

## 간접 힘 측정 방법과 가상 역행렬을 이용한 힘 예측

안병하\*, 심재술\*

### Forces Prediction by Indirect Force Measurement and Pseudo-inverse Technique

Byoung Ha Ahn\*, Jae Sool Shim\*

#### ABSTRACT

In the design of structure, the forces acting on the structure are key parameter for noise and vibration control. However, in the complex structure, the forces at the injection point on the structure cannot be measured directly. So, it is necessary to find out indirect force evaluation method. In this paper, forces have been measured with in-situ vibration responses and system information. And, three existing techniques of indirect force measurement, viz. direct inverse, principal component analysis and regularization have been compared. This paper shows that multi-vibration responses are essential for the precise estimation of the forces. To check these conditions, rotary compressor is adopted as test sample, because it is very difficult to measure the injection forces from internal excitation to shell. It has also been obtained that relatively higher force is transmitted through three welding paths to the compressor shell. It shows a good agreement between direct and indirect force evaluation with curvature shell and plate.

**Key Words** : Indirect Force Measurement (간접 힘 측정), Pseudo-inverse (가상 역행렬), Welding Point(용접점), ill-condition (행렬의 악조건), Rotary compressor (로터리 압축기)

#### 기호설명

$S_{aa} S_{ff}$  = auto, cross spectrum matrix  
 $H_{af}$  = matrix of frequency response function  
 $\gamma_{ij}$  = correlation of ij component transfer function  
 $n_d$  = number of averaging  
 $H$  = hermitian Transpose  
 $\lambda$  = optimization coefficient  
 $U, V$  =  $m \times m, n \times n$  unitary matrix

#### 1. 서론

일반적으로 압축기는 체적변화를 이용한 용적식 압축기가 주류를 이루고 있으며, 쉘 내부에 모터부와 일체형으로 구성되며 축은 로터와 압축기의 기계부가 일체형으로 압축부의 실린더는 쉘과 접용접으로 밀폐된 쉘에 의해서 지지된다. 따라서, 압축기에서 발생하는 진동 및 소음을 저감하기 위해 밀폐 용기 내에서 압축 기구부를 진동 특성을 고려한 용접에 의해 지지하는 내부 지지 방식을 취하고 있다. 이러한 압축기는 체적압축방식에 따라서 전달 방식에 따라 왕복동식(Recipro Type), 로터리식(Rotary Type) 및 스크롤식(Scroll Type)으

2001년 10월 11일 접수

\* LG 전자 Digital Appliance Company Laboratory

로 나누고, 가정용 에어컨에 사용되고 있는 압축기는 대부분 로터리식이다. 로터리식 압축기는 고속(약 3600 rpm)으로 회전하고, 주기적인(cyclic) 냉매 흡입, 압축 및 토출에 의하여 다양한 형태의 진동 및 소음이 발생한다. 에어컨용 1 마력급 에어컨 압축기는 지름이 약 20 cm 정도인 실린더형으로 밀폐된 압축기 공간은 두께 3.2 mm 정도의 Steel 쉘에 의해서 밀폐되도록 구성되어 있다. 압축기 구부에 의한 진동과 고압 기체 냉매의 압력 맥동에 의한 진동으로 크게 구분되어 질 수 있는데, 이 진동이 Shell과 연결되어 있는 용접점을 통하여 외부로 전파 된다. 쉘을 가진 시키는 가진 Path에 대한 정확한 기여도 분석은 저소음 압축기 개발에 필수적이나 구조적인 문제로 직접적으로 용접점을 통한 가진력을 측정하는 것이 어렵다.

계의 전달 함수와 응답(진동)으로부터 입력을 추정하는 문제는 Inverse Problem 로 알려져 왔으며 계의 고유 진동수 부근과 영점 (transmission zero) 부근에서 약간의 응답 측정 오차나 전달 함수의 오차라도 입력 예측에 큰 오차를 초래하는 것으로 연구되어 왔다<sup>(3)</sup>. 고유 진동수 부근은 계의 어느 특정 모우드의 특성이 지배적으로 나타나게 되므로 계의 전달 행렬은 그 특이치들의 상대적인 차이가 커지는 약조건(ill-condition)이 되어 행렬의 역(inverse) 계산에 오차가 포함되고, 입력 예측에 큰 오차를 유발하게 된다. 또, 영점 부근에서 전체 전달 행렬의 차수 부족(rank deficiency) 현상이 발생해 입력 추정에 오차를 발생한다. 이러한 오차를 피하기 위하여 최적의 응답 위치를 선정하거나 응답수를 늘리는 방법이 시도되고 있다. 많은 연구에 의해 기계적 구조물에 대한 간접적 입력 측정을 위한 다양한 이론이 계속 개발되어 지고 있으나 그 적용 예는 비교적 단순한 구조물인 보 (beam) 나 평판(plate)등에 그치고 있으나<sup>(3,4,5,6,7)</sup> 최근 들어 냉장고용 압축기에 있어서 3 차원 곡률에 의한 간접적 입력 측정을 연구하고 있다. 또한, 전술한 전달 함수의 약조건 문제를 회피하기 위하여 시도되는 측정점의 증가는 다수의 측정점을 동시에 측정해야만 하는 문제점을 안고 있다.

