

단선억제 및 가공정도 향상을 위한 Draw Tower의 구조 안정화 설계

남규동*·노승훈**†·윤현진*·김영조***·길사근****·이대웅*****

*금오공과대학교 대학원, **†금오공과대학교 기계시스템공학과,
구미대학교 기계공학과, *(주)티브이에스, *****한온시스템(주)

Structural Design of a Draw Tower for the Improved Stability and the Suppressed Wire Breakage

Kyu Dong Nam*, Seung Hoon Ro**†, Hyun Jin Yoon*,
Young Jo Kim***, Sa Geun Kil**** and Dae Woong Lee*****

*Graduate School, Kumoh National Institute of Technology,

**†Dept. of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology,

Dept. of Mechanical Engineering, Gumi University, *TVS Co., Ltd, *****Hanon Systems

ABSTRACT

Wire breakage in drawing, which is the most critical process in glass fiber manufacturing, is caused by numerous factors such as height, drawing speed, and air flow. The vibrations of the draw tower, however, is the most dominant factor to create the wire breakage. In this study, the structure of a draw tower has been analyzed through experiments and computer simulations to figure out the main reasons of the vibrations. And the design alterations were applied to the machine to identify the effects of those alterations. The result shows that design alterations of the draw tower structure can suppress the 87% of the vibrations, and further can prevent the wire breakage.

Key Words : Glass Fiber, Draw Tower, Design Alterations, Improved Stability, Suppressed Wire Breakage

1. 서 론

전 세계 광섬유 시장은 2016년 31억 달러에서 연평균 9.8%의 성장률로 증가하여 2021년에는 50억 달러에 이를 것으로 전망된다. 4G, 5G의 발전 및 데이터 센터의 증가 등이 광섬유 시장 성장의 주요 요인이다.[1]

이러한 광섬유 산업에서 가장 중요한 요소는 단선율을 최소화하여 손실을 줄이는 일이며 광섬유의 지름을 일정하게 가공하여 통신 효율을 높이는 것이다. 이 두 가지는 광섬유 산업의 부가가치를 결정하는 매우 중요한 사항이다. 광섬유 제조공정 중 드로잉 공정 장비는 MCVD(Modified

Chemical Vapor Deposition) 공정을 통해 제작된 모재를 광섬유로 인출하는 장비로, 이 장비의 진동은 가공정도를 해칠 뿐 아니라 단선을 일으켜 불량률을 높이고 제품 및 가격 경쟁력에 큰 악영향을 미친다.

광섬유의 제조공정은 Fig. 1과 같이 크게 코어 모재 생산과 클래드 모재 생산 그리고 드로잉(광섬유 인출)으로 분류되며 본 논문의 주제인 Draw Tower는 전체 공정의 핵심 장비이다.

광섬유 제조공정 중 드로잉 공정은 Fig. 2의 (a)와 같이 유리전이온도 이상의 온도에서 모재를 가열하며 인장응력으로 광섬유를 인출하는 공정으로 가공 중 장비 진동에 의한 전단응력이 응력의 크기, 방향을 변화시켜 (c)와 같이 광섬유 굽기가 불균일해지고 단선이 발생하므로 진

†E-mail: shro@kumoh.ac.kr

동제어를 통한 정밀한 인출이 요구된다.

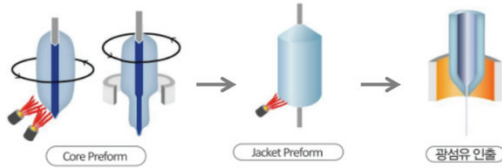


Fig. 1. Process of the optical fiber manufacturing

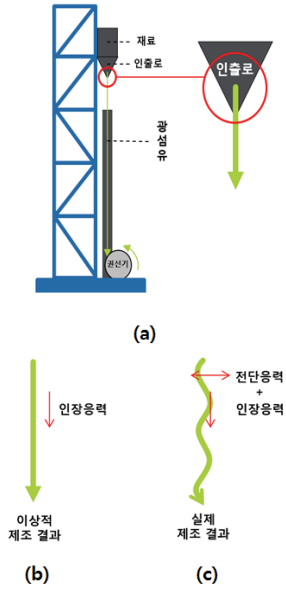


Fig. 2. Drawing process

인출 공정의 이상적인 가공형태의 Mohr's Circle은 Fig 3과 같이 인장응력만 존재한다. 그러나 가공 중 Draw Tower가 진동하게 되면 전단응력이 발생하여 인장응력과 더불어 Fig 4와 같은 Mohr's Circle을 갖게 된다.

