연 구 논 문

X20CrMoV121강과 2.25Cr1Mo강 용접부의 ASP 시험과 CVN 충격 시험의 상관관계에 대한 연구

이 동 환* · 김 형 섭**

*전북대학교 기계설계공학부
**전북대학교 대학원 기계설계학과

A Study on the Correlation between Advanced Small Punch Test and Charpy V-notch Test on X20CrMoV121 and 2.25Cr1Mo steels Weldment

Dong-Hwan Lee* and Hyoung-Sup Kim**

*Dept. of Mechanical Design engineering, Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea
**Mechanical Design, graduate school, Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea

*Corresponding author ; 0311dhlee@chonbuk.ac.kr
(Received March 12, 2008 ; Revised May 22, 2008 ; Accepted June 25, 2008)

Abstract

Charpy V-Notch test is commonly used to evaluate fracture toughness. However, since the region to be evaluated is limited to bulk material due to the specimen size required, individual evaluation of micro-structures on weldment is very difficult. In this study, ASP(Advanced Small Punch) test was carried out to evaluate material degradation and fracture toughness on the B.M, W.M and each micro-structures of HAZ for X20CrMoV121 and 2.25Cr1Mo steels with artificial aging time. In addition, to evaluate fracture toughness and material degradation of B.M and W.M of X20CrMoV121 steels with aging times, CVN (Charpy V-notch) test was performed. And then the correlation between ASP and CVN test on X20CrMoV121 steels was obtained. Furthermore, through this correlation, material degradation property of each micro-region of the HAZ in weldment, which was impossible to be evaluated by the CVN test, can be estimated and determined.

Key Words : Advanced Small Punch (ASP) Test, Conventional Small Punch(CSP) Test, Material Degradation, Heat Affected Zone (HAZ), Ductile-Brittle Transition Temperature(DBTT)

1. 서 론

일반적으로 발전설비와 같은 강 구조물에는 필수적으로 용접부가 존재하게 된다. 이러한 용접부는 구조물의 가장 취약한 부재로 알려져 있어 이들 용접부에 대한 평가는 구조물의 안전성 확인 차원에서 매우 중요하다. 한편, 에너지 발전 설비와 같이 고온 고압의 환경에 사용되는 내열강 용접부의 경우, 운전 시간의 증가함에 따라 다양한 재질 열화가 발생한다[1,2]. 특히 다양한 조직으로 구성되어 있는 용접부는 극한의 조건에서 장시간 노출됨에 따라, 각 조직의 물성이 예측이 힘들 정도로 변화되어 재료의 기계적 성질과 기기의 안전성에 영향을 미치게 된다[3]. 따라서, 고온 설비의 안전성을 확보하기 위해서는, 용접부 국부조직 각각에 대한 파괴강도와 재질 열화를 평가하는 것이 매우 중요하다[4].

본 연구에서는 발전설비의 보일러 재료로 사용되는 내열강 용접부의 파괴 인성 거동을 조사하기 위해서, 용접부 각 미세조직의 신재(virgin material)와 인공시효재(artificial aged material)를 대상으로 ASP (Advanced Small Punch) 시험을 실시하였다. 더불어 재료의 파괴인성 시험에 일반적으로 사용되는 샤르

피충격시험(Charpy V-notch: CVN) 시험을 실시하여 ASP시험과의 상관성에 대해 조사하였다. 이를 통하여 ASP 시험을 통한 파괴인성의 온도 의존성을 평가하는 것과 더불어, ASP 시험과 CVN 시험을 통해 얻어진 연성-취성 천이 온도(ductile-brittle transition temperature: DBTT) 사이의 상관관계를 도출하고, 이러한 상관 관계를 통하여, CVN 시험법으로는 특성 평가가 곤란한 용접부 국부조직에 대한 CVN의 DBTT를 추정함으로써, 용접부 국부조직 각각의 파괴인성과 재질열화를 고려하여 용접부의 건전성을 보다 종합적으로 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험재료

본 연구에 사용된 X20CrMoV121강과 2.25Cr1Mo강 및 그에 따른 용접봉의 화학적 조성과 상온에서의 기계적 특성을 Table 1과 2에 나타내었다. 이들 용접 공정과 강화 열처리 및 예열 후열 조건은 Table 3과 4에 나타내었다. Fig. 1은 본 연구에서 선정한 X20CrMoV121강과 2.25Cr1Mo강 용접부의 횡단면 사진으로 강 용접부의 미세조직별 위치도 함께 나타내었다. 이와 같은 용접부의 각 국부조직의 기계적 특성 평가를 위해 CGHAZ(조립역), FGHAZ(미세결정립역), ICHAZ(변태역), W.M(용착금속), B.M(모재)로부터 10mm × 10mm × 0.5 mm의 ASP시험편을 채취하였다. 또한 장시간 사용에 대한 재질 열화 거동을 조사하기 위하여, X20CrMoV121강의 용접부를 대상으로 인공 시효 열처리 (artificial aging heat treatment)를 수행하였다. 용접부의 열처리는 실제 사용온도 보다 높고 뜨임(tempering)온도 보다 낮은 660℃에서 일정 시간 동안 수행하여 얻었다.

