

모션프로파일의 주파수분석을 통한 웨이퍼 이송로봇의 진동성능 향상

Improvement of Vibration Performance for Wafer Transfer Robot using Frequency Analysis of Motion Profile

신동원^{1,✉}, 윤장규²
Dongwon Shin^{1,✉} and Jang Kyu Yun²

¹ 금오공과대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

² 금오공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

✉ Corresponding author: shindw@kumoh.ac.kr, Tel: +82-54-478-7321

Manuscript received: 2014.2.5 / Revised: 2014.5.31 / Accepted: 2014.6.16

This paper is study of solving vibration problem occurred in moving hand of wafer transfer robot in semiconductor manufacturing line. Long settling time for decreasing vibration makes low production rate, and moreover the excessive vibration of hand sometimes breaks the wafer in a cassette. The ways of reducing the moving speed and changing the type of motion profile did not help for lessening vibration. Therefore, we analyzed the mechanical property of the hand such as natural frequency, and frequency component of the motion profile currently used in the manufacturing line. In several conditions of motion profile, we found the best condition of which the frequency component in near of natural frequency of the hand is minimal and this induced small vibration in moving hand. The results were verified theoretically and experimentally using frequency analysis.

Key Words: Motion Profile (모션 프로파일), Wafer Transfer Robot (웨이퍼 이송 로봇), Vibration (진동), Frequency Analysis (주파수 분석)

1. 서론

산업현장에서 물건을 이송하거나 경로를 따라 이동하는 장비에 발생하는 진동은 물건을 파손하거나 생산품의 품질을 떨어뜨리고 생산속도에도 악영향을 미친다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 기구부의 구조를 변경하거나 모션프로파일을 입력성형하거나, 모션프로파일을 변경하는 방법이 있다.^{1,4} 기구부의 구조변경은 비용이 많이

드는 경우가 많고 이미 개발된 장비에는 구조변경이 어렵다. 그래서 이미 개발된 장비의 진동을 줄이는 방법으로 모션프로파일을 성형하는 입력성형과 모션프로파일을 변경하는 방법이 지속적으로 연구되어 산업현장장비에 적용되고 있다. 입력성형기법을 적용한 연구 중에 정밀XY스테이지와 3차원측정기에 적용하여 잔류진동을 효과적으로 제거한 연구가 있다.⁵ 또한, 액체를 운반하는 용기를 빠른 속도로 이송시킴에 따라 발생하는 슬로싱의

고유진동수를 입력성형기법에 적용하여 액체 용기의 속도프로파일을 설계한 연구도 진행되었다.⁶ 생산용 장비 및 설비의 고속화와 고성능화를 위한 구동모션프로파일로 저진동고속특성을 가진 개선된 5차 모션프로파일을 설계하여, 구동부의 잔류진동을 줄여서 정착시간을 감소시킨 연구도 진행되었다.⁷ 입력성형의 원리를 적용한 새로운 모션프로파일을 설계하여 입력성형절차의 복잡함을 줄이고 가감속시간의 시정성을 보장하는 모션프로파일을 제시한 연구도 진행되었다.⁸

본 연구는 실제 반도체 생산라인 상에서 웨이퍼이송로봇(wafer transfer robot)의 웨이퍼 이송 중에 발생하는 진동문제의 해결에 대한 연구이다. 일반적으로 웨이퍼 이송로봇은 시작 카세트 슬롯(Slot)에서 웨이퍼를 꺼내 핸드(hand)에 올려놓고 도착 카세트 슬롯에 넣는 작업을 반복하게 된다. 이러한 작업 중에 웨이퍼가 있을 때의 이송과 없을 때의 이송의 두가지 경우가 발생한다. 웨이퍼가 있는 상태란 핸드에 웨이퍼를 장착하고 시작 카세트를 출발하여 도착 카세트 앞에서 정지하기까지의 상태이고, 웨이퍼가 없는 상태란 웨이퍼 없이 도착 카세트를 출발하여 시작 카세트 앞에서 정지하기까지의 상태이다.

