

國立交通大學
機械工程學系碩士班
碩士論文

偵測質子交換膜燃料電池流道板生成水的

聲導波檢測

1896

Acoustic Guided Wave Inspection for Water Generated in
Flow Field Plate of PEM Fuel Cells

研究生：王裕太

指導教授：尹慶中 博士

中華民國一〇〇年九月

偵測質子交換膜燃料電池流道板生成水的聲導波檢測

Acoustic Guided Wave Inspection for Water Generated in
Flow Field Plate of PEM Fuel Cells

研究生：王裕太

Student : Yu-Tai Wang

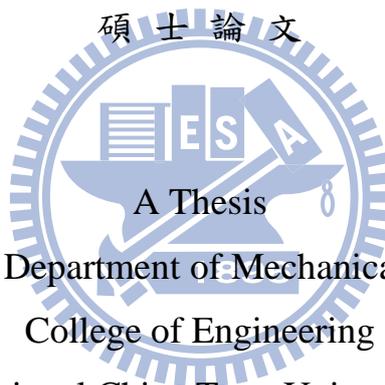
指導教授：尹慶中 博士

Advisor : Dr. Ching-Chung Yin

國立交通大學

機械工程學系碩士班

碩士論文



Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

September 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇〇年九月

偵測質子交換膜燃料電池流道板生成水的聲導波檢測

研究生：王裕太

指導教授：尹慶中 博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

質子交換膜燃料電池的運轉效能取決於電池組內部生成水分的管理，本研究於鋁合金流道板兩側設置陣列壓電陶瓷換能器，作為聲導波的致動器與感測器，監測流道板中水的分布。以有限元素法計算鋁合金流道板在某一固定波長下所獲得的頻率與模態變形，並繪製聲導波相速度頻散曲線，發現在相同頻率下會對應許多不同的聲導波模態，且當分析模型的寬度越大、流道數量越多時，低頻範圍與 S_0 模態相交的其他撓曲模態會越多。

實驗以陣列聲導波感測器及雷射都卜勒干涉儀偵測流道含有不同水量之導波訊號，流道板前後邊緣多重反射訊號會干擾直接波傳的聲導波響應，造成導波相速度量測值與數值解間的差異。壓電陣列發射及接收端之間的插入損失變化量為反應生成水量的函數，實驗結果顯示聲導波的衰減與負載的水量多寡有關，聲導波的插入損失可作為質子交換膜燃料電池反應生成水的監測指標。

關鍵字：質子交換膜燃料電池、水的生成、聲導波、陣列感測器

Acoustic Guided Wave Inspection for Water Generated in Flow Field Plate of PEM Fuel Cells

Student: Yu-Tai Wang

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The operating performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) depends on the water production inside the cells. In this study, array piezoelectric ceramic transducers were surface adhered to flow field plate mockups made of aluminum alloy and used to generate and detect guided acoustic waves propagating along the flow channels. In-situ inspection of water distribution in PEM fuel cells is feasible by the presented method. The phase velocities for guided acoustic waves and their corresponding mode shapes were determined using finite element analysis (FEA). Besides the A_0 and S_0 modes, several additional bending modes caused by transverse vibrations of the stiffeners in flow field plate were found in the lower frequency range.

In experiment, the acoustic wave signals were detected by two piezoelectric array sensors and laser Doppler interferometer for various amounts of water production. The fact of directly propagating guided waves interfered with multiply reflected echoes results in deviation of both measured and numerically predicted phase velocities of guided acoustic waves. The insertion loss between transmitted and received piezoelectric arrays was

measured as a function of the quantity of water production. The results indicate that the attenuation of guided acoustic wave increases as the water content increases. The insertion loss is a significant index for monitoring water production in the flow field plate of PEM fuel cells.

Keywords: PEM fuel cell, water production, guided acoustic wave, array sensor



誌謝

在此感謝我的指導教授 尹慶中博士在我就學期間所給予的指導，除了在研究的過程中不斷的提攜與指正，更讓我在生活以及待人處事上有所成長，老師所給我的指導我將終生銘記。同時感謝蕭國模與鄭泗東老師撥冗擔任口試委員，給予指教與建議，使論文能更完整。特別感謝學長劉育翔在實驗中所給予的幫助與建議，使得研究能順利完成，同時感謝學長游泰和、王多聞、許世明、溫子達、鄭博毅、賴佑年、學姐吳昱瑾提供學習上的寶貴意見與生活經驗，感謝同學蔡慶芳、吳家宇、湯士杰、鄭智遠、黃室維、蔡旻軒於修課與研究上的協助與琢磨，讓我們彼此都更加成長，以及學弟妹吳旻修、李劭遠、梁均帆、鄒心慧在這短暫相處中的幫助與分享，在此也祝福你們論文順利。

最後，特別要將此刻的心情與感動獻給我最敬愛的家人，因為你們的支持與陪伴，讓裕太能毫無後顧之憂的順利完成學業，也感謝一路陪伴的女友，在我最徬徨無助的時候總是給予精神的鼓勵，伴我渡過。

僅以此論文

獻給父母、家人以及所有關愛我的人

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究目的.....	3
1.4 內容簡述.....	4
第二章 理論分析.....	6
2.1 壓電材料.....	6
2.1.1 壓電效應.....	6
2.1.2 壓電材料的種類.....	7
2.1.3 壓電材料本構方程式.....	8
2.2 有限元素模態分析.....	9
2.3 等向性竹板的藍姆波相速度.....	11
2.4 線型導波之頻散方程式.....	14
2.4.1 漢彌頓原理.....	14
2.4.2 雙維更限元素分析.....	14
2.4.3 頻散方程式.....	16
第三章 數值模擬分析討論.....	19
3.1 材料系數的量測與計算.....	19

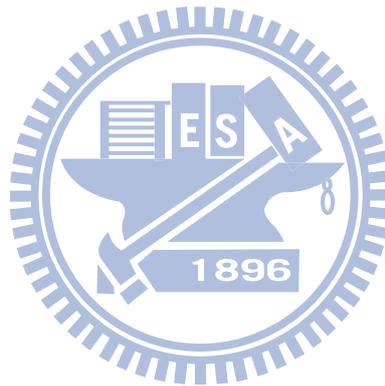
3.2	鋁合金流道板的聲導波相速度計算.....	20
3.3	雙維有限元素分析.....	23
3.3.1	中央凹陷流道分析模型之頻散曲線.....	23
3.3.2	中央凸起流道分析模型之頻散曲線.....	24
第四章	實驗量測結果討論.....	26
4.1	流道板與聲導波感測器之設計.....	26
4.2	流道板掃描量測實驗.....	27
4.2.1	實驗架構.....	27
4.2.2	齊發單收模式.....	27
4.2.3	單發單收模式.....	28
4.3	流道板雷射都卜勒干涉儀量測實驗.....	29
4.4	水量對聲導波傳遞的影響.....	30
4.5	流道板之設計改良.....	32
4.6	固定波長的聲導波激發.....	33
4.6.1	流道板不同條件量測訊號.....	34
4.6.2	實驗量測聲導波相速度頻散曲線.....	35
4.7	流道區上不同負載的影響.....	36
4.8	不含流道的鋁合金板之量測實驗.....	38
4.8.1	聲導波感測器掃描.....	38
4.8.2	插入損失的量測.....	39
4.9	實驗量測結果比較與討論.....	39
第五章	結論與未來展望.....	42
5.1	結論.....	42
5.1.1	數值分析結果討論.....	42
5.1.2	實驗量測結果討論.....	43

5.2 未來展望.....	43
參考文獻.....	45
附表.....	47
附圖.....	51



表目錄

表 3.1 氣體擴散層碳紙的材料系數.....	47
表 4.1 不同頻率之聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲(first gated signals=10-40 μ s、second gated signals=40-80 μ s).....	48
表 4.2 不同含水量與接收端 R8 在 580 kHz \pm 2%插入損失之峰值比較表(中央有流道之鋁板).....	49
表 4.3 不同含水量與接收端在 580 kHz \pm 2%插入損失之峰值比較表(中央有流道之鋁板).....	49
表 4.4 不同水量與接收端在 580 kHz \pm 2%插入損失之峰值比較表(中央無流道之鋁板).....	50



圖目錄

圖 2.1	極化過程與壓電效應示意圖.....	51
圖 2.2	平板中的(a)對稱及(b)反對稱板波示意圖.....	51
圖 2.3	全域座標與自然座標映射圖.....	52
圖 3.1	鋁合金流道板材料系數量測之座標軸定義.....	53
圖 3.2	壓力波探頭在鋁合金流道板量測之回波訊號.....	53
圖 3.3	剪力波探頭在鋁合金流道板 X_1 方向之回波訊號.....	54
圖 3.4	剪力波探頭在鋁合金流道板 X_2 方向之回波訊號.....	54
圖 3.5	波長 $\lambda=51$ mm 有限元素分析網格式模型.....	55
圖 3.6	波長 $\lambda=10$ mm 有限元素分析網格式模型.....	55
圖 3.7	鋁合金流道板(板厚 2 mm, 流道深度 0.5 mm)的聲導波相速度.....	56
圖 3.8	依圖 3.7 所示第一個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda=51$ mm 對應的導波頻率及模態圖.....	56
圖 3.9	依圖 3.7 所示第二個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda=51$ mm 對應的導波頻率及模態圖.....	57
圖 3.10	依圖 3.7 所示第三個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda=51$ mm 對應的導波頻率及模態圖.....	57
圖 3.11	依圖 3.7 所示第四個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda=51$ mm 對應的導波頻率及模態圖.....	58
圖 3.12	依圖 3.7 所示第五個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda=51$ mm 對應的導波頻率及模態圖.....	58

圖 3.13 依圖 3.7 所示第六個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 λ =51 mm 對應的導波頻率及模態圖	59
圖 3.14 波長 $\lambda=15$ mm 有限元素分析網格化模型	59
圖 3.15 波長 $\lambda=15$ mm 含碳紙之有限元素分析網格化模型(上層紫 色部分為碳紙，下層則為鋁合金流道)	60
圖 3.16 波長 $\lambda=15$ mm 的 A_0 模態圖	60
圖 3.17 波長 $\lambda=15$ mm 的 S_0 模態圖	61
圖 3.18 鋁合金流道板(板厚 2 mm，流道深度 0.5 mm)的聲導波相速 度(藍色實線為不含碳紙，紅色虛線為流道區上有碳紙).....	61
圖 3.19 二維有限元素分析鋁合金流道板的(a)分析模型、(b)聲導波 相速度(紅色虛線為 ANSYS 三維模態分析之 A_0 與 S_0 模態 相速度)	62
圖 3.20 二維有限元素分析鋁合金流道板的(a)分析模型、(b)聲導波 相速度(紅色虛線為 ANSYS 三維模態分析之 A_0 與 S_0 模態 相速度)	63
圖 3.21 二維有限元素分析鋁合金流道板的(a)分析模型、(b)聲導波 相速度(紅色虛線為 ANSYS 三維模態分析之 A_0 與 S_0 模態 相速度)	64
圖 3.22 不同元素大小的二維有限元素分析鋁合金流道板的聲導波 相速度(圖 3.19 至圖 3.21 與 ANSYS 解之比較圖).....	65
圖 3.23 三種相同元素分割大小，不同流道寬度之分析模型，元素 數量為(a)56、(b)28、(c)84 個	66
圖 3.24 與圖 3.23 分析模型對應之二維有限元素分析鋁合金流道板	

的聲導波相速度.....	67
圖 3.25 三種相同元素分割大小，不同凹陷流道數量分析模型，流道凹陷數量為(a)1、(b)2、(c)3 條.....	68
圖 3.26 與圖 3.25 分析模型對應之二維有限元素分析鋁合金流道板的聲導波相速度.....	69
圖 3.27 三種相同元素分割大小，不同凸起流道數量分析模型，流道凸起數量為(a)1、(b)2、(c)3 條.....	70
圖 3.28 與圖 3.27 分析模型對應之二維有限元素分析鋁合金流道板的聲導波相速度.....	71
圖 4.1 單流道設計之鋁合金流道板.....	72
圖 4.2 一維陣列壓電陶瓷(PZT-4)換能器.....	72
圖 4.3 鋁合金流道板與陣列聲導波感測器.....	73
圖 4.4 實驗架構示意圖.....	73
圖 4.5 陣列聲導波感測器編號示意圖.....	74
圖 4.6 齊發齊收與單發齊收模式流道內有水之實驗照片.....	74
圖 4.7 齊發模式下 R1 至 R8 的量測訊號(黑色實線代表流道無水，紅色實線代表有水).....	75
圖 4.8 齊發模式下 R9 至 R16 的量測訊號(黑色實線代表流道無水，紅色實線代表有水).....	76
圖 4.9 單發模式下 R1 至 R8 的量測訊號(黑色實線代表流道無水，紅色實線代表有水).....	77
圖 4.10 單發模式下 R9 至 R16 的量測訊號(黑色實線代表流道無水，	

紅色實線代表有水).....	78
圖 4.11 都卜勒干涉儀之(a)雷射頭、(b)控制器、(c)儀控面板、(d)實驗照片。.....	79
圖 4.12 都卜勒干涉儀量測鋁合金流道板聲導波的起迄位置，左邊紅點為量測起點($x = 0$)，右邊藍點為量測終點($x = 6.5$ mm)。	80
圖 4.13 都卜勒干涉儀量測鋁合金流道板聲導波的線掃描灰階圖，橫軸為波程時間(單位為 sec)，縱軸為圖 4.12 量測位置(單位為 mm)，淺色代表波峰，深色代表波谷。.....	80
圖 4.14 鋁合金流道板流道區(a) 覆蓋水之實驗照片、(b) 水覆蓋區較長 $L_1 = 40.31$ mm、(c) 水覆蓋區次長 $L_2 = 22.4$ mm、(d) 水覆蓋區較短 $L_3 = 7.17$ mm。.....	81
圖 4.15 陣列聲導波感測器量測之聲導波行經(a)無水覆蓋、水覆蓋區長度為(b) L_1 、(c) L_2 、(d) L_3 之流道區的訊號灰階圖，縱軸為接收端壓電元素編號，橫軸為波程時間。.....	82
圖 4.16 陣列聲導波感測器接收端 R8 量測不同頻率之聲導波行經(a)無水覆蓋、水覆蓋區長度為(b) L_1 、(c) L_2 、(d) L_3 之流道區的訊號灰階圖，縱軸為激振頻率，橫軸為波程時間。.....	83
圖 4.17 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_1 之流道區的(a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有水。訊號抵達時間介於 10-40 μ s 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、(b) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。.....	84
圖 4.18 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_1 之流道區的(a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有	

水。訊號抵達時間介於 40-80 μ s 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、
(b) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。..... 85

圖 4.19 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_2 之流道
區的(a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有
水。訊號抵達時間介於 10-40 μ s 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、
(b) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。..... 86

圖 4.20 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_2 之流道
區的(a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有
水。訊號抵達時間介於 40-80 μ s 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、
(b) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。..... 87

圖 4.21 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_3 之流道
區的(a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有
水。訊號抵達時間介於 10-40 μ s 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、
(b) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。..... 88

圖 4.22 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_3 之流道
區的(a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有
水。訊號抵達時間介於 40-80 μ s 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、
(b) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。..... 89

圖 4.23 改良後板四周黏貼高阻尼材料的鋁合金流道板(尺寸為
300 \times 200 \times 2mm)(a) 鋁板中央為流道 (b) 鋁板中央無流道 90

圖 4.24 板四周黏貼高阻尼材料影響比較(黑色實線為四周沒有、紅
色實線為四周有高阻尼材料)..... 91

圖 4.25 雷射都卜勒干涉儀量測位置示意圖，上面紅點設為量測起
點($x = 0$)，下面藍點為終點($x = 40$ mm)，間隔 0.05 mm 量測

一組聲導波訊號。.....	91
圖 4.26 雷射都卜勒干涉儀量測鋁合金流道板聲導波的線掃瞄灰階圖，橫軸及縱軸為波程時間(單位為 sec)及參考圖 4.25 所示之量測位置(單位為 mm)，淺色代表波峰，深色代表波谷。.....	92
圖 4.27 雷射都卜勒干涉儀量測流道肋板上位置示意圖，上面紅點設為量測起點(座標 $x = 0$)，下面藍點為終點(座標為 $x = 3.2$ mm)，間隔 0.05 mm 量測一組聲導波訊號。.....	92
圖 4.28 雷射都卜勒干涉儀量測流道底部位置示意圖，上面紅點設為量測起點(座標 $x = 0$)，下面藍點為終點(座標為 $x = 3.2$ mm)，間隔 0.05 mm 量測一組聲導波訊號。.....	93
圖 4.29 雷射都卜勒量測鋁合金流道板流道肋板與底部聲導波的線掃瞄灰階圖，橫軸及縱軸為波程時間(單位 sec)及參考圖 4.27、4.28 所示之量測位置(單位 mm)其中(a)肋板上齊發無水(b)肋板上單發無水(c)流道底單發無水(d)肋板上單發有水.....	94
圖 4.30 固定波長的聲導波激發.....	95
圖 4.31 將浸泡過濕潤碳紙置放於流道區上方.....	95
圖 4.32 接收端 R8 量測訊號(a)無水與碳紙(b)無水與有水比較圖(黑色實線為流道區無水、紅色實線為(a)流道區有碳紙(b)水填滿流道區).....	96
圖 4.33 陣列壓電陶瓷換能器(a)寬頻激振訊號(b)與其頻率響應.....	97
圖 4.34 寬頻訊號激振波長 5.6mm 聲導波，PZT1-PZT8 量測訊號(黑色實線為無水，紅色實線為有水).....	98

圖 4.35 寬頻訊號激振波長 5.6mm 聲導波, PZT9-PZT16 量測訊號(黑色實線為無水, 紅色實線為有水).....	99
圖 4.36 接收端 R1-R8 量測之頻率響應訊號(黑色實線為無水, 紅色實線為有水).....	100
圖 4.37 接收端 R9-R16 量測之頻率響應訊號(黑色實線為無水, 紅色實線為有水).....	101
圖 4.38 雷射都卜勒干涉儀量測寬頻訊號激振波長 5.6 mm 的聲導波位置示意圖, 由距離發射端 20 mm 為起始位置, 沿聲導波傳遞方向共量測八點, 間隔為 0.1 mm.....	102
圖 4.39 量測數據經 2D-FFT 轉換後, 頻率 $f=1$ MHz 對應之波數與振幅關係圖, 將圖中前兩個波峰對應之 k 值計算得 1 MHz 之相速度.....	102
圖 4.40 根據圖 4.38 表示之量測位置經 2D-FFT 計算得之頻散曲線與二維有限元素分析之聲導波相速度頻散曲線比較圖(圖中三角形為實驗結果).....	103
圖 4.41 插入損失量測實驗架構(圖左下為網路分析儀及散射參數測試組).....	103
圖 4.42 S 參數示意圖.....	104
圖 4.43 流道區負載示意圖(a)流道區無水(b)流道區上放置浸濕之碳紙(c)流道底部佈滿水(d)流道區上佈滿水.....	105
圖 4.44 流道區無水(黑色實線)與流道區上放置浸濕之碳紙(紅色實線)插入損失比較圖.....	106
圖 4.45 流道區無水(黑色實線)與流道底部佈滿水(紅色實線)插入損失比較圖.....	106

圖 4.46 流道區無水(黑色實線)與流道區上佈滿水(紅色實線)插入損失比較圖.....	107
圖 4.47 流道區水量示意圖(a)以 22 μ L 水將中央兩道滴滿(b)以 44 μ L 水將中央四道滴滿.....	107
圖 4.48 流道區無水(黑色實線)與中央 2 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	108
圖 4.49 流道區無水(黑色實線)與中央 4 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	108
圖 4.50 流道區無水(黑色實線)與中央 6 條流道有水(紅色實線)接收 R8 插入損失比較圖.....	109
圖 4.51 流道區無水(黑色實線)與中央 8 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	109
圖 4.52 流道區無水(黑色實線)與中央 10 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	110
圖 4.53 流道區無水(黑色實線)與中央 12 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	110
圖 4.54 流道區無水(黑色實線)與中央 14 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	111
圖 4.55 流道區無水(黑色實線)與中央 16 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	111
圖 4.56 流道區無水(黑色實線)與中央 18 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	112
圖 4.57 流道區無水(黑色實線)與中央 20 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	112
圖 4.58 流道區無水(黑色實線)與中央 22 條流道有水(紅色實線)接	

收端 R8 插入損失比較圖.....	113
圖 4.59 流道區無水(黑色實線)與中央 24 條流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	113
圖 4.60 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	114
圖 4.61 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接收端 R4 插入損失比較圖.....	114
圖 4.62 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接收端 R8 插入損失比較圖.....	115
圖 4.63 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接收端 R9 插入損失比較圖.....	115
圖 4.64 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接收端 R13 插入損失比較圖.....	116
圖 4.65 寬頻訊號激發波長 5.6 mm 聲導波經由(a)無流道(b)有流道鋁合金板接收端中央接收端 R8 量測訊號.....	117
圖 4.66 無流道之鋁合金平板接收端 R1-R8 量測之頻率響應訊號.....	118
圖 4.67 無流道之鋁合金平板接收端 R9-R16 量測之頻率響應訊號.....	119
圖 4.68 鋁合金平板量測插入損失水量分布位置.....	120
圖 4.69 接收端 R4 量測插入損失比較圖(黑色實線為無水，紅色實線為水量 100 μ L).....	120
圖 4.70 接收端 R8 量測插入損失比較圖(黑色實線為無水，紅色實線為水量 100 μ L).....	121
圖 4.71 接收端 R9 量測插入損失比較圖(黑色實線為無水，紅色實線為水量 100 μ L).....	121
圖 4.72 接收端 R13 量測插入損失比較圖(黑色實線為無水，紅色實	

線為水量 100 μ L)..... 122



第一章 緒論

1.1 研究背景

近年來人類對能源的需求與日俱增，全球能源開始面臨枯竭，另一方面石化燃料燃燒產生之廢氣所致之溫室效應，已在全球各地產生巨大影響，世界科技大國紛紛尋求潔淨且具經濟效益的替代性能源。燃料電池(fuel cell)是一種將化學能直接轉換成電能的裝置，只要不斷地供應燃料，就會持續地輸出電力。燃料通常採用氫氣、甲醇、乙醇、天然氣或其他碳氫化合物，使用空氣中的氧作為氧化劑，副產物是熱、純水或較少量的二氧化碳，具有低污染、低噪音、壽命長、免充電、高電能轉換效率及可再生性等特點，已成為國際間寄予厚望的綠色能源。

質子交換膜燃料電池(proton exchange membrane fuel cell，簡稱 PEMFC)，又稱高分子電解質燃料電池(polymer electrolyte membrane fuel cell)，是一種以含氫燃料與空氣作用產生電力與熱力的燃料電池，發展歷史較早，相關技術比較成熟。在質子交換膜燃料電池中，氣體擴散層是燃料電池中不可或缺的材料，其扮演著模電極組(MEA)與流道雙極板之間的溝通橋梁角色，主要的功能包括，引導氣體由石墨板流道區周圍的導流溝槽到觸媒層、順利將反應生成水排除於觸媒層外避免水的氾濫、電流的傳導體、燃料電池反應時散熱功能以及具有足夠的強度以支撐當模電極組因為吸水過多而變形等功能。

質子交換膜燃料電池運轉時，質子交換膜必須維持一定的濕度，以維持良好的離子導電率(ionic conductivity)。若電池內部反應生成的水分蒸發太快，使得質子交換膜過於乾燥，質子通過交換膜的阻力就會因此而增加，致使交換膜破裂，熱量因氫與氧的直接反應而快速生成，損害燃料電池。倘若水分排除太慢，電極被水淹沒，則會妨礙反應物抵達觸媒而停止反應。因此，質子交換膜燃料電池的運轉效能取決於電池組內

部生成水分的調節，如何有效地監測反應生成水也成為一項重要的課題。

1.2 文獻回顧

1999 年，Singh et al. [1]以理論模型模擬質子交換膜燃料電池的質傳現象，發現當質子交換膜燃料電池於高電流運作時若排水不良，將導致陰極端流道板的水氾濫而影響其運作效率。2001 年，Janssen et al. [2]實驗在不同操作條件下質子交換膜燃料電池效率的變化，發現若質子交換膜含水量不足將因電阻過大影響質子的質傳，導致效率降低，且陰極端乾化對燃料電池效率的降低較陽極端更為明顯。

Tüber et al. [3]在 2003 年以透明材料取代質子交換膜燃料電池組外側的雙極板，藉以觀察陰極端冷凝水與氣體的生成與流動，並發現為了維持燃料電池的效率，必須針對燃料電池的氣體供應與水的生成進行主動式調節。2004 年，Satija et al. [4]以鋁合金代替含玻璃纖維層板以避免含氫量過多的材料影響到圖像的顯示，並利用中子造影法觀察質子交換膜燃料電池雙極板水的生成與流動，其結果成功的辨別出反應成水堆積的區域，再將各層的顯影圖片推疊成 3D 的顯影圖片。2008 年，Bedet et al. [5]利用核磁共振(磁振造影)法觀察運轉中燃料電池組內部流道反應生成水形成與排除的過程，其實驗結果能清晰觀察出流道中水分部的區域。

自從 Rayleigh [6]於 1885 年提出表面聲波在半無限域的傳遞理論後，彈性波的波導傳遞問題便開始成為許多應用的重要基礎研究，發現波的能量幾乎只被束縛在等向性物質的表面傳遞，故稱為表面聲波。而 Lamb [7]在 1917 年說明波在等向性平板中的傳遞，提出在上下表面無曳力(traction free)之自由邊界拘束的平板中，存在一種沿平板傳遞的頻散波，稱之為藍姆波(Lamb waves)。藍姆波侷限於平板上下表面之間，在厚度方

向分為對稱波與反對稱的彈性波。若能在厚度方向維持共振模態便能沿著平板傳遞至遠處，具有波傳距離長、衰減小的特性。而當頻率跟厚度之乘積趨近於無窮大時，會變為雷力表面聲波(Rayleigh surface acoustic waves)。

1987年，Dewhurst et al. [8]利用脈衝雷射點波源激發在薄板中傳遞的藍姆波，量測其最低階之對稱與反對稱模態彈性波傳現象。Shen 與 Peter [9]利用 Laser-induced transient gratings (LITGs)短脈衝雷射在具有鍍層材料為 650nm 鋁薄膜的試片上形成干涉條紋以產生窄頻之表面聲波，再以麥克森干涉儀量測表面聲波之波形，找出頻散曲線。

Gachagan et al. [10]於 1999 年將梳狀換能器(comb transducer)黏貼於複材板表面，作為藍姆波的發射器，並以 HeNe 雷射作為波源，將 Mach-Zehnder 干涉儀作為藍姆波的接收器，並進一步量測藍姆波的相速度。2001 年，Drafts [11]將表面聲波(surface acoustic waves)的種類以及相對適用的致動器與感測器做統整與介紹，並提到在 biosensor 的使用上一般為靈敏度較高的洛夫波(Love waves)，或稱 SH 波(shear horizontal waves)。2006 年，Lee and Kuo [12]將壓電陶瓷元件對稱黏貼於一部分置於空氣且另一部分浸泡在液體中，厚度為 0.5mm 的鈦酸鋰壓電平板左右兩端，作為板波的發射器與接收器，當兩端壓電陶瓷元件同時激發，將產生沿著平板垂直向下之對稱板波，再由下方鈦酸鋰壓電平板兩側之接收端接收訊號，實驗量得浸泡在液體部分之洩漏性藍姆波(Leaky Lamb wave)波速改變及其板波衰減之趨勢都趨近於理論值。

1.3 研究目的

質子交換膜燃料電池運轉時，質子交換膜必須維持一定的濕度，以維持良好的離子導電率，因燃料電池本身不具透明性，無法直接觀察內

部水的生成，故擬以設計一套聲導波感測器對質子交換膜燃料電池流道雙極板進行掃描研究。然而，純質石墨為平面六角形環型結晶，其平面剛性如鑽石一般，在流道板製造上相當不易，且一般市售石墨環氧樹脂複合材料製造之流道板價格較昂貴，因其材料特性接近等向性材料[13]，且本研究之重點在於探討流道板中水的量測而非流道雙極板本身的導電及導熱性討論，因此，在本研究中使用鋁合金 T-6061 製造流道板進行量測，以特製的壓電陶瓷換能器(PZT-4)以導電銀膠黏貼於流道區的兩側作為聲導波的致動與感測器，進行掃描，以監測電池組內部流道區反應生成水的形成。

本研究利用二維與三維有限元素分析，分析導波波傳特性，計算並繪製頻散曲線與模態。接著利用黏貼於流道區兩側的壓電陶瓷換能器作為致動器及感測器，依照兩側壓電陶瓷換能器的黏貼方式可分為兩種，一種為互相平行的一組陣列式壓電陶瓷，可藉由單發單收或齊發單收兩種模式掃描流道板；另一種為互相垂直的一組陣列式壓電陶瓷，在固定波長的聲導波激發方式下進行掃描。本研究中以不同設計尺寸的鋁合金流道板以及不含流道的鋁合金平板進行實驗量測，以聲導波的致動與感測器掃描流道板，雷射都卜勒干涉儀量測激振出的聲導波在流道板上的波傳響應，量測不同條件下的超音波接收訊號以及插入損失(insertion loss)等，最後再根據實驗量測之結果進行比較。

1.4 內容簡述

本文一共分為五個章節，第一章為緒論，說明本研究之研究背景、文獻回顧及研究目的等。第二章為理論分析，介紹壓電材料的種類、壓電效應與特性方程式，有限元素分析理論，以及藍姆波在均質等向性平板中傳遞的相速度與波傳頻率的頻散關係。第三章為數值模擬分析，利

用有限元素法計算聲導波在鋁合金流道板傳遞的聲導波相速度，計算並繪製其頻散曲線。第四章為實驗量測結果討論，除了探討流道區在沒水、有水以及濕潤碳紙等不同的負載下利用陣列式聲導波換能器與雷射都卜勒干涉儀線掃描以及插入損失的結果比較外，在有流道與無流道的兩種鋁板上，比較聲導波傳遞的結果。第五章為結論與未來展望。



第二章 理論分析

本研究利用壓電陶瓷材料 PZT-4 黏貼於流道兩側作為流道板聲導波換能器，本章介紹壓電材料的種類及壓電效應的力學行為與壓電材料的電性特性，並說明模態分析的數值理論，等向性平板的對稱與反對稱藍姆波頻散方程式，以及線型導波之頻散方程式。

2.1 壓電材料

2.1.1 壓電效應

壓電材料所具備的壓電性(piezoelectricity)是一種機械能與電能互相轉換的現象，壓電效應(piezoelectric effect)的產生是因為晶格內原子間的特殊排列方式，使材料的應力場與電場互相耦合。

壓電效應包含了正壓電效應(direct piezoelectric effect)以及逆壓電效應(converse piezoelectric effect)，以壓電材料製作感測器與致動器時，即分別是利用正壓電與逆壓電效應的原理。考慮一極化方向在厚度方向之壓電材料，如圖 2.1 所示，若將機械應力施加於壓電材料時，壓電材料會在受力的兩端產生與應力大小成比例的電荷，當應力的方向相反時，電荷的極性也會隨之改變，此效應稱之為壓電材料的正壓電效應，可應用於感測器，如加速規與壓力感測器等。當施加直流電場於壓電材料極化方向的兩端時，材料的變形會隨著電場的大小而改變，當此一電場的方向相反時，壓電材料的變形方向亦隨之反向；若改以施加交流電壓，材料的變形會隨著輸入電壓的頻率產生週期性振盪，此種因外加電場而導致壓電材料變形的效應稱之為逆壓電效應，市場上許多壓電致動器(piezoelectric actuator)即利用此種效應製成，如壓電蜂鳴器等。

2.1.2 壓電材料的種類

具有壓電效應的材料大致上可分為五大類，第一類為單晶類(single crystalline)，例如：石英、羅德鹽、電氣石、鈮酸鋰(lithium niobate, LiNbO_3)、鉭酸鋰(lithium tantalate, LiTaO_3)等。第二類為薄膜類(thin film)，例如：氧化鋅(ZnO)、氮化鋁(AlN)等。第三類為高分子聚合物(polymer)，例如：PVDF 等。第四類為陶瓷(ceramics)，例如：鈦酸鋇(BaTiO_3)、鉛鈦酸鉛(lead zirconate titanate, PZT)等。第五類為複合材料(composite materials)，例如：AFC(active fiber composites)等。

各類壓電材料都有優缺點，例如單晶類有良好的溫度特性，但製造困難，需仰賴特殊的晶體成長(crystal growth)技術，特性受切面影響，且容易受到空氣的濕度而潮解，因此失去壓電性，例如：電氣石、羅德鹽等。薄膜類壓電材料的製造需要真空技術，不同的真空條件會產生不同的材料特性。高分子類性質柔軟，可以作成非常薄的元件，但壓電參數小，需甚高的極化電場，例如：PVDF 在室溫時之極化電場需高達 4MV/mm 。陶瓷類壓電材料活性(piezoelectric activity)安定，耐酸鹼，可製成任何形狀，居里溫度高，與高分子聚合物、複合材料一樣，在製造過程中需要高壓極化處理，但是極化電場強度較高分子聚合物與壓電複合材料低很多，例如：PZT 的極化電場只有 3kV/mm 左右。

壓電陶瓷具有工作溫度高、機械強度大、易於加工且成本低廉等優點，是目前工業應用最廣泛且實用性最高的壓電材料。鈦酸鋇為壓電陶瓷的代表，具有優異的介電常數及機電耦合常數，化學性質穩定，操作溫度範圍大且製造容易，並可製成任何形狀，因此成為壓電材料應用的首選。本文即採用壓電陶瓷材料 PZT-4 作為流道板聲導波的致動與感測器。

2.1.3 壓電材料本構方程式

壓電材料在受到機械應力或電場作用時，其本構方程式(constitutive)依據 IEEE Standard on Piezoelectricity[14]可表示為：

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \mathbf{E} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e} \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} \quad (2.2)$$

其中， \mathbf{T} 、 \mathbf{S} 分別為應力及應變張量矩陣， \mathbf{c}^E 是固定電場下的彈性勁度矩陣 (matrix of elastic stiffness)， \mathbf{e} 是壓電常數矩陣 (matrix of piezoelectric constants)， \mathbf{e}^T 為壓電常數矩陣的轉置矩陣 (transpose matrix)， \mathbf{D} 是電位移向量矩陣， \mathbf{E} 是電場矩陣， $\boldsymbol{\varepsilon}^S$ 是固定應變條件下的介電常數矩陣(matrix of dielectric constants)。

本研究所使用之壓電陶瓷材料為 PZT-4，具有橫向等向性的特性，假設其極化方向平行於 x_3 方向，其材料特性可以下列矩陣式表示：

彈性勁度矩陣為

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

壓電常數矩陣為

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

介電常數矩陣為

$$\boldsymbol{\varepsilon}^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

即 PZT-4 的本構方程式為

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{15} \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{15} \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 & 0 & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & -e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.2 有限元素模態分析

若考慮 n 個無阻尼的振動系統，其特徵值問題可表示為

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{x}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\dot{x}(t)\} = 0 \quad (2.7a)$$

$$[\mathbf{K}]\{u\} = \omega^2 [\mathbf{M}]\{u\} \quad (2.7b)$$

其特徵值 ω_i^2 所相對應的特徵向量為 $\{u\}_i$ ，在振動學中特徵值與特徵向量即為自然頻率的平方與模態向量。在此假設所有特徵值都不同並考慮兩組滿足式(2.7)之解為

$$[\mathbf{K}]\{u\}_i = \omega_i^2 [\mathbf{M}]\{u\}_i \quad (2.8)$$

$$[\mathbf{K}]\{u\}_j = \omega_j^2 [\mathbf{M}]\{u\}_j \quad (2.9)$$

將上述兩式等號兩邊各同乘 $\{u\}_j^T$ 及 $\{u\}_i^T$ ，可得

$$\{u\}_j^T [\mathbf{K}]\{u\}_i = \omega_i^2 \{u\}_j^T [\mathbf{M}]\{u\}_i \quad (2.10)$$

$$\{u\}_i^T [\mathbf{K}]\{u\}_j = \omega_j^2 \{u\}_i^T [\mathbf{M}]\{u\}_j \quad (2.11)$$

再將式(2.10)減去式(2.11)的轉置，由於 $[\mathbf{K}]$ 、 $[\mathbf{M}]$ 為對稱矩陣，且

$$([\mathbf{A}][\mathbf{B}][\mathbf{C}])^T = [\mathbf{A}]^T [\mathbf{B}]^T [\mathbf{C}]^T，故相減後可得$$

$$(\omega_i^2 - \omega_j^2) \{u\}_j^T [\mathbf{M}] \{u\}_i = 0 \quad (2.12)$$

即

$$\{u\}_j^T [\mathbf{M}] \{u\}_i = 0 \quad (i \neq j) \quad (2.13)$$

再將(2.13)代入(2.10)可得

$$\{u\}_j^T [\mathbf{K}] \{u\}_i = 0 \quad (i \neq j) \quad (2.14)$$

由式(2.13)表示任何兩個不同模態向量，對質量矩陣 $[\mathbf{M}]$ 具有正交性，(2.14)也表示任兩組不同模態向量，對剛性矩陣 $[\mathbf{K}]$ 具有正交性。且當 $i = j$ 時，上述兩式皆不為零，可以表示為第 i 模態之質量與剛性，其表示式分別為

$$\{u\}_i^T [\mathbf{M}] \{u\}_i = m_{ii} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.15)$$

$$\{u\}_i^T [\mathbf{K}] \{u\}_i = k_{ii} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.16)$$

而將所有模態之模態向量組合可為模態矩陣

$$[\mathbf{U}] = [\{u\}_1, \{u\}_2, \{u\}_3, \dots, \{u\}_n] \quad (2.17)$$

(2.15)與(2.16)可改寫為

$$[\mathbf{U}]^T [\mathbf{M}] [\mathbf{U}] = [\underline{\mathbf{M}}] \quad (2.18)$$

$$[\mathbf{U}]^T [\mathbf{K}] [\mathbf{U}] = [\underline{\mathbf{K}}] \quad (2.19)$$

其中 $[\underline{\mathbf{M}}] = \text{diag}[m_{p1} \ m_{p2} \ \dots \ m_{pn}]$ ， $[\underline{\mathbf{K}}] = \text{diag}[k_{p1} \ k_{p2} \ \dots \ k_{pn}]$ 。也就是說質量與剛性矩陣可藉由模態矩陣轉換成對角矩陣，可使原本耦合的系統轉換為非耦合，使各自的自由度獨立，如此便能更快速得解得欲求之解，其系統方程式可改寫為

$$\underline{\mathbf{M}} \{\ddot{q}\} + \underline{\mathbf{K}} \{q\} = 0 \quad (2.20)$$

其中

$$\{\ddot{q}\} = [\mathbf{U}]^{-1} \{\ddot{x}\} \quad (2.21)$$

$$\{q\} = [\mathbf{U}]^{-1} \{x\}$$

非耦合之各獨立系統所得之解利用(2.21)便可將其解轉換為原本耦合系統之解，此為各模態反應的線性組合，故又稱之為模態疊加法(modal superposition)。模態分析是振動學中很重要的方法之一，不論是自由振動或外力振動，當一個振動系統欲探討其運動方程式時，大多為一耦合之運動方程式，不易解得其解，但是透過模態疊加法便可較容易且快速得到各解，便可求得欲求之複雜的運動方程式。

2.3 等向性平板的藍姆波相速度

板波的波動受到平板上下表面無曳力之自由邊界的拘束，若無法在厚度方向形成共振則會很快的衰減並消散，反之若能在厚度方向形成共振便能沿著平板傳遞至遠處。而在板厚方向不同振動模態或振頻的板波分別具有不同的相速度，這種現象稱為頻散。由於平板上下表面自由邊界的拘束，其應力分量為零之邊界條件為

$$T_{xx} = T_{yy} = 0 \quad y = \pm h, \quad -\infty < x < \infty \quad (2.22)$$

假設其位勢能函數(potential function)為

$$\Phi(x, y) = F(y)e^{ikx} \quad (2.23a)$$

$$\Psi(x, y) = G(y)e^{ikx} \quad (2.23b)$$

其中 k 為未知的實數波數， $F(y)$ 、 $G(y)$ 為待定函數，由分離變數法(separation of variables)滿足

$$\frac{d^2 F(y)}{dy^2} - \eta_1^2 F(y) = 0 \quad (2.24a)$$

$$\frac{d^2 G(y)}{dy^2} - \eta_2^2 G(y) = 0 \quad (2.24b)$$

其中 $\eta_j = \sqrt{k^2 - k_j^2}$ 。考慮 η_1 、 η_2 為單一函數(single value function)，假設

$$\text{Re}(\eta_j) \geq 0 \quad (2.25)$$

在平板內部 ($-h < y < h$) 內，(2.23a)與(2.23b)式通解為

$$F(y) = A \sinh(\eta_1 y) + B \cosh(\eta_1 y) \quad (2.26a)$$

$$G(y) = C \sinh(\eta_2 y) + D \cosh(\eta_2 y) \quad (2.26b)$$

其中 A 、 B 、 C 、 D 為常數，則位勢能函數可寫為

$$\Phi(x, y) = [A \sinh(\eta_1 y) + B \cosh(\eta_1 y)] e^{ikx} \quad (2.27a)$$

$$\Psi(x, y) = [C \sinh(\eta_2 y) + D \cosh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.27b)$$

因此應力分量可表示為

$$T_{xy} = \mu(2\Phi_{,xy} + 2\Psi_{,xx} + k_2^2 \Psi) \quad (2.28a)$$

$$T_{yy} = \mu[-(2\Phi_{,xx} + k_2^2 \Phi) + 2\Psi_{,xy}] \quad (2.28b)$$

由式(2.22)代入可解出 k 、 A 、 C 、 D ，表示如下

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 2ik\eta_1 \cosh(\eta_1 h) & -(2k^2 - k_2^2) \cosh(\eta_2 h) \\ \pm(2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_1 h) & \pm 2ik\eta_2 \sinh(\eta_2 h) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ D \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \pm 2ik\eta_1 \sinh(\eta_1 h) & \mp(2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_2 h) \\ (2k^2 - k_2^2) \cosh(\eta_1 h) & 2ik\eta_2 \cosh(\eta_2 h) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} B \\ C \end{Bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (2.29)$$

若 $B = C = 0$ ，(2.27)代表反對稱板波，由(2.29)可得

$$\begin{bmatrix} 2ik\eta_1 \cosh(\eta_1 h) & -(2k^2 - k_2^2) \cosh(\eta_2 h) \\ \pm(2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_1 h) & \pm 2ik\eta_2 \sinh(\eta_2 h) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ D \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.30)$$

反之，若 $A = D = 0$ ，則代表對稱板波，因此

$$\begin{bmatrix} \pm 2ik\eta_1 \sinh(\eta_1 h) & \mp(2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_2 h) \\ (2k^2 - k_2^2) \cosh(\eta_1 h) & 2ik\eta_2 \cosh(\eta_2 h) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} B \\ C \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.31)$$

當 $B = C = 0$ 的情形下，位移場可假設為

$$U(x, y) = [ikA \sinh(\eta_1 y) - \eta_2 D \sinh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.32a)$$

$$V(x, y) = [\eta_1 A \cosh(\eta_1 y) + ikD \cosh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.32b)$$

由(2.30)和(2.31)存在非零解的條件可得特徵方程式

$$(2k^2 - k_2^2)^2 \sinh(\eta_1 h) \cosh(\eta_2 h) - 4k^2 \eta_1 \eta_2 \cosh(\eta_1 h) \sinh(\eta_2 h) = 0 \quad (2.33)$$

及

$$\frac{D}{A} = -\frac{(2k^2 - k_2^2) \sinh(\eta_1 h)}{2ik\eta_2 \sinh(\eta_2 h)} \quad (2.34)$$

由(2.32)-(2.34)式可以得到平板反對稱波的波傳行為。波數 k 為(2.33)的平方根，可改寫為

$$\frac{\tanh(\eta_2 h)}{\tanh(\eta_1 h)} = \frac{(2k^2 - k_2^2)^2}{4k^2 \eta_1 \eta_2} \quad (2.35)$$

(2.35)為波數 k 與相速度 c 的超越函數(transcendental equation)，其中 c 可由 $k = \frac{\omega}{c}$ 計算得。又(2.33)與(2.35)式稱為頻散方程式(dispersion equation)。

當 $A = D = 0$ 的情形下，位移場可假設為

$$U(x, y) = [ikB \cosh(\eta_1 y) - \eta_2 C \cosh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.36a)$$

$$V(x, y) = [\eta_1 B \sinh(\eta_1 y) + ikC \sinh(\eta_2 y)] e^{ikx} \quad (2.36b)$$

這種板波運動對稱於 x 軸。式(2.36)若存在非零解，可改寫為

$$\frac{\tanh(\eta_1 h)}{\tanh(\eta_2 h)} = \frac{(2k^2 - k_2^2)^2}{4k^2 \eta_1 \eta_2} \quad (2.37)$$

又(2.36)與(2.37)式亦稱為頻散方程式。

依據波動位移對於平板中平面的對稱性，板波區分為反對稱波及對稱波兩種，如圖 2.2，前者又稱為撓性波(flexural waves)，後者稱為延性波(extensional waves)。板波的波速是頻率或波長的函數，而根據板波在板厚方向的共振模式，可以繪成相速度頻散曲線(dispersion curve)。由頻散曲線的分析，便可以知道各頻率波動的強度。

2.4 線型導波之頻散方程式

2.4.1 漢彌頓原理

考慮無限長之線型聲導波在表面曳力為零的情形下，其應變能 U (strain energy)、動能 T (kinetic energy) 以矩陣形式分別表示如下：

$$U = \frac{1}{2} \int_{vol} \mathbf{T}^H \mathbf{S} dV = \frac{1}{2} \iiint_{x y z} \mathbf{S}^H \mathbf{C} \mathbf{S} dx dy dz \quad (2.38a)$$

$$T = \frac{1}{2} \int_{vol} \dot{\mathbf{u}}^H \boldsymbol{\rho} \dot{\mathbf{u}} dV = \frac{1}{2} \iiint_{x y z} \dot{\mathbf{u}}^H \boldsymbol{\rho} \dot{\mathbf{u}} dx dy dz \quad (2.38b)$$

其中， \mathbf{S} 為應變向量， $\dot{\mathbf{u}}$ 為位移向量對時間的偏微分， \mathbf{C} 為材料剛性矩陣， $\boldsymbol{\rho}$ 為一 3×3 的對角矩陣(diagonal matrix)，代表彈性聲導波的密度，上標 H 表示 Hermitian 矩陣，代表共軛轉置(conjugate tranpose)，若材料剛性矩陣 \mathbf{C} 與密度矩陣 $\boldsymbol{\rho}$ 為對稱之實數矩陣，則應變能與動能保證為正定(positive definite)。線型聲導波系統對拉格朗日函數(Lagrangian function) L 表示如下：

$$L = T - U = \frac{1}{2} \iiint_{x y z} (\dot{\mathbf{u}}^H \boldsymbol{\rho} \dot{\mathbf{u}} - \mathbf{S}^H \mathbf{C} \mathbf{S}) dx dy dz \quad (2.39)$$

應用漢彌頓原理(Hamilton's principle)，將拉格朗日函數對時間積分之一次變分設為零，

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} L dt = 0 \quad (2.40)$$

即可推得線型聲導波之運動方程式。

2.4.2 雙維有限元素分析

在(2.39)式中，可利用分離變數法，將線型聲導波的拉格朗日函數自對 z 的積分中提出，再利用有限元素法的技巧將線型聲導波的截面離散成數個小元素，元素內任意點的位移表示成元素節點位移及內插函數的乘積。

考慮線型聲導波之波傳方向朝 z 軸的正向，與 z 軸垂直的截面則維持共振模式，其位移向量 \mathbf{u} 假設為

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_x(x, y) \\ u_y(x, y) \\ u_z(x, y) \end{Bmatrix} e^{jkz} \quad (2.41)$$

