

용접열사이클 재현에 의한 SS400강 및 STS304강의 특성 평가 - 제1보: 기계적 특성 및 조직

안석환* · 정정환** · 남기우***

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 대학원 재료공학과

***부경대학교 신소재공학부

Evaluation of Characteristic for SS400 and STS304 steel by Weld Thermal Cycle Simulation - 1st Report: on the Mechanical Properties and Microstructure

SEOK-HWAN AHN*, JEONG-HWAN JEONG** AND KI-WOO NAM***

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Graduate School of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Weld Thermal Cycle Simulation 용접열사이클재현, Tensile Strength 인장강도, Thermal Stress 열응력, Hardness 경도

ABSTRACT: The welding methods have been applied to the most structural products used in the automobile, ship construction, and construction. The structure steel must have sufficient strength of structure; however, the mechanical properties of the welded part changes when it is welded. Therefore, the stability or life of the structure may be affected by the changed mechanical properties. The mechanical properties of the welded part must be examined in order to ensure the safety of structure. In this research, the SS400 steel and the STS304 steel were used to estimate the mechanical properties of the HAZ by weld thermal cycle simulation. In this study, the materials were used to examine the weld thermal cycle simulation characteristic, under two conditions: the drawing with diameter of $\Phi 10$ and the residual stress removal treatment. To examine the mechanical properties by the weld thermal cycle simulation, the tensile test was carried out in room temperature. The crosshead speed was 1mm/min.

1. 서 론

현대 산업에 있어서 용접은 자동차, 조선, 건설업 등의 여러 분야에서 구조물 제작의 대부분을 차지하고 있다. 이때 사용되는 구조용 강은 구조물에 필요한 강도 범위를 유지하고 있어야 하는데, 용접부의 국부적인 성질변화에 따른 구조물의 국부적인 기계적 특성변화로 인해 구조물의 안정성이나 수명이 치명적인 영향을 받게 된다(방한서 등, 1997; 안홍조 등, 2000; 오세규와 남기우, 1983; 이상기 등, 2000). 그러므로 이러한 영향을 줄이기 위해서는 사전에 용접부에 대한 재료의 특성 변화에 대한 연구가 필요하다. 용접 중의 가열에 의해 용접금속에 속하는 모재의 각 점은 bond로부터 떨어진 거리에 따라서 여러 가지 온도에 까지 급열, 급냉된다. 이와 같은 용접열영향부의 용접열사이클은 용접성 연구에 중요하게 여겨져 왔다(스즈키와 타무라, 1980; Hannerz, 1985). 따라서 용접열영향부의 여러 온도 구

역에서의 특성을 조사하는 것이 요구된다(Welding Handbook, 1976).

본 연구에서는 구조용 재료로 많이 쓰이는 SS400강과 우수한 용접성과 내식성, 내마모성으로 인해 기계재료나 구조용 재료에 널리 사용되고 있는 STS304강을 사용하여 이들 강들의 실제 용접에 의한 용접 열전도에 의해 형성되는 용접열영향부를 용접열사이클 재현을 통하여 모의하였다. 이와 같은 용접열사이클 재현을 통하여 각각의 목적하는 모의된 여러 가지 최고가열온도에 따른 용접열사이클로부터 형성되는 용접열영향부의 조직 및 기계적 특성을 조사하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 시험편

본 실험에 사용한 재료는 SS400강 및 STS304 오스테나이트 스테인리스강이며 그 화학성분 및 기계적 성질을 Table 1 및 Table 2에 각각 나타낸다.

제1저자 남기우 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산100번지
051-620-1640 namkw@mail.pknu.ac.kr

Table 1 Chemical composition of specimens (wt%)

Material	C	Mn	Si	P
SS400	0.148	0.458	0.213	0.012
STS304	0.04	1.16	0.57	0.02
S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.018	-	-	-	Bal.
0.007	20.32	8.44	0.15	Bal.

Table 2 Mechanical properties of specimens

Material	Yield strength (σ_y , kgf/mm ²)	Tensile Strength (σ_w , kgf/mm ²)	Elongation (%)
SS400 ($\phi 13$)	≥ 24.98	40.79~52	≥ 17
SS400 ($\phi 10$, drawing)	67.92	72.65	7.71
STS304 ($\phi 13$)	≥ 20.09	≥ 53	≥ 40
STS304 ($\phi 10$, drawing)	68.48	79.11	35.68

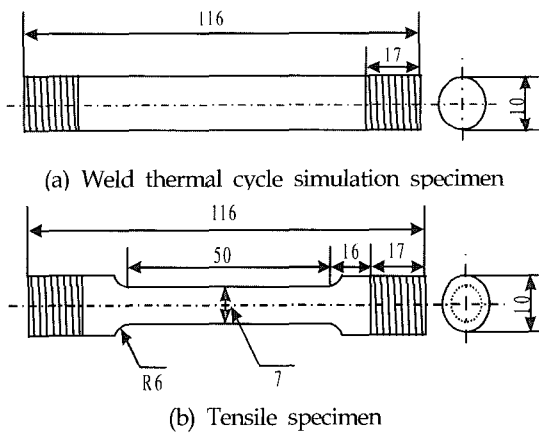


Fig. 1 Shapes and dimensions of specimens (unit : mm)

본 실험에 사용된 $\phi 10$ 봉의 경우, SS400강과 STS304강 모두 $\phi 13$ 로 압연이 되어 나온 것을 $\phi 10$ 로 만들기 위하여 인발을 하여 만들어진 봉으로써, 단면감소율은 약 40%정도 이다. 이와 같은 인발가공에 의한 가공경화로 인해 인장시험의 결과 SS400강 모재는 72.65kgf/mm², STS304강 모재는 79.11kgf/mm²으로 각각 나타났다. 이는 $\phi 13$ 봉의 모재와는 강도 값에서 차이가 나므로 각 재료마다 인발된 시험편과 인발 후 발생한 가공경화의 영향을 제거하기 위한 열처리를 행한 시험편의 두 종류로 하였다. 가공경화에 의한 시험 내부의 응력제거 열처리에 있어서는 SS400강의 경우 750°C에서 30분간 열처리를 한 후 공냉을 실시하였고, STS304강은 1050°C에서 30분간 열처리를 한 후 수냉을 실시하

였다. 실험에 이용된 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 1(a)는 용접열영향부의 용접열사이클 재현 실험에 사용한 시험편의 형상을, Fig. 1(b)는 용접열사이클 재현 후 인장시험에 사용한 인장시험편의 형상을 각각 나타낸다.

