

자동차 차체 패널의 점용접 및 플러그용접 특성에 대한 실험적 분석

권종호^{*1)} · 김장훈²⁾ · 이용우²⁾

신한대학교 자동차공학과¹⁾ · 에스톡 컨설팅그룹²⁾

Experimental Study on Spot Weld and Plug Weld of Automotive Body Panel

Jongho Kwon^{*1)} · Janghoon Kim²⁾ · Yongwoo Lee²⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Shinhan University, Gyeonggi 11644, Korea

²⁾ESTOC Consulting Group, Ace High-End Tower #206, 5 Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul 08389, Korea

(Received 12 September 2016 / Revised 26 September 2016 / Accepted 27 September 2016)

Abstract : This paper presents a comparison of an experimental study on spot and plug welding of an automotive body panel. Spot welding is a common joining technology used in automotive body panel assembly. In automotive body repair, however, plug welding is widely used due to its technical simplicity and cost benefit. Some researchers have focused on the use of spot welding in the manufacturing process, but there has been very little research done with respect to the engineering analysis of the plug welding process. In this study, two kinds of specimens are considered to compare the difference of failure strength between spot weld and plug weld: normal tension and shear tension. The experimental results show, in both normal tension and shear tension, that spot welding has higher failure strength than plug welding. In addition, plug welding is more vulnerable to shear tension than normal tension. This study can be applied to further studies on practical optimization for maintenance and repair of automotive body panels.

Key words : Automotive body panel(자동차 차체 패널), Body repair(차체수리), Spot weld(점용접), Plug weld(플러그용접), Normal tension(수직 인장), Shear tension(전단 인장), Experimental study(실험적 분석)

Nomenclature

- Q : heat generated, cal
- I : current, A
- R : electric resistance, Ω
- t : duration of current, sec
- W : thermal energy, cal
- K : temperature, °K

1. 서론

자동차의 차체 제작기술은 신소재의 적용뿐만 아니라 구조최적설계 및 용접최적화 등의 기술을 적용하는 급속한 발전을 통해 충분한 안전성능 및 강

성을 확보하고 있다. 그러나 자동차의 추돌로 손상이 생긴 경우의 차체손상 복원기술은 제조사의 차체 제작기술을 따라가기 어려운 실정이며, 이는 차체를 복원하는 방법이 정비현장을 중심으로 꾸준히 발전하여 왔으나, 대부분의 기술과 노하우가 전문 기술자의 숙련도에 의존하고 있어서 정량적이고 객관적인 신뢰성을 갖는 방법으로서의 접근이 이루어지지 못하고 있기 때문이다.

차체수리(body repair) 작업은 크게 ① 손상 진단 및 분석, ② 차체 계측 및 교정, ③ 패널 교환 및 수정, ④ 방청 및 도장 등의 공정으로 구분할 수 있으며, 모든 공정에서 적절한 장비의 활용을 통한 기술적 분석과 복원 작업이 이루어져야만 차체복원 이후에도 안전한 운행이 가능한 차체의 특성을 확보할 수

*Corresponding author, E-mail: jkwon@shinhan.ac.kr

있다. 특히 차체수리 작업에서 용접의 종류와 방법은 매우 중요한 부분으로 평가되어 진다. 손상된 차체의 복원 과정 후 용접부의 개수와 강도가 손상 복원 이전과 차이가 나는 경우에는 차량의 강성이 저하되거나 증가하여 충돌 성능에 큰 영향을 줄 수 있으며, 최적화된 승객의 상해도가 증가할 수 있다. 따라서 차체의 손상 복원 과정에서도 구조적인 특성 및 용접 특성 등을 고려한 최적화된 수리기법이 적용되어야 운행하는 차량의 안전을 보장할 수 있다.