其中 e^{jkz} 為波傳因子， k 為波數(wave number)， j 為 $\sqrt{-1}$ 。

聲導波元素內部各點的位移向量以節點位移與內插函數表示如下：

$$u_x = (N_1 u_x^1 + N_2 u_x^2 + N_3 u_x^3 + N_4 u_x^4) e^{jkz} \quad (2.42a)$$

$$u_y = (N_1 u_y^1 + N_2 u_y^2 + N_3 u_y^3 + N_4 u_y^4) e^{jkz} \quad (2.42b)$$

$$u_z = j(N_1 u_z^1 + N_2 u_z^2 + N_3 u_z^3 + N_4 u_z^4) e^{jkz} \quad (2.42c)$$

其中 u_x 、 u_y 、 u_z 為實數函數，但為滿足頻率域下的運動方程式， u_z 需乘上複數 j 。若將(2.42)表示成矩陣形式，則為

$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \mathbf{d} \quad (2.43)$$

其中

$$\mathbf{u} = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T \quad (2.44a)$$

$$\mathbf{N} = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \quad (2.44a)$$

$$N_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & jN_i \end{bmatrix} e^{jkz}, \quad N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i) \quad (2.44a)$$

$$\mathbf{d} = [d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad d_4]^T, \quad d_i = [u_x^i \quad u_y^i \quad u_z^i]^T \quad (2.44a)$$

\mathbf{N} 為內插函數矩陣， \mathbf{d} 為節點位移向量， N_i 為真實座標映射至自然座標的內插函數， $i=1, 2, 3, 4$ ，且參考圖 2.3 所示之全域座標與自然作標映射圖，元素的位移函數表示為

$$u = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) u_i, \quad v = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) v_i \quad (2.45)$$

座標函數表示為

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) x_i \quad y = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) y_i \quad (2.46)$$

此時，應變向量 \mathbf{S} 表示為

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}\mathbf{d} \quad (2.47a)$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \mathbf{B}_3 \quad \mathbf{B}_4] \quad (2.47b)$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \partial N_i / \partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial N_i / \partial y & 0 \\ 0 & 0 & -kN_i \\ 0 & jkN_i & j(\partial N_i / \partial y) \\ jkN_i & 0 & j(\partial N_i / \partial x) \\ \partial N_i / \partial y & \partial N_i / \partial x & 0 \end{bmatrix} e^{jkz} \quad (2.47c)$$

2.4.3 頻散方程式

將(2.43)式單位元素中任意點的位移 \mathbf{u} 、應變 \mathbf{S} 與內插函數的表示式，代入(2.38)式中，獲得各元素之應變能 U 、動能 T 及拉格朗日函數 L 的總和，分別表示如下：

$$U = \frac{1}{2} \sum_{x y z} \int \int \int \mathbf{d}^H \mathbf{B}^H \mathbf{C} \mathbf{B} \mathbf{d} dx dy dz = \frac{1}{2} \sum_z \int \mathbf{d}^H \mathbf{k} \mathbf{d} dz \quad (2.48a)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{x y z} \int \int \int \dot{\mathbf{d}}^H \mathbf{N}^H \rho \mathbf{N} \dot{\mathbf{d}} dx dy dz = \frac{1}{2} \sum_z \int \dot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} \dot{\mathbf{d}} dz \quad (2.48b)$$

$$L = T - U = \frac{1}{2} \sum_z \int (\dot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} \dot{\mathbf{d}} - \mathbf{d}^H \mathbf{k} \mathbf{d}) dz \quad (2.48c)$$

其中，

$$\mathbf{m} = \int \int \mathbf{N}^H \rho \mathbf{N} dx dy \quad (2.49a)$$

$$\mathbf{k} = \int \int \mathbf{B}^H \mathbf{C} \mathbf{B} dx dy \quad (2.49b)$$

\mathbf{m} 為元素的質量矩陣(mass matrix)， \mathbf{k} 為元素的剛度矩陣(stiffness matrix)，

將(2.48)式代入(2.40)式，整理後可得

$$\delta \sum \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \frac{1}{2} \int_z (\dot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} \dot{\mathbf{d}} - \mathbf{d}^H \mathbf{k} \mathbf{d}) dz \right\} dt = 0 \quad (2.50)$$

對於(2.50)式進行變分運算，獲得

$$\frac{1}{2} \sum_z \int \left\{ \int_{t_1}^{t_2} \delta \dot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} \dot{\mathbf{d}} dt + \int_{t_1}^{t_2} \dot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} \delta \dot{\mathbf{d}} dt - \int_{t_1}^{t_2} \delta \mathbf{d}^H \mathbf{k} \mathbf{d} dt - \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{d}^H \mathbf{k} \delta \mathbf{d} dt \right\} dz = 0 \quad (2.51)$$

再利用部分積分(integration by part)，將(2.51)式展開得

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sum_z \int \left\{ \delta \mathbf{d}^H \mathbf{m} \dot{\mathbf{d}} \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \delta \dot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} \dot{\mathbf{d}} dt + \dot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} \delta \mathbf{d} \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} \delta \mathbf{d} dt - \int_{t_1}^{t_2} \delta \mathbf{d}^H \mathbf{k} \mathbf{d} dt \right. \\ & \left. - \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{d}^H \mathbf{k} \delta \mathbf{d} dt \right\} dz = 0 \end{aligned} \quad (2.52)$$

考慮在時間 t_1 和 t_2 時， $\delta \mathbf{d}^H = \delta \mathbf{d} = 0$ 的限制條件，整理(2.52)式並提出 $\delta \mathbf{d}^H$ 和 $\delta \mathbf{d}$ ，得

$$\frac{1}{2} \sum \left\{ \delta \mathbf{d}^H \int_{t_1}^{t_2} (\mathbf{m} \ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{k} \mathbf{d}) dt + \int_{t_1}^{t_2} (\ddot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} + \mathbf{d}^H \mathbf{k}) dt \delta \mathbf{d} \right\} = 0 \quad (2.53)$$

因此，線型聲導波之運動方程式可表示如下：

$$\sum \{ \mathbf{m} \ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{k} \mathbf{d} \} = \mathbf{0} \quad (2.54)$$

$$\sum \{ \ddot{\mathbf{d}}^H \mathbf{m} + \mathbf{d}^H \mathbf{k} \} = \mathbf{0} \quad (2.55)$$

且 \mathbf{m} 和 \mathbf{k} 為實數對稱矩陣，故(2.54)與(2.55)兩式恆等。將離散後的元素矩陣組合成全域矩陣(global matrix)，可獲得整個系統的運動方程式，

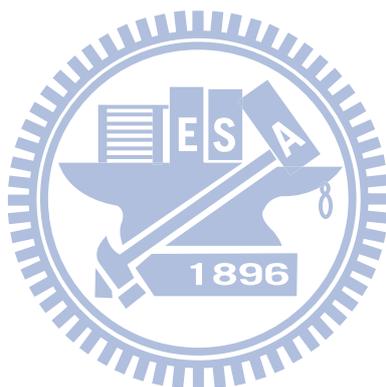
$$\mathbf{K} \mathbf{D} + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{D}} = \mathbf{0} \quad (2.56)$$

若節點位移具有時諧因子 $e^{-i\omega t}$ ，即 $\mathbf{D} = \bar{\mathbf{D}} e^{-i\omega t}$ ， $\ddot{\mathbf{D}} = -\omega^2 \bar{\mathbf{D}} e^{-i\omega t}$ ，分別代入(2.56)式，可建立波數 k 與角頻率 ω 關係之頻率方程式，

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \bar{\mathbf{D}} = \mathbf{0} \quad (2.57)$$

(2.57)式為特徵值問題，其具有非零解的條件是全域矩陣的行列式為零，

$$\det[\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M}] = 0 \quad (2.58)$$



第三章 數值模擬分析討論

本章可分為兩部分，第一部分利用有限元素套裝軟體 ANSYS 進行數值模擬，在自由邊界的情形下，給予適當的邊界條件進行三維結構模態分析(modal analysis)，求解並繪製鋁合金流道板 A_0 與 S_0 模態板波相速度頻散曲線。第二部分以雙維有限元素分析，大量節省元素數目及計算時間，以不同截面形狀之模型，計算並繪製其頻散曲線，由結果進行比較。

3.1 材料系數的量測與計算

雖然鋁合金流道板的製作材料為一般常見之鋁合金 T-6061，為了在數值分析時使用鋁合金流道板的確切材料系數，利用量測其密度及壓力波、剪力波波速，經過計算後可得到鋁合金流道板之機械材料系數。

首先利用排水法及電子秤可量得鋁合金流道板之體積與重量大小，藉此計算鋁合金流道板的密度 ρ 為 2730.5 kg/m^3 。接著利用脈波回音法(pulse-echo method)對鋁合金流道板進行波速量測，其中縱波波速利用壓力波探頭(Panametrics 5MHz V543)進行量測，探頭寬度為 6.35 mm，中心頻率為 5 MHz，橫波波速則使用剪力波探頭(Panametrics V221BA)進行量測，探頭寬度為 6.35 mm，中心頻率為 10 MHz。

在進行材料系數的量測之前，首先將鋁合金流道板的座標軸定義如圖 3.1 所示，厚度方向設為 X_3 軸，平行流道方向則為 X_1 軸，垂直流道方向則為 X_2 軸。在量測時皆利用 2 mm 厚非流道區的平坦表面進行實驗量測，先利用壓力波探頭量測其 X_3 方向之回波訊號，量測到如圖 3.2 之回波訊號，接著利用具有 7 μs 壓克力延遲層的剪力波探頭量測 X_1 與 X_2 方向之回波訊號，其結果如圖 3.3 與圖 3.4 所示，由於鋁合金為等向性材料，故在 X_1 與 X_2 方向量測之回波訊號相同，藉由回波訊號的時間差及波程可以算得其波速，其中波程為兩倍的厚度，由以上結果計算出鋁合金流

道板之縱波波速 C_L 為 6.37 mm/us，橫波波速 C_S 為 3.165 mm/us，再經由下式

$$E = \rho c_S^2 \left(\frac{3c_L^2 - 4c_S^2}{c_L^2 - c_S^2} \right) \quad (3.1)$$

$$\nu = \frac{c_L^2 - 2c_S^2}{2(c_L^2 - c_S^2)} \quad (3.2)$$

將量測到之密度 ρ 、壓力波波速 C_L 及剪力波波速 C_S 代入，可得楊式系數 E 為 73.077 GPa，蒲松比 ν 為 0.336，以此實驗量測得鋁合金的材料係數作為數值分析使用之依據。

分析中，氣體擴散層所使用之碳紙，其厚度較薄約 0.2 mm，且碳紙中之纖維方向為隨機排列，故將其假設為橫向等向性 (transversely isotropic)，並將其材料係數列於表 3.1，只需表中五個獨立之材料係數便可

求出其他係數[15]，其中 $E_2 = E_3$ 、 $\nu_{12} = \nu_{13}$ 、 $G_{12} = G_{13}$ 、 $G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})}$ ，

以及利用楊式系數之比值可算出在使用 ANSYS 作分析時所需要的其他材料係數。

3.2 鋁合金流道板的聲導波相速度計算

有限元素套裝軟體 ANSYS 的分析程序主要分為前處理 (pre-processor)、求解 (solver) 及後處理 (post-processor) 三個部份。前處理部分包含建立分析模型、給定材料係數與邊界條件。本研究中鋁合金流道板分析模型分為兩種，首先建立厚度 2 mm，流道凹陷 0.5 mm、寬度 1 mm，具有 25 條流道之流道板分析模型並將其網格化 (mesh)，鋁合金流道板的元素型態採用 SOLID185 元素，此元素為 8 節點之三維元素，每個節點具有 x 、 y 、 z 三個方向的位移自由度，並將平行流道方向的維度假設為無限長，擷取一段長度與聲導波波長相等的流道板，將原本錯縱複雜的

流道部分簡化為互相平行之流道，如圖 3.5 與圖 3.6 為波長 $\lambda=51\text{ mm}$ 與 $\lambda=10\text{ mm}$ 網格化後的有限元素分析模型，當分析模型縱向長度為 51 mm 時，其節點數量為 67165 個、元素數量為 50800 個；當分析模型縱向長度為 10 mm 時，其節點與元素數量則為 31501 個與 26880 個。在邊界條件的設定上，將流道板左右兩側節點的 x 、 y 、 z 三方向自由度設為零，與流道垂直的前後兩側截面上所有相對應節點的場變數(field variables)設為相等，即前後兩端位置相對應的節點其在各方向位移皆相等。以此前處理設計之模型進行三維振動模態分析，求解器將求解有限元素分析建立的系統聯立方程式，後處理則將求解器的分析資訊，作數據歸納及後續圖型化處理。

利用模態分析計算所得的共振頻率 f_r 與流道板的縱向長度(即波長 λ) 的乘積為聲導波的相速度 c ，將相速度 c 相對於共振頻率 f_r 繪圖，可以獲得鋁合金流道板聲導波的相速度頻散曲線。因此，有限元素分析模型其縱向長度必須隨著波長而改變，利用縱向長度 10 mm 到 60 mm 的分析模型求解，並在求解後的導波模態圖中，挑選聲導波平行於鋁合金流道板的流道方向波傳模態，圖 3.7 所示為聲導波平行於鋁合金流道板的流道方向波傳之相速度數值解。圖 3.8-3.13 所示為波長 $\lambda=51\text{ mm}$ 所對應的導波頻率及模態圖，若將波長 $\lambda=10\text{ mm}$ 到 $\lambda=51\text{ mm}$ 之間各波長求出對應的模態及導波頻率挑出後，便可描繪出聲導波相速度頻散曲線，分析的縱向長度間格越小，則繪出之曲線越圓滑且連續，反之其間格越大時，聲導波相速度頻散曲線就越不連續。

高頻聲導波的波長短，為了達到允許的數值精度，需要在波傳方向做細微的網格分割，而 ANSYS 不允許每個元素的長、寬、高尺寸比例差異太大，因此需要在波導截面上配合分割極密的元素網格，耗費大量計算資源，故此分析模型僅適用於分析低頻的聲導波相速度頻散曲線。為

了能夠分析較高頻之部分，建立如圖 3.14，厚度 2 mm，流道凹陷 0.5 mm、寬度 1 mm、縱向長度 15 mm 的單一流道分析模型，材料同樣為鋁合金，元素型態採用 SOLID185 元素並將其網格化，節點數量為 31501 點，元素數量為 26880 個。同樣地，將平行流道方向的維度假設為無限長，擷取一段長度與聲導波波長相等的流道板，進行振動模態分析。除了將與流道垂直之前後截面上相對應的元素節點的所有場變數設為相等外，流道左右兩側截面相對應的元素節點的所有場變數亦設為相等，將流道板之模型簡化，增加其網格密度，分析較高頻之部分。此外，為了比較流道上放置碳紙時其聲導波相速度是否會受到影響，在單一流道分析模型上方建立一層厚度為 0.2 mm 的碳紙模型，碳紙之元素種類同樣使用 SOLID185 元素，其材料參數須經由五個獨立之材料系數計算後方能輸入 ANSYS 中，其模型網格化如圖 3.15 所示，節點數量為 67497 點，元素數量為 58500 個，計算當流道上多一層碳紙時聲導波相速度。

由 ANSYS 模態分析計算波長 $\lambda=10$ mm 到 $\lambda=60$ mm 的共振模態，在各共振模態中挑出 A_0 與 S_0 模態。如圖 3.16 與圖 3.17 為波長 $\lambda=15$ mm 單一流道分析模型的 A_0 與 S_0 模態圖，將各波長中 A_0 與 S_0 模態的頻率與流道板的縱向長度相乘積，即可獲得鋁合金流道板聲導波的 A_0 與 S_0 模態板波的相速度頻散曲線。圖 3.18 為聲導波平行於鋁合金流道板的流道方向波傳之 A_0 與 S_0 模態板波的相速度數值解，藍色實線為流道上不含碳紙，紅色虛線為流道上建立一層厚度 0.2 mm 厚的碳紙。可發現當流道區上放置一層碳紙的時候， A_0 與 S_0 模態板波的相速度會受到影響而改變， A_0 模態板波在波速上呈現較相近的兩組解， S_0 模態板波波速受到碳紙的影響較明顯，當流道板上有一層碳紙時，聲導波傳遞速度較流道板上沒有碳紙時略快，聲導波的傳遞會受到影響而產生波速的改變。

分析中，碳紙與流道板間節點共用，為連續的兩個物體，而在實物模型中，碳紙與流道之間是經由泡水浸濕後的碳紙，以表面微量的水作為碳紙與流道的耦合，對流道板上聲導波傳遞的影響勢必會比分析結果中的影響來的小。因此，當流道區上放置一層碳紙時，聲導波的傳遞會受到影響。

3.3 雙維有限元素分析

應用 ANSYS 三維有限元素分析聲導波的共振模態，流道的自然頻率及所對應的共振模態中，會有許多型式的振動模態，必須從中挑選出適當的頻率及模態，才能進一步計算並描繪頻散曲線，且分析中使用的元素數量龐大，此過程相當耗費人力與資源。為此，本研究更進一步以雙維有限元素分析導波的波動行為，以分離變數法將時諧波傳因子與截面的振動分離，利用(2.57)式之線型聲導波的頻散方程式，求解此特徵方程式及對應的特徵向量，然後描繪出以頻率為橫座標、相速度為縱座標的頻散曲線。以下針對不同截面形狀之線型聲導波計算例，以鋁合金 T-6061 為材料，探討不同分析模型對聲導波波傳的影響。

3.3.1 中央凹陷流道分析模型之頻散曲線

考慮與實物模型相同尺寸的單一流道分析模型，其斷面高度 $H=2$ mm，寬度 $W=2$ mm，截面分割成 56 個元素，節點數目為 75 點，左右兩側各節點 x 方向自由度設為零，其分析結果如圖 3.19(a)所示。圖 3.19(b) 為各共振模態的頻散曲線，虛線部分則為 ANSYS 三維有限元素模態分析求出的 A_0 與 S_0 模態板波的頻散曲線。若將相同分析模型以不同的元素大小切割，截面分割成 14 個元素，節點數目為 24 點，左右兩側各節點 x 方向自由度設為零，其分析結果如圖 3.20 所示。若將截面分割成 350 個元素，節點數目為 396 點，左右兩側各節點 x 方向自由度設為零，其分析結

果如圖 3.21 所示，並將以上三種元素大小不同的分析結果互相比較如圖 3.22。當截面上切割元素越多時， A_0 與 S_0 模態板波的相速度解會越接近 ANSYS 模態分析之結果，且其他模態相速度也會略慢，為節省計算時間及比較各種不同截面形狀之分析結果，使用如圖 3.19(a)之元素大小，作為以下各種截面元素切割大小。

若考慮當斷面高度 $H=2$ mm，寬度 $W=1$ mm，截面分割成 28 個元素，節點數目為 43 點；以及斷面高度 $H=2$ mm，寬度 $W=3$ mm，截面分割成 84 個元素，節點數目為 107 點。以上兩種分析模型的流道凹陷與凸起之寬度與圖 3.19(a)成比例縮放，邊界條件為左右兩側各節點 x 方向自由度設為零，圖 3.23 所示為三種相同元素分割大小，不同流道寬度之分析模型，結果比較如圖 3.24 所示。當流道寬度變寬時， S_0 模態的相速度解在 1-1.5MHz 處會有些許變化，且與 S_0 模態相交的其他模態相速度解會往低頻移動。

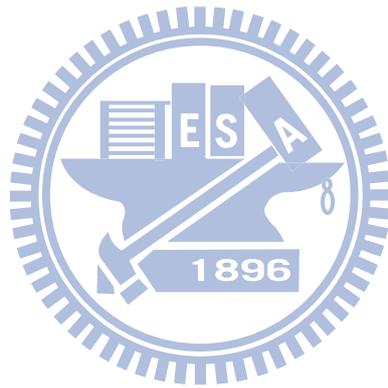
考慮斷面高度 $H=2$ mm、寬度 W 為 2、4、6 mm 三種不同凹陷流道數量之分析模型，其元素數量分別為 56、112、168 個，節點數量分別為 75、141、207 點，同樣將左右兩側各節點 x 方向自由度設為零，如圖 3.25 所示。圖 3.26 則為三種分析模型的聲導波相速度頻散曲線比較圖，發現分析模型中，流道數量越多時，在低頻處與 S_0 模態相交的其他模態相速度解會越多，而 A_0 與 S_0 模態的相速度解幾乎不會改變。

3.3.2 中央凸起流道分析模型之頻散曲線

考慮斷面高度 $H=2$ mm、寬度 W 為 2、4、6 mm 三種不同凸起流道數量之分析模型，其元素數量分別為 56、112、168 個，節點數量分別為 73、139、205 點，同樣將左右兩側各節點 x 方向自由度設為零，如圖 3.27 所示。圖 3.28 則為三種分析模型的聲導波相速度頻散曲線比較圖，當分析模型具有越多的流道數量，低頻處與 S_0 相交的其他模態相速度解會越

多。

由聲導波相速度的頻散曲線，發現在相同頻率下會對應許多不同的聲導波模態，各模態的波速都不相同。在二維有限元素分析中，低頻處與 S_0 模態交會之其他模態，若與圖 3.7 之結果比對，在流道數量增加時，撓曲模態便會產生，流道數越多，撓曲模態也越多。若是將二維有限元素分析模型流道數目增加，低頻處撓曲模態的增加趨勢會越接近 ANSYS 分析全流道模型時的結果。



第四章 實驗量測結果討論

本章為各種實驗量測流道板上不同負載或條件下的結果比較，包括流道板上無水、流道區上覆蓋浸濕之碳紙、流道區內用水全部填滿以及流道中不同水量的影響，並針對不同設計之流道板進行量測。量測方法包括陣列聲導波感測器的齊發單收與單發單收掃描模式、雷射都卜勒干涉儀量測、以及各條件下插入損失等，最後再以實驗量測結果進行比較與討論。

4.1 流道板與聲導波感測器之設計

石墨雙極流道板具有良好的導電性及導熱性，可確保電子傳導性及散熱溫度均勻分佈。然而，純質石墨流道板在製造上相當不易，一般以石墨環氧樹脂複合材料(graphite epoxy composites)較為常見，由於本研究著重於探討流道板中水的監測，且石墨環氧樹脂複合材料之材料特性較接近等向性材料[14]，故以鋁合金 T-6061 代替石墨環氧樹脂複合材料來製作流道板。鋁合金流道板設計如圖 4.1 所示，為了在流道板上設置一組聲導波致動與感測器，相較於一般石墨複材流道板，在流道兩側多了陣列式壓電陶瓷換能器放置的空間，其厚度為 2 mm，中間流道區部分為 45x56 mm，流道凹陷處深度 0.5 mm、寬度 1 mm。

用來作為流道板兩側之陣列式壓電致動及感測器採用寰辰科技公司製造如圖 4.2 所示，極化方向在厚度方向之陣列壓電陶瓷 PZT-4，此壓電陶瓷下表面佈滿電極，上表面以鑽石鋸片切割分成 16 個電極以及電極中間溝槽部分，電極寬度為 1.5 mm，兩個鄰近電極之間距離為 1.3 mm，分別在各電極之間切割三條寬度為 0.3 mm 深度為 0.5 mm 之溝槽，其作用除了在作為感測器時訊號在相鄰之探頭不互相影響外，對於作為致動器的時候能夠比較容易產生彎曲(bending)的振動方式，且將陣列壓電陶瓷

換能器以 AB 型導電銀膠黏貼於鋁合金流道板兩側並將各電極焊上導線，如圖 4.3 所示。當壓電換能器的厚度方向受到施加電場負載，引起橫向機械變形，即可產生聲導波，一端為致動器另一端則為感測器，對鋁合金流道板進行掃描。

4.2 流道板掃描量測實驗

4.2.1 實驗架構

其實驗架構如圖 4.4 所示，使用函數產生器(Angilent 33250A)產生訊號，經過放大器(ENI 325LA)的放大電路增益後，激振位於流道板其中一側之陣列式聲導波致動器，產生聲導波在流道板中傳遞後，示波器(Lecroy WS24XS)由函數產生器觸發直接將流道另一側之陣列式聲導波感測器收到之訊號顯示於示波器面板上。

在進行實驗前首先需定義兩側陣列式壓電陶瓷上相鄰各電極之編號，如圖 4.5 所示，將發射端壓電元素定義為 T1 至 T16，接收端為 R1 至 R16。齊發單收模式為每次同時激發發射端 16 個電極，再由接收端逐一接收超音波訊號，單發單收模式則為每次激發發射端之單一電極，再由接收端相對應之電極接收訊號，將流道板中有水與無水兩種情況所得之超音波掃描訊號加以比較，實驗時將水滴入流道區凹陷的流道底部，仔細將水控制在流道中不由流道凸起之肋板溢出，流道板中有水之情形如圖 4.6 所示，實驗時在水中滴入藍色染劑並將水滴入流道內，以便能夠清楚的看到水分布的位置。

4.2.2 齊發單收模式

齊發單收模式是以函數產生器每秒產生包含三個週期之頻率為 1.5 MHz 振幅為 500 mV_{pp} 之正弦波，訊號經過放大器的放大電路增益後，同時激發發射端 16 個電極，再由接收端之電極逐一讀取掃描訊號。圖 4.7

由上到下分別為齊發單收模式接收端 R1 至 R8 所量測到之訊號，圖 4.8 由上到下則為齊發單收模式接收端 R9 至 R16 量測到之訊號，兩圖中黑色實線為流道板中無水時量測到之結果，紅色實線則為流道板中有水時量測到之結果。由結果中發現以齊發齊收模式掃描時，當流道板中有水，接收端之訊號振幅略小於流道板中無水之訊號，表示聲導波的能量在傳遞上會受到流道區覆蓋水的影響而衰減。然而因為一連串的波群訊號彼此重疊交錯，故無法由量測到之訊號判讀聲導波經過水時，速度改變的影響，僅能由振幅的改變判斷部分能量會進入水中而消散。

4.2.3 單發單收模式

單發單收模式是以函數產生器每秒產生包含三個週期之頻率為 1.5 MHz 振幅為 500 mVpp 正弦波，訊號經過放大器的放大電路增益後，一次僅激振發射端 1 個電極再由接收端相應之電極逐一讀取掃描訊號，若發射端激振之電極為 T1，則量測之電極為接收端 R1。圖 4.9 為單發單收模式掃描之訊號，最上面為 T1/R1，依序遞增至最下面發射與接收端皆為 T8/R8，圖 4.10 由上到下則為單發單收模式 T9/R9 至 T16/R16 量測到之訊號，兩圖中黑色實線為流道板中無水時量測到之訊號，紅色實線則為流道板中有水時量測到之訊號。由結果中發現單發單收模式量測時，流道板中有水時接收端之訊號振幅同樣略小於流道板中無水之訊號，然而與齊發單收模式同樣受到一連串的波群訊號彼此重疊交錯，故無法進而判斷其波速上所受到的影響。

不論在齊發單收或是單發單收模式掃描下量測到之訊號振幅，流道中有水皆略小於流道板中無水之訊號，表示聲導波的能量在傳遞上會受到流道區覆蓋水的影響而衰減。單發單收模式所量測得之訊號振幅則整體上小於齊發單收模式之訊號，可知發射端 16 個壓電元素同時收到激振時，能夠同時在流道板上產生聲導波，因此在接收端之振幅大小才會大

於單發單收模式量測時到之訊號。但由於同時激發 16 個壓電元素，量測到之聲導波響應卻也比激發單一壓電元素時紊亂且複雜，此為不利於響應圖之判別及分析的因素。

4.3 流道板雷射都卜勒干涉儀量測實驗

為了解陣列壓電換能器的性能，以及確認陣列壓電換能器是否能於流道板實物模型上激發適當強度的聲導波，且在有限尺寸之實物模型邊緣是否產生回波，干擾直接傳遞於兩組陣列換能器之間的聲導波響應，使用雷射都卜勒干涉儀，量測實物模型上的聲導波響應。

圖 4.11 所示為雷射都卜勒干涉儀的實驗儀器照片，由(a)到(c)分別為雷射頭、控制器與儀控面板，由於雷射光聚焦於流道板上欲量測之位置後，需經由原路徑反射回雷射頭作接收，且在量測時需作試片的移動，故將流道板固定於如圖 4.11(d)之移動平台上作量測。量測時以函數產生器產生頻率為 500 kHz 等振幅之三個週期的弦波，經過功率放大器增益後，激振流道板左端中央的單一個壓電換能器產生聲導波，圖 4.12 所示為雷射都卜勒干涉儀量測鋁合金流道板聲導波近接收端的起迄位置示意圖，紅點設為量測起點(座標 $x = 0$)，藍點為終點(座標為 $x = 6.5$ mm)，間隔 0.5 mm 量測一組聲導波訊號。由於相同頻率對應許多不同的聲導波模態，各模態的波速不同，抵達量測位置便形成一組時間拖曳較長的響應。圖 4.13 所示為在上述量測點作直線掃瞄所擷取之聲導波響應灰階圖，淺色代表波峰，深色代表波谷，壓電換能器產生的聲導波行經流道區，訊號前緣抵達量測點的時間在 30 μ s 之後。聲導波抵達距離發射端愈遠的量測點所需時間愈長，因此，不同量測點擷取之訊號波峰連線呈現正斜率的趨勢。在圖 4.13 中，每組正斜率的訊號波峰連線之後，緊接著出現負斜率的訊號波峰連線，代表自流道板四周邊緣反射回來的訊號，與直接

抵達量測點的聲導波響應發生某種程度的干擾。

由雷射都卜勒干涉儀量測到之結果中，其由單一壓電元素產生之聲導波強度已足夠經鋁合金流道板傳遞至另一端聲導波感測器中，且由聲導波的線掃描灰階圖中發現，鋁合金流道板實物模型在聲導波的傳遞中存在許多經由邊緣反射回來的訊號，此反射訊號直接影響到雷射都卜勒或是聲導波感測器量測到的聲導波響應。

4.4 水量對聲導波傳遞的影響

圖 4.14 所示的四張實驗照片分別代表將水填充於流道板中央，為了明顯辨識，將藍色染料加入水中，水覆蓋區域的長度分別為 $L_1 = 40.31 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 22.4 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 7.17 \text{ mm}$ 。以函數產生器產生頻率為 500 kHz 等振幅之三個週期的弦波，經過功率放大器增益後，激振流道板左端中央的單一壓電換能器產生聲導波。圖 4.15 所示為陣列換能器上 16 個壓電元素感測的聲導波響應灰階圖，發射端經函數產生器激發後產生的聲導波行經流道區，在大約 $20 \mu\text{s}$ 之後抵達接收端。相較於圖 4.13，壓電換能器感測訊號所需的處理時間較雷射都卜勒干涉儀短，表現於擷取之超音波訊號前緣抵達的時間也較短。

函數產生器若改以不同的頻率激發發射端的壓電元素，圖 4.16 所示為不同水量條件下中央壓電元素 R8 單發單收模式器感測不同頻率之聲導波訊號的灰階圖，時間介於 $0-10 \mu\text{s}$ 的訊號是激發電壓經由地線傳達至數位示波器的雜訊。在圖 4.16 中，顏色較淡的部份代表波峰，顏色較深者為波谷。隨著頻率的遞增，訊號的波峰連線呈現負斜率，顯示高頻聲導波的波速較低頻者快，先抵達接收端換能器，說明發射端的壓電換能器激發之聲導波屬於撓曲波(flexural waves 或稱 bending waves)。時間介於 $25-30 \mu\text{s}$ 的訊號波谷連線卻呈現正斜率，顯示在該頻率下，會激發不

同模態的聲導波。這種正斜率的訊號響應不是邊緣反射波，因為速度快的聲導波，反射回來的時間應該也較短，呈現更大的負值斜率，不應該呈現正斜率趨勢。

行經水覆蓋流道區的聲導波在不同的時間階段會呈現出較小的振幅，意謂有些模態的聲導波能量會受到流道區域覆蓋水的影響而衰減。為了驗證水覆蓋流道區會降低聲導波的相速度，將各組訊號與行經無水覆蓋流道板之聲導波訊號進行交互相關運算(cross-correlation)，

$$R_{xy}(\tau) = \int_a^b x(t)y(t+\tau)dt \quad (4.1)$$

其中，訊號 $x(t)$ 及 $y(t)$ 分別為行經無水覆蓋流道區及水覆蓋區域的聲導波訊號，積分上、下限 a 、 b 為擷取時段(gated window)的前後時間點。 $R_{xy}(\tau)$ 峰值可為正、負值，對應的時間延遲(delay time)代表兩組訊號抵達接收器的時間差。比較 300、350 及 400 kHz 的聲導波行經無水覆蓋之流道區及水覆蓋區域長 L_1 、 L_2 及 L_3 的訊號，且考慮不同的聲導波模態，擷取時段的前後時間點就不同。圖 4.17、4.19、4.21 選定時間介於 10-40 μ s 的訊號，圖 4.18、4.20、4.22 則選定時間介於 40-80 μ s 的訊號，分別進行交互相關運算。由於不同頻率的聲導波相速度不同，行經水覆蓋區域的長度不同也會影響聲導波的波程時間。

表 4.1 所列為整理不同頻率之聲導波行經不同長度之水覆蓋區域造成的時間延遲，根據線性聲波理論，聲波穿過介質所耗費的時間與平行波傳方向的介質幾何尺寸成正比，表 4.1 所列數據不符合這項規律。主要原因在於目前採用的流道板實物模型尺寸較小，板緣四周沒有增設阻尼吸振，板緣反射的回波干擾自發射端直接抵達接收端的聲導波響應，以致於交互相關運算所獲得的時間延遲計算值產生誤差，在比較時間延遲計算值與水覆蓋長度的線性關係時，失去了參考基準。

4.5 流道板之設計改良

由於目前採用的流道板實物模型尺寸較小，板緣四周沒有增設阻尼吸振，板緣反射的回波干擾自發射端直接抵達接收端的聲導波響應，最簡單的方法就是在流道板的設計上作尺寸的改良。設計一如圖 4.23 的 300x200 mm 鋁合金流道板，其厚度為 2 mm，分為(a)中央流道部分與原設計相同，流道區為 45x56 mm，流道的凹陷深度 0.5 mm、寬度 1 mm，(b)不含流道的鋁合金平板，利用此加大四周寬度而減少邊緣反射的鋁合金流道板作量測，且為了更進一步減少邊緣反射的情況，圖 4.23 中可看見在板的四個邊緣各黏貼了一排具有較高阻尼特性的黏膠。圖 4.24 為接收端第八個壓電元素所接收到之訊號，其中黑色實線為鋁板邊緣沒有黏貼高阻尼材料所量測到之訊號，紅色實線則為鋁板四周黏貼高阻尼材料時所量測到之訊號，可發現在改良後流道板的邊緣反射訊號約在 100 μ s 之後，且 100 μ s 之後的聲導波響應才會因黏貼在鋁板四周的高阻尼材料而其振幅大幅的降低。

以 AB 型導電銀膠僅先將用作發射端的陣列壓電換能器黏貼於流道一側作為聲導波的致動器，避免黏貼於另一側之陣列壓電換能器產生不必要的回波訊號，以雷射都卜勒單純量測發射端發出之聲導波。利用雷射都卜勒干涉儀量測，如圖 4.25 所示之位置，函數產生器以 1MHz、500mV_{pp} 等振幅三個週期的正弦波激發發射端中央第八個壓電元素，由發射端前逐點量測，每隔 0.05 mm 量測一點，至流道板中央停止移動。圖 4.26 所示為在上述量測點作直線掃瞄所擷取之聲導波響應灰階圖，淺色代表波峰，深色代表波谷，壓電換能器產生的聲導波在 10 mm 處剛好進入流道區，在圖中形成一斷層後進入流道區，聲導波抵達距離發射端愈遠的量測點所需時間愈長，因此，不同量測點擷取之訊號波峰連線呈現正斜率的趨勢。在進入流道區 10 mm 之前可以看見大約在 20 μ s 處即出

現負斜率的訊號波峰連線，代表自進入流道板前緣處反射回來的訊號，由於擷取訊號之時間軸過長，導致後面有許多負斜率的邊緣反射波反射干擾直接抵達量測點的聲導波響應，約在 40 μs 之前的訊號是沒有受到回波訊號干擾的波段。其次，如前面所提示之激振訊號，量測如圖 4.27、4.28 的量測位置，分別在流道肋板上及流道底部以雷射都卜勒干涉儀量測，紅色點為起始位置，藍色為結束位置，並量測在流道內無水及填滿水之間的差異性。圖 4.29 為流道肋板上與流道底部量測之灰階圖，其結果可以發現當在圖(a)中流道區肋板上全發無水模式時量測到之訊號是相道雜亂的，16 個壓電元素之間的相互影響造成訊號有大量的重疊部分，在圖(b)與圖(d)中流道區肋板上量測無水與有水訊號在 40 μs 之後才有反射波的影響，但較難分辨兩者之差異，圖(c)中量測無水時流道底部之訊號，在 35 μs 左右就有反射波的影響，可以發現當流道中有水時，聲導波的傳遞進入水中會降低其波速，且在流道底部就存在流道本身產生的反射訊號，而非全然由整塊流道板的邊緣反射而來。

4.6 固定波長的聲導波激發

以函數產生器激振陣列壓電陶瓷換能器產生與頻率對應的聲導波響應，由第三章有限元素分析結果可知，在相同的頻率下會對應到不同的聲導波模態，由於各模態的波速不同，所以量測到之訊號為一組時間拖曳較長的響應，過多的模態導致各模態之間互相的干擾以致於無法清楚的判讀量測到之訊號。由於材料的波速為固定不變的材料性質，若能將產生的聲導波波長固定，便能確定激發出的第一組 A_0 與 S_0 模態訊號。為了以固定波長方式產生聲導波，故將發射端的陣列壓電換能器以導電銀膠黏貼與原本黏貼方式呈 90 度，黏貼於緊臨流道區之一側，而將接收端也靠近流道區作移動，如圖 4.30 所示。由於壓電換能器上壓電元素寬度

為 1.5 mm，且發射端相鄰之壓電元素間的距離皆為 1.3 mm，若同時激發 16 個壓電元素其波長為 2.8 mm，若同時激發第 1、3、5...至第 15 個壓電元素，其波長為 5.6 mm。

4.6.1 流道板不同條件量測訊號

質子交換膜燃料電池流道板內除了反應生成水的影響外，與流道板相鄰的氣體交換層也是與流道板直接接觸到的，而一般都以碳紙作為氣體交換層，因此除了單純流道內有水的情況外，碳紙在流道區上的情況也是值得探討的。如圖 4.31 所示，將濕潤的碳紙放置於流道板中央流道區的上方來作量測，為了避免氣泡殘留在碳紙內部，先將碳紙浸泡在水中約 12 小時，使水能夠盡量完全滲入碳紙，浸泡過後濕潤的碳紙利用表面吸附的水與流道耦合才能在流道上形成負載，再利用接收端量測到之訊號作比較。發射端以第 1、3、5...15 等共八個壓電元素作為激發之探頭，產生的聲導波經過流道區以及不同的三種負載情況再由接收端最中央第八個壓電元素作接收，圖 4.32 所示為流道區上無水、流道區上放置濕潤的碳紙及將水填滿流道區三種情況比較，圖 4.32(a)中黑色實線代表流道內無水，紅色實線代表將浸濕之碳紙放置於流道區上。圖 4.32(b)中黑色實線代表流道內無水，紅色實線代表將水填滿流道區內。圖中時間上介於 0-10 μs 的訊號是激發電壓經由地線傳達至數位示波器的雜訊，圖 (a)中可以發現由於濕潤的碳紙與流道間存在水的吸附力，其振幅比流道無負載的條件下振幅略小，圖(b)中流道內用水全部填滿時，振幅的改變比圖(a)之情形要來的大。表示聲導波在流道板中傳遞時，聲導波會有部分能量進入流道區中的水及流道上放置的濕潤碳紙，且前者影響大於後者。由於碳紙密度較水小，而碳紙與流道之間的耦合僅靠碳紙上些微水份的吸附力，故濕潤碳紙對聲導波傳遞的影響較不明顯。

若將激振方式改變，以函數產生器產生一個寬頻的訊號，其寬頻激

發訊號如圖 4.33 所示，其頻寬約為 0-1MHz，函數產生器產生之訊號經由放大器的放大增益後，激振發射端產生固定波長為 5.6 mm 之聲導波，圖 4.34、4.35 所示為固定波長為 5.6 mm 激發聲導波時。接收端 R1 至 R16 所量測到之訊號，圖中黑色實線為流道內無水，紅色實線為將水填滿流道。由於發射端正對著接收端中央，在越接近中央之壓電元素量測之訊號振幅會越大，且由於寬頻訊號在激振時能量較分散，相較於圖 4.7-4.10，其振幅較小。若將 R1 至 R16 所量測到之訊號作快速傅立葉轉換(fast fourier transform)，將時域訊號轉至頻率域，其結果如圖 4.36、4.37 所示。黑色實線為無水，紅色實線為有水，可發現在每個壓電元素所量測到之訊號中，250 kHz 與 580 kHz 附近皆有明顯的波峰產生，且流道區在受到水的負載下，頻率 580kHz 處的波峰有明顯的改變，代表著流道區的水對聲導波的傳遞具有一定程度上的影響，且在 580kHz 時更為明顯。

4.6.2 實驗量測聲導波相速度頻散曲線

由於聲導波在一任意頻率下會產生一種以上的波傳模態，為了解聲導波在實物模型上的頻散特性，以雷射都卜勒干涉儀在流道板上量測之訊號，繪製聲導波相速度頻散曲線。1991 年，由 Alleyne 與 Cawley 依據有限元素法所計算得到的板波波形，以二維傅立葉轉換(2D Fourier transform)，簡稱 2D-FFT，計算板波的頻散曲線[16]，此方法已經被廣泛應用於多模態頻散波相速度頻散曲線的實驗分析上。

時間傅立葉轉換先將時間域的訊號映射至頻率域上，再以空間傅立葉將不同量測位置所擷取的波形轉換至頻率 - 波數域 (frequency-wavenumber)，轉換後的振幅為頻率及波數的函數，如下式所表示

$$H(k, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) e^{-i(kx + \omega t)} dx dt \quad (4.2)$$

其中 $u(x,t)$ 即為不同位置量測到之空間與時間函數訊號。

以寬頻訊號激振波長為 5.6 mm 的聲導波，量測位置如圖 4.38 所示，由距離發射端 20 mm 為量測起點，沿聲導波傳遞方向量測 8 點，量測間隔為 0.1 mm，取樣點數為 4096 點。將量測到之訊號經過 2D-FFT 分析之後，時間轉換至頻率 f ，距離轉換至波數 k 。先繪製橫軸為波數，縱軸為振幅，圖 4.39 所示為 1 MHz 對應圖。將前兩個波峰所對應到之波數 k 值，與曲線所代表的頻率 f ，利用 $c=2\pi f/k$ ，可繪製橫軸為頻率，縱軸為相速度 c 的相速度頻散曲線。圖 4.40 所示為實驗繪製 0.2 MHz 至 1.2 MHz 的聲導波相速度頻散曲線與解析解之比較圖，圖中原點代表二維有限元素解析解，三角形則代表實驗結果。實驗與數值分析所求出之相速度有明顯的不同，若量測到之訊號受到反射訊號的干擾，會對結果產生影響，由於流道區內部產生的反射訊號無法排除，因而影響到實驗繪製聲導波頻散曲線結果的正確性。

4.7 流道區上不同負載的影響

為了能更清楚流道區上的水對聲導波的傳遞產生的影響，針對接收端中央壓電元素 R8，進行插入損失(Insertion loss)的量測比較，在流道區上滴入不同的水量並量測其插入損失。實驗中使用網路分析儀(HP8751A Network Analyzer)及散射參數測試組(HP87511A S-parameter Test Set)進行量測，可量測頻率範圍為 100kHz-500MHz，平均次數為 50 次，螢幕顯示最大點數為 801 點。S 參數(scattering parameter)可以表示入射能量、反射能量及透射能量之間的振幅與相位差關係，實驗架構如圖 4.41，其 S 參數定義如圖 4.42 所示， S_{11} 與 S_{22} 為輸入與輸出端的反射系數、 S_{21} 與 S_{12} 為順向與反向增益反應。實驗中將 port1 與 port2 分別接到流道板兩側的發射與接收端，量測不同條件下順向增益反應(S_{21})。

圖 4.43 所示為流道區上四種不同負載的示意圖，包括流道區無水、流道區上放置浸濕之碳紙、流道底部佈滿水及流道區上佈滿水，根據以上四種情況量測 S_{21} 的值，圖 4.44 至圖 4.46 為以上三種負載與流道區無水的插入損失比較，黑色實線為無水，紅色實線為有水。當流道區上負載改變時，插入損失也會隨著改變，根據前一小節中的結果，若比較 580 kHz \pm 2% 附近不同負載的峰值，當流道區無水時插入損失為 -41.89379 dB，當流道區上放置浸濕之碳紙時為 -42.61786dB，當流道底部佈滿水時為 -45.12214dB，流道區上佈滿水時則為 -46.78663dB。雖然流道區上外加負載對插入損失的影響不大，但當流道區上的負載越大時，其插入損失會越大，也就是說當流道板上有負載時會影響到流道板中聲導波的傳遞，其中由於水的密度為 1000 kg/m³，碳紙的密度僅為 440 kg/m³，且碳紙與流道板之間僅靠水的吸附力作用，故當流道板上放置浸濕的碳紙時插入損失較流道板中有水時小。

由於發射端與接收端之第八個壓電元素皆對準於流道凸起部分，將等量的水分別滴入凸起兩旁的流道內如圖 4.47(a)所示，每條流道約 11 μ L，再依序每次填滿左右向外各一條流道如圖 4.47(b)，每次增加 22 μ L 直到水將流道區 25 條流道全部填滿，並量測不同水量對插入損失的影響。圖 4.48 至圖 4.60 為各水量與流道無水時插入損失比較圖，其中黑色實線為無水，紅色實線為其他水量。當流道區負載(水量)改變時，觀察在頻率為 580 kHz 附近的插入損失，並將其 580 kHz \pm 2% 附近之插入損失與對應水量之結果列於表 4.2。其結果可發現當水量越多時，插入損失也越大，然而在 10 條流道內含水(110 μ L)之前，插入損失較不規律，只相差不到 0.5 dB，自 110 μ L 之後才能看出其大小之間較明顯的變化。

若量測流道上不同負載以及接收端不同壓電元素的插入損失，挑選接收端 R4、R8、R9、及 R13 量測，圖 4.61 至圖 4.64 為四個壓電元素量

測插入損失時流道無水與流道佈滿水(275 μL)時的比較圖，黑色實線為流道無水，紅色實線為流道佈滿水，且將量測時六種不同水量與其結果比較列於表 4.3。由於發射端的壓電陶瓷是正對著接收端中央 R8，而接收端兩側其他壓電元素相對距離較遠，因此，在插入損失的量測結果上，接收端中央的 R8 與 R9 插入損失整體上比距離較遠的 R4 與 R13 要來的小。而若由水量分別觀察其結果，中央的壓電元素雖然距離較近而有較小的插入損失，然而卻會因為水量的增加而有較大的變化。

4.8 不含流道的鋁合金平板的量測實驗

為了解聲導波致動與感測器的特性，以及流道板中央流道對聲導波傳遞的影響，以相同材料及尺寸之中央不含流道的鋁合金平板作實驗量測比較，實物模型如圖 4.23(a)，比較其聲導波的響應以及水量對插入損失的影響，最後在以量測之結果比較鋁合金平板中央有流道與無流道之差異。

4.8.1 聲導波感測器掃描

將一組陣列壓電陶瓷黏貼於不具流道的鋁合金平板上，黏貼位置與有流道時的黏貼位置相同，以函數產生器產生一寬頻訊號經放大器增益激振發射端第 1、3、5...15 共八個壓電元素，產生的聲導波經無流道之鋁合金平板傳至接收端。圖 4.65 為相同條件下，聲導波經過具有流道與沒有流道的鋁合金板，由接收端中央 R8 所接收到之聲導波訊號。同樣在 10 μs 之前為激發電壓經由地線傳達至數位示波器的雜訊，而且 10 μs 之後緊接著就是一連串的聲導波響應，若比較有流道與無流道之訊號可以發現，在聲導波經過流道區時，聲導波在流道內部便會產生反射，使得聲導波的響應受到影響。接著將單發單收時掃描鋁合金平板之訊號，以快速傅立葉轉換將時域之聲導波響應轉換為頻率響應圖，其結果如圖 4.66、

