

Trip형 고장력강판의 인장성질 및 점용접성

강창룡, 김효정, 김창규, 이병우, 이문용*, 이규현*, 김태일*

부경대학교 공과대학 금속공학과
*성우금속(주), 기술연구소

Tensile properties and Spot Weldability of Trip High Strength Steel Sheet

C.Y.Kang, H.J.Kim, C.G.Kim, B.W.Lee, M.Y.Lee, G.H.Lee, T.I.Kim

Dept. of Metall. Eng., Pukyong National University, Pusan, 608-739

*Technical Institute, Sungwoo Metal Co., Ltd., Pusan.

ABSTRACT

The effects of retained austenite and carbon content in the retained austenite on the tensile strength-elongation balance and spot weldability of TRIP high strength steel sheet have been investigated.

The retained austenite of granular type increased with increasing intercritical annealing and austempering temperature, and film type was increased with the increase of austempering time. The volume fraction of retained austenite increased with decreasing intercritical annealing temperature, and the maximum value was obtained at austempering temperature of 400°C. The values of tensile strength-elongation balance increased with decreasing intercritical annealing temperature and maximum value was obtained at austempering temperature of 400°C. The maximum value of tensile strength-elongation balance was obtained at a retained austenite content of about 12%. Tensile shear strength of the specimens with retained austenite was higher than that of the normalizing specimens. With increasing welding current and time, the tensile shear strength and nugget diameter increased, while nugget thickness showed the peak value and then decreased. The optimum range of welding condition at the given welding pressure of 350kgf was 7~11kA and 10~15 cycles.

1. 서 론

자동차용 고강도 강판은 60년대 말 미국에서 자동차 안전 규제에 대한 관련법이 제정된 이후 이에 대한 대응책으로 개발되기 시작한 후¹⁾, 두 차례의 석유파동과 함께 연비저감 및 환경문제 등에 대처하기 위한 차체 경량화의 측면에서 주요 연구 대상이 되어 왔다.

현재까지 개발된 자동차용 고장력 강판중 TRIP(TRIP=Transformation Induced Plasticity)형 강판은 TRIP거동에 따른 높은 강도와 우수한

연성을 얻을수 있기 때문에²⁾ 강도-연성 바란스가 대단히 뛰어나는 뿐만 아니라, roll quenching line으로 제조가능하여 많은 연구³⁻¹²⁾의 대상이 되고 있고, 최근에는 자동차의 bumper와 door impact beam 등에 적용하기 위한 연구도 진행되고 있다.

자동차의 제조공정은 크게 성형, 용접, 조립 및 도장 공정으로 분리되고, 자동차의 차체는 300개 이상의 박강판 프레스 성형품을 약 3000점 이상의 점용접과 수십 개소의 아크 및 브레이징 용접, 그리고 볼트 체결 등의 기계적 결합에 의해

일체형으로 조립되고 있다. 따라서 자동차용 강판은 강도와 성형성 뿐만 아니라 용접성도 중요하다. 그러나 현재까지 진행된 TRIP형 강판에 대한 연구는 잔류오스테나이트에 미치는 열처리 및 합금원소의 영향^{1,2)} 잔류오스테나이트의 TRIP거동³⁻⁷⁾ 등에 관하여 폭넓게 수행되어 왔지만, 용접성을 관련시켜 연구한 논문은 적은 실정이다.

따라서 본 연구는 높은 강도와 우수한 연성을 갖는 TRIP형 고장력강판의 개발을 위한 기초 자료를 얻기 위한 목적에서 Fe-C-Mn-Si의 화학조성에 P가 소량 첨가된 강을 제조한 후 2상영역 열처리 및 오스템퍼링 조건 변화에 따른 미세조직과 잔류오스테나이트 변화를 정성 및 정량 조직학적으로 규명함과 동시에 이들 변화가 강도-연성 발란스 및 점용접부의 전단인장강도 등에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료 및 열처리

시료는 고주파 진공용해로에서 표1과 같은 화학조성을 갖는 시료를 용해 제작한 후 1200°C에서 균질화 처리한 다음 열간 및 냉간압연을 거쳐, 최종 1.2mm 두께의 판재로 만든 후 시험편으로 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of the specimen (Wt.%)

| C | Mn | Si | P | Fe |
|-------|------|------|-------|-----|
| 0.237 | 1.98 | 1.45 | 0.098 | bal |

한편, 열처리는 시료를 920°C에서 10분간 노르말라이징 한 다음, 열팽창시험에서 얻은 A₁ 및 A₂ 변태점을 참고로 하여 760~840°C사이의 온도영역에서 2상영역열처리 한 다음 즉시 350~450°C로 유지된 염욕에 투입하여 60분까지 유지시간을 달리하는 오스템퍼링 한 다음 수냉 하였다.

