

研究論文

## Cu를 함유한 HSLA-100강 용접 열 영향부의 인성에 미치는 후열처리의 영향

朴太遠\* · 沈仁玉\* · 金英宇\* · 姜晶允\*\*

### The effects of PWHT on the toughness of weld HAZ in Cu-containing HSLA-100 steel

T. W. Park\*, I. O. Shim\*, Y. W. Kim\* and C. Y. Kang\*\*

**Key Words** : Postweld Heat Treatment(용접후 열처리), Aging(시효), Precipitates(석출물), Heat Affected Zone(열 영향부), High Strength Low Alloy Steel(저합금 고장력강), Impact Toughness(충격 인성)

#### Abstract

A study was made to examine the effects of postweld heat treatment(PWHT) on the toughness and microstructures in the weld heat affected zone(HAZ) of Cu-bearing HSLA-100 steel. The Gleeble thermal/mechanical simulator was used to simulate the weld HAZ. The details between toughness and PWHT of HAZ were studied by impact test, optical microscopy(O.M), scanning electron microscopy(SEM), transmission electron microscopy(TEM) and differential scanning calorimetry(DSC). The decrease of HAZ toughness in single thermal cycle comparing to base plate is ascribed to the coarsed-grain formed by heating to 1350°C. The increase of HAZ toughness in double thermal cycle comparing to single thermal cycle is due to the fine ferrite( $\alpha$ ) grain transformed from austenite( $\gamma$ ) formed by heating to  $\alpha/\gamma$  two phase region. Cu precipitated during aging for increasing the strength of base metal is dissolved during single thermal cycle to 1350°C and is precipitated little on cooling and heating during subsequent weld thermal cycle. It precipitates by introducing PWHT. Thus, the decrease of toughness in triple thermal cycle of  $T_{p1}=1350^\circ\text{C}$ ,  $T_{p2}=800^\circ\text{C}$  and  $T_{p3}=500^\circ\text{C}$  does not occur owing to the precipitation of Cu. The behaviors of Cu-precipitates in HAZ is similar to that in base plate. PWHT at 550°C shows highest hardness and lowest toughness, whereas PWHT at 650°C shows reasonable toughness, which improves the toughness of as-welded state.

\* 정회원, 국방 과학 연구소

\*\* 정회원, 부산대학교 공과대학 금속공학과

## 1. 서 론

용접 구조물에서 후열처리(PWHT)과정은 재료의 안정성 및 신뢰성을 향상시키는 제조 공정이다. PWHT는 많은 규격, 기준 등에 의하여 엄격히 정해지며, 재료의 종류, 두께, 용접상태, 사용조건 등에 따라 실시하고 있다. 또 규격에서 요구하지 않는 경우에도 크기, 형상, 사용조건, 부하 등을 고려하여 필요하면 행하는 경우도 있다<sup>1)</sup>.

PWHT의 목적으로는 용접잔류응력 및 변형의 완화, 용접부 성능 개선을 들 수 있다. 용접잔류응력은 PWHT온도로 가열하는 과정 및 PWHT온도에서 유지되는 동안 크립현상에 의해 저하하며, 그 감소 정도는 가열 온도에 의해 크게 영향을 받는다. 잔류응력 및 변형의 완화로 구조물의 형상 및 치수의 안정화 효과를 얻을 수 있다. 용접부의 성능개선효과로서는 HAZ경화부의 연화, 용착금속의 연성 향상, 취성괴파의 방지, 함유 가스의 제거, 크립특성, 내식특성 및 피로강도의 개선 등 많은 효과를 들 수 있다<sup>2)</sup>.

그러나 PWHT의 효과는 가열속도, 유지온도, 냉각속도 등의 영향을 받으며, 강종 또는 조건에 따라서는 역효과를 나타내는 경우도 있어, 목적에 따라 적절한 열처리 조건을 선택하는 것이 매우 중요하다.

Cu를 함유한 저합금 고장력(HSLA)강은 PWHT를 행하면 SRC(stress relief cracking)에 대한 민감도가 증가하는 것으로 알려져 있다. Lundin 등<sup>3)</sup>은 Cu를 함유한 HSLA-80강을 538°C에서 PWHT하면  $\epsilon$ -Cu이 석출되어 경도가 상승하는 것으로 보고하였다. Bolliger 등<sup>4)</sup>은 Cu를 함유한 A710강의 PWHT에 대한 연구 결과, 620°C에서 장시간(10시간) PWHT하여야만 HAZ부의 인성이 약간 개선되기 때문에 용접한 상태로 사용하는 것이 바람직하다고 보고하였다. 이와 같이 PWHT중에  $\epsilon$ -Cu이 석출하여 경도가 상승하기 때문에, Cu를 함유한 저합금 고장력강에 대한 대부분의 연구 보고는 PWHT의 생략을 제안하고 있다.

다층 용접할 경우에도 전층의 결정립 조대화 영역이 후속층의 열영향에 의해 PWHT와 비슷한 열처리를 받을 수 있기 때문에 인성이 저하할 것으로 예상되고, 인성의 저하는 주 강화 원소로 첨가되는 Cu에 의한  $\epsilon$ -Cu상의 석출 강화에 의한 것으로 보고되고 있다<sup>5)</sup>.