4.67 所示。各壓電元素接收到之頻率響應，在 250 kHz 與 600 kHz 皆有較大的振幅，且在各壓電元素皆比有流道時具有更大的振幅。

4.8.2 插入損失的量測

由 4.8.1 所量測到之頻率響應發現聲導波在鋁合金平板上傳遞時，在 600 kHz 具有較明顯的頻率響應，故在量測不同水量對其插入損失的影響時挑選 600 kHz \pm 2% 附近之插入損失，可以跟有流道時量測到之結果作比較。然而當致動與感測器之間不具有流道時，水量的分布便無法利用流道來作判斷，因此在聲導波的致動器與感測器正中間以微量滴定管作水量的控制，其水滴位置如圖 4.68 所示，在圖示之位置以微量滴定管分別滴下 20、40、60、80、100 μ L 的水滴，量測板上無水及五種水量的情況下對插入損失的影響。圖 4.69-圖 4.72 分別為各壓電元素水量 100 μ L 與無水時插入損失的比較圖，並將其結果比較列於表 4.4。與鋁板中央有流道相同的是發射端正對著的中央壓電元素 R8 與 R9，兩者的插入損失整體上較 R4 與 R13 小。然而，在不同水量下量測四個壓電元素的插入損失時，當流道板上無水與水量為 100 μ L 時，除了中央 R8 差異為 1.8 dB 外，其他三者約在 1.3-1.4 dB 之間，在正對發射端的壓電元素才會對中央水量負載具有較好的敏感度。

4.9 實驗量測結果比較與討論

本章最初量測之鋁合金流道板為實物模型尺寸較小之設計，利用流道兩側之壓電陶瓷經由齊發單收與單發單收兩種模式作掃瞄，並以雷射都卜勒干涉儀進行流道板上聲導波響應的量測。為了驗證水覆蓋流道區會降低聲導波的相速度，將不同水量下各組量測訊號與行經無水覆蓋流道板之聲導波訊號進行交互相關運算，然而其結果並不符合線性聲波理論中，聲波穿過介質所耗費的時間與平行波傳方向的介質幾何尺寸成正

比。且由聲導波響應灰階圖發現，每組正斜率的訊號波峰連線之後，緊接著出現負斜率的訊號波峰連線，代表自流道板四周邊緣反射回來的訊號，與直接抵達量測點的聲導波響應發生某種程度的干擾。

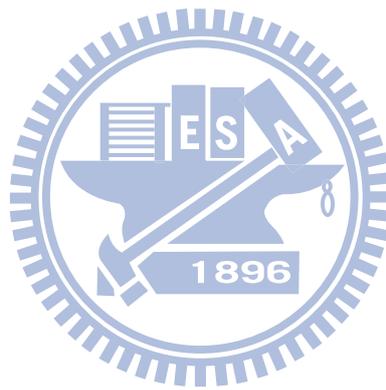
為了改善流道板的邊緣反射情形，因此將流道板四周部分的尺寸加大，且在板的四周黏貼一層高阻尼材料，發現當鋁合金流道板四周尺寸變大時，其四周的高阻尼材料僅對 100 μ s 之後的聲導波響應產生影響，以此避免使用到具有板緣反射之訊號。

以雷射都卜勒量測流道肋板上訊號，經由 2D-FFT 計算並繪製的聲導波相速度頻散曲線，卻因為無法排除的流道內部反射訊號，使其與數值分析解之間的差異較大。

在聲導波響應圖中，雖然僅能以振幅的改變判斷流道上具有負載，卻沒辦法以波速的改變判斷水量。若將接收訊號以快速複利葉轉換為頻率響應，可發現在 580 kHz 附近的頻率響應明顯受到流道上的負載而產生變化。若再更進一步量測當受到不同水量時其插入損失的變化，可發現當水量越多時，插入損失也會越大，且在發射端正對著的接收端中央壓電元素，插入損失比距離較遠的壓電元素小。

量測中央無流道之鋁合金平板時，由接收端量測到的聲導波響應結果，若與有流道之鋁板掃描訊號比較，發現當板中央有流道時，訊號間會有許多振幅較小的流道內部反射訊號產生。然而在各壓電元素接收之頻率響應訊號可以發現，當聲導波經過流道時，因為聲導波在進入流道區時，流道內部的反射而造成影響，使得不同壓電元素在主要振幅較大的 250 kHz 與 580 kHz 兩個頻率，振幅會有跳動的情形。而在無流道之鋁合金平板上，不同壓電元素量測到之頻率響應，在 250kHz 與 600 kHz 皆有較穩定的振幅。由於 580kHz 以及 600kHz，在監測流道板中的水時，其靈敏度較高，故在量測插入損失時，以 580kHz 以及 600kHz 兩者 \pm 2%

附近之峰值作為觀測基準。而由插入損失之比較也可發現，當平板或流道板上具有水的負載時，水量越多，則插入損失越大。



第五章 結論與未來展望

本研究設置於鋁合金流道板兩側之陣列式壓電陶瓷換能器，作為聲導波的致動與感測器，量測流道板上有水覆蓋時，對流道板的掃描、聲導波響應、以及插入損失等產生的影響。並利用二維與三維有限元素分析，計算並繪出鋁合金流道板的聲導波相速度頻散曲線與實驗結果比對。本章總結數值分析與實驗量測結果，供日後研究的參考。

5.1 結論

5.1.1 數值分析結果討論

為了解質子交換膜燃料電池運轉時，與流道接觸之氣體擴散層，是否會對流道板中傳遞的聲導波波速產生影響，首先以數值分析計算鋁合金流道板 A_0 與 S_0 模態板波的相速度。發現當流道上放置一層碳紙時，聲導波傳遞的速度會受到影響。然而，實際狀況中，碳紙與流道板的耦合僅依靠浸濕碳紙表面水的吸附力，與分析情況差異較大。

使用 ANSYS 三維有限元素分析聲導波的共振模態，能夠成功的繪製特定模態的相速度頻散曲線。然而，流道的自然頻率及所對應的共振模態中，會有許多型式的振動模態，必須從中挑選出適當的頻率及模態，才能進一步計算並描繪頻散曲線，挑選過程相當耗時。以二維有限元素分析所繪製聲導波相速度的頻散曲線中，發現在相同頻率下會對應許多不同的聲導波模態，各模態波速都不相同，當分析的模型僅具有單一流道時，低頻所對應到的聲導波模態數量較少，當流道數量越多時，相同頻率所對應到的聲導波模態也越多，且結果與 ANSYS 分析具有 25 條流道的相速度頻散曲線結果趨勢一致。

5.1.2 實驗量測結果討論

為了驗證水覆蓋流道區會降低聲導波的相速度，將不同水量下各組量測訊號與行經無水覆蓋流道板之聲導波訊號進行交互相關運算，實驗最初量測之鋁合金流道板，實物模型尺寸較小，邊緣反射造成結果並不符合線性聲波理論。且由雷射都卜勒干涉儀量測之聲導波響應灰階圖發現，自流道板四周邊緣反射回來的訊號，與直接抵達量測點的聲導波響應發生某種程度的干擾。

將流道板四周的尺寸加大，改善板緣四周回波訊號對掃描量測結果的影響。流道板尺寸變更後，四周的反射訊號可確定在 $100 \mu\text{s}$ 之後，在訊號的擷取與分析上，皆避免使用受反射影響之訊號。然而，以雷射都卜勒量測流道肋板上訊號，經 2D-FFT 計算並繪製的聲導波相速度頻散曲線，卻因為無法排除聲導波進入流道時的反射訊號，使其與數值分析之間的差異較大。

在流道或平板上有水時，對聲導波傳遞會產生影響，針對不同水量及不同壓電元素量測插入損失，需先以聲導波感測器量測頻率響應訊號。發現掃描流道板之頻率響應訊號中， $580 \text{ kHz} \pm 2\%$ 的振幅明顯受到流道上的負載而改變。在波傳途徑中，負載水量越多，聲導波的插入損失越大，代表聲導波在傳遞時，會因部分能量進入水中而衰減，且在波傳主要傳遞路徑上的負載，對插入損失的影響較大。

5.2 未來展望

目前以陣列聲導波感測器量測流道板之訊號，能由插入損失來判斷水量的多寡，但即使用水將流道填滿，變化依然不明顯。未來可以改變鋁合金流道板之厚度，使相同的水量在較薄的流道板上，對聲導波的傳遞影響更明顯，以及改變聲導波進入流道區時不連續的界面設計，減少

流道區內部產生反射的影響。

本研究之實驗部分針對流道區上不同水量加以探討，未來可更進一步利用接收端 16 個壓電元素之間的量測訊號，對流道板上不同區域覆蓋的水加以辨識。若能建立一套實驗繪製頻散曲線之系統，與數值分析之結果互相驗證，便能更了解聲導波在流道板上的頻散特性。



參考文獻

- [1] D. Singh, D.M. Lu, and N. Djilali (1999), “A two-dimensional analysis of mass transport in proton exchange membrane fuel cells,” *International Journal of Engineering Science*, **37**, 431-452.
- [2] G.J.M. Janssen and M.L.J. Overvelde (2001), “Water transport in the proton-exchange membrane fuel cell : measurements of the effective drag coefficient,” *Journal of Power Sources*, **101**, 117-125.
- [3] K. Tüber, D. Pócza, and C. Hebling (2003), “Visualization of water buildup in the cathode of a transparent PEM fuel cell,” *Journal of Power Sources*, **124**(2), 403-414.
- [4] R. Satija, D.L. Jacobson, M. Arif, and S.A. Werner (2004), “In situ neutron imaging technique for evaluation of water management systems in operating PEM fuel cells,” *Journal of Power Sources* , **129**, 238-245.
- [5] J. Bedet, G. Maranzana, S. Leclerc, O. Lottin, C. Moyne, D. Stemmelen, P. Mutzenhardt, and D. Canet (2008), “Magnetic resonance imaging of water distribution and production in a 6cm² PEMFC under operation,” *International Journal of Hydrogen Energy* ,**33**(12) 3146- 3149.
- [6] L. Rayleigh (1885), “On waves propagated along the plane surface of an elastic solid,” *Proc. London Math. Soc.*, **17**,4-11.
- [7] H. Lamb (1917), “On waves in an elastic plate,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, **93**(648),114-128.
- [8] R. J. Dewhurst, C. Edwards, A. D. W. McKie, and S. B. Paimer (1987), “Estimation of the thickness of thin metal sheet using laser generated ultrasound,” *Appl. Phys. Lett.*, **51**(14), 1066-1068.
- [9] Y. C. Shen and P. Hess (1997), “Real-time detection of laser-induced transient gratings and surface acoustic wave pulses with a Michelson

- interferometer,” *Journal of Applied Physics*, **82**, 4758-4762.
- [10] A. Gachagan, G. Hayward, A. McNab, P. Reynolds, S. G. Pierce, W. R. Philp, and B. Culshaw (1999), “Generation and reception of ultrasonic guided waves in composite plates using conformable piezoelectric transmitters and optical-fiber detectors,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 46(1), 72-81.
- [11] Bill Drafts (2001), “Acoustic Wave Technology Sensors,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **49**(4), 795-802.
- [12] Y. C. Lee and S. H. Kuo (2006), “Leaky Lamb Waves of a Piezoelectric Plate Subjected to Conductive Fluid Loading: An Experimental Study,” *IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **53**(9), 1617-1626.
- [13] 鄭博毅 (2010), 線陣列超音波換能器於質子交換膜燃料電池石墨雙極板的聲場, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣。
- [14] ANSI/IEEE Standard, *Piezoelectricity*, IEEE, New York, 1987.
- [15] M. F. Serincan and U. Pasaogullari (2010), “Effect of Gas Diffusion Layer Anisotropy on Mechanical Stresses in a Polymer Electrolyte Membrane,” *Journal of power sources*, **196**, 1314-1320
- [16] D. Alleyne and P. Cawley (1991), “A two-dimensional Fourier Transform method for the measurement of propagating multimode signals,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**(3), 1159-1168.
- [17] 陳俊男 (2002), 線型與圓柱型聲波導的雙維有限元素分析, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣。

附表

表 3.1 氣體擴散層碳紙的材料系數

Through-plane Young's modulus (MPa)	$E_1=0.5$
In-plane Young's modulus (MPa)	$E_2=9000$
Poisson's ratio in xy plane	$\nu_{12}=0$
Poisson's ratio in yz plane	$\nu_{23}=0.25$
Shear modulus in xy plane (MPa)	$G_{12}=19.5$
Density (kg/m³)	$\rho=440$

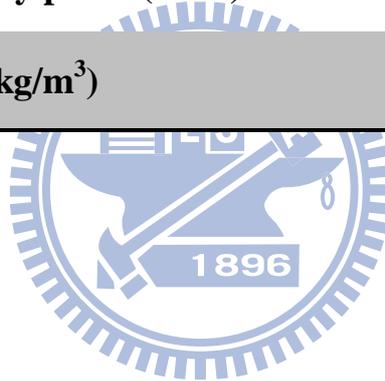


表 4.1 不同頻率之聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲
(first gated signals=10-40 μ s、second gated signals=40-80 μ s)

	水覆蓋區長 $L_1=40.31$ mm	Frequency (300 kHz)	Frequency (350 kHz)	Frequency (400 kHz)
First gated signals	Δt_{11} (μ s) (180° phase)	0.65	0.87	0.2
	Δt_{12} (μ s) (0° phase)	0.29	0.41	0.55
Second gated signals	Δt_{11} (μ s) (180° phase)	0.98	0.43	0.58
	Δt_{12} (μ s) (0° phase)	0.49	0.12	0.26

	水覆蓋區長 $L_2=22.4$ mm	Frequency (300 kHz)	Frequency (350 kHz)	Frequency (400 kHz)
First gated signals	Δt_{11} (μ s) (180° phase)	0.59	0.66	0.83
	Δt_{12} (μ s) (0° phase)	0.2	0.28	0.24
Second gated signals	Δt_{11} (μ s) (180° phase)	1.63	0.81	0.78
	Δt_{12} (μ s) (0° phase)	0.32	0.35	0.28

	水覆蓋區長 $L_3=7.17$ mm	Frequency (300 kHz)	Frequency (350 kHz)	Frequency (400 kHz)
First gated signals	Δt_{11} (μ s) (180° phase)	0.23	0.67	0.74
	Δt_{12} (μ s) (0° phase)	0.44	0.26	0.21
Second gated signals	Δt_{11} (μ s) (180° phase)	1.64	0.81	0.78
	Δt_{12} (μ s) (0° phase)	0.34	0.35	0.29

表 4.2 不同含水量與接收端 R8 在 580 kHz±2% 插入損失之峰值比較表(中央有流道之鋁板)

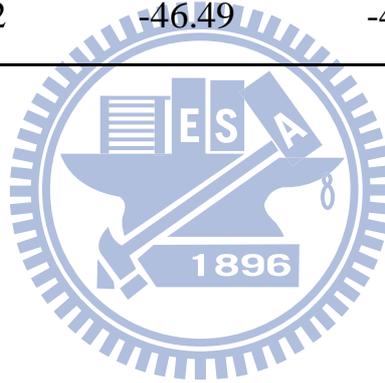
含水之流道數	總水量(μL)	插入損失(dB)
0	0	-41.66
2	22	-41.39
4	44	-41.56
6	66	-41.63
8	88	-41.61
10	110	-42.51
12	132	-42.88
14	154	-43.56
16	176	-43.48
18	198	-43.66
20	220	-44.02
22	242	-44.51
24	264	-45.21
25	275	-45.72

表 4.3 不同含水量與接收端在 580 kHz±2% 插入損失之峰值比較表
(中央有流道之鋁板)

含水流道數 (總水量 μL)	R4 插入損失 (dB)	R8 插入損失 (dB)	R9 插入損失 (dB)	R13 插入損失 (dB)
0(0)	-47.09	-41.66	-40.82	-47.5
4(44)	-47.55	-41.56	-40.91	-47.89
10(110)	-48	-42.51	-42.07	-48.66
25(275)	-48.44	-45.72	-44.22	-49.51

表 4.4 不同水量與接收端在 580 kHz±2% 插入損失之峰值比較表
(中央無流道之鋁板)

水量 (μL)	R4 插入損失 (dB)	R8 插入損失 (dB)	R9 插入損失 (dB)	R13 插入損失 (dB)
0	-50.26	-44.68	-48.31	-51.78
20	-50.23	-44.76	-48.39	-51.9
40	-50.57	-44.92	-48.49	-52.16
60	-50.99	-45.1	-48.45	-52.3
80	-51.28	-45.55	-48.97	-52.68
100	-51.42	-46.49	-49.63	-53.15



附圖

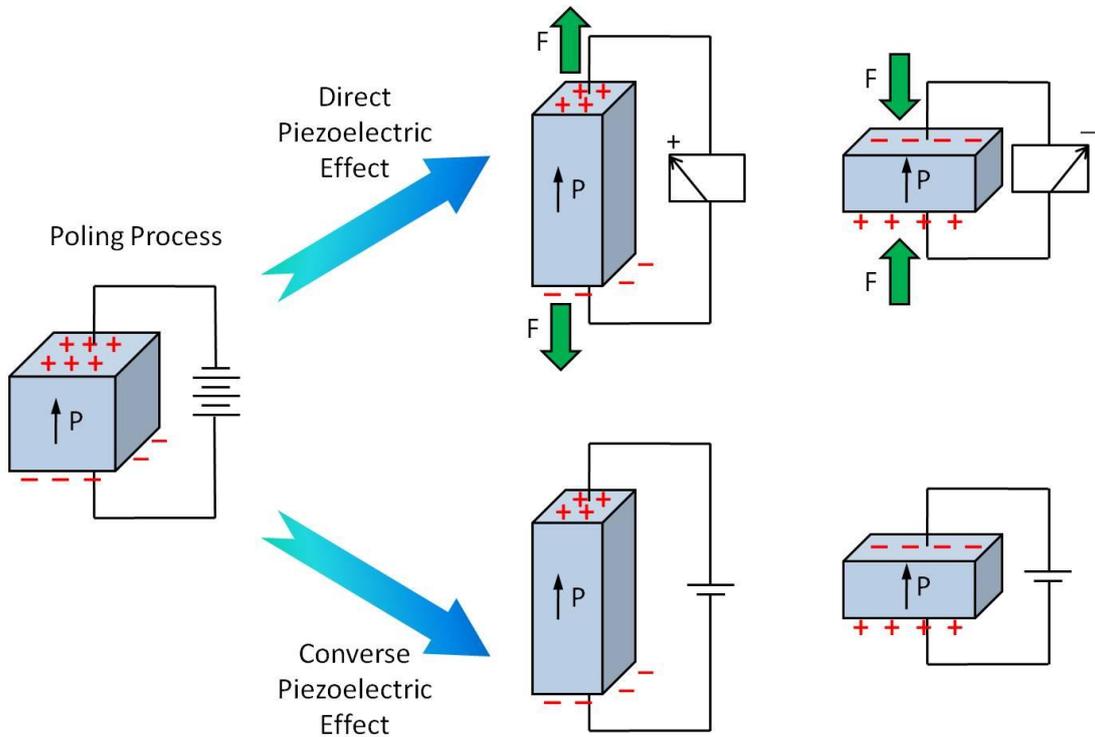


圖 2.1 極化過程與壓電效應示意圖

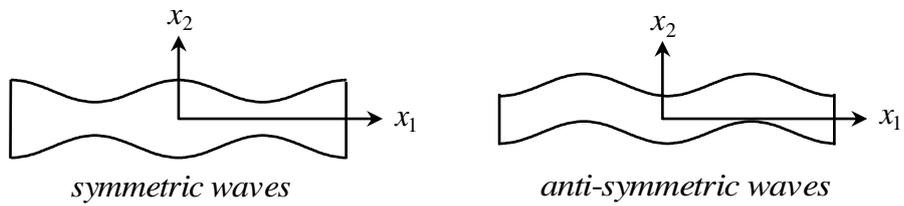


圖 2.2 平板中的(a)對稱及(b)反對稱板波示意圖

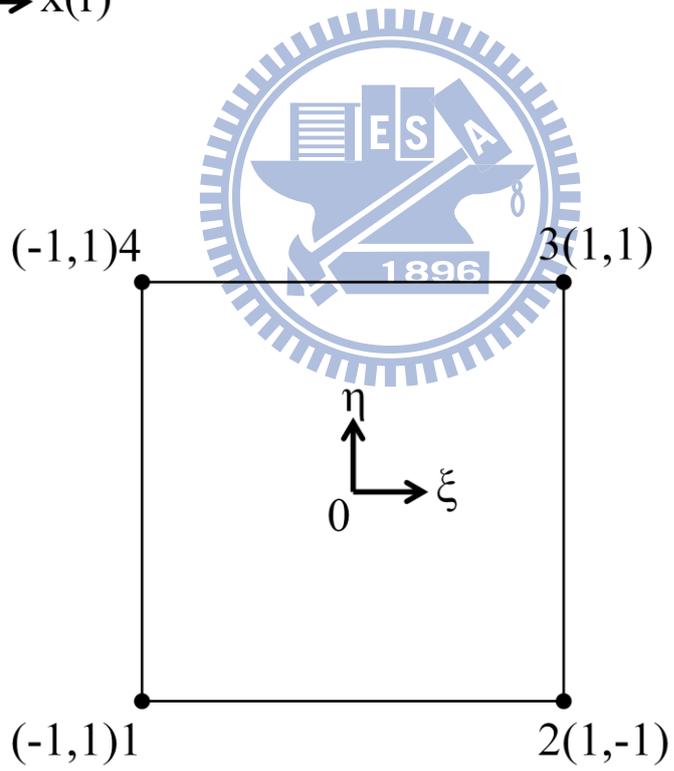
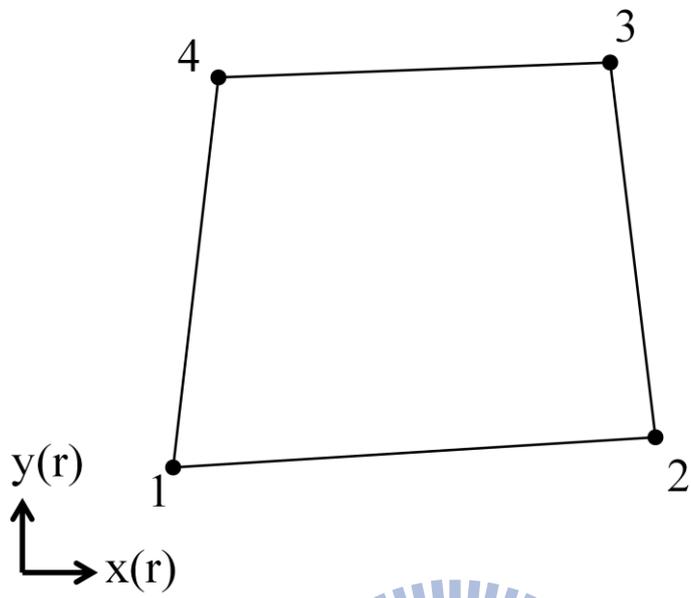


圖 2.3 全域座標與自然座標映射圖

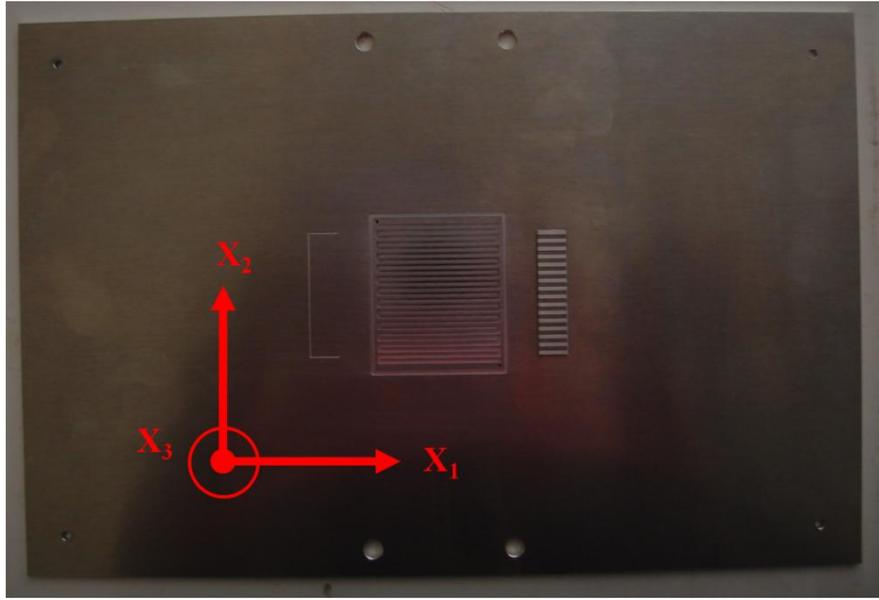


圖 3.1 鋁合金流道板材料系數量測之座標軸定義

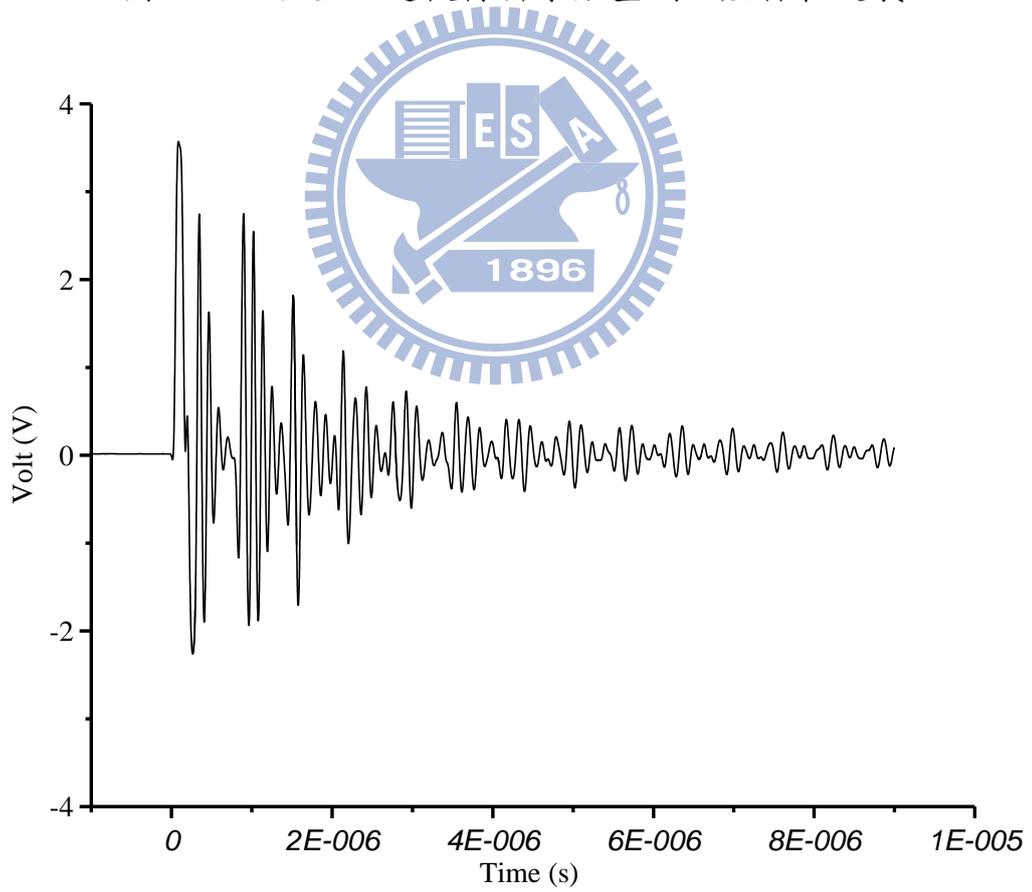


圖 3.2 壓力波探頭在鋁合金流道板量測之回波訊號

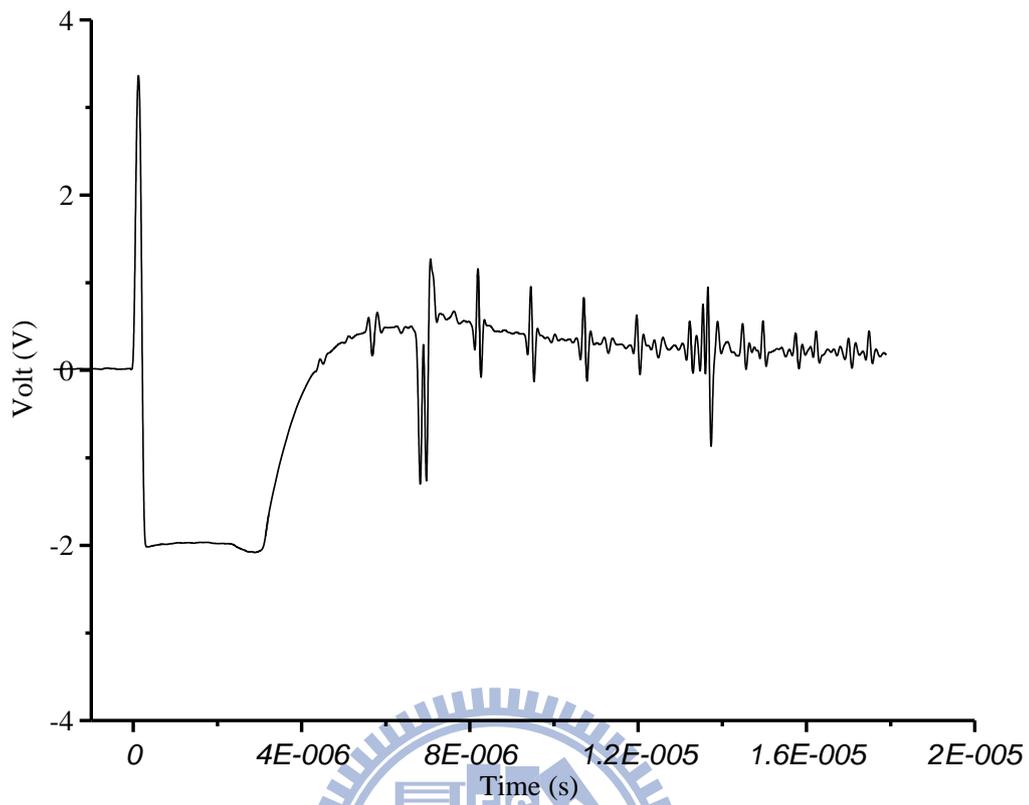


圖 3.3 剪力波探頭在鋁合金流道板 X_1 方向之回波訊號

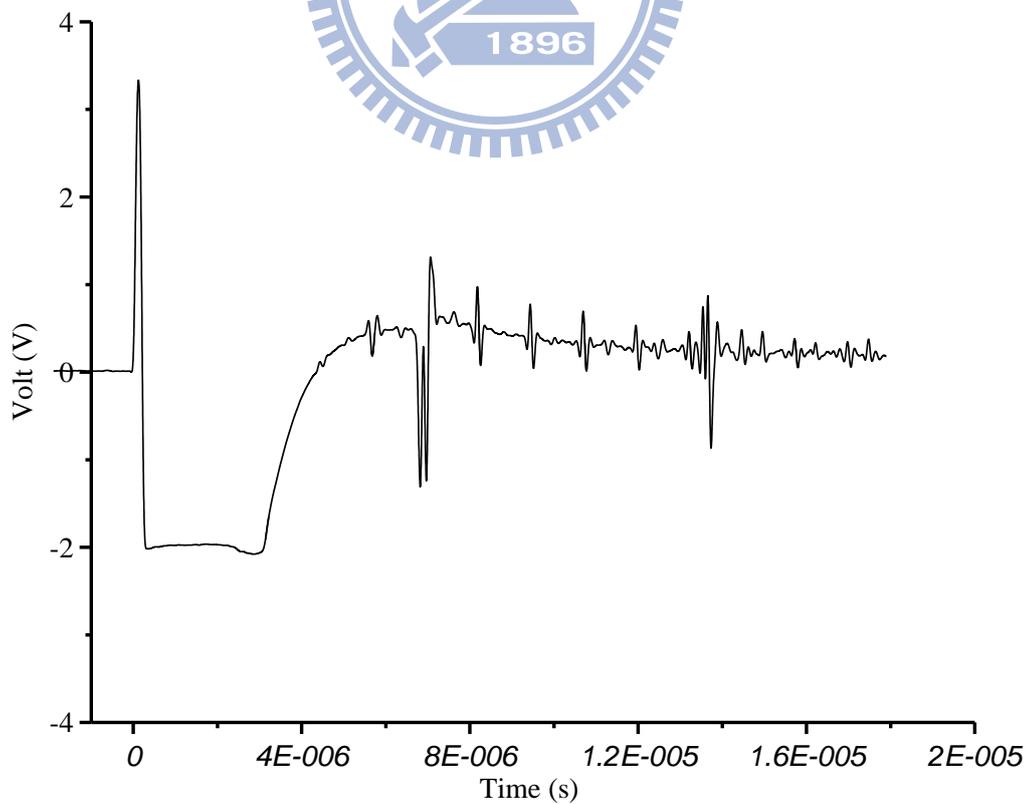


圖 3.4 剪力波探頭在鋁合金流道板 X_2 方向之回波訊號

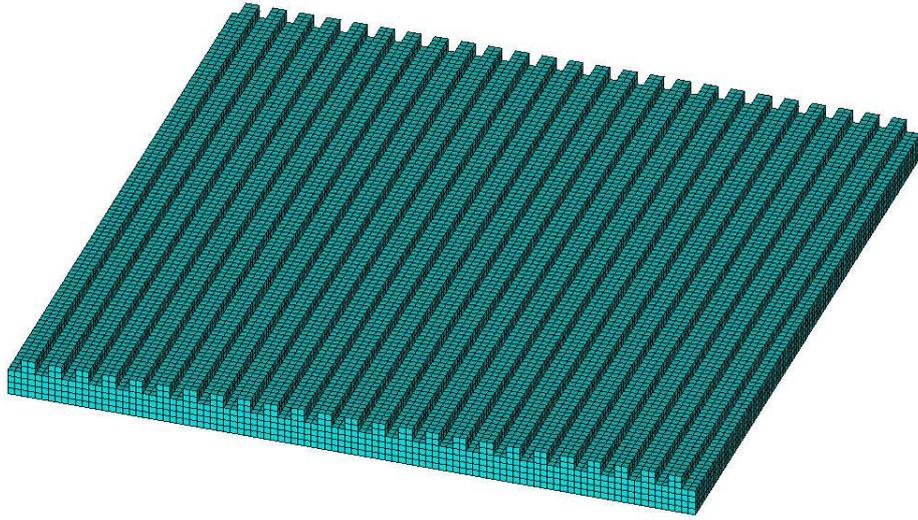


圖 3.5 波長 $\lambda=51$ mm 有限元素分析網格化模型

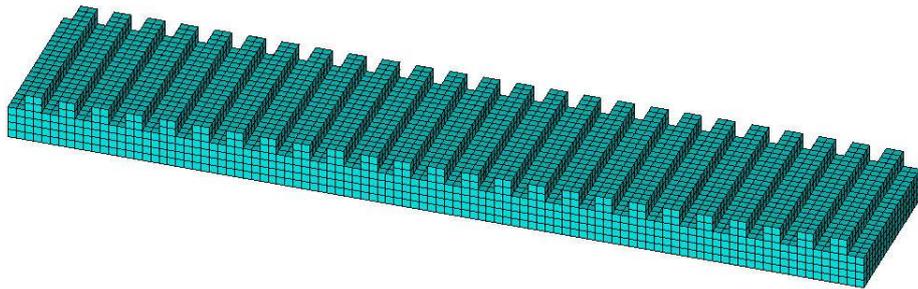


圖 3.6 波長 $\lambda=10$ mm 有限元素分析網格化模型

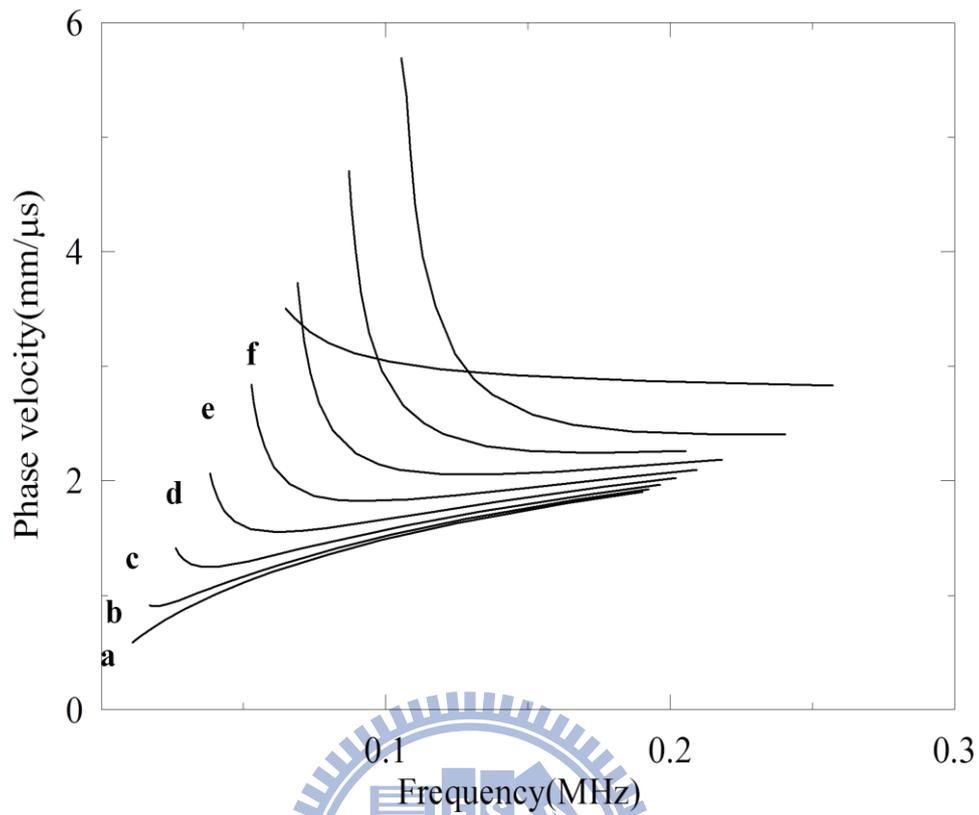


圖 3.7 鋁合金流道板(板厚 2 mm，流道深度 0.5 mm)的聲導波相速度

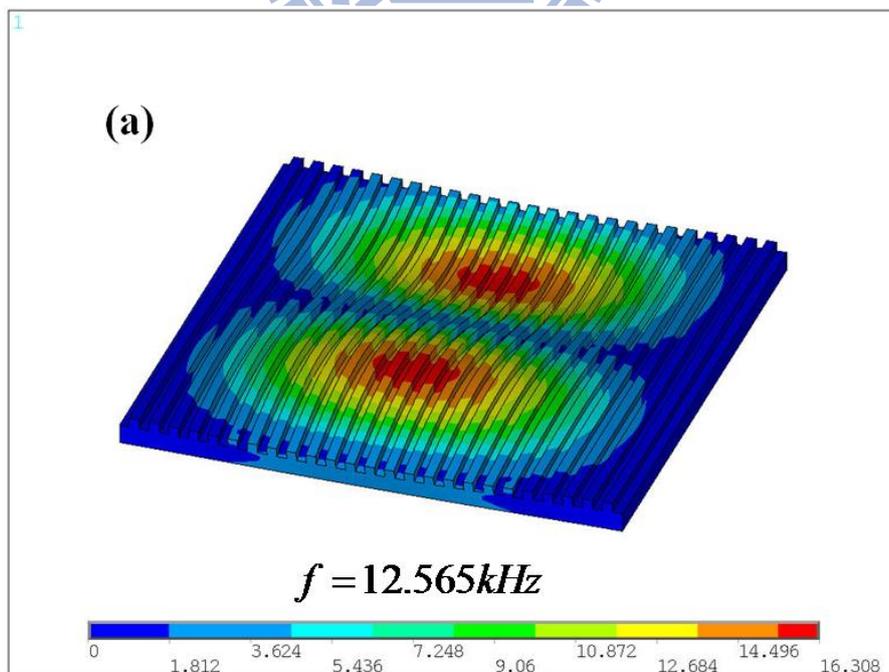


圖 3.8 依圖 3.7 所示第一個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda = 51 \text{ mm}$ 對應的導波頻率及模態圖

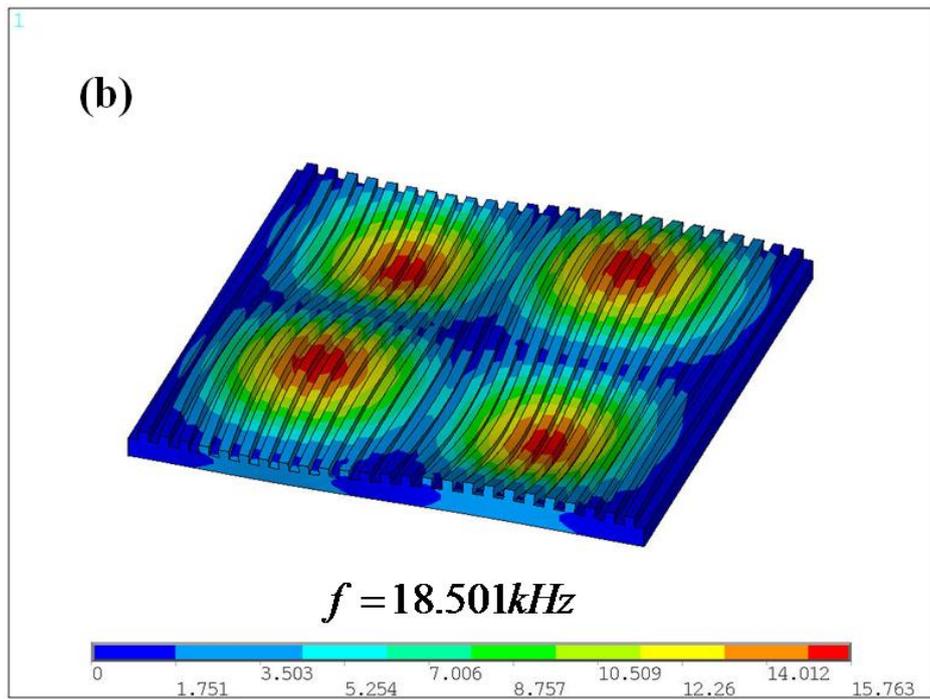


圖 3.9 依圖 3.7 所示第二個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda = 51\text{ mm}$ 對應的導波頻率及模態圖

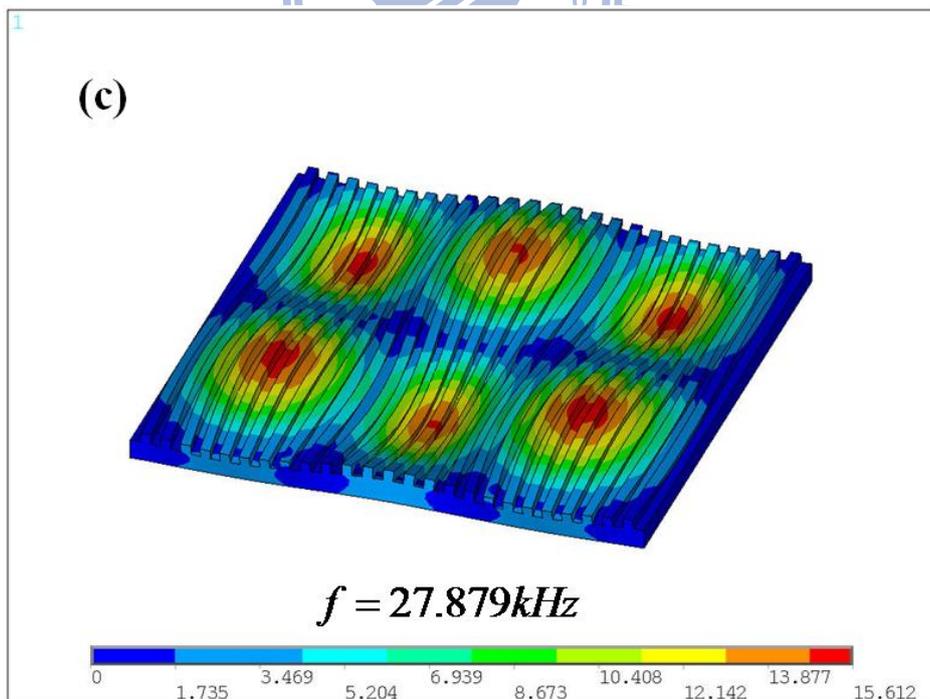


圖 3.10 依圖 3.7 所示第三個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda = 51\text{ mm}$ 對應的導波頻率及模態圖

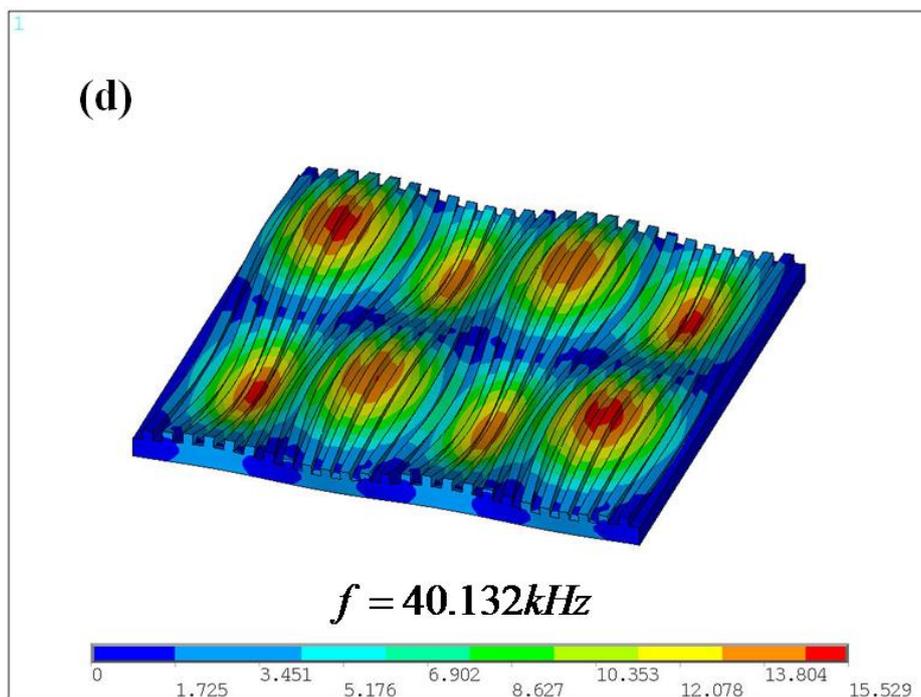


圖 3.11 依圖 3.7 所示第四個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda=51\text{ mm}$ 對應的導波頻率及模態圖

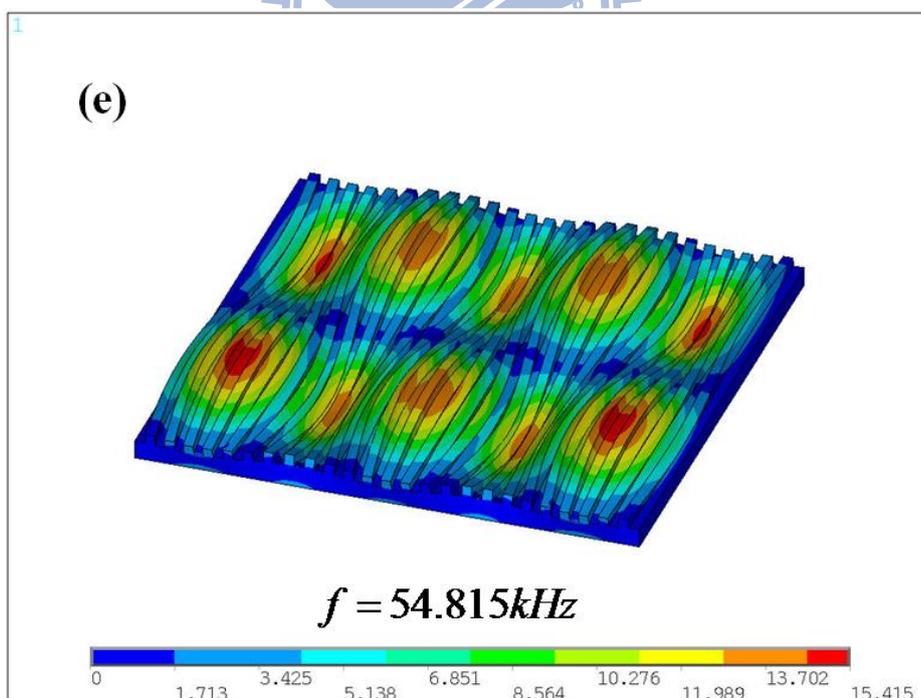


圖 3.12 依圖 3.7 所示第五個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda=51\text{ mm}$ 對應的導波頻率及模態圖