2.2 미세조직 관찰 및 잔류오스테나이트 측정

열처리된 시료는 페라이트 기지에 마르텐사이트와 배이나이틱-페라이트(Bainitic ferrite) 및 잔류

오스테나이트 등이 공존하는 다상 혼합조직을 갖기 때문에 각 상을 구분하기 위하여 kalling etchant 와 Na₂S₂O₈가 함유된 부식액을 개발하여 부식 한 다음, 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 조사하였다. 한편, 잔류오스테나이트는 시료를 박막법에 의해 제작한 다음 투과전자 현미경(Hitach E 13-800)을 사용하여 가속 전압 200kV에서 관찰하였다. 한편, 2상영역 열처리후 오스템퍼링처리 한 시료의 잔류오스테나이트 측정은 X선 회절시험기에서 Co-K α 선을 이용하여 35kV, 17mA의 조건으로 회절시험하였을 때 얻은 회절선도로 부터 Miller 법에 따라 구하였다.

2.3 인장시험

시험편을 ASTM E-8의 규격으로 제작한 다음 2상영역 열처리 및 오스템퍼링 조건을 달리하는 열처리 후 인장시험기를 사용하여 cross head speed를 1mm/min.로 정한 다음 인장시험하여 강도-연성 발란스값을 구하였다.

2.4 용접부 시험

점용접된 시료의 전단인장강도 측정은 노르말라이징 한 시료와 열처리된 시료를 JIS Z 3136의 규정에 따라 Table 2와 같은 조건으로 점용접 후 인장시험과 동일한 방법에 의해 인장시험하여 측정하였다. 한편, 시료의 점용접부 미세조직 관찰은 광학현미경으로 관찰하였고, 점용접 조건변화에 따른 nugget크기 변화는 점용접된 시료를 평면에 수직으로 절단한 다음 광학현미경과 미소경도시험기를 사용하여 측정하였다.

Table 2 Welding condition of spot weld

| Welding current | Welding time (Cy.) | Holding time (Cy.) | Pressure (kgf/spot) |
|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 4~12kA | 5~30 | 10 | 350 |

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직변화

Photo. 1은 노르말라이징한 시료를 760~840°C사

Photo. 1 SEM micrographs of austenite specimens at 400°C showing morphology of the retained austenite with changing in the intercritical annealing temperature. Intercritical temperature : a) 760°C b) 800°C c) 840°C

이의 온도에서 2상영역 열처리 후 400°C에서 오스테퍼링하였을 때 얻은 미세조직을 나타낸 주사전자현미경 사진이다. 세시료 모두 입상 및 필름상의 잔류오스테나이트가 공존하고 있지만, 2상영역 열처리 온도가 상승할수록 필름상의 잔류오스테나이트양이 증가하고 있음을 알 수 있다

Photo. 2는 시료를 800°C에서 2상영역열처리 후 여러 온도에서 오스테퍼링 하였을 때 얻은 미세조직을 주사전자현미경에 의해 나타낸 것이다. 오

스테퍼링 온도가 상승할수록 배이나이틱-페라이트의 양이 감소할 뿐만 아니라 배이나이틱-페라이트 라스 사이에 존재하는 필름형태의 잔류오스테나이트도 감소하지만, 입상형태의 잔류오스테나이트는 증가하고 있다.

한편 TRIP형 강관내 존재하는 잔류오스테나이트에 관한 연구에 의하면, 잔류오스테나이트는 페라이트 입내에 고립되어 존재하는 형(1 μ m크기)과 페라이트 입계, 특히 3중점 등에 존재하는 블록형

Photo. 2 SEM micrographs of the austempered specimens at various temperature after intercritical annealing temperature. Austempering temperature : a) 350°C b) 400°C c) 450°C

Photo. 3 TEM micrographs showing the morphology of the retained austenite obtained by the austempering at 400°C after intercritical annealing at 760°C
 a) granular type b) film type c) bar type

(2 μ m크기)의 입상과 베이나이틱-페라이트 또는 마르텐사이트 라스 사이에 존재하는 필름상 및 페라이트 입내에 존재하는 봉상의 3가지가 있다고¹³⁾ 알려져 있고, 또한 Matsumura 등¹²⁾은 0.14%C-1.46%Si-1.25%Mn강을 오스테나이트 단상영역에서 열처리 후 오스템퍼링 하면 베이나이틱-페라이트 라스 사이에서 필름상의 잔류오스테나이트가 존재하지만, 2상영역열처리 후 오스템퍼링하면 입상의 잔류오스테나이트가 존재한다고 보고하고 있다.

