



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 8월

석사학위 논문

저항 점 용접시 동판 부착에
따른 압흔 특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

정진태

저항 점 용접시 동판 부착에
따른 압흔 특성에 관한 연구

A study on the indentation characteristics with
cu back plate in resistance spot welding

2017년 8월 25일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

정진태

저항 점 용접시 동판 부착에
따른 압흔 특성에 관한 연구

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 4월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

정 진 태

정진태의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교 교	수	<u>방한서 (인)</u>
위 원	조선대학교 교	수	<u>방희선 (인)</u>
위 원	조선대학교 교	수	<u>송국현 (인)</u>

2017년 5월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	III
List of Tables	IV
Abstract	V
1장. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 국내외 기술 동향	3
1.3 저항 점 용접	5
1.3.1 저항 점 용접의 원리	5
1.3.2 저항 점 용접의 특징	8
1.4 냉간압연강판 SPCC 소재의 특징	10
2장. 연구 방법	11
2.1 실험방법 및 용접조건	11
2.1.1 사용소재 및 용접법	12
2.1.2 실험장비	14
2.1.3 동판 및 전극	16
2.1.4 실험조건 및 공정	18

2.2 용접부 특성 평가	20
2.2.1 너깃부 육안 검사 및 단면 특성	20
2.2.2 인장-전단강도	22
2.2.3 경도시험	25
3장. 결과 및 고찰	28
3.1 냉간압연간판 SPCC 1.2t의 용접 특성	28
3.1.1 용접부의 육안 검사 및 단면 특성	28
3.1.2 인장-전단강도 특성	32
3.1.3 경도 분포 특성	34
3.2 냉간압연간판 SPCC 1.6t의 용접 특성	35
3.2.1 용접부의 육안 검사 및 단면 특성	35
3.2.2 인장-전단강도 특성	39
3.2.3 경도 분포 특성	41
4장. 결론	42
참고문헌	44

List of Figures

Fig. 1.1 Details of insulated cap tip and ring type cap tip	4
Fig. 1.2 Details of air gun and servo gun	4
Fig. 1.3 Mimetic diagram of resistance spot welding	5
Fig. 1.4 Schematic illustration of the spot welding process	6
Fig. 1.5 Relations between contact resistance and electrode force	7
Fig. 1.6 Appellation of welding zone	8
Fig. 2.1 Flow chart of thesis	12
Fig. 2.2 Configuration of lap-joints specimen	14
Fig. 2.3 Optical microscope	14
Fig. 2.4 Equipment of resistance spot welding	15
Fig. 2.5 Configuration of resistance spot welding with cu back plate	17
Fig. 2.6 Electrode tip	18
Fig. 2.7 Specimen of resistance spot welding	22
Fig. 2.8 Specimen of lap-joint with single spot welding	22
Fig. 2.9 Dimension of tensile-shear test specimen	23
Fig. 2.10 UTM(Universal Testing Machine)	24
Fig. 2.11 Failure modes of spot welds during tensile-shear test	25
Fig. 2.12 Vickers hardness test scheme and equipment	26
Fig. 2.13 Plan and cross section of resistance spot welding	27
Fig. 2.14 Indentation location of resistance spot welding	27
Fig. 3.1 Indentation depth of spot welded joints with welding current in various electrode diameter (1.2t)	30
Fig. 3.2 Tensile-shear strength of spot welded joints (1.2t)	32
Fig. 3.3 Hardness distribution of spot welded joints (1.2t)	33
Fig. 3.4 Indentation depth of spot welded joints with welding current in various electrode diameter (1.6t)	35
Fig. 3.5 Tensile-shear strength of spot welded joints (1.6t)	38
Fig. 3.6 Hardness distribution of spot welded joints (1.6t)	40

List of Table

Table. 1.1 Type of cold rolled steel sheet	10
Table. 2.1 The chemical composition in SPCC (Wt%)	13
Table. 2.2 The mechanical property in SPCC	13
Table. 2.3 Specifications of resistance spot welding equipment	16
Table. 2.4 Electrode tip diameter and diameter ratio	18
Table. 2.5 Welding conditions for resistance spot welding	20
Table. 2.6 Nital etching reagent	22
Table. 2.7 Configuration of tensile-shear test specimen (unit : mm)	24
Table. 2.8 Hardness measurement condition	28
Table. 3.1 Cross section of the resistance spot welding (1.2t)	29
Table. 3.2 Size of nugget and indentation (1.2t)	30
Table. 3.3 Welding conditions of resistance spot welding (1.2t)	32
Table. 3.4 Cross section of the spot welded joints (1.6t)	36
Table. 3.5 Size of nugget and indentation (1.6t)	37
Table. 3.6 Welding conditions of resistance spot welding (1.6t)	39

ABSTRACT

A study on the indentation characteristics with cu back plate in resistance spot welding

Jeoung Jin-Tae

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

Resistance Spot Welding(RSW) is widely applied to the automobile manufacturing industry because of its benefits such as high speed of welding and productivity and especially its automation. The remaining indentation after the process have improper effect on welding strength and surface of the product. The present studies about reducing the indentation have progressed by changing the diameter of electrode. In this study, to get more elegant appearance of product by reduced indentation, copper plate was adhered on the lower electrode and the upper electrode diameter was changed.

Copper back plate was used in this experiment and lap-jointed each same thickness of 1.2mm×1.2mm, 1.6mm×1.6mm SPCC plate. In the case of changing the diameter of electrode, the condition of satisfying the optimum nugget diameter($5\sqrt{t}$) and minimum indentation was 1.2mm×1.2mm and 1.6mm×1.6mm with 8ϕ which were 10.0kA and 11.0kA for each. Comparing with industrial field, it was found that the welding indentation (industrial field = 0.07mm) was reduced about 57% in 1.2mm×1.2mm and 43% in 1.6mm×1.6mm. industrial

field

From the result of the tensile shear strength test with $1.2\text{mm} \times 1.2\text{mm}$, the average tensile shear strength was 6.55kN which is higher than 6.17kN(industrial field standard). The fracture of the weld zone appeared as plug fracture. Moreover, in the tensile shear strength test with $1.6\text{mm} \times 1.6\text{mm}$, the result showed the average tensile shear strength was 11.28kN which is higher than 9.21kN(industrial field standard) and the fracture of the weld zone appeared as plug fracture.

In terms of the micro hardness test with $1.2\text{mm} \times 1.2\text{mm}$ (upper electrode diameter : 8ϕ , welding current : 10.0kA), the hardness of nugget was 135 ~ 145Hv. The hardness of base metal was 82 ~ 92Hv and the heat affected zone(HAZ) was 100 ~ 110Hv. The result of the micro hardness test with $1.6\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ (upper electrode diameter : 8ϕ , welding current : 11.0kA) showed the hardness of nugget as 112 ~ 116Hv. The hardness of base metal was 73 ~ 77Hv and HAZ was 87 ~ 91Hv. From the both results of the micro hardness tests, it was observed that the hardness increased gradually from the base metal, the HAZ, and the nugget.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

저항 점 용접(Resistance Spot Welding, RSW)은 전극을 이용하여 판재를 고정시키고 저항 열을 발생시켜 모재의 접합면을 용융시키고 압력을 가해 접합부를 형성한다. 점 용접부의 내부에서는 전류에 의해 빠른 속도로 저항 열이 발생하며, 두 판재의 접합면 부근에서 가장 높은 온도로 가열되어 너깃을 형성하게 된다. 이와 같은 저항 점 용접법은 용접 속도가 빠르기 때문에 박판을 이용한 용접 제품의 대량 생산에 적합하여 자동차 및 가전제품 등의 산업 현장에서 널리 사용되고 있다.[1~2]

특히 자동차산업에서는 용접부의 기계적, 전기적, 열적 그리고 금속학적인 복잡한 상호작용에도 불구하고 저항 점 용접의 빠른 속도와 효율 때문에 많이 사용된다. 그 밖에 아크, 레이저 용접 등 다른 용접 기법도 사용되고 있으나 비교적 강건한 설비와 저렴한 생산원가로 인해 오랜 기간 산업표준이 되어 오고 있다.[3]

저항 점 용접의 여러 가지 결함에 대한 연구는 꾸준히 이루어졌으나 이러한 연구들은 주로 저항 점 용접부의 기계적 강도나 결함 방지책에 대한 연구가 대부분이다. 따라서, 본 연구에서는 접합부 강도에 영향을 미칠 뿐만 아니라 제품의 외관에도 상당한 영향을 미치는 압흔을 감소시킬 수 있는 방안에 대하여 연구하고자 하였다.

