한국해양공학회지 제22권 제6호, pp 27-34, 2008년 12월 (ISSN 1225-0767)

용접열사이클 재현에 의한 SS400강 및 STS304강의 특성 평가 - 제3보: 잔류응력과 초음파 파라미터

안석환* · 최문오** · 정정환*** · 김성광**** · 남기우*****
*부경대학교 기계공학부
**부산소방본부
***요업기술원
****국방기술품질원
*****부경대학교 신소재공학부

Evaluation of Characteristic for SS400 and STS304 Steel by Weld Thermal Cycle Simulation - 3rd Report: Residual Stress and Ultrasonic Parameter

SEOK-HWAN AHN*, MOON-OH CHOI**, JEONG-HWAN JEONG***, SUNG-KWANG KIM**** AND KI-WOO NAM*****
*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea
**Busan Fire Services, Busan, Korea
***Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Seoul, Korea
****Defence Agency for Technology and Quality, Changwon, Korea
*****Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Weld thermal cycle simulation 용접열사이클 재현 Thermal stress 열응력 X-ray diffraction X-선 회절 Ultrasonic parameter 초음파 파라미터, Residual stress 잔류응력

ABSTRACT: *The temperature distribution in the weldment is not uniform because a weldment is locally heated. Thermal plastic deformation results from the local expansion and shrinkage by the heating and cooling of metal. Therefore, residual stresses and distortion occur in the weldment. In this study, we had conducted on the weld thermal cycle simulation that is supposed as the HAZ on SS400 steel and STS304 steel. The residual stresses that were obtained from the drawing and the weld thermal cycle simulation were estimated by X-ray diffraction. We also carried out ultrasonic test for the weld thermal cycle simulated specimens, and then conducted on nondestructive evaluation by the ultrasonic parameters obtained ultrasonic test. From the results, residual stresses of weld thermal cycle simulated specimens after the residual stress removal heat treatment are lower than that of the drawing.*

1. 서 론

산업에 있어서 용접의 중요성은 조선 · 해양, 자동차, 건설, 토목, 원자력 등의 여러 분야에서 기계 혹은 구조물 제작의 많은 부분을 차지하고 있다. 이들 요소에 사용되어지는 구조용 강은 구조물에 필요한 강도 범위를 유지하고 있어야 하는데 용접부의 국부적인 성질변화에 따른 구조물의 국부적인 기계적 특성변화로 인해 구조물의 안정성이나 수명이 치명적인 영향을 받게 되며 이러한 영향을 줄이기 위해서는 사전에 용접부에 대한 재료의 특성 변화를 알아볼 필요가 있다(안홍조 등, 2000; 안석환 등, 2005).

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

SS400강은 일반구조용 압연강으로 용접성과 가공성 및 경제성 등으로 인해서 주요부품을 제외하고는 기계 및 구조물의 보조 부재로 흔히 사용되며, 건축용 자재, 자동차용, 선박용, 해양구조물, 건축 교량용으로 널리 사용되고 있고 그 활용도가 높다(이용복 등, 1996).

또한, 스테인리스강은 우수한 성형성, 내식성 및 내열성을 가지고 있으며 특히 오스테나이트계 스테인리스강은 기계적 성질과 내식성이 우수하기 때문에 극저온에서 고온에 이르기까지 광범위한 온도 범위와 다양한 사용조건에서 폭넓게 사용되고 있다. STS304강은 가장 대표적인 스테인리스강으로 우수한 성형성 및 내식성으로 인하여 화학공업, 식품제조설비 등의 용접이 필요한 부분, 열교환기, 초산저장 · 수송용기, 해양구조물 등 다양한 분야에서 널리 이용되어지고 있다(Kinami and Kimura, 1992; Tomimura and Takaki, 1988; Adler and Walters, 1993;

Solomon, 1985).

용접 시에는 용접열로 인하여 국부적으로 팽창 · 수축 등의 열소성 변형이 생긴다. 하지만 구속이나 어떤 힘에 의하여 용접부 주위에 높은 잔류응력이 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다(이용복 등, 1996; Solomon, 1985; 이종섭과 김숙환, 1998; American Welding Society, 1976). 이와 같이 잔류응력이라는 것은 외력이 작용하지 않을 경우에 있어서도 재료 내부에 응력이 남아 있는 현상을 말하며, 대부분의 가공이라든가 열처리 등에 있어서 이들 잔류응력이 발생하는 것으로 알려져 있다(이익현과 주재현, 1996; 미곡무, 1983; 사토우 쿠니히코 등, 1980; 장경호 등, 2004).

구조물에 대한 비파괴적 평가는 현재 초음파 탐상, AE(Acoustic emission), 방사선 투과, 자분 탐상, 와류 탐상등 많은 방법들이 사용되고 있고, 그중 초음파 탐상은 금속 재료에 있어서 기지조직이나 결정립 크기 등 미세조직의 변화가 기계적 성질에 어떤 영향을 주는지에 대한 연구로 널리 사용되어지고 있다(김효준과 이상익, 1989; 남기우 등, 2003a; 2003b; 오세규 등, 1987; 홍순택 등, 1999).

