

극한조건하 강구조 부재 이음부의 파괴거동해석

A Fracture Behavior of Connections of Structural Steel Members under Low Temperature

김 두 환* · 한 석 규* · 안 세 회*
 D.H. Kim · S.K. Han · S.H. Ahn
 (1998년 4월 6일 접수, 1998년 10월 27일 채택)

ABSTRACT

Welding structures will be occurred sudden crack or failure by reduced fracture toughness in case of low temperature. To protect these unstable fracture is very important. Because fracture of welding part come from welding faults or residual stress, critical stress intensity factors are acquired at temperatures between 22°C and -70°C from base metal, welding metal and H.A.Z.

It was studied effectiveness of annealing and affection of residual stress under low temperatures. In case of fracture toughness test, it showed that fracture toughness value decreased, according to the decrease of temperature. Expecially In case that compressive residual stress was existed, K_{IC} increased.

1. 서 론

저온 영역에서 사용되는 구조물의 경우 단순히 저탄소강을 사용하므로 이에 대한 안전대책으로 피로균열에 의한 불안정파괴를 방지하는 것이 대단히 중요하며 용접부의 파괴는 대부분 취성파괴로 용접부의 결함내지는 잔류응력에 의해 발생한다. 이러한 과정에서 파괴역학을 이용하여 극한조건하에서의 안전설계가 요구되어진

다.

Masubuchi¹⁾ 등은 실험을 통하여 용접부의 완전한 파괴는 예민한 Notch와 높은 인장잔류응력이 존재하고 파괴인성이 낮은 재료를 사용할 때 낮은 작용 하중에 의해서 발생하며 특히 저온에서 잔류응력의 파괴강도에 미치는 영향은 크다고 보고했다. 이에 따라 저온영역에서 용접 이음부재의 구조용접상세에 대한 피로특성을 규명하고 구조용 강재의 용접과정에서의 국부적인

* 서울산업대학교 구조공학과

가열로 인한 재질의 변형, 뒤틀림, 잔류응력 및 용접결합 등으로 부재강도의 적절한 설계가 시급한 문제이다.

따라서 본 연구에서는 저온상태의 용접 강구조물의 파괴인성치 변화와 잔류응력이 파괴인성치에 미치는 영향 등을 연구하고 잔류응력을 제거하는 열처리(Annealing)의 효과를 검토하였다.

한편 모재, 용접재 및 열처리한 용접재로부터 조밀단면(Compact Tension) 형태의 시편을 가공하여 각 온도에서의 파괴인성치 K_{Ic} 를 구하여 서로 비교함으로써 잔류응력이 저온하에서 용접부의 파괴거동에 미치는 영향을 연구하였다.

또한, 용접부에 대하여 파괴역학적으로 해석하려는 연구는 활발하였으나²⁾ 저온하에서 용접 잔류응력이 파괴거동에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 미흡한 상태이다. 앞으로의 개발 과업인 한랭지역에 건설될 용접 강구조물의 설계 및 시공시의 피로설계기준 개발이 시급한 실정³⁾이므로 기본자료를 제공할 목적으로 본 연구를 수행하였다.

2. 실험개요

2.1 실험재료

본 실험에 사용한 재료는 판두께 12mm의 SWS 50 구조강으로 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같다. 우선 시험편을 제작하기 위하여 420×120mm의 판재를 Fig. 1과 같이 압연방향과 평행하게 구속시키고 잠입(Submerged) 용접을 하였다. 이때 사용한 용접봉의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 3과 Table 4, 용접조건은 Table 5와 같다. 시험편들은 ASTM규격에 맞추었으며 용접부를 모재, 열영향부, 용착부로 구분하여 각 부위의 기계적 성질을 알아보기 위하여 시편을 각 부위에서 채취하였으며, 열처리에 따른 기계적 성질을 알아보기 위하여 열영향부와 용착부를 650℃에서 풀림(Annealing)을 30분정도 아르곤 가스상태로 놓아 두었다. 조밀인장(Compact Tension) 시험편은 Fig. 2와 같이 용접선과 직각으로 마주치는 곳에 균열선단(Crack Tip)이 오게 제작하였고, 인장시편은 용착부 열영향부 모재의 기계적 성

질을 알아보기 위하여 용접선과 평행하게 가공하였다. 용착금속부, 열영향부, 모재부 등의 미세구조는 Photo 1과 같다.

