특집 : 자동차 생산공정에서 용접기술 동향

프로세스 테이프를 이용한 알루미늄 합금의 스폿용접 특성에 관한 연구

유지영 · 조용준 · 장인성 · 이세헌

Investigation of Resistance Spot Welding for Aluminum Alloys with Spooling Process Tapes

Jiyoung Yu, Yongjoon Cho, Insung Chang and Sehun Rhee

1. 서 론

자동차 산업에서 차체 경량화, 내구성 확보, 운전자의 안전성 확보를 위해 알루미늄 합금, 고강도강, 마그네슘 합금 등 새로운 소재의 차체 적용이 증가하고 있다[1]. 특히 알루미늄은 철에 비해 비중이 3분의 1정도에 불과하며, 철의 1.5배 두께로 같은 강성을 가진 구조물을 설계할 수 있기 때문에 알루미늄 적용 시 중량을 50% 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한 이러한 경량 특성으로 인하여 중량의 증가 없이 차체의 크기를 확대시킬 수 있으므로 충돌 영역 길이를 확장할 수 있고, 연강에 비해 2배의 충격 흡수율을 갖고 있기 때문에 운전자의 안전성을 확보할 수 있다[2].

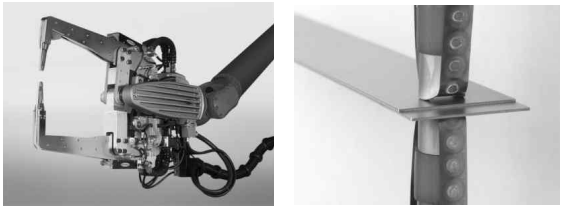
자동차 차체에 알루미늄 합금 적용 시, 접합 방법에는 용접(Welding), 셀프 피어싱 리벳팅(Self-Piercing Reveting), 클린칭(Clinching) 등과 같은 기계적 접합법과 접착제를 도포하여 접합하는 접착법이 있다[3]. 셀프 피어싱 리벳팅의 경우, 재료비가 소요되고 불필요한 리벳의 추가로 인해 무게 증가를 초래하며, 크고 복잡한 전용 리벳팅 건이 필요하다는 단점이 있다. 클린칭의 경우에는 접합강도가 매우 낮다는 문제점이 있다. 접착법의 경우, 피로와 부식 문제에 있어서 강점을 가지고 있지만 접착제로 인한 원가 상승과 낮은 접합강도가 문제가 되고 있다. 그리고 스폿용접을 이용할 경우, 알루미늄의 높은 전기전도도와 높은 열전도도로 인한 낮은 용접성이 알루미늄의 차체 적용 시 문제가 되고 있다. 따라서 알루미늄 용접 시, 짧은 용접시간 동안의 높은 용접전류를 통전시켜 순간적으로 큰 입열을 인가하여야 한다는 단점이 있다. 또 열에 의한 팽창과 수축이 크고 표면에 생성된 산화피막으로 인하여 용접 중 수소가 용융부에 침투하여 크랙(Crack) 및 기공 등의 용접 결함을 유발하며, 전극의 소재인 구리와 알루미늄의 합금화에 의해 전극의 오염이 심하게 발생하여 전극 수명이 매우 짧고 잦은 전극 드레싱(Electrode dressing)이 필요하다[4-6].

본 연구에서는 알루미늄 합금 용접 시, 기존 스폿용접의 문제점을 해결하고자 프로세스 테이프(Process tape)를 이용하는 Fronius 사의 델타 스폿 용접기(Delta spot welding system)를 도입하였다. 알루미늄 합금 동종 용접과 알루미늄 합금-탄소강 이종 용접에 해당 용접 시스템을 적용하여 그 용접 특성을 분석하였다. 그리고 알루미늄 합금 용접 시 문제가 되었던 용접 결함 제거와 용접성 향상을 위한 방법으로 용접 변수인 용접전류 및 가압력 프로파일(Profile)의 설정에 관하여 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 스폿용접기는 Fig. 1에 나타내었다. 용접전류는 인버터(Inverter)를 이용하여 생성한 DC 전류를 사용하며, 용접기의 가압력은 서보건(Servo-gun)으로 제어가 되기 때문에 용접공정 중 거의 실시간으로 가압력제어가 가능하다. Fig. 1의 (b)와 같이 전극과 용접모재 사이에 프로세스 테이프가 위치하고, 1회의 용접공정 후 프로세스 테이프가 1번의 스텝(Step) 전진하여 새로운 프로세스 테이프가 공급되는 것이 해당 용접기의 가장 큰 특징이다. 프로세스 테이프는 전극의 오염 방지, 날림(Expulsion) 발생 억제,



