

DP강의 전기저항점용접부 너깃직경에 미치는 Si 함량의 영향

공종판* · 강길모* · 한태교** · 진광근** · 강정윤*†

*부산대학교 재료공학부

**POSCO 기술연구원

Effect of Si content on Nugget Diameter of Electric Resistance Spot Welded Dual Phase Steel

Jong-Pan Kong*, Gil Mo Kang*, Tae-Kyo Han**, Kwang-Geun Chin* and Chung-Yun Kang*†

*Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**POSCO Technical Research Laboratories, Gwangyang 545-711, Korea

†Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received October 19, 2011, Revised October 27, 2011, Accepted October 28, 2011)

Abstract

In this study, effect of Si content on nugget diameter in electric resistance spot welded dual-phase(DP) steel was investigated. The cold rolled DP steels with different Si content (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 wt.%) were used and thickness of those sheet was 1.2mm. With increasing Si content, nugget diameter was increased at the same welding current. This is attributed to increase of heat input result from high resistivity. Also, nugget diameter was increased with an increase in Si content for the same heat input. For this reason, the melting point of DP steel is lowered with an increase in the Si content. And solid DP steel can easily be transformed to a liquid phase because the low melting point. Finally, a prediction formula for the nugget diameter(N.D.) could be obtained in terms of heat input(Q) and melting point(M.P) as follows:

$$N.D.(mm) = 0.11Q(J) - 0.0031 M.P.(^{\circ}C) + 0.32$$

Key Words : Electric resistance spot welding, Si content, Nugget diameter, Resistivity, Melting point, Yield strength

1. 서 론

전기저항점용접(Electric Resistance Spot Welding, ERSW)은 모재 또는 도금층의 저항이 상당히 중요한 인자 중 하나이며, 저항값은 합금성분에 영향을 받는다. 일반적으로 철판고장력강은 연강과 비교하여 첨가원소의 함량이 많아 전기저항이 크고, 열전도율은 작은 경향을 가지고 있어 비교적 저항열이 높은 특징을 가지고 있다¹⁾. 따라서 철판고장력강은 동일 용접조건에서 연강에 비해 너깃직경이 더 클 것으로 예상된다²⁾.

지금까지 너깃직경에 대한 선행연구결과로 Cho³⁾ 등은 용접공정중에 예측할 수 있는 신호 중의 하나인 동저항

신호를 예측하여 동저항신호와 너깃형성의 관계에 관한 연구를 수행한 바 있다. 또한 Alfaro⁴⁾ 등은 용접공정 중의 너깃형성을 고속카메라를 이용하여 확인한 바 있고, Aslanlar⁵⁾, Ghosh^{5,6)} 등은 너깃직경에 미치는 용접전류와 용접시간의 영향을 연구한 바 있다. 이처럼 대부분 선행연구는 용접공정과 용접변수에 따라 너깃직경과의 관계를 많이 검토하여 왔다. 그러나 철판고장력강에서 합금원소 및 함량변화에 따른 저항점용접에서 너깃직경 변화에 관한 체계적인 연구는 전무한 상태이다.

한편 철판고장력강은 합금원소에 따라 미세조직 및 기계적 성질이 달라진다. 특히 Si는 DP(Dual Phase) 강에서 Si 함량 증가할수록, 페라이트의 고용강화를 증가시켜 강도를 향상시킨다고 알려져 있다⁷⁾. 또한 Saleh⁸⁾,

CAI⁹⁾ 등의 연구 결과에서 의하면, DP강에서 Si 함량 증가에 따라 페라이트 크기를 감소시키고, 잔류오스테라이트 분율을 증가시켜 강도와 연신율을 동시에 향상시킨다고 보고하고 있다. 이처럼 DP강에서 Si 함량 변화에 따라 모재의 미세조직 및 기계적 성질 뿐만 아니라 전기적 성질 등도 변할 것으로 예상된다¹⁰⁾.

따라서 Si 함량 변화에 따라 모재의 성질도 변화하게 되어, 너깃직경에도 영향을 미칠 것으로 예상되어, 본 연구에서는 DP강의 전기저항접합부에서 너깃직경에 미치는 Si 함량의 영향을 검토하였다.