2.2 용접열사이클 재현

본 실험에서 사용한 용접열사이클 재현 장치로는 Dynamic System Inc.의 Gleeble 3200을 사용하였다. 용접열사이클 재현온도는 Fig. 2 에서의 용접 열영향부(HAZ)의 온도 영향에 따른 충격에너지 값을 고려하여 Fig. 3과 같은 열 사이클로 용접열사이클 재현 실험을 실시하였다(마루젠주식회사, 1990). 목적온도까지의 도달시간은 3초이며, 목적온도에서 2초간 유지 후 90초간 용접열사이클 재현 장치 속에서 냉각시켰다.

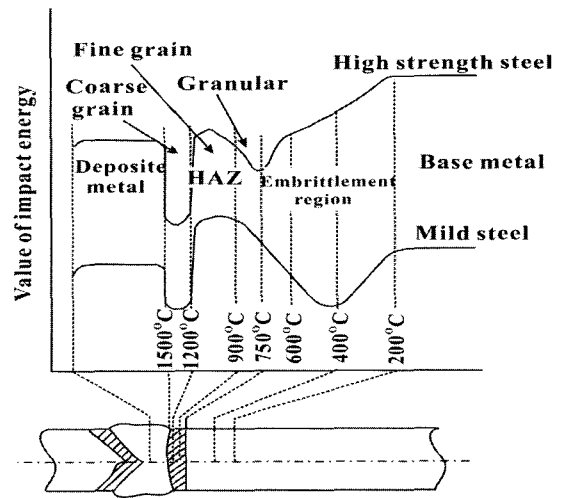


Fig. 2 Impact energy according to temperature of HAZ

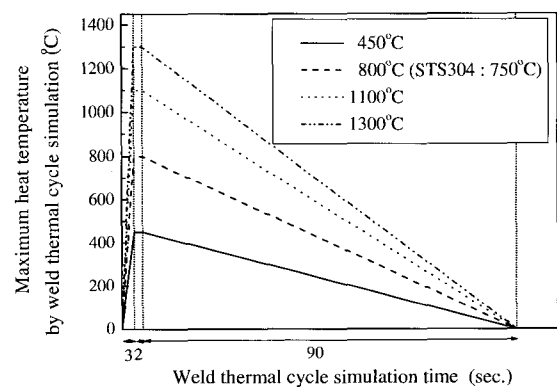


Fig. 3 Heat cycles used in the weld thermal cycle simulation test of SS400 steel and STS304 steel

2.3 조직 관찰 및 인장시험

시험편을 $\phi 10$ 로 절단한 후, 경면 연마하여 에칭시킨 후 광학 현미경으로 조직을 관찰하였다. 또한, 인장시험은 Fig. 1에 나타

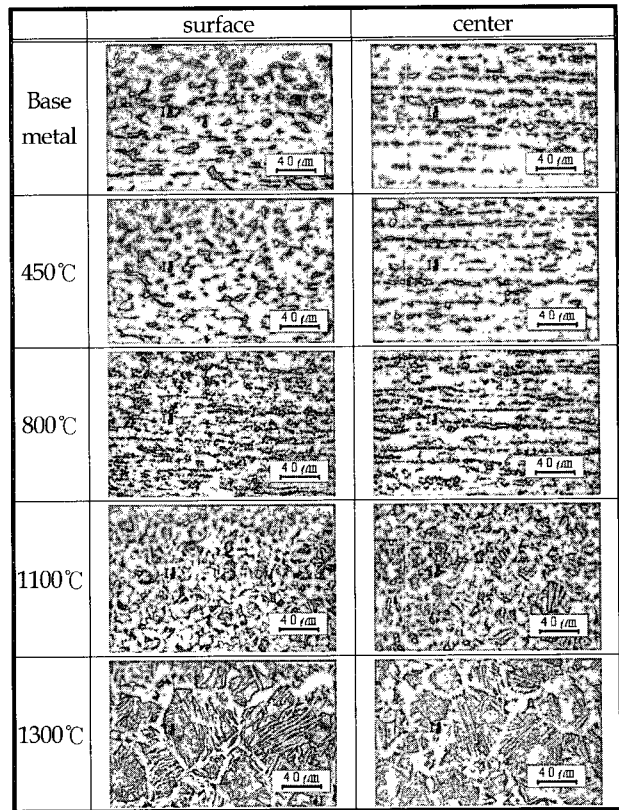
낸 인장시험편을 이용하여 용량 49kN의 UTM (Instron Co.) 시험기로 실온 대기 중에서 실시하였다. Cross head speed는 SS400강과 STS304강 모두 1mm/min 으로 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