Table 1 Chemical compositions of used materials.(wt.%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	W
X20CrMoV121	0.19	0.19	0.48	0.011	0.003	0.66	10.40	0.86	0.26	-	-
2.25Cr1Mo	0.12	0.23	0.48	0.016	0.001	-	2.29	0.94	-	-	-
Filler Metal of X20CrMoV121	0.18	0.25	0.50			0.6	11.50	1.0	0.30		0.50
Filler Metal of 2.25Cr1Mo	0.15	0.80	1.20	0.03	0.03		2.50	1.20		0.35	

Table 2 Mechanical properties of used materials

Materials	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Y/T ratio(%)
X20CrMoV121	572	798	19.4	72
2.25Cr1Mo	401	544	29	74

Table 3 Welding process specification for X20CrMoV121 and 2.25Cr1Mo steels.

(a) X20CrMoV121 steel

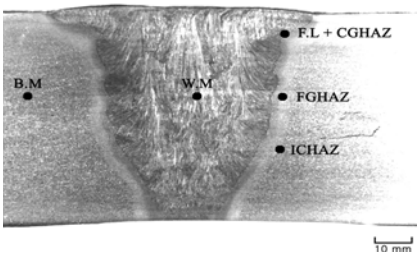
Pass	Proc.	Filler Metal		Polarity/Current		Voltage Range (V)	Travel speed (cm/min)
		DIN class	Dia. (mm)	Type	Amp. range (A)		
1~3	GTAW	SGCrMoWV12	ϕ2.4	DCSP	130~150	11	8~15
4~34	SAW	UPS2CrMoWV12	ϕ4.0	DCRP	305~345	31~32	40~50

(b) 2.25Cr1Mo steel

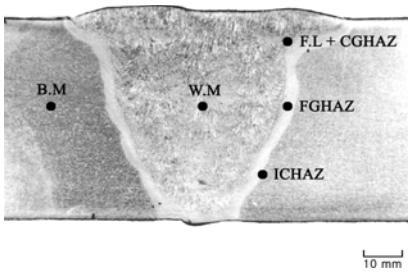
Pass	Proc.	Filler Metal		Polarity /Current		Voltage Range (V)	Travel speed (cm/min)
		AWS class	Dia. (mm)	Type	Amp. range(A)		
1	GTAW	ER90S-B3	ϕ2.4	DCSP	110~120	12~13	7~8
2~6					140~190	13~15	7~10
7~35	SAW	F9P2-EB3-B3	ϕ4.0	DCRP	320~350	30~31	28~33

Table 4 Strengthening heat treatment conditions(NT) / Preheat and PWHT conditions

Materials	Nomalizing	Tempering	Preheat	PWHT
X20CrMoV121	1050℃, 15min, AC	760℃, 90min, AC	120℃, 2hr 20min	750℃, 5hr 51min
2.25Cr1Mo	930℃, 10min, AC	740℃, 30min, AC	Min. 160℃	730~740℃, 6hr



(a) X20CrMoV121 steel



(b) 2.25Cr1Mo steel

Fig. 1 Macro etched photograph of multi-pass weldment

2.2 시험편 및 실험 방법

본 연구에 사용된 ASP 시험은 1.5mm의 볼을 10mm × 10mm × 0.5mm의 박판형 시험편의 상부에 놓고, loading bar를 통해 시험편에 하중을 가하는 벌징 시험의 일종이다. Fig. 2는 Fig. 1에 나타난 X20CrMoV121강 용접부의 횡단면 사진에서 toe HAZ 위치를 확대하여 나타낸 사진으로서 시험편의 채취위치를 보여주고 있다. Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 HAZ 조직들이 F.L(Fusion Line, 용융선)로부터 뚜렷하게 각자의 영역을 구성하고 있음 알 수 있다. 또한 그림에 표시된 원은 ASP 시험 시 볼의 위치와 크기를 나타내고 있는데, 볼의 개재 영역이 조직 내에 정확하게 위치하고 있어 보다 정확한 물성평가가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 3는 X20CrMoV121강 용접부의 각 국부조직

