



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](#)

자동차 차체 저항점용접 연속타점 수명에 미치는
이종두께 및 강판조합의 영향

본 논문을 서정철의 공학석사 학위논문으로 인준함.

Effect of Different Sheet Thicknesses and Combination
of Materials on Electrode Life of Resistance Spot
Welding for Automobile

지도교수 최 일 동

위원장 이 성 열 (인)
위 원 최 일 동 (인)
위 원 박 영 도 (인)

2014년 8월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

서 정 철

2014년 06월

한국해양대학교 대학원



- i -

목 차

List of Tables iv

List of Figures v

Abstract vii

1. 서 론 1

2. 이론적 배경

2.1 자동차 아연도금 강판 2

2.2 고강도 강판 3

2.3 저항 점용접 4

2.3.1 점용접의 공정변수 7

2.3.1.1 가압력 7

2.3.1.2 통전시간 7

2.3.1.3 통전전류 7

2.3.1.4 전극 8

2.4 연속타점 9

3. 실험방법

3.1 사용재료 및 시험장치 10

3.2 실험방법 13

3.2.1 로브곡선 13

3.2.2 Carbon imprint 13

3.2.3 Peel test 14

3.2.4 전단인장시험 16

3.2.5 전극 합금화 현상 18

3.2.6 시편 너깃 직경 관찰 18

4. 결과 및 고찰

4.1 로브 곡선 상한선 19

4.2 너깃 직경변화 21

4.3 Carbon imprint 분석 26

4.4 Peel test 결과 29

4.5 전단인장시험 31

4.6 연속타점 수에 따른 너깃 형상 변화 40

5. 결론 44

감사의 글 46

참고문헌 47

List of Tables

Table 1 Manual of spot welding equipment.

Table 2 Welding condition.

- iv -

Fig. 13 Nugget diameter changes with the continuous welding for welded samples two sheet.

Fig. 14 Severe macro-deformation or mushrooming on a truncated cone electrode Optical micrographs of electrodes tested to 1000 welds.

Fig. 15 Cross-sections of continuous spot welding.

Fig. 16 Nugget diameter changes with the continuous welding for welded samples three sheet.

Fig. 17 Changes in face diameter of the electrode tip which were welded with two sheet.

Fig. 18 Changes in face diameter of the electrode tip which were welded with three sheet.

Fig. 19 Button diameter as a function of number of welds for the two sheet used.

Fig. 20 Button diameter as a function of number of welds for the three sheet used.

Fig. 21 Tensile-shear load as a function of number of welds for the two sheet used.

Fig. 22 Tensile-shear load as a function of number of welds for the three sheet used.

Fig. 23 SEM micrograph of upper electrode of two sheet steel surface after 2000 welds.

Fig. 24 SEM micrograph of lower electrode of two sheet steel surface after 2000 welds.

Fig. 25 Typical alloying layers of electrode tip after electrode life test.

Fig. 26 SEM images of cross-section of as upper electrode of after 2000 welds.

Fig. 27 SEM images of cross-section of as lower electrode of after 2000 welds.

- vi -

List of Figures

Fig. 1 Relationship between tensile strength and elongation of various steel grades.

Fig. 2 Sequence in resistance spot welding. (b) Cross-section of a spot weld, showing the weld nugget and the indentation of the electrode on the sheet surfaces.

Fig. 3 Schedule parameters of resistance spot welding.

Fig. 4 Typical RSW electrode tip geometries.

Fig. 5 Servo gun-type spot welding system. (HX200-Hi4a)

Fig. 6 Schematic of jig system.

Fig. 7 Schematic of carbon imprint experiment.

Fig. 8 Schematic drawings of a two sheet combination of tensile Peel test sample geometries.

Fig. 9 Peel test schematic. i) the peel test sample is welded tack weld first, then test weld. ii) the ends of the sample on the test weld side are bent back and a peel force is applied. iii) the weld is pulled to failure and either interfacial failure occurs yielding no button, or weld pullout occurs yielding a peel button.

Fig. 10 Schematic drawings of a two sheet of tensile test sample geometries.

Fig. 11 Schematic drawings of a three sheet of tensile test sample geometries.

Fig. 12 Lobe curve of two sheet Combination.

- v -

Fig. 28 SEM micrograph of upper electrode of three sheet steel surface after 3000 welds

Fig. 29 SEM micrograph of upper electrode of three sheet steel surface after 3000 welds

Fig. 30 SEM images of cross-section of as upper electrode of after 3000 welds.

Fig. 31 SEM images of cross-section of as lower electrode of after 3000 welds.

Fig. 32 Macrograph of cross section for resistance spot weld two sheet combination steels.

Fig. 33 Macrograph of cross section for resistance spot weld three sheet combination steels.

- vii -

Effect of Different Sheet Thicknesses and Combination of Materials on Electrode Life of Resistance Spot Welding for Automobile

Seo, Jeong Chul

Department of Materials Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Recently, the importance of reducing the weight and increase the stability of the car body is very high in the automotive industry. To complement this, the application of High Strength Steels has also increased significantly. In order to achieve abrasion resistance and corrosion resistance, the surface of the high strength steel sheet is being increasingly subjected to surface treatment like Galvanization.

The resistance spot welding is applied to process most car. The melting of coating layer and alloying elements in High -Strength Galvanized steel sheets reduce the weldability of the material.

The importance of continuous dotting life evaluation increases as it is considered to be an important parameter affecting the weld quality during the manufacturing process throughout the lifetime of electrode. Though Previous studies have been reported using inverter DC air gun welder; however no prior study exists on the Evaluation of continuous dot life of electrode in resistance spot welding for heterogeneous sheet combination using inverter DC servo-gun welder.

Therefore, In this work, a cooperative study is performed, in order to correlate the electrode and nugget shape change due to electrode wear over the lifetime of electrode; for different material combination as well as for different sheet thickness.

KEY WORDS: spot welding, SEM-EDS, electrode life test, galvanized steel, inverter DC welder, Servo-gun

- viii -



- ix -

제 1 장 서론

최근까지도 자동차 차체의 안정성과 경량화 등의 중요성은 자동차 시장에서 그 중요도가 매우 높다. 이를 보완하고 개선하기 위해 고강도 강판의 적용이 증가하고 있으며, 또한 내식성과 내마모성 등의 향상을 위해 고강도 강판표면에 표면처리를 실시한 아연 도금강판의 사용이 증가하고 있는 추세이다.

대부분의 자동차 공정에 적용되는 저항 점용접에서는 고강도 강판의 합금 원소와 높은 강도 그리고 아연도금강판의 도금층 등이 용접성을 저하시키는 원인이 된다. 특히 아연 도금강판에서 저항 점용접은 도금층의 영향으로 인해 일반 냉연강판보다 발열량이 부족하므로 높은 전류조건 사용이 일반적이다. 이러한 높은 용접 전류, 도금층으로 인한 전극의 열화 그리고 도금층 표면과 전극의 합금화는 저항 점용접에서 Cu-Cr 전극의 수명을 단축시키는 원인으로 작용한다. [1-7]

전극의 수명은 생산 공정 중 용접 품질에 영향을 미치는 중요한 파라미터로 여겨지며 이와 함께 연속타점 수명평가의 중요성이 대두되고 있다. 인버터 DC 용접기를 이용한 고강도 강판의 저항 점용접성 평가에 대한 연구는 다수 이루어져 왔으나 서보건(Servo-gun) 용접기를 사용한 아연도금강판과 고강도 강판의 이종 강판 조합 연속타점 수명 측면에서의 보고는 거의 전무하다.

연속타점 시 지속적인 가압과 합금화, 그리고 전극의 열화 현상에 따라 전극 팁 직경이 증가하여 전류밀도 감소의 영향이 있는 것으로 여러 문헌에 보고된 바 있다. [8-9]

따라서 본 연구에서는 아연도금 이종두께 조합 및 고강도강판 조합과의 연속타점 수명 평가를 통해 타점 수에 따른 용접부 품질 변화를 고찰하고 너깃 형상과 전극 마모의 상관관계 연구를 목적으로 하였다.

- 1 -

제 2 장 이론적 배경

2.1 자동차 아연도금 강판

도금 강판이란 내식성, 부식성과 같은 특성을 향상시키고 기능성을 부여하기 위해 표면에 금속 또는 비금속을 피복시킨 강판을 일컫는다. 그 중 강판의 표면에 아연(Zn)을 도금하는 아연도금 강판은 가장 대표적인 강판으로 널리 사용되고 있다. 현재 아연도금 강판은 전 세계적으로 연간 1억 3,000만 톤이 생산되고 있으며 자동차, 가전, 건축용으로 약 150조 원 규모의 시장이 형성되어 있다. 장점으로는 우수한 내부식성을 들 수 있다. 도금체인 아연이 모체인 철보다 큰 이온화 경향을 갖기 때문에 희생양극(sacrificial anode)을 통한 우수한 내부식성을 부여하며, 금속 중에서도 상대적으로 낮은 419.6 °C의 용점을 가지므로 가공성이 좋고 뛰어난 경제성을 갖는다. 또한 아연도금 시 철과의 합금화가 용이하며, 이러한 특성을 이용하여 용접성과 페인트 부착성 등이 우수한 것으로 알려져 있는 아연-철 합금 도금으로의 응용 또한 가능하다.