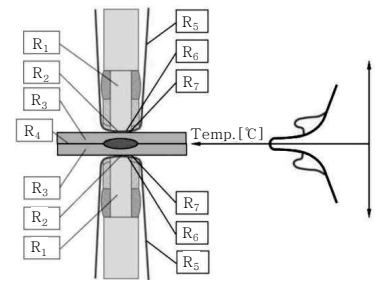
(a) Welding gun (b) Process tape

Fig. 1 Delta spot welding machine[7]

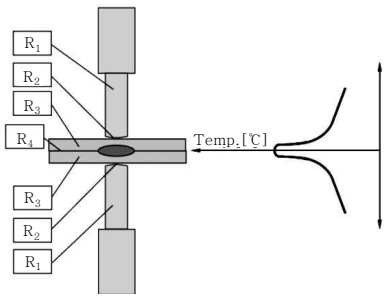
시험편과 전극 사이의 추가적인 저항 생성을 통한 용접부 입열량 증대등의 기능을 가진다. 또한 전극과 모재 사이에 위치한 프로세스 테이프는 전극과 모재의 합금화를 방지하여 전극 오염을 감소시키며, 날림 발생 시 스패터(Spatter)가 프로세스 테이프에 부착되기 때문에 스패터 저감 효과를 가진다. Fig. 2는 프로세스 테이프에 의해 변화된 용접부의 온도와 저항 분포를 나타낸다. Fig. 2의 (b)는 일반 스폿용접 시의 저항 및 온도 분포 곡선이다. Fig. 2의 (a)는 프로세스 테이프를 사용할 경우에 용접 중 발생하는 온도와 저항의 분포이며, 전극과 모재 사이에 위치한 프로세스 테이프에 의해 전극과 테이프 사이와 테이프와 모재 사이에서 추가적인 저항이 발생하기 때문에 더 큰 발열을 확보할 수 있다. 이러한 추가적인 저항의 발생으로 인해 일반 용접보다 상대적으로 작은 용접전류로 알루미늄 합금의 용접이 가능해진다.

2.2 실험 재료

본 연구에서 사용한 시험편은 Al6K32 알루미늄 합금(두께:1mm/0.85mm)과 1.2mm 두께의 탄소강 SGARC440을 사용하였다. Table 1은 시험편의 화학조성이다. Cu-Cr 성분의 전극을 사용하였고, 그 형상은 Fig. 3과 같이 직경(Ø)은 16mm, 전극 반경(R)은 100mm이다. 그리고 총 세 가지의 프로세스 테이프가 실험에서 사용되었다. Al6K32(두께:1mm) 동종 용접의 경우에는 구리도금 스틸 테이프가 사용되었다. 그리고 Al6K32(두께:0.85mm)와 SGARC440(두께:1.2mm)



(a) With process tape



(b) Without process tape

Fig. 2 Distribution of resistance in RSW process[7]

Table 1 Material composition of the Al6K32 and SGARC440 (unit: wt%)

Al6K32							
Si	Cu	Mn	Cr	Mg	Fe	Zn	Ti
1.0	0.35	0.5	0.01	0.02	0.13	0.01	0.01
SGARC440 (60/60)							
Si	Cu	Mn	Cr	Ni	Mo	V	C
0.14	0.1	1.4	0.1	0.1	0.05	0.01	0.09

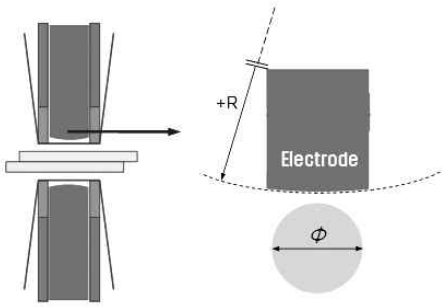


Fig. 3 Configuration of electrodes[7]

이종 용접의 경우, Al6K32와 전극 사이에는 스테인레스 스틸 테이프와 SGARC440과 전극 사이에는 니켈 도금 스틸 테이프가 각각 사용되었다.

