

國立交通大學

機械工程學系

博士論文

**S15C/SUS304 異種金屬銲接之溫度與殘留  
應力研究**

The Study on Welding Temperature and Residual Stress of  
S15C/SUS304 Dissimilar Metal Butt Joint

研究生：蔡曜隆

指導教授：周長彬

中華民國 九十九 年 六 月

# S15C/SUS304 異種金屬銲接之溫度與殘留應力研究

## The Study on Welding Temperature and Residual Stress of S15C/SUS304 Dissimilar Metal Butt Joint

研究生：蔡曜隆

Student : Yao-Long Tsai

指導教授：周長彬 博士

Advisor : Dr. Chang-Pin Chou

國立交通大學  
機械工程學系  
博士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Doctor of  
Philosophy

In

Mechanical Engineering

June 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九 年 六 月

# S15C/SUS304 異種金屬銲接之溫度與殘留應力研究

## The Study on Welding Temperature and Residual Stress of S15C/SUS304 Dissimilar Metal Butt Joint

研究生：蔡曜隆

指導教授：周長彬 博士

國立交通大學機械工程學系

### 摘 要

本研究目的主要在探討同種與異種金屬銲接之溫度場與殘留應力之差異，以了解材料係數對於銲接殘留應力之影響程度。

為模擬分析銲接過程中溫度與應力之變化情形，本研究採用熱彈性理論，並考慮非線性材料特性等來進行銲接平板之有限元素數值分析。在模擬分析過程中，主要可區分為熱學與力學模式兩種分析理論。實驗材料選用 SUS 304 不銹鋼與 S15C 碳鋼兩種，進行同種與異種金屬銲接模擬分析。銲接方法則採用自生氣護鎢極電弧銲，並以鑽孔應變計法來量測銲件殘留應力值。

本研究結果顯示使用 54 % 的 GTAW 電弧效率可準確模擬銲件溫度場的分佈狀況。在相同的銲接參數下，最大拉伸殘留應力會隨熱膨脹係數增加、熱傳導係數減少與降伏應力增加而呈線性增加。拉伸殘留應力區則隨楊氏係數的增加、熱膨脹係數的增加、熱傳導係數的減少、與降伏應力的增加而呈線性增加。本研究最後根據材料係數與銲接殘留應力之關係，推導出頗具實用性的銲接殘留應力預測公式，此公式可快速且準確的預測出平板對接銲之殘留應力分佈情形。

**關鍵字：**異種金屬、銲接、殘留應力、SUS 304 不銹鋼、S15C 碳鋼

# **The Study on Welding Temperature and Residual Stress of S15C/SUS304 Dissimilar Metal Butt Joint**

**Student : Yao-Long Tsai**

**Advisor : Dr. Chang-Pin Chou**

**Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University**

## **ABSTRACT**

This study explored the difference in the distribution of the temperature and residual stresses of both the similar and dissimilar weld metal joints.

Autogenous GTA welding process was conducted on stainless steel 304 and structural steels S15C. The hole-drilling method was used to experimentally measure the residual stress. The thermo-elastic-plastic theory was employed in the finite element model with temperature dependent material properties.

The results showed that using 54% thermal efficiency of GTA welding can accurately simulate the welding temperature distributions. Under the same welding parameters, results showed that the maximum longitudinal tensile residual stresses increase linearly with the increase of the thermal expansion coefficient and the increase of the yield stress. The length of the tensile residual stress zone linearly decreases with the increase of the thermal conductivity. Finally, based on the relationship between material properties and welding residual stresses, a very useful and effective prediction equation is developed and verified in this study.

**Keyword : dissimilar metal, weld, residual stress, SUS304 stainless steel, S15C carbon steel**

## 誌 謝

感謝指導老師 周長彬教授在博士班期間的悉心指導，使得本論文得以順利完成。為學期間，恩師的治學態度使學生深感敬佩，尤其在做人處事上的敦敦教誨，實惠我良多。特誌卷首，以代表我最誠摯的敬意與謝忱。

同時，感謝口試委員王星豪教授、林義成教授、李義綱教授與鄭璧瑩教授對於本論文疏漏處的不吝指教與提供寶貴意見，特此致上最誠摯的謝意。

在研究期間，學長鄭慶民、林后堯、同窗好友梁家豪、黃和悅、鍾君璋、葉國泰、謝秉恆、王文昇、徐任賢、林上瑜、學弟林玄良、張進春、郭承獻、張佑銘、陳敬仰、黃俊榮與鐸接研究室全體碩博士班學弟在研究期間的鼓勵，系上技士劉克正先生給予行政上方便與工安訓練的指導，工研院毛維雲經理、王立華主任、蔡太平、游晶瑩、李昭仁、陳友忠、李昭仁、王燦耀、李宜親、簡荃聖與吳國安等研究員、助理陳惠芬、邱書榮以及工研院材化所功能設計與複材研究組各位同仁對於研究的協助支援與建議，特在此一一致謝。

最後，僅將本論文獻給我最敬愛的先父蔡昆林、母親蔡蘇素鑾女士，感謝父母多年來的養育與栽培之恩，妹妹蔡佩芳與好友陳美方的全力地支持及精神上的鼓勵，讓我心無旁騖地完成學業。在此時，願與你們共享這份榮譽與喜悅。

蔡 曜 隆 謹誌

民國九十九年 六月

於鐸接研究室

# 目 錄

頁次

中文摘要

英文摘要

誌 謝

目 錄

表 目 錄

圖 目 錄

符號說明

X

## 第一章

### 緒論

1

1.1 研究背景與動機

1

1.2 研究目的

4

1.3 研究方法

4

## 第二章

### 基本理論

5

2.1 熱學模式

5

2.2 力學模式

10

2.2.1 力平衡方程式

10

2.2.2 熱彈塑性組合方程式

13

2.3 銲接熱源的作用模式

14

2.3.1 半橢球熱源

15

2.3.2 雙橢球移動熱源

16

## 第三章

### 實驗與分析方法

18

3.1 實驗試片準備

18

3.2	銲接實驗	18
3.3	熱循環記錄	19
3.4	殘留應力量測	19
3.5	分析方法與步驟	20
3.5.1	幾何尺寸與材料	20
3.5.2	熱輸入量條件	21
3.5.3	分析模型	21
3.5.4	分析模式	22
3.5.5	初始條件與邊界條件	22
3.5.6	分析假設	23
<b>第四章</b>	<b>結果與討論</b>	<b>24</b>
4.1	電弧效率評估 .....	24
4.2	熱學模式分析 .....	25
4.2.1	SUS304 不銹鋼同種對接銲之熱學模式分析 .....	25
4.2.2	S15C 碳鋼同種對接銲之熱學模式分析	27
4.2.3	異種金屬對接銲之熱學模式分析	28
4.3	力學模式分析	30
4.3.1	同種 SUS304 不銹鋼對接銲之殘留應力分析	30
4.3.2	同種 S15C 碳鋼對接銲之殘留應力分析	33
4.3.3	異種金屬對接銲之殘留應力分析	38
4.4	材料系數對於銲接殘留應力之影響	42
4.4.1	虛擬材料的建構	43
4.4.2	楊氏係數、熱膨脹係數與熱傳導對於銲接殘留應力之影響	44
4.4.3	降伏應力對於銲接殘留應力之影響	45
4.4.4	殘留應力預測公式的建立與驗證	45

第五章	結論	47
	參考文獻	49
	附錄	57



# 表 目 錄

	頁次	
表 3.1	SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼之化學成份 ( wt-% )	57
表 3.2	SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼在常溫下之物理性質與機械性質	57
表 5.1	虛擬材料表	57
表 5.2	虛擬材料之殘留應力分析結果	58



# 圖目錄

	頁次	
圖 1.1	銲接溫度與熱應力變化之示意圖	59
圖 1.2	銲接殘留應力形成之示意圖	59
圖 2.1	以外插方式求瞬間溫度之示意圖	60
圖 2.2	半橢球熱源分佈示意圖	60
圖 2.3	雙橢球移動熱源分佈示意圖	61
圖 3.1	熱循環記錄設備之示意圖	61
圖 3.2	殘留應力量測設備之示意圖	62
圖 3.3	MM EA-062RE-120 玫瑰形式應變計	62
圖 3.4	對接銲板幾何尺寸之示意圖	63
圖 3.5	SUS 304 不銹鋼之熱物理性質與溫度變化之關係圖	63
圖 3.6	SUS 304 不銹鋼之機械性質與溫度變化之關係圖	64
圖 3.7	S15C 碳鋼之熱物理性質與溫度變化之關係圖	64
圖 3.8	S15C 碳鋼之熱物理性質與溫度變化之關係圖	65
圖 3.9	同種材質之 3 維銲接平板之有限元素網格劃分圖	65
圖 3.10	異種材質之 3 維銲接平板之有限元素網格劃分圖	66
圖 4.1	同種 304 不銹鋼銲件峰值溫度分佈圖	66
圖 4.2	同種 304 不銹鋼銲接熱循環曲線圖	67
圖 4.3	同種 S15C 碳鋼銲接熱循環曲線圖	67
圖 4.4	異種 304 不銹鋼銲接熱循環曲線圖	68
圖 4.5	異種 S15C 碳鋼銲接熱循環曲線圖	68
圖 4.6	SUS304 不銹鋼銲接時間 5 秒時之溫度場狀態圖	69
圖 4.7	SUS304 不銹鋼銲接時間 15 秒時之溫度場狀態圖	69
圖 4.8	SUS304 不銹鋼銲接時間 30 秒時之溫度場狀態圖	70

圖 4.9	SUS304 不銹鋼銲接時間 50 秒時之溫度場狀態圖	70
圖 4.10	SUS304 不銹鋼銲接時間 100 秒時之溫度場狀態圖	71
圖 4.11	SUS304 不銹鋼銲接時間 200 秒時之溫度場狀態圖	71
圖 4.12	SUS304 不銹鋼銲接時間 400 秒時之溫度場狀態圖	72
圖 4.13	SUS304 不銹鋼銲接時間 800 秒時之溫度場狀態圖	72
圖 4.14	SUS304 不銹鋼銲接時間 1600 秒時之溫度場狀態圖	73
圖 4.15	S15C 碳鋼銲接時間 5 秒時之溫度場狀態圖	73
圖 4.16	S15C 碳鋼銲接時間 15 秒時之溫度場狀態圖	74
圖 4.17	S15C 碳鋼銲接時間 30 秒時之溫度場狀態圖	74
圖 4.18	S15C 碳鋼銲接時間 50 秒時之溫度場狀態圖	75
圖 4.19	S15C 碳鋼銲接時間 100 秒時之溫度場狀態圖	75
圖 4.20	S15C 碳鋼銲接時間 200 秒時之溫度場狀態圖	76
圖 4.21	S15C 碳鋼銲接時間 400 秒時之溫度場狀態圖	76
圖 4.22	S15C 碳鋼銲接時間 800 秒時之溫度場狀態圖	77
圖 4.23	S15C 碳鋼銲接時間 1600 秒時之溫度場狀態圖	77
圖 4.24	異種銲接時間 5 秒時之溫度場狀態圖	78
圖 4.25	異種銲接時間 15 秒時之溫度場狀態圖	78
圖 4.26	異種銲接時間 30 秒時之溫度場狀態圖	79
圖 4.27	異種銲接時間 50 秒時之溫度場狀態圖	79
圖 4.28	異種銲接時間 100 秒時之溫度場狀態圖	80
圖 4.29	異種銲接時間 200 秒時之溫度場狀態圖	80
圖 4.30	異種銲接時間 400 秒時之溫度場狀態圖	81
圖 4.31	異種銲接時間 800 秒時之溫度場狀態圖	81
圖 4.32	異種銲接時間 1600 秒時之溫度場狀態圖	82
圖 4.33	不銹鋼之銲接時間 5 秒時之 <sub>xx</sub> 暫態熱應力場狀態圖	82

圖 4.34	不銹鋼之銲接時間 10 秒時之	XX	暫態熱應力場狀態圖	83
圖 4.35	不銹鋼之銲接時間 15 秒時之	XX	暫態熱應力場狀態圖	83
圖 4.36	不銹鋼之銲接時間 20 秒時之	XX	暫態熱應力場狀態圖	84
圖 4.37	不銹鋼之銲接時間 25 秒時之	XX	暫態熱應力場狀態圖	84
圖 4.38	不銹鋼之銲接時間 50 秒時之	XX	銲接殘留應力場狀態圖	85
圖 4.39	不銹鋼之銲接時間 100 秒時之	XX	銲接殘留應力場狀態圖	85
圖 4.40	不銹鋼之銲接時間 200 秒時之	XX	銲接殘留應力場狀態圖	86
圖 4.41	不銹鋼之銲接時間 400 秒時之	XX	銲接殘留應力場狀態圖	86
圖 4.42	不銹鋼之銲接時間 800 秒時之	XX	銲接殘留應力場狀態圖	87
圖 4.43	不銹鋼之銲接時間 1600 秒時之	XX	銲接殘留應力場狀態圖	87
圖 4.44	不銹鋼之銲接時間 3150 秒時之	XX	銲接殘留應力場狀態圖	88
圖 4.45	不銹鋼之銲接時間 5 秒時之	YY	暫態熱應力場狀態圖	88
圖 4.46	不銹鋼之銲接時間 10 秒時之	YY	暫態熱應力場狀態圖	89
圖 4.47	不銹鋼之銲接時間 15 秒時之	YY	暫態熱應力場狀態圖	89
圖 4.48	不銹鋼之銲接時間 20 秒時之	YY	暫態熱應力場狀態圖	90
圖 4.49	不銹鋼之銲接時間 25 秒時之	YY	暫態熱應力場狀態圖	90
圖 4.50	不銹鋼之銲接時間 50 秒時之	YY	銲接殘留應力場狀態圖	91
圖 4.51	不銹鋼之銲接時間 100 秒時之	YY	銲接殘留應力場狀態圖	91
圖 4.52	不銹鋼之銲接時間 200 秒時之	YY	銲接殘留應力場狀態圖	92
圖 4.53	不銹鋼之銲接時間 400 秒時之	YY	銲接殘留應力場狀態圖	92
圖 4.54	不銹鋼之銲接時間 800 秒時之	YY	銲接殘留應力場狀態圖	93
圖 4.55	不銹鋼之銲接時間 1600 秒時之	YY	銲接殘留應力場狀態圖	93
圖 4.56	不銹鋼之銲接時間 3150 秒時之	YY	銲接殘留應力場狀態圖	94
圖 4.57 (a)	不銹鋼之	XX	銲接殘留應力分佈圖	95
圖 4.57 (b)	不銹鋼之	XX	銲接殘留應力分析結果與實驗數據之比較圖	95

圖 4.58 (a)	不銹鋼之 $Y_Y$ 銲接殘留應力分佈圖	96
圖 4.58 (b)	不銹鋼之 $Y_Y$ 銲接殘留應力分析結果與實驗數據之比較圖	96
圖 4.59	碳鋼之銲接時間 5 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	97
圖 4.60	碳鋼之銲接時間 10 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	97
圖 4.61	碳鋼之銲接時間 15 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	98
圖 4.62	碳鋼之銲接時間 20 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	98
圖 4.63	碳鋼之銲接時間 25 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	99
圖 4.64	碳鋼之銲接時間 50 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	99
圖 4.65	碳鋼之銲接時間 100 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	100
圖 4.66	碳鋼之銲接時間 200 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	100
圖 4.67	碳鋼之銲接時間 400 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	101
圖 4.68	碳鋼之銲接時間 800 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	101
圖 4.69	碳鋼之銲接時間 1600 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	102
圖 4.70	碳鋼之銲接時間 3150 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	102
圖 4.71	碳鋼之銲接時間 5 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	103
圖 4.72	碳鋼之銲接時間 10 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	103
圖 4.73	碳鋼之銲接時間 15 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	104
圖 4.74	碳鋼之銲接時間 20 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	104
圖 4.75	碳鋼之銲接時間 25 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	105
圖 4.76	碳鋼之銲接時間 50 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	105
圖 4.77	碳鋼之銲接時間 100 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	106
圖 4.78	碳鋼之銲接時間 200 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	106
圖 4.79	碳鋼之銲接時間 400 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	107
圖 4.80	碳鋼之銲接時間 800 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	107
圖 4.81	碳鋼之銲接時間 1600 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	108

圖 4.82	碳鋼之銲接時間 3150 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	108
圖 4.83 (a)	碳鋼之 $XX$ 銲接殘留應力分佈圖	109
圖 4.83 (b)	碳鋼之 $XX$ 銲接殘留應力分析結果與實驗數據之比較圖	109
圖 4.84 (a)	碳鋼之 $Y_Y$ 銲接殘留應力分佈圖	110
圖 4.84 (b)	碳鋼之 $Y_Y$ 銲接殘留應力分析結果與實驗數據之比較圖	110
圖 4.85	同種不銹鋼與同種碳鋼之銲接殘留應力比較圖	111
圖 4.86	異種金屬銲接時間 5 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	111
圖 4.87	異種金屬銲接時間 10 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	112
圖 4.88	異種金屬銲接時間 15 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	112
圖 4.89	異種金屬銲接時間 20 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	113
圖 4.90	異種金屬銲接時間 25 秒時之 $XX$ 暫態熱應力場狀態圖	113
圖 4.91	異種金屬銲接 50 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	114
圖 4.92	異種金屬銲接 100 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	114
圖 4.93	異種金屬銲接 200 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	115
圖 4.94	異種金屬銲接 400 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	115
圖 4.95	異種金屬銲接 800 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	116
圖 4.96	異種金屬銲接 1600 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	116
圖 4.97	異種金屬銲接 3150 秒時之 $XX$ 銲接殘留應力場狀態圖	117
圖 4.98	異種金屬銲接時間 5 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	117
圖 4.99	異種金屬銲接時間 10 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	118
圖 4.100	異種金屬銲接時間 15 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	118
圖 4.101	異種金屬銲接時間 20 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	119
圖 4.102	異種金屬銲接時間 25 秒時之 $Y_Y$ 暫態熱應力場狀態圖	119
圖 4.103	異種金屬銲接 50 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	120
圖 4.104	異種金屬銲接 100 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	120

圖 4.105	異種金屬銲接 200 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	121
圖 4.106	異種金屬銲接 400 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	121
圖 4.107	異種金屬銲接 800 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	122
圖 4.108	異種金屬銲接 1600 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	122
圖 4.109	異種金屬銲接 3150 秒時之 $Y_Y$ 銲接殘留應力場狀態圖	123
圖 4.110 (a)	異種金屬銲接之 $X_X$ 銲接殘留應力分佈圖	124
圖 4.110 (b)	異種金屬銲接之 $X_X$ 銲接殘留應力分析結果與實驗數據比較圖	124
圖 4.111 (a)	異種銲接之 $Y_Y$ 銲接殘留應力分佈圖	125
圖 4.111 (b)	異種金屬銲接之 $Y_Y$ 銲接殘留應力分析結果與實驗數據比較圖	125
圖 4.112	僅變動材料系數楊氏係數 $E$ 之殘留應力曲線圖	126
圖 4.113	僅變動材料系數熱膨脹係數 $\alpha$ 之殘留應力曲線圖	126
圖 4.114	僅變動材料系數熱傳導係數 $K$ 之殘留應力曲線圖	127
圖 4.115	僅變動材料系數降伏強度 $\sigma_y$ 之殘留應力曲線圖	127
圖 4.116	S15C 碳鋼板之銲接殘留應力預測結果	128
圖 4.117	SUS304 不銹鋼板之殘留應力預測結果	128

## 符 號 說 明

$R$	: heat flow rate per unit area
$Q$	: heat generation rate per unit volume
$\rho$	: density
$C_p$	: specific heat
$T$	: temperature
$t$	: time
$K$	: thermal conductivity coefficient
$\{q\}$	: heat flux field
$\{\eta\}$	: unit outward normal vector
$h_f$	: film coefficient
$T_B$	: bulk temperature of the adjacent fluid
$T_S$	: temperature at the surface of the model
$\{T_e\}$	: nodal temperature field
$[E]$	: element shape functions
$[K]$	: thermal conductivity matrix
$[L]$	: differential operator matrix
$\sigma_{ij}$	: stress tensor
$f_i$	: body force
$\{\sigma\}$	: stress field
$\{\varepsilon\}$	: strain field
$\{u\}$	: displacement field
$\{P\}$	: surface force field
$\{f\}$	: body force field
$\{U_e\}$	: nodal displacement field
$[B]$	: strain-displacement shape functions
$[N]$	: displacement shape functions
$\{\Delta\sigma_e\}$	: nodal stress increment field
$\{\Delta U_e\}$	: nodal displacement increment field
$\{\Delta T_e\}$	: nodal temperature increment field

$[S^e]$  : elastic stiffness matrix

$[S^p]$  : plastic stiffness matrix

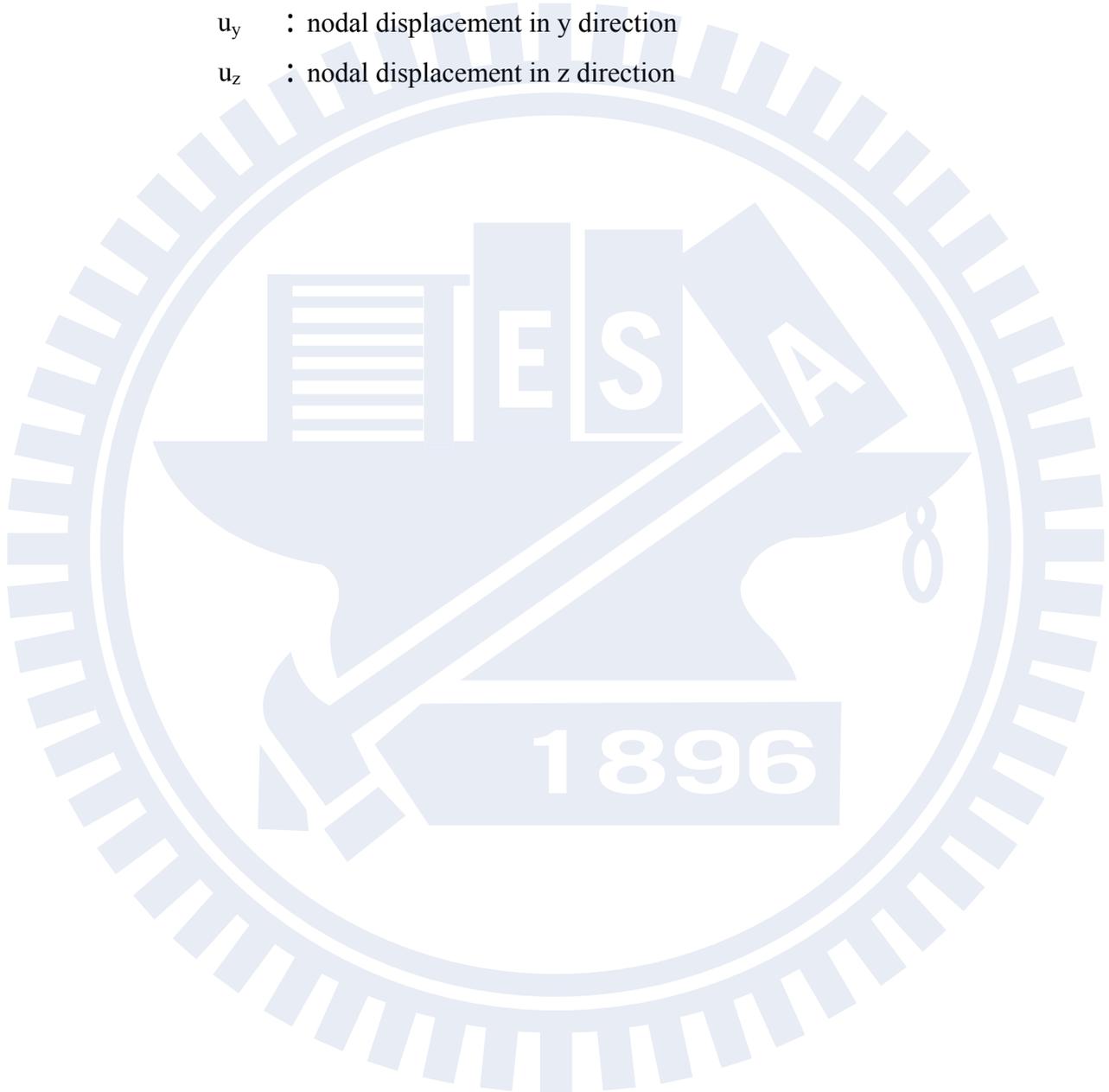
$[S^{th}]$  : thermal stiffness matrix

$[M]$  : temperature shape functions

$u_x$  : nodal displacement in x direction

$u_y$  : nodal displacement in y direction

$u_z$  : nodal displacement in z direction



# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

銲接是使材料接合在一起的一種加工程序。它主要是將兩種或兩種以上的材料(金屬或非金屬),在其接頭處局部加熱到適當的溫度,使材料互相熔化,或是僅熔化填充金屬(filler metal)使工件藉由填充金屬凝固而結合,或在高溫狀態下加壓使材料在高壓摩擦下接合在一起的一種加工程序。隨著現代工業的發展與科技的進步,對銲接結構的性能的要求也相對的提高,除滿足力學性能外,亦須滿足高耐磨、耐腐蝕性、低溫韌性等多方面性能的要求。在這種條件下,任何一種金屬,都不可能完全滿足整體銲接結構的使用要求;因此現在工程結構中不僅需要對同種材料進行銲接,也需要對異種材料進行銲接,所以異種金屬銲接也就成為工業生產中不可或缺的先進製造技術。

不銹鋼因具有高溫強度、高延展性與優異的抗腐蝕特性,被廣泛地應用於各類型的產業中,如高溫作業的石化業、食品工業與核電產業等。業界最常使用的沃斯田鐵系不銹鋼如 SUS 304、SUS316 等,由於鎳、鉻成分較高,因此製造成本遠高於碳鋼或合金鋼,由於含碳

量極低之關係，造成材料強度不足。因此在降低成本的考量上，耐腐蝕性高的不銹鋼通常應用在高溫與高腐蝕的環境下，而在此環境外，則與較低成本的碳鋼進行異種金屬銲接，以碳鋼作為提供強度的結構件，使銲接結構件同時滿足所需之條件。

然而，大多數銲接結構均採用局部加熱的銲接方法製造，因此，在銲接的過程中，銲接熱源對於母材上進行局部且不均勻的急速加熱與冷卻，使得銲道附近的熔融金屬與母材產生熱應變。由熱應變再形成熱應力，此不均勻的熱應力便是產生銲接殘留應力的主要原因之一（如圖 1.1 所示）。其中銲接拉伸殘留應力的存在，將會嚴重影響銲接結構之機械性質與耐腐蝕性，諸如脆性破壞、疲勞強度、應力腐蝕破裂及氫裂等。[5-8] 銲接殘留應力之形成，可藉由圖 1.2 來加以說明。當溫度從室溫（位置 A）升到較高溫度（位置 B）時，靠近銲道附近的材料因受到加熱而膨脹，但受到遠離銲道周圍材料之束縛，因此會在銲道附近產生壓縮應力（compressive stress），直至達到材料的壓縮降伏應力（位置 B）。當溫度繼續上升時，材料便沿壓縮降伏曲線 BC 一直至最高溫度（位置 C）。在經過最高溫度以後，溫度便開始下降，此時，靠近銲道附近的材料因受到冷卻而收縮，但受到遠離銲道附近材料之束縛，因此會在銲道附近產生拉伸應力（tensile stress），直至達到材料的拉伸降伏應力（位置 D）。當溫度繼續下降

時，材料便沿拉伸降伏曲線 DF 一直至室溫（位置 A）。值得注意的是，當鐸件冷卻至室溫之前，會先達到一個「平衡溫度（equilibrium temperature）」（位置 E），亦即當鐸件熱循環溫度達到此平衡溫度時，其溫度梯度（temperature gradient）會為零。因此，作用在鐸件上的熱應力亦會隨之被阻止，而保持一定值（線段 EF）[9-11]，此 EF 即為鐸接殘留應力值。

由於鐸接是屬於一種經驗累積的實務加工技術，因此在 80 年代以前，對鐸接殘留應力之大小與分佈情形大多以經驗公式或實驗方式來加以估算或求得。[14-18] 然而其所面對的將是龐大的人力、物力及財力等之消耗與浪費，且其所得到的數據亦未必準確。自 80 年代以後，隨著電腦科技的蓬勃發展與分析軟體的廣泛應用，已有許多學者利用有限元素法來評估鐸接殘留應力之大小與分佈情形。[19-45] 因此，本研究使用有限元素法來進行同種與異種金屬對接鐸板之模擬分析，藉以探討同種與異種金屬鐸接溫度場、鐸接殘留應力之差異。再利用驗證的有限元素模型，探討材料系數對於鐸接殘留應力之影響與差異。

## 1.2 研究目的

- 一、探討同種與異種金屬銲接溫度場分布狀況。
- 二、探討同種與異種金屬銲接殘留應力大小與分佈狀況。
- 三、探討材料係數對於銲接殘留應力之影響。

## 1.3 研究方法

為模擬分析銲接過程中溫度與應力之變化情形，本研究採用熱彈塑性理論，考慮非線性材料特性等來進行同種與異種金屬銲接平板之有限元素數值分析。在整個模擬分析的過程中，主要可區分為熱學模式與力學模式兩分析理論。在熱學模式分析方面，主要在得知銲接溫度場之分佈狀況。在力學模式分析方面，主要在求得銲接殘留應力之大小與分佈情形。

## 第二章 基本理論

本研究使用有限元素數值分析軟體 ANSYS 來進行銲接溫度與應力之模擬分析。為分析銲接過程中溫度與應力之變化情形，本研究採用熱彈塑性理論 (thermo-elastic-plastic theory)，並配合實體八節點熱傳元素 (solid eight-node thermo elements)，實體八節點結構元素 (solid eight-node structural elements) 及考慮非線性材料特性 (temperature dependent material properties) 等來進行銲接平板之有限元素數值分析，藉以探討銲接溫度、熱應力及殘留應力之大小與分佈情形。在整個模擬分析過程中，主要可區分為熱學模式與力學模式兩分析理論。在熱學模式分析方面，主要在得知銲接溫度場之分佈狀況。在力學模式分析方面，主要在求得暫態熱應力 (transient thermal stresses) 與銲接殘留應力 (welding residual stresses) 之大小與分佈情形。

### 2.1 熱學模式 (Thermal model)

根據熱力學第一定律，表面為  $S$  所包圍之控制體積 (control volume)，其熱傳平衡方程式可表示為：

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z}\right) + Q(x, y, z, t) = \rho C_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (2-1)$$

此處

$R_x$  : heat flow rate per unit area in x direction

$R_y$  : heat flow rate per unit area in y direction

$R_z$  : heat flow rate per unit area in z direction

$Q$  : heat generation rate per unit volume

$\rho$  : density

$C_p$  : specific heat

$T$  : temperature

$t$  : time

假設在物體內的熱傳具有方向性，同時應用 Fourier law 可得到：

$$R_x = -K_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-2a)$$

$$R_y = -K_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2-2b)$$

$$R_z = -K_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2-2c)$$

此處

$K_x$  : thermal conductivity coefficient in x direction

$K_y$  : thermal conductivity coefficient in y direction

$K_z$  : thermal conductivity coefficient in z direction

在本研究中由於考慮非線性材料特性，因此須將  $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$ 、 $\rho$  及  $C_p$  等均視為溫度之函數。在此，將式 (2-2) 代入式 (2-1) 中而可得到：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-3)$$

式 (2-3) 即為熱傳導御方程式 (governing heat conduction equation)。

若再將初始條件與邊界條件代入式 (2-3) 即可求得其熱傳通解。

其中，初始條件與邊界條件之設定如下所述：

#### A. 初始條件

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (2-4)$$

## B.邊界條件

$$\{q\}^T \cdot \{\eta\} = -h_f (T_B - T_s) \quad (2-5)$$

此處

$\{q\}$  : heat flux field

$\{\eta\}$  : unit outward normal vector

$h_f$  : film coefficient

$T_B$  : bulk temperature of the adjacent fluid

$T_s$  : temperature at the surface of the model

接著，將熱傳統御方程式（2-3 式）及其所考慮之邊界條件（2-5 式）改寫成有限元素矩陣型式而可推導得：

$$[C] \cdot \{T_e\} + [K] \cdot \{T_e\} = \{F_e\} \quad (2-6)$$

其中

$$[C] = \int_V \rho \cdot C_p \cdot [E] \cdot [E]^T \cdot dV$$

$$[K] = \int_V [E']^T \cdot [K] \cdot [E'] \cdot dV + \int_S h_f \cdot [E] \cdot [E]^T \cdot dS$$

$$\{F_e\} = \int_V Q \cdot [E] \cdot dV + \int_S h_f \cdot T_B \cdot [E] \cdot dS$$

$$[E'] = [L] \cdot [E]^T$$

此處

$\{T_e\}$  : nodal temperature field

$[E]$  : element shape functions

$[K]$  : thermal conductivity matrix

$[L]$  : differential operator matrix

藉由式 (2-6) 便可求得節點溫度場  $\{T_e\}$ ，再將熱學模式分析中所求得之節點溫度場代入力學模式分析中。

此外，由於銲接是屬於急速加熱與冷卻的非線性熱循環過程，因此材料特性係數諸如降伏應力、彈性係數、熱膨脹係數、熱傳係數、密度及比熱等，在銲接過程中皆會隨著溫度的改變而加以變化。如圖 2.1 所示，每一個時間的材料特性係數乃是以以前一個時間間隔之材料特性係數的平均值來做運算，而其運算方式則是取前兩個時間間隔以外插方式來求得前一個時間的瞬間溫度  $T(\tau)$ ：

$$T(\tau) = T(t - \Delta t) + \frac{\tau}{\Delta t} [T(t - \Delta t) - T(t - 2\Delta t)] \quad (2-7)$$

假設  $g$  為隨瞬間溫度  $T(\tau)$  而改變的材料特性係數，亦即其為瞬間溫度之函數。因此在時間為  $t$  時之材料特性係數，便可經由式 (2-8)

求得：

$$g = \frac{1}{\Delta t} \cdot \int_{t-\Delta t}^t g[T(\tau)] \cdot d\tau \quad (2-8)$$

## 2.2 力學模式 ( Mechanical model )

### 2.2.1 力平衡方程式

$$\sigma_{ij,j} + \rho \cdot f_i = 0 \quad (2-9)$$

其中

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$$

此處

$\sigma_{ij}$  : stress tensor

$f_i$  : body force

將力平衡方程式 ( 2-9式 ) 利用虛功原理與散度定理亦可改寫成有限元素矩陣型式：

$$\int_V \{\delta\varepsilon\}^T \cdot \{\sigma\} \cdot dV = \int_S \{\delta u\}^T \cdot \{P\} \cdot dS + \int_V \rho \cdot \{\delta u\}^T \cdot \{f\} \cdot dV \quad (2-10)$$

設

$$\{\delta\varepsilon\} = [B] \cdot \{\delta U_e\} \quad (2-11a)$$

$$\{\delta u\} = [N] \cdot \{\delta U_e\} \quad (2-11b)$$

$$[B] = [L] \cdot [N] \quad (2-11c)$$

此處

$\{\sigma\}$  : stress field

$\{\varepsilon\}$  : strain field

$\{u\}$  : displacement field

$\{P\}$  : surface force field

$\{f\}$  : body force field

$\{U_e\}$  : nodal displacement field

$[B]$  : strain-displacement shape functions

$[N]$  : displacement shape functions

將式 (2-11) 代入式 (2-10) , 可推導得 :

$$\int_V [B]^T \cdot \{\sigma\} \cdot dV = \{R\} \quad (2-12)$$

其中

$$\{R\} = \int_S [N]^T \cdot \{P\} \cdot dS + \int_V \rho \cdot [N]^T \cdot \{f\} \cdot dV \quad (2-13)$$

由於上述所推導之公式均假設為線彈性分析下之有限元素模式。然而實際上在進行彈塑性分析的過程中，節點之位移函數為一非

線性函數，因此須使用疊代法來求其位移解。此外，在彈塑性分析的過程中，必須要先瞭解節點之變形歷程，然後才能藉由作用力變化之增量分析，進而求得位移與應力之變化量。

在使用增量分析上，首先將作用於結構之總負荷  $\{R\}$  以逐步增量的方式加入，亦即對於在第  $(m+1)$  步時，其負荷可表示為：

$${}^{m+1}\{R\} = {}^m\{R\} + \{\Delta R\} \quad (2-14a)$$

至於其相對應之應力，則可表示為：

$${}^{m+1}\{\sigma_e\} = {}^m\{\sigma_e\} + \{\Delta\sigma_e\} \quad (2-14b)$$

藉由式 (2-12)，可將式 (2-14) 表示成：

$$\int_V [B]^T \cdot \{\Delta\sigma_e\} \cdot dV = {}^m\{R\} + \{\Delta R\} - \int_V [B]^T \cdot {}^m\{\sigma_e\} \cdot dV \quad (2-15)$$

接著將式 (2-12) 代入式 (2-15)，可推導得：

$$\int_V [B]^T \cdot \{\Delta\sigma_e\} \cdot dV = \{\Delta R\} \quad (2-16)$$

### 2.2.2 熱彈塑性組成方程式

在本研究分析中，由於假設材料須遵循等向應變硬化法則 (isotropic strain-hardening rule)、von mises降服準則 (yield criterion) 及Prandtl-Reuss塑流法則 (plastic flow rule) 等，因此可得到材料應力與應變之關係式：

$$\{\Delta\sigma_e\} = [S^{ep}] \cdot [B] \cdot \{\Delta U_e\} - [S^{th}] \cdot [M] \cdot \{\Delta T_e\} \quad (2-17)$$

其中

$$[S^{ep}] = [S^e] + [S^p]$$

此處

$\{\Delta\sigma_e\}$  : nodal stress increment field

$\{\Delta U_e\}$  : nodal displacement increment field

$\{\Delta T_e\}$  : nodal temperature increment field

$[S^e]$  : elastic stiffness matrix

$[S^p]$  : plastic stiffness matrix

$[S^{th}]$  : thermal stiffness matrix

$[M]$  : temperature shape functions

將式 (2-17) 代入式 (2-16) , 而可得到 :

$${}^{m+1}\{K_1\} \cdot \{\Delta U_e\} - {}^{m+1}\{K_2\} \cdot \{\Delta T_e\} = \{\Delta R\} \quad (2-18)$$

其中

$${}^{m+1}\{K_1\} = \int_V [B]^T \cdot [S^{ep}] \cdot [B] \cdot dV$$

$${}^{m+1}\{K_2\} = \int_V [B]^T \cdot [S^{th}] \cdot [M] \cdot dV$$

藉由式 (2-17) 與 (2-18) 可求得節點位移增量場  $\{\Delta U_e\}$  與應力增量場  $\{\Delta \sigma_e\}$ 。然後將式 (2-14b) 利用疊代法即可求得節點應力場  $\{\sigma_e\}$ 。

### 2.3 銲接熱源的作用模式[46]

按照熱源作用方式的不同, 可將銲接熱源以集中熱源、平面分布熱源、體積分布熱源來處理。若所評估之銲件部位距離銲道中心線較遠時, 可將銲接熱源以集中熱源方式(點熱源、線熱源)來處理。對於一般電弧銲而言, 銲接電弧的熱流主要是作用在一定的面積上, 故可採用平面分布熱源(高斯熱源)來處理。對於熔化極氣體保護電弧銲、高能束銲接以及三維銲接模擬問題, 由於銲接熱源的熱流密度不僅作用在銲件表面上, 同時也沿銲件厚度方向作用, 故可以用橢球體模式來描述。

### 2.3.1 半橢球熱源

如圖 2.2 所示，假設橢球體的半軸分別為  $a_h$ 、 $b_h$  和  $c_h$  設熱源中心作用點的坐標為  $(0, 0, 0)$ ，以此點為原點建立坐標系  $(x, y, z)$ 。在熱源中心  $(0, 0, 0)$ ，熱流密度最大值為  $q_m$ 。熱流密度的體積分布可表示為

$$q(x, y, z) = q_m \exp(-Ax^2 - By^2 - Cz^2) \quad (2-19)$$

式(2-19)中， $A$ 、 $B$ 、 $C$  是熱源的體積分布參數。由於熱流是分布在鋁件上表面之半個橢球體內，有

$$\begin{aligned} Q &= \eta I U_a = 4 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty q(x, y, z) dx dy dz \\ &= 4q_m \int_0^\infty \exp(-Ax^2) dx \int_0^\infty \exp(-By^2) dy \int_0^\infty \exp(-Cz^2) dz \\ &= 4q_m \left( \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{B}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{C}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \right) \\ &= \frac{q_m \pi \sqrt{\pi}}{2\sqrt{ABC}} \\ \Rightarrow q_m &= \frac{2Q\sqrt{ABC}}{\pi\sqrt{\pi}} \quad (2-20) \end{aligned}$$

在橢球體半軸處， $x=a_h$ ， $y=b_h$ ， $z=c_h$ 。假設有 95% 的熱能集中在半橢球體內，所以

$$q(a_h, 0, 0) = q_m \exp(-Aa_h^2) = 0.05q_m$$

$$A = \frac{3}{a_h^2} \quad (2-21)$$

同理可得：

$$B = \frac{3}{b_h^2} \quad (2-22)$$

$$C = \frac{3}{c_h^2} \quad (2-23)$$

將式 (2-20) ~ 式 (2-23) 代入式 (2-19)，可獲得半橢球體內的熱流分布公式：

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{q_h b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_h^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right) \quad (2-24)$$

### 2.3.2 雙橢球移動熱源

在實際的銲接過程中，由於銲接速度的影響，電弧前方的加熱區域會小於電弧後方的加熱區域，使得電弧熱流作用呈現不對稱的分布。因此電弧的熱流分布，不再是以電弧中心線為對稱的半橢球體，而是雙半橢球體，即電弧前、後的半橢球體形狀將不相同，如圖 2.3 所示。

作用於銲件上的體積熱源分為前、後兩部分。假設雙橢球體的半軸為  $(a_h, a_r, b_h, c_h)$ ，且前、後半橢球體內熱輸入之配額分別是  $f_f, f_r$ ，再利用式(2-24)，可以寫出前、後半橢球體內的熱流分布：

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{a_f b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right), \quad x \geq 0 \quad (2-25)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q)}{a_r b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right), \quad x < 0 \quad (2-26)$$

對於前半橢球部分（相當於半橢球體的二分之一），熱輸入為

$$\begin{aligned} & 2 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty q_f(x, y, z) dx dy dz \\ &= \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2}\right) dx \int_0^\infty \exp\left(-\frac{3y^2}{b_h^2}\right) dy \int_0^\infty \exp\left(-\frac{3z^2}{c_h^2}\right) dz \\ &= 2 \times \frac{6\sqrt{3}6(f_f Q)}{a_f b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \times \frac{a_f}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{2}}{2} \times \frac{b_h}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times \frac{c_h}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} \\ &= \frac{1}{2}(f_f Q) \end{aligned}$$

同理，對於後半橢球部分（相當於半橢球體的二分之一），熱輸入為

$$2 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty q_r(x, y, z) dx dy dz = \frac{1}{2} Q(f_f + f_r)$$

$$\text{由於 } \eta I U_a = Q = \frac{1}{2}(f_f Q) + \frac{1}{2}(f_r Q) = \frac{1}{2} Q(f_f + f_r)$$

$$\Rightarrow f_f + f_r = 2 \quad (2-27)$$

## 第三章 實驗與分析方法

### 3.1 實驗試片準備

本研究所採用的實驗材料為SUS 304沃斯田鐵型不銹鋼與S15C碳鋼，至於其化學成份、常溫物理性質及機械性質等，分別如表3.1與表3.2所示。為了要使實驗試片之初始應力（initial stress）皆相似，在銲接前先將所有的試片均加熱950 °C、恆溫3小時的應力釋放處理，且將試片表面的氧化物與油污利用400號砂紙予以清除，並用丙酮清潔乾淨。

### 3.2 銲接實驗

本實驗設備係用採惰氣鎢極電弧銲接機（HOBART TIGWAVE™ 350 AC/DC型氬銲機與可數位控制走速的銲接檯車）。銲接方法採用自生氣護鎢極電弧銲（autogenous gas tungsten arc welding）來進行對接銲（butt-welded）實驗，其中鎢電極材料為EWTh-2（直徑為2.4 mm），鎢電極伸出噴嘴的距離為3 mm，鎢電極至實驗試片的距離為2.5 mm，鎢電極角度為90°，保護氣體（純氬氣）流量則為10 liter/min。

### 3.3 熱循環記錄

為觀察銲接溫度場的分佈狀況與分析銲接熱應力的作用行為，在銲接的過程中以熱電偶（thermocouple）記錄銲件不同位置處的熱循環（thermal cycle）曲線。熱循環記錄設備（如圖 3.1 所示）採 Yokogama 出產的 Data Acquisition Unit（DA-100）之動態溫度記錄器，其中熱電偶採 Type K。

### 3.4 殘留應力量測

殘留應力量測係採 ASTM 標準 E837 規範的鑽孔應變計法（hole-drilling strain-gage method）[47]。如圖 3.2 所示，量測設備採用 Measurements Group, Inc. 出品的 RS-200 Milling Guide、P-3500 Strain Indicator、SB-10 Switch & Balance Unit 及 High Speed Air Turbine Drilling Setup 等。至於應變計則採用特定長方形之玫瑰形式應變計（MM EA-062RE-120）黏貼於銲道旁，如圖 3.3 所示。其中量測步驟為先將試片欲量測面用 100 號砂紙磨至 600 號砂紙，並用丙酮清潔乾淨後，將應變計緊貼在欲量測位置上，使用錫銲連接應變計與絕緣導線，將導線連接到 Switch & Balance Unit，再利用 Milling Guide 鑽一小孔（鑽頭直徑為 1.6 mm）於應變計中心（鑽孔深度為 1.92 mm），最後利用 Strain Indicator 讀取應變值，即可利用公式來計算銲件殘留應力值。

## 3.5 分析方法與步驟

### 3.5.1 幾何尺寸與材料特性

本研究主要分為同種材質與異種材質銲接兩大部分，分別進行對接銲之有限元素數值模擬分析並比較其結果。在同種材質對接銲模擬方面，是將兩個幾何尺寸與材料特性完全相同的平板來進行對接銲之有限元素數值模擬分析，且主要分析材料有兩種；在異種材質對接銲模擬方面，則是將兩個幾何尺寸相同，但材料特性不同的平板來進行對接銲之有限元素數值模擬分析。在本研究中，平板幾何尺寸均為  $150 \times 75 \times 3$  mm，如圖 3.4 所示。至於平板材料則採 SUS 304 沃斯田鐵型不銹鋼以及 S15C 碳鋼兩種，其熱物理性質與機械性質隨溫度變化之關係，分別如圖 3.5、圖 3.6、圖 3.7 與圖 3.8 所示。由於沃斯田鐵不銹鋼最重要的特性就是在各種溫度下均保持沃斯田相組織，即不會因溫度的改變而產生相變化，因此可忽略相變化因素對不銹鋼銲接殘留應力之影響，而 S15C 碳鋼由於其含碳量略為偏低之緣故，相變化影響層面並不明顯，因此亦可忽略相變化因素對碳鋼銲接殘留應力之影響。此外，根據 Tekriwal 與 Mazumder 的研究結果顯示[52]，在進行銲接應力數值模擬分析時，可將 Poisson's ratio 視為一常數（在本研究中設定為 0.3）。

### 3.5.2 熱輸入量條件

1. 銲接電流：110 A

2. 電弧電壓：13 V

3. 銲接速度：5 mm/sec

至於電弧效率 ( arc efficiency ) 的設定，本研究主要是依據熱學模式分析結果與熱循環實驗數據的比較而加以求得，以期能得到較佳的熱傳分析結果。

### 3.5.3 分析模型

在有限元素網格劃分方面，由於考慮到熱源施加時在銲道附近會產生很高的溫度梯度，因此在銲道熔融區附近的網格元素需要加以細分。在同種材質銲接模擬分析方面，由於本研究是將兩個幾何尺寸與材料特性完全相同的對接平板來進行銲接模擬分析，因此可以假設熱源呈對稱分佈且熱量均勻作用於兩對接平板，而取整個模型的一半來進行銲接溫度與應力之模擬分析。此外，經網格化之後的有限元素分析模型共有 3000 個元素與 3213 個節點，如圖 3.9 所示。

在異種材質銲接模擬分析方面，由於是材料特性不同但幾何尺寸相同的兩塊對接平板，因此就分析上必須採取完整的模型來進行銲接溫度與應力之模擬分析，此外，經網格化之後的有限元素分析模型共有 6000 個元素與 6273 個節點，如圖 3.10 所示。

### 3.5.4 分析模式

本研究在整個模擬分析的過程中，主要可區分為「熱學模式」與「力學模式」兩分析理論。其中在熱學模式分析方面，根據本研究所設定的熱輸入量條件，以雙橢球移動熱源 ( double-elliptic moving heat source model ) 的方式依序對銲道網格元素施加熱量，並給予銲道網格元素適當的熱源作用時間，藉以進行銲接平板之熱傳分析，進而得知銲接溫度場之分佈狀況。在力學模式分析方面，首先將熱學模式中所求得之銲接溫度場代入力學模式中，並設定初始條件與邊界條件，最後則進行材料熱彈塑性行為分析，以求得暫態熱應力與銲接殘留應力之大小與分佈情形。

### 3.5.5 初始條件與邊界條件

#### 1. 初始條件

$$T(x, y, z, 0) = 25$$

$$\sigma(x, y, z, 0) = 0$$

$$\varepsilon(x, y, z, 0) = 0$$

## 2.邊界條件

### 熱學模式分析

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } y = 0 \text{ mm}$$
$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_f (T - T_s) \quad \text{在其他所有表面}$$

