

내열강 용접부의 파괴강도 평가를 위한 Advanced Small Punch 시험에 관한 연구

이동환* · 이송인** · 권일현** · 유효선**

*전북대학교 대학원 정밀기계공학과

**전북대학교 기계항공시스템공학부, 자동차신기술연구센터

A Study on Advanced Small Punch Test for Evaluation of Fracture Strength in Heat Resisting Steel Weldment

Dong-Hwan Lee*, Song-In Lee**, Il-Hyun Kwon** and Hyo-Sun Yu**

*Dept. of Precision Mechanical Eng., Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

**Division of Mechanical Aero System Eng., Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

Abstract

In order to evaluate the proper fracture strength of microstructures in a steel weldment, smaller size loading ball than used for a conventional small punch(CSP) testing is required due to regional limitation on constitutive structures. In this study, the minimized loading ball(ϕ 1.5mm) and bore diameter of lower die(ϕ 3mm) were designed for an advanced small punch(ASP) test. The results obtained from the ASP test were compared with those from a CSP testing for a X20CrMoV121 steel weldment. It was found that the ASP test clearly showed the microstructural dependance on fracture strength and ductile-brittle transition behavior of the weldment. In the ASP test, especially, the cracks tend to initiate for various directions within hemispherical indentation region of an objective structure in SP test. This indicates that the evaluation of more proper fracture strength for F.L+CGHAZ, FGHAZ and ICHAZ can be performed by means of the ASP test in a steel weldment.

(Received September 17, 2002)

Key Words : Advanced small punch(ASP) test, Heat resisting steel weldment, F.L, CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ, Fracture strength, DBTT, X20CrMoV121 steel

1. 서 론

고온·고압 설비를 비롯한 각종 공학구조물에 있어서 필수불가결하게 존재하게 되는 용접부는 불안정 취성파괴에 대한 중요한 인자로 고려되고 있다. 즉, 용접입열이나 급열, 급냉의 용접 열이력에 따라 용착금속(weld metal : W.M), 용융선(fusion line : F.L), 열영향부(heat affected zone : HAZ)와 같은 다양하고 복잡한 조직이 생성된다. 특히 발전설비 배관이나 헤더 등과 같은 고온 부재들은 대부분 후판으로 구성되어 있기 때문에 SMAW(shield metal arc weld), SAW(submerged arc weld) 그리고 GMAW(gas metal

arc weld) 등의 용접법을 이용한 다층용접이 수행된다. 이러한 용접공정에 의하여 생성되는 최종패스의 열영향부는 조립역(coarse grain region : CGHAZ), 세립역(fine grain region : FGHAZ), 부분 변태역(inter-critical grain region : ICHAZ) 그리고 템퍼링역(temperd grain region : TGHZ)과 같은 더욱 복잡한 조직으로 구성된다. 이와 같은 열영향부는 F.L로부터 거리에 따라 생성된 다양한 조직들의 기계적 특성이 상이하고 모재(base metal : B.M)에 비하여 강도와 인성이 크게 저하되어 용접부의 파괴에 큰 영향을 끼친다^{1,2)}.

따라서 용접구조물의 안전성을 확보하는데 있어서 용접부, 특히 각 용접조직에 대한 고유하고 정확한 기계

적 특성의 평가는 중요한 문제이다.

최근 용접부의 강도나 인성 평가 시 기존의 인장, 또는 샬피충격(CVN)시험의 적용상의 제한성, 즉 다양한 조직이 형성되고 조직간의 거리가 극히 제한적인 용접부 국부조직에 대한 고유한 파괴강도의 평가를 위하여, 소형펀치(Small Punch : 이하 SP) 시험³⁻⁵⁾, 연속압입(Continuous Indentation)시험⁶⁾ 등이 개발되어 용접부에 적용되고 있다. 이중 SP 시험은 부하용 강구(steel ball) 아래의 용접부 미시영역에 대한 고유한 강도 및 인성 평가의 가능성이 인정되어 그 적용이 확대되고 있다. 현재 시험에 사용되는 부하강구는 $\phi 2.4\text{mm}$ 의 크기이나, 이보다 더 작은 강구를 이용한다면 보다 정도 있게 강 용접부의 국부조직에 대한 재료평가가 가능할 것이다. 또한 이 같은 시험기법은 종래 용접부 시험편의 크기에 따라 HAZ부 각 조직의 구성비 차이에 기인한 파괴강도의 데이터 편차를 보다 최소화 할 수 있을 것으로 보인다.