문제는 반도체 생산공정 상에서 웨이퍼가 없는 상태로 시작 카세트 앞에 도착하여 정지했을 때 핸드에 잔류진동이 심각하게 발생한다는 점이다. 이를 해결하기 위하여 정착시간을 길게 부여하여 진동이 없어질 때까지 기다리는 절차를 수행하였으나, 진동이 심한 경우에는 과도한 진동으로 인하여 핸드가 카세트상의 웨이퍼를 건드려 웨이퍼가 파손하는 상황이 발생하곤 하였다. 결국, 긴 정착시간의 부여로 인한 생산시간의 지연과 더불어 웨이퍼의 파손으로 인한 심각한 손실이 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 현장에서 속도프로파일의 타입을 바꾸거나, 또는 속도를 대폭 줄여서 가동을 하는 등 다양한 시도를 하였으나 잔류진동은 여전히 줄지 않고 남아 있었다.

본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위하여 로봇의 기계적 특성과 모션프로파일을 분석하여 로봇에 적합한 모션프로파일 조건을 제시하였다.

2. 현재 웨이퍼 이송 로봇의 문제점

현재 웨이퍼이송로봇에는 사다리꼴 모션프로파일을 사용하고 있고, 모션프로파일 정속구간의 속

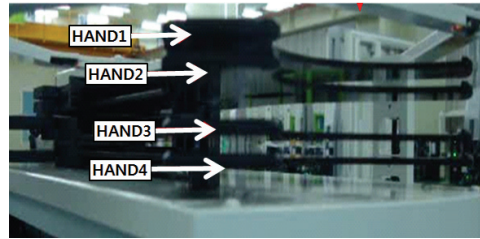


Fig. 1 Hands of the wafer transfer robot

도를 모터가 낼 수 있는 최대속도의 60%에 해당하는 속도로 사용하고 있다. 이 상태에서 웨이퍼를 장착하고 이동할 때에는 웨이퍼에 의한 댐핑효과가 발생하여 핸드에서의 진동이 거의 발생하지 않았다. 그러나 웨이퍼가 없는 상태에서 이동할 때, Fig. 1과 같이 4개의 손을 가진 웨이퍼이송로봇의 핸드1, 3에서 진동이 크게 발생하여 상기에서 언급한 문제가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 속도프로파일을 사다리꼴에서 S커브로 변경하고, 정속속도를 줄이고, 서보드라이브의 게인 튜닝 및 기계의 결합상태를 재점검하였으나, 진동이 줄어들지 않았다. 심지어 모션프로파일의 정속속도를 최대속도의 10%로 대폭 줄인 모션프로파일을 사용하였으나 진동이 증가하였다. 이에 본 논문에서 그 원인을 파악하고 해결책을 제시하고자 임펄스충격실험을 통해 핸드1, 3의 고유진동수를 측정 및 분석하고, 최대속도의 10%, 60%, 70%에 해당하는 정속속도를 가진 모션프로파일의 주파수분석을 하고, 이를 토대로 하여 각각의 속도에 따른 진동의 최대진폭을 측정하여 진동이 최소로 되는 모션프로파일의 조건과 그 이유를 분석하였다.

3. 로봇핸드의 고유진동수 측정

이러한 웨이퍼이송로봇 핸드의 고유진동수 및 진폭을 측정하기 위하여 비접촉식 센서인 Polytec사의 소형센서헤드와 컨트롤러를 사용하여 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 속도디코더(VD-02)와 거리디코더(DD-200)의 분해능은 각각 0.15 $\mu\text{m/s}$ 와 2 nm이다. 그리고 측정 소프트웨어는 Polytec Vibrometer software를 사용하였다.

진동의 측정은 로봇의 4개의 핸드 중에서 진동이 크게 발생한 1, 3번의 핸드에 대하여 실험하였으며, 핸드의 재질은 경량화를 위한 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)재질이다.