아연도금은 용융된 아연 중에 강판을 직접 침적시켜 도금층을 형성하게 되며 전기아연도금은 전해법을 응용하여 도금층을 형성한다. 특히, 전기아연도금의 경우 도금층이 미려하고 광택이 뛰어나 용융아연도금을 대체 가능한 것으로 예상되었으나, 설비투자비용이 크고 에너지 효율이 낮아 상대적으로 경제성이 떨어지며, 용융아연도금의 기술 발달 및 품질 향상으로 인해 최근에는 80% 이상의 아연도금 강판이 용융아연도금을 통해 생산되고 있다. [10]

- 2 -

2.2 고강도 강판

자동차 차체에는 일반강에서 AHSS(Advanced High Strength Steel)까지 다양한 강종들이 적용되고 있으며, 경량화를 위해 더욱 선진화된 AHSS 강종을 적용하기 위해 철강업체들의 연구개발이 가속화되고 있다. Fig. 1에 자동차용 강종개발 경향을 알아보기 쉽게 인장강도-연신율 balance를 해당 강종과 함께 나타내었다. 강도가 낮은 경우에는 보통 연신율이 높으며, 강도가 증가함에 따라 연신율이 감소하는 경향을 보이는데, 이러한 강도와 연신율이 바나나 모양의 형태로 나타나므로 이러한 그림을 Banana-Diagram으로 부른다. 일반 AHSS에는 DP(Dual Phase)강과 TRIP(Transformation Induced Plasticity)강, CP(Complex Phase)강이 현재 상용화되어 있다 [11]

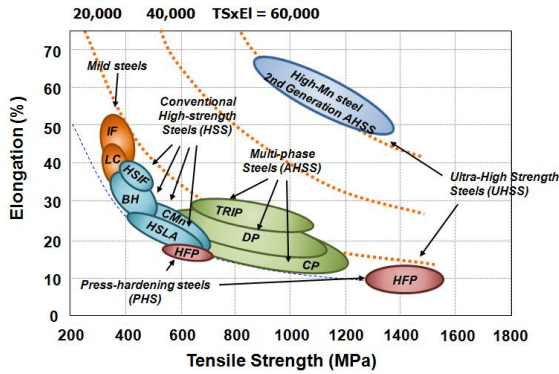


Fig. 1 Relationship between tensile strength and elongation of various steel grades.

- 3 -

2.3 저항 점용접

저항 점용접은 겹치기 저항용접의 대표적인 것으로 2개 혹은 그 이상의 금속 강판을 전극사이에 넣고 전류를 통하면 접촉부의 접촉저항에 의해 발열이 발생되고 그로 인해 용접부의 온도가 급격히 상승하여 금속강판은 녹기 시작한다. 이때 압력을 가하면 접촉부는 변형되어 접촉저항이 감소되나, 이미 상승된 온도로 금속제 자체의 고유저항은 더욱 증가하고 온도가 상승되어 반응용 상태에 달한다. 이와 동시에 상하 전극으로 압력을 가하여 밀착시킨 다음 전극을 용접부에서 떼면 전류의 흐름이 정지되어 용접이 완료된다. [12]

$$Q = I^2RT \text{ (J)} = 0.24 I^2RT \text{ (cal)}$$

여기서 Q는 발열량, I는 전류, R은 저항 및 T는 통전시간을 의미한다 (1J=0.24cal). 위의 식에서 저항(R)은 용접재료, 전극 및 용접장치 등을 포함한 저항을 의미하며, 도체의 비저항(ρ), 길이(L), 단면적(A)에 의해 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = I^2 \left(\frac{\rho L}{A} \right) T$$

위의 식에서 발열량(Q)는 전류의 제곱에 비례하고, 통전시간에 비례한다. 그러나 저항(R)의 경우 도체 비저항(ρ) 및 길이(L)에 비례하는 반면, 단면적(A)에 반비례하는 관계를 가진다. 따라서 전류가 흐르는 단면적이 커질수록 전류효율은 감소되고 동일한 전류로 용접할 경우, 단면적이 적을수록 전류밀도가 증가되는 효과를 볼 수 있다. [12]

- 4 -

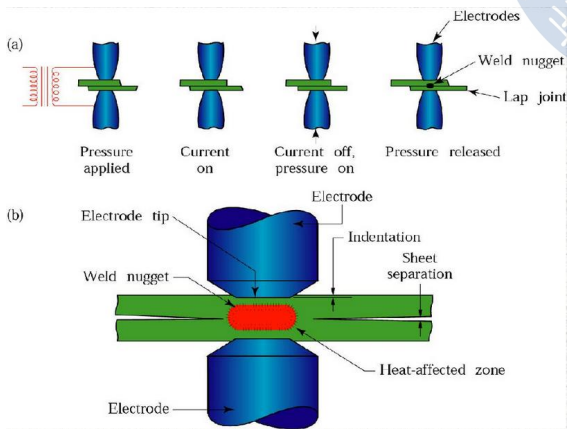


Fig. 2 (a) Sequence in resistance spot welding. (b) Cross-section of a spot weld, showing the weld nugget and the indentation of the electrode on the sheet surfaces. [13]

- 5 -

2.3.1 점용접의 공정변수

저항 점용접의 과정은 초기 가압시간(squeeze time), 통전시간(weld time), 유지시간(hold time)으로 분류된다. 각 공정변수는 점용접이 진행되는 동안 상호 연계적으로 작용하며 이에 대한 모식도를 Fig. 3에 나타내었다.

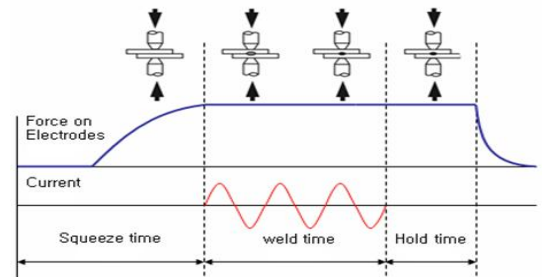


Fig. 3 Schedule parameters of resistance spot welding.

- 6 -

2.3.1.1 가압력

강판에 주어지는 적절한 전극의 가압력은 통전 시 형성되는 너깃이 일정한 형태로 유지시킬 수 있도록 도와준다. 또한 비교적 높은 전류조건에서 강판 사이로 중간날림(expulsion)이 발생하는 것을 방지하며 강판과 강판 사이에서 접착적인 발열이 일어날 수 있도록 전극과 강판의 용착을 방지하는 역할을 한다. 또한 가압력이 작으면 접촉저항이 증가하여 발열이 많아지므로 중간날림이 발생할 수 있으며, 반면 가압력이 너무 크면 접촉 면적이 증가하여 통전 시 전류 밀도가 증가하게 되므로, 결국 저항 발열을 감소시켜 적절한 너깃을 형성하지 못하게 된다. [14.15] 또한 접촉저항이 작아 발열이 부족하게 되어 강도가 떨어지게 되고 앞흔이 깊어진다.

2.3.1.2 통전시간 (weld time)

용접전류가 흐르는 시간을 말한다. 이 때 강판과 강판사이에 용융이 일어난다. 통전시간이 짧으면 용접부 발열이 부족하여 용접강도의 저하가 나타나고, 통전시간이 너무 길면 발열이 과다하여 중간날림이 발생하거나 용착이 발생한다. 점용접에 사용하는 강판의 종류와 두께에 따라 적용되는 통전시간에 편차가 있으며 일반적으로 8 ~ 30 cycle 이내의 구간이 적용된다.

2.3.1.3 용접전류 (Weld Current)

용접전류는 용접시간과 더불어 용접부의 입열량에 직접적인 영향을 미치는 인자로 점용접의 저항발열에 주요인자로 작용한다. 용접전류는 전기가 흐르는 양의 크기이며, 발열의 주요소로 전류가 부족하면 전류밀도가 낮아 발열량이 부족해진다. 그 결과 용접부에서 계면파단이 발생한다. 반면 과다한 용접전류가 주어질 경우 전류밀도는 증가하며 이에 따라 발열량이 과다하여 중간날림 발생의 주요원인이 된다.[16]

2.3.1.4 전극 (Weld Current)

전극은 용접전력을 모체에 전달하는 역할을 하기 때문에 점용접과 같은 저항 용접에서 전극의 재질과 형상은 매우 중요하다. 용접과정에서 전극 표면의 전류밀도는 500 A/mm²까지 상승하는 것으로 알려져 있어서 양호한 전기전도도와 함께 고온 강도 또한 전극이 가져야 할 특성의 하나이다. 점용접에서 전극은 용접부에 큰 압력을 가하여 안정적인 용접이 이루어지게 하고, 용접이 완료된 다음에는 용접부를 냉각시켜 결합이 없는 너깃을 형성시킨다. 전극의 형상은 선단의 모양에 따라 구분할 수 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 선단부의 형상에 따른 전극 형상을 보여주고 있다. 저항 점용접에서 주로 사용되는 전극은 TYPE, B-DOME 형 Cu-Cr계의 재질을 가진 것을 일반적으로 사용하고 있다. 그리고 전극 팁 직경이 작아지게 되면 전류밀도가 높아지므로 발열량이 많아지므로 중간날림이 발생하며, 용접강도가 낮아진다. 반면 전극 팁 직경이 크게 되면 전류밀도가 작게 되어 너깃이 작아진다. [17]