압흔은 응력집중현상에 의해 전단강도를 저하시키는 원인이 되기도 하므로 중요한 품질변수중 하나이다. 또한 압흔이 발생한 만큼 용접부의 금속이 용접 주변부로 밀려나서 접합이 되며 판재 사이가 벌어지는 판 분리 현상이 발생되어 점 용접된 외관은 변형이 되어 제품의 품질을 저하시킨다.[4~5]

대부분 차체에 적용되는 저항 점 용접들은 도장에 의해 용접 흔적이 가려져 쉽게 눈에 띄지 않지만 일부 점 용접으로 인해 압흔이 도출되는 부품의 외관상 품질을 개선시키면서 전단강도를 임계값 이상으로 유지시키고자 본 연구에서는 이를 저감시킬 수 있는 방법을 개발하여 일부 산업용 자동차의 외관상 제품 품질을 향상시키고 디자인 유연성을 높이고자 한다. [6]

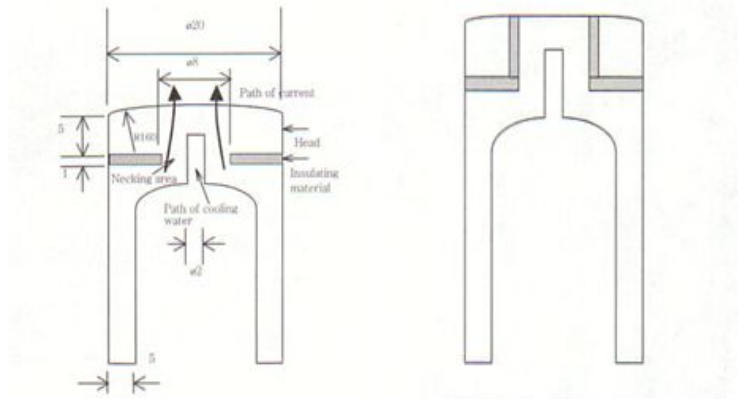
1.2 국내·외 기술 동향

저항 점 용접 시의 저항은 주로 소재의 비저항과 접촉저항으로 이루어지는데 접촉 저항은 일반적으로 가압력에 역비례하는 경향을 보인다. 가압력이 감소하면 접촉 저항이 증가하여 발열량이 증가하며 압흔 깊이가 깊어지게 되는데 이때 접촉저항을 줄이기 위해 가압력을 증가시키게 되면 전극팁과의 접촉부의 압력이 증가하고 이에 따라 접촉부 표면의 응력이 증가하여 압흔 깊이가 깊어지게 된다.[7]

따라서 가압력에 의한 상반된 효과를 제어하는 것은 상당히 어려우며 전류밀도를 증가시키기 위해 전극팁을 원형 또는 원추형상으로 할 경우에는 과도한 압흔이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 최근에는 전극팁의 내부에 일정 길이의 절연체를 두어 너깃부의 전류밀도를 높여 충분한 용융이 일어나도록 하고, 전극 헤드부분은 모재의 접촉면적을 넓혀 표면응력을 대폭 감소시키는 일체형 절연팁이 개발되었다.[8]

한편, 국내 자동차 산업의 차체 조립 공정은 로봇을 이용한 자동화가 대부분 설치되어 있으나 저항 점 용접 공정의 대부분은 공압 실린더에 의한 점 용접이 되고 있어서 실제 가압력을 정밀하게 측정하거나 제어할 수 없다. 따라서 정밀한 가압력 제어를 위해 서보 모터를 장착한 서보 용접건 시스템이 고안되었다.

서보건 저항 점 용접의 가장 큰 특징은 가변 Stroke로 공압건에 비해 가압력을 임의로 조절 가능하고 용접 중에도 가압력을 단계별로 조절할 수 있어 저항 점 용접 중에 용융된 금속이 용접 주변부로 밀려나서 접합이 되어 판재 사이가 벌어지는 판 분리 현상 등이 일어나지 않도록 하는 것이 가능해졌을 뿐 아니라 압흔 깊이를 대폭 개선할 수 있게 되었다.[9]



(a) Details of insulated cap tip (b) Details of ring type cap tip
Fig. 1.1 Details of insulated cap tip and ring type cap tip

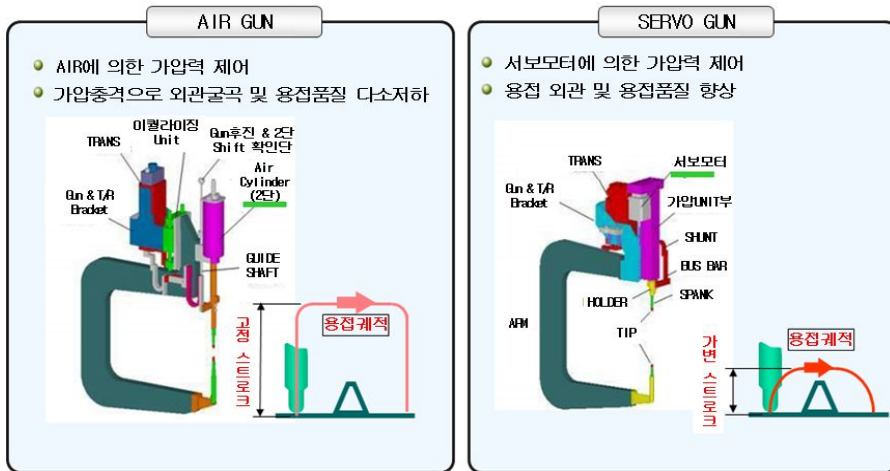


Fig. 1.2 Details of air gun and servo gun

1.3 저항 점 용접

1.3.1 저항 점 용접의 원리

Fig. 1.3은 저항 점 용접의 모식도를 나타낸 것으로, 두 장의 판재를 서로 겹치기 해놓고 전극으로 가압하여 판재를 고정시킨 후 용접 변압기에 의해 형성된 높은 전류를 인가한다. 전류에 의해 판재인 용접재 내부의 접합면 부근에서 저항열의 발생으로 인해 용융점 이상으로 가열되어 너깃을 형성한다.[10]

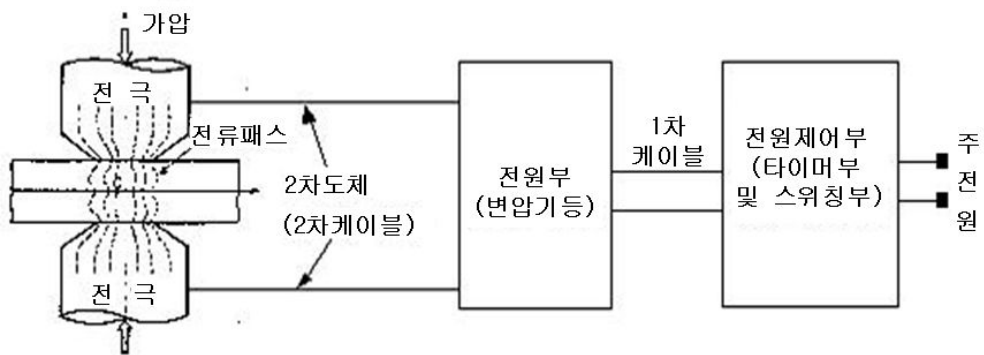


Fig. 1.3 Mimetic diagram of resistance spot welding

이때 발생하는 열량은 $Q=I^2Rt$ 와 같은 공식에 의해 산출된다. $Q=I^2Rt$ 에서 Q 는 발열량, I 는 용접전류, R 는 전기 저항, t 는 통전시간이다.

이중에서 가장 중요한 인자는 전기 저항으로, 저항 점 용접에서 저항의 분포는 Fig. 1.4와 같으며 각각 고유저항과 접촉저항으로 이루어져 있다. Fig. 1.4의 전극의 고유저항은 상대적으로 그 값이 매우 작으므로 무시한다. ①은 전극과 철판 사이의 접촉저항이고 ②는 판재 고유저항이며 마지막으로 두 판재 사이의 접촉저항이 ③으로 가장 큰 값을 갖는다. 용접이 진행되는 과정에서 저항이 가장 큰 부

위인 ③은 판재끼리 접촉된 부분에서 가장 큰 발열이 일어나 용융이 시작된다. 용융이 시작되면 가장 큰 접촉 저항이 작아지고 모재의 고유저항이 커지면서 열의 이동이 발생하며 용융혼합물인 너깃이 성장한다.[11]

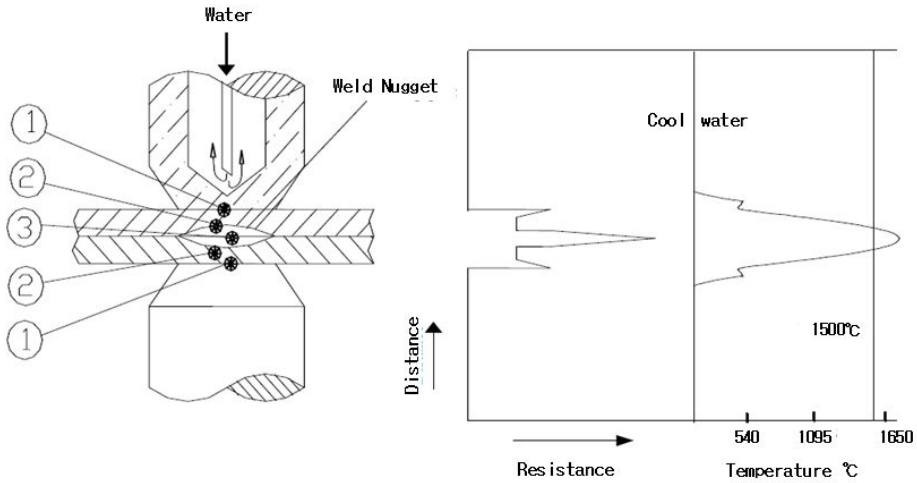


Fig. 1.4 Schematic illustration of the spot welding process

저항 점 용접의 3대 요소로는 전류, 저항, 통전시간이 있다. 이 중 전류는 제곱값으로 열량에 반영되어 기여도가 가장 크다. 저항은 용접 대상물에 압력을 가해주는 힘인 가압력과 관련이 있다. Fig. 1.5와 같이 용접부의 가압력이 커질수록 판재 사이의 접촉 부분이 증가하여 접촉 면적이 늘어나 전류가 보다 쉽게 흐를 수 있게 되는데 이는 접촉저항이 줄어드는 것과 같다.