본 연구에서는 2상영역열처리 후 오스템퍼링 할 때 생성되는 잔류오스테나이트 형상을 알아보기 위해 시료를 760°C에서 2상영역열처리 후 400°C에서 오스템퍼링 하였을 때 얻은 잔류오스테나이트를 투과전자현미경에 의해 Photo. 3에 나타내었다. 사진 a)에서는 잔류오스테나이트가 페라이트의 입내와 입계, 특히 입계의 3중점 등에서 입상으로 존재하고 있지만, b)에서는 베이나이틱-페라이트 라스 사이에서 필름상으로 존재하고 있고, c)에서는 페라이트 입내에서 봉상으로 존재하고 있음을 알 수 있다.

3. 2 잔류오스테나이트 변화

Fig. 1은 시료를 여러온도에서 2상영역 열처리 한 다음 400°C에서 오스템퍼링 하였을 때 얻은 잔류오스테나이트를 나타낸 것이다. 2상영역 열처

리 온도가 낮을수록 잔류오스테나이트의 양이 많아지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 2상영역내에서 오스테나이트의 양은 2상영역 열처리 온도가 낮을수록 적어지기 때문에 오스테나이트 내 탄소농도는 높게 되고 그결과 오스테나이트의 안정도가 증가되어 오스템퍼링 후 수냉시 마르텐사이트로 변태하지 않고 잔류하기 때문이다.

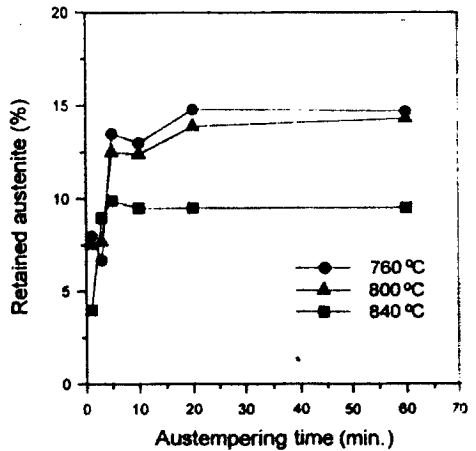


Fig. 1 Effect of intercritical annealing temperature on the volume fraction of retained austenite obtained after austempering at 400°C

Fig. 2는 800°C에서 2상영역 열처리 후 여러 온도에서 오스테퍼링하였을 때 얻은 잔류오스테나이트를 나타낸 것이다. 오스테퍼링 시간이 길어질수록 잔류오스테나이트의 양이 증가하고 있다. 이와 같은 이유는 TRIP강에서 잔류오스테나이트는 오스테퍼링할 때 오스테나이트 입계에서 핵생성되어 성장하는 베이나이트-페라이트가 미변태된 주위의 오스테나이트내로 탄소를 배출하게 되고 그 결과 탄소농도가 높은 오스테나이트는 안정도가 높게 되어 이후 수냉시 마르텐사이트로 변태하지 않고 잔류하기 때문에 생성하게 되는데, 오스테퍼링처리 시간이 길어지면 Si가 베이나이트-페라이트의 성장을 촉진하고" 이로 인하여 오스테나이트내 탄소농도는 더욱 더 높아지게 되기 때문에 안정도가 더욱더 증가되어 잔류오스테나이트가 많아진다고 생각된다.

