

# 초음파 부상장치의 디스크형 스테이터의 진동 특성 해석

## Vibration Characteristics Analysis of the Disk-Type Stator in Ultrasonic Levitation System

정상화\* · 최석봉\*\* · 차경래\*\* · 김현욱\*\* · 김광호\*\* · 박준호\*\*

Sang Hwa Jeong\*, Suk Bong Choi\*\*, Kyoung Rae Cha\*\*, Hyun Uk Kim\*\*, Kwang Ho Kim\*\*, Jun Ho Park\*\*

**Key Words** : Ultrasonic Levitation(초음파 부상), Vibration Characteristics(진동특성), Ultrasonic Transducer(초음파발생장치) Mode Analysis(진동모드해석), Laser Scanning Vibrometer(3차원레이저진동측정기)

### ABSTRACT

In the semiconductor and optical industry the non-contact transportation is required for reducing the damages. The ultrasonic levitation is the solution of the problem. In this paper, the ultrasonic levitation system and 3 disk-type stator for levitating various object are proposed. The vibration modes of disks are analyzed with FEM and designed with the analysis results. The 3D vibration profiles of the disks are measured by Laser scanning vibrometer for verifying the vibration characteristics of the system and the amplitudes of the disks and the levitation heights of object are measured for evaluating the performance.

### 1. 서론

최근 들어 반도체 산업 및 정보통신 산업이 발달함에 따라 반도체 부품이나 광소자부품을 손상 없이 안전하게 이송하는 시스템이 요구되고 있고 이러한 요구에 따라 물체를 부상시켜 이송하는 방법이 제시되고 있다<sup>1</sup>. 반도체의 경우 반도체 내부의 전자적 배열이 변하지 않아야 하며, 렌즈의 경우 접촉력에 의한 표면 손상으로부터 안전해야 한다. 이러한 조건을 충족시킬 수 있는 이송 방법이 초음파를 이용하여 물체를 부상시켜서 이송하는 방법이다<sup>2</sup>. 초음파를 이용한 이송에 대한 연구는 80년대 말부터 일본을 중심으로 초음파 모터 개발에 관한 연구로 시작되었다<sup>3</sup>. 90년대 말부터는 두 개의 초음파 발생장치와 빔을 이용하여 물체를 이송하는 방법이 Paul I.Ro에 의해 제시되었다<sup>4,5</sup>.

본 연구에서는 초음파를 이용하여 물체를 무접촉으로 이송하기 위하여 초음파 부상 시스템을 개발하였다. 부상하고자 하는 물체에 따라 발생하는 파형이 달라야 하므로 세가지 디스크형 스테이터를 고안하고 진동 모드 특성을 해석하였다. 그리고 해석에 의해 얻은 데이터를 토대로 스테이터를 설계하였다. 개발된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 3차원 레이저 진동 측정장치를 이용하여 스테이터 표면의 진동을 측정하였고 스테이터 중심부

의 진폭은 정진용량형 센서를 이용하여 측정하였다. 또한 스테이터 형별로 부상특성을 실험하기 위해 물체의 부상된 변위를 레이저 변위센서를 이용하여 측정하였다.

### 2. 유한요소 해석을 이용한 스테이터 진동해석

부상시키고자 하는 물체에 따라 파형이 달라야 하므로 본 연구에서는 세가지 디스크형 스테이터를 고안하고 진동 모드 해석 하였다. 진동 모드 해석을 통해 초음파 발생장치와 같은 공진주파수를 설정하였고 그 주파수에서의 진동모드 형태를 파악할 수 있었다.

스테이터의 재질은 두랄루민이고 진동해석을 위한 구속 조건은 볼트탭 위치에서 고정하고 위부분의 원판에서 원판과 법선 방향으로 2,000N을 입력하였다. Fig. 1은 고안된 스테이터의 형상이다. 디스크 형태는 내경과 외경의 길이 그리고 디스크의 두께를 변화시켰다. Table 1에서 보는 것처럼 유한요소 해석 결과 디스크 1은 12차 모드에서 27.885kHz, 디스크 2는 12차 모드에서 26.878 kHz, 그리고 디스크 3은 10차 모드에서 26.946 kHz로 초음파 발생장치와 가장 근접한 주파수를 나타냈다. Fig. 2는 유한요소 해석한 결과 디스크 3의 모드형태를 나타낸 그림이다.