자동차 차체 패널(body panel)의 용접에 대한 연구는 생산 공정에서 적용되는 점용접(spot welding)에 대한 내용들이 주로 이루어지고 있다.¹⁻³⁾ 그러나 현실적으로 사고로 인한 차체 손상의 복원 과정에서는 점용접과 함께 플러그용접(plug welding)이 대부분의 경우에 적용되고 있으나, 플러그용접에 대한 연구뿐만 아니라 두 용접의 특성에 대한 직접적인 비교 연구는 이루어지지 않고 있는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 자동차 차체 패널의 복원 과정에 적용되는 점용접 및 플러그용접의 특성을 비교 평가하기 위하여 두 가지 방법으로 제작한 용접부의 수직 인장(normal tension) 및 전단 인장(shear tension) 시험편을 대상으로 실험적인 분석을 수행하였으며, 향후 차체 패널 및 화이트바디(BIW, Body In White)의 최적화 복원에 대한 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 용접 시험편

2.1 점용접 및 플러그용접

점용접의 원리는 Fig. 1과 같이 겹쳐진 피용접 소재가 압력을 받은 상태에서 전압과 전류를 가해주게 되면, 금속의 접촉면에서 발생하는 접촉저항과 금속의 고유저항에 의해 열이 발생하여 금속의 접촉부가 가열 또는 용융되어지면 수직압력에 의해 접합이 되게 된다.⁴⁾

이 때 발생하는 저항 열은 줄의 법칙(Joule's law)에 따르며 다음 식으로 표시된다.⁵⁾

$$Q = 0.24 I^2 R t \quad (1)$$

여기서 Q 는 열량(cal), I 는 전류(A), R 은 전기저

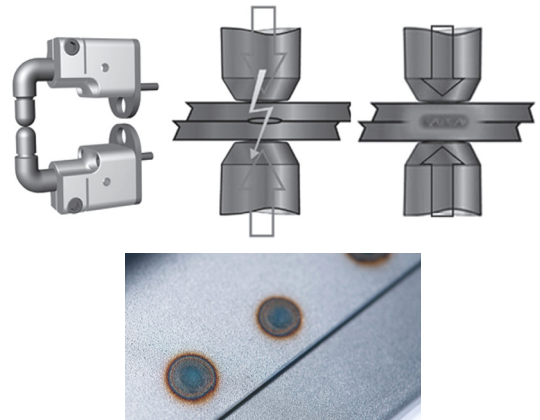


Fig. 1 Spot welding

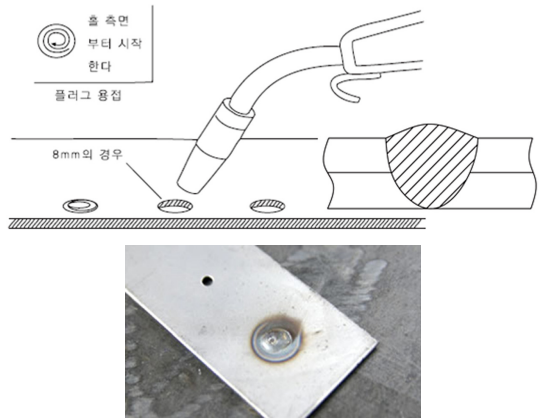


Fig. 2 Plug welding

항(Ω), t 는 시간(sec)이다.

점용접은 단시간 용접이 가능하고 가열되는 영역이 작아서 용접 후 열변형이 적으며, 용접부의 품질 재현성이 우수하다. 하지만 피용접 소재의 재질 및 두께 등에 따라서 각각의 조건 설정을 변경하여야 하며, 접합부의 양쪽 면에서 동시에 가압을 가해주어야 하기 때문에 자동차 차체 패널과 같은 복잡한 구조의 형상에 용접을 할 경우 위치에 따라 점용접이 힘든 경우도 있다. 이와 같이 점용접의 사용에 제약 받는 경우에는 일반적으로 플러그용접을 사용하게 된다.