2. 사용 재료 및 실험방법

실험에 사용된 강재는 두께가 1.2 mm인 Si 함유량이 다른 냉연 DP (Dual Phase)강을 사용하였다. 0.07C - 2.3Mn - 1Cr - 0.01P - 0.003S 기본조성에 Si 함량을 0.5wt.%에서 2.0wt.%까지 0.5wt.% 간격으로 변화하여 너깃직경을 검토하였다.

용접은 공기압축식 AC 전기저항접기를 사용하였으며, 용접시 사용한 전극은 6mm의 전극선단경을 가지는 Cr-Cu합금인 dome형태를 사용하였다. 시편은 가로 40mm, 세로 40mm로 절단한 다음, 표면을 아세톤과 메탈알코올로 세척 후 겹침 점용접을 실시하였다.

표 2는 용접조건을 나타낸 것으로 가압력, 용접시간, 유지시간 등은 ISO 18278-2에서 추천하는 용접조건으로 고정한 상태에서 용접전류만 5.2~9.0kA범위에서 0.2kA간격으로 변화하여 너깃직경을 검토하였다. 너깃직경은 너깃중앙부에 정밀컷팅기를 이용하여 절단 후 NaOH 에칭액(NaOH 5g + Picric acid 3g + boiled water 100mL)을 사용하여 너깃을 현출 하였다. 그리고 각 조건당 3개씩 현출 후 Image-Pro Plus

Table 1 Welding conditions (Single phase AC, 60Hz) [ISO 18278-2]

Welding parameters	Values
Weld force (kN)	4
Weld time (cycle)	17
Hold time (cycle)	17
Squeeze time (cycle)	40
Weld current (kA)	5.2 ~ 9.0
Water flow rate (ℓ/min)	4

프로그램을 이용해 너깃직경을 측정 후 평균 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Si 함량과 용접전류에 따른 너깃직경의 변화

Fig. 1은 Si 함량과 용접 전류에 따른 너깃(Nugget)의 단면 조직사진을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 두 시편 사이에 둥근형태의 용접된 부분은 너깃을 나타낸다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 용접전류가 증가함에 따라 너깃의 크기는 증가하는 경향을 보이고 있다. 한편 7.4kA의 동일 용접전류에서 Si 함량이 증가 할수록 너깃의 크기 역시 약간 증가하는 경향을 보인다.

너깃직경을 정확히 정의하기 위해 NaOH 에칭액으로 용접부 조직을 현출한 후 광학현미경을 이용하여 자세히 관찰하였다. Fig. 2는 Si0.5%, 7.4kA의 용접전류로 용접한 대표적인 용접부 단면 광학현미경 사진을 나타낸 것이다. Fig. 2 (a)에서 알 수 있듯이 너깃 주변에 흰색띠가 관찰된다. 그리고 Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의 X부분을 확대한 광학현미경사진으로 다각형태의 구

