

# 이종재 A15083-O/DP590 마찰교반점용접시 틀의 삽입깊이(Plunge Depth)가 용접성에 미치는 영향

정 수 옥\* · 방 한 시\*\* · 방 희 선\*\*,\*†

\*조선대학교 용접·접합과학공학과 대학원

\*\*조선대학교 용접·접합과학공학과

## Effect of Tool Plunge Depth on Weldability of Dissimilar A15083-O/DP590 Friction Spot Joint

Su-Ok Jeong\*, Han-Sur Bang\*\* and Hee-Seon Bang\*\*,\*†

\*Graduate School of Welding and Joining Science Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

\*\*Dept. of Welding and Joining Science Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

†Corresponding author : banghs@chosun.ac.kr

(Received May 30, 2016 ; Revised June 16, 2016 ; Accepted June 21, 2016)

### Abstract

In terms of mechanical and metallurgical characteristics, the effect of tool plunge depths(0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5mm) on weldability in dissimilar A15083-O/DP590 friction spot joint has been clarified. From the results, it is found that the stirred nugget was stably formed at a plunge depth of more than 0.7mm, which is caused by improved stirring action against each other material. With increasing a plunge depth, the thickness of intermetallic compound(IMC) layer in A15083-O/DP590 joint has a tendency to increase. The tensile shear strength reaches to the maximum failure load of 6.5kN at a plunge depth of 0.7mm due to relatively small decrease in the thickness of A15083-O sheet and relatively minute thickness of IMC layer, compared with those of other plunge depth conditions.

Key Words : Friction spot joining(FSJ), Dissimilar materials, Plunge depth, Intermetallic compound (IMC)

### 1. 서 론

세계 자동차업계에서는 연비절감과 이산화탄소 저감 등을 위해 고효율엔진개발과 차체 경량화를 추진하고 있다. 이에 따라 차체 경량화를 위해서 최적구조 설계기술, 경량소재 성형기술, 용접·접합기술 등에 대한 전반적인 연구개발이 세계적으로 진행되고 있다. 이 중에서, 차체 경량화의 가장 효과적인 방법 중의 하나로 다중소재(Multi-Materials) 적용을 들 수 있는데, 이는 요구되는 특성에 맞춰 다양한 종류의 소재를 적용하여 차체를 경량화 하는 방법이다. 예로, 기존 소재 대신 대표적인 경량소재인 알루미늄합금, 마그네슘합금 및 고강도강을 차체에 조합하여 적용하는 것을 들 수

있다. 이와 같이 이러한 경량소재와 고강도강의 조합에 따른 이종금속의 경우<sup>1-5)</sup> 기존의 용융용접으로는 용융점 및 물성차이가 매우 클 뿐만 아니라 접합부 계면에 취성의 금속간화합물(IMC)의 발생으로 만족할 만한 건전한 용접부를 얻을 수가 없다<sup>6)</sup>. 최근 경량소재와 철계 이종금속 용접을 위한 연구로 고상용접중의 하나인 마찰교반용접(Friction stir welding, FSW)을 채용하여 경량합금과 연강 또는 스테인레스강(Al/Steel, Mg/Steel 및 Ti/Steel)과의 맞대기 용접시 기계적 성질에 대한 연구가 보고되고 있다. 이는 가압력과 틀 회전으로 인한 마찰열, 피접합재의 소성유동을 이용한 고상용접으로써 상기와 같은 용융용접의 근본적인 문제를 해결할 수 이 점이 있다. 현재 마찰교반용접을 국외 자동차업체 마쓰다는 2006년 MX-5 차종의 트렁크 판넬에, 혼다는

2013년 어코드 차종의 프런트 서브프레임에 적용하여 양산하는 단계이다. 그러나 국내는 아직 연구단계이며, 양산제품에는 적용되지 않고 있으며<sup>7-10)</sup>, 또한 경량합금과 고강도강 이종금속의 마찰교반점용접(Friction spot joining, FSJ)에 관련된 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 자동차용 고강도강판 DP590과 경량소재 알루미늄합금 Al5083-O 이종금속에 대한 마찰교반점용접을 실시하였으며, 툴의 핀(Pin) 삽입깊이(Plunge depth)가 용접부의 소성유동 및 기계적, 금속학적 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다<sup>11,12)</sup>.