본 논문에서는 단순한 평판에서의 간단한 구조물에서 소형 압축기 쉘과 같은 비교적 복잡한 기계 구조물의 간접적 입력 측정에 대한 결과 및 직접 측정과의 비교를 기술하였고 다수 응답의 동시 측정에 따른 문제점을 해결코자 시도하였다.

아울러 실제로 에어컨용 압축기에 있어서 발생하는 문제에 대해서 용접점에 의한 진동 전달력 추정에 적용하였다.

## 2. 간접 입력 측정 이론

다중입력 다중출력 선형 시 불변계(MIMO Linear Time Invariant System)에 대하여, 응답 가속도의 크로스 스펙트럼 행렬( $S_{aa}$ )은 식(1)과 같이 주어진 계의 주파수 응답 행렬( $H_{af}$ ) 및 추정해야 할 입력 (편의상 힘) 크로스 스펙트럼 행렬 ( $S_{ff}$ )의 관계식으로 표시할 수 있다.

$$S_{aa} = H_{af} S_{ff} H_{af}^H \quad (1)$$

여기서, 위첨자 “H”는 행렬의 Hermitian Transpose 를 의미하며, 추정해야 할 입력 크로스 스펙트럼 행렬( $S_{ff}$ )은 식(2)와 같이 구할 수 있다

$$S_{ff} = H_{af}^+ S_{aa} H_{af}^{H+} \quad (2)$$

여기서, 위 첨자 “+”는 오차의 최소 자승법에 기초한 행렬의 pseudo 역 행렬을 의미한다. 전술하였듯이 식(2)의 역 행렬 수행에 있어 계의 공진점 부근 및 영점 부근에서 차수 부족에 의한 오차가 발생하게 되는데 이러한 문제점을 회피하는 대표적인 기법들은 계의 고유치를 구하고 계의 추정시에 포함된 오차보다 작은 고유치를 버리는 주성분 분석법(Principal Component Analysis;PCA)<sup>(5)</sup>과 입력 에너지의 크기에 제한을 두는 적절화 방법 (Regularization Method)<sup>(3)</sup>을 들 수 있다. 우선 특이치 분석에 의한 주성분을 가려 행렬의 약조건을 개선 시키는 주성분 분석법은 다음과 같다. 어떤 주어진 계의  $m \times n$  전달 행렬( $H$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = USV^H \quad (3)$$

여기서,  $U$  는  $m \times m$  unitary 행렬,  $V$  는  $n \times n$  unitary 행렬을 나타내고,  $S$  는  $H$  의 차수가  $r$  인 경우 ( $r \leq \min\{m, n\}$ ),  $r \times r$  정방 행렬  $T$  및 zero 행렬 ( $(m-r) \times (m-r)$ ) 또는

$(n - r) \times (n - r)$  )로 다음과 같이 표현된다.

$$S = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

단, 행렬  $T$  는 다음과 같이 특이치를 내림차순으로 (즉  $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_r$  ) 정리하여,  $U$  및  $V$  행렬을 구할 수 있다.

$$T = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_r) \quad (5)$$

식(3)의 행렬  $H$  의 역행렬을 구하면서 만약 식(5)의 특이치들이 어떤 값 (보통 계의 측정에 따른 오차 한계 값,  $e$  ) 보다 작아지게 되면(즉,  $s_i \leq e$  ) 그 보다 작은 값들을 모두 0 으로 한 행렬  $K$  로부터  $H$  의 pseudo 역행렬을 아래의 식(6)과 같이 구한다.