본 연구에서는 용접부의 열영향부(HAZ: Heat affected zone)에 대해 열영향부의 대표적인 온도를 국부적으로 용접열사이클 재현을 하고, 인발과 용접열사이클 재현에 의해 발생한 잔류응력을 X-선 회절을 이용하여 조사하였다. 또한 용접열사이클 재현한 시험편에 대해 초음파 탐상 시험을 실시하여 초음파 파라미터에 의한 용접열재현부의 비파괴적인 평가를 하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 시험편

본 실험에 사용한 재료는 SS400강 및 STS304 오스테나이트 스테인리스강이며 그 화학성분 및 기계적 성질은 전보(안석환 등, 2005)와 동일하다

본 실험에 사용된 Φ10 봉의 경우, SS400강과 STS304강 모두 Φ13로 압연이 되어 나온 것을 Φ10로 만들기 위하여 인발을 하여 만들어진 봉으로써, 단면감소율은 약 40%정도 이다. 이와 같은 인발가공에 의한 가공경화로 인해 인장시험의 결과 SS400강 모재는 72.65kgf/mm^2, STS304강 모재는 79.11kgf/mm^{2}으로 각각 나타났다. 이것은 Φ13 봉의 모재와는 강도 값에서 차이가 나므로 각 재료마다 인발 된 시험편과 인발 후 발생한 가공경화의 영향을 제거하기 위한 열처리를 행한 시험편의 두 종류로 하였다. 인발에 따른 가공경화에 의한 시편 내부의 응력완화 열처리에 있어서는 SS400강의 경우 750℃에서 30분간 열처리를 한 후 공냉을 실시하였고, STS304강은 1050℃에서 30분간 열처리를 한 후 수냉을 실시하였다. 용접열사이클 재현시험, 잔류응력 및 초음파탐상에 이용된 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타낸다(안석환 등, 2005).

2.2 용접열사이클 재현시험

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(일본용접학회, 1990). 목적온도까지의 도달시간은 3초이며, 목적온도에서 2초간 유지 후 90초간 용접열사이클 재현 장치 속에서 냉각시켰다. 그리고 시편의 산화를 방지하기 위하여 GLEEBLE 3200의 Chamber를 고진공으로 하여 용접열사이클 재현시험을 실시하였다(일본용접학회, 1990; 안석환 등, 2005).

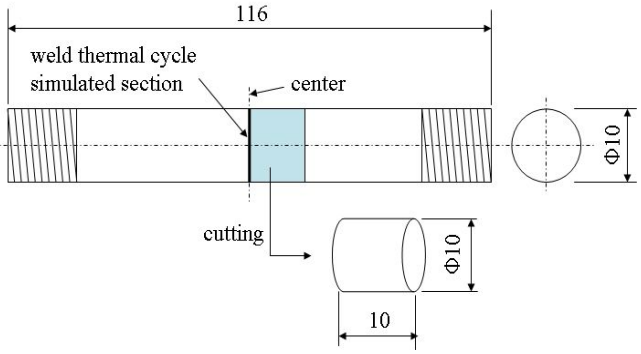


Fig. 1 Shapes and dimensions of specimens to the weld thermal cycle simulation, residual stress and ultrasonic test (unit: mm)

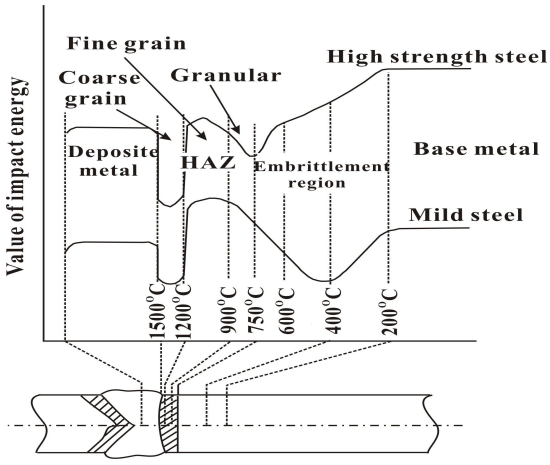


Fig. 2 Impact energy according to temperature of HAZ

2.3 잔류응력 측정

잔류응력 측정은 X-선 회절법을 적용하였다. 잔류응력 측정을 위하여 사용된 기기는 PHILIPS사의 High Resolution 4-Crystal Triple Axis X-ray Diffractometer를 이용하였다.

Fig. 1에 나타낸 것처럼 잔류응력 측정을 위한 시편은 용접열사이클 재현된 부분을 두께 1.7mm로 절단하여 에머리페이퍼 #100~2500 및 0.3μm의 알루미나 분말로 경면연마한 후 그 면을 측정하였으며, 표면으로부터 반경방향으로 0.5, 2.5, 5mm(시편의 중심)의 세부분으로 나누어 측정하였다.

2.4 초음파 탐상

Fig. 1에 나타낸 것과 같은 용접열사이클 재현 시험편으로부터 채취한 시험편을 이용하여 초음파탐상 시험을 실시하였다. 시험편은 용접열사이클 재현에 의해 열영향을 받은 부분이 절단 시 재차 가공열의 영향을 최대한 받지 않도록 절단하여 제작 가공한 후 연마지로 경면연마 하였다. 실험에 사용된 초음파 탐상기로는 Klautkramer사의 USD15 초음파 탐상기, 초음파 센서로는 Klautkramer사의 중심주파수 5kHz의 광대역 센서 G5MN 53046을 사용하였다. 초음파탐상법은 수직탐상법인 펄스반사법을 사용하여 종파에 대한 초음파 음속 및 감쇠계수를 실시간적으로 측정하였고 센서와 시험체 사이에 접촉매질을 사용하였다(남기우 등, 2003).