## 2. 실험 방법

### 2.1 사용 재료

본 연구에서는 두께 3.0mm의 알루미늄합금 Al5083-O와 두께 2.0mm의 DP590강판을 사용하였으며, 이들의 화학성분과 기계적 물성은 Table 1에 나타내었다. 시편은 150mm(L) × 50mm(W)로 제작하였으며, Al5083-O은 상판, DP590은 하판에 위치시켜 두 판재를 겹치기 용접을 실시하였다. 접합툴은 WC-Co12% 소재로 제작하였고 툴의 솔더 직경은 14mm, 핀은 절두체(frustum)형상에 직경은 위, 아래 각각 6mm, 4mm이고, 길이는 상판의 두께와 동일한 3mm로 하였다.

### 2.2 실험 방법

두 판재를 50mm 겹치고 지그로 고정하여 마찰교반점용접을 실시하였다. 용접공정변수는 예비실험 회전속도 300~500rpm, 삽입속도 0.3~1.0mm/s 결과를 토대로, 본 실험에서는 회전속도는 300rpm, 삽입속도는 0.5mm/s, 유지시간은 15초로 두고 툴의 핀 삽입깊이

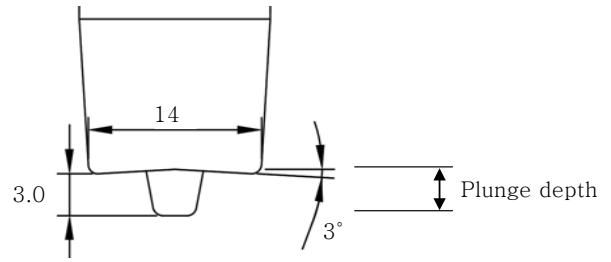


Fig. 1 Tool details used (unit: mm)

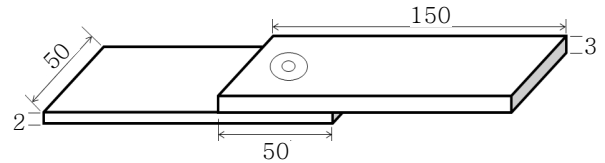


Fig. 2 Dimensions of specimen (unit: mm)

(0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5mm)의 변화에 따른 용접부의 특성을 고찰하였다.

실험 후, 용접부 특성을 관찰하기 위해서 시험편을 나이탈(Nital)용액과 켈러(Keller)용액을 사용하여 에칭한 후 용접부의 단면을 관찰하였다. 기계적 특성 고찰을 위해 경도, 전단인장강도시험을 실시하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도기(HM-112)를 사용하여 0.5kgf, 유지시간 10초로 측정하였으며, 접합계면을 기준으로 알루미늄측 0.7mm, 스틸측 0.7mm의 위치에서 0.5mm 간격으로 측정하였다. 전단인장시험은 KS B 0851규격으로 전단인장시험편을 제작하여 만능재료시험기(UT100F)로 평가하였다. 금속학적 특성의 경우 SEM(JSM-7000F)을 이용하여 툴의 삽입깊이에 따른 용접부의 미세조직과 금속간화합물(IMC)층의 두께 변화에 대해서 고찰하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 용접부의 기계적 특성

#### 3.1.1 용접부 마크로 및 전단인장강도

Fig. 3는 알루미늄합금 Al5083-O를 상부에 고강도강 DP590을 하부에 배열하여 겹치기용접시, 툴의 핀 삽입깊이(0.2~1.5mm)에 따른 접합부의 단면의 형상을 나타낸 것이다. 겹치기 접합부의 기계적 성질에 가장 큰 영향을 원인으로 미세조직이 아니라 훅(hook)현상과 유효두께(effective sheet thickness)의 감소 및 금속간화합물의 영향에 대한 접합부의 특성의 관점에서 고찰하였다.