플러그용접이란 Fig. 2와 같이 접합되어질 두 개의 피용접 소재 중 한쪽에 구멍을 가공한 후 탄산가스(CO₂) 용접 등을 이용하여 구멍에 용착 금속을 채워 패널을 접합시키는 용접 방법으로 아크 점용접

(arc spot welding)이라고도 한다.⁴⁾ 플러그용접 시 패널의 한쪽 면만을 통한 접합이 가능하기 때문에 점용접보다 사용 가능한 범위가 넓음에도 불구하고, 변형과 같은 품질 불량 발생하기 쉽고 접합 강도가 저하되며 생산성이 떨어지는 문제점이 있다.⁶⁾

2.2 인장 시험편

자동차 차체에는 일반적으로 0.6 mm ~ 2.0 mm의 강판이 용도별 부위에 따라 사용되고 있으며, 본 연구에서는 구조용 압연강재인 SS400을 피용접재로 하여 1.0 mm의 강판에 대한 인장 시험을 수행하였다. 피용접재의 화학 성분 및 주요 전기적, 기계적 물성치는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Electrical and mechanical properties of SS400

Electrical Properties	Electrical resistance ($\mu\Omega \cdot m$)	Thermal conductivity (W/mK)	Thermal expansion coefficient ($\mu m/m^{\circ}C$)
	5.2	400	0.4
Mechanical Properties	Yield strength (N/mm^2)	Tensile strength (N/mm^2)	Elongation (%)
	245	400 ~ 510	17

인장 시험편은 탄성계수 및 인장강도와 같은 SS400의 기본적인 물성치를 확인하기 위한 기본 인장 시험편과 하중의 방향에 따른 용접부의 특성과 차이점을 확인하기 위해 수직 인장 방향과 전단 인장 방향의 시험편을 각각 제작하였다.

점용접은 CELETTE SCORPION 2000 장치를 이용하였으며, 점용접 과정에서 용접 품질에 가장 큰 영향을 미치는 3대 요소인 전류, 통전시간, 전극 압력의 조건은 Table 2에 나타내었다.

플러그용접은 MIGATRONIC AUTOMIG 273 아크 용접기를 이용하였으며, 점용접과 유사한 크기의 용접 효과를 얻기 위해 일반적으로 많이 사용되

Table 2 Spot welding condition

Weld current		10 kA
Welding force		4 kN
Time schedule	Squeeze time	20 cycles
	Weld time	12 cycles
	Holding time	5 cycles

Table 3 Plug welding condition

Voltage	26 V
Current	140 A
Weld time	2.4 sec

고 있는 방법에 따라 한쪽 패널에 6 mm 구멍을 가공하여 시험편을 제작하였다. 플러그용접에 영향을 미치는 인자는 상하 패널에 가해지는 가압력, 용접 와이어 직경 및 와이어 속도, 보호가스, 전압, 전류 및 용접 시간이며, 이 인자들을 다양하게 바꾸어 가며 비드의 형상 및 용융부의 단면 상태 등을 종합적으로 비교하여 가장 양호한 용접 조건을 Table 3과 같이 설정하였다.

2.2.1 기본 인장 시험편

기본 인장 시험편은 KS B 0801 13B호 규격에 따라 Fig. 3과 같이 제작하였다.

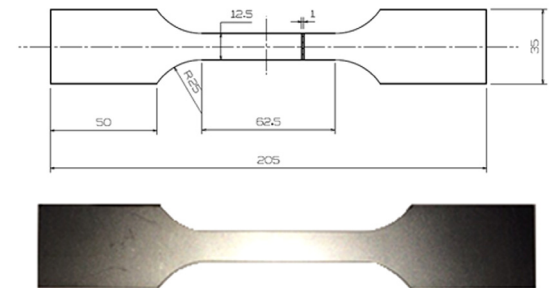


Fig. 3 Basic tensile specimen

2.2.2 수직 인장 시험편

용접 단면에 대해 수직 방향 하중에 대한 인장 시험을 위해서 저항 점용접 시험편에 관한 규정인 ISO 14272를 적용하여 Fig. 4와 같은 십자 형태의 인장 시험편을 제작하였다. 본 연구에서는 동일한 조건의 패널에 대한 점용접과 플러그용접의 비교 분석을 목적으로 하고 있기 때문에, 플러그용접 인장 시험편 규격도 위 규정에 따라 제작하였다. 용접 전과 용접 후의 시험편의 형상을 Fig. 4에 나타내었다.