항복강도 560MPa수준인 A710강과 HSLA-80강에 관해서는 열영향부의 조직과 인성과의 상관 관계에 대한 연구가 부분적으로 보고되고 있으나, 항복강도 690MPa수준인 HSLA-100강에 대한 연구보고는 거의 없다. 그리고 모재와 열영향부의 미세조직과 기계적 특성을 복합적으로 고려하지 않고, 모재만을 또는 용접부만을 독립적으로 연구함으로써 Cu석출물에 의해 강화되는 이 재료의 독특한 특성에 대한 이해가 부족한 실정이다. 즉, 모재에서의 Cu석출물 거동에 관해서는 많은 연구가 행하여지고 있지만, 용접 열영향부에서의 석출물 거동에 관한 연구 보고는 없다.

따라서 이 합금의 모재와 용접 열영향부에 대한 미세조직과 석출 특성에 관한 이해를 통하여, PWHT를 도입하여 충격인성을 증가시킬 수 있다면 이 재료의 용접부 성능 개선에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Cu를 함유한 HSLA-100강의 시효온도에 따른 모재의 특성을 조사하고, Gleeble로 재현한 용접 열영향부에 대해 550°C, 600°C, 650°C에서 PWHT를 행하여, PWHT온도와 충격인성과의 관계를 구함으로써 PWHT도입에 의해 인성을 증가시킬 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 시험재 및 실험방법

### 2.1 시험재

사용한 시험재는 진공용해한 후 압연개시 및 종료 온도를 각각 1100°C 및 900°C로 하여 제조하였다. Table 1은 시험재의 화학조성을 나타낸 것으로 탄소량이 0.04wt%로서 기존의 항복강도 690MPa수준으로 사용되고 있는 HY계(0.16wt%)보다 적으며

Table 1. Chemical composition of HSLA-100 steel. (wt%)

	C	Si	Mn	Cu	Sol-Al	Ni	Cr	Mo	Nb
HSLA-100	0.035	0.395	0.89	1.52	0.027	3.44	0.597	0.356	0.042

탄소량의 감소에 의한 강도 저하를 보상하기 위해 석출상을 생성시키는 Cu를 1.5wt%첨가하였고, Cu 첨가에 의한 고온취성을 방지하고 저온 충격인성을 향상시키기 위해 Ni을 첨가하였다. 또한, 경화 특성을 향상시킬 목적으로 Ni, Mn, Mo 등의 원소를 첨가하였다.

13 mm두께로 압연된 판재는 900°C에서 1시간 동안 오스테나이트( $\gamma$ )처리하여 수냉하였다. 수냉 후 시효 처리는 300°C~670°C 온도범위에서 1시간 동안 유지한 후 공냉하였다.

## 2.2 실험 방법

시효한 시험재에 대해 인장 및 충격시험을 하였다. 650°C에서 시효한 시험재에 대해서는 Gleeble 1500을 이용하여 용접 열cycle재현시험을 하였다. 용접 열cycle재현 시편은 10.5×10.5×57(mm)크기로 가공하였으며, 열cycle 조건은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 즉, 단일, 2중 및 3중 열cycle로 구분하고, 최고가열온도는 각각 1350°C, 1350°C+800°C 및 1350°C+800°C+500°C로서 급열하였다. 또 냉각속도는 두께 25 mm 강재를 예열없이 20kJ/cm의 입열량으로 GMA용접하는 경우를 예상하여 800°C에서 500°C까지의 냉각시간( $\Delta t_{800/500}$ )을 10초로 제어하였다<sup>6)</sup>.

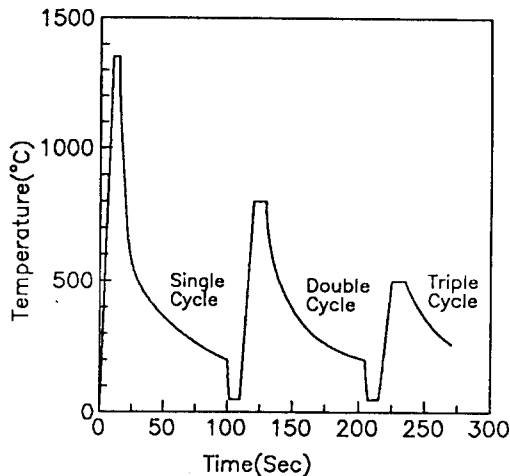


Fig. 1. Thermal cycle used for HAZ simulation.

이러한 열cycle재현 시편에 대한 PWHT는 단일 열cycle의 경우 650°C, 2중 열cycle은 650°C, 600°C, 550°C, 3중 열cycle의 경우에는 650°C에서 각각 1시

간 동안 실시하였다.

이들 시편에 대해서 경도, 인장 및 충격시험을 하였으며, 주사전자현미경을 이용하여 충격시험후 파면을 관찰하였다. 또한, 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 석출물 및 미세조직을 관찰하였으며, 모재와 열cycle재현한 시편 및 PWHT한 시편에 대한  $\epsilon$ -Cu의 거동을 조사하기 위해서는 시차주사열분석(differential scanning calorimetry, DSC)을 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 모재의 특성

Fig. 2는 900°C에서 1시간 동안  $\gamma$ 처리하여 수냉한 시편을 각 온도에서 시효한 후 시효 온도에 따른 항복강도의 변화를 나타낸 것이다. 300°C에서는 AQ(as-quenched)상태보다 상당히 높은 항복강도를 나타내며, 400°C에서 약간 감소하였다가 500°C에서 최대를 나타낸 후 급격히 저하하는 경향을 나타낸다. 저자 등<sup>7,8)</sup>은 300°C에서의 항복강도 증가는 bcc 구조인 정합의 Cu-clusters 생성에 의한 것이며, 400°C에서는 뜨임에 의한 연화 효과가 크게 나타나서 강도가 감소하며, 500°C에서는 Cu-clusters 및  $\epsilon$ -Cu상이 석출되어 강도 증가 효과가 뜨임에 의한 연화 효과보다 크게 나타나 최대 강도를 나타내고, 시효 온도를 더욱 높이면 석출물의 조대화 및 뜨임