其中

$$h_f = 5W / m^2 \cdot K$$

$$T_s = 25$$

### 力學模式分析

$$u_y(x, y, z, t) = 0 \quad \text{在 } y = 0 \text{ mm}$$

$$u_x(x, y, z, t) = 0 \quad \text{在 } y = \pm 75 \text{ mm}$$

$$u_y(x, y, z, t) = 0 \quad \text{在 } y = \pm 75 \text{ mm}$$

### 3.5.6 分析假設

- 1.以雙橢球移動熱源的方式來模擬銲接熱量的施加。
- 2.熱源呈對稱分佈且熱量均勻作用於兩對接平板。
- 3.銲板與外界環境的熱傳方式僅考慮自然熱對流。
- 4.材料遵循等向應變硬化法則、Von-Mises 降服準則及 Prandtl-Reuss 塑流法則。

## 第四章 結果與討論

### 4.1 電弧效率評估

在銲接的過程中，電弧的作用常因機器的類型、工作環境的變化等因素而造成效率的流失，因此在進行銲接模擬的最初工作就是對於電弧效率作一連串的評估，以找出適當的電弧效率設定值。本研究為客觀地找出所用銲接機台之電弧效率設定值，採用 SUS 304 不銹鋼同種材質對接銲之熱學模式分析結果，配合其相對的熱循環實驗量測數據的綜合比較而加以求得，再使用所求得的電弧效率設定值，輸入至 S15C 碳鋼同種材質對接銲以及 SUS304 不銹鋼 - S15C 碳鋼異種對接銲之熱學模式分析，利用其分析出來的預測結果，配合其相對的熱循環實驗量測數據的綜合比較而加以驗證所求得的電弧效率設定值。圖 4.1 為同種 SUS304 不銹鋼銲件峰值溫度分佈圖，圖 4.2 則為同種 SUS304 不銹鋼銲接熱循環曲線圖。綜合圖 4.1 與圖 4.2 之分析結果與實驗數據的比較可得知，使用 54 % 的 GTAW 電弧效率可以準確模擬 SUS304 不銹鋼銲件溫度場的分佈狀況。

圖 4.3 與圖 4.4 圖 4.5 為使用 54 % GTAW 電弧效率所獲得的 S15C 碳鋼銲件與 SUS304 不銹鋼 - S15C 碳鋼異種銲件之銲接熱循環曲線

圖。由圖 4.3 與圖 4.4、圖 4.5 所獲得之分析結果與實驗數據的比較可顯示，使用 54 % 的 GTAW 電弧效率亦可以準確模擬 S15C 碳鋼銲件與 SUS304 不銹鋼 - S15C 碳鋼異種銲件溫度場的分佈狀況。也就是說本研究所使用的銲接機台之熱效率值為 54 %。

## 4.2 熱學模式分析

### 4.2.1 SUS304 不銹鋼同種對接銲之熱學模式分析

圖 4.6 為銲接時間為 5 秒時之溫度場狀態圖，由於本研究之銲接速度為 5 mm/sec，故可明顯發現此時之銲接熱源或溫度分佈主要集中於  $X = 25$  mm 處，且亦可發現在銲接熱源作用之處有較高的溫度梯度存在（相對於其他區域而言），而遠離銲道部份則由於熱對流等效應現象而幾乎沒有溫度梯度的存在。

圖 4.7 為銲接時間為 15 秒時之溫度場狀態圖。同樣地，亦可明顯發現此時之銲接熱源或溫度分佈主要集中於  $X = 75$  mm 處。在此階段銲接熱源已到達銲板中央位置，且可發現在銲接熱源作用之處仍有較高的溫度梯度存在，而在銲接熱源已作用過的區域，其溫度梯度則開始有降低的趨勢。整體而言，銲接熱源所作用之銲道部份，其在正 Y 方向（垂直銲道方向）之溫度梯度普遍較其他區域高出許多。至於在 X 方向（平行銲道方向）之溫度梯度，主要分為兩個方向。在銲

接熱源正 X 方向，由於是鐸接熱源未作用過的區域，因此在鐸道附近具有較高的溫度梯度；而在鐸接熱源負 X 方向，由於是鐸接熱源已作用過的區域，因此在鐸道附近具有較低的溫度梯度。本研究在探討鐸接溫度梯度方面，由於 X 方向之各點均會在不同的時間受到鐸接熱源的作用，因此鐸接熱源未作用過的區域，雖然也有相當高的溫度梯度，但在鐸接熱源作用過之後，此區域（在前一瞬間鐸接熱源未作用的鐸道位置）溫度會急遽升高，造成溫度梯度在瞬間會比鐸接熱源作用前變的較為平滑（與前一鐸道位置相比較）。在鐸接過程中，由於平行鐸道方向之溫度梯度是呈一非線性變化，因此在分析方面較為複雜，故本研究在探討鐸接溫度梯度方面，主要是針對垂直鐸道方向之溫度梯度來加以說明。

值得一提的是，由圖 4.7 可發現其等溫線急遽變化之範圍局部發生於鐸接熱源附近，且呈拉長之橢圓狀分佈（若再觀察圖 4.8 將可發現此趨勢更加顯著），此為移動熱源所形成之主要特徵。

圖 4.8 為鐸接時間為 30 秒時之溫度場狀態圖。在此階段可視為鐸接熱源即將離開板材之際，至於鐸道部份之溫度梯度分佈亦與上述趨勢相似。

圖 4.9、圖 4.10、圖 4.11、圖 4.12 與圖 4.13 分為鐸接時間 50 秒、100 秒、200 秒、400 秒與 800 秒時之溫度場狀態圖。由此一連串的

溫度場狀態圖可看出銲板溫度漸趨穩態，且溫度梯度亦明顯降低許多。

圖 4.14 為板材在銲接時間 1600 秒時之溫度場狀態圖。由於銲板各部分溫度已達到平衡的狀態，因此整個銲板幾乎沒有溫度梯度的存在。

#### 4.2.2 S15C 碳鋼同種對接銲之熱學模式分析

圖 4.15 為 S15C 碳鋼銲接時間 5 秒時之溫度場狀態圖，由圖可發現所觀察的結果亦相似於 SUS304 不銹鋼的熱學模式分析現象，銲接熱源或溫度分佈主要集中於  $X = 25 \text{ mm}$  處，且銲接熱源作用之處有較高的溫度梯度存在（相對於其他區域而言），而遠離銲道部份則由於熱對流等效應現象而幾乎沒有溫度梯度的存在。

圖 4.16 為銲接時間為 15 秒時之溫度場狀態圖。同樣地，亦可明顯發現此時之銲接熱源或溫度分佈主要集中於  $X = 75 \text{ mm}$  處。在此階段銲接熱源已到達銲板中央位置，且可發現在銲接熱源作用之處仍有較高的溫度梯度存在，而在銲接熱源已作用過的區域，其溫度梯度則開始有降低的趨勢。

圖 4.17 為銲接時間為 30 秒時之溫度場狀態圖。在此階段可視為銲接熱源即將離開板材之際，至於銲道部份之溫度梯度分佈亦與上述

趨勢相似。

圖 4.18、圖 4.19、圖 4.20、圖 4.21 與圖 4.22 分為銲接時間 50 秒、100 秒、200 秒、400 秒與 800 秒時之溫度場狀態圖。由此一連串的溫度場狀態圖可看出銲板溫度漸趨穩態，且溫度梯度亦明顯降低許多，此外由這些溫度的變化亦可發現，其相較於 SUS304 不銹鋼的溫度變化而言，具有較快達到穩態的現象，這是因為 S15C 碳鋼之熱傳導係數較高，因此對於溫度具有較高的傳遞作用所導致。

圖 4.23 為板材在銲接時間 1600 秒時之溫度場狀態圖。由於銲板各部分溫度已達到平衡的狀態，因此整個銲板幾乎沒有溫度梯度的存在。

### 4.2.3 異種金屬對接銲之熱學模式分析

圖 4.24 為 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼異種對接銲之銲接時間 5 秒時之溫度場狀態圖。此時之銲接熱源或溫度分佈主要集中於  $X = 25$  mm 處，雖然銲接板件是不同的兩種材料，但相似於同種材質的熱學模式分析，亦可發現在銲接熱源作用之處有較高的溫度梯度存在，而遠離銲道部份則由於熱對流等效應現象而幾乎沒有溫度梯度的存在，且兩側板件的溫度略有些許的變化。

圖 4.25 為銲接時間為 15 秒時之溫度場狀態圖。同樣地，亦可明

顯發現此時之鐸接熱源或溫度分佈主要集中於  $X = 75 \text{ mm}$  處。在此階段鐸接熱源已到達鐸板中央位置，且可發現在鐸接熱源作用之處仍有較高的溫度梯度存在，而在鐸接熱源已作用過的區域，其溫度梯度則開始有降低的趨勢，此外由圖中可看出 S15C 鐸板的溫度梯度(圖 4.25 下方板件)相對於 SUS304 鐸板(圖 4.25 上方板件)較低，且溫度傳遞較明顯。

圖 4.26 為鐸接時間為 30 秒時之溫度場狀態圖。在此階段可視為鐸接熱源即將離開板材之際，至於鐸道部份之溫度梯度分佈亦與上述趨勢相似。

圖 4.27、圖 4.28、圖 4.29、圖 4.30 與圖 4.31 分為鐸接時間 50 秒、100 秒、200 秒、400 秒與 800 秒時之溫度場狀態圖。由此一連串的溫度場狀態圖可看出鐸板溫度漸趨穩態，其溫度梯度亦明顯降低許多，且由於 S15C 碳鋼鐸板較快達到穩態，對於 SUS304 不銹鋼鐸板而言則具有散熱的作用。

圖 4.32 為板材在鐸接時間 1600 秒時之溫度場狀態圖。由於鐸板各部分溫度已達到平衡的狀態，因此整個鐸板幾乎沒有溫度梯度的存在。

## 4.3 力學模式分析

### 4.3.1 同種 SUS304 不銹鋼對接銲之殘留應力分析

#### 同種 SUS304 不銹鋼對接銲之 $\sigma_{XX}$ 暫態熱應力分析

圖 4.33 為銲接時間為 5 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖。在此階段可發現接近銲接熱源的區域因高溫而膨脹，但受到遠離銲接熱源周圍區域之束縛，因此會在銲接熱源附近產生壓縮熱應力。而在遠離銲接熱源的區域則因力學平衡之緣故，因此會產生拉伸熱應力。

圖 4.34 為銲接時間為 10 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖。在此階段可發現其相似於圖 4.33 所觀察到的現象，即接近銲接熱源的區域因高溫而膨脹，並受到遠離銲接熱源周圍區域之束縛，在銲接熱源附近產生壓縮熱應力，遠離銲接熱源的區域則會產生拉伸熱應力。

同樣的圖 4.35 與圖 4.36 亦可更明顯地發現整個銲道周圍受到局部熱源作用，使得銲道周圍區域受到遠離銲接熱源的區域的束縛而產生壓縮熱應力，而遠離銲接熱源的區域亦受到銲道周圍區域之壓縮應力的產生與束縛，產生相對的拉伸熱應力。

圖 4.37 為銲接時間為 25 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖。在此階段由於銲接熱源即將離開板材，因此在靠近銲道終端位置處仍具有較高的壓縮熱應力。至於在其他區域則由於銲接熱源的遠離，會造成整個銲板開始冷卻而收縮，且因銲道區域由高溫熔融狀態冷卻時，

304 沃斯田鐵型不銹鋼在 600~1200 的溫度範圍間由於其降伏應力會急遽降低（參考圖 3.3 所示），因此會產生較大的塑性變形，進而會在遠離銲接熱源的區域形成較高的拉伸熱應力。

圖 4.38 為銲接 50 秒時之  $\sigma_{xx}$  銲接殘留應力場狀態圖，在此階段由於銲接熱源已經離開板材，隨著銲件的冷卻，殘留應力也就相對地產生，因此可明顯發現在靠近銲道區域的拉伸殘留應力相較於圖 4.37 增加許多。

圖 4.39、圖 4.40、圖 4.41、圖 4.42、圖 4.43 分別為銲接 100 秒、200 秒、400 秒、800 秒、1600 秒時之  $\sigma_{xx}$  銲接殘留應力場狀態圖。此時可發現在靠近銲道區域的拉伸殘留應力增加的速率已趨於緩慢。

圖 4.44 為銲接 3150 秒時之  $\sigma_{xx}$  銲接殘留應力場狀態圖。此時更可發現整個銲板的殘留應力相較於圖 4.43 變化不大，即已趨於定值。

#### 同種 SUS304 不銹鋼對接銲之 $\sigma_{yy}$ 暫態熱應力分析

圖 4.45 為銲接時間為 5 秒時之  $\sigma_{yy}$  暫態熱應力場狀態圖，在此階段亦可發現在接近銲接熱源的區域會產生壓縮熱應力，而在遠離銲接熱源的區域則會產生拉伸熱應力。

圖 4.46、圖 4.47、圖 4.48、圖 4.49 分別為 10 秒、15 秒、20 秒、

25 秒時之暫態應力，可發現大致上均有此現象的發生。

圖 4.50 為鐸接 50 秒時之  $\sigma_{YY}$  鐸接殘留應力場狀態圖，在此階段由於鐸接熱源已經離開板材，因此可明顯發現在鐸板中央位置的拉伸殘留應力相較於圖 4.49 增加許多，而鐸板兩側的壓縮殘留應力亦逐漸地增加。

圖 4.51、圖 4.52、圖 4.53、圖 4.54、圖 4.55 分別為鐸接 100 秒、200 秒、400 秒、800 秒、1600 秒時之  $\sigma_{YY}$  鐸接殘留應力場狀態圖。此時可發現鐸道中央與兩端位置的拉伸與壓縮殘留應力增加的速率已趨於緩慢。

圖 4.56 為鐸後 3150 秒時之  $\sigma_{YY}$  鐸接殘留應力場狀態圖，此時可發現在鐸板中央位置處產生定值得拉伸殘留應力，而在鐸板兩端位置處則產生定值的壓縮殘留應力。

### 同種 SUS304 不銹鋼對接鐸殘留應力之分析與實驗

圖 4.57 與圖 4.58 分別為 SUS304 不銹鋼鐸板冷卻至室溫時之  $\sigma_{XX}$  與  $\sigma_{YY}$  鐸接殘留應力分佈圖。由  $\sigma_{XX}$  鐸接殘留應力之分析結果可得知，在靠近鐸道附近的區域會產生為較高的拉伸殘留應力值，其大小可達到母材的降伏應力，而在遠離鐸道的區域則會產生較低的壓縮殘留應力。此外，在本研究中（鐸接電流為 110 A、電弧電壓為 13 V

及銲接速度為 5 mm/sec 之銲接條件) 發現約有 23.2 mm 寬的拉伸殘留應力區 (tensile residual stress zone) 產生於靠近銲道附近的區域, 而此拉伸殘留應力區將可能會嚴重影響銲件之機械性質與耐腐蝕性。由  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力之分析結果可得知, 在銲板中央位置處會產生較低的拉伸殘留應力, 而在銲板兩側位置處則會產生較高的壓縮殘留應力。本研究在此發現最大  $\sigma_{XX}$  拉伸殘留應力值(247 Mpa)約為最大  $\sigma_{YY}$  拉伸殘留應力值(89.5 MPa)的 2.76 倍, 此說明縱向拉伸殘留應力 ( $\sigma_{XX}$ )比橫向拉伸殘留應力( $\sigma_{YY}$ )影響平板銲接結構強度甚鉅, 在結構安全評估分析上應多考慮此縱向殘留應力的分布與大小[48-52]。

綜合圖 4.57 (b)與圖 4.58 (b)之殘留應力分析結果與實驗數據的比較可得知, 本研究建構之有限元素模型可準確模擬同種 SUS304 不銹鋼對接銲之銲件殘留應力的大小與分佈情形。

### 4.3.2 同種 S15C 碳鋼對接銲之殘留應力分析

#### 同種 S15C 碳鋼對接銲之 $\sigma_{XX}$ 暫態熱應力分析

圖 4.59 為銲接時間為 5 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖, 在此階段可發現其相似於 SUS304 不銹鋼的狀況, 即接近銲接熱源的區域因高溫而膨脹, 但受到遠離銲接熱源周圍區域之束縛, 因此會在銲接熱源附近產生壓縮熱應力。而在遠離銲接熱源的區域則因力學平衡之緣

故，因此會產生拉伸熱應力。

圖 4.60 為銲接時間為 10 秒時之  $\sigma_{xx}$  暫態熱應力場狀態圖，在此階段可發現其相似於圖 4.59 所觀察到的現象，即接近銲接熱源的區域因高溫而膨脹，並受到遠離銲接熱源周圍區域之束縛，在銲接熱源附近產生壓縮熱應力。遠離銲接熱源的區域則會產生拉伸熱應力。

同樣的圖 4.61 與圖 4.62 亦可更明顯地發現整個銲道周圍受到局部熱源作用，使得銲道周圍區域受到遠離銲接熱源的區域的束縛而產生壓縮熱應力。而遠離銲接熱源的區域亦受到銲道周圍區域之壓縮應力的產生與束縛，產生相對的拉伸熱應力。

圖 4.63 為銲接時間為 25 秒時之  $\sigma_{xx}$  暫態熱應力場狀態圖。在此階段由於銲接熱源即將離開板材，因此在靠近銲道終端位置處仍具有較高的壓縮熱應力。至於在其他區域則由於銲接熱源的遠離，會造成整個銲板開始冷卻而收縮，且因銲道區域由高溫熔融狀態冷卻時，S15C 碳鋼在 600~1000 的溫度範圍間由於其降伏應力會急遽降低（參考圖 3.5 所示），因此會產生較大的塑性變形，進而會在遠離銲接熱源的區域形成較高的拉伸熱應力。

圖 4.69 為銲後 50 秒時之  $\sigma_{xx}$  銲接殘留應力場狀態圖。在此階段由於銲接熱源已經離開板材，因此可明顯發現在靠近銲道區域的拉伸殘留應力相較於圖 4.61 增加許多。

圖 4.70、圖 4.71、圖 4.72、圖 4.73、圖 4.74 為鐸後 100 秒、200 秒、400 秒、800 秒、1600 秒時之  $\sigma_{XX}$  鐸接殘留應力場狀態圖。此時可發現在靠近鐸道區域的拉伸殘留應力增加的速率已趨於緩慢。

圖 4.75 為鐸後 3150 秒時之  $\sigma_{XX}$  鐸接殘留應力場狀態圖。此時更可發現整個鐸板的殘留應力相較於圖 4.74 變化不大，即已趨於定值，其應力分佈的情形大致與 SUS 304 不銹鋼所分析的結果相似。

#### 同種 S15C 碳鋼對接鐸之 $\sigma_{YY}$ 暫態熱應力分析

圖 4.64 為鐸接時間為 5 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖，在此階段亦可發現在接近鐸接熱源的區域會產生壓縮熱應力，而在遠離鐸接熱源的區域則會產生拉伸熱應力。

圖 4.65、圖 4.66、圖 4.67、圖 4.68 分別為 10 秒、15 秒、20 秒、25 秒時之暫態應力，可發現大致上均有此現象的發生。

圖 4.76 為鐸後 50 秒時之  $\sigma_{YY}$  鐸接殘留應力場狀態圖。在此階段由於鐸接熱源已經離開板材，因此可明顯發現在鐸板中央位置的拉伸殘留應力相較於圖 4.68 增加許多，而鐸板兩側的壓縮殘留應力亦逐漸地增加。

圖 4.77、圖 4.78、圖 4.79、圖 4.80、圖 4.81 為鐸後 100 秒、200 秒、400 秒、800 秒、1600 秒時之  $\sigma_{YY}$  鐸接殘留應力場狀態圖。此時

可發現在鐳道中央與兩端位置的拉伸與壓縮殘留應力增加的速率已趨於緩慢。

圖 4.82 為鐳後 3150 秒時之  $\sigma_{YY}$  鐳接殘留應力場狀態圖，此時可發現在鐳板中央位置處產生定值得拉伸殘留應力，而在鐳板兩端位置處則產生定值的壓縮殘留應力。

### 同種 S15C 碳鋼對接鐳殘留應力之分析與實驗

圖 4.83 與圖 4.84 分別為 S15C 碳鋼鐳板冷卻至室溫時之  $\sigma_{XX}$  與  $\sigma_{YY}$  鐳接殘留應力分佈圖。由  $\sigma_{XX}$  鐳接殘留應力之分析結果可得知，在靠近鐳道附近的區域會產生為較高的拉伸殘留應力值，其大小可達到母材的降伏應力，而在遠離鐳道的區域則會產生較低的壓縮殘留應力。此外，在本研究中（鐳接電流為 110 A、電弧電壓為 13 V 及鐳接速度為 5 mm/sec 之鐳接條件）發現約有 16.3 mm 寬的拉伸殘留應力區（tensile residual stress zone）產生於靠近鐳道附近的區域，而此拉伸殘留應力區將可能會嚴重影響鐳件之機械性質與耐腐蝕性。由  $\sigma_{YY}$  鐳接殘留應力之分析結果可得知，在鐳板中央位置處會產生較低的拉伸殘留應力，而在鐳板兩側位置處則會產生較高的壓縮殘留應力。本研究亦發現最大  $\sigma_{XX}$  拉伸殘留應力值(298 MPa)約最大  $\sigma_{YY}$  拉伸殘留應力值(83.2 MPa)的 3.58 倍，再次說明縱向拉伸殘留應力( $\sigma_{XX}$ )

比橫向拉伸殘留應力( $\sigma_{YY}$ )影響平板銲接結構強度甚鉅。

綜合圖 4.83 (b)與圖 4.84(b)之殘留應力分析結果與實驗數據的比較可得知，本研究建構之有限元素模型可以準確模擬同種 S15C 碳鋼對接銲之銲件殘留應力的大小與分佈情形。

圖 4.85 為 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼之銲接殘留應力比較圖，圖中可發現 SUS304 不銹鋼之最大銲接殘留應力值非常接近其降伏應力強度，而 S15C 碳鋼之最大殘留應力值則略低於其降伏強度，會發生此差異是由於高熱傳導性材料在銲接過程中，會造成有較低的鋒值溫度與溫度梯度，使板材相互間之熱應力拉扯變小，進而導致最大銲接殘留應力略小於其降伏強度；相反地，低熱傳導性材料則將造成最大銲接殘留應力高於降伏強度。此外，雖然熱膨脹系數會造成較高的熱應力，理應造成較高的銲接殘留應力，但圖中兩者之最高殘留應力值的比較並沒有發現明顯現象，這是降伏應力的影響程度遠高於熱膨脹系數所導致，也就是最高銲接殘留應力值大部份取決於材料的降伏應力值。 [58, 59]

### 4.3.3 異種金屬對接銲之殘留應力分析

#### 異種 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼對接銲之 $\sigma_{XX}$ 暫態熱應力分析

圖 4.86 為銲接時間為 5 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖，此階段可發現相似前節所觀察的現象，兩塊銲板在接近銲接熱源的區域因高溫而膨脹，並受到周圍區域之束縛而在銲接熱源附近產生壓縮熱應力。在遠離銲接熱源的區域則因力學平衡之緣故，因此會產生拉伸熱應力。

圖 4.87 為銲接時間為 10 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖，在此階段可發現其相似於圖 5.86 所觀察到的現象，即接近銲接熱源的區域因高溫而膨脹，並受到遠離銲接熱源周圍區域之束縛，在銲接熱源附近產生壓縮熱應力，遠離銲接熱源的區域則會產生拉伸熱應力。

同樣的圖 4.88 與圖 4.89 亦可更明顯地發現整個銲道周圍受到局部熱源作用，使得銲道周圍區域受到遠離銲接熱源的區域的束縛而產生壓縮熱應力，而遠離銲接熱源的區域亦受到銲道周圍區域之壓縮應力的產生與束縛，產生相對的拉伸熱應力。

圖 4.90 為銲接時間為 25 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖，在此階段由於銲接熱源即將離開板材，因此在靠近銲道終端位置處仍具有較高的壓縮熱應力。至於在其他區域則由於銲接熱源的遠離，造成 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼兩塊銲板開始各自地冷卻而收縮，且因

銲道區域由高溫熔融狀態冷卻時，304 沃斯田鐵型不銹鋼與 S15C 碳鋼各自在一定溫度範圍內具有相當大的應力變化值，因此會產生較大的塑性變形，進而會在遠離銲接熱源的區域形成較高的拉伸熱應力，且相較於同種 SUS304 不銹鋼與同種 S15C 碳鋼的暫態熱應力狀況，亦可發現兩塊板件因為接合在一起，而會有相互間的應力拉扯現象，而造成銲板應力會有各自地上升或下降的調整趨勢。

圖 4.91 為銲接 50 秒時之  $\sigma_{xx}$  銲接殘留應力場狀態圖，在此階段由於銲接熱源已經離開板材，因此可明顯發現兩塊銲板在靠近銲道區域的拉伸殘留應力相較於圖 4.90 增加許多。由於兩塊銲板具有不同的材料特性，故在降溫的過程中亦造成相互間的應力拉扯，因此在 SUS304 不銹鋼銲板上，其應力變化會因為 S15C 碳鋼銲板的作用，而比同種銲接時的應力略大，這是因為在溫度 600-1200 時，S15C 碳鋼與 SUS304 不銹鋼均具有良好的塑性且有不同的應力變化速度，故 SUS 304 不銹鋼在升溫與降溫的過程中，受到 S15C 銲板的束縛作用相對於同種 SUS304 銲接時的束縛作用較大，因此其殘留應力便會比同種 SUS304 銲接所產生的殘留應力大。同樣地，S15C 碳鋼在升溫與降溫的過程中，均受到 SUS304 不銹鋼銲板強烈束縛，因此其所產生的殘留應力便會比同種 S15C 碳鋼銲接所產生的殘留應力小。

圖 4.92、圖 4.93、圖 4.94、圖 4.95、圖 4.96 分別為銲接 100 秒、200 秒、400 秒、800 秒、1600 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖。此時可發現在靠近銲道區域的拉伸殘留應力增加的速率已趨於緩慢。

圖 4.97 為銲接 3150 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖。此時更可發現整個銲板的殘留應力相較於圖 4.96 變化不大，即已趨於定值。

### 異種 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼對接銲之 $\sigma_{YY}$ 暫態熱應力分析

圖 4.98 為銲接時間為 5 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖，在此階段亦可發現在接近銲接熱源的區域會產生壓縮熱應力，而在遠離銲接熱源的區域則會產生拉伸熱應力。

圖 4.99、圖 4.100、圖 4.101、圖 4.102 分別為 10 秒、15 秒、20 秒、25 秒時之暫態應力，可發現大致上均有此現象的發生。

圖 4.103 為銲接 50 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖。在此階段由於銲接熱源已經離開板材，因此可明顯發現在銲板中央位置的拉伸殘留應力相較於圖 4.102 增加許多，而兩塊銲板的兩側之壓縮殘留應力亦逐漸地增加。

圖 4.104、圖 4.105、圖 4.106、圖 4.107、圖 4.108 為銲後 100 秒、200 秒、400 秒、800 秒、1600 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖。此時可發現在銲道中央與兩端位置的拉伸與壓縮殘留應力增加的速率已趨於緩慢。

圖 4.109 為鐸後 3150 秒時之  $\sigma_{YY}$  鐸接殘留應力場狀態圖，此時可發現在鐸板中央位置處產生定值得拉伸殘留應力，而在鐸板兩端位置處則產生定值的壓縮殘留應力。

### 異種 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼對接鐸之殘留應力分析與實驗

圖 4.110 與圖 4.111 分別為異種鐸板冷卻至室溫時之  $\sigma_{XX}$  與  $\sigma_{YY}$  鐸接殘留應力分佈圖。同樣地，由  $\sigma_{XX}$  鐸接殘留應力之分析結果可得知，兩塊異種鐸板在靠近鐸道附近的區域均會產生較高的拉伸殘留應力值，其大小可達到各鐸板母材之降伏應力，而在遠離鐸道的區域則會產生較低的壓縮殘留應力。此外，在本研究中（鐸接電流為 110 A、電弧電壓為 13 V 及鐸接速度為 5 mm/sec 之鐸接條件）亦發現在 SUS304 不銹鋼鐸板上約有 20 mm 寬的拉伸殘留應力區（tensile residual stress zone）產生於靠近鐸道附近的區域，且最大的拉伸殘留應力相對於同種 SUS304 不銹鋼鐸接時略大，造成這樣的原因是由於與 S15C 碳鋼的接合，使得原本存留於 304 不銹鋼鐸板的熱量可藉由 S15C 碳鋼的高熱傳導性而得以紓解，而導致 304 不銹鋼板件的所受到的熱影響範圍變小，導致 SUS304 不銹鋼之拉伸殘留應力區變小，但受到 S15C 碳鋼的束縛影響，使得 304 不銹鋼鐸板接合處之拉伸殘留應力因而變大。相對地，S15C 碳鋼鐸板則因為吸收 SUS304 不銹

鋼銲板的額外熱量所致，造成 S15C 碳鋼銲板熱影響區的加大，故在本研究中可發現 S15C 碳鋼銲板上約有 18.4 mm 寬的拉伸殘留應力區，且最高拉伸殘留應力比同種銲接時的拉伸殘留應力小。這些拉伸殘留應力區將可能會嚴重影響銲件之機械性質與耐腐蝕性。同樣地，由  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力之分析結果可得知，在銲板中央位置處會產生較低的拉伸殘留應力，而在銲板兩側位置處則會產生較高的壓縮殘留應力。本研究再此亦發現異種銲接 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼的兩塊銲板，其各自銲板上最大  $\sigma_{XX}$  拉伸殘留應力值均大於最大  $\sigma_{YY}$  拉伸殘留應力值的 2~3 倍，所得的結果亦與同種銲接時所觀察到的現象相似，也就是說縱向拉伸殘留應力( $\sigma_{XX}$ )是影響銲接結構強度的主因。

綜合圖 4.110 (b)與圖 4.111(b)之殘留應力分析結果與實驗數據的比較可得知，本研究之有限元素模型可以準確模擬異種 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼對接銲之銲件殘留應力的大小與分佈情形。

#### 4.4 材料係數對於銲接殘留應力之影響

由同種與異種金屬銲接之分析結果可以得知，本研究所建構之有限元素模型已得到驗證，且可看出材料係數對於銲接殘留應力具有某種形式的影響，為進一步釐清材料係數與銲接殘留應力之間之關係，本研究便利用已驗證之有限元素模型，虛擬數種不同材料係數，來探

討各材料系數與殘留應力之間的影響與規律。

#### 4.4.1 虛擬材料的建構

銲接殘留應力生成之原因，以物理性質而言，主要是由於銲接熱源造成局部且不均勻熱應力拉扯所導致，而熱應力  $\sigma_T$  的基本公式如下：

$$\sigma_T = E \times \alpha \times T \quad (4.1)$$

$$\Delta T = -\frac{Q \times \Delta X}{K \times A} \quad (4.2)$$

其中  $E$ =楊氏係數、 $\alpha$ =熱膨脹係數、 $T$ =溫度差

$Q$ =熱源能量、 $X$ =熱傳導距離、 $A$ =熱傳面積、 $K$ =熱傳導係數

由式(4.1)、(4.2)可以瞭解熱應力主要是由楊氏係數  $E$ 、熱膨脹  $\alpha$  以及熱傳導  $K$  等這三種材料性質所影響，此外式(5.1)僅適用於彈性變形範圍，由於銲接過程中，局部不均勻熱應力之拉扯強度往往超越材料降幅應力值而導致塑性變形，因此降伏強度  $\sigma_y$  亦是影響銲接殘留應力大小的重要因素，本研究以 S15C 碳鋼之材料性質為基礎，將楊氏係數( $E$ )、熱膨脹( $\alpha$ )、熱傳導( $K$ )與降伏強度( $\sigma_y$ )分別調高與調低各自係數值之 10%倍率，建構組合出 29 種材料性質之虛擬材料(如表 5.1 所示)，並將這些虛擬材料導入已驗證過之有限元素模型中，先探

討楊氏係數(E)、熱膨脹( $\alpha$ )與熱傳導(K)這三種材料係數對於平板銲接殘留應力之影響，再探討降伏強度對於銲接殘留應力之影響。

#### 4.4.2 楊氏係數、熱膨脹係數與熱傳導對於銲接殘留應力之影響

圖 4.112 為僅變動材料係數楊氏係數 E 的殘留應力曲線圖，圖中可以看出最大拉伸殘留應力並沒有特別的變化；材料編號 2 與材料編號 3 之拉伸殘留應力區分別為 17.2mm 與 15.4mm，與材料編號 1 (S15C 碳鋼)之拉伸應力區比較，可發現拉伸應力區是隨楊氏係數增加而呈線性增加。

圖 4.113 為僅變動材料係數熱膨脹係數  $\alpha$  的殘留應力曲線圖，圖中可以看出材料編號 4 與材料編號 5 之最大拉伸殘留應力分別為 304MPa 與 292MPa，而拉伸殘留應力區分別為 17.3mm 與 15.3mm，與材料編號 1 (S15C 碳鋼)之拉伸應力區比較，可發現最大拉伸殘留應力與拉伸殘留應力區會隨著熱膨脹係數的增加而呈線性增加。

圖 4.114 為僅變動材料係數熱傳導係數 K 的殘留應力曲線圖，圖中可以看出材料編號 6 與材料編號 7 之最大拉伸殘留應力分別為 292MPa 與 304MPa，而拉伸殘留應力區分別為 16.2mm 與 16.4mm，與材料編號 1 (S15C 碳鋼)之拉伸應力區比較，可發現最大拉伸殘留應力與拉伸殘留應力區會隨著熱傳導係數的增加而呈線性遞減。

表 4.2 則紀錄各虛擬材料之最大拉伸殘留應力與應力區之變動情況，由表 4.2 之比對結果可以得知，在同一個降伏應力下，楊氏係數 E、熱膨脹係數  $\alpha$  與熱傳導係數 K 的變動對於最大殘留應力與拉伸殘留應力區之變動值，具有線性獨立與疊加效果。

#### 4.4.3 降伏應力對於銲接殘留應力之影響

圖 4.115 為僅變動材料系數降伏強度  $\sigma_Y$  的殘留應力曲線圖,圖中可以看出材料編號 28 與材料編號 29 之最大拉伸殘留應力分別為 352MPa 與 244MPa, 而拉伸殘留應力區分別為 15.3mm 與 17.3mm, 與材料編號 1 (S15C 碳鋼)之拉伸應力區比較,可發現最大拉伸殘留應力會隨著降伏應力  $\sigma_Y$  的增加而呈線性增加,而拉伸殘留應力區會隨著降伏應力  $\sigma_Y$  的增加而呈線性遞減。由表 4.2 與其他材料系數的比對結果可以發現材料之降伏應力決定主要的最大殘留應力數值,而其他材料系數則僅作些微的變動,此結果與 K. H. Chang, C. H. Lee 等學者所論述的結果相似。[58, 59]

#### 4.4.4 殘留應力預測公式的建立與驗證

由 4.4.2 與 4.4.3 的結果可以得知平板銲接殘留應力是可以由楊氏係數、熱膨脹係數、熱傳導係數與降伏應力來估算,因此本研究根據表 4.2 之比對關係結果推導出材料系數與最大拉伸殘留應力  $\sigma_{\max}$  之關係公式如式 4.3 所示,而材料系數與拉伸殘留應力區  $L_{\text{tension}}$  之關係公式則如式 4.4 所示。

$$\sigma_{\max} = \frac{540\sigma_y}{315 \times 10^6} + \frac{60\alpha}{11.9 \times 10^{-6}} - \frac{60K}{51.9} - 242 \quad (4.3)$$

$$L_{\text{tension}} = 8.3 - \frac{10\sigma_y}{315 \times 10^6} + \frac{9E}{205 \times 10^9} + \frac{10\alpha}{11.9 \times 10^{-6}} - \frac{K}{51.9} \quad (4.4)$$

然後,殘留應力預測公式便可進一步地利用式(5.3)與式(5.4)推導出來:

$$\sigma_x(y) = \sigma_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{y}{L_{\text{tension}}} \right)^2 \right] e^{-1/2(y/L_{\text{tension}})^2} \quad (4.5)$$

圖 4.116 為預測公式與 S15C 碳鋼之殘留應力分析與實驗結果比對圖，圖中可以看出本研究所推導的殘留應力預測公式所描述之殘留應力分佈與 S15C 碳鋼之分析與實驗結果相似。為了進一步確認本研究所發展的殘留應力預測公式適用於其他鋼材，便將 SUS304 不銹鋼之材料係數代入式 4.5 中並與實驗結果比對，由圖 4.117 的比對結果可以看出，本研究所發展之預測公式亦能相當地準確描述 SUS304 不銹鋼平板殘留應力分布情形，即驗證了本研究殘留應力預測公式之可靠性與準確性。

## 第五章 結論

1. 在銲接電流為 110 A、電弧電壓為 13 V 及銲接速度為 5 mm/sec 之銲接條件下，可發現同種 SUS304 不銹鋼銲板約有 23.2 mm 寬的拉伸殘留應力區產生於靠近銲道附近的區域。同種 S15C 碳鋼銲板約有 16.3 mm 寬的拉伸殘留應力區產生於靠近銲道附近的區域。
2. 在銲接電流為 110 A、電弧電壓為 13 V 及銲接速度為 5 mm/sec 之銲接條件下，可發現異種 SUS304 不銹鋼銲板約有 20 mm 寬的拉伸殘留應力區產生於靠近銲道附近的區域。異種 S15C 碳鋼銲板約有 18.4mm 寬的拉伸殘留應力區產生於靠近銲道附近的區域。
3. 綜合熱學模式之分析結果與實驗數據的比較可得知，在銲接電流為 110 A、電弧電壓為 13 V 及銲接速度為 5 mm/sec 之銲接條件下，使用 54 % 的 GTAW 電弧效率可以準確模擬銲件溫度場的分佈狀況。
4. 綜合力學模式之分析結果與實驗數據的比較可得知，本研究之有限元素模型可以準確模擬銲件殘留應力的大小與分佈情形。

5. 最大拉伸殘留應力會隨著熱膨脹係數增加、降伏應力增加與熱傳導係數減少而呈線性增加，且大部分取決於降伏應力值，楊氏係數則無太大變化。
6. 拉伸殘留應力區會隨楊氏係數增加、熱膨脹係數增加、熱傳導係數減少與降伏應力增加而呈線性增加。
7. 本研究所發展之平板銲接殘留應力預測公式，可快速且準確地預測低碳鋼或不銹鋼等平板鋼材之銲接殘留應力分佈。

## 參考文獻

1. K. Masubuchi, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Oxford, 1980.
2. S. Kou, Welding Metallurgy, John Wiley & Sons, Toronto, 1987.
3. Welding Handbook, 8th edn, Vol. 1, American Welding Society, Miami, 1987.
4. K. Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1992.
5. H. Kihara and K. Masubuchi, “Effect of residual stress on brittle fracture”, Welding Journal Research Supplement, 38(4), pp. 159s-168s, 1959.
6. K. Masubuchi and D. C. Martin, “Investigation of residual stresses by use of hydrogen cracking”, Welding Journal Research Supplement, 40(12), pp. 553s-563s, 1961.
7. R. Robelotto, J. M. Lambase and A. Toy, “Residual stress in welded titanium and their effects on mechanical behavior”, Welding Journal Research Supplement, 47(7), pp. 289s-298s, 1968.
8. T. Toyooka et al., “Fatigue test of residual stress induced specimens in carbon steel”, Welding Journal Research Supplement, 64(1), pp. 29s-36s, 1985.
9. C.P. Chou and Y.C. Lin, “Improvement of Residual Stress by Parallel

- Heat Welding in Small Specimens in Type 304 Stainless Steel”, Materials Science and Technology, 8(2), pp. 179-183, 1992.
10. Y.C. Lin and C.P. Chou, “Residual Stress Due to Parallel Heat Welding in Small Specimens in Type 304 Stainless Steel”, Materials Science and Technology, 8(9), pp. 837-840, 1992.
  11. Y. C. Lin and C. P. Chou, “A New Technique for Reducing the Residual Stress”, Journal of Materials Processing Technology, 48, pp. 693-698, 1995.
  12. S. Vaidyanathan, A. F. Todaro, and I. Finnie, “Residual Stresses Due to Circumferential Welds”, American Society of Mechanical Engineers (Paper), Issue: n 73-Mat-AA, 1973.
  13. H. Murakawa, “Theoretical Prediction of Residual Stress in Welded Structures”, Welding International, 11, pp. 599-604, 1997.
  14. E. Macherauch, “X-Ray Stress Analysis”, Experimental Mechanics, 6(3), 140-153, 1966.
  15. N. J. Rendler and I. Vigness, “Hole-drilling strain-gauge method of measuring residual stresses”, Experimental Mechanics, 6(12), pp. 577-586, 1966.
  16. G. A. Alpsten and L. Tall, “Residual stresses in heavy welded shapes”, Welding Journal Research Supplement, 1970, 49(3), 93s-105s.
  17. R. Bjorhovde et al., “Residual stresses in thick welded plates”, Welding Journal Research Supplement, 51(8), pp. 392s-405s, 1972.
  18. N. N. Hsu, “Acoustical Birefringence and Use of Ultrasonic Waves for Experimental Stress Analysis”, Experimental Mechanics, 14(5),

pp. 169-176, 1974.

19. Z-B. Kuang and S. N. Atluri, "Temperature field due to a moving heat source: A moving mesh finite element analysis", J. Appl. Mech., 52, pp. 274-280, 1985.
20. Y. Ueda, K. Nakacho, and T. Shimizu, "Improvement of Residual Stresses of Circumferential Joint of Pipe by Heat-Sink Welding", Journal of Pressure Vessel Technology - Transactions of the ASME, 108, pp. 14-23, 1986.
21. R. I. Karlsson and B. L. Josefson, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Temperatures and Stresses in a Single- Pass Butt-Welded Pipe", Journal of Pressure Vessel Technology - Transactions of the ASME, 112, pp. 76-84, 1990.
22. Y. Shim et al., "Determination of residual stresses in thick-section weldments", Welding Journal Research Supplement, 71 (9), pp. 305s-312s, 1992.
23. A. Wu et al., "Effects of Welding Procedures on Residual Stresses in T-Joints", Transactions of JWRI, 25(4), pp. 81-89, 1996.
24. T. L. Teng and P. H. Chang, "A Study of Residual Stresses in Multi-Pass-Girth Butt Welded Pipes" International Journal of Pressure Vessels and Piping, 74, pp. 59-70, 1997.
25. T. L. Teng and P. H. Chang, "Three-dimensional thermomechanical analysis of circumferentially welded thin-walled pipes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 75, pp. 237-247, 1998.
26. S. M. Variyar and N. S. Prasad, "Estimation of residual stresses in

- weldments using a nine-noded degenerated shell element”, Journal of Materials Processing Technology, 91, pp. 150-160, 1999.
27. E. F. Rybicki et al., “A Finite-Element Model for Residual Stresses and Deflections in Girth-Butt Welded Pipes”, Transactions of the ASME, 100, pp. 256-262, 1978.
  28. E.F. Rybicki and R.B Stonesifer, “Computation of Residual Stresses due to Multipass Welds in Piping Systems”, Journal of Pressure Vessel Technology - Transactions of the ASME, 101, pp. 149-154, 1979.
  29. B. Brickstad and B.L. Josefson, “A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 75, pp. 11-25, 1998.
  30. L.E. Lindgren, L. Karlsson, “Deformations and Stresses in Welding of Shell Structures”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 25, pp. 635-655, 1988.
  31. R.I. Karlsson, B.L. Josefson, “Three-Dimensional Finite Element Analysis of Temperatures and Stresses in a Single-Pass Butt-Welded Pipe”, Transactions of the ASME, 112, pp. 76-84, 1990.
  32. S. Fricke, E. Keim and J. Schmidt, “Numerical Weld Modeling – A Method for Calculating Weld-Induced Residual Stresses”, Nuclear Engineering and Design, 206, pp. 139-150, 2001.
  33. J. A. Free and F. D. P. Goff, “Predicting Residual Stresses in Multi-Pass Weldments with The Finite Element Method”, Computers

- and Structures, 32(2), pp. 365-378, 1989.
34. Y. Shim et al., “Determination of Residual Stresses in Thick-Section Weldments”, Welding Journal Research Supplement, 71(9), pp. 305s-312s, 1992.
  35. N. Siva Prasad, and T. K. Sankaranarayanan, “Estimation of Residual Stresses in Weldments Using Adaptive Grids”, Computers and Structures, 60(6), pp. 1037-1045, 1996.
  36. J. Canas et al., “A Simplified Numerical Analysis of Residual Stresses in Aluminum Welded Plates”, Computers and Structures, 58(1), pp. 59-69, 1996.
  37. I. Sattari-Far and M.R. Farahani, “Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 86, pp.723-731, 2009.
  38. D. Akbari and I. Sattari-Far, “Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 86, pp. 769–776, 2009.
  39. S. Kiyoshima et al., “Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint”, Computational Materials Science, 46, pp. 987–995, 2009.
  40. J.R. Cho et al., “Investigation of residual stress and post weld heat treatment of multi-pass welds by finite element method and experiments”, Journal of Materials Processing Technology, 155–156, pp. 1690–1695, 2004.
  41. D. Deng and H. Murakawa, “Numerical simulation of temperature

field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements”, Computational Materials Science, 37, 269–277, 2006.

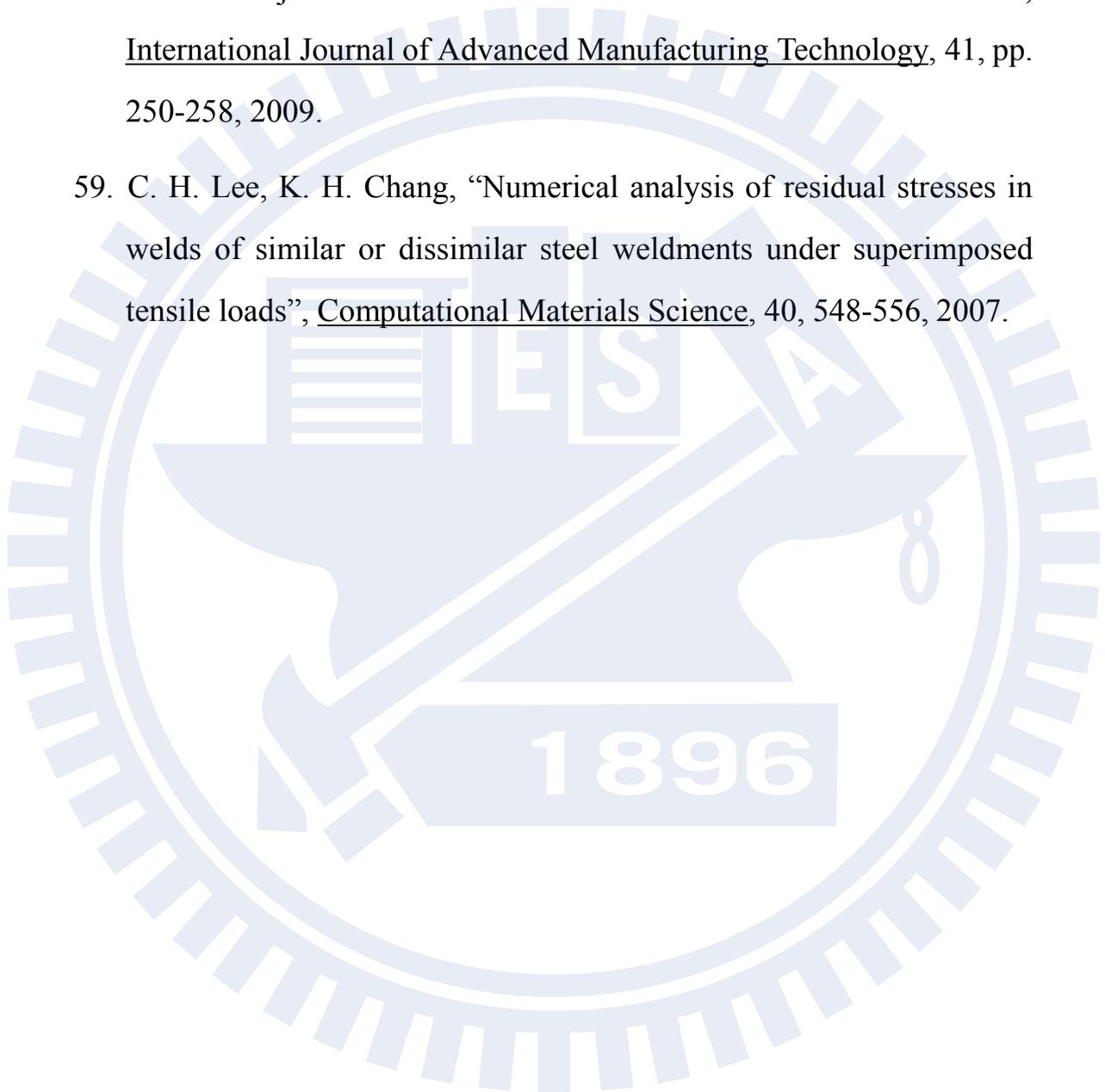
42. C.D. Elcoate et al., “Three dimensional multi-pass repair weld simulations”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 82, 244–257, 2005.
43. D. Dean and H. Murakawa, “Prediction of welding residual stress in multi-pass butt-welded modified 9Cr–1Mo steel pipe considering phase transformation effects”, Computational Materials Science, 37, pp. 209–219, 2006.
44. D. Dean and H. Murakawa, “Finite element analysis of temperature field, microstructure and residual stress in multi-pass butt-welded 2.25Cr–1Mo steel pipes”, Computational Materials Science, 43, pp. 681–695, 2008.
45. K. Ogawa et al., “Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment”, Computational Materials Science, 45, 1031–1042, 2009.
46. J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby, “A new finite element model for welding heat source”, Metall. Trans. A, 15, pp. 299-305, 1984.
47. American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method ASTM Standard E837-99, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 675–684, (2001).