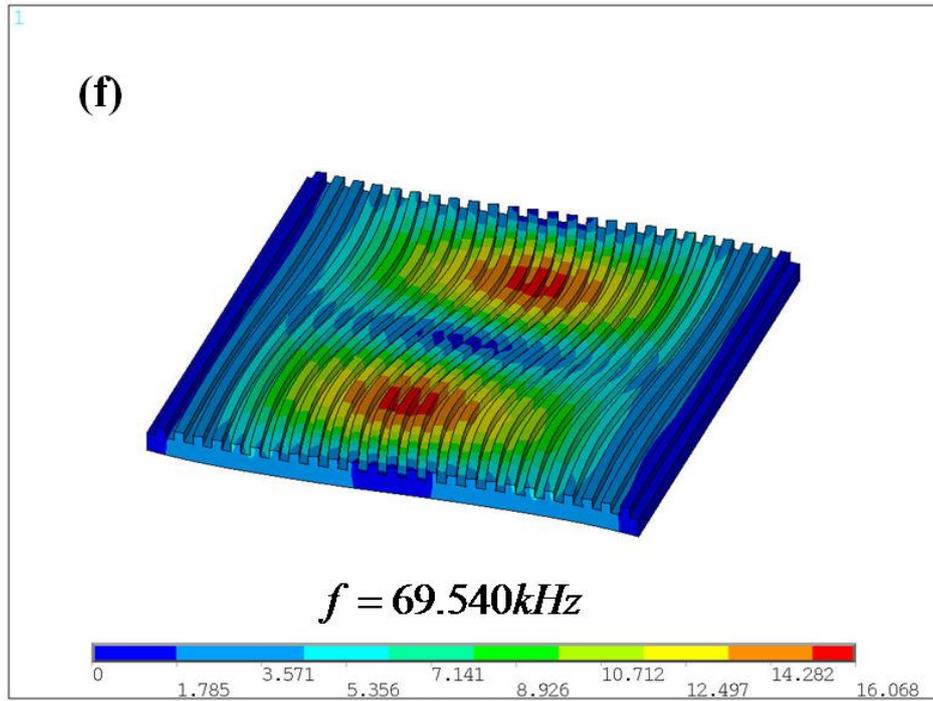


圖 3.13 依圖 3.7 所示第六個聲導波模態相速度頻散曲線於波長 $\lambda = 51 \text{ mm}$ 對應的導波頻率及模態圖

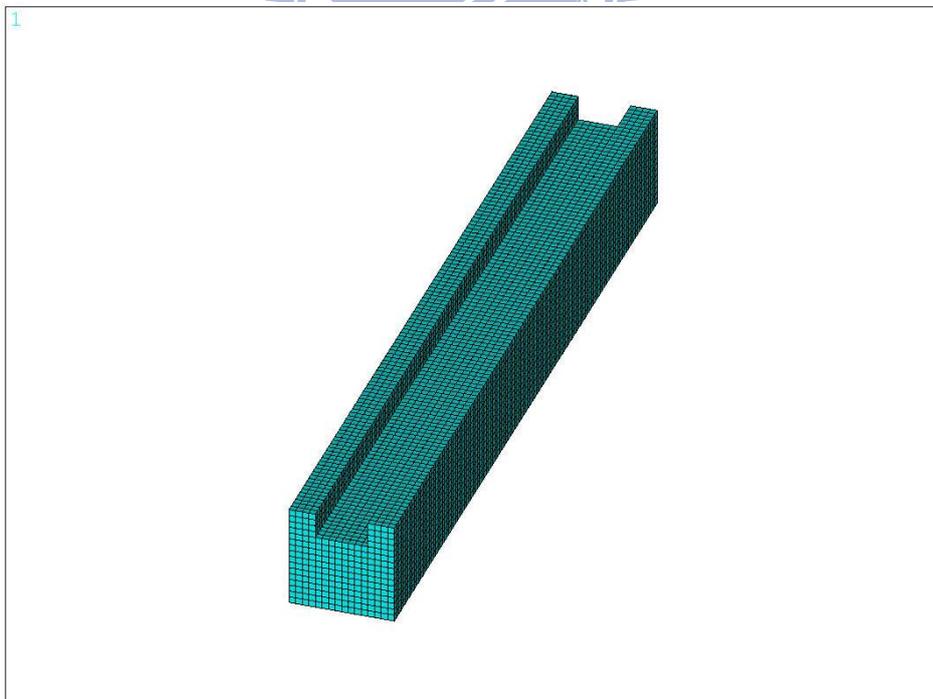


圖 3.14 波長 $\lambda = 15 \text{ mm}$ 有限元素分析網格化模型

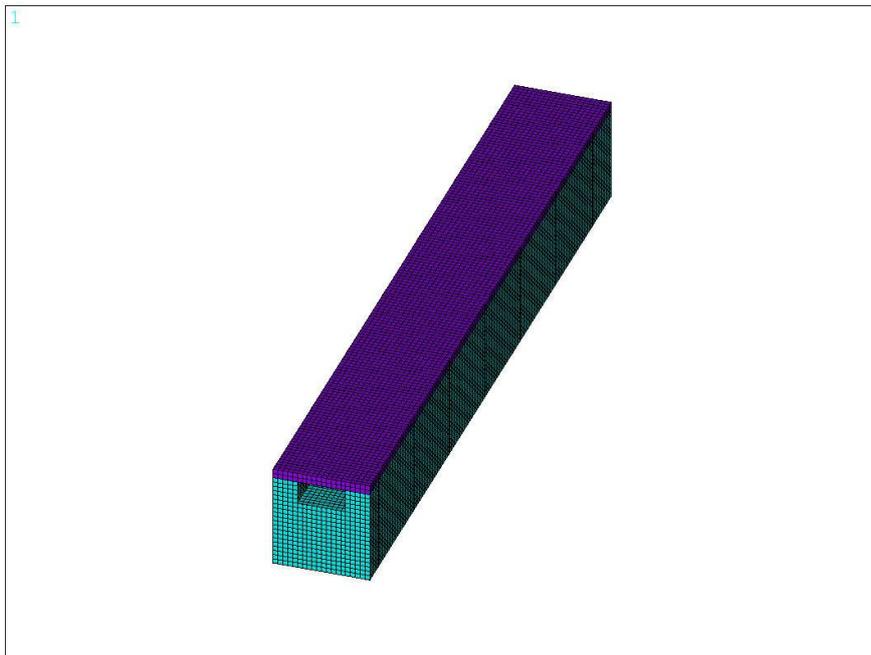


圖 3.15 波長 $\lambda=15\text{ mm}$ 含碳紙之有限元素分析網格化模型
(上層紫色部分為碳紙，下層則為鋁合金流道)

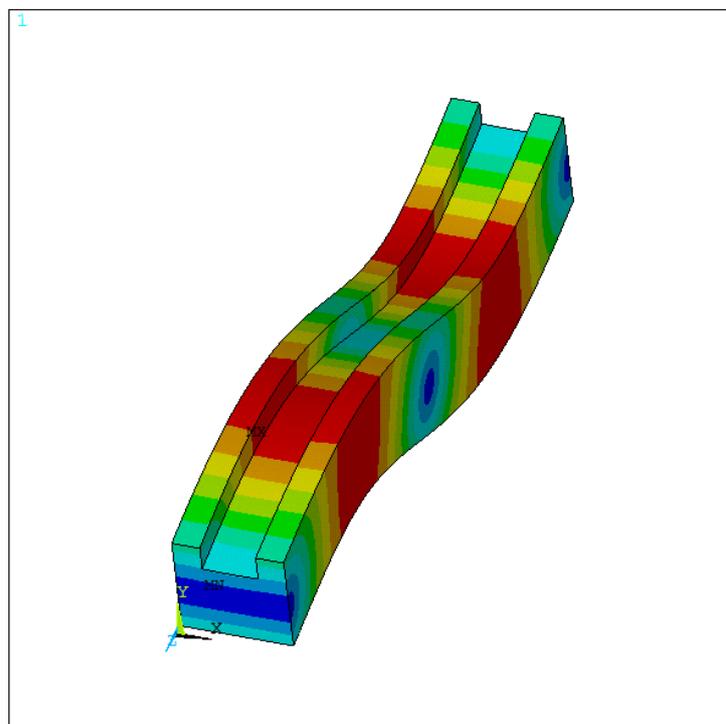


圖 3.16 波長 $\lambda=15\text{ mm}$ 的 A_0 模態圖

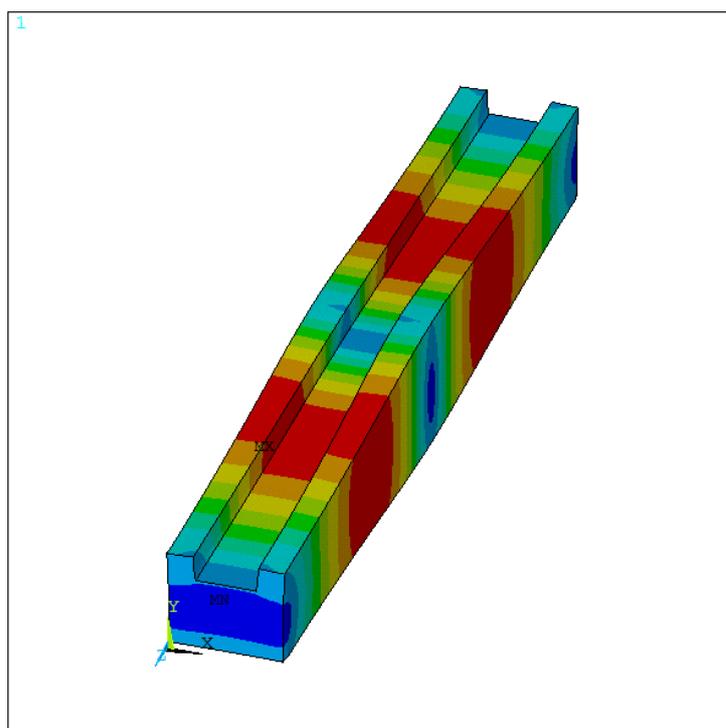


圖 3.17 波長 $\lambda=15$ mm 的 S_0 模態圖

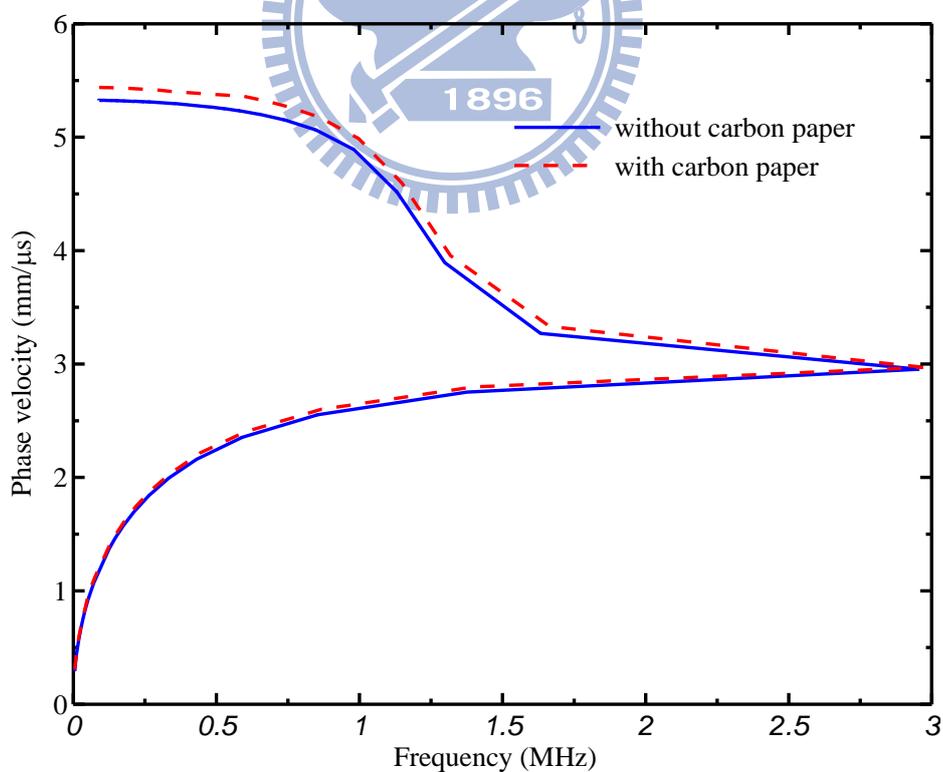
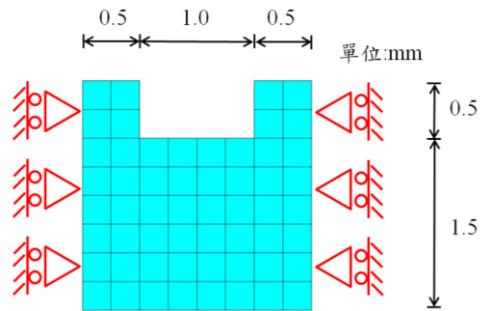
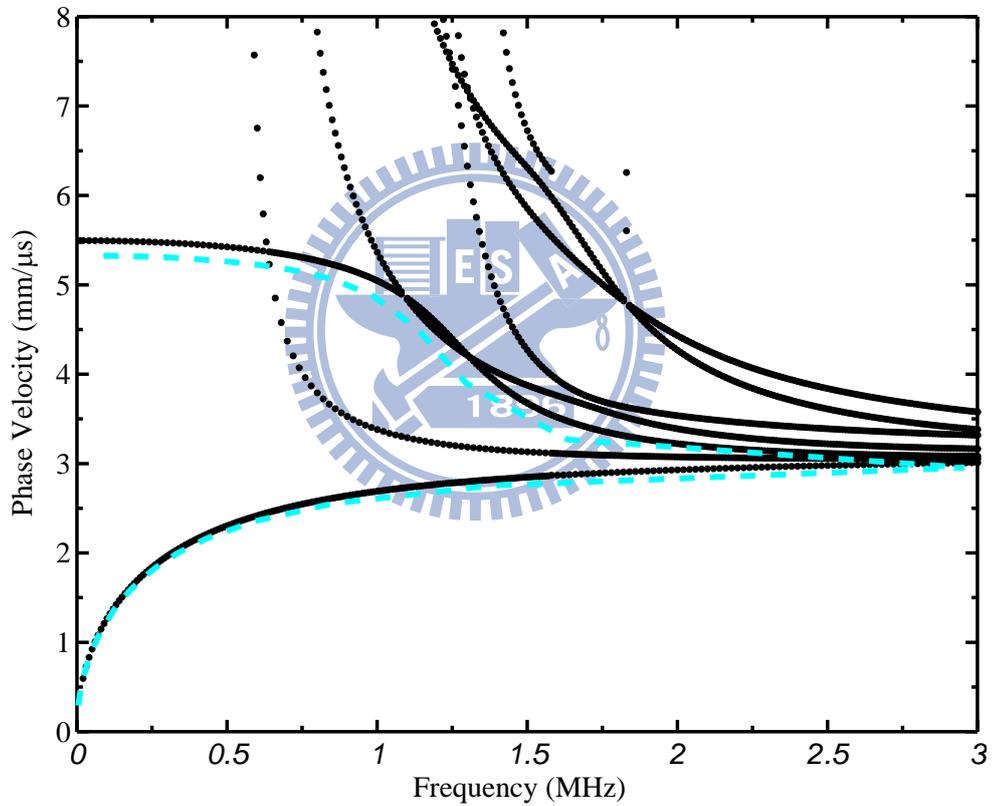


圖 3.18 鋁合金流道板(板厚 2 mm，流道深度 0.5 mm)的聲導波相速度
(藍色實線為不含碳紙，紅色虛線為流道區上有碳紙)



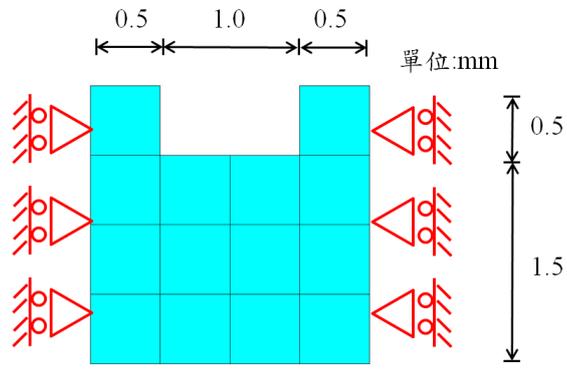
(a)



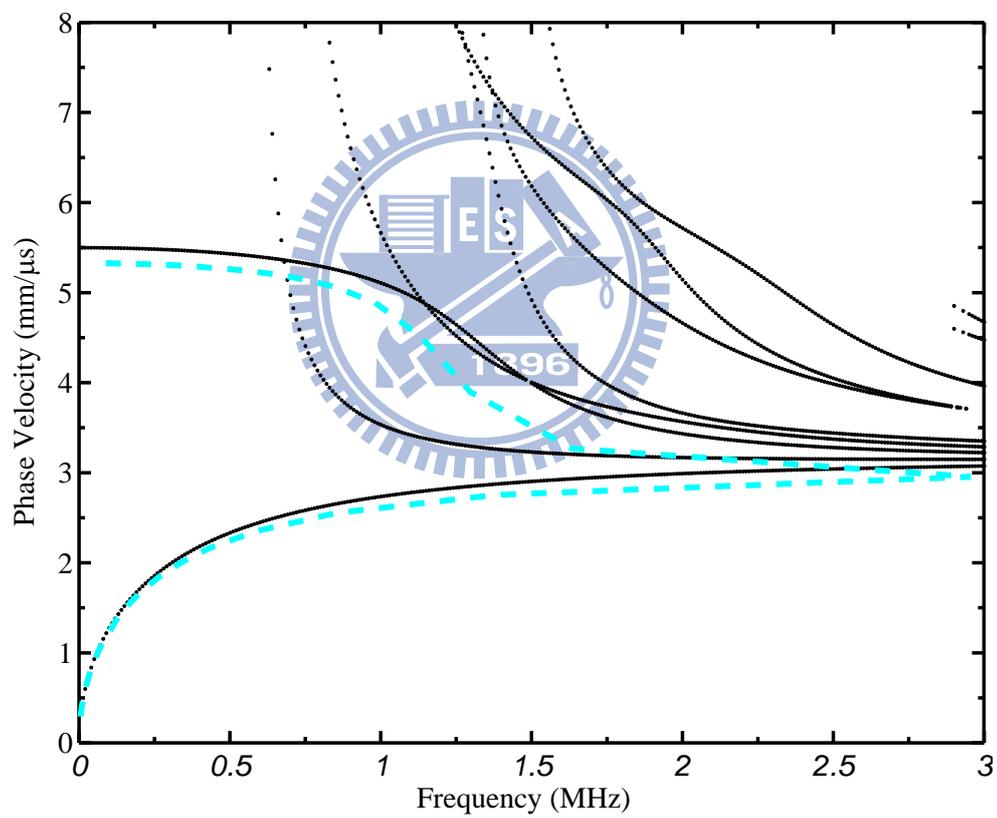
(b)

圖 3.19 二維有限元素分析鋁合金流道板的(a)分析模型(b)聲導波相速度

(紅色虛線為 ANSYS 三維模態分析之 A_0 與 S_0 模態相速度)

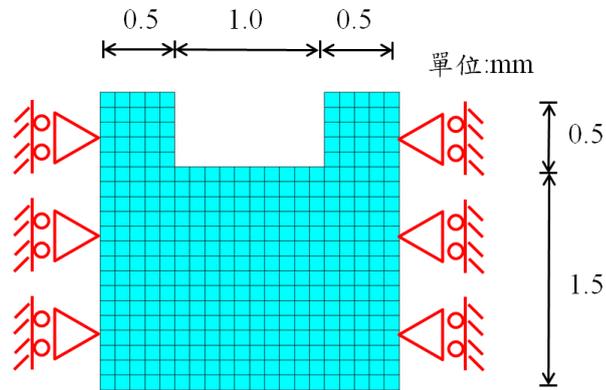


(a)

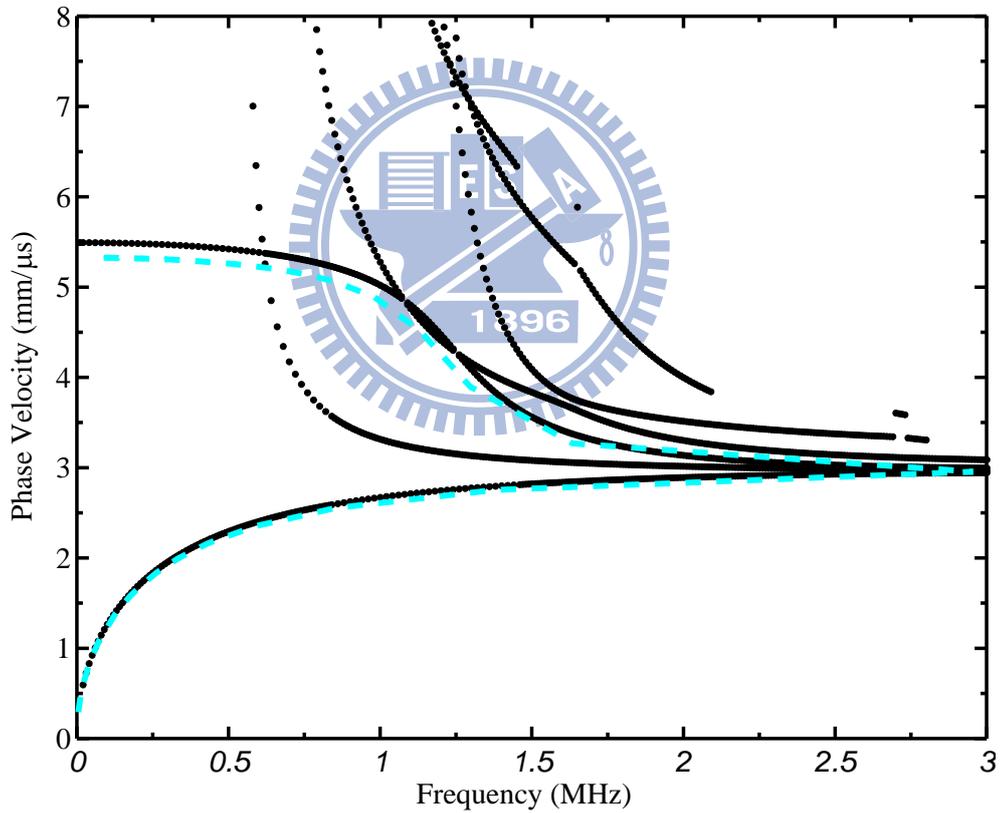


(b)

圖 3.20 二維有限元素分析鋁合金流道板的(a)分析模型(b)聲導波相速度
(紅色虛線為 ANSYS 三維模態分析之 A_0 與 S_0 模態相速度)



(a)



(b)

圖 3.21 二維有限元素分析鋁合金流道板的(a)分析模型(b)聲導波相速度
(紅色虛線為 ANSYS 三維模態分析之 A_0 與 S_0 模態相速度)

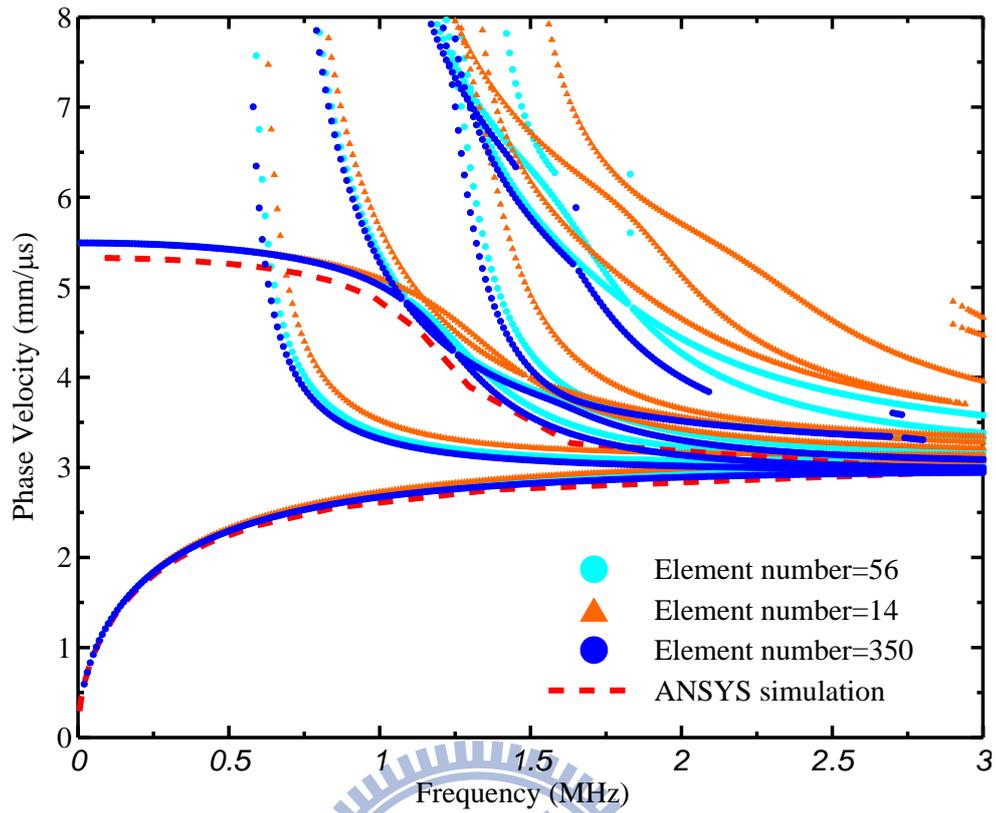
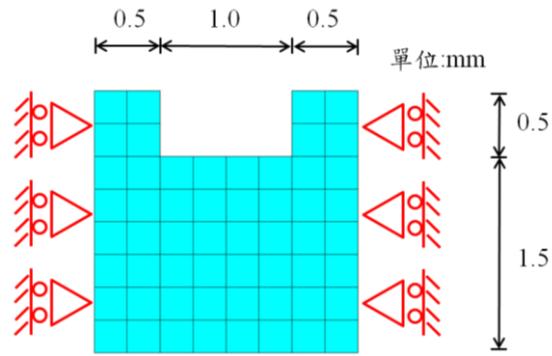
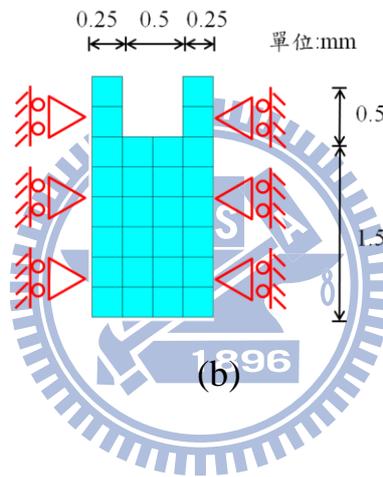


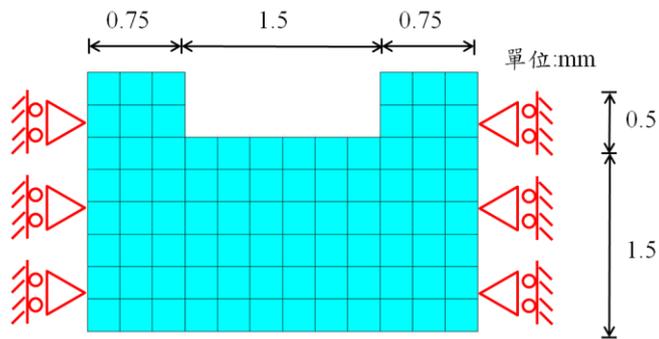
圖 3.22 不同元素大小的二維有限元素分析鋁合金流道板的聲導波相速度
(圖 3.19 至圖 3.21 與 ANSYS 解之比較圖)



(a)



(b)



(c)

圖 3.23 三種相同元素分割大小，不同流道寬度之分析模型，
元素數量為(a)56、(b)28、(c)84 個

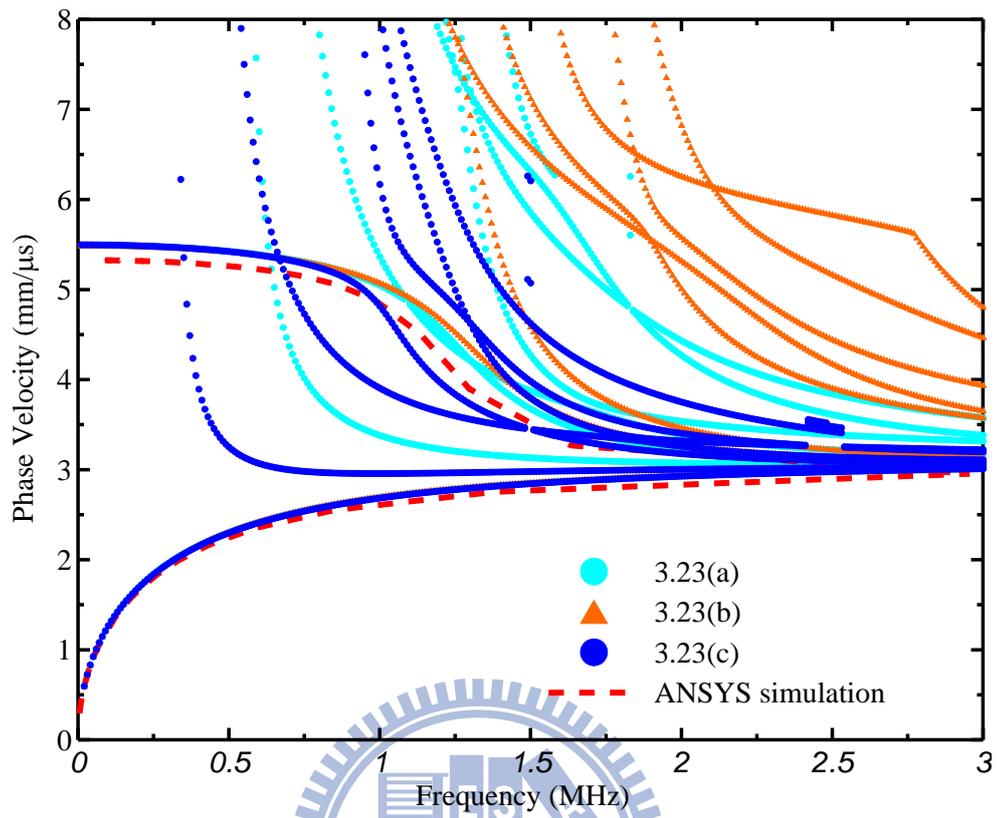
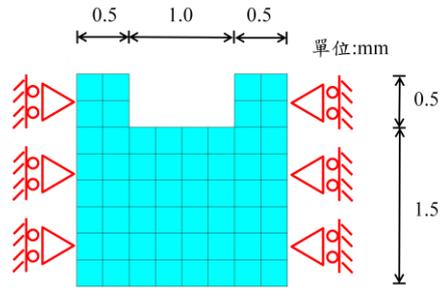
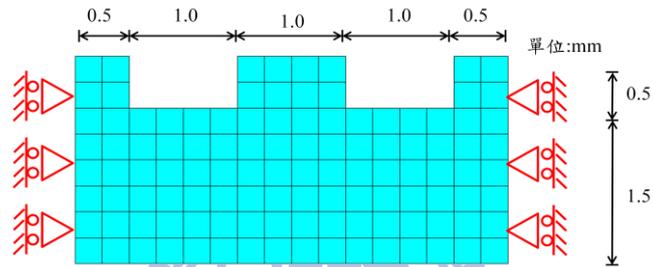


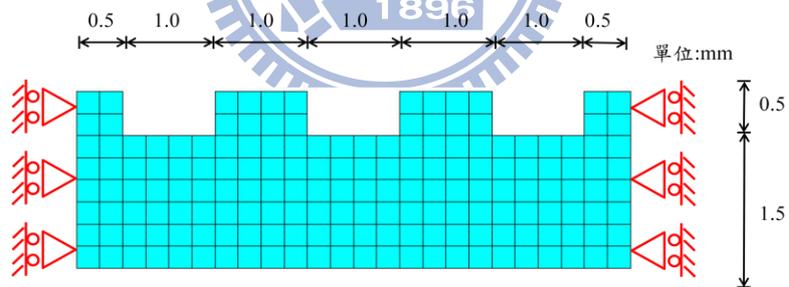
圖 3.24 與圖 3.23 分析模型對應之二維有限元素分析鋁合金流道板的聲導波相速度



(a)



(b)



(c)

圖 3.25 三種相同元素分割大小，不同凹陷流道數量分析模型，
流道凹陷數量為(a)1、(b)2、(c)3 條

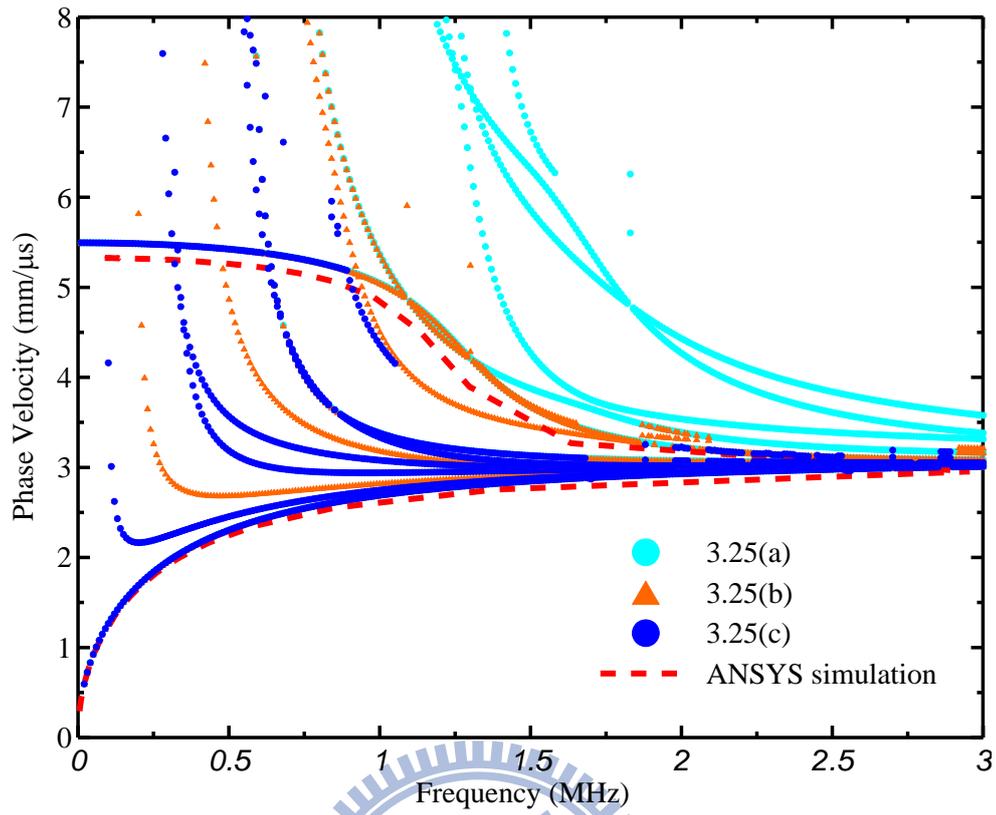
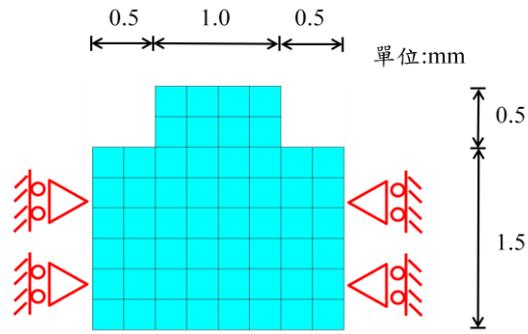
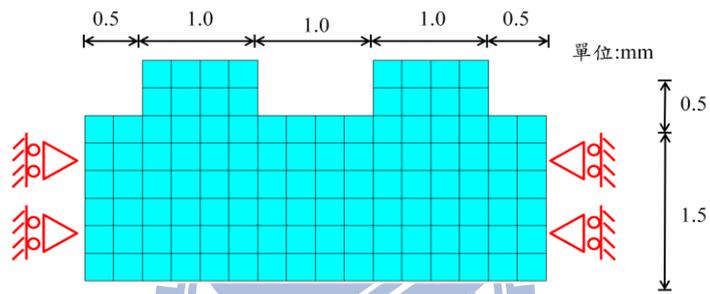


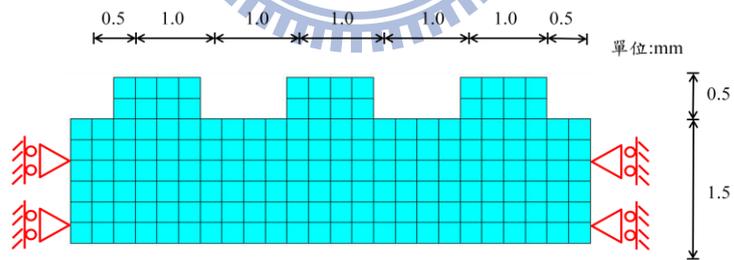
圖 3.26 與圖 3.25 分析模型對應之二維有限元素分析鋁合金流道板的聲導波相速度



(a)



(b)



(c)

圖 3.27 三種相同元素分割大小，不同凸起流道數量分析模型，
流道凸起數量為(a)1、(b)2、(c)3 條

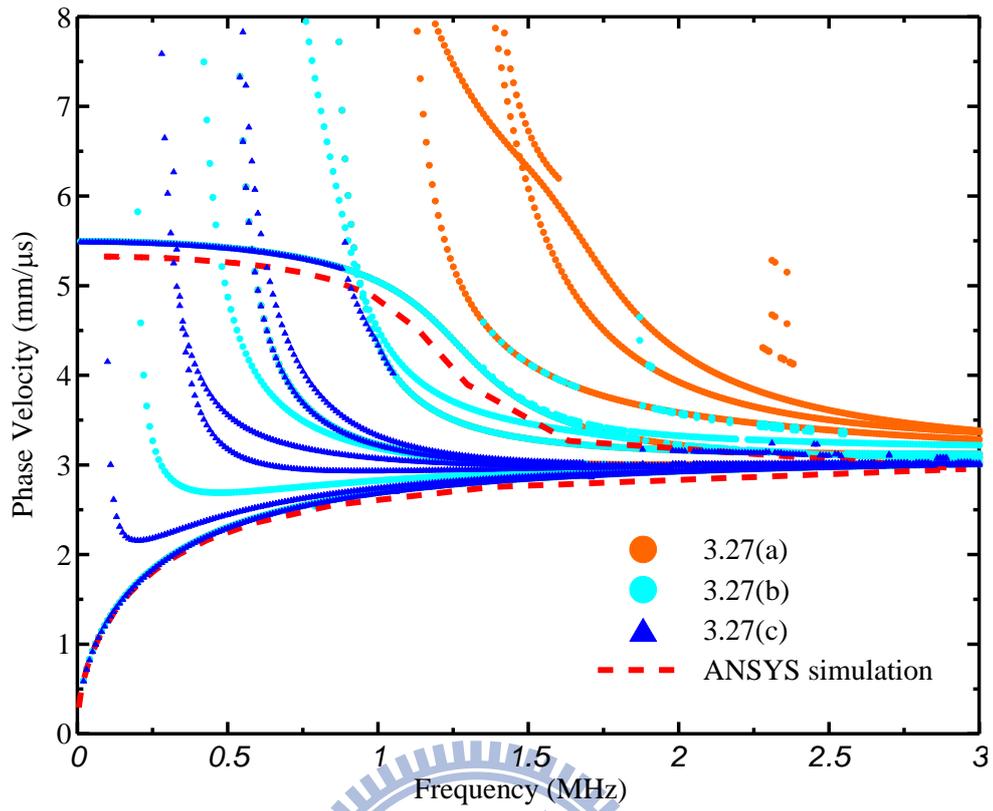


圖 3.28 與圖 3.27 分析模型對應之二維有限元素分析鋁合金流道板的聲導波相速度

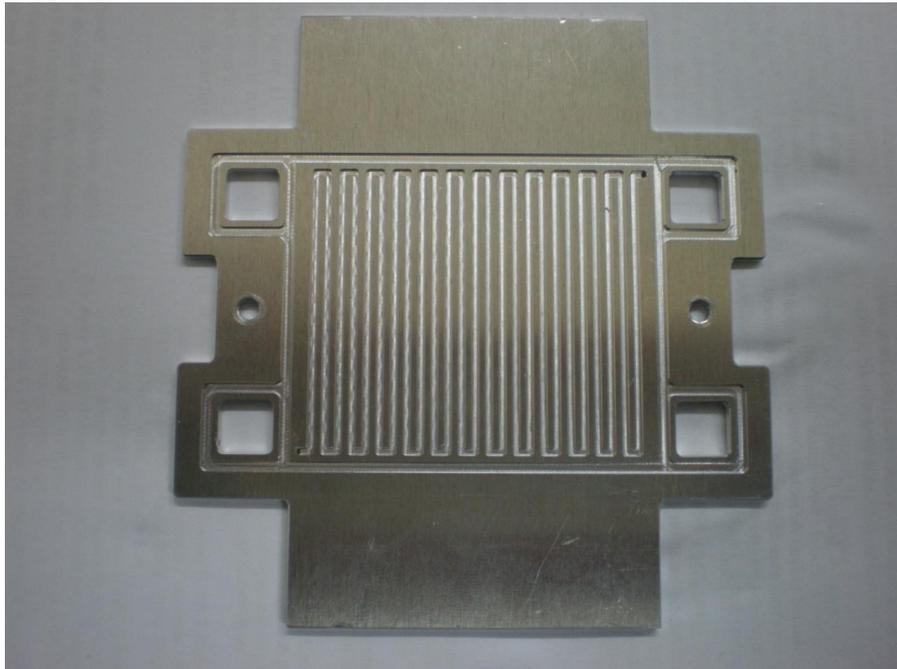


圖 4.1 單流道設計之鋁合金流道板

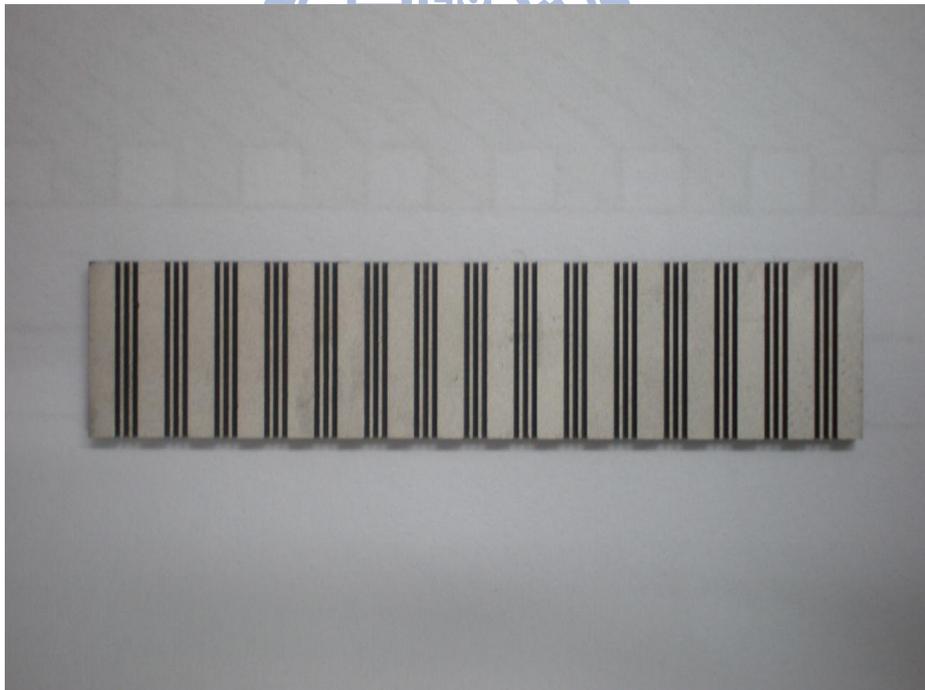


圖 4.2 一維陣列壓電陶瓷(PZT-4)換能器

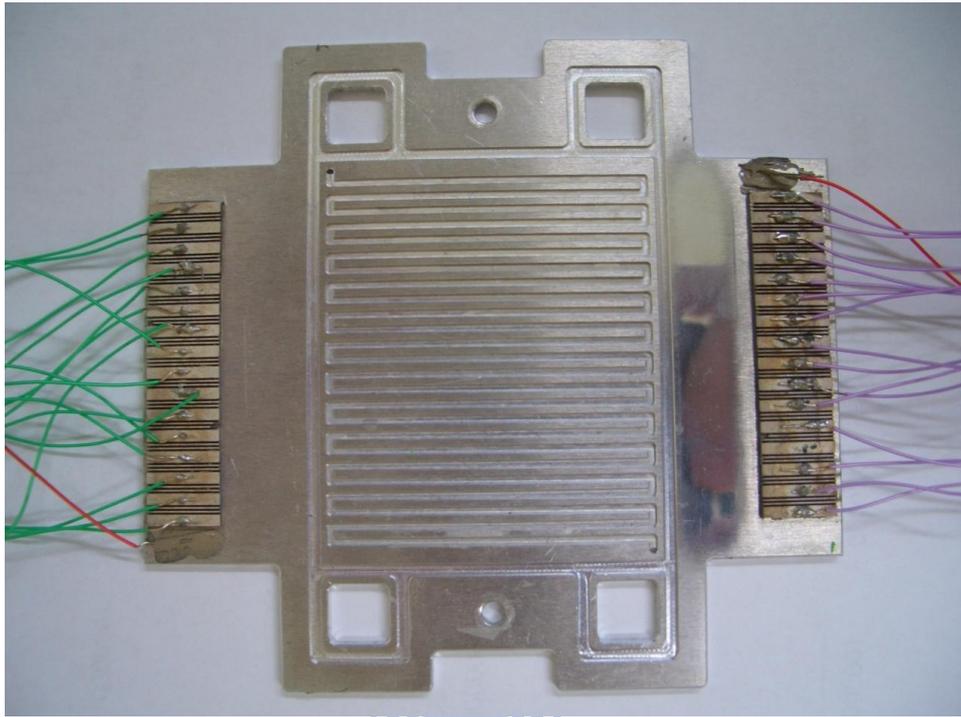


圖 4.3 鋁合金流道板與陣列聲導波感測器

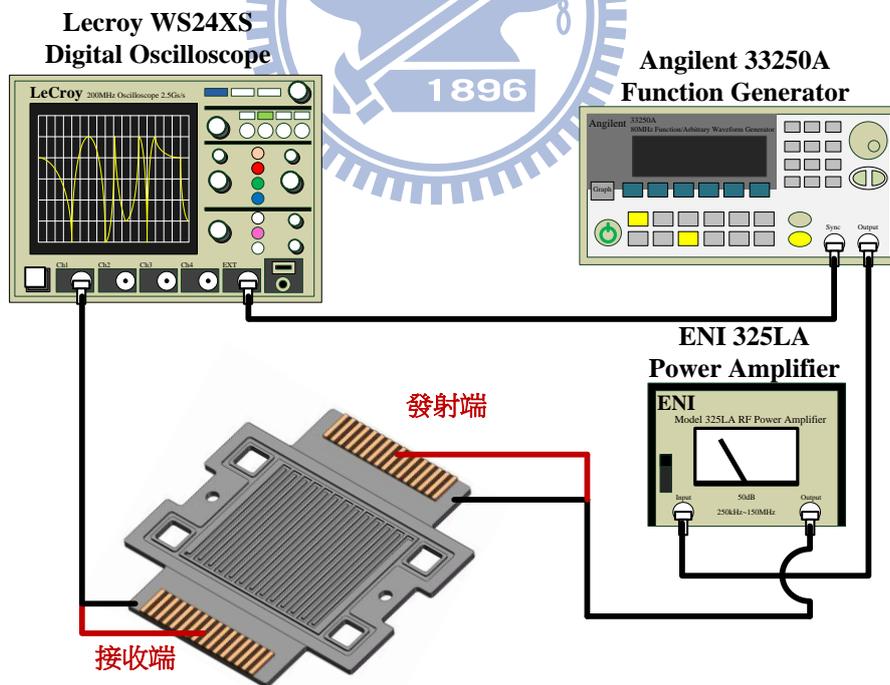


圖 4.4 實驗架構示意圖

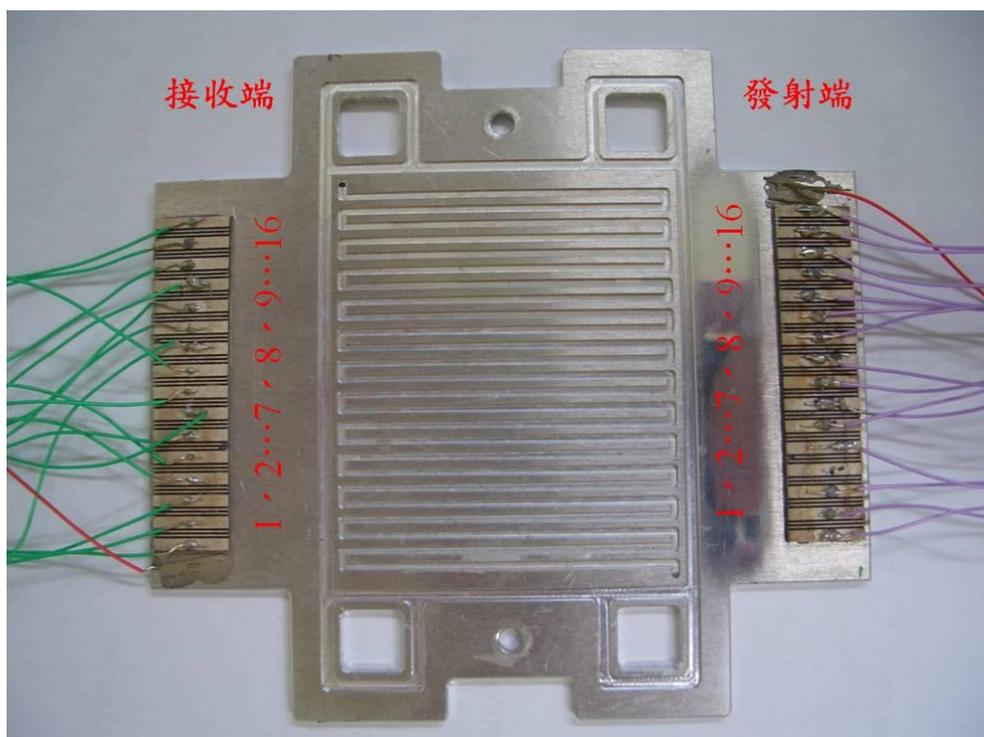


圖 4.5 陣列聲導波感測器編號示意圖(發射端為 T1 至 T16，
接收端為 R1 至 R16)