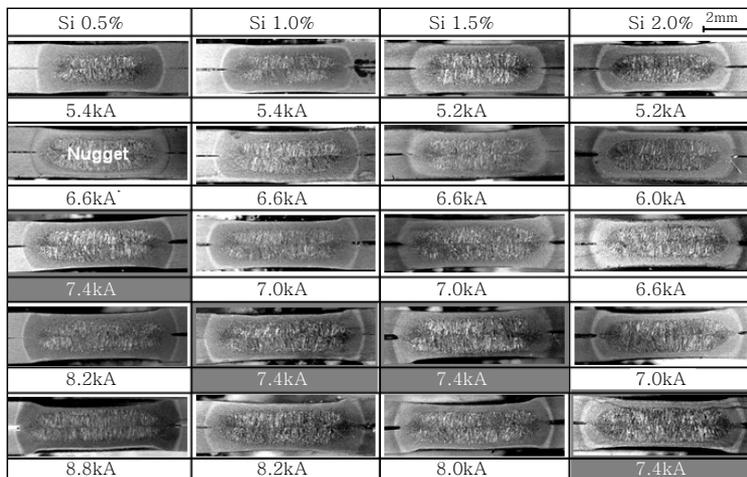


Fig. 1 Cross-sections of spot welds with various Si content and welding current

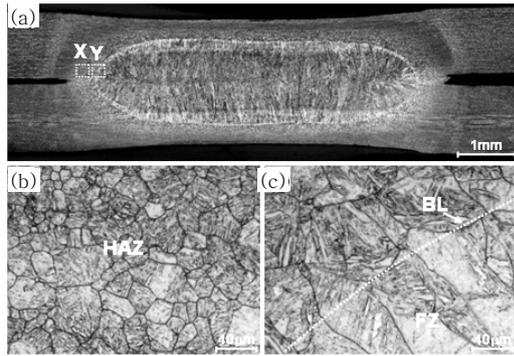


Fig. 2 Typical optical micrographs of spot welds in Si0.5% [Welding Condition : 7.4kA]. (a) cross-section of spot welds, (b) X in (a), (c) Y in (a)

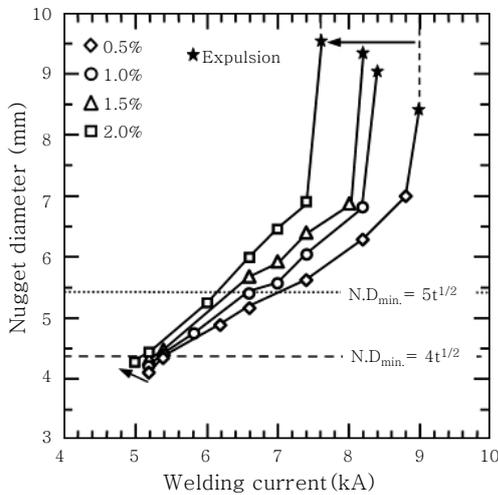


Fig. 3 Nugget diameter (N.D.) with various Si content and welding currents

오스테나이트 입계가 나타난다. 반면에 흰색띠 경계의 조직 사진을 나타낸 Fig. 2 (c)에서 알 수 있듯이 흰색띠 경계에서 HAZ의 결정립을 모체로하여 결정립이 성장한 에피택셜 성장(Epitaxial Growth)^{11,12)}이 나타난다. 이 결과로부터 흰색띠는 용융부(Fusion Zone)의 경계를 나타내는 본드라인(Bond Line)임을 알 수 있다. 따라서 너깃직경은 너깃 중앙에서 본드라인인 흰색띠 사이의 폭으로 정의 하였다.

Fig. 3은 Si 함량과 용접전류에 따른 너깃직경을 정량화한 결과를 나타낸 것이다. 또한 최소너깃경이 $N.D_{min.} = 4t^{1/2}$ (t =모재 두께)는 파선으로 표시하였고, $N.D_{min.} = 5t^{1/2}$ 는 점선으로 표시하였다. 이 결과로부터 너깃직경은 용접전류가 증가할수록 점차적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 동일한 용접전류에서 Si 함량 증가에 따라서 너깃직경이 증가하고, $4t^{1/2}$ 과 $5t^{1/2}$

의 너깃직경을 만족하는 하한 용접전류는 저전류 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다.

3.2 Si 함량과 용접전류에 따른 너깃직경 사이의 상관관계 고찰

이상 결과로부터 용접전류가 증가할수록 너깃직경은 직선적으로 증가하고, 동일한 용접전류에서 Si 함량 증가에 따라 너깃직경 역시 증가하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 너깃직경은 용접변수(용접전류, 용접시간, 가압력 등), 모재의 저항과 접촉저항 등에 따라 달라진다. 그리고 용접변수와 저항은 입열량에 직접적으로 영향을 미치는 인자이고, 선행연구자의 결과에 따르면 입열량과 너깃직경 사이에 밀접한 관계가 있다고 보고된 바 있다¹³⁾.

한편 본 연구에서는 용접시간, 가압력 등과 같은 기타 용접변수들은 고정하였기 때문에 결국 용접전류와 Si 함량 변화에 따른 모재의 성질(전기적, 열적성질 등)이 입열량에 영향을 미치고, 결국 너깃직경에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 특히 Si 함량 변화가 변화하면, 모재의 고유저항이 변화하게 되고, 따라서 입열량도 변화할 것으로 예상된다. 그래서 Si 함량과 용접전류에 따른 입열량을 계산하여, 너깃직경과의 상관관계를 검토하였다.

