

研究論文

SP시험에 의한 TMCP강의 방향성 및 용접부의 파괴인성에 관한 연구

유효선*·안병국**·류대영***·정세희*

A study on fracture toughness of welded joint and orientation in TMCP steel by the SP test

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

Key words : TMCP(thermo-mechanical control process), SP Test(소형펀치시험), SP Energy, DBTT(ductile brittle transition temperature; 연성-취성전이온도), COD Test(균열개구변위 시험), Orientation(방향성), HAZ(용접열영향부), Fracture Toughness(파괴인성)

Abstract

In this paper, the fracture toughness evaluation of the various microstructures such as HAZ, F.L and W. M in weldment of TMCP steel which has the softening zone owing to high heat input welding was carried out by using of the small punch(SP) test. In addition, the fracture toughness with the specimen orientation of rolled TMCP steel was investigated by means of SP test and the crack opening displacement(COD) test and then was compared with that of conventional SM50YB steel. From the results of SP test for TMCP steel, it could be seen that the SP energy transition curves of three different orientation were shifted to higher temperature side in order of S, T and L. But the $DBTT_{SP}$ of each orientation specimen did not show a lot of differences and were quite lower than those of conventional SM50YB steel. The mechanical properties of HAZ structure in weldment of TMCP steel such as hardness, SP energy at room temperature and $-196^{\circ}C$ and the upper shelf energy of SP energy transition curve were lower than those of base metal due to softening. The $DBTT_{SP}$ of each microstructure in weldment of TMCP steel increased in order of HAZ, F.L and W.M against base metal, but all microstructures showed a quite lower $DBTT_{SP}$ than those of SM50YB steel.

※ 1998년 3월 17일 접수

* 정희원, 전북대학교 기계공학부, 자동차 신기술연구소

** 정희원, 전북대학교 신소재공학부

*** 정희원, 전주공업대학 금형설계과

1. 서 론

최근 해양 및 선박 등의 구조용 강재를 제작하는 중공업 분야에 있어서는 경제성 및 주변 환경의 가혹화를 고려한 고장력, 고인성의 강을 필요로 하고 있다. 또 용접구조물이 대형화됨에 따라 용접 구조물의 중량경감에 따른 재료의 절약, 에너지 절감 및 구조물 성능의 향상을 목적으로 고장력강의 적용이 증가하고 있다. 그러나 대형 구조물의 제작에 있어서 대입열 용접은 생산성 향상의 측면에서 매우 필요한 시공방법이나 종래의 높은 탄소당량(Ceq)을 갖는 고장력강을 대입열 용접할 경우, 용접부의 인성이 저하되므로, 구조물의 안정성 측면에서 그의 적용이 제한되고 있는 실정이다.

이러한 문제를 해결하기 위해 제어압연 공법을 이용한 TMCP (thermo-mechanical control process) 강이 개발되었다^{1,2)}. 이 강재는 열간제어 압연과 제어 냉각의 공정을 합리적으로 결합하여 제조된 강재로서 인성이 우수하고 낮은 탄소당량을 가지므로 용접성이 우수하여, 최근 선박 및 해양구조물 등의 중공업 분야에서 그 관심과 사용이 증가하고 있는 강이다³⁾. 특히 가속냉각형 TMCP 강재는 저탄소강이므로 용접시 종래의 강재에 비해 열영향부(heat affected zone : HAZ)의 취화를 억제시킬 수 있기 때문에 대입열 용접 후에도 우수한 기계적 성질을 유지할 수 있다^{4,5)}.

그러나 TMCP강의 용접 열영향부는 대입열 용접시 가속냉각에 의한 기지 강화효과가 소멸되어 발생하는 연화현상(softening)으로 모재에 비하여 인성이 저하한다^{6,7)}. 이러한 TMCP 강재의 연화현상은 구조물의 안정성에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 정확한 평가가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 가속냉각형 TMCP AH36급강을 대입열 용접한 후, 모재 및 용접부의 각 조직을 대상으로 SP(small punch)시험^{8~10)}을 실시하여 이들 조직들의 파괴거동 및 연성-취성전이 특성에 의한 파괴인성을 조사하였다. 또한 as received-TMCP 강재의 제조과정시 금속 조직의 연신에 기인하는 파괴인성의 방향성^{11~13)}을 조사하였다. 이같은 결과들은 TMCP강과 동급의 인장강도(50kgf/mm²급)를 갖는 종래의 SM50YB강과 비교하였다. 그리고 각 방향에 따라 3점굽힘 균열개

구변위(crack opening displacement : COD) 시험을 실시하여 SP시험결과들과 비교·고찰하였다.

2. 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 두께 25mm의 AH36급 가속냉각형 TMCP 강재와 종래 널리 사용되고 있는 SM50YB강이며, 두 강재의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of steels used.