$$H^+ = VS^+U^H \quad (6)$$

$$\text{단, } S^+ = \begin{bmatrix} K^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\Lambda = \text{diag}(s, s_2, \dots, s_{i-1}, 0, \dots, 0) \quad (8)$$

최적화 방법은 식(2)로 부터 구해지는 입력의 에너지 크기를 제한하기 위해서, 식(4)에서 구한 특이치의 최소치가 오차 한계값  $e$  보다 작아지게 되면 특이치 행렬에 최적화 상수를 더한 행렬로부터  $H$  의 pseudo 역 행렬을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$H^+ = V\Lambda^{-1}U^H \quad (9)$$

$$\text{여기서, } \Lambda = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \lambda I \quad (10)$$

식(10)에서 행렬  $I$  는 크기가  $m \times n$  이고 대각선 entry 가 1 인 행렬이다. PCA 나 최적화 방법 모두 주어진 계의 전달함수의 오차를 추정해야 하는데 실험적으로 전달함수를 얻을 때 함께 얻을 수 있는 상관 함수에서 다음과 같이 구할 수 있다<sup>(8)</sup>.

$$e = \text{Cond}(H) \frac{\|\delta H\|}{\|H\|} \quad (11)$$

여기서,  $\|\cdot\|$  는 행렬의 norm operator,  $\text{Cond}(\cdot)$  는 행렬의 condition number 를 의미한다. 또한  $\delta H$  행렬은 상관 함수로부터 그 entry 를 다음의 식

(12)로 표현할 수 있다.

$$\delta H_{ij} = 3 \sqrt{\frac{1 - \gamma_{ij}^2}{2n_d \gamma_{ij}^2}} \quad (12)$$

여기서  $\gamma_{ij}$  는 전달함수  $ij$  번째 요소에 해당하는 상관함수의 값이며,  $n_d$  는 주파수 분석에서의 Averaging 횟수이다. 최적화 방법은 최적화 상수( $\lambda$ )를 정하면서 식(11)로 주어진 오차에 최적화 상수( $\lambda_0$ )를 곱한 수를 이용한다.

$$\lambda = \lambda_0 \text{Cond}(H) \frac{\|\delta H\|}{\|H\|} \quad (13)$$

전술한 전달 행렬을 실험적으로 구함에 있어서의 문제는 Cross Spectrum 을 구하기 위해 동시에  $m$  개의 응답을 측정 주파수 분석을 행하여야 한다는 점이다. 통상 산업체나 학계에 널리 보급되고 있는 2 Channel 주파수 분석기로는 접근이 불가능하다고 볼 수 있는데 기준점(Reference Point)을 이용 동시 응답을 측정할 효과를 노리고자 한다. 일반적으로  $i$  번째 측정점과  $j$  번째 측정점과의 Cross Spectrum ( $S_{ij}$ )는 아래와 같은 식(14)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{ij} &= H_{ij} S_{jj} \\ &= \frac{H_{ij}}{H_{rj}} H_{rj} S_{jj} \\ &= H_{ir} S_{rj} \end{aligned} \quad (14)$$

식(14)에서 Cross Spectrum ( $S_{ij}$ )는 기준점  $r$  과  $i$  및  $j$  측정점과의 전달함수( $H_{ir}$ ) 및 Cross Spectrum ( $S_{rj}$ )으로 부터 구할 수 있게 된다. 따라서, 2 Channel 주파수 분석기를 통하여 주어진 기준점  $r$  과 측정점들과의 전달함수 및 Cross Spectrum 을 구하고 측정점들 사이의 Cross Spectrum 은 식(14)로 부터 구할 수 있게 되어 모든 측정점들을 동시에 측정 주파수 분석을 행할 필요가 없게 된다. 여기서, 주의해야 할 점은 기준점은 실험이 행해지는 동안 고정되어야 하며 입력과 응답의 상관관계가 충분히 높을수록 좋은 결과를 얻을 수 있다는 점이다.

### 3. 실험 및 실험 결과

#### 3.1 실험 장치

이론의 타당성을 검증하기 위해서 단순한 평판과 완만한 곡률을 포함한 빈 반구에 대해서 실험을 실시하였고, 평판과 곡률을 포함한 실제 구조물인 Compressor 셸과 내부 압축 기구부를 연결한 용접면에서의 진동 가진력을 예측하는 실험장치를 구성하였다.