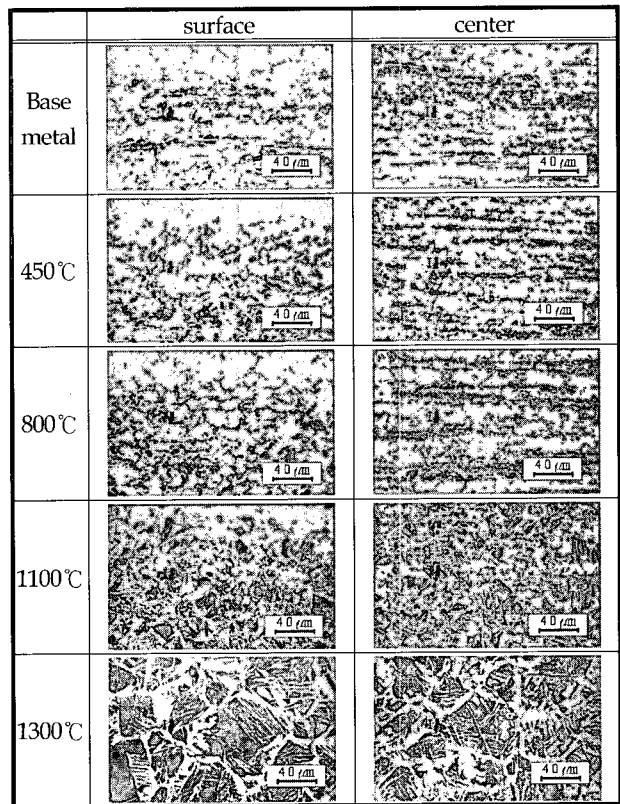
3.1 조직관찰

Fig. 4는 SS400강의 용접열사이클 재현 후의 조직 사진이다. 용접열사이클 재현부를 인발 방향으로 길이 절단을 한 후, 표면과 중심부를 각각 관찰한 것이다. 좌측이 표면에서 깊이 방향으로 10 μ m 떨어진 부분, 우측이 중심부를 각각 나타낸다. (a)는 인발 후 용접열사이클 재현을 실시한 시편, (b)는 가공경화에 의한 내부응력제거 열처리 후 용접열사이클 재현을 실시한 시편의 조직을 각각 나타낸다.

Fig. 4의 검은색은 펄라이트, 흰색은 페라이트로 구성되어 있다. Fig. 4(a)의 인발 시편의 경우, 용접열사이클 재현 온도를 450 $^{\circ}$ C로 한 경우 모재와 비교해서 조직의 변화는 거의 나타나지 않았다. 페라이트기지 속에 펄라이트가 작은 섬의 형태로 산재하고 있다. A₁변태점 이상으로 가열된 800 $^{\circ}$ C일 경우는 모재에 비하여 재결정에 의하여 페라이트와 펄라이트가 미세화되는 것이 관찰되었다. 미세한 입상의 펄라이트가 섬유상조직으로 배열되어 있다. 용접열사이클 재현 온도가 A₃변태점 온도 이상인 1100 $^{\circ}$ C의 조직은 조립과 미세립의 중간 정도로 다소 미세립을 나타내고 있고, 특히 최고가열온도가 가장 높은 1300 $^{\circ}$ C로 증가된 경우는 조대한 결정으로 과열조직이 관찰되었다. 1300 $^{\circ}$ C는 용접 bond부에 인접한 온도로서 그 조직은 모재나 다른 용접열사이클 재현 온도의 조직에 비하여 펄라이트가 조대화되었다. 특히 모재 및 450 $^{\circ}$ C, 800 $^{\circ}$ C로 용접열사이클 재현한 시편의 경우 인발에 의해 인발방향으로 신연되어 조직의 편평화(섬유상조직) 현상이 뚜렷이 나타난 것을 볼 수 있다. 표면부는 다소 전단작용이 가해진 형상으로, 중심부는 단순한 인장과 압축에 의해 변형된 형상의 섬유상조직이 나타났다. 그러나 1100 $^{\circ}$ C 및 1300 $^{\circ}$ C로 용접열사이클 재현한 경우 재결정 후의 결정립성장이 일어나 조직이 조대화 되어졌고, 재결정 후 결정립성장과 더불어 인발방향으로의 신연된 섬유상조직은 거의 소멸되었다. 이것은 변형된 페라이트와 펄라이트가 오스테나이트조직으로 변화하고 냉각에 의해 새로운 페라이트와 펄라이트가 출현하였기 때문이다(홍중휘, 1986). 용접열사이클 재현 온도 800 $^{\circ}$ C에서 재결정에 의한 페라이트+펄라이트 조직이 미세화 되고, 이후 온도가 증가할수록 펄라이트의 조대화가 일어났고 800 $^{\circ}$ C이상인 경우 각 온도구역에서 표면부와 중심부의 조직적인 차이는 거의 찾아볼 수 없다. 용접열사이클 재현 온도가 높을수록, 즉 A₃점을 넘어 가열되어 용접 bond부에 가까울수록 열 영향으로 인해 결정립이 점차 조립화 되어졌다고 사료된다(히라가와 등, 2002). 특히 용접경계선에 인접한 부분의 현미경조직은 재결정부 조직보다도 탄소함유량이 현저하게 많은 것처럼 보이는데 이것은 용접경계선 인접부분에는 소르바이트 조직이 존재하기 때문인 것으로 생각된다(세키구치와 요시무라, 1980).