Table 1 Modes in 28 kHz

	Disk 1	Disk 2	Disk 3
Mode	12	12	11
Frequency	27.885 kHz	26.878 kHz	26.946 kHz

\* 조선대학교 기계공학과  
E-mail : shjeong@chosun.ac.kr  
Tel : (062) 230-7351, Fax : (062) 230-7178

\*\* 조선대학교 대학원

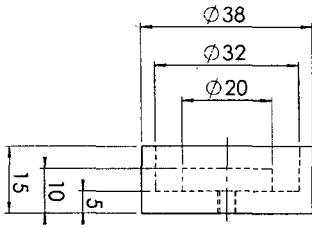


Fig. 1 Disk-Type Stator

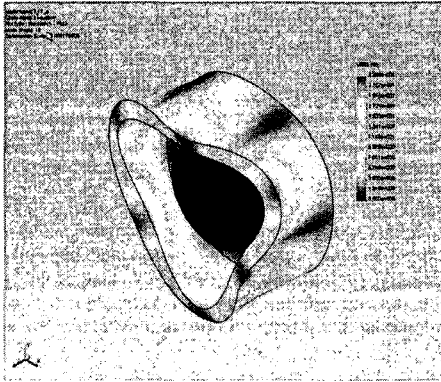


Fig. 2 Frequency Analysis of Disk 3

### 3. 스테이터의 진동 측정

#### (1) 3차원 레이저 진동측정기를 이용한 진동측정

제작된 디스크형 스테이터 표면에서 발생하는 진동 형태를 측정하기 위해 3차원 레이저 진동측정기를 사용하였다. 실험장치의 구성도는 Fig. 3과 같다. 그림에서 보는 것처럼 초음파 발생장치에 디스크형 스테이터를 장착하였고 입력은 함수발생기에서 공진 주파수를 중심으로 0.1 kHz씩 변화시켰다. 이 때 부상이 시작하는 주파수에서 물체에 진동을 전달하는 부분인 내부 원형판의 진동 프로파일을 레이저 진동측정기를 이용하여 측정하였다. Fig. 4는 레이저 진동측정기를 이용하여 스테이터의 진동 전달부를 측정한 진동 프로파일을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 원판을 4개의 직선으로 분할하였고 분할 선상의 2차원 진동 프로파일을 디스크 형태別に 따른 5개의 주파수대별로 측정하였다.

#### (2) 측정결과

3차원 레이저 진동 측정기로 스테이터 진동 전달부인 내부 원판을 측정된 결과 Disk 1의 경우 28.9 kHz에서 최대변위가 검출되었고 Disk 2의 경우 27.8 kHz에서 Disk 3의 경우는 29.2 kHz에서 최대 진폭이 검출되었다.