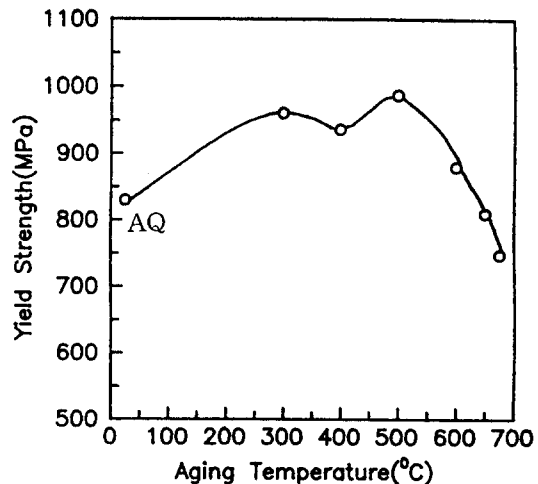


Fig. 2. Yield strength with aging temperature of HSLA-100 steel.

에 의한 연화로 강도가 급속히 감소함을 보고한 바 있다.

Photo. 1의 (a), (b)는 각각 최대 강도를 나타내는 500°C와 과시효 상태인 650°C시효 때의  $\epsilon$ -Cu상을 나타낸 것이다. 이러한 석출상들이 강도 증가에 기여하는 것으로 판단되며, 최대 강도를 나타내는 500°C에서는 석출물이 미세하고, 650°C때는 500°C보다 석출물이 조대화되었음을 알 수 있다.

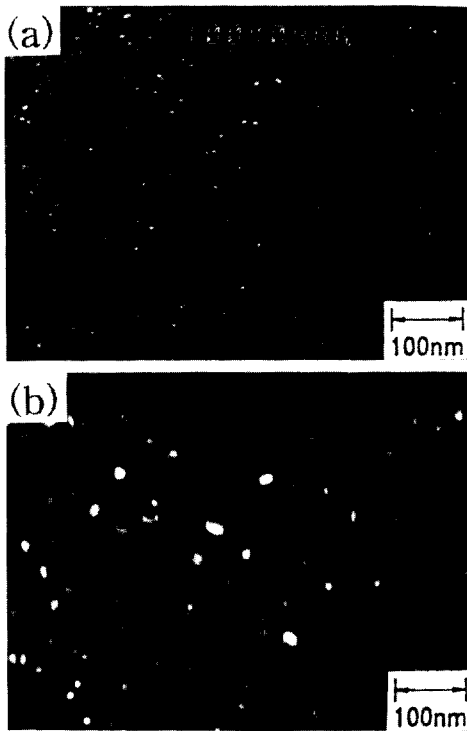


Photo. 1 TEM micrographs of HSLA-100 steel aged at 500°C(a) and 650°C(b).

Fig. 3은 Fig. 2와 같은 조건으로 열처리한 시편에 대해 LT방향의 충격인성을 측정된 것이다. 300°C보다 400°C에서 약간 증가하였다가, 500°C에서는 아주 낮은 충격인성을 나타내며, 그후는 급격히 증가한다. 이러한 경향은 Fig. 2의 항복강도 곡선과 잘 대응되는 경향을 나타낸다.

Fig. 2와 Fig. 3의 실험결과에서, 650°C에서 시효할 경우 690MPa이상이며 가장 높은 충격인성을 나타내기 때문에 650°C에서 시효한 시편에 대해 용접 열영향부 재현 열처리를 행하였다.

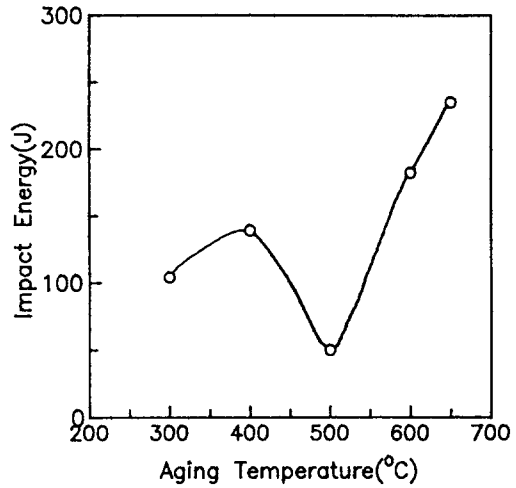


Fig. 3. Impact energies tested at R.T with aging temperature in base metal of HSLA-100 steel.

## 3.2 HAZ의 특성 및 PWHT의 영향

### 3.2.1 미세 조직

Photo. 2의 (a), (b), (c), (d)는 각각 650°C에서 시효한 모재의 조직과 단일, 2중 및 3중 열cycle처리한 열영향부의 조직이다. 모재(a)의 결정립 크기는 약 6 $\mu$ m이나  $T_{\text{H}}=1350^{\circ}\text{C}$ 로 가열된 (b)는 약 80 $\mu$ m로 조대화하였다. 2중 열cycle처리한 (c)에는 부분적으로 작은 결정립이 관찰되며, 500°C의 열영향을 받은 (d)는 (c)와 비슷한 조직을 나타낸다.

