

초고장력 강판의 CMT 용접 조건과 용접 이음부 분석

방양근^{a,b}, 강유성^c, 송문섭^b, 전용호^{c*}

Analysis of Welding Conditions and Weld Joints of Advanced High-strength Steel Through Cold-metal Transfer Welding

Yangkeun Bang^{a,b}, Yousung Kang^c, Moonseob Song^b, Yongho Jeon^{c*}^a Graduate school of engineering, Ajou University^b Institute of technology, Seojin Industrial^c Department of Mechanical Engineering, Ajou University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	18	March	2020
Revised	3	April	2020
Accepted	8	April	2020

Keywords:

AHSS
CMT welding
Tensile strength
Lap joint weld
Hardness

ABSTRACT

Lightweight vehicles are essential in the automotive industry and are receiving increasing attention in research studies. In particular, investigations on the welding of advanced high-strength steel (AHSS) have been conducted recently. In this study, the lap joint welding of AHSS was performed through a cold-metal transfer welding process, and the defects in the cross-section were analyzed to determine the optimum welding condition. Additionally, tensile tests were carried out under the selected welding conditions to check if the weld had a similar tensile strength to that of the base material. Fracture mainly occurred at the boundary of the heat-affected zone, which was analyzed through the increase in hardness.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 연비 및 CO₂ 규제가 강화되면서 환경 규제를 만족하지 못할 경우 자동차의 판매 제한 및 기준치 초과에 따른 페널티를 부여하고 있다. 따라서 자동차 산업에서는 차량의 연비를 향상시키고, CO₂ 배출을 줄이기 위한 연구에 주목하고 있다. 차량의 연비를 향상 시키는 방안으로는 내연 기관의 효율 향상 및 초고장력 강판 및 경량 소재 확대 적용을 통한 차량의 경량화가 있고, CO₂ 배출을 저감시키기 위한 방안으로는 친환경 자동차 개발 등이 있다.

이 중 차량 경량화는 배기가스 감소, 연비 및 가속 성능 향상, 제동 거리 단축, 조향 성능 향상, 자동차 새시의 내구 수명 증가와

같은 장점이 있다. 이를 위해 초고장력 강판을 이용한 경량화 연구가 활발히 진행되고 있는데, 초고장력 강판은 일반 강판 대비 비강성이 높아 차량 경량화에 유리한 이점이 있기 때문이다. 그러나, 강판의 두께가 감소하여 용접성이 떨어지기 때문에 초고장력 강판을 효과적으로 활용하기 위한 금속 박판 용접 기술이 필요하다. 금속 박판 용접에 대한 연구는 지속적으로 진행되어, Fronius社에서 개발된 cold metal transfer (CMT) 용접이 상용화되었다^[1]. 본 연구에서는 자동차용 초고장력 강판 중에서 아연 도금된 780 MPa급과 1180 MPa급의 초고장력 강판을 활용하여 두께 변화 및 인장 강도에 따른 용접조건 및 기계적 강도 변화를 분석하였다. 입열량 감소를 통한 열 변형을 최소화하기 위해 CMT 용접을 적용하였으며, 용접 이음부의 품질을 평가하기 위해 용접 단면 분석 및 용접

* Corresponding author. Tel.: +31-219-3652

E-mail address: princaps@ajou.ac.kr (Yongho Jeon).

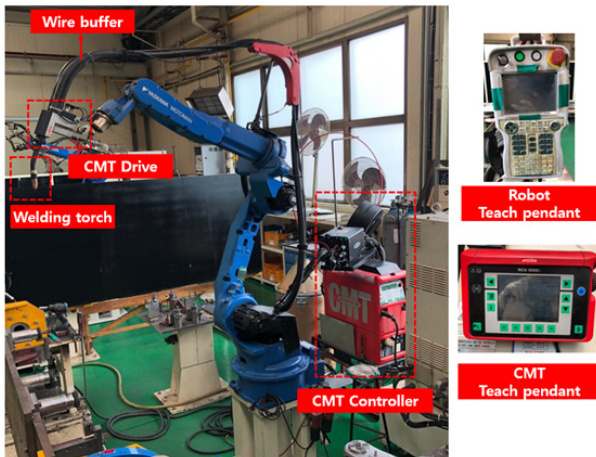


Fig. 1 Equipment used for CMT welding experiments on ultra-high strength steel plates

이음부의 인장 강도, 경도를 분석하였다.