진동에 의한 전단응력의 존재로 Mohr's Circle의 지름을 크게 하여 응력이 커지며 응력의 작용 방향이 계속 변하게 된다. 즉, 진동의 크기는 시간에 따라 변화하므로 전단응력의 크기가 변하게 되어 최대 전단응력 값이 계속 달라지므로 Cable이 받는 응력 값이 달라지면서 Cable의 직경이 변하게 되고 진동이 클수록 이 변화가 심해져 그에 따라 Cable의 단선 발생 가능성이 크며 인출 공정에서 단선이 되지 않더라도 다음 공정에서 단선될 가능성도 그만큼 커진다.

본 연구에서는 Draw Tower의 진동을 최소화할 수 있도록 설계를 개선함으로써 단선을 억제하고 광섬유 생산공정의 안정화와 가격경쟁력 제고 및 광섬유 지름의 균일화로 통신 효율을 높임을 목표로 한다.

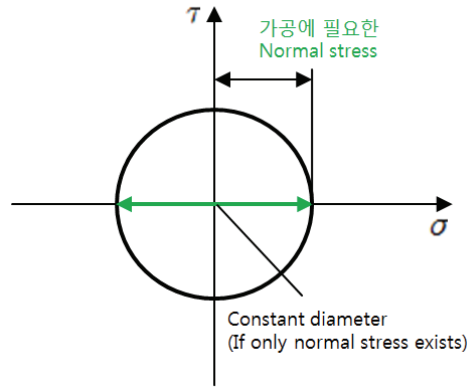


Fig. 3. Mohr's circle for ideal drawing

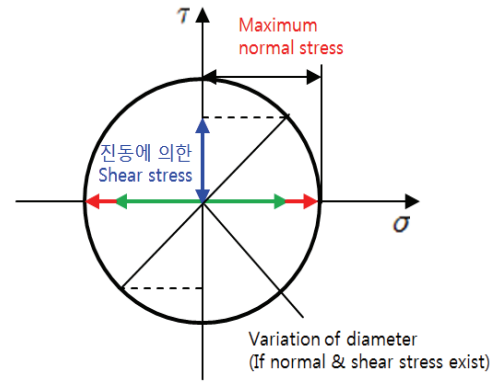


Fig. 4. Mohr's circle for drawing with shear stress

2. 장비 동특성 분석 및 결과

2.1 진동 분석 실험

Draw Tower의 진동 상태 분석과 설계 개선안도출을 위하여 주파수분석 실험을 진행하고 이를 통해 구조물의 동특성을 분석하여 장비의 진동 원인이 되는 고유진동수와 진동형에 대하여 분석한다.[2]

2.1.1 Draw Tower 구조

본 장비의 경우 모재를 피더(Feeder)에 장착한 후 전기로(Furnace)에 삽입하고 끝 부분을 용융점 온도로 가열하여 모재가 연화되면 Capstan으로 감아 광섬유로 인출한다.

Capstan Wheel의 주요 작동속도는 900 mpm, 1200 mpm 이며 이는 실제 가공에 사용되는 작동속도로 장비 진동발생에 가장 큰 영향을 미치는 가진원이다. Fig 5는 Draw Tower의 구조이다. 이 Draw Tower의 제원은 2.2.1에 소개하였다.



Fig. 5. The structure of the draw tower

2.1.2 실험 장비 및 Setup

실험에 사용된 장비 및 준비상태는 Table 1 및 Fig. 6 과 같다.

