

## S20C 리벳된 Al5052와 SPFC980Y 강철 resistance-element 접합점 접합부의 미세조직 발달 및 고강도-부식 저항 특성

백승엽<sup>1</sup>, 송종호<sup>1</sup>, 박승연<sup>1</sup>, 송일종<sup>2</sup>, 이현철<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한국자동차연구원 소재융합연구센터, <sup>2</sup>(주)현대하이텍 기술연구소

### Corrosion-Resistant High Strength S20C Element Riveted Al5052-SPFC980Y Steel Joints by Resistance Element Spot Welding

Seung-Yeop Baek<sup>1</sup>, Jong-Ho Song<sup>1</sup>, Seung-Youn Park<sup>1</sup>, Il-Jong Song<sup>2</sup>, Hyun-Chul Lee<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Multi-Material Research Center, Korea Automotive Technology Institute  
<sup>2</sup>Hyundai Hi-Tec Ind. Co. Ltd.

**요약** 이 연구는 electric resistance element spot welding 프로세스를 도입하여 알루미늄 합금-강철의 이종 접합부의 기계적 강도 및 내식성을 향상시키기 위해 수행되었다. SPFC980Y 강철과 Al5052-H32가 각각 모재로써 적용되었고, S20C 강철은 리벳 element로써 음각과 양각의 형상으로 구분되며, Al5052-H32에 전기 저항 스폿 용접을 위해 리벳팅 되어 6.5 kA의 전류와 250 kgf/cm<sup>2</sup>의 가압력으로 접합되었다. 그 결과, 음각된 S20C element는 스폿 용접 공정 후 불안정한 너깃이 형성되는 반면, 양각된 S20C의 경우, 구조적으로 건전한 접합부로 건전한 내식성 및 탁월한 기계적 특성이 얻어졌다. FEM 시뮬레이션의 도입으로, 음각과 양각의 계면의 접합 특성이 수치적으로 밝혀졌으며, 시뮬레이션 결과는 미세조직 발달 양상을 수치적으로 뒷받침하였다. 이 연구는 element 스폿 용접된 H32-A5052 이종 접합부의 기계적 강도 및 부식 신뢰성에 대해 체계적으로 분석되었으며, 이 공정은 금속재료뿐만 아니라, 경량 비전도성 비철/비금속계 재료에도 적용 될 수 있기 때문에, 차세대 차체 경량화의 양산 기술로 확장 될 수 있다.

**Abstract** This study examined the mechanical strength and corrosion resistance of a dissimilar joint with an aluminum alloy and steel by resistance element spot welding. SPFC980 steels and Al5052 alloys were applied as the base materials. S20C steels were assembled on Al5052 for the riveting element before the electric resistance welding process. The SPFC980-S20C riveted Al5052 was welded at a 6.5 kA current and 250 kgf/cm<sup>2</sup>. As a result, the engraved S20C elements formed unstable nuggets after the spot welding processes. In contrast, in the embossed S20C elements, exceptional mechanical properties, such as robust corrosion resistance and fatigue resistance, were obtained by structurally sound joints. The correlation between the microstructure and mechanical properties were examined by microstructural investigations and FEM simulations. The corrosion reliability of element spot-welded SPFC980-Al5052 dissimilar joints was investigated systematically.

**Keywords** : Dissimilar Joint, High Strength Steel, Electric Resistance Welding, Microstructure, Corrosion

본 논문은 중소벤처기업부와 한국산업기술진흥원의 “지역특화산업육성+(R&D, S2892850)” 사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

\*Corresponding Author : Hyun-Chul Lee(Korea Automotive Technology Institute)

email: hcllee@katech.re.kr

Received December 1, 2020

Revised January 5, 2021

Accepted February 5, 2021

Published February 28, 2021

## 1. 서론

철강 및 알루미늄 합금은 금속중에서 전 세계적으로 가장 많이 소비되는 소재이다. 특히 높은 강도와 낮은 재료비를 유지하면서 무게를 줄이려는 요구가 지속적으로 증가하는 운송 산업에서 널리 사용된다. 따라서 완전히 다른 두 합금 시스템을 결합하면 무게, 강도 및 비용 요구 사항을 충족하는 응용 분야가 크게 확장 될 수 있다. 주요 과제는 Fe 및 Al 기반 합금이 용접, 열전도율, 열팽창 계수, 열용량, 화학적 반응성, 상변태 등과 같이 호환되지 않는 물리적 및 화학적 특성을 가지고 있다는 것이다. 이 불일치된 물성 특성은 이를 위해 기존 용접 프로세스인 gas tungsten arc welding, laser welding, electron beam welding, spot welding 등이 주로 이용되어 왔으나, 이들 용접은 접합부의 미세조직의 발달을 동반한 기계적 물성의 향상에 제한적인 것으로 보고된 바 있다[1,2]. 이와 같은 비 호환성으로 인해 Al과 Fe의 이중 용접이 성공적으로 이루어지기 어려운 실정이다.