48. Metals Handbook, 9th edn, Vol. 3, American Society for Metals, Ohio, 1980.
49. F. P. Incropera and D. P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Singapore, 1985.
50. A. J. Chapman, Fundamentals of Heat Transfer, Macmillan Publishing Company, New York, 1987.
51. E. Kula and V. Weiss, Residual Stress and Stress Relaxation, Proceedings of the Twenty-eighth Sagamore Army Materials Research Conference Plenum Press, New York, 1982.
52. P. Tekriwal and J. Mazumder, “Transient and residual thermal strain-stress analysis of gmaw” ASME J. of Engineering Materials and Technology, 113, pp. 336-343, 1991.
53. METEQ ver1.2 CD-ROM, The Society of Material Science, Japan , 2002
54. L.M. Chong, Predicting welding hardness [D]. M, Eng, Thesis. Ottawa, Canada: Carleton University, pp. 52-57, 1982.
55. D. Deng., “FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation”, Materials and Design, 30, pp. 359-366, 2009.
56. Y.C. Lin and K. H. Lee, “Effect of preheating on the residual stress in type 304 stainless steel weldment”, Journal of Materials Processing Technology, 63, pp. 797-801, 1997.
57. S. A. A. Akbari Mousavi, R. Miresmaeili, “Experimental and numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding

process for 304L stainless steel”, Journal of Materials Processing Technology, 208, pp. 383-394, 1997.

58. K. H. Chang, C. H. Lee, “Finite element analysis of the residual stress in T-joint fillet welds made of similar and dissimilar steels”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 41, pp. 250-258, 2009.

59. C. H. Lee, K. H. Chang, “Numerical analysis of residual stresses in welds of similar or dissimilar steel weldments under superimposed tensile loads”, Computational Materials Science, 40, 548-556, 2007.



## 附 錄

表 3.1 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼之化學成份 (wt-%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr
SUS304	0.08	0.75	2	0.045	0.03	18
S15C	0.15	0.22	0.41	0.021	0.029	0.15

表 3.2 SUS304 不銹鋼與 S15C 碳鋼在常溫下之物理性質與機械性質

Steel	Yield Stress (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Thermal Conductivity (W/m-K)	Thermal Expansion ( $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ )
SUS304	246	193	16.2	17.2
S15C	315	205	51.9	11.9

表 4.1 虛擬材料表

Material	E	$\alpha$	K	$\sigma_y$	Material	E	$\alpha$	K	$\sigma_y$
1	X	X	X	X	16	X	I	I	X
2	I	X	X	X	17	X	I	D	X
3	D	X	X	X	18	X	D	I	X
4	X	I	X	X	19	X	D	D	X
5	X	D	X	X	20	I	I	I	X
6	X	X	I	X	21	I	I	D	X
7	X	X	D	X	22	I	D	I	X
8	I	I	X	X	23	I	D	D	X
9	I	D	X	X	24	D	I	I	X
10	I	X	I	X	25	D	I	D	X
11	I	X	D	X	26	D	D	I	X
12	D	I	X	X	27	D	D	D	X
13	D	D	X	X	28	X	X	X	I
14	D	X	I	X	29	X	X	X	D
15	D	X	D	X	-	-	-	-	-

[註: 編號1為 S15C, X=無變動, I= 增加10%, D=減少10%]

表 4.2 虛擬材料之殘留應力分析結果

材料編號	最大殘留應力 (MPa)	變動 (MPa)	拉伸區 (mm)	變動 (mm)	備註
1	298	0	16.3	0	S15C
2	298	0	17.2	0.9	I <sub>E</sub>
3	298	0	15.4	-0.9	D <sub>E</sub>
4	304	6	17.3	1	I <sub>α</sub>
5	292	-6	15.3	-1	D <sub>α</sub>
6	292	-6	16.2	-0.1	I <sub>K</sub>
7	304	6	16.4	0.1	D <sub>K</sub>
8	305	7	18	1.7	I <sub>E</sub> I <sub>α</sub>
9	292	-6	16.2	-0.1	I <sub>E</sub> D <sub>α</sub>
10	292	-6	17	0.7	I <sub>E</sub> I <sub>K</sub>
11	305	7	17.2	0.9	I <sub>E</sub> D <sub>K</sub>
12	305	7	16.2	-0.1	D <sub>E</sub> I <sub>α</sub>
13	292	-6	14.3	-2	D <sub>E</sub> D <sub>α</sub>
14	293	-5	15.1	-1.2	D <sub>E</sub> H <sub>K</sub>
15	305	7	15.5	-0.8	D <sub>E</sub> D <sub>K</sub>
16	299	1	17	0.7	I <sub>α</sub> I <sub>K</sub>
17	312	14	17.2	0.9	I <sub>α</sub> D <sub>K</sub>
18	287	-11	15.1	-1.2	D <sub>α</sub> I <sub>K</sub>
19	298	0	15.4	-0.9	D <sub>α</sub> D <sub>K</sub>
20	299	1	17.9	1.6	I <sub>E</sub> I <sub>α</sub> I <sub>K</sub>
21	312	14	18.1	1.8	I <sub>E</sub> I <sub>α</sub> D <sub>K</sub>
22	287	-11	16.1	-0.2	I <sub>E</sub> D <sub>α</sub> I <sub>K</sub>
23	298	0	16.3	0	I <sub>E</sub> D <sub>α</sub> D <sub>K</sub>
24	299	1	16.1	-0.2	D <sub>E</sub> I <sub>α</sub> I <sub>K</sub>
25	312	14	16.3	0	D <sub>E</sub> I <sub>α</sub> D <sub>K</sub>
26	287	-11	14.2	-2.1	D <sub>E</sub> D <sub>α</sub> I <sub>K</sub>
27	298	0	14.4	-1.9	D <sub>E</sub> D <sub>α</sub> D <sub>K</sub>
28	352	54	15.3	-1.0	I <sub>Y</sub>
29	244	-54	17.3	1.0	D <sub>Y</sub>

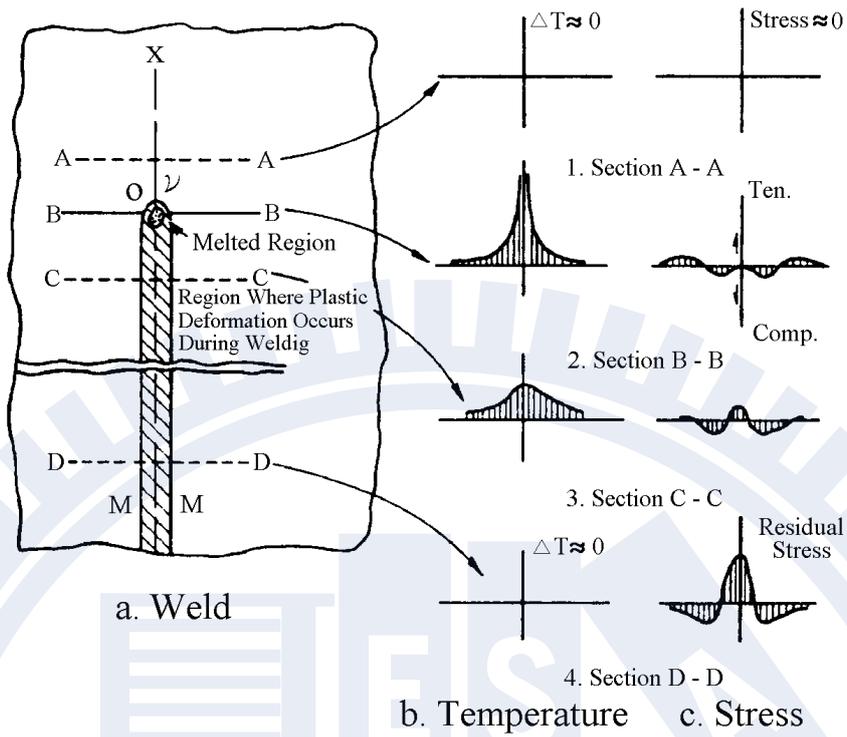


圖1.1 銲接溫度與熱應力變化之示意圖[1-4]

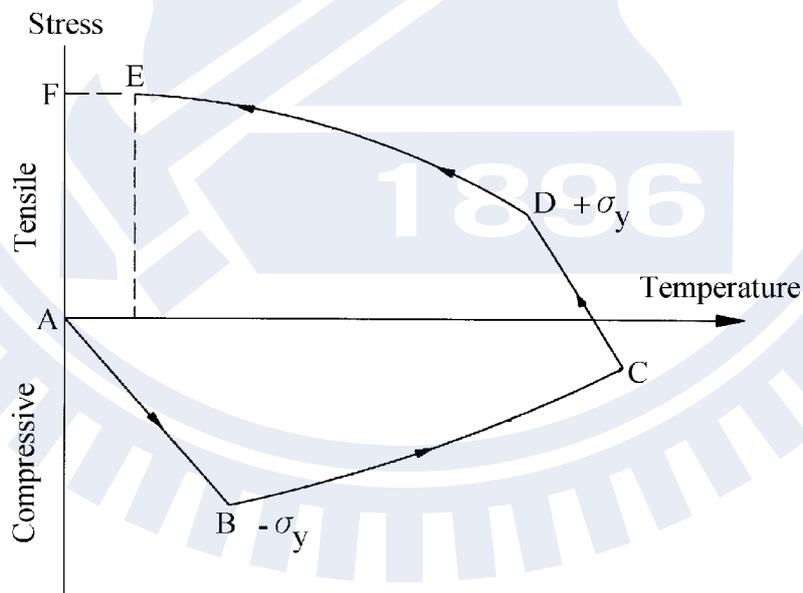


圖1.2 銲接殘留應力形成之示意圖[9-13]

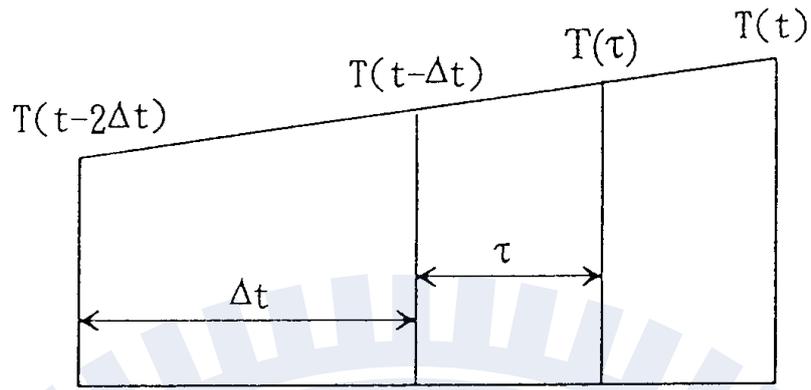


圖 2.1 以外插方式求瞬間溫度之示意圖

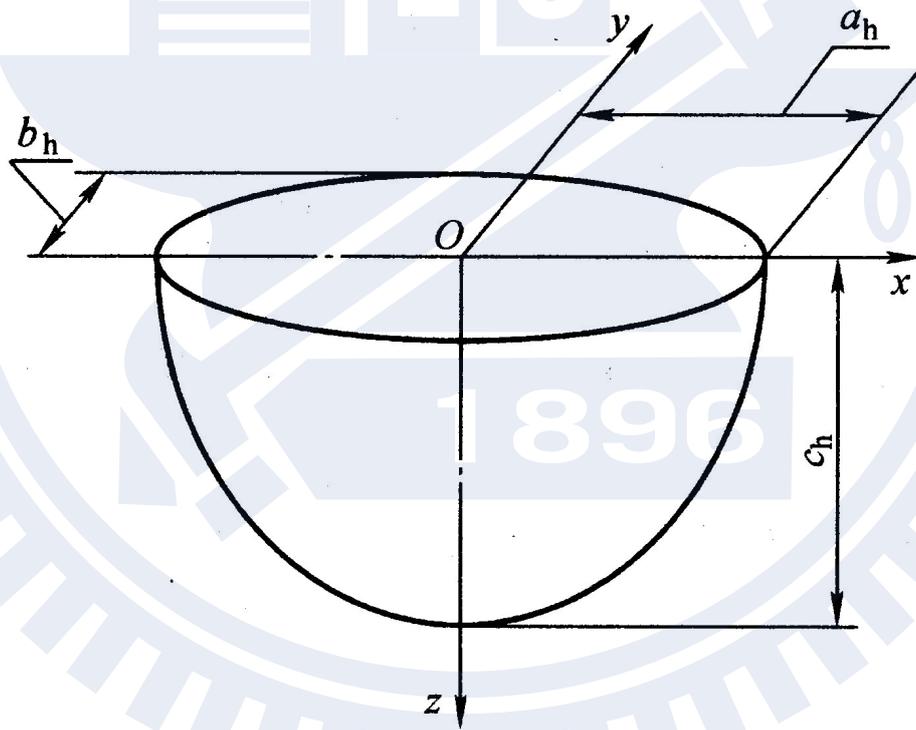


圖2.2 半橢球熱源分佈示意圖

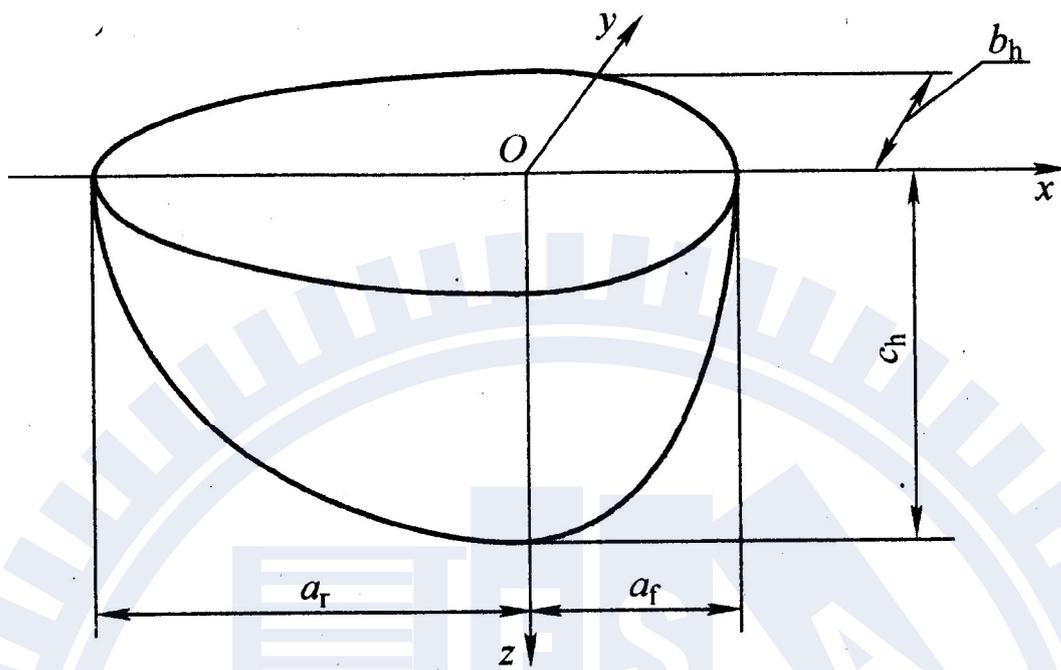


圖2.3 雙橢球移動熱源分佈示意圖

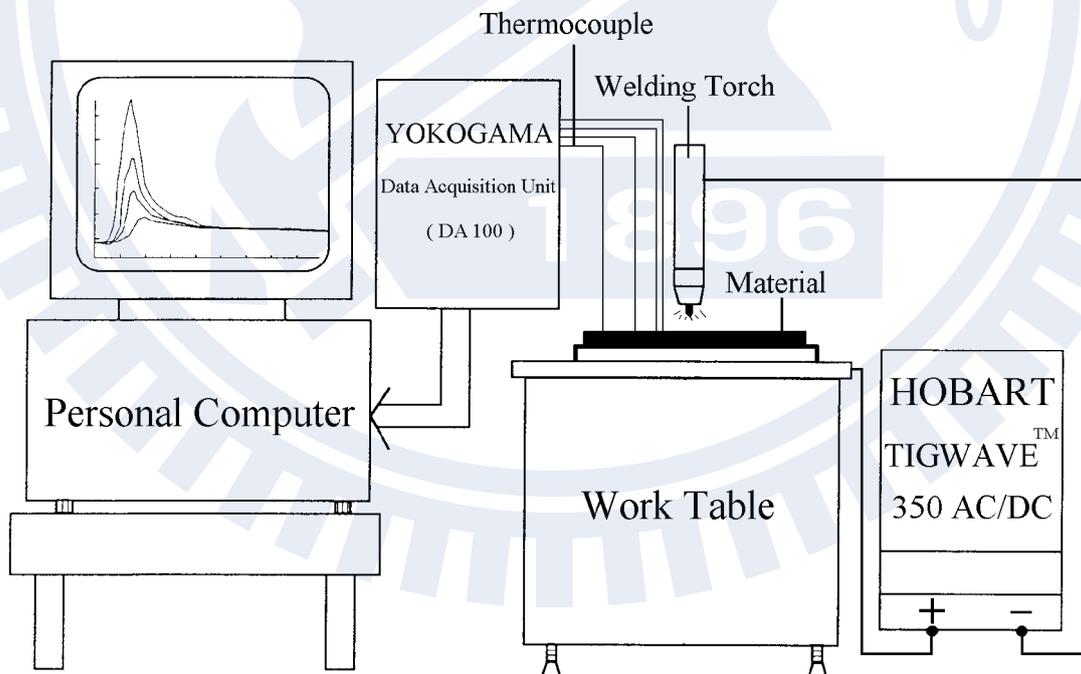


圖 3.1 熱循環記錄設備之示意圖

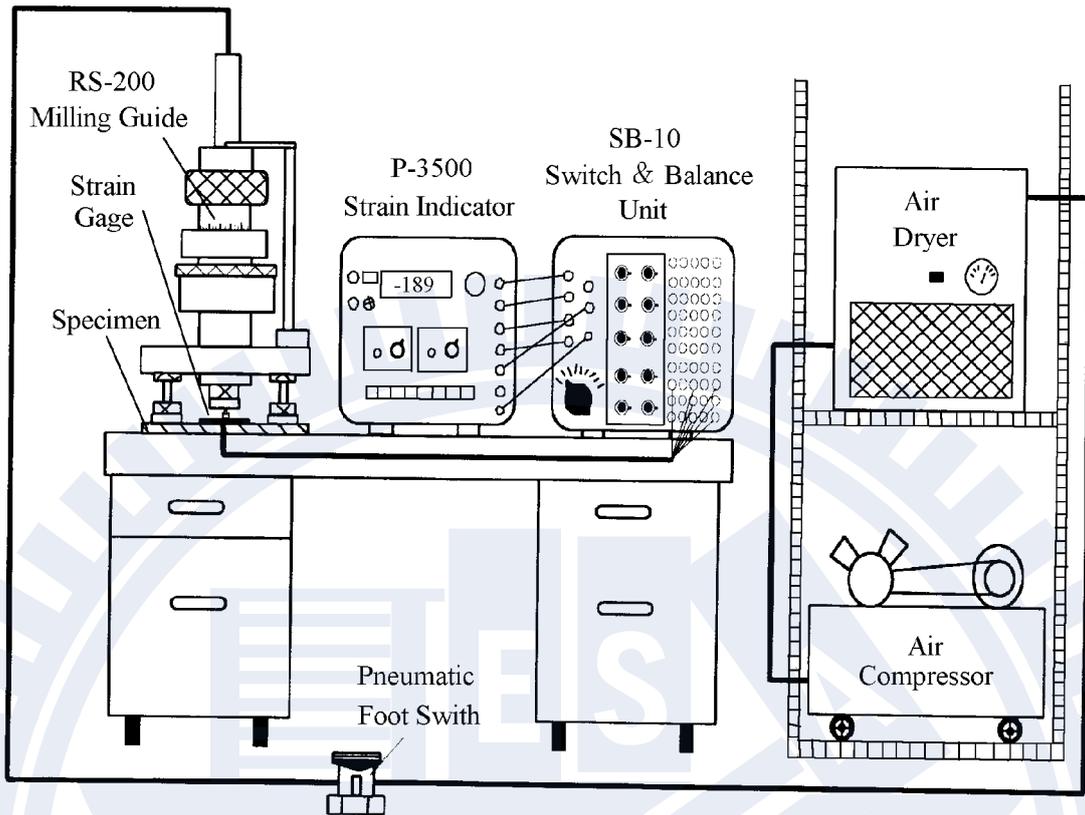


圖 3.2 殘留應力量測設備之示意圖

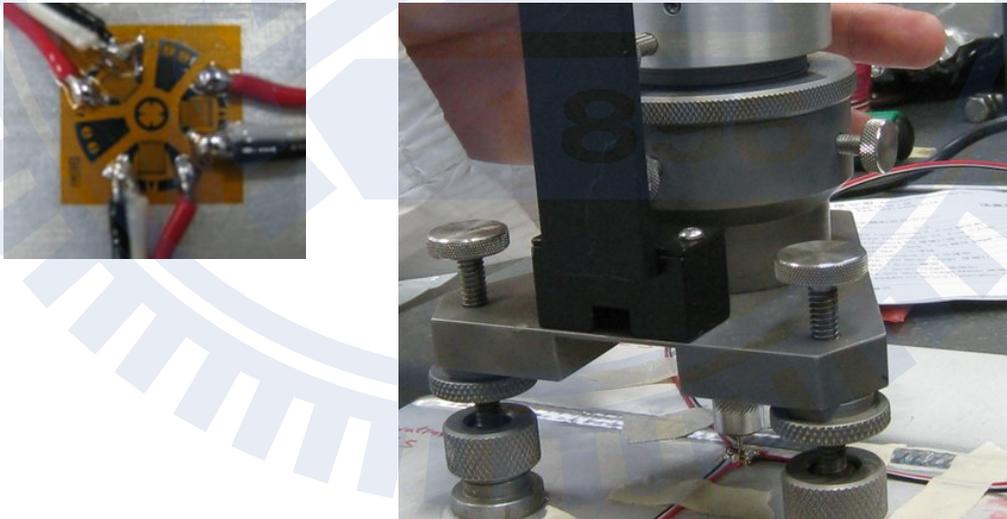


圖 3.3 MM EA-062RE-120 玫瑰形式應變計

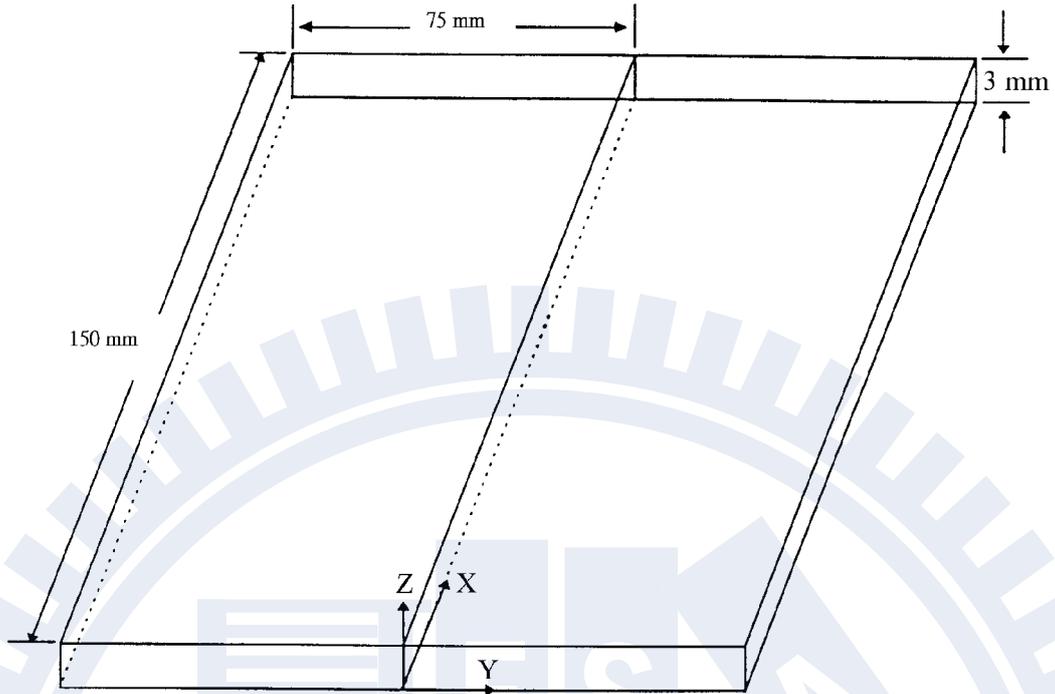


圖 3.4 對接銲板幾何尺寸之示意圖

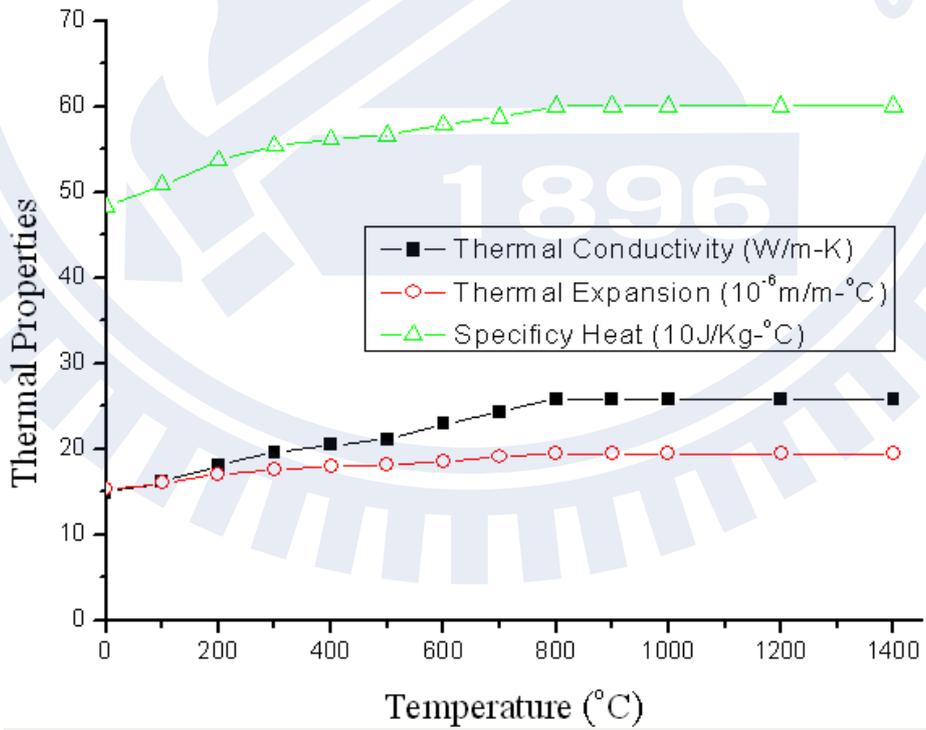


圖 3.5 SUS 304 不銹鋼之熱物理性質與溫度變化之關係圖[20,48-50]

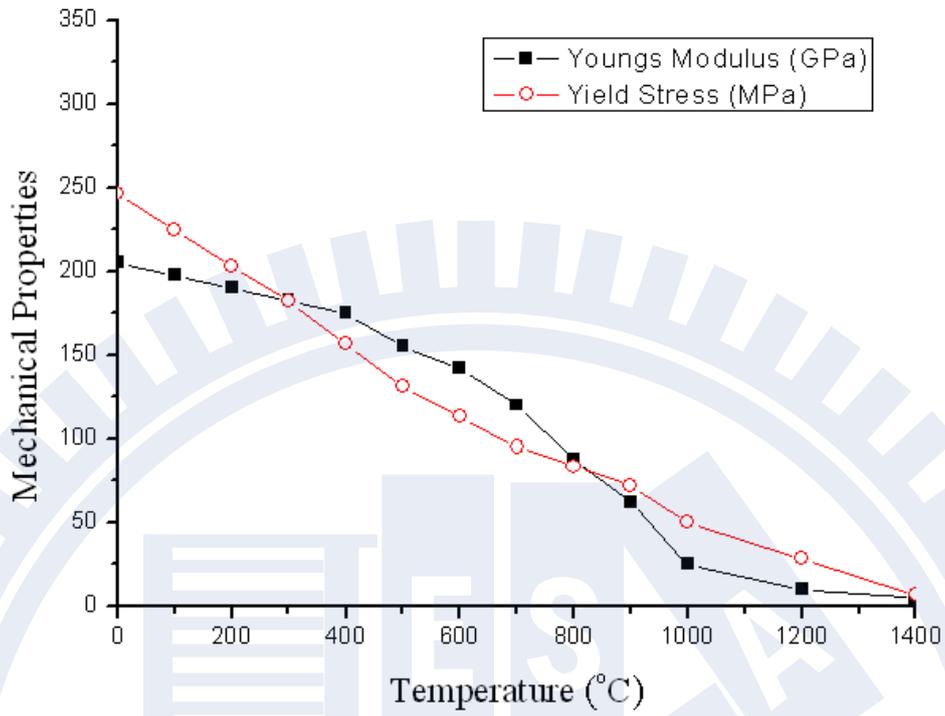


圖 3.6 SUS 304 不銹鋼之機械性質與溫度變化之關係圖[20,51]

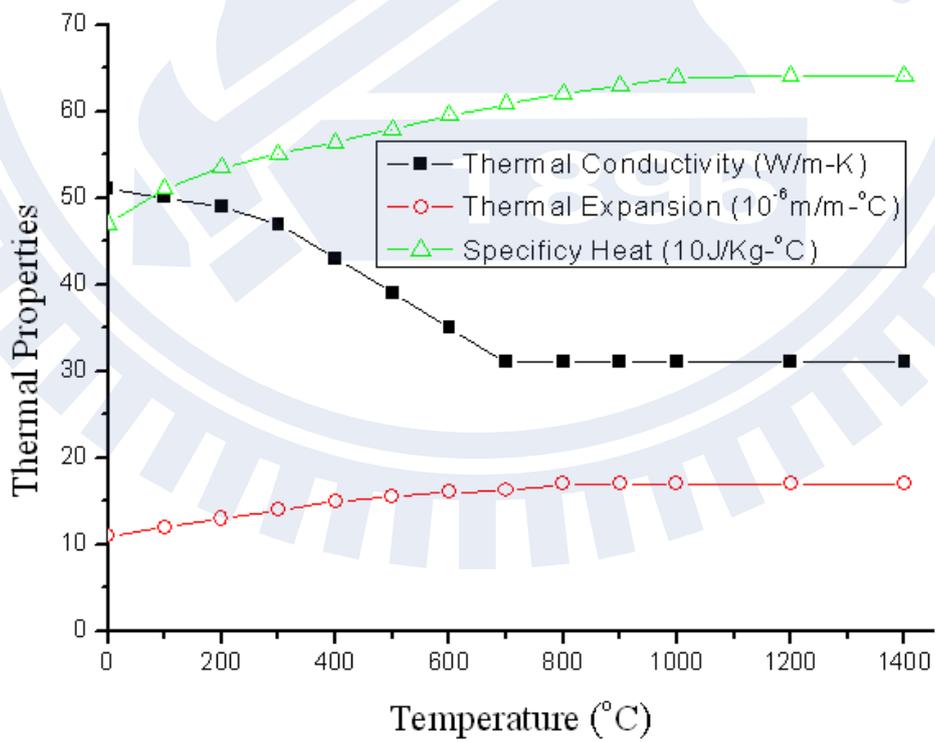


圖 3.7 S15C 碳鋼之熱物理性質與溫度變化之關係圖[53]

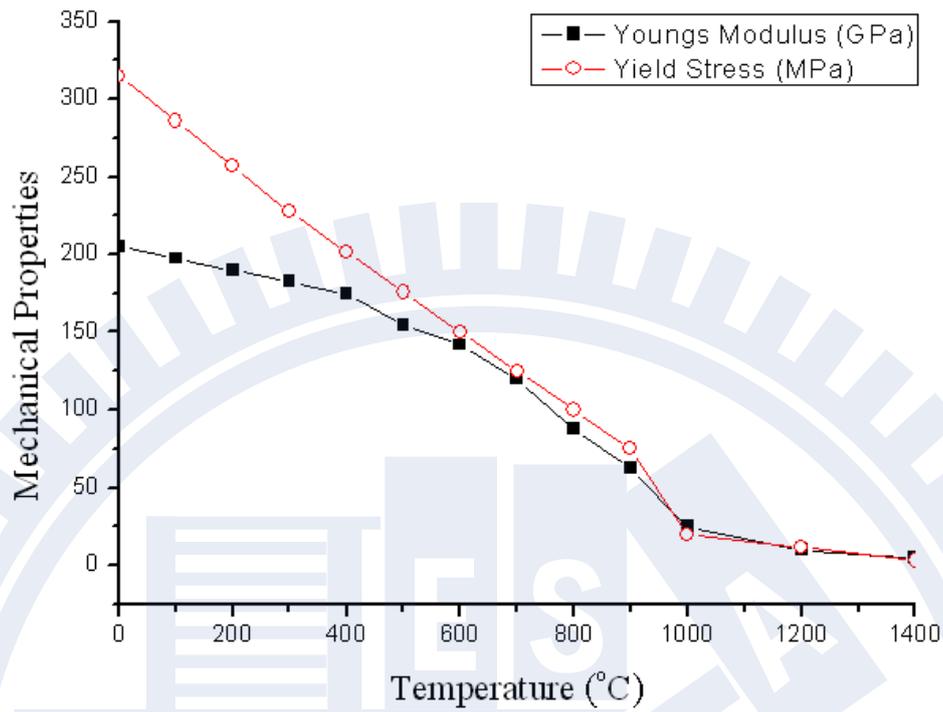


圖 3.8 S15C 碳鋼之機械性質與溫度變化之關係圖[53]