圖 4.6 齊發齊收與單發齊收模式流道內有水之實驗照片

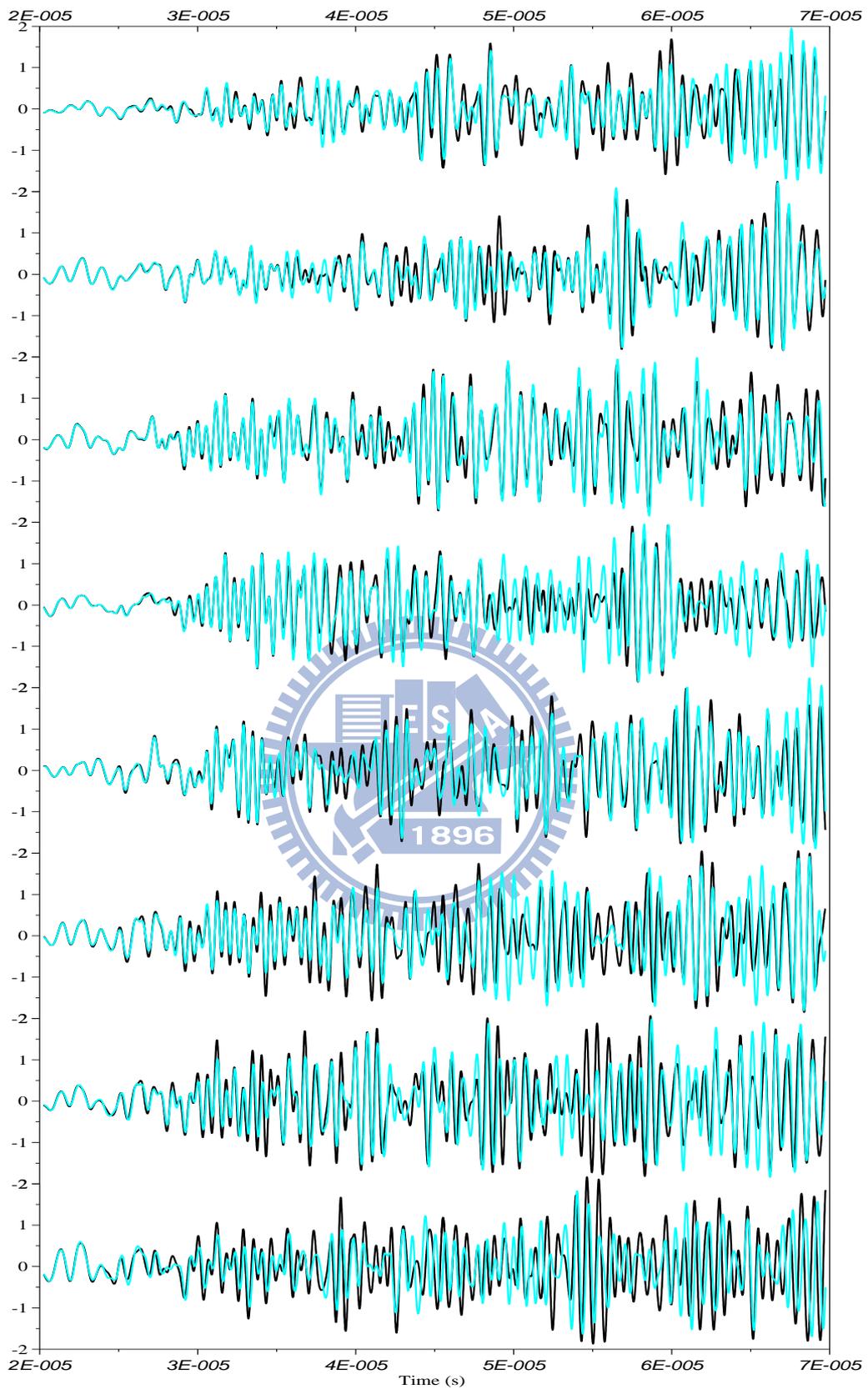


圖 4.7 齊發模式下 R1 至 R8 的量測訊號

(黑色實線代表流道無水，紅色實線代表有水)

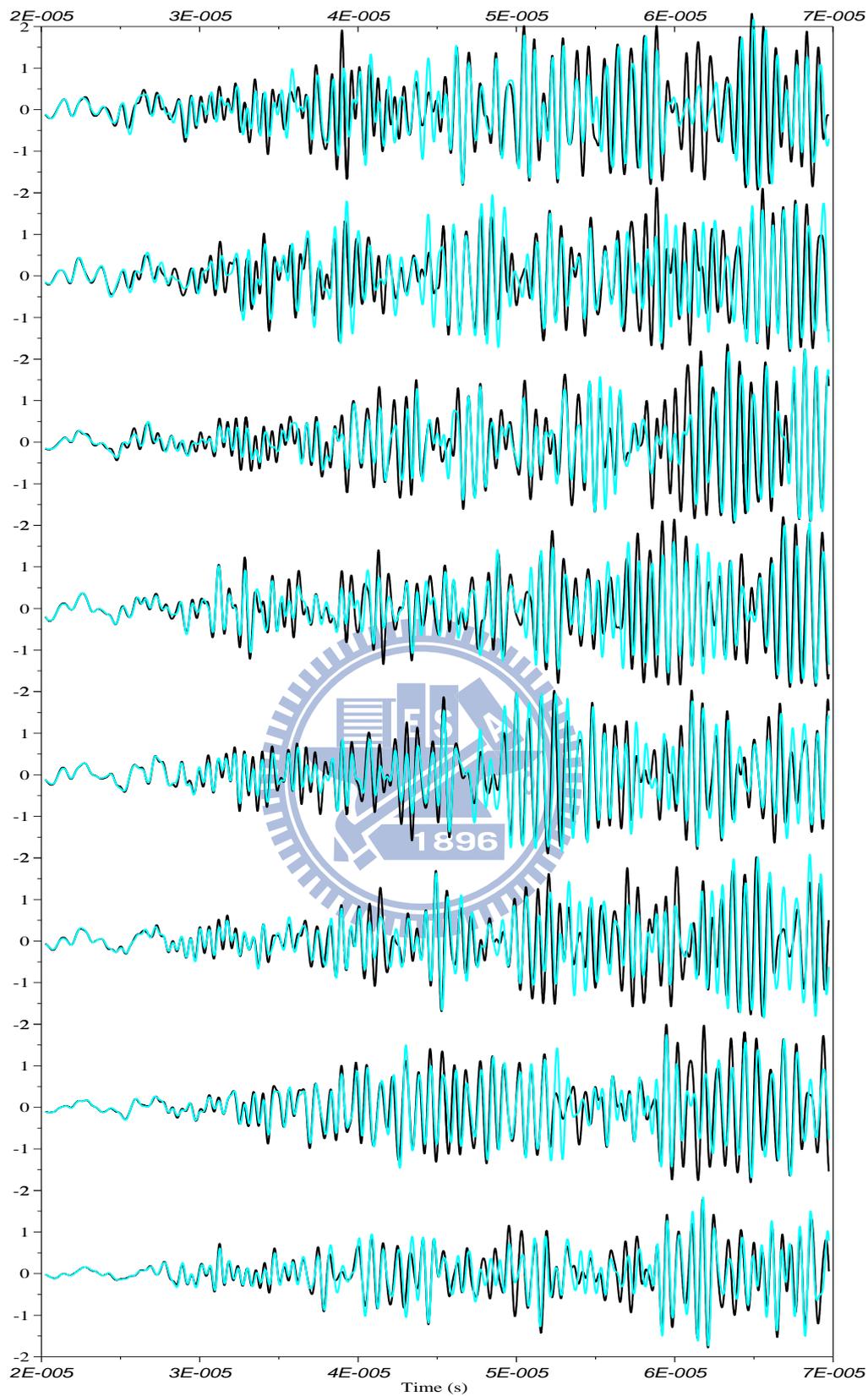


圖 4.8 齊發模式下 R9 至 R16 的量測訊號
 (黑色實線代表流道無水，紅色實線代表有水)

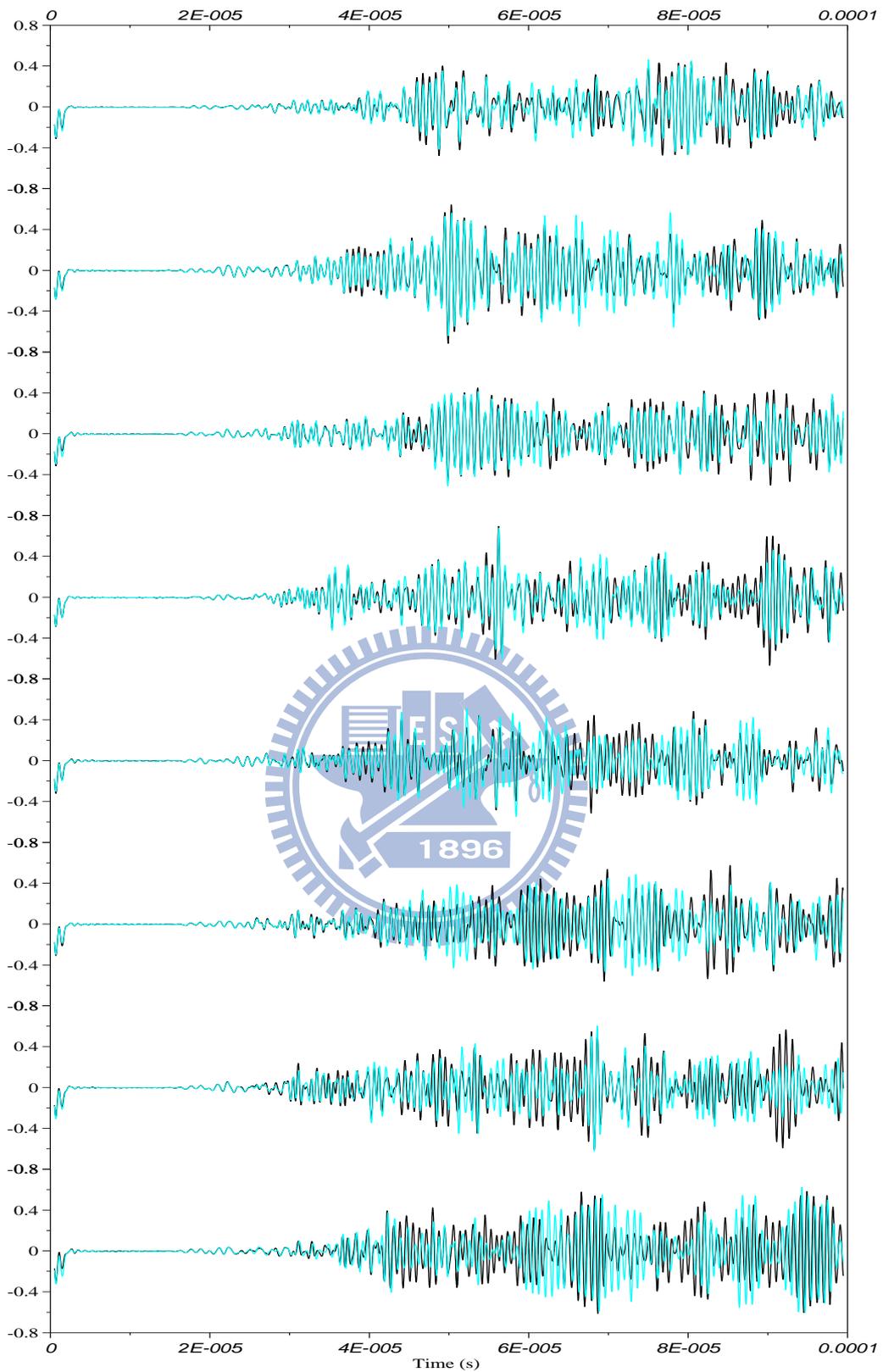


圖 4.9 單發模式下 R1 至 R8 的量測訊號
 (黑色實線代表流道無水，紅色實線代表有水)

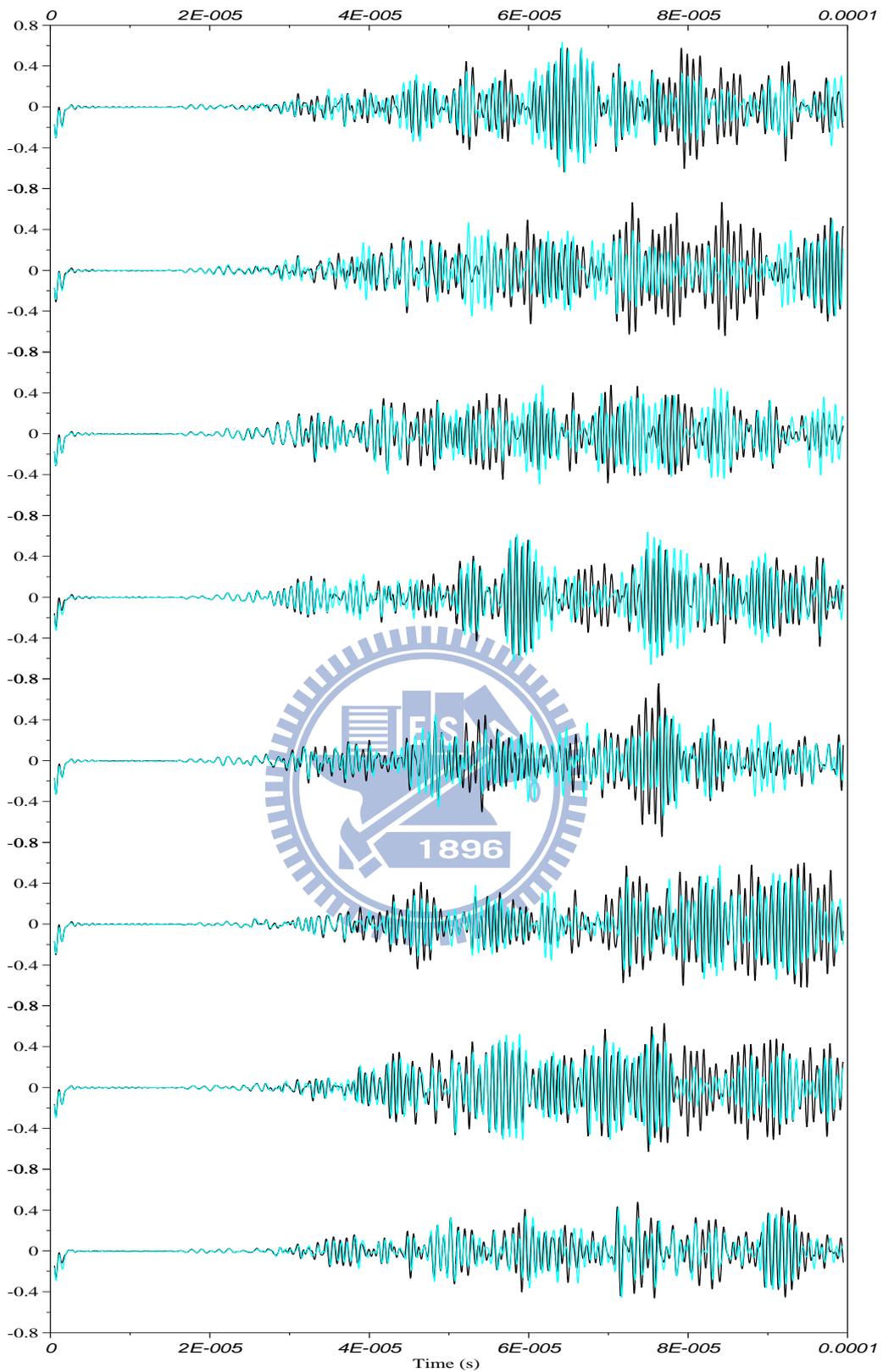


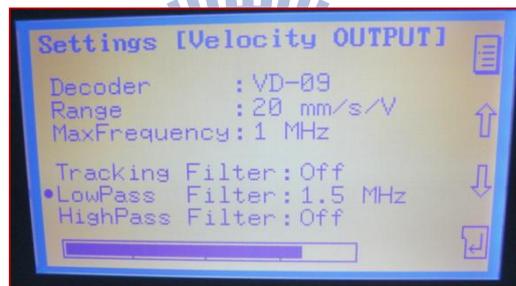
圖 4.10 單發模式下 R9 至 R16 的量測訊號
 (黑色實線代表流道無水，紅色實線代表有水)



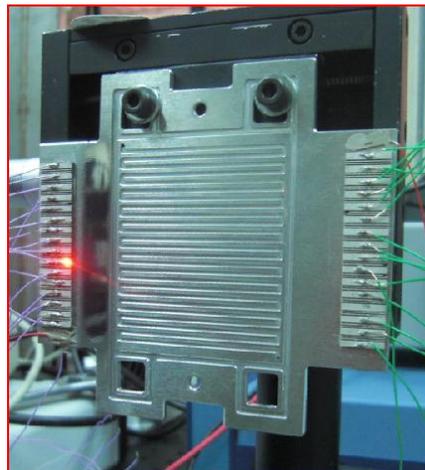
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4.11 都卜勒干涉儀之(a)雷射頭、(b)控制器、(c)儀控面板、(d)實驗照片。

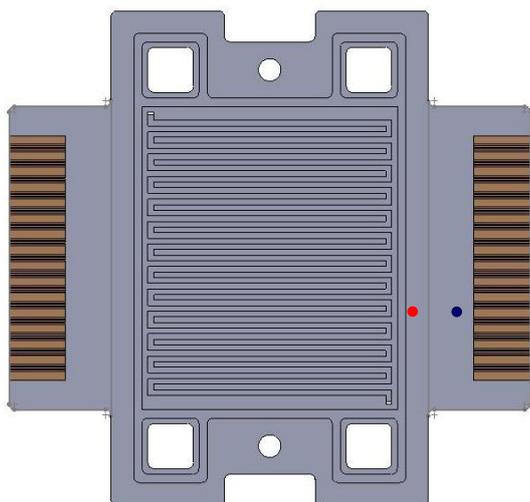


圖 4.12 都卜勒干涉儀量測鋁合金流道板聲導波的起迄位置，左邊紅點為量測起點($x = 0$)，右邊藍點為量測終點($x = 6.5$ mm)。

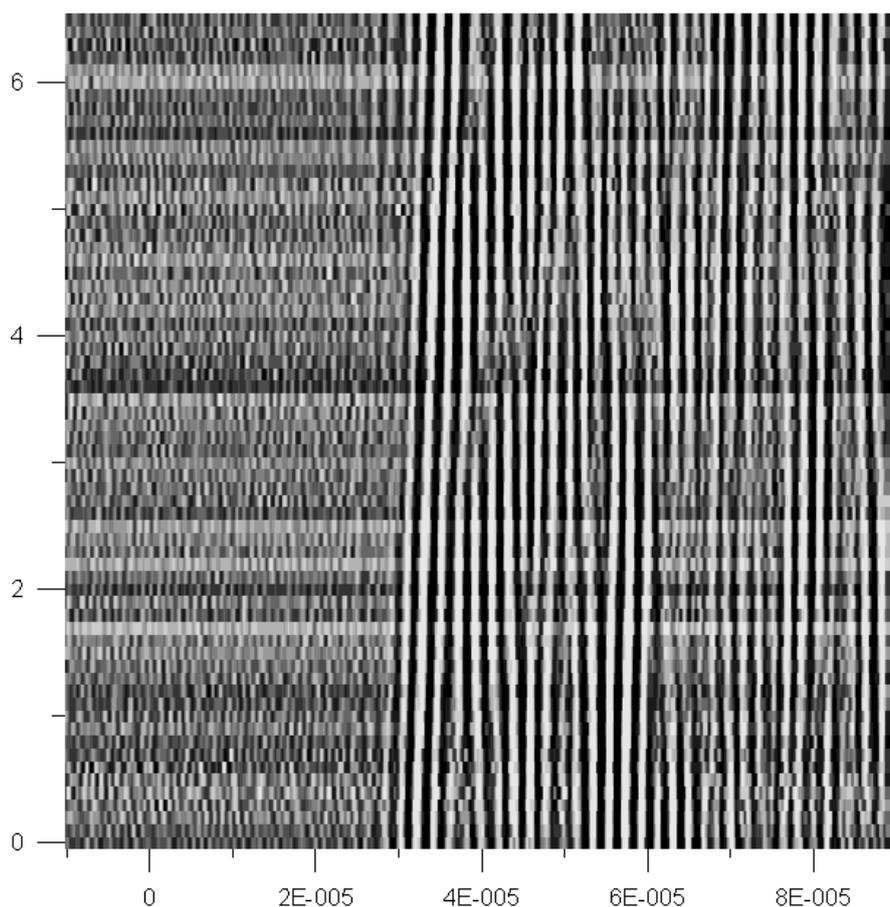
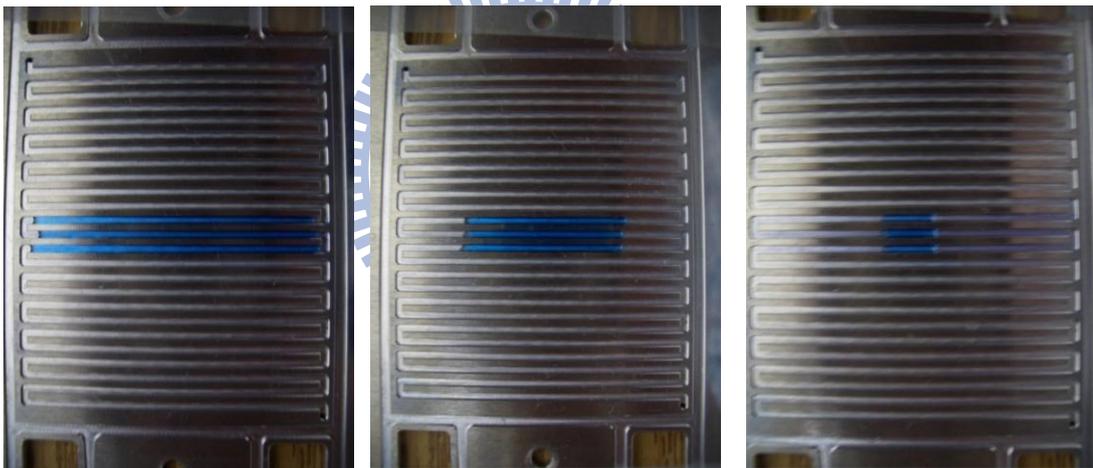


圖 4.13 都卜勒干涉儀量測鋁合金流道板聲導波的線掃描灰階圖，橫軸為波程時間(單位為 sec)，縱軸為圖 4.12 量測位置(單位為 mm)，淺色代表波峰，深色代表波谷。



(a)

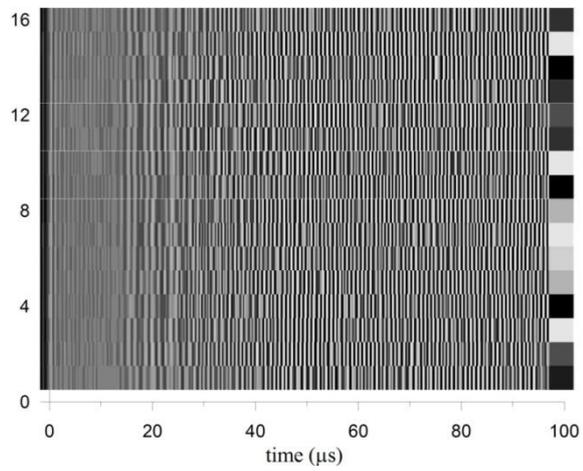


(b)

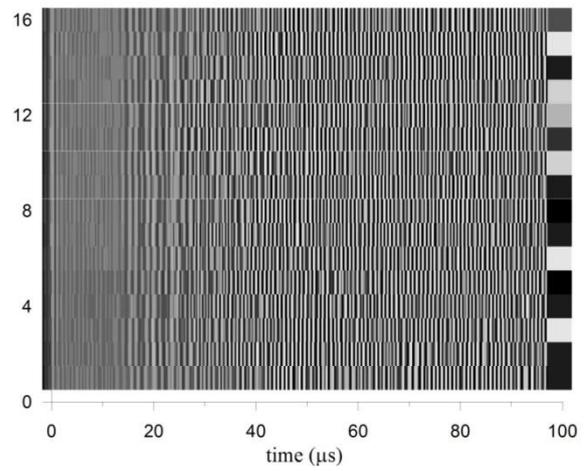
(c)

(d)

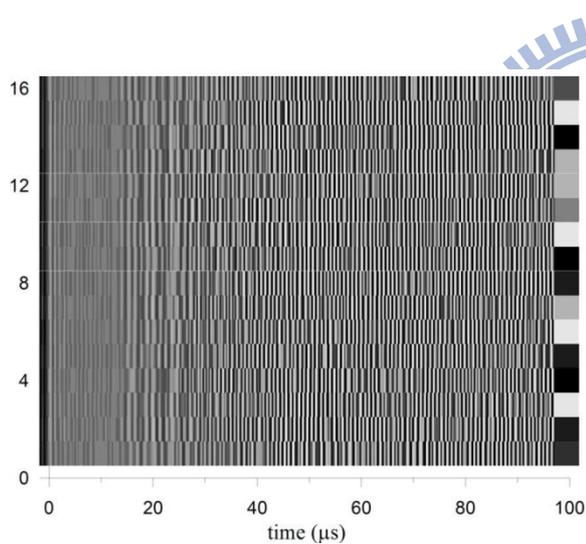
圖 4.14 鋁合金流道板流道區(a) 覆蓋水之實驗照片、(b) 水覆蓋區較長 $L_1 = 40.31 \text{ mm}$ 、(c) 水覆蓋區次長 $L_2 = 22.4 \text{ mm}$ 、(d) 水覆蓋區較短 $L_3 = 7.17 \text{ mm}$ 。



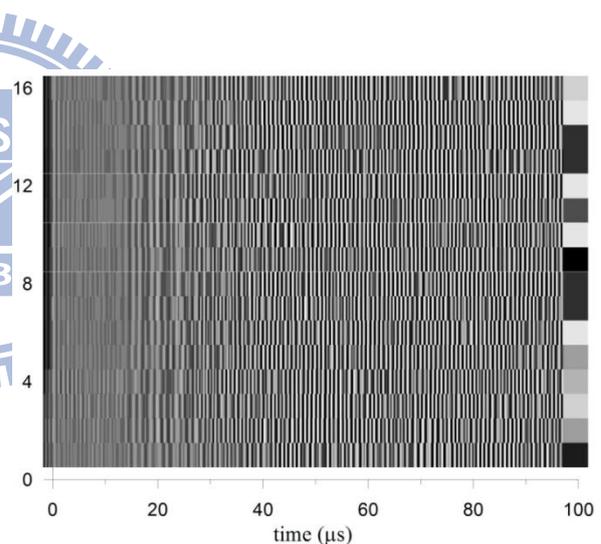
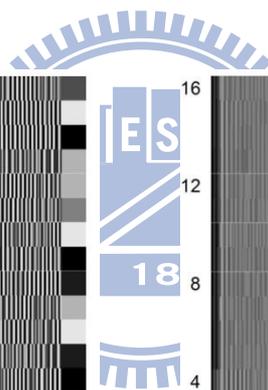
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4.15 陣列聲導波感測器量測之聲導波行經(a)無水覆蓋、水覆蓋區長度為(b) L_1 、(c) L_2 、(d) L_3 之流道區的訊號灰階圖，縱軸為接收端壓電元素編號，橫軸為波程時間。

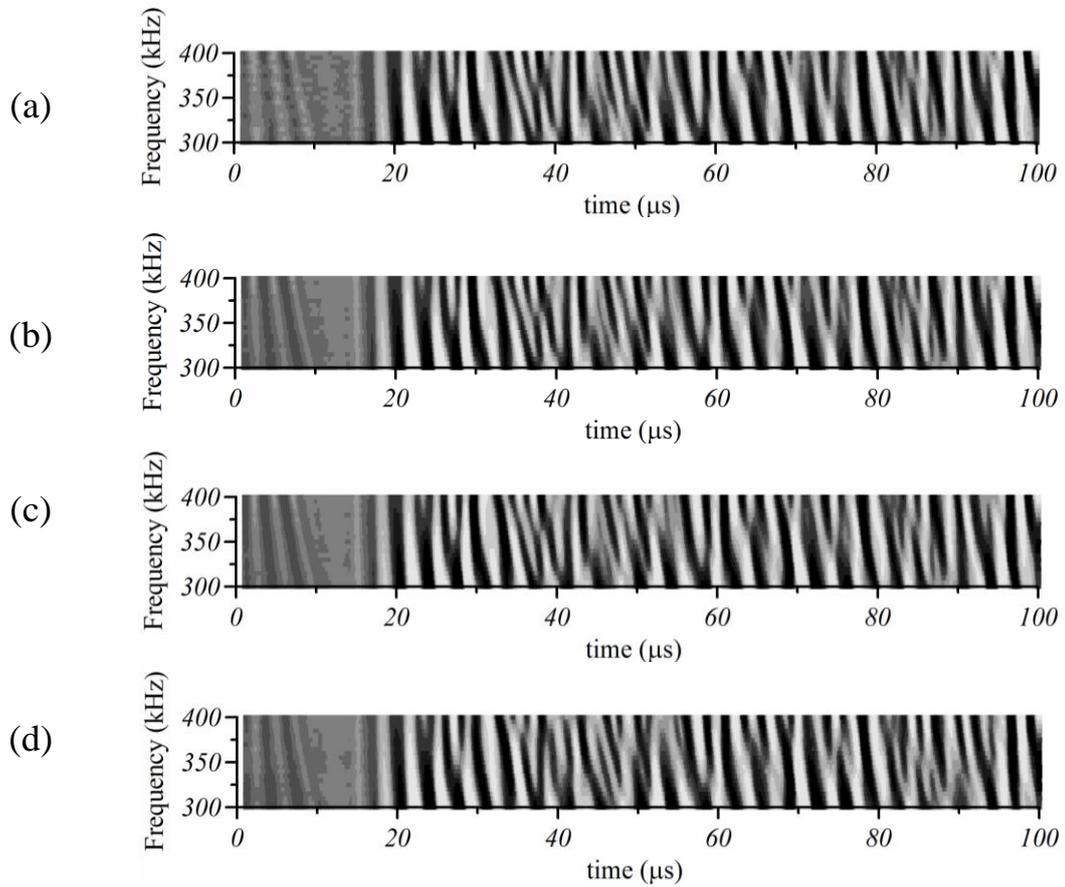


圖 4.16 陣列聲導波感測器 R8 量測不同頻率之聲導波行經(a)無水覆蓋、水覆蓋區長度為(b) L_1 、(c) L_2 、(d) L_3 之流道區的訊號灰階圖，縱軸為激振頻率，橫軸為波程時間。

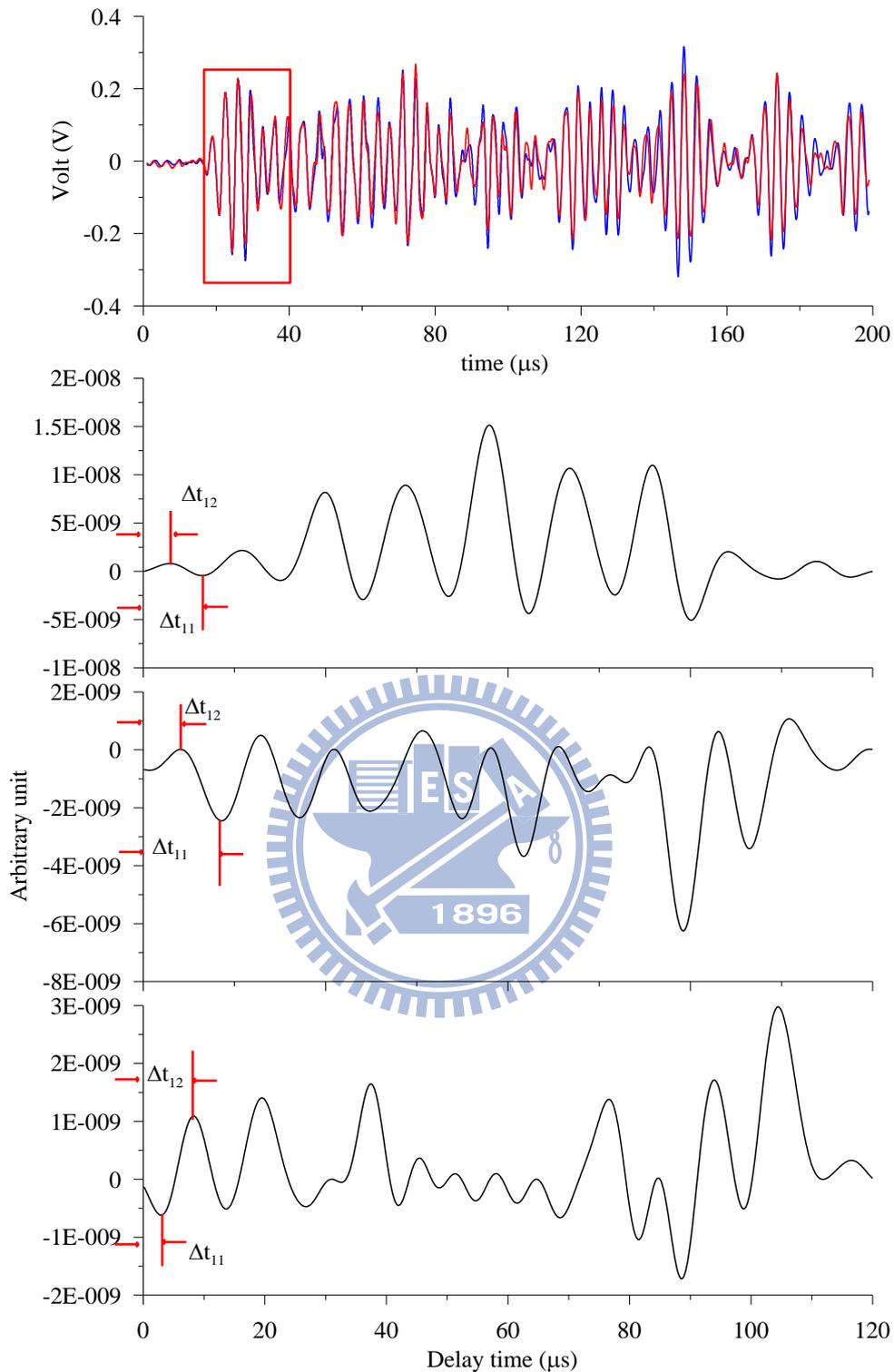


圖 4.17 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_1 之流道區的 (a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有水。訊號抵達時間介於 10-40 μs 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、(d) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。

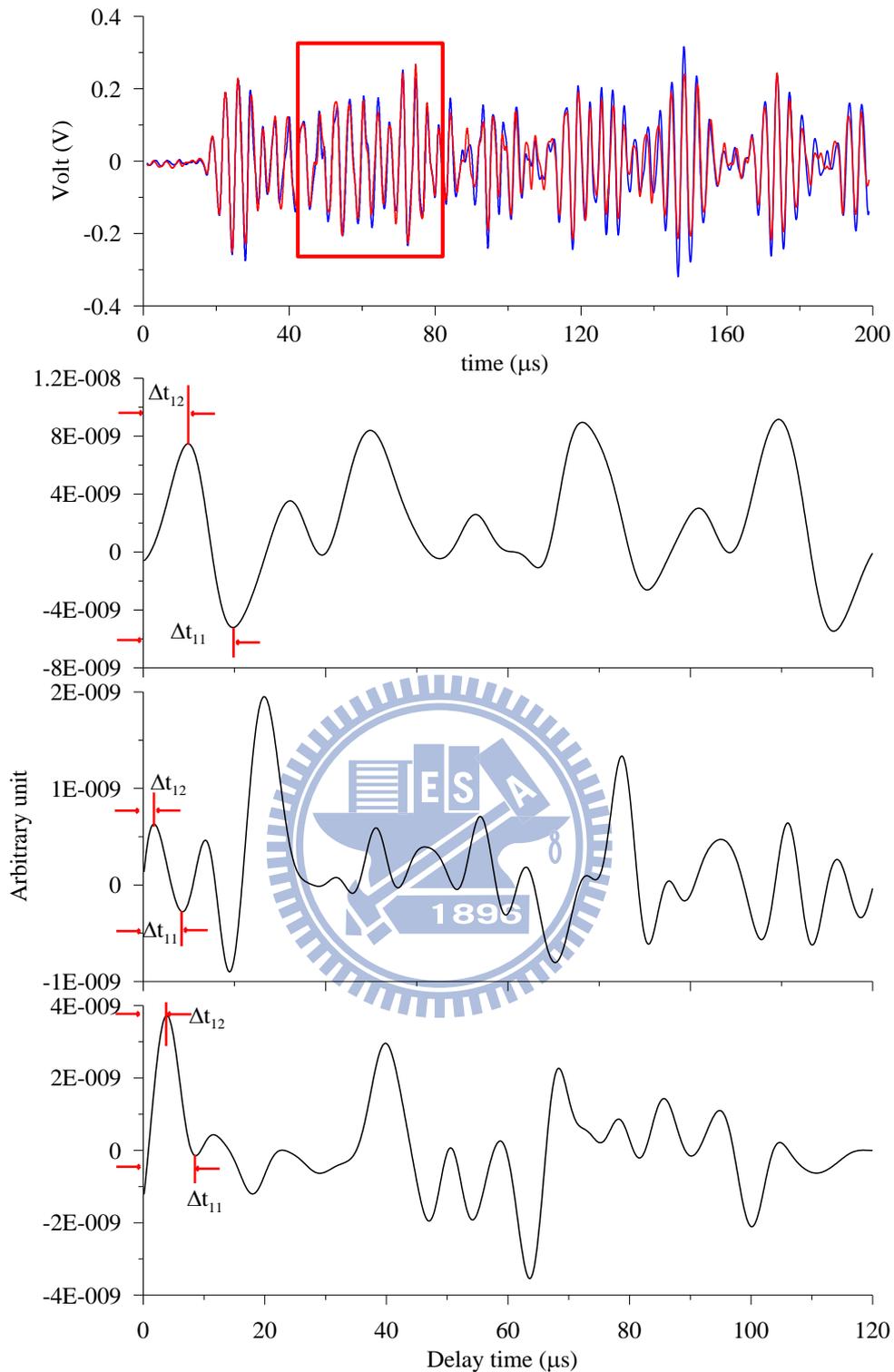


圖 4.18 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_1 之流道區的 (a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有水。訊號抵達時間介於 40-80 μ s 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、(b) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。

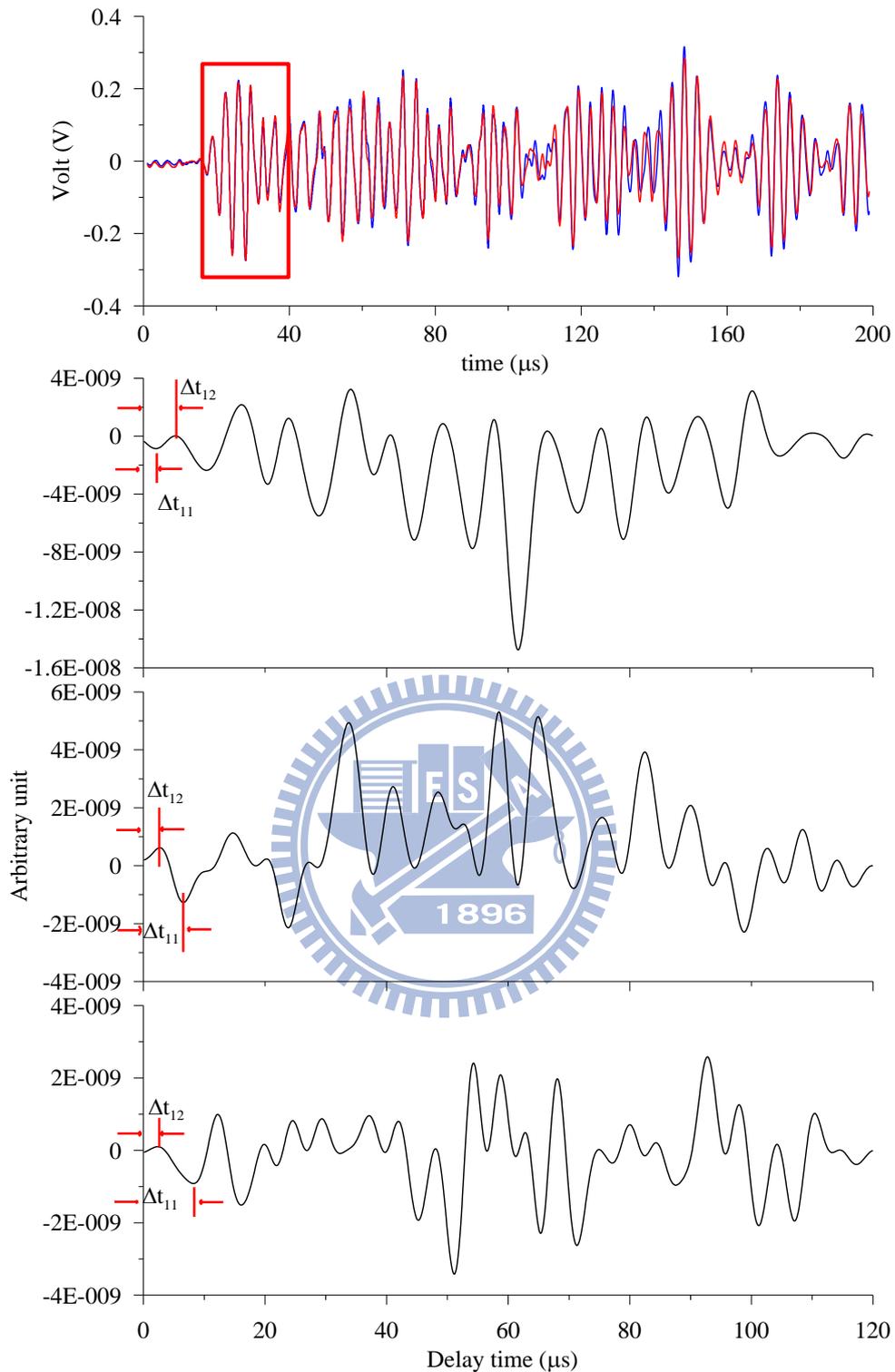


圖 4.19 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_2 之流道區的 (a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有水。訊號抵達時間介於 10-40 μs 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、(d) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。

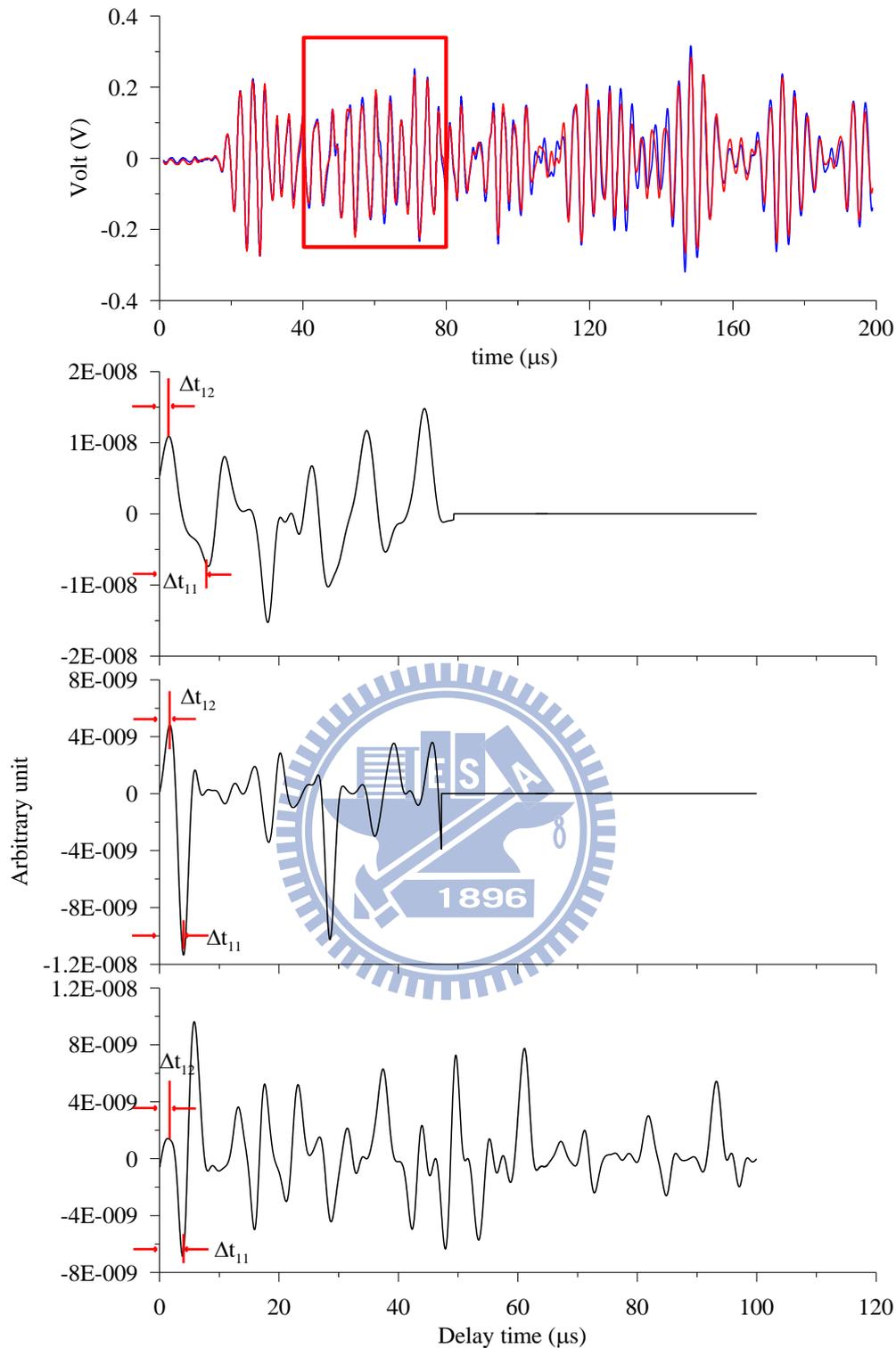


圖 4.20 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_2 之流道區的 (a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有水。訊號抵達時間介於 40-80 μs 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、(b) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。

