

研究論文

AH36-TMCP강의 용접후열처리 효과에 관한 연구

유효선*·장원상**·안병국***·정세희*

A Study on Effect of PWHT in AH36-TMCP Steel

H. S. Yu*, Y. S. Chang**, B. G. Ahn*** and S. H. Chung*

Key words : TMCP(thermo-mechanical control process), PWHT(post welded heat treatment; 용접후열처리), SP Test(소형편치시험), DBTT(ductile brittle transition temperature; 연성-취성전이온도), HAZ(용접열영향부), Softening(연화현상)

Abstract

It is well known that the fine bainitic microstructure obtained by TMCP(thermo-mechanical control process) secures the high toughness of base metal. Besides, TMCP steel is very suitable for high heat input in welding as it has low carbon equivalent. In HAZ, however, the accelerated cooling effect imparted on the matrix by the weld thermal cycles is relieved and thus the weldment of TMCP steel has softening zone which shows low fracture toughness compared with base metal. Therefore, PHWT of weldment is carried out to improve the fracture toughness in weldment of TMCP steel which has softening zone. In this study, the effects of PWHT on the weldment of AH36-TMCP steel are investigated by the small punch(SP) test. From the several results such as SP energy and displacement at room temperature, the behavior of transition curves, the fracture strength at -196°C , distribution of (DBTT)_{sp} and (DBTT)_{sp}, the PWHT condition of A. C. after $850^{\circ}\text{C} - 1 \text{ sec}$ W. C. was suitable condition for recovering a softening zone of HAZ as welded.

※ 1998년 3월 17일 접수

* 정희원, 전북대학교 기계공학부, 자동차 신기술연구소

** 정희원, 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

*** 정희원, 전북대학교 신소재공학부

1. 서 론

일반적으로 대형구조용 재료로 쓰이는 강재는 열간압연으로 생산된 강재를 normalizing 처리하여 조직을 미세화하고 합금원소의 양을 조절하여 필요한 강도와 인성을 얻는다^{1,2)}. 이러한 종래의 방법으로 생산된 고장력강은 합금원소량의 증가, 특히 탄소당량(Ceq)의 증가로 인하여 저온균열 방지를 위해서 예열없이 용접이 곤란하고, 또한 생산성 향상의 측면에서 매우 필요한 시공방법의 하나인 대입열 용접이 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제어압연 공법을 도입하여 개발된 강이 TMCP (thermo-mechanical control process) 강이다^{3,4)}.

이와 같은 TMCP 강재는 비 수냉형 강재(TMCP-controlled rolled steel)와 수냉형 강재(TMCP-accelerated cooled steel)로 크게 나뉘어지며, 수냉형 강재는 다시 가속냉각형 강재(accelerated cooled steel)과 직접 담금질-뜨임 강재(direct quenching-tempering type steel)로 나뉘어진다. Fig. 1에 종래의 방법으로 생산된 강재와 TMCP 강재의 제조과정을 도시하였다.

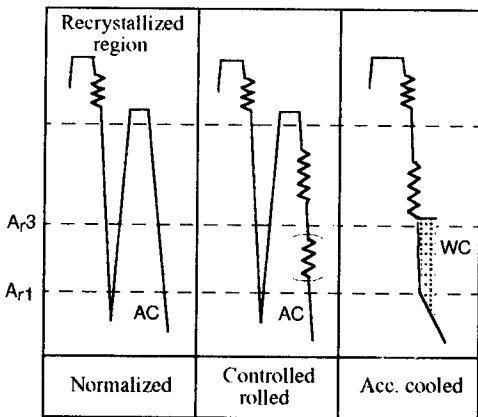


Fig. 1 Manufacturing process of TMCP steel.

이상의 방법으로 제조된 TMCP 강재는 금속학적으로 제어압연에 의한 결정립 미세화, 전위의 도입 그리고 제어냉각에 의해 기지(matrix)조직을 미세한 ferrite와 제 2상 조직인 bainite 조직을 얻어

낮은 탄소당량(low Ceq)에서도 모재의 인성을 높게 확보한 강재이다⁵⁾. 또한 TMCP 강재는 인성이 우수할 뿐만 아니라 탄소당량(Ceq)이 낮아 용접성이 우수하여 최근 선박 및 해양구조물 등의 중공업 분야에서 그 수요가 증가하고 있다. 특히 가속냉각형 TMCP 강재는 저탄소강이므로 용접시 종래의 강재에 비해 열영향부의 취화를 억제시킬 수 있기 때문에 대입열 용접용 강재로 적합하다^{6~8)}.