2.3 실험 방법

알루미늄 합금 동종 및 알루미늄 합금-탄소강 이종 용접 품질 향상을 위하여 8가지 용접 변수를 고려하였다. Fig. 4는 설정가능한 용접 변수(Welding parameter)를 보여준다. 총 8개의 변수 중 전류값(Main current value)과 가압력1(Force1)은 다른 변수들에 비하여 교호작용이 크기 때문에 로브 곡선(Lobe curve)을 통하여 그 영향을 관찰하였고, 또 사전 실험을 통해 가압력2(Force2)는 5kN 이하에서는 크랙 제거 효과가 없음을 확인하였기 때문에 Up slope time, Main

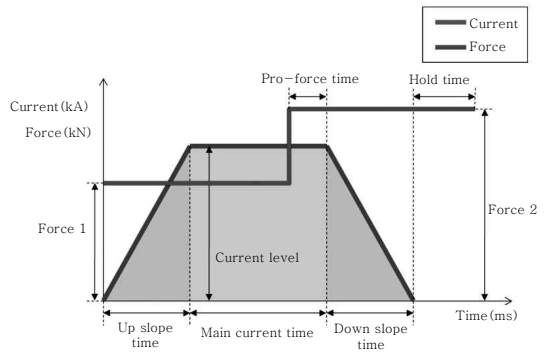


Fig. 4 Welding parameters

Table 2 Reference welding condition

Current [kA]	Up slope time [msec]	Main current time [msec]	Down slope time [msec]
17	50	100	300
Force 1 [kN]	Force 2 [kN]	Pre-force time [msec]	Holding time [msec]
2	5	20	100

current time, Down slope time, Pre-force time, Holding time의 5가지 변수와 그 특성을 고려하였다. Main current time은 정전류 용접을 실시하는 시간, Up slope time는 설정 전류까지 전류가 상승하는 시간, Down slope time은 정전류 용접 후 전류를 하강하는 시간, Hold time은 전류 통전이 끝난 후 가압력을 유지하는 시간을 의미한다. Pre-force time의 경우, 정전류 용접이 끝나는 시점과 2단 가압이 시작되는 시점 사이의 시간을 의미하며, 정전류 용접이 끝나는 시점을 기준으로 그 앞쪽에서 2단 가압이 시작되는 경우를 양(+)으로 정의하였다. Table 2의 용접 조건을 기준으로 관찰 대상이 되는 변수를 제외한 나머지 변수를 고정시킨 후 각각 변수의 특성을 평가하였으며, 이때 동종 2겹으로 1mm두께의 Al6K32를 시험편으로 사용하였다. 변수 특성 실험 후 구해진 값들은 고정 조건으로 사용하여 전류값과 가압력1(Force1)에 대한 Al6K32(두께:1mm)의 적정 용접 영역(Lobe curve)을 도출였다. 또한 변수 특성 실험의 결과를 기반으로 하여 Al6K32(두께:0.85mm)와 SGARC440(두께:1.2mm)의 이종 용접 특성을 분석하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 용접 변수별 특성

Up slope time, Main current time, Down slope time, Pre-force time, Holding time의 5가지 변수의 특성에 대한 실험 결과는 Table 3과 같다. Up slope time이 클 경우 초기 입열량 부족으로 용접강도가 낮아지며, 작을 경우는 크랙이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Main current time은 특정 시간 이상이 되면 통전 시간이 용접강도에 미치는 영향이 미미하며 과다한 경우에는 용접부에 크랙이 발생하였다. Down slope time은 용접강도에 미치는 영향은 미미하지만 용접결함을 감소시키는 중요한 변수임을 알 수 있다. 즉 300msec 이상일 경우 용접부 결함이 제거되며 이는 Down slope time 구간에서 용융부를 서서히 냉각

Table 3 Result of experiment for welding parameters

Parameter	Level [msec]	Crack/Void	Expulsion	Strength [kgf]
Up slope time	0	o	x	221.71
	50	x	x	219.54
	100	x	x	186.23
Main current time	50	x	x	216.72
	100	x	x	219.54
	200	o	x	219.89
Down slope time	0	o	x	212.67
	150	o	x	215.59
	300	x	x	216.46
Pre-force time	-20	o	x	224.87
	0	o	x	221.16
	20	x	x	219.54
Holding time	0	o	x	224.81
	50	o	x	220.02
	100	x	x	219.54