### 3.2.2 경도

Fig. 4는 2중 열cycle처리한 시편(A.W)과 2중 열cycle처리후 550°C, 600°C, 650°C에서 각각 1시간 동안 PWHT한 시편에 대한 경도값의 변화를 나타낸 것이다. 경화 특성은 Fig. 2의 모재와 같은 경향인데, 이것은 3.2.4의 석출상 거동에 대한 실험결과 (Fig. 8, Fig. 9)에서 설명하겠지만, 단일 열cycle처리로 1350°C까지 가열될 때  $\epsilon$ -Cu가 재용해되어 냉각중 석출되지 않으며, 고용된 상태가 2중 열cycle후에도 유지되고, PWHT에 의해  $\epsilon$ -Cu상이 석출하여 경화에 기여하기 때문인 것으로 판단된다. 550°C와 600°C는 높은 경도값을 나타내는데, Fig. 2와

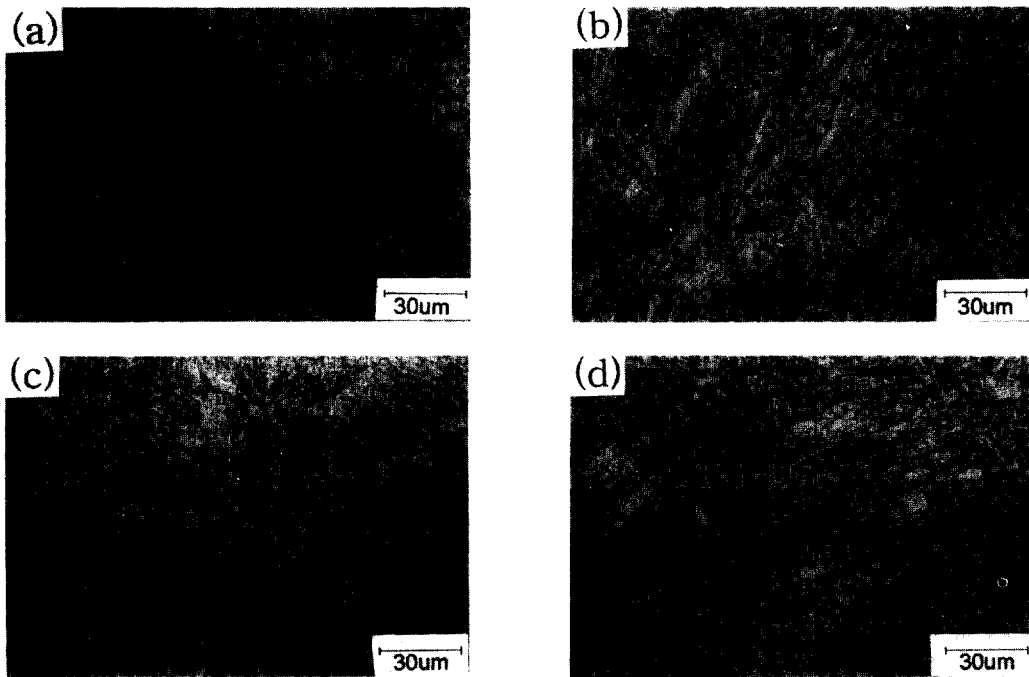


Photo. 2 Optical micrographs with thermal cycle.  
 (a) base metal (b) single cycle (c) double cycle (d) triple cycle

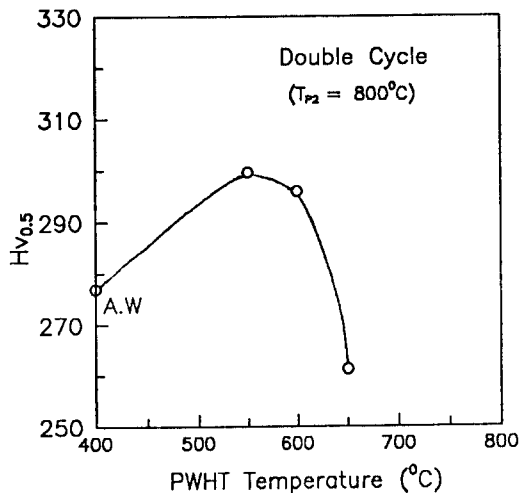


Fig. 4. Variation of hardness with PWHT temperature after double thermal cycle.

Fig. 3의 모재의 특성에서 조사한 바와 같이 항복강도 690MPa 이상이며 양호한 충격인성을 갖는 최적의 온도가 650°C임을 고려하면 PWHT는 550°C와 600°C보다는 고온에서 행하여야 원하는 PWHT효

과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 650°C PWHT 때는 Hv 260으로서 600°C보다 급격히 저하하여 AW 상태나 모재(Hv 280)보다도 더욱 낮은 값을 나타낸다.

### 3.2.3 충격 인성

Fig. 5는 2중 열cycle처리 한 시편과 2중 열cycle 처리한 후 550°C, 600°C, 650°C에서 각각 1시간 동안 PWHT한 시편의 충격인성을 모재와 비교한 것이다. PWHT온도에 따른 충격인성은 Fig. 4의 정도값과 잘 대응하고 있다. AW상태에서 약 180J이고, 550°C, 600°C PWHT의 경우는 AW상태보다 훨씬 낮은 100J 정도의 충격인성을 나타내지만, 650°C에서는 약 220J로 모재보다는 약간 낮지만 AW상태보다 높은 값을 나타낸다.