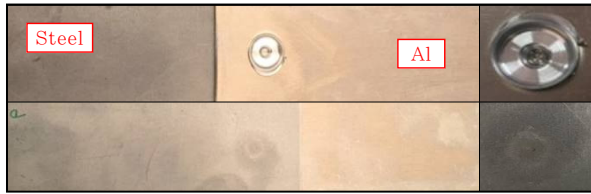
먼저 삽입깊이에 따른 너깃 형상을 관찰해보면, 툴의 삽입깊이가 낮은 0.2mm~0.5mm조건에서는 핀이 하

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of base materials

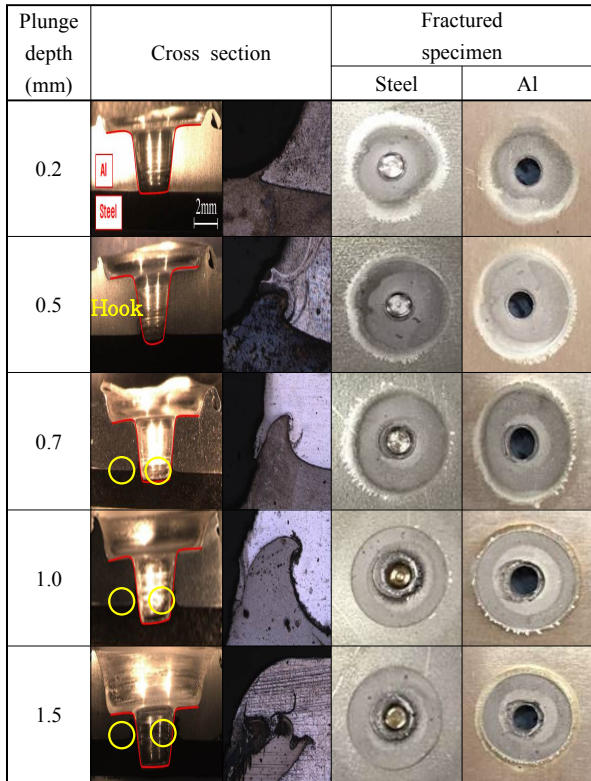
Chemical composition (wt.%)									
Al5083-O	Mg	Mn	Fe	Cr	Si	Cu	Ti	Zn	Al
	4.402	0.655	0.297	0.096	0.083	0.020	0.010	0.002	Bal.
DP590	C		Si	Mn		P		S	
	0.063		0.178	1.819		0.012		0.005	

Mechanical properties			
Material	T.S(MPa)	Y.S(MPa)	EL.(%)
Al5083-O	316.9	143.1	23.1
DP590	593.0	375.0	29



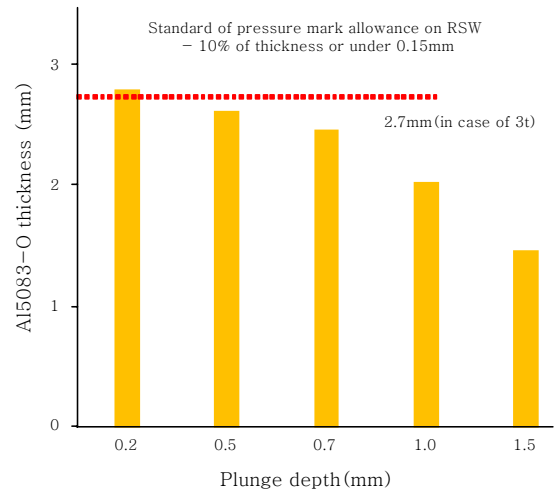
(a) Appearance



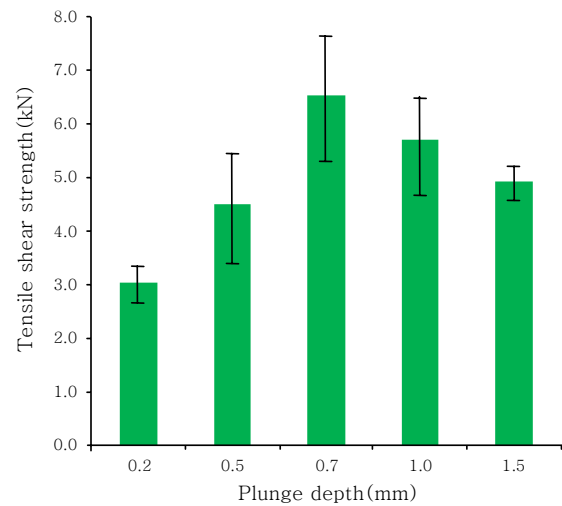
(b) Cross section and fractured specimen