2.2.3 전단 인장 시험편

용접 단면의 전단 방향 하중에 대한 인장 시험도 수직 인장 시험과 마찬가지로 점용접과 플러그용접에 대해 동일한 조건에서 하중의 방향만 변수로 설정하였기 때문에 수직 인장 시험의 용접 시험편의

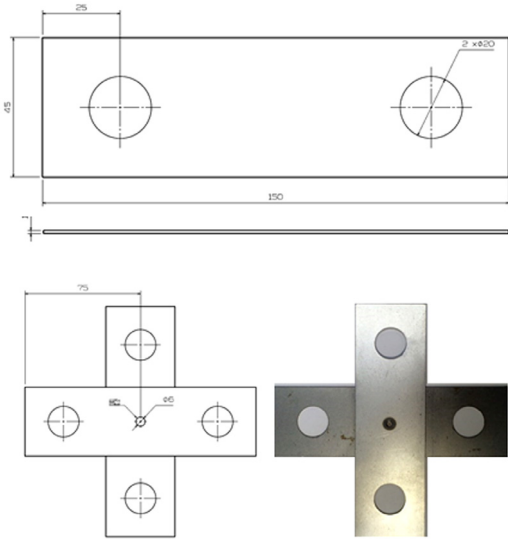


Fig. 4 Normal tension specimen for spot and plug welding

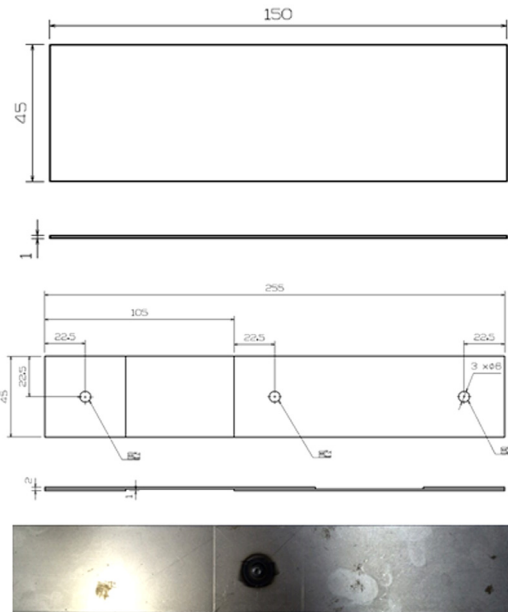


Fig. 5 Shear tension specimen for spot and plug welding

규정을 준용하여 제작하였다. 전단 인장 시험편의 기본 형상과 용접 후의 형상은 Fig. 5에 나타내었다.

3. 인장 시험 및 분석

본 연구의 목적인 점용접과 플러그용접의 특성에 대한 비교를 위해서 기본 인장 시험편 및 용접 단면

의 수직 및 전단 인장 시험편에 대해 인장 시험을 수행하였다.

3.1 인장 시험 조건

인장 특성 평가를 위해 Fig. 6과 같이 최대 용량 10 ton의 유압식 만능재료시험기인 INSTRON 8801을 사용하여 20 mm/min의 속도로 변위제어 시험을 수행하였다.

Fig. 6과 같이 기본 인장 시험편 및 전단 인장 시험편은 시험기 그림에 직접 물렸으며, 수직 인장 시험편은 지그를 제작하여 그림에 물려서 하중의 방향이 정확하게 시험편에 전달되도록 하였다.

인장 시험은 기본 시험편과 용접 시험편이 모두 완전히 파단 될 때 까지 실행하였으며, 기본 인장 시험 5회, 수직 인장 시험 10회 (점용접 및 플러그용접 각 5회), 전단 인장 시험 10회 (점용접 및 플러그용접 각 5회) 등 총 25회의 시험을 수행하여 데이터를 확보하였고, 각각의 조건에서 편차가 적은 3개의 시험 데이터를 선정하여 결과를 분석하였다.