Table 1 Spec. of the test equipments

Equipment	Model	Company
Freq. analyzer	DSA 212	Difa Measuring Systems
Accelerometer	8634b5	Kistler
Impact hammer	DYTR PULSE	Dytran

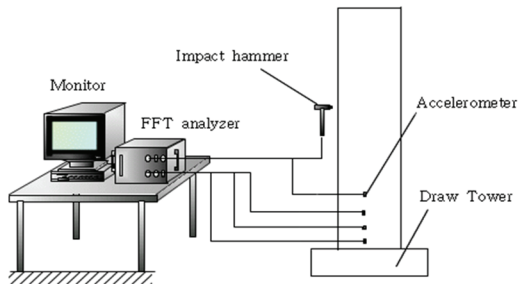


Fig. 6. The setup for the frequency response test

Top Frame에 Accelerometer를 부착하여 임팩트 해머로 힘을 가하고 센서로 진동을 측정하여 주파수 분석기를 통해 전달함수를 얻는다. 전달함수의 분석을 통해 장비의 동특성(고유진동수, 진동 형태)을 파악할 수 있으며 Fig. 7의 ①~④위치에 Accelerometer를 부착하고 동일한 실험을 진행하였다.

2.1.3 진동 측정 실험 결과

Fig. 8은 실험으로 부터 얻어진 장비의 전달함수 그래프이다. 그래프의 피크(Peak)점에서 각 고유진동수를 읽을 수 있으며 상대적인 크기를 통해 진동형을 유추할 수 있다.

Fig. 8의 Peak들은 해당 주파수 대역의 진동이 커질 가능성이 있는 영역이며 Capstan Wheel의 직경이 254.65 mm임을 감안할 때 900 mpm의 가공속도는 18.75 Hz에 해당되며

1200 mpm은 25 Hz에 해당한다. Capstan의 작동속도가 구조물의 고유진동수[18.7, 24.6 Hz]와 공진하여 Draw Tower 및 내부 Module의 내구성을 저하시키는 물론 품질에 악영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 아래 Fig. 9는 Draw Tower의 각 부의 고유진동수 및 진동형을 정리한 그림이다.[3]

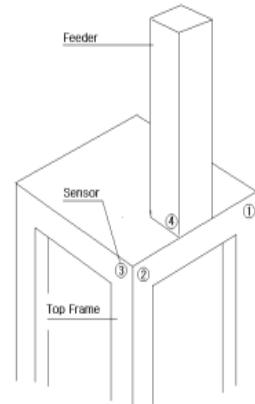


Fig. 7. The locations of the sensors

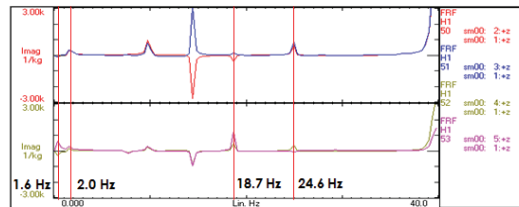


Fig. 8. Transfer functions of the machine

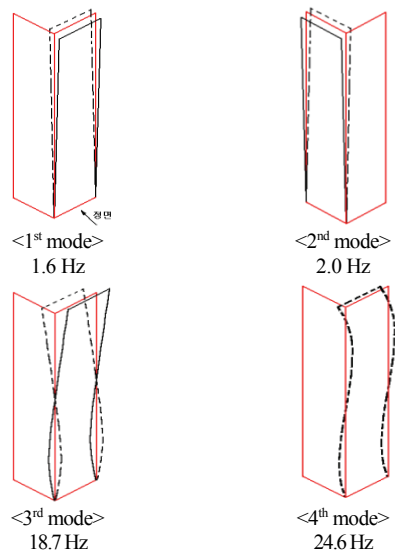


Fig. 9. Mode shapes(1~4th mode) of the machine (experiment)

2.2 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구조물의 동특성을 파악하기 위해 구조물의 형상, 물성치, 지지조건을 반영하여 모델링을 진행하였다.

2.2.1 시뮬레이션 모델 설정

구현된 Model은 Fig. 10과 같으며 제원은 높이 22 m, 중량 18 ton이다.

시뮬레이션 모델의 재질은 구조용 강(Young's Modulus : 200 GPa, Poisson's ratio : 0.3, Density : 7870 kg/m³)으로 하였으며 각 부분별 접촉조건으로 볼트 체결부위는 연결점을 공유하는 것과 유사한 조건인 Bonded로 하였고 베이스 바닥부분은 Fixed로 하였다. 또한 인출로 하부에 5 ton의 하중을 적용시켰다.