기존 자동차 구조재료 및 새시 양산라인에는 점용접 설비가 많이 이용되고 있으며, 고품질 Al-Steel 점 용접 접합을 구현하려면 많은 한계의 극복이 필요하다. 초기 산화물, 알루미늄 시트와 상기 용접 전극과의 접촉 저항을 증가시킬 수 있는 알루미늄 합금 표면에 접합 인터페이스의 효과적인 가열 및 Al과 전극간 계면에서 산화물의 영향을 극복 하는 것이다. 더욱이, 용접과정 중 알루미늄 합금과 강철의 녹는 점이 달라서 강철은 견고하게 유지되는 동안 알루미늄 합금만 용융된다.(순수 알루미늄의 녹는 점은 933K, 순수한 철은 1808K). 액체 알루미늄은 단단한 강철을 적셔 두 재료를 함께 연결하면서 계면에서 금속간화합물(IMC: Intermetallic Compound) 층형성을 초래한다. IMC는 단단하고 부서지기 쉬운 취성의 특성을 가지기 때문에 인터페이스의 IMC는 접합부의 강도를 저하시키는 결정적인 요인이다[3,4,13]. 저항 점용접에 의해 생산 된 고품질 접합부는 얇은 금속간화합물 층, 제한된 수축 및 500 nm 미만의 등축 입자 크기를 가지는 것이 바람직하다.

Al과 강철의 저항 점 용접의 또 다른 문제는 전극 마모이다. Al-Steel 저항 점 용접 중에 전류 흐름에 의해 발생하는 열은 Al 시트와 구리 전극 사이에 반응을 일으킬 수 있으며, 이 반응으로 Al이 구리 전극에 달라 붙어 전극 수명이 단축된다[5].

따라서, 상기 언급된 저항 점 용접의 이슈를 극복하여, 알루미늄 합금-철강의 우수한 물성 특성 구현을 위하여,

이 연구는 Resistance Element spot Welding 프로세스를 도입하여 알루미늄 합금-강철의 이중 접합부의 기계적 강도 및 내식성을 향상 시키고자 수행되었고, 이 과정에서 나타나는 미세조직 발달과 기계적 특성의 주요 특징에 대해 실험적, 수치적으로 논의된다.

## 2. 실험절차

### 2.1 요소 저항 점용접

저항 점용접은 저렴한 비용과 짧은 사이클 시간, 유연성 및 견고성으로 인해 자동차 차체 어셈블리에 가장 널리 사용되는 접합 방법이다[6]. 이 연구에서, 전기전도도가 다른 두 물질에 저항 점용접을 수행하기 위해 Fig. 1과 같이 Al5052에 강철 S20C 복합 금형을 새롭게 전공정으로써 도입하여, SPFC980 강철과 전기전도 특성을 일치시켜 점용접이 구현된다. AC power supply에서 공급되는 전류는 상/하 각각의 전극에 연결되어 하중을 동시에 가하여 저항에 의해 발생하는 열에 의해 접합 계면에 용융 너깃이 형성되어 최종적으로 결합되는 공정이다. 이 연구에서 모든 시편은 인가 전류 6.5 kA, 통전 시간 200 ms으로 250 kgf/cm<sup>2</sup>의 가압력에 의해 접합되었다.

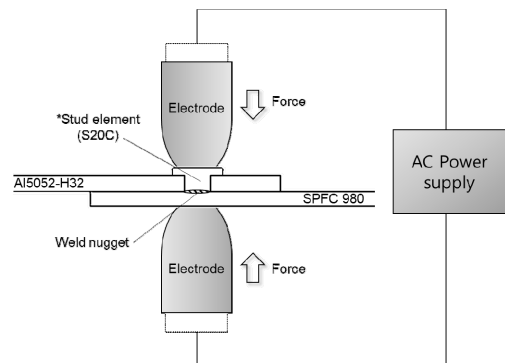


Fig. 1. Schematic descriptions of element spot welding process

### 2.2 소재 및 특성평가

접합된 Al5052-SPFC980 접합부의 내식성 및 기계적 특성을 평가하기 위하여, Fig. 2와 같이 시험편이 준비되었다. Fig. 2(a)는 접합된 시험편의 3D 모델링 이미지이며, 적용된 소재는 범례에 표시된 바와 같으며, 각 소재의 화학조성은 Table. 1에 나타내었다. Fig. 2(b)는 해당 이미지의 top view를 보여주며, 재료의 형상과 치수가