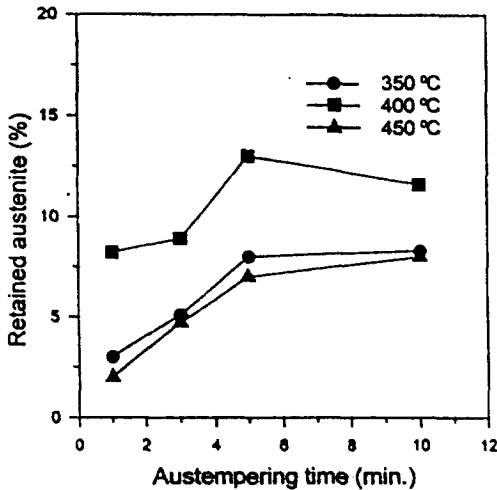


Fig. 2 Variation of the volume fraction of the retained austenite with the austempering after intercritical annealing at 800°C

3. 3 강도-연성 발란스 변화

Fig. 3은 여러 온도에서 2상영역 열처리 한 다음 400°C에서 오스테퍼링 후 인장시험하였을 때 얻은 강도-연성 발란스 변화를 나타낸 것이다. 2상영역 열처리 온도가 낮을수록 강도-연성 발란

스값이 높게 나타나고 있다. 이것은 Fig.1의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 2상영역 열처리 온도가 낮을수록 잔류오스테나이트가 많이 생성되어 TRIP거동의 효과가 크게 나타났기^{13, 15)} 때문이다.

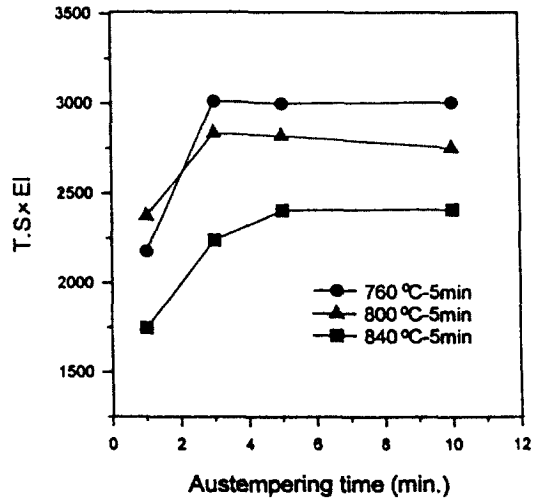


Fig. 3 Change in T.S. x El. as a function of the austempering time at 400°C after intercritical annealing at various temperature

Fig. 4는 760°C에서 2상영역 열처리 한 다음 여러 온도에서 오스테퍼링 후 인장시험 하였을 때 얻은 강도-연성 발란스 변화를 나타낸 것이다. 오스테퍼링 시간이 길어짐에 따라 강도-연성 발란스 값이 증가하고 있고, 또한 400°C에서 오스테퍼링 처리한 경우가 가장 높은 강도-연성 발란스 값을 나타내고 있다. 이와같은 이유는 Fig.2에서 알 수 있는 바와 같이 오스테퍼링 시간이 증가하면 잔류오스테나이트의 양이 많아지기 때문에 TRIP 효과가 크게 나타나기 때문이고, 400°C에서 가장 높은 값을 나타내는 이유 역시 400°C의 경우가 가장 많은 잔류오스테나이트가 생성되기 때문이다.

Fig. 5는 TRIP거동을 나타내는 강에서 잔류오스

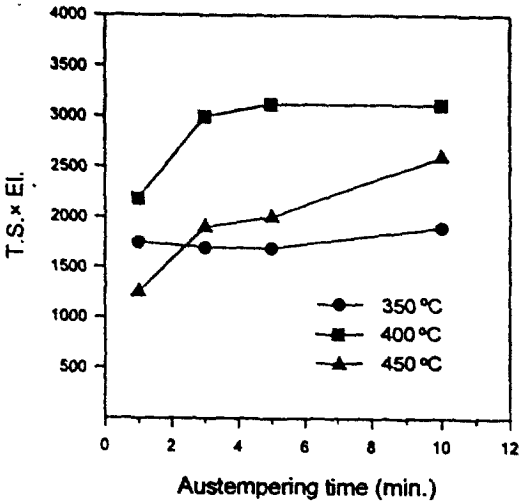


Fig. 4 Change in T.S. x El. with the austempering time at various temperature after intercritical annealing at 760°C

테나이트가 강도-연성バランス에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3과 4의 시험에서 얻은 강도-연성バランス값을 잔류오스테나이트에 대해 나타낸 것이다. 강도-연성バランス값은 잔류오스테나