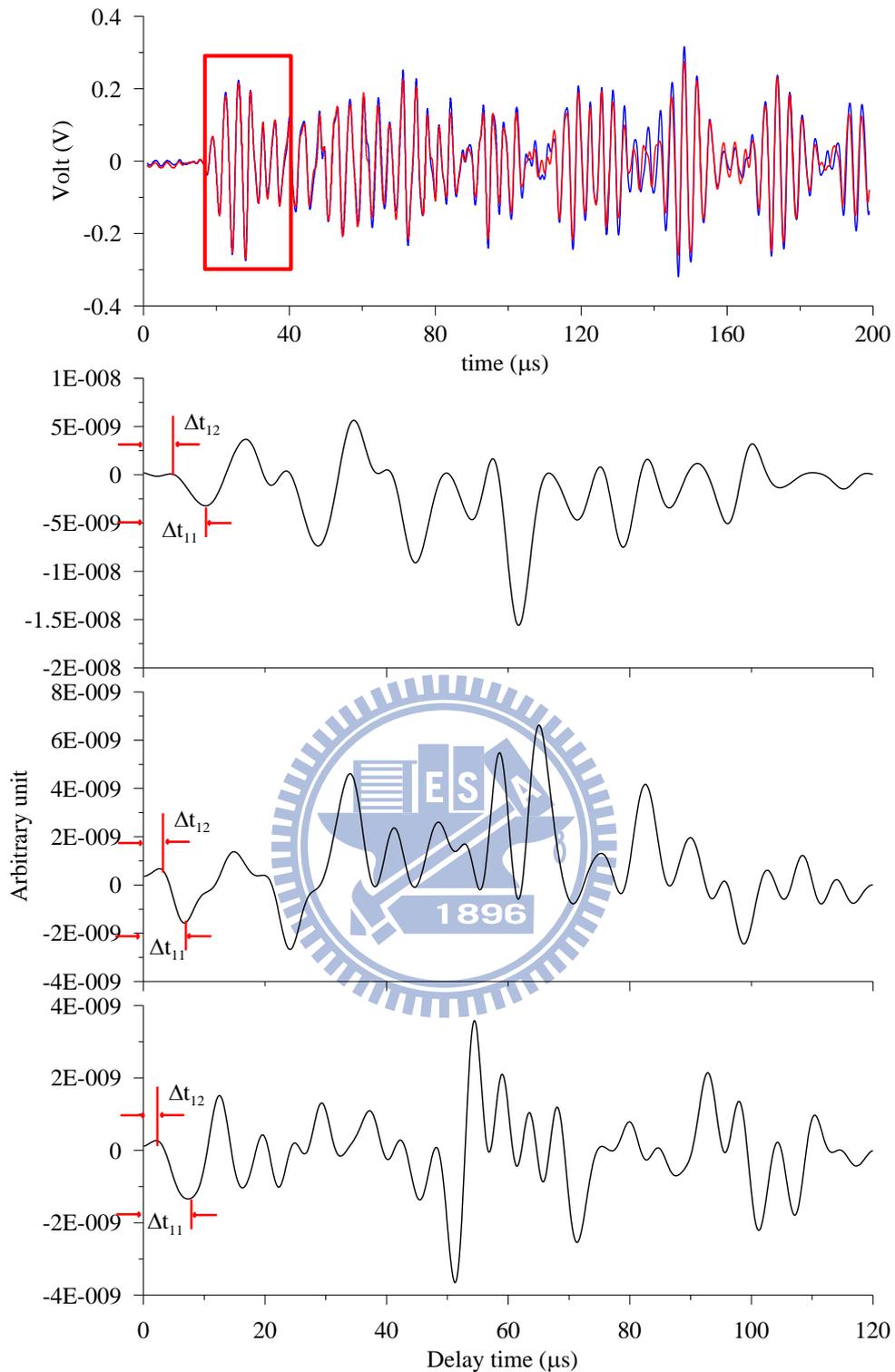


圖 4.21 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_3 之流道區的 (a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有水。訊號抵達時間介於 10-40 μs 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、(d) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。

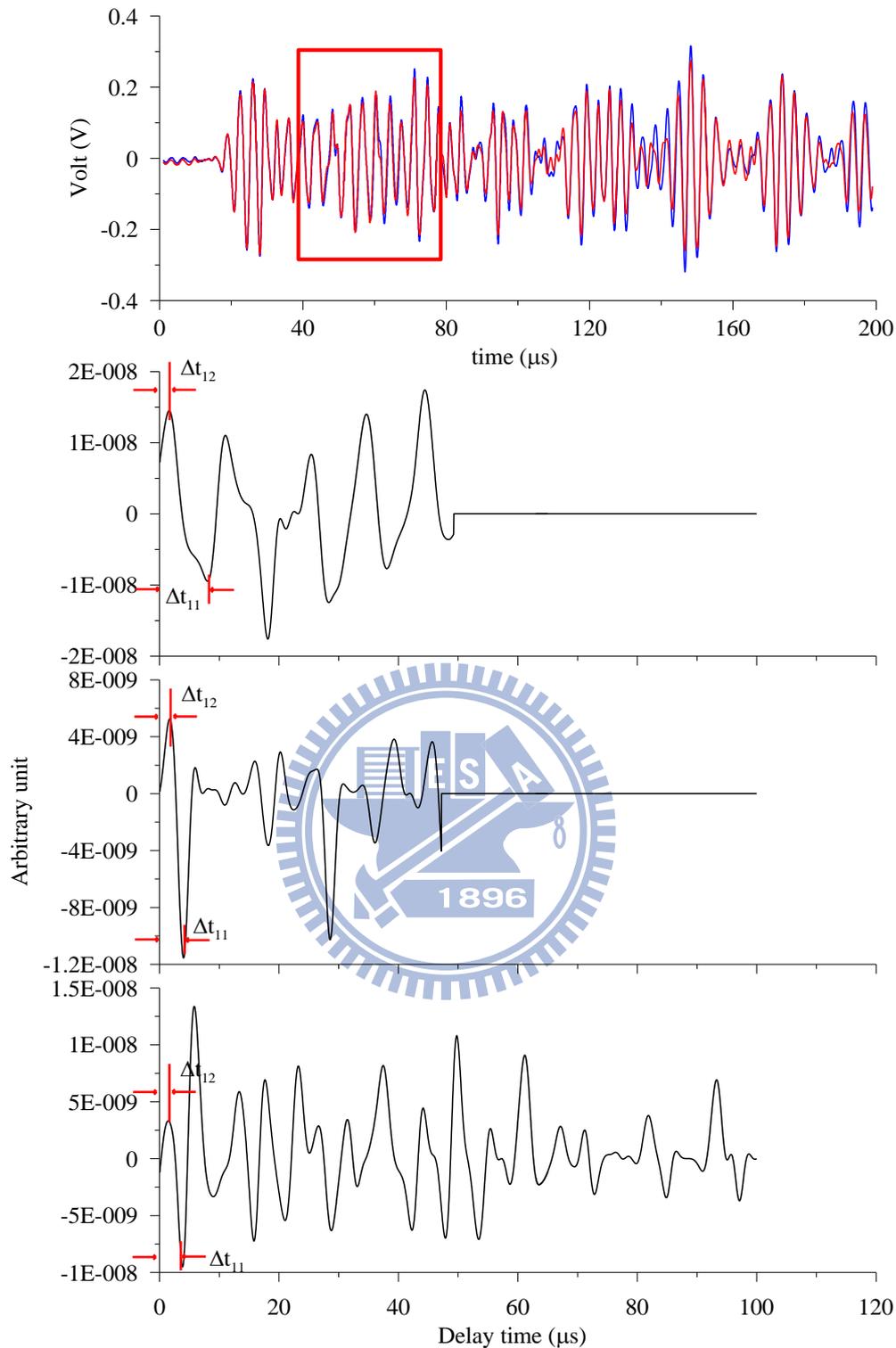
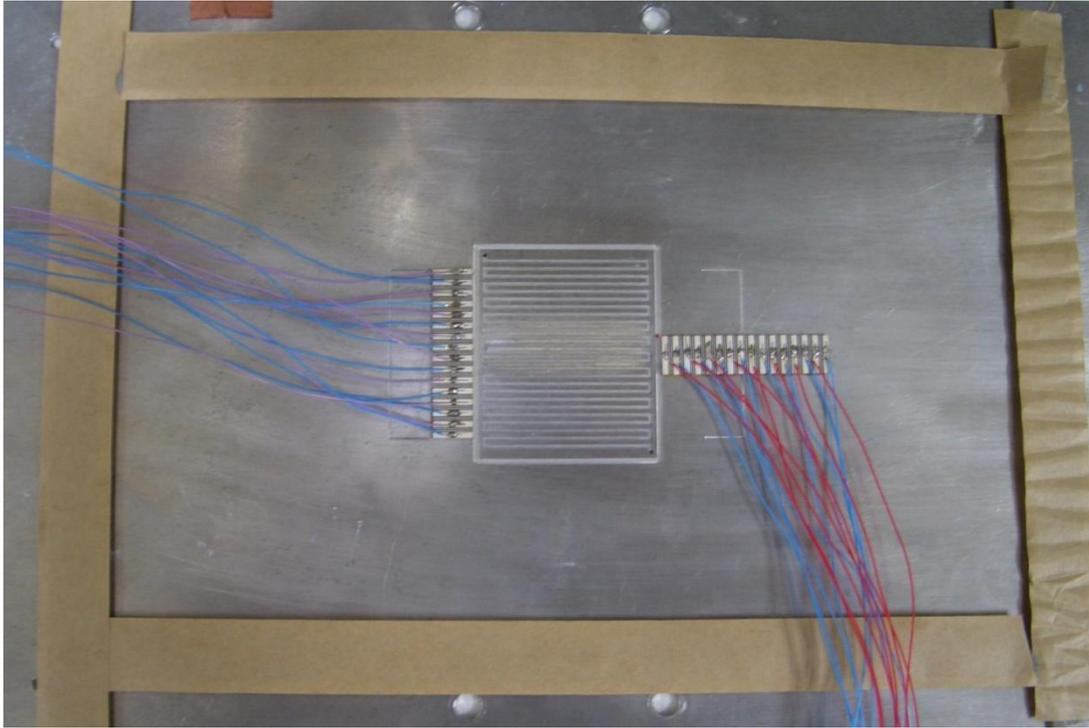
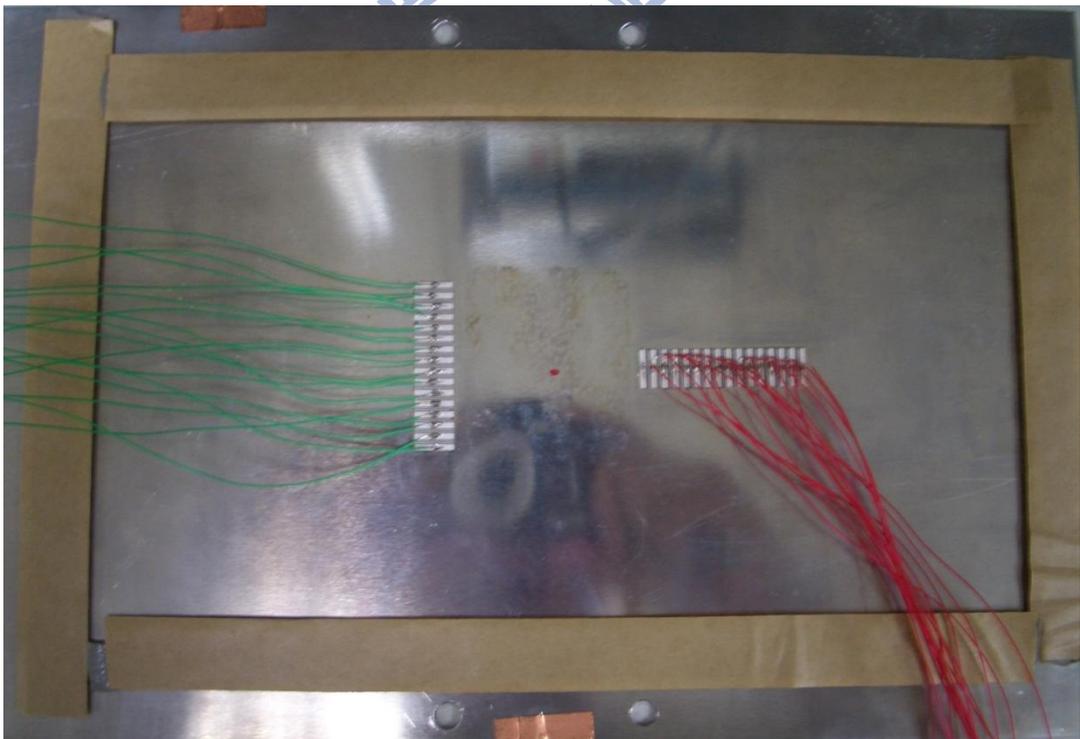


圖 4.22 陣列聲導波感測器量測行經無水及水覆蓋區域長 L_3 之流道區的 (a) 300 kHz 聲導波訊號，藍色代表無水，紅色代表有水。訊號抵達時間介於 40-80 μs 之 (b) 300 kHz、(c) 350 kHz、(d) 400 kHz 聲導波行經水覆蓋區域造成的時間延遲。



(a)



(b)

圖 4.23 改良後板四周黏貼高阻尼材料的鋁合金流道板(尺寸為 $300 \times 200 \times 2$ mm)(a) 鋁板中央為流道 (b) 鋁板中央無流道

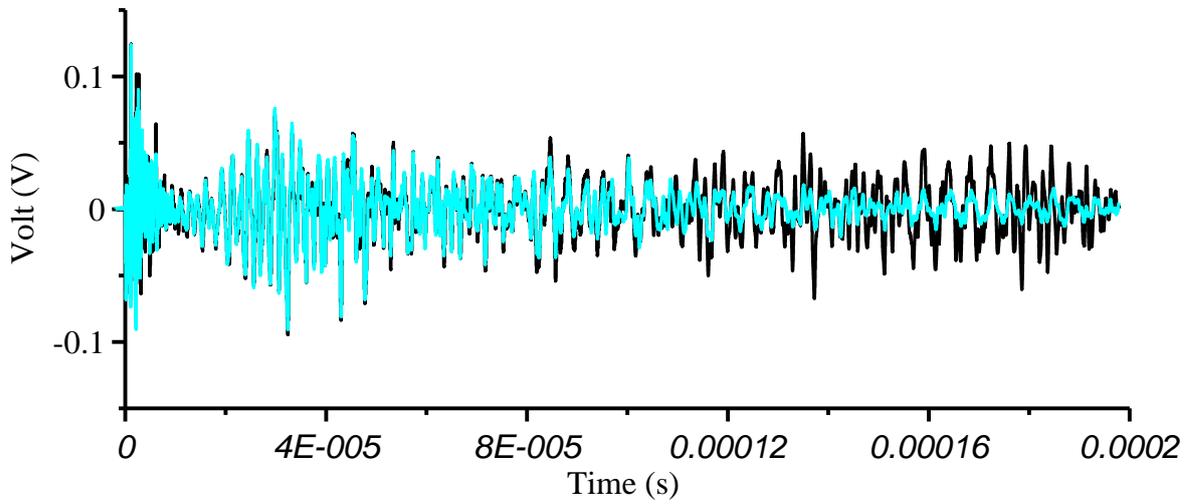


圖 4.24 板四周黏貼高阻尼材料影響比較

(黑色實線為四周沒有、紅色實線為四周有高阻尼材料)

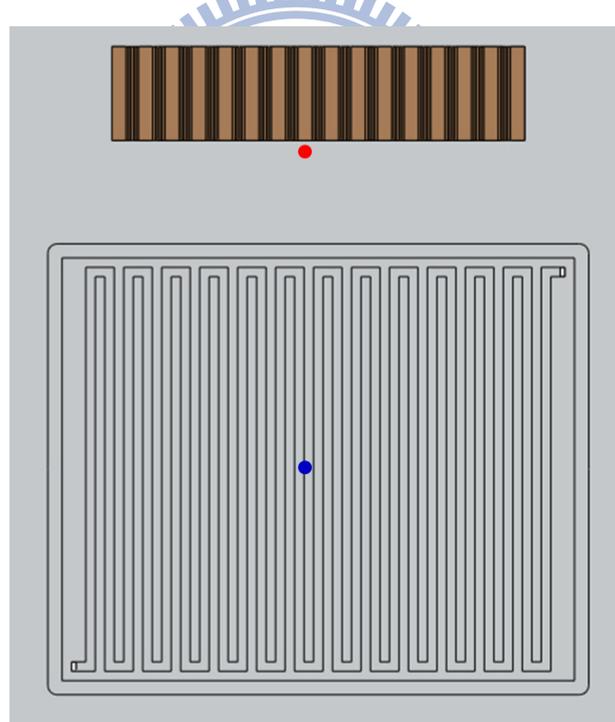


圖 4.25 雷射都卜勒干涉儀量測位置示意圖，上面紅點設為量測起點($x = 0$)，下面藍點為終點($x = 40 \text{ mm}$)，間隔 0.05 mm 量測一組聲導波訊號。

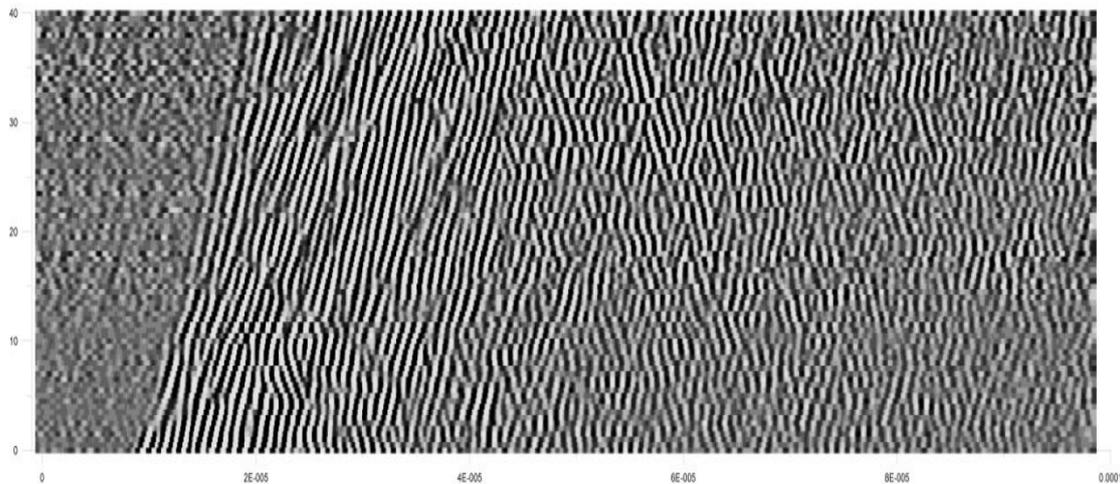


圖 4.26 雷射都卜勒干涉儀量測鋁合金流道板聲導波的線掃描灰階圖，橫軸及縱軸為波程時間(單位為 sec)及參考圖 4.25 所示之量測位置(單位為 mm)，淺色代表波峰，深色代表波谷。

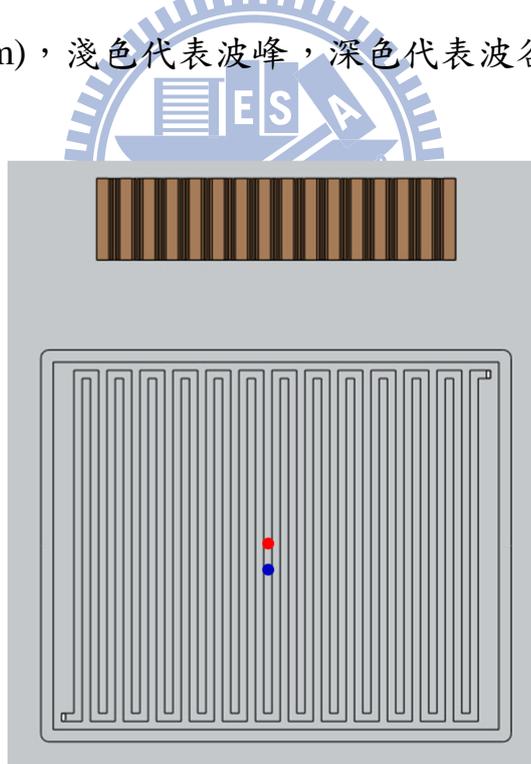


圖 4.27 雷射都卜勒干涉儀量測流道肋板上位置示意圖，上面紅點設為量測起點(座標 $x = 0$)，下面藍點為終點(座標為 $x = 3.2$ mm)，間隔 0.05 mm 量測一組聲導波訊號。

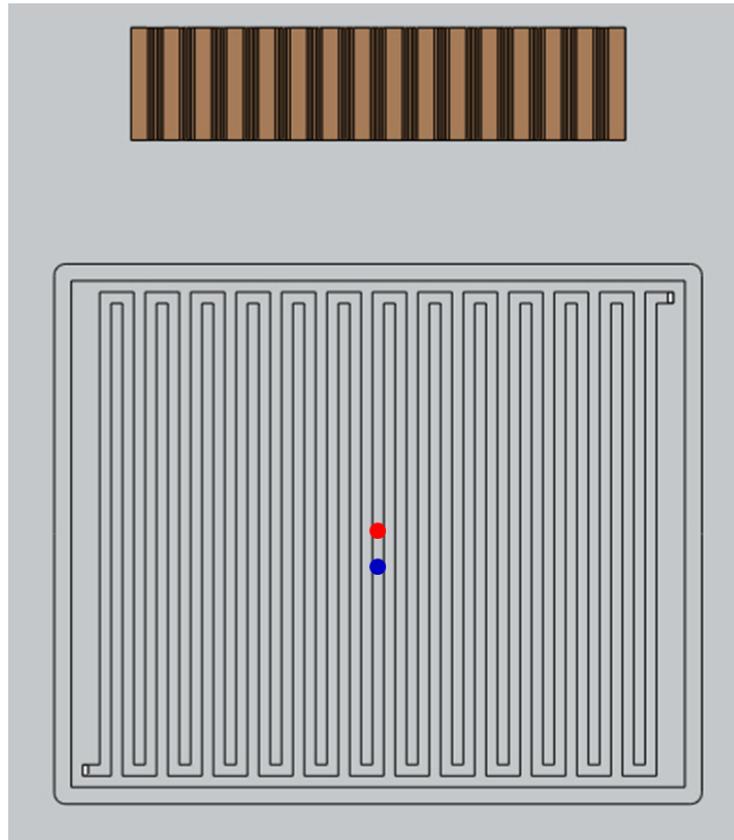


圖 4.28 雷射都卜勒干涉儀量測流道底部位置示意圖，上面紅點設為量測起點(座標 $x = 0$)，下面藍點為終點(座標為 $x = 3.2 \text{ mm}$)，間隔 0.05 mm 量測一組聲導波訊號。

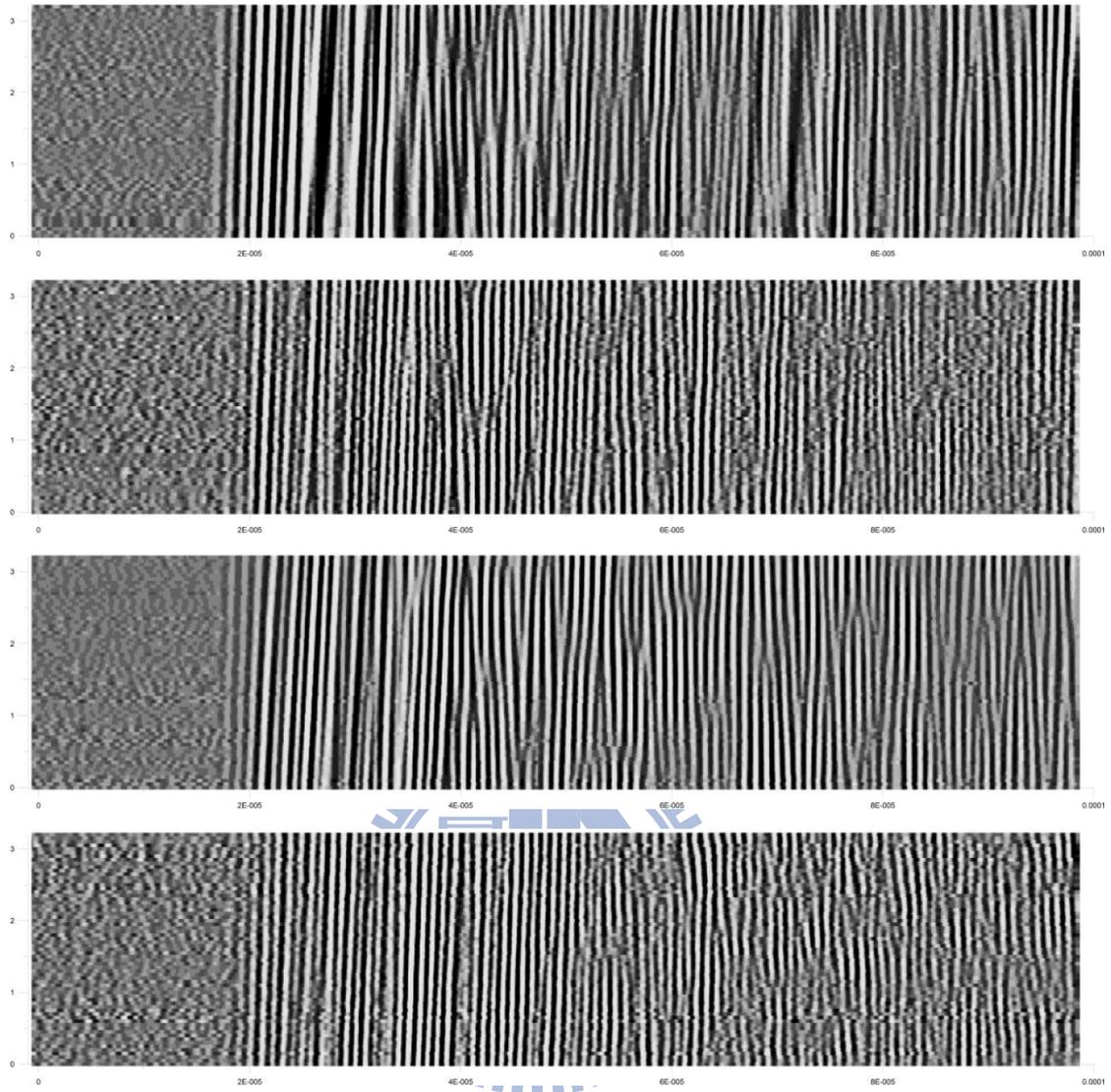


圖 4.29 雷射都卜勒量測鋁合金流道板流道肋板與底部聲導波的線掃描灰階圖，橫軸及縱軸為波程時間(單位 sec)及參考圖 4.27、4.28 所示之量測位置(單位 mm)其中(a)肋板上齊發無水(b)肋板上單發無水(c)流道底單發無水(d)肋板上單發有水

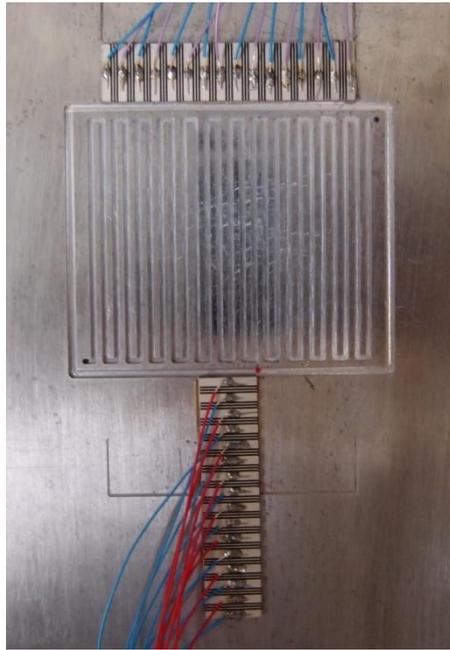


圖 4.30 固定波長的聲導波激發

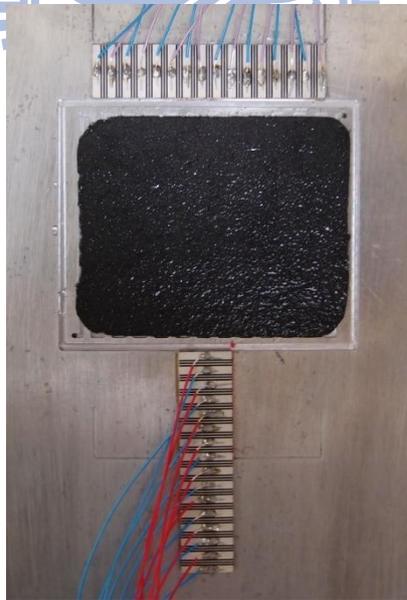


圖 4.31 將浸泡過濕潤碳紙置放於流道區上方

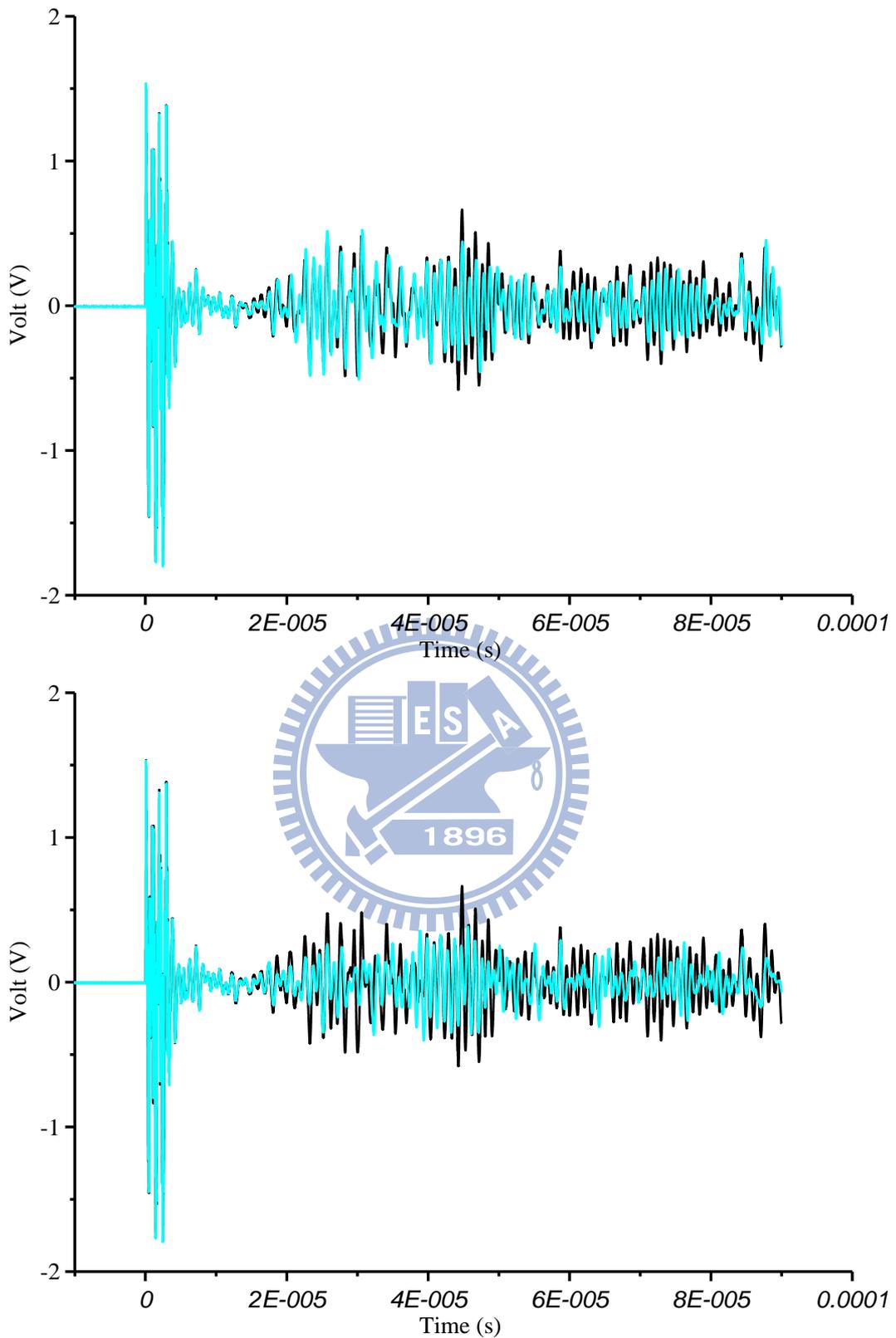


圖 4.32 接收端 R8 量測訊號(a)無水與碳紙(b)無水與有水比較圖
 (黑色實線為流道區無水、紅色實線為(a)流道區有碳紙(b)水填滿流道區)

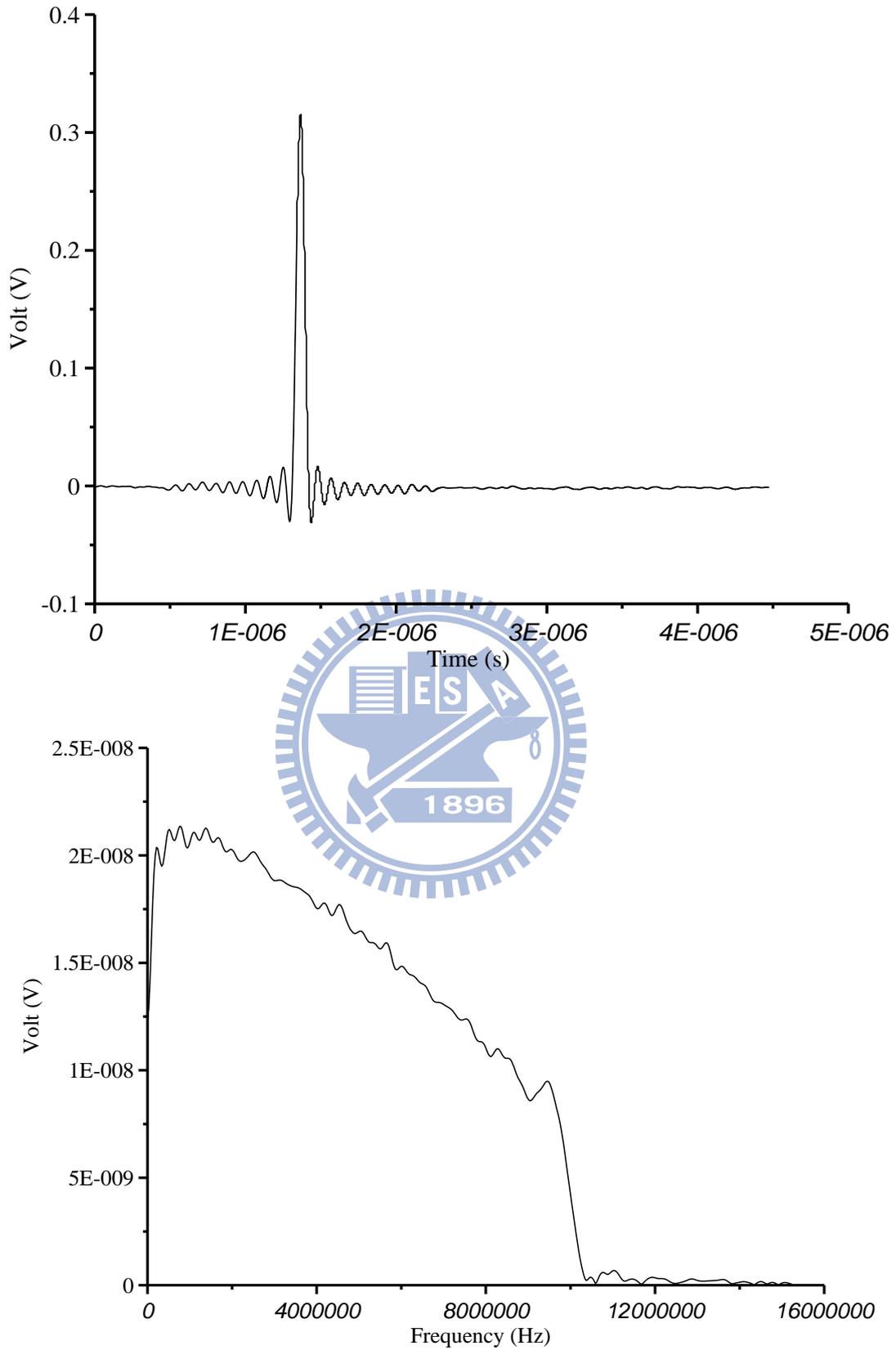


圖 4.33 陣列壓電陶瓷換能器(a)寬頻激振訊號(b)與其頻率響應

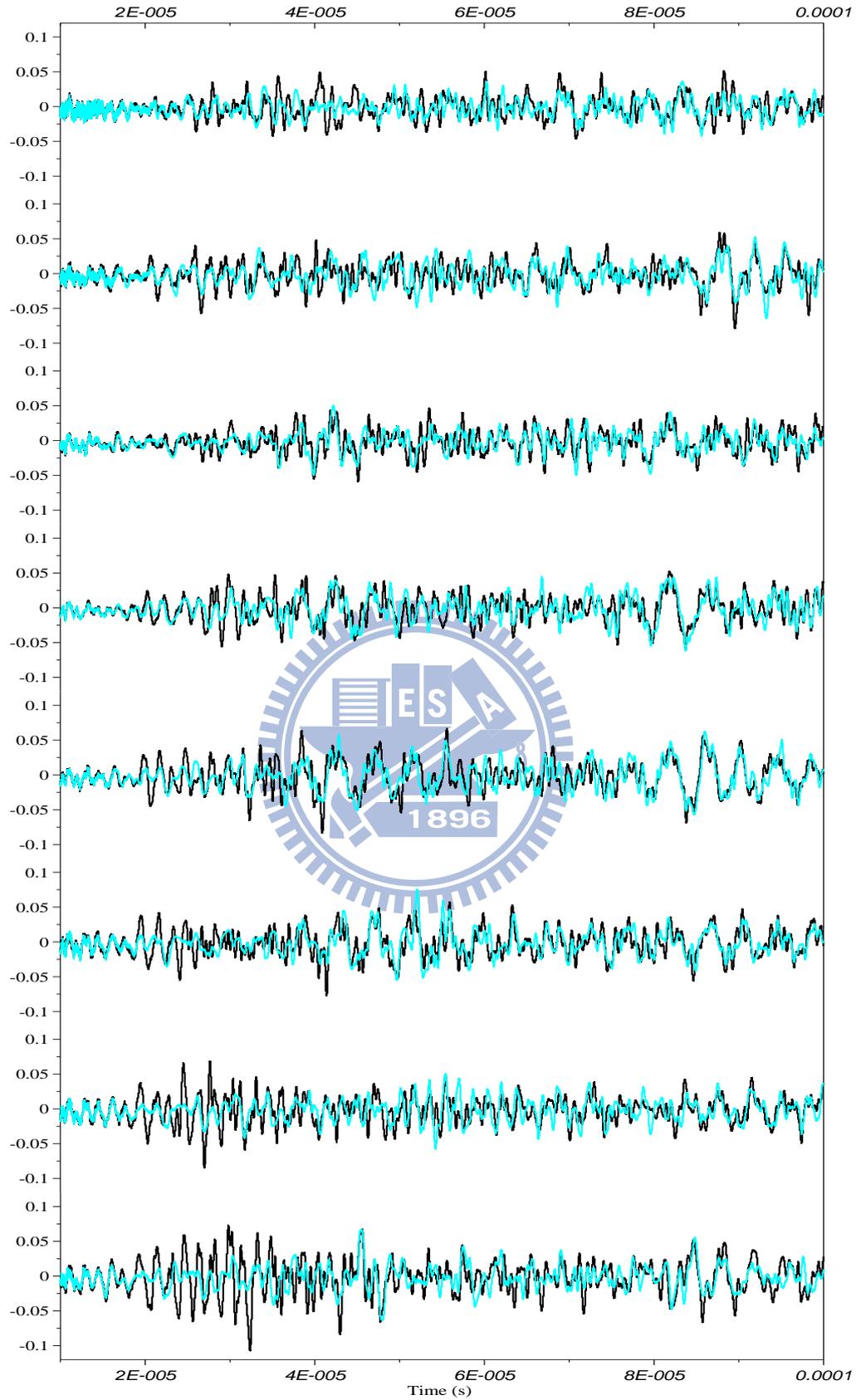


圖 4.34 寬頻訊號激振波長 5.6mm 聲導波，R1-R8 量測訊號
 (黑色實線為無水，紅色實線為有水)

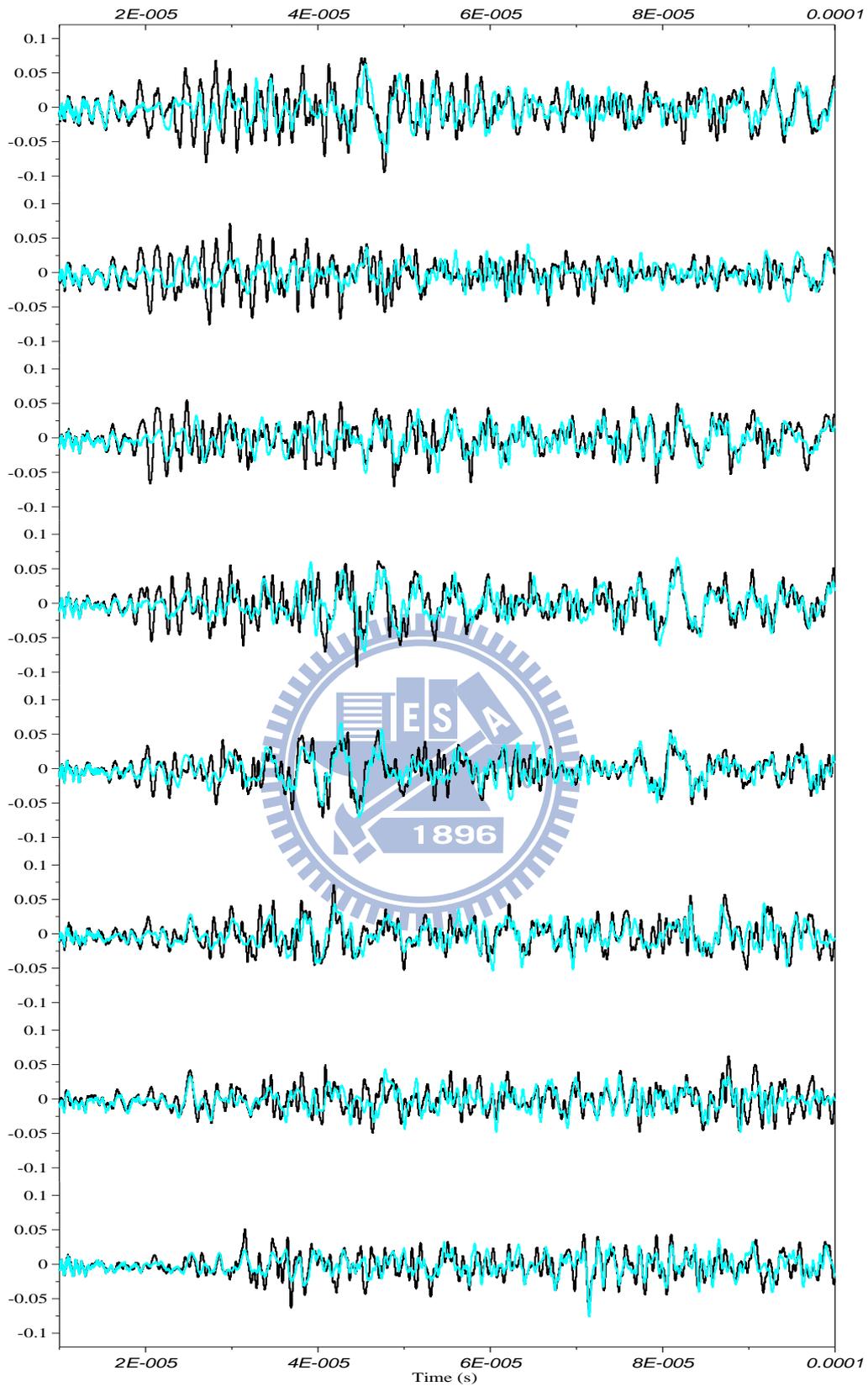


圖 4.35 寬頻訊號激振波長 5.6mm 聲導波，R9-R16 量測訊號
 (黑色實線為無水，紅色實線為有水)

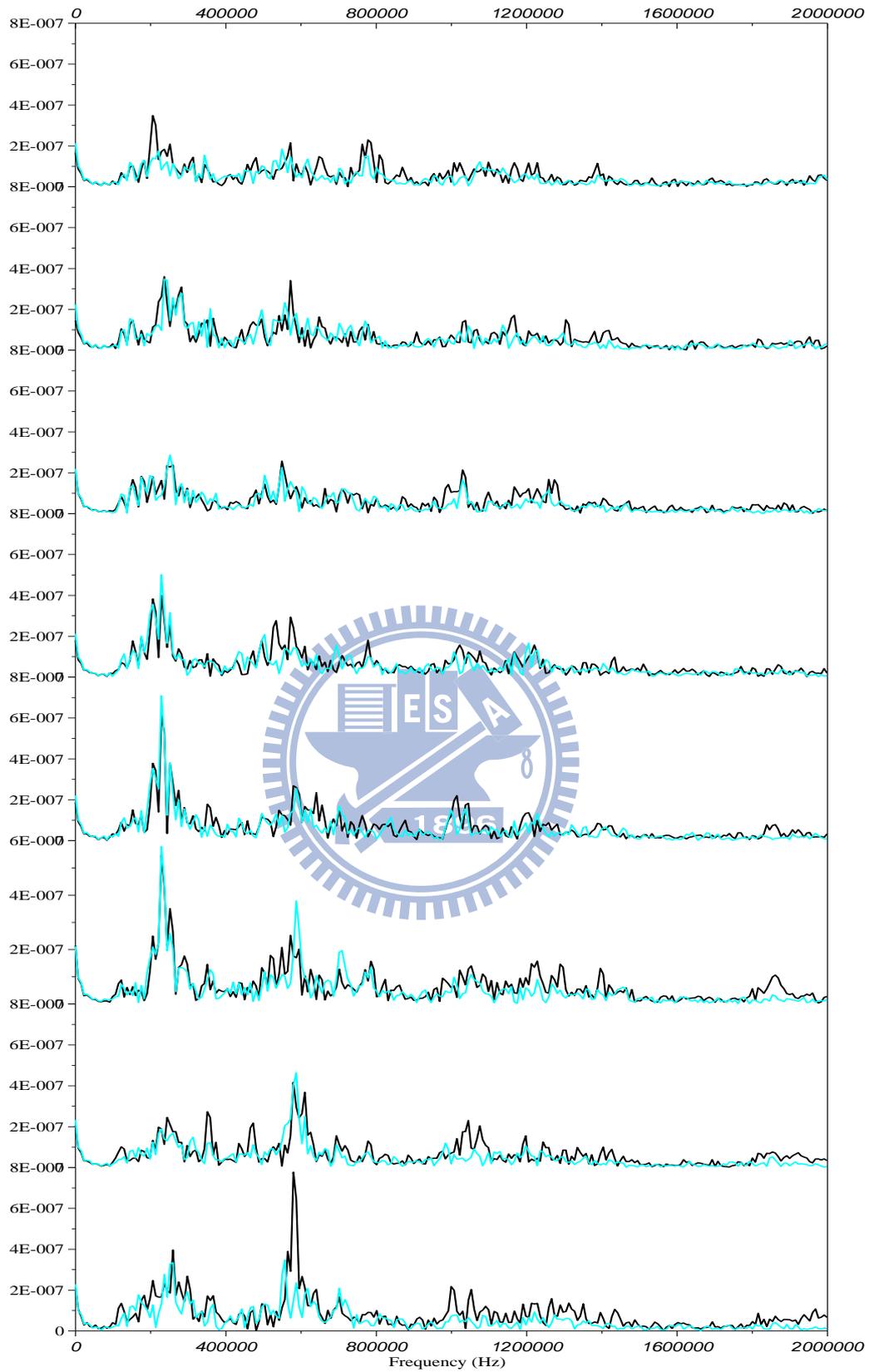


圖 4.36 接收端 R1-R8 量測之頻率響應訊號

(黑色實線為無水，紅色實線為有水)