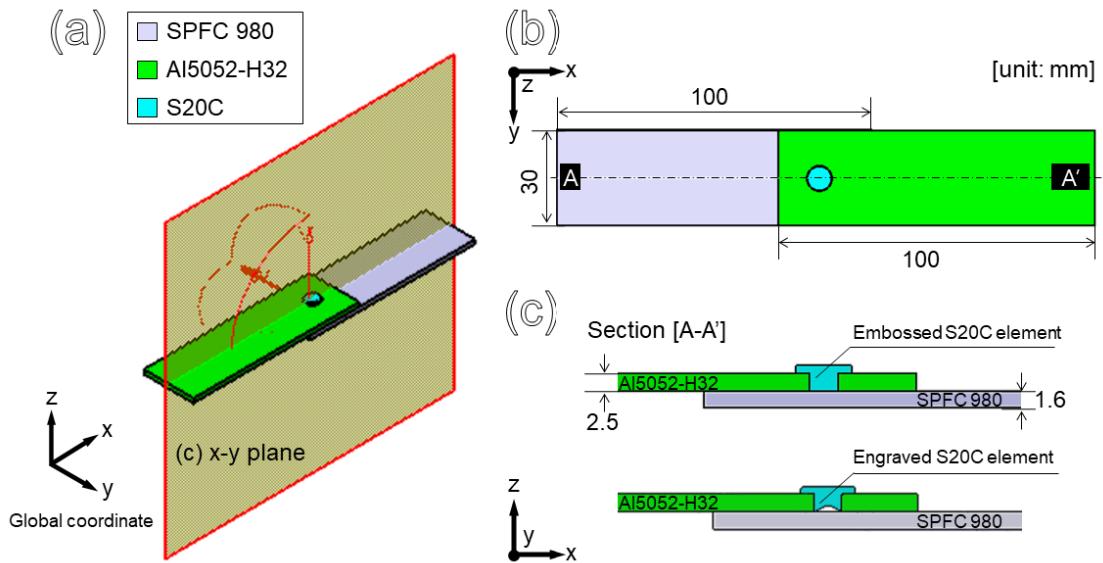


Fig. 2. Schematic sketch of Al5052-SPFC980 steel dissimilar joints. (a) 3D modelling and its material assignment (b) top view image and dimension and (c) cross-sectional image of different S20C element geometries

표시되어 있다. Al5052와 SPFC980 강철, 두 경우 모두 100 mm x 30 mm의 시험편으로 와이어 방전가공에 의해 재단 되었으며, 그 두께는 각각 2.5t 와 1.6t 이다. Fig. 2(c) 는 Fig. 2(b)의 단면을 보여주며, S20C element 복합금형 리벳은 형상 변수로써 음각(위)과 양각(아래)의 형상을 갖는 S20C가 Al5052에 각각 리벳팅 되었다.

Table 1. Chemical composition of base materials

Material	Chemical Composition(%)						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
Al5052-H32	0.25	0.40	0.029	0.027	2.392	0.183	0.002
SPFC980Y	C	Si	Mn	P	S		
	0.109	0.942	2.192	0.014	0.001		

용접된 시험편의 미세조직 평가를 위해 단면 절단 후, SiC계 sand paper를 이용하여 기계적으로 연마하였으며, 최종적으로 Diamond suspension 용액을 이용하여 접합부 단면이 경면 연마되었다. 이후 연마된 단면은 Nital 2 % 용액에 의해 etching 되었으며, 광학현미경 (GX51, OLYMPUS)의 도입으로 결정립 크기, 형상, 기공, segregation 등 미세조직 특성이 관찰되었다. 기계적 특성 평가를 위해 접합 강도는 Fig. 3(a)과 같이, UTM 장비(UT-100, MTDI)에 의해 2 mm/min의 시험

속도로 인장-전단 시험 되었다. 각 시편의 강도 값은 3회 측정치의 평균값을 취하였고, 시험편은 Fig. 3(b)과 같이 장비에 장착되어 시험된다. 내식-신뢰성 시험은 염수 분무 시험기(CC2000IP, Ascott)에 의해 KS D 9502에 의거하여 48시간, 96시간 염수 폭로 시험 조건에서 부식 후 각각 인장-전단 되어 소재의 부식 저항성이 기계적 강도의 측면에서 평가된다.