이러한 배경 하에서 본 연구에서는 최근 발전소 고효율화에 부합하여 사용이 증대되고 있는 내열강인 X20CrMoV121강을 대상으로 기존의 소형펀치(Conventional Small Punch : 이하 CSP) 시험을 개선시킨 Advanced Small Punch(이하 ASP) 시험을 도입하여 강용접부의 고유한 파괴강도와 인성의 평가 가능성을 검토하고자 한다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서 사용된 내열강재인 X20CrMoV121강의 화학 조성과 상온에서의 기계적 특성을 Table 1, 2에 나타내었다. 실제 발전 설비에 적용되는 용접절차와 조건에 준하여 용접공정이 수행되었으며, 이들 용접조건을 Table 3에 수록하였다.

제작된 용접부의 블록으로부터 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.5\text{mm}^t$ (또는 0.3mm^t) 크기의 SP 시험편이 제작되었다. 용접부의 각 조직별 시험편 채취위치는 ① F.L+CGHAZ, ② FGHAZ, ③ ICHAZ, ④ W.M, ⑤ B.M 조직으로 하였다.

X20CrMoV121강 용접부의 부식된 단면과, 각 조직별 SP 시험편의 채취 위치와 강구에 의한 조직별 부하영역을 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 Fig. 1(a)의 원으로 표시된 부위에서 F.L+CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ 조직에 대한 시험편들이 채취되었다. 광학현미경을 통

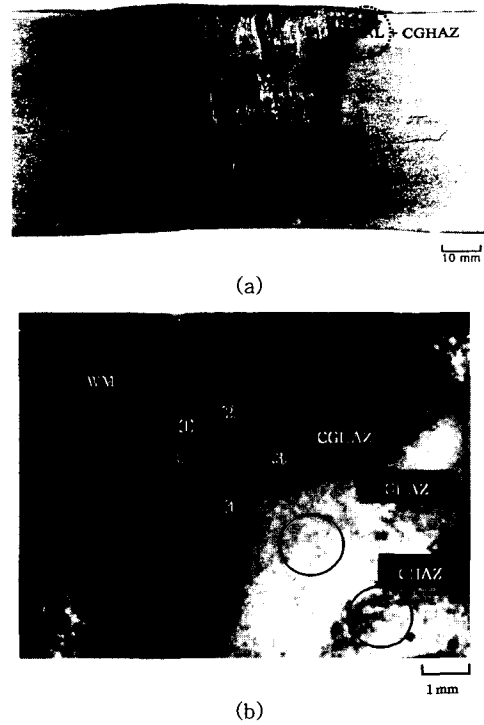


Fig. 1 Macroetched photographs of X20CrMoV121 steel weldment

Table 1 Chemical composition of X20CrMoV121 steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe
0.19	0.19	0.48	0.011	0.003	0.66	10.40	0.86	bal.

Table 2 Mechanical properties of X20CrMoV121 steel

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Y/T ratio (%)
572	798	19.4	72

Table 3 Welding process specification for X20CrMoV121 steel

Process (pass)	Filler metal		Shielding gas	Preheat range	Voltage range (V)	Travel speed (cm/min)
	DIN class	Diameter				
GTAW (1~3)	SGCrMoWV12	$\phi 2.4$	DCSP	130~150	11	8~15
SAW (4~34)	UPS2CrMoWV12	$\phi 2.4$	DCSP	305~345	31~32	40~50

해 관찰된 HAZ부의 미세조직들은 마르텐사이트조직으로서 입자가 조대화된 CGHAZ와 좀더 조직이 치밀하고 입자가 작은 FGHAZ, 그리고 FGHAZ의 세립조직에 이웃하고 A₁이상의 용접열 영향을 받아 조직내의 lath 상의 계면이 불분명한 ICHAZ 조직들로 구성되어 있으며, Fig. 1에서와 같이 부식단면에서 뚜렷한 각자의 영역을 나타내고 있다. Fig. 1(b)에서 표시한 원들은 각각 F.L+CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ 조직에 대한 ASP 시험 시 부하강구의 위치를 나타낸 것이다. 여기서 부하강구의 개재(介在) 영역이 각 조직 내에 정확하게 위치하고 있어 시험대상 조직에 대한 고유한 강도 평가가 가능할 것으로 기대된다.