Fig. 6 Tensile test equipment and specimen setting

3.2 기본 인장 시험 결과

기본 인장 시험편에 대한 시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 시험 결과를 통해 구한 응력-변형률 선도 (stress-strain curve)를 이용하여 추출한 인장강도 (σ_u)는 약 400.8 MPa, 탄성계수(E)는 약 204.2 GPa, 변형률(ϵ)은 약 28.2%로 구하여졌으며, 인장강도 수치와 SS400 탄성계수(약 210 GPa)와 비교했을 때 신뢰할 수준의 결과가 나타났다.

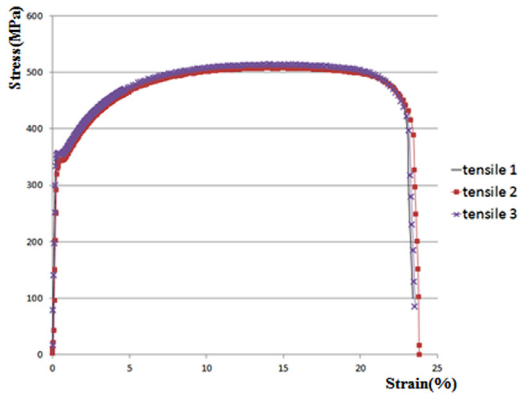


Fig. 7 Stress-strain curves of SS400 basic tensile specimen

3.3 수직 인장 시험 결과

점용접과 플러그용접 시험편에 대한 수직 인장 시험을 수행한 결과로 얻어진 힘-변위 선도(force-displacement curve) 및 인장 형상을 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다.

점용접 및 플러그 용접을 하게 되면 용접부에 형성된 너깃(nugget)의 체적 및 변형을 정확하게 측정하기 어려우므로 용접 시험편의 인장 시험 결과는 인장강도(MPa)가 아닌 파단시의 인장하중(kN)으로 나타내었다.

Pouranvari 등⁷⁾의 연구 결과에 따르면 저항 점용접의 경우 부재의 파단은 용접이 불량할 때 특별한 손상 없이 분리되는 계면 파단(interfacial fracture)과 용접 너깃 주위의 열변형구간(HAZ; heat affected zone)이 손상되는 플러그 파단(plug fracture)으로 구분할 수 있으며, 본 연구에서의 점용접 시험편과 플

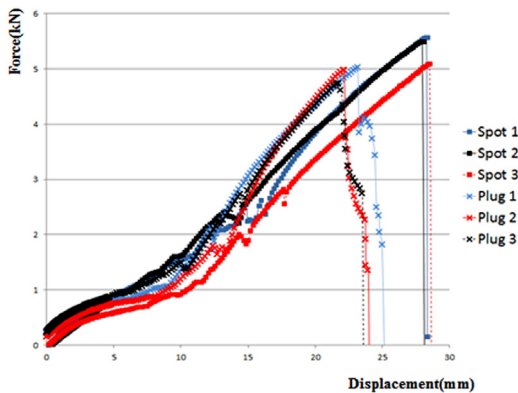


Fig. 8 Force-displacement curves of normal tension test

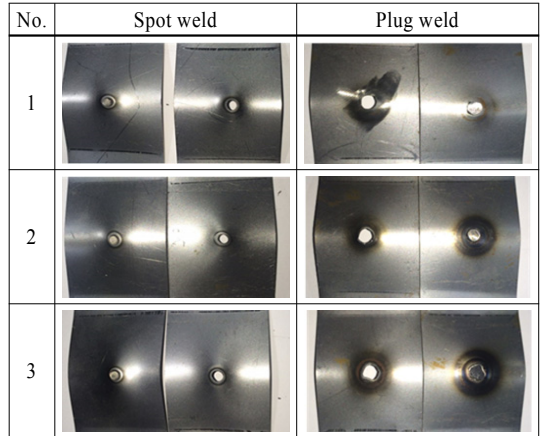


Fig. 9 Weld nugget fractured by normal tension test

Table 4 Failure force of normal tension test

No.	1	2	3	Avg.
Spot weld (kN)	5.57	5.49	5.08	5.38
Plug weld (kN)	5.02	4.98	4.74	4.91

러그용접 시험편 모두 용접 반대편 너깃부가 수직 분리되는 플러그 파단의 모습을 보이고 있다.