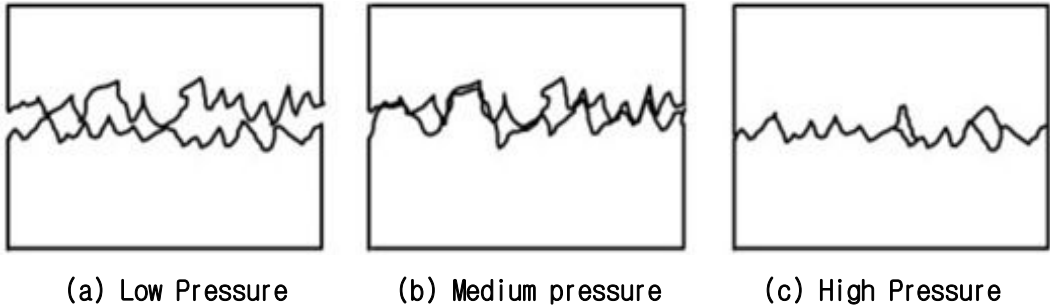


Fig. 1.5 Relations between contact resistance and electrode force

가압력이 너무 약할 경우 판재가 접촉하는 부분의 접촉저항이 매우 커져 너트의 성장속도가 빨라지며 약한 가압력에 의해 용융혼합물이 옆으로 빠져나가 중간날림이나 판 분리 현상이 발생할 수 있다. 따라서 너트의 크기가 줄어들고 기공 등의 결함이 발생할 수 있다.

반면 가압력이 너무 클 경우에는 판재가 접촉하는 부분의 접촉저항이 작아지면서 상대적으로 모재의 고유저항에 의한 열 발생이 많아지게 되면서 전극에 의해 모재가 눌리는 압흔 현상이 나타나며 이 또한 용접부의 강도를 약화 시킬 수 있는 요인이 된다.

이와 같이 전류와 가압력은 상호작용 하므로 최적의 용접조건을 도출하기 위해서는 두 변수를 동시에 고려해 주어야 한다. 통전시간은 열량공식에 의하면 열량과 정비례 관계이지만 용접이 진행되고 너트가 형성되면서 접촉저항은 줄어들고 판재의 고유저항이 커지는 현상에 의해 적정시간 이상의 통전시간은 너트 직경의 성장보다는 판재의 과열로 인한 압흔이 형성될 수 있다.[12]

1.3.2 저항 점 용접의 특징

아크용접 대비 저항 점 용접의 장점은 짧은 시간에 용접을 이룰 수 있고 가열 영역이 용접부 근처에만 한정되므로 용접부의 열변형이 적다. 자동 용접이기 때문에 작업자의 숙련도가 거의 요구되지 않고 용가재나 플럭스가 불필요하므로 용접부의 품질 재현성이 우수하며 용접 중에 아크 용접과 같이 유해한 자외선을 발생시키지 않는다. 또한 한 쪽의 봉 모양 전극을 평탄한 전극으로 바꾸어 사용하면 용접 후 전극에 의한 압흔이 거의 없어져서 표면 품질을 높일 수 있다.

저항 점 용접의 단점으로는 용접 시 대전류를 필요로 하기 때문에 용접기 및 수전 설비의 규모와 투자비용이 크고 전류, 가압력, 통전시간, 전극형상, 용접재의 재질과 두께 등에 따라 용접조건이 달라지므로 용접조건을 선정하기가 까다롭다. 저항 점 용접부는 너깃 주위의 노치 효과에 의해 비교적 낮은 기계적 성질을 가진다. 또한 너깃부의 크기와 접합 상태를 외관으로는 판정할 수 없으며 적당한 비파괴 검사법이 없다.[13]

저항 점 용접부의 각 부분의 명칭 및 결함의 명칭은 Fig. 1.6와 같이 일반 아크 용접부의 명칭과 다르다.

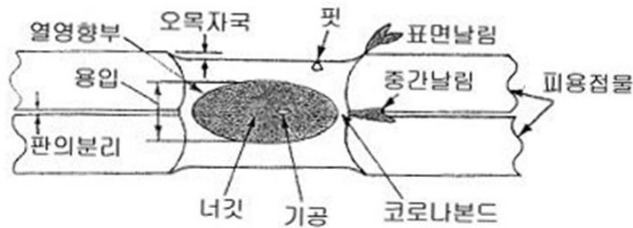


Fig. 1.6 Appellation of welding zone

너깃은 저항 점 용접의 결과로 접합부에 생기는 용융 응고한 부분으로서 일반적으로 접합면을 중심으로 바둑돌 모양으로 형성되며, 코로나 본드는 너깃 주위에 존재하는 링 형상의 부분으로 실제 용융되지 않고 열과 압력에 의해 고상으로 압접된 부분이다.

코로나 본드는 접합부의 강도에는 기여하지 않는다. 오목자국은 압흔이라고도 하며 전극팁이 가압력으로 모재에 파고 들어가서 오목하게 된 부분이다. 용입은 피용접재가 녹아들어간 깊이로 너깃의 한쪽 두께와 같다.

기공은 너깃 내부에서 용융중에 발생한 기포가 응고 시에 이탈하지 못하고 남아 있는 공동을 말하며 일반적으로 너깃의 중앙부에 발생하고 과대전류나 가압력의 부족으로 인해 용융금속이 날아나간 자리에 형성된다.

중간날림은 용융금속이 코로나 본드를 파괴하고 외부로 튀어나가면서 날리는 것을 말하며 가장 해결하기 어려운 문제 중의 하나이다. 표면날림은 전극과 피용접재의 접촉면에서 피용접재나 전극이 용융하여 튀어나가는 것으로 중간날림보다는 자주 발생하지 않지만 주로 점 용접에서 도전률이 나쁜 전극소재를 사용하거나 냉각부족 또는 전극팁 직경이 과소한 경우에 자주 생기고 전극팁의 손상에 가장 큰 영향을 미친다.[14]

1.4 냉간압연강판 SPCC 소재의 특징

냉간압연강판(SPCC)은 열연 코일을 소재로 표면 스케일을 제거하고 두께 0.15~0.32mm 정도까지 압연한 후 소둔과 조질 압연을 거쳐 생산한다. 열연 강판에 비해 두께가 얇고, 표면이 미려하고, 평활하며, 가공성이 우수하다. 이러한 특성에 따라 자동차, 가전 기기, 가구, 사무용품, 차량, 건축 등에 직접 사용되거나 아연, 알루미늄, 주석, 크롬 등의 도금용 원판으로 광범위하게 사용되고 있다.

냉간가공을 하면 금속의 기계적 성질이 변하는데 인장강도, 항복점, 경도 등은 점차 증가하고 연신율, 수축단면 등은 감소된다. 특히 50% 이상의 성질변화에 대한 영향이 완만히 진행되지 못함으로써 경화가 급격히 진행된다면 변형능력이 감소되어 파괴되고 만다. 따라서 파괴되기 전에 풀림(Annealing)을 함으로써 변형능력이 회복된 후 다시 가공하는 것이 필요하다. 냉연강판의 특성은 화학성분, 기계적, 물리적 성질, 치수, 형상, 외관 등이 있으며 각종 용도에 적합한 강종이 채택되고 있다.[15]

Table. 1.1 Type of cold rolled steel sheet

Type	Composition			
	C	Mn	P	S
SPCC	0.15	0.60	0.050	0.050
SPCD	0.12	0.50	0.040	0.040
SPCE	0.10	0.45	0.030	0.030
SPCF	0.08	0.45	0.030	0.030
SPCG	0.02	0.25	0.020	0.020

제 2 장 연구 방법

2.1 실험방법 및 용접조건

2.1.1 사용소재 및 용접법

본 연구에서는 저항 점용접 시 필연적으로 발생하는 압흔을 최소화시키기 위한 방안으로 동판 부착 및 전극직경비(상부 : 6~16 \emptyset , 하부 : 6 \emptyset)를 변화시켜 실험을 실시하였다. 동판 부착은 하부 전극을 고정하고, 동판 부착을 통해 압흔 저항 특성을 고찰하였다. 전극직경비는 상부 전극과 하부 전극의 비로서 하부 전극은 고정하고 상부 전극(6~16 \emptyset)을 변화시켜 실험을 진행하였다.[16]

본 연구에서 사용한 강재는 냉간압연강판(SPCC)으로 일반용도에 사용되는 강재로서 자동차용으로는 Roof, Fender, Hood, Quater, Oil Pan, Spring House 등에 사용된다. 실험에 사용한 냉간압연강판(SPCC)의 화학적 조성과 기계적인 물성은 Table. 2.1과 Table. 2.2에 나타내었다.