X20CrMoV121 강 용접부의 미세조직에 대한 마이크로 비커스 경도분포는 Fig. 2와 같다. 시험결과를 살펴볼 때, B.M의 평균 경도값은 약 240의 값을 보인 반면, F.L에 이웃한 CGHAZ와 W.M부는 약 300~330 정도를 보여 B.M보다 매우 높은 경도 분포를 보였다. 특히 용접시 Ac₁과 Ac₃ 사이의 온도 영역을 경험하는 ICHAZ에서 경도값이 B.M 보다 낮은 연화층을 관찰할 수 있다.

SP 시험은 만능재료시험기를 이용하여 펀치의 선단과 시험편 사이에 강구(HRC 64)를 위치시킨 후 0.6mm/min의 크로스헤드 속도로 부하하였다.

SP 시험 중 실시간으로 하중-변위 거동을 측정하고 그 곡선 아래의 면적으로 SP 에너지(이하 E_{SP})를 구하였으며, -196℃~상온까지의 다양한 온도범위에서 얻어진 각 조직별 E_{SP}의 온도의존곡선으로부터 연성-취성 천이온도(ductile-brittle transition temperature: 이하 DBTT)를 구하였다. 이때 DBTT는 E_{SP}의 상부값과 하부 값의 평균값에 상당하는 시험온도로 정하였다. SP 시험에 대한 기타 자세한 방법과 절차는 이전에 보

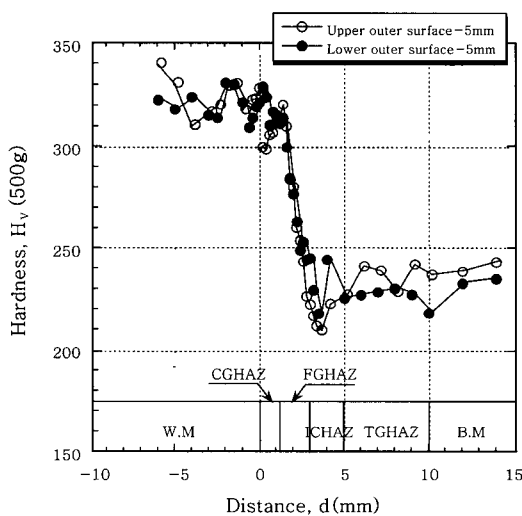


Fig. 2 Microhardness distributions obtained from the cross section of the weldment

고된 연구결과들^{4,5)}에 수록되어 있으며 이에 준한다. CSP 및 ASP 시험지그에 대한 주요 사양을 Table 4에 비교, 수록하였다. 여기서 DGH (deformation guide hole)는 SP 시험지그 하부다이의 중앙부에 가공된 변형유도구멍을 의미한다.

Table 4 Dimensional comparison for CSP and ASP test jig (Unit : mm)

Item	CSP	ASP
Punch bar diameter	2.4	1.5
Steel ball diameter	2.4	1.5
DGH diameter	4.0	3.0
Specimen thickness	0.5	0.3, 0.5

3. 시험결과 및 고찰

3.1 SP 시험편의 응력해석

ASP 시험장치에서 하부다이의 DGH 직경에 따라 시험편에 발생하는 응력분포를 알아보기 위하여 상용 MARC S/W를 이용한 탄-소성 유한요소해석이 수행되었다.

SP 시험편의 대칭성을 이용하여 시험편 형상의 1/2만을 모델링하였고 axisymmetric 조건하에서 해석이 진행되도록 하였다. 4-node quadrilateral 요소가 적용되었고 시험편의 두께에 따라 요소수는 578~928개, 절점수는 678~1021개 였다. 부하강구와 시험편을 지지하는 상·하부다이는 강체로, 시험편은 변형체로 규정하여 접촉되도록 하였다. 이들 접촉부에서 쿨롱마찰 계수는 0.3으로 하였고, Fig. 3에 유한요소 해석모델을 나타내었다.

Fig. 4는 SP 시험장치에서 DGH 직경에 따른 시험

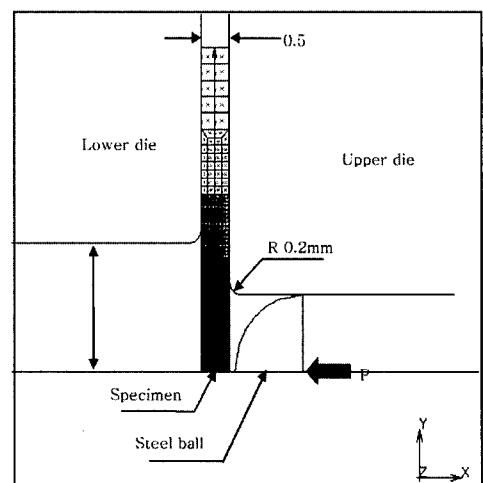


Fig. 3 Finite element model for SP test

편의 최대 von-Mises 응력(σ_{eq-max})값들을 편치의 부하축방향 변위가 0.5mm일 때 해석한 결과이다. 여기서 σ_{eq-max} 값은 파괴가 발생하는 시험편의 변형부 외경에서의 최대값이다.