일반적으로 전기저항점용접에서의 입열량은 전극팁과 모재, 모재와 모재사이의 접촉저항과 모재의 고유저항 등에 따라 달라진다. 그러나 용접초기에는 접촉저항이 중요하지만, 너깃의 형성과정에서는 모재의 고유저항이 지배적으로 입열량에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그리고 본 연구에서 사용된 강재는 도금되지 않은 냉연강판을 사용하였기 때문에 접촉 저항보다 모재의 고유저항이 입열량에 직접적으로 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 전기저항점용접에서의 입열량은 개략적으로 수식 (1)^{13,14)}과 같이 표현 할 수 있다.

$$Q = I^2Rt \tag{1}$$

여기서, Q는 입열량 (kJ), I는 용접전류(kA), R은 저항($\mu\Omega$), t는 용접시간(sec)를 나타낸다. 저항은 수식 (2)^{4,15,16)}와 같이 표현 할 수 있다.

$$R = \rho \cdot L/S \tag{2}$$

여기서, ρ 는 모재의 고유저항($\mu\Omega \cdot \text{cm}$), L은 전극팁 사이의 거리, S는 압흔폭의 면적으로 나타낸다. 한편 입열량(Q)정의에서 용접전류(I)와 용접시간(t)는 고정변수이나, 그러나 저항은 연속적으로 변하는 변수이다.

즉 너짓형성 과정 중에 전극팁 사이의 거리(L)와 압흔폭의 면적(S)은 연속적으로 변하기 때문에 저항을 정의하기 상당히 어렵다. 그러나 대부분 전극팁 사이의 거리와 압흔폭은 너짓이 가장 최대가 될 때 생성되고^{4,17,18)} 이때의 저항이 결국 입열량에 직접적으로 관계가 있을 것으로 예상된다. 따라서 최종적인 압흔폭과 압흔깊이를 측정하면 저항을 예측할 수 있고, 이 저항을 이용하면 입열량 계산이 가능하다.

Fig. 4는 압흔폭(면적), 압흔깊이, 전극과 전극 사이의 거리등을 정의하기 위한 모식도를 나타낸 것이다. 이 모식도로부터 팁 사이의 거리(L)와 압흔폭(S)은 각각 (3)식과 (4)식으로 표현할 수 있다.

$$L = 2(t - I.D.) \tag{3}$$

$$S = \pi \cdot (I.W./2)^2 \tag{4}$$

여기서, t는 모재의 두께(cm), I.D.는 압흔깊이(cm), I.W.는 압흔폭(cm)을 나타낸다. 따라서 입열량을 계산하기 위하여, 고유저항, 압흔깊이와 압흔폭을 실험 통하여 측정하였다.

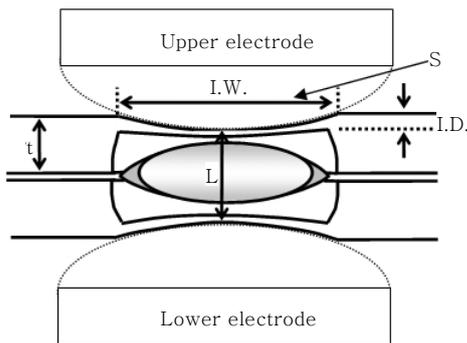


Fig. 4 Schematic for definition of indentation width(I.W.), indentation depth(I.D.) and distance between upper electrode and lower electrode(L) etc