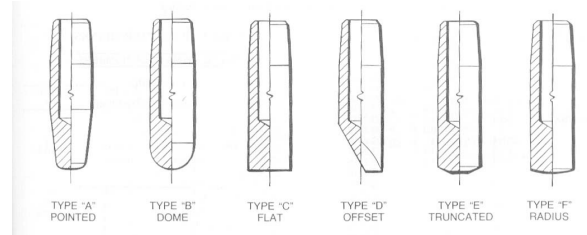


Fig. 4 Typical RSW electrode tip geometries



2.4 연속타점

점용접에서 중요시되는 또 하나의 문제는 연속 용접성이다. 동일한 용접조건으로 계속하여 용접을 하여도 용접부 특성이 변화하지 않고 일정한 품질을 유지하도록 하는 것은 용접 생산성 측면에서 매우 중요한 일이다. 일반적으로 점용접을 연속적으로 할 경우 용접전류와 전극 가압력에 의하여 전극선단부가 마모 또는 변형되어 전극과 판의 접촉 면적이 증가하거나 불균일하게 된다. 그 결과 너깃 형성에 필요한 전류밀도가 감소하거나 불균일하게 되어 요구하는 수준의 용접부 품질을 얻기 어려워진다. 이와 같이 연속용접을 할 때 조정의 너깃 직경이 얻어지기 어려운 용접의 점수를 연속타점 수명이라고 부르며 공정관리 기준의 하나로 관리되고 있는 항목이다. 연속타점 수명에 영향을 주는 인자로는 용접전류, 용접시간, 가압력 외에도 용접과 휴지시간의 반복 방법, 전극의 형상 및 재질, 용접된 소재의 혼합조건, 냉각수의 유량 및 용접기 특성 등이다. 이러한 이유 때문에 알려진 연속타점 수명 값만으로 연속타점 특성을 직접 비교하는 것이 곤란한 경우가 있으며 반드시 실험조건들을 먼저 확인해야 한다. [18]

제 3 장 실험 방법

3.1 사용재료 및 시험장치

본 실험에 사용된 강판은 약 340MPa급의 인장강도를 만족하고 1.4 mm의 두께를 가지는 SGARC 용융아연도금강판과 약 270MPa급의 인장강도를 만족하는 SGACUD 0.7 mm 두께의 연강판을 사용하였다. 이와 함께 강판 조합에 따른 연속타점 수명 평가 영향을 추가로 관찰하기 위해 3겹 이중 강판 조합 실험에서 SABC 1470MPa급 1.4 mm 두께의 핫 스탬핑(hot-stamping) 강판을 사용하였다.

Fig. 5의 그림과 같이 용접기는 서보건(Servo-gun) 용접기를 사용하였으며 용접기 사양은 Table. 1에 나타내었다. 냉각수의 공급량은 9.5 l/min로 일정하게 공급해 주었으며 전극은 전극 선단 직경 6 mm인 일반 Cu-Cr전극을 사용하였다. 본 실험은 계획한 점용접 타점 수까지의 일관성 있는 작업이 매우 중요하므로 Fig. 6과 같이 jig를 설치하여 강판을 고정된 뒤 서보건 용접기를 이용하여 점용접 하였다. jig에 고정된 강판의 우측 상부부터 아래로 5타점씩 점용접하여 좌측으로 서보건이 이동하게 되며 이와 같은 반복 작업으로 한 강판조합에 100타점씩 점용접 하게 된다. 또한 전극의 과도한 피로를 고려하여 5타점마다 3초, 25타점마다 10초씩 휴지시간을 각각 설정하였다.



Fig. 5 Servo gun-type spot welding system. (HX200-Hi4a)

Sheet Combination	Electrode			Welding Current (Imax) (kA)	Up. Slope Time (cycle)	Weld Time (cycle)	Gun type
	Tip diameter (mm)	Force (kgf)	Cooling (ℓ/min)				
2 겹 이중 강판 조합	6	245	9.5	8	3	12	Servo
3 겹 이중 강판 조합		300					

Table. 1 Manual of spot welding equipment.

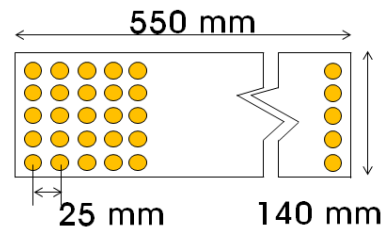
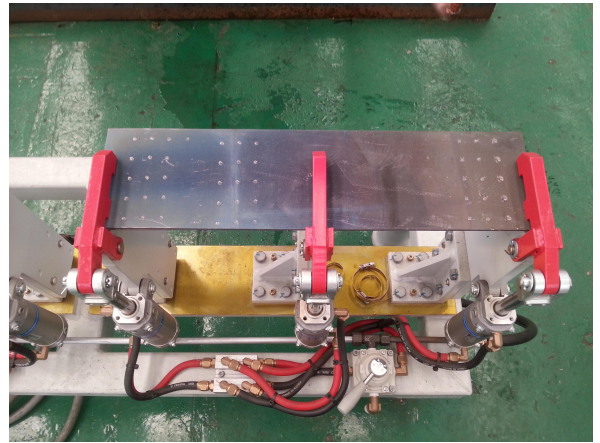


Fig. 6 Schematic of jig system.

3.2 실험 방법

3.2.1 로브곡선

적절한 용접조건을 설정하기 위해 강판 조합에 따른 가압력인 245 kgf와 300 kgf를 각각 적용하였다. 자동차 차체용 강재로써 강판 두께가 1.2 mm 이상의 두꺼운 강판이라면 높은 가압력으로 인해 강판과 강판 사이의 간극을 좁혀주지 않으면 전극 직하에서 전류가 집중되지 않기 때문에 위와 같은 가압력을 고정하였다. 용접시간은 2 cy 단위로, 전류는 200 A 단위로 증가시켜 로브곡선 상한선을 도출하였다. 하한곡선은 최소너깃 버튼 직경인 $d=4/t$ 를 만족하지 않고 계면파단이 일어나는 구간으로 설정 하였고 상한곡선은 중간날림이 발생하는 구간으로 설정 하였다. 중간날림의 판단기준은 용접 시, 강판 사이에서 날림 흔적이 관찰 되었을 때 중간날림으로 판단하였다.

3.2.2 Carbon imprint

점용접 시, 이중 강판 조합의 아래 부분에 위치하는 SGACUD 0.7 mm 두께 강판 사이와 하부 전극 사이에 먹지(Carbon imprint)와 백색 종이를 삽입하였다. 용접진이 상하로 움직이며 전극으로 강판을 가압할 때, 가압된 전극 선단 팁의 면적을 먹지를 통해 백색 종이에 찍혀 측정할 수 있도록 하였다. 이러한 결과를 통해 점용접 타수에 따른 전극 팁 직경 변화를 알 수 있다. 그 모식도를 Fig. 7에 나타내었다.

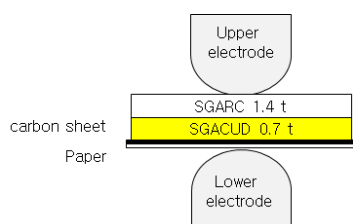


Fig. 7 Schematic of carbon imprint experiment.

3.2.3 Peel test

용접된 강판 사이를 강제로 분리 과단 시켜서 용착상태의 양부를 판정하는 시험을 말한다. 전용 바이스에 한 쪽을 고정시켜 놓고 다른 한쪽을 잡아 당겨 용접부를 분리시켜서 용착 상태를 조사하였다. 너깃 직경은 ISO 1420 규격에 맞춰 좌우상하를 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정, 그 결과를 평균하였다. 시험하기 위한 시편의 치수를 Fig. 8에 나타내었다.

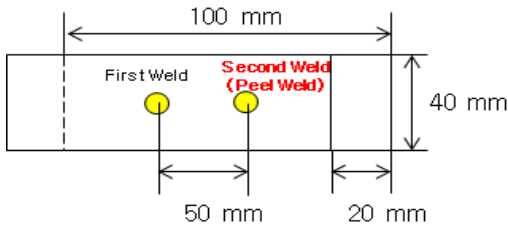


Fig. 8 Schematic drawings of a two sheet of tensile peel test sample geometries.

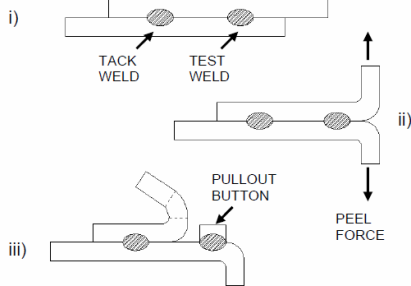


Fig. 9 Peel test schematic. i) the peel test sample is welded tack weld first, then test weld. ii) the ends of the sample on the test weld side are bent back and a peel force is applied. iii) the weld is pulled to failure and either interfacial failure occurs yielding no button, or weld pullout occurs yielding a peel button.



3.2.4 전단인장시험

전단인장시험(Tensile shear strength test)은 Fig. 10과 같이 KS규격의 저항 접용접 전단인장 시편으로 100 mm * 40 mm 의 시험편을 제작하였다. 강판의 두께가 5.0 mm 이하인 금속 재료에 대하여 적용되며 KS B 0851의 접용접 이음의 인장 전단 시험 방법에 규정되어 있다. 시험은 KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 시행하며, 결과값은 2회 측정 후, 평균하였다. 인장속도는 10 mm/min 로 측정하였으며, peak load(kgf)를 전단인장강도로 표기하였다.