**Fig. 3** Appearance, cross-section and fractured surfaces of specimens

부스틸 상표면에 약간 닿을 정도이므로 너깃 형상은 교반작용이 적어 단순히 접합된 형태를 나타내었다. 반면 틀의 삽입깊이가 0.7mm 이상에는 핀이 하부스틸 상표면을 교반함으로써 너깃 형상은 두 재료가 서로 교반이 이루어진 형태를 나타냄을 알 수 있었다. 또한 접합부에 흑이 상부 알루미늄의 핀 끝단 좌우로 발생하며, 이는 삽입깊이에 비례하여 흑의 폭과 높이가 증가하였다. 아울러, 삽입깊이에 따른 접합부 상부 알루미늄층의 유효 두께변화를 고찰하기 위해, 두께변화를 측정해 보았다. Fig 4에 나타낸바와 같이 삽입깊이가 증가할수록 상판 알루미늄 두께 감소가 증가함을 확인할 수 있었으며, 특히 삽입깊이가 1.0mm 이상일 때 두께가 급격히 감소하는 특징을 나타냈다. 이러한 접합부에 대한 유효두께 평가를 위해 저항점용접 기준 압흔 허용도 (두께 10% 또는 0.15mm) 관점에서 비교해 보았다. 저항점용접 기준 압흔 허용도 규정에 의하면 본 실험에서 사용된 알



**Fig. 4** The thickness of Al5083-O(3t) after welding



**Fig. 5** Tensile shear strength of the joints at various plunge depths

루미늄 두께 3mm의 경우 유효두께 2.7mm 이상이 허용되므로, 삽입깊이 0.2mm를 제외한 다른 조건에서는 이를 만족시키지 못함을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 틀의 삽입깊이(0.2~1.5mm)에 따른 전단 인장시험 결과를 나타낸 것이다. 특징으로는 삽입깊이 0.2mm에서 0.7mm 조건에서 삽입깊이가 증가할수록 전단인장강도가 증가하다가 1.0mm 이후에는 점차 감소하는 특징을 나타내었으며, 최대 전단인장강도는 6.5kN으로 삽입깊이 0.7mm일 때 관찰되었다. 전단인장강도에 만족하는 접합조건에 따른 전단인장강도 차이를 Fig. 3의 너깃의 형상, 인장전단시험의 파단 양상 및 상판 알루미늄 두께의 감소측면에서 분석하여 보았다. 너깃의 형상 및 인장전단시험의 파단 양상측면<sup>13,14)</sup>에서 살펴보면, 0.7mm 이하에서 너깃 형상이 단순히 접합된 형태여서 계면파단이 발생하고, 0.7mm 이상에서 재료