ASP 시험의 경우, DGH 직경이 증가함에 따라 σ_{eq-max} 는 감소하고 있으며, 동일 크기의 DGH 직경에서 시험편 두께가 증가함에 따라 σ_{eq-max} 는 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 두 시험지그에서 DGH 직경에 따른 응력의 차이는 지그의 강성에 영향을 줄 정도로 그리 크지 않음을 알 수 있다.

위 결과에서 CSP 시험의 경우와 유사한 응력분포를 갖도록 하기 위해서는 ASP 시험지그에서 DGH의 직경을 4mm 이상으로 설계하여야 하나 강구의 직경이 1.5mm임을 고려할 때 SP 시험편의 고유한 특성인 bulging형 변형을 유도하기 위해서는 이러한 크기의 DGH 직경이 다소 무리가 있음을 예상할 수 있다. 또한 파괴인성의 평가를 위한 SP 시험의 적용 시 충분한 응력집중과 구속을 통해 재료의 소성변형 능력을 억제시켜 취성파괴를 유도할 필요가 있음을 감안할 때 적절한 DGH 직경의 선정은 매우 중요하다.

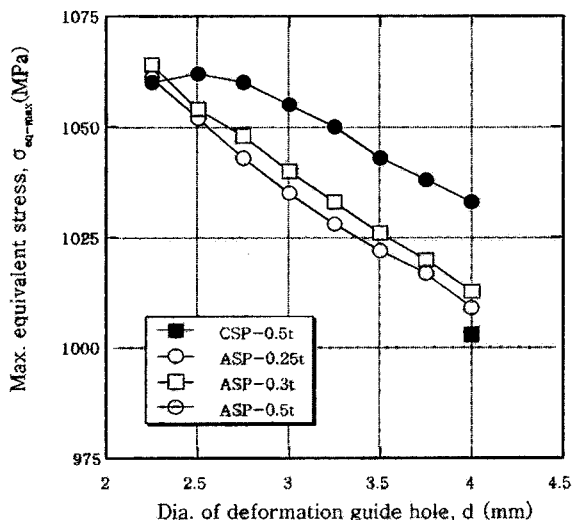


Fig. 4 Max. equivalent stress according to diameter of deformation guide hole in SP test

3.2 SP 하중-변위 거동에 대한 시험편 두께의 영향

Fig. 5는 F.L+CGHAZ와 B.M 조직에 대하여 두께가 0.5mm인 표준형시험편을 적용한 CSP 시험결과와 두께가 0.3, 0.5mm인 시험편을 적용한 ASP 시험결과를 비교한 그림이다. 여기서 ASP 시험지그 하부다이의 DGH 직경은 3mm이다.

두 시험법에서 하중-변위 곡선은 두께에 관계없이 용접열사이클에 의해 소입경화되어 경도가 높은 F.L+

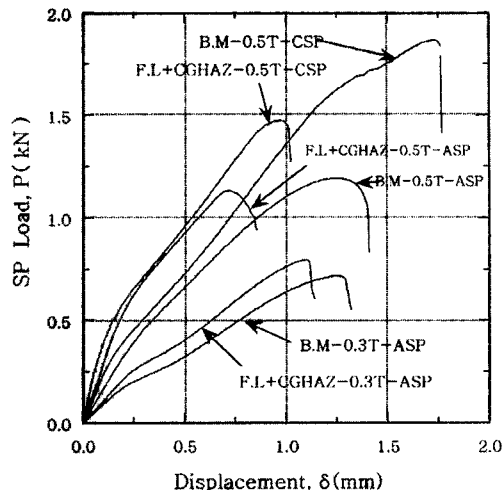


Fig. 5 A comparison of load-displacement curve according to specimen thickness at RT

CGHAZ의 곡선이 경도가 더 낮은 B.M의 곡선보다 상부에 위치하고 있어 경도증가로 인한 재료의 취화 경향을 잘 나타내고 있다.