3겹 이종 강판 조합의 경우, Fig. 11과 같이 SGARC 340MPa급 1.4 mm 강판과 SGACUD 0.7 mm 강판 사이에 SABC 1470MPa급 1.4 mm 강판을 삽입하여 접용접하였다. 삽입되는 SABC 1470MPa급 1.4 mm 강판의 치수는 가로 세로 40 mm * 40 mm 이었으며, 2겹 이종 강판 조합과 동일하게 결과값은 2회 측정 후, 평균하였다. 인장속도는 10 mm/min 로 측정하였으며, peak load(kgf)를 전단인장강도로 표기하였다.

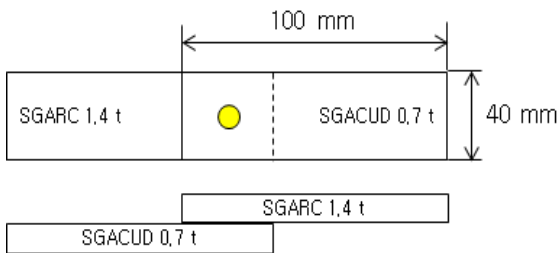


Fig. 10 Schematic drawings of a two sheet of tensile test sample geometries.

3.2.5 전극 합금화 현상

최종타점 후의 아연도금강판의 표면 도금층과 전극과의 합금화 현상을 관찰하기 위해 사용된 Cu-Cr 상부, 하부 전극을 각각 채취하였다. 채취한 Cu-Cr 전극은 연마 절단기를 사용하여 단면을 관찰할 수 있도록 절단하였으며, 절단된 단면을 SiC paper를 이용하여 연마하였다. 부식액(ethanol 95 % 100-120 ml + Hydrochloric acid 1.19 20-50 ml + Iron(III)chloride 5-10 g)을 이용하였으며, 부식된 시편은 SEM-EDS 촬영을 통해 합금화 층의 성분을 관찰하였다.

3.2.6 시편 너깃 직경 관찰

용접 품질을 결정하는 너깃 직경은 전극의 형상에 의해 변화하기도 한다. 전류밀도에 따른 발열량과 직접적인 영향이 있기 때문에 이러한 현상을 관찰하기 위해 500 타점마다의 너깃 형상을 관찰하였다. 1타점부터 500 타점마다의 시편을 절단하여 단면을 SiC paper를 이용하여 연마하였다. 부식액은 3 % nital 용액을 이용하여 사용하였으며, 광학 현미경을 이용하여 너깃의 형상을 관찰하였다.

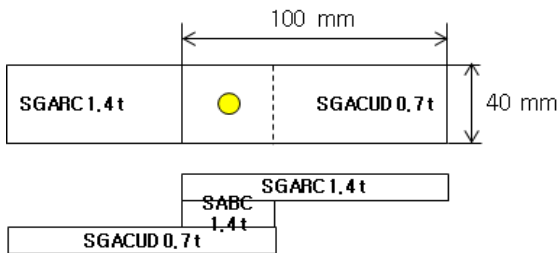


Fig. 11 Schematic drawings of a three sheet of tensile test sample geometries.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 로브 곡선 상한선

Fig. 12는 본 연구에 사용된 2겹 강판 조합 SGARC 340MPa급 1.4 mm 두께 강판과 SGACUD 0.7 mm 강판에 Cu-Cr 전극을 사용한 로브곡선 상한선의 결과이다. 연속타점 수명 평가를 위한 기준은 AWS D 8.9 규격을 적용하여 200 A 낮은 조건으로 실시해야 하기 때문에 로브 곡선 상한선을 필요로 한다. 결과는 전극의 합금원소에 따라 전기 전도도, 연화 온도, 경도가 각각 다르며, 사용되는 강판에 따라 표면저항 및 모재저항 값이 다르기 때문에 로브곡선에 영향을 미친다.

SABC 1470MPa급 1.4 mm 두께 강판을 삽입한 3겹 이중 강판 조합은 AWS D 8.9 규격을 적용하지 않고 중간날림이 발생하는 조건을 적용하였다. 전류는 2겹 이중 강판 조합과 동일하게 8 kA를 적용하였으며, 가압력은 강판 조합에 의한 두께 증가로 인해 2겹 강판 조합 대비 55 kgf 가 더 높은 300 kgf 로 적용하였다.

동일한 용접조건에서 용접시간이 증가할수록 발열량이 증가하여 중간날림 발생의 원인이 되므로 용접시간이 증가할수록 용접전류가 감소하게 된다.

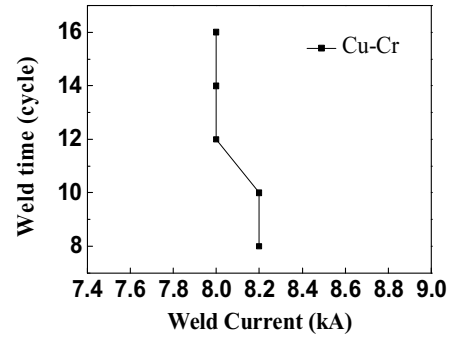


Fig. 12 Lobe curve of two sheet Combination.

4.2 너깃 직경 변화

SGARC 340MPa급 1.4 mm, SGACUD 0.7 mm 와 같은 2겹 이중 강판 조합에서의 연속 타점 시, 연속 점용접 타수에 따라 너깃 직경이 변화하였다. 초기 1 타점에서 너깃 직경은 5.3 mm이었으며 이는 최소너깃 직경인 $4\sqrt{t}$ 를 만족하는 길이이다. 연속타점 수가 증가함에 따라 너깃 직경은 점차 줄어들었으며, 최종 타점까지 500타점마다의 결과를 Fig 12에 나타내었다.

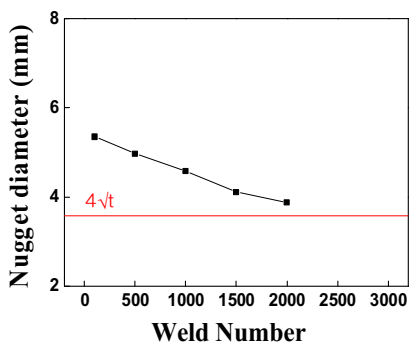


Fig. 13 Nugget diameter changes with the continuous welding for welded samples two sheet.

최종타점인 2000타점에서 초기 너깃 직경보다 1.42 mm 줄어든 3.88 mm의 너깃 직경이 관찰되었다. 너깃 직경 변화에 따른 이러한 수치 변화는 2000타점 후 초기 너깃 직경 대비 27 % 가 감소한 결과이다. 또한 2000타점에서의 너깃 직경 3.88 mm는 최소너깃 직경인 3.34 mm 만족하는 결과이다.

연속타점 시, 전극 팁 선단 직경 변화는 강판에 용접선의 지속적인 가압과 함께 강판 표면층의 아연도금 층과 Cu-Cr 전극 표면층과의 합금화에 의한 영향이 크다. 이러한 요인으로 인하여 전극 팁 직경은 점차 연속타점에 의해 변화하며, 이러한 현상을 Mushrooming 현상이라고 일컫는다. mushrooming 현상은 마치 전극 팁 부분이 버섯모양과 비슷하다 하여 지어진 이름으로 Fig. 14와 같은 모습을 하고 있다. [19]



Fig. 14 Severe macro-deformation or mushrooming on a truncated cone electrode optical micrographs of electrodes tested to 1000 welds. [16]

연속타점이 진행 될 때마다 전극 팁 직경이 증가하는 mushrooming 현상에 의해 전류밀도는 낮아지게 된다. 전류밀도의 감소는 다음 식에 의해 증명된다.

$$Q = I^2 \left(\frac{\rho L}{A} \right) T$$

발열량(Q)은 전류의 제곱에 비례하고, 통전시간(T)에 비례한다. 위 실험에서 통전시간(T)은 15 cy 로 고정하였으므로 전류값(I²)과 저항값($\frac{\rho L}{A}$)만이 발열량(Q)에 영향을 미치게 된다. 저항($\frac{\rho L}{A}$)의 경우 도체 비저항(ρ) 및 길이(L)에 비례하는 반면, 단면적(A)에 반비례하는 관계를 가진다. 따라서 연속타점에 의한 전

극 팁 직경 증가로 인해 전류가 흐르는 단면적이 커질수록 전류효율이 감소되기 때문에 동일한 전류로 용접할 경우 발열량(Q)이 줄어들게 된다. [12] 위와 같은 식에 의해 전극 팁 직경이 증가하게 되면 발열량이 감소하게 되며 연속 타점 시 너깃 직경이 줄어들게 된다.

SABC 1470MPa급 1.4 mm 강판을 SGARC 340MPa급 1.4 mm 강판과 SGACUD 0.7 mm 강판 중간에 삽입한 3겹 이중 강판 조합의 경우에

는 중간날림이 지속적으로 발생하였기 때문에 전극 팁 직경이 증가하는 영향 외에 중간날림으로 인한 변수가 발열량(Q)에 영향을 미치게 된다. 중간날림을 억제하지 않는 이상, 강판과 강판사이에서 비산하는 용융물의 양이 달라지기 때문에, 따라서 3겹 이중 강판 조합에서의 경우 중간날림의 발생에 의해 동일 조건 제 실험에서 너깃 직경 차이가 있을 수 있다.