Fig. 8에서 보면 점용접 시험편의 경우 약 5.38 kN에서 파단이 발생하였고, 플러그용접 시험편은 약 4.91 kN에서 파단이 발생하였다. 이를 통해 점용접이 플러그용접보다 약 9.4% 높은 수직 하중에서 파단이 발생함을 알 수 있으며, Table 4에 수직 인장 시험 결과를 요약하였다.

3.4 전단 인장 시험 결과

점용접과 플러그용접 시험편에 대한 전단 인장 시험에서 구한 힘-변위 선도 및 인장 형상을 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 나타내었다.

전단 인장에 의한 파단 형상은 점용접 시험편과 플러그용접 시험편 모두에서 용접부 주변의 플러그 파단과 함께 전단 하중 방향으로의 찢김 파단(tear fracture)이 발생하였다.

Fig. 10에서 보면 전단 인장 시험에서의 파단하중은 점용접이 약 7.05 kN으로 플러그용접의 파단하중인 5.63 kN 보다 약 25.18% 높은 하중에서 파단이 발생하였으며, Table 5에 시험 결과를 요약하였다.

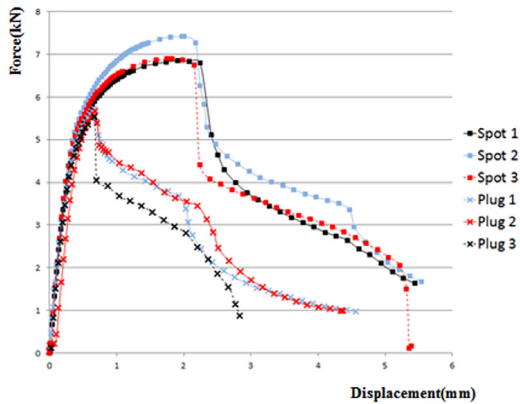


Fig. 10 Force-displacement curves of shear tension test

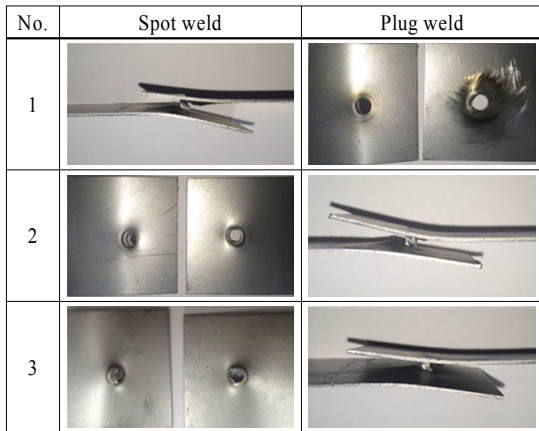


Fig. 11 Weld nugget fractured by shear tension test

Table 5 Failure force of shear tension test

No.	1	2	3	Avg.
Spot weld (kN)	6.85	7.42	6.90	7.05
Plug weld (kN)	5.71	5.66	5.53	5.63

이러한 결과로부터 플러그용접의 경우 점용접과 비교하여 용접부의 전단 인장에 상대적으로 더 취약함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차 차체 패널의 복원 과정에 적용되는 점용접 및 플러그용접의 특성을 비교 평가하기 위하여 용접부의 수직 인장 및 전단 인장에 대한 실험적인 분석을 수행하였으며, 다음과 같은

내용과 결과를 도출하였다.