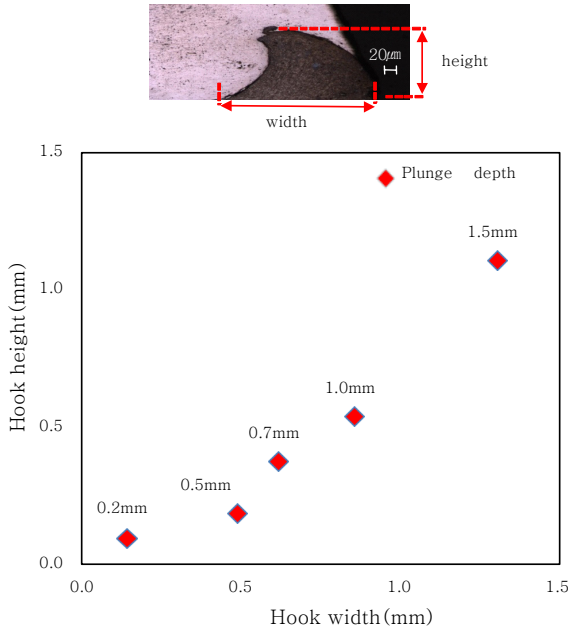


Fig. 6 Hook size of the joints at various plunge depths

가 서로 교반이 이루어져 접합된 너깃이 형성되어 플러그파단이 발생하기 때문이다. 아울러 두께의 감소 측면에서 보면, 0.7mm이하에서는 두께 감소가 그다지 크지 않기 때문에 최대 전단인장강도가 0.7mm일 때 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 6과 같이 틀의 삽입깊이에 따른 용접부 혹의 크기로 X축은 혹의 너비, Y축은 혹의 높이를 측정하여 비교하였다. 틀의 삽입깊이가 증가할수록 스틸이 알루미늄 쪽으로 유입되는 양이 커지기 때문에 혹의 크기가 증가하는 것으로 판단된다<sup>15)</sup>. 또한 앞서 살펴본 바와 같이 삽입깊이의 증가에 따라 전단인장강도가 비례해서 증가하는 것이 아니기 때문에 높은 전단인장강도를 얻기 위해서 피접합재의 두께 대비 적절한 틀의 삽입깊이가 요구되는 것으로 판단된다.

3.1.2 경도 분포

Fig. 7은 용접부의 중심에서 좌우 10mm로 0.5mm 간격으로 경도 분포를 나타내었다. 삽입깊이가 1.5mm일 때, (a) Al5083-O측에서 최대 경도 값이 270Hv로 모재 190Hv에 비해 약 80Hv 정도 높은 경도를 나타내는데, 이는 교반 중에 하부의 스틸이 상부 알루미늄 쪽으로 유입되어 형성된 혹에 해당되므로 다소 높은 경도 값을 나타내었다. 그리고 (b)의 DP590도 알루미늄과 마찬가지로 틀의 삽입깊이 1.5mm일 때, 최고 경도가 약 337Hv로 모재 대비 약 140Hv 높아짐을 알 수 있었다. 특히, 삽입깊이에 따른 경도 비교에서 1.5mm일 때, 알루미늄과 스틸 모두 경도 값이 현저하게 높은 값

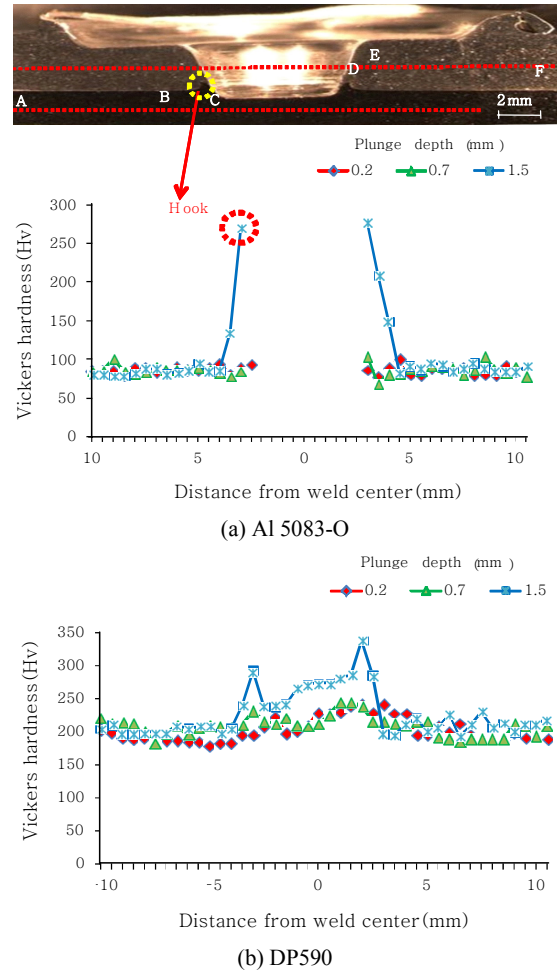
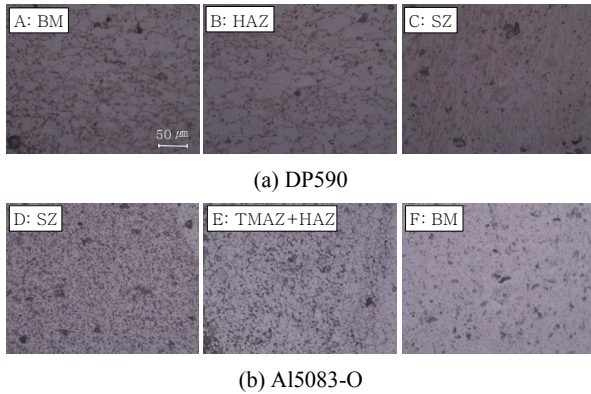