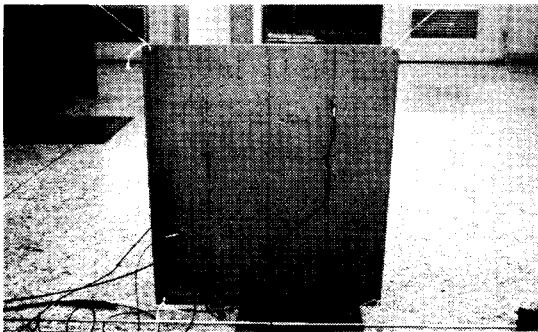
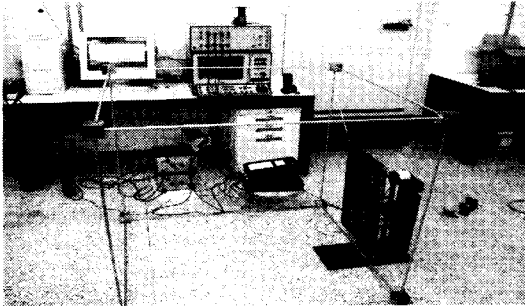
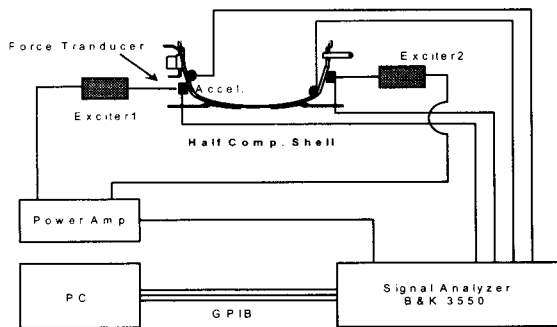


Fig. 1 Geometry of Plate



(a) Plate



(b) Shell

Fig. 2 Experimental apparatus of Plate and Shell

평판은 50x60x3.2[cm]이며, Boundary 조건으로 free-free 상태에서 실험을 수행하였다. 가진 조건은 두 위치에 랜덤력을 동시가진 하였으며, 응답 조건은 다양한 실험을 위하여 13 개의 위치에서 측정하였다. 소형 가진기(Mini Shaker)를 체결하고 Exciting Force 및 진동 응답을 측정하여 평판 실험과 곡률을 가진 반구 실험에 대해 가진력의 간접 측정 결과와 직접 측정 결과의 비교를 피하였다. 실험 장치의 개략도는 그림 1, 2, 3 에 도시하였으며 주파수 분석기는 B&K3550, 소형 가진기는 B&K4810, 힘센서는 B&K8200 (Conditioning Amplifier B&K 2635), Power Amplifier 는 B&K 2706, 진동 측정에 이용한 가속도계는 PCB JM353 (Power Supply PCB 480B)을 이용했다. B&K 3550 분석기는 IEEE-488 Interface 를 통해 컴퓨터로 Data 를 전송 MatLab 으로 작성한 Program 으로 분석 하였다. 또, 실제 Compressor 에 압축 기구부를 체결하고 토출압력[2.14 MPa ], 흡입압력[0.67 MPa ]을 유지하도록 실제 사이클에 장착하여 세개의 용접점에 전달되는 힘을 측정하였다. 가진력은 용접 위치 세 곳에서 응답력은 Compressor 의 응답점은 22 개 측정 점으로 부터 응답을 측정하였다.

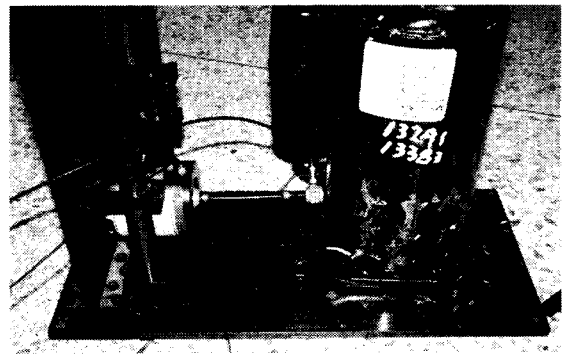


Fig. 3 Experimental apparatus of Compressor

#### 3.2 실험 결과

##### 3.2.1 가진력 측정 결과

실험은 크게 평판에서 실험의 오차나 전달행렬의 수정을 고려하지 않은 Direct 방법과 수학적인 방법으로 전달행렬을 개선하기 위해 사용된 Regularization, PCA 방법들을 비교 실험하였다. 또한 곡률을 포함한 반구형 셸에서 각 방법들이 미치는 영향도를 상세하게 분석하였다. 그림 4 에서