3. 결과 및 고찰

3.1 용접열사이클재현시 열사이클에 대한 실제 온도 사이클

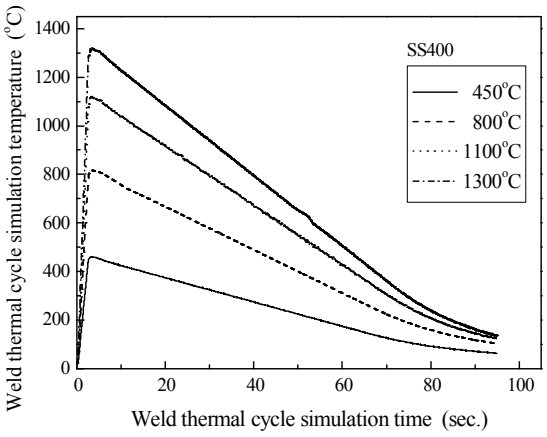
용접열사이클 재현 시간과 온도의 사이클에 맞추어 용접열사이클 재현을 실시한 결과를 Fig. 3에 나타낸다.

SS400강과 STS304강 모두 목적온도(최고가열온도)에 도달하였을 때의 온도는 목적온도보다 10~25℃ 정도 높게 나타났는데, 이는 열 가속도 때문에 시편에 전류를 차단하더라도 열이 가해지기 때문이다. 하지만 열 가속도에 의한 열은 목적온도에 비하면 미미(목적온도에 대해 승온율이 약 2.4%미만)하므로 용접열사이클 재현의 목적온도에는 별 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 2초간의 짧은 시간 동안 유지함에 따른 열 가속도의 영향으로 정확한 목적온도를 유지하기에는 다소 어려움이 따랐고, 이에 실제 용접과 목적온도 이상으로 승온된 온도를 감안하여 원래 사이클을 토대로 실험을 실시하였다. 목적온도인 각 최고가열온도 도달 후 냉각이 실시되었으나 SS400강은 200~300℃, STS304강은 300~500℃부터 기존 냉각 사이클보다 더 느린 냉각곡선을 그리고 있다. STS304강이 SS400강보다 더 높은 온도에서 냉각 속도가 느려지는 것은 열전도성(Thermal conductivity)이 STS304강보다 SS400강이 더 좋기 때문에 열을 더 빨리 분산시키기 때문이다. SS400강의 1300℃의 경우 다른 온도대와는 달리 냉각곡선의 약 700℃부근에서 약간의 등온을 유지하고 있다. 이는 A_1변태선과 거의 일치하는 선으로서 등온변태가 일어난 구간으로 예상이 된다.

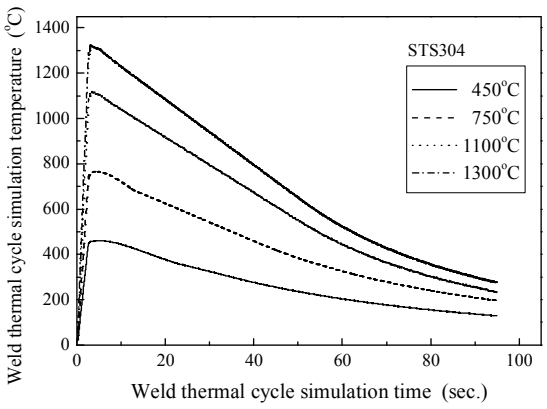
3.2 잔류응력

Fig. 4에는 SS400강의 인발 후 용접열사이클 재현한 시편과 인발에 의한 잔류응력의 완화를 위한 열처리 후 용접열사이클 재현한 시편에 대해서, 각각 모재 및 800℃로 용접열사이클 재현한 2종류의 시편의 표면으로부터 중심까지의 3개소에서 측정한 잔류응력치를 비교하여 나타낸다. 측정위치는 반경방향(표면으로부터 두께방향)으로 0.5mm, 2.5mm 및 5mm(최중심부)에서 실시하였다.

Fig. 4(a)는 SS400강의 인발된 모재 및 인발 후 용접열사이클 재현한 경우로서, 모재는 5mm(시편중심부)에서 약 -1073MPa의 최대치를 나타내었다. 이는 인발시 다이내벽의 큰 마찰저항



(a) SS400

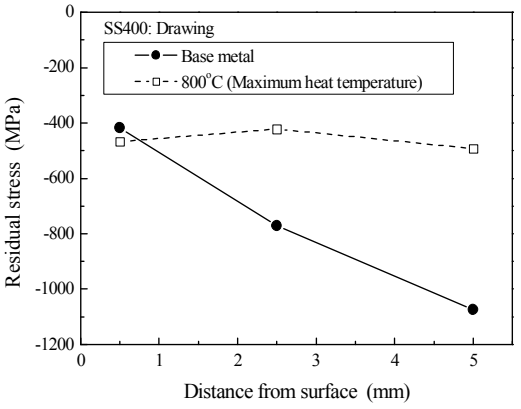


(b) STS304

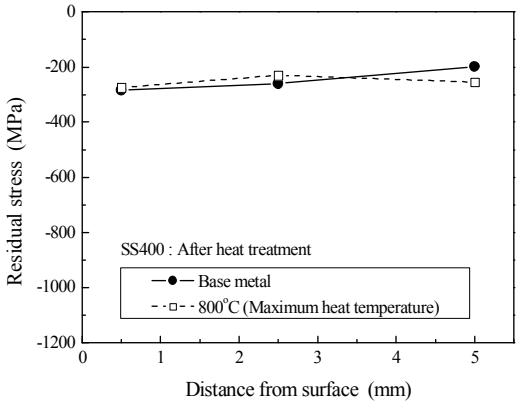
Fig. 3 Real temperature cycles according to the weld thermal cycle simulated time and temperature