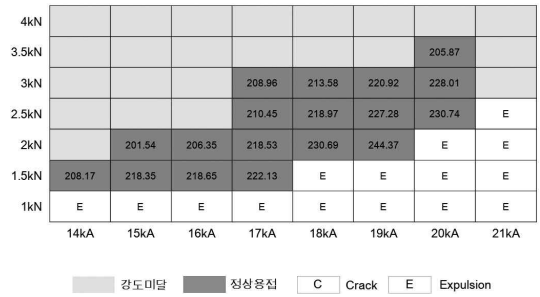
시켜주는 효과가 발생하기 때문에 용융금속의 수축으로 인한 기공 및 크랙 발생이 억제되는 것으로 사료된다. Pre-force time은 Main current time이 끝나기 전에 2단 가압을 통해 가압을 상승시킴으로써 용융부 수축으로 인해 용접부 결함이 발생하는 것을 방지해준다. 하지만 Pre-force time이 길어지면 가압력의 상승이 동저항을 감소시키기 때문에 용접강도가 감소하게 된다. Hold time은 특정 시간 이상이 설정되어 용융부 냉각이 끝날 때까지 가압력을 유지해줌으로써 용융부 부피 변화로 인한 결함 발생을 억제시켜주는 역할을 한다.

3.2 Al6K32 동종 용접 특성

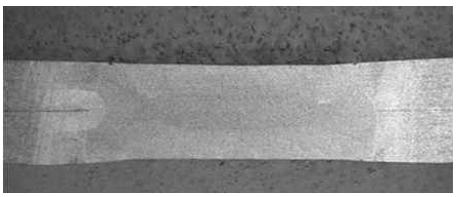
용접 변수 특성에 대한 실험 결과를 토대로 8가지 용접 변수 중 Up slope time, Main current time, Down slope time, Pre-force time, Holding time, force2의 조건을 Table 4와 같이 고정하고, Force1과 Main current 값에 대한 로브 곡선을 도출하였다. 로브 곡선은 세로축을 Force1으로 가로축을 Main current 값으로 하는 형태의 로브 곡선을 사용하였으며, 로브

Table 4 Fixed condition of Al6K32 lobe curve

Up slope time [msec]	Main current time [msec]	Down slope time [msec]	Pre-force time [msec]	Holding time [msec]	Force 2 [kN]
50	100	300	20	100	5



(a) Lobe curve



(b) Cross section of weld

Fig. 5 Lobe curve & cross section of Al6K32

곡선의 하한은 전단인장강도 200kgf로 설정하였고, 상한은 날림(Expulsion) 유무로 하였다. 로브 곡선의 하한을 전단인장강도 200kgf로 선정한 이유는 셀프피어싱 리벳팅으로 접합하였을 때의 전단인장강도가 200kgf이기 때문이다. Fig. 5의 (a)는 Al6K32의 로브 곡선이며, 적정 용접 영역이 매우 넓고 또 적정 용접 영역 내의 거의 모든 조건에서 전단인장시험 시 버튼 파단(Button fracture)이 발생하였다. Fig. 5의 (b)는 적정 용접 조건일 때의 대표적인 단면이며 크랙이나 기공 등의 용접결함이 발생하지 않음을 확인하였다.

3.3 Al6K32-SGARC440 이종 용접 특성

Al6K32(두께:0.85mm)와 SGARC440(두께:1.2mm)의 이종 용접의 로브 곡선을 도출하기 위해 고정 변수의 조건을 실험을 통해 Table 5와 같이 재설정하였다. 로브 곡선의 하한과 상한은 Al6K32 동종 용접과 동일하게 선정하였고, 도출된 로브 곡선은 Fig. 6과 같다. 탄소강과 알루미늄 합금의 이종 용접의 경우, 알루미늄 합금 동종 용접에 비해 7kA 정도 낮은 전류 영역에서 적정 용접 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는

Table 5 Fixed condition of Al6K32-SGARC440 lobe curve

Up slope time [msec]	Main current time [msec]	Down slope time [msec]	Pre-force time [msec]	Holding time [msec]	Force 2 [kN]
50	500	300	0	100	5