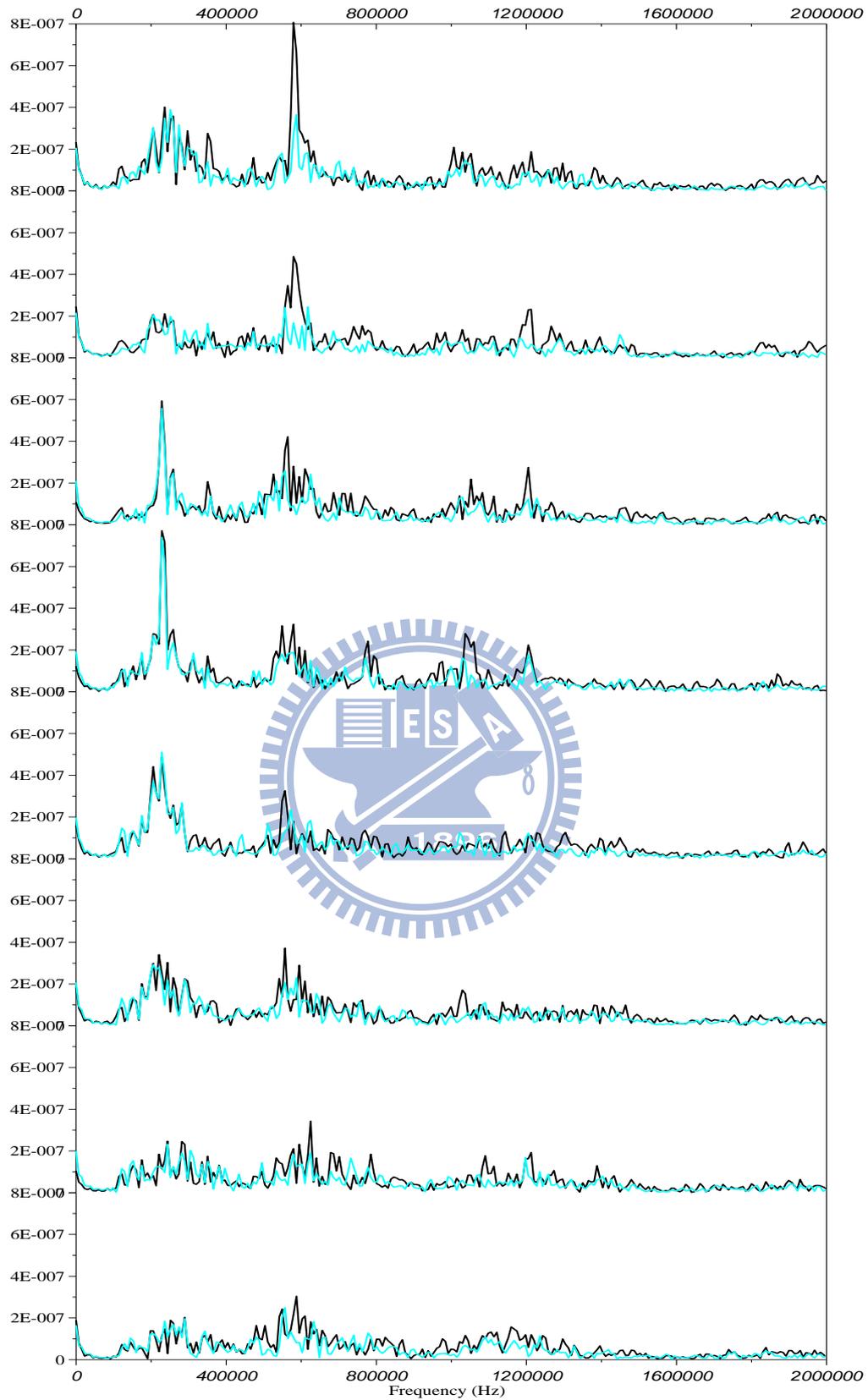


圖 4.37 接收端 R9-R16 量測之頻率響應訊號

(黑色實線為無水，紅色實線為有水)

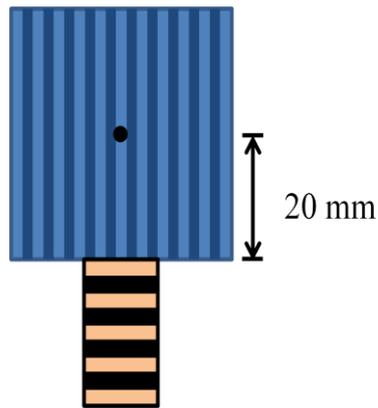


圖 4.38 雷射都卜勒干涉儀量測寬頻訊號激振波長 5.6 mm 的聲導波位置示意圖，由距離發射端 20 mm 為起始位置，沿聲導波傳遞方向共量測八點，間隔為 0.1 mm

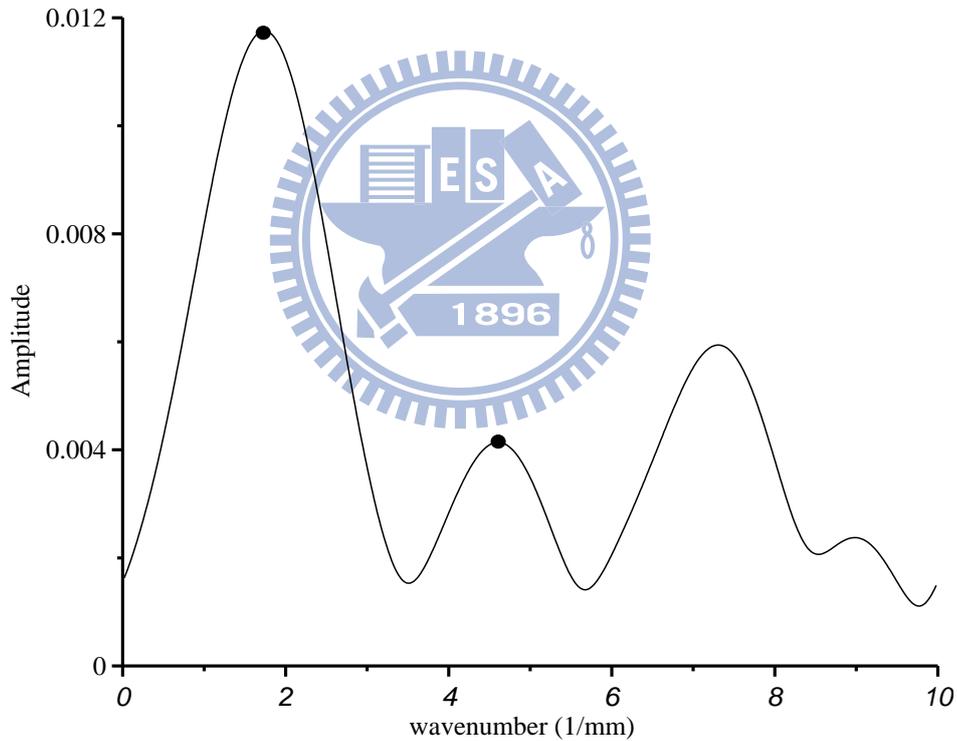


圖 4.39 量測數據經 2D-FFT 轉換後，頻率 $f = 1$ MHz 對應之波數與振幅關係圖，將圖中前兩個波峰對應之 k 值計算得 1 MHz 之相速度

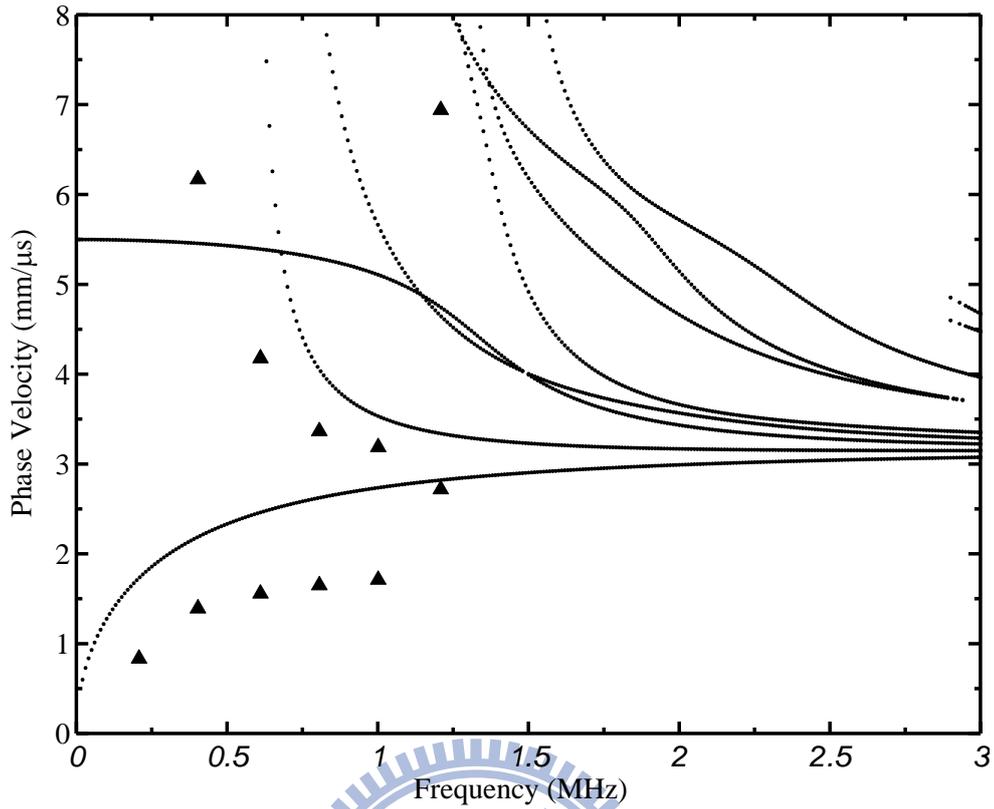


圖 4.40 根據圖 4.38 表示之量測位置經 2D-FFT 計算得之頻散曲線與二維有限元素分析之聲導波相速度頻散曲線比較圖(圖中三角形為實驗結果)

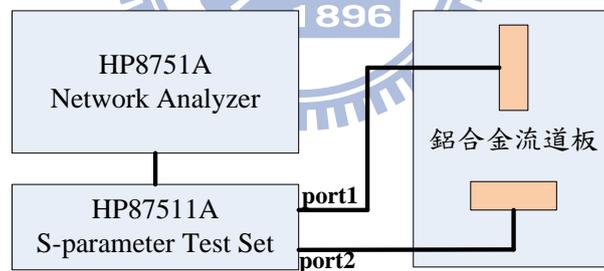


圖 4.41 插入損失量測實驗架構

(圖左下為網路分析儀及散射參數測試組)

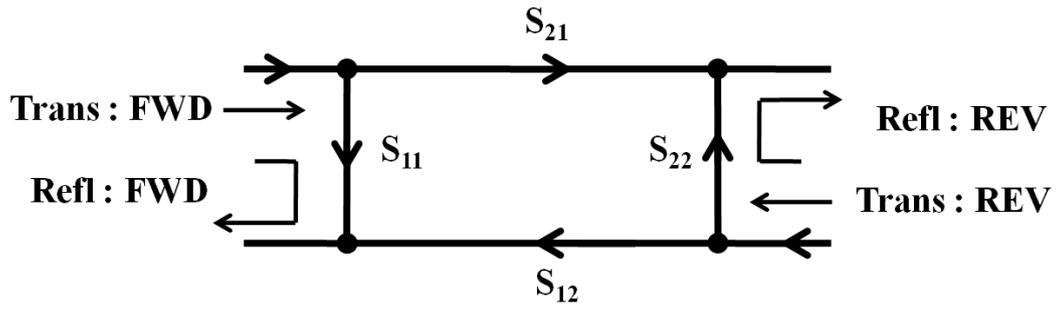
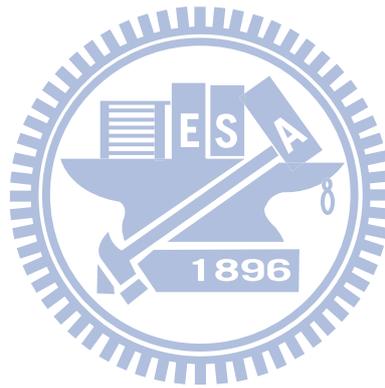
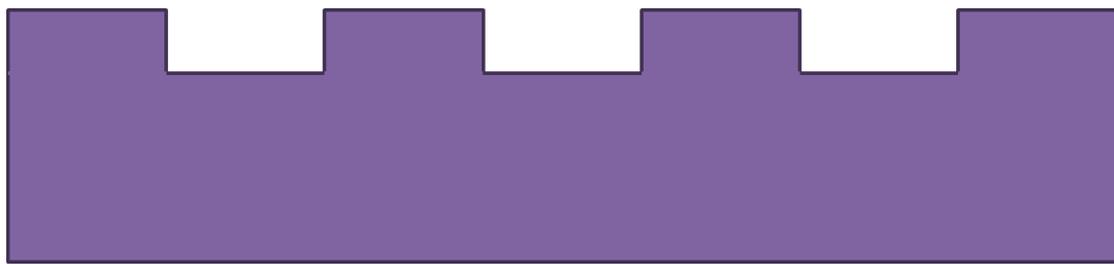
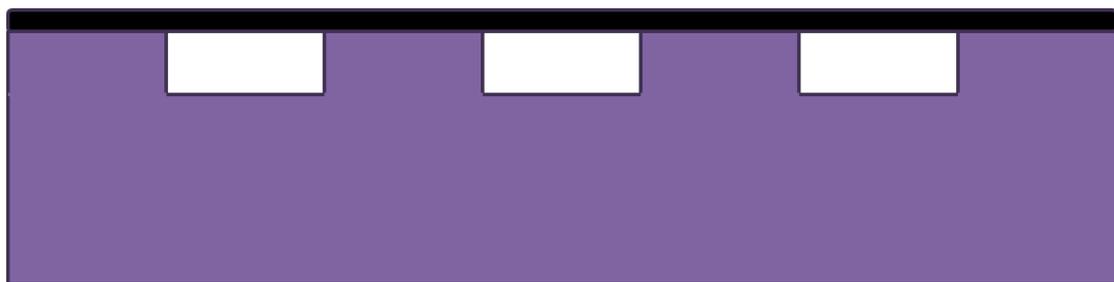


圖 4.42 S 參數示意圖

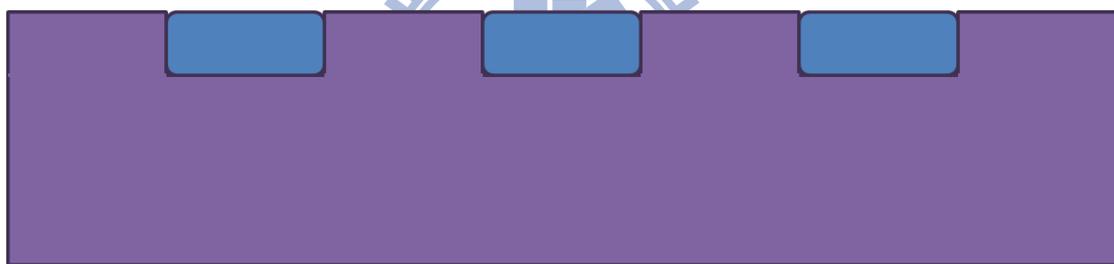




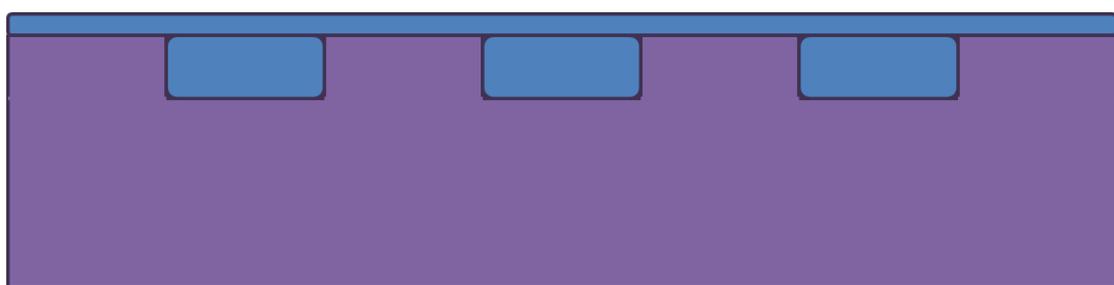
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4.43 流道區負載示意圖(a)流道區無水、(b)流道區上放置浸濕之碳紙、
(c)流道底部佈滿水、(d)流道區上佈滿水

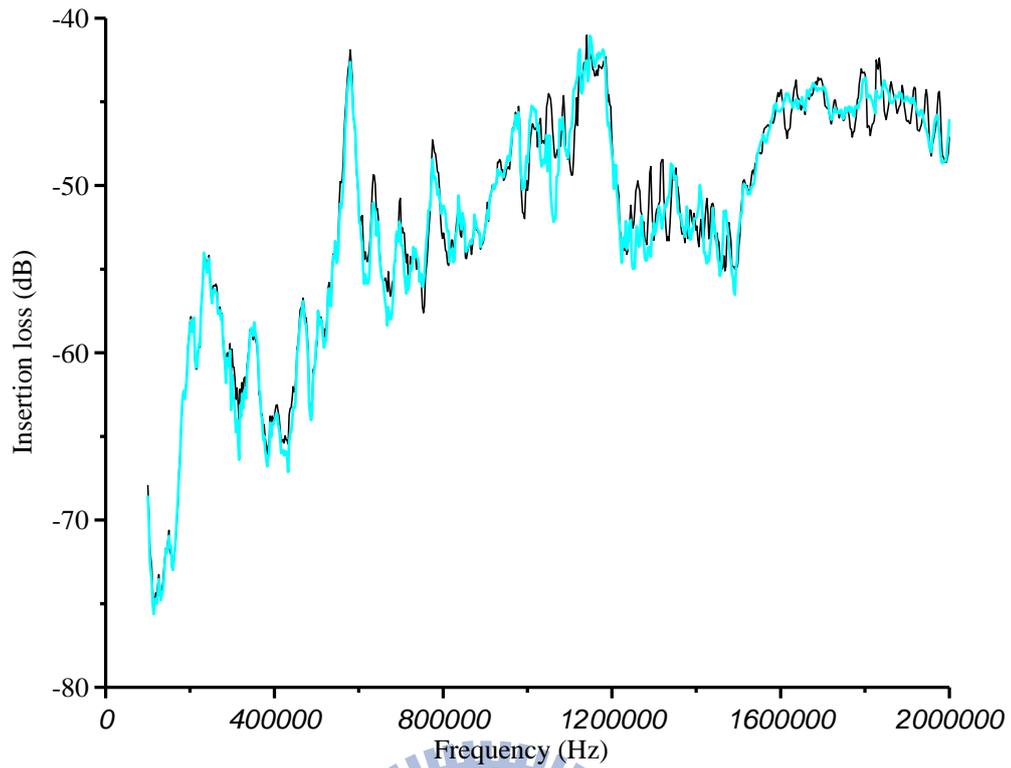


圖 4.44 流道區無水(黑色實線)與流道區上放置浸濕之碳紙(紅色實線)接

收端 R8 插入損失比較圖

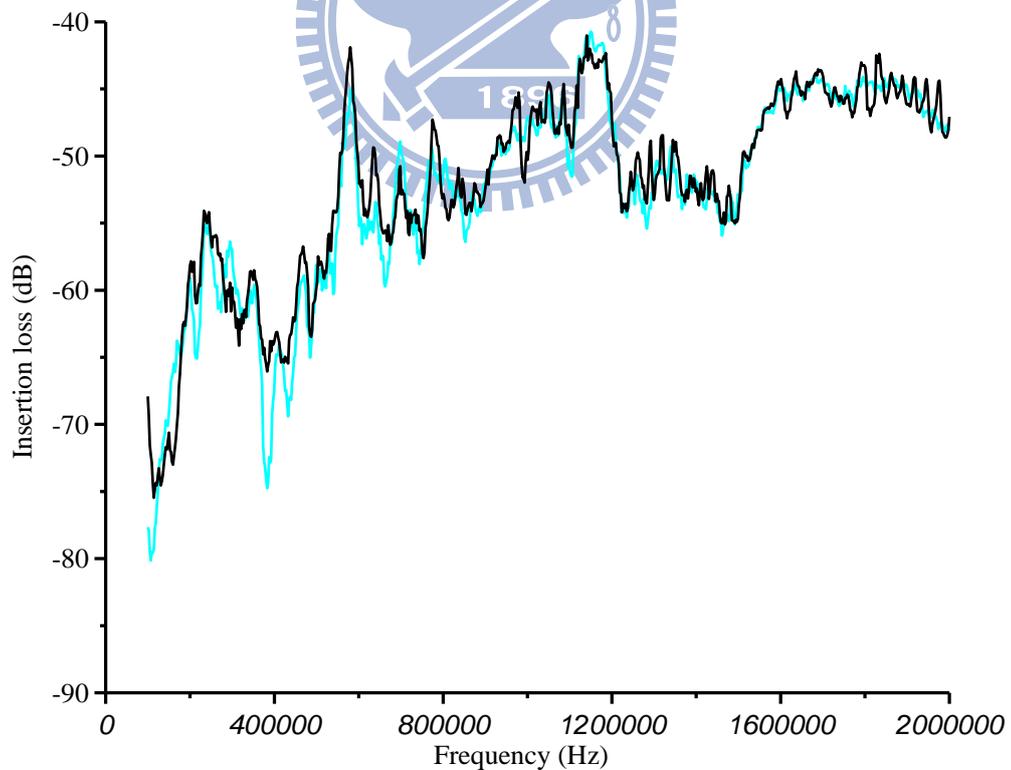


圖 4.45 流道區無水(黑色實線)與流道底部佈滿水(紅色實線)接收端 R8 插

入損失比較圖

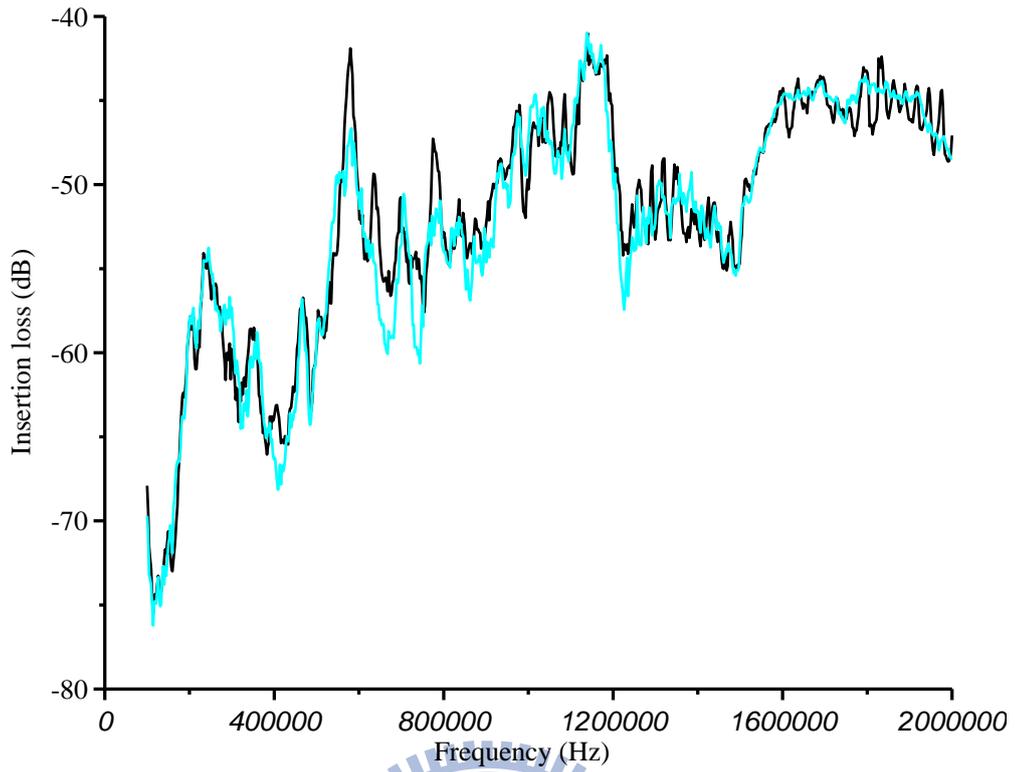
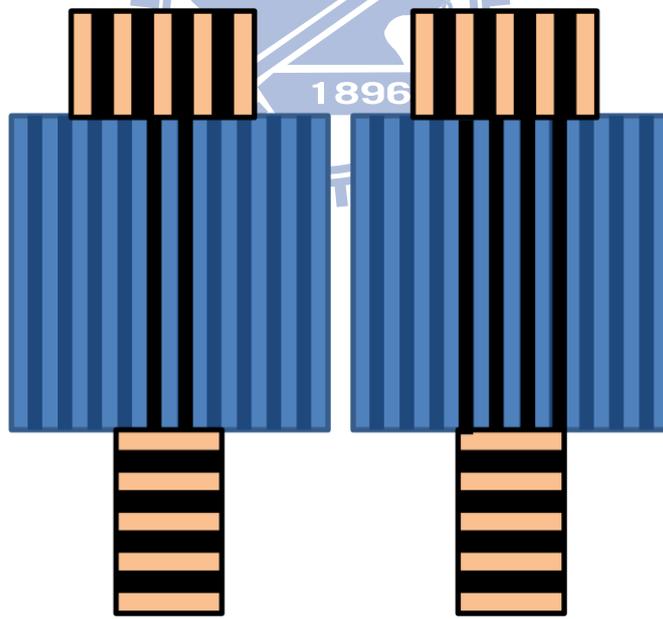


圖 4.46 流道區無水(黑色實線)與流道區上佈滿水(紅色實線)接收端 R8 插

入損失比較圖



(a)

(b)