Chemical compositions (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Al	V	Ti
SM50YB	0.17	0.34	1.2	0.016	0.008	0.042	0.048	
TMCP	0.15	0.25	1.1	0.016	0.003	0.035		0.018

Mechanical properties

	σ_y (kgf/mm ²)	σ_m (kgf/mm ²)	Elongation (%)
SM50YB	45	57	25
TMCP	38	52	26

시험에 사용될 용접부를 얻기 위해 Table 2와 같은 조건으로 SAW(submerged arc welding) 용접하였으며, SP시험편은 모재 및 용접부 각 조직에서 시험대상이 되는 미세조직 부위를 cut-off wheel을 사용하여 10×10×0.7~0.8mm로 절단하였다. 이렇게 절단된 시험편은 #1200 emery paper 및 알루미나 연마제를 사용하여 SP시험편의 규격인 10×10×0.5mm로 가공하였다. 이 때 시험편에 가공경화가 발생하지 않도록 주의하여 가공하였다⁹⁾. 3점굽힘 균열개구변위(crack opening displacement : COD) 시험에서 시험편은 10×10×55mm의 크기로 하였으며 노치의 가공은 cut-off wheel을 사용하여 폭 0.14mm, 깊이 2mm로 제작하였다.

Fig. 1은 TMCP 강 용접부 단면의 모식도, SP시험편 채취부위와 명칭 그리고 하중의 부과방법을 도시한 것이며, Fig. 2는 SP시험 및 3점굽힘

Table 2. Welding condition of TMCP steel.

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

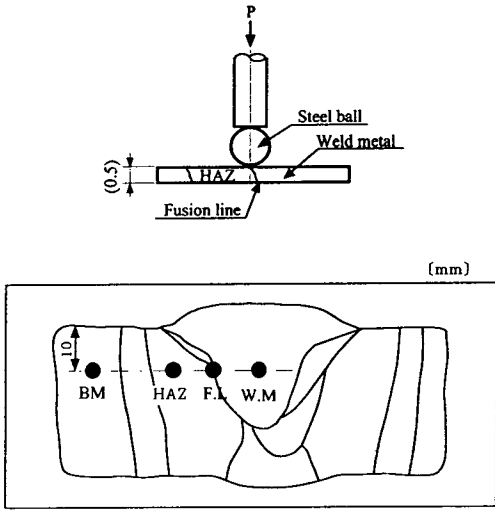


Fig. 1 Schematic illustration showing the extracted position of SP test specimen in welded block of TMCP steel.

- S (LS) : Thickness
short transverse direction
- T (LT) : Width
long transverse direction
- L (TL) : Length
longitudinal rolling direction

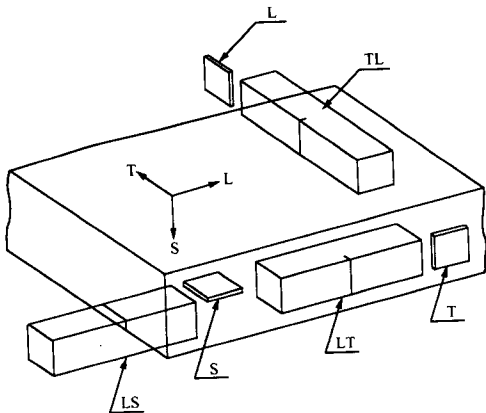


Fig. 2 Code system for specimen orientation and crack propagation direction in SP and COD tests.

COD시험에 의한 방향성 평가를 위한 시험편의 채취 방법에 따른 방향을 나타낸 것이다. COD시험

편의 각 방향은 ASTM 규격에 의해 두 영문자로 표기하였으며, 그 중 첫 문자는 시험편의 거시적 파단면에 수직한 방향을, 두 번째 문자는 균열의 전파방향을 표기하고 있다. SP시험편의 각 방향은 시험편에 접하는 펀치의 진행방향, 즉 부하방향으로 표기하였다.

Fig. 3은 SP실험장치 및 3점굽힘 COD실험장치를 나타낸 그림이다. SP시험장치의 지그는 상부 다이(upper die)와 하부 다이(lower die), 그리고 4개의 볼트로 이루어 졌으며, SP시험은 펀치 선단에 HRC 62~67의 경도를 갖는 강구를 개재시켜 시험편의 윗면에 부하속도(cross head speed) 0.2mm/min.로 하중을 가하였다. 모든 시험조건에서 2개이상의 시험편을 이용하여 재현성을 검토하였다.