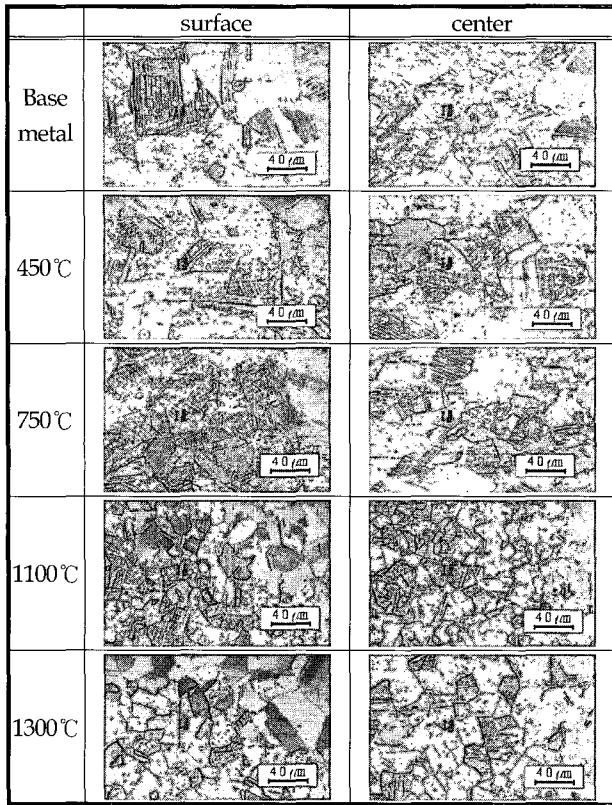


(a) Drawing

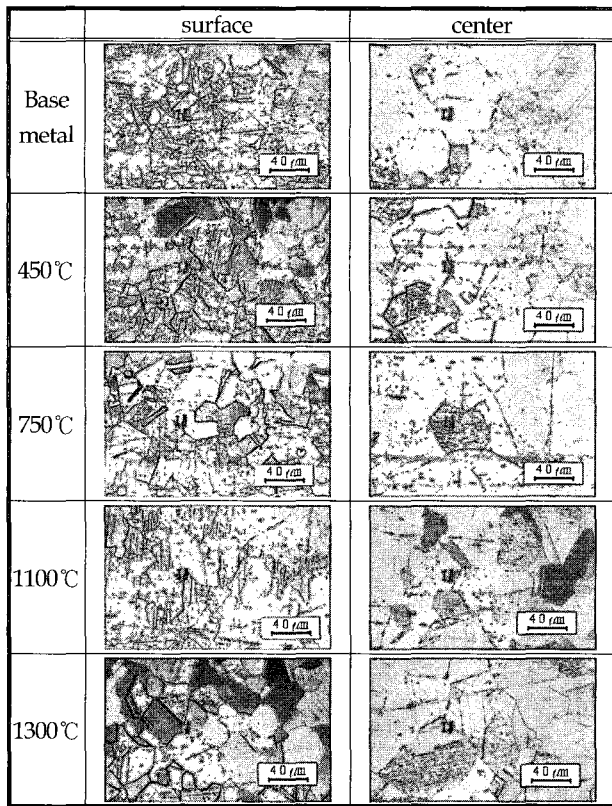


(b) After heat treatment

Fig. 4 The optical micrographs of SS400 steel according to the weld thermal cycle simulation temperature (parallel to drawing direction, $\times 500$)



(a) Drawing



(b) After heat treatment

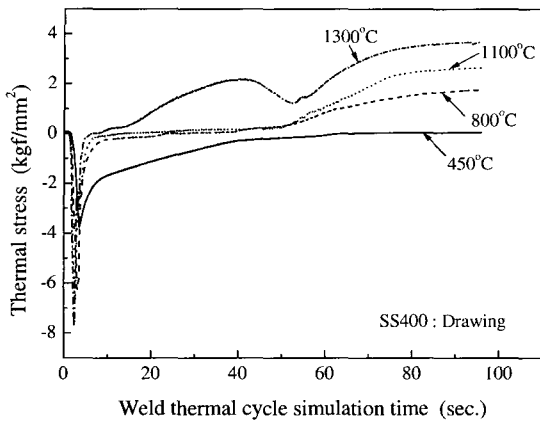
Fig. 5 The optical micrographs of STS304 steel according to the weld thermal cycle simulation temperature (parallel to drawing direction, $\times 500$)

Fig. 4(b)는 인발에 따른 가공경화에 의해 발생한 내부응력의 제거를 위한 열처리 후의 용접열사이클재현을 실시한 내부조직을 나타낸다. 내부에 잔류하는 응력 제거를 위해 750°C에서 30분간 열처리하고 공냉하였다. 용접열사이클 재현 전의 시험편 모두는 A1변태온도 이상에서 열처리를 행하여 재결정이 발생하였다. 이것은 Fig. 4(b)의 모재 및 450°C로 용접열사이클 재현한 경우의 조직을 보면 전열처리를 행하지 않은 Fig. 4(a)와 비교했을 때 모재와 450°C에서 전열처리로 인하여 페라이트가 다소 증가되고 펄라이트가 다소 미세화된 것으로부터 확인 가능하다. 중앙부에서는 800°C까지 (a)와같이 인발에 의한 섬유상조직이 나타나고 있으나 다소 감소한 것을 볼 수 있고, 대체로 재결정조직은 등축결정립 형태에 유사하게 이루어져 있다. 용접열사이클 재현 온도 800°C 이상의 조직은 (a)와 비교하여 거의 차이점을 발견할 수 없었다. 특히 Fig. 4(b)의 표면부 사진의 윗부분에서는 페라이트의 결정립만 주로 보인다. 750°C에서의 가열, 즉 A1변태점 이상에서의 가열에 의한 탈탄으로 표면부에 존재하던 오스테나이트 속에 고용된 탄소들이 연소되어 최표면층에서 탄소량이 적어졌기 때문에 페라이트 입자만이 나타났다고 판단된다(이영배와 박정웅, 1999).

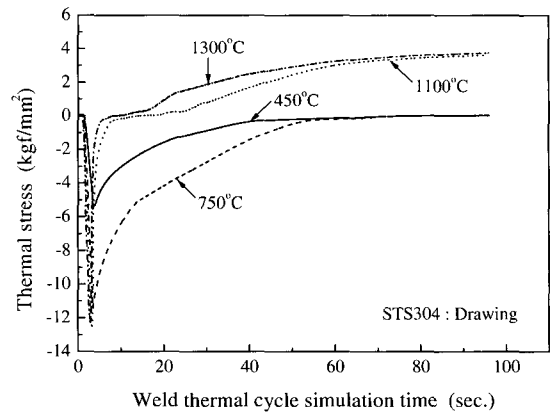
Fig. 5는 STS304강의 용접열사이클 재현 후의 조직 사진으로 용접열사이클 재현부를 인발 방향으로 길이 절단을 한 후, 표면과 중심부를 각각 관찰한 것이다. 오스테나이트 스테인리스강은 변태점을 이용해서 결정립이 조정되지 않는다. 다만 냉간가공에 의한 가공경화를 이용 결정립 미세화에 의해 적절한 열처리의 온도에 따라 재결정이 발생하는데, 본 연구에서도 1100°C 이상 용접열사이클 재현 온도에서 재결정을 확인할 수 있었고, 1100°C 보다 높은 온도인 1300°C로 용접열사이클 재현하였을 경우 결정립이 커져있는 것을 확인할 수 있다. 750°C로 용접열사이클 재현한 경우 결정립계에 약간의 탄화물이 석출된 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 인발가공 후에 발생한 응력제거를 위해 1050°C에서 30분간 유지한 후 수냉을 실시하였다. Fig. 5(a)와 비교하여 모든 시험편에서 1050°C에서의 전열처리로 인해 재결정이 일어난 것을 확인할 수 있다. 전열처리 후 모재 및 450°C, 750°C까지로 용접열사이클 재현한 경우에는 조직에 큰 변화가 없었으나, 1100°C 이상으로 용접열사이클 재현한 경우 결정이 다소 조립화되어진 것을 알 수 있다.