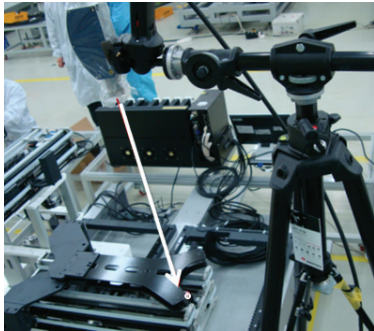


Fig. 2 Experimental setup to measure vibration of wafer hand hand

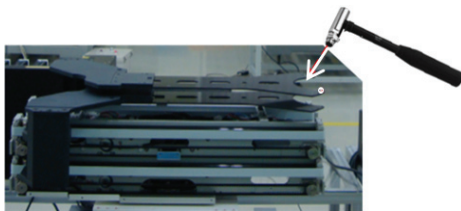


Fig. 3 Impulse impact experiment on the wafer hand

실험은 진동이 크게 발생하는 웨이퍼가 없는 상태에서 핸드 1, 3에 대해서 임펄스 충격실험을 하고, 이를 통하여 고유진동수를 획득하고 고유진동수를 기준으로 관심주파수대역을 설정하였다.

Fig. 3과 같이 임펄스망치로 핸드 1, 3에 임펄스를 발생시켜 Fig. 3, 4, 5, 6과 같이 측정소프트웨어로 진폭 및 고유진동수를 측정하였다. Fig. 4, 5에서 핸드1의 최대진폭은 $1500\ \mu\text{m}$ 으로, 1차 고유진동수는 $21.959\ \text{Hz}$, 2차 고유진동수는 $37.876\ \text{Hz}$ 으로 측정되었다. 그리고 Fig. 6, 7에서 핸드3의 최대진폭은 $1500\ \mu\text{m}$ 으로, 1차고유진동수는 $22.206\ \text{Hz}$, 2차 고유진동수는 $38.711\ \text{Hz}$ 으로 측정되었다. 로봇 3대에 대하여 각각 실험한 결과의 평균을 Table 1과 같이 정리하여 핸드1의 1차 고유진동수는 $22.401\ \text{Hz}$, 2차 고유진동수는 $38.399\ \text{Hz}$ 으로, 핸드3의 1차 고유진동수는 $22.202\ \text{Hz}$, 2차 고유진동수는 $38.619\ \text{Hz}$ 으로 나타내었다.

Table 1에서 1차 고유진동수는 로봇 핸드에 대해 해당하는 값이고, 2차 고유진동수는 Fig. 8에서 핸드를 고정하는 Γ 자 모양의 금속재질의 핸드고정부에 해당하는 값으로 판단된다. 따라서 관심영역은 핸드의 진동이므로 핸드의 주파수대역인 $22.2, 22.4\ \text{Hz}$ 를 포함한 구간으로 관심주파수대역을 $22.1\sim 22.6\ \text{Hz}$ 로 설정하였다.