을 받아 중심부의 큰 인장소성변형이 표면에서 구속되어 재료 내부에 압축잔류응력이 남게 된 것으로 생각된다(스토우 하지메, 2003). 800℃로 용접열사이클 재현한 경우에는 0.5mm에서 -467.5MPa, 2.5mm에서 -421.2MPa, 5mm에서 -492.6MPa로 표면부와 중심부에서 큰 차이는 나타나지 않는다. 이로부터 A1 변태점 이상의 온도로 용접열사이클 재현을 하였을 경우에는 압축잔류응력이 상당히 감소했음을 알 수 있다(스토우 하지메, 2003). 이것으로부터 전보(안석환 등, 2005)의 결과로서 SS400강의 인발 후 용접열사이클 재현한 시편의 인장강도가 최고가열온도 800℃에서 급격한 저하를 나타낸 원인으로 잔류응력이 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)에 대하여, (a)의 인발 후 인발에 의해 발생한 잔류응력을 완화하기 위해 열처리를 실시한 다음 용접열사이클 재현한 시편의 결과를 나타낸다. 모재의 경우 0.5mm에서 -283.5MPa, 2.5mm에서 -260.2MPa, 5mm에서 -198.1MPa를 각각 나타내었다. 최고가열온도 800℃로 용접열사이클 재현

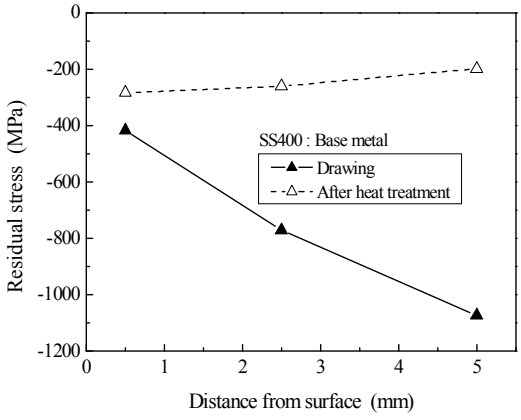


(a) Drawing

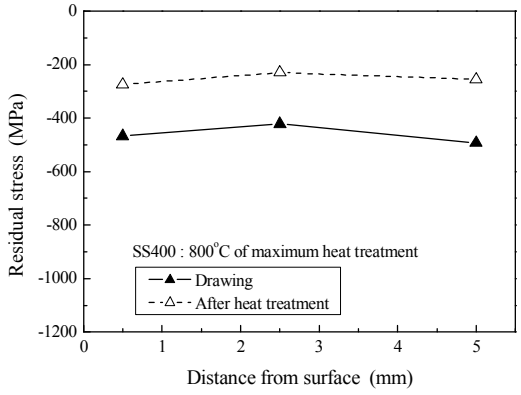


(b) After heat treatment

Fig. 4 Comparison of residual stresses between base metal and specimen of 800℃ of maximum heat temperature for SS400 steel



(a) Base metal



(b) 800℃ of maximum heat temperature

Fig. 5 Comparison of residual stresses for base metal and specimen of 800℃ of maximum heat temperature of figure 4, respectively

한 시편은 0.5mm에서 -274.2MPa, 2.5mm에서 -229.2MPa, 5mm에서 -254.1MPa을 나타내었다. 이상과 같이 잔류응력을 완화하기 위해 열처리를 실시한 경우의 결과는, 열처리 후 모재 및 800℃로 용접열사이클 재현한 경우 모두에서 비슷한 응력값을 나타내었다. 잔류응력 완화 열처리를 행하기 전의 결과(Fig. 4(a))와 비교하면 두 시편 모두 잔류응력이 상당히 완화되었음을 알 수 있다. 인발에 의해 발생한 잔류응력을 완화하기 위한 열처리 효과로부터 모재와 800℃ 용접열사이클 재현한 시편 사이에서의 잔류응력의 차는 거의 나타나지 않았다. 그리고 잔류응력 완화열처리 후 재차 용접열사이클 재현을 하였기 때문에 잔류응력이 완전히 없어지지는 않았고 어느 정도의 압축잔류응력은 남아 있는 결과를 나타내었다.

Fig. 5는 Fig. 4의 결과들을 인발 후 용접열사이클 재현한 경우와 인발 후 발생한 잔류응력 완화 열처리를 행한 후 용접열사이클 재현한 경우에 대해, (a) 모재 및 (b) 최고가열온도 800℃로 용접열사이클 재현한 경우의 잔류응력 값을 각각 비교하여 나타낸 것이다.

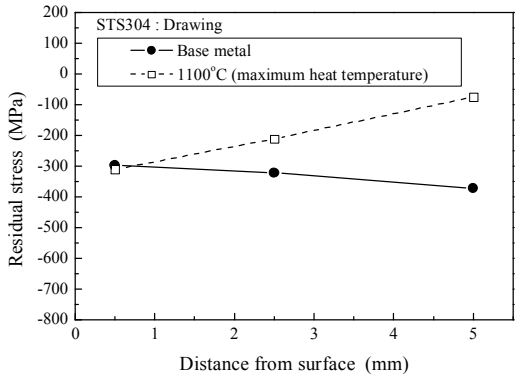
Fig. 5(a)의 모재인 경우에는, 인발한 시편에서는 큰 압축잔류응력이 분포하고 있지만 잔류응력 완화 열처리를 행함으로 인해시편 내부의 잔류응력이 인발한 상태의 시편에 비해 상당히 완화되었다는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 800℃ 용접열재현한 시편에서는 열처리에 의해 시편 내부에 고루 분포된 잔류응력을 확인할 수 있다. 이와 같이 응력을 완화한 후의 모재 및 용접열재현한 시편의 경우에는 잔류응력을 완화하지 않은 상태인 인발한 모재와 인발 후 용접열재현한 시편의 경우보다도 압축잔류응력의 감소가 현저하였다. 특히, 모재보다도 800℃ 용접열재현한 시편에 있어서는 응력을 완화시킨 경우와 그렇지 않은 경우에 있어서 재차 800℃로 가열하였기 때문에, 이 800℃의 온도에 의한 가열로 발생한 열응력과 A_1변태점 이상의 온도에 의한 가열로 발생한 변태응력이 상호작용함에 따른 영향으로 모재(Fig. 5(a))에 비해 잔류응력의 차는 다소 적은 것으로 판단된다(Fig. 5(b)).