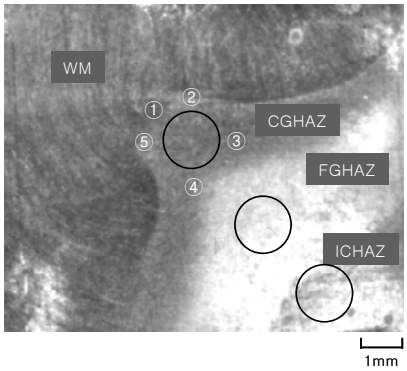


Fig. 2 Macro etched toe HAZ and loading position for each specimen in ASP test

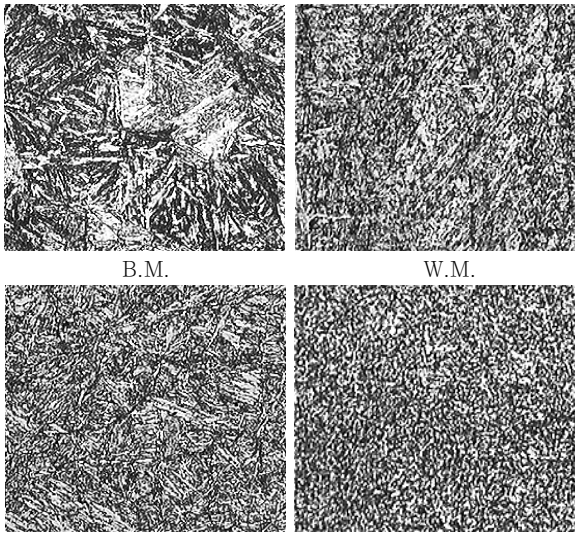


Fig. 3 Microstructures of X20CrMoV121 steel weldment

에서 관찰된 미세조직 사진으로, B.M 조직을 보면 lath 템퍼드 마르텐사이트(tempered martensite) 조직과 미세 탄화물로 구성되어 있음을 알 수 있다. 용접 시 받게 되는 열이력에 따라 F.L에 인접한 CGHAZ는 조대화된 마르텐사이트 조직으로, 이웃한 FGHAZ는 미세한 세립조직으로, W.M에서는 선·후행 패스(pass)에 의한 반복적인 뜨임(tempering) 효과로 인하여 용접 패스(pass)가 겹치는 부분에서 일부 조직이 미세화된 침상형 조직으로 구성되어 있다. 이러한 조직적인 차이로부터 이들 조직의 물성이 서로 다르게 나타날 것임이 예측가능하다.

ASP 시험은 소형펀치 시험에서 사용되는 일반적인 방법에 준하여 수행되었다[5,6]. 본 시험에 사용된 시험기는 용량 10ton의 만능 시험기이며, 0.6mm/min의 일정한 변위 속도로 시험이 수행되었다. 또한 온도에 따른 기계적 성질을 평가하기 위해, 액체질소 챔버를 사용하여 -196℃~ 상온(RT)의 범위에서 시험이 수행되었다. ASP 시험과 기존 파괴인성 시험과의 비교를 위해, X20CrMoV121강재에 대하여 ASTM E 23에 따라 CVN 충격 시험을 수행하였으며, 357.9J의 Tinius Olsen사의 충격시험기를 사용하였다. Fig. 4에는 ASP 시험편과 CVN 시험편의 채취 위치를 보여주고 있다. CVN 시험편은 2.5mm × 10mm × 55mm 크기의 표준 subsize 시험편으로서 노치반경은 0.25mm, 깊이는 2mm, 노치부 각도는 45°로 하였다. CVN 시험은 구성조직이 극히 제한적인 용접부의 특성을 고려하여 W.M 조직과 B.M 조직만을 대상으로 하였다.

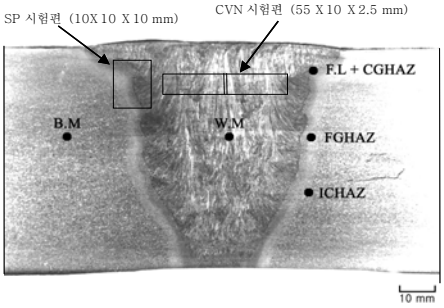


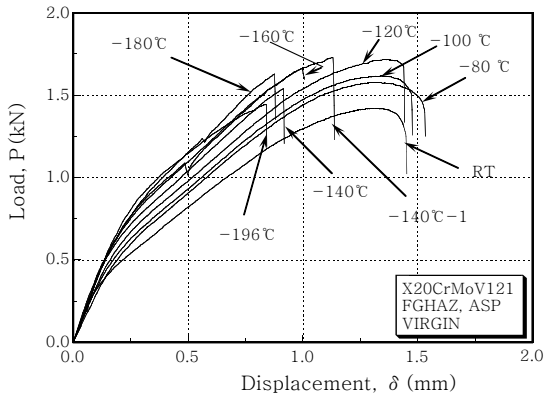
Fig. 4 Dimensions and machining plan of CVN impact test specimen