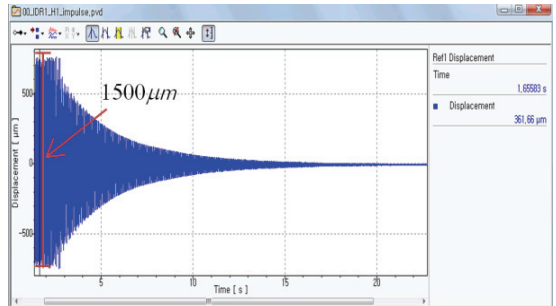


Fig. 4 Amplitude of impulse response for hand 1

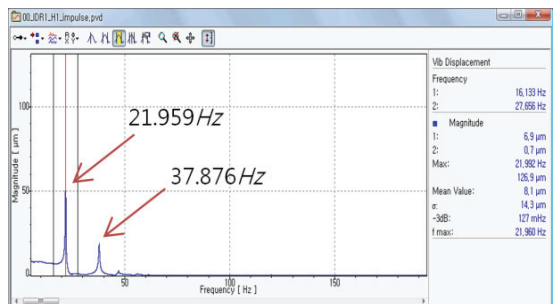


Fig. 5 Natural frequencies of hand 1: $21.959\ \text{Hz}$, $37.876\ \text{Hz}$

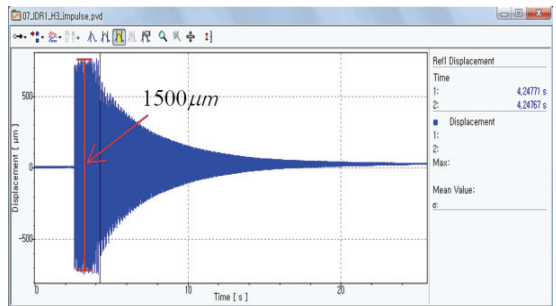


Fig. 6 Amplitude of impulse response for hand 3

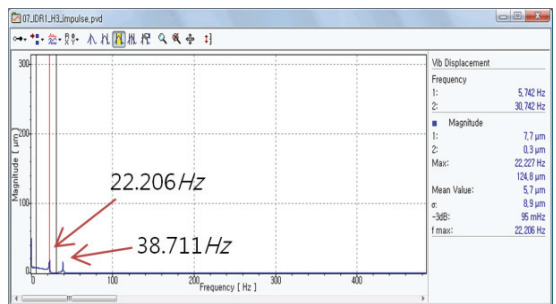


Fig. 7 Natural frequencies of hand 3: $22.206\ \text{Hz}$, $38.711\ \text{Hz}$

Table 1 Natural frequencies for wafer hand

Hand	Amplitude	1st Natural Freq.	2nd Natural Freq.
Hand 1	1333.33 μm	22.401 Hz	38.399 Hz
Hand 3	783.333 μm	22.202 Hz	38.619 Hz

Table 2 Motion condition of Z, T and Y axis

Axis	Start Position (1)	End Position (2)	Acceleration [mm/s^2]	Max Velocity [mm/s]	Motion Profile
Z	137.1mm	217.3mm	589	413	Trapezoidal
T	-0.280°	180.13°	525	263	Trapezoidal
Y	7.501mm	759.7mm	2,179	1,525	Trapezoidal

* Define the velocity as 10 %, 60 %, 70 % of max velocity

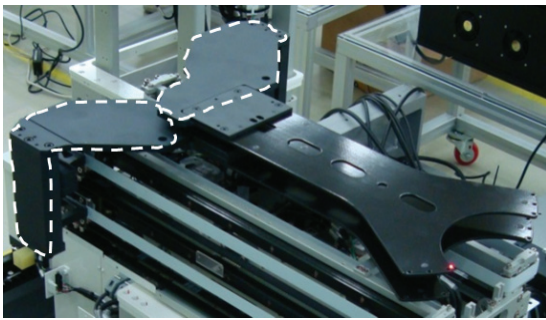


Fig. 8 Supporter generating second natural frequency

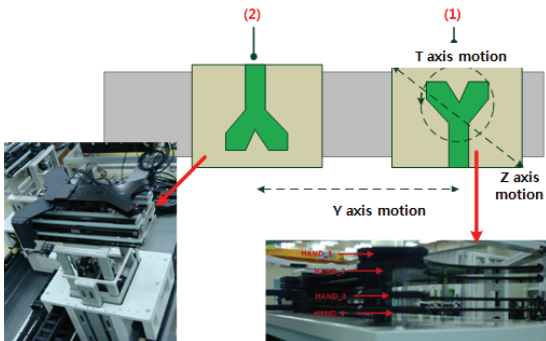


Fig. 9 Starting and ending position of wafer transfer robot

4. 모션프로파일의 주파수분석

Fig. 9는 웨이퍼이송로봇의 이송동작을 보여주는 그림으로 (1)번 위치에서 시작하여 (2)번 위치로 도착한다. 시작위치에서 도착위치까지의 이송은 3축(Y, T, Z)을 동시에 구동하되, Y축으로 이송되면서 동시에 Z축으로 올라가고, T축으로 180도 회전하는 동작을 한다. 이어 최대속도의 10 %, 60 %, 70 %에 해당하는 모션프로파일에 대한 주파수분석을 하여 각 모션프로파일이 관심주파수대역에서 가지는 성분을 확인하였다. 이를 바탕으로 실험에서 각 모션프로파일로 웨이퍼이송로봇을 이송하여 웨이퍼의 진동을 측정하였다.