공진점 및 영점 부근에서 간접 입력 측정은 직접 입력 측정치와 비교할 때 큰 오차를 보여주고 있다. 그림 5 및 6 은 앞서 언급한 주성분 분석법과 최적화 방법으로 시도한 결과를 도시했다. 그림 5, 6 에서, 두 방법 모두 직접 역행렬을 취하는 방법보다 공진점 근방에서의 추정 오차가 줄어들고 있음을 보여주고 있다. 그러나 주성분 분석법 및 최적화 방법은 특정 주파수 영역에서 (예를 들어 80 Hz 및 250 Hz) 큰 오차를 발생하고 있음을 알 수 있다. 주성분 분석법 및 최적화 방법은 오차의 크기를 줄일 수 있으나 타 주파수 영역 대비 큰 오차를 보여 주고 있다.

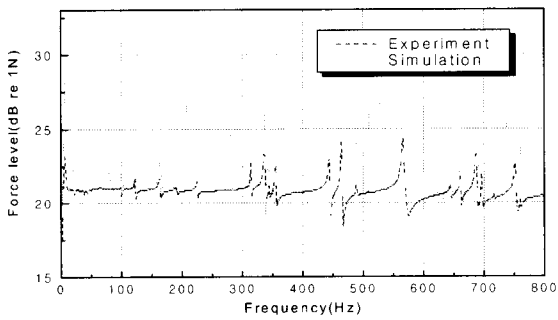


Fig. 4 Direct Method (2 Input 2 Response)

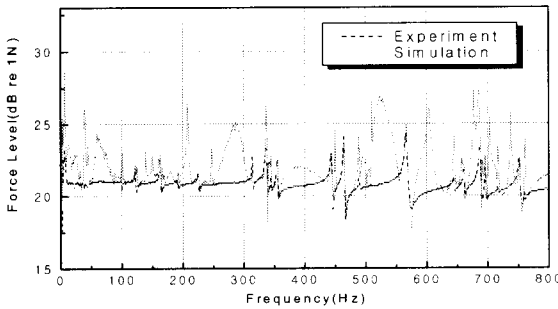


Fig. 5 Regularization Method (2 Input 2 Response)

이는 입력 갯수와 응답 갯수가 같을때 공진주파수 대역이나 영점 대역과는 별도로 전달행렬의 차수가 어느 주파수 영역에서 문제가 됨을 보여주고 있다. 따라서 이러한 대역에서의 추정 오차 개선은 최적 응답 위치의 선정이나 응답 갯수를

늘리는 방법으로 개선해야 함을 보여주고 있다.

그림 7 에서 응답 개수를 늘리는 방법에서는 간접 입력 측정 결과가 직접 입력 측정 결과와 거의 모든 대역에서 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 특히 공진점 부근에서의 추정 오차도 크게 감소하고 있음을 알 수 있다.

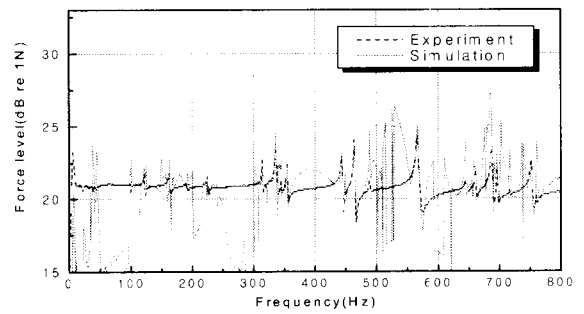


Fig. 6 PCA Method (2 Input 2 Response)

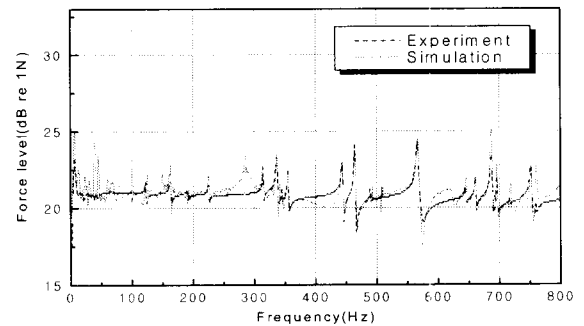


Fig. 7 Direct Method (2 Input 4 Response)