그러나 대입열 용접시 가속냉각에 의한 기지 강화효과가 소멸되어 용접부에 연화현상(softening)이 일어나 용접부의 경도, 인장강도, 충격저 등의 기계적 성질이 저하한다고 보고되고 있다^{9~12)}. 또 용접부의 강화를 위한 용접후열처리(post welded heat treatment : PWHT)에 의한 2차 연화현상으로 열영향부의 경도 및 인장강도는 현저하게 감소되고 그 연화폭의 크기도 크게 확대되어 용접구조물의 대형사고를 유발할 수 있다고 보고¹³⁾되고 있어 그에 대한 평가 및 대책이 요구되어진다. 그러나 현재로서는 용접 열영향부의 PWHT에 대한 데이터의 부족 및 다양한 PWHT 조건에 대한 평가에 대해서도 정확히 보고되어 있지 않는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 AH36급 가속냉각형 TMCP 강 용접부에 있어서 여러 조건에서 PWHT를 실시한 후 소형펀치(small punch : SP) 시험법¹⁴⁾을 통해 용접부 각 조직에서의 파괴인성의 변화를 as welded 조직과 비교 평가함으로써 TMCP강 용접부의 연화현상을 제거할 수 있는지의 여부를 실험실적으로 검토하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 두께 25mm의 AH36급 가속냉각형 TMCP 강재로 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1과 같다. 시험에 사용될 용접부를 얻기 위해 Table 2와 같은 조건으로 용접하였으며, Fig. 2는 용접부의 용접단면 사진이다.

TMCP강의 PWHT의 온도 설정은 본 시험강재인 AH36급의 가속냉각형 TMCP 강재의 Ar₁, Ar₃ 변태 온도를 기준으로하여 결정하였다. 본 실험의 PWHT 조건은 Table 3과 같다.

준비된 모재와 용접 블록으로부터 SP 시험편을 얻기 위해 소정의 크기로 절단하고 용접부를 5%의 Nital 용액으로 부식시킨 뒤에 모재(base metal

Table 1. Mechanical properties and chemical composition of TMCP steel.

Mechanical properties at room temperature

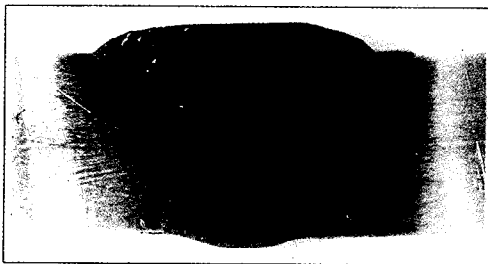
σ_y (kgf/mm ²)	σ_{UTS} (kgf/mm ²)	Elongation (%)
38	52	26

Chemical compositions

	C	Si	Mn	P	S	Al	V	Ti
wt%	0.15	0.25	1.1	0.016	0.003	0.035	-	0.018

Table 2. Welding condition of TMCP steel.

Heat input (kJ/cm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)
80	930	36	25

**Fig. 2** Macroetched photograph of multipass weldment in TMCP steel.

: B.M), 용접 열영향부 (heat affected zone : HAZ), 접합경계선 (fusion line : F.L), 용착금속 (weld metal : W.M)을 구분하여 각 조직에서 SP 시험편을 제작하였다. SP 시험편의 크기는 10×10×0.5mm로 가공하였다.

SP 시험은 펀치 선단에 HRC 62~67의 경도를 갖는 강구를 개재시켜 시험편의 상면에 부하속도 (cross head speed) 0.2mm/min로 하중을 가하였다. 시험온도는 액체질소를 사용하여 -196℃~20℃의 범위로 하였다.

한편 하중-변위 곡선은 파괴시까지 자동측정 기록하였으며, SP 시험에 의한 파괴에너지 즉 SP 에너지 (E_{sp})는 SP 시험법에 따라 하중-변위 곡선 아래의 면적으로부터 구하였다. 이렇게 구한 SP 에너지와 그 시험온도를 대응시킨 곡선, 즉, SP 에너지-온도 의존곡선으로부터 연성-취성 천이온도 (ductile brittle transition temperature : DBTTSP)를 구하였는데, 이는 상부에너지 (upper shelf energy)와 하부에너지 (lower shelf energy)의 평균값에 대응하는 온도로서 구하였다¹⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 PWHT 조건에 따른 용접부의 경도 분포와 조직관찰

