

Settling Time에 따른 웨이퍼 TTV 측정 및 변수 영향 분석

김형원* · 정안목* · 김태호* · 이학준*†

*† 한국생산기술연구원

Wafer TTV Measurement and Variable Effect Analysis According to Settling Time

Hyeong Won Kim*, Anmok Jeong*, Taeho Kim* and Hak Jun Lee*†

*† Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

High bandwidth memory a core technology of the future memory semiconductor industry, is attracting attention. Temporary bonding and debonding process technology, which plays an important role in high bandwidth memory process technology, is also being studied. In this process, total thickness variation is a major factor determining wafer performance. In this study, the reliability of the equipment measuring total thickness variation is identified, and the servo motor settling, and wafer total thickness variation measurement accuracy are analyzed. As for the experimental variables, vacuum, acceleration time, and speed are changed to find the most efficient value by comparing the stabilization time. The smaller the vacuum and the larger the radius, the longer the settling time. If the radius is small, high-speed rotation performance is good, and if the radius is large, low-speed rotation performance is good. In the future, we plan to conduct an experiment to measure the entire of the wafer.

Key Words : Wafer TTV, Settling Time, Displacement sensor

1. 서 론

최근 5G, 인공지능, 사물인터넷, 자율운전, 빅데이터 등 반도체 산업의 발전과 더불어 현대 사회에서는 데이터 고성능 처리 속도를 요구하는 추세이다.¹⁾ 인공지능 시장의 확대에 따라 메모리의 수요가 증가하고 있는 상황에서 주목받는 연구 분야 중 하나가 HBM(High Bandwidth Memory)이다.²⁾ HBM은 3D 적층 기술을 활용한 고성능 메모리로 높은 대역폭을 구현할 수 있다. 기존 RAM과 비교하여 크기가 작아 공간 효율성이 높고, 소비 전력도 낮다. 더 빠른 HBM개발을 위해 전 세계적으로 다양한 연구 개발이 이루어지고 있는 추세이며, 이는 미래의 메모리 반도체 기술을 선도하는 중요한 역할을 할 것으로 주목받고 있다.

HBM 공정 과정에서 반도체 칩이 점점 더 얇아질수록 품질에 대한 더 정밀한 웨이퍼 테스트가 필요하다. TTV (Total Thickness Variation)는 웨이퍼의 총 두께변화율을 나타내는 지표로서 HBM, TBDB (Temporary Bonding and Debonding)와 같은 공정에서 주로 사용되며 웨이퍼칩의 두께 및 평탄도를 측정하여 확인할 수 있다. 평탄도는 곧 웨이퍼의 성능을 좌우하는 중요한 요소로 작용하므로 TTV의 중요도는 점점 더 커지고 있다.³⁾

1.1 연구 배경 및 목적

현재 TTV 측정을 위한 다양한 방식이 개발되어지고 있으며 M사는 와전류 센서를 이용한 방식으로 TTV를 측정하였다. 와전류 방식은 고주파 자계를 발생시켜 전자 유도 작용에 의해 대상 물체 표면에 수직 방향의 와전류가 흘러 센서 코일의 임피던스가 변한다. 이러한 현상에 따

†E-mail: hak1414@kitech.re.kr

른 발진 상태의 변화를 이용하여 거리를 측정한다. 이를 통해 웨이퍼 두께, TTV에 대해 측정이 가능하며, 웨이퍼 전체 표면 스캐닝과 매핑이 가능하였다.⁵⁾ TTV 측정을 위한 다른 측정 방식으로는 백색광 간섭계 측정 방식이 있다. 백색광 간섭원리는 빛이 광 분할기에서 나뉘진 빛이 샘플과 기준거울에서 반사되며 다시 광 분할기에서 만나면 빛의 중첩의 원리에 의거하여 간섭이 일어난다. 그 간섭패턴을 이용하여 거리를 측정한다.⁶⁾ 백색광 간섭계는 면 측정 방식이기 때문에 수직방향 해상도는 높으나 측면방향 해상도는 낮은 문제가 있고, 비균질 재료는 측정 정확도가 제한된다.