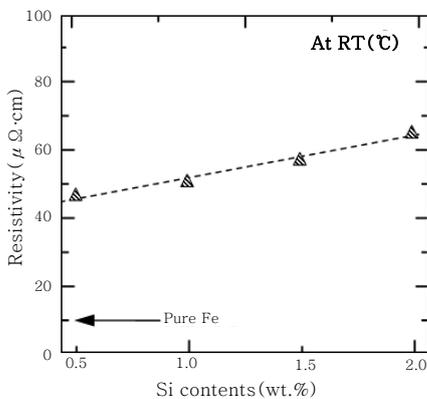


Fig. 5 Resistivity of base metal with Si content using 4-point probe

Fig. 5는 4포인트 프로브를 이용하여¹⁹⁾ Si 함량에 따른 고유저항을 측정된 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 고유저항은 Si 함량이 증가함에 따라 직선적으로 증가하는 경향을 보인다. 고유저항과 Si 함량의 관계는 통계 소프트웨어인 Minitab을 이용하여 구한 결과, (5)식으로 얻어졌다.

$$\rho(\mu\Omega \cdot \text{cm}) = 9.7\text{Si}(\text{wt.}\%) + 34.6 \tag{5}$$

Fig. 6과 Fig. 7은 Si 함량과 용접전류에 따른 압흔폭과 압흔깊이의 변화를 각각 나타낸 것이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 압흔폭과 압흔깊이는 용접전류 증가에 따라 직선적으로 증가하는 경향이 보이고, 또한 동일한 용접전류에서 Si 함량 증가에 따라 증가하는 경향이 나타난다.

한편 압흔폭과 압흔깊이 변화는 전극 팁이 용접부에 가해지는 하중에 따라 소성변형에 의해 생기므로 재료

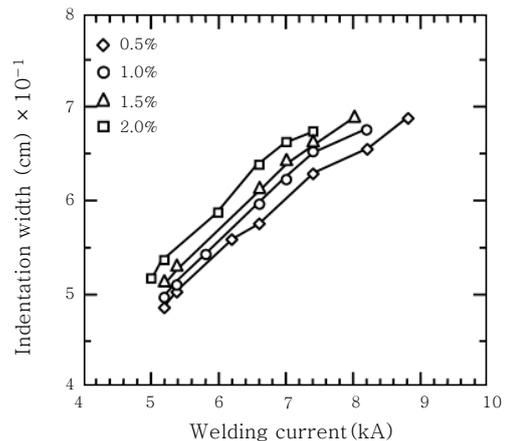


Fig. 6 Indentation width with Si content and welding currents

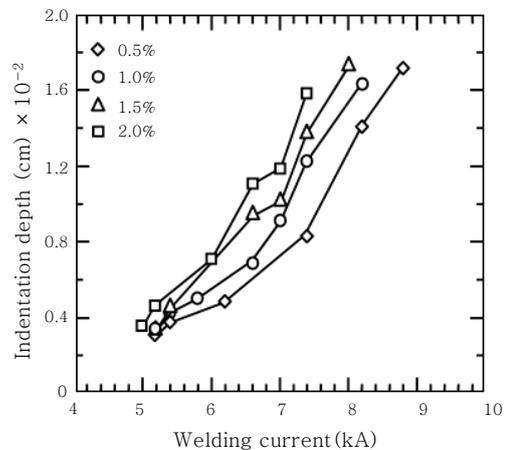


Fig. 7 Indentation depth with Si content and welding currents

의 고온항복강도와 밀접한 관계가 있고, 또한 Si 함량 변화에 따라 고온항복강도는 변할 것으로 예상된다.

Fig. 8은 JmatPro v-5소프트웨어를 이용하여 Si 함량 변화에 따른 1200℃, 1350℃에서의 항복강도를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 Si 함량 증가에 따라 고온항복강도가 감소하기 때문에 동일한 전극 팁의 하중이 가해지더라도 소성변형이 잘 되어 압흔폭이 넓어지고, 압흔깊이가 깊어지는 것으로 판단된다. 따라서 동일한 용접전류에서 Si 함량 증가에 따라 압흔폭과 압흔깊이가 증가하는 이유는 입열량의 증가와 고온항복강도의 감소에 의한 것으로 판단된다.

이상 결과로부터 압흔폭과 압흔깊이는 Si 함량과 용접전류사이의 관계로부터 각각의 실험식 (6)과 (7)을 얻었다.

$$I.W.(cm) = 0.045Si(wt.%) + 0.059I(kA) + 0.17 \tag{6}$$

$$I.D.(cm) = 0.0022Si(wt.%) + 0.0043I(kA) - 0.0222 \tag{7}$$

따라서 수식 (5), (6)과 (7)의 실험식으로부터 고유저항, 압흔폭과 압흔깊이를 예측할 수 있고, 이 값을 수식 (2), (3)과 (4)에 대입하게 되면 저항을 구할 수 있다. 최종적으로 수식(1)에 대입하면 입열량을 구할 수 있다.