한편, 하중-변위곡선은 파괴시까지 자동측정 기록하였으며, SP시험에 의한 파괴에너지 즉 SP 파괴에너지(ESP)는 하중-변위곡선 아래의 면적으로부터 구하였다. 이렇게 구한 파괴에너지와 그 시험온도를 대응시킨 곡선, 즉 SP 에너지-온도 의존곡선으로부터 연성-취성과괴거동과 천이온도(ductile-brittle transition temperature : DBTT_{SP})를 조사하였다. 이때 DBTT_{SP}는 온도 의존곡선의

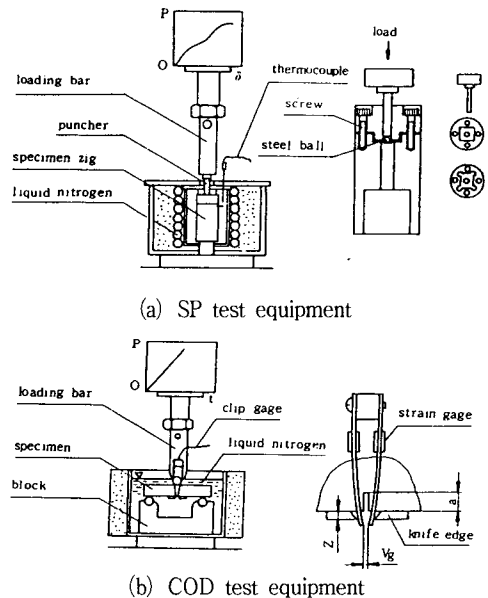


Fig. 3 Schematic illustration of experimental equipments for SP and COD tests.

upper shelf energy와 lower shelf energy의 평균값에 대응하는 온도로서 구하였다⁹⁾.

또한 COD시험의 부하속도는 SP시험과 같이 0.2mm/min.로 하였으며, 두 시험에 있어 시험온도는 액체 질소를 사용하여 -196℃~20℃의 범위로 하였고, 시험편의 일정한 온도 유지를 위하여 시험온도에 도달한 뒤 약 5분간의 유지시간을 가졌다. 온도제어의 범위는 ±2℃로 하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 TMCP 강 방향성에 따른 파괴인성

TMCP강 특징중의 하나인 가속냉각에 의한 기지 강화효과를 각 방향에 따라 알아보기 위해 종래의 SM50YB강과 함께 모재에 대해 SP실험을 실시하여 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4의 SM50YB강의 경우에 3축방향의 SP 연성-취성 파괴특성을 비교해 볼 때 SP 에너지-온도 의존곡선은 S, T, L 방향의 순으로 고온측에 위치하고 있어 S 및 T 방향에 비해 L 방향의 파괴인성이 저하하였음을 알 수 있는데 이는 Fig. 6의 각 방향

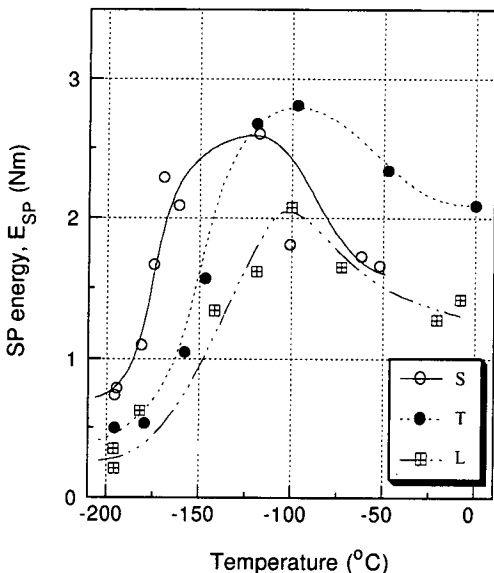


Fig. 4 SP energy transition behaviors as a function of specimen orientation for SM50YB parent material.

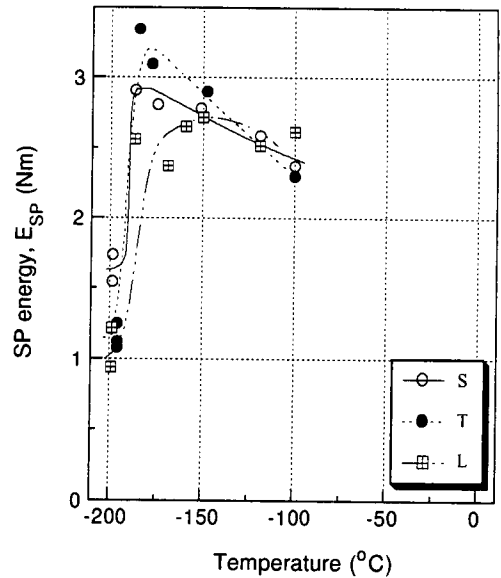


Fig. 5 SP energy transition behaviors as a function of specimen orientation for TMCP parent material.