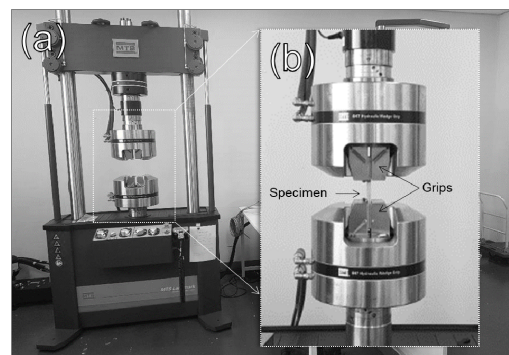


Fig. 3. (a) Tensile and fatigue test machines, (b) high magnification image of (a) and its detail description image for attached specimen

### 3. 실험결과

#### 3.1 미세조직 발달

접합부의 미세조직 발달 양상은 재료의 기계적 특성 발달과 밀접한 상호 관계가 있으며, 이는 미세조직 제어를 통해 접합강도를 향상시킬 수 있어, 반드시 분석되어야 할 중요한 지표이다. Fig. 4는 형상변수로써 적용된 S20C 요소 리벳의 음각 및 양각 차이에 의한 점용접으로 접합된 단면 구조 사진이다. 관찰 영역은 Fig. 4(a)의 이미지에 나타낸 바와 같으며, Fig. 4(b)는 음각 S20C 요소 리벳이 적용되어 접합된 단면사진이다. 파란색 화살표는 주요 결합 부위를 나타내고 있으며, S20C 강철과 SPFC980Y 강철의 접합계면이 뚜렷하게 관찰되었다. 이 계면은 영역 1과 2로 구분되며, 영역 1은 완전히 용융되지 않아 접합이 완결되지 않은 부분이고 영역 2는 접합된 영역이다. 또한, 이 계면 주변에서 미세 공극들이 주로 관찰 되는 특징이 있다. 반면, 양각 S20C 요소 리벳이 적용되어 접합된 단면에서는 Fig. 4(c)에 나타난 바와 같이, 주요한 결합 없이 미세화된 수지상(dendrite) 미세구조가 주를 이루는 용융 nugget 영역이 뚜렷하게 관찰되었으며, 이는 접합과정에서 소재가 완전히 용융되어 접합이 건전하게 완결됨을 의미한다. 또한, 결정립의 사이즈는 거시적으로 음각에 비해 양각 S20C 요소리벳이 채택된 시험편의 접합부 center에 가까울수록 더욱 미세화 되었고, Fig. 4의 (b), (c)에서 보는 바와 같이 음각 S20C 요소 리벳이 적용된 시험편은 뚜렷하게 미접합된 line 주변으로 열에 의해 조대화된 결정립 분포가 지배적임을 분명히 볼 수 있다. 추가적으로, 음각과 양각, 형상 변수에 따라 발견된 미세공극의 빈도가 Fig. 4(d)와 같이 나타나 있다. 음각과 양각의 접합 특성이 다른 이유는 토론 섹션에서 수치 시뮬레이션에 의해 더 자세히 논의된다.

#### 3.2 기계적 특성

인장-전단 시험에 수행된 시험편은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 각 100 mm x 30 mm의 시험편이 30 mm 겹침부를 가지도록 하였으며, 저항 점용접을 위하여, AI5052 시험편 겹침부 중앙에 S20C element 리벳팅 후 점용접기에 의해 접합되었다. 인장-전단 시험은 2 mm/min의 속도로 수행되었으며, 인장-전단 시험에서 얻어진 하중-변위 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, 범례의 주황색 요소는 양각(embossed S20C), 하늘색 요소는 음각(engraved S20C) 요소 리벳이 적용되어 접

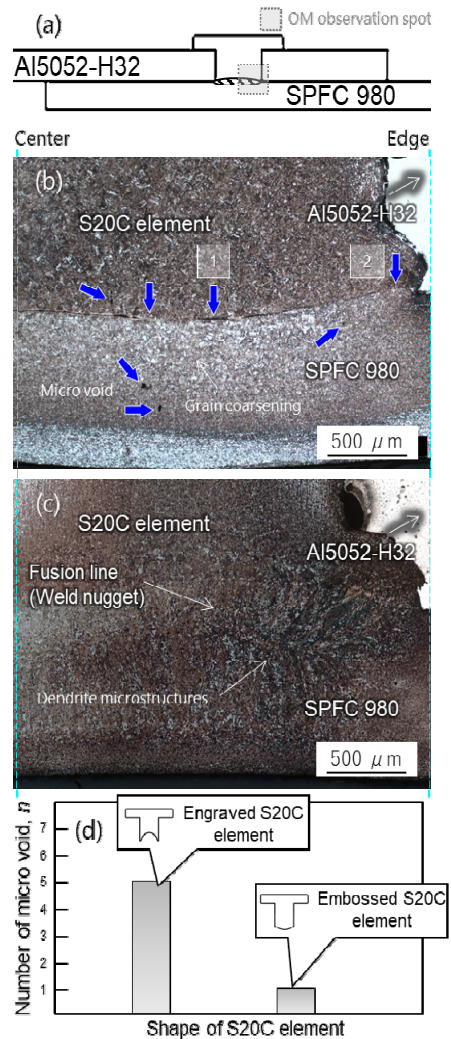


Fig. 4. Microstructure investigation results (a) Schematic illustration of optical microscope image, (b) welding interface of engraved S20C element used spot welding specimen and (c) welding interface of embossed S20C element used spot welding specimen, and (d) its micro-void frequency