시험편 제원은 길이 (L)=160mm, 폭(B)=50mm, 판두께 (t)=1.2mm와 (L)=150mm, 폭 (B)=45mm, 판두께 (t)=1.6mm로 절단한 후 각각 같은 두께의 시편을 겹쳐 약 50mm의 간격으로 저항 점 용접을 실시하여 시험편을 제작하였으며, 저항 점 용접 이음부의 형상은 Fig. 2.2에 나타내었다.[17]

Table. 2.1 The chemical composition in SPCC (Wt%)

Composition Material	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
SPCC	0.0017 ~ 0.0020	0.002 ~ 0.002	0.098 ~ 0.093	0.009 ~ 0.0096	0.0051 ~ 0.0055

Table. 2.2 The mechanical properties in SPCC

Material	Mechanical properties		
	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SPCC	162 ~172	292 ~291	50 ~51

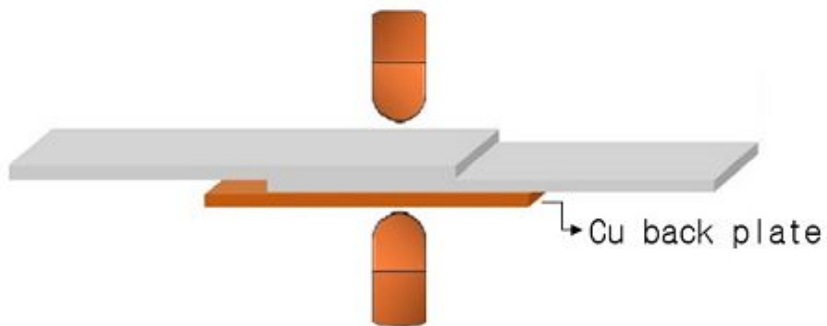


Fig. 2.2 Configuration of lap-joints specimen



Fig. 2.3 Optical microscope

2.1.2 실험장비

본 연구에서는 냉간압연강판(SPCC)의 저항 점 용접을 위하여 미야찌코리아의 Max welding input 241kVA, 공압으로 작동하는 정치식 용접기를 사용하였다. Fig. 2.4 (a)와 Table. 2.3은 본 연구에 사용한 저항 점 용접기와 상세 사양을 나타내었다. 점 용접시 전극의 가압력은 Fig. 2.4(b)의 10kN 용량의 하중 측정기를 사용하여 측정하였다. 또한 압흔 깊이 측정은 다이얼게이지를 이용하여 측정하였다.



(a) Spot welding machine

(b) Electrode force machine

Fig. 2.4 Equipment of resistance spot welding

Table. 2.3 Specifications of resistance spot welding equipment

Rated input	100 KVA
Power input voltage	1Ø220V 60Hz
Max welding input	241 KVA
Rated output A	27,000 A
Cooling capacity	10 ℓ /min
Max electrode force	1,000 kgf

2.1.3 동판 및 전극

동판 삽입 실험은 Fig. 2.5와 같이 시험편 하부에 동판을 삽입하였으며, 상부 전극은 6 ~ 16mm로 변화시키면서 하부의 전극 위에 동판을 부착하여 동판 부착에 따른 압흔 저감 특성을 비교, 평가하였다. 동판은 Fig. 2.5와 같이 시험편 하부에 부착하였으며, 제원은 길이 110mm, 폭 30mm, 두께는 10mm로 하였다.

저항 점 용접에 있어서 동판 부착 유무 및 전극 형상과 제원은 매우 중요한 요소 중 하나이다. 본 실험에 사용된 전극은 하부 R형 Cr-Cu 재질의 전극으로 선단경 6mm이며, 압흔 저감을 위해 동판 백킹재(copper back plate)를 사용 하였다.

Fig. 2.6와 같이 상부 전극은 6, 8, 10, 13mm로 기존 R형 Cr-Cu 전극의 선단경을 사용하였고, 16mm는 F형 Cr-Cu 재질의 전극으로 실험을 실시하였다. 또한 상부전극과 하부전극의 비를 전극직경비로 하여 전극직경비에 따른 압흔 깊이를 비교하였으며 전극직경비는 Table. 2.4에 나타내었다.[18]

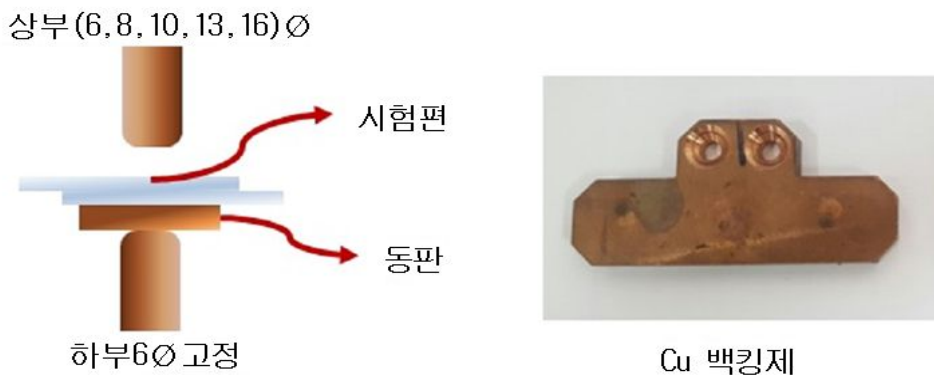








Fig. 2.5 Configuration of resistance spot welding with cu back plate



Fig. 2.6 Electrode tip

Table. 2.4 Electrode tip diameter and diameter ratio

Lower electrode tip diameter(mm)	Upper electrode tip diameter(mm)				
 6 ϕ	R type				F type
	 6 ϕ	 8 ϕ	 10 ϕ	 13 ϕ	 16 ϕ
Electrode tip diameter ratio	1	1.3	1.7	2.2	2.7

2.1.4 용접조건

저항 점 용접에서는 용접전류(kA), 가압력(kN), 통전시간(welding time), 전극 탐의 형상 등이 주요 변수 이다. 이 중 용접전류(kA), 가압력(kN), 통전시간 (welding time)는 제어 가능한 인자로 가장 중요한 변수이다.

본 연구의 주요점으로 동판 부착 및 전극직경비(상부 : 6 ~ 16mm, 하부 : 6mm)에 따른 용접 전류 변화에 대한 압흔을 최소화 할 수 있는 조건을 찾고자 용접전류 (kA)는 처음에는 전류를 낮게 설정하여 중간날림이 발생할 때까지 서서히 증가시켰다. 이 중간날림이 발생하는 전류치보다 약간 낮은 전류값을 적정 전류치로 설정하였다. 가압력과 통전시간은 비교를 위하여 기존 현장에서 사용하고 있는 용접 조건을 참고하였다.

SPCC 강재에 대한 두 종류의 lap-joint 저항 점 용접을 위한 동판 부착 및 전극 직경비 따른 판재 두께 1.2t(mm), 1.6t(mm)의 상세 용접 조건은 Table. 2.5와 같다. 기본적으로 상부전극의 직경은 6 ~ 16mm, 하부전극의 직경은 6mm로 하여 하부 전극에 동판을 부착하여 실험을 진행하였다.

판재 두께 1.2t(mm)는 얇은 두께를 고려하여 1회 통전 하였고, 1.6t(mm)는 처음 통전에는 전류값을 7KA로 통전시간을 15cycle로 고정 시켰으며, 두 번째 통전에서는 통전시간을 36cycle, 전류값을 9.0 ~ 11.0KA 변화 시켜 2회 통전하여 실험하였다.

Table. 2.5 Welding conditions for resistance spot welding

Type \ Plate thickness	1.2x1.2(mm)	1.6x1.6(mm)
Electrode force(kN)	3	3
Squeeze time(cycle)	36	36
Weld current 1(kA)	9.0~11.0	7.0
Weld time 1(cycle)	36	15
Weld current 2(kA)	-	9.0~11.0
Weld time 2(cycle)	-	36
Holding time(cycle)	12	12
Upper Electrode tip diameter(Ø)	6~16	6~16
Lower Electrode tip diameter(Ø)	6	6
Electrode diameter ratio	1 ~ 2.7	1 ~ 2.7

2.2 용접부 특성 평가

2.2.1 너깃부 육안 검사 및 단면 특성

저항 점 용접에서 최적 용접조건을 위해선 압흔의 깊이와 크기, 너깃의 크기 등 육안검사를 실시하였다. 최적 용접조건으로 표면 및 중간날림이 발생하지 않으며 판 분리 현상이 일어나지 않는 조건을 선정하였다.

용접부의 단면 시험은 KS B 0854 점 용접 이음의 단면 시험방법의 단면 시험에 의거하여 실시하였다. 시험편의 모양은 Fig. 2.8과 같이 하였으며 시험은 판 표면과 수직의 단면에 대하여 시행하며, 용접 점의 대략 중심을 지나는 단면을 적당한 방법으로 절단하여 연마, 부식시킨 후 너깃 지름, 용입, 균열, 기공 등의 내부 결함에 대하여 조사하였다.

용접부의 단면 형상을 관찰하기 위하여 KS B ISO 15614에 의거하여 시험편 절단을 실시하고 마운팅, 미세연마를 실시하였다. 마운팅을 실시하고 연마지를 사용하여 # 400, # 600, # 800, # 1000, # 1200, # 1500, # 2000, # 2400, # 4000 순서로 연마를 수행하였다. 아울러 세밀한 연마를 위하여 Diamond paste 9 μ m, 3 μ m, 1 μ m를 이용하여 미세연마를 수행하였다. 그리고 나서 연마된 시험편을 나이탈 애칭액으로 30~50초간 etching을 실시하였다. 나이탈 부식액은 질산 3%와 에탄올 97% 비율이다. 나이탈 애칭액의 비율은 Table. 2.6에 나타내었다.[19~20]



Fig. 2.7 Specimen of resistance spot welding

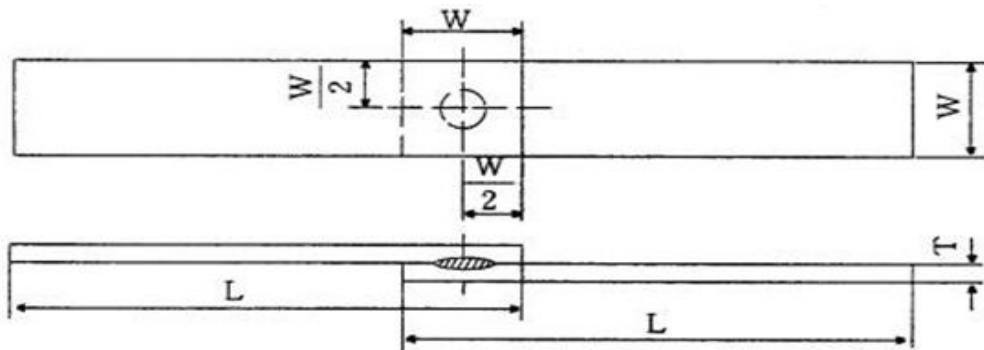


Fig. 2.8 Specimen of lap-joint with single spot welding

Table. 2.6 Nital etching reagent

Solutions	Values(ml)
Nitric acid(HNO_3)	3
Ethyl alcohol($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	97

2.2.2 인장-전단강도

인장-전단강도는 각각 KS B 0850 규격에 따라 Fig. 2.9과 같이 시험편을 제작해 시험하였다. 판재두께 1.2t(mm) 시험편은 호칭 판 두께 0.8mm 이상 ~ 1.3mm 미만의 규격에 따라 판너비 30mm, 겹침여유 30mm, 시험편 길이 100mm, 클램프 간 거리 90mm의 인장-전단시험편을 제작하고, 판재두께 1.6t(mm) 시험편의 경우는 호칭 판 두께 규격 1.3mm이상 ~ 2.5mm 미만의 규격에 따라 판너비 40mm, 겹침여유 40mm, 시험편 길이 125mm, 클램프 간 거리 100mm의 규격으로 시험편을 제작하였다.