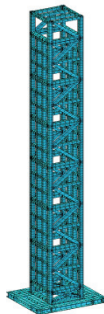


Fig. 10. The model for computer simulation

2.2.2 시뮬레이션 결과

유한요소해석 프로그램을 이용하여 구현된 시뮬레이션 모델의 해석 결과는 Fig 11과 같이 정리할 수 있다.

2.3 진동 분석 실험과 컴퓨터 시뮬레이션 결과 비교

실험 및 시뮬레이션을 통하여 얻어진 고유진동수를 비교한 결과 Table 2에서 볼 수 있듯이 두 경우의 오차가 5% 이하로 실험 결과와 시뮬레이션에 의한 분석 결과가 잘 일치하므로 시뮬레이션 모델이 실제 장비의 특성을 잘 반영하고 있으며 이 모델을 이용하여 설계 개선을 진행할 수 있다.

3. 안정화 설계안 도출 및 효과 확인

3.1 개선안 도출

실험 및 시뮬레이션 결과를 활용하여 설계 개선안을 도출하고 그 효과를 확인하는 과정을 거쳐 최종 설계안을 완성한다.

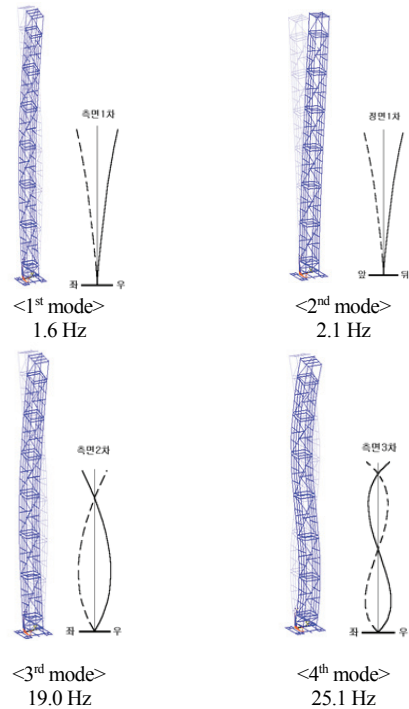


Fig. 11. Mode shapes(1~4th mode) of the machine (simulation)

Table 2. Natural frequencies from experiment and simulation

	Natural Frequencies[Hz]			
Experiment	1.6	2.0	18.7	24.6
Simulation	1.6	2.1	19.0	25.1
Difference	0%	5%	1.6%	2.03%

주파수 분석 실험결과 1, 2차 고유진동수의 경우는 작동속도 영역에서 멀리 떨어져 있어 공진의 가능성은 극히 적으므로 강성을 강화하는 것이 가장 바람직하다. 18 ~ 30 Hz 구간에 존재하는 19.0 Hz, 25.1 Hz의 진동은 광섬유류의 가공속도인 900 ~ 1200 mpm과 일치하여 큰 진동을 일으킨다. 그러므로 최대한 공진을 회피하여 진동을 억제할 수 있는 방향으로 개선안을 도출한다.

3.1.1 설계 개선안 #1

Draw Tower의 강성을 크게 하여 동특성을 향상하기 위하여 지지 Bracket을 설치하는 것이 바람직하다. 강성 증가와 함께 하부 질량증가에 의한 진동흡수 증대로 전체적인 진동량을 감소시킨다. 최적 Bracket 조건을 찾아 Fig. 12와 같이 Frame 상부측면 네 모서리와 대응하는 Basement 윗면 네 모서리를 지지대로 상호 연결 후 Rib을 설계하였다. 지지 Bracket을 설치한 후 Simulation Model에 대한 고유진동수 및 진동크기의 결과는 Table 3과 같다.[4]

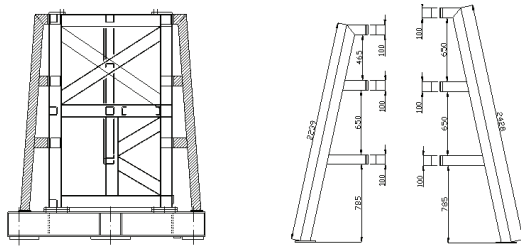


Fig. 12. Design alteration #1

Table 3. Natural frequencies and vibration magnitudes of original model and alteration #1

		Original	Alteration #1	Difference
Nat. freq. [Hz]	1st	1.6	1.9	18.7% ↑
	2nd	2.1	2.6	23.8% ↑ -
	3rd	19.0	20.5	7.8% ↑
	4th	25.1	27.0	7.5% ↑
Vib. Mag. [mm/s ²]		113.79	49.28	56.7% ↓

Table 3을 보면 최초 Simulation Model에 비하여 고유진동수가 약 25.35% 상승하였으며 진동량 또한 전체적으로 약 56.7% 감소하였다.

