

## 직접구동형 가진기의 개발 및 성능평가

### Development of a Direct Drive Type Exciter and Performance Evaluation

김 오 복\*      박 정 모\*\*      김 석 현\*\*\*  
Kim, O-Bok    Park, Jung-Mo    Kim, Seock-Hyun

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to design and manufacture a vibration exciter, which can be used in the education and research for the vibration engineering. For this purpose, a direct drive type vibration exciter is developed, which consists of a motor, an inverter, eccentric rotating sleeves and two excitation plates. Developed exciter is tested on some dynamic characteristics to evaluate its excitation performance. Test results show that the developed machine can excite bodies on the horizontal vibrating plates in x,y direction by the constant displacement amplitude in the frequency range below 50Hz, which confirms that the exciter can be used as a vibration testing machine in the low frequency range.

키워드 : 직접구동형 가진기, 일정변위가진, 가진성능

Keywords : *direct drive type vibration exciter, constant displacement excitation, excitation performance*

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구의 목적

가진기는 기계시스템의 연구/개발 과정에서, 시험 모델의 동적 응답특성, 제품의 재질이나 구조물의 물리적 특성치를 구하는 진동시험에 광범위하게 사용될뿐만 아니라, 자동이송장치, 자동분리기등 자동화 생산라인에서도 필수적으로 이용되는 기계이다. 가진기에는 가진방법에 따라 직접구동형(direct drive type), 불평형 회전체의 원심력을 이용하는 반력형(reactive type), 스피커 원리를 이용하는 일렉트로다이나믹형(electro - dynamic type), 유압및 공압을 사용하는 유/공압식(hydraulic/phneumatic type), 자력

을 이용하는 일렉트로마그네틱형(electro-magnetic type)등 다양한 종류가 있다.[1] 직접구동이나 반력형은 비교적 저주파수영역에서 사용되며, 유공압식은 저주파수영역에서 큰 가진력을 필요로 할 때 사용된다. 일렉트로다이나믹형이나 일렉트로마그네틱형은 고주파수영역에서의 가진에 적합하다. 본 연구에서는 진동관련 교육 및 연구용으로 사용할 수 있는 저주파대역용 가진기의 제작을 목적으로 한다. 이를 위하여 직접구동형 가진기를 설계/제작하고 그 성능을 실험적으로 확인하여 사용범위를 평가한다. 제작된 직접구동형 가진기는 회전하는 편심디스크(슬리브)의 편심량에 따라 일정한 변위진폭으로 주파수를 변화시키면서 가진할 수 있는 일정변위가진형(constant displacement excitation type)이며, 수평면상에서 x,y 양방향으로 가진할 수 있도록 하였다. 또한, 여러가지 편심량을 갖는 회전슬리브를 쉽게 교환토록 함으로써, 요구되는 가진레벨을 조정할 수 있도록 설계/제작하였다. 복잡하지 않은 메커니즘으로 정비

\* 군산직업훈련원 교사

\*\* 강원대학교 정밀기계공학과 석사과정

\*\*\* 강원대학교 정밀기계공학과 교수, 공학박사

나 개선이 용이하고, 비교적 저렴한 비용으로 제작할 수 있는 장점이 있다. 가진기 구조의 1차 고유진동수를 사용주파수대역보다 훨씬 높게 제작함으로써 작동중 가진기의 공진에 의한 기능상실을 방지하였다. 또한, 운동부에 비하여 베이스의 무게를 충분히 크게 함으로써, 베이스의 운동을 무시할 수 있을 정도로 작게 하였다. 그 결과 진동판의 진동변위는 부하나 회전속도에 무관하게 거의 일정하게 나타나는 것을 실험으로 확인하였다.