Fig. 6은 STS304강에 대한 인발(a)과 잔류응력 완화 열처리(b)한 모재 및 1100℃에서 용접열사이클 재현한 시편의 잔류응력 분포를 각각 나타낸다.

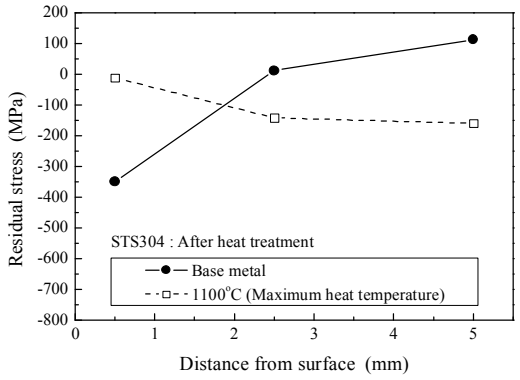
인발된 시편(Fig. 6(a))의 모재는 0.5mm가 -297.7MPa, 2.5mm가 -321.5MPa, 5mm가 -371.8MPa로 각각 나타났다. 이를 1100℃로 용접열재현한 경우 0.5mm가 -310.5MPa, 2.5mm가 -211.1MPa, 5mm가 -74.4MPa로 각각 나타났다. 이들 값을 비교하면 표면은 거의 동일한 잔류응력을 나타내지만 최중심부 영역에서는 1100℃로 용접열재현한 경우의 잔류응력이 완화되고 있음을 알 수 있다. 이는 용접열사이클 재현 후 내부조직의 조대화 때문으로 생각된다. 모재와 1100℃로 용접열사이클 재현을 한 시편의 평균을 보면 약 -131MPa의 차를 나타내는데 이는 SS400강과 동일하게 시편 내부의 잔류응력의 영향이 기계적 성질에 영향을 주고 있음을 알 수 있다(안석환, 2005).

Fig. 6(b)의 잔류응력 완화 열처리 시편에 있어서는 처리 후의 모재에서 0.5mm가 -350MPa, 2.5mm가 11.9MPa, 5mm가 112.9MPa를 각각 나타내고 있다. 또한 처리 후 1100℃에서의 용접열재현한 경우 0.5mm가 -11.1MPa, 2.5mm가 -142.1MPa, 5mm가 -159.3MPa를 나타내었다. 잔류응력 완화 열처리 후의 모재의 표면에서의 잔류응력값은 열처리 전의 표면에서의 잔류응력값과 거의 변화가 없었으나, 내부로 옮겨 갈수록 응력의 완화가 크게 나타났고 중심부에서는 오히려 인장의 잔류응력이 재차 발생하였다. 이는 용접열사이클 재현장치 안에서의 서냉 후 꺼내어 잔류응력 완화 열처리를 위한 가열 후 수냉시킨 영향으로 판단된다. 반면 1100℃의 경우에는 모재보다도 응력완화처리 후의 표면에서 응력완화가 많이 발생하였으나 내부에서는 거의 비슷한 값을 나타내었고, 응력완화 처리 후의 시편의 경우에는 내부로 갈수록 압축잔류응력을 나타내었다. 이는 응력완화 후 재차 용접열사이클 재현을 행함으로써 발생한 열응력의 영향으로 판단된다.

STS304강의 인발 시편과 잔류응력 완화처리 시편에 대해서 모재(a)와 1100℃에서 용접열사이클 재현한 시편(b)을 각각 비

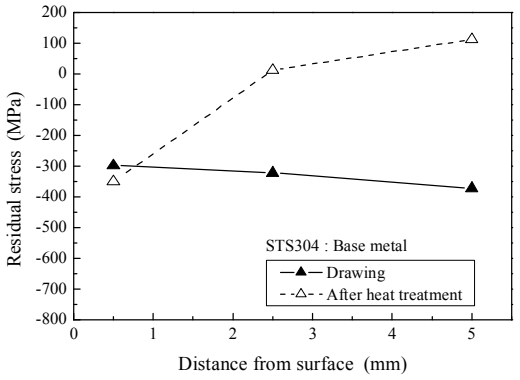


(a) Drawing

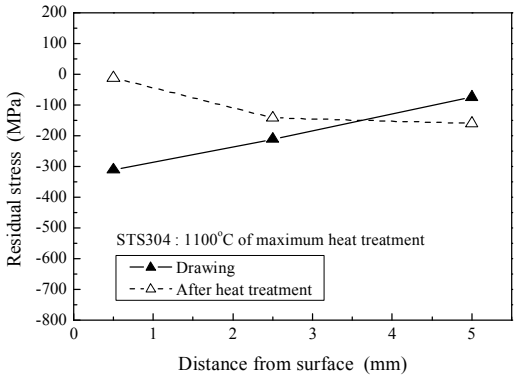


(b) After heat treatment

Fig. 6 Comparison of residual stresses between base metal and specimen of 1100℃ of maximum heat temperature for STS304 steel