먼저 CSP 시험의 경우, F.L+CGHAZ와 B.M 조직에 대한 파괴강도의 차이를 잘 나타내고 있다. 즉, 취약한 F.L+CGHAZ의 경우 최대하중 부근에서 발생된 미소균열이 성장된 후 하중의 급감과 함께 곧바로 시험편 두께가 판통되는 취성적 파괴거동을 보이고 있다. 그러나 상대적으로 연성이 양호한 B.M의 경우에는 SP 시험편의 4개 변형영역 중에서 최대하중 바로 이전의 소성막신장영역(plastic membrane stretching regime)⁷⁾에서 강구와 시험편사이의 접촉면적이 커지고 그로인해 하중지지력(load bearing capacity)이 증가되어 그 만큼의 막응력(membrane stress) 증가를 위해 하중이 증가하고 있다. 이후 최대하중 부근에서 미소균열의 발생과 함께 하중이 서서히 감소하고 균열이 성장된 후 파괴되는 연성적 파괴거동을 보이게 된다.

한편, ASP 시험에서 0.3mm 두께의 시험편은 미세 조직에 따라 강도와 변위 상에 큰 차이가 없는 반면, 0.5mm 두께를 적용한 경우에는 최대하중의 차이는 적으나 변위는 CSP 시험에서와 유사하게 시험대상 조직에 따른 차이를 잘 나타내고 있다. 이같은 이유는 0.5mm ASP 시험편의 경우에 강구의 직경이 CSP 시험에서 보다 훨씬 작기 때문에 소성변형에 대한 구속효과나 국부적 응력집중 정도가 더 크게 될 것이다. 따라서 소성막신장영역에서 막응력의 초과를 위한 하중증가의 요구가 CSP 시험편에서 보다는 덜 한 것으로 사료된다.

SP 시험의 경우, 매우 높은 국부적 집중응력의 영향을 받는 부하강구 바로 아래의 실제적 변형영역에서,

시험편의 두께가 얇아질수록 국부적 응력장(local stress field)의 영향을 받는 단위두께당 결정립수는 두께감소에 비례하여 동일한 비율로 감소되므로 재료의 파괴거동은 야금학적 인자에 의한 영향을 그만큼 덜 받게 된다. 또한 SP 시험용 펀치 선단(혹은 강구)의 크기가 감소될수록 부하영역에서의 국부 응력의 구배 (gradient)가 매우 급해지며, 재료의 파괴거동을 정성적으로 평가하는 것이 더욱 어렵게 된다³⁾. 따라서 Fig. 5에서 0.3mm 시험편의 ASP 시험결과는 두 조직의 야금학적 차이에도 불구하고 큰 차이가 없는 것으로 사료된다.

이와 함께 시험편두께 방향으로의 단면적이 적을수록 조직상의 비균질적인 용접부에 적용 시 시험결과의 분산을 초래할 수 있음을 고려하고, 아울러 시험편의 원활한 bulging 변형을 위해서는 0.5mm 두께의 시험편을 적용한 3mm의 DGH 직경의 ASP 시험지그의 사용이 추천된다.

3.3 용접부 조직에 따른 SP 파괴특성

Fig. 6은 HAZ부의 각 조직과 B.M, W.M 조직을 대상으로 상온에서 얻어진 하중-변위 곡선으로부터 계산된 E_{SP} 를 ASP와 CSP 시험에 대하여 비교한 그림이다. E_{SP} 는 SP 시험에서 재료의 부하능력과 파괴특성을 대변하는 중요한 물리량이다.

조직이 치밀한 FGHAZ 조직이 가장 큰 E_{SP} 값을 보인 반면, 용융응고조직인 W.M과 입자가 조대한 F.L+CGHAZ 조직은 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 전반적으로 강구와 DGH의 직경이 더 작은 ASP 시험에서의 E_{SP} 값들이 CSP 시험에서보다 훨씬 낮은 영역에 위치하고 있음에도 불구하고 CSP 시험과 동일하게 HAZ

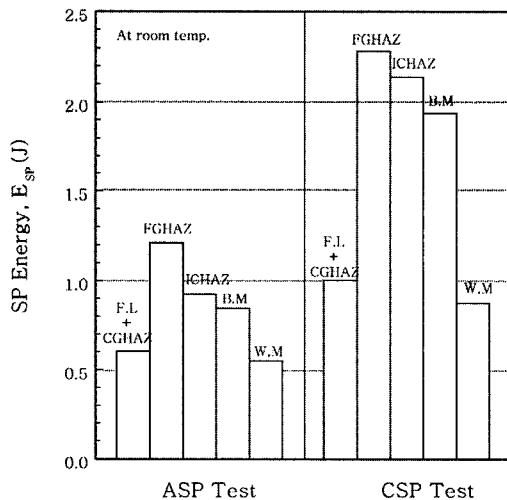


Fig. 6 A comparison of ESP from various microstructures at room temp. in SP test

부 조직들에 대한 의존성을 잘 나타내고 있다.