## 2. 직접구동형 가진기의 설계 및 제작

### 2.1 작동원리

그림 1은 개발된 가진기의 설계도이다. 모터회전에 따라 편심슬리브⑥이 회전하면, 슬리브는 모터축을 회전중심으로 편심량을 반경으로 주기적인 원운동을 한다. 슬리브는 그 원주상의 볼베어링⑦을 통하여 상부가진판①에 연결되므로, 상부가진판에 동일한 회전운동을 전달한다. 상부가진판은 회전운동을 자유롭게 하기 위하여 하부가진판②와 한 쌍의 선형가이드⑧을 통하여 연결되고, 하부가진판 역시 선형가이드를 통하여 고정판③에 지지된다. 이 두쌍의 선형가이드는 서로 직교하면서 두 방향의 왕복운동을 자유롭게 하므로, 상부가진판은 원운동을 할 수 있다. 결과적으로 상부가진판상에 장착된 물체는 수평면상 x,y 방향으로 가진된다. 그림 2는 편심슬리브의 운동을 보인다. 가진기의 구동모터가 회전하면, 슬리브 중심 P는 모터축 O를 중심으로 원운동을 하고, 슬리브 중심 P의 xy방향 변위는 다음과 같이 표시된다.

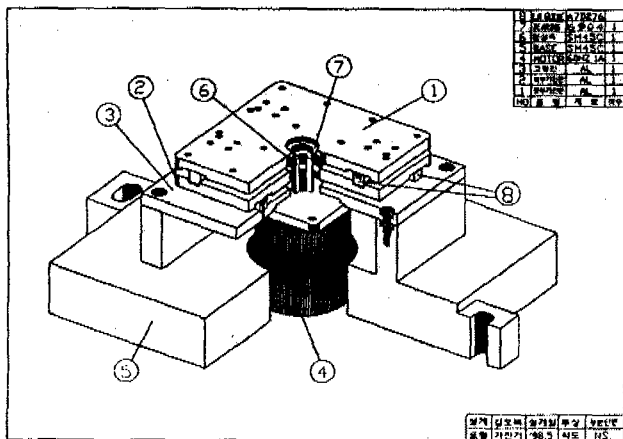


그림 1. 가진기의 설계도

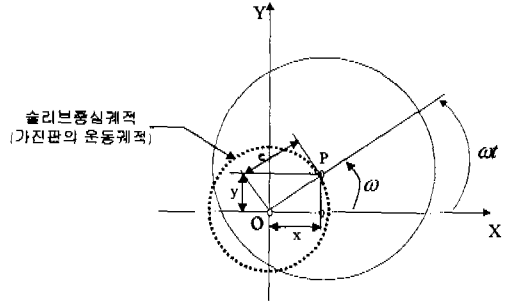


그림 2. 편심슬리브의 운동

$$x = e \cdot \cos \omega t \quad (1)$$

$$y = e \cdot \sin \omega t \quad (2)$$

여기서,  $e$ 는 슬리브편심량(모터축과 슬리브중심사이의 거리)이나, 실제로는 편심량에 모터축 및 슬리브를 지지하는 베어링부의 동가적인 유격이 부가되고 미세한 가공오차도 포함된다. 상부 가진판상의 모든점도 중심 P와 동일한 원운동을 하므로, 상부가진판은 x,y양방향으로 모터회전수와 동일한 주파수로  $\pm e$ 진폭의 변위로 운동한다.