인장-전단시험에 사용된 장비는 Fig. 2.10의 일본 시마츠社의 UTM(Universal Testing Machine)이며, 인장-전단시험은 3mm/min의 속도로 수행하였다. 저항 점 용접 인장시험 시의 파단형상으로는 Fig. 2.11에 나타낸 것과 같이 세 종류의 파단형상이 있다. 용접부족으로 인해 너깃부에서 분리되는 (a) 쉼어 파단과 양호한 용접으로 반대쪽의 피용접재를 찢으며 분리되는 (b) 테어 파단 그리고 과도한 용접으로 반대쪽 너깃부가 쏙 빠지는 것과 같은 (c) 플러그 파단으로 나뉜다.[21~22]

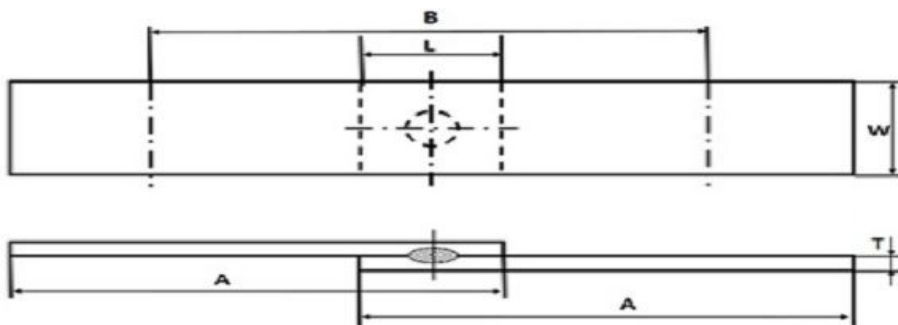


Fig. 2.9 Dimension of tensile-shear test specimen

Table. 2.7 Configuration of tensile-shear test specimen (unit : mm)

Plate Thickness T	Width W	Over lap L	Length A	Free length between clamps B
0.3 ~ 0.8	20	20	75	70
0.8 ~ 1.3	30	30	100	90
1.3 ~ 2.5	40	40	125	100
2.5 ~ 5.0	50	50	150	110



Fig. 2.10 UTM(Universal Testing Machine)

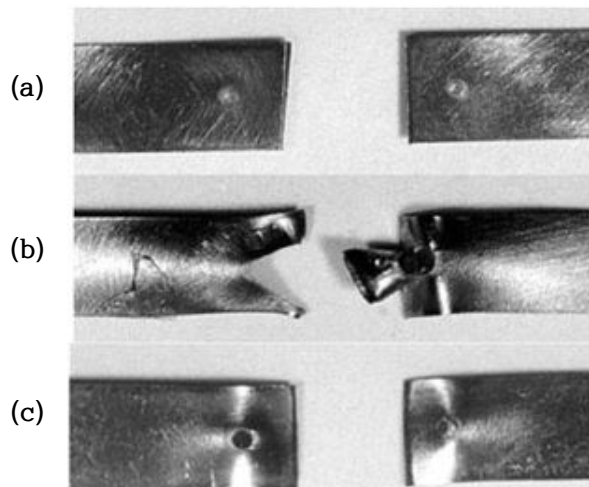


Fig. 2.11 Failure modes of spot welds during tensile-shear test

2.2.3 경도시험

경도시험은 Fig. 2.12의 AkAshy사의 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 하중 0.5kgf로 실시하였다. 시험편은 KS B ISO 14271 점, 프로젝션, 심 용접의 비커스 경도시험(저하중, 미세경도)에 따라 Fig. 2.13와 같이 용접 시험편을 채취하여 시험편의 너깃부(상하 5points, 좌우 6points) 11points, 열영향부(상하 2points, 좌우 4points) 6points, 모재부(상판 5points, 하판 4points) 9points, 총 26points의 경도를 측정하였고 경도 측정 위치는 Fig. 2.14에 나타내었다.

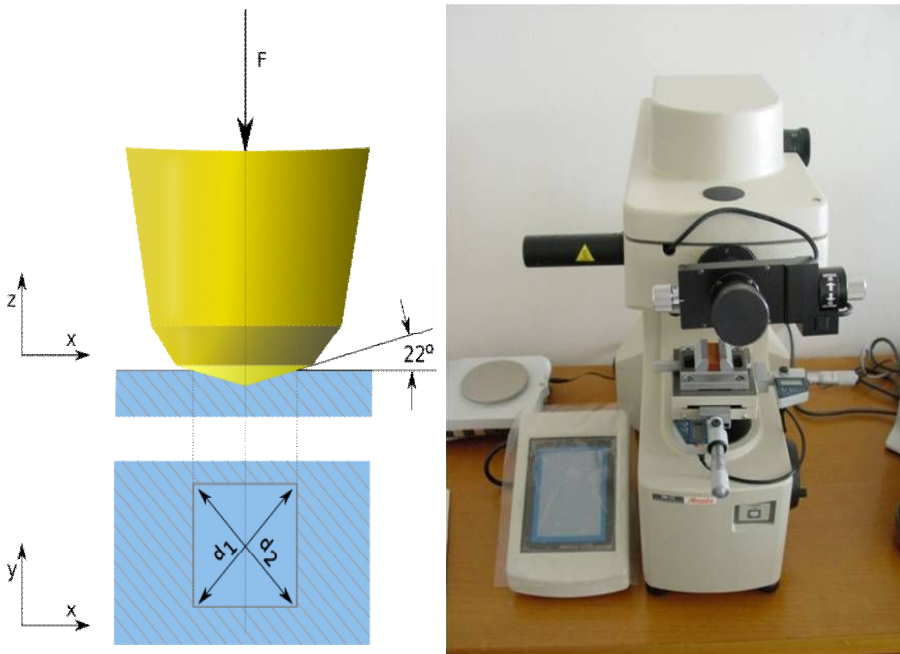


Fig. 2.12 Vickers hardness test scheme and equipment

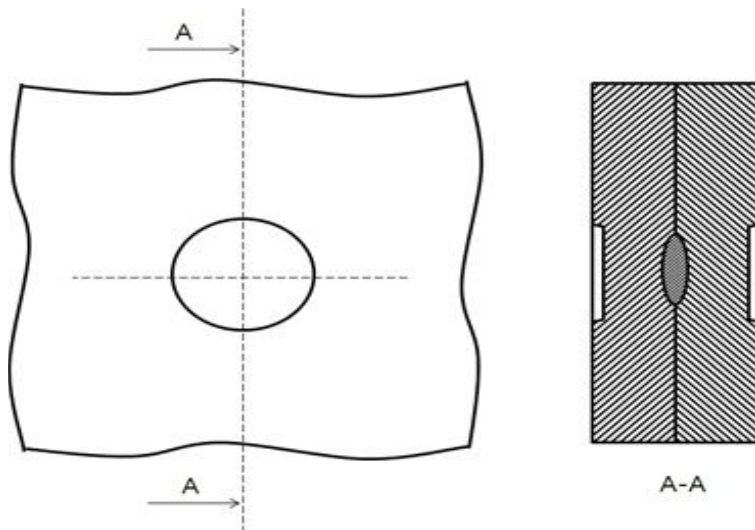


Fig. 2.13 Plan and cross section of resistance spot welding

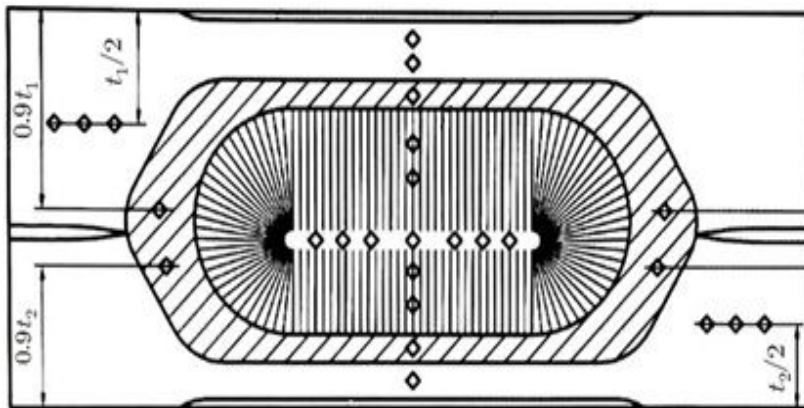


Fig. 2.14 Indentation location of resistance spot welding

Table. 2.8 Hardness measurement condition

Parameters	Values
Type	Micro vickers hardness tester
Load	0.5kgf
Loading time	10sec
Test position	Below 2.5mm from surface

3장. 결과 및 고찰

3.1 냉간압연강판 SPCC 1.2t(mm) 용접 특성

3.1.1 용접부 육안 검사 및 단면 특성

냉간압연강판(SPCC) 1.2t(mm) 용접부 품질을 평가하기 위해 용접 조건을 하부전극에 동판을 삽입하여 가압력 3kN, 가압유지시간 36cycle, 통전시간 36cycle, 냉각시간 12cycle로 고정시켰다. 1회 통전을 실시하였고, 용접전류(9.0 ~ 11.0kA) 및 전극 직경비(1.0 ~ 2.7)를 변화시켜 실험을 실시하였다.