용접부의 미세조직 중 인성의 열화가 가장 현저한 곳으로 알려진 F.L+CGHAZ 조직에 대하여 -196°C ~ 상온의 다양한 온도에서 ASP 시험을 통해 얻어진 하중-변위 거동을 Fig. 7에 나타내었다. 시험온도의 감소에 따른 항복강도의 증가효과로 인하여 저온부에서 하중-변위 곡선이 고하중측으로 이동하고 있음을 볼 수 있다⁹⁾. 또한 -160°C 이하의 저온부에서는 최대하중 이후 급격한 하중감소를 보이는 취성적 거동과, -120°C 이상에서 온도가 증가할수록 최대하중 이후에 하중이 서서히 감소하는 연성적 파괴거동을 보이고 있다.

HAZ 조직들과 B.M, W.M 조직을 대상으로 구한 E_{SP} 값을 시험온도에 따라 Fig. 8에 나타내었다. 미세조직에 따라 E_{SP} 의 천이거동은 뚜렷한 차이를 보이고 있으며, 모든 조직에서 온도에 따른 E_{SP} 의 상·하부값이 명확히 나타나므로써 ASP 시험에서도 E_{SP} 의 온도 의존성을 확인 할 수 있다.

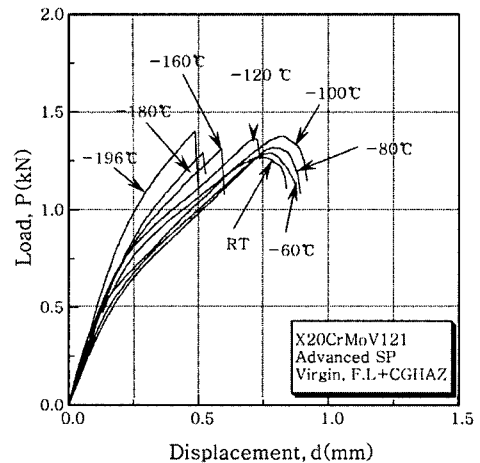


Fig. 7 The load-displacement curves obtained from F.L+CGHAZ at various temp. in ASP test