### 2.2 가진기의 설계 및 제작

그림 1에서와 같이, 가진기는 크게 베이스, 모터, 가진부로 구성된다. 베이스는  $350 \times 350 \times 80$  (mm)의 강재(SM45C)로, 가진부에 비하여 무게를 매우 크게 함으로써 베이스의 운동을 무시할 수 있을 정도로 억제시켰다. 구동부에 사용한 모터는 용량 220V/1A, 3상 유도전동기로, 전압형 인버터에 의하여 회전속도를 조절하여 0-3600 rpm 범위에서 작동한다. 모터축은 세트스크류를 사용하여 0.15 mm, 0.25 mm, 0.5 mm 및 1.0 mm의 4종류의 편심량을 갖는 회전슬리브를 용이하게 교환함으로써, 가진레벨의 범위를 조정할 수 있도록 하였다. 슬리브는 레이디얼 깊은 홈볼베어링(6904Z)을 통하여 상부 가진판에 연결된다. 상부 가진판의 중심부 구멍에는 베어링의 외륜이 중간끼워맞춤으로 조립되도록 하였다. 상부 가진판은 원운동을 할 수 있도록 하부 가진판과 선형가이드로 연결된다. 상부가진판 아랫면에 홈가공을 하여 가진판의 진동시 조립위치가 어긋나지 않도록 선형가이드를 중간끼워맞춤( $27 \pm 0^{001}$ )하였다. 또한 두 개의 선형가이드는 가진판이 왕복운동하는 과정에서 마찰을

최소화할 수 있도록 평행을 유지하도록 하였다(평행도 0.02/100). 하부 가진판은 상하면에 두쌍의 선형가이드를 통하여 위로는 상부가진판과, 아래로는 고정판에 연결된다. 상하 선형가이드의 설치홈은  $\pm 0.1^\circ$  이내로 수직으로 교차시켰다.

### 3. 가진기의 성능평가

#### 3.1 회전속도에 따른 가진변위 특성

제작된 일정변위 가진기는 가진주파수에 무관하게 일정한 크기의 변위진폭으로 물체를 가진하는 능력이 가진기의 성능을 결정하는 중요한 인자이다.[2] 이를 실험적으로 확인하기 위하여 몇 가지의 성능평가 시험을 수행하였다. 슬리브의 편심량은 0.14mm로 선정하였다. 먼저 인버터상에 표시되는 모터의 회전주파수와 가진판의 실제 가진주파수를 그림 3에서 비교하였다. 인버터 모니터상에 표시되는 모터회전속도에 상당하는 가진주파수는 실선으로 표시하고, 가속도계(B&K 4383)로 측정된 실제 가진주파수는 점선으로 표시하였다. 그림 3에서 3000rpm(50Hz)범위에서 두 값의 차이는 1%이내를 유지하였다. 따라서, 인버터, 모터 및 가진부는 무부하상태에서는 비교적 정확한 가진주파수로 가진하는 것으로 평가된다. 가진기의 다른 중요한 성능인자는 가진주파수 성분이다. 현실적으로, 편심슬리브의 원주오차, 가진판 구멍과 베어링 사이의 간극, 슬리브 및 가진판 구멍의 가공오차등 여러 가지 요인에 의하여, 가진판은 정확한 정현파로 가진되지 못하고, 슬리브 회전주파수를 기본으로하여 고차의 조화성분이 함께 가진된다. 그림 4는 몇가지 회전속도에서 가진판의 진동응답(변위)을 보인다. 파워스펙트럼에서 기본주파수인 회전주파수 성분에 비하여 고차의 조화성분은 20dB이상 작은 레벨을 보인다. 이는 고차성분의 변위가 회전주파수 성분에 비하여 1/10이하로 매우 작음을 의미한다. 그림 5는 회전속도에 따른  $x, y$  방향 운동 조화성분의 상대적인 크기를 비교한다. 3000rpm(기본주파수: 50Hz) 아래에서 기본주파수 성분의 진폭은 0.14 mm 정도의 일정한 변위를 보이고, 고차 조화성분의 크기는 기본주파수성분에 비하여 무시할 정도로 작음을 관찰할 수 있다. 따라서, 제작된 가진기는 50Hz 아래에서는 일정한 변위로 가진할 수 있을 것으로 평가된다.