3. 실험결과 및 고찰

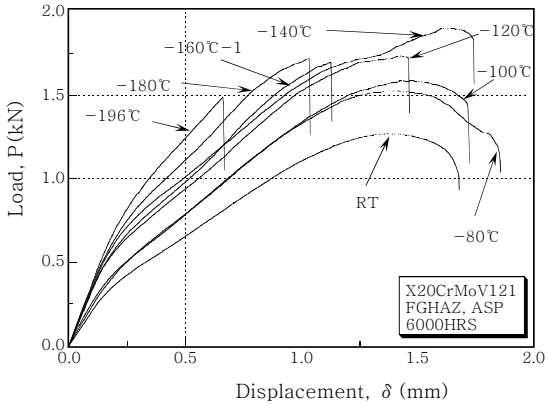
3.1 용접부 미세 조직의 ASP 시험특성 평가

3.1.1 ASP 시험의 하중-변위 거동

ASP 시험은 하중-변위 거동은, I: 탄성 굽힘영역, II: 소성굽힘영역, III:소성막신장영역, IV:소성 불안정영역의 4단계로 분류되고 있으며, 소성막 신장영역이 잘 나타나는 것이 특징이다. Fig. 5는 X20CrMoV121강의 FGHAZ에 대한 ASP 실험에서 얻어진 다양한 시험온도별 하중-변위 선도를 나타낸 그림이다. 동일한 열처리 조건에서 전체적인 하중-변위 거동은 시험 온도에 따라 뚜렷한 파괴 거동 차이와 의존성을 나타내고 있다. 즉 다른 조직과 약간 차이는 있으나, 약 -140℃ 이하의 저온부에서는 하중의 급격한 감소를 보여 취성파괴 거동을 보이고 있으며, 한편 그 이상의 온도 영역으로 갈수록 P_{MAX}이후 완만한 하중감소와 함께 최종 파단 되어 일반적인 소형펀치시험의 연성파괴 거동을 잘 나타내고 있다. 따라서 -140℃ 부근에서 연성-취성 천이 거동이 일어나고 있음을 확인 할 수 있다. 또한, 시효 열처리 시간이 증가 할수록 변위증가와 약간의 하중 감소를 확인 할 수 있다.



(a) Virgin



(b) 6000HRS

Fig. 5 Load-displacement curves for FGHAZ of X20CrMoV121 steel weldment with aging time by ASP test

3.1.2 ASP 시험의 연성- 취성 천이 곡선

ASP시험으로 파괴에너지(E_{ASP})는 하중-변위 곡선의 아랫 면적으로 정의되며, 온도에 따른 E_{ASP}의 거동으로부터 연성-취성 천이 곡선을 구할 수 있다[7,8]. Fig. 6은 X20CrMoV121강 신재와 시효재의 용접부에 대한 ASP시험의 연성-취성천이 곡선을 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 데이터의 일관성을 위하여, 식(1)과 같은 Sigmoidal Boltzman 함수를 이용한 curve fitting을 이용하여 DBTT(℃)를 구하였으며[9,10] 그 결과를

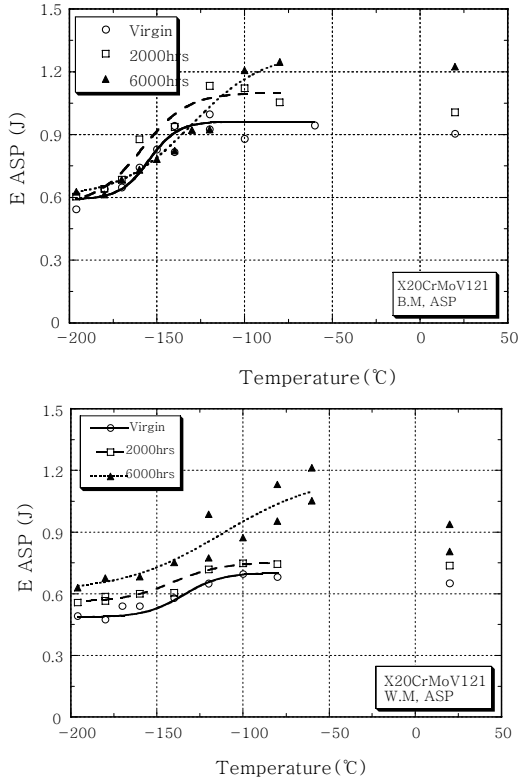


Fig. 6 Ductile-brittle transition curves for W.M & B.M of X20CrMoV121 steel weldment with aging time by ASP test

Table 5에 나타내었다.