본 연구에서는 위와 같은 문제점을 보완하기 위하여 제작한 시스템에서는 측정 정확도 성능이 뛰어난 레이저 변위 센서를 사용하였으며 웨이퍼의 위, 아래 면을 동시에 측정한 후 이를 이용하여 TTV측정이 진행된다. 제작된 TTV 측정 모듈의 기초실험을 통해 Settling Time에 대한 최적조건을 도출하였으며 이를 바탕으로 TTV 측정 모듈의 신뢰성평가를 확인하였다.

2. 웨이퍼 TTV 측정

TTV는 웨이퍼의 두께변화율을 확인하는 용도로서 다양한 방식으로 본딩된 웨이퍼 칩의 상태를 확인할 수 있다. TTV는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 T_{max} 는 Maximum Thickness이고 T_{min} 은 Minimum Thickness이다.

$$TTV = (T_{max}) - (T_{min}) \quad (1)$$

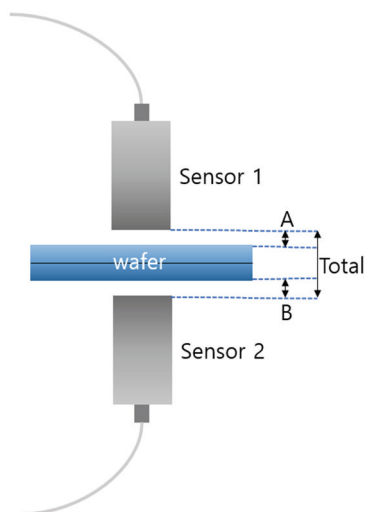


Fig. 1. Visual representation of Laser sensor.

Fig 1의 센서들은 레이저 변위 센서이며 웨이퍼의 두께 변화를 측정할 수 있다. 센서 두께를 이용해서 측정하는 듀얼 측정 방식을 활용해 높은 정확도를 제공하고, 각 레이어의 측정이 가능하다. 다음 Fig 1 센서는 식(2)과 같은 수식으로 웨이퍼의 두께를 측정한다.

$$Thickness = Total - A - B \quad (2)$$

2.1 TTV 측정을 위한 간이 측정 모듈

본 실험에서는 Fig 2와 같이 중앙에 위치한 웨이퍼를 대상으로 웨이퍼의 위, 아래에서 측정 가능하도록 구성하였다. 공압은 웨이퍼를 척에 고정시켜 서보 모터 회전에도 중심이 움직이지 않게 잡아주는 역할을 한다. 레굴레이터를 이용하여 척에 가해지는 공압을 일정하게 유지하고, 공압의 크기 조절이 가능하다.

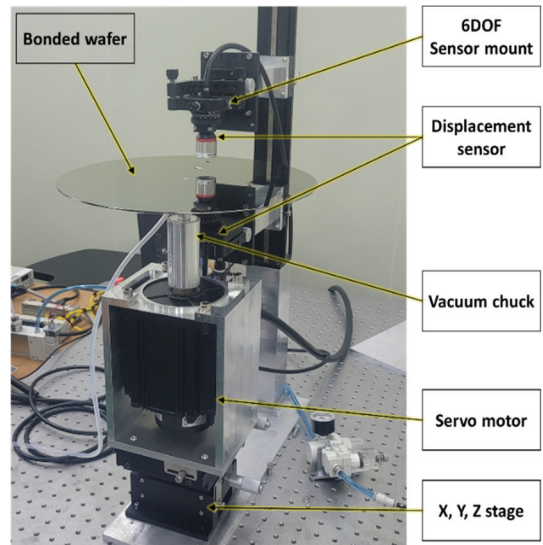


Fig. 2. Wafer TTV Measurement equipment.

변위 센서가 들어간 Sensor mount는 6자유도 센서 광축용 조정 지그로 6축($X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)의 미세 조정을 통해 센서 광축이 일치되도록 구현하였다. 또한 간이 모듈에서 웨이퍼 전영역 TTV측정을 위해 서보모터 하단에 X, Y, Z 축 정밀 이송 스테이지를 사용하였다. 서보모터는 웨이퍼 TTV측정 위치에 대한 정확한 검토를 위해 분해능이 23Bit인 고정밀 서보모터를 사용하였다.