2. CMT 용접

2.1 Cold metal transfer 용접

Fronius社에서 개발된 CMT 용접은 용적 이행 과정에서 기계적으로 와이어의 송급 속도를 제어하여 단락 이행 시키는 방법으로, 단락 시 와이어가 후진하여 강제적으로 단락을 종료시킨다^[2]. CMT 용접은 단락 구간에서도 전압을 낮게 유지하여 과전류 제어가 가능하고, 기계적인 강제 단락을 통해 열이 유입되는 시간이 짧아져 모재에 입열량이 감소하게 된다. 입열량의 감소는 열 영향부의 면적을 감소시키고, 스파터 감소 효과를 가진다. CMT 용접은 0.3 mm 두께의 박판 용접까지 가능한 것으로 보고되었으며, 알루미늄과 같은 비철계 금속과의 이종 접합에서도 우수한 용접 품질을 유지하는 것으로 보고되었다^[3]. 본 연구에서는 초고장력 강판의 두께 및 인장 강도 변화에 따른 CMT 용접 실험을 진행하고, 용접 후 시편의 용접 품질 및 신뢰성을 평가하였다.

3. 초고장력 강판의 CMT 용접 실험

3.1 CMT 용접 실험 계획

본 연구에서는 YASKAWA社의 MOTOMAN 용접 로봇과 Fronius社의 TPS4000 CMT 컨트롤러 장비를 사용하였다. Fig. 1은 CMT 용접 시스템의 구성을 나타내었고, Table 1은 CMT 컨트롤러 장비의 제원을 나타내었다. 와이어는 1.2 mm 직경의 고장력강용 솔리드 와이어를 사용하였으며, 보호 가스는 Ar과 CO₂의 비율을 8:2로 사용하였다.

실험에 사용된 초고장력 강판은 자동차 차체 및 새시 부품 특히

Table 1 CMT welding controller spec

TPS4000 CMT controller	
Mains voltage	3Φ 400 V ± 15%
Mains frequency	50/60 Hz
Mains fuse protection	35 A
Degree of efficiency	88%
Welding current range	3 - 400 A
Duty cycle at 10 min/40°C	40% at 400 A
Duty cycle at 10 min/40°C	100% at 320 A
Open circuit voltage	70 V
Working voltage	14.2 - 34 V
Protection class	IP 23
Dimensions l/b/h in mm.	625/290/475 mm

Table 2 Experimental combinations based on specimen thickness and tensile strength

	Upper sheet	Lower sheet
Case 1	1180 MPa (1.4 t)	1180 MPa (1.4 t)
Case 2	780 MPa (1.6 t)	780 MPa (1.6 t)
Case 3	780 MPa (1.6 t)	1180 MPa (1.4 t)

Table 3 Factors and levels of CMT welding experiments

	Level 1	Level 2	Level 3
Wire feeding vel. (m/min)	3.0	3.4	3.8
Welding torch vel. (m/min)	0.5	0.6	0.7

범퍼 빔의 제조에 사용되는 아연 도금된 초고장력 강판(현대제철, SGAF780DP, SGAF1180Y)을 사용하였으며, 인장 강도는 각각 780 MPa급과 1180 MPa급의 초고장력 강판을 사용하였다. 양산 조건에 부합하는 용접 시편 제작을 위해 가로, 세로 길이는 각각 100, 50 mm 이고, 두께는 1.6 mm인 경우와 1.4 mm인 경우를 고려하였고 이를 Table 2에 나타내었다.

용접 이음은 겹치기 이음(lap joint) 용접을 하였으며, Fig.2는 제작된 시편과 실험에 사용된 지그를 나타내었다. 아연 도금된 강판의 겹치기 이음 용접은 강판 사이의 gap이 없기 때문에 용접 이음부에서 내부 기공 및 스파터가 발생하기 쉽다.^[4] CMT 용접의 공정 변수는 와이어 피딩 속도와 아크용접 토치의 이송 속도를 변수로 설정하여 3 수준으로 Table 3과 같이 실험을 구성하였으며, 나머지 CMT 용접 조건은 Table 4와 같이 모든 실험에서 동일하게 진행하였다.