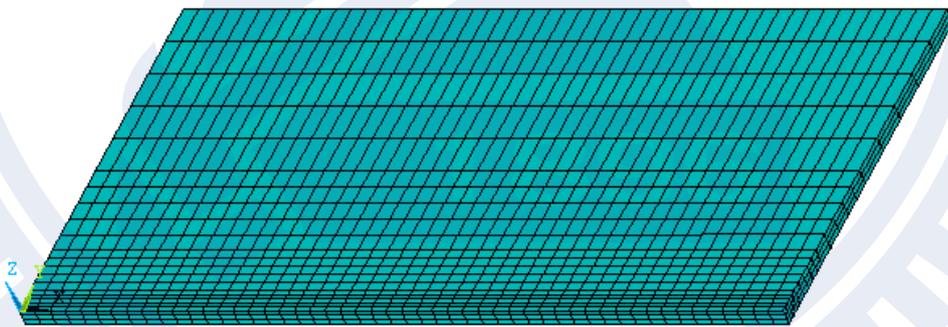


圖 3.9 同種材質之 3 維銲接平板之有限元素網格劃分圖

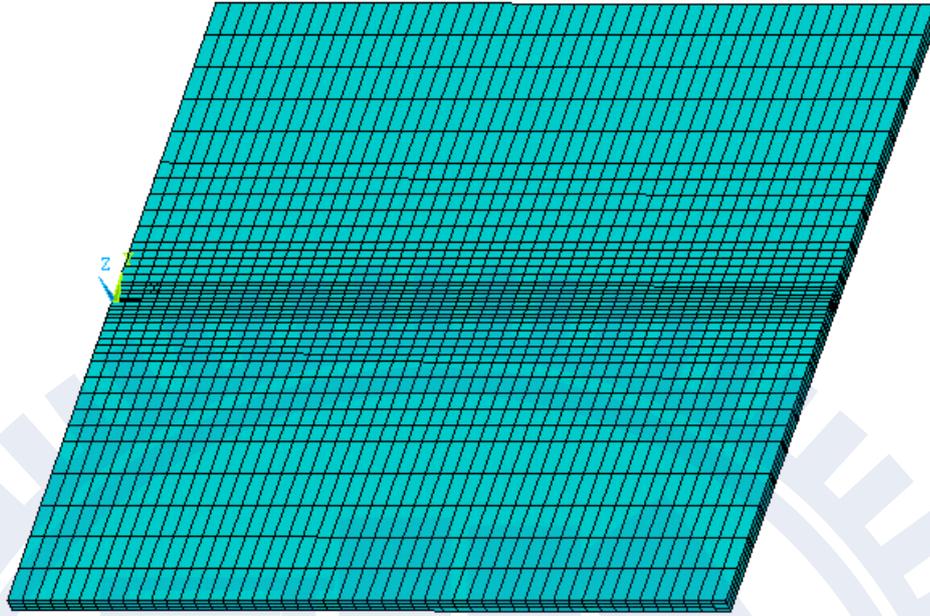


圖 3.10 異種材質之 3 維銲接平板之有限元素網格劃分圖

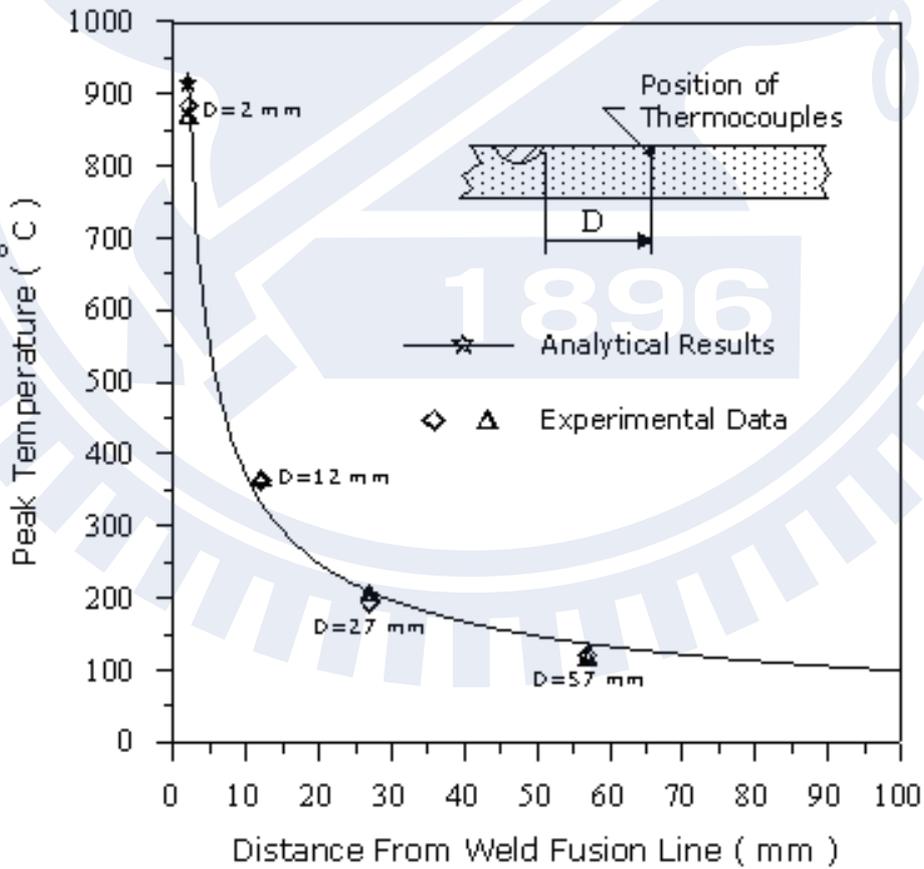


圖 4.1 同種 304 不銹鋼銲件峰值溫度分佈圖

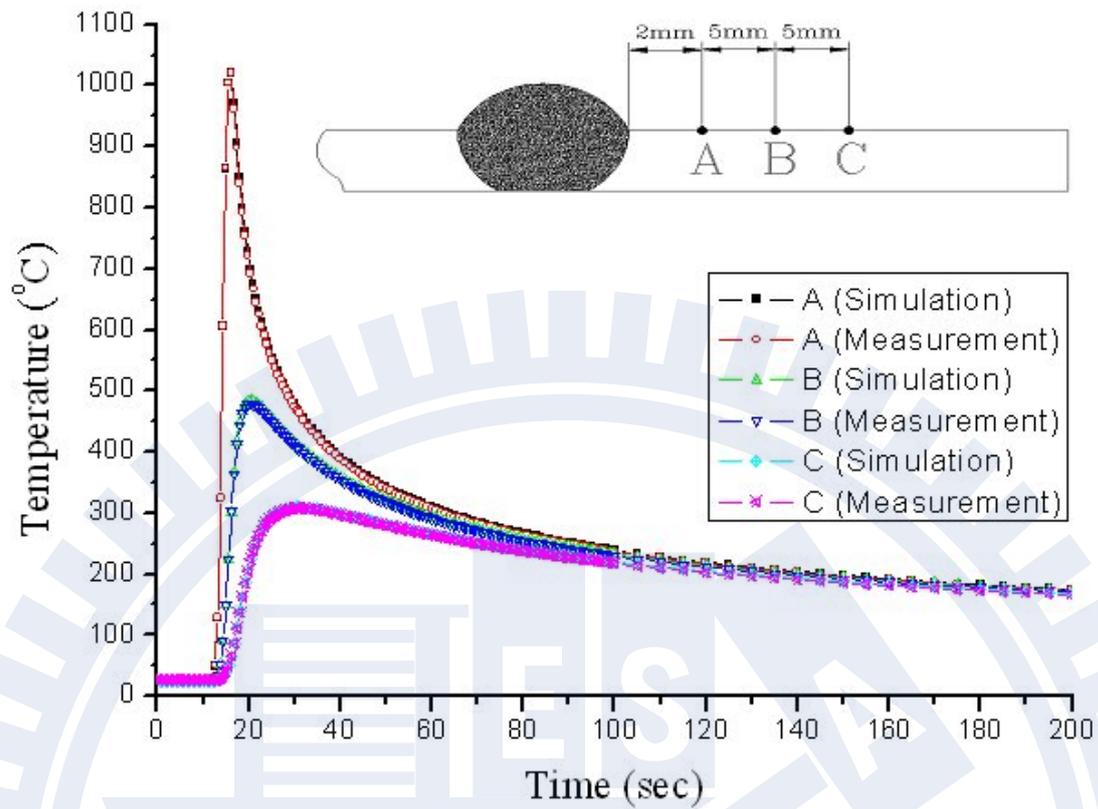


圖 4.2 同種 304 不銹鋼銲接熱循環曲線圖

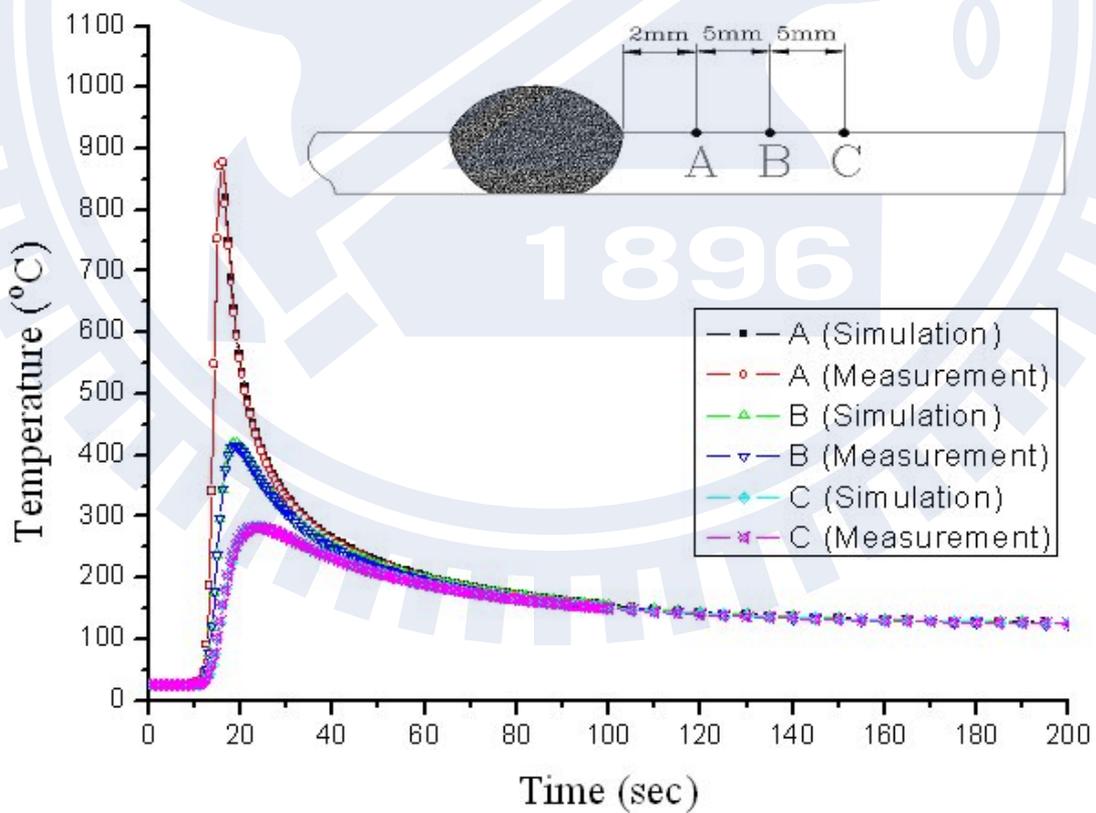


圖 4.3 同種 S15C 碳鋼銲接熱循環曲線圖

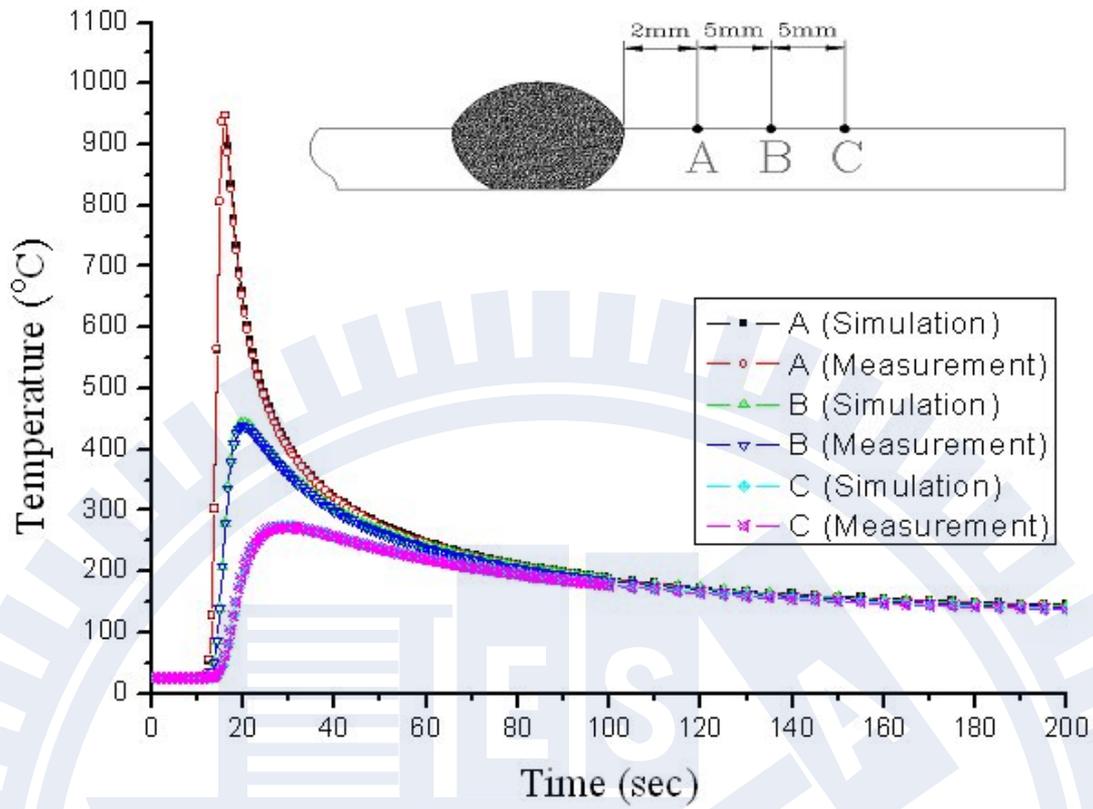


圖 4.4 異種 304 不銹鋼銲接熱循環曲線圖

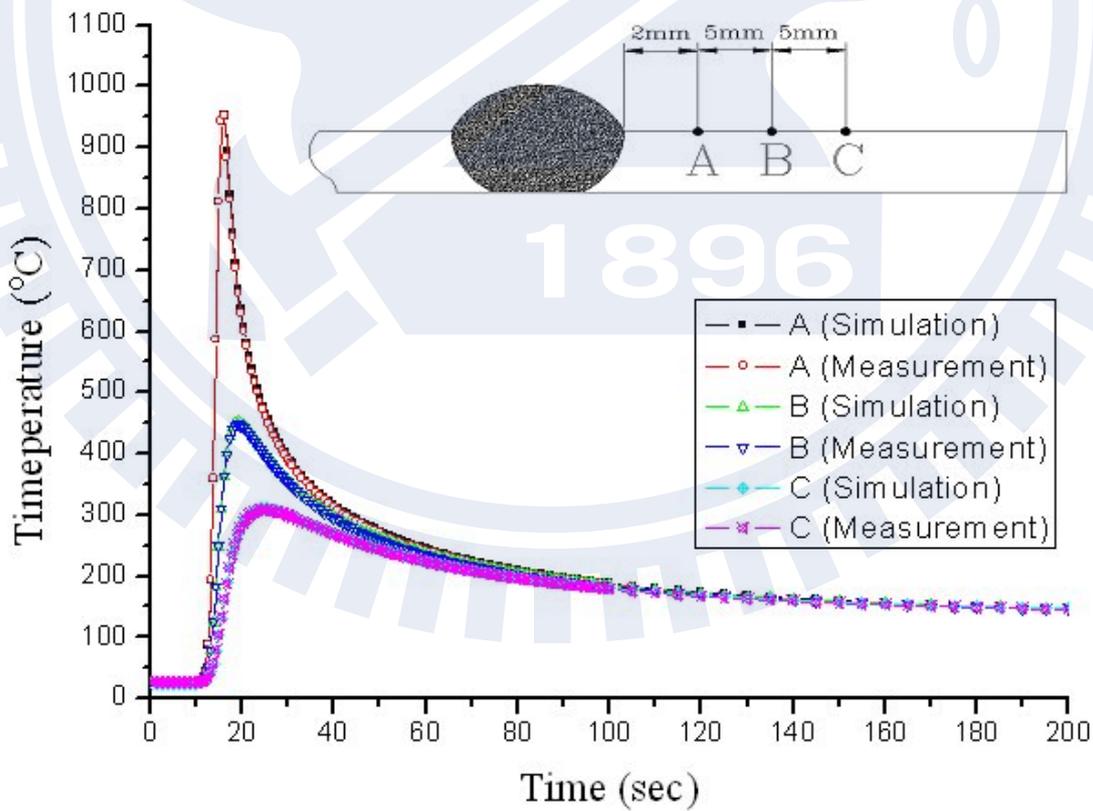


圖 4.5 異種 S15C 碳鋼銲接熱循環曲線圖

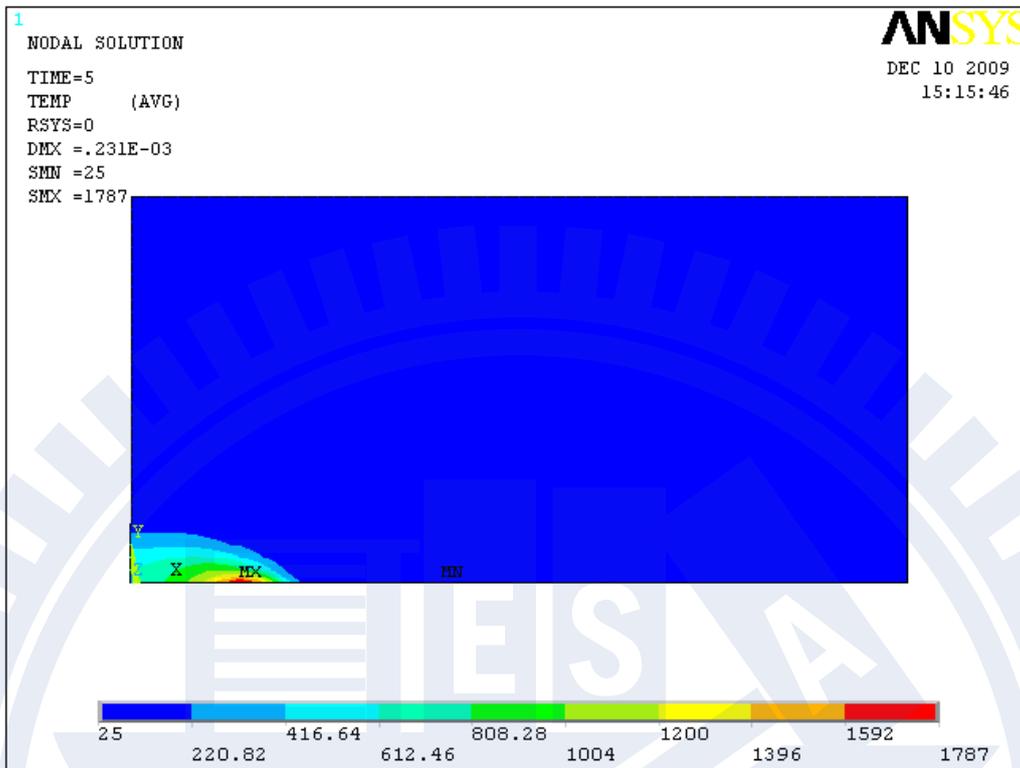


圖 4.6 SUS304 不銹鋼銲接時間 5 秒時之溫度場狀態圖

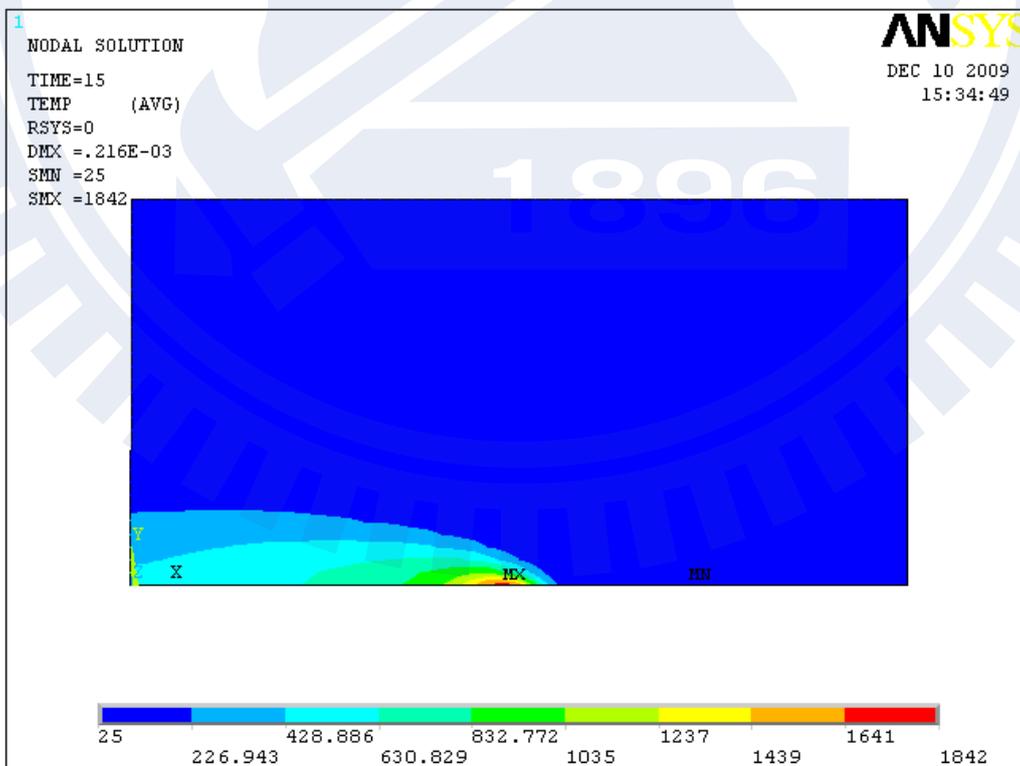


圖 4.7 SUS304 不銹鋼銲接時間 15 秒時之溫度場狀態圖

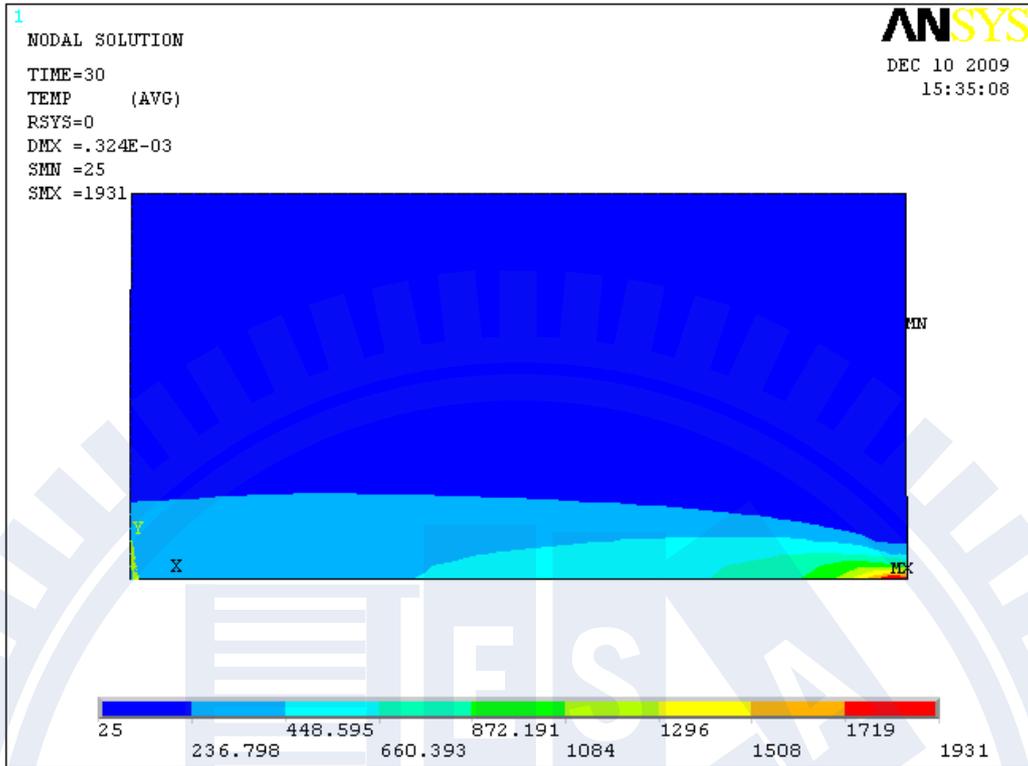


圖 4.8 SUS304 不銹鋼銲接時間 30 秒時之溫度場狀態圖

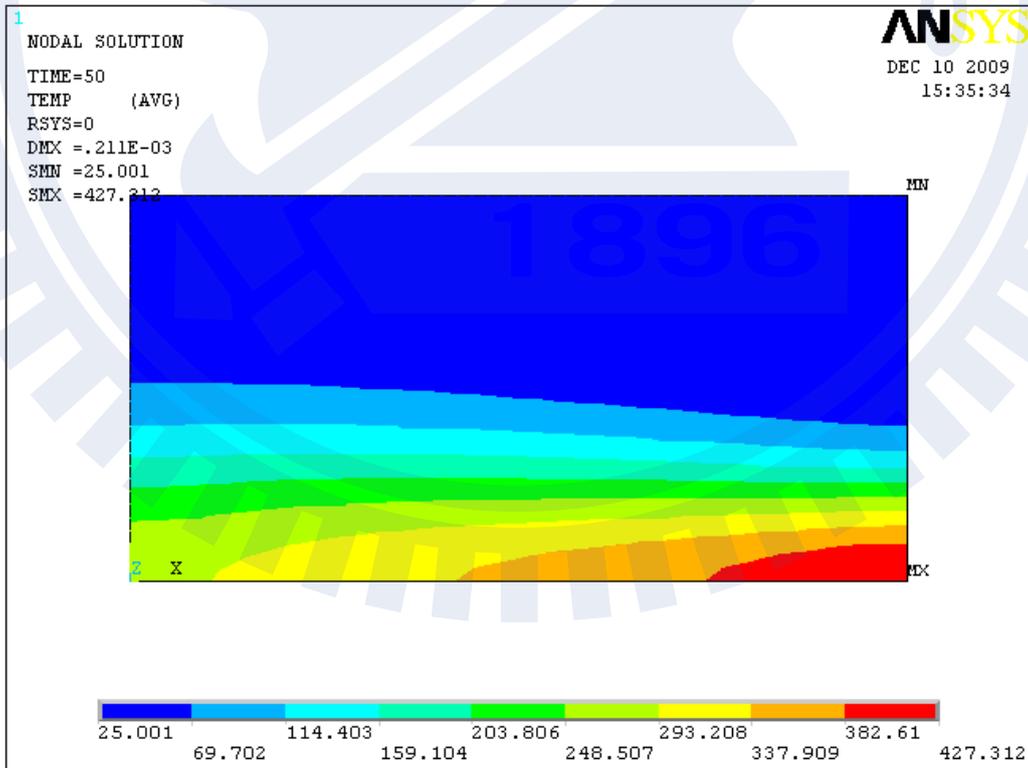


圖 4.9 SUS304 不銹鋼銲接時間 50 秒時之溫度場狀態圖

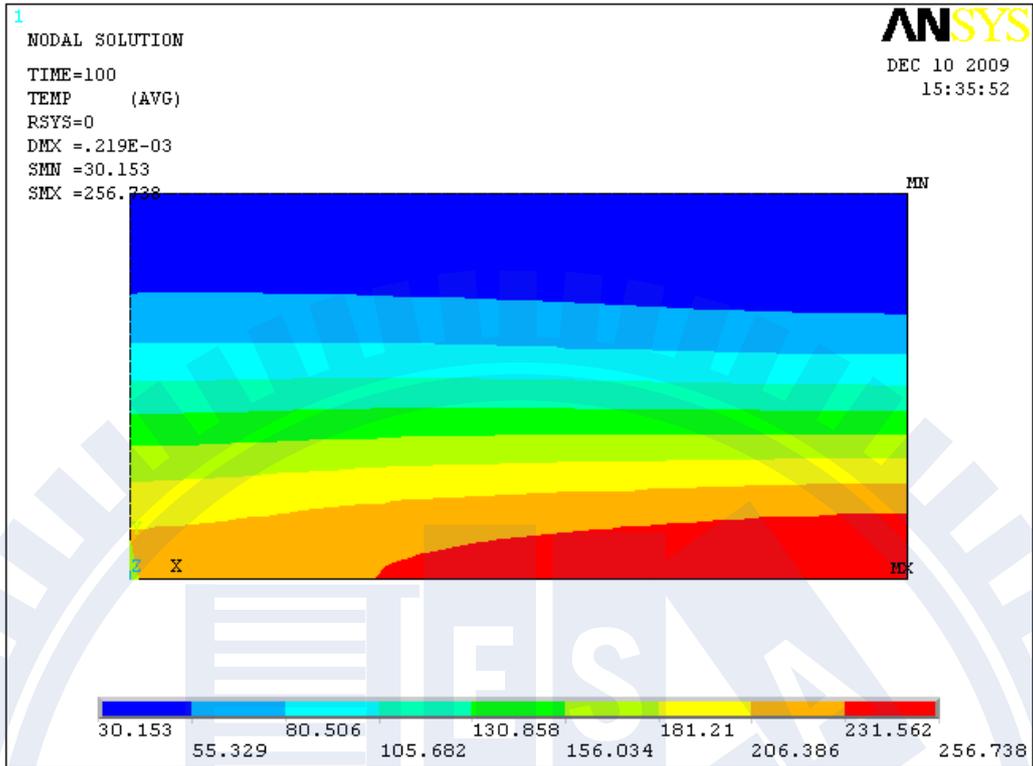


圖 4.10 SUS304 不銹鋼銲接時間 100 秒時之溫度場狀態圖

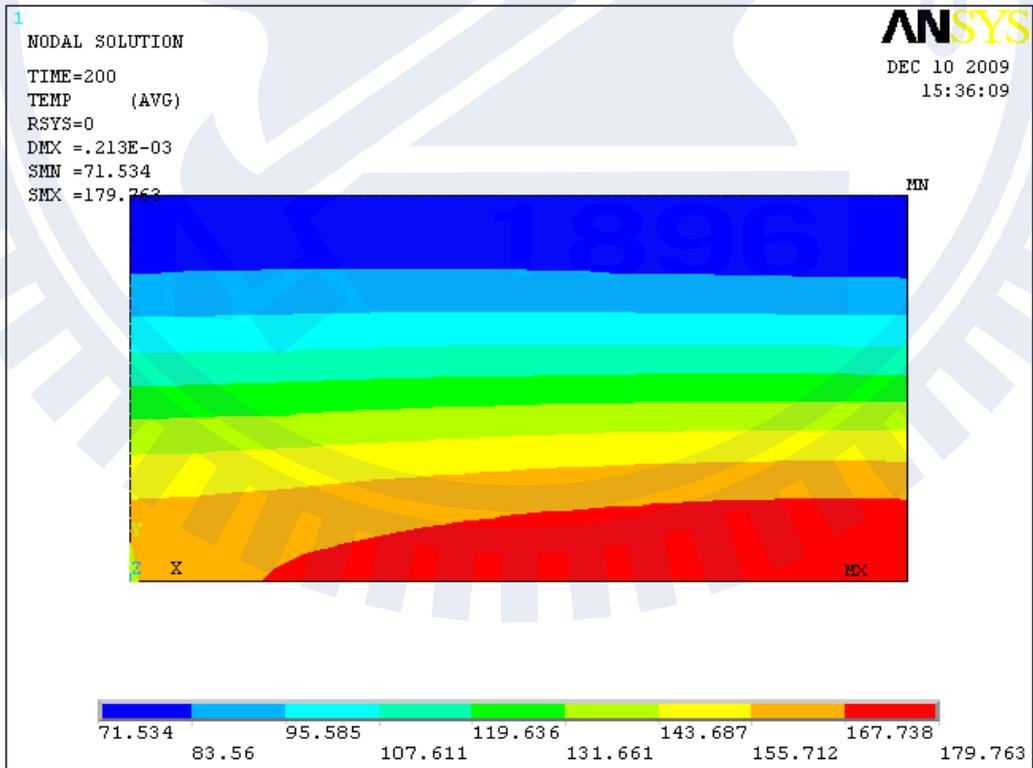


圖 4.11 SUS304 不銹鋼銲接時間 200 秒時之溫度場狀態圖

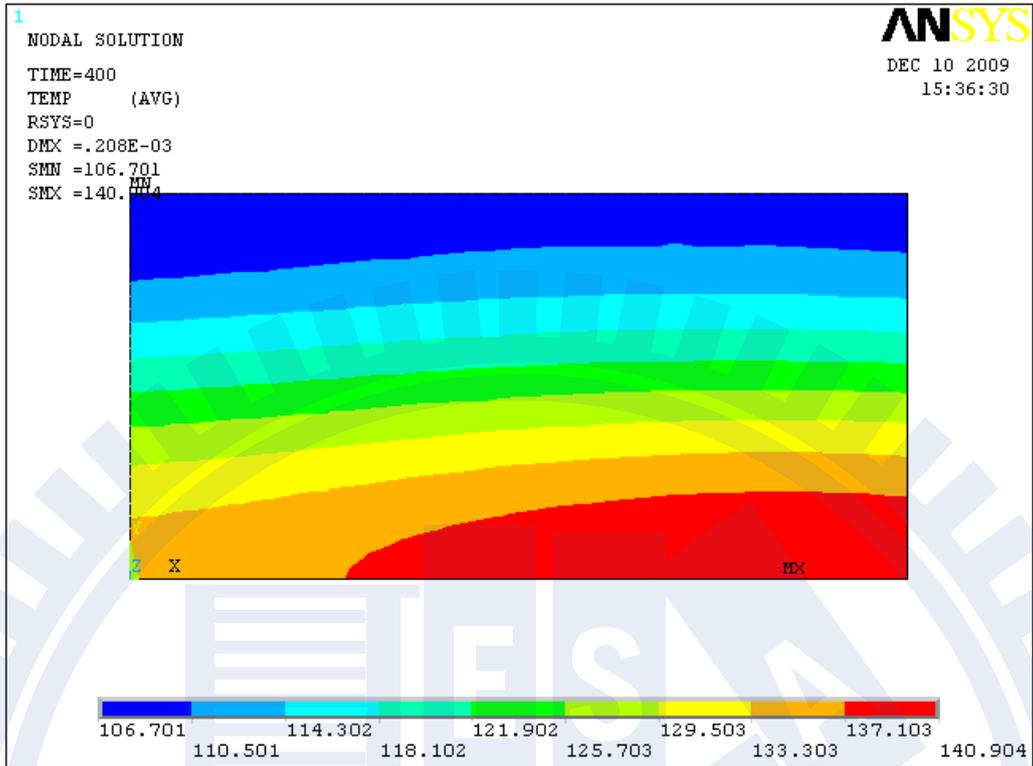


圖 4.12 SUS304 不銹鋼銲接時間 400 秒時之溫度場狀態圖

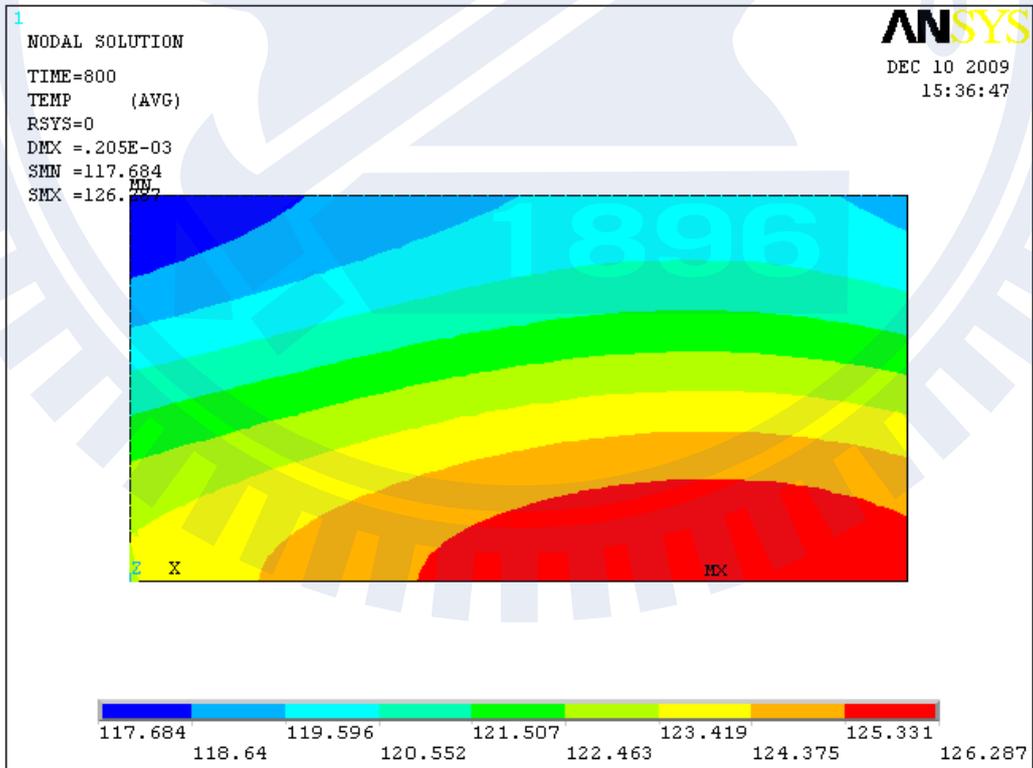


圖 4.13 SUS304 不銹鋼銲接時間 800 秒時之溫度場狀態圖

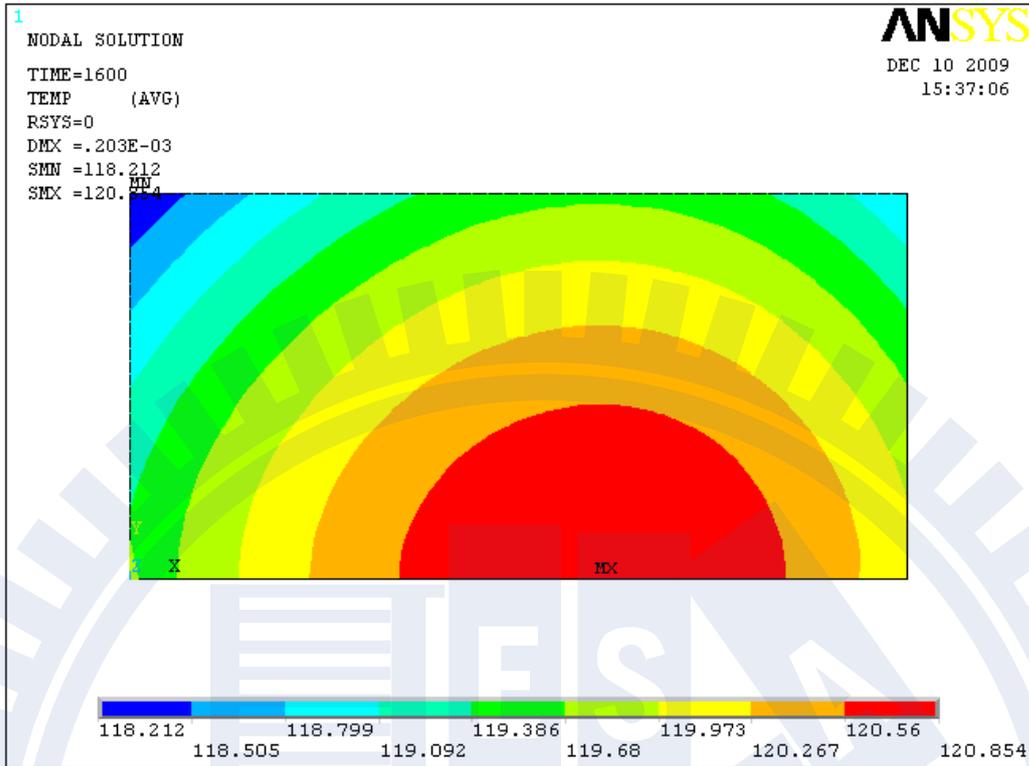


圖 4.14 SUS304 不銹鋼銲接時間 1600 秒時之溫度場狀態圖

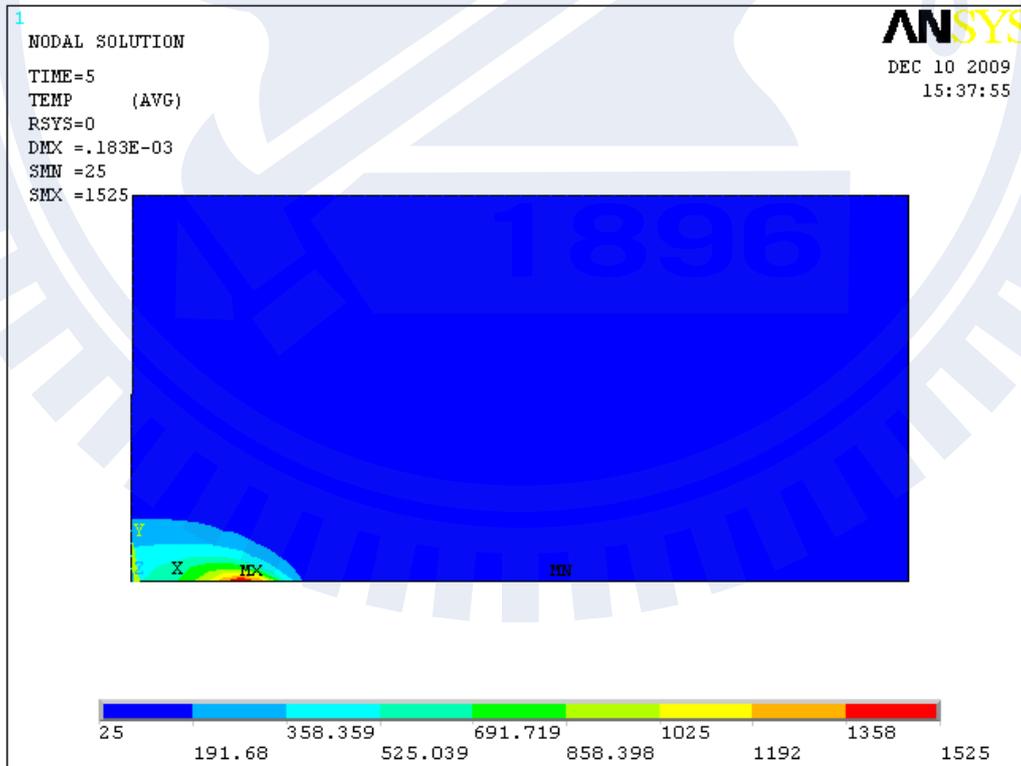


圖 4.15 S15C 碳鋼銲接時間 5 秒時之溫度場狀態圖

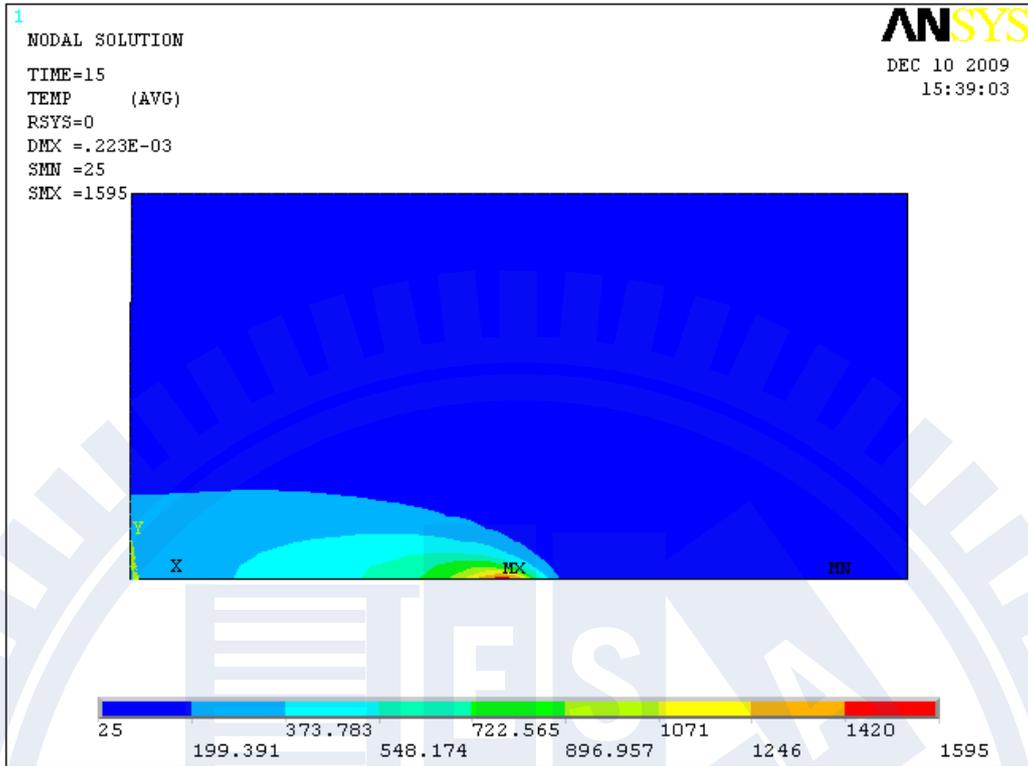


圖 4.16 S15C 碳鋼銲接時間 15 秒時之溫度場狀態圖

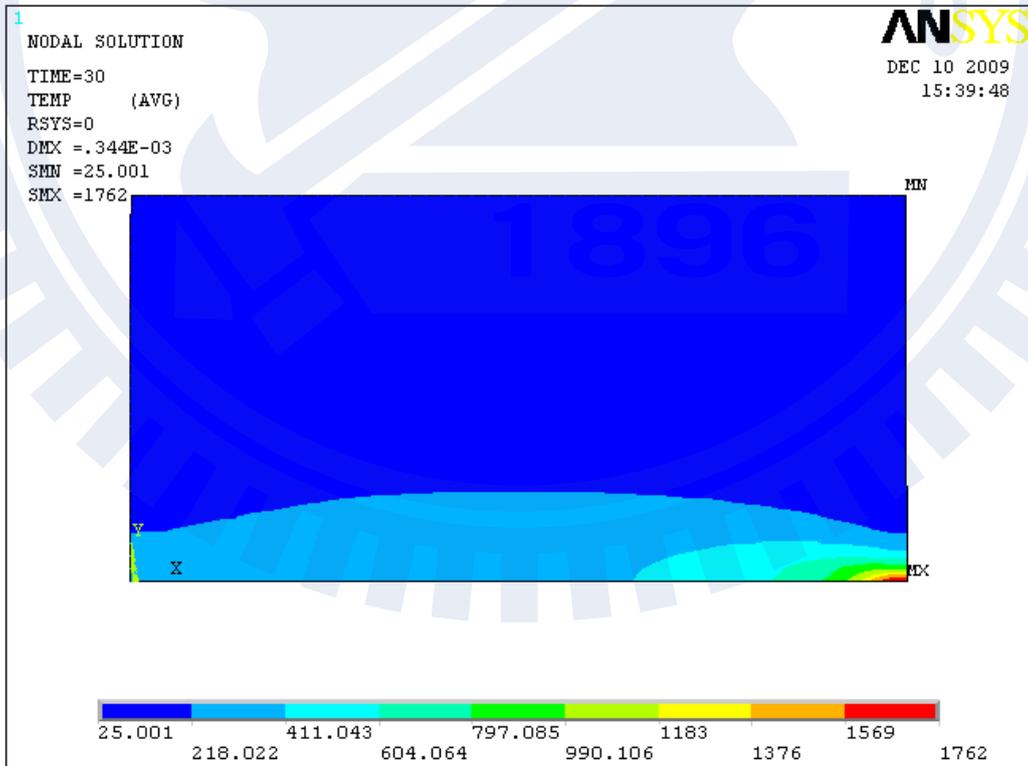


圖 4.17 S15C 碳鋼銲接時間 30 秒時之溫度場狀態圖

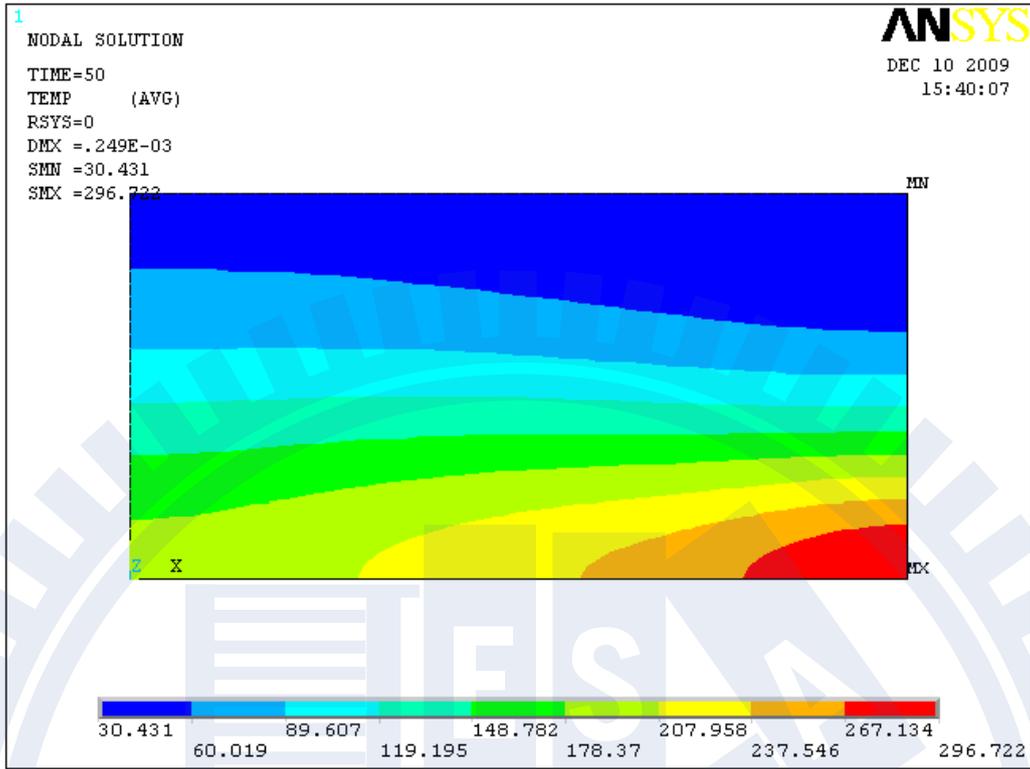


圖 4.18 S15C 碳鋼銲接時間 50 秒時之溫度場狀態圖

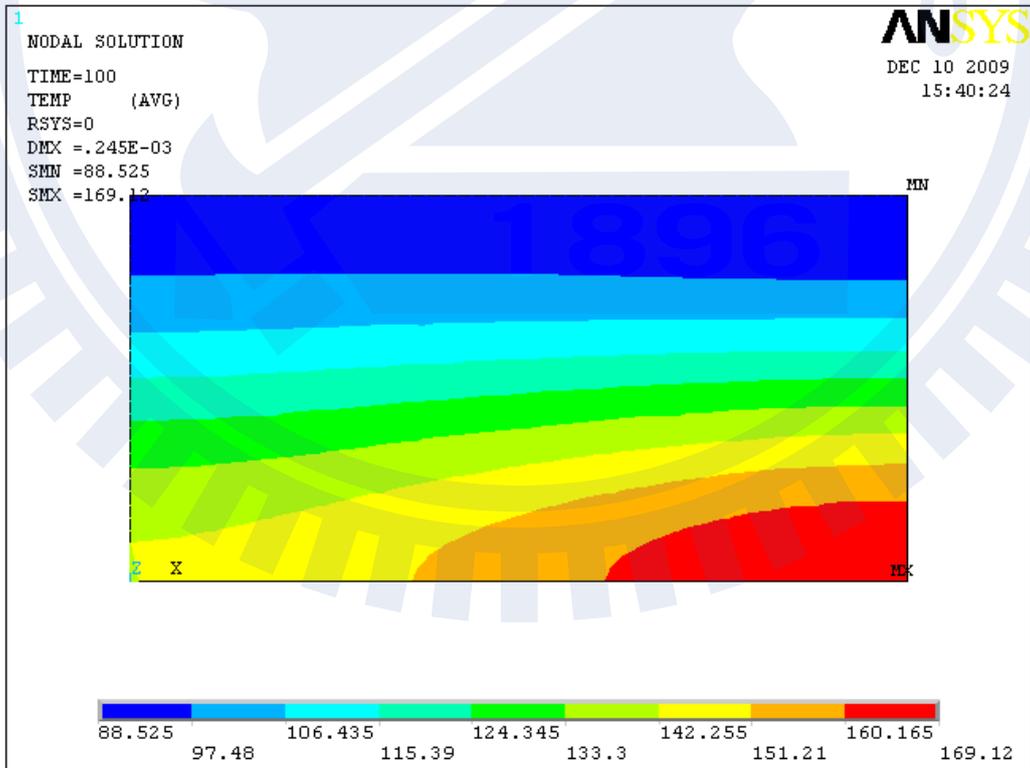


圖 4.19 S15C 碳鋼銲接時間 100 秒時之溫度場狀態圖

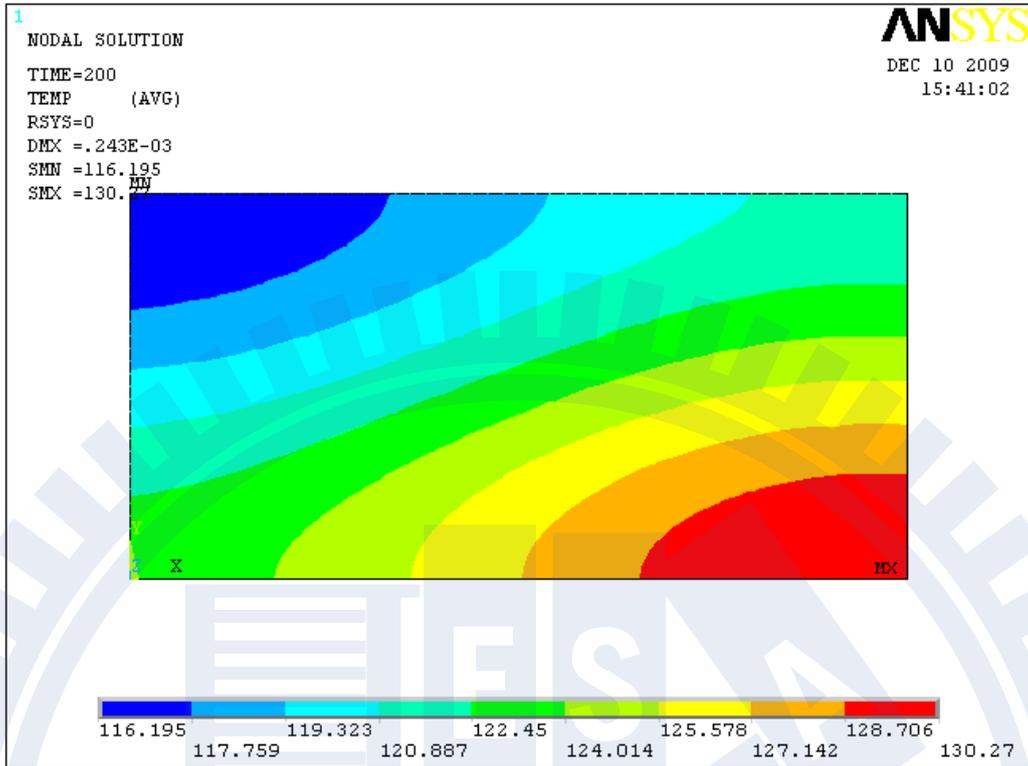


圖 4.20 S15C 碳鋼銲接時間 200 秒時之溫度場狀態圖

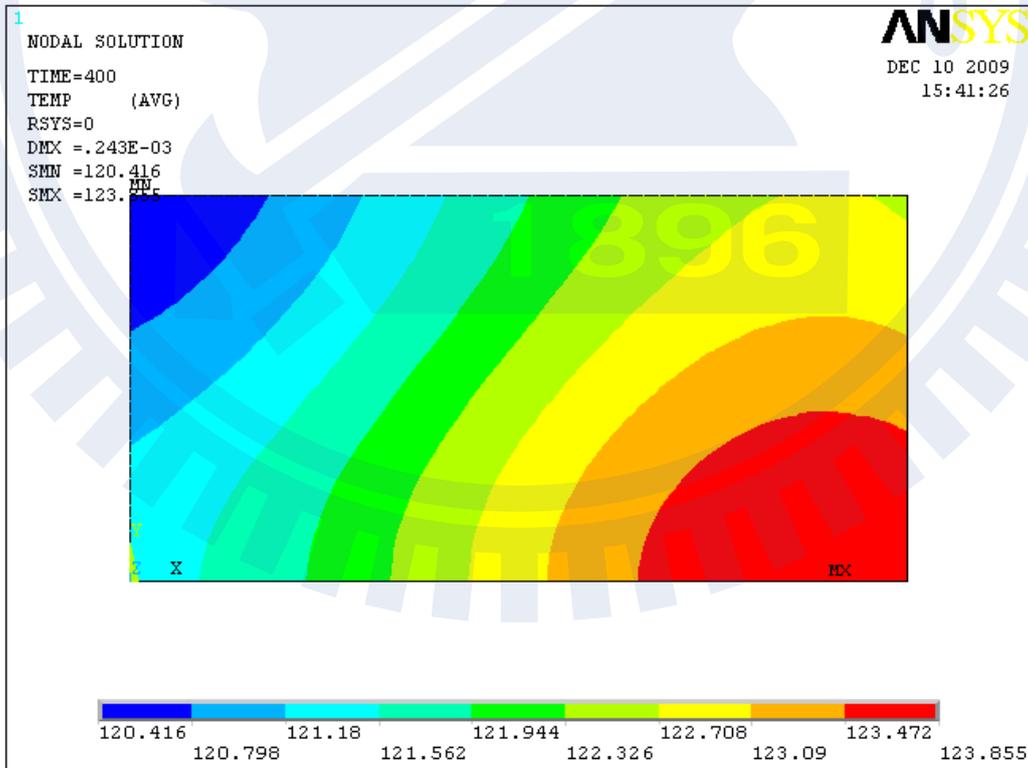


圖 4.21 S15C 碳鋼銲接時間 400 秒時之溫度場狀態圖

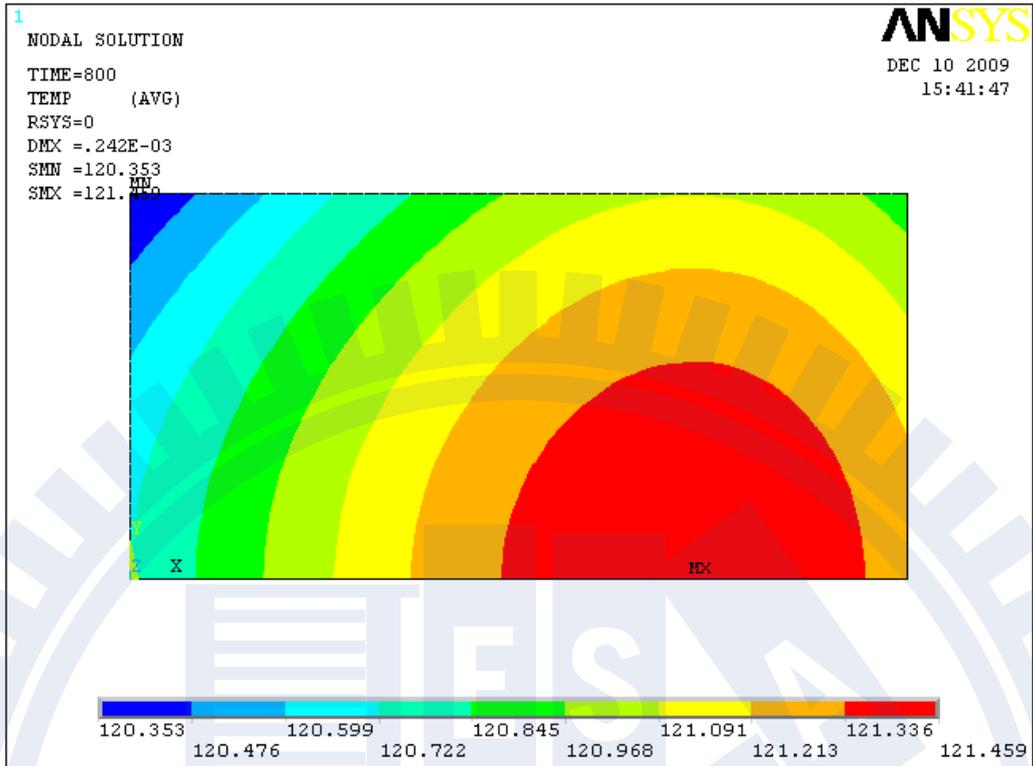


圖 4.22 S15C 碳鋼銲接時間 800 秒時之溫度場狀態圖

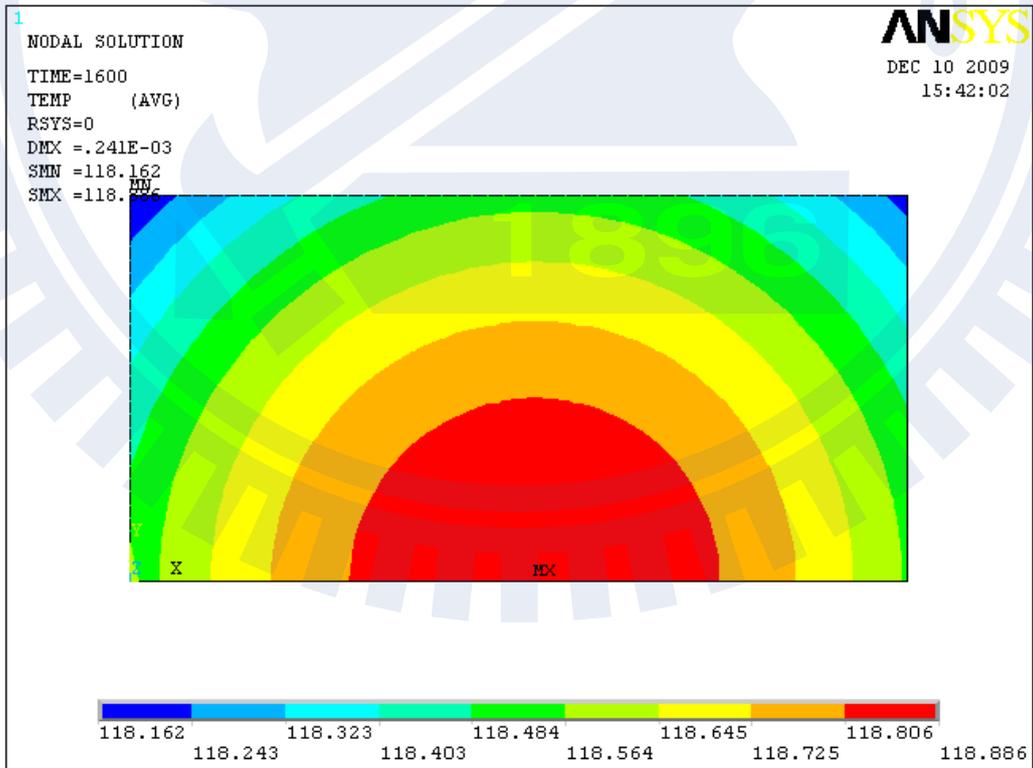


圖 4.23 S15C 碳鋼銲接時間 1600 秒時之溫度場狀態圖

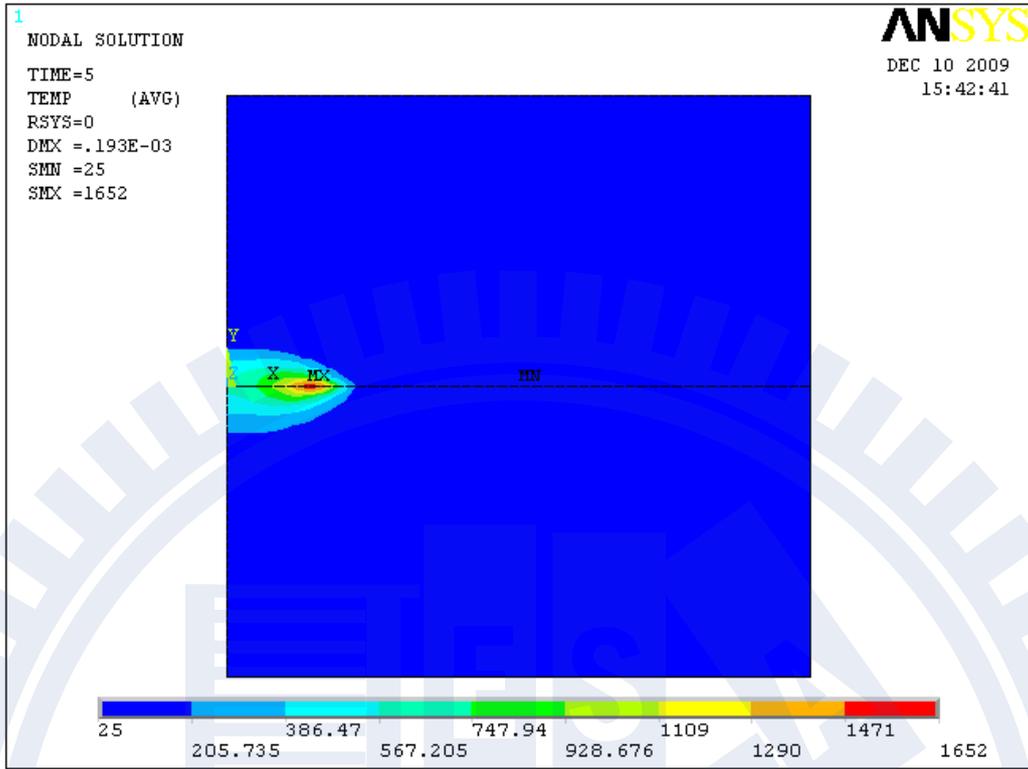