3장에서 핸드1, 3에 대한 고유진동수를 측정하여 관심주파수대역을 설정하였다. 이어 Table 2와 같이 각 축의 모션조건을 설정하고 최대속도의

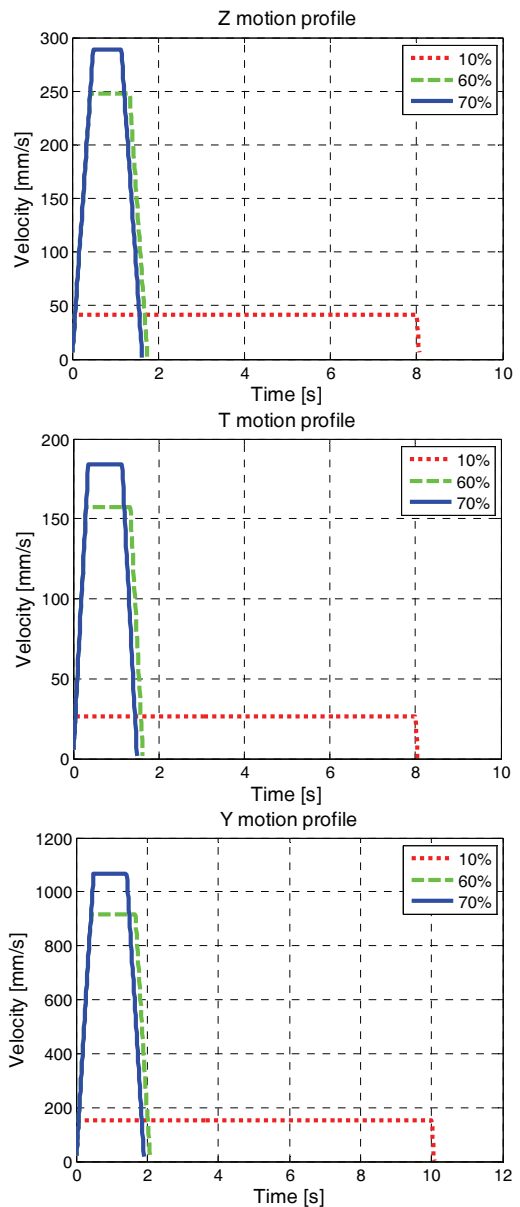


Fig. 10 Motion profile of Z, T and Y axes for 10, 60 and 70 % of Maximum velocity

10 %, 60 %, 70 %에 해당하는 정속속도를 가진 Z, T, Y모션프로파일을 구성하였다. 이를 도시하면 Fig. 10과 같다.

Fig. 10을 보면 Z, T, Y의 3개의 축에 대하여 최대속도의 10 %, 60 %, 70 %의 3가지 조건을 적용하여 총 9개의 속도프로파일이 그려진 것을 볼 수 있다.

4.1 주파수분석의 수식적 해석

속도프로파일을 통하여 로봇핸드에 가해지는 입력은 속도프로파일의 미분항인 가속도프로파일으로서 관성력으로 핸드에 작용하여 핸드의 진동을 유발시키는 것이다. 웨이퍼이송로봇에 사용된 사다리꼴 속도프로파일의 미분한 결과는 Fig. 11과 같은 가속도프로파일이다. 이의 주파수영역에서의 변환되는 과정은 수식 [1, 2, 3]과 같다.

Fig. 11과 수식1에서 $\ddot{q}(t)$ 는 사다리꼴 위치프로파일 $q(t)$ 의 가속도프로파일이며, $h(t)$ 는 헤비사이드 계단함수(heaviside step function)이다. 그리고 α 는 전체시간 T 에서 가속구간의 시간으로서 감속구간의 시간과 동일한 값을 가진다.

$$\ddot{q}(t) = \ddot{q}_{ma} (h(t+T/2) - h(t+T/2 - \alpha T) - h(t - T/2 + \alpha T) + h(t - T/2)) \tag{1}$$

주파수분석을 위해 수식1을 푸리에변환(Fourier transform)하면 아래와 같은 수식으로 된다.