합된 시험편의 하중-변위 곡선을 각각 나타낸다. 양각 요소 리벳이 채택된 시험편은 강도가 9300N에 육박하고, 상대적으로 큰 연신율을 가지는 탁월한 기계적 성능을 나타내었다. 반면, 음각 요소리벳이 적용된 접합부는 양각 리벳보다 현저히 열화된 2000N의 하중영역에서 파단되며, 변위 또한 상당히 낮으므로, 취성의 특성을 가지는 특성이 관찰되었다. Fig. 5(b)는 음각 S20C 리벳된

Al5052와 SPFC980 강철 접합된 시험편의 인장-전단 시험결과를 확대한 그림이다. 인장-전단 하중-변형 선도는 양각(주황색 심볼)과 비교하여, 기울기가 조금 완만해졌으나 2500N 초차 도달하지 못하고 완전히 파괴된 양상을 나타내었다. 결과적으로, 음각 요소 리벳으로 접합된 접합강도는 양각에 비해 4배 낮은 결과를 초래하였고, 이 결과의 근거는 Fig. 4(b), (c)의 결과에서 볼 수 있듯이, 접합된 면적과 미세구조와 관련이 있는 것으로 여겨진다. 이와 관련된 미세조직-기계적 특성 관계는 이전의 연구들[2,7]에서 보고된 결과와 경향이 일치하며 실험 고찰 섹션에서 더 논의된다.

자동차의 주행환경에서 부식은 지배적인 소재의 열화 요소이다[8,9]. 이러한 이유로, 접합강도에 대한 부식의 영향을 더욱 이해하기 위해 염수 분무 시험 후, 인장-전단 시험이 추가적으로 수행되었다. 결과는 Fig. 6(a)과 같으며, 부식에 의해 인장-전단 강도가 점차 감소하는 경향을 보이지만 부식 전과 후 모든 조건에서 9000N 이상의 초기 강도 수준으로 유지되었다. Fig. 6(b)는 96시간 염수분무 시험 후 인장-전단 시험된 시험편의 파단 샘플이며, SPFC980Y와 저항 점 용접된 S20C 요소 리벳은 파단 되지않고 그대로 접합되어 있었다. 이를 통해 파단은 분명히 Al5052의 모재가 찢어지면서 발생되었음을 의미한다.

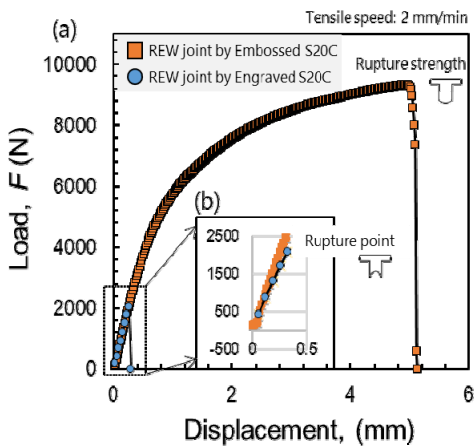


Fig. 5. (a) Load-displacement curve after tensile-shear tests (b) high magnification image of rupture part for electric resistance welding joint by engraved S20C element

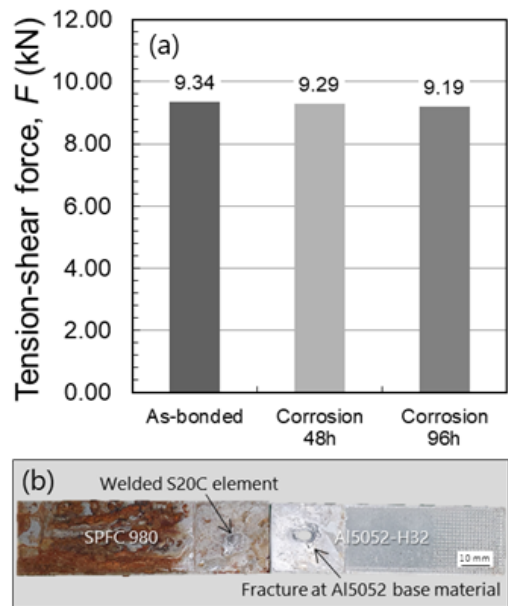


Fig. 6. (a) Tensile-shear strength after salt spray corrosion tests and (b) its fractured joint specimen