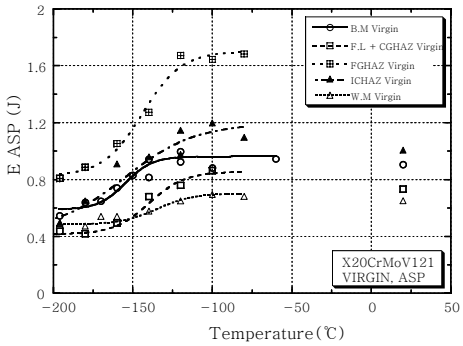
$$E=E_{low}+\frac{E_{high}-E_{low}}{1+\exp(\frac{T-DBTT}{dT})} \quad (1)$$

B.M 조직에서는 2000hrs 시효조건에서의 연성-취성 천이온도의 저하에 따른 인성의 증가 후, 6000hrs 시효조건에서 연성-천이온도의 증가로 인한 인성의 저하를 확인 할 수 있고, W.M 조직에서는 시효 시간증가에 따른 인성의 증가를 확인 할 수 있었다. 본 연구에서 제시된 바와 같이 열화재의 연성-취성천이곡선이 신재보다 상부에 위치하여 재료의 기계적 특성이 향상된 것으로 볼 수 있으나 DBTT값은 여전히 신재보다 적거나 크게 평가됨으로서 ASP 시험이 재질열화의 거동을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

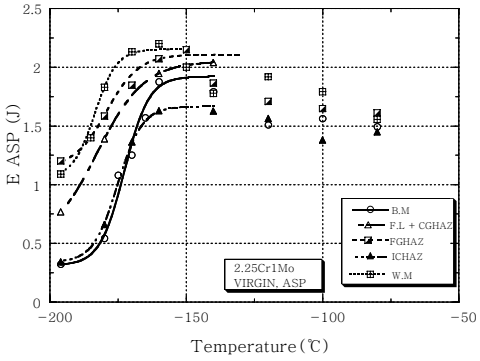
Fig. 7은 X20CrMov121강과 2.25Cr1Mo강의 신재 용접부에 대해 미세 조직별로 얻어진 E_{ASP}의 연성-취성 천이온도($DBTT_{ASP}$)곡선을 함께 나타낸 그림으로 모든 조직에서 시험온도에 따른 E_{ASP}의 상부와 하부의 값이 명확히 나타남으로써 E_{ASP}의 시험온도 의존성을 확인할 수 있으며 시험 대상 조직별로 각기 다른 연성-취성 천이 거동의 차이를 관찰할 수 있다. X20CrMoV121강 용접부 미세조직들의 E_{ASP} 천이곡선을 살펴보면 이웃하여 연속 배열된 HAZ부 조직들에서 연성-취성천이온도 곡선거동이 뚜렷한 차이를 보여 ASP 시험법의 유용성을 잘 나타내고 있다. 조직별로 살펴보면 결정립이 미세한 FGHAZ 조직의 경우 강도와 연성 등의 기계적 성질이 가장 우수하였다. 또한 거의 모든 시험온도에서 E_{ASP}가 가장 높으며 $DBTT_{ASP}$가 약 -166℃로서 최저온 측에 위치하고 있어 FGHAZ 조직이 상대적으로 인성이 가장 우수함을 알 수 있다[11]. 2.25Cr1Mo강의 경우 모든 HAZ 조직들이 B.M보다 인성이 향상된 결과를 보이고 있으며, W.M 조직의 인성이 가장 우수함을 알 수 있다. 또한 연성-취성 천이 곡선 거동은 W.M, FGHAZ, CGHAZ, ICHAZ 조직 순으로 고온 측으로 이동되며, ICHAZ조직이 가장낮은 기계적 특성을 보이고 있다.