(a) Base metal



(b) 1100℃ of maximum heat temperature

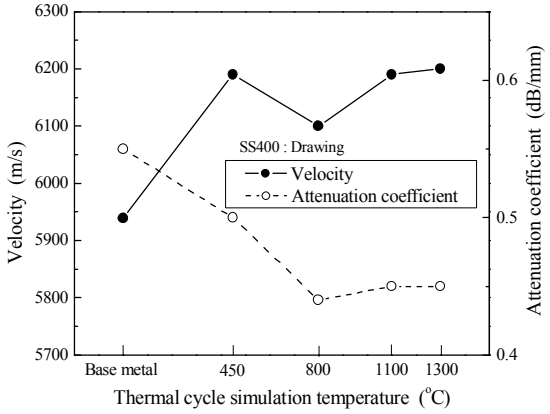
Fig. 7 Comparison of residual stresses for base metal and specimen of 1100℃ of maximum heat temperature of figure 6, respectively

교한 것을 Fig. 7에 나타내었다. 모재의 두 시편을 비교해 보면 표면은 거의 비슷한 압축응력을 나타내고 있지만 내부로 갈수록 인발시편은 압축응력을, 잔류응력을 완화한 시편은 인장응력의 형태로, 상기 SS400강의 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 이는 상기에도 나타내었듯이 인발시편은 인발공정에 의한 내벽의 마찰저항으로 시편 내부가 압축의 잔류응력을 가지게 되고, 잔류응력 완화처리 시편은 잔류응력의 완화 및 이후의 용접열사이클 재현에 의한 열응력의 영향 때문인 것으로 사료된다. 또한 1100℃ 용접열사이클 재현한 시편(Fig. 7(b))을 비교해 보면 인발된 시편의 용접열사이클 재현 후의 표면은 압축의 잔류응력을 나타내고 내부로 갈수록 응력이 완화되고 있으나, 잔류응력 완화처리 시편의 용접열사이클 재현 후의 표면은 거의 0의 값을 가지고 내부로 갈수록 압축의 응력을 보인다. 이것은 위에서도 나타내었듯이 잔류응력 완화처리 시편의 경우는 완화 열처리 후 재차 행해진 용접열재현에 의한 열응력의 영향이 다소 작용하고 있는 것으로 판단된다.

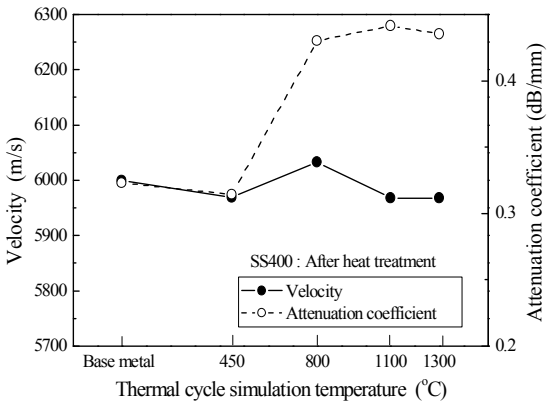
3.3 초음파 속도 및 감쇠계수

Fig. 8과 9에는 각 재료에 대한 인발 및 잔류응력 완화처리 후 각각 열재현한 시편에 대한 각 온도에서의 초음파 속도 및 감쇠계수를 나타낸다. 초음파속도는 파의 종류 및 탄성파 특성과, 종탄성계수, 밀도, 포와송비, 가공경화, 소성변형, 부하, 잔류응력 등의 재료특성과 부식, 고온피로 등의 환경특성에 의해 결정된다. 감쇠계수는 파의종류, 주파수, 파장 등의 탄성파 특성과, 결정립분포, 석출물, 개재물 등의 조직불균일 및 잔류응력 및 부식, 균열 등의 표면조도에도 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 금속에 있어서는 시험편의 결정립이 커질수록 속도는 감소하고 감쇠계수는 증가한다고 알려져 있다이는 결정립이 클수록 산란감쇠가 커지며, 주로 주파수가 높을수록 산란이 심해지기 때문이다(홍순택 등, 1999; 남기우등, 2003a; 2003b; 오세규 등, 1987; 박은수 등, 2002; 박은수, 1992; 이충헌과 이경애 , 1999).

Fig. 8(a)에 나타나 있는 SS400강의 인발시편의 경우에는 전보

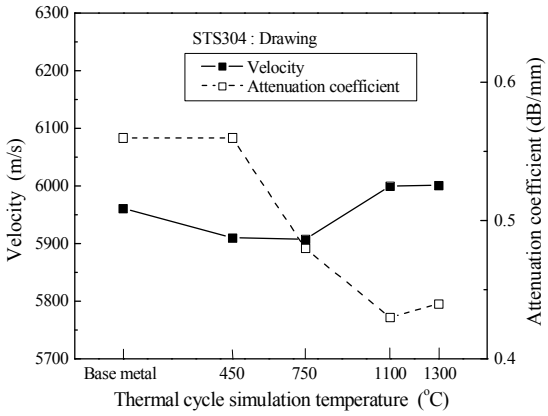


(a) Drawing

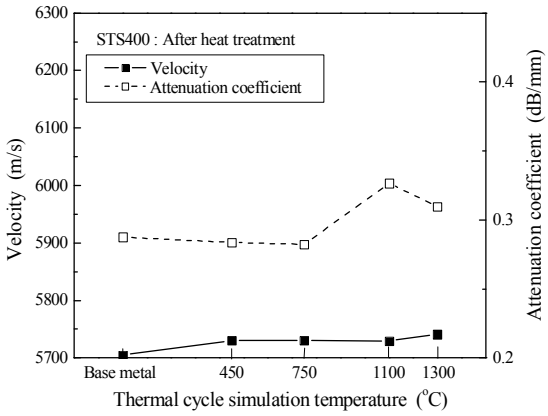


(b) After heat treatment

Fig. 8 The velocity and attenuation of SS400 steel according to the weld thermal cycle simulation temperature