3.2 CMT 용접 실험 결과

Fig. 2의 장비를 이용하여 Table 2의 초고장력 강판의 두께와

Table 4 Fixed variables in CMT welding experiments

Experimental Conditions	Fixed value
Amount of shielding gas (l/min)	15
Contact tip to work distance (mm)	15
Torch angle (degree)	45
Tilting angle (degree)	0
Torch target point	0



Fig. 2 Welding specimen and CMT welding jig used in the experiment

인장 강도 변화에 따른 용접 품질을 평가하였다. 용접 품질은 용접이 잘 된 케이스와 Fig. 3에 나타낸 세 가지의 용접 결함으로 분류하였다. Back bead는 아크에 의해 용융된 금속이 용접면 반대편까지 침투한 경우로 입열량이 과다한 경우 발생한다. Blow hole은 초고장력 강판 표면의 아연 도금이 용융 금속 내부에서 잔류된 경우 발생한다. Undercut은 용접 전류가 과다하여 모재가 많이 녹아 발생하는 결함이다. 아크 용접에서는 아크의 길이가 길 때 주로 발생한다. 이러한 결함들은 용접 표면의 품질이나 기계적 특성을 저하시키는 원인이 된다.

CMT 용접의 결과를 Table 5에 나타내었다. Table 2~4의 조건을 적용하여 수행한 CMT 용접 시편의 단면이다. 용접 단면의 내부 결함을 확인하기 위한 실험은 ISO 5817 규격을 참고하였다. 각각의 용접 단면에 대해서 용접이 잘 된 경우는 GW, back bead가 발생한 경우는 BB, blow hole이 발생한 경우는 BH, undercut이 발생한 경우는 UC로 나타내었다. 전체적인 CMT 용접의 결과로부터 동일한 용접 토치 이동 속도에서 와이어 피딩 속도가 증가하면 전압과 전류가 증가하여 용입이 깊어지고, 비드 폭이 넓어지는 경향을 보였다. 모재의 두께가 얇은 강판의 용접은 와이어 피딩 속도와 용접 토치의 이동 속도를 높여 입열량을 감소시키는 것이 유리하다. 예시로 모재의 두께가 2.8 t로 가장 얇은 Case 1의 결과에서 와이어 피딩 속도가 3.0 ~ 3.4 m/min이고, 아크 용접 토치의 속도가 0.6 ~ 0.7 m/min일 때, 용접 결함이 없는 것을 확인할 수 있다. 그러나 와이어 피딩 속도와 아크 용접 토치의 속도가 지나치

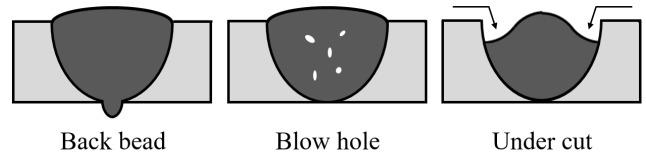


Fig. 3 The type of weld defect considered to evaluate the results of CMT welding

게 빠른 경우에는 blow hole과 undercut이 함께 발생하여 적절한 용접 조건이 필요함을 확인할 수 있다. 모재의 두께가 상대적으로 두꺼운 Case 2와 3의 경우, Case 1 대비 와이어 피딩 속도가 같거나 높고, 아크 용접 토치의 속도는 낮은 경우에 용접 결함이 적게 발생하였다.

4. CMT 용접 시편의 기계적 특성 평가

4.1 인장 강도

Table 5의 결과로부터 용접 단면에서 결함이 없는 조건의 CMT 용접 강판으로 인장 시험 시편을 제작하였다. 인장시험 시편은 KS B 0801 규격을 참고하였으며, 인장 시험의 변형률 속도는 2 mm/min으로 적용하였다. 용접 조건별 3회씩 실험을 진행하여 평균값으로 결과를 도출하였다.