TMCP강 용접시 용접열에 의해 발생한 연화현상의 제거와 파괴인성의 향상을 위해 용접후열처리를 실시하였다. Fig. 3은 as welded 상태와 여러 PWHT후 연화부의 경도분포가 as received 상태의 모재 수준으로 회복되어진 600℃에서의 수냉 및 720℃에서의 공냉의 경우, 850℃에서의 공냉과 1초 수냉시의 경도 분포이다. 이때 경도시험은 비커스 경도계로 하중 10kg을 가했을 때 측정된 경도 분포이다. 먼저 as welded 상태를 보면 HAZ의 경도가 모재보다도 낮은 값을 보여 뚜렷한 연화현상을 관찰할 수가 있다. 이에 대해 600℃ 수냉 및 720℃에서의 공냉의 경우, 모재 부위는 as received 모재와 거의 같은 경도 값을 유지하고 있으며 HAZ의 연화

Table 3. PWHT Conditions.

Specimen	Acc. speed	Acc. temp.	Holding time	Cooling type
A1, B1 A2, B2	480℃/h	600℃	1/4hr	Air cooling Continuous water cooling
A4, B4 A5, B5	480℃/h	720℃	1/4hr	Air cooling Continuous water cooling
A7, B7	480℃/h	850℃	1/4hr	Air cooling
A9, B9	480℃/h	850℃	1/4hr	Continuous water cooling
A10, B10	480℃/h	850℃	1/4hr	Water cooling for 1 sec. and air cooling

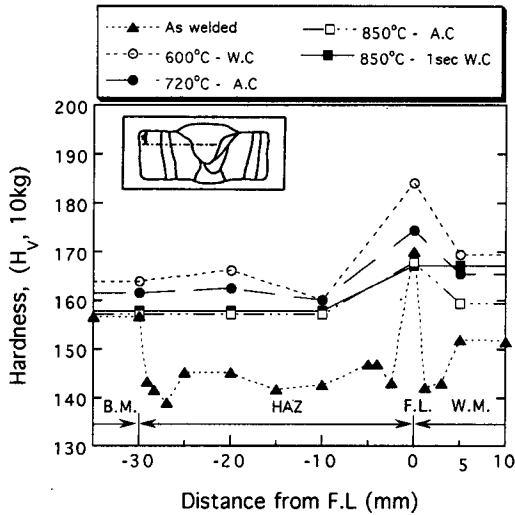


Fig. 3 Vickers hardness distribution of welded joint of TMCP steel after PWHT.

부도 모재 부위와 비슷한 수준으로 회복되어 졌으나 F.L 부위에서는 as welded의 F.L 경도치보다도 더 증가되어 상당히 경화되었다.

850°C에서 공냉한 경우와 1초 수냉후 공냉한 경우는 두 조건 모두가 모재 부위의 경도가 as received 모재의 경도 값과 거의 일치하는 경향을 나타내고 있고 HAZ 연화부의 경도값 역시 모재 부위와 같은 수준을 유지하고 있어서 PWHT 조건들 중 가장 나은 용접후열처리 효과를 기대할 수 있다. 여러 PWHT 조건들 중 850°C에서 1초 수냉후 공냉한 경우의 미세조직 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 사진에서 보이는 것처럼 F.L을 기점으로 해서 HAZ 및 모재조직에서 공히 pearlite와 martensite의 중간조직으로 여겨지는 10~15 m의 입자크기를 갖는 미세한 bainite 조직이 나타나고 있어서 HAZ에서 조대한 ferrite와 pearlite의 조직을 보인 as welded 상태보다 경도의 향상과 함께 파괴인성의 향상이 예상된다.

3.2 PWHT 조건에 따른 상온에서의 파괴특성

여러 열처리 조건들 중 앞서 설명한 4조건 of PWHT 효과를 검토해 보기 위해서 PWHT 후의 각 용접 조직에 대해 상온에서 SP시험을 실시하여 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

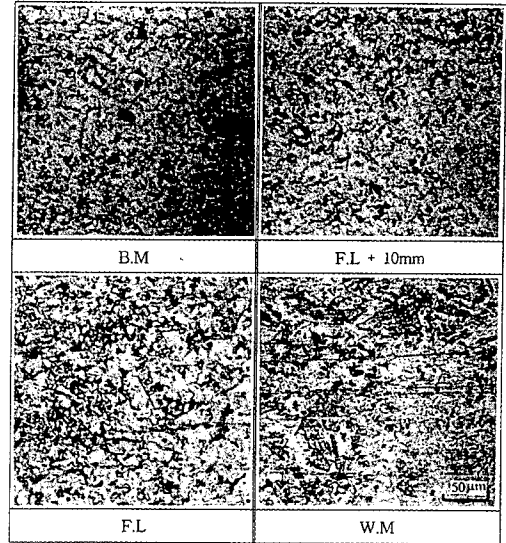


Fig. 4 Microstructures of welded joint after PWHT. (Holding time at 850°C : 15min., 1sec. water cooling)