圖 4.47 流道區水量示意圖(a)以 22 μL 水將中央兩道滴滿

(b)以 44 μL 水將中央四道滴滿

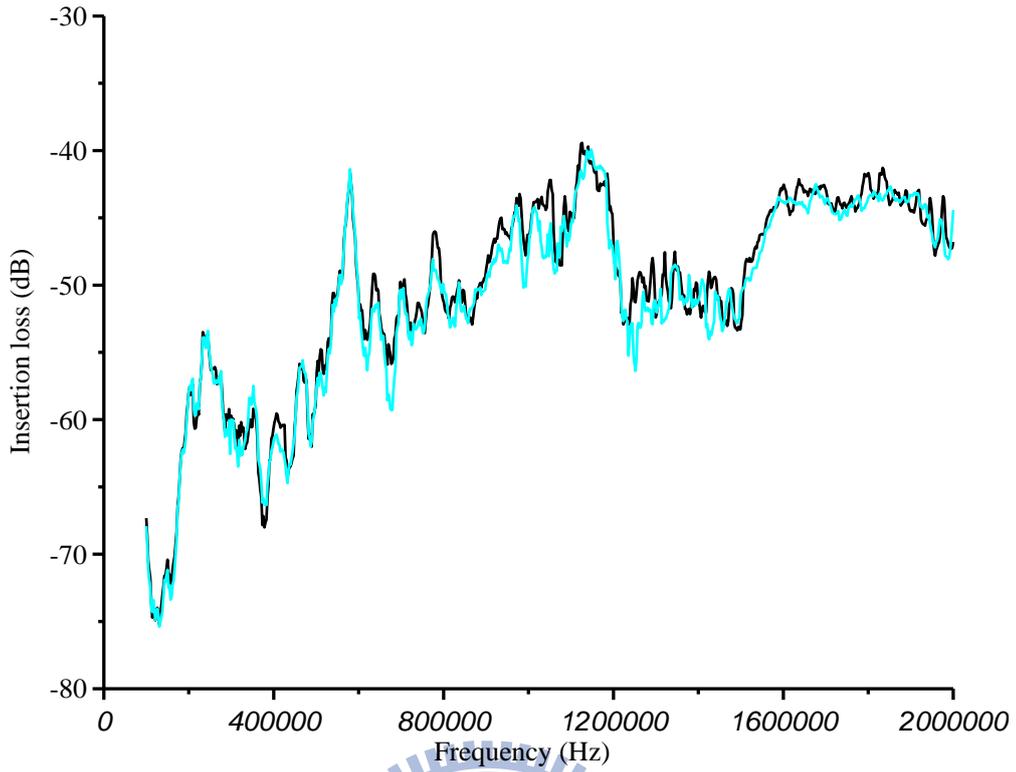


圖 4.48 流道區無水(黑色實線)與中央 2 條流道有水(紅色實線)接收端 R8

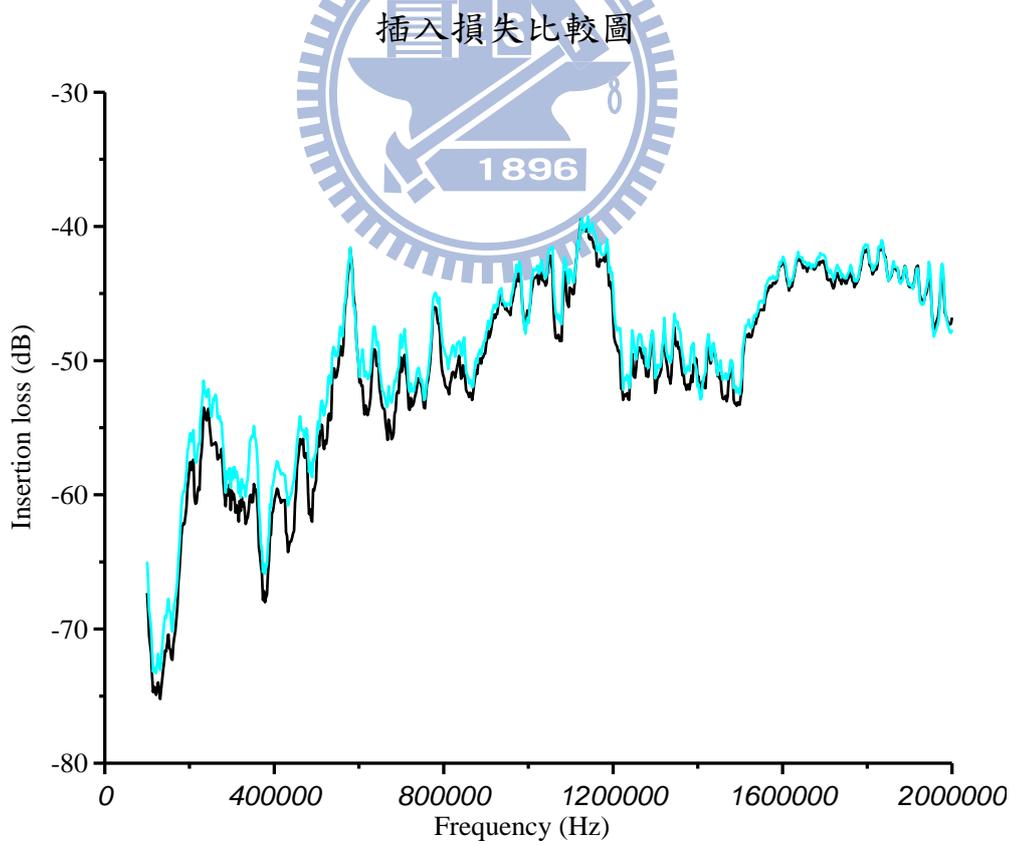


圖 4.49 流道區無水(黑色實線)與中央 4 條流道有水(紅色實線)接收端 R8

插入損失比較圖

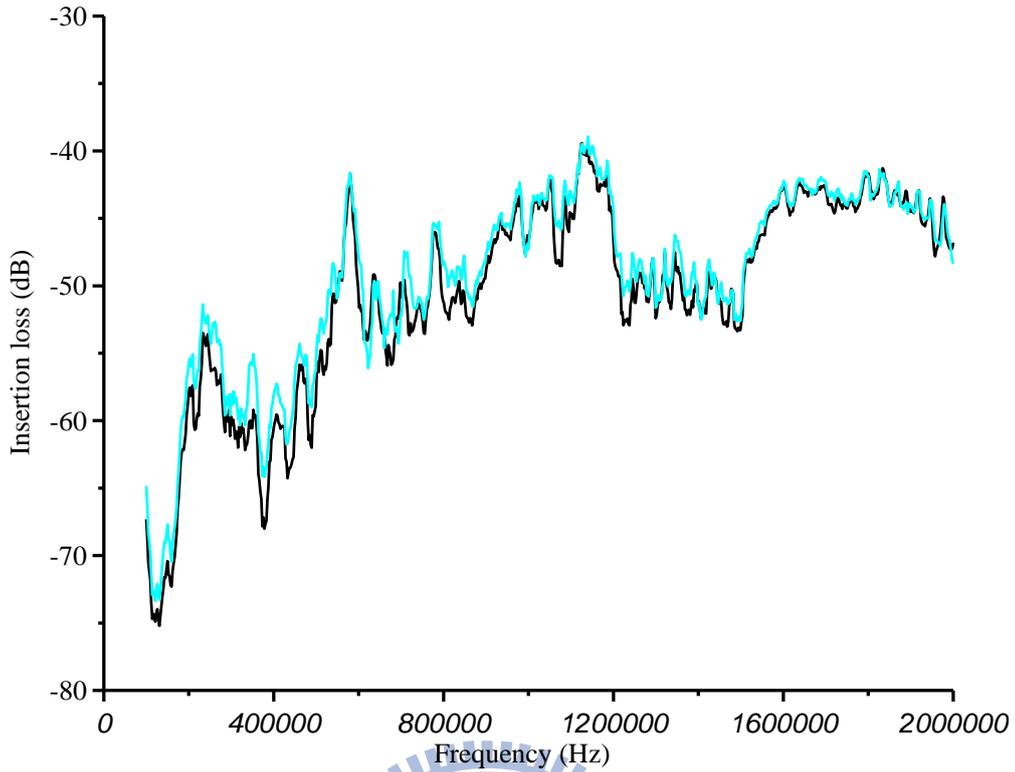


圖 4.50 流道區無水(黑色實線)與中央 6 條流道有水(紅色實線)接收端 R8

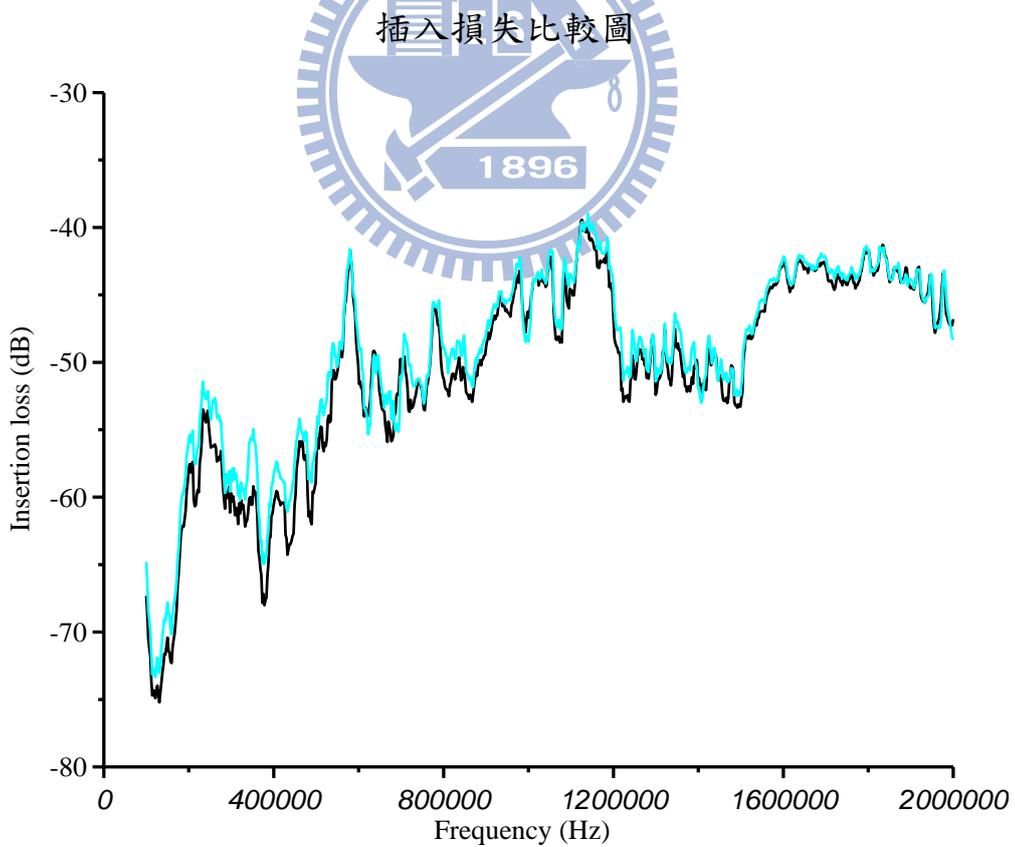


圖 4.51 流道區無水(黑色實線)與中央 8 條流道有水(紅色實線)接收端 R8

插入損失比較圖

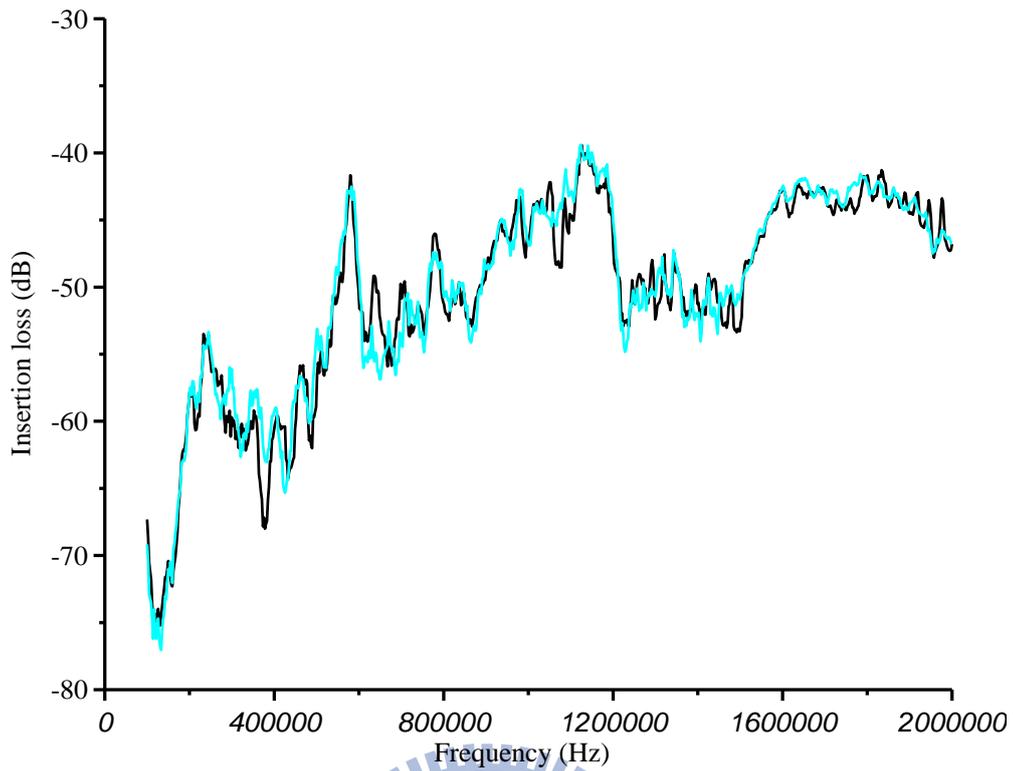


圖 4.52 流道區無水(黑色實線)與中央 10 條流道有水(紅色實線)接收端 R8

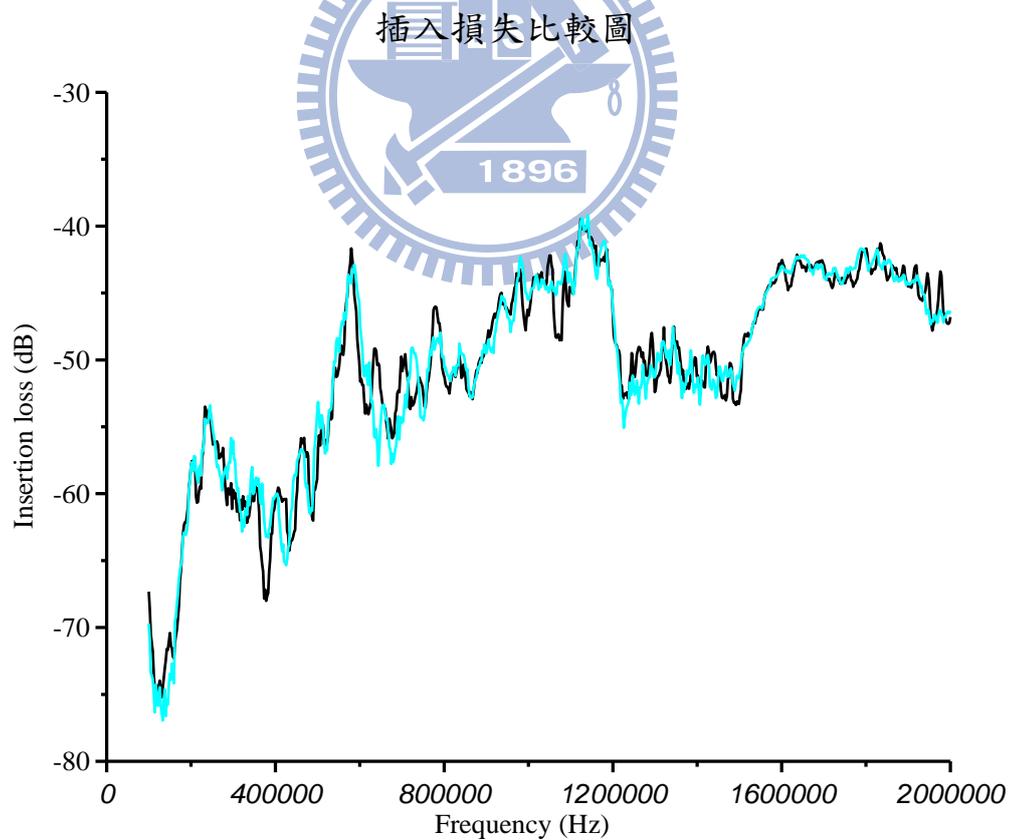


圖 4.53 流道區無水(黑色實線)與中央 12 條流道有水(紅色實線)接收端 R8

插入損失比較圖

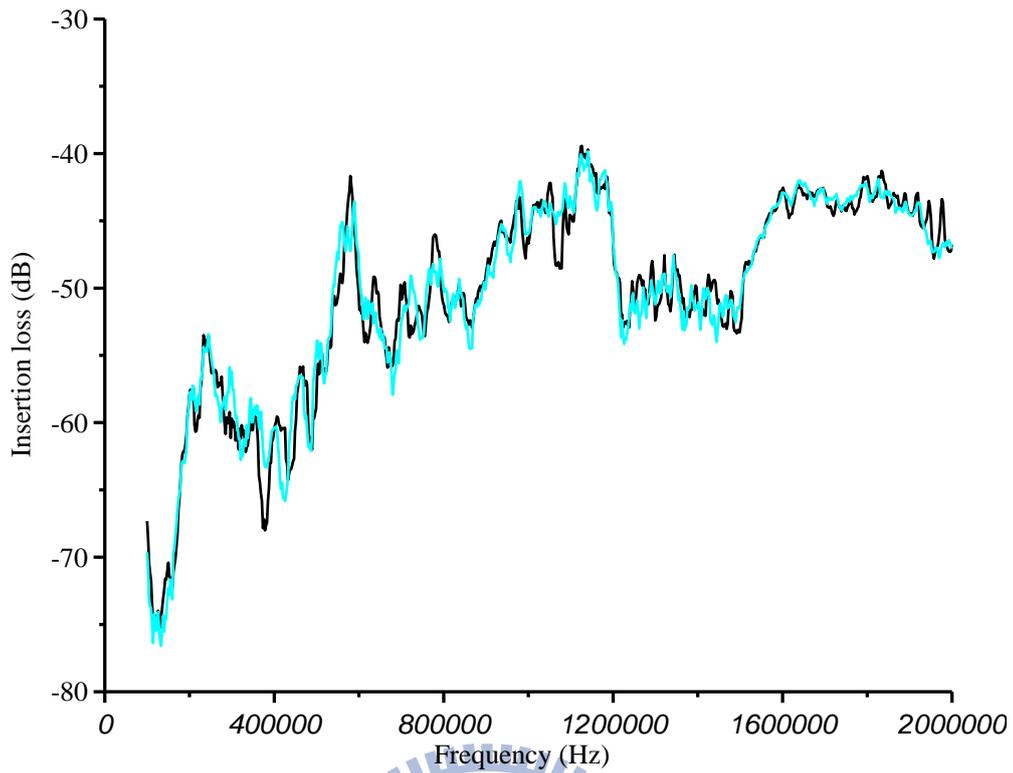


圖 4.54 流道區無水(黑色實線)與中央 14 條流道有水(紅色實線)接收端 R8

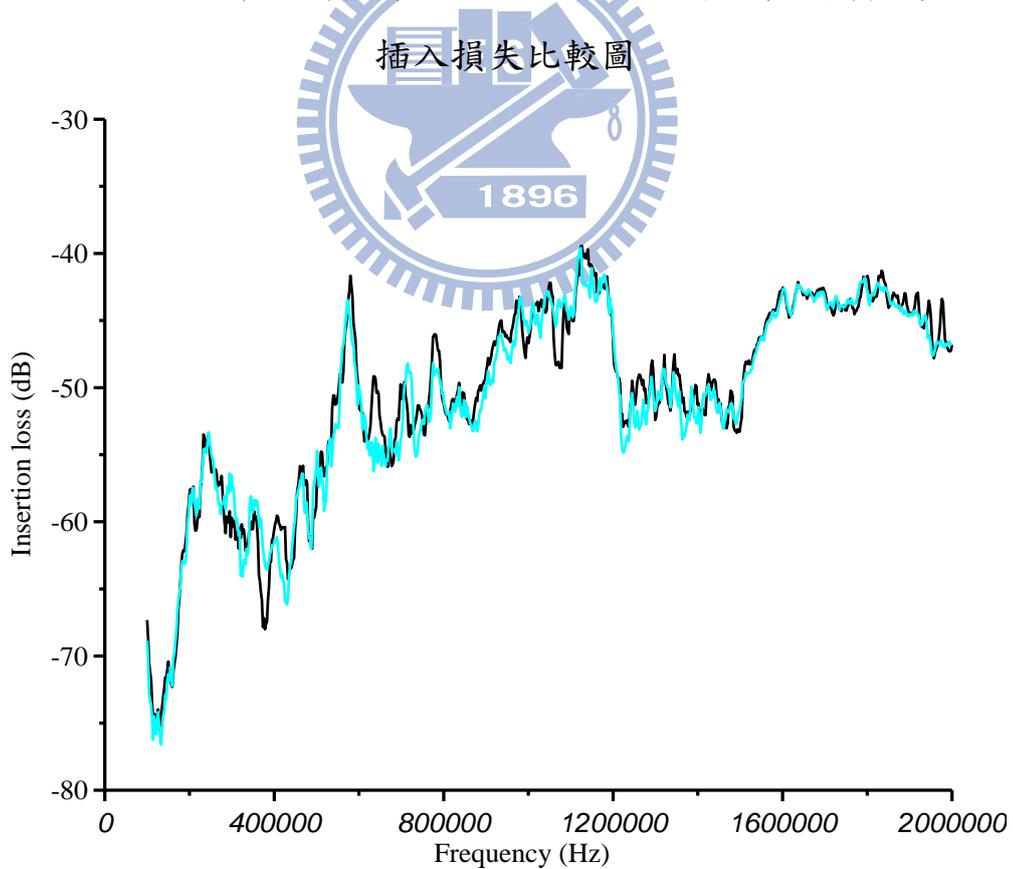


圖 4.55 流道區無水(黑色實線)與中央 16 條流道有水(紅色實線)接收端 R8

插入損失比較圖

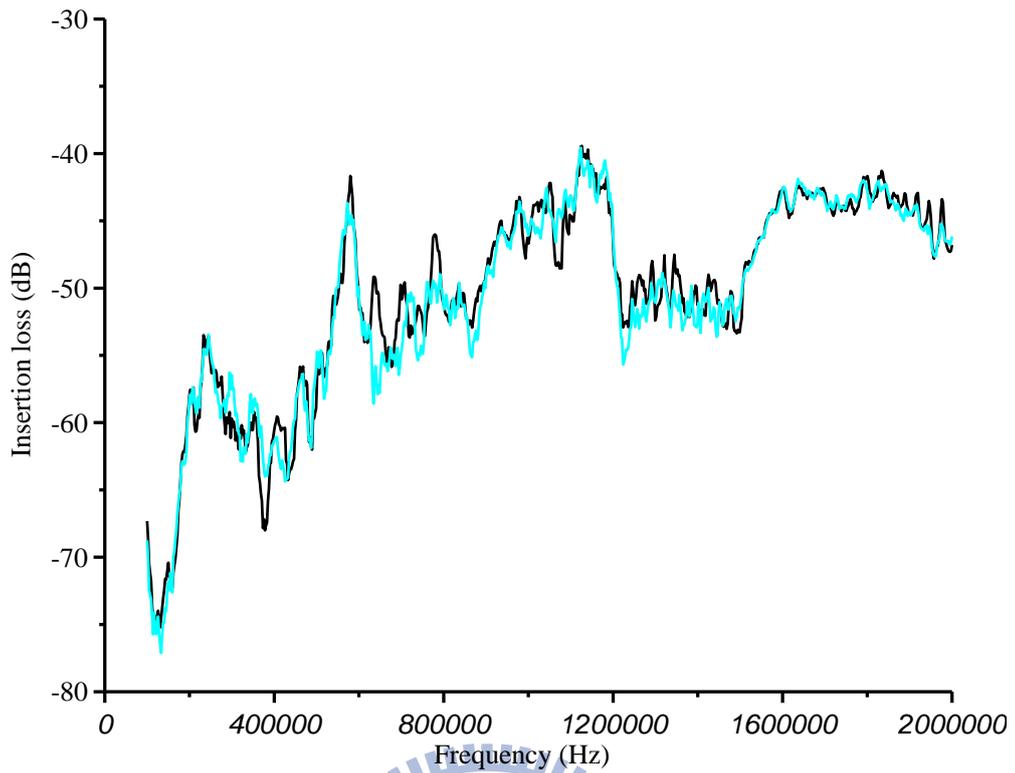


圖 4.56 流道區無水(黑色實線)與中央18條流道有水(紅色實線)接收端 R8

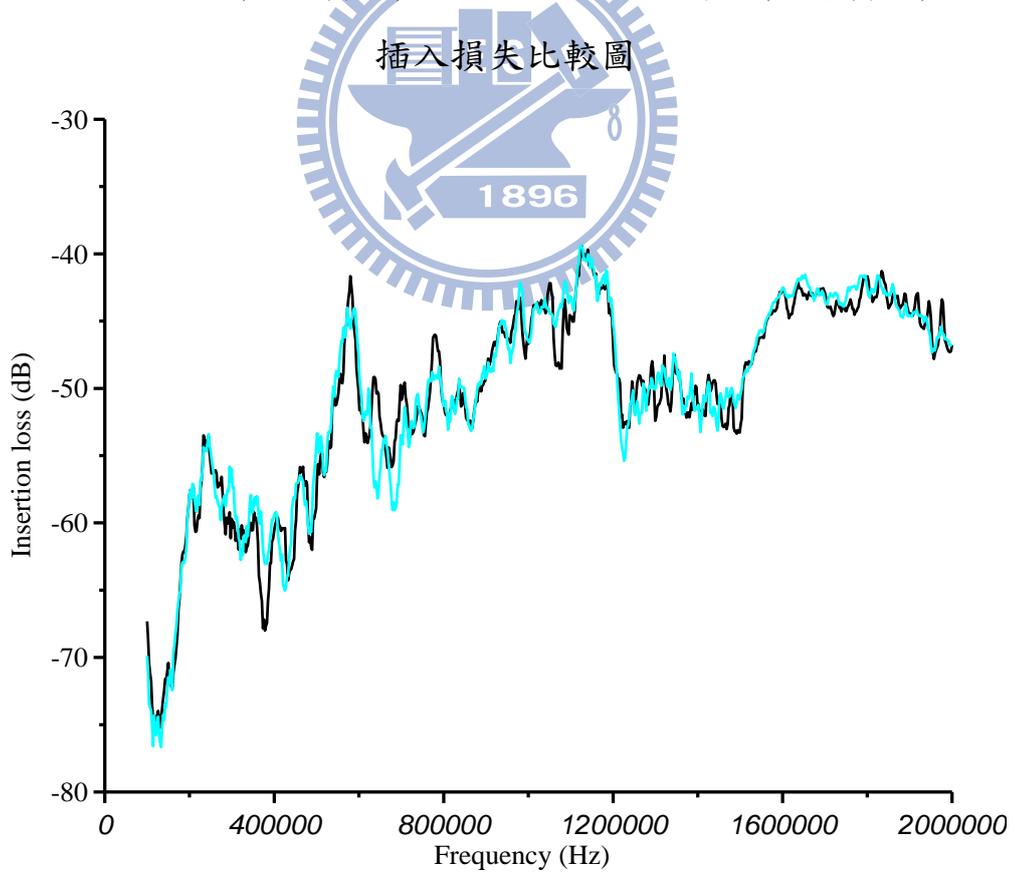


圖 4.57 流道區無水(黑色實線)與中央20條流道有水(紅色實線)接收端 R8

插入損失比較圖

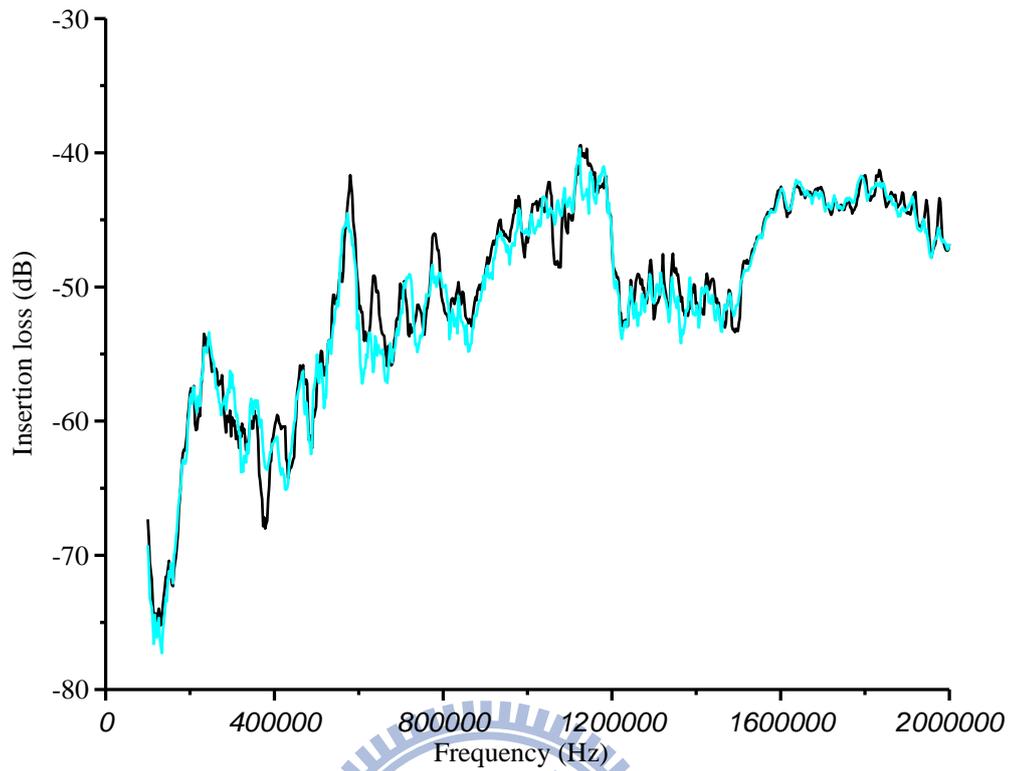


圖 4.58 流道區無水(黑色實線)與中央22條流道有水(紅色實線)接收端 R8

插入損失比較圖

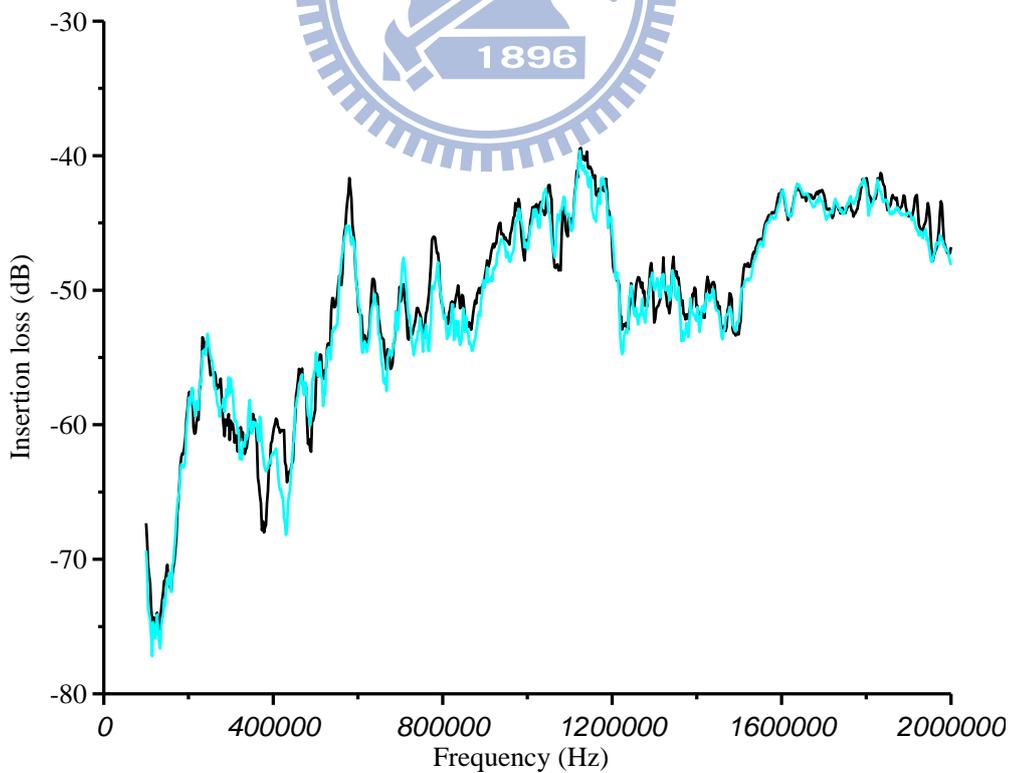


圖 4.59 流道區無水(黑色實線)與中央24條流道有水(紅色實線)接收端 R8

插入損失比較圖

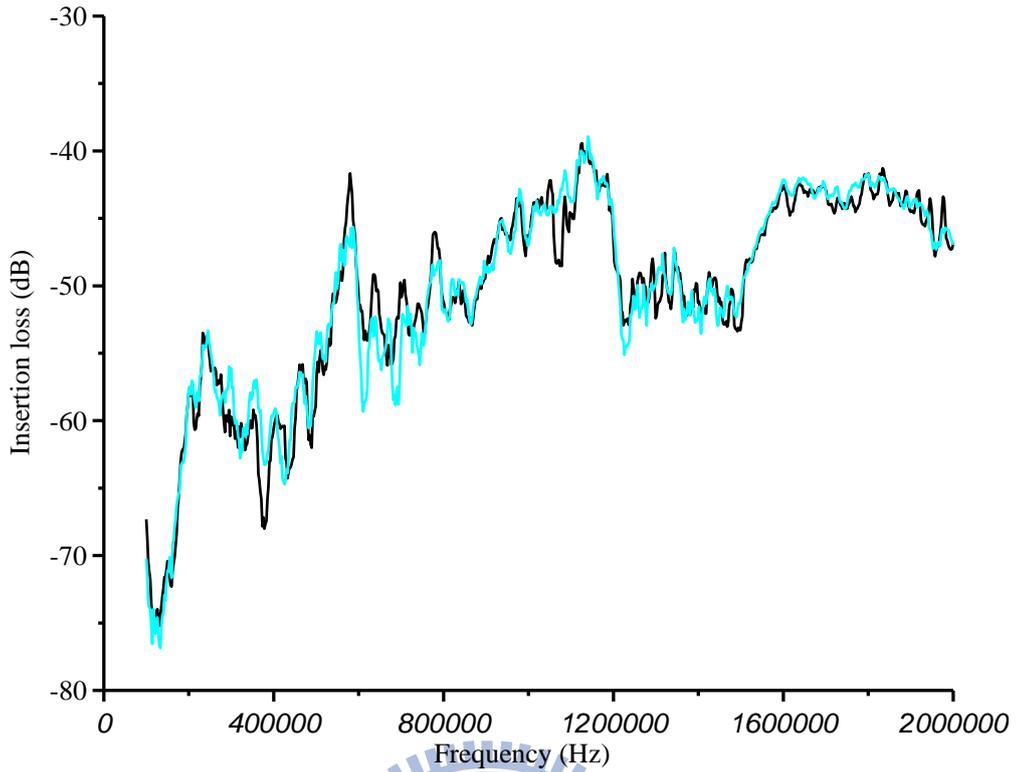


圖 4.60 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接
收端 R8 插入損失比較圖

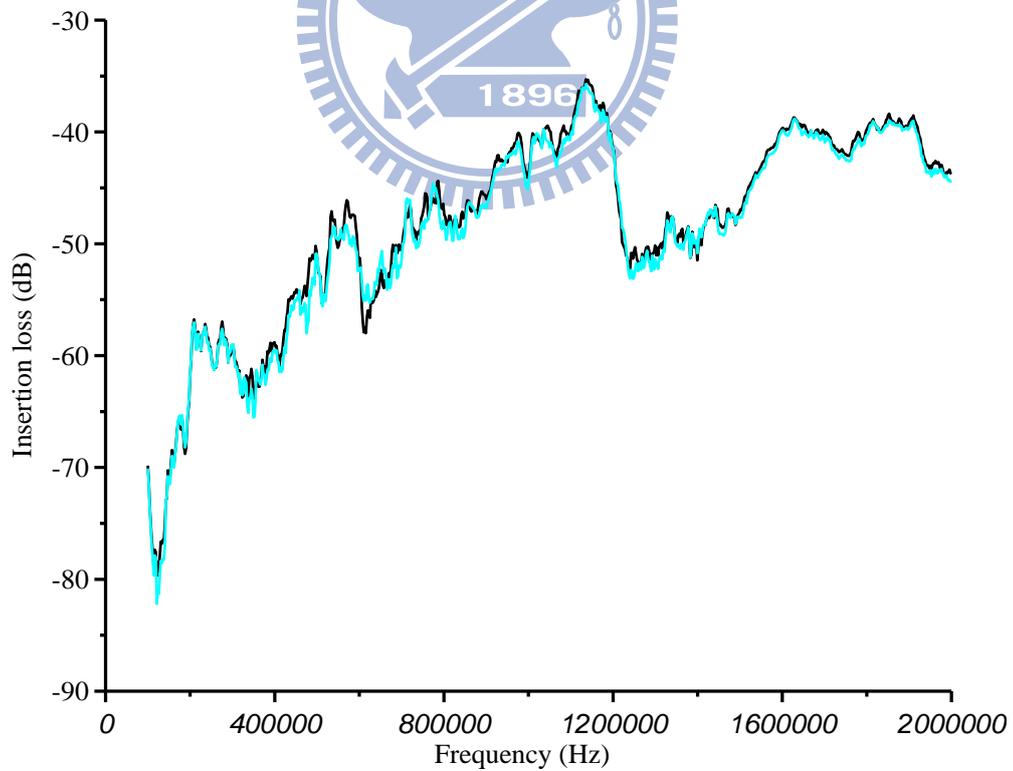


圖 4.61 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接
收端 R4 插入損失比較圖

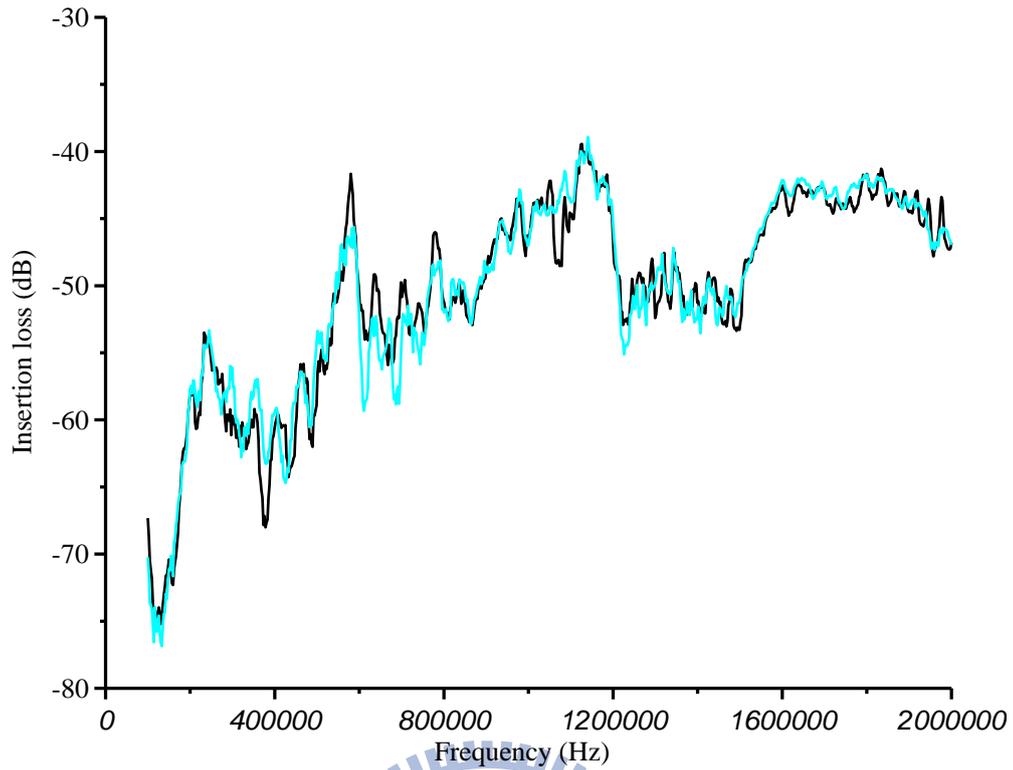


圖 4.62 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接
收端 R8 插入損失比較圖

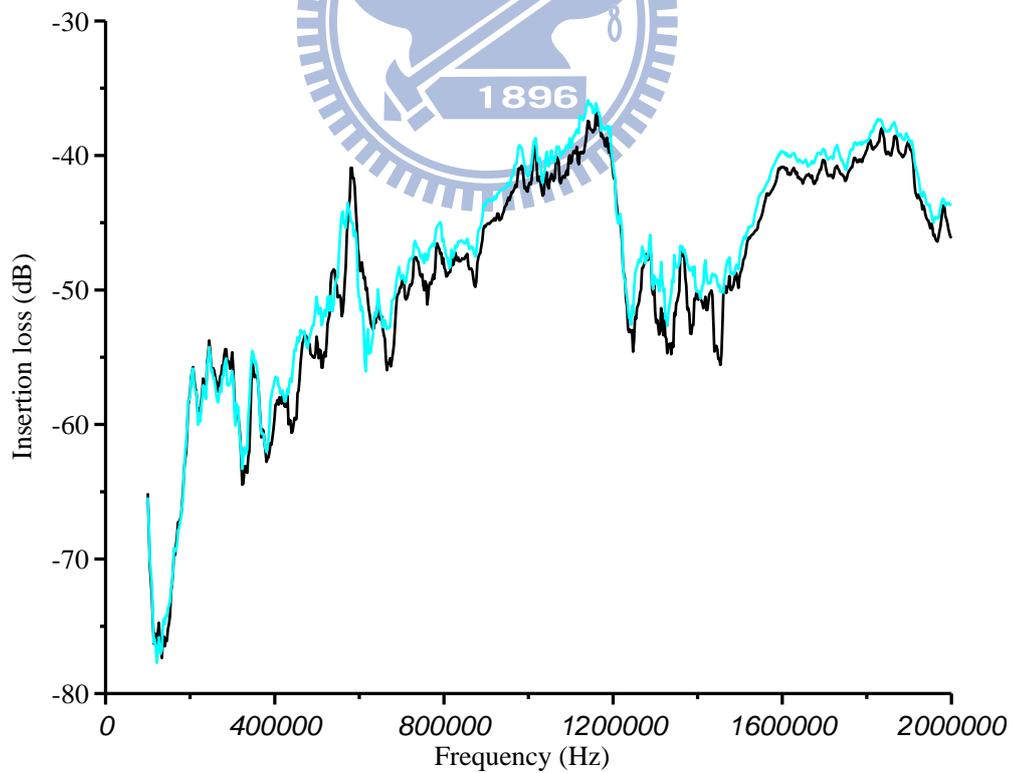


圖 4.63 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接
收端 R9 插入損失比較圖

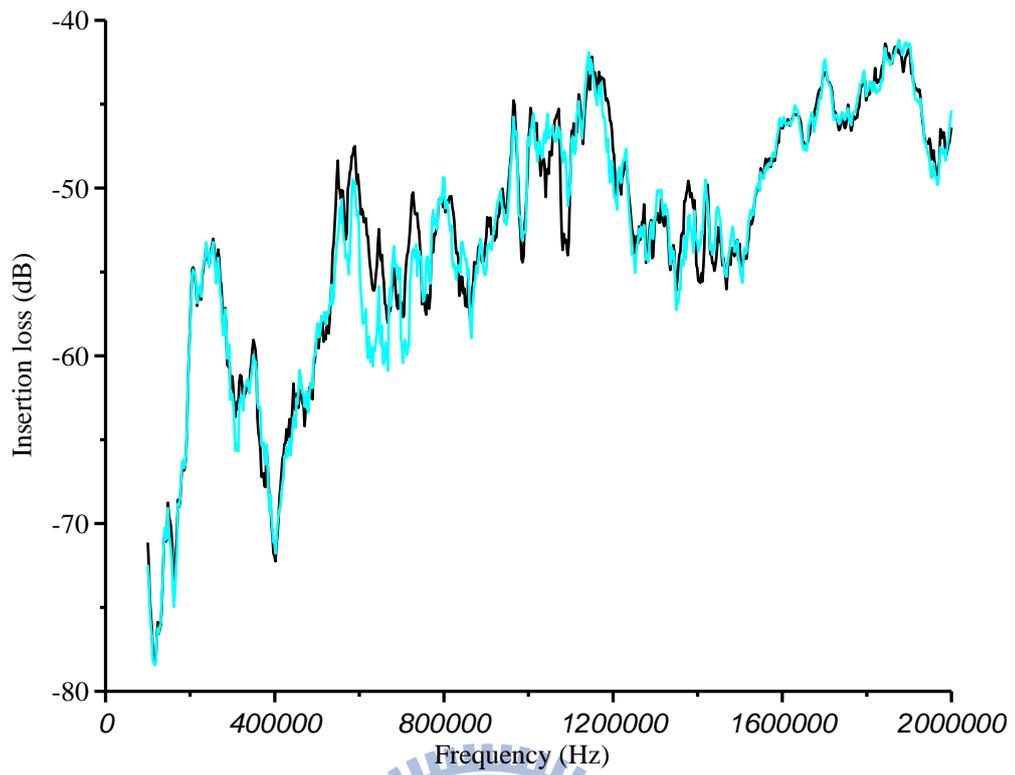


圖 4.64 流道區無水(黑色實線)與中央 25 條(全滿)流道有水(紅色實線)接收端 R13 插入損失比較圖



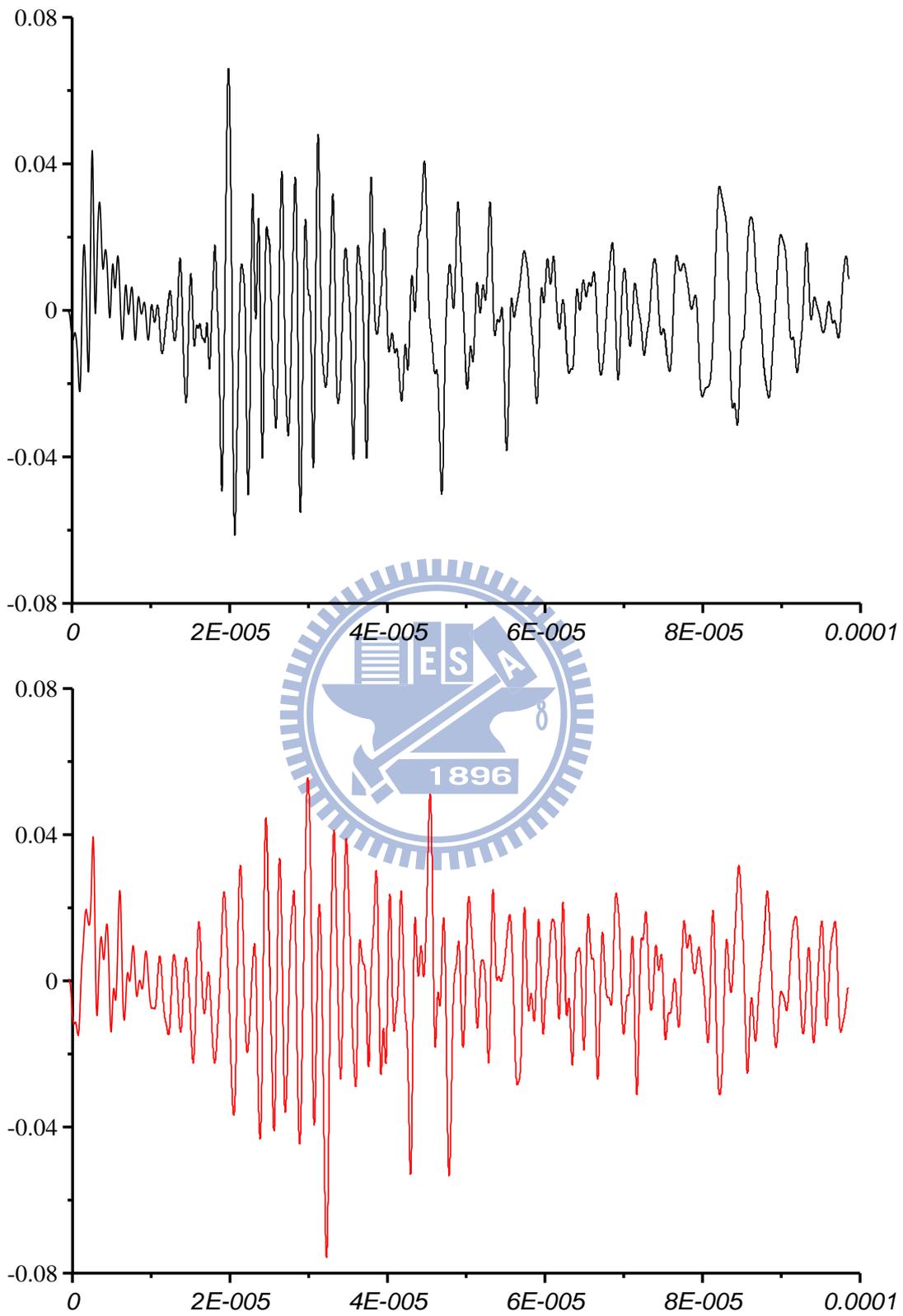


圖 4.65 寬頻訊號激發波長 5.6 mm 聲導波經由(a)無流道(b)有流道鋁合金板接收端中央 R8 量測訊號

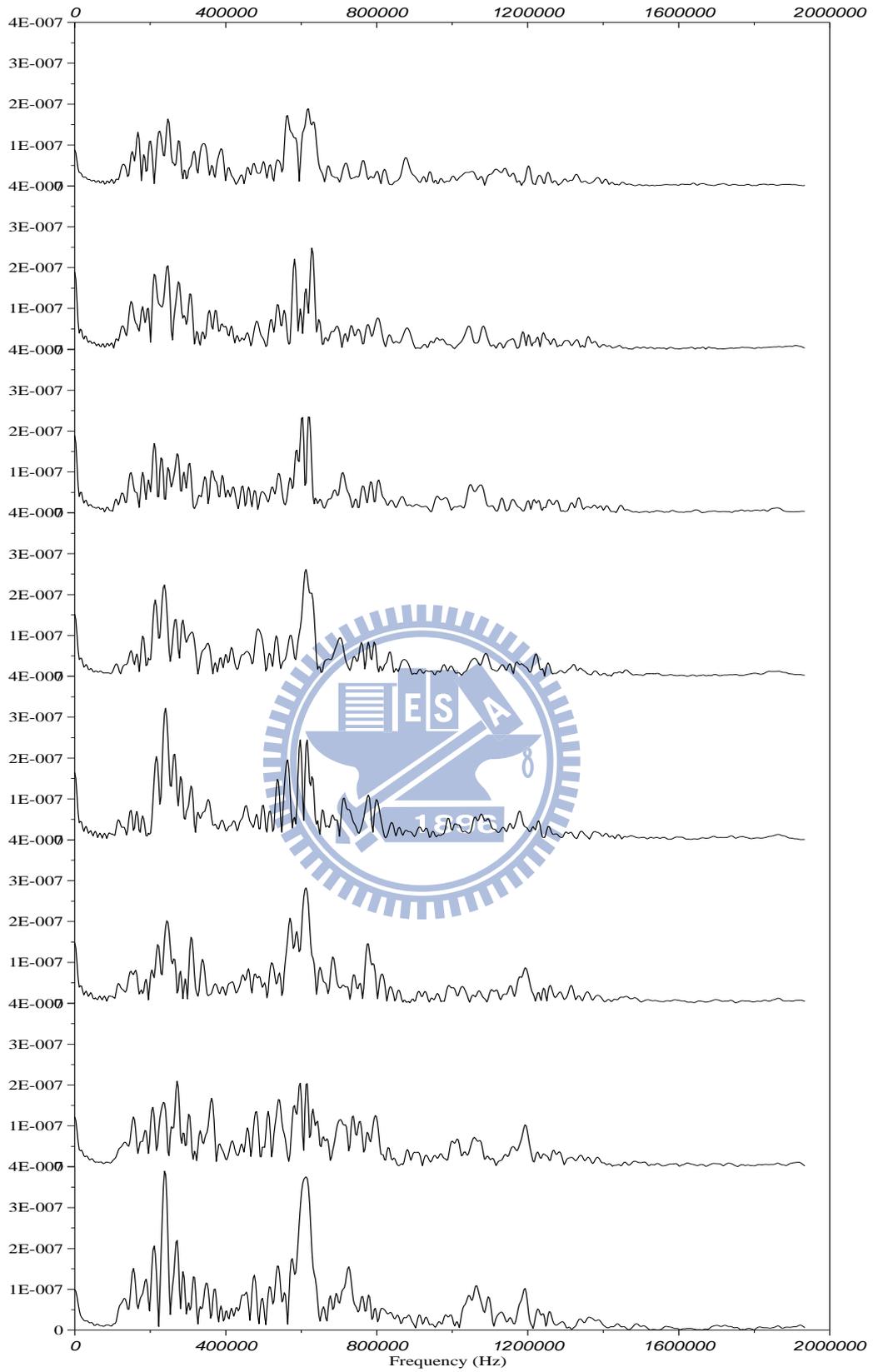


圖 4.66 無流道之鋁合金平板接收端 R1-R8 量測之頻率響應訊號

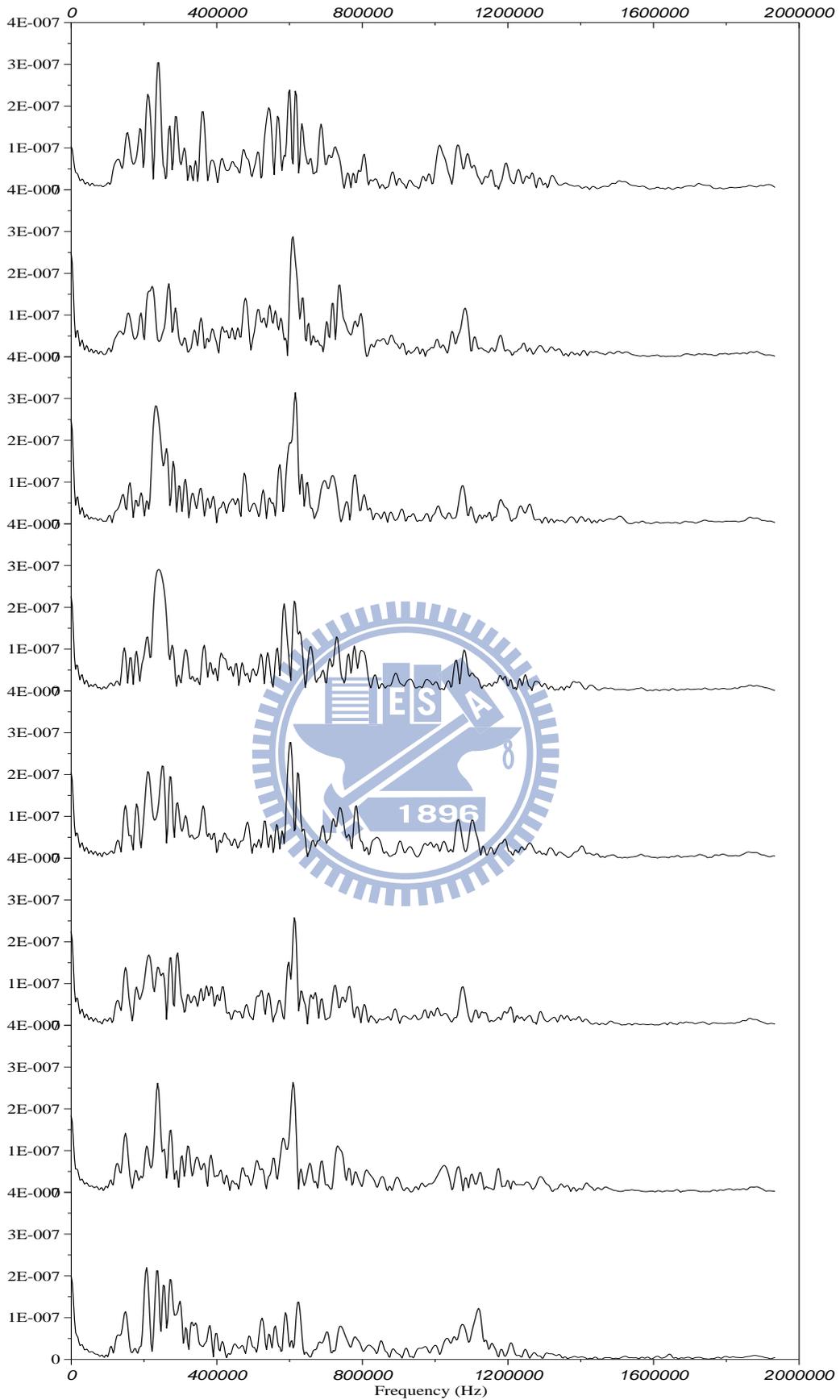


圖 4.67 無流道之鋁合金平板接收端 R9-R16 量測之頻率響應訊號

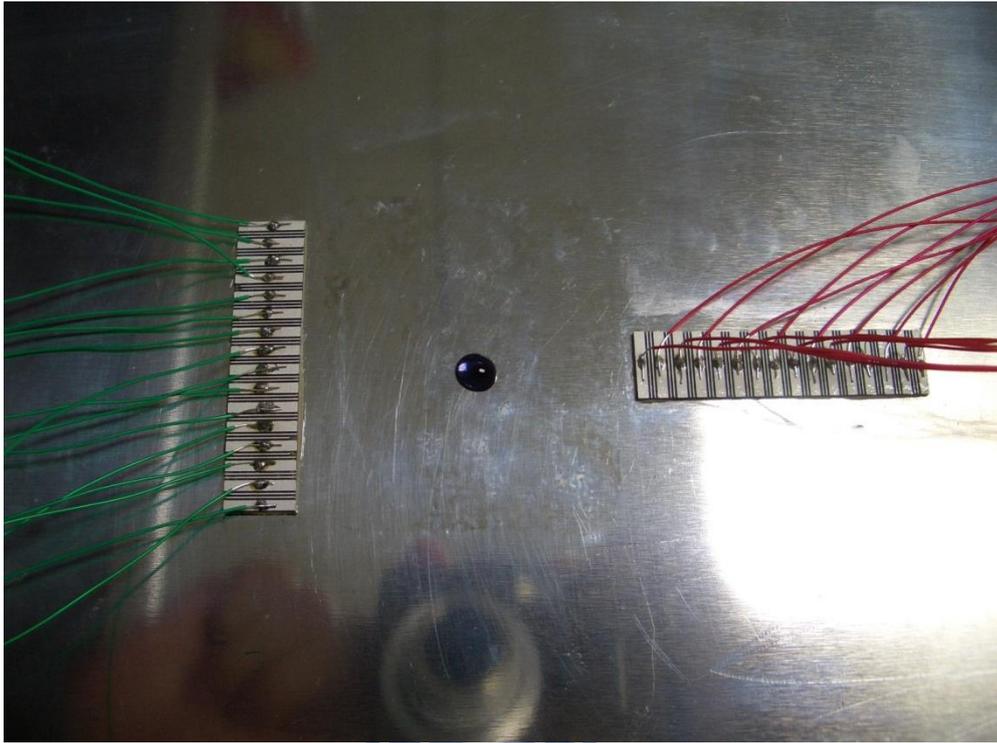


圖 4.68 鋁合金平板量測插入損失水量分布位置

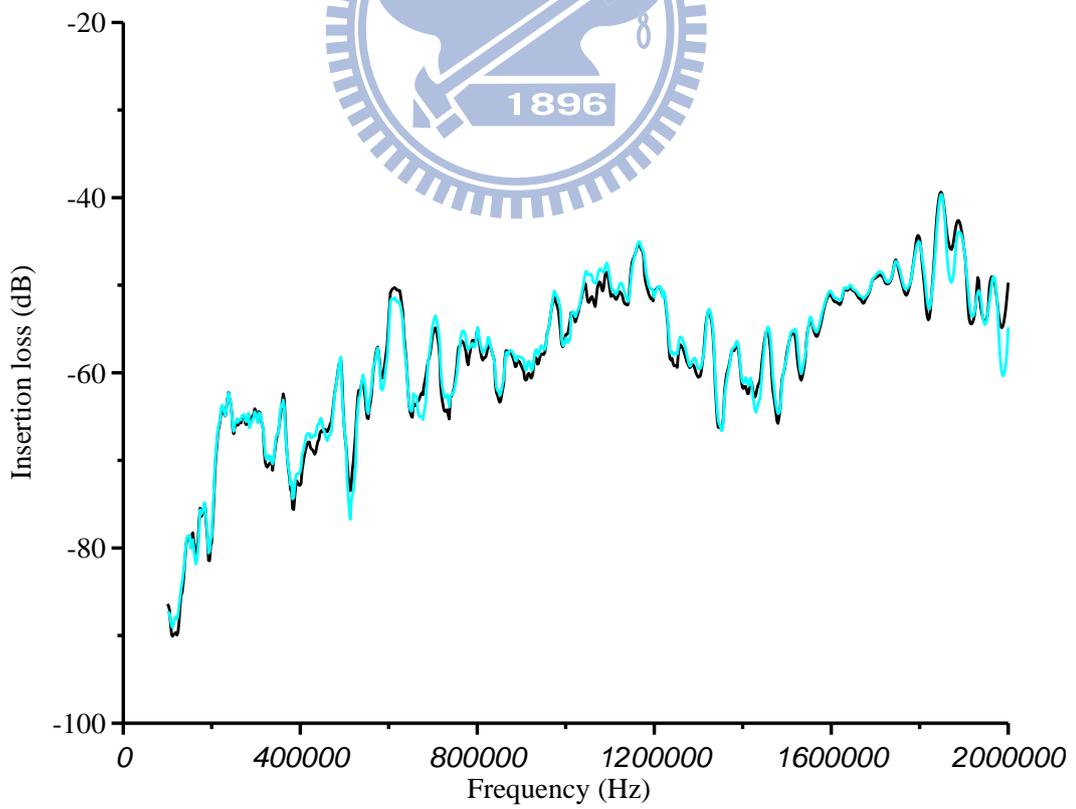


圖 4.69 接收端 R4 量測插入損失比較圖

(黑色實線為無水，紅色實線為水量 100µL)

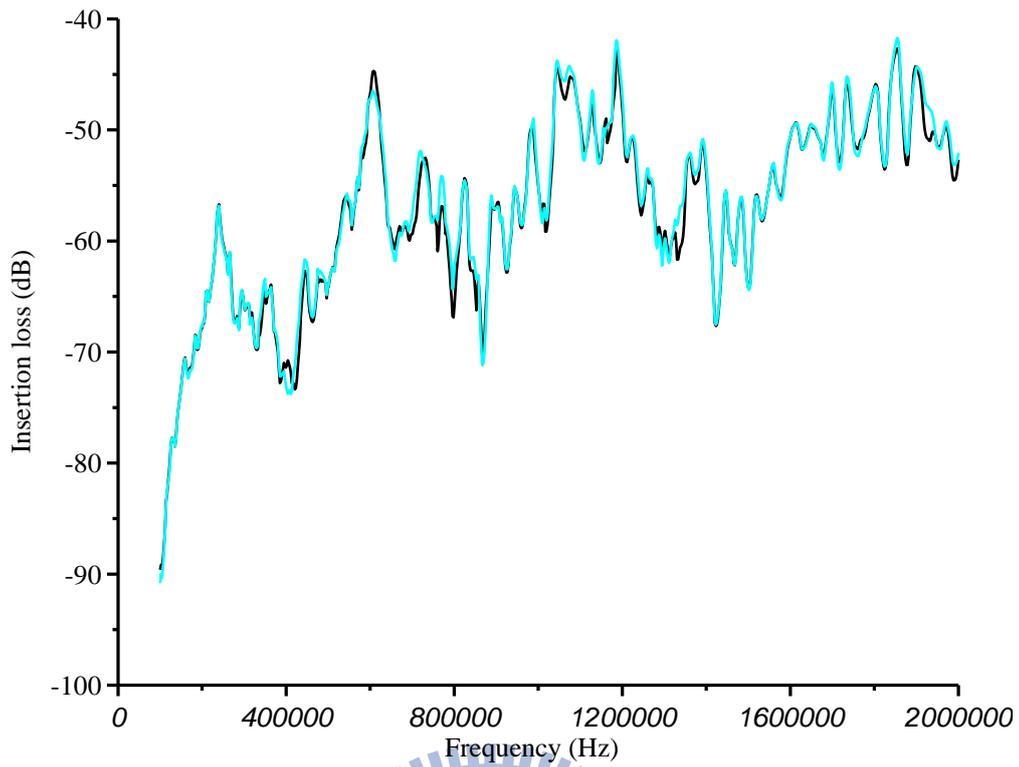


圖 4.70 接收端 R8 量測插入損失比較圖

(黑色實線為無水，紅色實線為水量 100 μ L)

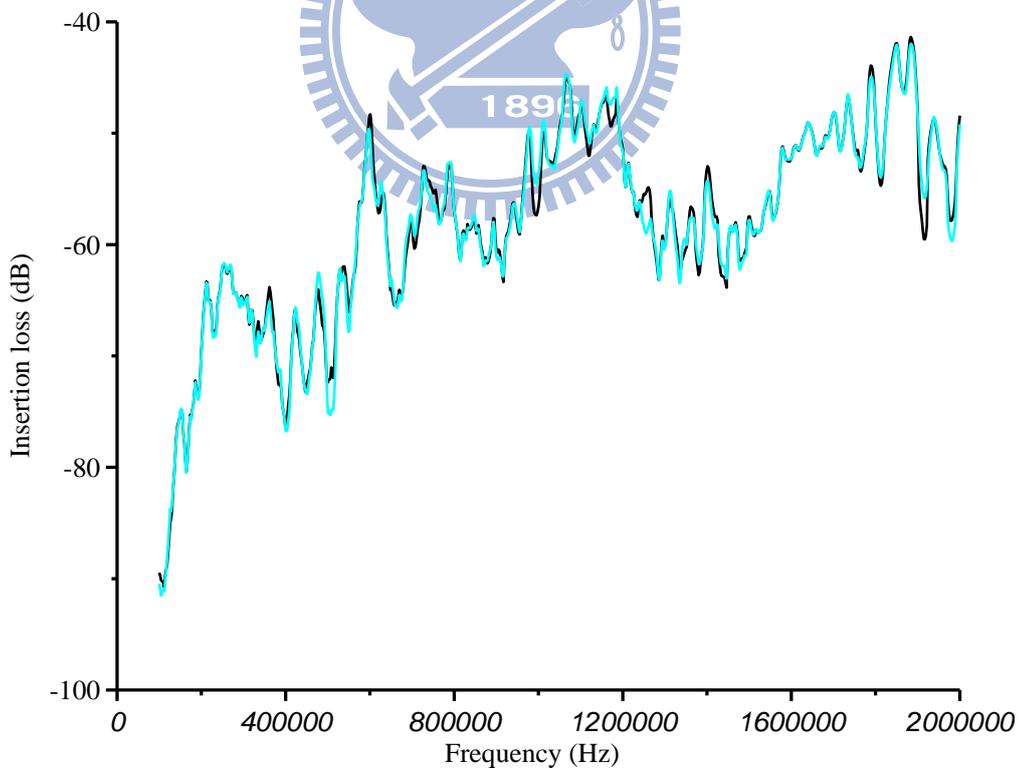


圖 4.71 接收端 R9 量測插入損失比較圖

(黑色實線為無水，紅色實線為水量 100 μ L)

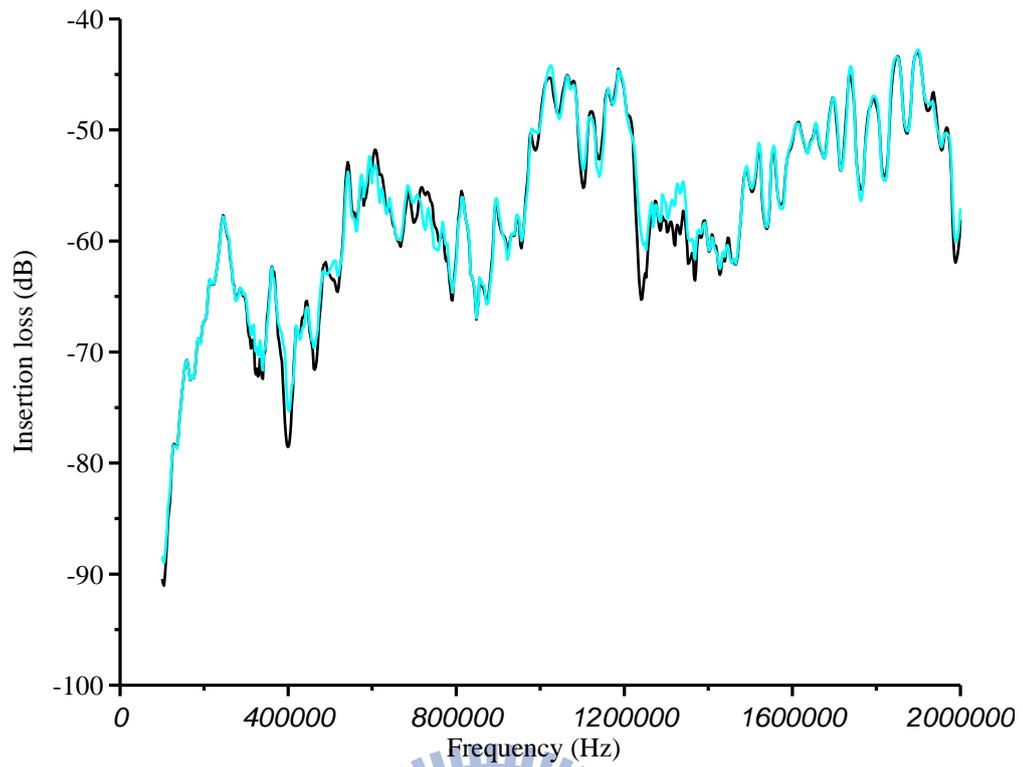


圖 4.72 接收端 R13 量測插入損失比較圖
 (黑色實線為無水，紅色實線為水量 100 μ L)