Table 5 $DBTT_{ASP}$ of B.M and W.M of X20CrMoV121 steel weldment obtained by ASP test

	B.M	W.M
VIRGIN	-155	-135
2000HRS	-159	-140
6000HRS	-130	-112



(a) X20CrMoV121



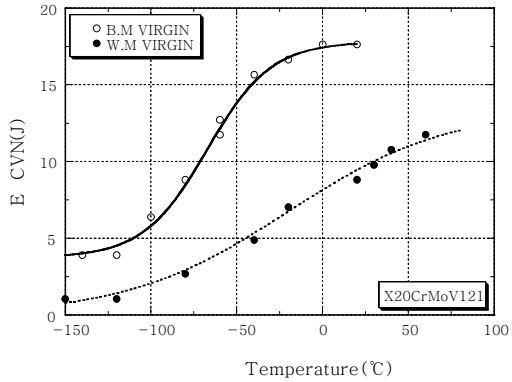
(b) 2.25Cr1Mo

Fig. 7 ASP ductile-brittle transition curves for various microstructures of virgin X20CrMoV121 and 2.25Cr1Mo steel weldment

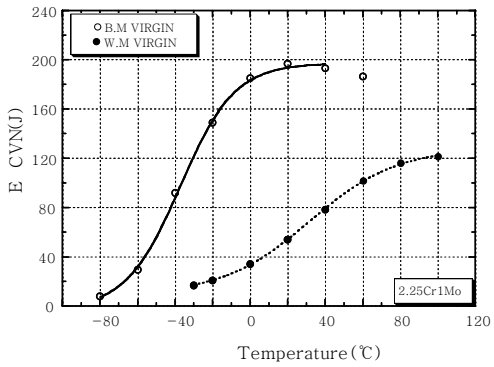
본 연구의 두 용접부가 서로 다른 거동을 보이는 이유는 용가재의 기계적 특성과 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉, X20CrMoV121강에 사용된 용가재는 규정강도가 최소 750MPa(DIN 8575-1)로서 모재의 강도에 비해 약간 낮은데 반해, 2.25Cr1Mo강의 용가재는 규정강도가 최소 620MPa(ASME SFA-5.17 & 5.28)로서 모재의 강도보다 높다. 따라서 X20CrMoV121강에서는 용착금속이, 2.25Cr1Mo강에서는 모재와 그에 인접한 ICHAZ 조직이 낮은 기계적 특성을 보인 것으로 판단된다. 그러나 두 재료 모두 결정립 미세화에 의한 강화효과에 의해, FGHAZ가 전반적으로 우수한 기계적 특성을 보이고 있다.

3.2 용접부 CVN 충격시험 특성 평가

X20CrMoV121강의 B.M, W.M 조직에 대한 CVN 충격시험의 결과가 Fig. 8에 보여진다. 그림에서 보는 바와 같이 B.M 조직에 비하여 W.M 조직의 천이곡선이 천이온도영역에서 약 47℃ 정도 고온 측으로 현저히 이동되어 있어 W.M 조직의 기계적 특성이 상대적으로 취약함을 잘 알 수 있다. 이 같은 결과는 용접시공에 따른 야금학적 조직 변화에 따른 결과로 판단된다. 즉, 용접 시 발생되는 후속 비드의 용접 열사이클 및 용접구속으로 인하여 타 조직에 비하여 경도가 높게 되어 상대적으로 낮은 파괴강도 특성을 보이는 것으로

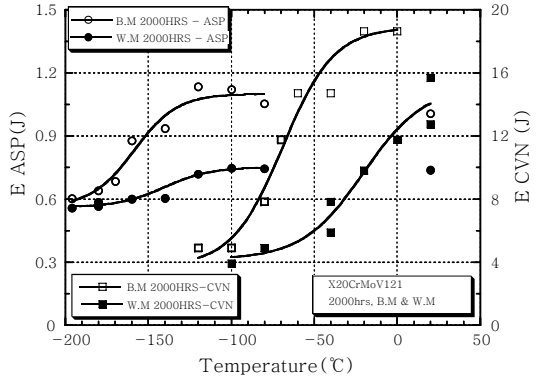


(a) X20CrMoV121

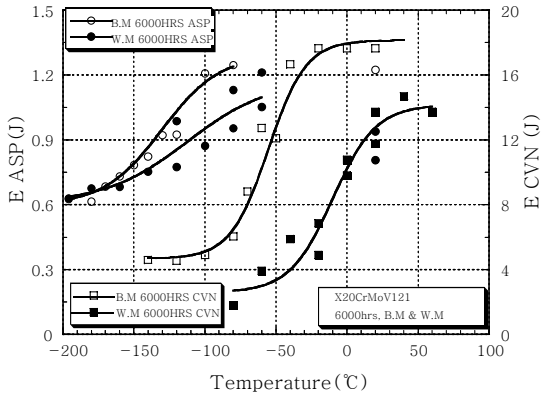


(b) 2.25Cr1Mo

Fig. 8 CVN impact energy transition curves for virgin B.M and W.M in X20CrMoV121 and 2.25Cr1Mo steel weldment



(a) 2000HRS



(b) 6000hrs

Fig. 9 Comparison of DBTT curves obtained from CVN and ASP test for B.M and W.M in X20CrMoV121 steel weldment

생각된다. 2.25Cr1Mo강의 경우 역시 X20CrMoV121 강과 동일하게 W.M의 천이 곡선이 B.M보다 고온 측에 존재하여 상대적으로 W.M이 취약함을 확인할 수 있다.