- 1) SS400의 기본 시험편에 대한 인장 시험에서 인장 강도는 400.8 MPa, 탄성계수는 204.2 GPa, 변형률은 28.2%로 구하여졌으며, 기존의 재료 물성 데이터와 비교하여 시험의 신뢰성을 확인하였다.
- 2) 점용접과 플러그용접 시험편의 수직 인장 시험 결과, 점용접의 수직 파단하중은 약 578.3 kgf, 플러그용접의 수직 파단하중은 약 528.5 kgf로 측정되어 점용접이 플러그용접에 비해 약 9.4% 높은 수직 하중에서 파단이 발생하였다.
- 3) 점용접 및 플러그용접 시험편의 전단 인장 시험 결과, 점용접의 전단 파단하중은 약 719.3 kgf, 플러그용접의 전단 파단하중은 약 574.6 kgf로 측정되어 점용접의 전단 파단하중이 플러그용접의 하중보다 약 25.2% 높게 나타났다.
- 4) 2)와 3)의 결론으로부터 점용접과 플러그용접 시험편의 수직 인장 및 전단 인장 시험 결과를 비교해 보면, 같은 조건에서 플러그용접이 점용접에 비해 수직 및 전단에서 각각 9.4%와 25.2% 낮은 용접 강도를 나타낼 수 있으며, 특히 용접부에 작용하는 전단 하중에 대하여 상대적으로 더 취약함을 알 수 있다.
- 5) 자동차 차체 패널의 손상은 사고로 인해 발생하는 하중에 의해 발생하며, 용접부의 손상은 주로 전단 하중의 작용에 의해 발생하는 경우가 많기 때문에 플러그용접의 상대적인 취약함을 알 수 있는 4)의 결과는 손상된 차체의 복원을 위한 용접 방법의 중요성을 정확하게 제시하고 있다.
- 6) 자동차 차체 패널의 용접에 대한 연구는 생산 공정에서 적용되는 점용접에 대한 내용들이 주로 이루어지고 있으나, 보수 과정에 활용되는 플러그용접에 대한 연구뿐만 아니라 두 용접의 특성에 대한 직접적인 비교 연구는 이루어지지 않고 있기 때문에, 본 연구 결과는 향후 차체 패널 및 BIW의 최적화 복원에 대한 다양한 연구를 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 논문은 2016년도 신한대학교 학술연구비 지원으로 연구되었음.

References

- 1) H. J. Bang, Y. H. Ju, J. H. Choi, H. S. Shin, B. S. Jung, K. J. Park, S. K. Lee and J. D. Cho, "Development of Computational Model for Spot Welding and Effect Analysis on Welding Conditions," Transactions of KSAE, Vol.23, No.6, pp.642-649, 2015.
- 2) J. H. Han, S. M. Yang, H. S. Yu and T. J. Kim, "Optimal Condition for Spot Weldment of Dissimilar Steel Sheet in Automotive," Transactions of KSAE, Vol.18, No.4, pp.68-73, 2010.
- 3) J. H. Song, H. Huh, H. G. Kim and S. H. Kim, "Evaluation of the Finite Element Modeling of Spot-welded Region for Crash Analysis," Transactions of KSAE, Vol.14, No.2, pp.1-8, 2006.
- 4) Automobile Body Repair, Human Resources Development Service of Korea, 2015.
- 5) J. W. Ha, Dynamic Material Properties of the Heat-affected Zone(HAZ) in a Resistance Spot Weld, M. S. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea, 2008.
- 6) K. M. Lee, J. S. Kim and B. Y. Lee, "A Study on the Arc Position which Influence on Quality of Plug Welding in the Vehicle Body," The Korean Welding & Joining Society, Vol.30, No.3, pp.264-268, 2012.
- 7) M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadch, P. H. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of Weld Nugget Size on Overload Failure Mode of Resistance Spot Weld," Science and Technology of Welding & Joining, Vol.12, No.3, pp.217-225, 2007.