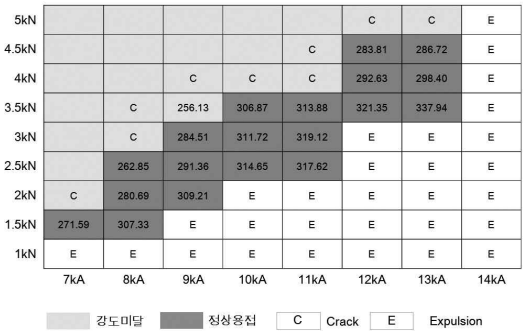
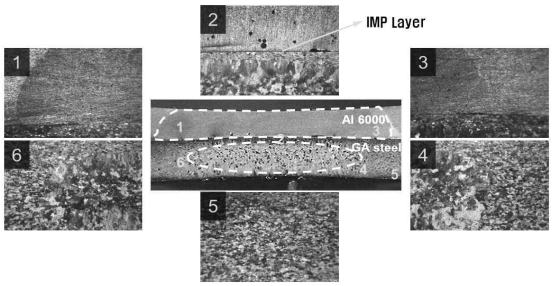
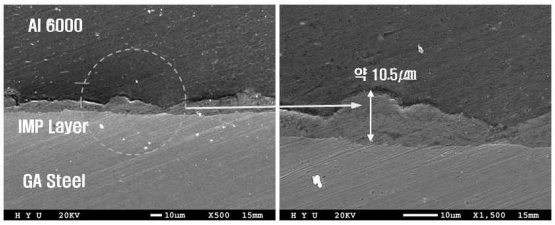


Fig. 6 Lobe curve of Al6K32-SGARC440

탄소강의 저항이 알루미늄 합금의 저항보다 매우 크기 때문으로 사료된다. 이종 용접의 경우 역시 적정 용접 영역이 넓고, 적정 용접 영역 내의 거의 모든 조건에서 전단인장시험 시 버튼 파단이 발생하였다. 이종 금속 용접부를 분석하기 위해 Table 5의 조건에서 Force2만 3kN으로 변경하고, Main current 값을 10kA, Force 1을 3kN으로 설정하여 단면 시험용 시험편을 제작하였다. 시험편의 단면을 광학현미경과 SEM을 이용하여 분석하였다. Fig. 7의 (a)는 Al6K32-SGARC440 용접부의 광학현미경 이미지(Image)이다. (a)에서 알 수 있듯이 두 모재 사이에 너깃(Nugget)이 생성되지 않는다. 즉, 알루미늄 합금과 탄소강 이종 용접의 경우, 두 모재는 너깃이 아닌 IMP layer(Intermetallic Phase layer)에 의해 접합된다. IMP layer는 혼합물층으로 크기가 클수록 강도가 높아지는 너깃과는 달리 강한 취성을 가지기 때문에 지나치게 두껍게 형성이 되는 경우에는 용접부의 강도가 낮아지는 특징을 가진다. 이종 금속 용접 현상은 상대적으로 낮은 용융 온도를 가지는 알루미늄이 용접 초기에 용융되기 시작하고 알루미늄 모재의 용융 면적이 증가함에 따라 두 모재의 접촉면에서 용융된 알루미늄으로 인하여 젖음현상이 발생한다. 그리고 용접이 진행됨에 따라 철의 용융온도에 도달하면 철의 일부분이 용융되기 시작하고 IMP layer가 형성된다. 두 모재 사이의 IMP layer를 확인하기 위해 용접부를 SEM을 이용하여 500배/1500배 확대하여 관찰하였다. Fig. 7의 (b)는 IMP layer의 SEM 이미지이며, 두 모재 경계에서 대략 10μm 두께의 IMP layer가 생성되었다. IMP layer의 성분 검사를 실시한 결과, 알루미늄이 72.04%, 철이 21.70%, 아연이 6.26%로 구성되었다. 전단인장시험 결과, 기준으로 선정한 200kgf를 상회하였고, 또 거의 모든 적정 용접 영역에서 버튼 파단이 발생하였기 때문에 양질의 용접부가 생성되었다고 사료된다.