본 실험에서의 경우, 3겹 이중 강판 조합 조건은 중간날림이 육안으로 약 900타점까지 관찰되었다. 이를 좀 더 명확하게 규명하기 위해 3겹 이중 강판의 단면을 절단하여 너깃 형상을 관찰하였다.

일반적으로 용해한 용융금속(molten metal)이 전극의 가압보다 발열에 의해 팽창하는 힘이 더 크면 중간날림이 발생하고 이 때, 용융 금속으로부터 일부가 비산되어진 채 용융금속은 응고가 된다. 이와 같이 용접금속의 내부에 생기는 공동을 Porosity라고 일컫는다. 따라서 너깃에 porosity가 관찰되는 타점까지를 중간날림이 발생하는 구간으로 판단하였다. 이러한 결과는 Fig. 15 와 같다.

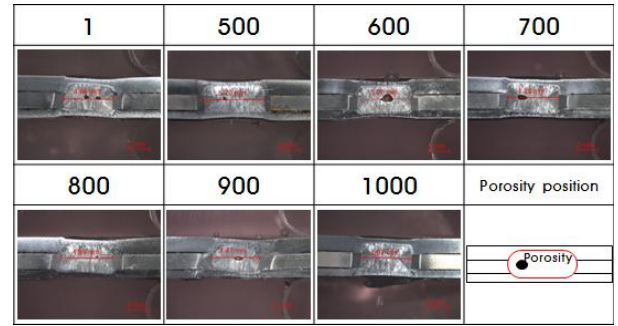


Fig. 15 Cross-sections of continuous spot welding.

Fig. 15에 보이는 바와 같이 너깃의 단면을 관찰하였을 때, 주로 900타점까지 상부 강판인 SGARC 340MPa급 1.4 mm 강판과 중간에 삽입된 SABC 1470급 1.4 mm 강판 사이에서 공동이 관찰되었으며 1000타점 이후부터 중간날림에 의한 공동이 관찰되지 않았다.

중간날림에 의한 현상은 연속타점 수에 따른 너깃 직경의 변화에도 영향을 미친다. 아래 Fig. 16는 3겹 이중 강판 조합에서의 너깃 직경 변화를 나타낸 것이다.

500타점 이후부터 1000타점까지 100타점마다의 너깃 직경을 추가 분석하였으며 중간날림이 발생한 1타점부터 900타점까지는 비산되는 용융금속의 영향으로 인해 너깃의 직경이 타점마다 다른 경향이 관찰되었다.

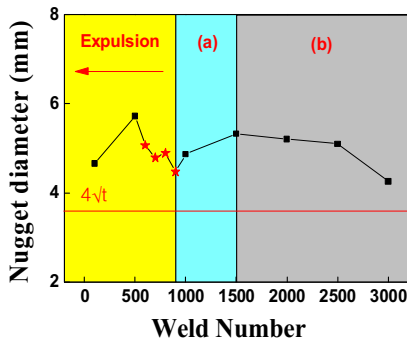
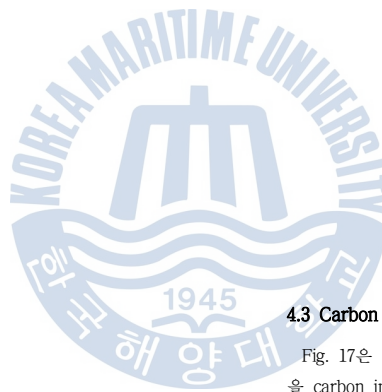


Fig. 16 Nugget diameter changes with the continuous welding for welded samples three sheet.

중간날림이 발생하지 않은 1000타점과 1500타점에서의 일시적인 너깃 직경 증가는 전극 팁 탈착에 의한 현상으로 사료된다. mushrooming 현상에 따라 외곽 쪽으로 점차 밀려나던 전극 팁이 탈착되어 순간적으로 전류밀도가 증가하고 발열량(Q)이 증가하게 된다.

이러한 현상은 1500타점 이후 전극 팁 직경이 점차 다시 증가하게 됨에 따라 너깃 직경이 감소하였다. 본 실험에 적용된 3겹 이중 강판 용접조건으로는 연속 3000타점까지에서도 최소 너깃 직경인 3.34 mm를 만족하는 4.26 mm 의 너깃 직경을 관찰할 수 있었다.



4.3 Carbon imprint 분석

Fig. 17은 연속타점 수에 따른 전극 팁 직경 변화를 관찰하기 위해 하부 전극을 carbon imprint 측정법을 이용하여 관찰한 결과이다. carbon imprint 측정은 전극 팁 증가의 경향성을 파악하기 위한 가장 일반적인 실험이며, 이중두께 및 강판 조합에 따라 초기 1타점의 carbon imprint 측정 결과가 달라질 수 있다. 2겹 이중 강판 조합의 실험에서 1타점 5.21 mm 이었던 carbon imprint 직경이 연속 2000타점에서 6.68 mm로 1.47 mm 증가하였다. 이는 초기 직경 대비 28%의 성장률을 나타낸다. 이처럼 전극 팁 직경이 명확하게 증가함에 따라 전류 밀도 감소에 따른 너깃 직경의 감소가 관찰되었으며, 타점마다 미세하게 증가와 감소를 반복하였으나 2000타점까지 꾸준히 증가하는 경향이 관찰되었다.

일반적으로 용접 타점 수에 따라 전극 팁 성장은 초반의 급격한 성장이 이루어지는 primary 구간과 성장 속도가 점차 감소하는 secondary 구간 그리고 급격한 성장이 발생하는 ternary 구간으로 나눌 수 있다. 본 실험의 연속타점 수명 평가에서는 용접부의 파단시험을 통해 최소버튼직경 이하의 조건에서 실험을 중단하므로 실질적으로 ternary의 구간은 관찰되지 않는다. 일반적으로 primary구간은 총 전극 성장크기의 약 50% 수준에서 나타나고 연속타점 수명의 한계는 secondary 구간에서 발생하는 것으로 알려져 있다. [20]

2겹 이중 강판 조합에서 primary 구간과 secondary 구간이 명확하지 않은 것은 전극의 성장이 1타점부터 최종타점까지 지속적으로 이루어지고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 연속타점 수명을 포함하여 전단인장강도 및 button diameter의 측정 결과와도 관계되어 있다.

Fig. 18은 3겹 이중 강판 조합의 carbon imprint 결과를 나타내었다. 3겹 이중 강판 조합의 경우 중간날림이 발생한 초기타점부터 900 타점 부근까지의 primary 구간이 명확하게 나타난다. 이는 2겹 이중 강판 조합에서와 달리 중간날림이 발생하는 용접조건에서 강판과 전극 사이에 비교적 표면저항이 높아 합금화에 따른 전극의 마모에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 또한 과도한 발열량을 야기하는 용접조건인 경우 강판의 열이 전극까지 옮겨가며 전극의 합금화나 온도 상승에 따른 경도의 저하를 야기한다.

초기 1타점에서 4.8 mm 의 직경을 가진 carbon imprint가 점용접 3000 타점에서 2.0 mm 증가한 6.8 mm 의 직경이 관찰된다. 이는 초기 직경 대비 42 % 의 높은 성장률을 나타내며, 2000 타점에서도 이미 2접 이중 강판 조합과 달리 14 % 더 높은 초기 직경 대비 40 % 의 높은 전극 팁 성장률을 나타냈다.

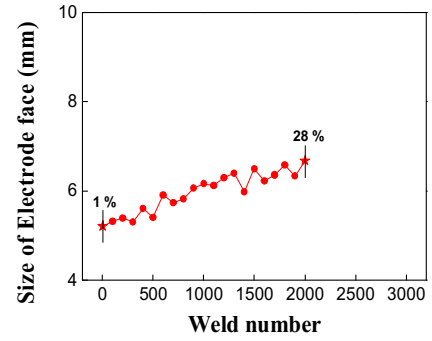


Fig. 17 Changes in face diameter of the electrode tip which were welded with two sheet

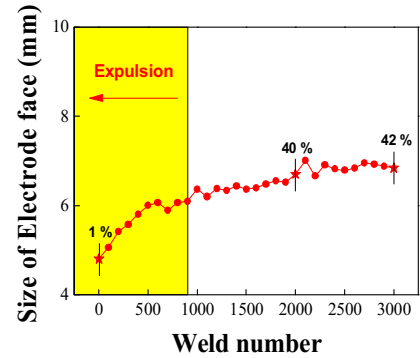


Fig. 18 Changes in face diameter of the electrode tip which were welded with three sheet



4.4 Peel test 결과

Fig. 19는 2접 이중 강판 조합에서 100타점마다의 peel test 결과를 나타내었다. Carbon imprint 측정법에 의해 연속 점용접 타수가 증가할수록 전극 선단 직경이 커지는 것이 관찰되었으므로, 전류밀도 감소에 의한 발열량 감소로 인해 button diameter 역시 점용접 타수가 증가할수록 작아질 것으로 예상할 수 있었다. 연속 900타점까지 button diameter가 꾸준히 감소하다, mushrooming 현상에 의해 전극 팁이 성장과 소실을 반복하면서 너جت 직경에 영향을 미친다. 이로 인해 전류밀도의 변화가 생겨 button diameter가 잦은 증가와 감소 경향이 관찰된다.