의 조직관찰로부터 나타난 바와 같이 L 방향의 조직은 강판의 압연과정에서 발생하는 뚜렷한 band 상 조직에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 5의 TMCP강 역시 3축방향의 SP 에너지-온도 의존곡선이 S, T, L 방향의 순으로 고온측에 위치하고 있으나, S와 T 방향의 SP 에너지-온도 의존곡선의 큰 차이를 보이지 않고 있다. 또한 L방향은 S, T방향에 비해 파괴인성이 떨어지고는 있으나 그 차이가 SM50YB 강재에 비해 매우 적음을 알 수 있다. 또한 두 강재의 SP 에너지-온도 의존곡선들로부터 -196℃에서 파괴에너지 값을 비교해 볼 때 TMCP강의 SP 에너지는 세 방향에 있어 1~1.7Nm 정도의 값을 보이는 반면, 동급의 인장강도를 갖는 SM50YB 강재는 이보다 낮은 0.4~0.75Nm를 보여 저온에서의 파괴에너지 또한 TMCP 강재가 높음을 알 수 있다.

Fig. 7은 TMCP 강 방향의 경우 L방향 시험편의 상부(-150℃)와 하부(-196℃) 영역에서 관찰된 거시적, 미시적 파면사진이다. 사진에서 먼저 -196℃의 경우는 시험편의 극히 적은 소성유동과 반구정점에서 약간 떨어진 위치에서 거시균열이 전파되었음을 관찰할 수 있고, 미시파면사진에서는 전형적인

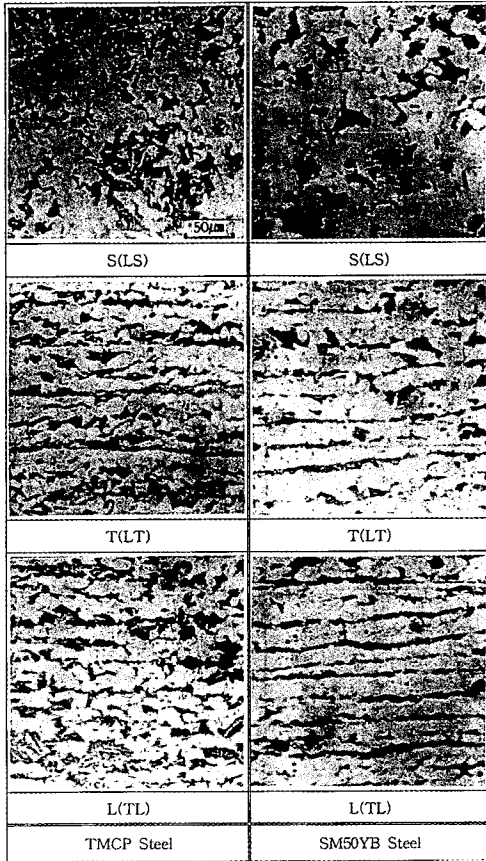


Fig. 6 Microstructures of three mutually perpendicular planes of parent materials in SM50YB and TMCP steels.

벽개파괴를 관찰할 수가 있다. 반면, 천이곡선의 상부영역인 -150°C의 경우는 시험편의 큰 소성유동으로 반구형이 크게 형성된 후 시험편의 두께감소가 현저한 부위에서 원둘레 방향으로 거시균열이 전파되었음을 관찰할 수 있다. 그리고 미시파면에서는 전형적인 덩플의 연성파면을 보이고 있어, 파면사진으로부터 시험온도에 따라 뚜렷한 연성-취성파괴거동을 관찰할 수 있다.

Fig. 8은 TMCP 강에 있어 앞의 SP시험과 동일한 조직을 대상으로하여 3점굽힘 COD 시험을 수행하여 얻은 연성-취성천이곡선을 나타낸 결과이다. COD시험 결과, 역시 각 방향에 따른 파괴인성의 차이가 매우 적음을 알 수 있어 각 방향의 파괴인성이 모두 우수함을 보이고 있다. 그러나 Fig. 6의

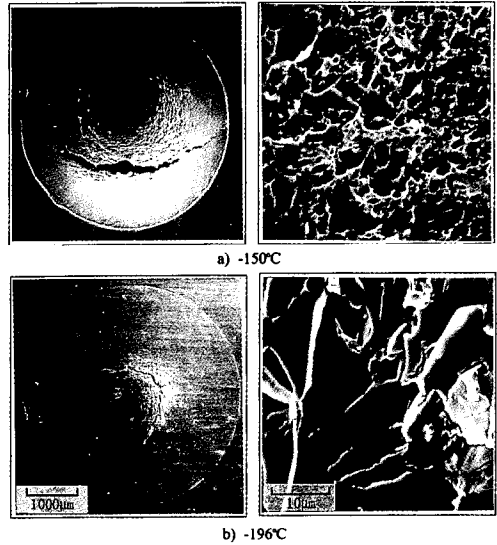


Fig. 7 SEM macro- and microfractographs for TMCP steel-L orientation at -150°C and -196°C