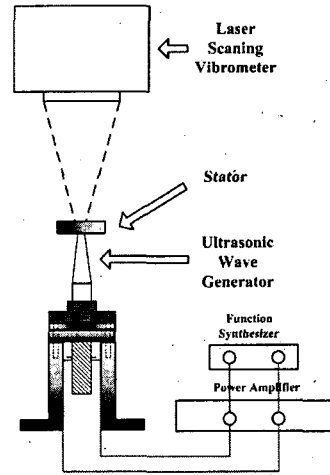


Fig. 3 Experimental Apparatus for Ultrasonic Levitation

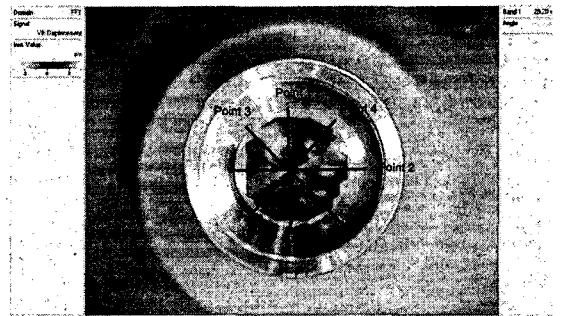


Fig. 4 Measurement of Disk-Type Stator using Laser Scanning Vibrometer

#### (2)-1 디스크 1의 진동특성

디스크 1의 진동특성을 측정하기 위해 28 kHz를 중심으로 0.1 kHz씩 증가, 감소시키면서 물체의 부상여부를 관찰하였다. 부상이 되는 시점은 28.7 kHz이고 28.9 kHz에서 가장 많은 부상을 보였으며 다시 주파수가 증가할수록 물체의 부상 높이가 감소되었다.

Fig. 5는 부상이 시작된 시점에서부터 주파수를 0.1 kHz 단위로 변화시켰을 때 측정된 디스크 내부 원판의 진폭 변화를 나타낸 것이다. 최대 진폭은 28.9 kHz에서 4.5  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. Fig. 6은 최대 진폭을 나타낸 28.9 kHz에서 Fig. 4와 같이 4분할된 선상에서의 진폭변위를 나타낸 것이다. (a)는 최고점에서의 프로파일을 나타낸 것이고 (b)는 최소점일 때의 프로파일을 나타낸 것이다. 그때의 최대변위는 4.5  $\mu\text{m}$  그리고 -4.5  $\mu\text{m}$ 이다. 결과에서 보는 것처럼 원판 영역 전체에서 진폭이 상승하고 감소하는 것을 볼 수 있고 최고 변위도 대칭적으로 나타남을 알 수 있다.

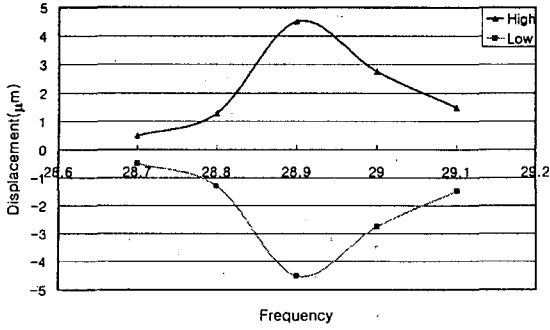


Fig. 5 Change of Bandwidth according to Frequency in Disk 1

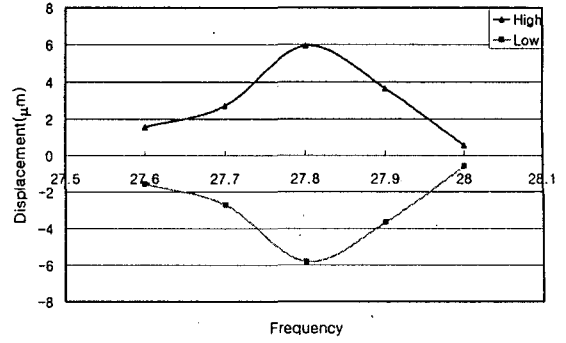
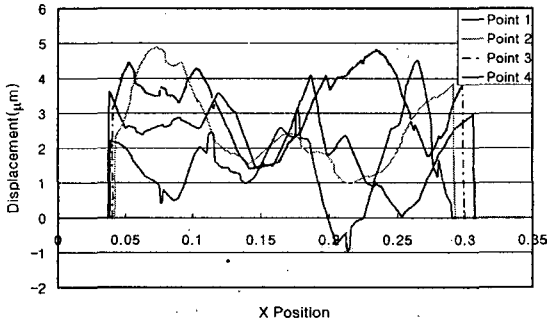
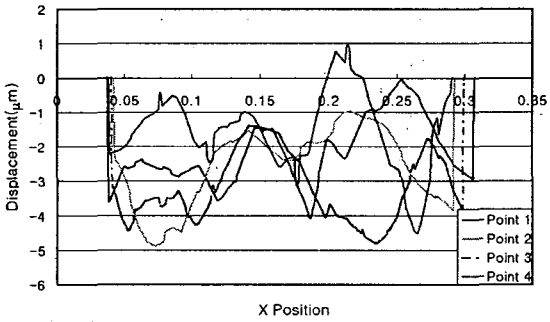