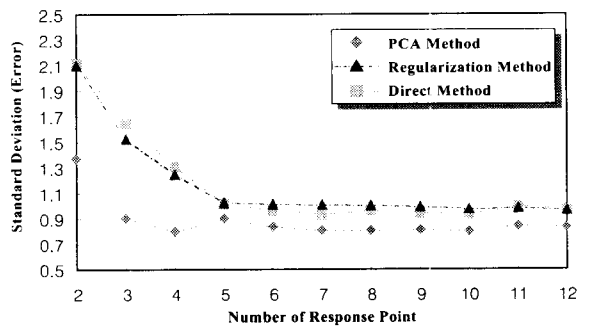
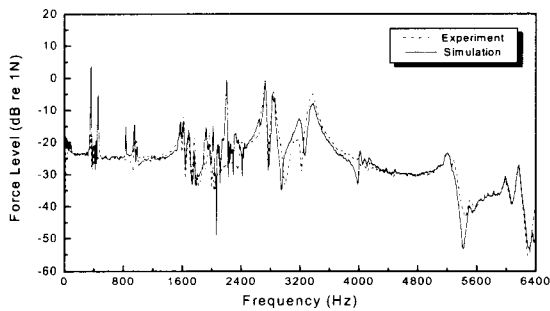
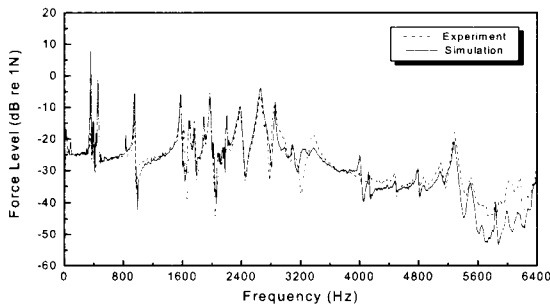


Fig. 8 Error Comparison

그림 8 은 응답 개수에 따른 오차를 계산하였다. 간접 입력 측정에 있어서 영점부근의 영향은 실제 중요하지 않으므로 공진대역의 크기 중심으로 오차계산을 하였고, 오차 지수로서 실제 입력한 힘과 진동응답에서 구한 힘과의 표준편차를 고려하였다. 그림 7, 8 에서, 추정 오차를 줄이는 가장 정확한 방법은 응답의 개수를 늘려야 함을 보여 주고 있다. 또한 PCA 방법에서 알 수 있듯이 응답점이 4 개 이상에서부터는 오히려 과도한 응답점에 의해서 야기된 실험 Random 오차를 증가시키게 되므로 오차를 최소화하기 위해서는 최적의 응답점을 선정해야 함을 알수 있다. 그림 9, 10, 11, 12 는 곡률을 포함한 반구 셸의 간접 입력 측정을 수행한 결과이다.



(a) Direct Method (2 Input 2 Response) , F1

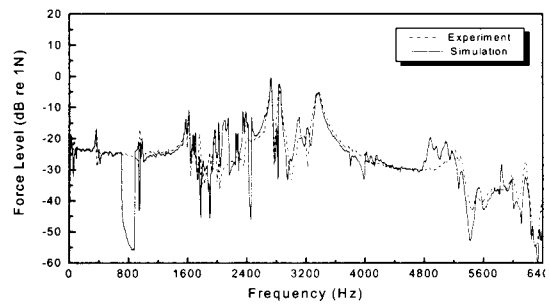


(b) Direct Method (2 Input 2 Response) , F2

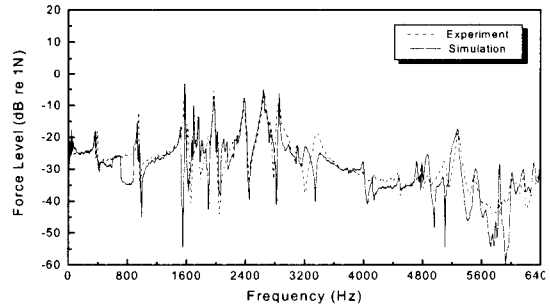
Fig. 9 Force Prediction of Shell by Direct Method

그림 9, 10, 11, 12 는 곡률을 포함한 반구 셸의 간접 입력 측정을 수행한 결과이다. 그림 9 에서 간접 입력 측정결과가 평판에 비교해서 비교적 공진점 부근이나 영점 부근에서도 잘 일치함을 볼 수 있다. 이것은 간접 입력 측정에서 가장 중요

한 요소인 전달행렬을 구하는데 있어서 높은 강성과 에너지 전달이 쉬운 반구형 셸이 평판보다 더 정확한 결과를 얻었음에 기인한다고 볼 수 있다. 그림에도 불구하고 100 Hz 와 2300 Hz 에 근접한 공진 대역에서 과도한 힘 예측이 수행되었으며 부분적으로 영점 부근에서 힘 예측에 오차를 수반함을 볼 수 있다. 그림 10 및 11 은 앞서 평판에서 분석한 같은 방법으로 적절화 방법과 주성분 분석법으로 시도한 결과를 도시했다.