3.2 열응력 분포

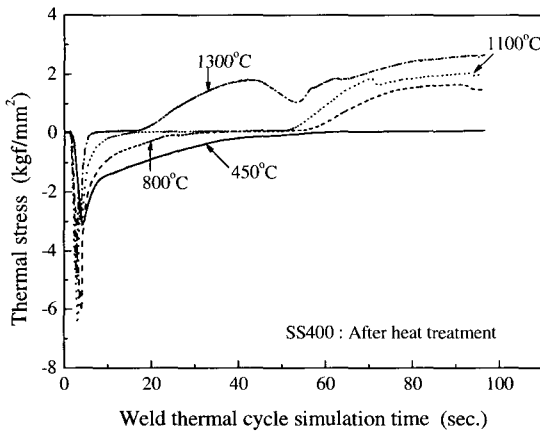
Fig. 6은 SS400강과 STS304강 시험편에 대하여 목적하는 용접열사이클 재현 온도로 가열한 후 냉각하였을 때 시험편 상에 발생한 열응력의 변화를 나타낸다. 인발 후 용접열사이클 재현을 실시한 시험편 및 인발 후 전열처리를 행하고 다시 용접열사이클 재현을 실시한 시험편 모두에서 목적온도 도달 후 냉각이 완료된 시점에서는 대부분 인장의 열응력이 잔류하였다. Fig. 6(a)에 나타난 SS400강의 인발의 경우, 모든 온도 구역에서 무응력상태가 나타났고 최고가열온도가 높아 냉각속도가 빠를수록 무응력에 도달하는 시간은 빠르게 나타났다. 용접열사이클 재현 온도 450°C에서는 냉각이 완료되었을 때 내부응



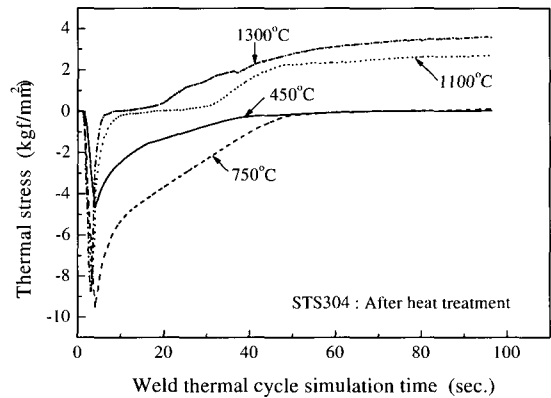
(a) SS400 (drawing)



(c) STS304 (drawing)



(b) SS400 (after heat treatment)



(d) STS304 (after heat treatment)

Fig. 6 Thermal stress distribution of SS400 and STS304 steel according to the weld thermal cycle simulation temperature

력은 거의 무응력상태가 된 것에 반해 800°C 이상으로 용접열 사이클 재현 한 경우들에서는 냉각이 개시되어 수 내지 수십 초 경과 후 인장의 열응력이 존재하였고, 1300°C에서 최고 약 3.68kg/mm²을 나타내었다. 이것은 800°C 이상으로 용접열사이클 재현한 경우들은 저탄소강의 변형저항을 잃어버리는 온도로 알려진 700°C 이상의 온도로 가열, 즉 A₁ 변태점 이상으로 열이 가해져 변형저항이 발생하지 않으나, 실온까지의 냉각에 의해 상변태가 발생하여 재차 변태잠열이 방출됨으로서 이들이 인장의 열응력으로 잔류한 것으로 생각된다. 이에 반해, 인발 후 750°C로 전열처리를 행한 다음 재차 용접열사이클 재현을 실시한 경우(Fig. 6(b))에 있어서는 (a)와 동일한 양상을 나타내고 있지만, 이미 750°C에서 열처리를 행하고 재차 목적하는 온도로 용접열사이클 재현하였기 때문에 (a)에 비해 다소 인장의 열응력이 낮게 나타났고, 또한 최초 목적온도로 가열하는 동안에 열팽창에 따른 변형이 전부 압축되어 나타나는 압축의 열응력도 다소 낮게 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한, 무응력

에 도달하는 시간도 800°C 이상에서는 (b)가 (a)에 비해 다소 긴 것에 반해, 450°C에서는 전열처리를 행한 경우가 오히려 짧게 나타났는데 이것은 전열처리로 인해 이보다 낮은 온도로 용접열사이클 재현한 경우에는 조직적인 변화가 일어나지 않고 게다가 열팽창이 다소 감소되었기 때문으로 사료된다. Fig. 6(c) 및 (d)는 STS304강의 결과로서 전술한 SS400강과 유사한 경향을 나타내었다. 다만, STS304강에서는 1050°C 이상이 되어야 변형저항을 가지므로 750°C 이하의 열재현 온도에서의 냉각이 완료된 시점에서 무응력상태를 나타내었다. 인장 및 압축의 최대열응력은 STS304의 쪽이 다소 큰 값을 나타내었다.

3.3 기계적 특성

Fig. 7에는 SS400강의 용접열사이클 재현 온도에 대한 최대 인장응력을 나타내었다. ●는 인발 후 용접열사이클 재현한 시편, △는 인발 후 가공경화에 의해 발생한 내부응력제거 처리를 하고 난 후 용접열사이클 재현 한 시편, ○는 △의 시편을

부분 재가공한 시편을 각각 나타낸다.