Fig. 7 Hardness distribution of the welding region

을 얻었는데, 이는 삽입깊이가 증가할수록 틀의 가압력과 회전으로 인한 소성변형으로 인해 경도가 높아짐을 알 수 있었다<sup>16,17)</sup>. 또한, 금속간화합물에서 경도는 높아지고 이로 인해 취성의 성질을 나타낸다<sup>18)</sup>. 본 실험에서의 경도 역시 금속간화합물 발생으로 접합부의 경도 상승에 영향을 미쳤을 것이라 판단된다.

3.2 용접부의 금속학적 특성

전술한 바와 같이 경도분포를 갖는 이유를 규명하기 위하여 경도와 미세조직과의 상관관계를 검토하였다. 이중금속 Al/Steel 접합에서 용접부 전단인장강도를 저하시키는 Al<sub>3</sub>Fe, Al<sub>5</sub>Fe<sub>2</sub> 등과 같은 금속간화합물이 발생한다. 따라서 틀의 삽입깊이에 따른 금속간화합물(IMC)이 용접부의 전단인장강도에 미치는 영향을 고찰하기 위해 금속간화합물(IMC)층의 두께 변화에 대해서 분석하였다. Fig. 8은 최대 전단인장강도 값을 나타내는 틀의 삽입깊이 0.7mm조건에서의 용접부의 각 영역별(SZ, TMAZ, HAZ, BM) 미세조직으로 (a)는 DP590,



**Fig. 8** Optical microstructures of the joints with a plunge depth of 0.7mm

(b)는 Al5083-O이며, Fig. 7의 단면에서 각 영역별 미세조직을 관찰한 것이다. 교반부(Stir zone, SZ)에서는 동적재결정이 발생하여 조직이 미세화 되었고 HAZ는 모재 대비 조직이 다소 조대화 되어 경도 값이 교반부에서 다소 높고 열영향부(Heat affected zone, HAZ)에서 점차적으로 감소하는 것으로 판단된다<sup>19)</sup>.

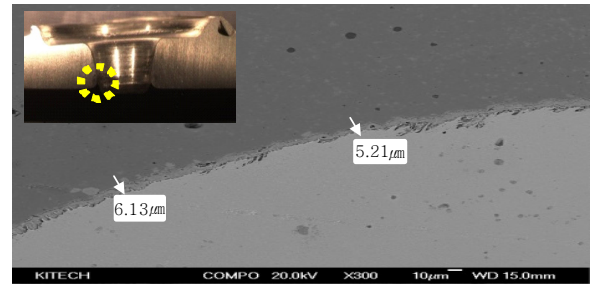
Fig. 9는 삽입깊이에 따른 금속간화합물층을 나타낸 것이다. 삽입깊이가 0.5mm이하에서는 교반작용이 적어 단순히 접합된 형태를 나타내므로 금속간화합물이 아주 미소하고, 삽입깊이 0.7mm에서는 약 5~6 $\mu$ m, 1.0mm는 약 7~11 $\mu$ m, 1.5mm는 약 9~30 $\mu$ m의 금속간화합물층이 형성되어 삽입깊이가 증가할수록 입열 증가로 인해 금속간화합물층의 두께가 증가함을 확인할 수 있었다.

삽입깊이 0.7mm에서 금속간화합물 층의 두께가 약 5~6 $\mu$ m로 Al/Fe이종재료 접합에서 요구되는 10 $\mu$ m이내의 금속간화합물층을 형성하였으며, 재료가 서로 충분히 교반된 너깃을 형성하였기 때문에 Fig. 4에서와 같이 다른 조건에 비해 높은 전단인장강도 값을 보임을 확인할 수 있었다.