변위센서는 멀티 컬러 공초점 레이저 센서를 적용하였다. 멀티 컬러 공초점 측정원리는 파장별로 초점 거리가 다른 빛을 투광하고, 수광 시 초점이 일치하는 파장의 빛만 투과시켜 수광된 빛의 결상 위치를 산출하여 변위를

측정하는 방식이다. 이는 기존 백색 광원보다 광범위한 파장대역에서 안정적인 고휘도 발광이 실현된다. 또한 Spot 직경에 변화가 없기 때문에 거리가 달라지거나, 곡면 및 경사도에서도 고정도 측정이 가능하다.⁷⁾ 측정헤드에는 렌즈만 있기 때문에 발열이나 전기 노이즈의 영향도 없다. TTV간이 측정 모듈에 사용된 Component를 Table 1에 작성하였다. Fig. 3 처럼 간이 모듈은 최종 49개의 Point를 측정 가능하도록 설계되었다.

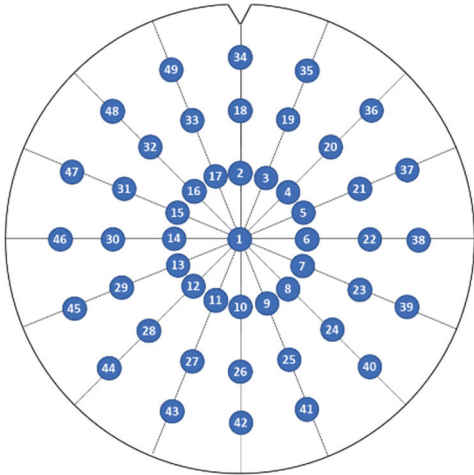


Fig. 3. Main points among Wafer with 49 Bonding Points Marked.

Table 1. Specification of Vacuum, Servo Motor and Sensors

Component	Item	Description
Vacuum Ejector	Vacuum Ejector (ZL6H06-K15LZ, SMC)	Max working vacuum pressure: -93kpa
Servo Motor	Servo Motor (MDMF302L1G5, PANASONIC)	Rated Torque: 14.3 N·M Rated rotation speed: 2000 r/min Resolution: 8388608
Displacement Sensor	Displacement Sensor (CL-P015, KEYENCE)	Measurement range: ±1.3mm

3. TTV측정 실험

3.1 TTV 측정 모듈의 신뢰성 테스트

측정 모듈의 신뢰성을 검토하기 위해 1500 μm 두께의 글라스 웨이퍼를 이용하여 사전 실험을 진행하였다.

Table 2는 글라스 웨이퍼의 중심으로부터 75mm 떨어진 4Point에서 측정한 두께를 나타낸 표이다. TTV는 3.1 μm 로 측정 모듈의 신뢰성을 확인하였다.

Table 3은 기초 실험에 사용할 본딩 웨이퍼의 실제 두께를 사전 측정한 것이다. 기초 실험을 통해 나온 두께 결과값과 비교하여 장비의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

Table 2. Glass Wafer TTV pre-test

Position	Thickness (μm)
18	1495.9
22	1499.0
26	1498.7
30	1497.9
Max.	1499.0
Min.	1495.9
TTV	3.1

Table 3. Bonding Wafer Thickness pre-test

Position	Thickness (μm)
Max	1667.0
Min	1540.5

3.2 TTV 측정 최적조건 도출

신뢰성이 검증된 모듈로 본딩 웨이퍼 TTV를 측정하였다. Fig. 4에 나온 2번(65mm), 18번(75mm), 34번(112.5mm) 지점에서 22.5° 회전시켰을 때 발생한 웨이퍼의 TTV를 관측하였다.

본 실험에서는 서로 다른 조건에 따라 TTV settling time이 얼마나 차이가 나는지 알아보기 위해 사전 실험을 진행하기 전에 세가지 변수를 설정하였다. 웨이퍼를 고정시켜주는 공압의 크기, 웨이퍼 회전 시 서보모터의 속도, 가속시간을 변수로 정하였다. 공압과 속도는 수치를 바꿔가며 실험을 진행하였고 가속시간은 사전 실험을 통해 50ms로 설정하였다. Fig. 5는 공압의 크기와 서보 모터 속도에 따른 비교 그래프이다. 34번(112.5mm) 지점에서 기준 공압마다 속도를 바꿔가며 최적조건을 찾는 실험을 수행하였다. 각 공압 조건에 따른 실험 결과값에 대한 산술평균을 산출하여 그 값을 비교해 볼 수 있었다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 공압이 점점 낮아질수록 Settling time이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 공압의 최적 조건은 레귤레이터 최대 공압인 -92.5kPa이다. 장비의 생산성이 좋기 위해서는 측정 시간이 짧아야 하기 때문에 속도에 따른 TTV의 차이가 어떻게 발생하는지 보기위해서 각 반경에 따른 속도 변화 43 degree/s 와 8.6 degree/s를 변수로 반복 실험을 진행하였다.