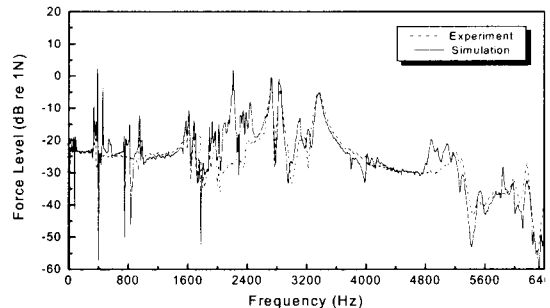


(a) Reg. Method (2 Input 2 Response), F1

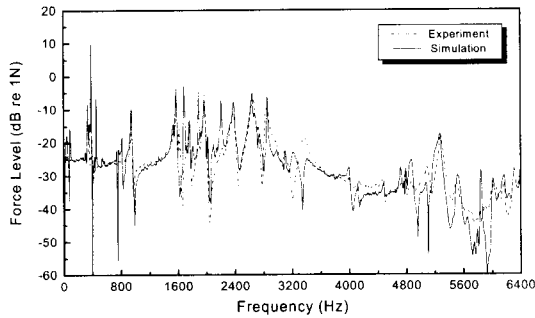


(b)Reg. Method (2 Input 2 Response), F2

Fig. 10 Force Prediction of Shell by Reg. Method



(a) PCA Method (2 Input 2 Response), F1



(b) PCA Method (2 Input 2 Response), F2  
Fig. 11 Force Prediction of Shell by Direct Method

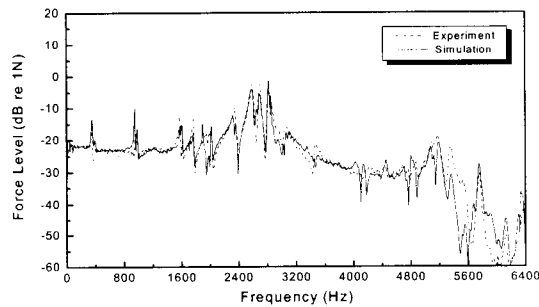


Fig. 12 Direct Method (2 Input 4 Response), F1

적절화 방법과 주성분 분석법은 전달 행렬의 수학적 수정없이 구한 간접 입력 측정방법 보다는 공진점 부근에서 좋은 결과를 얻을 수 있지만 영점 부근에서 많은 오차를 수반할 수 있음을 볼 수 있다.

그림 12 에 응답 개수를 증가하여 간접 입력 예측을 도사하였다. 가진 개수와 응답 개수를 동일하게 고려한 결과보다 응답 개수를 늘려 계산한 간접 입력 예측이 아주 우수한 최소 오차를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 평판 실험과 곡률을 고려한 반구형 셸에 대한 실험 결과를 정리하면 압축기의 셸과 같은 비교적 복잡한 구조물에 대해서도 간접 입력 측정을 상당한 신뢰성을 갖고 시도할 수 있으며 특히 공진점이나 영점 부근에서의 추정 오차는 측정점의 갯수를 증대시킴으로써 크게 개선시킬 수 있음을 알 수 있었다. 본 본문에서 시도한 Cross Spectrum 추정은 2 Channel 주파수 분석기로도 다수의 응답에 대한 추정이 가능하므로 응답

갯수의 증가는 단지 추정 시간의 증대만을 초래할 뿐 별도로 Hardware System 의 변경을 요구하지는 않는다. 압축기 셸과 같은 비교적 복잡한 구조물에 대해 최적 응답의 위치 결정은 Finite Element Model 로 상당한 시간을 투자하여 결정할 수도 있다. 그러나 실제 산업 현장에서 추정 오차의 개선은 실험자의 경험에 기초하여 응답 갯수를 늘리는 것이 더욱더 효과적이라고 볼 수 있으며 반구형 셸에 대한 실험 결과는 이러한 사실을 잘 뒷받침하고 있다.