3.1.2 설계 개선안 #2

Fig 13 (a)와 같이 5번째 Frame부터 Top Frame까지 대각선으로 설치된 Beam을 축소 변경하였다. 상부질량을 감소함으로써 Draw Tower 전체 중량을 감소시키며 하부의 일정한 강성에 대한 상부의 관성영향을 감소시켜 고유진동수 상승과 진동량의 감소를 유도한다[5]

Fig 13 (b)와 같이 1, 2, 3번째 Frame의 수직기둥 단면 치수를 증가시켰다. 하단질량 및 강성을 증가시킴으로써 진동 흡수능을 증가시키며 동시에 굽힘강성을 보완하여 고유진동수를 상승시켜 작동속도 영역에서 공진을 억제하고자 한다.

Fig 13의 개선안을 적용하여 시뮬레이션을 진행한 결과를 Table 4에 정리하였으며 진동이 47% 감소함을 확인하였다.

3.2 최종 개선안 도출 및 효과 확인

앞에서 다양한 설계 개선을 통해 동특성 및 진동량의 변화 양상을 살펴보았다. 언급된 설계 변경안 모두 진동 감소 효과가 있으므로 지지 Bracket 설치의 설계 개선안 #1, Frame 질량 증가/감소의 설계 개선안 #2를 함께 적용하여 결과를 확인하고자 한다.[6]

Fig 14는 개선안 적용 전후의 진동을 Computer Simulation

으로 비교한 것이며 Table 5는 이를 통해 얻은 고유진동수 변화를 나타낸다. 본 구조 안정화 설계 연구를 통해 Draw Tower의 진동이 87.4% 소멸되었으며 Frame 질량 감소로 기존의 18 ton이던 장비가 11.5 ton으로 줄어 제조 원가 절감에도 크게 기여할 수 있어 이를 최종 개선안으로 결정하였다.

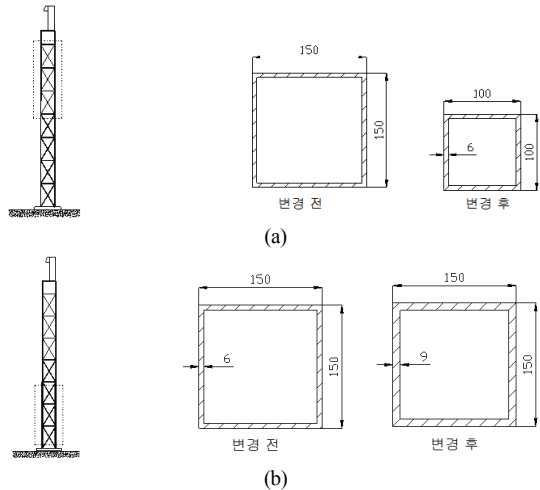


Fig. 13. Design alteration #2

Table 4. Natural frequencies and vibration magnitudes of original model and alteration #2

		Original	Alteration #2	Difference
Nat. freq. [Hz]	1st	1.6	1.8	12.5% ↑
	2nd	2.1	2.4	14.2% ↑
	3rd	19.0	26.2	37.8% ↑
	4th	25.1	35.4	41.0% ↑
Vib. Mag. [mm/s ²]		113.79	60.31	47% ↓

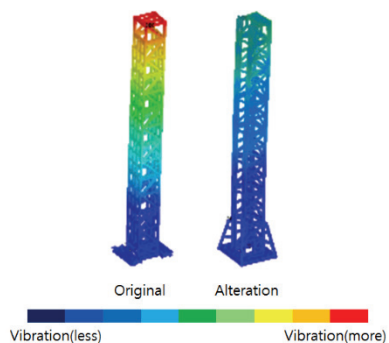
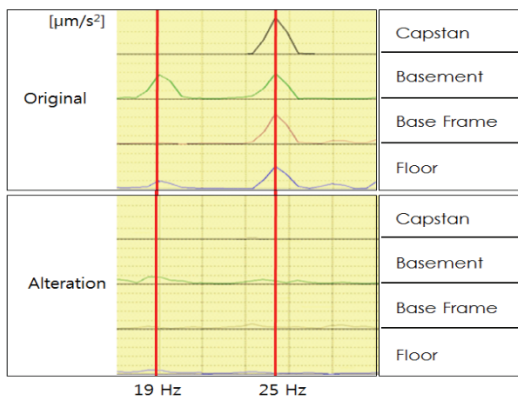