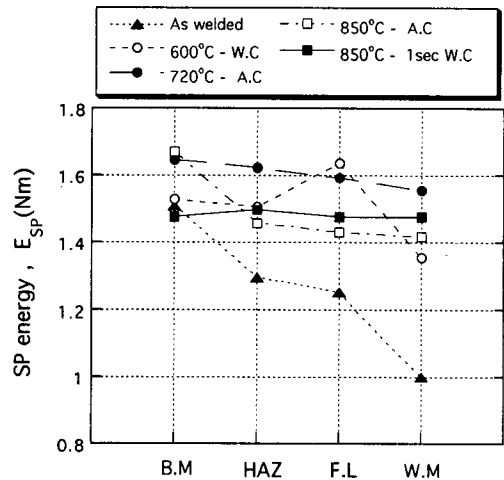


Fig. 5 Distribution of SP energy obtained from SP test at room temperature after PWHT

Fig. 5의 600°C에서 수냉한 경우 용접부 각 조직에 있어서 SP 에너지 값은 1.6~1.7Nm 정도로 as welded 용접부와 비교할 때 상당한 회복을 보이고 있으나 Fig. 6의 변위 값은 B.M., HAZ, F.L., W.M의 순으로 감소하고 있어 각 부위별의 연화현상이 일정하게 회복됐다고 보기 어렵다. 720°C에서 공냉

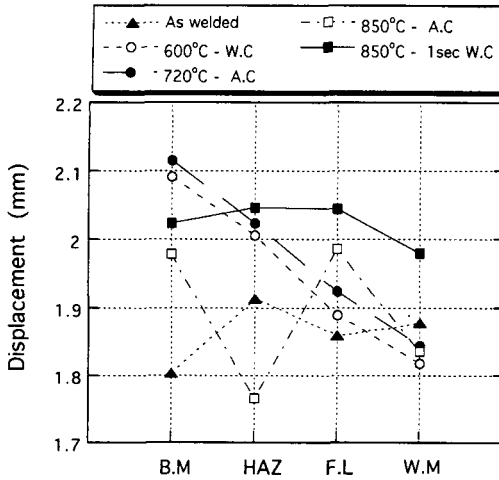


Fig. 6 Distribution of displacement obtained from SP test at room temperature after PWHT

한 시편의 모재 및 HAZ에서의 SP 에너지 값은 as received 상태의 모재와 거의 비슷한 수준으로 회복 되었으나 F.L은 모재보다 높고, W.M은 모재에 비해 현저히 낮은 값을 보이고 있다. 또 Fig. 6의 변위 값에서는 600°C 공냉의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있어서 이 경우 역시 인성값이 일정하게 회복 되지 않았다.

850°C에서 공냉한 시편에서 모재 부위에 비해 HAZ, F.L, W.M의 SP 에너지 값이 낮은 수준에서 일정하게 나타나고 있으며, 변위값은 B.M과 F.L은 같은 값을 유지하나 HAZ와 W.M은 현저히 낮은 값을 나타내고 있어서 이 조건에서 역시 인성의 회복이 일정하지 않았다.

850°C에서 15min 유지후 1초동안 수냉을 행하고 공냉처리한 경우를 살펴보면 모재, HAZ, F.L, W.M의 모든 부위에서 SP 에너지 값이 1.5Nm 정도로 as received 모재의 SP 에너지 값과 거의 같은 수준에서 일정하게 유지되고 있다. 또한 Fig. 6에 나타난 변위의 경우도 as received 상태의 모재의 변위 값보다 약간 높은 수준이기는 하지만, 각 부위에서의 변위값이 변화가 거의 없이 일정하게 유지되고 있다. 따라서 이 조건의 PWHT를 실시한 용접블록의 모재, HAZ, F.L, W.M의 각 부위에서의 파괴에너지가 as received 상태의 모재 수준으로 거의 일정하게 유지되고 있어 연화부의 회복을 기대할 수 있다.

3.3 PWHT 조건에 따른 SP 에너지-온도의존곡선

TMCP강 용접부의 연화현상을 제거하기 위해 실시한 PWHT에 대한 그 효과를 좀 더 자세히 관찰하기 위해 위의 4조건에서 PWHT를 행한 용접블록을 대상으로 시험온도를 -196°C~-20°C로 변화시켜가며 SP 시험을 실시하였다. 그 결과로써 얻은 SP 에너지-온도 의존곡선을 Fig. 7, 8, 9, 10에 도시하였으며 이들 SP 에너지-온도 의존곡선들로부터 PWHT에 의한 용접부의 파괴인성의 변화를 살펴 보았다. 한편, as welded 상태의 용접부 각 조직에 대한 SP 에너지-온도의존곡선은 앞의 논문에서 언급되어 생략한다.