Fig. 7 Change of Bandwidth according to Frequency in Disk 2

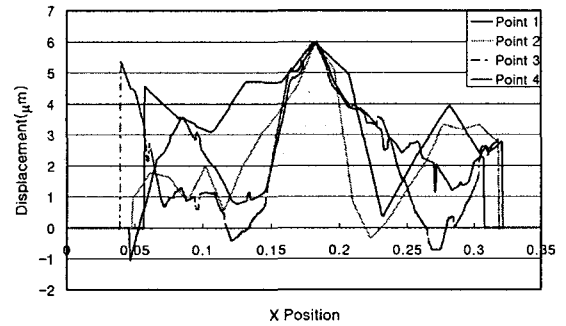


(a) Maximum Amplitude

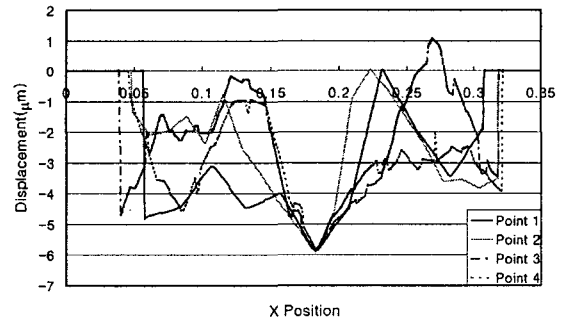


(b) Minimum Amplitude

Fig. 6 Vibration Characteristics of Disk 1 in 29.0 kHz



(a) Maximum Amplitude



(b) Minimum Amplitude

Fig. 8 Vibration Characteristics of Disk 1 in 27.8 kHz

(2)-2 디스크 2의 진동특성

Disk 2에서는 27.8에서 가장 높은 부상을 나타냈다. 레이저 진동측정기로 측정된 결과 27.8 kHz에서 가장 큰 변위  $\pm 6 \mu\text{m}$ 가 측정되었다. Fig. 7은 부상이 시작되는 27.6 kHz에서 부상이 확인되지 않는 28 kHz까지의 진폭 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 8은 최대 진폭을 나타낸 27.8 kHz에서의 분할 영역별 진폭 프로파일을 나타낸 것이다. (a)에서는 최고진폭이  $5.95 \mu\text{m}$  그리고 (b)에서는 최저진폭이  $-5.84 \mu\text{m}$ 임을 나타내고 있다.

(2)-3 디스크 3의 진동특성

Fig. 9는 Disk 3의 진폭변화를 나타낸 그래프이다. 결과에서 보는 것처럼 가장 큰 변위는 29.2 kHz에서  $\pm 2.37 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 부상은 28.8 kHz에서 시작되었다. Fig. 10은 가장 큰 변위가 나타난 28.8 kHz에서의 각 분할구간별 진폭의 형태를 나타낸 것으로 약  $\pm 2.34 \mu\text{m}$ 의 변위를 나타냄을 알 수 있다.

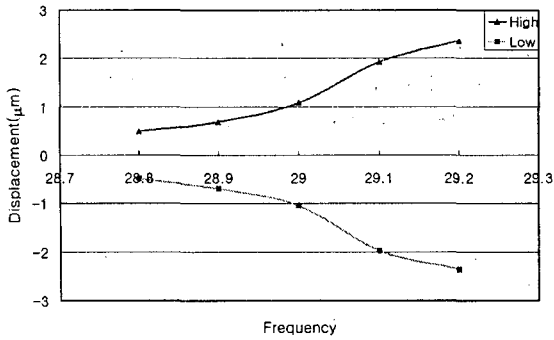
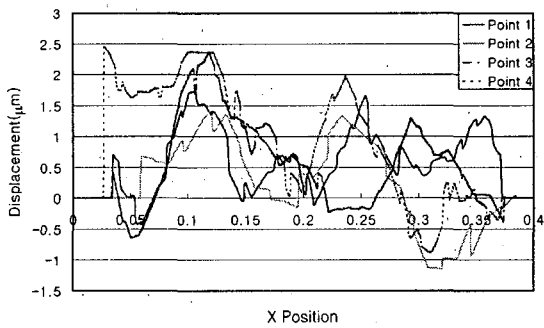
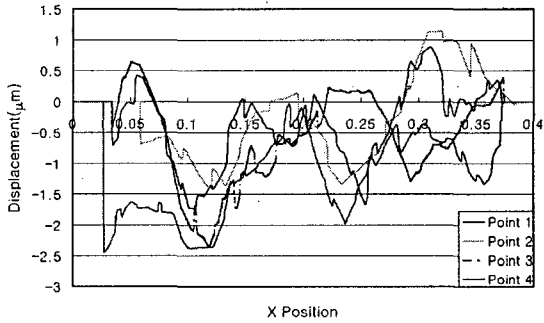