저항 점 용접에서 최적 용접조건을 위해선 압흔의 깊이와 크기, 너깃의 크기 등 육안검사를 실시하였다. 최적 용접조건을 주안점으로 표면 및 중간날림이 발생하지 않으며 판 분리 현상이 일어나지 않는 조건을 선정하였다.

Table. 3.1에서 보듯이 상부 전극 6mm에서 모든 전류값에서 너깃이 잘 형성된 것을 알 수 있었다. 상부 전극 8mm에서는 일부 전류값에서 너깃의 형성을 확인할 수 있었으며, 10mm, 13mm, 16mm에서는 두 가지의 용접결함이 생긴 것을 확인할 수 있었다. 과도한 전극팁의 직경 변화로 용접전류부족이 원인이 되어 너깃 경의 과소, 용입 불량 등의 용접결함이 발생하였다.[23]

본 연구에서 수행한 조건 중에서 너깃이 형성되지 않은 상부전극 10mm, 13mm, 16mm는 제외하고 너깃이 형성된 조건인 상부 전극 6mm, 8mm를 선정하여 너깃, 압흔 측정값을 Table. 3.2에 정리하였다.

Table. 3.2의 값에서 알 수 있듯이 6mm와 8mm의 일부에서 KS B 0854에 명시되어 있는 최소너깃크기인 $5\sqrt{t}$ 인 5.48mm 이상을 만족하였다. 상부 전극 6mm에서는 전류값이 상승하면서 너깃의 크기가 커짐을 확인할 수 있었으며, 압흔은 0.4mm ~

0.7mm 사이를 나타내었다. 상부 전극 8mm에서는 10.0kA, 10.5kA, 11.0kA 3가지 조건에서 전류값이 상승하면서 너깃의 크기가 커짐을 확인 할 수 있었으며, 압흔은 0.01mm ~ 0.05mm 사이를 나타내었다.

본 연구에서 수행한 조건에서 알 수 있듯이 상부 전극 6mm와 8mm 일부에서 최소 너깃직경을 만족하였다. Fig. 3.1에서 보듯이 상부전극 6mm와 8mm에서 기준 평균 값보다 압흔이 저감되었지만, 6mm에서 점 용접된 외관의 품질을 저하시키는 판 분리 현상이 확인 되었다. 판 분리 현상은 과도한 가압력과 전극직경의 과소로 인하여 발생한 것으로 사료 된다. 결국, 압흔은 6mm에서 보다 8mm에서 더 좋은 결과를 확인 할 수 있었다. 또한, 기존 현장 요구치 압흔(0.07mm)보다 약 57% 저감된 것을 알 수 있었다.

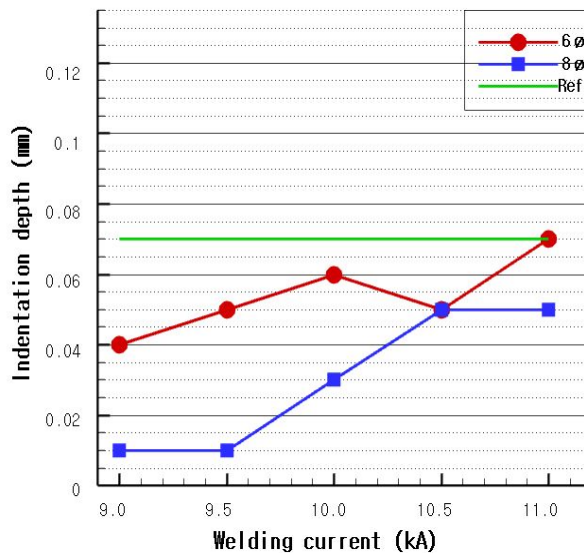


Fig. 3.1 Indentation depth of spot welded joints with welding current in various electrode diameter (1.2t)

Table. 3.1 Cross section of the spot welded joints (1.2t)


























Current Electrode diameter ratio	9.0 kA	9.5 kA	10.0 kA	10.5 kA	11.0 kA
1.0					
1.3					
1.7					
2.2					
2.7					

Table. 3.2 Size of nugget and indentation (1.2t)

Electrode tip diameter	Current (kA)	Nugget diameter (mm)	Depth of indentation (mm)	
			Front	Back
6 \varnothing	9.0	5.50	0.04	0.439
	9.5	5.835	0.05	0.439
	10.0	5.908	0.06	0.484
	10.5	6.166	0.05	0.499
	11.0	6.196	0.07	0.51
8 \varnothing	9.0	-	0.01	0.07
	9.5	-	0.01	0.06
	10.0	6.318	0.03	0.09
	10.5	6.545	0.05	0.08
	11.0	6.681	0.05	0.11

3.1.2 인장-전단강도 특성

본 연구는 냉간압연강판(SPCC) 1.2t 저항 점 용접 lap-joint 용접 시 동판 부착 및 전극 직경 변화가 인장-전단강도 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 인장-전단시험용 시험편은 KS B 0850의 규격에 의거하여 제작하여 시험을 수행하였다.

점 용접부 표면형상과 절단면 너깃 형상, 인장접합강도 등을 1차적으로 육안검사 및 단면특성을 평가한 결과 접합성은 매우 양호하였다. 또한, 용접과정에서 발생할 수 있는 기공(Porosity)이나 미소균열 등과 같은 용접결함이 발견되지 않은 조건하에서 최소 너깃 요구치 만족과 압흔을 최소화 할 수 있는 용접 조건 즉, 냉간 압연강판(SPCC) 1.2t 동판부착, 전극직경비(상부 8 ϕ , 하부 6 ϕ), 전류 10.0kA 조건을 선정하였다.

Table. 3.3과 같이 선정된 조건을 3번의 인장-전단시험을 할 수 있도록 인장-전단시험편 3개씩 제작하였다. Fig. 3.2 는 인장-전단하중 평균값과 기존 현장의 요구치를 나타내었다.

인장-전단시험 결과, 인장-전단하중 평균값은 6.55kN으로 기존 현장의 요구치 (1.2t : 6.17kN)를 상회하고 파단모드는 반대쪽 너깃부가 쏙 빠지는 것과 같은 플러그파단 형태를 보이며, 건전한 용접부로 판단 할 수 있었다.

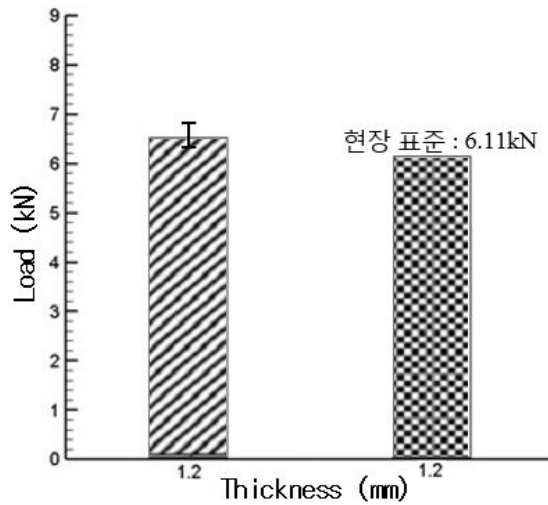


Fig. 3.2 Tensile-shear strength of spot welded joints (1.2t)

Table. 3.3 Welding conditions of resistance spot welding (1.2t)

Type	Values
Weld force(kN)	3
Squeeze time(cycle)	36
Weld current 1(kA)	10.0
Weld time 1(cycle)	36
Weld current 2(kA)	-
Weld time 2(cycle)	-
Holding time(cycle)	12
Upper Electrode tip diameter(Ø)	8
Lower Electrode tip diameter(Ø)	6

3.1.3 경도 분포 특성

Fig. 3.3는 앞절의 최소 압흔 조건인 동판 부착, 전극직경비(상부 8 ϕ , 하부 6 ϕ), 전류 10.0kA로 수행한 저항 점 용접 용접부의 경도를 측정된 것이다. 앞서 언급한 것과 같이 용접부의 너깃(Nugget), 열영향부(Heat Affected Zone), 모재(Base Metal)에 대하여 KS B ISO 14271 규격에 의거하여 경도를 측정 하였다.

경도 분포를 측정 결과, 너깃부 평균 경도값은 140Hv, 열영향부 105Hv, 모재 87Hv로 나타났다. 너깃부의 경도값 140Hv는 열영향부 대비 약 35Hv상승하고 모재 대비 약 53Hv 상승됨을 알 수 있었다. Fig. 3.3를 보면 알 수 있듯이, 경도값은 모재, 열영향부, 너깃 순으로 갈수록 증가하였다.