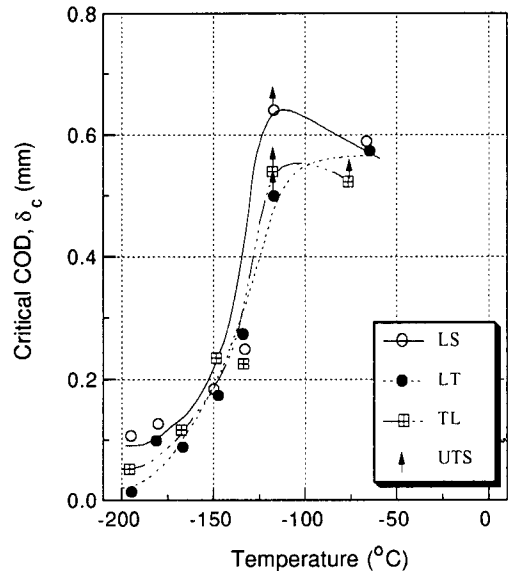


Fig. 8 Critical COD transition behaviors for TMCP parent material.

TMCP강의 T(LT)와 L(TL) 방향의 조직은 약간의 연신형상을 보여 파괴인성의 저하가 예상되나 SP와 COD시험 결과, 각 방향의 파괴인성 차이가 매우 적은 것은 가속냉각에 의한 TMCP강의 기지 강화효

Table 3. Ductile-brittle transition temperature by SP test and COD test in TMCP and SM50YB steels.

Steel	Orientation	(DBTT) _{sp} (C°)	(DBTT) _{cod} (C°)
SM50YB	S/LS	-174	-152
	T/LT	-155	-125
	L/TL	-147	-150
TMCP	S/LS	-190	-156
	T/LT	-190	-155
	L/TL	-182	-150

파괴 기인된다고 사려된다. Table 3은 각 시험재의 연성-취성 온도의존곡선으로부터 DBTT_{sp}와 DBTT_{cod}를 구하여 나타낸 것으로, 두 강재의 각 방향에 따른 SP 연성-취성 천이온도의 변화를 살펴볼 때 TMCP강의 경우 S, T 방향의 천이온도는 -190℃로 극히 저온에 위치하고, 압연방향인 L 방향의 천이온도는 조금 높은 -182℃로 보이고 있다. 또한 TMCP 강에 비해 월등히 낮은 연성-취성 천이온도를 보이고 있다.

한편, COD시험결과를 보면, TMCP 강재의 경우 SP시험결과와 같이 세방향에 있어 DBTT의 큰 차이를 보이고 있지 않으나, SM50YB강재의 경우는 SP시험결과와 다르게 세방향의 DBTT_{cod} 결과가 뚜렷한 차이가 없음을 알 수 있다. 이같은 실험 결과들로부터 연성-취성천이온도에 의한 파괴인성 평가시 종래의 COD시험 보다도 미소시험편을 이용한 SP시험에 의한 파괴인성 평가가 더욱 우수함을 확인할 수 있다. 이는 시험재의 응력상태가 COD시험의 경우보다 SP시험의 경우에 더욱 가혹한 막응력상태(membrane stress condition)이고, 그로 인해 각 시험온도에서 나타나는 뚜렷한 재료 파괴거동에 기인한 결과로 사료된다. 그리고 COD시험의 경우보다 SP시험의 경우에 DzBTT_{sp}가 낮은 이유는 시험편의 두께 차이에 의한 결과로, 시험편의 외부응력에 대해 COD시험편의 경우는 평면변형(plane strain) 상태임에 반해 SP시험편의 경우는 평면응력(plane stress) 상태이기 때문이다. 즉, SP시험편은 박판이므로 plane strain 상태보다도 시험재의 소성유동이 크기 때문에 COD시험의 경우보다 더 낮은 온도영역에서 연성-취성 천이파괴 거동을 보이기 때문이라 사료된다.

3.2 TMCP 강 용접부의 파괴인성

Fig. 9는 용접부의 모재(B.M), 용착금속(W.M), 용접 열영향부(HAZ) 및 용융선(fusion line : F.L)조직의 미세조직 사진들이다. 이들 조직을 살펴보면 모재부위에서의 조직은 변태점 Ar₃~Ar₁에서의 가속냉각 효과로써 기지에 ferrite의 핵 생성을 증가시킴으로써 얻어지는 베이나이트 조직으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이같은 사실이 가속냉각형 TMCP 강재의 파괴인성을 향상시키는 주요한 원인이다. 그러나 용접부위에서의 조직, 특히 F.L 근처에서의 조직은 용접열에 의해 가속냉각 효과가 소실되어 조대화된 페라이트와 퍼얼라이트의 조직으로 변태되고, 이에 따른 상당히 큰 연화현상을 예상할 수 있다.