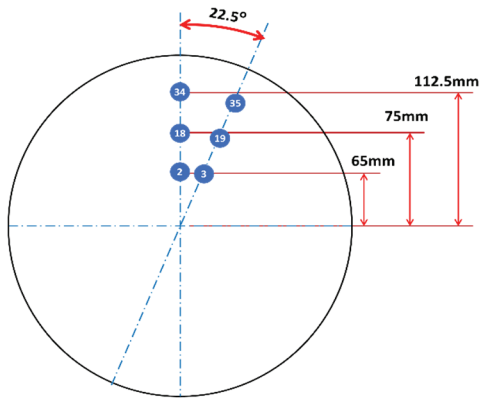


Fig. 4. Point inside the wafer used in the experiment.

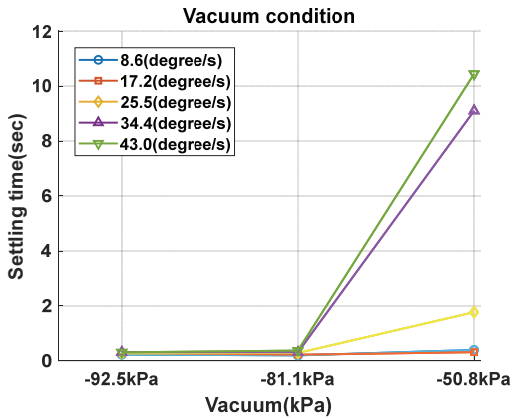


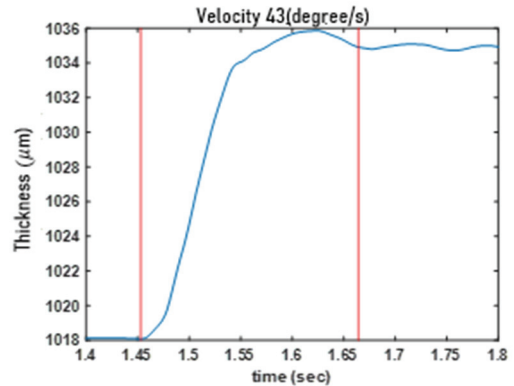
Fig. 5. The relationship between vacuum and velocity conditions.

4. TTV 실험

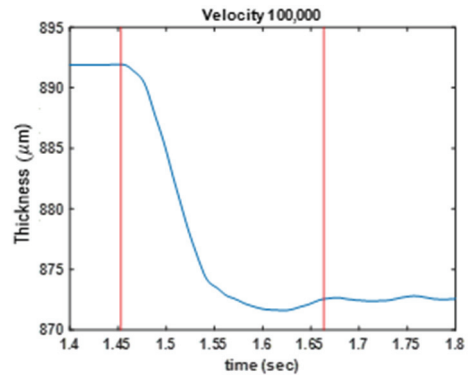
Fig. 6 (c), Fig 7은 TTV측정 settling time 값과 서보 모터의 속도에 따른 위치 편차 settling time을 비교한 그래프이다. 서보 모터 그래프는 위치 편차를 나타내며, 위치 지령 펄스가 종료된 후 목표 위치로부터 발생하는 위치 편차가 미리 설정한 In-position 값보다 작은 경우, 정확한 위치에 도달하기 위해 피드백 제어를 통해서 그래프가 변화함을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 공압 -92.5(kPa), 속도가 43(degree/s), 가속시간이 50ms 일 때 34번 point(반경 112.5mm)에서의 TTV와 서보 모터의 Settling Time을 붉은 실선으로 표현한 그래프이다. (a)는 Fig. 1에서 확인했던 Sensor1에 해당하고 (b)는 Sensor2에 해당한다. (a), (b) 그래프는 각각의 위치에서 서보 모터를 작동시켰을 때 위, 아래에서 측정한 본딩 웨이퍼의 두께이다. Fig 6 (c)에서의 TTV는 약6.5 μ m 이고, 두께는 1655 μ m