(a) Optical macrostructure of Al6K32-SGARC440 weld



(b) SEM image of IMP layer

Fig. 7 Analysis of cross sectional area

4. 결 론

본 연구에서는 스폿용접 공정에 프로세스 테이프를 적용한 Delta spot welding system을 이용하여 6000계열 알루미늄 합금인 Al6K32와 아연도금강인 SGARC440 판재에 스폿용접의 특성을 평가하였다. 해당 용접 시스템의 용접 변수 특성을 평가하였고, 알루미늄 합금(Al6K32) 동종 용접과 알루미늄 합금-탄소강(Al6K32-SGARC440) 이종 용접의 용접 특성을 평가하였다. 그 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 알루미늄 합금 동종 용접의 경우, 용접전류의 Up slope/Down slope, 2단 가압, Hold time은 용접부 결함 제거에 큰 영향을 미친다. 그리고 알루미늄 합금의 높은 열전도도로 인해 단시간의 고전류 용접이 요구된다.

2) Al6K32 알루미늄 합금 동종 용접의 경우, Delta spot 용접기의 Up slope time, Main current time, Down slope time 등의 용접 변수 조정을 통해 용접부 결함을 제거할 수 있었으며 이 조건을 토대로 적정 용접 영역을 도출하였다.

3) Al6K32와 SGARC440의 이종 용접을 위한 용접 변수를 선정하였고, 이를 기반으로 적정 용접 영역을 도출하였다. 알루미늄 합금-탄소강의 용접의 경우, 알루미늄 합금 동종 용접에 비해 낮은 용접전류 영역에서 장시간의 용접이 요구되었다. 또한 용접부 단면 분석을 통해 용접부의 형상과 두 모재 사이에서 생성된 IMP layer를 분석하였다.

차체 경량화와 안전성 향상에 대한 요구에 대응하여 알루미늄 합금과 고강도강 등의 다양한 소재의 자동차 적용이 증가하고 있으며, 이러한 소재의 접합 문제를 해결하기 위해 리벳팅, 클린칭, 접착제, 스폿용접 등의 접합법에 대한 연구 개발이 요구되고 있는 실정이다. 특히 본 연구에서 사용된 용접은 차체 조립 공정에서 가장 많이 사용되는 스폿용접의 한 종류로써 전극 마모와 용접부 결함 발생과 같은 기존 스폿용접의 문제점을 해결하고 장점은 그대로 계승한 용접법이다. 해당 용접법의 현장적용을 위하여 용접 변수에 관한 연구와 프로세스 테이프 선정, 용접성 평가 등에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 서울시 산학연 협력사업(과제번호:10848), 정부(지식경제부) 산업원천기술개발사업(과제번호:10035641)과 현대-기아자동차((주)엔지비)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

1. A. Richter : Smart Weighting, Cutting tool engineering, 60(2008), 38-49
2. S. Kim, K. Lee, H. Huh, J. Yoo, M. Lee : Crashworthiness Evaluation of Aluminum Crash Box for an Auto-body, KSAE Spring Conference, 2(2006), 1106-1111 (in Korean)
3. T. A. Barnes, I. R. Pashby : Joining techniques for aluminium space frames used in automobiles. Part II. Adhesive bonding and mechanical fasteners, Journal of Material Processing Technology, 99-(1-3) (2000), 72-79
4. S. M. Cho : Resistance Welding and Resistance Joining Technology to Fe-base Material of Al-alloy, Journal of Korean Welding Society, 19-2(2001), 14-22 (in Korean)
5. Rashid, S. Fukumoto, J. B. Medley, J. Villafuerte, Y. Zhou : Influence of Lubricants on Electrode Life in Resistance Spot Welding of Aluminum Alloys, Journal of American Welding Society, 86-3 (2007), 62-70
6. Z. Li, C. Hao, J. Zhang, H. Zhang : Effects of sheet surface conditions on electrode life in resistance welding aluminum, Journal of American Welding Society, 86-4 (2007), 81-89
7. Fronius international GmbH : Delta Spot - a new spot welding process, Fronius corporate, 2008

• 유지영
• 1980년생
• 한양대학교 기계공학과
• 스폿용접 및 용접 자동화
• e-mail : susagye@naver.com

• 조용준
• 1968년생
• 현대자동차 요소생기개발팀
• 자동차 용접/접합
• e-mail : yongjoon@hyundai.com

• 장인성
• 1961년생
• 현대자동차 요소생기개발팀
• 자동차 생산 신기술 개발
• e-mail : goltz11a@hyundai.com

• 이세헌
• 1956년생
• 한양대학교 기계공학과
• 스폿용접 및 레이저 가공
• e-mail : srhee@hanyang.ac.kr