圖 4.24 異種銲接時間 5 秒時之溫度場狀態圖

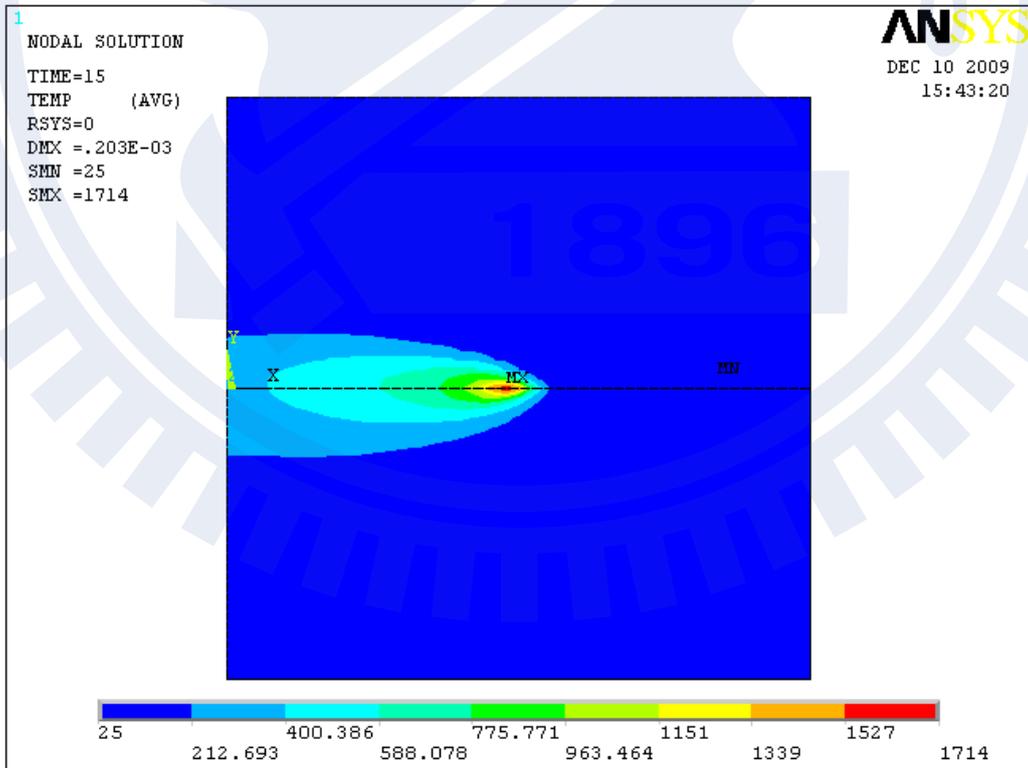


圖 4.25 異種銲接時間 15 秒時之溫度場狀態圖

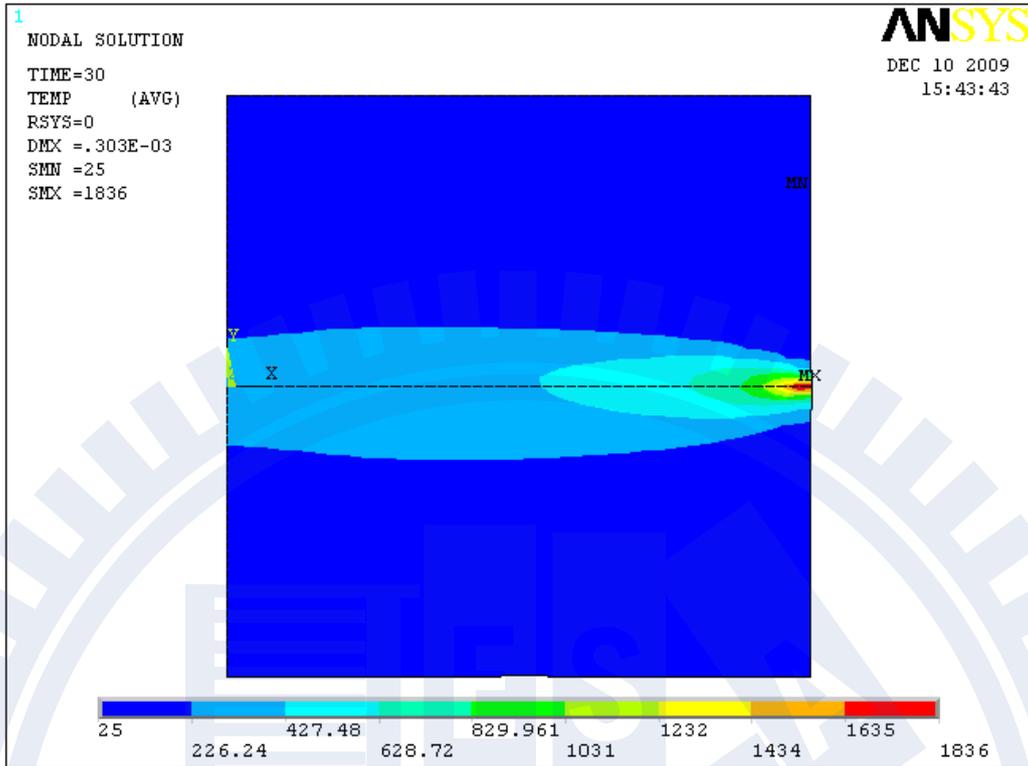


圖 4.26 異種銲接時間 30 秒時之溫度場狀態圖

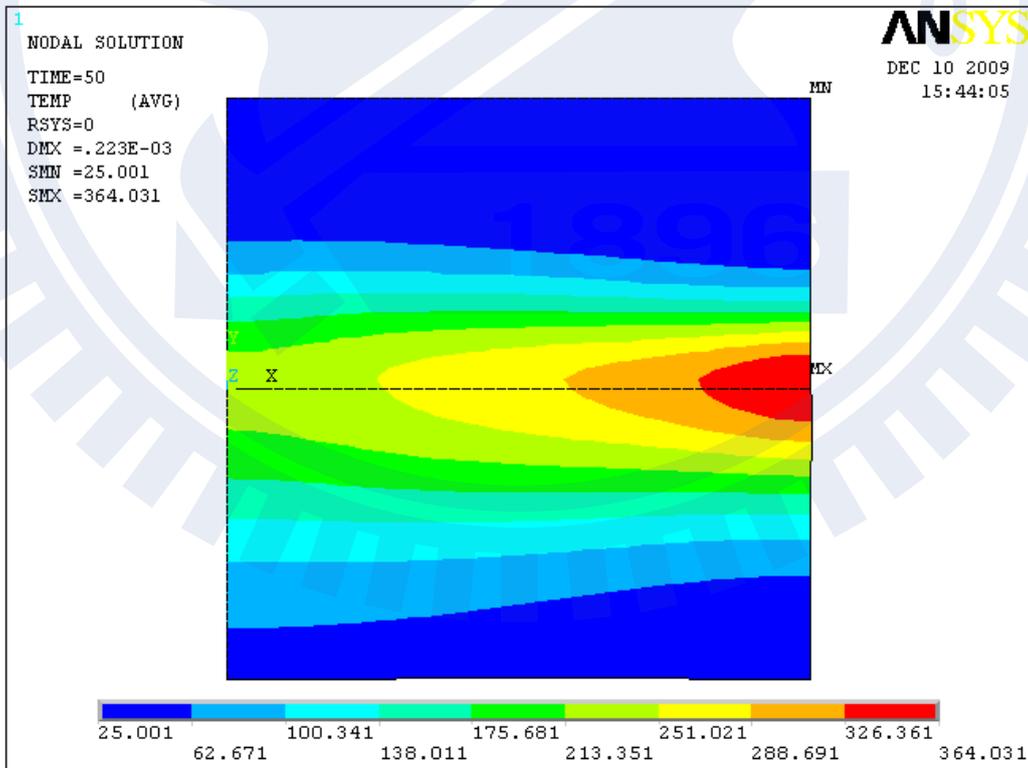


圖 4.27 異種銲接時間 50 秒時之溫度場狀態圖

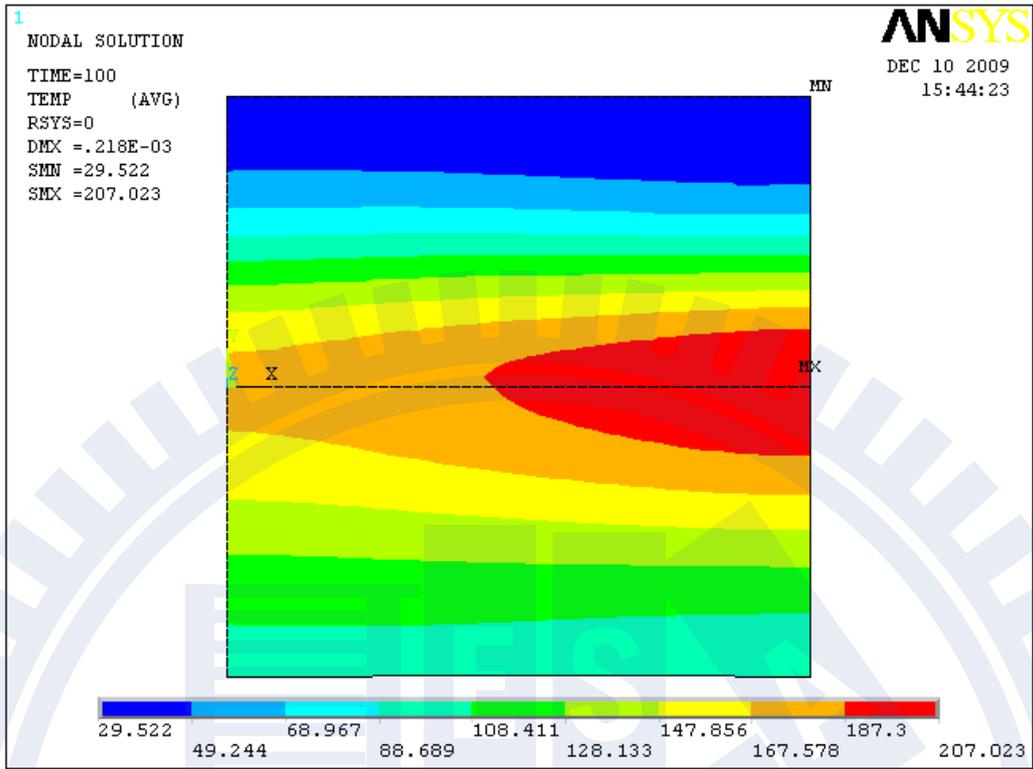


圖 4.28 異種銲接時間 100 秒時之溫度場狀態圖

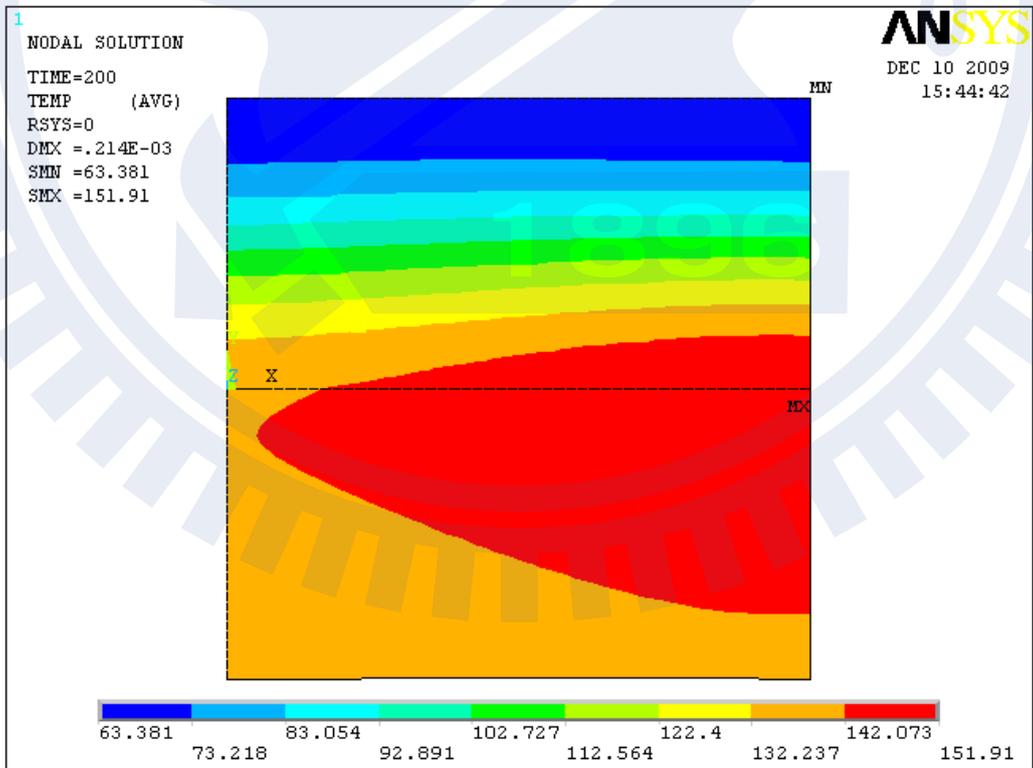


圖 4.29 異種銲接時間 200 秒時之溫度場狀態圖

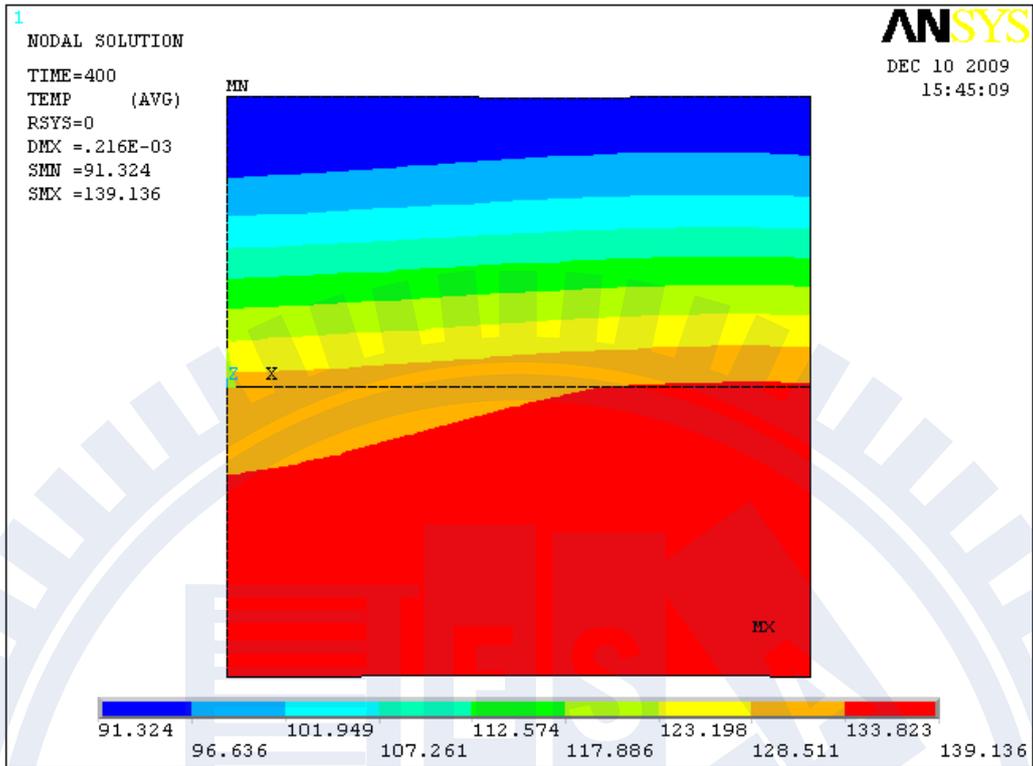


圖 4.30 異種銲接時間 400 秒時之溫度場狀態圖

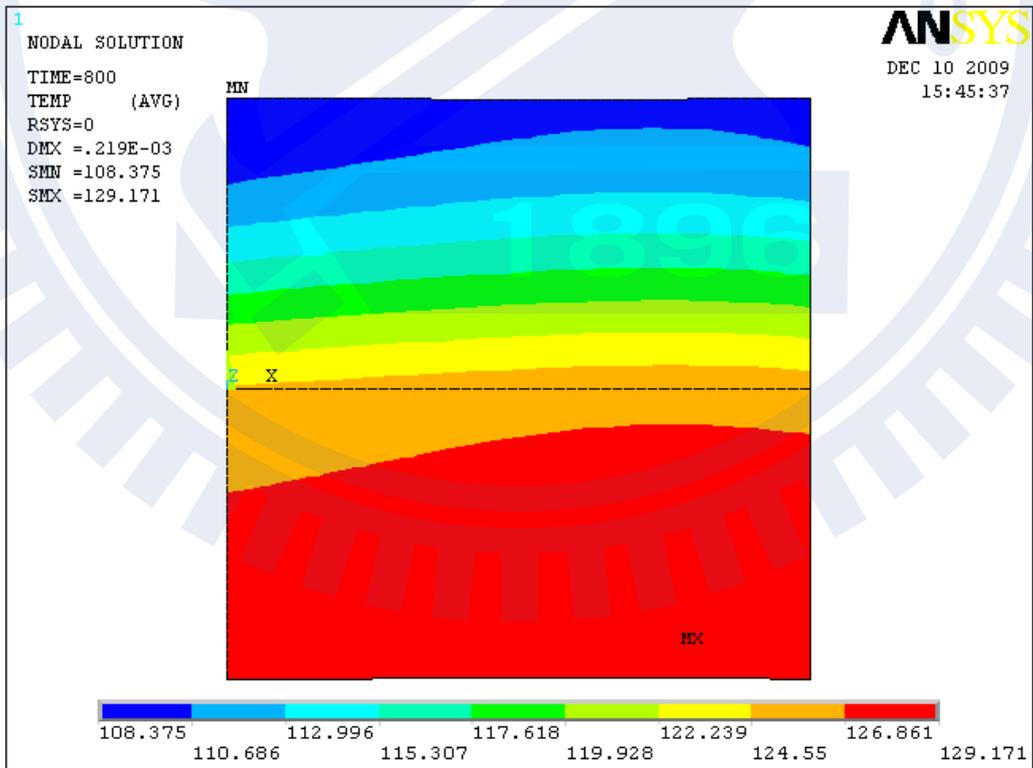


圖 4.31 異種銲接時間 800 秒時之溫度場狀態圖

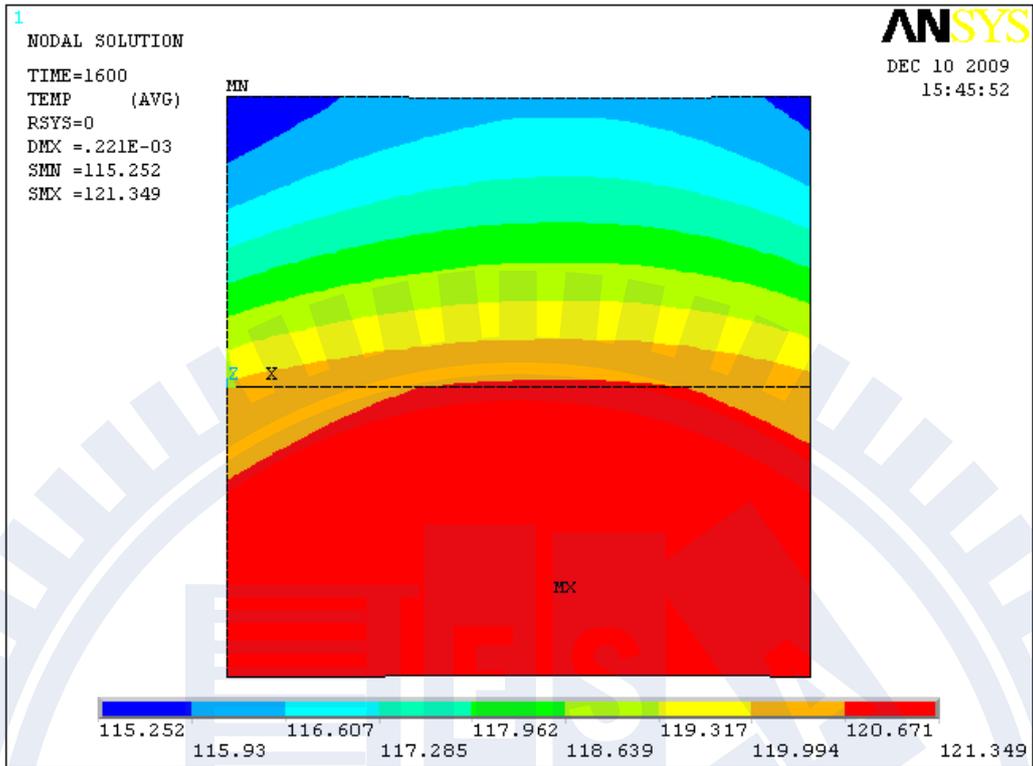


圖 4.32 異種銲接時間 1600 秒時之溫度場狀態圖

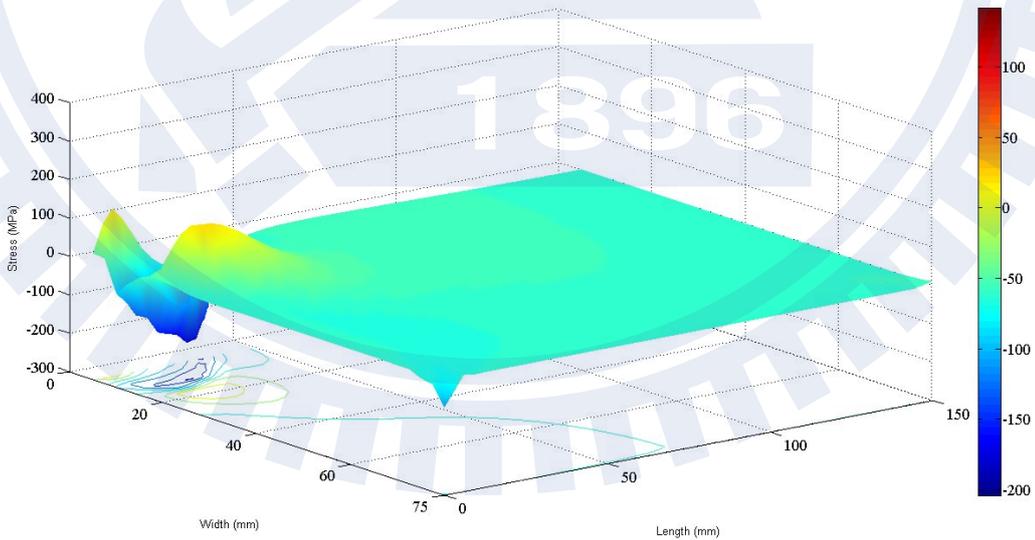


圖 4.33 不銹鋼之銲接時間 5 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

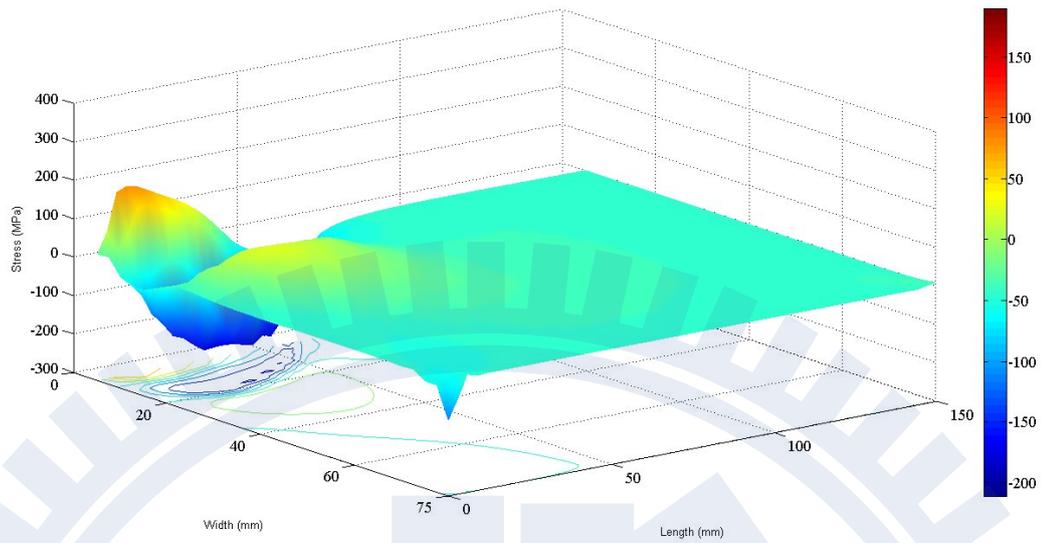


圖 4.34 不銹鋼之銲接時間 10 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

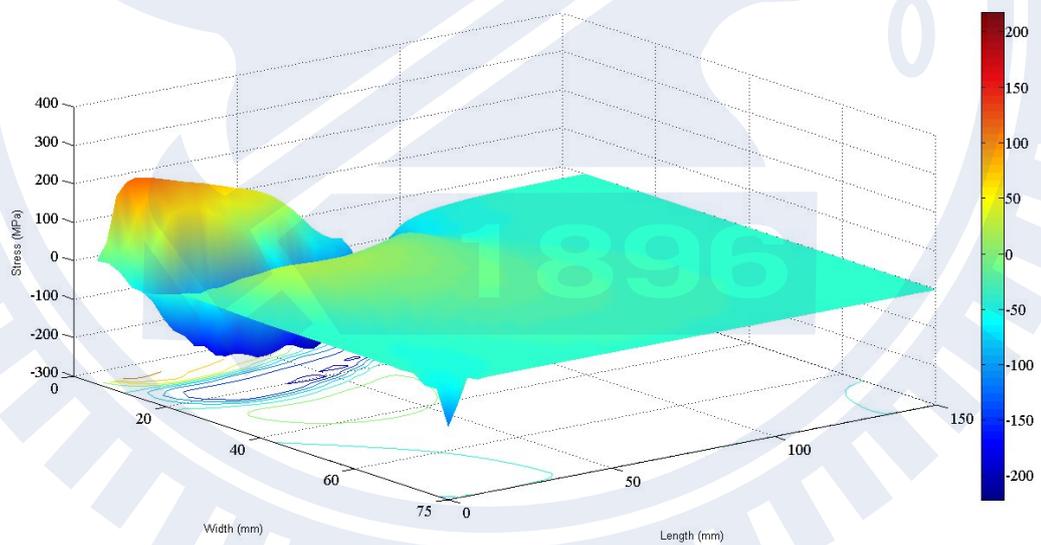


圖 4.35 不銹鋼之銲接時間 15 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

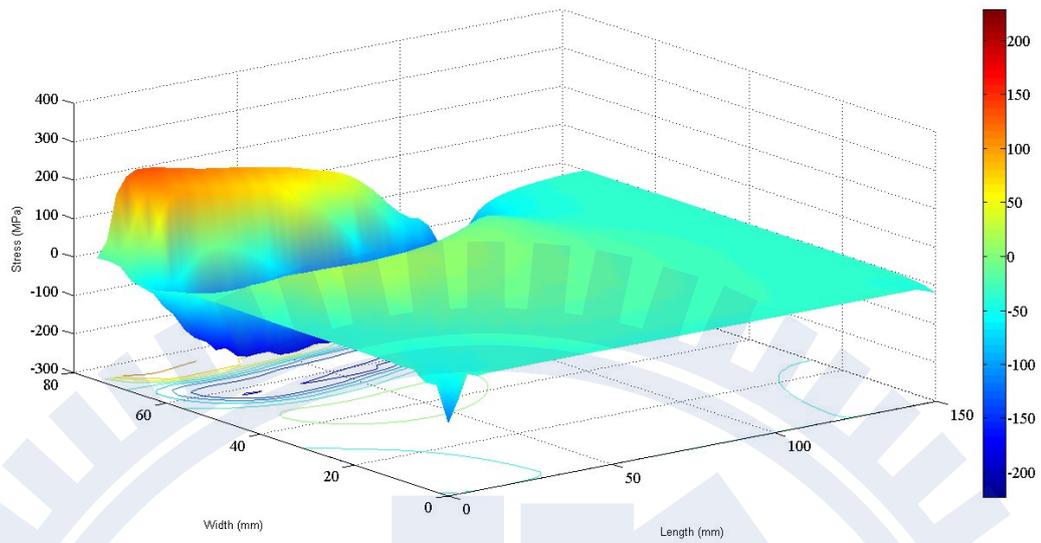


圖 4.36 不銹鋼之銲接時間 20 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

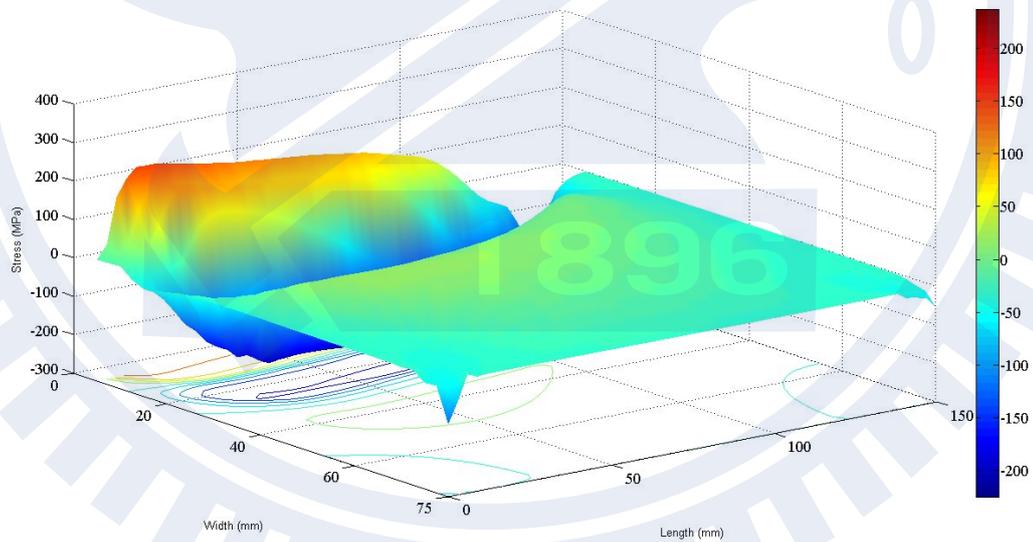


圖 4.37 不銹鋼之銲接時間 25 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

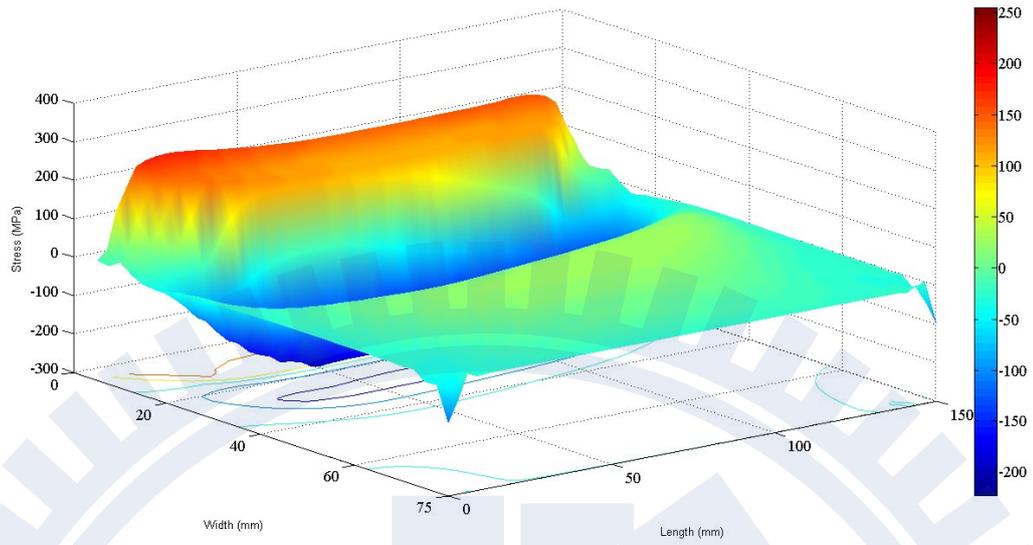


圖 4.38 不銹鋼之銲接時間 50 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

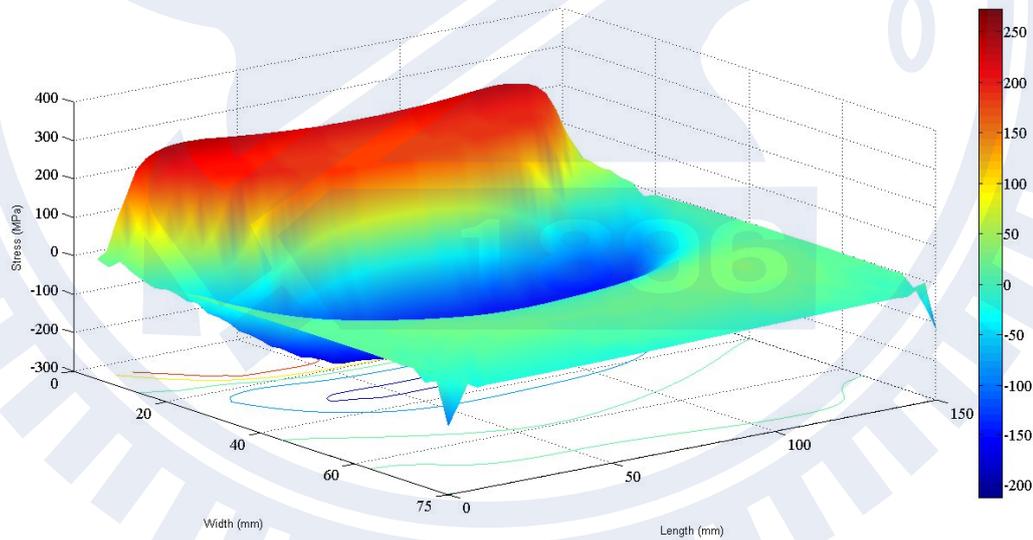


圖 4.39 不銹鋼之銲接時間 100 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

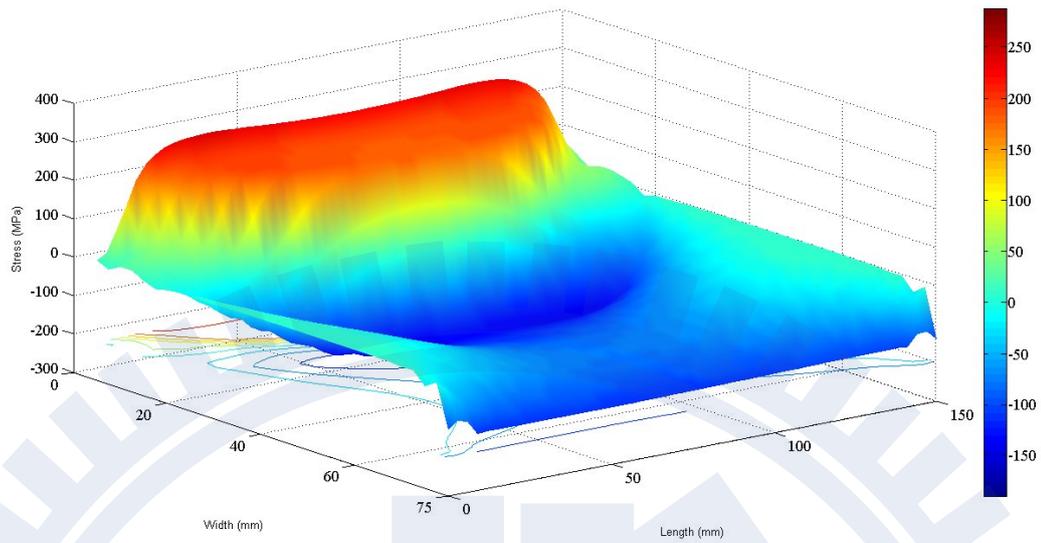


圖 4.40 不銹鋼之銲接時間 200 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

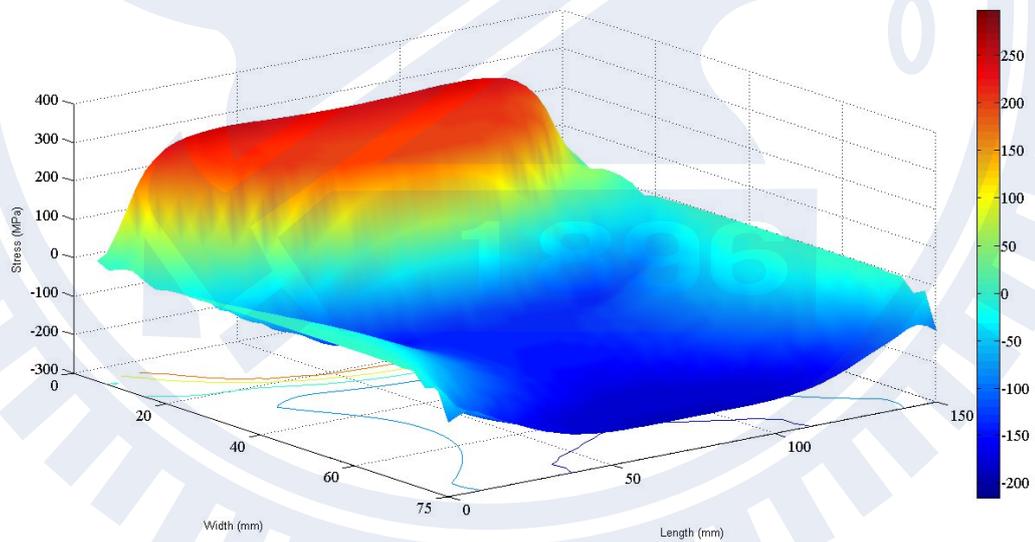


圖 4.41 不銹鋼之銲接時間 400 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

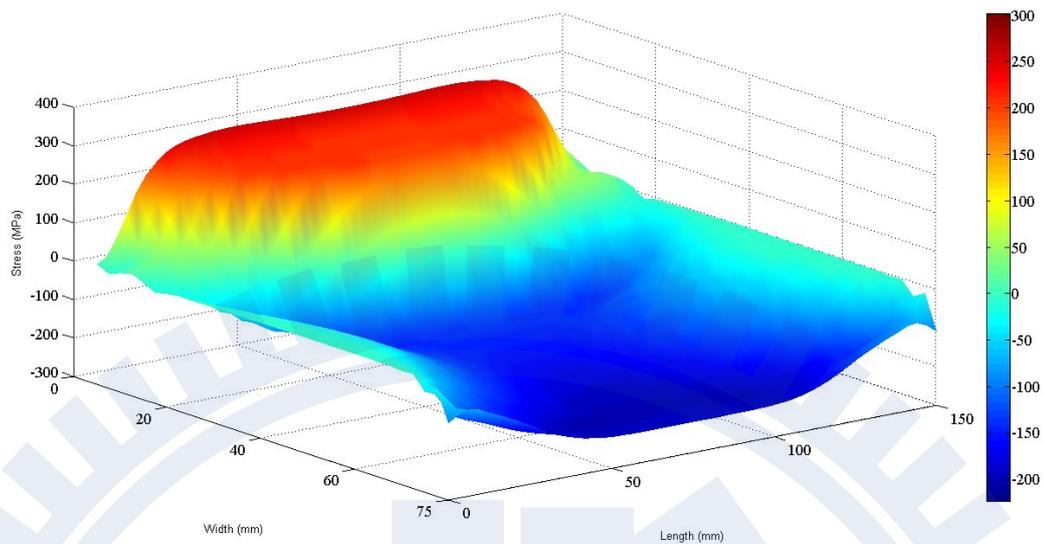


圖 4.42 不銹鋼之銲接時間 800 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

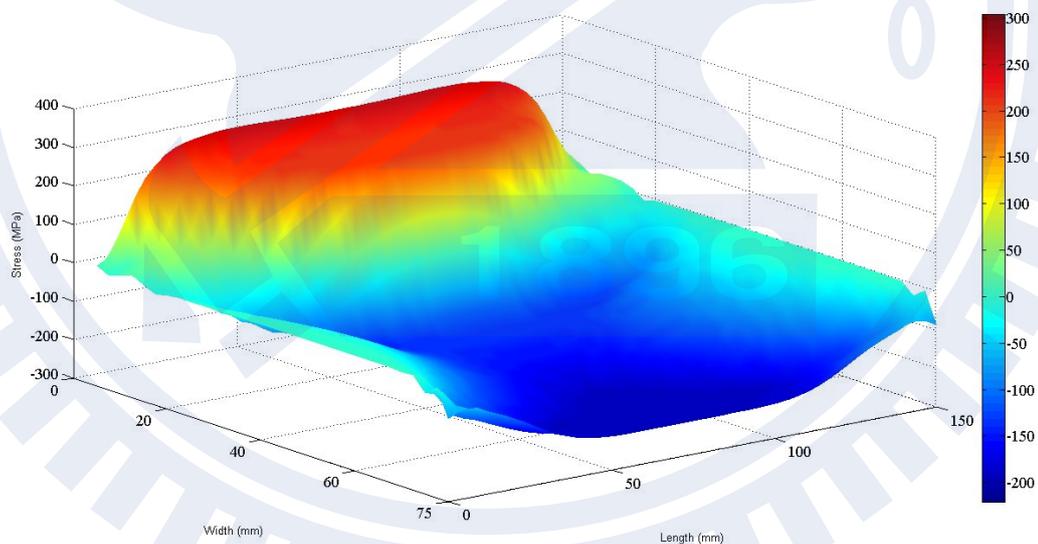


圖 4.43 不銹鋼之銲接時間 1600 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

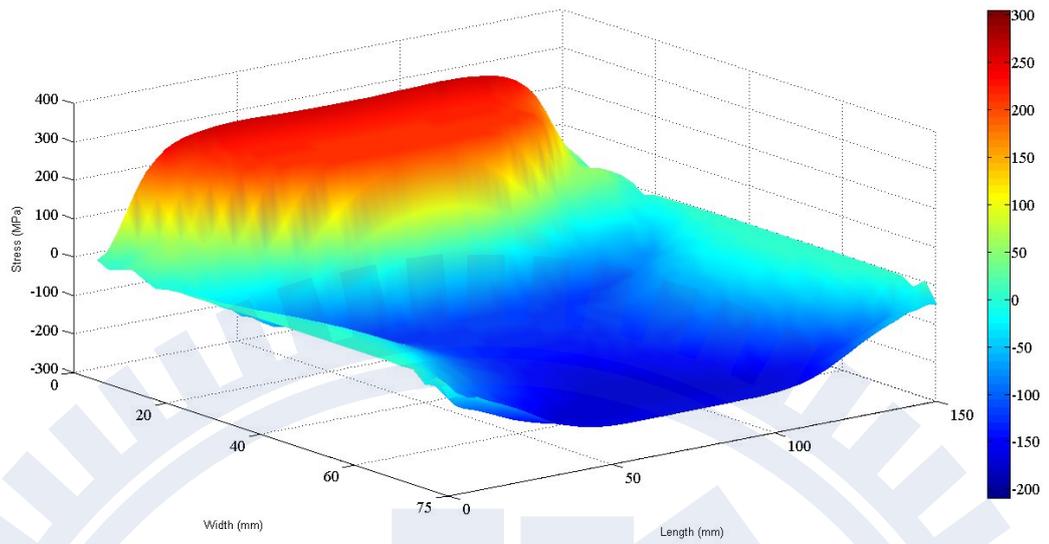