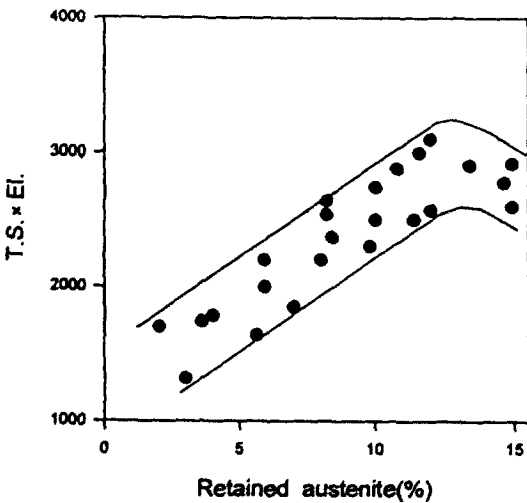


Fig. 5 Effect of the retained austenite on the T.S. x El. of specimens obtained by the change of various heat treatment path

이트의 양이 증가함에 따라 직선적으로 증가하다가 약 12%에서 최대값을 나타낸 후 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 잔류오스테나이트의 양이 약 12%까지는 연신율이 잔류오스테나이트에 지배되는데 기인되어 강도-연성 밸런스값은 증가하지만 12% 이상이 되면 TRIP 거동에 따른 연신율의 증가 효과는 비록 커지만 잔류오스테나이트가 많아짐에 따른 강도 감소가 상대적으로 더욱더 크기 때문에 강도-연성 밸런스값이 감소된다고 생각된다.

Fig. 6은 강도-연성 밸런스값에 미치는 잔류오스테나이트의 영향을 보다 상세히 알아보기 위하여 인장강도와 연신율을 잔류오스테나이트에 대해 나타낸 것이다. 인장강도는 잔류오스테나이트의 양이 증가함에 따라 감소하고 있는데 반하여, 연신율은 직선적인 비례관계로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 TRIP형 강에서는 연신

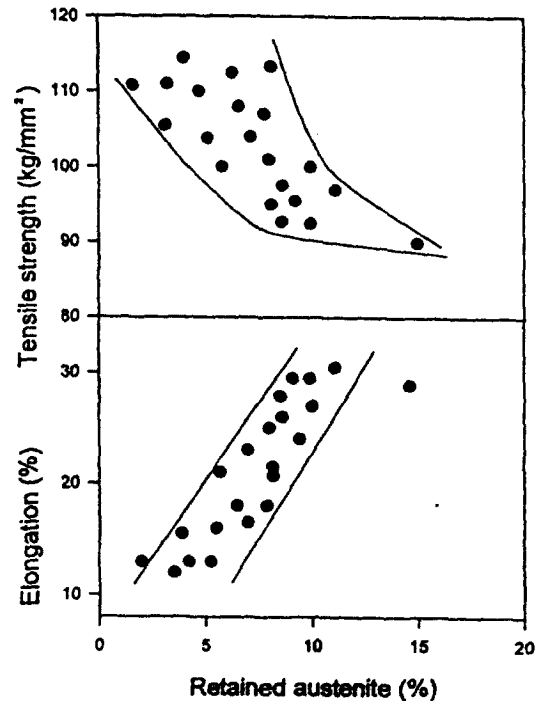


Fig. 6 Effect of the retained austenite on the tensile strength and elongation of austempered specimens after intercritical annealing

율이 잔류오스테나이트에 강하게 지배되는데 기 인되어 강도-연성 밸런스 값이 지배되고 있음을 알 수 있다.

3. 4 전단인장강도 변화

Fig 7은 2상영역 열처리 한 다음 오스템퍼링처 리에 의해 잔류오스테나이트를 갖는 시료와 노르 말라이징 한 시료에 대하여 용접전류를 변화시켜 용접한 후 인장시험하였을 때 얻은 전단인장강도 값을 나타낸 것이다. 두시료 모두 용접전류 증가 와 더불어 전단인장강도 값은 용접전류가 6KA까 지는 빠른속도로 증가하지만 그 이상이 되면 비 교적 완만하게 증가하고 있음을 알 수 있고, 또한 2상영역 열처리 후 오스템퍼링처리에 의해 잔류 오스테나이트를 갖는 시료가 노르말라이징한 시 료보다 용접전류가 높은 영역에서 약간 높은 값 을 나타내고 있다. 이와같은 이유는 용접전류가 증가하면 용접시 입열량이 증가하여 용착부인 nugget의 크기가 증가하기 때문이고, 잔류오스테 나이트를 갖는 시료의 전단인장강도 값이 높은 이유는 잔류오스테나이트내 탄소농도가 노르말라 이징한 시료에 비해 대단히 높기 때문에 점용접 성이 낮을 것으로 예상되지만, 상대적으로 기지조