인발 후 용접열사이클 재현한 시편(●)의 경우, 모재가 72.65 kgf/mm², 450℃ 용접열사이클 재현시편이 72.4kgf/mm²로 거의 차이가 없었는데 이들은 내부조직이 섬유상으로 신연되어 강도가 크게 나타났고, 낮은 연율을 보였다. 그러나 A₁변태온도 이상의 온도인 800℃로 용접열사이클 재현을 실시하였을 경우 51.55kgf/mm²로 모재에 비해 약 71% 정도 최대인장응력의 감소를 보였다. 800℃에서의 급격한 인장강도의 감소와는 달리 이보다 온도가 높은 1100℃와 1300℃의 경우에는 조직이 조대해지고 있는 것에 비해 인장강도는 미미하게 증가(1100℃:52.15kgf/mm², 1300℃:53.22kgf/mm²)하고 있는 양상이다. 이는 탄소함유량이 낮아 경화가 작고 모재에 비해 전체적으로 연신이 다소 크게 되고, 과열에 의한 조립화로 펄라이트조직의 조대화에 따른 변태응력과 더불어 잔류응력이 커져 최대인장응력이 약간 증가한 것으로 생각된다. 그러나 용접열사이클 재현 온도가 가장 높은 1300℃의 경우에는 다른 용접열사이클 재현 온도에 비해 냉각속도가 커서 연성이 다소 저하되었다. 800℃에서 인장응력의 큰 감소를 나타낸 이유는 Fig. 4(a)의 그림에도 나타났듯이

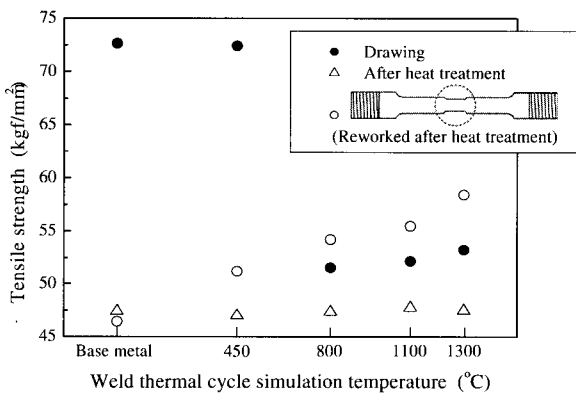


Fig. 7 Tensile strength of SS400 steel according to the weld thermal cycle simulation temperature

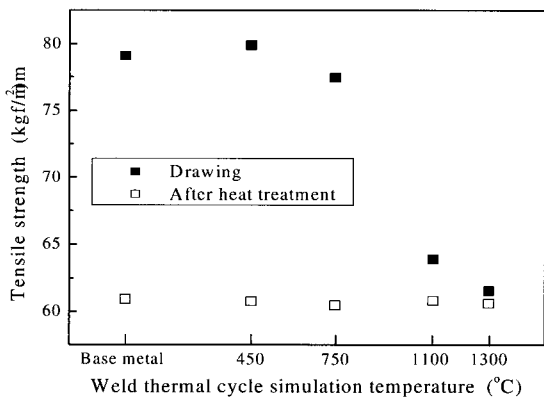


Fig. 8 Tensile strength of STS304 steel according to the weld thermal cycle simulation temperature

변태점이상의 온도로의 가열에 의해 재결정이 발생하였고, 회복과정을 동반하여 강도가 감소한 것으로 생각된다.

인발에 의한 내부응력제거를 위한 열처리를 행한 후 재차 용접열사이클 재현한 시편의 경우(△)들은 모두 모재부에서 파단이 발생하였다. 이때 각각의 용접열사이클 재현 조건에서의 인장응력 값은 모재가 47.41kgf/mm², 450℃에서 1300℃까지는 최저가 46.99kgf/mm²에서 최고가 47.74kgf/mm²를 나타내었고 모재와 비교해서 거의 차이가 없었다. 이는 인발에 의한 재료 내부의 잔류응력을 제거하기 위해 전열처리를 실시한 후 용접열사이클 재현을 실시하였는데, A₁변태점 이상의 온도에서의 전열처리에 의한 재결정이 발생함으로써 재료의 전체적인 연화를 초래하여 강도의 저하를 가져 왔기 때문에 모재부에서 파단이 일어난 것으로 생각된다(스즈키와 타무라, 1980; 엄기원, 1996). 또한 전열처리 후 용접열사이클 재현한 800℃이상의 경우 이미 A₁변태점 이상의 온도에서의 조직변화가 발생하였고 여기에 A₁변태점 이상의 온도로서 용접열사이클 재현을 실시하더라도 재결정에 의한 연화가 충분히 완료되어졌기 때문에 조직적인 변화가 발생함이 없이 거의 일정한 인장강도값을 나타낸 것으로 판단된다. 그런 까닭으로, 이를 확인하기 위하여 Fig. 1에 나타난 인장시편을 용접열사이클 재현 구간인 중심부의 10mm구간에 대해 Ø5로 부분 재가공하여 다시 인장시험을 실시하고 그 결과를 ○로 나타내었다. 이때, 단면감소부는 응력집중을 피하기 위하여 라운딩처리를 하였다. 잔류응력제거 처리 시편의 부분재가공 후 실시한 인장시험 결과, 모재부가 아닌 용접열사이클 재현을 실시한 부분에서 파단이 발생하였다. 모재는 46.4kgf/mm², 450℃ 열재현은 51.19kgf/mm², 800℃는 54.19kgf/mm², 1100℃는 55.46kgf/mm², 1300℃는 58.43kgf/mm²의 최대인장응력을 각각 나타내었다. 재가공한 시편의 결과에서 용접열사이클 재현 온도가 낮을수록 인장강도가 낮게 나타나고 있는 것은 Fig. 4(b)에도 나타났듯이 1100℃까지는 표면부에 탈탄현상이 나타났고, 또한 잔류응력의 제거를 위해 적용한 750℃의 온도로부터 재결정이 발생하였고, 인발시편에 비해 페라이트가 다소 조대화되어 이로 인해 강도저하를 가져온 것으로 판단된다. 용접열사이클 재현 온도가 증가함에 따른 열응력의 증가와 상기에 밝힌듯이 A₁점 이상에서의 전열처리로 인해 즉, 가공경화의 영향을 제거하기 위해 실시한 전열처리의 온도역이 다소 높은 온도에서 행하여져서 변태에 의한 응력이 중첩되어 시편의 내부에 잔류응력이 재차 증가함에 따라 용접열사이클 재현부의 인장강도가 증가한 것으로 사료된다. 따라서 금후 잔류응력에 대해 검토할 필요가 있다.