Fig. 20은 3접 이중 강판 조합에서 100타점마다의 peel test 결과를 나타내었다. 3접 이중 강판 조합의 경우, 앞선 실험인 너جت 형상 관찰 결과에서 900타점까지 중심부에 porosity가 관찰되었다. porosity는 용접부의 결합력을 약하게 하여 계면파단(Interfacial fracture)이 잘 일어나게 하는 원인이 되기 때문에, 3접 이중 강판 조합의 경우 peel test 결과가 최소 너جت 직경인 3.34 mm 이상을 만족할 수 없을 것으로 예상하였다. 하지만 button diameter는 중간날림에 의해 용융금속이 너جت 밖으로 빠져나감에 따라 직경에 차이만 있을 뿐 3000타점까지 최소 너جت 직경인 3.34 mm 이상의 button diameter가 관찰되었다.

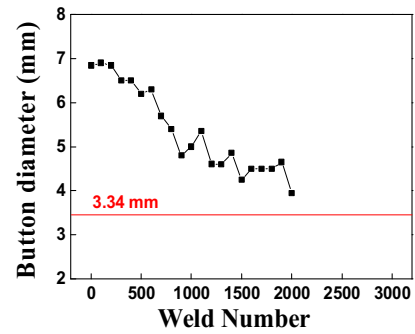


Fig. 19 Button diameter as a function of number of welds for the two sheet used.

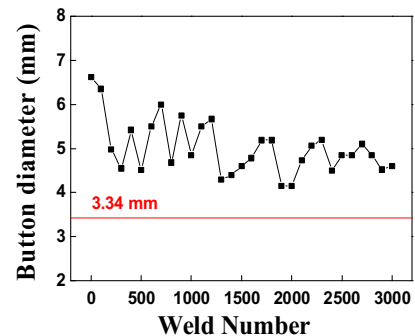


Fig. 20 Button diameter as a function of number of welds for the three sheet used.

4.5 전단인장시험

Fig. 21에 2겹 이종 강판 조합 연속 2000 타점까지의 전단인장시험 결과를 나타내었다. 연속 점용접 타점 수에 따라 너짓 직경이 감소하는 결과가 있으므로 전단인장강도 또한 너짓 직경 감소에 따라 점용접 타수가 증가하면 유사한 거동을 나타낼 것이라고 예상되었다. Fig. 19에 나타난 button diameter 감소와는 달리 연속타점 수 증가에 따른 전단인장강도의 급격한 감소는 관찰되지 않았으나 꾸준한 감소가 관찰되었다. 2000 타점까지의 모든 용접타수에서 SGACUD 0.7 mm 기준 허용인장강도인 1.67 kN을 만족하였다. 900 타점에서 순간적으로 3.35 kN까지 감소된 인장강도를 관찰할 수 있었으나, 이는 전극 mushrooming 현상에 의한 전극 팁 소실 영향으로 판단된다.

Fig. 22에 3겹 이종 강판 조합의 연속 3000 타점까지의 전단인장시험 결과를 나타내었다. 3000타점까지 SGACUD 0.7 mm 기준 허용인장강도인 1.67 kN을 만족하였다.

3겹 이종 강판 조합의 경우, SGARC 340MPa급 1.4 mm 강판과 SABC 1470MPa급 1.4 mm 강판 사이보다 비교적 인장 강도가 낮은 SGACUD 0.7 mm 하부 판재 쪽에서 찢기며 분리되는 테어 파단 (Tear fracture)이 관찰되었다. 2겹 이종 강판 조합에 비해 연속타점 수에 따른 전단인장강도의 감소가 크지 않았다. 이러한 결과는 강판 사이에 추가되는 SABC 1470MPa급 1.4 mm 강판의 고합금계 합금조성으로 인하여 모재 고유의 벌크 저항이 높기 때문에 발열량이 더 커 하부 판재까지 너짓 거동의 영향이 미친 것으로 사료된다.

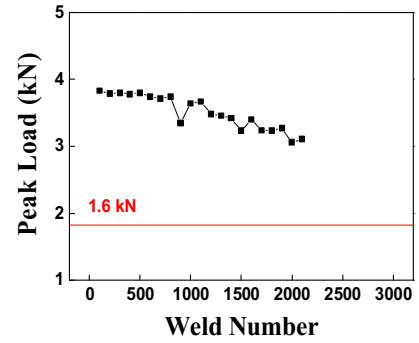


Fig. 21 Tensile-shear load as a function of number of welds for the two sheet used.

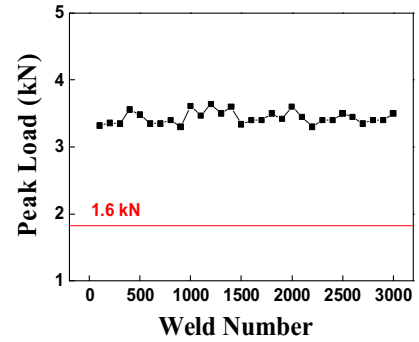


Fig. 22 Tensile-shear load as a function of number of welds for the three sheet used.

4.6 전극 합금화 관찰

2겹 이종 강판 조합 연속 2000타점 이후, 서보전에 고정되어 있던 상부 하부 전극을 채취하였다. 각 전극의 표면과 단면을 FE-SEM을 이용하여 관찰하였다. Fig. 23 결과와 같이 전극 표면 전반에 걸쳐 강판의 합금성분인 Fe가 관찰되었다. Fe는 강판의 주요 합금원소로, 이러한 결과는 합금화가 전극 팁 전반에 걸쳐서 진행 된 것으로 사료된다.

비교적 상부 전극에서 Fe 원소의 wt %가 높은 것은 SGARC 1.4 mm 강판과 SGACUD 0.7 mm 강판의 저항 점용접 시, 모재저항에 따른 너짓 생성 거동이 SGARC 340MPa 급 1.4 mm 강판에서 빠른 시간에 발생하기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 근거는 강판 발열에 의한 전극 합금화 역시 상부 전극에서 더 심각한 것으로 관찰되었기 때문이다.

Fig. 26은 상부 전극 단면을 SEM-EDS를 이용하여 관찰한 결과이다. 일반적으로 용융아연도금강판에 Cu-Cr 전극을 사용하였을 경우, 3겹의 층이 관찰된다고 알려져 있다.[15] 층의 가장 아래 부분에 해당되는 base electrode material 은 전극 본연의 합금원소인 Cu 원소가 90 % 이상 관찰된다, 이는 가장 아래층인 base electrode material 층은 합금화가 거의 일어나지 않았음을 의미한다. 중간 층에 해당되는 innermost alloy layer 층은 평균 Zn 조성이 60 wt % 이상 관찰 되었다, Fig. 27에서의 innermost alloy layer 층은 Zn 조성이 50 wt % 이상 관찰되었다. 합금화에 의해 조성변화가 가장 영향을 많이 받는 innermost alloy layer 층을 비교해보았을 때, 본 실험은 비교적 전극의 합금화가 하부 전극보다 상부 전극에서 더 진행된 것이라 판단할 수 있다. 가장 외곽층인 middle layer 층에서는 20 wt % 이상의 Zn 조성이 관찰되었으며, 강판과의 직접적인 가압에 의해 전극의 수명 동안 이 층은 계속된 조성의 변화가 생기게 된다. [15,20]

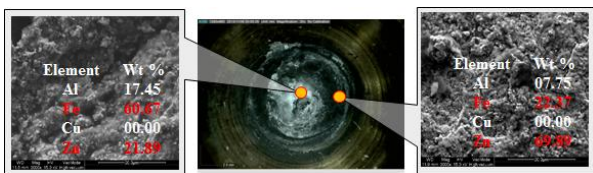


Fig. 23 SEM micrograph of upper electrode of two sheet steel surface after 2000 welds

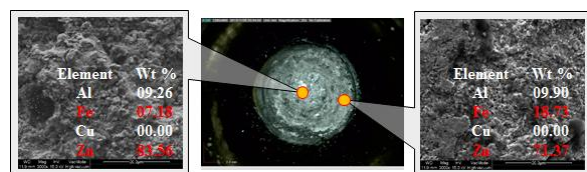


Fig. 24 SEM micrograph of lower electrode of two sheet steel surface after 2000 welds

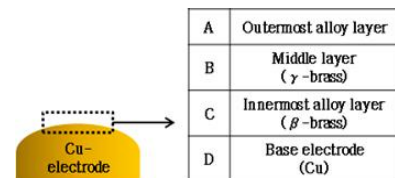


Fig. 25 Typical alloying layers of electrode tip after electrode life test.

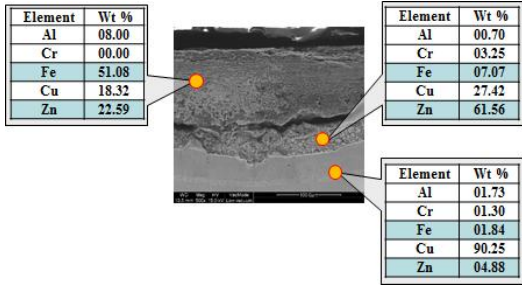


Fig. 26 SEM images of cross-section of as upper electrode of after 2000 welds.