## 4. 실험고찰

### 4.1 접합계면 발달 양상

양각의 S20C 강철 리벳요소가 채택되어 접합된 Al5052-SPFC980 이중 접합부는 음각 요소와 동일한 공정 조건에서도 충분한 용융너깃을 형성하고, 결함 없는 건전한 접합부 확보에 효과적이었다. 점 용접 접합 시 틀에 의해 유도되는 금속의 유동은 소재 내부에 큰 순간적인 변형량을 수반하며, 이를 통해 접합되는 소재는 열 공급에 의해 재결정될 수 있는 충분한 변형량을 가지게 된다[10,11]. 뿐만 아니라, 틀과 재료간의 마찰에 의해 발생하는 열은 재료에 축적된 변형 상태를 재결정 시키기에 충분하기 때문에, 동적재결정이 활발하게 일어남으로써 결정립 미세화를 촉진시킬 수 있다[10,11]. 특히, 이 연구에 사용된 철강재료는 FCC 금속들 중 적층결합에너지가 낮은 재료이기 때문에, 결정립 미세화에 더욱 큰 효과를 나타낼 수 있다. 이들 금속은 동적회복에 의한 전위의 재배열이 어렵기 때문에, 결정립 내부와 결정립계에 더 많은 전위를 축적할 수 있다. 그 결과 재결정 핵생성이 동시다발적으로 더 많은 사이트에서 일어날 수 있고, 이를 통해 결정립 미세화에 더욱 큰 효과를 나타내게 된

다. 반면, 음각 요소 리벳이 적용된 접합부의 경우, Fig. 4(c)에서 볼 수 있듯이, 음각된 부분 (center, 영역1)에서 기하학적으로 SPFC980 강철과 압착이 불충분하기 때문에, 금속의 소성유동이 충분히 유도되지 않았으며, 이로 인해 접합이 완결되지 않고 통전으로 발생하는 열에 의한 결정립 조대화만을 초래하였다.

S20C 음각 요소 리벳이 적용된 접합부와 양각 요소 리벳이 적용된 접합부의 접합성이 다른 이유를 더 이해하기 위해 소성가공 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 통해 리벳 형상변수에 따른 가압 공정이 시뮬레이션 되었다. 이를 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 Deform이 도입되었으며, 판상 모재에 형상이 다른 리벳을 가압하는 공정에서 다른 역학적 양상이 수치적으로 계산되었다. Fig. 7에 음각 S20C와 양각 S20C 소재에 대한 각각의 수치 해석된 접합 컨택 공정 결과를 나타내었다. 경계 조건과 소재 assignment는 Fig. 7(a)와 같고, 적용된 재료 물성은 Table. 2에 나타내었다. 양각된 S20C 요소 리벳의 가압공정 시 툴에 약 211 MPa의 유효 응력이 가해지는데, 음각된 요소 리벳은 가압공정 시 툴에 239 MPa의 유효응력을 가하는 결과를 초래 하였다 (Fig. 7b). 이 때, S20C 리벳-SPFC980이 상호 반응하는 하중 흐름 결과를 Fig. 7(c)에 나타내었다. 양각된 리벳의 경우, 하중의 흐름이 모두 파란색으로, 상대적으로 더 적은 힘으로 가압이 충분히 되며, 양각의 리벳이 중앙 접지부에 닿는 순간, 압입 받은 판은 중앙 접지부로부터 인장 되면서 원활한 하중흐름으로 리벳의 전면이 판에 접지되었다. 반면, 음각 리벳의 경우는, 리벳의 모서리로부터 강한 하중이 SPFC980 판에 전달되며(빨간색, 초록색 화살표), 모서리로부터 접지된 판은 압축되면서 접지가 완결되지 않았다. 이러한 시뮬레이션 결과에 의해, Fig. 4의 미세조직 발달 양상이 수치적으로 뒷받침된다.