Fig. 7은 600°C에서 수냉한 경우의 SP 에너지-온도 의존곡선이다. 그림에서 나타난 바와 같이 as welded 용접부에서의 연화현상을 나타냈던 HAZ 조직의 SP 에너지-온도 의존곡선이 모재조직의 선이 곡선보다 저온측에 위치하고 있어서 HAZ 조직의 인성이 PWHT에 의해 개선되었다. 그러나 F.L과 용착금속의 SP 에너지-온도 의존곡선은 모재의 선이 곡선보다 고온측에 위치하고 있어서 PWHT에 의한 인성의 회복이 이루어지지 않음을 알 수 있다.

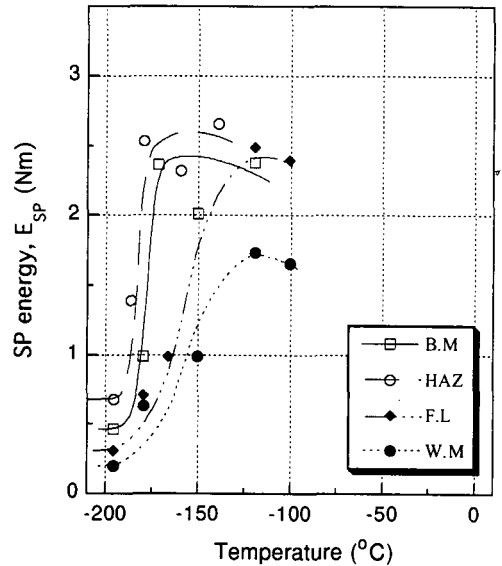


Fig. 7 SP energy transition behavior for welded joint after PWHT. (PWHT condition : Holding time at 600°C-15 min, Water cooling)

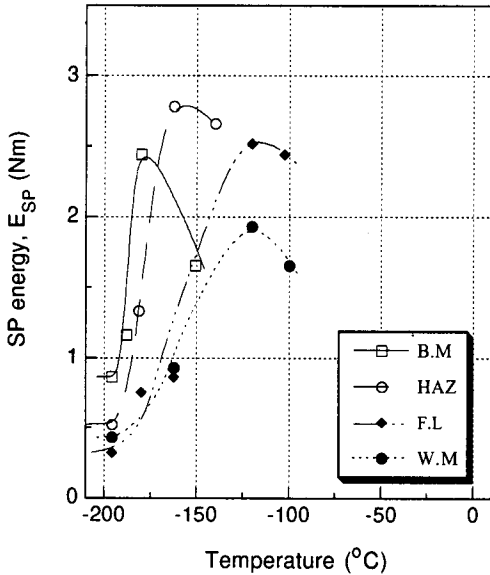


Fig. 8 SP energy transition behavior for welded joint after PWHT. (PWHT condition : Holding time at 720°C-15 min, Air cooling)

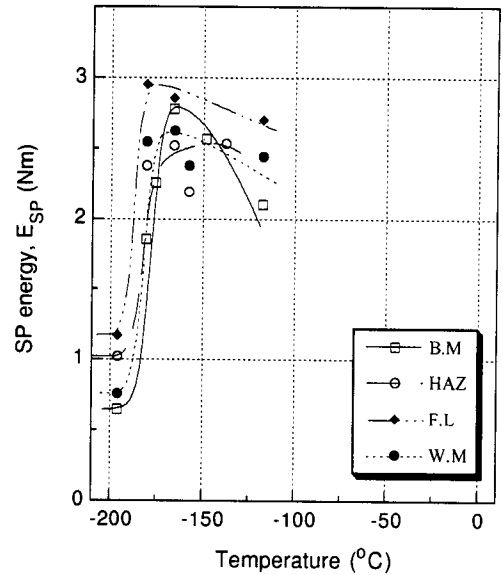


Fig. 10 SP energy transition behavior for welded joint after PWHT. (PWHT condition : Holding time at 850°C-15 min, lsec. Water cooling)