먼저 원소재인 780 MPa (1.6 t)급 소재의 인장 강도는 793 MPa, 최대 하중은 1,573 kgf, 1180 MPa (1.4 t)급 소재는 1,224 MPa, 최대 하중은 2,121 kgf의 결과를 보였다. 각 용접 조건별 강판의 인장 시험 결과는 Table 6에 나타내었으며, 겹치기 이음 용접 시편에 적용된 최대 하중 값을 기준으로 결과를 정리하였다. Case 1의 경우, 와이어 피딩 속도가 3.4 m/min이고, 아크 용접 토치의 속도가 0.7 m/min인 경우에 인장 강도가 가장 높게 측정되었다. Case 2의 경우는 와이어 피딩 속도가 3.8 m/min, 아크 용접 토치의 속도는 0.6 m/min인 경우가 인장 강도가 가장 높게 측정되었으며, Case 3에서는 와이어 피딩 속도 3.8 m/min, 아크 용접 토치의 속도는 0.5 m/min에서 인장 강도가 가장 높게 측정되었다.

인장 시험 시편의 파단 형상을 Fig. 4에 나타내었다. CMT 용접 시편에 인장 하중이 작용할 때, 시편의 파단은 열영향부(heat affect zone; HAZ), 열영향부와 용접부의 경계(fusion line), 용접부(fusion zone)에서 파단이 발생하였다. 대부분의 실험에서 하부 모재의 HAZ 경계에서 파단이 발생하였다.

4.2 파단면 경도 측정

용접 시편의 용접부 파단면의 경도를 측정하기 위해 시편의 절단을 진행하였다. 시편 절단 시 발생하는 열영향을 최소화하기 위해 어브레시브 커터와 절삭유를 충분히 사용하였으며, 낮은 절삭

Table 5 Results of a cross-sectional analysis of CMT welding specimens

Case 1 (1.4 t + 1.4 t)				
Velocity (m/min)	Welding torch			
	0.5	0.6	0.7	
Wire feeding	3.0			
		BB	GW	GW
		3.4		
	BB		GW	GW
	3.8			
		BH	BH+UC	BH+UC
		Case 2 (1.6 t + 1.6 t)		
	Velocity (m/min)	Welding torch		
		0.5	0.6	0.7
Wire feeding	3.0			
		GW	UC	UC
		3.4		
	GW		GW	UC
	3.8			
		BB	GW	UC
		Case 3 (1.6 t + 1.4 t)		
	Velocity (m/min)	Welding torch		
		0.5	0.6	0.7
Wire feeding	3.0			
		BH	GW	GW
		3.4		
	GW		GW	UC
	3.8			
		GW	BH+UC	UC

Table 6 Tensile strength test results for each case of CMT welding specimen

Case 1		Welding torch vel. (m/min)		
Tensile strength (kgf)		0.5	0.6	0.7
Wire feeding vel. (m/min)	3.0	-	1,451	1,532
	3.4	-	1,585	1,715
	3.8	-	-	-
Case 2		Welding torch vel. (m/min)		
Tensile strength (kgf)		0.5	0.6	0.7
Wire feeding vel. (m/min)	3.0	1,373	-	-
	3.4	1,267	1,464	-
	3.8	-	1,552	-
Case 3		Welding torch vel. (m/min)		
Tensile strength (kgf)		0.5	0.6	0.7
Wire feeding vel. (m/min)	3.0	-	1,162	1,521
	3.4	1,060	1,567	-
	3.8	1,630	-	-

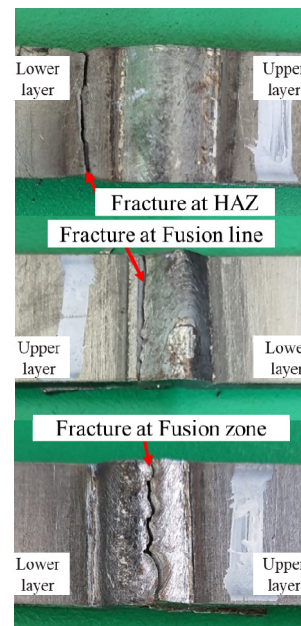


Fig. 4 Types of fractures resulting from tensile strength testing of CMT welding specimens

속도에서 절단을 진행하였다. 파단면의 경도 측정은 Mitutoyo 社의 HM-200 마이크로 비커스 경도계로 측정하였다. 경도의 측정은 Fig. 5에서와 같이 모재부(base metal; BM) - HAZ - Fusion Zone (FZ) - HAZ - 모재부 순서로 0.5 mm 간격으로 0.2 kgf의 하중으로 측정하였다.