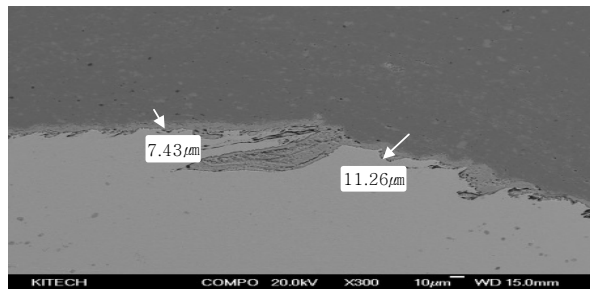
#### 4. 결 론

이종재인 Al5083-O와 SGAFc DP590을 마찰교반점용접시, 틀의 삽입깊이(0.2~1.5mm)에 따른 용접부의 너깃 형성, 전단인장강도 및 금속간화합물층 두께 변화 특성을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

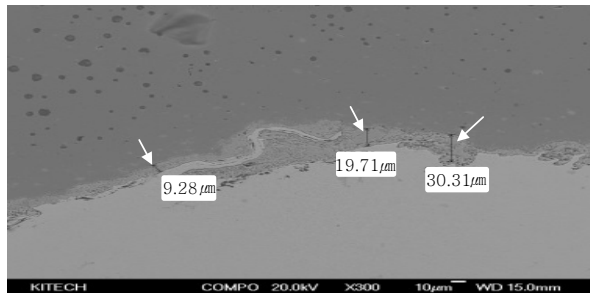
1) 접합부의 너깃 형상을 관찰해보면, 틀의 삽입깊이가 낮은 0.2mm~0.5mm조건에서 너깃 형상은 교반작용이 적어 단순히 접합된 형태를 나타내었다. 반면 틀의 삽입깊이가 0.7mm이상으로 접합된 너깃 형상은 재료가 서로 교반이 이루어진 형태를 나타냄을 알 수 있었다.



(a) 0.7mm

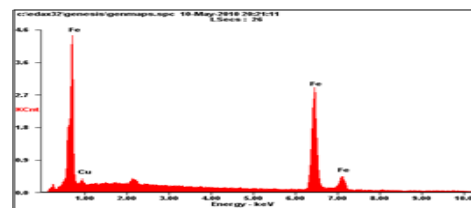


(b) 1.0mm

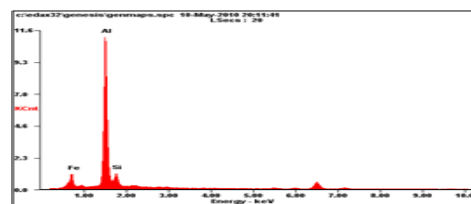


(c) 1.5mm

**Fig. 9** SEM images of the joints at various plunge depths



(a) Al5083-O



(b) DP590

**Fig. 10** EDX results after FSJ with a plunge depth of 0.7mm

2) 삽입깊이가 0.5mm이하에서는 교반작용이 거의 이루어지지 않아 금속간화합물의 형성이 아주 미소하고, 삽입깊이 0.7mm에서는 약 5~6 $\mu$ m, 1.0mm는 약 7~11 $\mu$ m

1.5mm는 약 9~30 $\mu$ m의 두께의 금속간화합물층이 형성되었다. 이는 삽입깊이가 낮은 0.2mm~0.5mm의 조건에서는 접합부 상하간 교반작용이 적게 발생하고 0.7mm이상 조건에서는 두 재료간의 교반작용이 향상 및 입열 증가로 인해 금속간화합물이 점차적으로 증가하는 것으로 판단된다.

3) 최대 전단인장강도는 6.5kN로 저항점용접 알루미늄 (3t) 기준의 강도에 만족하는 결과를 삽입깊이 0.7mm에서 얻을 수 있었다. 이는 접합부의 너깃 형성이 두 재료가 교반이 원활하게 이루어져 형성되었을 뿐만 아니라, 상대적으로 금속간화합물 층의 두께가 작고 알루미늄 유효 두께감소가 미소하기 때문이라고 판단된다. 알루미늄 두께 감소에 있어서, 향후 저항점용접의 압흔 허용도를 고려한 최적 용접조건 도출에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부와 한국산업기술 평가관리원의 제조기반 산업핵심기술개발사업으로 수행된 연구결과임(과제번호:10049005)