圖 4.44 不銹鋼之銲接時間 3150 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

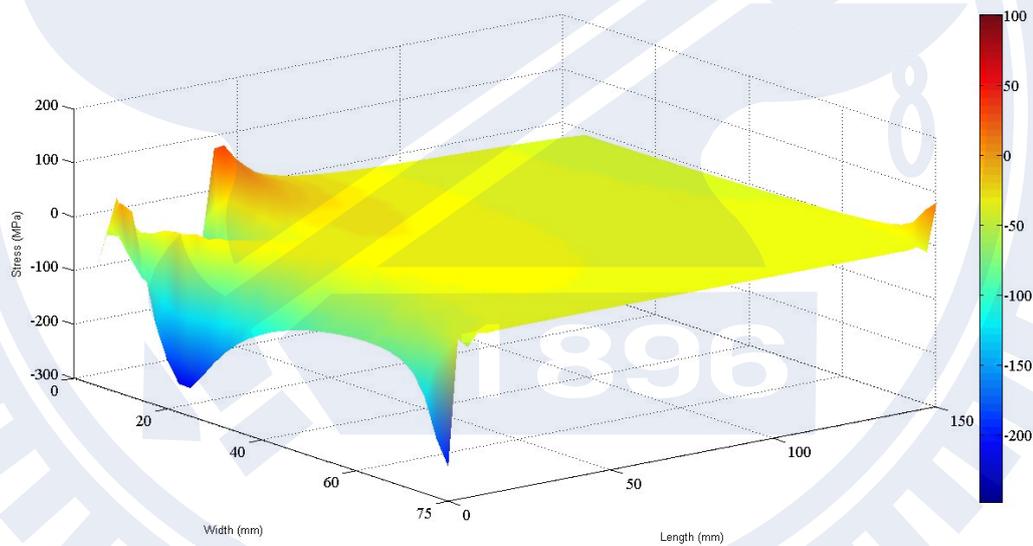


圖 4.45 不銹鋼之銲接時間 5 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

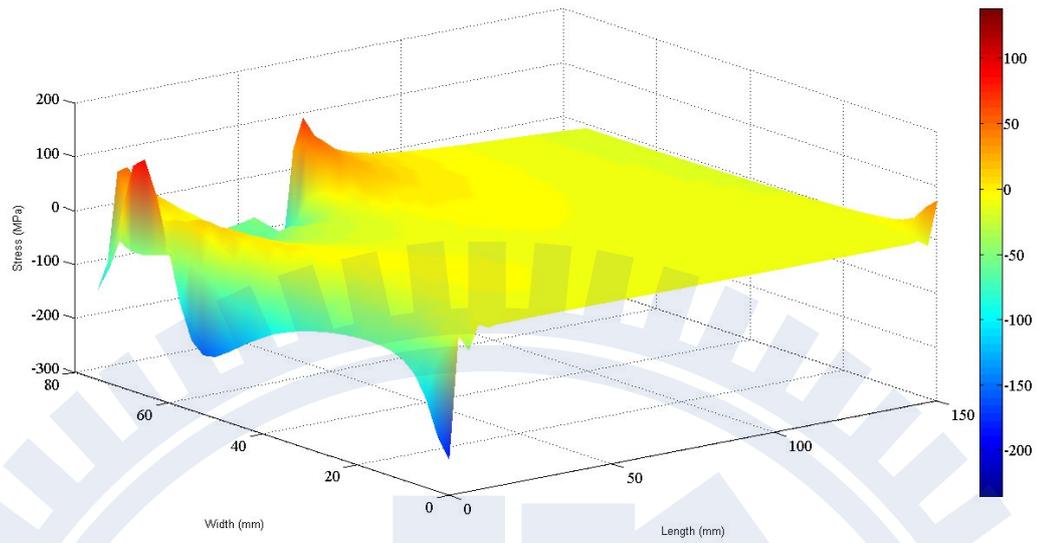


圖 4.46 不銹鋼之銲接時間 10 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

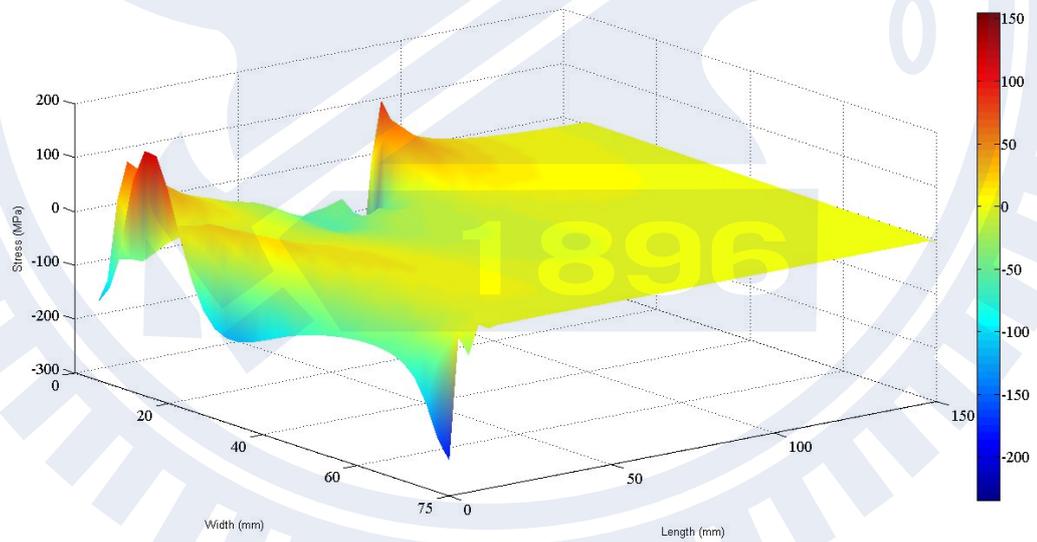


圖 4.47 不銹鋼之銲接時間 15 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

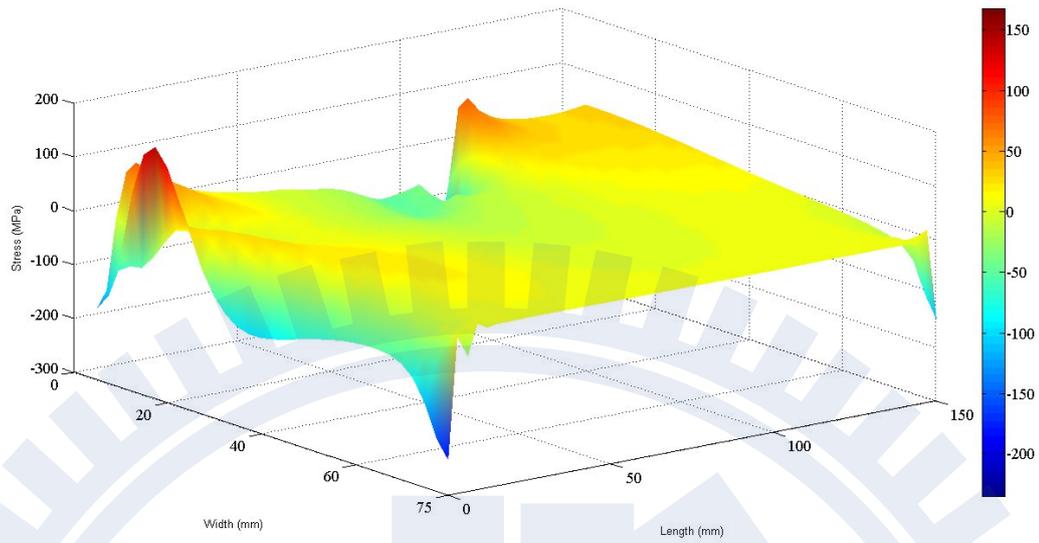


圖 4.48 不銹鋼之銲接時間 20 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

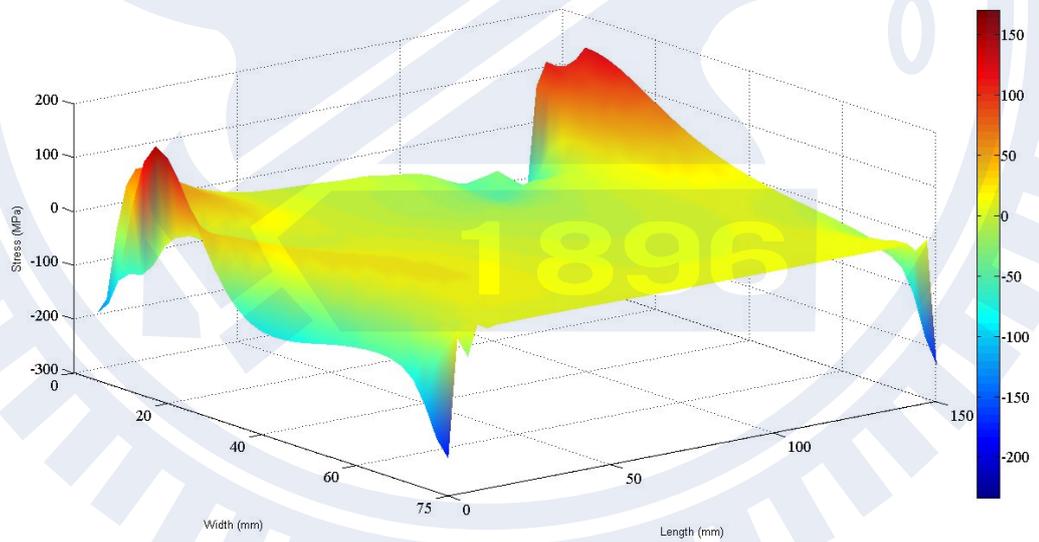


圖 4.49 不銹鋼之銲接時間 25 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

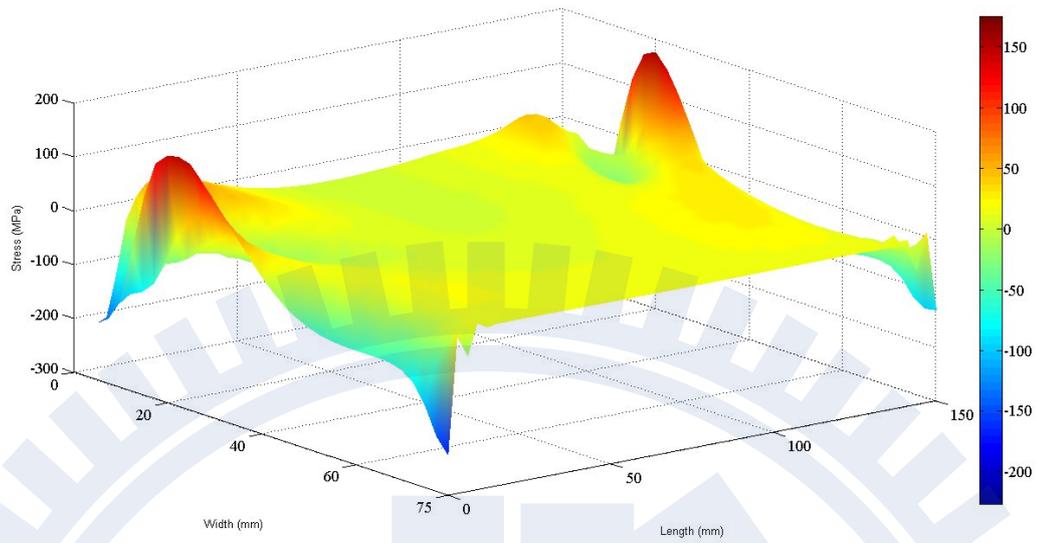


圖 4.50 不銹鋼之銲接時間 50 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

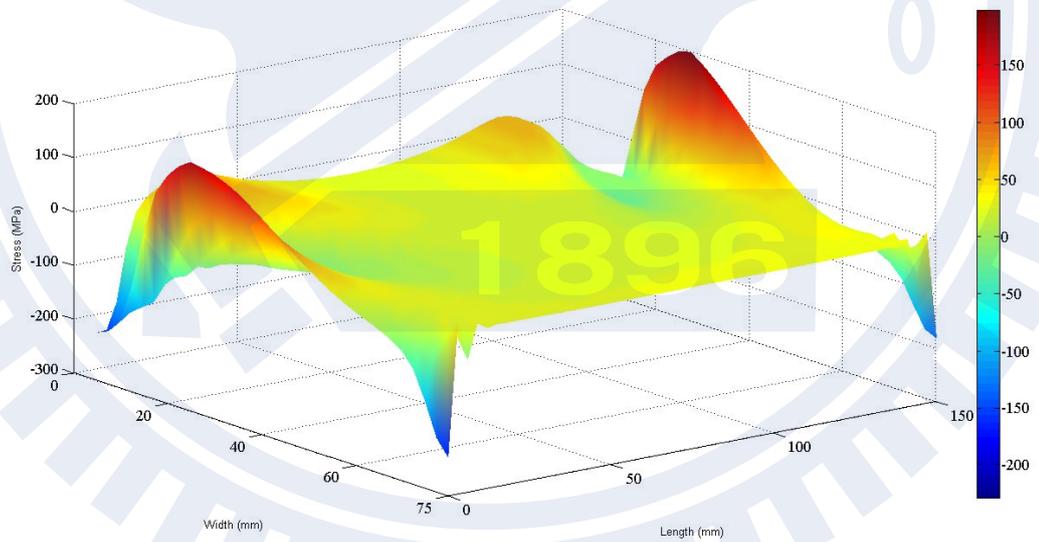


圖 4.51 不銹鋼之銲接時間 100 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

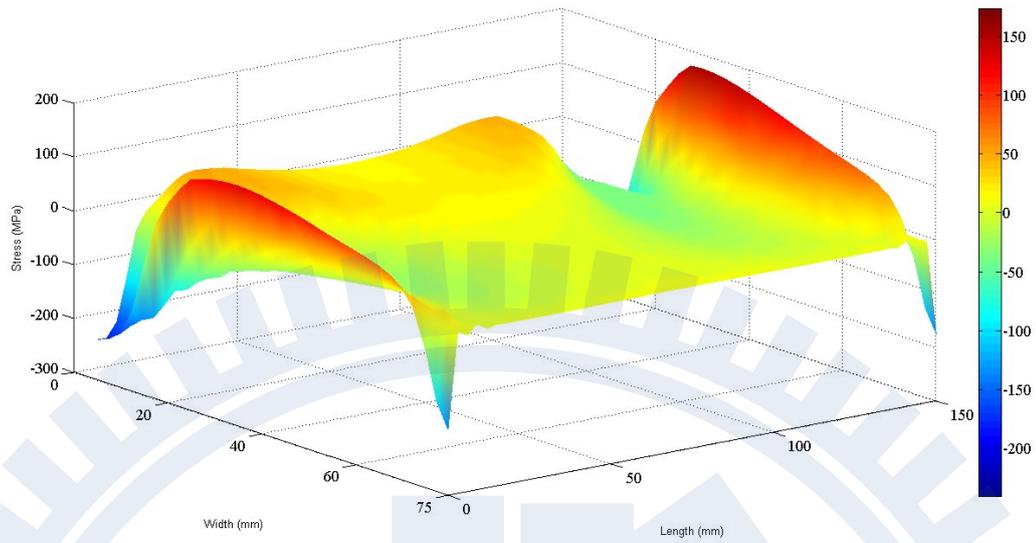


圖 4.52 不銹鋼之銲接時間 200 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

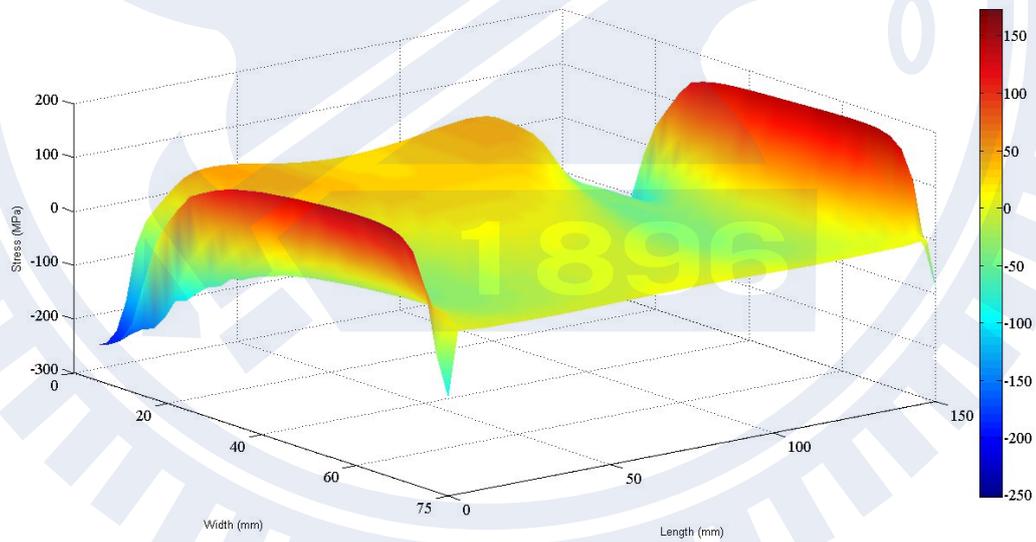


圖 4.53 不銹鋼之銲接時間 400 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

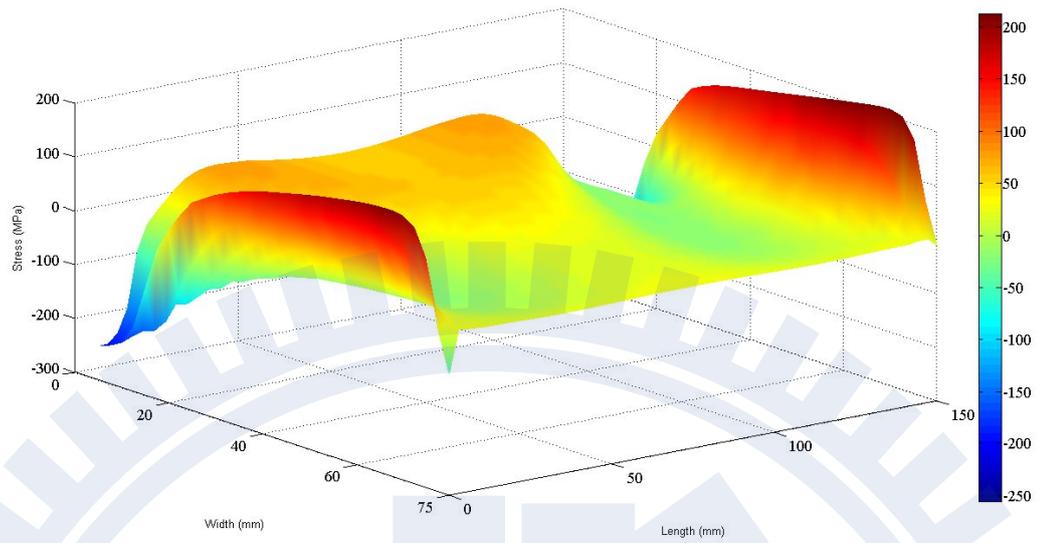


圖 4.54 不銹鋼之銲接時間 800 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

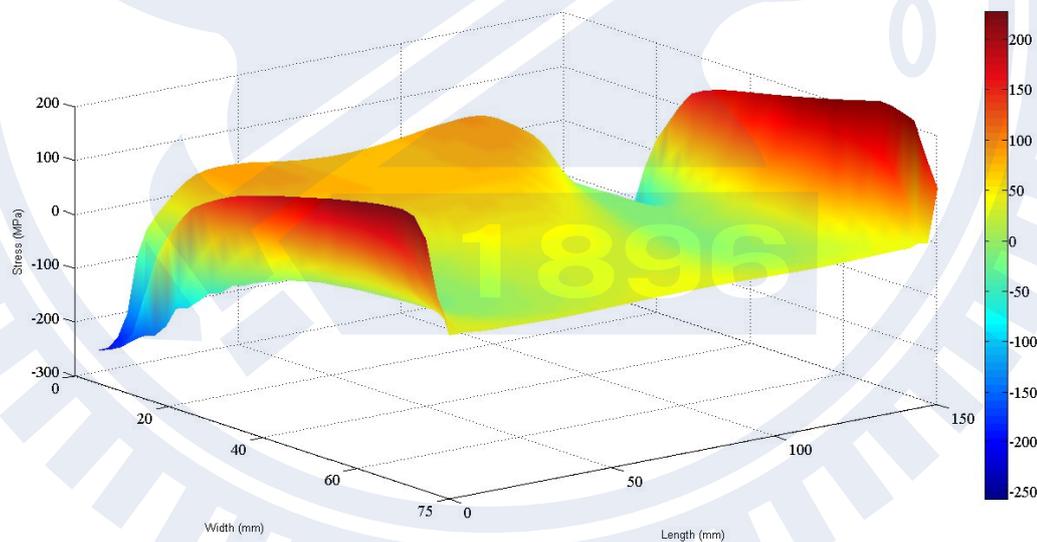


圖 4.55 不銹鋼之銲接時間 1600 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

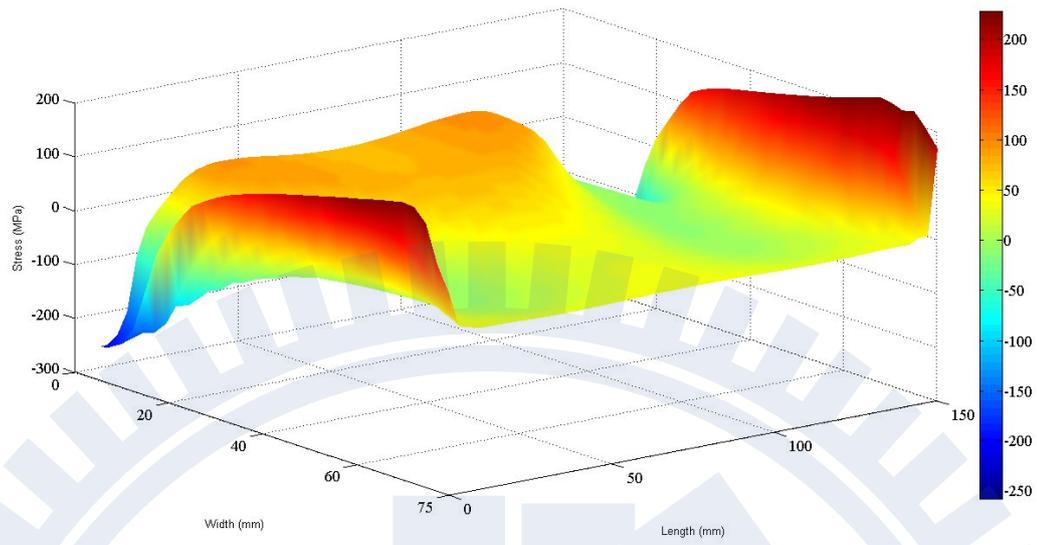


圖 4.56 不銹鋼之銲接時間 3150 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

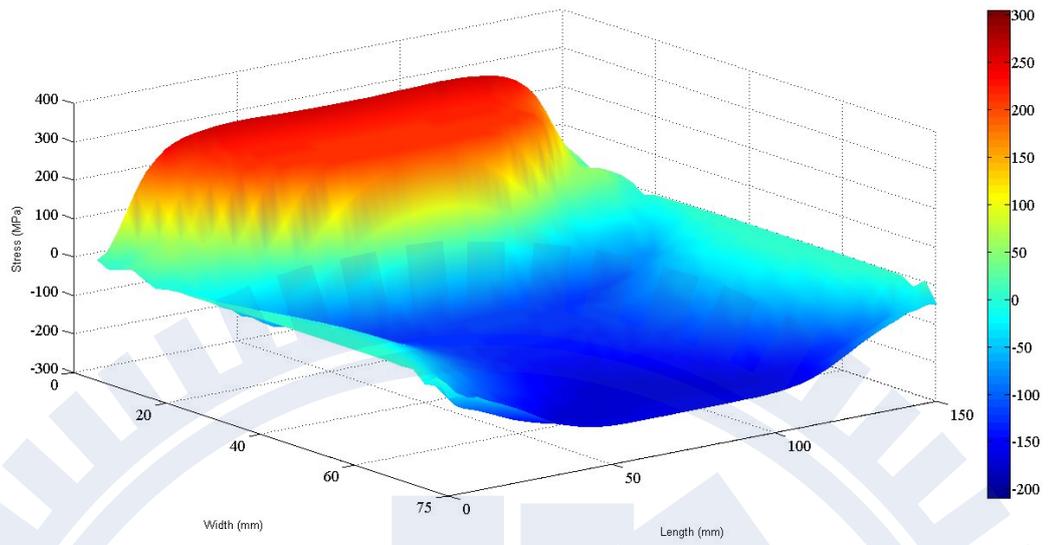


圖 4.57 (a) 不銹鋼之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力分佈圖

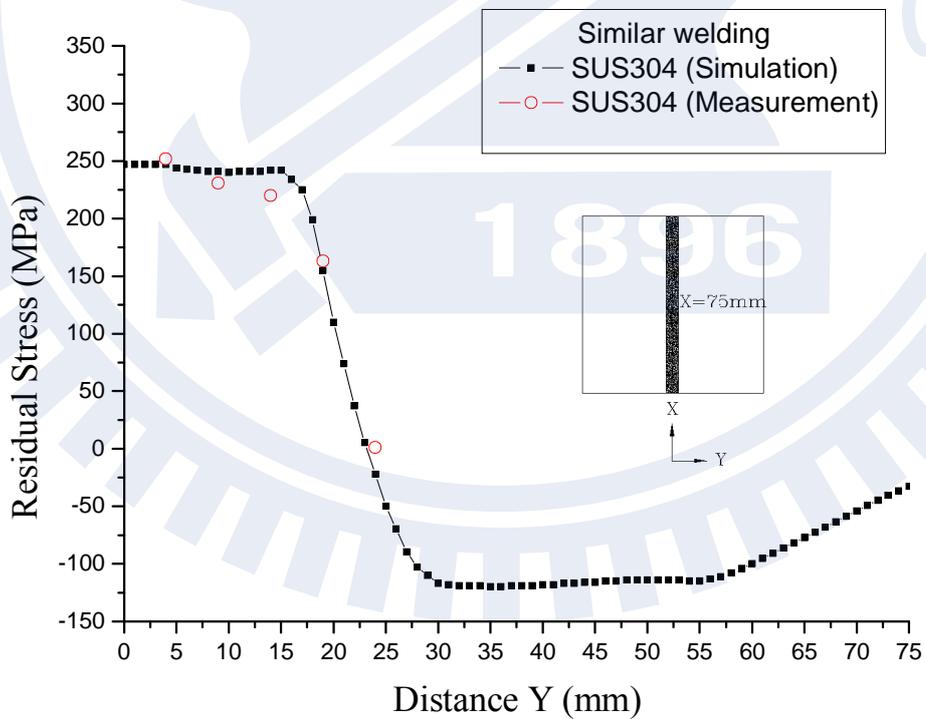


圖 4.57(b) 不銹鋼之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力分析結果與實驗數據之比較圖

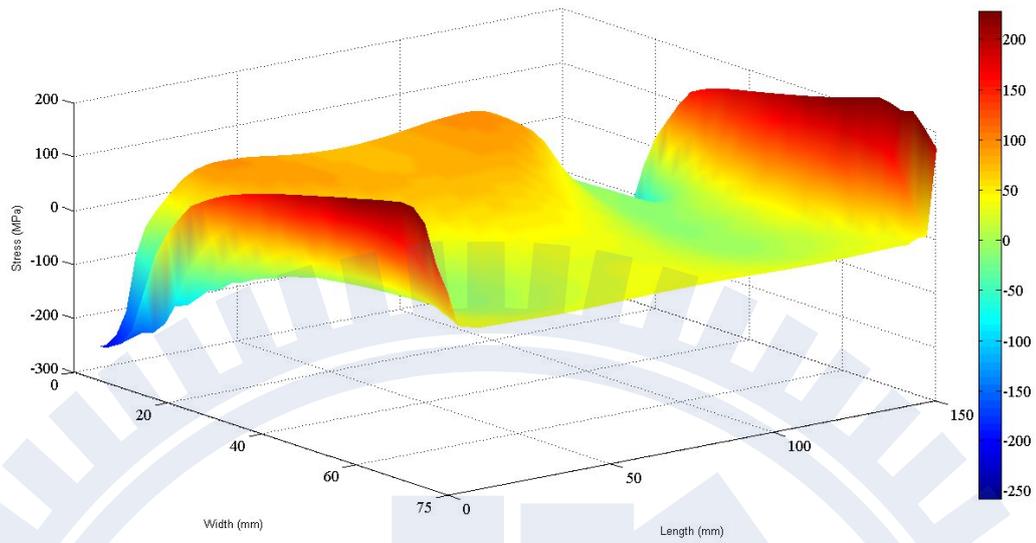


圖 4.58 (a) 不銹鋼之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力分佈圖

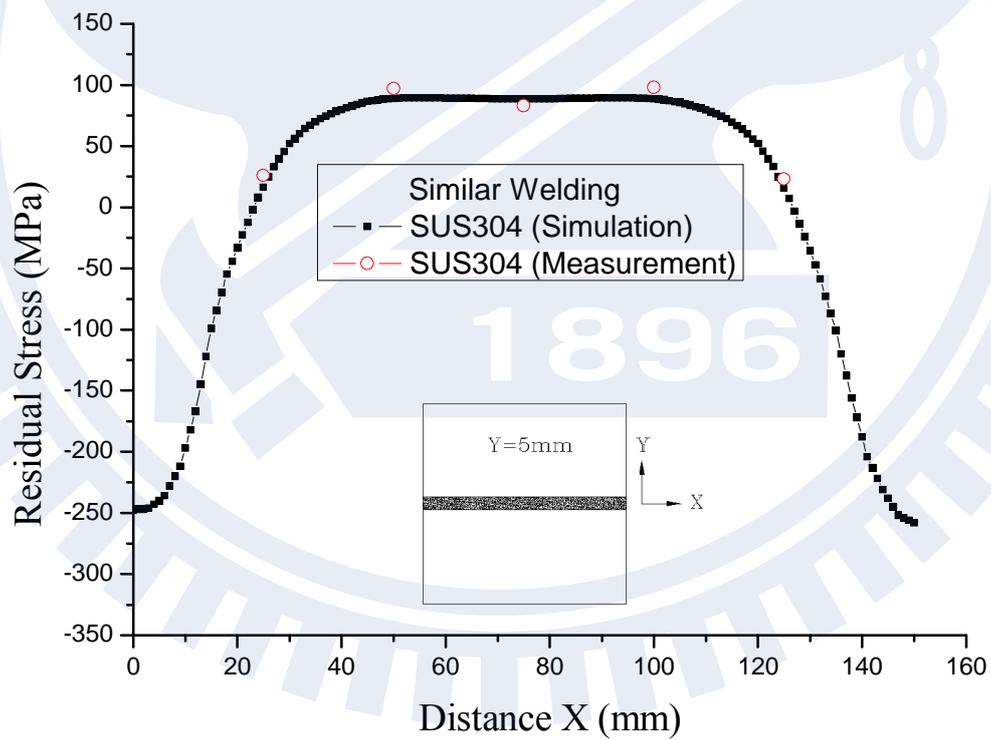


圖 4.58(b) 不銹鋼之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力分析結果與實驗數據之比較圖