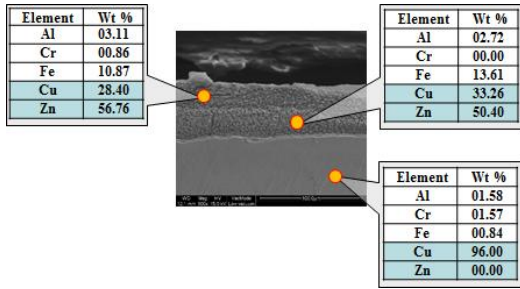


Fig. 27 SEM images of cross-section of as lower electrode of after 2000 welds.



Fig. 28, Fig. 29는 3겹 이중 강판 조합 연속 3000타점 이후, 서보건에 고정되어 있던 상부 하부 전극의 표면을 FE-SEM을 이용하여 관찰한 결과이다. 2겹 이중 강판 조합의 전극 표면 FE-SEM 결과에 따라 3겹 이중 강판 조합의 경우에서도 강판의 합금원소인 Fe가 비교적 상부전극에 더 많이 합금화되어 분포되어 있을 것을 예상할 수 있었다. 그러나 3겹 이중 강판 조합의 경우 상부 전극과 하부 전극의 표면 Fe 원소 wt %는 각 10.88 wt %와 04.62 wt %로 그 차이가 미비하였다. 이는 강판 조합 중간에 삽입되는 SABC 1470 MPa급 핫 스텝 평 강판 1.4 mm의 모재 특성 영향으로 사료된다. 고합금강 SABC 강은 탄소 이외의 합금원소가 많이 들어있는 강으로서 점용접 특성에 영향을 미치는 내열성, 전기저항성 등이 높기 때문에 점용접 시 높은 모재저항에 의해 너깃이 형성된다. 그로 인해 비교적 점용접 타수가 증가하여도 2겹 이중 강판 조합과 달리 너깃 형성이 하부 강판까지 영향을 미쳐 합금화로 인한 상부, 하부 전극의 Fe 원소 차이가 크지 않은 것이라 사료된다.

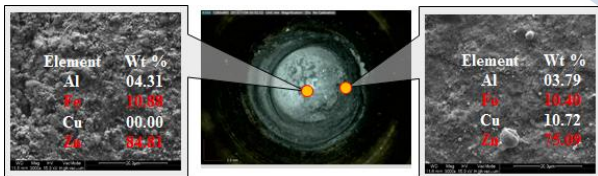


Fig. 28 SEM micrograph of upper electrode of three sheet steel surface after 3000 welds

Fig. 30과 Fig. 31은 3겹 이중 강판 조합의 상부 하부 전극 단면을 SEM-EDS를 이용하여 관찰한 결과이다. Fig. 26에 나타난 전극 상부에서는 4겹의 층이 형성되었다. 최외각인 outermost layer 층에서 Zn 원소가 55.49 wt % 관찰되었으며, 이것은 3겹 이중 강판 조합의 경우 3000타점까지도 높은 너깃 발열량에 의한 표면 발열로 인해 전극과의 합금화가 활발히 진행되고 있음을 의미한다. 또한 middle layer 층과 innermost alloy layer 층에서도 합금화로 인해 약 40 wt %의 Zn 원소가 관찰되었다. 가장 아래 층 부분인 base electrode material 층에서는 합금화 영향이 없었으므로 0.2 wt %인 미량의 Zn 원소가 관찰되었다. Fig. 31에 나타난 하부전극 SEM-EDS 결과의 경우, 2겹 이중 강판 조합 결과와 비슷한 경향이 관찰되었다. 합금화가 진행되지 않은 가장 아래 부분인 base electrode material에서 Zn 원소는 관찰되지 않았으며, innermost ally layer 층을 걸쳐 middle layer 층까지 합금화가 진행된 층에서는 Zn 원소가 60 wt %까지 관찰되었다.

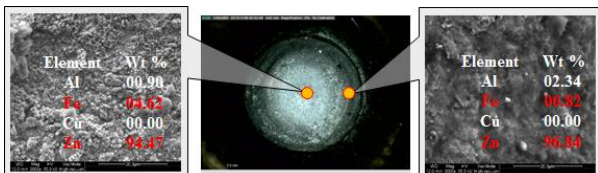


Fig. 29 SEM micrograph of upper electrode of three sheet steel surface after 3000 welds

4.7 연속타점 수에 따른 너깃 형상 변화

Fig. 32는 2겹 이중 강판 조합에서 연속타점에 따른 너깃형상을 광학현미경을 이용, 500타점 단위로 관찰한 결과이다. 100타점에서 5.35 mm 인 너깃 직경이 2000 타점에서 3.88 mm로 줄어든 것이 관찰되었다. 위와 같이 너깃직경이 줄어드는 결과는 앞선 carbon imprint 측정 결과 및 peel test 결과를 토대로 예상할 수 있었다.

특이한 점은 점용접 타수가 증가할수록 발열량이 감소하면서, 비교적 모재 저항이 낮은 하부 강판 SGACUD 0.7 mm 쪽으로 penetration 이 부족한 현상이 관찰되었다. 위와 같은 현상은 1000타점에서 점차 뚜렷해지며 2000타점에서는 하부 강판 쪽으로 penetration이 완전히 부족한 현상이 관찰된다.

위 결과는 기계적 성질이 만족되어도 용접 품질 면에서 문제가 될 수 있음을 의미한다. 1500 타점 이후 button diameter, tensile test는 최소허용 조건을 만족하였으나 오직 압접(pressure welding)에 의해 용접되었으므로 내구성 및 용접 품질 측면에서 문제가 될 것이라 판단된다.

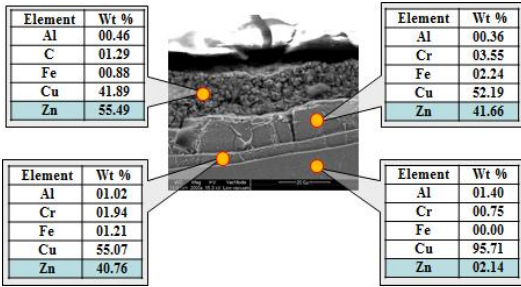


Fig. 30 SEM images of cross-section of as upper electrode of after 3000 welds.

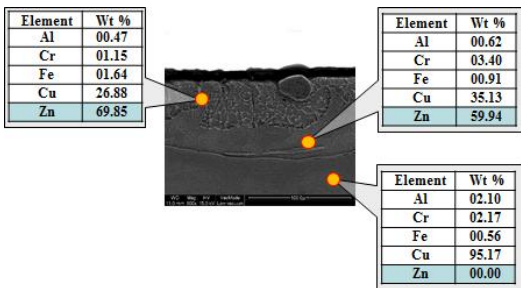
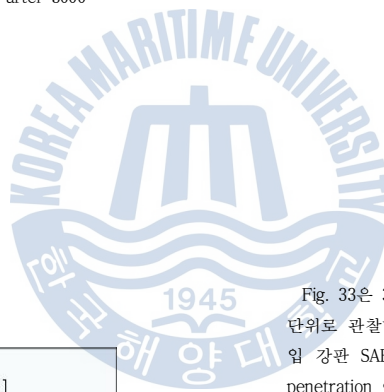


Fig. 31 SEM images of cross-section of as lower electrode of after 3000 welds.



타점수	Macro [Cross sections]	Micro [Cross sections]
100		
500		
1000		
1500		
2000		

Fig. 32 Macrograph of cross section for resistance spot weld two sheet combination steels.

Fig. 33은 3겹 이중 강판 조합에서의 너깃형상을 광학현미경을 이용, 500타점 단위로 관찰한 결과이다. 상부 강판인 SGARC 340MPa 급 1.4 mm 와 중간 삽입 강판 SABC 1470MPa 급 1.4 mm 사이의 너깃 형상은 연속 3000타점까지 penetration 이 부족한 문제가 없었으므로 micro 사진을 삽입하지 않았다. 그러나 SABC 1470MPa 급 1.4 mm 와 SGACUD 0.7 mm 사이에서 2겹 이중 강판 조합과 동일한 경향인 penetration부족 문제가 명확하게 관찰되었다. 비교적 이른 시점인 연속 1000타점에서 현상이 관찰되었으며 점용접 타수가 증가할수록 penetration이 부족한 현상이 가속화되었다.

연속 1000타점 이후에서는 중간 삽입 강판 SABC 1470 MPa급 1.4 mm 와 하부강판 SGACUD 0.7 mm가 오직 압접에 의해 용접되기 때문에 기계적 성질이 만족되어도 용접 품질 측면에서 문제가 될 수 있음을 의미한다.