1180 MPa급 초고장력 강판을 CMT 용접한 Case 1의 비커스 경도 측정 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 모재부에서 평균 395 Hv, 열영향부에서 평균 400 Hv, 용접부에서는 평균 330 Hv의 결과가 측정되었다. 780 MPa급 초고장력 강판을 CMT 용접한 Case 2

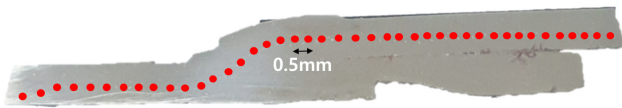


Fig. 5 The position where the hardness is measured at the fracture surface of the CMT welded specimen

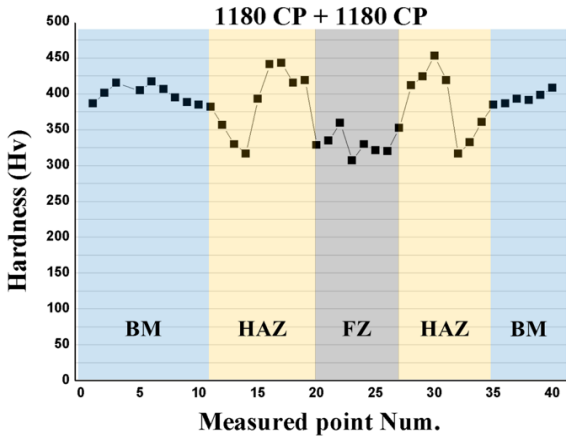


Fig. 6 Results of vickers hardness from Case 1 welded by CMT welding between 1180 MPa AHSS sheets

시편의 비커스 경도 측정 결과는 Fig. 7과 같으며, 모재부에서 265 Hv, 열영향부에서 392 Hv, 용접부에서 305 Hv의 경도가 측정되었다. Fig. 8에는 Case 3의 비커스 경도 측정 결과를 나타내었다. 열영향부에서 경도가 급격하게 증가하는 경향을 모든 Case에서 확인할 수 있었다. 또한 용접부에서는 다시 경도가 감소하는 경향을 보였다.

이는 각 Case에서 살펴본 바와 같이 HAZ에서 경도가 증가함에 따라 취성이 증가하여 파단이 발생한 것으로 분석할 수 있으며, 특히 HAZ에서 모재 또는 HAZ에서 FZ로 변환되는 부위에서 주로 파단이 발생한 것을 확인하였다.

FZ의 경도가 모든 경우에서 비슷한 결과를 보이는 원인은 동일한 용접 와이어를 사용하여 CMT 용접을 진행하였기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 780 MPa급과 1180 MPa급의 초고장력 강판을 대상으로 CMT 용접을 활용하여 와이어 피딩 속도와 용접 토치의 속도를 변화시키면서 겹치기 이음 용접을 진행하였다. 겹치기 이음 용접 이후, 용접 시편의 단면 분석을 통해 용접 결함을 분류하고, 용접 품질을 평가하였다.

두께 1.4 t, 1180 MPa급의 초고장력 강판을 활용한 CMT 용접 실험으로부터 박판 용접의 경우 와이어 피딩 속도와 아크 용접 토치의 속도를 증가시켜 모재에 유입되는 입열량을 감소시켜야 용접

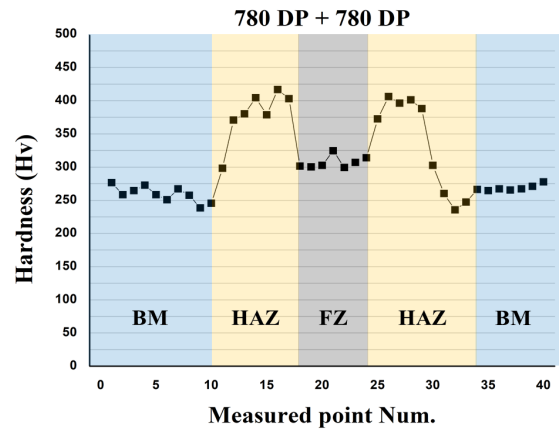


Fig. 7 Results of vickers hardness from Case 2 welded by CMT welding between 780 MPa AHSS sheets