Cu를 함유한 HSLA강의 PWHT에 관한 연구에서 대부분의 연구자들은 HSLA-100강의 대체 대상 재료인 HY-100강과 같은 조절고장력강에서 요구되는 뜨임온도보다 낮은 온도(HY-100강의 뜨임 온도는 660°C임), 즉 AWS D 1.1"에서 규정된 온도범위인

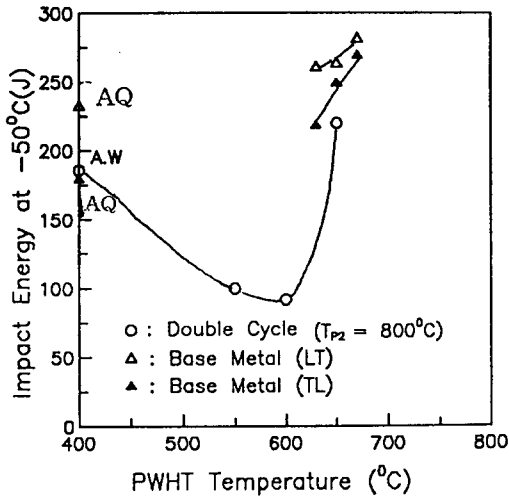


Fig. 5. Impact energies tested at  $-50^{\circ}\text{C}$  with PWHT temperature of the base metal and double cycled specimens

600°C를 기준으로 하였기 때문에 600°C근방의 PWHT는 Fig. 4에서 살펴본 바와 같이 강도가 증

가하여 충격인성의 저하를 초래한 것으로 판단된다.

Lundin등<sup>9)</sup>은 Cu를 함유한 A710강의 565°C, 621°C, 677°C PWHT 균열을 C-ring과 Y-groove 실험으로 조사한 결과, PWHT 균열에 민감한 원인은 재현열처리로 생성된 과포화고용상태의 시편에 대하여, 응력을 가한 후 온도를 올림에 따라 입계 석출물의 생성, 성장이 입내보다 빨라, 입계 석출물이 조대화되어 입계와 입내의 강화 차이로 인한 입계응력집중으로 파단시간이 감소된다고 하였다.

2중 열cycle 처리한 시편과 2중 열cycle 처리 후 550°C, 600°C 및 650°C에서 1시간 동안 PWHT한 시편의 충격 파단면을 Photo. 3의 (a), (b), (c), (d)에 각각 나타내었다. (a), (b), (c)는 모두 취성의 입내벽개파괴이지만, (d)는 연성의 입내 딩플(dimple)에 의한 파단면이다.

Fig. 6은 모재와 2중 열cycle 처리 후 600°C와 650°C에서 PWHT한 시편의 충격시험 온도에 따른 충격인성의 변화를 나타낸 것이다. 모재의 경우 -100°C까지 높은 충격인성을 나타내나, 600°C PWHT와 650°C PWHT의 경우 각각 상온이하, -18°C 이하

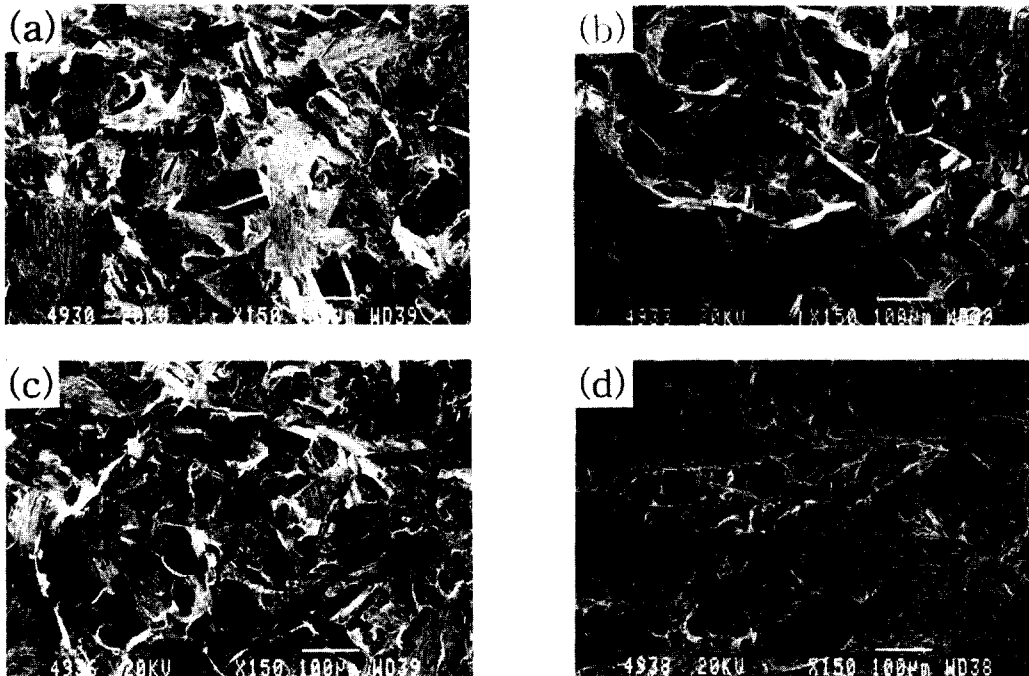


Photo. 3 SEM fractographs with PWHT temperature of HSLA-100 steel.