안쪽으로 들어오는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 공압 -92.5 (kPa) 속도가 8.6(degree/s), 가속시간이50ms 일 때 34번 point(반경 112.5mm)에서 측정한 자료이다. Fig 7에서의 TTV는 약 7.5 μ m 이고, 두께는 1656 μ m 이내에 들어오는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Table 3에서 나타난 것처럼 Max 두께인 1667 μ m 내에 들어오는 것 확인할 수 있었다.



(a) Upper displacement data



(b) Under displacement data

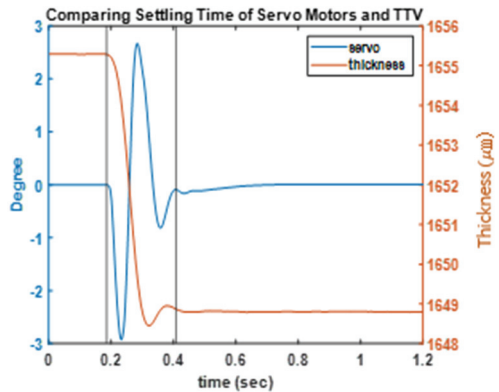


Fig. 6. (c) Comparing Settling Time of Servo Motors and TTV data at a Speed of 43(degree/s).

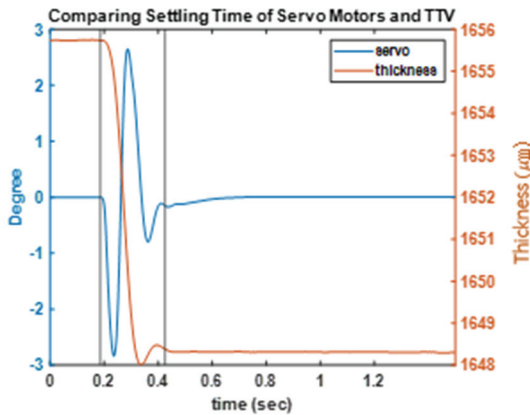


Fig. 7. Comparing Settling Time of Servo Motors and TTV data at a Speed of 8.6(degree/s).

5. 실험 결과

Table 4와 Table 5는 각각 공압 -92.5kPa, 가속시간 50ms 일 때 각 반경마다의 Settling Time을 보여주고 있다. 두 테이블은 속도의 차이를 가지고 있다. Table.4는 43(degree/s)속도를 설정하였고 Table 5는 8.6(degree/s)의 속도 차이를 두고 실험을 진행하였다. 실험 결과를 Fig. 7에 그래프로 나타내었다.

Table 4. Vacuum -92.5kPa, Acceleration time 50ms, Velocity 43(degree/s)

No.	65mm	75mm	112.5mm
1	173.8ms	194.4ms	231.8ms
2	173.7ms	186.6ms	249.9ms
3	173.2ms	177.0ms	255.7ms
4	168.7ms	195.8ms	251.2ms
5	179.4ms	191.7ms	242.3ms
6	179.7ms	193.8ms	230.3ms
AVG	174.7ms	189.9ms	245.2ms

Table 5. Vacuum -92.5kPa, Acceleration time 50ms, Velocity 8.6(degree/s)

No.	65mm	75mm	112.5mm
1	179.2ms	205.9ms	237.3ms
2	175.4ms	203.4ms	229.9ms
3	176.7ms	224.7ms	256.8ms
4	172.7ms	194.8ms	250.7ms
5	178.4ms	191.3ms	237.3ms
6	178.7ms	192.7ms	228.3ms
AVG	176.8ms	202.1ms	240.0ms

결과적으로 Settling time이 웨이퍼의 반경 65mm 내부에서 외부로 갈수록 조금씩 커지는 경향을 보인다. 최적속도는 도출하지 못하였으며 반경에 따라서 적정 속도를

확인할 수 있었다. Fig. 7에서 반경이 65mm, 75mm일 때는 고속도 회전이 Settling time성능이 더 좋은 반면, 112.5mm 일 때는 저속도 회전이 성능이 더 좋은 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 전체 settling time이 대략 2.6s안에 전부 들어오는 모습을 보이고 있다.