$$A(\omega) = 4j \frac{h}{(1-\alpha)\alpha T^2 \omega} \sin((1-\alpha)\omega \frac{T}{2}) \sin(\alpha\omega \frac{T}{2}) \tag{2}$$

위의 수식을 아래와 같은 과정으로 진폭 V (amplitude) 을 구하고, 진동수 ω 을 무차원수 Ω 으로 변경하여 $V'(\Omega)$ 로 표현하였다.

$$V(\omega) = \frac{|A(\omega)|}{\pi}$$

$$V'(\Omega) = V(\omega) \Big|_{\omega=\omega_0 \Omega}$$

$$V'(\Omega) = \frac{h}{T} \frac{2}{(1-\alpha)\alpha \pi^2 \Omega} |\sin((1-\alpha)\pi\Omega) \sin(\alpha\pi\Omega)| \tag{3}$$

where

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

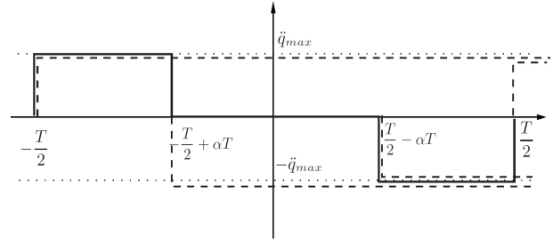


Fig. 11 Acceleration motion profile in time domain

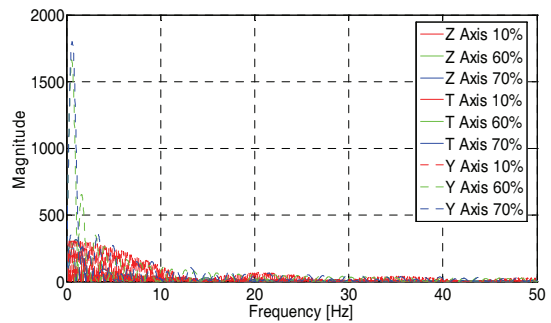


Fig. 12 Frequency transform of acceleration term for motion profile in Fig. 10

상기의 수식을 이용하여 최대속도의 10 %, 60 %, 70%에 해당하는 Z, T, Y 모션프로파일을 0~50 Hz사이에서 주파수영역에서 도시한 결과는 Fig. 12와 같다.

Fig. 12에서는 0~50 Hz에서 각 모션프로파일의 주파수응답의 크기를 볼 수 있다. 그러나 고유진동수를 포함한 관심주파수영역이 잘 보이지 않으므로 관심주파수영역인 22.1~22.6 Hz 구간을 확대하여 보면 Fig. 13과 같다.

Fig. 13에서 Z축의 주파수응답의 크기(magnitude)는 20아래로 형성되고, T축의 주파수응답의 크기는 15아래로 형성하고 있다. 그러나 Y축의 주파수응답의 크기는 0~60까지 형성하고 있으며, 그 크기는 모션프로파일에 따라 크게 차이를 확인할 수 있다.

즉 Y축 10% 모션프로파일과 60% 모션프로파일의 주파수응답의 크기가 웨이퍼이송로봇 핸드의 고유진동수부분에서 0~60사이의 큰 크기의 성분을 가지고 있고 그에 반해 70% 모션프로파일의 주파수응답의 크기는 20아래로 형성하고 있다.

이는 Y축 10%, 60% 모션프로파일에 비해 Y축 70% 모션프로파일이 핸드의 진동발생을 줄일 수 있음을 나타낸다.