Fig. 9은 입열량과 너깃직경 사이의 상관관계를 플롯(plot)한 것이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 상관계수(R²)가 0.94로부터 너깃직경과 입열량 사이에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 너깃직경과 입열량 사이의 상관식은 (8)식과 같이 표현 할 수 있다.

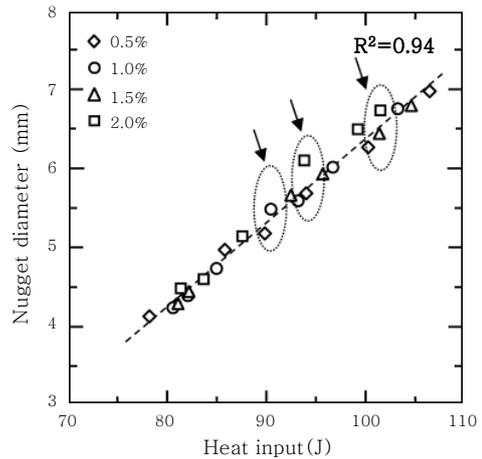


Fig. 9 Correlation between heat input and nugget diameter

$$N.D.(mm) = 0.11Q(J) - 4.42 \tag{8}$$

따라서 용접전류가 증가에 따른 너깃직경이 증가한 이유는 (1)식의 관계로부터, 용접전류가 증가함에 따라 입열량이 증가하기 때문에 너깃직경이 증가한 것으로 일반적인 결과임을 알 수 있다¹³⁾. 그리고 동일한 용접전류에서 Si 함량 증가에 따라 너깃직경이 증가한 이유는 고유저항 변화에 따라 입열량이 증가하기 때문으로 판단된다. 그러나 점선과 화살표로 표시된 부분을 보면 동일 또는 비슷한 입열량임에도 불구하고 Si 함량 증가에 따라 너깃직경이 조금 큰 것을 알 수 있다. 따라서 Si 함량 변화에 따라 입열량 외에도 너깃직경에 영향을 미치는 인자가 있을 것으로 예상된다.

한편 너깃은 입열량에 의해 모재가 녹아 액상이 응고된 것으로 액상의 성질에 영향을 받을 것으로 예상된다. 특히 액상의 성질 중 용점(Melting Point, M.P.)은 너깃직경에 추가적으로 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이 이유는 용점이 낮을수록 액상이 되기 쉽기 때문이다. 열역학 소프트웨어인 Thermo-Calc TCW5를 이용하여 상태를 작성하고, Si 함량에 따른 용점을 측정된 검토한 결과를 Fig. 10에 나타낸다. 이 결과로부터, Si의 함량과 용점과는 양호한 직선 관계가 있으며, 다음(9)식으로 표현할 수 있다. 이것은 Si의 함량이 증가할수록 용점이 감소하므로, 동일한 입열량에서도 더 낮은 온도에서 액상으로 되기 때문에, Si 함량이 높을수록 더 많은 액상이 형성되므로, 너깃직경이 좀 더 클 수 있는 것을 의미한다.