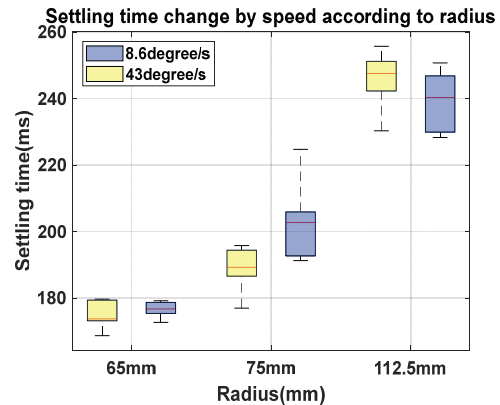


Fig. 8. Experimental results in Table3,4.

6. 결론

본 연구에서는 공압, 속도에 따른 웨이퍼 TTV계측에 대한 실험을 진행하였으며, 각 변수 조건(공압, 가속시간, 속도) 들을 구성하고 연구를 수행하였다. 직경 300mm 본딩 웨이퍼의 두께를 멀티컬러 공초점 방식을 사용한 레이저 변위센서로 웨이퍼의 위, 아래를 반경 65mm, 75mm, 112.5mm 지점에서 22.5°돌렸을 때의 TTV 및 Settling Time을 측정하였다. 공압의 크기는 너무 강하면 웨이퍼의 파손이 발생할 수 있었으나 실험 결과 레귤레이터 최대 공압을 가해도 이상없음을 확인하였다. 공압의 크기를 줄이며 실험을 진행하였고, 공압의 크기가 줄어들수록 Settling Time이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 반경을 넓히며 실험을 진행하였다. 반경이 커질수록 Settling Time이 커졌으며, 8.6degree/s일 경우에는 반경 112.5mm일 때 성능이 좋았고 43degree/s일 경우는 65mm, 75mm일 때 성능이 좋았다. 따라서 생산성을 높이기 위해서 웨이퍼 반경 TTV를 측정하려면 반경별로 속도를 맞게 조절하여 회전시킨다면 생산성을 높일 수 있을 것으로 예상된다. 향후 웨이퍼 전 영역 49Point에 대한 실험을 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 정부 산업통상자원부의 ‘PIM인공지능반도체 핵심기술개발 사업’의 지원을 받아 수행된 연구 결과임니

대[과제명: HBM 제조를 위한 초박형 웨이퍼 핸들링용 본딩 장비 개발/과제 고유번호: RS-2022-00154701].

참고문헌

1. MO, Zihao, et al. "Temporary Bonding and Debonding in Advanced Packaging: Recent Progress and Applications", *Electronics*, 2023, 12.7: 1666. 2.
2. LEE, Jong Chern, et al. High bandwidth memory (HBM) with TSV technique. In: 2016 International SoC Design Conference (ISOCC). IEEE, 2016. p. 181-182.
3. Jun, Hongshin, et al. "High-bandwidth memory (HBM) test challenges and solutions." *IEEE Design & Test* 34.1 (2016): 16-25.
4. Korea Institute of Machinery and Materials. "Development of core technology for ultra-thin wafer TBDB (Temporary Bonding De-Bonding) equipment". Ministry of Science, ICT and Future Planning, 2014.
5. KEYENCE." Eddy Current Displacement Sensor among Precision Measurement Libraries" [<https://www.keyence.co.kr/ss/products/measure/library/type/inductive.jsp>] (2023).
6. Yong-Tae Jeon, Hyun Lee, and Jae Sung Choi. "Development of 3D surface shape analysis system using white light scanning interference." *Korean Information Processing Society Conference Proceedings* 24.1 (2017): 625-628.5.
7. Hyun-Woo Oh, and Woong-Sik Kim. "The Development of Bumped Wafer Inspection System Using Confocal Principle." *Journal of the Institute of Electronic and Information Engineering* 56.7 (2019): 47-54.

접수일: 2023년 6월 20일, 심사일: 2023년 8월 25일,
게재확정일: 2023년 9월 7일