제 5 장 결 론

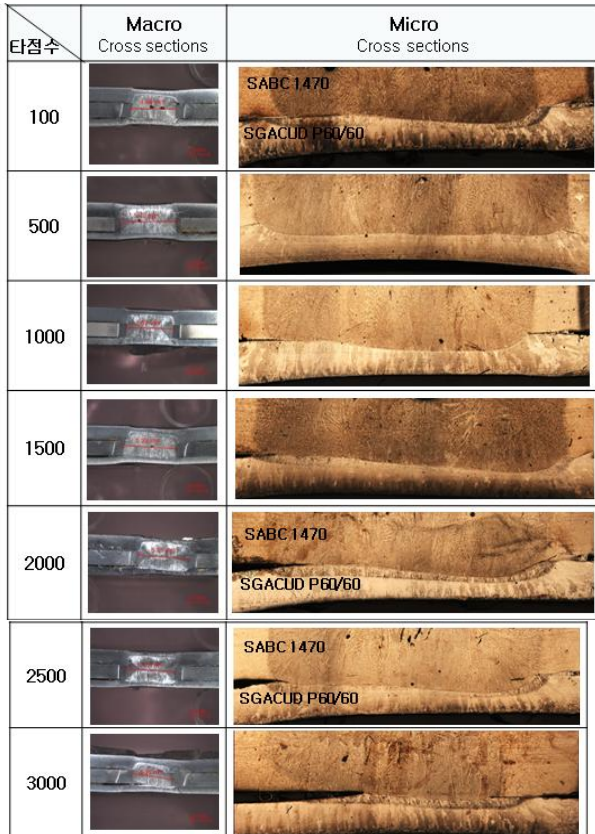


Fig. 33 Macrograph of cross section for resistance spot weld three sheet combination steels.

- 43 -

1) SGARC 340MPa급 1.4 mm 와 SGACUD 0.7 mm을 사용하는 2겹 이중 강판 조합에서 Cu-Cr 전극을 적용하여 점용접시, 아래와 같은 용접조건 15 cy, 245 kgf에서 의 중간날림(expulsion)발생조건은 8.2 kA 이었다. 중간날림 발생조건에서 -200 A 전류를 고정하였을 경우, 초기타점에서의 너깃 직경은 5.3 mm이며 이 직경은 최소너깃 직경 $d=4\sqrt{t}$ 를 만족하는 직경이다.

2) 저항 점용접을 연속적으로 할 경우 용접전류와 전극 가압력에 의하여 전극선단부가 마모 또는 변형되는 현상이 관찰되었다. 본 실험에 적용된 2겹 이중 강판 조합과 3겹 이중 강판 조합의 경우 모두 이와 같은 현상이 관찰되었으며 이는, carbon imprint 측정 결과에 따라 설명될 수 있다. carbon imprint에 의한 측정결과 2겹 이중조합과 3겹 이중 강판 조합의 각 초기타점 대비 전극 선단 직경 변화는 1 mm 이상 증가한 것으로 관찰되었다. 또한 carbon imprint에 의한 전극 선단부의 직경 변화 결과는 상부 전극과 하부 전극이 큰 차이가 없었다.

3) 연속타점이 진행 될 때마다 전극 팁 직경이 증가하는 mushrooming 현상에 의해 전류밀도는 낮아지게 된다. 단면적이 커질수록 전류효율이 감소되기 때문에 동일한 전류로 연속 점 용접할 경우 발열량이 줄어들게 된다. 줄어든 발열량에 의해 점용접 연속 타점 시 너깃 직경이 줄어든 것이 관찰되었다. 이러한 결과는 중간날림이 발생하지 않는 조건인 2겹 이중 강판 조합에서 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 연속타점에 따라 전극의 합금층이 성장과 소실을 반복하게 되므로 일부 타점에 너깃 직경 변화가 있었으나 2000타점 후 최종적으로 1 mm 이상의 너깃 직경 감소가 관찰되었다.

- 44 -

4) 전단인장시험의 경우 2겹 이중 강판 조합과 3겹 이중 강판 조합 모두에서 최소 허용인장강도를 만족하였다. 점용접 연속타점 시 너깃의 변화에 따라 인장강도의 감소를 예상하였으나 최종타점까지 초기타점과 크게 다르지 않은 결과가 관찰되었다. 또한 2겹 이중 강판 조합에서의 경우 전단인장강도의 감소가 지속적으로 발생하나 3겹 이중 강판 조합에서는 전단인장강도의 감소가 크지 않았다.

5) 본 실험과 같이 SGARC 340MPa급 1.4 mm 와 SGACUD 0.7 mm를 사용하여 동일한 용접조건에서 연속 타점할 경우 전극 선단 직경변화에 의한 발열량 감소와 함께 모재저항이 다른 이유로 penetration이 SGACUD 0.7 mm 하부 강판 쪽으로 충분하지 못한 현상이 관찰된다.

6) 2겹 이중 강판 조합과 3겹 이중 강판 조합에서의 점용접 최종 연속타점 후 상부, 하부 전극을 채취하여 합금화 층을 관찰하였다. SEM-EDS를 이용하여 관찰한 결과, Cu-Cr 원소만이 포함된 전극 표면에서 Fe 원소가 합금화로 인해 관찰되었다. 이러한 결과는 상부, 하부 전극의 합금화 정도에 따라 수치에 조금씩 차이가 있었다. 2겹 및 3겹 이중 강판 조합의 경우 상부전극과 하부전극의 성장에는 큰 차이가 없었으나 실제 전극의 합금화 정도는 차이가 존재하며 이에 따른 접합부 품질 저하 가능성이 존재할 것으로 사료된다.

- 45 -

감사의 글

이 지면을 기회로 학사과정 및 석사과정을 마칠 수 있도록 이끌어 주신 최일동 교수님께 진심으로 감사한 마음을 드립니다. 오래도록 존경합니다. 또한 부족한 저를 애증의 매로 지도 편담해주신 박영도 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 두 분 오래오래 건강하셨으면 좋겠습니다.

저의 전공을 탄탄하게 만들어주신 문경만 교수님, 이성열 교수님, 김윤해 교수님, 이병우 교수님, 김준영 교수님께도 감사드립니다.

많은 시간을 중앙감에 보낸 날들이었지만, 돌이켜 보면 그 시간들이 저를 성장시켰던 것 아닐까 합니다. 학업은 할 수 있을 때 해야 한다는 말이 이제는 조금 실감이 납니다. 아쉬운 마음도 듭니다.

실험실에서 부족한 저를 위해 항상 좋은 마음으로 의견을 나눠주고 한 창욱이 형, 배울 점이 많은 재원이, 철희, 먼 곳에서 가까운 마음으로 도움주는 지연이, 훈택이, 성상이.. 그리고 지호, 신소재 실험실과 재료강도 실험실에서의 모든 시간들을 좋은 추억으로 간직하겠습니다. 문길이형, 인생의 선배로서 감사드립니다.

매일 아침마다, 늦깎이 학생 아들내미 도시락 싸주시는 어머니께 이루 표현할 수 없는 사랑을 드립니다. 아버지, 여동생. 저만큼 고생한 박소현 모두 사랑합니다.

저는 이제 사회에서 여러분들과 인생의 중반부를 시작할 것입니다. 잘 부탁드립니다. 저를 알고 계가 아는 모든 사람들이 복되고 건강하고 무엇보다 행복했으면 좋겠습니다. 감사합니다.

- 46 -

참고문헌

1. T. H. Kim, Ph. D. Thesis, p. 1-5, Hanyang University, Seoul (2006).
2. J. Zou, Q. Zhao, and Z. Chen, J. Mater Proc Tech. 209, 4141 (2009).
3. S. S. Park, MS. Thesis, p. 34-39, Dong-Eui University, Busan (2009).
4. S. S. Park, S. M. Lee, Y. J. Cho, N. H. Kang, J. H. Yu, Y. S. Kim, and Y. D. Park, J. Kor. Inst. Met. & Mater. 46, 672 (2008).
5. S. S. Park, Y. M. Choi, D. G. Nam, Y. S. Kim, J. H. Yu, and Y. D. Park, J. KWJS. 26, 625 (2008).
6. S. S. Park, S. M. Lee, Y. J. Cho, N. H. Kang, J. H. Yu, Y. S. Kim, and Y. D. Park, J. Kor. Inst. Met. & Mater. 46, 672 (2008).
7. J. W. Son, Journal of KWS, 2009.11, 118-118 (1 page)
8. J. W. Son, CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.11, No.1(2012), pp.29-36
9. Electrodes & Point holders. OBARA manual
10. J M. Bean, S H Kim, T Y Kim, Y D Kim, Trend in Metals & Material Engineering, Vol. 24, No. 6 p. 14(2011)
11. Tae-Kyo Han, Kyoo-Young Lee and Jong-Sang Kim, Recent Developments and Weldability of Advanced High Strength Steels for automotive Applications, (2009), 13-18 (in korea)
12. C. Y. Choi, Ph. D. Thesis, p. 7, Busan university University (2012).
13. <http://dc140.4shared.com/doc/sA5ddk-C/preview.html>
14. Quanfeng Song, Wenqi Zhang, Welding journal, 84-5, 73-s to 76-s (2005).
15. Mohamed Abu-Aesh, Australasian Welding Journal, 48, 34-41 (2003).
16. M.Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadch, P. H. Marashi and M. Goodarzi, Science and Technology of Welding and Joining, 12-3, 217-225 (2007).
17. S. M. Lee, Ms. Thesis, P. 8-11, Dong-Eui University, Busan (2010).
18. 용접접합편람, 대한용접학회, (1998), pp.167
19. Babu, S.S., Santella, M. L., and Peterson, W., "Modeling Resistance Spot Welding Electrode
20. J. Zou, Q. Zhao, and Z. Chen, J. Mater Proc Tech. 209, 4141 (2009).