3.3 ASP 시험과 CVN 시험의 상관성 평가

ASP시험과 CVN 시험결과의 상관성을 평가하기 위하여 Fig. 9에 두 시험 결과를 함께 나타내었다. 전반적으로 CVN 충격시험의 연성-취성천이온도 곡선보다 ASP 시험의 연성-취성천이온도 곡선이 더 저온 측에 위치하고 있는데, 이는 ASP 시험의 경우 CVN에 비해 부하 속도가 낮아 발생된 차이로 생각된다. 두 시험법 모두 X20CrMoV121강 용접부에서 W.M 조직의 연성-취성천이온도 곡선은 B.M 조직보다 우측에 존재하여 W.M 조직의 낮은 파괴 인성 특성을 확인할 수 있다.

X20CrMoV121강과 2.25Cr1Mo강의 연성-취성 천이 곡선에서 얻어지는 두 조직의 DBTT를 시험방법에 대해 서로 비교한 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. 전반적으로 B.M의 DBTT보다 W.M의 값이 고온 측에 존재하는 것을 알 수 있다. 한편 재료 및 조직별 거동

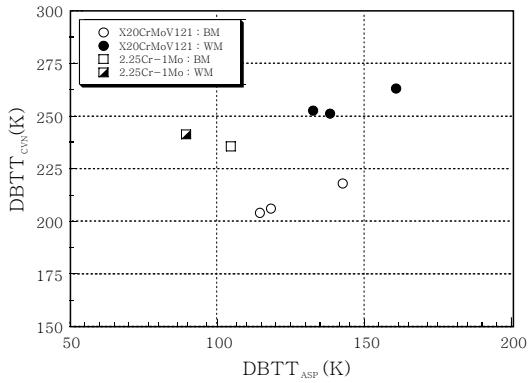


Fig. 10 Comparison of DBTT(Absolute Temperature) obtained from CVN and ASP test for B.M and W.M in X20CrMoV121 and 2.25Cr1Mo

을 비교하여 보면 각각 선형적인 관계가 있음을 확인할 수 있어, 두 실험 사이에 일정한 상관성을 도출할 수 있음을 짐작할 수 있다.

Fig. 11은 우선적으로 Fig. 10에서 확인한 X20CrMoV121 강의 ASP와 CVN시험에 대한 비를 재료의 탄소당량을 매개변수로 하여 정리한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 인자사이에 선형적인 관계가 있음을 확인할 수

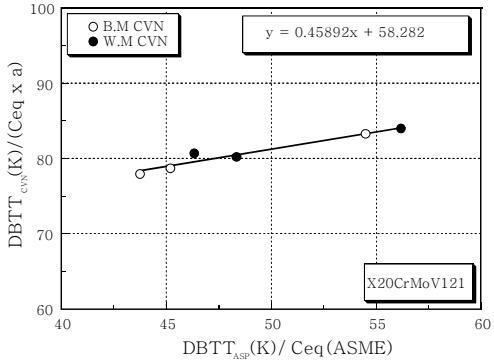


Fig. 11 The Equation of DBTT(absolute temperature) obtained from CVN and ASP test for B.M and W.M in X20CrMoV121

있다. 이러한 관계로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

$$DBTT_{CVN}(K) = 0.459 \cdot DBTT_{ASP}(K) \cdot \alpha + 58.252 \cdot (Ceq \cdot \alpha) \quad (2)$$

여기서, 탄소 당량 Ceq는 일반적으로 널리 사용되는 $C_{eq}=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$을 이용하였으며, 비례상수 α는 용착 금속과 모재사이의 탄소당량을 고려한 $\alpha=Ceq_{(W.M)}/Ceq_{(B.M)}$로 정의된다.

X20CrMoV121강 용접부의 각 조직에 대한 $DBTT_{ASP}$(절대 온도)를 식(2)를 대입함으로써, CVN 시험의 DBTT(℃)를 유추한 결과가 Table 6에 보여 진다.