## References

1. Y. S. Kim, Future of the friction stir spot welding technology for non-ferrous metal, *Journal of KWJS*, 30(3) (2012), 4-14 (in Korean)
2. S. H. Chowdhury, D. L. Chen, S. D. Bhole, X. Cao, and P. Wanjara, Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive, *Materials Science and Engineering: A*, 562 (2013), 53-60
3. H. S. Shin, Y. C. Jung and K. Choi, Effects of tool speed on joining characteristics during friction stir spot welding of Mg-alloy (AZ31B) sheet, *Journal of KWJS*, 29(2) (2011), 80-87 (in Korean)
4. S. H. Kim, S. W. Kim, S. J. Park and W. S. Chang, Dissimilar Friction Spot Joining : A5052-H32 / A6022-T4, *RIST Journal of R&D*, 21(2) (2007), 153-159 (in Korean)
5. C. K. Chun, H. J. Kim and W. S. Chang, Friction Stir Spot Joining on Aluminum Alloy for Transportation, *Journal of KWJS*, 26(6), (2008), 23-29 (in Korean)
6. E. Fereiduni, M. Movahedi and A. H. Kokabi, Aluminum/steel joints made by an alternative friction stir spot welding process, *Journal of Materials Processing Technology*, 224 (2015), 1-10
7. W. H. Lee, Y. G. Lim, H. G. Ryu and B. J. Park, Characters of Zinc-coated steel and Al 6061 using FSW, *RIST Journal of R&D*, 22(4) (2008), 254-258 (in Korean)
8. R. S. Mishra, and Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering :Reports*, 50(1) (2005), 1-78
9. Y. M. Yeon, C. Y. Lee, W. B. Lee, S. B. Jung, and W. S. Chang, Spot Friction Stir Welding and Characteristics of Joints in Aluminium Alloys, *Journal of KWJS*, 23(3) (2005), 16-20 (in Korean)
10. G. Buffa, L. Fratini, and MARIO. Piacentini, On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys, *Journal of materials processing technology*, 208(1) (2008), 309-317
11. T. K. Han, K. Y. Lee, and J. S. Kim, Recent developments and weldability of advanced high strength steels for automotive applications, *Journal of KWJS*, 27(2) (2009), 13-18
12. J. M. Piccinia, H. G. Svoboda, Effect of pin length on Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar Aluminum-Steel joints, *Procedia Materials Science*, 9 (2015), 504-513
13. C. K. Chun, H. J. Kim, T. K. Kim and W. S. Chang, Dissimilar Friction Spot Joining : A5052-H32 / A6022-T4, *RIST Journal of R&D*, 21(4) (2007), 281-286 (in Korean)
14. T. Pan, A. Joaquin, D. E. Wilkosz, L. Reatherford, J. M. Nicholson, Z. Feng and M. L. Santella, Spot friction welding for sheet aluminum joining, *In Proceedings of the 5th international symposium of friction stir welding*, 1416 (2004)
15. M. Tutar, H. Aydin, C. Yuce, N. Yavuz, and A. Bayram, The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array, *Materials & Design*, 63 (2014), 789-797
16. T. J. Luo, B. L. Shi, Q. Q. Duan, J. W. Fu, and Y. S. Yang, Fatigue behavior of friction stir spot welded AZ31 Mg alloy sheet joints, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(7) (2013), 1949-1956
17. Y. Q. Zhao, H. J. Liu, S. X. Chen, Z. Lin, and J. C. Hou, Effects of sleeve plunge depth on microstructures and mechanical properties of friction spot welded alclad 7B04-T74 aluminum alloy, *Materials & Design*, 62, (2014), 40-46
18. N. H. Kang, Y. G. Yoo, C. W. Lee, and J. H. Kim, Intermetallic Compounds Behavior at Laser Overlay Interface of Aluminum and Fe-based Powder, *Journal of KWJS*, 25(3) (2007), 51-56 (in Korean)
19. E. H. Kim, K. J. Lee, and K. H. Song, Evaluation of mechanical properties on friction stir lap jointed Al6061/HT590 alloys, *J. of Welding and Joining*, 33(2) (2015), 8-13 (in Korean)