Table 2. Mechanical properties of base materials

Material	Ultimate (N/mm <sup>2</sup> )	Yield (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
Al5052-H32	234	184	11
SPFC980Y	1,046	656	17

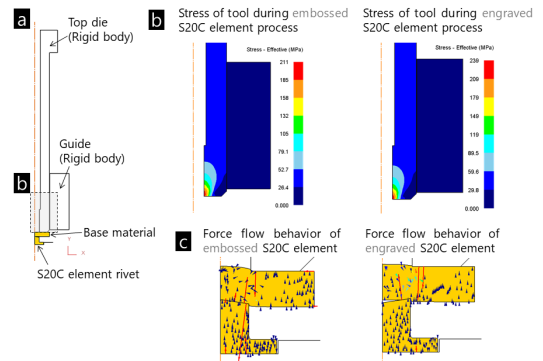


Fig. 7. Numerical calculated results of bonding contact processing on the embossed S20C element and engraved S20C element. (a) Boundary condition of the simulation, (b) die tool stress distributions when the material pressed and (c) its force flow behavior of S20C elements

## 4.2 기계적 특성 발달

S20C 리벳된 Al5052-H32와 SPFC980Y 강철의 스폿 용접 접합된 이종 접합부는 주요 결함 없이, 염수 환경 노출에 의한 부식 시험 후에도 9000N 이상의 인장-전단 강도를 갖는 탁월한 기계적 특성을 초래 하였다. 기존의 스폿 용접 된 Al-Steel 인장-전단 강도는 약 5000N 이하의 값[6,7,12-14]으로 보고되고 있다. 일반적으로, 이종 접합된 소재의 계면에서는, 열 입력에 의한 계면 반응의 산출물인 금속간 화합물 형성이 불가피하다 [3,4,13]. 이 금속간 화합물은 모재 또는 합금에 비해 깨지기 쉬운 취성의 특성인 경질과 같은 물리적 특성 차이와 열악한 화학적 호환성으로 인해, 접합부의 기계적 성질을 현저하게 감소시키는 결정적인 요인이 된다[15-17]. 또한, 이종 소재의 저항 스폿 용접 프로세스는 서로 다른 전기전도 등 물리적 특성의 mismatch로 인해 용접성 또한 매우 열악하다. 하지만, 이 연구에서 도입된 spot 용접 전 S20C의 철강 요소 리벳된 Al5052-H32 소재는, 상기 언급된 이종 소재간 물성 mismatch를 해소 하여 IMC 생성을 억제함으로써, 인장-전단강도 뿐만 아니라, 부식 저항성에 효과적인 것으로 확인 되었다.

## 5. 결론

Resistance element spot welding 프로세스를 도입하여, S20C 요소 리벳된 Al5052-H32와 자동차용

강판인, SPFC980 강철 간의 이중 접합이 성공적으로 수행되었다. 알루미늄 합금-철강 스폿 용접을 위하여, 물성 mismatch 해소를 통한 용접성 및 기계적 성질 개선을 목적으로 도입된 Al5052-H32 판상 S20C 리벳팅 전처리하는 부식 및 기계적 특성 발달에 큰 효과를 보였다. S20C 요소의 형상변수로써 도입된 음각 및 양각 타입의 요소 리벳 중에서, 음각 리벳은 기하학적 특성으로 인해 계면에서 너깃의 형성이 제대로 발생되지 않은 반면, 양각 타입의 요소 리벳은 원활한 용융 너깃 형성과 하중 흐름으로 결함 없는 건전하고 미세화 된 미세조직이 유도되었다. 그 결과, 접합 소재는 부식 시험 후에도 약 9000N 에 육박하는 인장-전단 시험결과를 초래하였고, 모재 파단이 아닌, 알루미늄 측 모재에서 파단되는 결과를 나타내었다. 따라서 S20C가 리벳팅 된 Al5052-H32 와 SPFC980Y 철강의 element electric resistance welding 프로세스의 도입은 기존의 스폿 용접 라인을 그대로 유지할 수 있고 탁월한 야금학적, 기계적 성질을 구현할 수 있을 뿐만 아니라, 용접 spot의 align 또한 편리하므로, 자동차 구조 어셈블리 산업에서 대량생산으로 확장 될 수 있는 이점이 충분하다.