Fig. 8은 STS304의 용접열사이클 재현 온도에 따른 인장응력 값을 나타내고 있다. ●는 인발 후 용접열사이클 재현한 시편, ○는 내부응력제거 처리 후 용접열사이클 재현한 시편을 각각 나타낸다. 그림 속에는 모재의 결과를 함께 나타내었다. 인발 시편의 경우 750℃ 이상에서 급격한 인장강도의 감소를 보인다. 이것은 오스테나이트 결정입계에 석출한 탄화물의 영향과 재결정에 의한 결과로 생각된다. 1300℃에서 조직이 보다 조대해짐에 따라 1100℃보다 인장강도가 더 낮게 나타나고 있다. 인발에 의한 잔류응력제거 처리 시편의 경우는 전열처리에 의

한 재결정화로 인발된 시편보다 낮은 강도값을 보인다. 용접열 사이클 재현 온도를 증가시키더라도 강도 값에 차이가 거의 없는 것은 인발된 시편을 1050℃에서 고용화열처리를 행하여 내부응력을 제거하고 가공조직을 재결정시켜 충분히 연한 상태가 되었기 때문으로 생각된다. 전열처리 후 1300℃로 용접열 사이클 재현 한 경우에서 가장 낮은 인장강도값을 나타내는데 이는 다른 용접열사이클 재현된 시편보다도 결정립이 다소 조대화되었기 때문으로 사료된다.

Fig. 9에는 SS400강의 용접열사이클 재현한 시편의 경도 분포를 나타내었다. ●는 인발 후 용접열사이클 재현한 시편을, ○는 인발 후 발생한 내부응력제거 처리 후 용접열사이클 재현한 시편을 각각 나타낸다. 또한 그림 속에는 모재의 결과도 함께 나타내었다.

인발 후 용접열사이클 재현한 시편의 경우 모재가 237.9Hv, 450℃가 235.4Hv, 800℃가 177.4Hv, 1100℃가 183.8Hv, 1300℃가 189Hv로 각각 나타났다. A₁변태점 이상의 온도인 800℃에서 경도값의 급격한 저하를 보이고 있다. 용접열사이클 재현 온도 800℃ 이상에서의 경도의 급격한 저하는 재결정에 따른

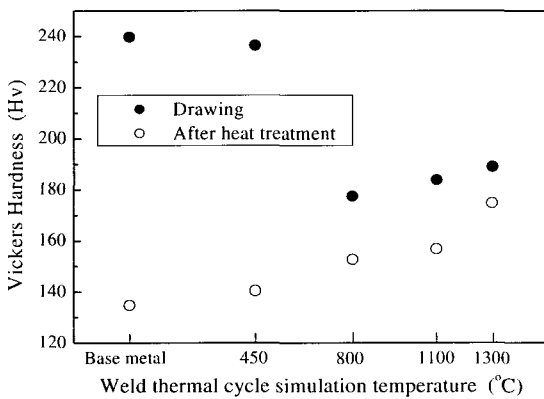


Fig. 9 Hardness of SS400 steel according to the weld thermal cycle simulation temperature

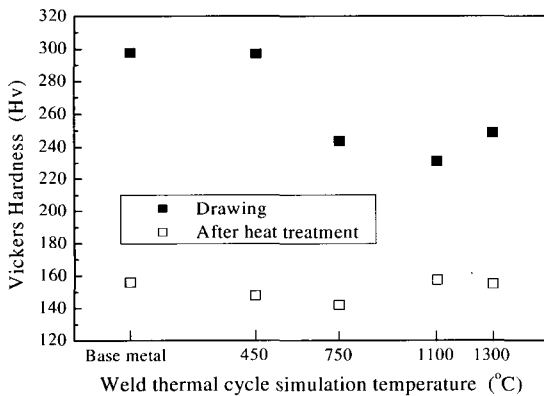


Fig. 10 Hardness of STS304 steel according to the weld thermal cycle simulation temperature

재료의 연화에 기인한 것으로 사료된다. 내부응력제거 처리 후 용접열사이클 재현한 시편의 경우, 모재는 134.7Hv, 450℃는 140.4Hv, 800℃는 152.7Hv, 1100℃는 156.8Hv, 1300℃는 174.7Hv로 각각 나타났으며, 용접열사이클 재현 온도가 높을수록 경도값이 증가함을 알 수 있다. 이는 인발시 재료 내부에 존재하게 되는 압축잔류응력이 내부응력제거 열처리로 인해 잔류응력의 영향이 제거된 상태에서 재차 용접열사이클 재현으로 함으로서 열응력이 발생하여, 이 열응력이 재료 내부에 또 다른 잔류응력으로 남게 됨으로써 재료의 경도가 증가한 것으로 사료된다. 그러나, 가공경화에 의한 영향을 제거하기 위해 실시한 전열처리의 온도가 다소 높게 설정되어 따라서 내부응력제거 열처리를 한 시편의 모재가 처리하지 않은 시편의 모재에 비해 경도가 낮게 나타나지만, 이후 용접열사이클 재현에 의해 발생한 열응력이 잔류응력으로 존재하기 때문에 경도가 증가된 것으로 생각된다. 용접열사이클 재현온도가 높을수록, 즉 열응력이 많이 발생할수록 인발시편의 경도 값에 근접하고 있음을 알 수 있다. 이것은 용접 bond부에 가까울수록 인성이 저하되기 때문으로 생각된다.

Fig. 10은 STS304강의 경도값을 나타내고 있다. 인발시편의 경우, 모재는 297.7Hv, 용접열사이클 재현 온도 450℃는 297Hv, 800℃는 243.6Hv, 1100℃는 231.1Hv, 1300℃는 248.6Hv로 각각 나타났다. 450℃까지는 모재와 거의 차이가 나지 않지만 750℃이상에서는 모재보다 낮은 경도값을 나타내고 있다. 하지만 인발 후 전열처리를 하고 용접열사이클 재현을 실시한 시편의 경우, 모재는 156Hv, 450℃는 148Hv, 800℃는 142Hv, 1100℃는 157.4Hv, 1300℃는 155Hv로서 용접열사이클 재현 온도에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 인발 시편의 경우에는 용접열사이클 재현 온도에 따라 경도의 값에 변화가 나타났지만, STS304강의 잔류응력제거 처리 시편은 용접열사이클 재현을 하더라도 잔류응력제거 열처리시의 조직의 재결정화 때문에 경도값에 변화가 거의 없는 것은 사료된다.