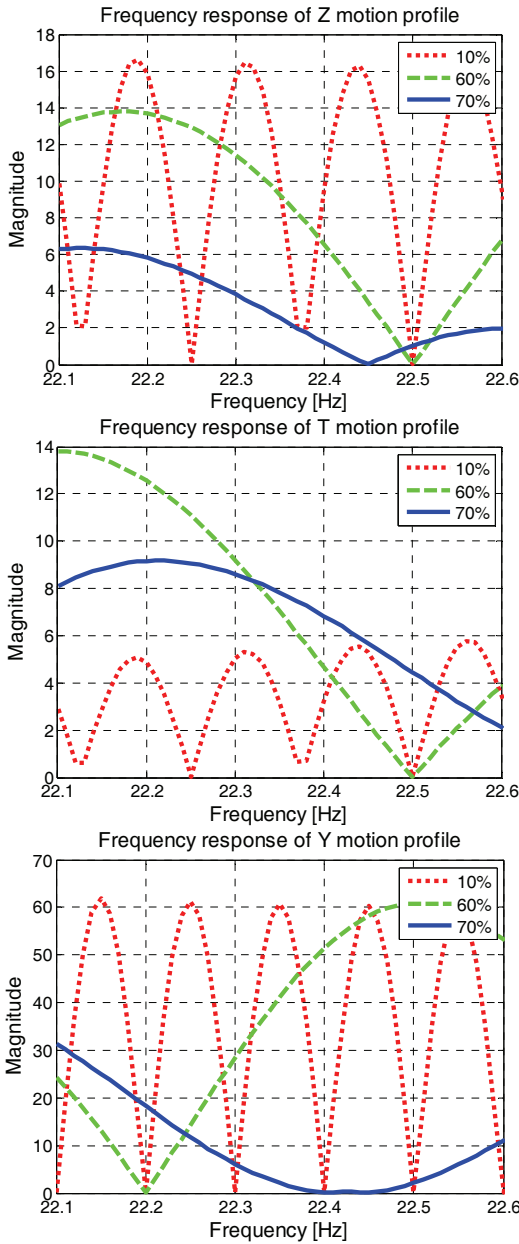


Fig. 13 Frequency transform of Z, T and Y motion profile in the interested range of 22.1~22.6Hz

5. 각 모션프로파일에 따른 진동측정실험

이번 실험에서는 Z, T, Y축의 3축을 동시에 이송하여 도착위치에서의 진동(T축방향)을 센서로 측정하였다. 모션프로파일은 4장에서 언급한 Fig. 10과 같은 Z, T, Y축 10%, 60%, 70% 모션프로파일을

Table 3 Maximum amplitude of hands of three robots for 10, 60, 70 % of maximum velocity (unit μm)

Robot	Hand	10 %	60 %	70 %
Robot 1	Hand 1	500	400	150
	Hand 3	1200	500	200
Robot 2	Hand 1	200	160	50
	Hand 3	400	100	100
Robot 3	Hand 1	300	250	200
	Hand 3	700	400	100

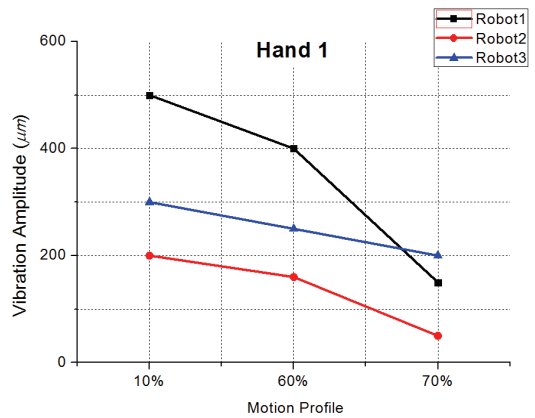


Fig. 14 Vibration of hand 1 in table 3

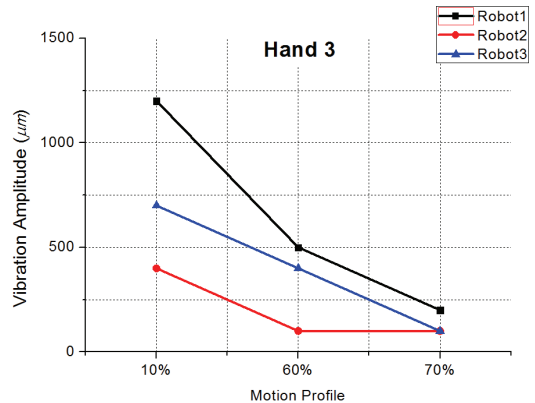


Fig. 15 Vibration of hand 3 in table 3

을 사용하였다. 3개의 로봇에 반복실험 후 실험결과를 Table 3에 정리하였다. Table 3을 보면 Robot1에서 70% 모션프로파일에 의한 핸드1과 핸드3의 진동이 150 μm , 200 μm 으로 기존모션프로파일인 60%모션프로파일에 의한 핸드1, 3의 진동보다 62.5%, 60%가 감소하였으며, Robot2에서 70% 모