직을 이루고 있는 베이나이트-페라이트는 노르말 라이징 한 시료보다 탄소농도가 현저히 적을 뿐 만 아니라, 탄소농도가 높은 잔류오스테나이트에 비해 체적율이 많기 때문에 오히려 점용접성은 증가된다고 생각된다. 한편, 용접전류가 11KA이 상 이 되면, 강도의 증가는 기대할 수 있지만 입열량 이 과다하여 indentation이 깊게 되고 spatter가 발 생하기 때문에 용접부 품질과 생산성 측면에서 적정 시공조건은 되지 못한다.^{16,17)}

Fig. 8은 용접시간을 변화시켜 점용접한 시료의 전단인장강도 값을 나타낸 것이다. 두시료 모두 용접시간의 증가와 더불어 전단인장강도 값이 증 가하고 있고, 또한 잔류오스테나이트를 갖는 시료 의 전단인장강도 값이 높게 나타났다. 이것은 용 접시간이 증가하면 용착부인 nugget의 크기가 증 가하기 때문이고, 잔류오스테나이트를 갖는 시료 가 전단인장강도값이 높은 이유는 노르말라이징 한 시료보다 탄소농도가 높은 잔류오스테나이트 를 함유하고 있지만, 상대적으로 탄소농도가 낮은 베이나이트-페라이트의 체적분율이 월등히 높기 때문에 점용접성이 오히려 향상되기 때문이라 생 각된다.

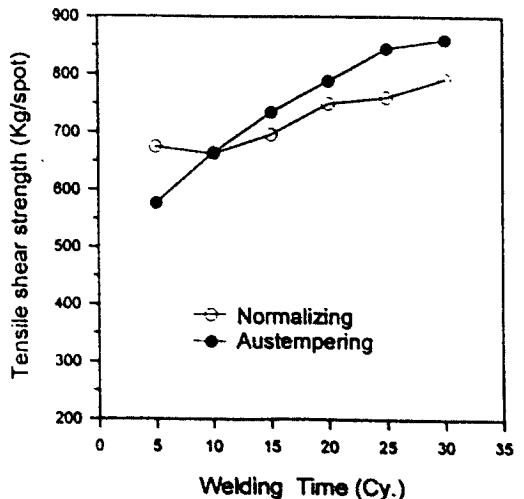
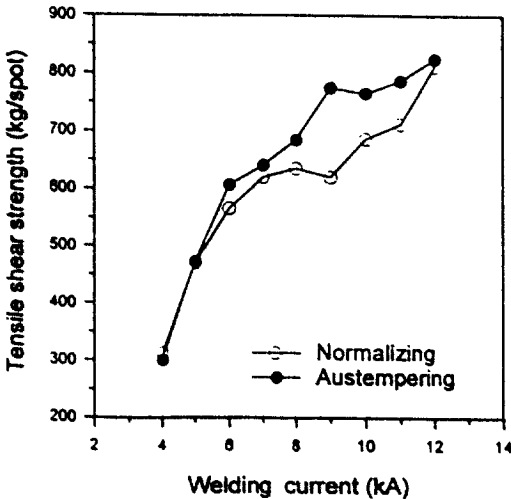


Fig. 7 Effect of welding current on the tensile shear strength obtained after spot weld under 11Cy, 350kgf.

Fig. 8 Effect of welding time(cycle) on the tensile shear strength obtained after spot weld under 9kA, 350kgf.

Fig. 9는 2상영역 열처리 한 다음 여러 온도에서 오스테퍼링 한 시료를 점용접하여 인장시험하였을 때 얻은 인장전단강도값을 나타낸 것이다. 400°C에서 오스테퍼링 한 시료가 가장 높은값을 나타내고 있고, 또한 오스테퍼링 시간이 증가함에 따라 전단인장강도값이 증가하고 있다. 이와같은 이유는 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 오스테퍼링 온도가 400°C인 경우가 탄소농도가 높은 잔류오스테나이트 량이 가장 많고, 또한 오스테퍼링 시간이 증가함에 따라 잔류오스테나이트의 양이 많아지지만, 상대적으로 기지조직인 베이나이트-페라이트의 탄소농도는 더욱 더 낮아질 뿐만 아니라 체적분을 또한 잔류오스테나이트에 비해 월등히 높기 때문에 전단인장전단강도 값이 높아진다고 생각된다.