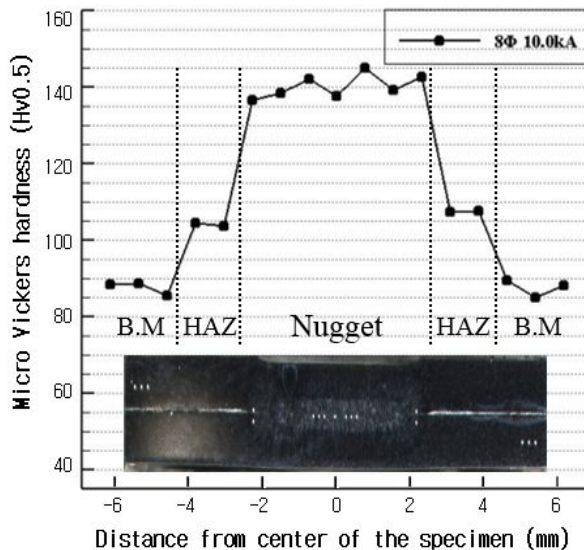


Fig. 3.3 Hardness distribution of spot welded joints (1.2t)

3.2 냉간압연강판 SPCC 1.6t(mm) 용접 특성

3.2.1 용접부 육안 검사 및 단면 특성

냉간압연강판(SPCC) 1.6t(mm) 용접부 품질을 평가하기 위해 용접 조건을 하부전극에 동판을 삽입하였고, 가압력 3KN 가압유지시간 36cycle, 통전시간 36cycle, 냉각시간 12cycle로 고정하였다. 1.2t(mm)와 달리 2회 통전을 실시하였고, 1회 통전 시 용접 전류 7.0kA 2회 통전 시 용접전류(9.0 ~ 11.0kA) 및 전극직경비(1.0 ~ 2.7)를 변화시켜 실험을 실시하였다.

저항 점 용접에서 최적 용접조건을 위해선 압흔의 깊이와 크기, 너깃의 크기 등 육안검사를 실시하였다. 최적 용접조건인 주안점으로 표면 및 중간날림이 발생하지 않으며 판 분리 현상이 일어나지 않는 조건을 선정하였다.

Table. 3.4 에서 보듯이 상부 전극 6mm의 전극에서 모든 전류값에서 너깃이 잘 형성된 것을 알 수 있었다. 8mm에서는 전류값 11.0kA에서만 너깃의 형성을 확인할 수 있었으며, 10mm, 13mm, 16mm에서는 두 가지의 용접결함이 생긴 것을 확인할 수 있었다. 과도한 전극팁의 직경 변화로 용접전류부족이 원인이 되어 너깃 경의 과소, 용입 불량 등의 용접결함이 발생하였다.[16]

본 연구에서 수행한 조건 중에서 너깃이 형성되지 않은 상부 전극 10mm, 13mm, 16mm는 제외하고 너깃이 형성된 조건인 6mm, 8mm를 선정하여 너깃, 압흔 측정값을 Table. 3.5 에 정리하였다.

Table. 3.5의 값에서 알 수 있듯이 상부 전극 6mm와 8mm의 일부에서 KS B 0854에 명시되어 있는 최소너깃크기인 $5\sqrt{t}$ 인 6.32mm를 만족하였다. 6mm에서는 전류값이 상승하면서 너깃의 크기가 커짐을 확인할 수 있었으며, 압흔은 0.07mm ~ 0.08mm 사이를 나타내었다. 8mm에서는 11.0kA 조건에서만 최소너깃크기를 만족하였으며, 압흔은 0.04mm를 나타내었다.

본 연구에서 상부 전극 6mm와 8mm 일부에서 최소너깃직경을 만족하였다. Fig. 3.4에서 보듯이 6mm와 8mm에서 기준 평균값보다 압흔이 저감되었지만, 6mm에서 점 용접된 외관의 품질을 저하시키는 판 분리 현상이 확인 되었다. 판 분리 현상은 과도한 가압력과 전극직경의 과소 인하여 발생한 것으로 사료 된다. 결국, 압흔은 6mm에서 보다 8mm에서 더 좋은 결과를 확인할 수 있었다. 또한, 기존 현장 요구치 압흔(0.07mm)보다 약 43% 저감된 것을 알 수 있었다.

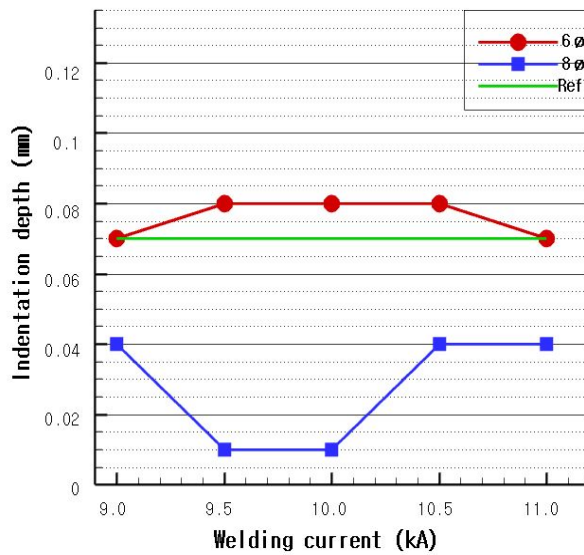


Fig. 3.4 Indentation depth of spot welded joints with welding current in various electrode diameter (1.6t)

Table. 3.4 Cross section of the spot welded joints (1.6t)


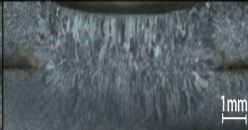



















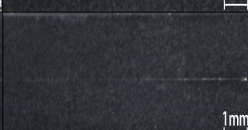

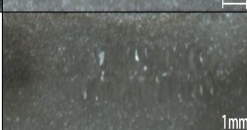
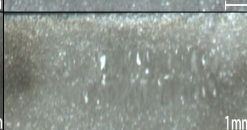
Current Electrode diameter ratio	9.0 kA	9.5 kA	10.0 kA	10.5 kA	11.0 kA
1.0					
1.3					
1.7					
2.2					
2.7					

Table. 3.5 Size of nugget and indentation (1.6t)

Electrode tip diameter	Current (kA)	Nugget diameter (mm)	Depth of indentation (mm)	
			Front	Back
6∅	9.0	7.11	0.07	0.32
	9.5	7.40	0.08	0.31
	10.0	7.57	0.08	0.38
	10.5	7.514	0.08	0.56
	11.0	7.317	0.07	0.43
8∅	9.0	-	0.04	0.02
	9.5	-	0.01	0.05
	10.0	-	0.01	0.05
	10.5	-	0.04	0.09
	11.0	7.102	0.04	0.14

3.2.2 인장-전단강도 특성

본 연구는 냉간압연강판(SPCC) 1.6t 저항 점 용접 lap-joint 용접 시 동판 부착 및 전극 직경 변화가 인장-전단강도 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 인장-전단시험용 시험편은 KS B 0850의 규격에 의거하여 제작하여 시험을 수행하였다.

점 용접부 표면형상과 절단면 너깃 형상, 인장접합강도 등을 1차적으로 육안검사 및 단면특성을 평가한 결과 접합성은 매우 양호하였다. 또한, 용접과정에서 발생할 수 있는 기공(Porosity)이나 미소균열 등과 같은 용접결합이 발견되지 않은 조건하에서 최소 너깃 요구치 만족과 압흔을 최소화 할 수 있는 용접 조건 즉, 냉간 압연강판(SPCC) 1.6t 동판부착, 전극직경비(상부 8 ϕ , 하부 6 ϕ), 전류 11.0kA 조건을 선정하였다.

Table. 3.3과 같이 선정된 조건을 3번의 인장-전단시험을 할 수 있도록 인장-전단시험편 3개씩 제작하였다. Fig. 3.2 는 인장-전단하중 평균값과 기존 현장의 요구치를 나타내었다.

인장-전단시험 결과, 인장-전단하중 평균값은 11.28kN으로 기존 현장의 요구치 (1.6t : 9.21kN)를 상회하고 파단모드는 반대쪽 너깃부가 쏙 빠지는 것과 같은 플러그파단 형태를 보이며, 건전한 용접부로 판단 할 수 있었다.

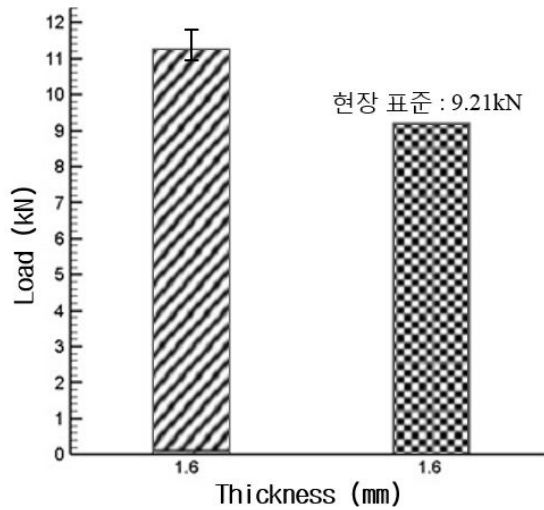


Fig. 3.5 Tensile-shear strength of spot welded joints (1.6t)

Table. 3.6 Welding conditions of resistance spot welding (1.6t)

Type	Values
Weld force(kN)	3
Squeeze time(cycle)	36
Weld current 1(kA)	7.0
Weld time 1(cycle)	15
Weld current 2(kA)	11.0
Weld time 2(cycle)	36
Holding time(cycle)	12
Upper Electrode tip diameter(Ø)	8
Lower Electrode tip diameter(Ø)	6

3.2.3 경도 분포 특성

Fig. 3.6는 앞절의 최소 압흔 조건인 동판 부착, 전극직경비(상부 8 ϕ , 하부 6 ϕ), 전류 10.0kA로 수행한 저항 점 용접 용접부의 경도를 측정된 것이다. 앞서 언급한 것과 같이 용접부의 너깃(Nugget), 열영향부(Heat Affected Zone), 모재(Base Metal)에 대하여 KS B ISO 14271 규격에 의거하여 경도를 측정 하였다.