Fig. 9 Change of Bandwidth according to Frequency in Disk 3



(a) Maximum Amplitude

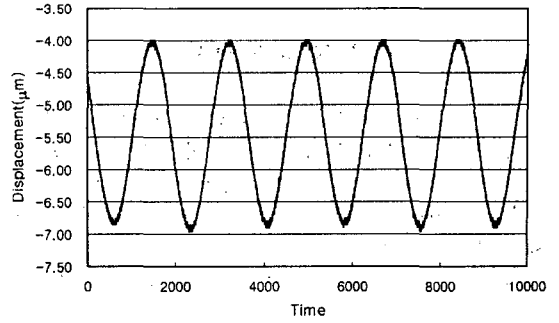


(b) Minimum Amplitude

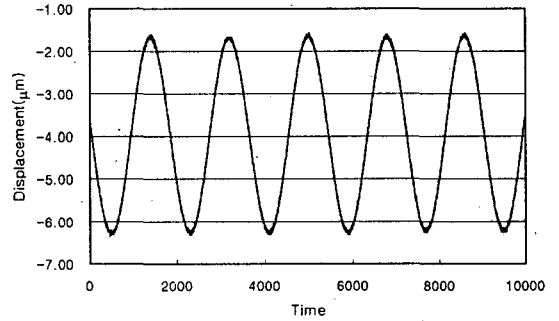
Fig. 10 Vibration Characteristics of Disk 1 in 29.2 kHz

#### 4. 정전용량형 센서에 의한 스테이터 진폭측정

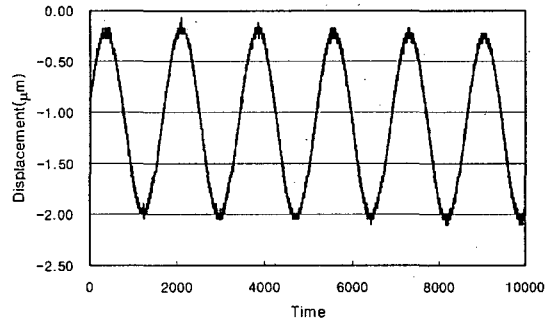
초음파가 발생될 때 디스크의 진동 및 주기를 측정하기 위해 정전용량형 변위 센서를 사용하였다. 측정위치는 디스크 내부원판의 중심이다. Fig. 11(a)는 디스크 1의 측정결과를 나타낸 것이다. 발생변위는 28.8 kHz에서  $2.96 \mu\text{m}$ 에서 최대로 나타났다. Fig. 11(b)는 디스크 2 중심부의 진동형태를 나타낸 것이다. 27.8 kHz에서 최대값  $4.8 \mu\text{m}$ 를 나타냈다. Fig. 11(c)는 디스크 3의 진동 형태를 나타낸 것으로 28.8 kHz에서  $2.03 \mu\text{m}$ 를 나타냈다.