Fig. 14. Vibration magnitudes of the original model and the final model(simulation)

Table 5. Natural frequencies and vibration magnitudes of original model and the final model

		Original	Alteration	Difference
Nat. freq. [Hz]	1st	1.6	1.9	18.7% ↑
	2nd	2.1	2.6	23.8% ↑
	3rd	19.0	31.6	66.3% ↑
	4th	25.1	42.1	67.7% ↑
Vib. Mag.[mm/s ²]		113.79	14.34	87.4% ↓

Fig. 15 는 개선 전후 Draw Tower의 진동을 측정된 결과로 진동이 90% 이상 소멸되었음을 확인할 수 있다.

**Fig. 15.** Vibration magnitudes of the original model and the final model(experiment)

4. 결 론

본 연구는 Draw Tower의 진동 최소화를 통한 단선억제 및 가공정도향상을 위한 설계 개선안을 찾고자 하였다. 이를 위하여 기존 Draw Tower의 동특성을 분석하고 이를 바탕으로 Simulation Model에 설계 개선안을 적용하여 그 효과를 검증하였고 이 효과들을 조합하여 기존의 Draw Tower에 비하여 진동이 90%이상 소멸된 안정된 Draw Tower의 설계안을 도출하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존 Draw Tower는 Fig. 9와 같은 진동을 보이며 900 rpm ~ 1200rpm의 작동속도 구간에서 공진한다.
- 2) Draw Tower의 고유진동수 1.6 Hz는 Fig. 11과 같이 Draw Tower가 좌.우로 흔들리는 Mode이며 이를 최소화하기 위하여 지지 Bracket을 설치하여 56.7%의 진동량 감소 효과를 보았다.

- 3) Draw Tower의 고유진동수 19.0 Hz, 25.1 Hz는 Fig. 11와 같이 Beam 2차, 3차 Mode 형태이며 이를 최소화하기 위하여 Fig. 13과 같이 Frame길이를 증가/감소시켰으며 그 결과 약 47%의 진동량 감소 효과를 보았다.
- 4) 본 설계안을 적용하여 Draw Tower를 제작한 결과 Draw Tower의 진동억제를 통한 불량률의 혁신적 감소는 물론 수입된 장비보다 제작 및 Maintenance에 있어 커다란 경비절감의 효과를 가져올 수 있을 것으로 사료된다. 또한 본 연구의 결과는 현재 다양한 공장에서 사용되고 있는 각종 장치의 동특성 분석 및 생산성 향상에 직결되는 고속 작동화를 위한 설계개선의 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술 연구비 지원에 의하여 연구된 논문으로 이에 관계자 여러분께 감사를 포함합니다.

참고문헌

1. Fiber market - R&D Special zone technology global market trend report, Innopolis foundation, pp. 2-5, 2018.
2. Ro, S. H., Mechanical Vibrations with Applications, Chaosbook, pp. 152-172, 2013.
3. Ro, S. H., "Design Alteration of a Milling Machine Structure for the Improved Stability," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5, pp. 72-78, 2006.
4. Cho, H. J., and Ro, S. H., "Effect of Design Parameters on the Variation of Natural Frequencies of the Uniform and the Nonuniform Cantilever Beams," Transactions of the KSME, Vol. 23, pp. 697-708, 1999.
5. Ro, S. H., and Park, Y. R., "Stability Design of a Laser Cutter for the Strengthened Glass", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 19-25, 2015.
6. Shin, H. B., and Ro, S. H., "Design Alterations of a Squaring & Grinding Machine for the Solar Cell Wafer to Suppress Vibrations", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 25-30, 2017.

접수일: 2019년 6월 4일, 심사일: 2019년 6월 18일,
게재확정일: 2019년 6월 21일