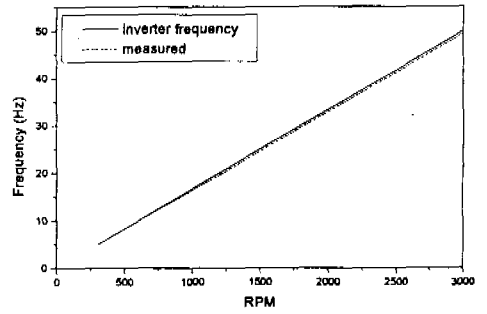
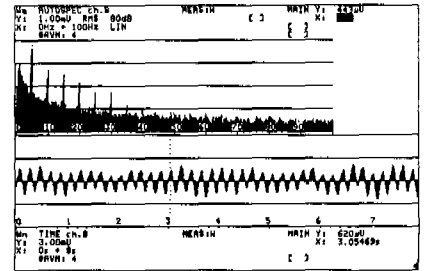
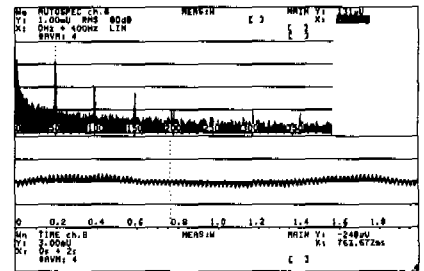


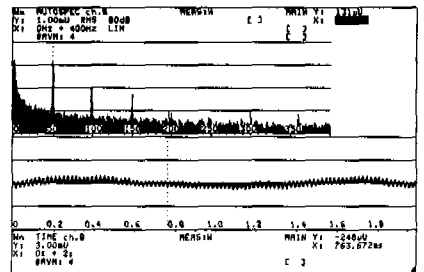
그림 3. 인버터 주파수와 실제 가진주파수의 비교



가) 300rpm

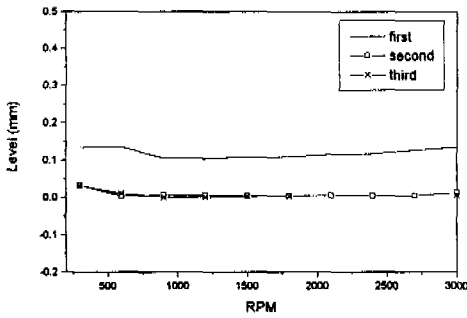


나) 600 rpm

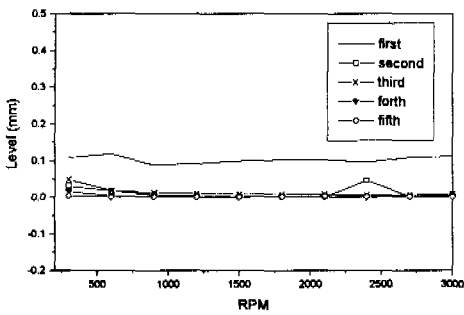


다) 3000 rpm

그림 4. 가진 판의 주파수 성분



가) x방향 변위응답



나) y방향 변위응답

그림 5. 가진판의 변위응답

### 3.2 가진기 구조의 모드시험

#### 3.2.1 모드시험의 원리 및 실험장치 구성

가진기도 하나의 진동계이므로, 그 사용주파수범위는 가진기 구조의 1차공진주파수보다 훨씬 낮은 범위로 제한된다.[3] 가진기 구조의 공진주파수 및 모드의 분포를 파악하기 위하여 모드시험을 수행하였다. 모드시험은 진동계의 이론적 주파수응답 모델과 주파수응답 측정데이터를 적절히 피팅시켜 이론모델 상에 표시된 고유진동수 및 모드벡터, 모드감쇠치를 결정하는 작업이다. 실험에서 주파수 응답함수  $H(\omega)$ 는 진동계의 입출력신호의 교차스펙트럼  $G_{yy}(\omega)$ 와 입력신호의 자기스펙트럼  $G_{ff}(\omega)$ 에 의하여 다음과 같이 결정된다.[4]

$$H(\omega) = \frac{G_{yy}(\omega)}{G_{ff}(\omega)} \quad (3)$$

여기서,  $G_{ff}(\omega) = F(\omega) \times F^*(\omega)$ 는 진동계에 작용하

는 가진력의 자기스펙트럼(AutoSpectrum)이고,  $G_{yy}(\omega) = Y(\omega) \times F^*(\omega)$ 는 변위응답과 가진력신호 사이의 교차스펙트럼(Cross Spectrum)이다. \*는 공액복소항(Complex Conjugate)을 의미한다. 한편, 다자유도 진동계의 주파수응답함수의 이론모델은 다음과 같다.[5]

$$\alpha_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{r\phi_i \cdot r\phi_j}{m_r(\omega_r^2 - \omega^2)} \quad (4)$$