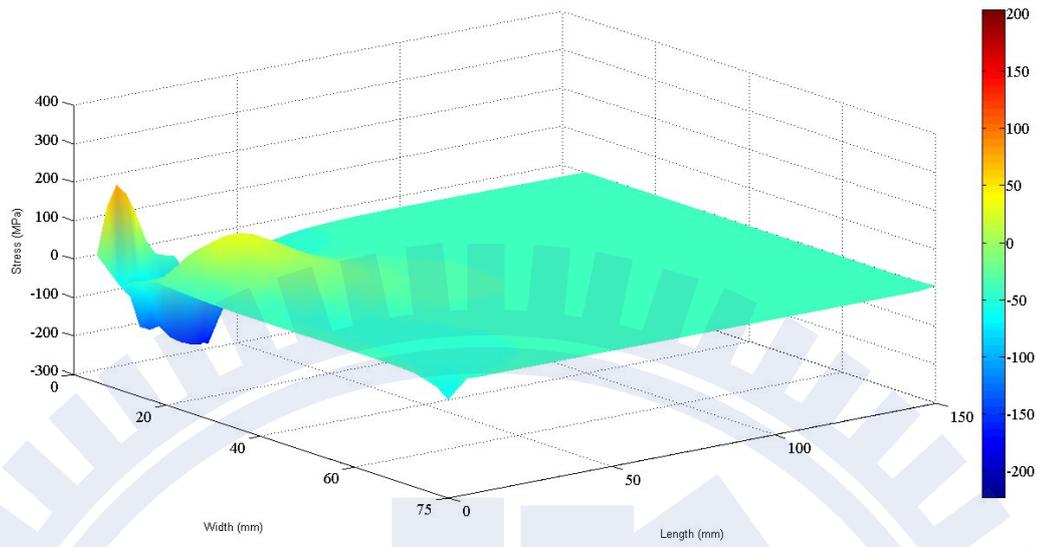


圖 4.59 碳鋼之銲接時間 5 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

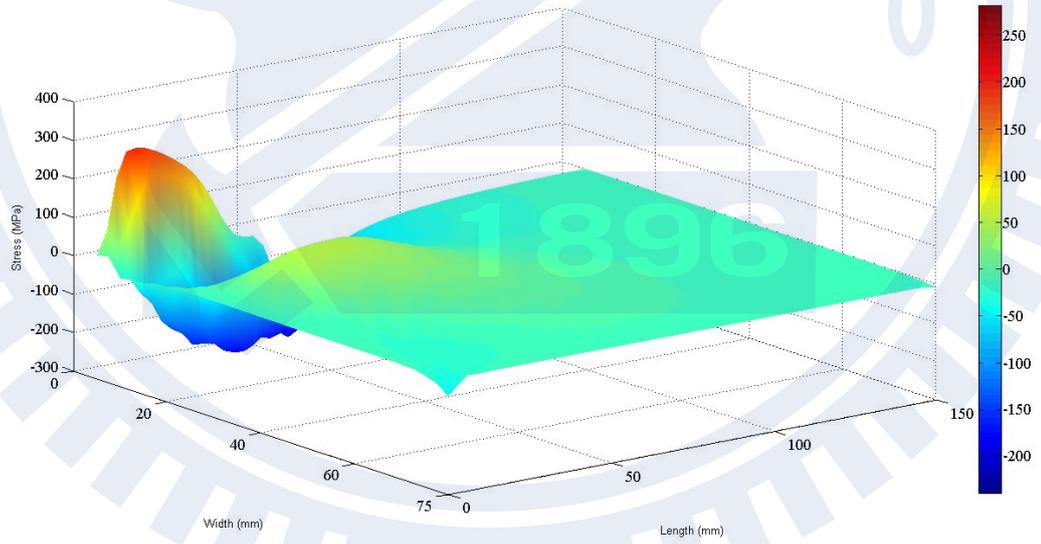


圖 4.60 碳鋼之銲接時間 10 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

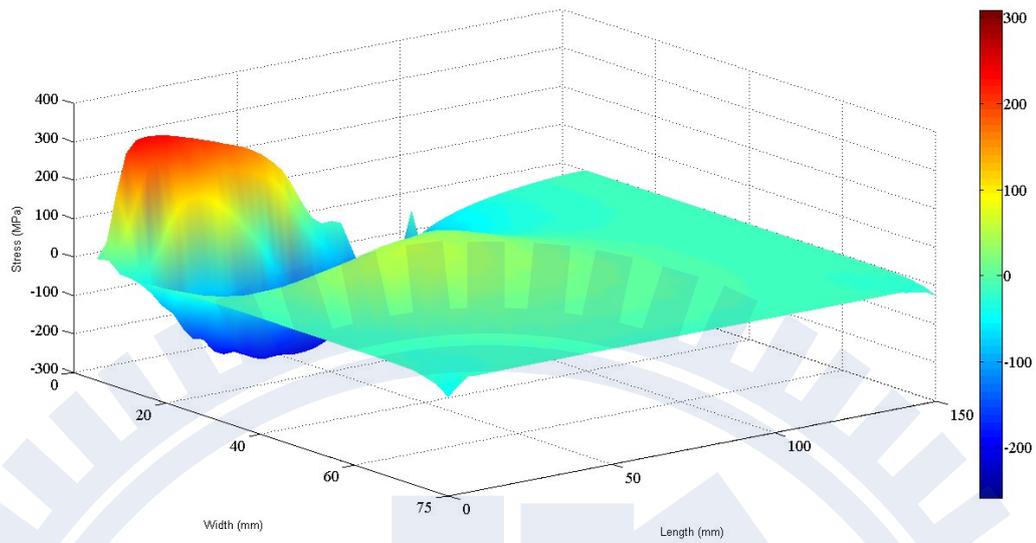


圖 4.61 碳鋼之鐸接時間 15 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

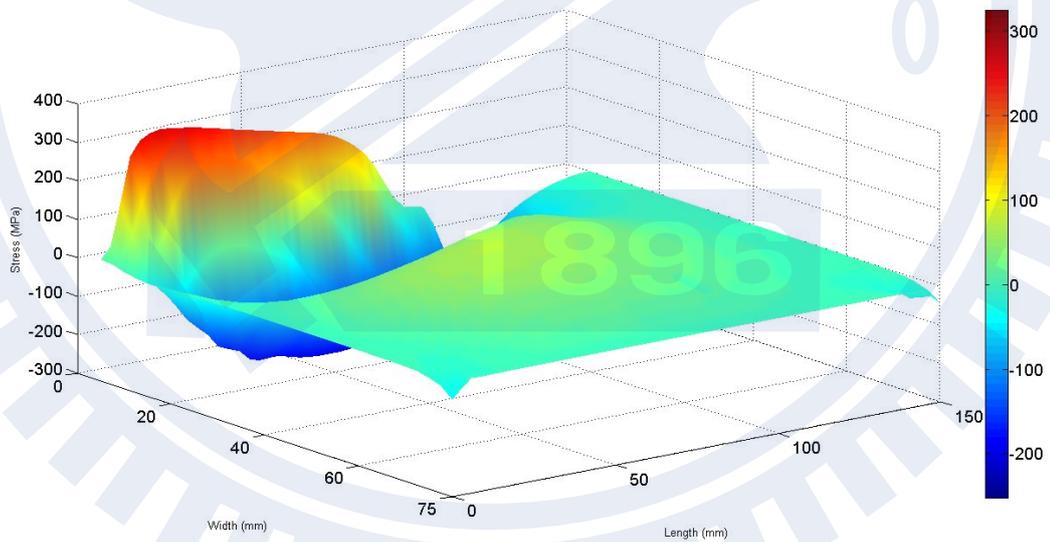


圖 4.62 碳鋼之鐸接時間 20 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

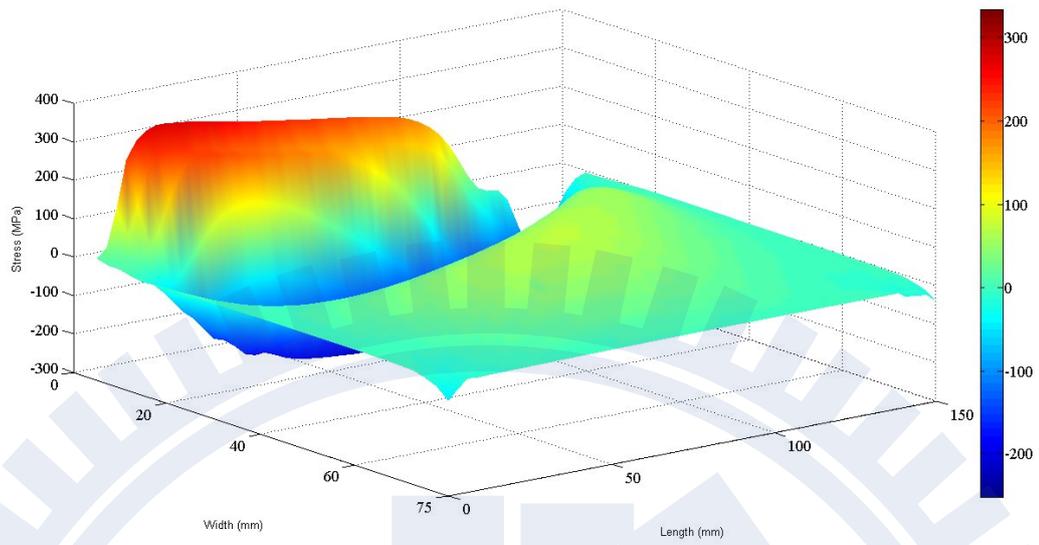


圖 4.63 碳鋼之銲接時間 25 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

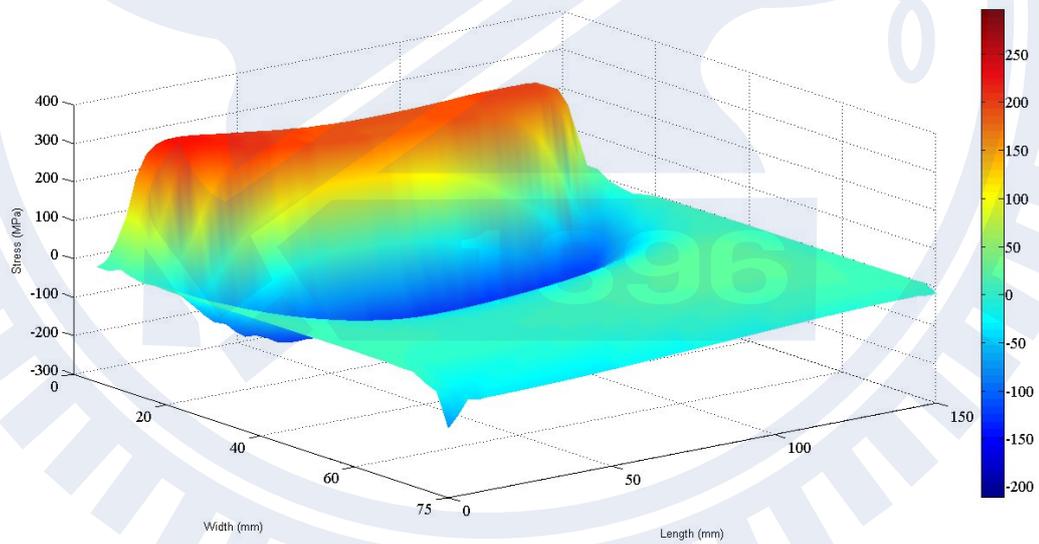


圖 4.64 碳鋼之銲接時間 50 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

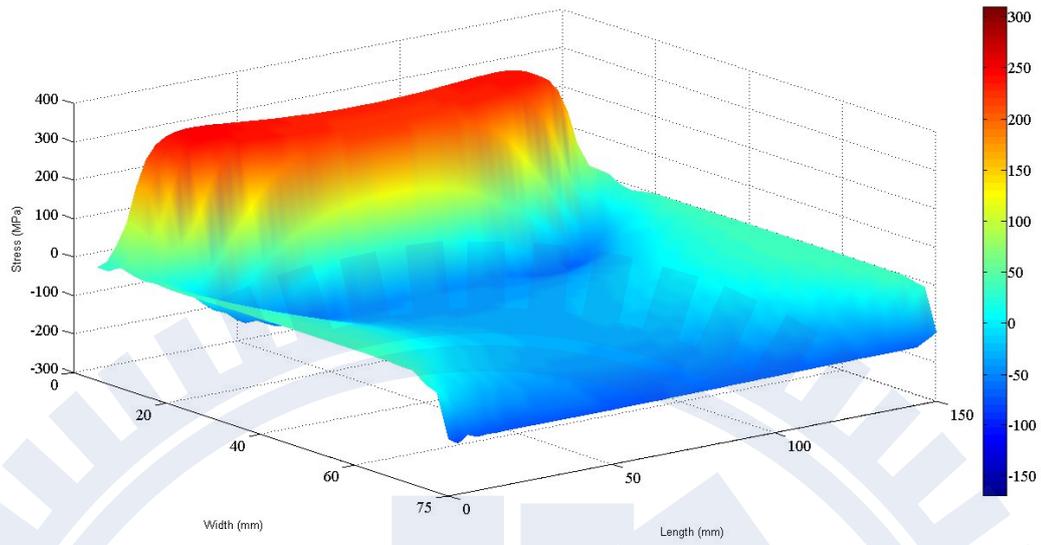


圖 4.65 碳鋼之銲接時間 100 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

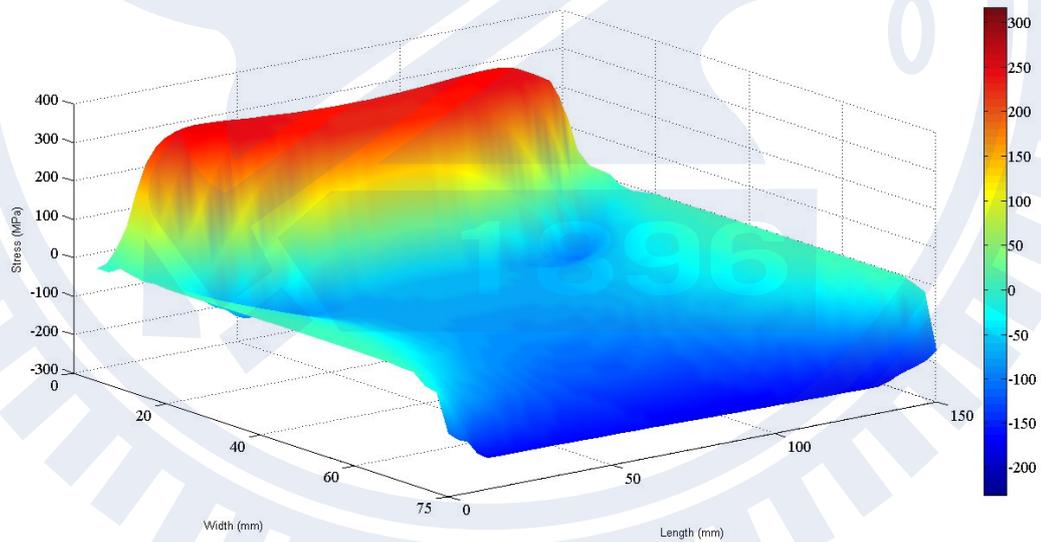


圖 4.66 碳鋼之銲接時間 200 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

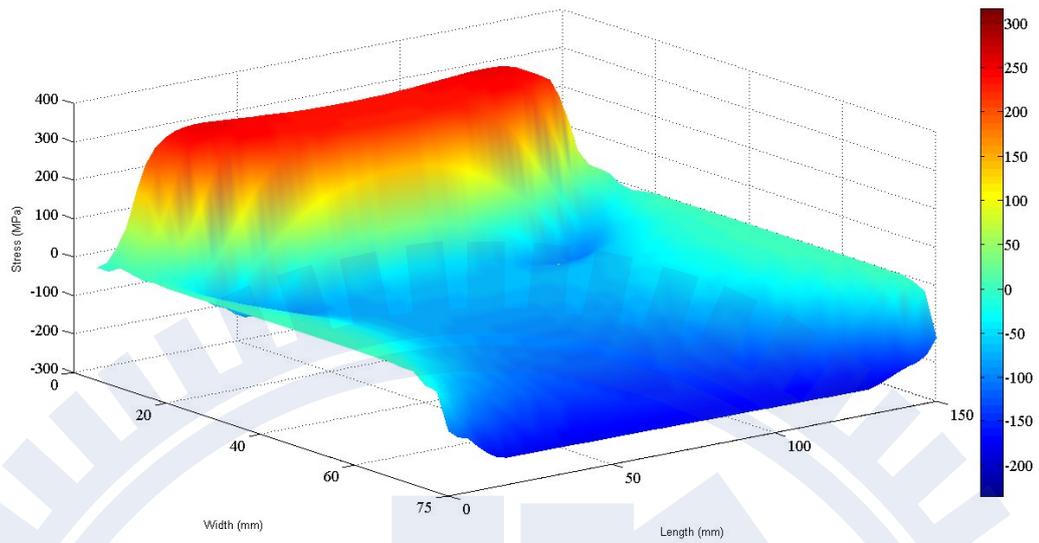


圖 4.67 碳鋼之銲接時間 400 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

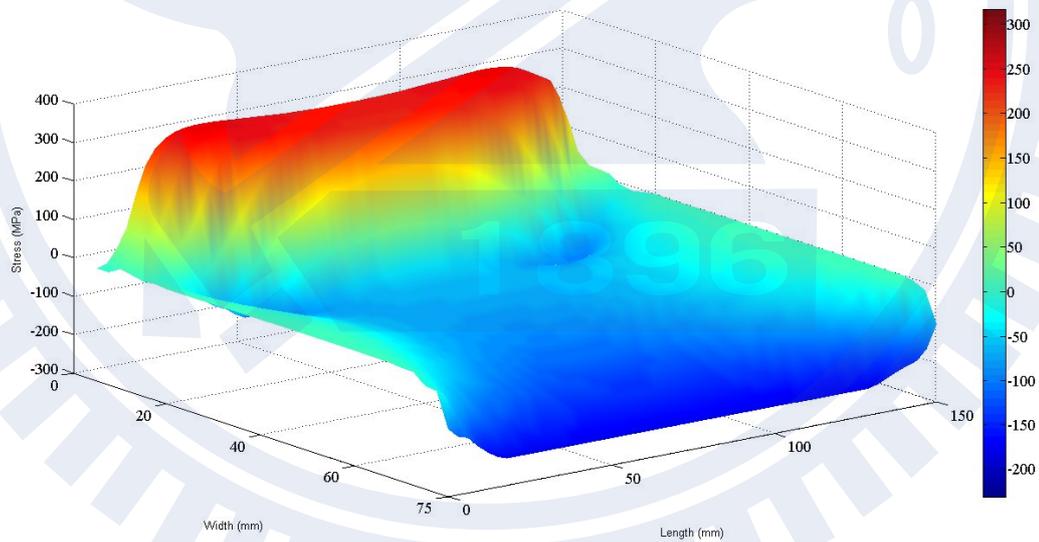


圖 4.68 碳鋼之銲接時間 800 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

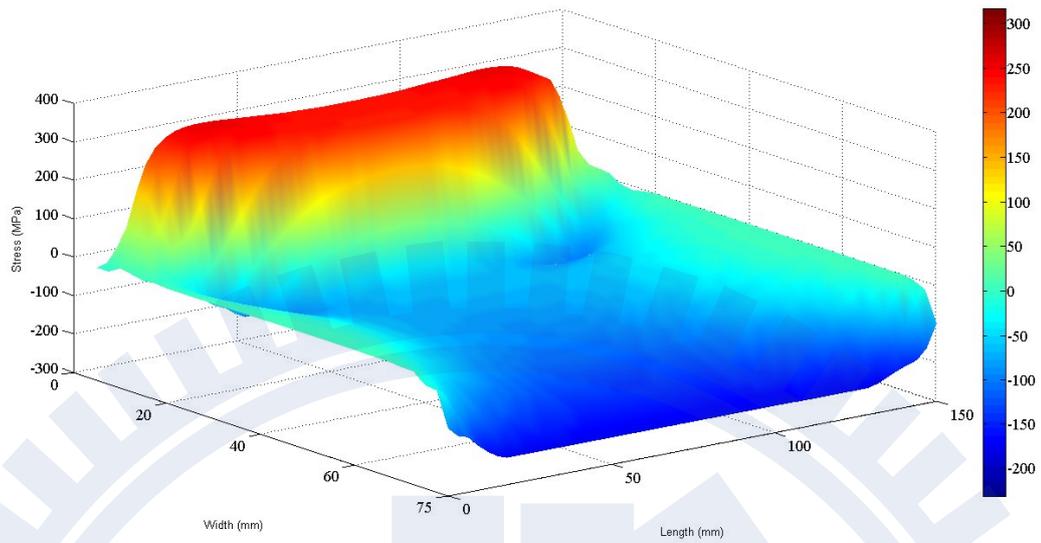


圖 4.69 碳鋼之銲接時間 1600 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

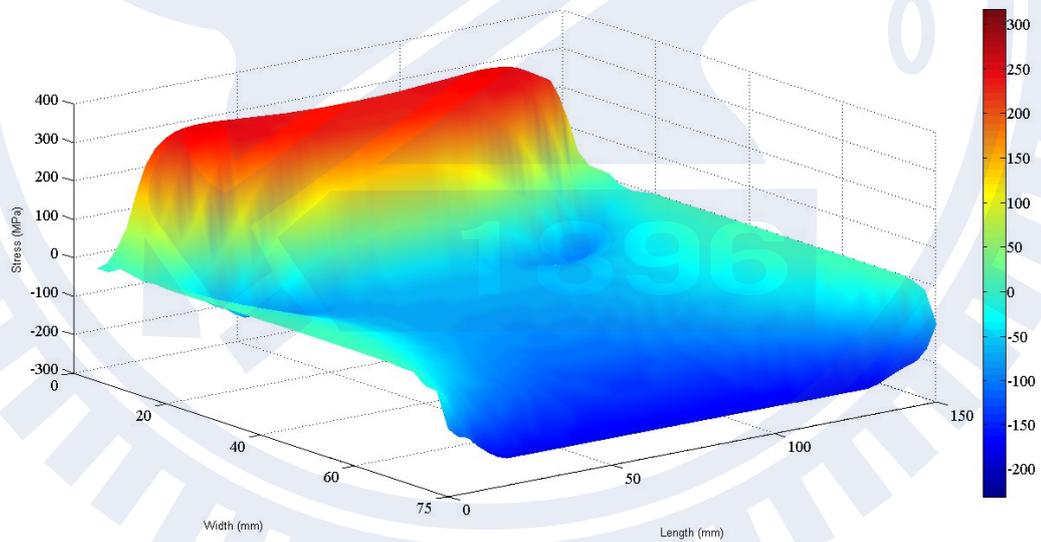


圖 4.70 碳鋼之銲接時間 3150 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

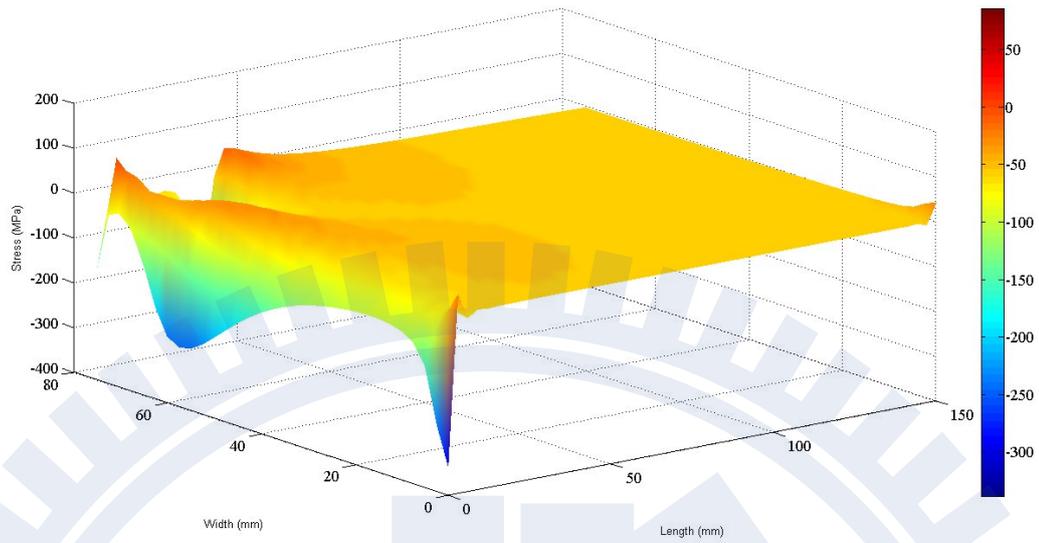


圖 4.71 碳鋼之銲接時間 5 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

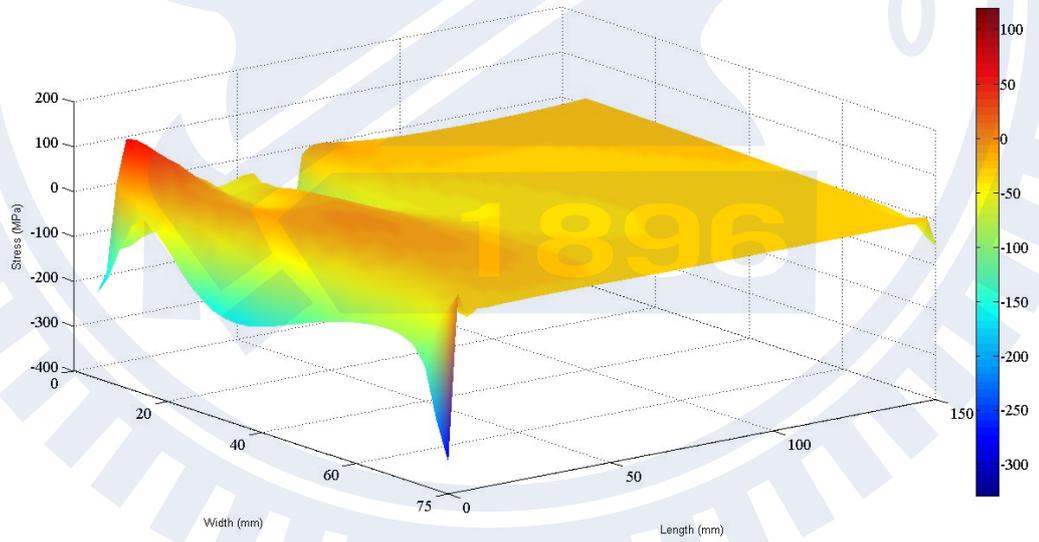


圖 4.72 碳鋼之銲接時間 10 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

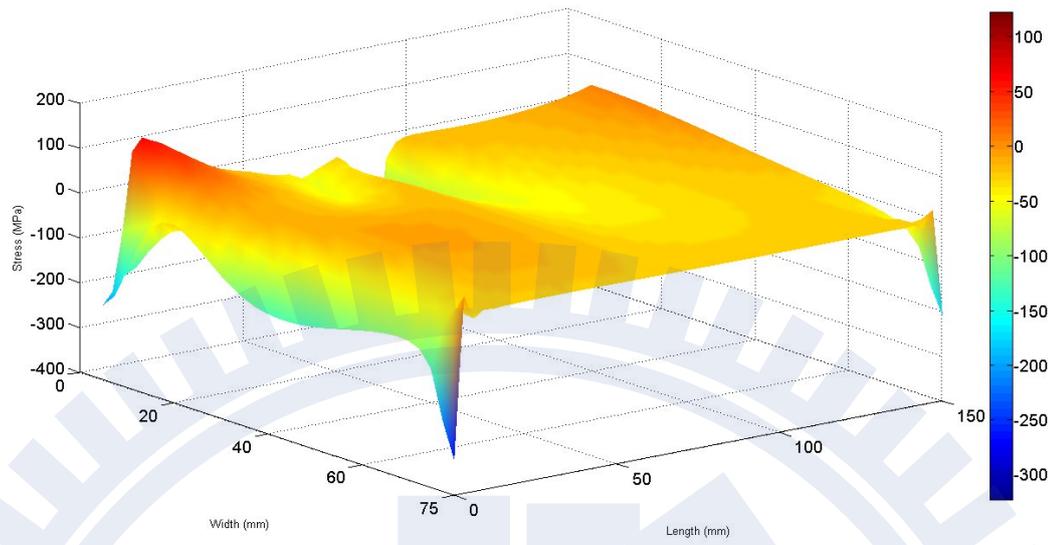


圖 4.73 碳鋼之銲接時間 15 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

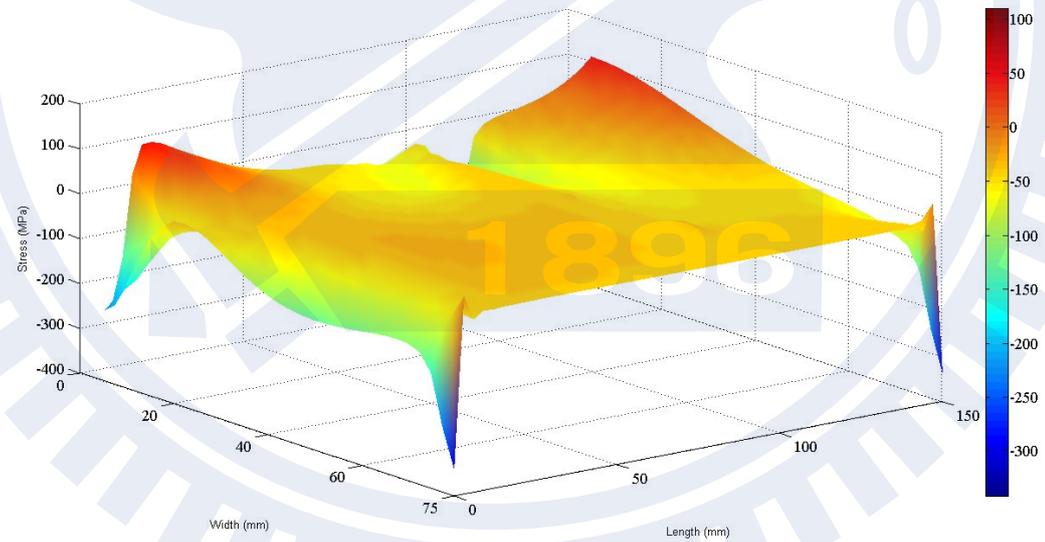


圖 4.74 碳鋼之銲接時間 20 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

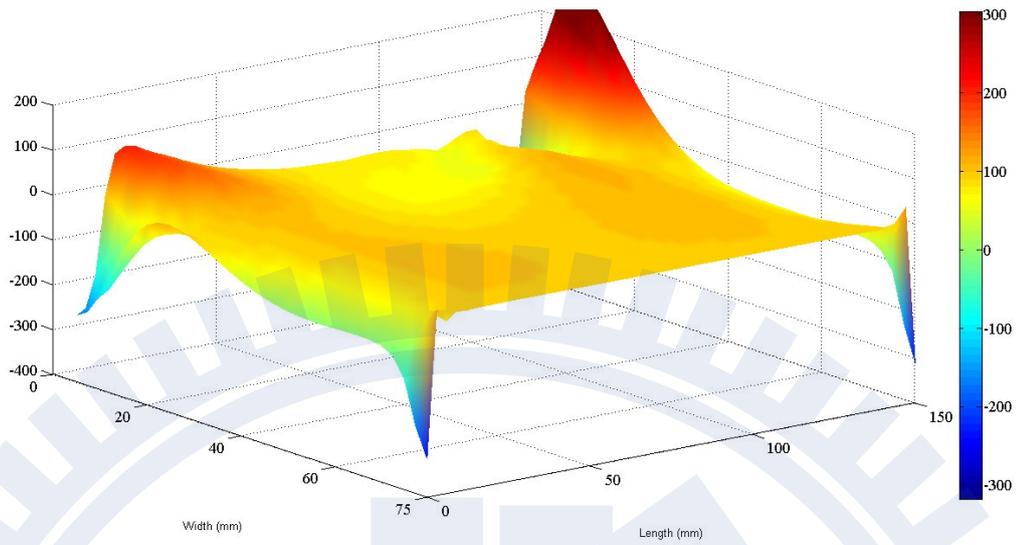


圖 4.75 碳鋼之銲接時間 25 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

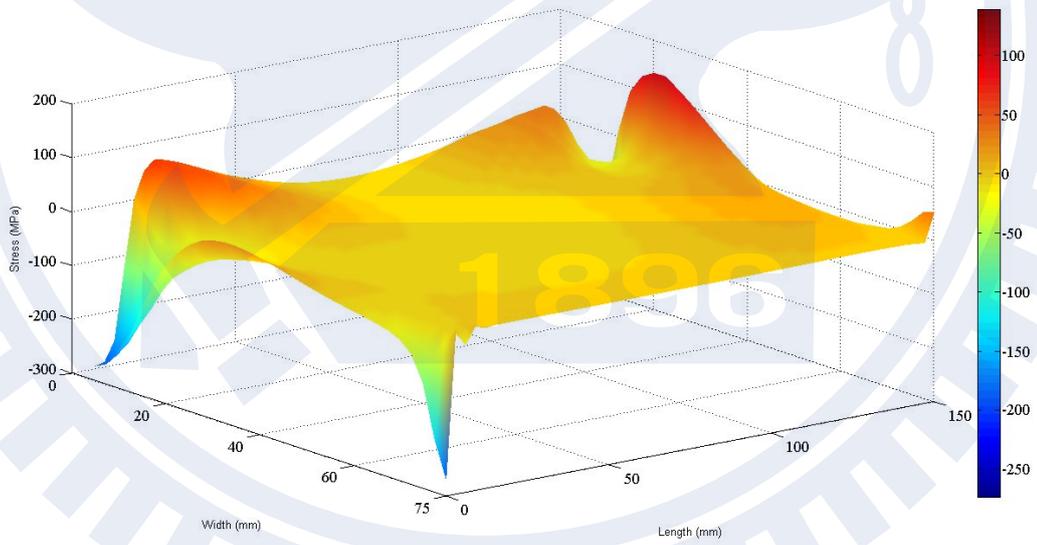


圖 4.76 碳鋼之銲接時間 50 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

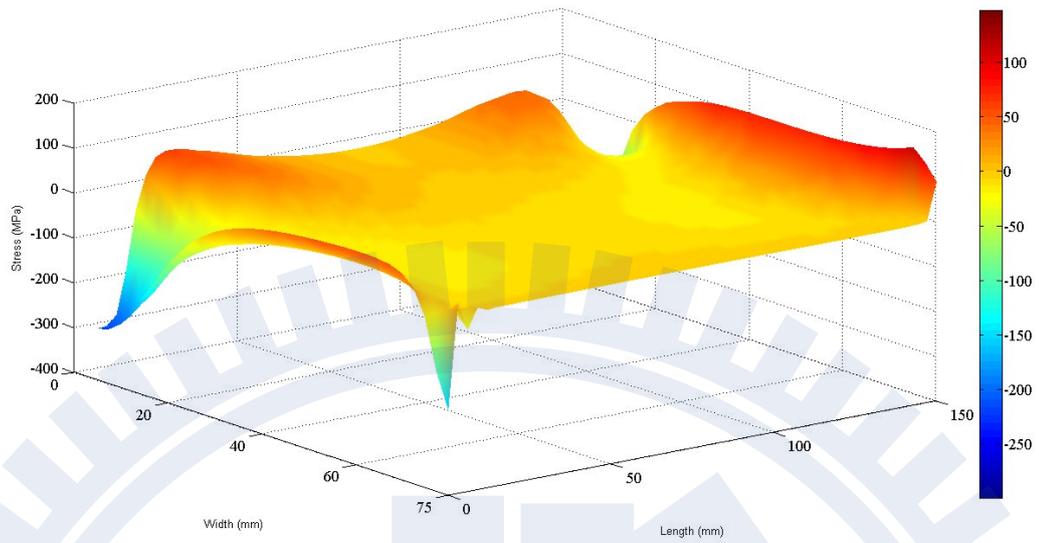


圖 4.77 碳鋼之銲接時間 100 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

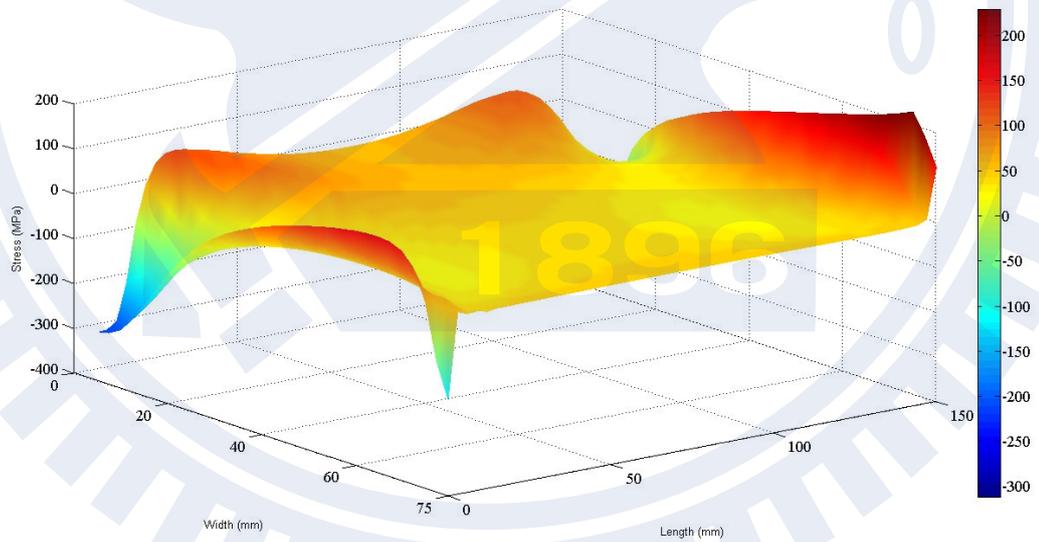


圖 4.78 碳鋼之銲接時間 200 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

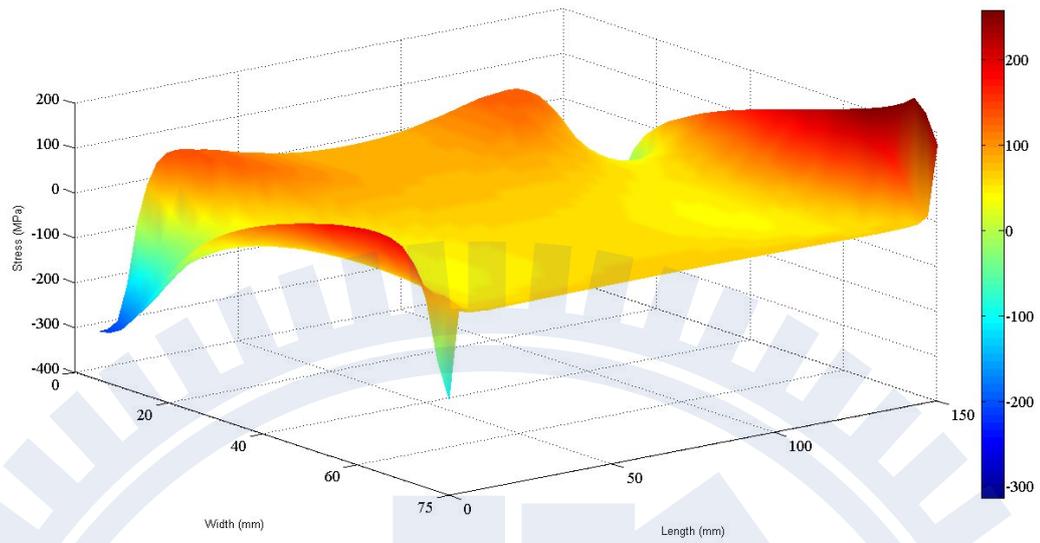


圖 4.79 碳鋼之銲接時間 400 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

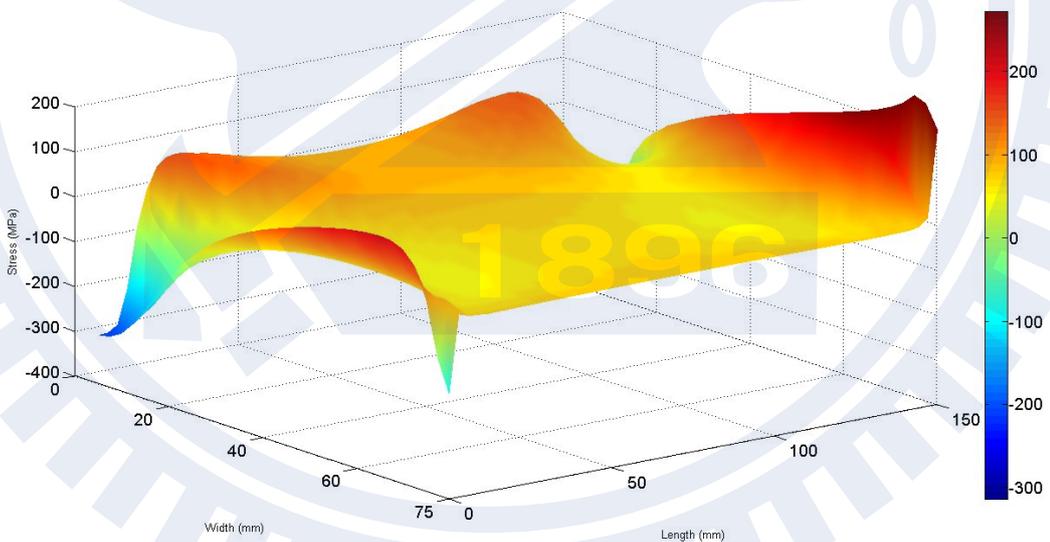


圖 4.80 碳鋼之銲接時間 800 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

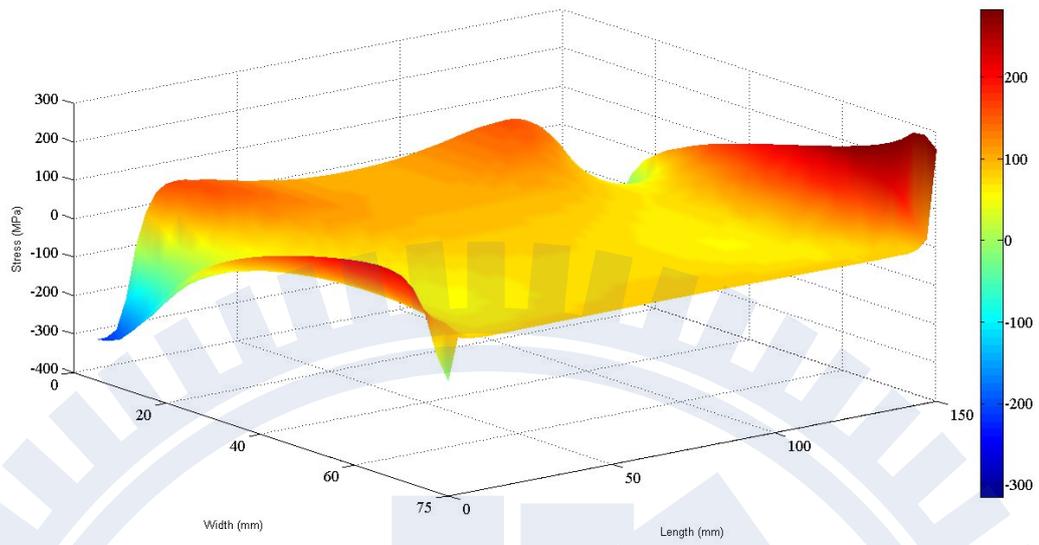


圖 4.81 碳鋼之銲接時間 1600 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

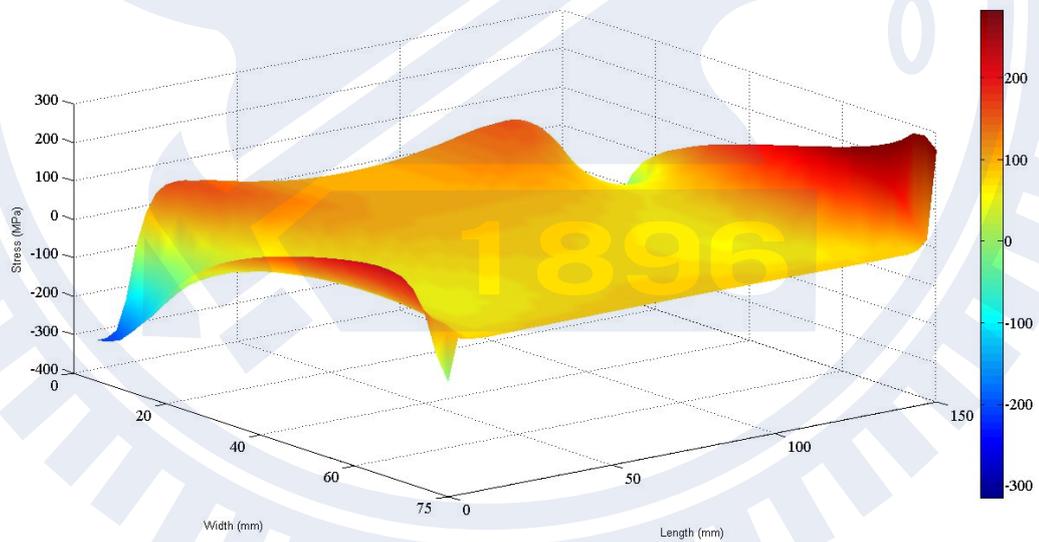


圖 4.82 碳鋼之銲接時間 3150 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

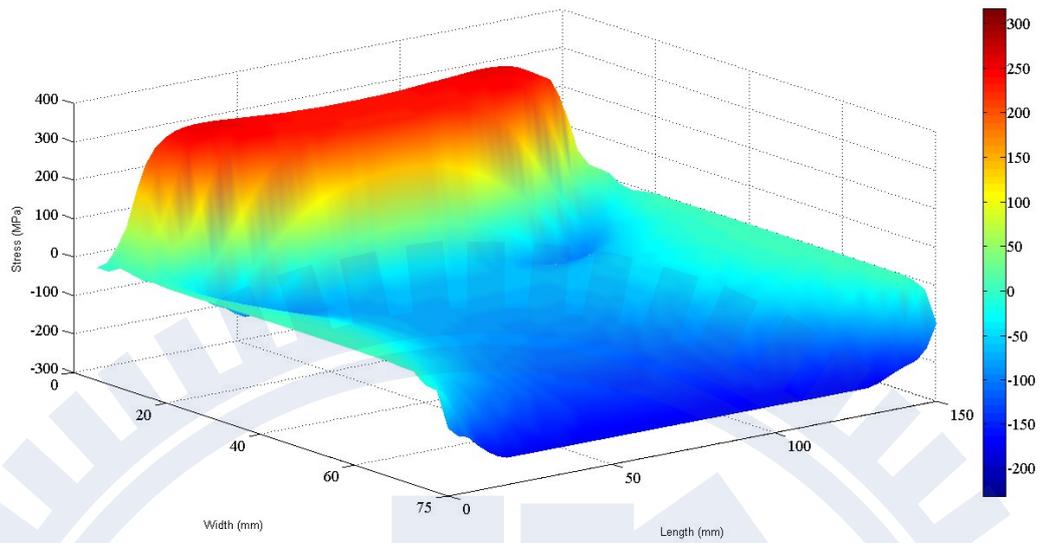


圖 4.83 (a) 碳鋼之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力分佈圖

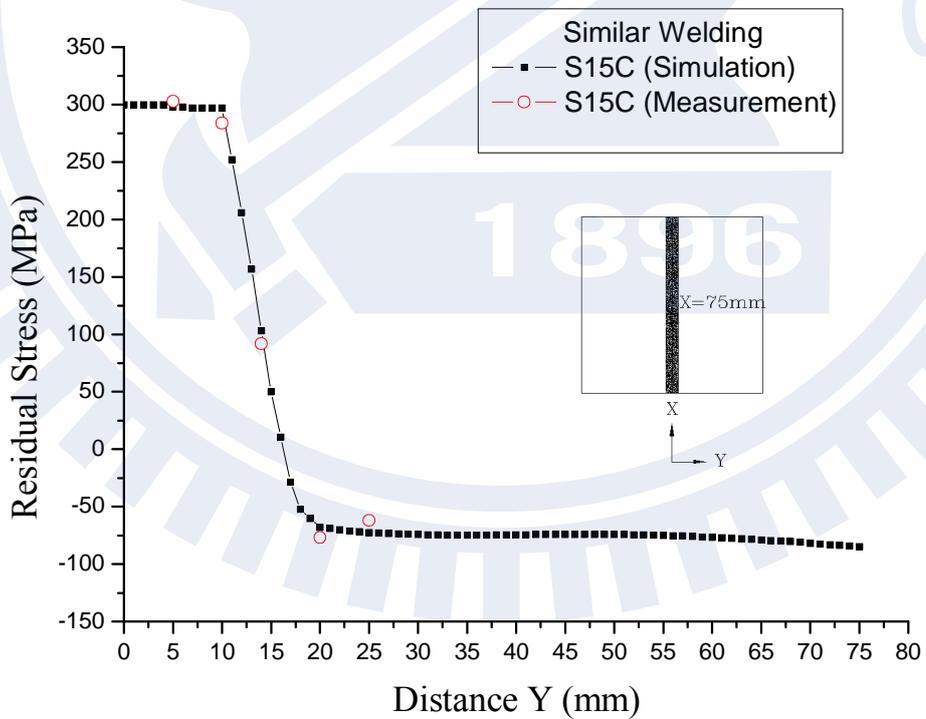


圖 4.83 (b) 碳鋼之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力分析結果與實驗數據之比較圖

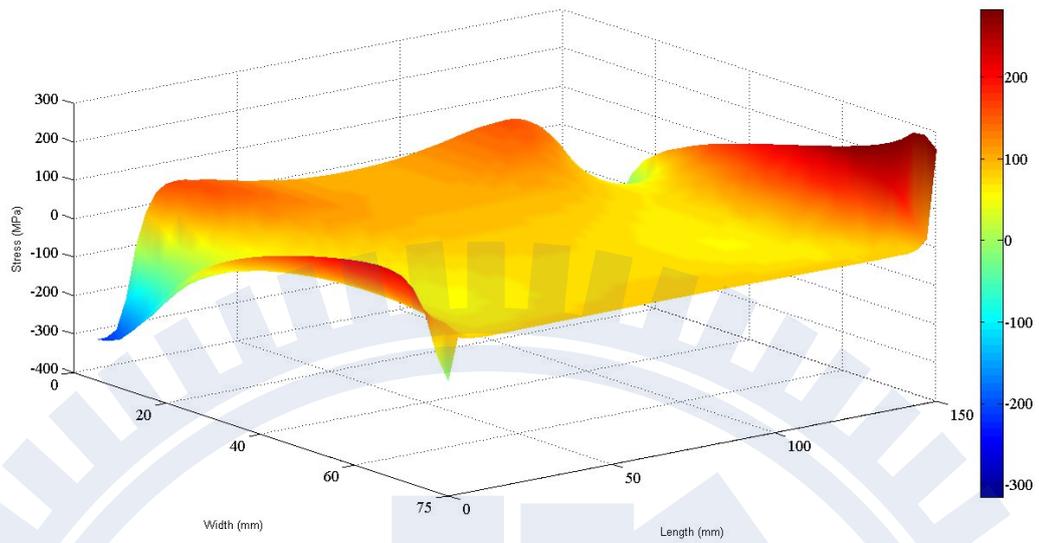


圖 4.84 (a) 碳鋼之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力分佈圖

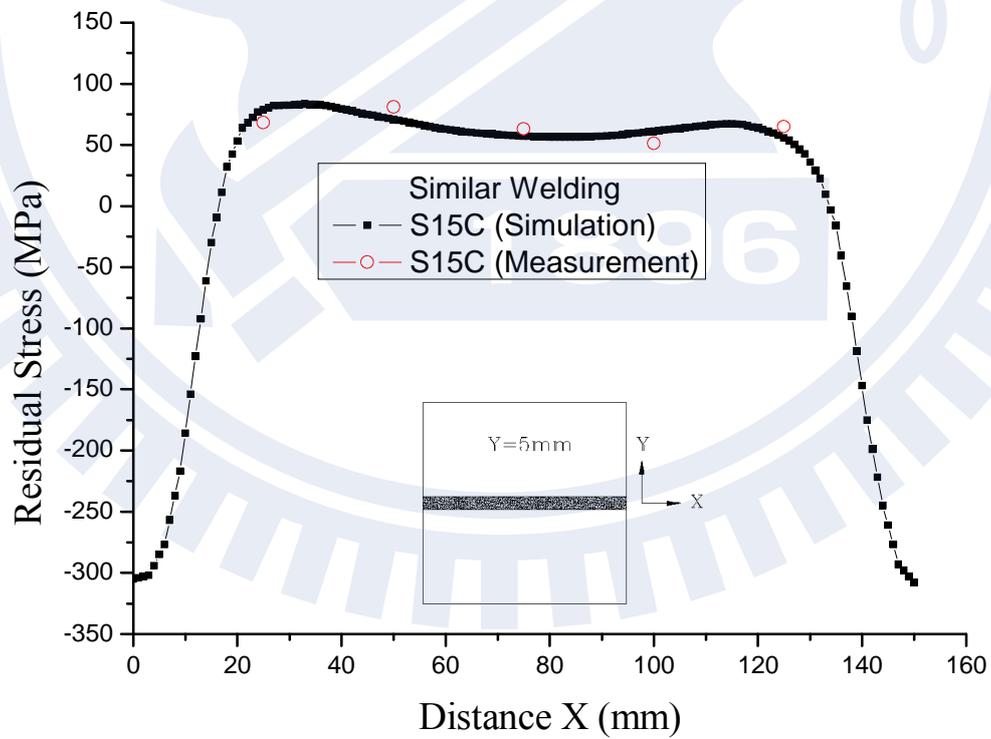


圖 4.84 (b) 碳鋼之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力分析結果與實驗數據之比較圖