$$M.P.(^{\circ}C) = -14.8Si(wt.%) + 513.5 \tag{9}$$

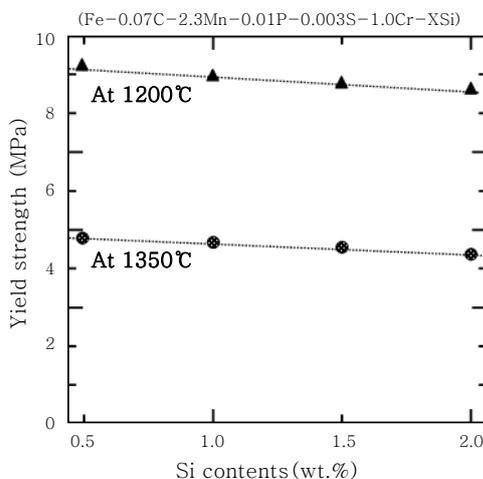


Fig. 8 High yield strength with Si content using JmatPro v-5

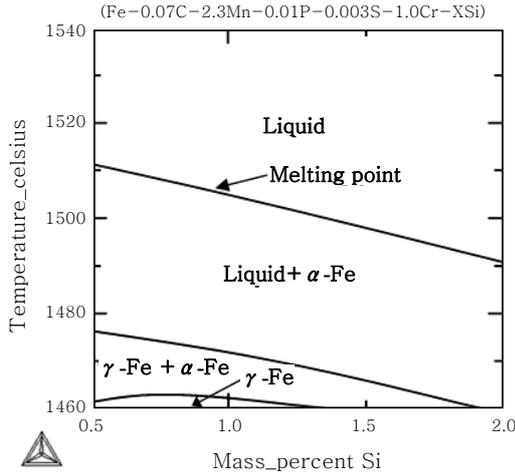


Fig. 10 Calculated quasi-binary phase diagram using Thermo-Calc TCW5 program (Data base : TCFE6)

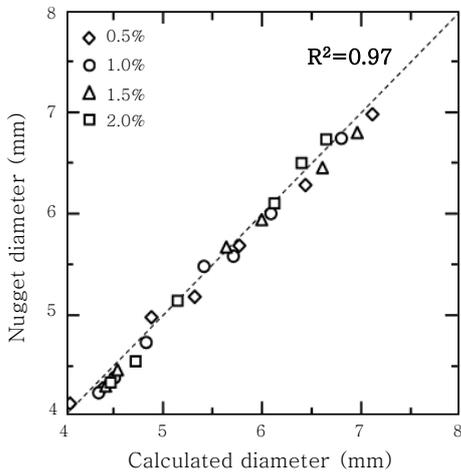


Fig. 11 Correlation between calculated diameter and measured diameter

너깃직경과 입열량과의 관계식인 (8)식에 용점을 반영한 새로운 너깃직경 예측식을 구하면 다음 (10)식과 같다.

$$N.D.(mm) = 0.11Q(J) - 0.0031 M.P.(^{\circ}C) + 0.32 \tag{10}$$

Fig. 11은 (9)식의 예측식으로부터 구한 너깃직경과 실제 측정된 너깃직경 사이의 상관관계를 플롯한 것이다. (8)식의 상관계수(R^2)가 0.94인 반면 용점을 고려한 (9)식의 상관계수가 0.97인 것으로부터, 입열량과 용점을 복합적으로 고려한 너깃직경 예측식인 (9)식이 더 정확성이 높은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

DP강의 전기저항점용접부에서 너깃직경에 미치는 Si 함량과 용접조건의 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접전류의 증가에 따라 너깃직경이 직선적으로 증가하고, 그 증가하는 기울기는 Si의 함량이 높을수록 컸다.
- 2) Si의 함량이 증가할수록 전기저항은 직선적으로 증가하였고, 반면에 용점은 직선적으로 감소하였다.
- 3) 고유저항(ρ), 통전면적(S) 및 통전거리(L)를 실험으로 측정하여 저항($R = \rho \cdot L/S$)을 구하고, 입열량($Q = I^2Rt$) 계산하여 너깃직경과 상관관계를 검토한 결과, 상관계수(R^2)가 0.94인 양호한 직선관계를 나타내었다.
- 4) Si의 함량 증가에 따라 용점이 변화하는 것을 착안하여 입열량과 용점을 고려한 너깃직경 예측식 ($N.D.(mm) = 0.11Q(J) - 0.0031 M.P.(^{\circ}C) + 0.32$)은 상관계수가 0.97인 양호한 직선관계가 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 (주)POSCO와 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 선도연구센터육성사업 학제간융합분야(NCRC)로부터 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다 (2007-0161-004).