여기서,  $N$ 은 고려하는 모드의 수,  $m_r$ 은 모드질량,  $\omega_r$ 은 고유진동수,  $r\phi_i, r\phi_j$ 는 각각  $r$ 번째 모드 벡터의  $i$ (측정점),  $j$ (가진력)성분이다. 이론모델인 식(4)와 실험적으로 구한 식(3)을 최소자승오차법에 근거하여 다항곡선 피팅방법을 사용하여 식(4)의 모드변수를 결정한다.[6] 이러한 수치해석작업은 2채널 신호분석기에서 PC로 주파수응답함수의 실험치를 전송하고 난 후, 상용프로그램을 사용하여 처리된다. 본 연구에서는 충격해머의 가진력을 입력신호로, 가속도계 응답을 출력신호로하여 주파수응답함수를 측정하였다. 그림 6은 가속도계(BK4383) 및 충격해머(B&K 8202), 전하증폭기(B&K2635), 2채널 신호분석기(BK2035)와 모드해석전용 소프트웨어(STAR-MOD

AL)로 구성된 실험장치이고, 그림 7은 충격해머를 사용하는 충격시험장면을 보인다. 가진기 구조상에 그림 8과 같이 44개의 가진점을 표시하고, 절점 #11 상에  $x$ 방향으로 가속도센서를 부착시킨후, 44개의 가진점을 순차적으로 충격하여, 매 충격시의 주파수 응답함수를 신호분석기로 구한다.