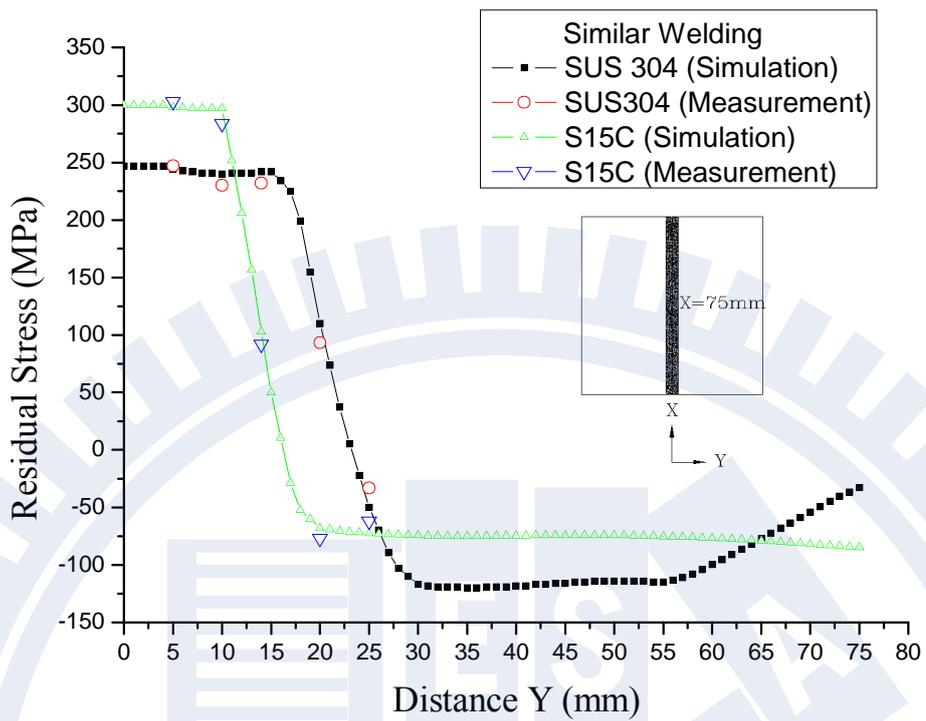


圖 4.85 同種不銹鋼與同種碳鋼之銲接殘留應力比較圖

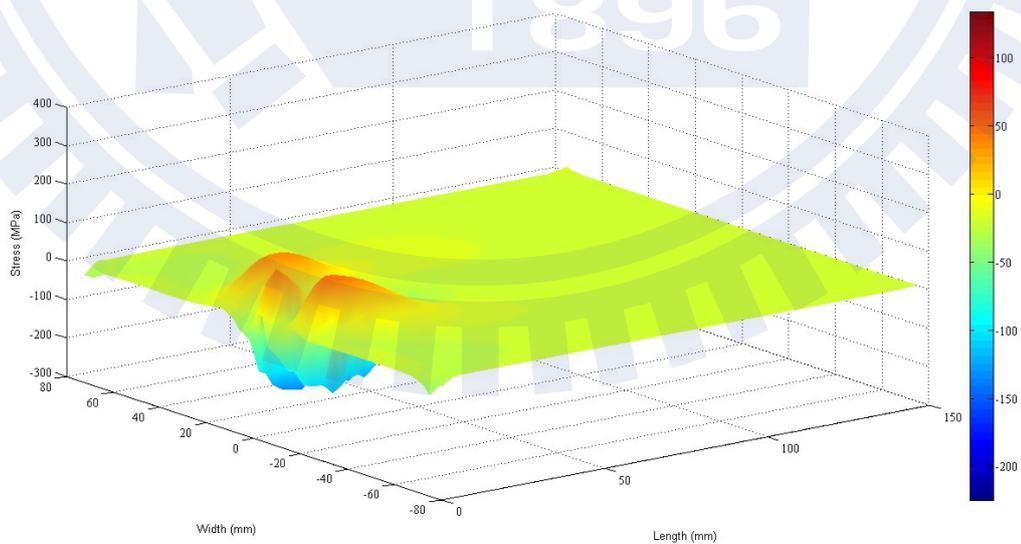


圖 4.86 異種金屬銲接時間 5 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

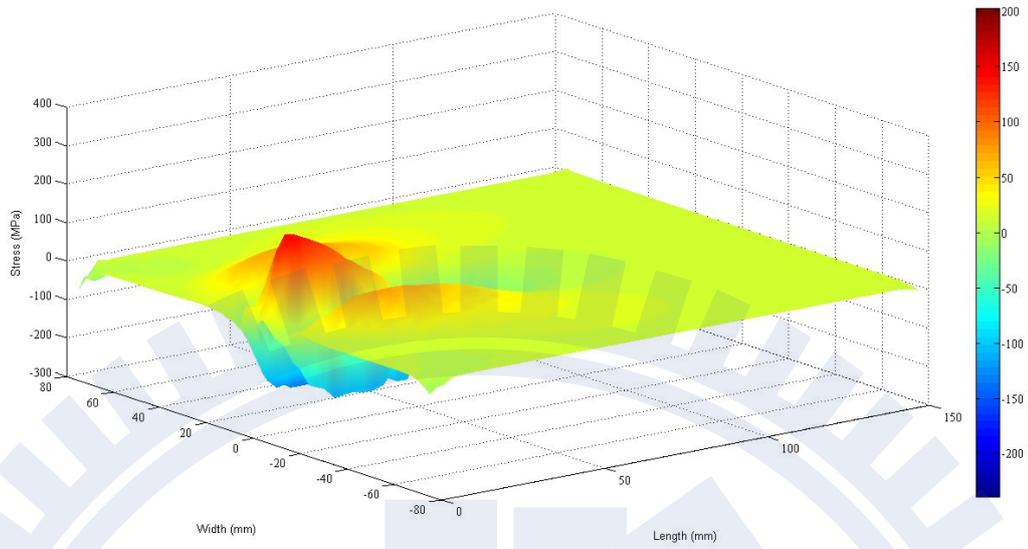


圖 4.87 異種金屬銲接時間 10 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

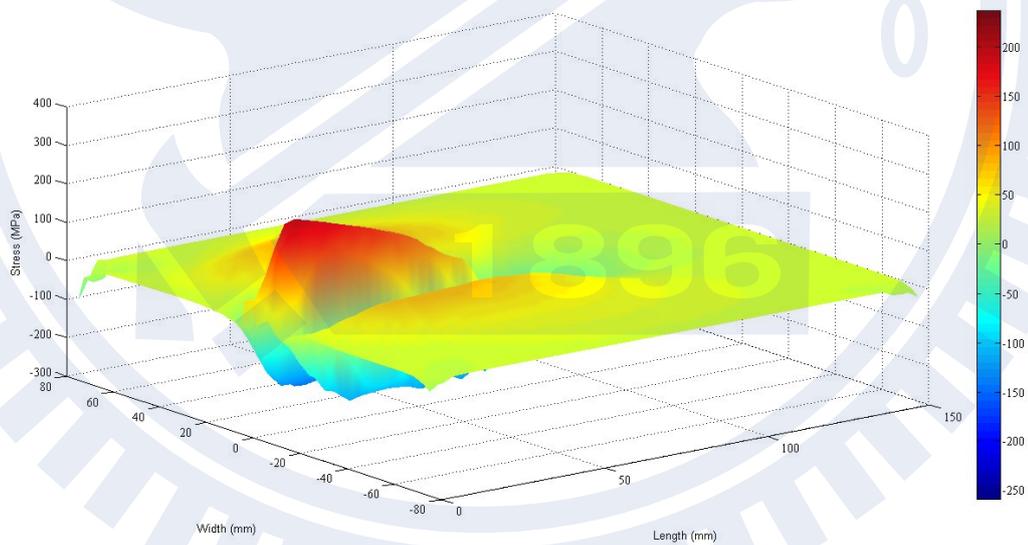


圖 4.88 異種金屬銲接時間 15 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

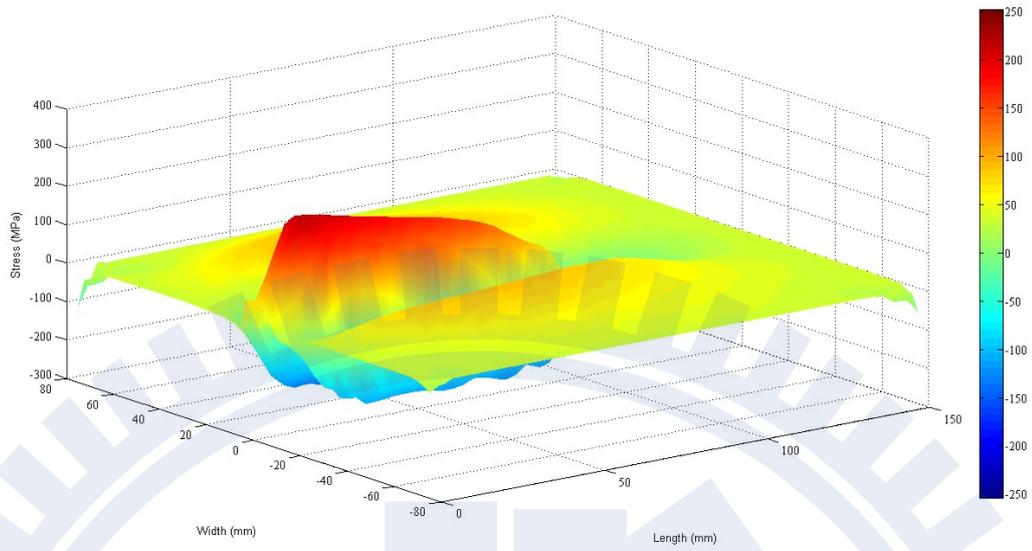


圖 4.89 異種金屬銲接時間 20 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

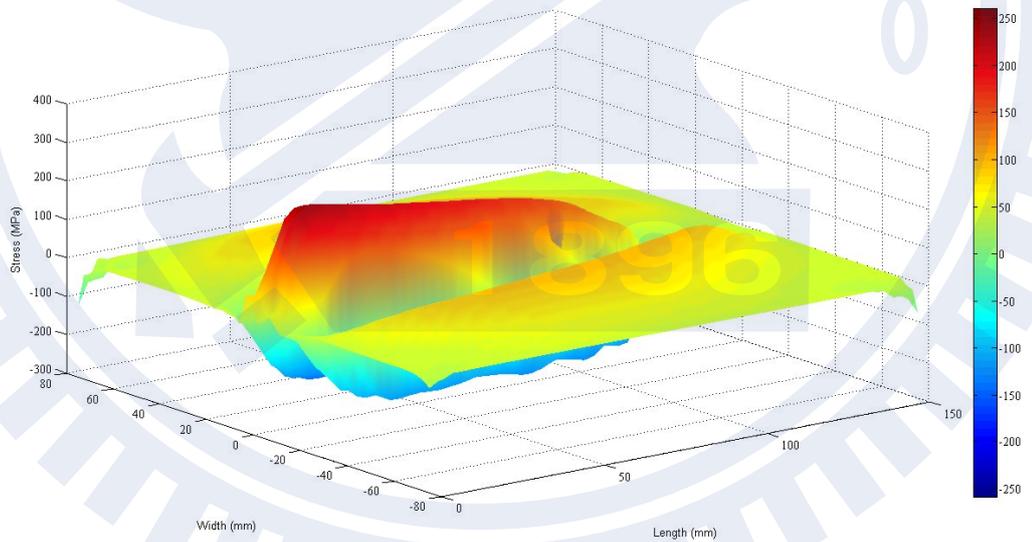


圖 4.90 異種金屬銲接時間 25 秒時之  $\sigma_{XX}$  暫態熱應力場狀態圖

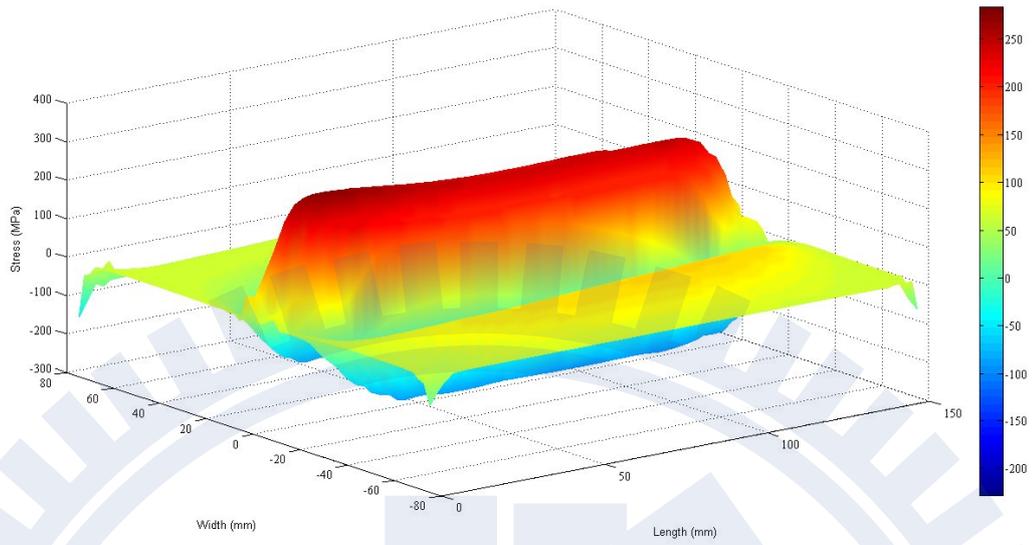


圖 4.91 異種金屬銲接 50 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

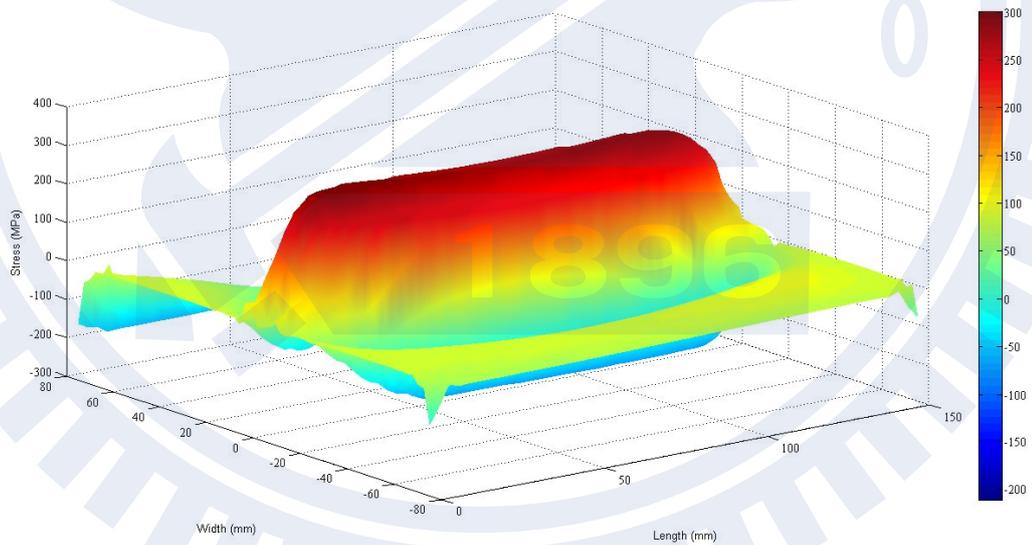


圖 4.92 異種金屬銲接 100 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

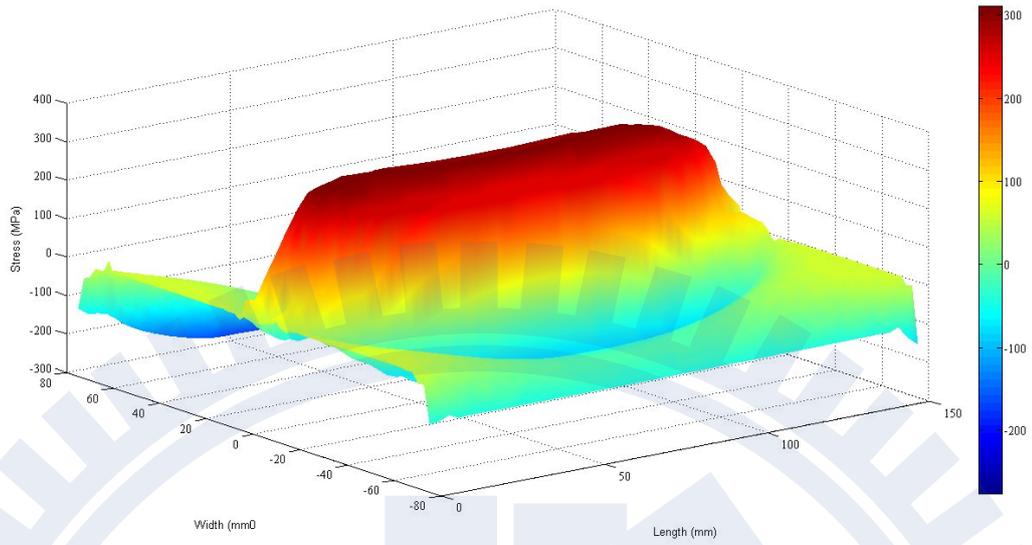


圖 4.93 異種金屬銲接 200 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

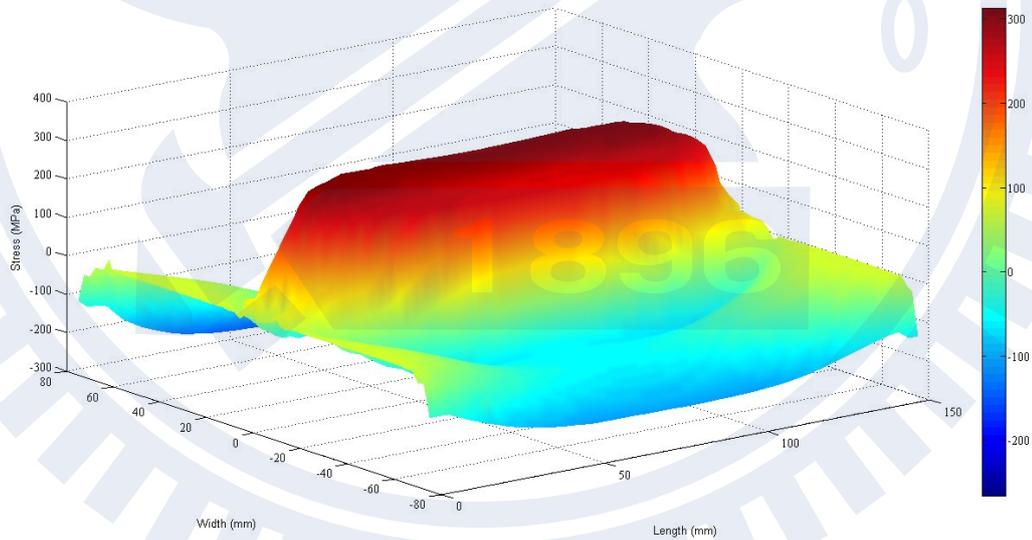


圖 4.94 異種金屬銲接 400 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

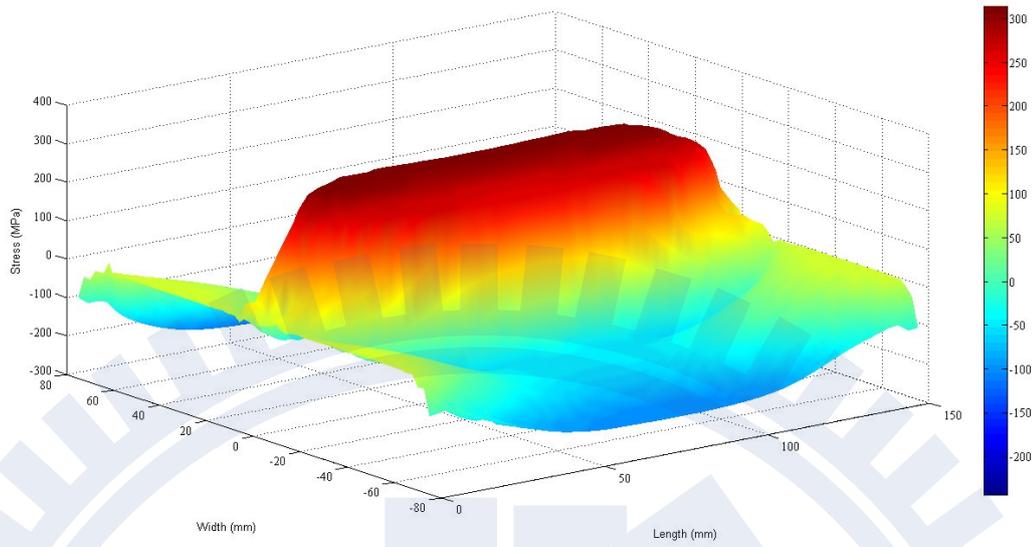


圖 4.95 異種金屬銲接 800 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

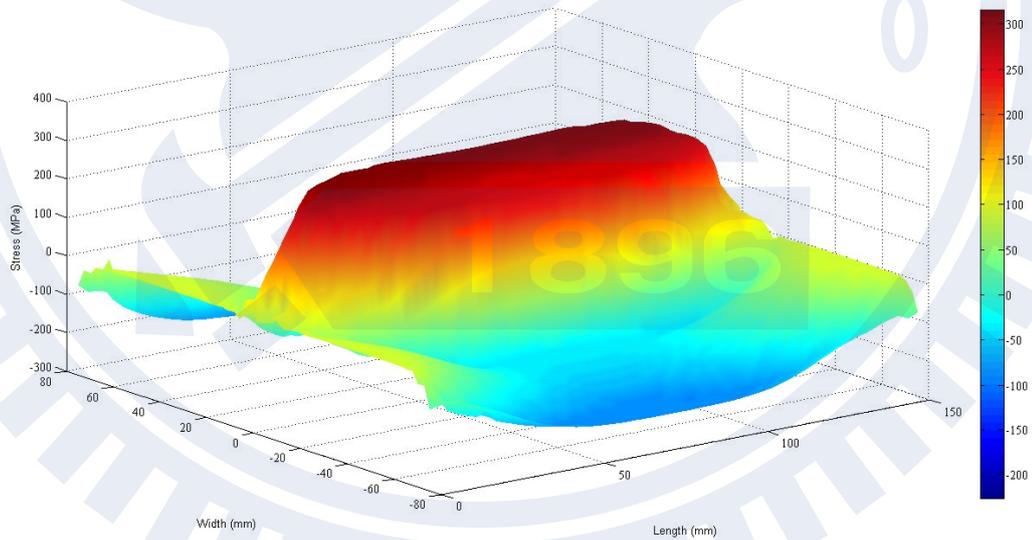


圖 4.96 異種金屬銲接 1600 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

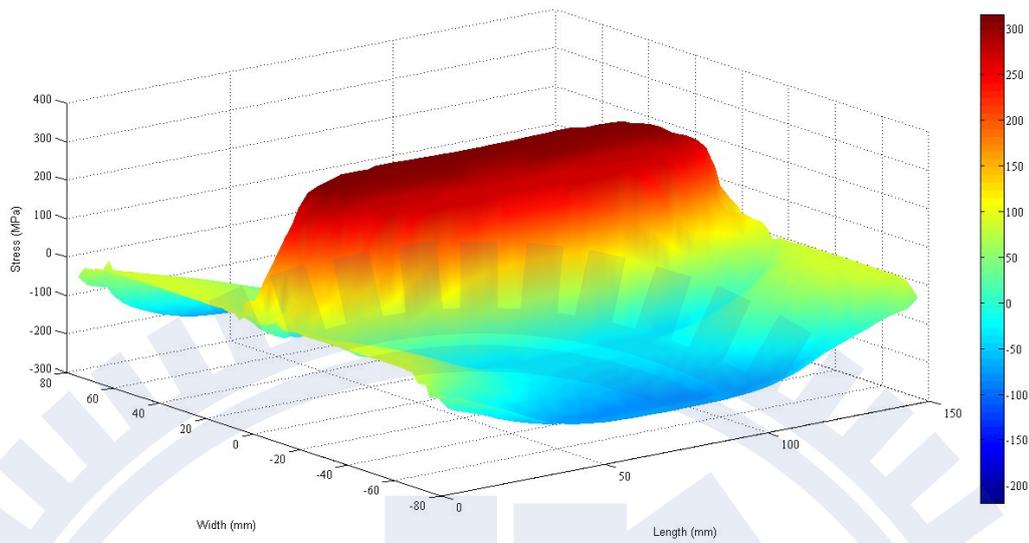


圖 4.97 異種金屬銲接 3150 秒時之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力場狀態圖

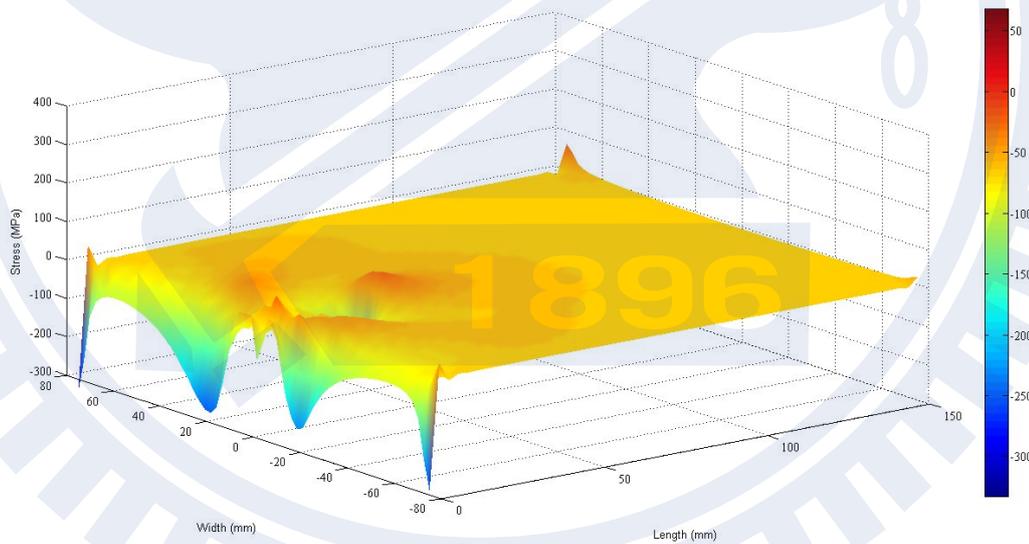


圖 4.98 異種金屬銲接時間 5 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

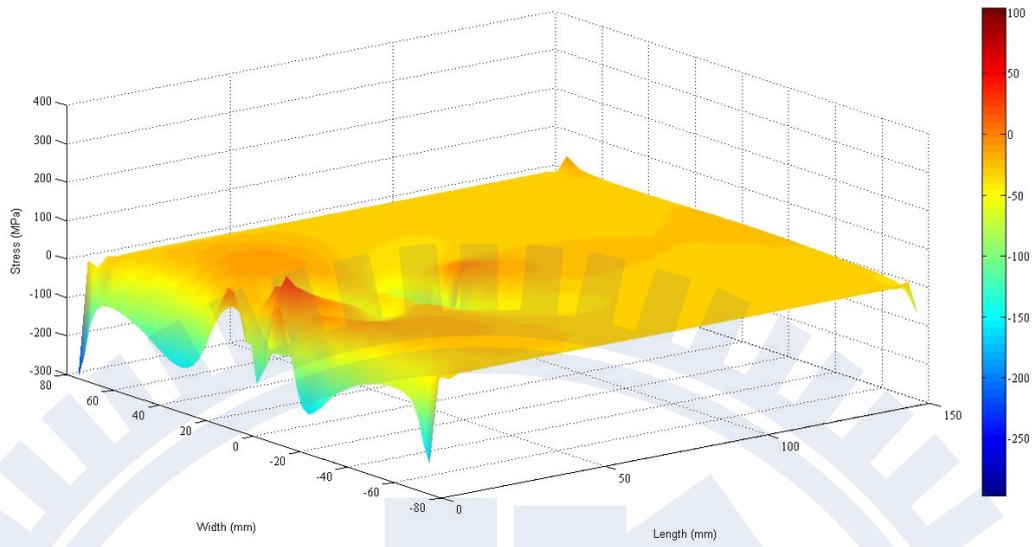


圖 4.99 異種金屬銲接時間 10 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

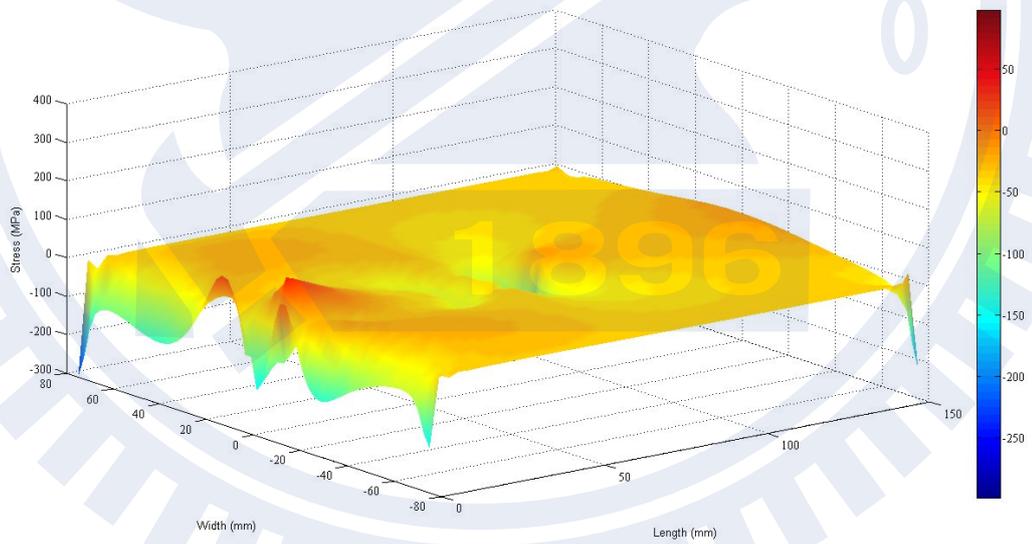


圖 4.100 異種金屬銲接時間 15 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

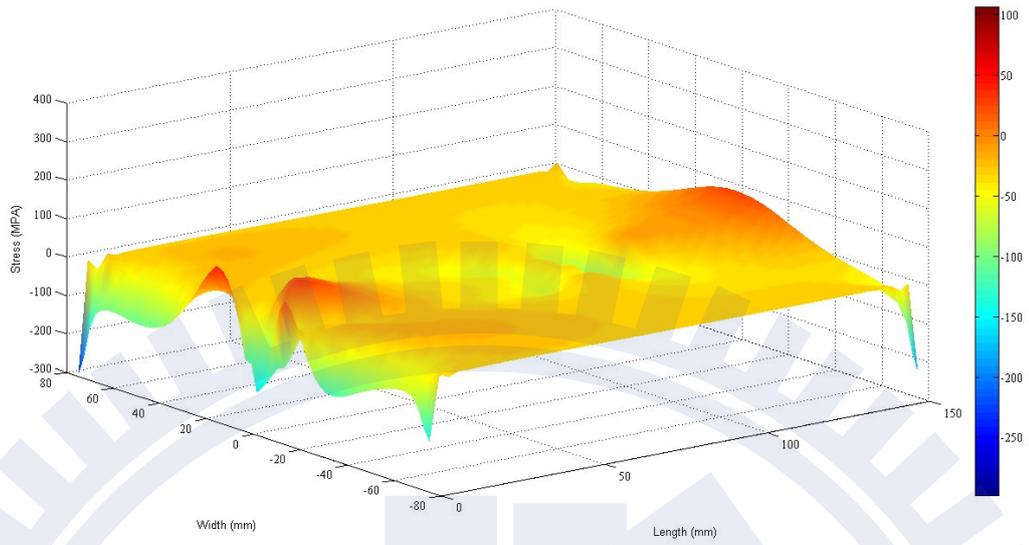


圖 4.101 異種金屬銲接時間 20 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

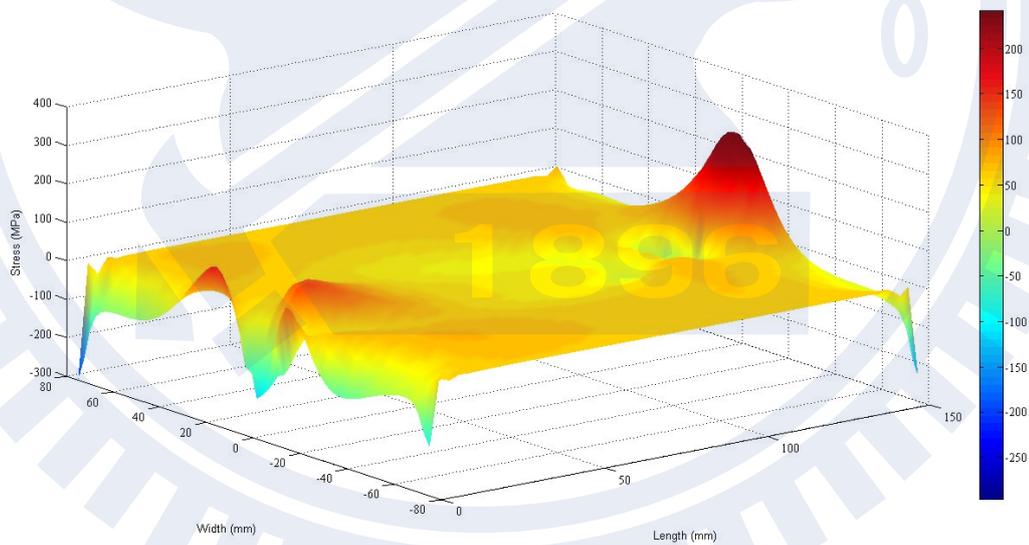


圖 4.102 異種金屬銲接時間 25 秒時之  $\sigma_{YY}$  暫態熱應力場狀態圖

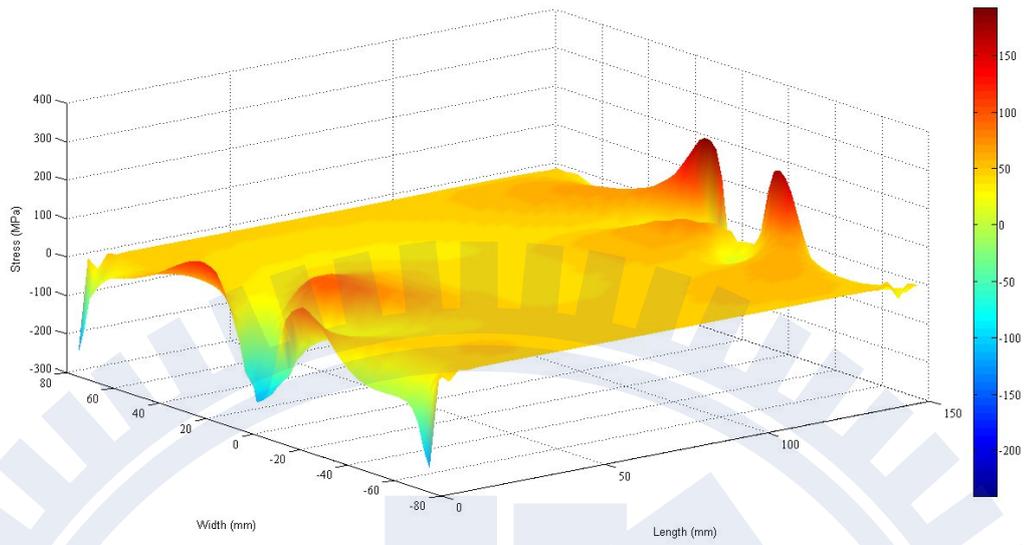


圖 4.103 異種金屬銲接 50 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

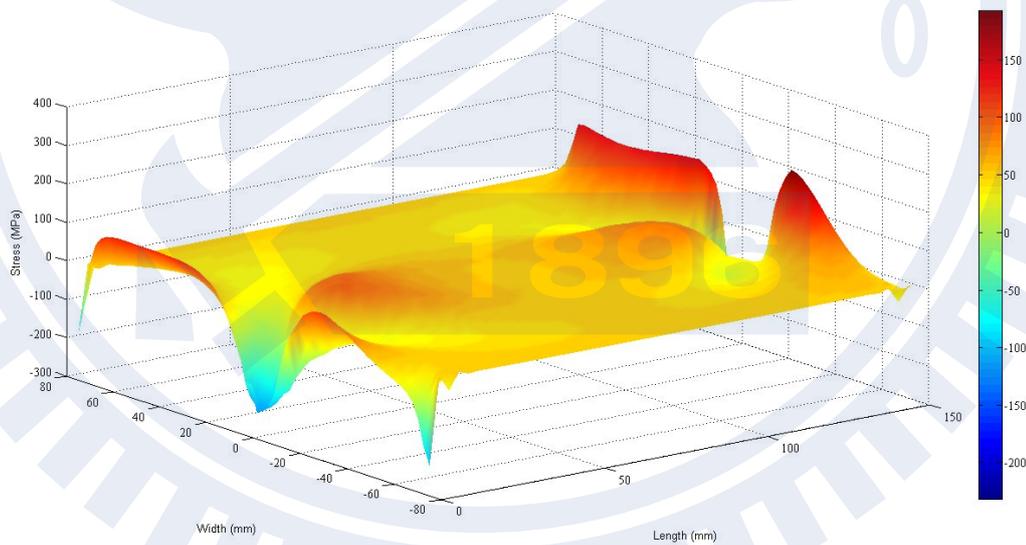


圖 4.104 異種金屬銲接 100 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

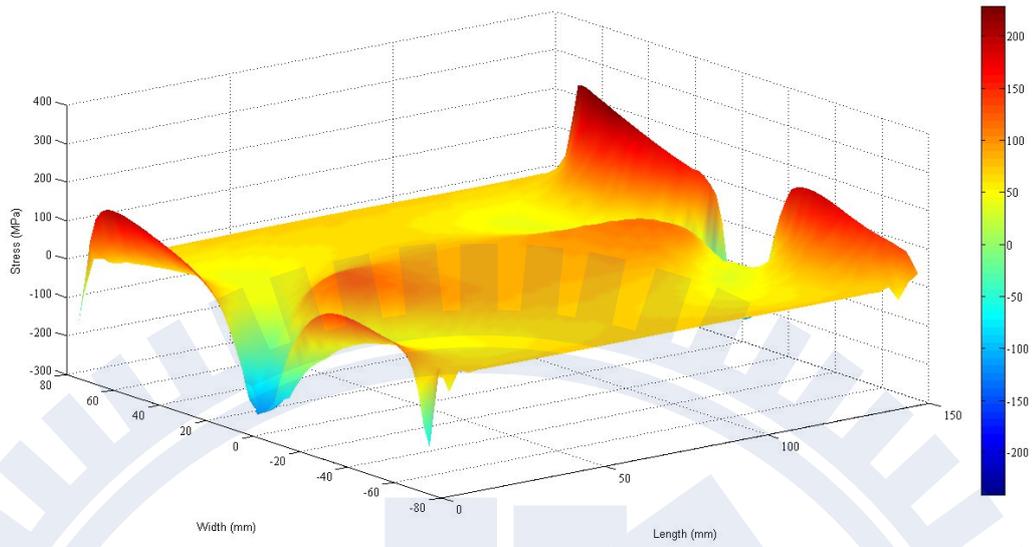


圖 4.105 異種金屬銲接 200 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

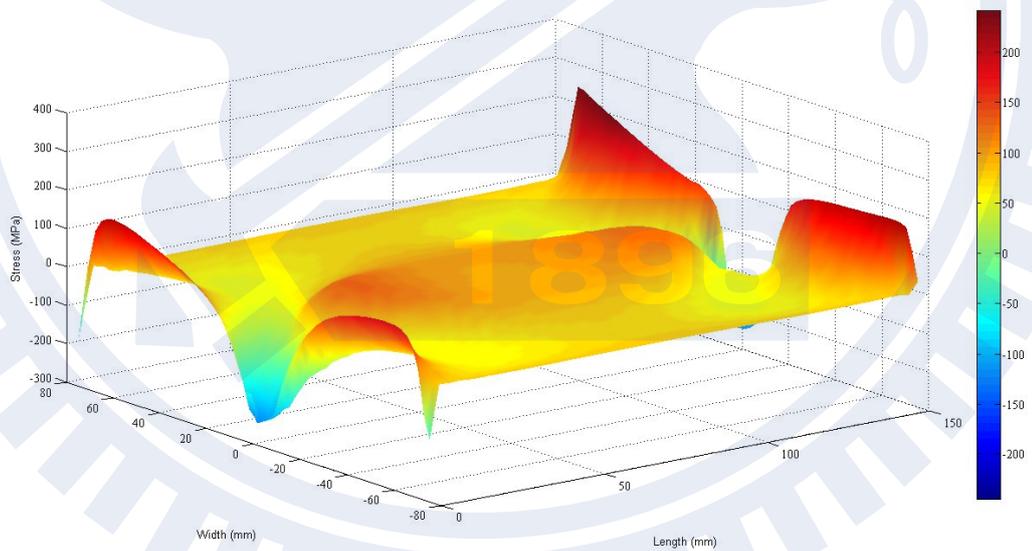


圖 4.106 異種金屬銲接 400 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

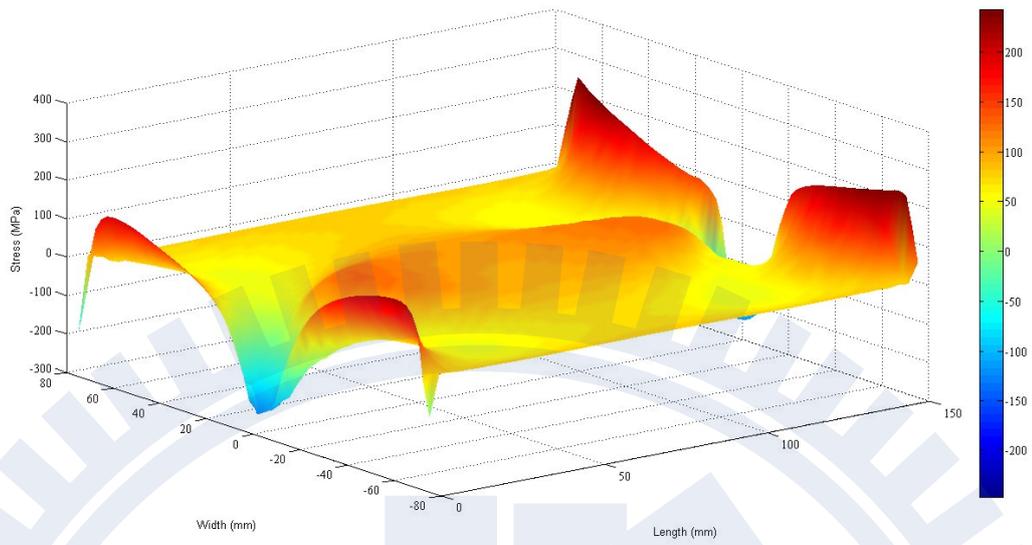


圖 4.107 異種金屬銲接 800 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

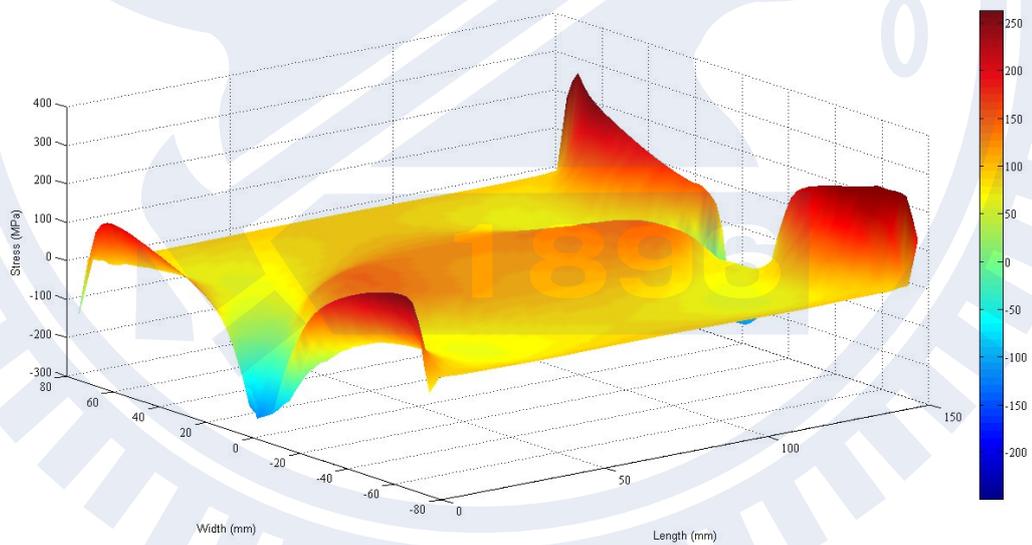


圖 4.108 異種金屬銲接 1600 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

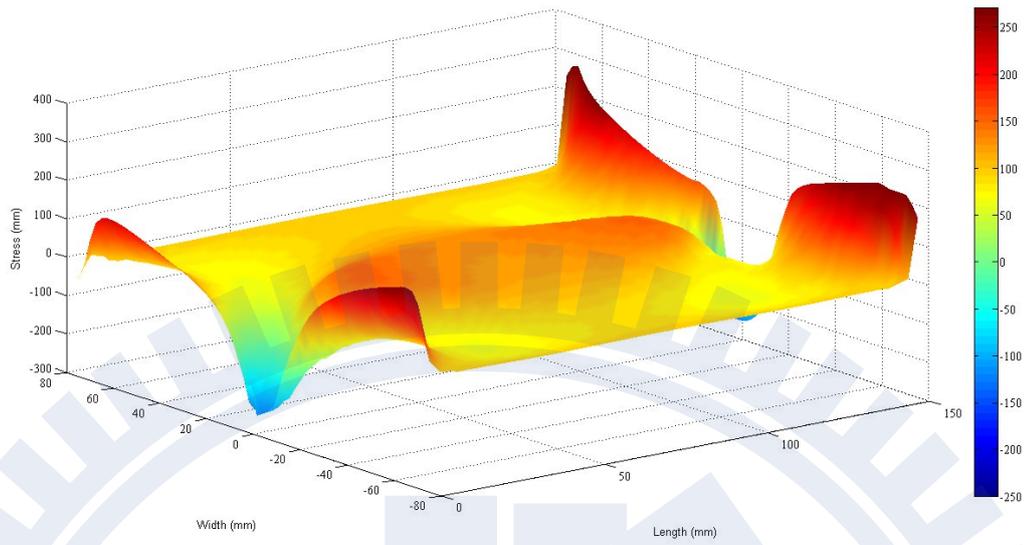


圖 4.109 異種金屬銲接 3150 秒時之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力場狀態圖

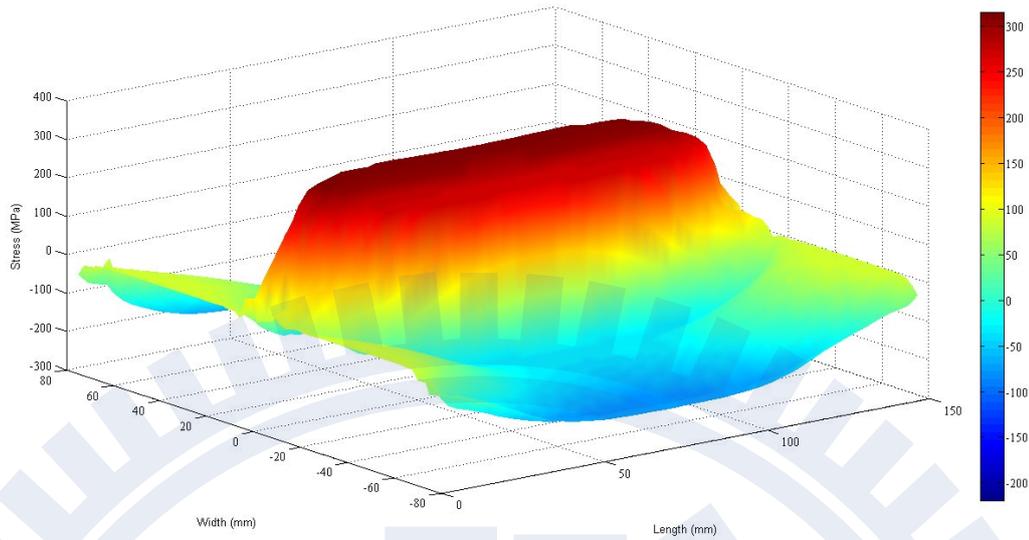


圖 4.110 (a) 異種金屬銲接之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力分佈圖

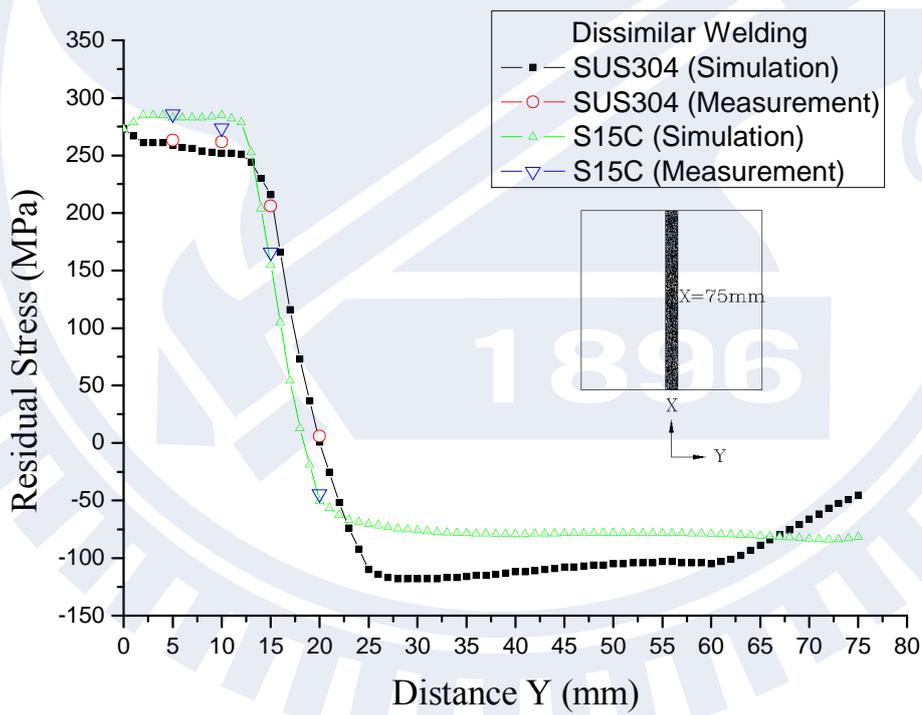


圖 4.110 (b) 異種金屬銲接之  $\sigma_{XX}$  銲接殘留應力分析結果與實驗數據

比較圖

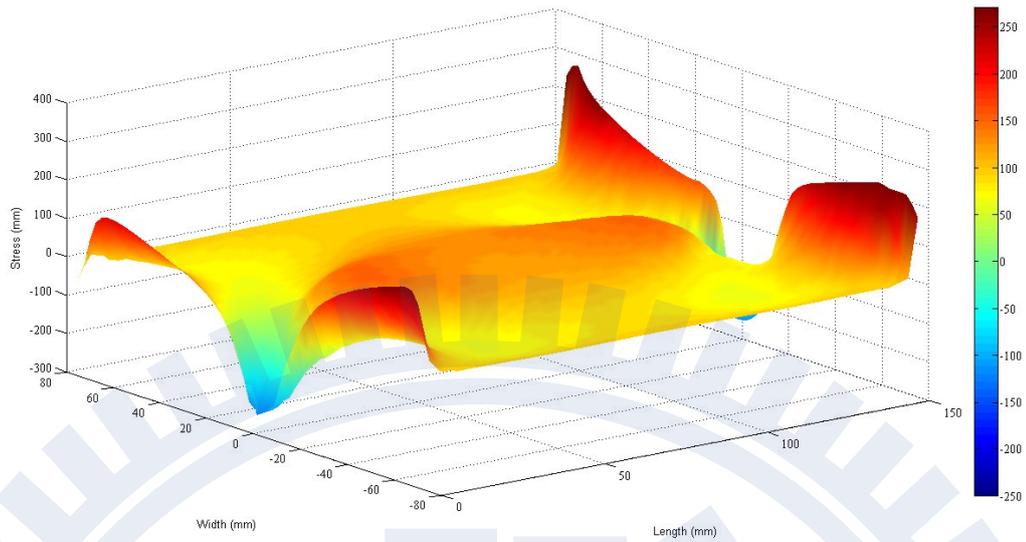


圖 4.111 (a) 異種金屬銲接之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力分佈圖

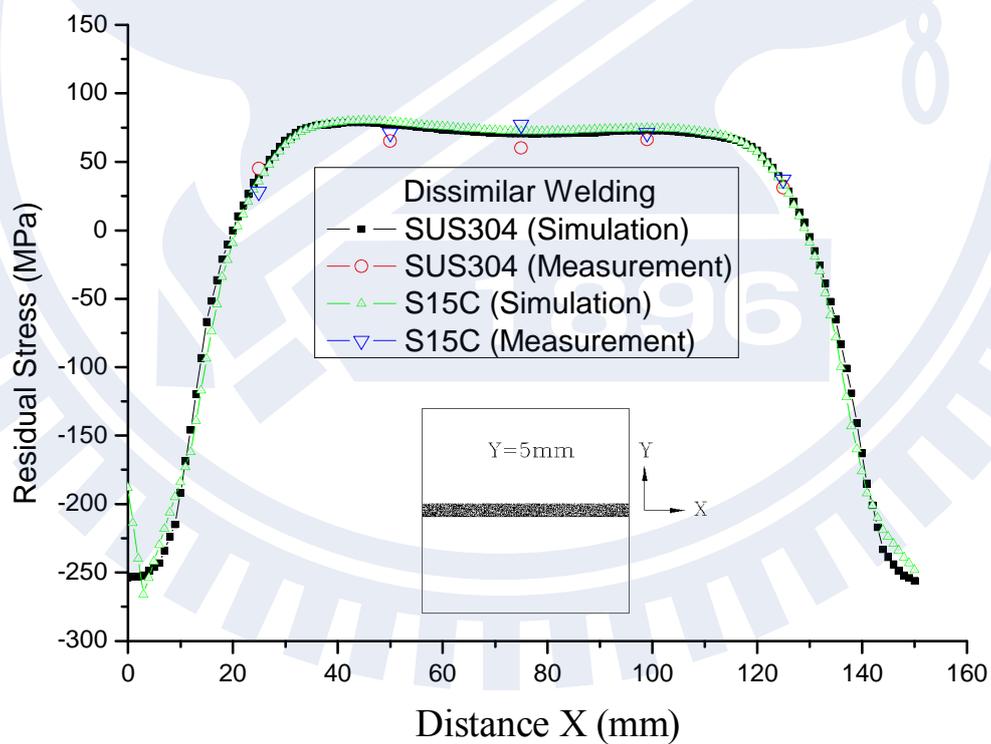


圖 4.111 (b) 異種金屬銲接之  $\sigma_{YY}$  銲接殘留應力分析結果與實驗數據

比較圖

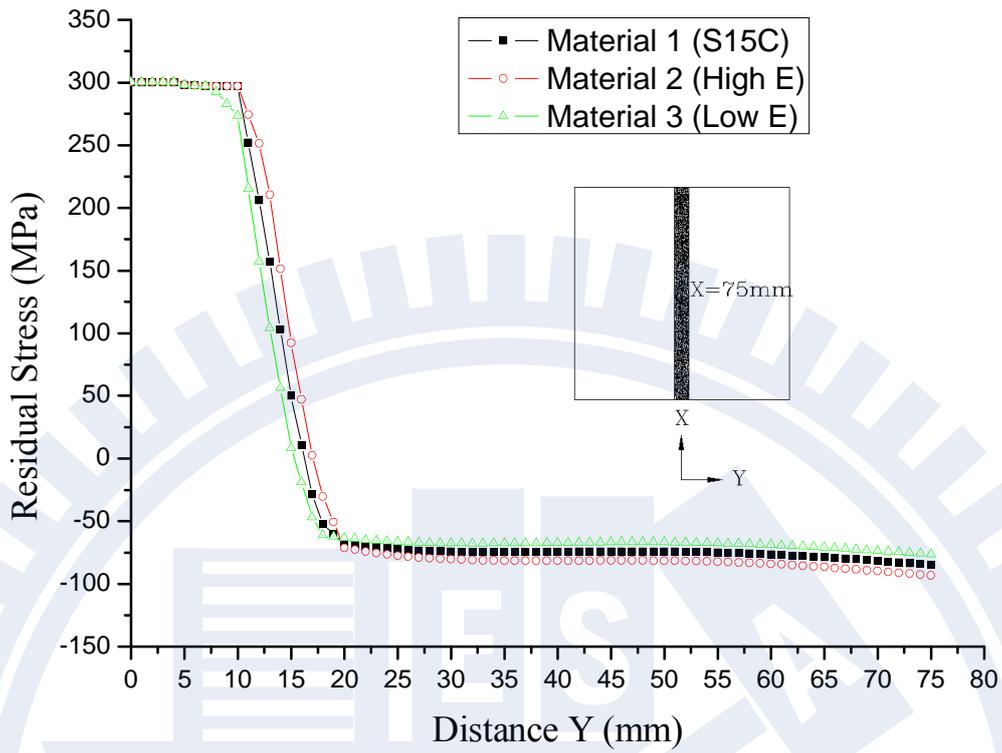


圖 4.112 僅變動材料系數楊氏係數 E 的殘留應力曲線圖

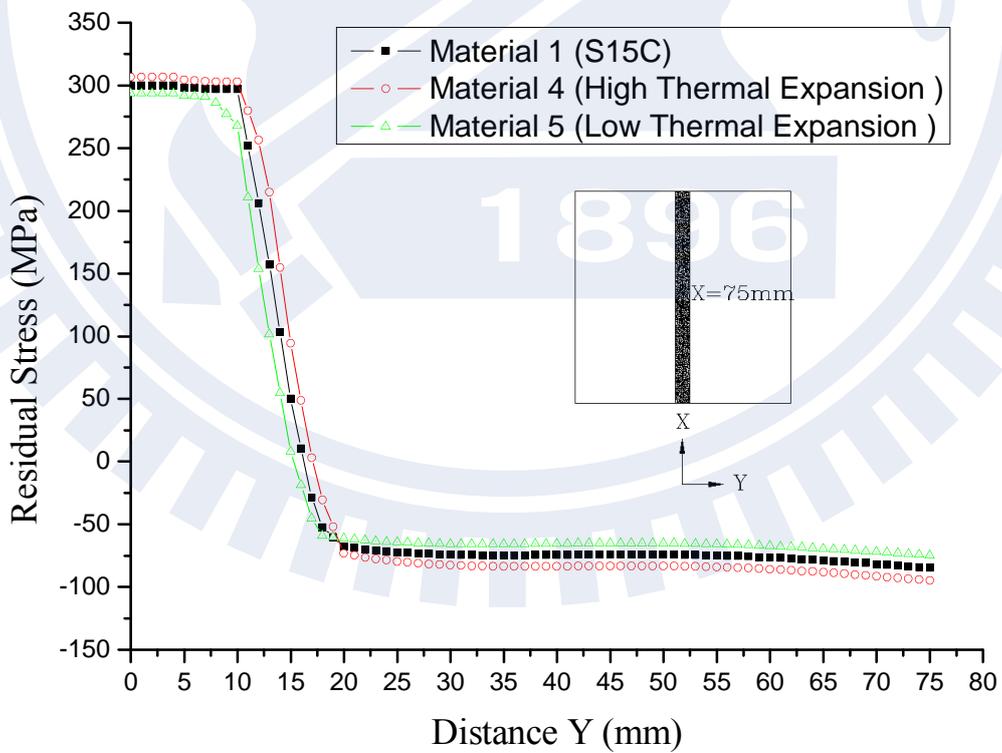


圖 4.113 僅變動材料系數熱膨脹係數  $\alpha$  之殘留應力曲線圖

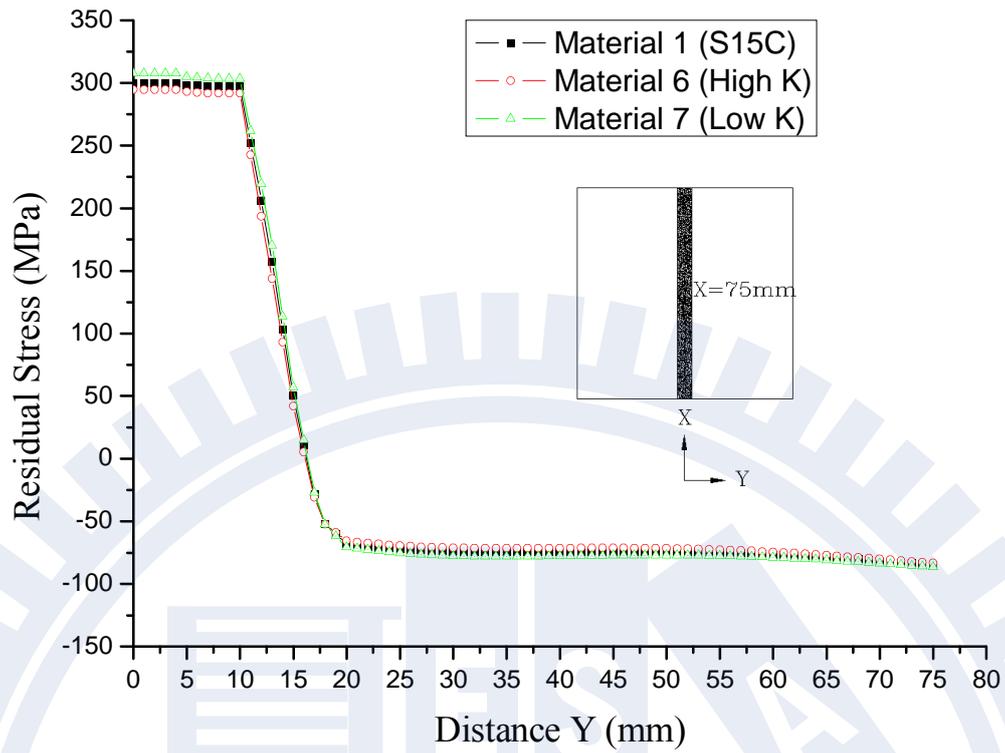


圖 4.114 僅變動材料系數熱傳導係數  $K$  之殘留應力曲線圖

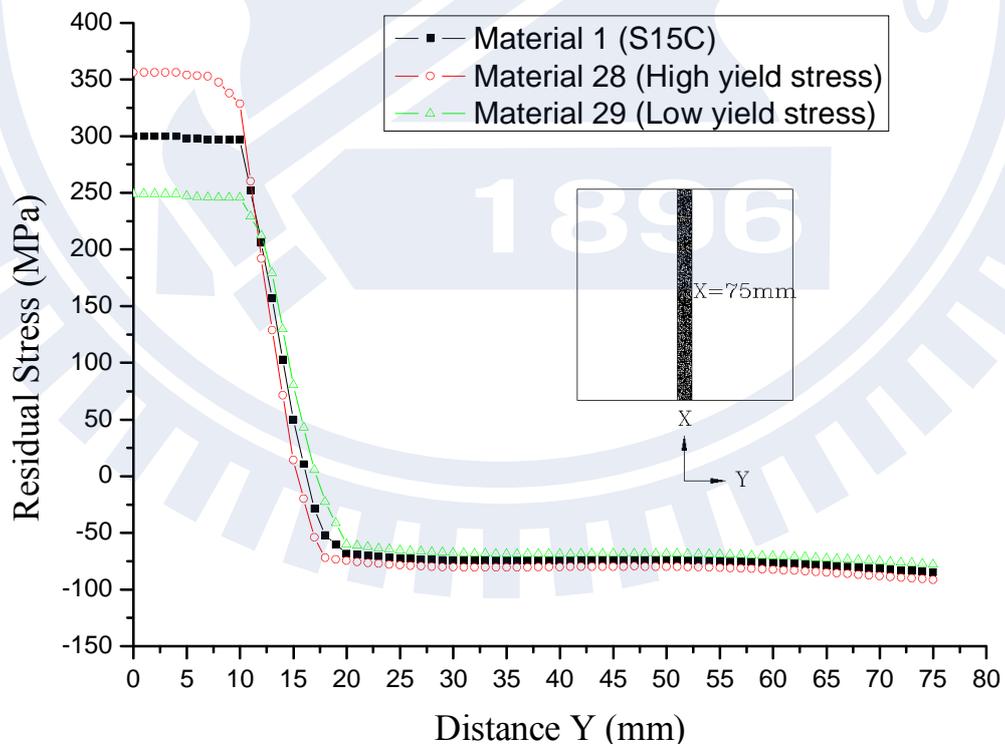


圖 4.115 僅變動材料系數降伏強度  $\sigma_Y$  之殘留應力曲線圖

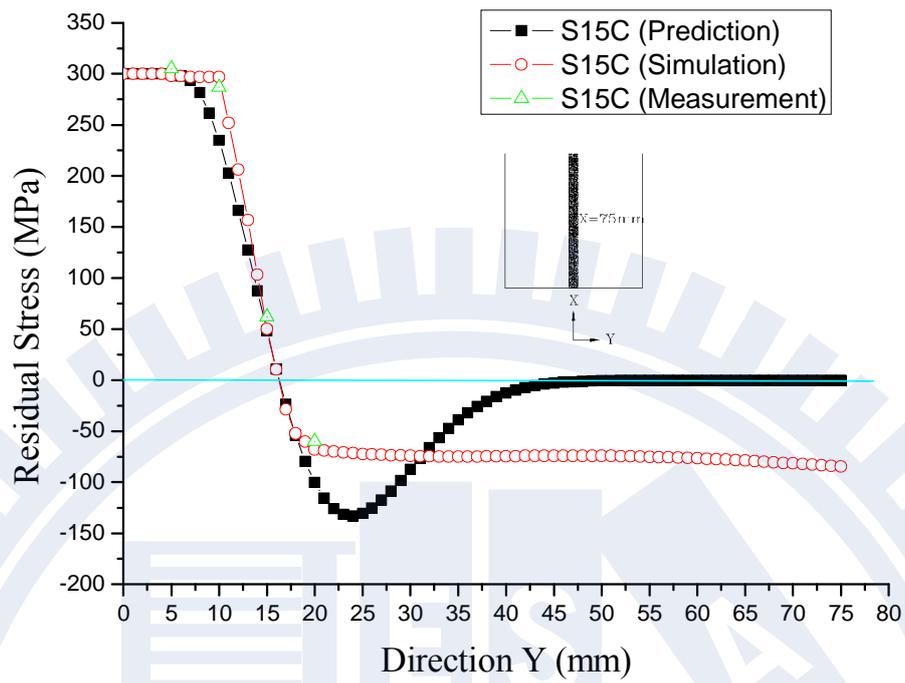


圖 4.116 S15C 碳鋼板之銲接殘留應力預測結果

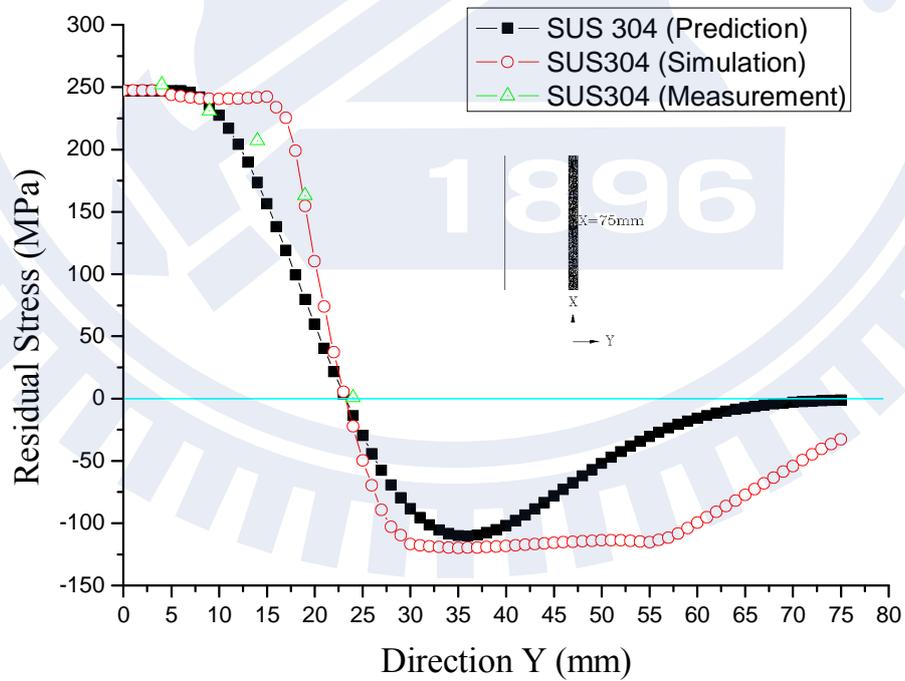


圖 4.117 SUS304 不銹鋼板之殘留應力預測結果

## 蔡曜隆博士個人資歷表

出生：中華民國 65 年 06 月 29 日

住址：高雄市苓雅區正言路 107 巷 2 號之 2 號

電話：(O)03-5914178；(H)07-7113667；0936-439728

學歷：私立長庚大學機械工程學系 學士 (中華民國 88 年)

國立交通大學機械工程學系 碩士 (中華民國 90 年)

國立交通大學機械工程學系 博士 (中華民國 99 年)

### 經歷：

工業技術研究院材料與化工所 副研究員

工研院「核能電廠運轉安全及重要換照項目整體性鑑定計畫」協助執行人

工研院「核二廠時限整體安全評估技術服務」協助執行人

工研院「核二廠飼水管嘴覆焊設計及結構安全評估技術服務案」執行人

工研院「核三廠調壓槽管嘴覆焊設計及結構安全評估技術服務案」執行人

工研院「核三廠反應爐底部穿越管及安全相關噴嘴鐸道殘留應力分析」執行人

工研院「調壓槽安全閥(PZR PSV)離線測試設備設計與安裝」執行負責人

### 現職：

工業技術研究院材料與化工所 副研究員

## 蔡曜隆 (Yao-Long, Tsai)

### A. Referred Paper

1. Y.L. Tsai, Li. H. Wang, T.W. Fan, Sam Ranganath, C.K. Wang and C.P. Chou, “Welding overlay analysis of dissimilar metal weld cracking of feedwater nozzle”, International Journal of Pressure vessels and Piping, 87, pp. 26-32, 2010.
2. Y.L. Tsai, C.C. Chang and C.P. Chou, “The Study of the Relationships between Material Properties and Welding Residual Stresses”, Advanced Material Research, 97-101, pp. 703-708, 2010.
3. Y.L. Tsai, C.C. Chang and C.P. Chou, “Finite element analysis of the residual stress in butt welds of similar and dissimilar steel plates”, International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering, 2010. (Accepted)
4. Y.L. Tsai, C.C. Chang and C.P. Chou, “Three-Dimensional FEM Analysis of Residual Stresses in Butt-Welded Tube”, International Journal of Computer Applications in Technology, 2009. (revised)

### B. Conference Paper

1. Y.L. Tsai, K.H. Tseng, C.P. Chou, “The Study of Post-Weld-Shift (PWS) in Optical Subassembly of TO Package”, The International Conference on Advanced Welding/Joining Technology for 21st Century 2005, Dalian, China, 2005.
2. Y.L. Tsai, C.C. Chang and C.P. Chou, 2009, “Residual Stress Analysis of the Butt-Welded Plates of AZ31B,” International Conference on Manufacturing and Engineering Systems, Yunlin, Taiwan, December 17-19, 2009.
3. Y.L. Tsai, C.J. Li, T.P. Tsai, T.W. Fan, Li H. Wang and C.P. Chou, 2010, “Sensitivity Analyses of Finite Element Method for Computing Residual Stress of Dissimilar Metal Multi-Pass Weld”, The 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE18), Xi'an, China, May 17-21, 2010.
4. Y.L. Tsai, T.P. Tsai, C.J. Li, T.W. Fan, Li H. Wang and C.P. Chou, 2010, “Dynamic analysis of including new loads on spent fuel storage rack”, The 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE18), Xi'an, China, May 17-21, 2010.
5. Y.L. Tsai, C.J. Li, T.P. Tsai, T.W. Fan, Li H. Wang and C.P. Chou, 2010, “Finite Element Analysis of Residual Stress of Dissimilar Metal Welded Nozzle”, ASME PVP/K-PVP 2010 conference, Washington, USA, July 18-22, 2010.
6. Y.L. Tsai, T.P. Tsai, C.J. Li, T.W. Fan, Li H. Wang and C.P. Chou, 2010, “Dynamic analysis of spent fuel storage rack”, ASME PVP/K-PVP 2010 conference, Washington, USA, July 18-22, 2010.