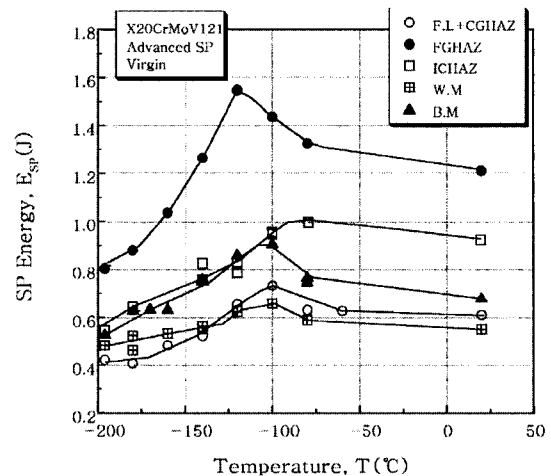


Fig. 8 SP energy transition behavior for various microstructures in ASP test

이러한 E_{SP} 의 천이거동을 확인하기 위하여 SEM을 통해 관찰된 F.L+CGHAZ 조직의 거시적, 미시적 파면을 Fig. 9에 도시하였다. 모든 온도조건에서 균열은 시험편 중앙의 반구(半球)정점에서 다소 떨어진 부위에서 개시, 전파되고 있으며, 이는 유한요소해석에서 얻어진 최대응력의 발생지점과 일치한다. -196°C 의 저온에서는 강구에 의한 압입부에서 소성변형이 거의 없으며 생성된 균열이 반경방향으로 곧바로 전파하는 취성파괴 거동을 보이고 있다. 그러나 시험온도의 증가에 따라 반구형 압입부에서는 소성변형의 증가와 함께 다수의 균열이 원주방향으로 전파, 파단되는 연성적 파괴거동을 보이고 있다. 미시파면을 살펴보면, -80°C 에서 연성적인 입내 딩플(dimple)파면을 보이나, -160°C 에서는 입내 의벽개와 약간의 딩플이 혼재된 양상을 보이고 있으며, -196°C 에서는 전형적인 취성파면인 입내 벽개파면과 의벽개 및 입계파괴의 혼재양상을 나타내고 있다. 이는 종래의 CSP 시험에서와 동일한 온도 범위에서 연-취성 천이가 발생함을 의미하는 것이라 할 수 있다. 이상의 SP 시험결과로부터 얻은 각 미세조직에 대한 DBTT값을 Table 5에 비교, 수록하였다. SP 시험을 통해 평가되는 DBTT는 재료의 파괴인성과 관련된 특성값으로서 CVN 충격시험에서 얻어진 FATT (fracture appearance transition temp.)와의 상관성이 인정되고 있다^{3,8)}. 두 SP 시험법에서 모두 F.L+CGHAZ의 DBTT값이 B.M보다 고온측에 위치하고 있다. ASP 시험에서는 상온에서 우수한 파괴강도를 보인 FGHAZ 조직의 DBTT 값이 -147°C 로서 가장 인성이 우수함

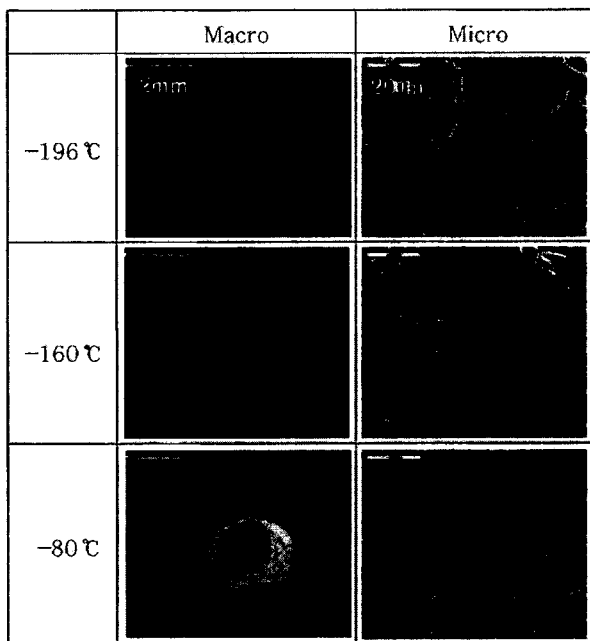


Fig. 9 SEM fractographs of F.L+CGHAZ in weldment tested by ASP

Table 5 A comparison of DBTT with various microstructures in ASP & CSP test

Test method	Structures	DBTT(°C)	Remarks
CSP	B.M	-128	0
	F.L+CGHAZ	-115	+13
ASP	B.M	-142	0
	F.L+CGHAZ	-130	+12
	FGHAZ	-147	-5
	ICHAZ	-132	+10
	W.M	-133	+9

을 알 수 있다. 그러나 HAZ 조직들 중 조대한 결정립의 F.L+CGHAZ와 용융응고조직의 취약성으로 인하여 상온에서 낮은 E_{SP} 값을 보인 W.M, 연화층이 존재하는 ICHAZ 조직은 B.M보다 높은 DBTT 값을 보여 상대적인 인성의 저하를 엿볼 수 있다. 미세조직적 측면에서 볼 때, W.M의 경우에는 다층용접 시 선·후행 패스의 용착부 경계부에서 뜨임(tempering)효과로 국부적 미세화로 인한 조직 불균일, ICHAZ의 경우에는 마르텐사이트와 국부적인 오스테나이트의 부분적 변태와 FGHAZ와의 경계부에서의 조직 구성 상의 불균일로 인한 결과로 사료된다. 이상의 시험결과는 weld toe 부근에서 이웃하여 연속, 배열된 HAZ 조직들에 대해 뚜렷한 천이거동 상의 차이를 보여 ASP 시험기법의 우수성을 잘 나타내고 있다. 여기서 비교란의 값들은 각 시험법에서 B.M과 대비한 Δ DBTT값들이다.