(a) Disk 1



(b) Disk 2



(c) Disk 3

Fig. 11 Vibrations in Center of Disk

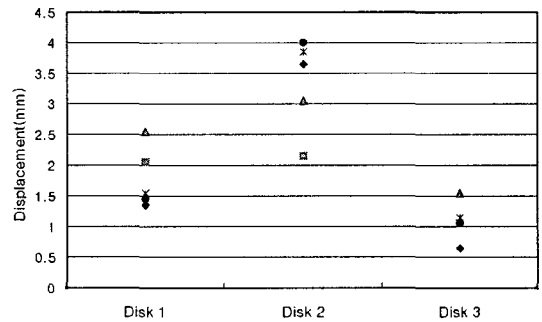


Fig. 12 Levitation Heights according to the Disk-Types

## 5. 부상 높이 측정

초음파로 물체가 부상될 때 디스크 형태별로 최대 부상높이를 측정하였다. 측정센서는 레이저 변위센서를 이용하였다. Fig. 12 는 디스크 형태별 부상 높이를 나타낸 것이다. 사용된 물체는 0.25g의 알루미늄 원판이다. Disk 2에서 4 mm로 가장 큰 부상높이를 나타냈으며 Disk 1에서 2.5 mm Disk 3에서 1.5 mm로 측정되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 반도체 소자나 광소자의 무접촉 이송에 이용하고자 초음파 부상 장치에 대해 연구하였다. 초음파 발생장치의 초음파를 집중시켜 이송 물체를 부상시키는 디스크형 스테이터를 고안하였고 유한요소 해석을 통해 진동 모드를 파악하였다. 유한요소해석 결과를 토대로 부상 물체에 따라 발생 파형이 달라야 하므로 세가지 형태의 디스크형 스테이터를 설계하였다. 물체가 부상될 때 진동 특성을 평가하고자 디스크형 스테이터 표면의 진동 형태를 3차원 레이저 진동측정기를 사용하여 측정하였다. 측정결과 디스크 1에서는 28.9 kHz에서 최대 진폭을 나타냈으며 디스크 2에서는 27.8 kHz, 그리고 디스크 3에서는 29.2 kHz에서 가장 큰 진폭을 나타냈다. 그리고 스테이터 내부 원판의 진동 프로파일을 파악할 수 있었다. 스테이터의 중심부 변위는 정전용량형 센서를 이용하여 측정하였다. 측정결과 중심부의 변위의 최

대값은 디스크 1의 경우 2.96  $\mu\text{m}$ , 디스크 2의 경우 4.8  $\mu\text{m}$  그리고 디스크 3의 경우 2.03  $\mu\text{m}$ 으로 측정되었다. 물체 부상높이는 레이저 변위센서를 이용하여 측정되었는데 디스크 2에서 가장 높은 부상높이 4 mm를 보였고

디스크 1에서 2.5 mm 디스크 3에서 1.5 mm의 부상 높이를 나타냈다. 이로써 부상높이는 발생하는 진폭의 크기와 비례함을 알 수 있었고 진동 프로파일의 진폭이 크고 일정할수록 부상의 높이도 증가함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국산업기술재단 지역혁신인력양성사업의 연구비 지원으로 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) S. H. Jeong., B. S. Shin., 2003, A Study on the Relationship between Flexural Beam Shape and Transport Characteristics for the Ultrasonic Transport Systems, Proc. KSMTE Autumn Conference, pp.25-29.
- (2) S. H. Jeong., T. H. Kim., B. S. Shin., and K. R. Cha., 2003, A Study on Object Transport System using 2-Mode Ultrasonic Wave, Proc. KSPE Spring Conference, pp.1170-1173.
- (3) E. Matsuo., Y. Koike., K. Nakamura., S. Ueha., Y. Hashimoto., 2000, Holding characteristics of planar objects suspended by near-field acoustic levitation, Ultrasonics 38, pp.60-63.
- (4) B.-G. Loh., and P. I. Ro., 2000, Changing The Propagation Direction Of Flexural Ultrasonic Progressive Waves By Modulating Excitation Frequency, Journal of Sound and Vibration, 238(1), pp.171-178.
- (5) Byung-Gook Loh., and Paul I. Ro., 2000, An Object Transport System Using Flexural Ultrasonic Progressive Waves Generated Two-Mode Excitation, IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 47, pp.994-999.