참 고 문 헌

1. DuYoul Choi and YoungGon Kim : Trend of Joining Technology for Automotive Sheet Steels, Journal of KWJS, **27-2** (2009), 125-126 (in Korean)
2. Hatsuhiro OIKAWA, Gen MURAYAMA, Tatsuya SAKIYAMA, Yasuo TAKAHASHI and Tadashi ISHIKAWA : Resistance Spot Weldability of High Strength Steel (HSS) Sheets for Automobiles, Nippon Steel Technical Report, **95** (2007), 40-45
3. Yongjoon Cho and Sehun Rhee : Primary Circuit Dynamic Resistance Monitoring and its Application to Quality Estimation during Resistance Spot Welding, Welding Journal, **81-6** (2002), 104s-111s
4. S.C.A. Alfaro, J.E. Varga, M.A. Wolff and L.O. Vilarinho : Comparison between AC and MF-DC resistance spot welding by using high speed filming, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, **24-1** (2007), 333-339
5. S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, E. Ilhan : Welding time effect on mechanical properties of automotive

- sheets in electrical resistance spot welding, *Materials and Design*, **29-7** (2008), 1430
6. P.K. Ghosh, P.C. Gupta, Ram Avtar and B.K. Jha : Resistance Spot Weldability of Phase Steel Sheet Comparatively Thick C-Mn-Cr-Mo Dual, *ISIJ International*, **30-3** (1990), 235-237
 7. R. G. DAVIES : Influence of Silicon and Phosphorous on the Mechanical Properties of Both Ferrite and Dual-Phase Steels, *METALLURGICAL TRANSACTIONS A*, **10A** (1979), 114-117
 8. H. Saleh and R. Priestner : Retained austenite in dual-phase silicon steels and its effect on mechanical properties, *Journal of Materials Processing Technology*, **113** (2001), 588-592
 9. Minghui CAI, Hua Ding, Youngkook Lee, Zhengyou Tang and Jiansu Zhang : Effects of Si on Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Hot-rolled Ferrite and Bainite Dual-phase Steels, *ISIJ International*, **51-3** (2011), 478-480
 10. K.C. Kim, K.H. Lee and R.W. Chang : Resistance Spot Weldability of Cold Rolled HT80 Grade Steel for Automobile Application, *Journal of KWJS*, 10-1 (1992), **53-57** (in Korean)
 11. Taban E , Deleu E, Dhooge A and Kaluc E, Laser welding of modified 12% Cr stainless steel: Strength, fatigue, toughness, microstructure and corrosion properties, *Mater Design*, **30** (2009), 1197
 12. S.A.A. Akbari Mousavi and A.R. Sufizadeh : Metallurgical investigations of pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 321 and AISI 630 stainless steels, *Materials and Design*, **30** (2009), 3154-3156
 13. V. H. LÓPEZ-CORTÉZ and F. A. EYES-VALDÉS : Understanding Resistance Spot Welding of Advanced High-Strength Steels, *Welding Journal*, **87** (2008) 37-39
 14. S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, E. Ilhan : Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding, *Materials and Design*, **29-7** (2008), 1428
 15. Kaxuo HOSHINO, Hisayoshi KANEZASHI and Keiji OSAKI : Effect of Electrical Resistance on Penetration of Spot Welding in High Strength Stainless Steels, *Transactions ISIJ*, **23** (1983), 1087
 16. OTANI Tadayuki and SASABE Ken : Characteristics of Resistance Spot Welds of Ultra-fine Grained High Strength Steel Sheets, *Journal of JWS*, **21-2** (2003), 246
 17. IKEDA Rinsei, OKITA Yasuaki, ONO Moriaki, YASUDA Koichi and TERASAKI Toshio : Development of Advanced Resistance Spot Welding Process Using Control of Electrode Force and Welding Current during Welding, *Journal of JWS*, **28-1** (2010), 144
 18. HeeSeok Chang and HyoChul Kwon : In-Process Monitoring of Micro Resistance Spot Weld Quality using Accelerometer, *Journal of KWJS*, **29-1** (2011), 116-117 (in Korean)
 19. F. Khodabakhshi, M. Kazeminezhad and A.H. Kokabi : Mechanical properties and microstructure of resistance spot welded severely deformed low carbon steel, *Materials Science and Engineering A*, **529** (2011), 238-240