3.4 F.L+CGHAZ 조직의 파단위치

총 54개의 F.L+CGHAZ 시험편을 대상으로 분석된 SP 시험 후 위치에 따른 파단비율을 Table 6에 수록하였다. 여기서 시험편의 파단위치(방향)를 나타내는 ①~⑤의 번호들을 Fig. 1에 같이 표기하였다. ASP 시험에서는 ①, ②번 방향으로 F.L부에 인접한 CGHAZ

Table 6 Fracture ratio according to failure location in ASP and CSP test specimen (%)

Failure location	ASP	CSP	Remarks
①	13.3	14.3	13.8
②	33.3	42.9	37.9
③	33.3	7.1	20.7
④	13.3	10.7	12.1
⑤	6.6	25.0	15.5

조직과, 상반된 ③, ④번 방향의 CGHAZ 조직에서도 거의 동일한 비율로 파단이 일어났음을 볼 수 있다. 반면에 CSP 시험에서는 강구의 상대적인 크기 증가로 인하여 주로 ①, ②, ⑤번 방향의 F.L부에서 대부분의 파단이 발생하였다. 이같은 시험결과로부터 ASP 시험에서는 강구의 직경이 CGHAZ부의 폭보다 훨씬 작기 때문에 F.L부 이외에도 고유한 CGHAZ 영역내의 다양한 방향으로 파단이 고루 발생하였다고 생각된다.

따라서 ASP 시험은 CSP 시험보다 미세조직의 파괴 특성을 보다 정도 있게 평가 가능할 것으로 기대한다. 한편 Table 6에서 비교란은 전체 시험편수에 대비한 위치별 파단비율을 의미하며, 전체적으로는 상단의 F.L부에서 가장 많은 비율로 파단이 일어났음을 알 수 있다.

본 연구를 통해 선행된 X20CrMoV121강 용접부의 미세조직들 이외에 타 강종에 대해서도 ASP 시험법의 적용을 위한 연구가 현재 진행되고 있으며, 다양한 조직이 혼재되어있는 용접부에 적용 시 본 ASP 시험법의 유용성이 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 내열강인 X20CrMoV121강을 대상으로 Advanced Small Punch(ASP) 시험을 도입하여 강용접부의 다양한 미세조직들에 대한 파괴강도와 인성의 평가 시 그 적용가능성을 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유한요소해석에서 DGH의 직경이 감소할수록, 또는 시험편 두께가 증가할수록 SP 시험편에 발생하는 최대등가응력, σ_{eq-max} 은 증가하였다.

2) ASP 시험에서 0.3mm 두께에 비하여 0.5mm 두께의 시험편에서 시험대상 조직에 따른 파괴강도와 변형거동의 뚜렷한 차이가 나타났다.

3) ASP 시험을 통해 재료의 파괴 전과정 중에 흡수된 에너지, E_{SP} 가 용접부의 각 미세조직에 대하여 평가되었다. FGHAZ는 가장 높은 E_{SP} 를, F.L+CGHAZ와 WM은 B.M보다도 작은 E_{SP} 를 보여 HAZ의 조직변화에 따른 뚜렷한 의존성을 보였다.

4) ASP 시험을 통해 용접조직별 DBTT의 평가가 가능하였다. FGHAZ에 비하여 F.L+CGHAZ와 WM, ICHAZ의 DBTT값은 B.M보다 고온측에 위치하여 상대적으로 인성의 저하를 확인하였다.

5) E_{SP} 및 DBTT의 천이거동과 시험편의 파단위치 등을 고려할 때 ASP 시험은 용접부의 미세조직에 대해 보다 고유하고 신뢰성 있는 특성 평가가 가능할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 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
2. R. Viswanathan : Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components, *ASM International Metals Park*, (1993), 206-208
3. J. M. Baik, J. Kameda and O. Buck : Development of Small Punch Tests for Ductile-Brittle Transition Temperature Measurement of Temper Embrittled Ni-Cr Steels, *ASTM STP 888*, (1986), 92-111
4. 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)
5. H. S. Yu, B. G. Ahn, D. Y. Lyu and S. H. Chung : A Study on Fracture Toughness of Welded Joint and Orientation in TMCP Steel by the SP Test, *Journal of KWS*, 16-6, (1998), 35-43 (in Korean)
6. F. M. Haggag, T. S. Byun, J. H. Hong, P. Q. Miraglia and K L. Murty : Indentation-Energy-To-Fracture(IEF) Parameter for Characterization of DBTT in Carbon Steels Using Nondestructive Automated Ball Indentation(ABI) Technique, *Scripta Materialia*, 38-4, (1998), 645-651
7. JAERI-memo 62-193 : Small Punch Test Method, Japan Atomic Energy Research Institute, (1987)
8. J. H. Bullock and A. S. Fairman : BALTICA III, International Conference Plant Condition and Life Management, Vol. 1, June, (1995), 179-186
9. R. W. Hertzberg : *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, Wiley, 243