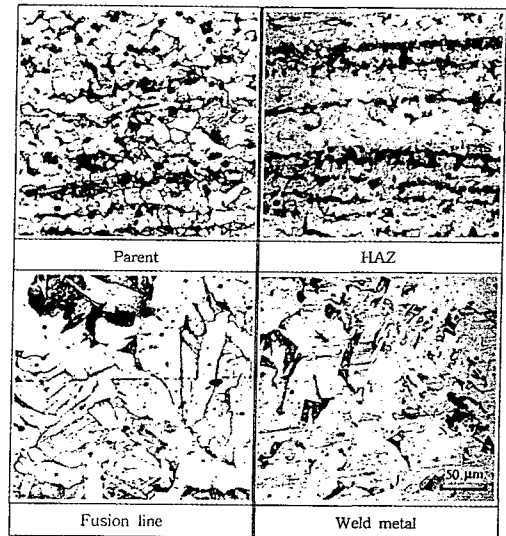


Fig. 9 Microstructures of welded joint of TMCP steel.

Fig. 10은 가속냉각형 TMCP 강 용접부의 미세조직을 대상으로 비커스 경도계를 이용하여 하중 10kg을 가했을 때의 측정된 경도분포이다. 이 선도에서 가속냉각형 TMCP 강재는 용접부 HAZ가 경화되는 normalizing 강재와는 달리 HAZ에서 경도가 감소되어 오히려 모재보다도 낮은 경도 분포를 나타내는 연화현상이 발생되고 있음을 알 수 있다. 또 연화폭도 25mm 이상이어서 큰 폭의 연화 정도를 알 수 있는데 이는 TMCP 강에 대한 대입열

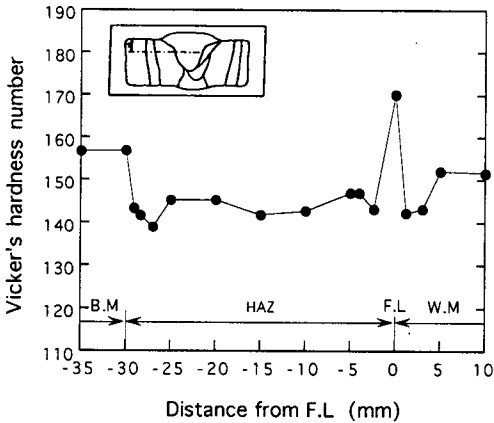


Fig. 10 Vickers hardness distribution of welded joint in TMCP steel.

용접시, 강의 기지 강화기구인 가속냉각 효과가 소실되기 때문이다.

Fig. 11은 상온에서 모재 및 용접부의 각 조직 (HAZ, F.L, W.M)에 대해 SP시험을 실시한 결과이다. 그림에 나타난 것처럼 변위는 모재, F.L, W.M, HAZ의 순으로 그 값이 증가하고 있다. 즉 HAZ의 변위 값은 모재보다 높은 값을 나타내고 있어 경도분포에서 나타난 연화부의 특징이 상온의 변위 값의 변화에서도 나타나고 있음을 알 수 있다. SP 에너지는 변위분포와는 달리 모재의 값에 비해 HAZ, F.L, W.M의 순으로 낮아지고 있어 연화의 영향이 SP 에너지 값의 변화에서도 나타나고

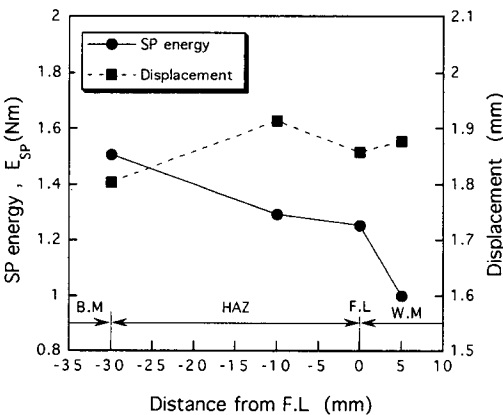


Fig. 11 Displacement and SP energy obtained of welded joint in TMCP steel.

있음을 알 수 있다.

다음은 용접부에서 파괴특성의 변화를 좀 더 자세히 알아 보기 위해 각 조직에 대해 시험온도를 변화시켜가며 SP 시험을 행하였다.

Fig. 12는 이들 시험의 결과로, 그림에서 보는 바와 같이 모재 및 HAZ, F.L, W.M 조직 모두 시험온도의 증가에 따라 SP 에너지의 증가와 함께 어느 온도 이후에는 그값이 다시 감소하는 뚜렷한 SP 연성-취성 파괴특성을 나타내고 있다. 또한 SP 에너지-온도 의존곡선은 모재, HAZ, F.L, W.M의 순으로 고온측에 위치하고 있어서 용접 열싸이클에 의해 변태된 HAZ, F.L, W.M 조직이 모재 조직에 비해 파괴인성이 저하하였음을 알 수 있다. 특히 HAZ의 경우, 천이곡선의 상부영역 (upper shelf)에서 SP 에너지 값이 모재의 값에 비해 현저히 낮은 값을 보이고 있어 HAZ에서 연화현상에 의한 파괴에너지의 저하가 나타나고 있다. 그리고 -196°C 에서 모재부는 약 1.2N m 정도, HAZ에서는 약 0.6N m 를 보이고 있어 저온에서의 파괴에 대한 저항 또한 HAZ 부에서 낮음을 관찰할 수 있다.