## References

- [1] R.K. SIDHU, O.A. OJO, and M.C. CHATURVEDI, "Microstructural analysis of laser-beam-welded directionally solidified INCONEL 738", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.38, No.4, pp.858-870, April. 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-006-9063-8>
- [2] K. H. Song, Y. D. Chung, K.Nakata, "Investigation of microstructure and mechanical properties of friction stir lap jointed Monel 400 and Inconel 600", *Met Mater Int*, Vol.19, No.3, pp.571-576, May. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-013-3027-5>
- [3] H. Springer, A. Kostka, E.J. Payton, D. Raabe, A. Kaysser-Pyzalla et al., "On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminium alloys", *ACTA MATERIALIA*, Vol.59, No.4, pp.1586-1600, May. 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.11.023>
- [4] H. Dehahanpour Baruj, A. Shadkam, M. Kazeminezhad, "Effect of severe plastic deformation on evolution of intermetallic layer and mechanical properties of cold roll bonded Al-Steel bilayer sheets", *J MATER RES TECHNOL*, Vol.9, No.5, pp.11497-11508, Aug. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.033>
- [5] Sigler DR, Carlson BE, Janiak P, "Improving aluminum resistance spot welding in automotive structures", *Welding Journal*, pp.64-72, June. 2013.
- [6] Chen J, Feng Z, Wang HP, Carlson BE, Brown T et al., "Multi-scale mechanical modeling of Al-steel resistance spot welds", *Material Science and engineering A*, Vol.735, pp.145-153, Aug. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.039>
- [7] Lu Y, Mayton E, Song H, Kimchi M, Zhang W, "Dissimilar metal joining of aluminum to steel by ultrasonic plus resistance spot welding - Microstructure and mechanical properties", *Materials and Design*, Vol.165, January. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107585>
- [8] A. Laurino, E. Andrieu, J.-P. Harouard, G.Odemer, J.-C. Salabura et al., "Effect of corrosion on the fatigue life and fracture mechanisms of 6101 aluminum alloy wires for car manufacturing applications", *Materials and Design*, Vol.53, pp.236-249, January. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.079>
- [9] A A. Saeed, Zulfiqar A, Khan, M.H. Nazir, "Time dependent surface corrosion analysis and modelling of automotive steel under a simplistic model of variations in environmental parameters", *Materials Chemistry and Physics*, Vol.178, pp.65-73, Aug. 2016.  
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.04.068>
- [10] Mishra RS, Ma ZY, "Friction stir welding and processing" *Materials Science Engineering R Reports*, vol.50, pp.1-78, Aug. 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
- [11] Murr LE, Handbook of materials structures, properties, processing and performance, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01815-7>
- [12] Das T, Das R, Paul J, "Resistance spot welding of dissimilar AISI-1008 steel/Al-1100 alloy lap joints with a graphene interlayer", *Journal of Manufacturing Process*, Vol.53, pp.260-274, Feb. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.032>
- [13] Azhari-Saray H, Sarkari-Khorrami M, Nademi-Babahadi A, Kashani-Bozorg SF, "Dissimilar resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy/St-12 carbon steel using a high entropy alloy interlaye", *Intermetallics*, Vol.124, June. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106876>
- [14] Yamagishi H, "High-productivity and high-strength Fe/Al dissimilar metal joining by spot forge welding", *Materials Letters*, Vol.278, July. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128412>
- [15] Zedan MJ, Doos QM, "New Method of Resistance Spot Welding for Dissimilar 1008 Low Carbon Steel-5052 Aluminum Alloy", *Procedia Structural Integrity*, Vol.9, pp.37-46, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.06.008>
- [16] Chen C, Kong L, Wang M, Haselhuhn AS, Sigler DR et al., "The robustness of Al-steel resistance spot welding process", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.43, pp.300-310, Feb. 2019.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.030>

- [17] Deng S, Yuan R, Tang X, Lu F, "Migration behavior of IMC layer in twin-spot laser welding-brazing of aluminum to steel", *Materials and Design*, Vol.188, January, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108489>

백 승 엽(Seung-Yeop Baek) [정회원]



- 2017년 2월 : 조선대학교 용접접합과학공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 : 오사카대학교 JWRI 재료생산공학과 (박사수료)
- 2019년 1월 ~ 현재 : 한국자동차연구원 연구원

<관심분야>  
용접접합, 신뢰성평가

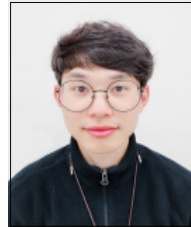
송 종 호(Jong-Ho Song) [정회원]



- 1996년 3월 ~ 1998년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 1998년 3월 ~ 2004년 2월: KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 2월 ~ 현재 : 한국자동차연구원 수석연구원

<관심분야>  
소성가공, 경량화

박 승 연(Seung-Yeon Park) [정회원]



- 2017년 8월 : 전남대학교 신소재공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국자동차연구원 연구원

<관심분야>  
경량소재, 소성가공

송 일 종(II-Jong Song) [정회원]



- 1997년 12월 ~ 2000년 4월 : (주)현대산업 사원
- 2004년 2월 : 조선이공대 기계과 (전문학사)
- 2000년 5월 ~ 현재 : (주)현대하이텍 연구소장

<관심분야>  
소재개발, 기계연구

이 현 철(Hyun-Chul Lee) [정회원]



- 2010년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2010년 9월 ~ 2011년 2월 : KAIST 박사후연구원
- 2011년 2월 ~ 2014년 11월 : 삼성전기 책임연구원
- 2014년 12월 ~ 현재 : 한국자동차연구원 책임연구원

<관심분야>  
FEM, 차체사시경량화, 고효율생산기술개발