경도 분포를 측정 결과, 너깃부 평균 경도값은 115Hv, 열영향부 90Hv, 모재 76Hv로 나타났다. 너깃부의 경도값 115Hv는 열영향부 대비 약 25Hv상승하고 모재 대비 약 39Hv 상승됨을 알 수 있었다. Fig. 3.6를 보면 알 수 있듯이, 경도값은 모재, 열영향부, 너깃 순으로 갈수록 증가하였다.

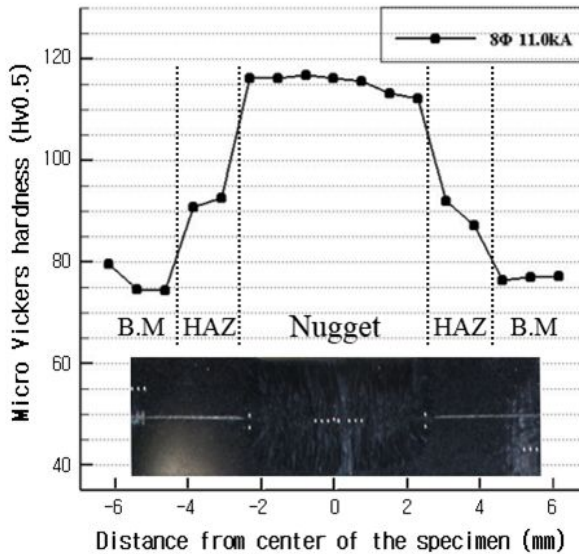


Fig. 3.6 Hardness distribution of spot welded joints (1.6t)

4장 결론

본 연구에서는 저항 점 용접부의 압흔을 저감하기 위한 방안으로 동판 부착 및 전극직경비, 용접전류 변화에 의한 압흔 저감 특성을 고찰하였다. 최적 용접조건은 압흔 깊이와 크기, 너깃의 크기 등 육안검사 외에도 기계적 특성을 평가하여 도출하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 저항 점 용접시 동판 부착에 따라 기존 압흔 대비(전극직경비 $D_2/D_1 = 1$, 상부 전극 6 \emptyset , 하부 전극 6 \emptyset) 44% 저감의 효과를 얻을 수 있었다.
- 2) 동판 부착 조건에서 전극직경비($D_2/D_1 = 1 \sim 2.7$) 변화에 따른 너깃 형성을 고찰한 결과, 전극직경비($D_2/D_1 = 1, 1.3$ 상부 전극 6 $\emptyset, 8\emptyset$ 하부 전극 6 \emptyset) 조건에서 최소너깃직경을 만족 하였으나, 전극직경비 $D_2/D_1 = 1.7$ 이상인 경우 전류밀도 저하로 인한 저항발열 감소에 의해 너깃 직경이 감소함을 확인할 수 있었다. 또한, 전극직경비 $D_2/D_1 = 1.7$ 이상인 경우 전류를 증가하여도 너깃이 형성되지 못하는데, 열의 영향만 받는 것으로 사료된다.
- 3) 압흔 형상 및 깊이를 고찰한 결과, 전극직경비 $D_2/D_1 = 1.3$ 에서 1.2t(mm) 경우 0.03mm로 기존 현장 측정치 0.07mm보다 57% 저감하였고, 1.6t(mm)는 0.04mm로 기존 현장 측정치 0.07mm보다 43% 저감 된 것을 확인할 수 있었다. 그러나 전극직경비 $D_2/D_1 = 1.7$ 이상에서는 압흔 깊이는 소폭 증가하나 볼록한 형상의 압흔으로 바뀐 것을 알 수 있었다. 이는 하부와 상부의 전극의 직경의 차이가 커지면서 하부 전극의 압력이 재료의 상부표면의 압흔형성에 영향을 준 것으로 사료된다.

- 4) 앞서 도출된 용접조건 (전극직경비 1.3, 상부 전극 8 \emptyset 하부 전극 6 \emptyset)의 인장-전단하중의 경우, 판재두께 1.2t, 1.6t 각각 기존 현장 표준값 6.17kN, 9.21kN을 상회한 6.55kN, 11.28kN을 확인할 수 있었다. 또한 파단모드는 반대쪽 너깃부가 썩 빠지는 것과 같은 플러그파단형태를 나타냈다.

- 5) 결국, 1.2t(mm)에서 전극직경비 1.3(상부 전극 8 \emptyset 하부 전극 6 \emptyset), 용접전류 10.0kA에서 가장 압흔 저감 하였고, 1.6t(mm)에서는 전극직경비 1.3(상부 전극 8 \emptyset 하부 전극 6 \emptyset), 용접전류 11.0kA에서 가장 압흔 저감을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Robert J, Messler W, Jou M. (1996). Review of control systems for resistance spot welding: past and current practices and emerging trends. *Sci Technol Weld Join* 1996;1:1-9.
- [2] Kang Zhou, Tuo Shi, Lilong Cai. (2017). Online measuring the electrical resistivity of molten nugget of stainless steel in resistance spot welding. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.28, Part1, 109-115.
- [3] 서승일, 이재근, 장상길, 차병우. (1996). 점 용접 시 압흔 깊이 감소를 위한 최적 용접 조건 선정에 관한 연구 (A Study on the Optimum Welding Conditions for Reducing the Depth of Indentation of Surface in Spot Welding). *대한용접·접합학회지*, 14(2), 57-64.
- [4] 김희현, 박정훈, 김성수, 백승세, 권일현, 양성모, 유효선. (2004). 자동차용 이중두께 점 용접물의 압흔 깊이와 인장-전단강도 특성. *대한기계학회 춘추학술대회*, 33-38.
- [5] 조도운, 조용준, 박현성, 소득영, 장인성. (2015). 저항 점 용접 압흔 최소화를 위한 양산 적용공법 개발. *대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집*, 107-107.
- [6] 용접접합편람 3편 공정 및 열가공, *대한용접접합학회*, pp78.
- [7] Hua Wang, Yansong Zhang, Guanlong Chen. (2009). Resistance spot welding processing monitoring based on electrode displacement curve using moving range chart. *Measurement*, Vol.42, 1032-1038.
- [8] S. I. Seo, S. G. Jang. 점 용접 시 압흔 깊이 감소를 위한 절연팁 개발에 관한 연구, *대한용접학회지* 제 21권 제1호, 2003.2, pp42-47.

- [9] 박지환, 김영선, 조형석, 박영제. 서보건을 이용한 저항 점 용접에서 공정변수의 품질에 대한 기여도 분석, 1998년 한국자동제어학술회의 논문집 제1권, 998.10, pp454-457.
- [10] P.S. Wei, T.H. Wu. (2012). Electrical contact resistance effect on resistance spot welding. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.55, 3316-3324.
- [11] 공종판, 강정윤. (2011). 자동차용 첨단 고강도강 전기저항점 용접의 비산(expulsion) 현상. 대한용접·접합학회지, 29(6), 26-32.
- [12] 이정현, 박은혜. (2014). 전극 형상 디자인에 따른 점 용접의 품질에 관한 연구. 한국과학예술포럼, 17, 329-329.
- [13] 방한서, 주성민. (1998). 수치 Simulation에 의한 저항 점 용접부의 역학적 거동에 관한 연구 (A study of the mechanical behavior in resistance spot welding using numerical simulation). 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, 91-95.
- [14] 임재규, 윤호철, 최기표, 서도원, 전양배. (2002). 점 용접 스파터 감소를 위한 최적 용접 조건에 관한 연구. 대한기계학회 기타 간행물, 2901-2907.
- [15] POSCO SPCC : www.posco.co.kr 포스코
- [16] 방한서, 신현, 방희선. (2000). 저항 점 용접 시 피치의 영향에 관한 연구 (A study on the Effect of pitch during resistance spot welding). 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, 327-329.
- [17] S.M. Cho. (1997). Principle of Resistance Welding and Analysis of Monitoring Results. Journal of KWS, Vol.15, No.2, pp.1~10.
- [18] Hyundai Motor Company. (1995). Electric resistance weld. pp 27-60, 99-102.
- [19] Yi Luo, Wan Rui, Xiaojian Xie, Yang Zhu. (2016). Study on the nugget growth in single-phase AC resistance spot welding based on the calculation of dynamic resistance. Journal of Materials Processing Technology, Vol.229, 492-500.

- [20] 홍민성, 김종현. (2010). 점 용접의 간격 변화에 의한 구조 강성 영향 평가 연구. 한국생산제조학회지, 19(4), 511-520.
- [21] Fengxiang Xu, Guangyong Sun, Guangyao Li, Qing Li. (2014). Failure analysis for resistance spot welding in lap-shear specimens. International Journal of Mechanical Sciences, Vol.78, 154-166.
- [22] Kwangsoo Chung, Wooram Noh, Xin Yang, Heung Nam Han, Myoung-Gyu Lee. (2017). Practical failure analysis of resistance spot welded advanced high-strength steel sheets. International Journal of Plasticity, Vol.94, 122-147.
- [23] <http://www.miyachikorea.co.kr> 미야찌 코리아 용접기술자료