또한 연성-취성 천이온도 구역내의 어느 임의의 동일온도 선상에서의 모재, HAZ, F.L, W.M 각

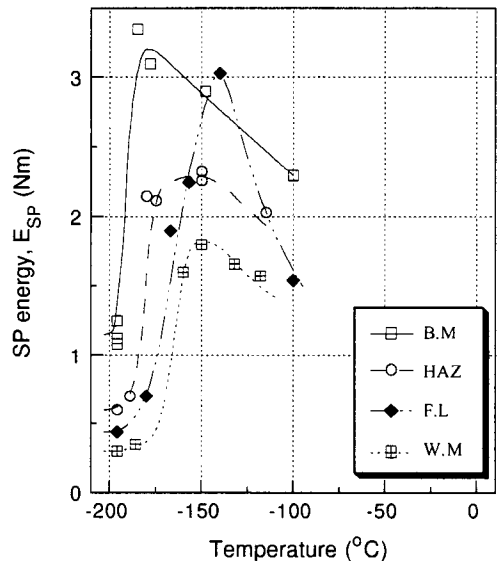


Fig. 12 SP energy transition behaviors in welded joint of TMCP steel.

각의 SP 파괴에너지 값을 비교해 보면 모재에 비해 타조직의 SP 에너지 값이 현저하게 작음을 알 수 있다.

Fig. 13은 SM50YB강의 모재 및 F.L, W.M 조직에 대한 연성-취성전이곡선의 거동을 나타낸 결과로서 SP 에너지-온도 의존곡선은 W.M, F.L의 순으로 모재보다 고온측에 위치하여 모재조직에 비하여 두 용접조직은 용접열 사이클로 인한 파괴인성이 저하하였음을 알 수 있다.

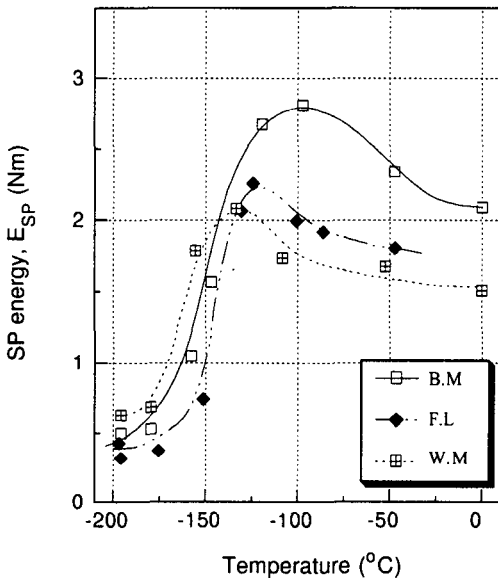


Fig. 13 SP energy transition behaviors in welded joint of SM50YB steel.

Fig. 12과 Fig. 13의 SP 에너지-온도 의존곡선으로부터 얻어진 두 강종의 연성-취성 전이온도 ($DBTT_{SP}$)를 Fig. 14에 도시하였다. 그림에서 TMCP강의 경우 모재조직과 HAZ 조직의 $DBTT_{SP}$ 의 차이는 적으나, $DBTT_{SP}$ 저하경향은 모재에 비해 HAZ, F.L, W.M 순으로 고온측에 위치하고 있다. 특히 F.L 조직과 W.M 조직의 $DBTT_{SP}$ 는 모재에 비해 약 20°C 정도 고온측에 위치하고 있어 연화영역인 HAZ보다 더 큰 파괴인성의 저하를 관찰할 수 있다. 따라서 이같은 TMCP 강 용접부에 대한 파괴인성의 저하를 개선하기 위해서는 용접후 열처리 작업이 필요하다고 판단된다. 한편, 이들의 시험결과를 종래 같은 급의 인장강도를 갖는

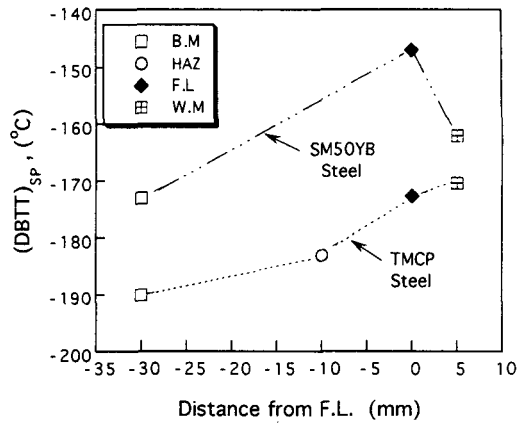


Fig. 14 The distribution of ductile-brittle transition temperature ($DBTT_{SP}$) in weldment of TMCP and SM50YB steels.