4. 결 론

SS400강 및 STS304강에 대해 용접열영향부를 재현한 용접열사이클 재현시험을 실시하여, 각각의 최고가열온도구역에서의 기계적 성질 및 조직을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SS400강의 경우, 용접열사이클 재현 온도 800℃에서 재결정에 의한 페라이트+펄라이트 조직이 미세화 되고, 이후 온도가 증가할수록 펄라이트의 조대화가 일어났고 800℃이상인 경우 각 온도구역에서 표면부와 중심부의 조직적인 차이는 거의 찾아볼 수 없다. 인발 후 전열처리를 행하고 용접열사이클 재현한 모재와 450℃에서는 페라이트가 다소 증가되고 펄라이트가 다소 미세화 되어졌고, 용접열사이클 재현 온도 800℃ 이상의 조직은 인발 후 용접열사이클 재현한 조직과 비교하여 거의 차이점을 발견할 수 없었다.
- 2) STS304강의 경우, 100℃이상 용접열사이클 재현 온도에서

재결정을 확인할 수 있었고, 1100℃ 보다 높은 온도인 1300℃로 용접열사이클 재현하였을 경우 결정립이 커져있는 것을 확인할 수 있었다. 전열처리 후 모재 및 450℃, 750℃까지로 용접열사이클 재현한 경우에는 조직에 큰 변화가 없었으나, 1100℃이상으로 용접열사이클 재현 한 경우 결정이 다소 조립화 되어진 것을 알 수 있다.

3) 인발 후 용접열사이클 재현을 실시한 시편 및 인발 후 전열처리를 행하고 다시 용접열사이클 재현을 실시한 시편 모두에서 목적온도 도달 후 냉각이 완료된 시점에서는 대부분 인장의 열응력이 잔류하였다.

4) SS400강의 인장강도 : 인발 후 용접열사이클 재현한 경우에는 모재 및 450℃로 용접열사이클 재현한 시편은 내부조직이 섬유상으로 신연되어 강도가 크게 나타났고, 낮은 연율을 보였다. 800℃로 용접열사이클 재현한 경우 최대인장응력의 감소를 보였다. 이보다 온도가 높은 1100℃와 1300℃의 경우에는 조직이 조대해 지고 있는 것에 비해 인장강도는 미미하게 증가하고 있는 양상을 나타내었다. 또한, 내부응력제거 처리 시편의 부분재가공 후 실시한 인장시험 결과, 용접열사이클 재현 온도가 낮을수록 인장강도가 낮게 나타났다.

5) STS304강의 인장강도 : 인발 시편의 경우 용접열사이클 재현 온도 750℃ 이상에서 급격한 인장강도의 감소를 보인다. 전열처리 후 1300℃로 용접열사이클 재현 한 경우에서 가장 낮은 인장강도값을 나타내는데 이는 다른 용접열사이클 재현된 시편보다도 결정립이 다소 조대화되었기 때문이다.

6) SS400강의 경도 : 인발 시편의 경우 용접열사이클 재현 온도 800℃ 이상에서의 경도의 급격한 저하는 재결정에 따른 재료의 연화에 기인하며, 내부응력제거 처리 후 용접열사이클 재현한 시편의 경우 용접열사이클 재현 온도가 높을수록 경도값이 증가하였다.

7) STS304강의 경도 : 인발 시편의 경우에는 용접열사이클 재현 온도에 따라 경도의 값에 변화가 나타났지만, 내부응력제거 처리 시편은 용접열사이클 재현을 하더라도 내부응력제거 열처리시의 조직의 재결정화 때문에 경도값에 변화가 거의 없었다.

참 고 문 헌

마루젠주식회사 (1990). 용접.접합편람, 일본용접학회, pp 810-811.

히라카와 켄지, 오오타니 히로오, 엔도 마사히로, 사카모토 하로오 (2002). 기계재료학, 조창서점, pp 52-165.

세키구치 키치로, 요시무라 고로 (1980). 현대용접기술대계-용접과 재질(상), 산보출판, pp 235-260.

스즈키 하루요시, 타무라 히로시 (1980). 현대용접기술대계-용접금속학, 산보출판, pp 51-81.

방한서, 차용훈, 오윤권, 노찬승, 김종명 (1997). "점열탄소성 이론에 의한 용접후열처리에 대한 수치해석", 한국해양공학회지, 제11권, 제1호, pp 113-123.

안홍조, 이찬우, 이창희 (2000). "C-Mn 구조용강 열영향부의 결정립 성장 거동 예측 모델링", 대한금속·재료학회지, 제38권, 제6호, pp 841-850.

엄기원 (1996). 최신용접공학, 동명사, pp 249-271.

오세규, 남기우 (1983). "국산구조용강판의 수증용접성과 용접강도 특성", 대한기계학회논문집, 제7권, 제3호, pp 263-269.

이상기, 도재운, 남기우, 강창룡, 이해우, 안석환 (2000). "수퍼 2상 스테인리스강의 피로균열진전 특성에 미치는 미세조직의 영향", 한국해양공학회지, 제14권, 제2호, pp 66-70.

이영배, 박정웅 (1999). 금속열처리원리, 문운당, pp 122

홍종휘 (1986). 금속재료, 보성출판사, pp 179-206.

Hannerz, N.E. (1985). Idealized Thermal Cycle for Weld Heat Affected Zone Simulation of Steel, Perdue Thermal Physical Property Handbook, Perdue Univ.

Welding Handbook (1976). Fundamentals of Welding, 7th Edition, Vol 1. American Welding Society.

2005년 4월 6일 원고 접수

2005년 10월 25일 최종 수정본 채택