(a) As-double cycled (b) 550°C (c) 600°C (d) 650°C

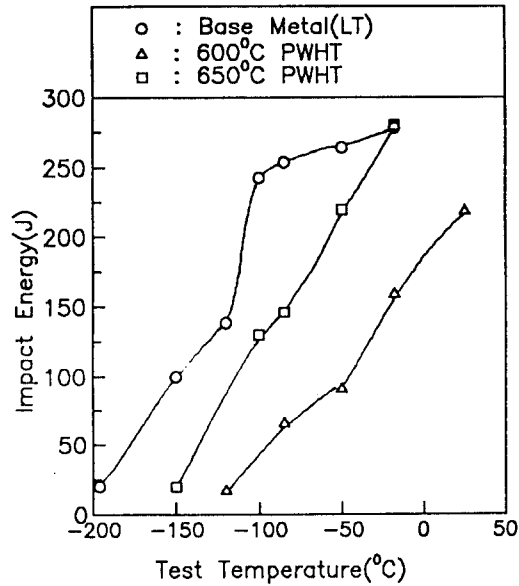


Fig. 6. Impact energies with test temperature of base metal and PWHT specimens at 600\* and 650 \* after double cycle.

에서 충격인성이 감소한다. 충격인성은 모두 모재 →650°CPWHT→600°CPWHT의 순으로 낮아짐을 알 수 있다. 그리고 모재의 충격전이온도는 약 -140°C, 650°CPWHT와 600°CPWHT한 경우는 각각 -90°C, -45°C로 나타났다.

두 PWHT온도가 파단면에 미치는 영향을 조사하기 위하여 -50°C에서 충격 시험한 파단면을 관찰하였다. Photo 4의 (a)와 (b)는 각각 600°C와 650°C에서 PWHT한 것이다. (a)는 주로 입내벽개 파괴에 의한 취성파면이나, (b)는 덩플에 의한 연성 파면을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 3, Fig. 5, Fig. 6 등의 결과에서 650°C열처리가 가장 양호한 충격인성을 나타내기 때문에 단일, 2중 및 3중 열cycle후 650°C에서 PWHT하여 충격인성을 조사하였다. Fig. 7은 그 결과를 나타낸 것이다. 모재의 충격인성에는 미치지 못하지만 각 열cycle의 AW상태보다는 높은 충격인성을 나타낸다. 여기에서, 단일 열cycle처리한 상태의 인성 저하는 Photo. 2(b)에서 보인 바와 같이 결정립의 조대화가 주 원인인 것으로 판단되고, 2중 열cycle처리로 인성이 증가한 것은 Photo. 2(c)에서 보인 바와 같이 미세한 상이 관찰되었는데, 이것은  $T_{\alpha_2}=800^\circ\text{C}$ 로 열처리시 생성된  $\gamma$ 가 냉각시 미세한  $\alpha$ 로 변태

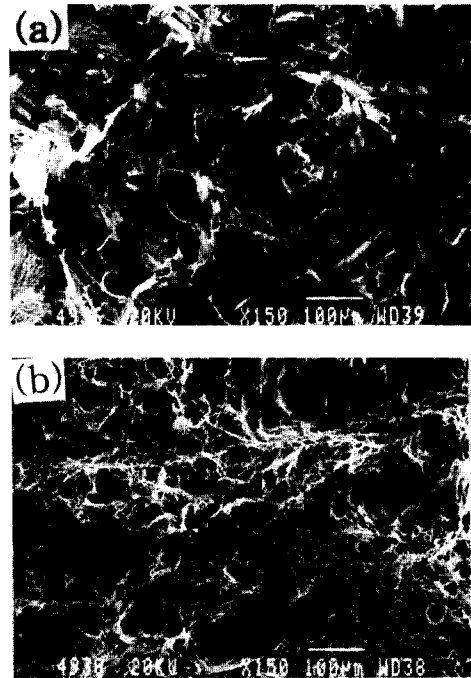


Photo. 4 SEM fractographs after impact test at -50°C for HSLA-100 steel PWHT at 600°C(a) and 650°C(b).

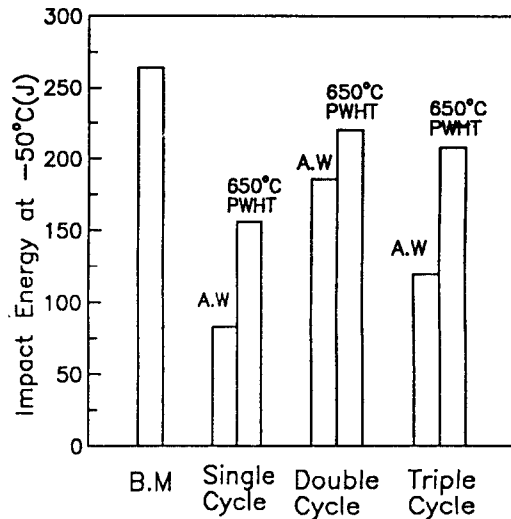


Fig. 7. Impact energies tested at -50°C with thermal cycle.

된 것으로 판단되며, 이 미세한 상으로 인하여 충격인성이 증가한 것으로 판단된다.  $T_{\alpha_2}=500^\circ\text{C}$ 의 3

중 열cycle시의 충격인성 감소는 Cu석출물에 의한 것으로 많은 연구자들<sup>6, 11)</sup>은 보고하고 있으나, 열영향부의 경화 폭선(Fig. 4)이 모재(Fig. 2)와 같은 것으로 보아, 재현 열cycle중에는 Cu석출물이 생성되지 않고, PWHT로 생성되어 경화에 기여하는 것으로 판단된다. 이에 대해서는 Fig. 8과 Fig. 9에서 다시 고찰하고자 한다.