(a) Drawing



(b) After heat treatment

Fig. 9 The velocity and attenuation of STS304 steel according to the weld thermal cycle simulation temperature

(안석환, 2005)에서 모재 및 450℃의 경우 결정입도가 크게 나타났다. 따라서 감쇠가 크게 나타났다. 또한 인발가공으로 인해 축(길이)방향으로 조직이 편평화되어졌고, 이 편평화된 조직의 길이 및 방향이 음파에 영향을 미치게 되고 내부로 갈수록 섬유조직의 편평화가 발달함으로써 매질의 규칙적 진동을 방해하여 산란, 흡수 등의 작용으로 인해 감쇠계수가 크게 나타난 것으로 판단된다(남기우 등, 2003a; 2003b; 이충헌과 김경애, 1999; 박은수 등, 2002). 초음파속도에 있어서는 인발된 모재에서 가장 낮게 나타났으며, 다른 온도대에서는 유사한 값을 나타내었다. 용접열사이클 재현한 경우에는 800℃에서 재결정으로 인해 조직이 다소 미세화 되어져 감쇠계수가 낮게 나타났으나 이후 변태점온도 이상으로 목적온도가 높아짐에 따라 결정립의 조대화가 나타났고 이는 감쇠계수가 소폭이나마 상승한 결과를 가져온 것으로 판단된다.

잔류응력 완화처리 시편(b)는 열처리로 인하여 잔류응력이 많이 완화되었는데 다음 단계로 계속해서 용접열사이클 재현을 실시하였지만 초음파 속도에는 거의 변화가 나타나지 않았다. 그러나 감쇠계수는 A_1변태점 온도 이상인 800℃부터 재차 용접열사이클 재현에 의해 재결정화가 발생하였고 이후 결정입자가 조대화되어 증가하고 있는 양상을 나타내었다(이충헌과 김경애, 1999). 인발된 시편과 비교해 보면, 속도는 인발된 시편보다 다소 낮게 나타났다. 반면 감쇠계수는 목적온도 800℃ 이상에서 인발된 시편의 목적온도 800℃이상의 감쇠계수에 근접하는 값을 나타내었다. 이는 전보(안석환, 2005)에 나타낸 것처럼 결정입자의 직경이 450℃까지는 인발시편의 경우가 더 컸으나, 800℃ 이상에서는 오히려 잔류응력 완화처리후의 시편에서 더 크게 나타난 결과로 판단된다. 여기에는 조직뿐만 아니라 다른 변수들이 초음파의 속도와 감쇠계수에 영향을 미치는 것으로도 사료되며(박은수 등, 2002), 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 생각한다.

Fig. 9는 STS304강에 대한 초음파의 속도와 감쇠계수의 상관관계를 나타낸다. 그 결과는 전반적으로 SS400강과 유사한 경향을 나타내었다. 인발된 시편은 속도에서는 거의 유사한 값을 나타내었고 1100℃에서 조직의 조립화에 의해 감쇠계수가 소폭 상승하는 경향을 보였다. 잔류응력 완화처리 시편은 용접열사이클 재현을 하더라도 조직에는 큰 차이를 보이지 않았고, 속도나 감쇠계수에 거의 변화가 나타나지 않았다.

한편 인발된 시편과 비교하였을 때는 속도와 감쇠계수 모두 낮은 값을 가지는데 이는 잔류응력 완화처리에 의한 잔류응력 감소의 영향으로 판단되며 상기에도 언급하였듯이 초음파속도 및 감쇠계수에 잔류응력이 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

(1) SS400강의 경우에는 A_1변태점 이상의 온도로 용접열사이클 재현을 하였을 경우에는 압축잔류응력이 상당히 감소했다. 이것으로부터 SS400강의 인발 후 용접열사이클 재현한 시편의 인장강도가 최고가열온도 800℃에서 급격한 저하를 나타낸 원인으로 잔류응력이 영향을 미치는 것으로 사료된다.

또한, 잔류응력을 완화하기 위해 열처리를 실시한 경우의 결과는, 열처리 후 모재 및 800℃로 용접열사이클 재현한 경우 모두에서 비슷한 응력값을 나타내었다. 인발에 의해 발생한 잔류응력을 완화하기 위한 열처리 효과로부터 모재와 800℃ 용접열사이클 재현한 시편의 잔류응력의 차는 거의 나타나지 않았다. 그리고, 모재 및 800℃ 용접열재현한 경우 모두에서, 인발 후 용접열재현한 경우보다 잔류응력 완화 후 용접열재현한 경우에 잔류응력이 낮게 나타났다.

(2) STS304강의 경우에는 인발 후 모재에 비해 인발 후 1100℃에서 용접열재현한 시편에서 표면은 거의 동일한 잔류응력을 나타내지만 최중심부 영역에서는 잔류응력이 완화되고 있음을 알 수 있다.

또한, 잔류응력 완화 열처리 후의 모재의 표면은 거의 변화가 없었으나 내부로 옮겨 갈수록 응력의 완화가 많이 일어났다. 반면 1100℃의 경우에는 열처리 후 표면에서는 응력완화가 많이 발생하였으나 내부에서는 거의 비슷한 값을 나타내었다.