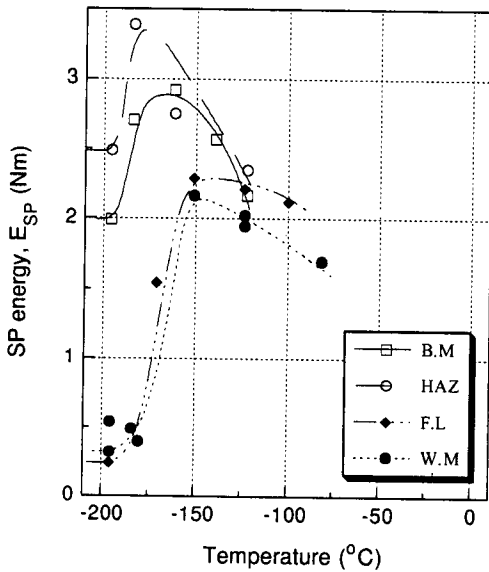


Fig. 9 SP energy transition behavior for welded joint after PWHT. (PWHT condition : Holding time at 850°C-15 min, Air cooling)

Fig. 8의 720°C에서 공냉한 경우에는 각 SP 에너

지-온도 의존곡선이 모재, HAZ, F.L, W.M 순으로 고온측에 위치하고 있어서 as welded 용접부의 천이곡선의 변화와 비슷한 양상을 보이고 있다. 특히 F.L과 W.M의 SP 에너지-온도 의존곡선은 모재와 HAZ보다 현저히 고온측에 위치하고 있어서 모재, HAZ와의 인성의 차이가 큼을 알 수 있다.

Fig. 9의 850°C에서 공냉한 경우는 600°C에서 수냉한 경우와 비슷한 양상을 나타내고 있다. HAZ 조직의 SP 에너지-온도 의존곡선이 모재의 천이곡선보다 저온측에 위치하고 있어서 HAZ 조직의 인성이 PWHT에 의해 개선되었지만, F.L과 W.M의 SP 에너지-온도 의존곡선은 모재와 HAZ보다 현저히 고온측에 위치하고, 모재와 HAZ에 비해 F.L과 W.M의 upper shelf의 SP 에너지 값이 현저히 낮은 수준을 유지하고 있어서 PWHT에 의한 인성의 회복이 이루어지지 않았다.

Fig. 10의 850°C에서 1초동안 수냉후 공냉한 경우에는 HAZ, F.L, W.M의 SP 에너지-온도 의존곡선이 모재의 천이곡선보다 저온측에 위치하고 있으며, 각각의 천이곡선 거동의 차이가 아주 작게 나타나고 있어서 각 조직의 인성이 PWHT에 의해 모재 수준으로 일정하게 개선되었음을 알 수 있

다. 이와 같은 결과는 Fig. 4의 미시조직 관찰로부터도 알 수 있는데, 이는 모든 HAZ 및 모재조직에서 공히 미세한 ferrite와 cementite의 혼합조직인 bainite 조직으로 변태된 결과라 여겨진다.

Fig. 11은 as welded와 PWHT의 모재와 용접부위를 대상으로 -196°C 에서 SP 에너지(E_{SP})를 각 조직별로 나타낸 그림이다. 여기서 -196°C 에서 파괴에너지 특성을 조사한 이유는 모든 시험재가 전형적인 벽개파괴를 일으키는 온도에서 정량적인 파괴에너지를 고찰하기 위해서이다. As welded 상태의 용접부에서는 모재조직에 비해 HAZ, F.L, W.M 순으로 낮은 파괴에너지를 나타내고 있다. 이에 대해 여러 PWHT 조건들 중 850°C 에서 1초 수냉시의 각 조직별 파괴에너지를 살펴볼 때, 모재부에서는 as received 상태의 모재조직보다 낮은 0.7Nm 의 파괴에너지를 보이고 있으나 용접부 각 조직에서는 모두 as welded 상태보다도 큰 파괴에너지 값을 보이고 있어 연화부의 저온 파괴에너지가 PWHT에 의해 향상되었음을 알 수 있다. 그외의 PWHT 조건에서는 조직별 일정한 파괴에너지의 회복은 나타나지 않고 있다.

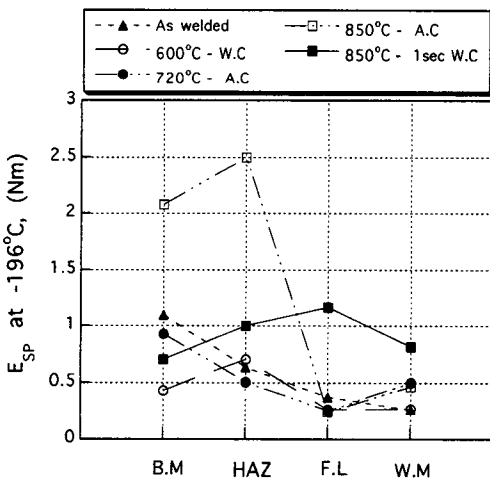


Fig. 11 Distribution of SP energy at -196°C for welded joint of TMCP steel after PWHT