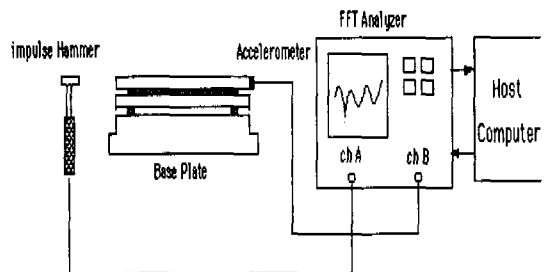


그림 6. 모드시험 장치의 구성

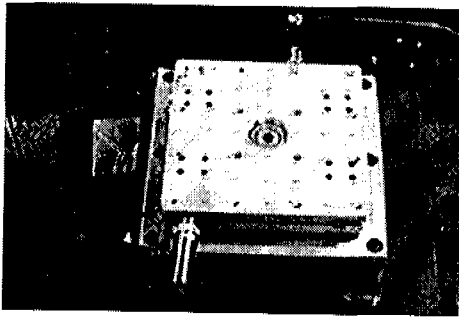


그림 7. 충격시험장면

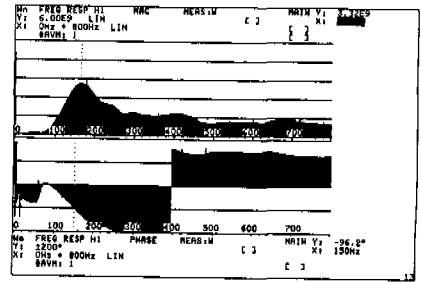


그림 9. 절점 #5타격시의 주파수응답함수

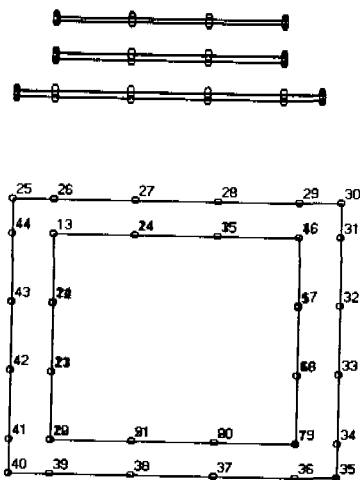


그림 8. 충격가진을 위한 가진점

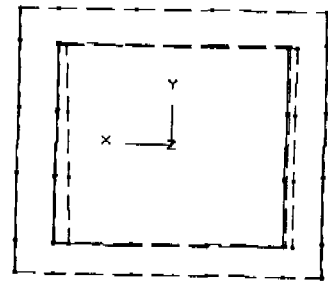


그림 10. 가진기구구조의 1차진동모드(167Hz)

### 3.2.2 모드시험 결과분석

그림 9는 절점 #5를 가진하였을 때의 주파수응답함수이다. 감쇠가 매우 커 공진피크가 명확하게 나타나지 않으나, 여러 점을 타격하고 가속도계의 부착 위치를 변경시키면서 주파수응답함수의 크기와 위상을 반복 측정하여 고유진동수를 구하였다. 측정된 1차 고유진동수는 167Hz이고 진동모드는 그림 10과 같이 가진상판이 x방향으로 강제운동하는 모드로 나타났다. 사용된 가진판의 구조모드는 이보다 매우 높은 범위에서 나타나므로, 가진기 베이스상에 모터축, 슬리브, 베어링 및 선형가이드의 등가적인 강성과 가진판의 질량으로 구성된 진동계의 공진주파수로 보인다. 하부 베이스의 운동은 거의 보이지 않는 것은 하부베이스의 무게가 가진판보다 매우 크기 때문이다.

앞에서 실험적으로 확인된 바 있으나, 고유진동수가 사용주파수대역인 50Hz보다 상당히 높으므로 이 대역의 가진에는 구조적으로 문제가 없음을 다시 한번 확인할 수가 있다. 모터 회전수의 제한이 없으면 100Hz 정도까지는 구조적으로 문제가 없을 것으로 평가된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 3상모터와 인버터, 편심회전디스크, 2쌍의 선형가이드에 지지된 2개의 가진판으로 구성된 직접구동형 가진기를 설계/제작하였다. 제작된 가진기를 대상으로 속도에 따른 가진주파수 및 가진레벨을 측정된 결과, 50Hz(3000rpm)아래에서 일정변위로 주파수를 조정하면서 가진할 수 있음을 확인하였다. 또한, 가진기 구조의 모드시험에서 1차모드는 상부 가진판이 수평방향으로 강제운동하는 모드로, 167Hz의 공진주파수를 가지는 것으로 나타났다. 따라서, 50Hz아래에서 가진기 구조는 충분한 강성을 가지고 일정한 변위로 진동계에 입력변위를 가할 수 있는 것으로 평가되었다. 가진기에 걸리는 부하에 따

른 가진특성을 평가하기 위하여, 앞으로 다양한 실험 모델을 제작하여 가진실험을 수행할 예정이다. 연구 과정에서 축적된 설계/제작상의 기술자료는 추후 개선된 성능을 갖는 다양한 형태의 가진기를 개발하는데 중요한 자료로 사용된다.

### 참고 문헌

- [1] K.Unholtz, *Vibration Testing Machine, Shock and Vibration Hand Book*, 3rd edition, McGraw Hill Book Company, 1961.
- [2] K. G. McConnell, *Vibration Testing*, John Wiley & Sons, 1995.
- [3] D.J. Inman, *Engineering Vibration*, Prentice Hall, 1994.
- [4] J.S.Bendat and A.G.Piersol, *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, John Wiley & Sons, 1980.
- [5] D.J.Ewins, *Modal Testing: Theory and Practice*, Research Studies Press, 1984.
- [6] *The STAR User Guide*, Spectral Dynamics, 1997.