선프로파일에 의한 핸드1와 핸드3의 진동이 160 μm , 100 μm 으로 기존모션프로파일인 60 %모션프로파일에 의한 핸드1, 3의 진동보다 68.75 %, 0 %가 감소하였다 또한 Robot3에서 70 % 모션프로파일에 의한 핸드1와 핸드3의 진동이 250 μm , 400 μm 으로 기존모션프로파일인 60 %모션프로파일에 의한 핸드1, 3의 진동보다 20 %, 75 %가 감소하였다. 이에 Table 3을 그래프로 나타낸 Fig. 14, 15를 보면 로봇에 따라 진동의 차이가 있으나 공통적으로 70 % 모션프로파일일 때 진동이 줄어들고 있음을 확인할 수 있으나, Robot2의 핸드3과 Robot3의 핸드1에서는 효과가 낮게 나타났다. 이러한 모션프로파일의 속도를 증가한 반면에 진동이 줄어든 이유는 4장에서 언급한 바와 같이 속도가 증가된 모션프로파일이 주파수대역에서 볼 때 고유진동수에 해당하는 주파수성분의 감소로 인함으로 분석된다.

6. 결론

본 연구에서는 반도체 생산라인 상에서 웨이퍼 이송로봇의 핸드에서 발생하는 진동문제를 해결하기 위하여 로봇의 기계적 특성과 모션프로파일을 분석하여 로봇에 적합한 모션프로파일을 구하고 이를 실험을 통하여 확인하였다.

이를 위하여 웨이퍼이송로봇 핸드에 임펄스충격실험을 하여 핸드의 고유진동수를 구하였다. 로봇의 최대속도의 10%, 60%, 70% 에 해당하는 정속 속도의 모션프로파일에 대하여 가속도 성분의 주파수 성분을 구하였으며, 특히 핸드의 고유진동수 부근에서의 각 모션프로파일의 주파수성분을 세밀히 분석하였다. 그 결과 70% 모션프로파일이 고유진동수부근에서 가장 낮은 주파수응답을 가지고 있음을 확인하였다. 각 모션프로파일을 사용한 실험을 통해 진동을 측정하여 70% 모션프로파일에서 진동이 가장 작게 나옴을 확인하였다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 2013년도 산학연공동기술개발사업(No. 2013-105-055)의 연구수행으로 인한 결과임을 밝힙니다.

REFERENCES

1. Biagiotti, L. and Melchiorri, C., "Trajectory Planning

for Automatic Machines and Robots," Springer, pp. 59-87, 265-289, 2008.

2. Yoon, J. K. and Shin, D. W., "A Research for Comparative Analysis of Various Motion Profile," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 83-84, 2012.
3. Yoon, J. K. and Shin, D. W., "Improvement of Vibration Performance for Wafer Transfer Robot using Motion Profile," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 53-54, 2013.
4. Yim, J. C., Ahn, T. K., and Cho, J. K., "Reduction of Residual Vibration in Wafer Positioning System using Input Shaping," Proc. of KSNVE Autumn Conference, pp. 559-563, 2005.
5. Hong, S.-W., Park, S.-W., and Singhose, W. E., "Input Shaping for Vibration Reduction in Precise Positioning System," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 4, pp. 26-31, 2008.
6. Kim, D. J., Hong, S. W., and Kim K. J., "Velocity Profile Design of Liquid Tank Considering Sloshing Natural Frequencies," Proc. of KSMTE Conference, Paper No. 19, 2013.
7. So, B. K., Tae, W. H., and Kim, J. H., "Development of Improved 5th Order Motion Profile for Low Vibration and High Speed," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 10, pp. 1110-1118, 2012.
8. Lim, C. Y. and Shin, D. W., "The Design of Predefined Motion Profiles with Input Shaping," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 179-180, 2011.