Fig. 12는 as welded 상태와 각 PWHT 후의 SP 에너지-온도 의존곡선으로부터 구한 연성-취성 천이 온도($DBTT_{SP}$)의 결과를 나타낸 것이다. 그림에 $DBTT_{SP}$ 저하경향은 모재에 비해 HAZ, F.L, W.M 순으로 고온측에 위치하고 있고, F.L 조직과 W.M 조직의 $DBTT_{SP}$ 온도는 모재에 비해 20°C

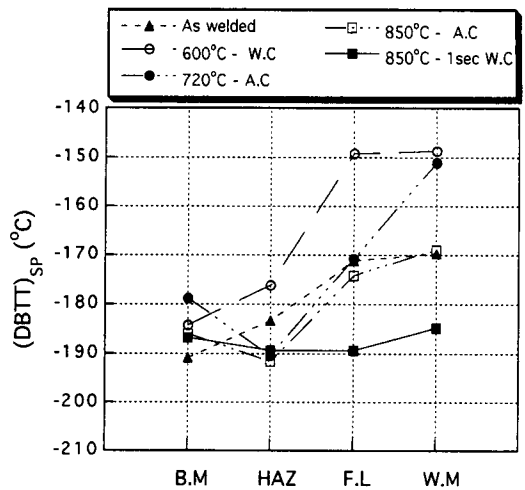


Fig. 12 Distribution of $(DBTT)_{SP}$ for welded joint of TMCP steel after PWHT

정도 고온측에 위치하고 있어서 파괴인성이 저하하였음을 알 수 있다. PWHT 후의 $(DBTT)_{SP}$ 거동을 살펴보면 600°C 에서의 수냉, 720°C 에서의 공냉, 850°C 에서의 공냉한 용접부의 $(DBTT)_{SP}$ 거동은 모재 혹은 모재와 HAZ의 $(DBTT)_{SP}$ 에 비해 다른 조직에서의 $(DBTT)_{SP}$ 가 현저하게 고온측에 위치하고 있어서 인성이 저하하였다. 그러나 850°C 에서 1초 수냉후 공냉한 경우의 $(DBTT)_{SP}$ 거동은 각 조직의 $(DBTT)_{SP}$ 가 거의 차이가 없이 as received 상태의 모재 수준으로 일정하게 유지되고 있어서 as welded 상태의 용접부 조직의 $(DBTT)_{SP}$ 거동에서 나타난 연화에 따른 파괴인성의 저하가 회복되었음을 알 수 있다. 일 예로 HAZ 및 F.L에서의 as welded 상태의 $(DBTT)_{SP}$ 는 각 -184°C , -172°C 인 반면에 850°C 1초 수냉시의 $(DBTT)_{SP}$ 는 각각 -189°C , -186°C 를 보여 인성의 회복을 확인할 수 있다.

PWHT에 의한 파괴인성의 회복정도를 좀 더 정량적으로 알아보기 위해 as received 상태의 모재조직의 $(DBTT)_{SP}$ 에 대한 열처리후 각 조직으로부터 얻은 $(DBTT)_{SP}$ 와의 차이 ($\Delta DBTT)_{SP}$ 를 Fig. 13에 도시하였다. 먼저 as welded 상태의 $(\Delta DBTT)_{SP}$ 를 보면 용접부 각 조직에서의 $(\Delta DBTT)_{SP}$ 는 크게는 21°C 정도의 고온측 이동을 보이는 반면에 여러 열처리 조건들 중 850°C 1초 수냉시의 각 조직에서의 $(\Delta DBTT)_{SP}$ 는 불과 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 정도의 인성의 저하를 보이고 있어 850°C 1초 수냉의 PWHT 조건은 as welded 용접부의 연화현상을 회복시킬 수 있는 가

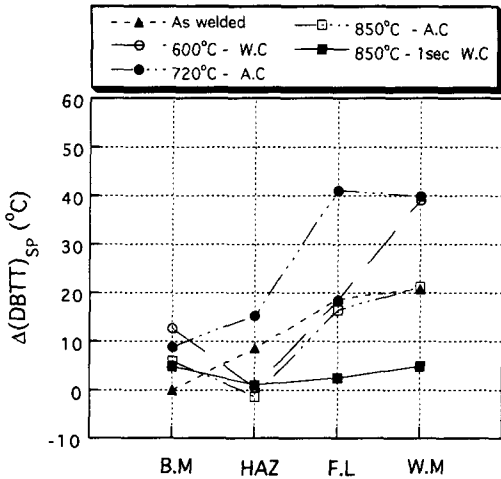


Fig. 13 Distribution of $(\Delta DBTT)_{SP}$ for PWHT structures against base metal of as welded joint

장 우수한 용접후열처리 조건으로 생각된다. 그 외의 열처리 조건에서의 조직별 $(\Delta DBTT)_{SP}$ 는 상당히 큰 차이를 보여 PWHT 조건에 따른 파괴인성의 회복은 불가능함을 알 수 있다.