SM50YB강 용접부 조직의 결과와 비교해 보면, SM50YB강의 모든 조직에 대한 $DBTT_{SP}$ 는 TMCP강의 경우보다 월등히 높은 값을 보여, 파괴인성 특성은 가속냉각에 의해 기지강화된 TMCP강이 대입열 용접후에도 우수함을 SP시험 결과로부터 명확하게 알 수 있다. 덧붙여, 한편, 이상의 실험 결과들로부터 SP시험법은 조직이 연속적으로 변화하는 강 용접부위에 대한 각 조직의 고유한 파괴인성 평가에 그유용성이 매우 높음을 알 수 있고, 앞으로 용접구조물의 재료평가에 그 적용이 기대된다.

4. 결 론

지금까지 TMCP강과 SM50YB강의 모재 및 용접부를 대상으로 SP시험과 COD시험을 실시하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. TMCP 강의 각 방향에 따른 SP시험 결과, 연성-취성 전이곡선은 S, T, L방향순으로 고온측에 위치하나 세방향에 있어 파괴인성의 큰 차이는 없었다. 그리고 각방향의 $DBTT_{SP}$ 는 SM50YB강재에 비해 월등히 낮아 TMCP 강 가속냉각에 의한 우수한 파괴인성의 특성을 관찰할 수 있었다.

2. COD시험결과, TMCP강의 경우 SP시험결과와 같이 세방향에 있어 DBTT의 큰차이를 보이지 않았으나, SM50YB강의 경우는 SP시험결과와 다르게 세방향의 $DBTT_{COD}$ 결과가 뚜렷한 차이가 없

어, COD시험 보다도 미소시험편을 이용한 SP시험에 의한 파괴인성의 평가가 더욱 우수함을 관찰할 수 있었다.

3. TMCP 강 HAZ 조직은 경도분포 및 상온과 저온(-196℃)에서의 파괴에너지 그리고 SP 에너지-온도 의존곡선의 상부에너지가 모재에 비해 낮아 연화에 의한 낮은 기계적 특성치를 확인할 수 있었다.

4. TMCP강의 용접부에 대한 DBTT_{SP}는 모재에 비해 HAZ, F.L, W.M 순으로 고온측에 위치하여 낮은 파괴인성을 보이고 있어 용접부 각 조직의 파괴인성의 개선을 위해서는 용접후 열처리작업이 필요하다고 판단된다. 그러나 TMCP강 용접부의 각 조직은 SM50YB강의 경우보다 월등히 낮은 DBTT_{SP}를 보였다.

참 고 문 헌

1. 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
2. 冨合 岡信孝 : TMCP鋼의溶接, 日本溶接學會, 第 61卷, 第 4號, (1992), pp. 288-301
3. 김희진 : TMCP 강재의 연화 현상, 대한용접학회지, 제 4권, 제 2호, (1986), pp. 9-17
4. 신민태, 윤중근, 김희진 : TMCP 강 HAZ의 용접열 영향부 인성에 관한 연구, 대한용접학회지, 제 4권, 제 3호, (1986), pp. 43-49
5. 윤중근, 김희진 : 기술현대, Vol. 7, No. 2, (1987), pp. 16-23
6. J. G., Youn, H. J. Kim : Welding Metallurgy of Structural Steel, AIME, (1987), pp. 157-168
7. 윤중근, 김희진 : Proc. of the 1st Conference on Mechanical Behaviors of Materials, (1987), pp. 179-185
8. J. M. Baik, J. Kameda, O. Buck. : Development of Small Punch Tests for Ductile-Brittle Transition Temperature Measurement of Temper Embrittled Ni-Cr Steels, ASTM STP 888, (1986), pp. 92-111
9. JAERI-memo(62-193) : 小型パンチ(SP) 試験法(案), 日本原子力研究所, (1987), pp. 1-135
10. 유대영 : 소형펀치 시험에 의한 강용접부의 파괴인성 평가에 관한 연구, 전북대학교 박사학위 논문, (1990), pp. 1-125
11. R. H. Sailors : Fracture Feature Anisotropy in a Martensitic Steel plate, ASTM STP 600, (1976), pp. 172-189
12. W. P. A Belcher, S. G. Druce : Micromechanism of Ductile Stable Crack Growth in Nuclear Pressure Vessel Steels, ASTM STP 803, (1983), pp. 739-763
13. Ximiyuan Ma, Shoji, T., and Takahashi, H. : Characterization of Fracture Behavior in Small Punch Test by Combined Recrystallization-Etch Method and Rigid Plastic Analysis, J. of Testing and Evaluation, Vol. 23, (1987), p. 49