### 3.2.2 냉매 하중하의 용접점 분석

냉매하의 압축 기구부를 체결하고 흡입구와 토출구를 사이클에 장착하여, 토출 압력 및 흡입 압력을 에어컨 상태와 동일한 상태로 유지하였다. (토출 압력 [21.6 Kg/cm<sup>2</sup>], 흡입압력[6 Kg/cm<sup>2</sup>]) 유지하면서 압축 기구부 및 전동기를 지지하는 3 개의 용접점을 통하여 셸로 전달되는 힘을 측정하고자 하였다. 압축 기구부가 체결되지 않고 빈 셸에 Mini-Shaker 로 셸을 가진시키는 경우와 달리 이러한 냉매하의 압축시 셸에 전달되는 힘의 직접 측정은 거의 불가능하다고 볼 수 있다. 3 개의 용접점으로 전달되는 힘의 추정을 위해 응답 진동 측정점 갯수는 22 개로 하였으며 각각의 용접점에서 응답점들과의 전달함수는 실험을 통하여 측정하였다.

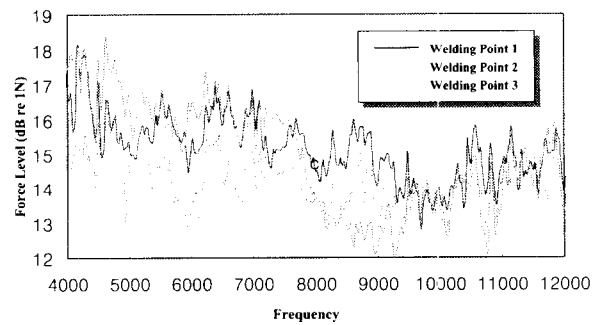


Fig. 13 Forces of Welding Points

그림 13 은 냉매하에 셸로 전달되는 힘을 진동 응답으로 부터 간접 측정한 결과를 보여주고 있다. 각 용접점에서 서로 다른 크기의 작용 힘이 나타나 있다. 위의 결론으로 서로 다른 크기의 힘이 셸에 가해지고 있으며 여기서 가장 힘이 크게 작용하는 부분의 용접부의 위치를 변경하거나 내

부 실린더 형상을 교체하여 소음 저감을 시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 압축기 셸과 같은 비교적 복잡한 기계 구조물의 간접적 입력 측정에 대한 결과를 기술하였고 다수 응답의 동시 측정에 따른 문제점을 해결코자 기준점을 이용한 전달함수의 측정 방법을 제시하였다. 반구형 셸에 대한 실험 결과, 압축기의 셸과 같은 비교적 복잡한 구조물에 대해서도 간접 입력 측정을 상당한 신뢰성을 갖고 시도할 수 있으며, 특히 공진점 이나 영점 부근에서의 추정 오차는 평판 실험 및 곡률을 포함한 Shell 실험의 결과 측정점의 갯수를 증대시킴으로써 크게 개선 시킬 수 있음을 보여주었다. 실제 냉매 하중하의 셸에 가해지는 용접점의 하중 크기를 예측할 수 있었으며 특히 5000Hz 대역의 진동이 전체 셸에 가진되는 기여도를 분리할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. P. May, P. Davies and J. S. Bolton, "Correlations Between Subjective and Objective Evaluations of Refrigerator Noise," Proceedings of Inter-Noise 96, Liverpool, UK, pp. 2257-2260, 1996.
2. James F. Hamilton, Measurement and Control of Compressor Noise, Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 1988.
3. J. K. Lee, "A Study on Indirect Force Measurement in Structure," Ph. D. Dissertation, KAIST, Korea, 1993.
4. J. A. Fabunmi, "Effects of Structural Modes on Vibratory Force Determination by the Pseudoinverse Technique," AIAA Journal, Vol. 24 (3), pp. 504-509, 1986.
5. R. E. Powell and W. Seering, "Multichannel Structural Inverse Filtering," Transactions of ASME, Vol. 106, pp. 22-28, 1984.
6. T. J. Roggenkamp and R. J. Bernhard, "Indirect Measurement of Multiple Random Force Spectra," Proceedings of Inter-Noise 93, pp. 881-883, 1993.
7. G. X. Zhang and J. C. Pascal, "Characterization of Partially Coherent Random Forces by Means of PCA," Proceedings of Inter-Noise 96, pp. 2873-2876, 1996.
8. J. S. Bendat and A. G. Piersol, Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley&Sons, NewYork, 1980.