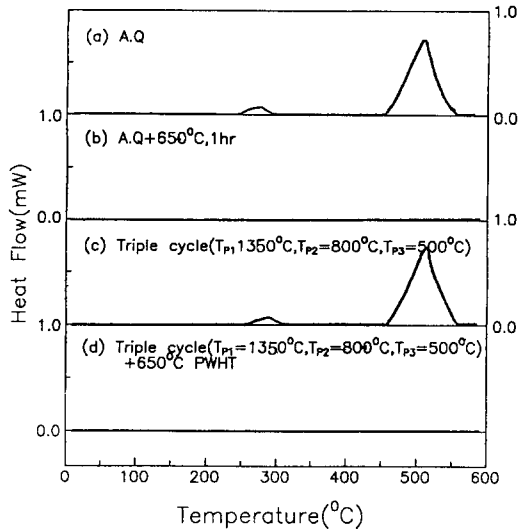


Fig. 8. DSC curves with thermal cycle

Grange 등<sup>11)</sup>의 실험결과에 의하면 Mo, Si, Cr, Ni, Mn 등의 미량원소가 첨가된 Fe-C 합금을 260°C와 540°C에서 뜨임처리하면 Fe-C 2원합금보다 경도가 훨씬 증가함을 보고하였는데,  $T_p=500^\circ\text{C}$ 의 3중 열cycle시의 인성 감소는 Mo, Si, Cr, Ni, Mn 등의 원소에 의한 경도 증가와 관련된 것으로 판단된다. 그러나 미량 합금 원소들의 정확한 영향에 대한 규명을 위해서는 2차 경화와 인성에 미치는 원소들의 영향에 대한 연구를 추가적으로 행하여야 할 것으로 판단된다.

650°C에서 PWHT하면 단일, 2중 및 3중 열cycle 처리한 시편 모두 충격인성이 증가하였는데, 이것은 모재를 650°C 시효할 때 높은 충격인성을 나타낸 결과(Fig. 3)과 같은 경향임을 알 수 있다.

### 3.2.4 석출물 거동

Cu를 함유한 저합금 고장력강을 용접할 경우,

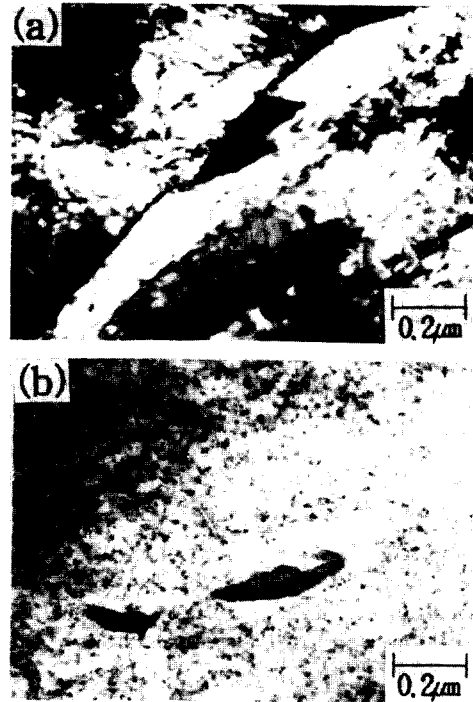


Photo. 5. TEM micrographs of HSLA-100 steel.

(a) Triple cycle

(b) Triple cycle + 650°C PWHT

$A_1$  이하 온도의 열영향을 받게 되면, Cu석출물의 재석출에 의해 충격인성이 저하하는 것으로 많은 연구자들은 보고하고 있다. 윤<sup>11)</sup>은  $T_p=600^\circ\text{C}$ 일 때 경도가 상승하는데, 이 경도 상승은 Cu-rich 입자들의 재석출에 기인하며 이 때 인성이 감소함을 보고하였다. 그는 Cu-rich 입자들의 존재를 SEM으로 제시하였는데, 아주 짧은 시간에 열영향을 받는 열영향부에서의 미세한 상의 존재를 SEM으로 규명하는 것은 어려운 것으로 판단된다. 그리하여 저자 등<sup>6)</sup>은 HSLA-100강의 주 강화 원소로 첨가된 Cu와 관련된 석출상을 연구하는데 유용한 방법으로 DSC 분석을 제시한 바가 있는데, 본 실험에서 Cu에 기인한 석출상과 관련하여 충격인성을 조사하기 위해 DSC 분석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. (a)는 A.Q 처리한 시편, (b)는 A.Q + 650°C, 1hr 시효 처리한 시편, (c)는 A.Q + 650°C, 1hr 시효 + 3중 열cycle 처리한 시편, 그리고 (d)는 A.Q + 650°C, 1hr 시효 + 3중 열cycle + 650°C PWHT 한 시편을 열분석한 폭선이다. (a)에는 280°C와 500°C 부근에서 2개의 발



열반응이 나타나고, 시효한 (b)에는 이 발열반응이 나타나지 않으며, 3중 열cycle처리한 (c)에는 (a)와 같은 곡선을 나타낸다. 그리고 PWHT한 (d)에는 이 발열반응이 관찰되지 않는다.