표에서 보는 바와 같이 6000hrs에서 DBTT가 가장 높아 일반적으로 판단되어지는 결과와 같음을 알 수 있다. 조직별로 분석 해 보았을 때, W.M과 더불어 CGHAZ에서 가장 높게 나와 이 조직의 파괴인성이 가장 열악함을 알 수 있다. 따라서, 발전설비 보일러 헤더용 X20CrMoV121강 용접부의 안전성을 확보하기 위해서는 용착금속과 CGHAZ 조직에 대한 보다 정확한 평가 및 유지 관리가 우선시 되어야 함을 알 수 있다.

향후, 보다 다양한 재료 및 열처리 조건을 통해 시험 결과를 더욱 보완 한다면, 본 연구에서 제시한 바와 같이 ASP 시험과 상관관계를 이용한 용접부 국부조직의 평가 방법은 매우 유용하리라 기대한다.

Table 6 $DBTT_{CVN}$ of various microstructures of X20CrMoV121 steel weldment by correlation equation

	B.M	F.L+ CGHAZ	FGHAZ	ICHAZ	W.M
VIRGIN	-67.0	-39.2	-41.4	-46.9	-20.4
2000HRS	-69.0	-34.9	-52.6	-39.1	-20.4
6000HRS	-55.4	-30.4	-41.7	-38.6	-10.0

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) X20CrMoV121강과 2.25Cr1Mo강을 대상으로 ASP시험과 CVN시험을 통해 얻어진 연성-취성천이 온도를 비교한 결과 전반적으로 W.M의 DBTT가 B.M보다 고온 측에 존재하는 것을 확인할 수 있으며, X20CrMoV121강의 경우 두 시험사이에는 선형적인 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

2) X20CrMoV121강의 경우 탄소당량을 매개변수로 ASP 시험과 CVN시험의 DBTT사이의 선형적인 상관관계를 구할 수 있었으며, 이로부터 기존 CVN 시험에서는 구하기 곤란한 용접 국부 조직의 $DBTT_{CVN}$을 추정할 수 있었다.

3) ASP 시험과 CVN 시험사이의 관계식에 의해 구해진 데이터로부터, 모든 조직의 6000hrs에서 DBTT가 가장 높았으며, 조직별로 분석 해 보았을 때, W.M과 더불어 F.L.+CGHAZ에서 가장 높게 나와 파괴인성이 가장 열악함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 전북대학교 신임 교수 지원 연구비에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

1. S. H. Song, R. G. Faulkner, P. E. J. Flewitt, R. F. Smith, P. Marmy : Temper Embrittlement of a CrMo Low-alloy Steel Evaluated by menas of Small Punch Testing, Materials Science and Engineering, **A281**(2000), 75-81
2. B. J. Shaw : A Study of Carbides in Low Alloy Cr-Mo Steels, Research on Cr-Mo Steels, ASME, MPC-21(1984), 117-128
3. S. H. Chung, H. Takahashi and M. Suzuki : Microstructural Gradient in HAZ and its Influence upon Toe HAZ Fracture Toughness, Welding in the World(1978), 248
4. Dong Hwan Lee : Evaluation of Fracture Strength and Material Degradation for Weldment of High Temperature Service Steel Using Advanced Small Punch, KSME International Journal, **18-9**(2004) 1604-1613
5. H. S. Yu, B. G. Ahn, D. Y. Lyu and S. H. Chung : A Study on Fracture Toughness of Welded Joint Orientation in TMCP steel by SP Test, Journal of KWS. **16-6**(1998), 35-43(in Korean)
6. D. Y. Lyu, S. H. Chung, J. K. Lim, H. D. Jung, K.

Tamakawa and H. Takahashi : A Study on Fracture Strength Evaluation of Steel Welded Joint by Small Punch Test (I), Journal of KWS. **7-3** (1989), 28-35 (in Korean)
7. J. Kameda, X. Mao : Small-punch and TEM-disc testing techniques and their application to characterization of radiation damage, Journal of Materials Science, **27**(1995), 983-989
8. A. Shekhter, A.B.L. Croker : Towards the correlation of fracture toughness in an ex-service power generating motor, International Journal Pressure Vessels and Piping, **77**(1999), 113-116
9. R. Moskovic, P.E.J. Flewitt : An overview of the principles of modeling Charpy impact energy data using statistical analyses, Metallurgical and Materials Transaction A, **28A**(1997), 2609-2623
10. B. Tanguy, : Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test, Engineering Fracture Mechanics, **72**(2005), 49-72
11. D. H. Lee, S. I. Lee, I. H. Kwon, S. S. Baek and H. S. Yu, : Fracture Strength Evaluation of Heat Resistant Steel Weldment by Advanced Small Punch Test. Proc. KWS Welding Strength Research Workshop(2002), 76-83 (in Korean)