이상의 SP 시험으로부터 TMCP강 용접부의 PWHT 효과를 살펴본 결과, 즉 상온에서의 변위 및 SP 에너지의 결과, SP 에너지-온도 의존곡선들의 거동, -196°C에서의 파괴에너지의 결과 그리고 연성-취성전이온도 $(DBTT)_{SP}$ 와 $(\Delta DBTT)_{SP}$ 등의 결과들로부터 850°C 1초 수냉후 공냉한 PWHT 조건은 TMCP강 용접부에 발생하는 연화현상을 제거할 수 있는 용접후열처리 조건으로 생각된다.

4. 결 론

대입열 용접시 발생하는 TMCP강 용접부의 연화현상을 회복하기 위해 여러 조건에서 용접후열처리(PWHT)를 실시하고 각 조직에서의 경도 및 파괴인성의 대변인자인 연성-취성전이온도의 변화를 as welded 조직과 비교 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TMCP강 용접부에 대해 여러 조건으로 PWHT를 실시한 결과, 600°C-15min. 유지후 수냉, 720°C-15min. 유지후 공냉, 850°C-15min 유지후 공냉, 850°C-15min 유지후 1초 수냉의 PWHT 조건에서 연화현상이 나타나는 HAZ의 경도값이 as received 상태의 모재 수준으로 회복되었다.

2. 상온에서의 변위 및 SP 에너지의 결과, SP 에너지-온도 의존곡선들의 거동, -196°C에서의 파괴 에너지, 연성-취성 전이온도 $(DBTT)_{SP}$ 그리고 $\Delta (DBTT)_{SP}$ 등의 결과들로부터 각 PWHT 조건중 850°C에서 1초 수냉후 공냉한 PWHT 조건이 가장 우수한 용접후열처리 조건으로 확인되었다.

3. 850°C에서 1초동안 수냉후 공냉한 PWHT 조건에서의 HAZ의 조직은 모두 미세한 bainite 조직이 얻어졌으며 그 결과 as welded 상태의 연화현상의 회복이 가능하였다.

참 고 문 헌

1. Kozasu : Overview of Accelerated Cooling of Plate, Technical Research Center, Nippon K. K., (1985)
2. H. Suzuki : Weldability of Modern Structural Steels in Japan, Transactions. ISIJ, Vol. 23, (1983), pp. 18-204
3. 日本溶接學會溶接冶金研究委員會 : TMCP鋼의溶接冶金, (1985), pp. 1-250
4. 百合 岡信孝 : TMCP鋼의溶接, 日本溶接學會, 第 61卷, 第 4號, (1992), pp. 288-301
5. 신민태, 윤중근, 김희진 : TMCP강의 용접열 영향부 인성에 관한 연구, 대한용접학회지, 제 4권, 제 3호, (1986), pp. 43-49
6. 김영식 : TMCP강재와 그 용접부의 강도특성, 대한기계학회지, 제 30권, 제 2호, (1990), pp. 146-154
7. J.G., Youn, H.J.Kim : Welding Metallurgy of Structural Steel, AIME, (1987), pp 157-168
8. 船舶鐵鋼構造海洋構造物部會 : 造船의溶接, 日本溶接協會, (1985), pp. 72-80
9. J.G.Youn and H.J.Kim : Proc. of 1st Conference on mechanical behaviors of materials, (1987), Seoul, pp. 179-185
10. Hermann Muesch et al, Offshore technology Conference, (1981)
11. 小溝ら, 日本溶接學會全國大會講演概要 43集, (1988), p 220
12. 河崎ら, 日本溶接學會全國大會講演概要 44集, (1989), p 234
13. 윤중근, 김희진 : TMCP강재의 연화현상, 대한용접학회지, 제 6권 제 2호, (1988), pp. 9-17
14. 유대영, 정세희, H.Takahashi : 소형편치시험에 의한 강용접부의 파괴강도 평가에 관한 연구, 대한용접학회지, 제 7권, 제 3호, (1989), pp. 28-35