저자 등<sup>7,8)</sup>은 (a)곡선의 280°C부근에서 나타나는 작은 발열반응은 기지와 정합인 bcc구조의 Cu-clusters생성에 의한 것이며, 500°C부근에서 발열량이 2J/g인 반응은 fcc구조의  $\epsilon$ -Cu상의 생성에 기인한 것임을 보고한 바 있다. (b)에는 발열반응이 나타나지 않는데, 이것은 시효로 이미 상의 석출이 완료되었기 때문에, 열분석 측정중에는 반응이 나타나지 않는 것으로 판단된다. (c)에는 (a)곡선에서 나타났던 발열반응이 다시 나타나는데, 이것은  $T_p = 1350^\circ\text{C}$ 의 열cycle로 석출상이 재고용된 후,  $T_p = 800^\circ\text{C}$ 와  $T_p = 500^\circ\text{C}$ 의 열cycle처리에도 석출이 일어나지 않기 때문에, 그 후에 수행된 열분석측정 가열과정에서 Cu-clusters 및  $\epsilon$ -Cu상이 석출하여 발열을 나타내는 것으로 판단된다. (d)는 시효처리한 (b)와 마찬가지로, 650°C PWHT처리로 상이 석출되었음을 의미한다.

실제  $\epsilon$ -Cu석출물을 TEM으로 관찰한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. (a)는 3중 열cycle처리한 시편, (b)는 3중 열cycle처리+650°C PWHT한 시편의 조직이다. (a)에는 lath폭이 약 0.1 $\mu\text{m}$ 정도인 마르텐사이트만이 관찰되나, (b)에는 미세한  $\epsilon$ -Cu상이 관찰되는데, 이는 PWHT로 석출상이 생성되어 발열반응이 나타나지 않은 열분석 결과인 Fig. 8(d)와도 잘 일치한다. 앞에서 언급한 바와 같이 많은 연구자들은,  $A_1$  이하 온도의 열영향을 받게 되면 Cu석출물의 재석출로 충격인성이 저하하는 것으로 보고하였으나, 본 연구의 열분석 결과와 TEM조직 관찰로부터 Cu석출물은 재현 열cycle중에는 석출되지 않고, PWHT를 행하여야 석출됨을 알 수 있다. 따라서, 본 시험재의 경우  $A_1$  이하 온도의 열영향을 받을 때 충격인성 저하는 Cu석출물과는 무관함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

Cu를 함유한 HSLA-100강의 시효 온도에 따른 모재 및 용접 열cycle재현부의 특성을 조사하고, PWHT의 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모재를 급냉 후 시효할 경우 500°C에서 항복

강도가 가장 높고 충격인성이 가장 낮았으며, 500°C 이상 온도가 증가하면 강도는 낮아지고 충격인성은 증가하였다.

2) 단일 열cycle재현 열영향부의 충격인성 감소는 조대 결정립 생성에 기인하며, 2중 열cycle시의 충격인성 증가는 열cycle시 생성된  $\gamma$ 가 냉각시 미세한  $\alpha$ 로 변태되었기 때문으로 판단된다.

3) 재현 열영향부의 충격인성은 모재와 마찬가지로  $\epsilon$ -Cu상의 생성에 의해 영향을 받으며,  $\epsilon$ -Cu상의 석출로 강도가 높을 때는 충격인성이 저하하였다. 즉, 550°C, 600°C에서 PWHT할 때는 강도는 높고 충격인성은 낮았으나, 650°C에서 PWHT할 때 강도는 낮아지나 충격인성을 크게 증가시킬 수 있다.

4) 단일 열cycle로 재고용된 Cu는 2중 및 3중 열cycle처리시에도 재석출되지 않으며 PWHT에 의해 석출된다. 3중 열cycle시,  $A_1$  이하 온도의 열영향을 받을 때 충격인성 저하는 Cu와 다른 미량 합금 원소에 의한 경화에 기인된 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. 鈴木 宏, 岡田 八郎, 橋本 浩: 壓力容器におけるPWHTに効果とその條件決定, 溶接學會誌, 第61卷, 第6號, (1992), pp.473~477.
2. 後藤 明信: SR割の發生機構とその對策, 溶接學會誌, 第61권, 第6號, (1992), pp.469~472.
3. C.D.Lundin, T.P.S.Gill, C.Y.Qiao: Heat affected zone in low carbon microalloyed steels, Recent Trend in Welding Science and Technology(edited by S.A.David and J.M.Vitek) ASM international, (1990), pp.249~256.
4. W.Bolliger, R.Varughese, E.Kaufmann, W-F.Qin, A.W.Pense, R.D.Stout: The effect of welding and fabrication operation on the toughness of A710 steel, Microalloyed HSLA steels, ASM international, (1988), pp.277~290.
5. C.D.Lundin, R.Menon, Z.Chen: Post weld heat treatment cracking in high strength low alloy steel, WRC Bulletin 349, Dec. (1989), pp.22~30.
6. 松田 福久: 溶接冶金學, 日刊工業新聞社, (1972), pp.186~194.
7. 박태원, 심인옥, 김영우, 강정윤: Cu를 함유한 HSLA강의 기계적 성질에 미치는 열처리의 영

- 향, 한국재료학회지, 제5권, 제3호, (1995), pp. 333~343.
8. 박태원, 심인옥, 김영우, 강정윤 : 열분석법에 의한 Cu를 함유한 HSLA강의 시효거동에 관한 연구, 대한금속학회지, 제33권, 제1호, (1995), pp.57~64.
  9. AWS D1.1, (1983), pp.47.
  10. R.A.Granger, C.R. Hribal, L.F.Porter : Hardness of tempered martensite in carbon and low-alloy steels, Met.Trans.A, Vol.8A, (1977), pp.1775~1785.
  11. 윤중근 : 후속 열이력에 의한 Cu첨가형 HSLA강 용접 열영향부의 이차 취화, 제8회 재료강도심포지엄, Oct. (1994), pp.231~240.