3. 5. 용접부의 야금학적 고찰

Photo. 4는 2상영역 열처리 한 다음 오스테퍼링 후 점용접한 시료의 용접부 미세조직을 나타낸 사진이다. nugget부는 사진 b)에서 할 수 있는 바와 같이 주로 마르텐사이트 조직에 소량의 베이나이트 조직 등으로 이루어져 있고, 열영향부는 베이나이트 조직에 소량의 페라이트와 마르텐사

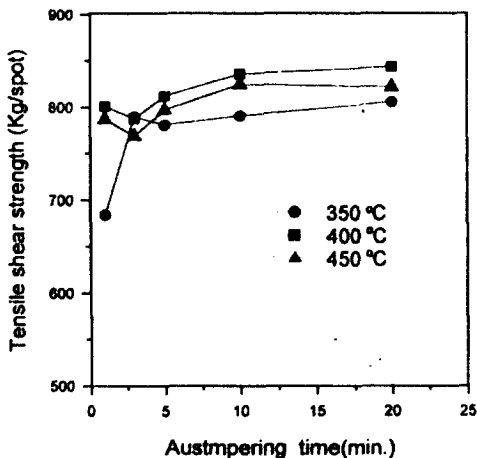


Fig. 9 Effect of austempering time and temperature on the tensile shear strength obtained after spot weld under 9kA, 11Cy and 350kgf.

Photo. 4 Optical micrographs of spot welded specimens by welding condition of 9kA, 15Cy and 350kgf. a) Spot weld cross section b) High magnification of a)

이트 등이 존재하고 있으며, 모재부는 배이나이트-페라이트 조직에 마르텐사이트 및 잔류오스테나이트 등이 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 2상영역열처리 후 오스텨퍼링처리에 의해 잔류오스테나이트를 갖는 시료와 노르말라이징 한 시료의 용접전류 변화에 따른 nugget의 직경 및 두께 변화를 나타낸 것이다. nugget 직경은 용접전류가 증가함에 따라 증가하고 있다. 그러나 nugget 두께는 약간 증가하다 변화가 없거나 또는 약간 감소하고 있는 경향을 나타내고 있는데, 이는 과도한 에너지로 용접할 경우 전극압력에 의한 indentation이 깊어지기 때문이다.^{16,17)}

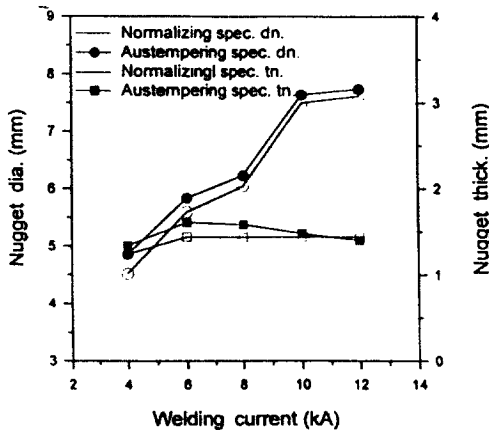


Fig. 10 Effect of welding current on the nugget formation obtained after spot weld under 11Cy, 350kgf.

Fig. 11은 nugget의 직경 및 두께 변화에 미치는 용접시간의 영향을 조사하여 나타낸 것이다. 용접시간이 길어짐에 따라 nugget 직경은 증가하다 용접시간이 15cycle 이상이 되면 거의 변화없이 일정한 크기를 나타내고 있는데 반하여, 두께는 용접시간의 증가와 더불어 증가하다 약간 감소하고 있는 경향을 나타내고 있다. 이와같이 용접시간이 길어지면 nugget두께가 증가하다 감소하는 이유는 용접시간이 특정시간 이상이 되면, 과도한 에너지가 공급되어 전극압력에 의한 indentation이

깊어지기 때문이다.^{16,17)}

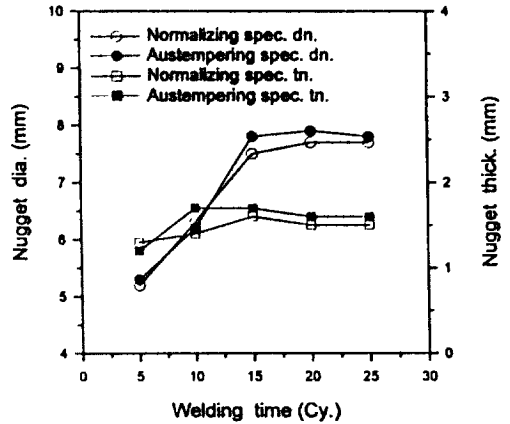


Fig. 11 Effect of welding time(cycle) on the nugget formation obtained after spot weld under 9kA, 350kgf.