(3) SS400강의 인발시편의 모재 및 450℃에서 감쇠가 크게 나타났다. 초음파속도에 있어서는 인발된 모재에서 가장 낮게 나타났으며, 다른 온도대에서는 유사한 값을 나타내었다. 용접열사이클 재현한 경우에는 800℃에서 감쇠계수가 낮게 나타났으나, 변태점온도 이상으로 목적온도가 높아짐에 따라 결정립의 조대화가 나타났고 이는 감쇠계수가 소폭이나마 상승한 결과를 가져온 것으로 판단된다.

잔류응력 완화처리 시편에서는 초음파 속도에는 거의 변화가 나타나지 않았으나, 인발된 시편에 비해 다소 낮게 나타났다. 감쇠계수는 A_1변태점 온도 이상인 800℃부터 증가하고 있는 양상을 나타내었고 목적온도 800℃ 이상에서 인발된 시편의 목적온도 800℃이상의 감쇠계수에 근접하는 값을 나타내었다.

(4) STS304강에 대한 초음파의 속도와 감쇠계수의 결과는 전반적으로 SS400강과 유사한 경향을 나타내었다.

(5) 인발된 시편에 비해 잔류응력 완화처리한 시편의 초음파 속도와 감쇠계수가 모두 낮은 값을 가지는데 이것으로부터 잔류응력이 초음파 속도와 감쇠계수에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

김효준, 이상익 (1989). "과공정 CV흑연주철에서 주물의 직경이 기지조직, 기계적 성질 및 초음파속도에 미치는 영향", 대한금속학회지, 제27권, 제9호, pp 784-792.

남기우, 박소순, 안석환 (2003a). "STS316L 모재 및 용착부의 열처리에 따른 초음파 특성", 대한금속·재료학회지, 제41권, 제3호, pp 186-195.

남기우, 박소순, 안석환 (2003b). "STS316L용접재의 표면파에 의한 잔류응력 측정과 균열진전시의 음향방출특성", 한국해 양공학회지, 제17권, 제1호, pp 47-54.

미곡 무 (1983). 잔류응력의 발생과 대책, 양현당.

박은수 (1992). 초음파법에 의한 철강(SCM440)의 표면경화층의 결정입도 및 조직변화에 관한 연구, 한양대학교 박사학위

논문.
박은수, 박익근, 송성진 (2002). 비파괴평가공학, 학연사, pp 227-231.
사토우 쿠니히코, 우에다 유키오, 후지모토 츠기오 (1980). 현대용접기술대계-용접변형 · 잔류응력, 산보출판.
스토우 하지메 (2003). 잔류응력과 뒤틀림, 우치다 로카쿠호.
안석환, 정정환, 남기우 (2005). ″용접열사이클 재현에 의한 SS400강 및 STS304강의 특성 평가 - 제1보: 기계적특성 및 조직″, 한국해양공학회지, 제19권, 제6호, pp 64-71.
안홍조, 이찬우, 이창희 (2000). ″C-Mn 구조용강 열영향부의 결정 립 성장 거동 예측 모델링″, 대한금속 · 재료학회지, 제38권, 제6호, pp 841-850
오세규, 김동조, 한상덕(1987). “이종재 마찰용접 이음부에서 초음파 반사계수와 용접부와의 관계”, 한국해양공학회지, 제1권, 제1호, pp 138-143.
이용복, 조남익, 박강은, 1996, “SS400 용접부의 표면피로균열거동에 관한 연구”, 대한용접학회지, 제14권, 제2호, pp 124-129.
이익성, 주재현 (1996). ″인발가공 조건이 잔류응력 발생에 미치는 영향″, 한국소성가공학회 및 대한금속학회 공동심포지움, pp 163-175.
이종섭, 김숙환 (1998). “오스테나이트계 스텐인리스강 용접부의 금속학적 현상에 관한 연구(Ⅰ) - 시판 오스테나이트계 스테인리스강의 용접성-”, 대한용접학회지, 제16권, 제3호, pp 239-248
이충헌, 김경애 (1999). 초음파탐상 검사, 세진사, pp 51-57.
일본용접학회 (1990). 용접 · 접합편람, 마루젠주식회사, pp 810-811.
장경호, 이진형, 신영의 (2004). “고강도강재의 고온인장특성 및 용접시 잔류응력특징에 관한 연구”, 대한용접학회지, 제22권, 제4호, pp 346-354.
홍순택, 권숙인, 조응용 (1999). “초음파 감쇠측정에 의한 탄소강 미세조직의 비파괴적 평가 “, 대한금속학회지, 제37권, 제7호, pp 754-759.
Adler, T.A. and Walters, R.P. (1993). “Repassivation of 304 Stainless Steel Investigated with a Single Scratch Test”, Corrosion, Vol 49, No 5, pp 399-408.
American Welding Society (1976). Welding Handbook - Fundamentals of Welding, 7 Edition, Vol 1, pp 222-282.
Kinami, T. and Kimura, A. (1992). “Effect of Temperature on Deformation Charistics of Stainless Steels under High Speed Forming Conditions”, DENKI-SENKO, Vol 63, No 2, pp
Solomon, H.D. (1985). “Influence of Prior Deformation and Composition on Continuous Cooling Sensitization of AISI 304 Stainless Steel”, Corrosion, Vol 41, No 9, pp 512-516.
Tomimura, K. and Takaki, S. (1988). "Reversion Process of Deformation Induced Martensite to Austenite in Metastable Austenitic Stainless Steel", Tetsu to hagane, No 8, pp 1649-1656.

2008년 11월 3일 원고 접수
2008년 11월 27일 최종 수정본 채택