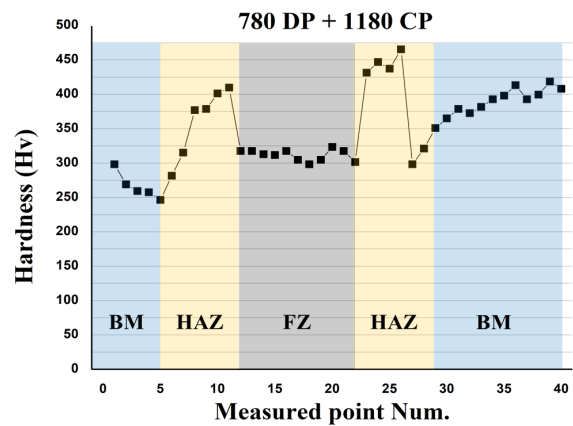


Fig. 8 Results of vickers hardness measured between 1180 MPa and 780 MPa AHSS sheet welded by CMT welding

품질이 향상되는 것을 확인하였다. 그러나 와이어 피딩 속도와 아크 용접 토치의 속도가 지나치게 빠를 경우, 오히려 용접 결함이 발생하여 적절한 용접 조건이 필요함을 확인하였다. 강판의 두께가 증가하면 와이어 피딩 속도는 증가시키고, 아크 용접 토치의 속도는 낮추어야 용접 품질이 향상되는 경향을 확인하였다.

CMT 용접 시편의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장 시험을 진행하였으며, 단일 모재와 유사한 하중에서 파단 되는 것을 확인하였다. 파단 위치는 HAZ, HAZ과 용접부의 경계, 용접부에서 파단이 발생하는 것을 확인하였으며, HAZ과 용접부의 경계 및 HAZ에서의 파단은 아크열에 의해 경도가 높아지고 취성이 증가하여 파단이 발생한 것으로 분석하였다.

후기

본 연구는 2017학년도 아주대학교 일반연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Furukawa, K., 2010, New CMT Arc Welding Process - Welding of Steel of Aluminium Dissimilar Metals and Welding of Super-thin Aluminium Sheets, *Welding International*, 20:6 440-445, <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3598>.
- [2] Kim, Y. S., Ryoo, H. S., Kim, H. J., Oh, S. C., 2007, A Review Welding Current Waveform Control and Mechanical Control Technique for Reduction of Spatter in Short Circuit Transfer, *The Korean Welding and Joining Society*, 25:5 4-14, <https://doi.org/10.5781/KWJS.2007.25.5.004>.
- [3] Lee, C. J., Kim, Y. C., Kim, J. D., 2013, Technology on Arc Welding Machine of Aluminium by Digital Control, *The Korean Welding and Joining Society*, 31:1 26-32, <https://doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.1.26>.
- [4] Ahn, Y. N., Kang, M. J., Kim, C. H., 2016, Applicability Study of 2-pass Laser Welding on Galvanized Steel Sheets, *Journal of Welding and Joining*, 34:4 55-61, <http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.4.55>.
- [5] Jeong, Y. C., Cho, Y. T., Jung, Y. G., 2015, Amount of Spatter in Arc Welding for High-Strength Galvanized Steel According to Shielding Gas Composition, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 15:1 110-115, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2016.15.1.110>.
- [6] Mvola, B., Kah, P., Layus P., 2018, Review of Current Waveform Control Effect on Weld Geometry in Gas Metal Arc Welding Preocess, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96 4243-4265, <https://doi.org/10.1007%2Fs00170-018-1879-z>.
- [7] Bang, Y. K., 2020, Effect on Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel by Cold Metal Transfer welding, Master Thesis, Ajou University, Republic of Korea.

	<p>Yangkeun Bang Research Engineer in Test & Prototype Team at Institute of technology, Seojin Industrial. His research interest is CMT welding. E-mail: ykbang@seojin.com</p>
	<p>Yousung Kang PhD. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is printed electronics. E-mail: gidalim89@ajou.ac.kr</p>
	<p>Moonseob Song General Manager in Test & Prototype Team at Institute of technology, Seojin Industrial. His research interest is Manufacturing process using advanced materials. E-mail: msong2@seojin.com</p>
	<p>Yongho Jeon Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is Manufacturing processes. E-mail: princaps@ajou.ac.kr</p>