4. 결론

Fe-C-Si-Mn-P조성을 갖는 강판을 2상영역열처리 및 오스텨퍼링 조건을 변화시켜 열처리 한 후 열처리 조건 변화에 따른 미세조직 및 잔류오스테나이트의 변화를 조사하고, 동시에 이들 변화가 강도-연성 밸런스 및 점용접성에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2상영역 열처리 및 오스텨퍼링 온도가 증가하면 입상의 잔류오스테나이트가 가하고, 오스텨퍼링 시간이 길어지면 필름상의 잔류오스테나이트가 증가 하였다. 또한 잔류오스테나이트의 양은 2상영역 열처리 온도가 낮아질수록 많아지고, 오스텨퍼링 온도가 400℃에서 가장 많은 양의 잔류오스테나이트가 얻어졌다.
- 2) 강도-연성 밸런스값은 잔류오스테나이트의 양이 많아지는데 기인되어 2상영역 열처리 온도가 낮을수록 높고, 또한 오스텨퍼링온도가 400℃에서 가장 높은 값을 나타내었다.
- 3) Trip형 강판에서 강도-연성 밸런스 값은 연성이 잔류오스테나이트에 지배되는데 기인되어 영향을 받게 되고, 잔류오스테나이트의 양이 약 1

2%일 때 최대값을 나타낸 후 감소하였다.

4) 전단인장강도값은 2상영역 열처리 후 오스텐 퍼링처리에 의해 잔류오스테나이트를 갖는 시료가 노르말라이징한 시료보다 높게 나타났다. 또한 용접전류 및 시간이 증가함에 따라 전단인장강도와 nugget의 직경은 증가하는데 반하여 두께는 증가하다 감소 하였다.

5) 잔류오스테나이트를 갖는 Trip형 고장력강판인 본 시료의 적정 용접조건 범위는 용접 가압력 350kgf에서 용접전류는 7~11KA, 용접시간 10~15cycle사이의 범위에서 얻어졌다.

후 기

본 연구는 1997년도 포항종합제철주식회사의 연구비 지원으로 수행된 연구결과의 일부로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 武智 : 自動車用 高強度 鋼板 の 製造技術, 鐵と鋼, vol. 63, 9(1982), 1244.
- 2) V. F. Zackey, E. R. Parker D.Fahr, R. Bush : Trans. ASM, Vol. 60 (1967), 252.
- 3) O. Matsumura, Y. Sakuma, H. Takechi : Trans. ISIJ, Vol. 27(1987), 570.
- 4) 小松原望, 今井規雄, 國重和俊 : CAMP-ISIJ, Vol. 6 (1993), 1702.
- 5) Y. Sakuma, O. Matsumura, H. Takechi : Metallurgical Trans.A, Vol. 22A (1991), pp. 489-498.
- 6) 水井直 : CAMP-ISIJ, Vol. 6 (1993), pp.1700.
- 7) O. Matsumura, Y. Sakuma, Y. Ishii, J. Zhao : ISIJ International, Vol. 32 (1992), No.10, pp. 1110-1116.
- 8) 今井規雄, 小松原望, 國重和俊 : CAMP-ISIJ, Vol. 6(1993), pp. 754.
- 9) 杉本公一, 小林光征, 橋本俊一 : 日本金屬學會誌, 第5卷, 第6, (1990), pp.657-663.
- 10) R.L. Miller, : Trans. ASM, 57 (1964), pp. 892-899.
- 11) 杉本公一, 小林光征, 松島英浩 : CAMP-ISIJ, 6 (1993), pp. 758.
- 12) O. Matsumura, Y. Sakuma, H. Takechi : ISIJ International, Vol. 32 (1992), No. 9, pp. 1014-1020.
- 13) D. A. Porter, K. E. Easterling : Phase Transformations in Metals and alloy, pp. 415-416.
- 14) 姜昌龍, 成章鉉 : 熱處理學會誌, 3, 2(1990), pp. 101-111.
- 15) 文元振, 姜昌龍, 成章鉉 : 大韓金屬學會誌, 35, 3 (1997), 978.
- 16) 김기철, 이기호, 장태웅 : 대한용접학회지, 10, 1 (1992), 52.
- 17) 西 : 自動車用高張力薄鋼板のスポット 溶接性評價研究, 製鐵研究, 第 307 號(1982), 56.