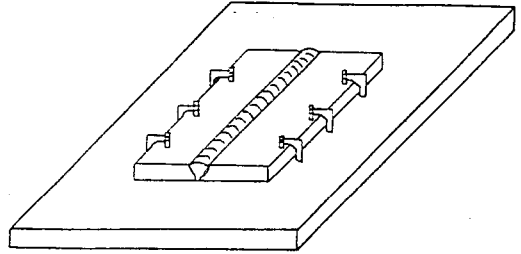


Fig. 1 The procedure of welding by restraining jigs

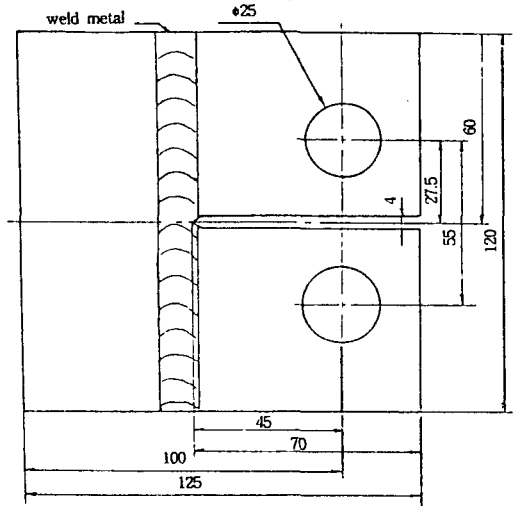


Fig. 2 Compact tension specimen (mm)

Table 1 Chemical composition of the base metal (%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SWS 50	1.4	0.35	0.13	0.015	0.007

Table 2 Mechanical properties of the base metal

Material	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Impact Value (ft-lb)
SWS 50	384.1	527.2	18%	51%	117.2

Table 3 Chemical composition of the welding wire (%)

C	Mn	Si	P	S
0.06	0.86	0.58	0.02	0.01

Table 4 Mechanical properties of the welding wire

Tensile strength (MPa)	Yielding point (MPa)	Elongation (%)	Impact Value (ft-lb)
369	512	32	142

Table 5 Welding condition

Diameter (mm)	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Root (mm)	Speed (cm/Min)
3.8	2	480-550 (1st pass) 400-450 (2nd)	40	3.8	180

2.2 실험방법

2.2.1 재료강도시험

용접부의 잔류응력측정은 여러 가지 방법이 있으나, 그 중 재료에 Drilling을 하여 주밍주위의 변형률을 측정함으로써 잔류응력을 결정하는 응력이완법의 하나인 Mathar³⁾의 Hole-Drilling 법을 채택하였다.

저온에서 시험을 하기 위하여 Instron사의 Model 320의 저온용 Chamber를 사용하였으며 인장시험시 대부분의 조건은 ASTM A370에 따랐다. 또한 저온용 Chamber의 크기를 고려하여 ASTM 규격에 비례하여 축소된 시편을 사용하였다.

먼저 시편을 정착시키고 액체질소를 사용하여, 온도 변화를 최소화시키기 위하여 원하는 온도로 약 5분 정도 유지시킨 후 Instron사의 Model 1325 만능시험기를 사용하여 인장시험을 하였다. 온도구간은 22°C, -3°C, -40°C, -70°C로 구분하여 시험을 하였다.

또한, 각 온도별 충격에너지를 구하기 위하여 Charpy V notch 충격시험을 하였다. 시험편을 드라이 아이스와 아세톤을 사용하여 원하는 온도로 냉각, 10분정도 유지시켜 온도변화를 최소화한 후 5초 이내에 시편을 시험기에 장착함과 동시에 충격을 가하여 실험을 하였다.

2.2.2 파괴인성시험

시험기의 용량과 저온용 Chamber의 크기를 고려할 때, 본 연구에서는 K_{IC} 를 측정하기가 불

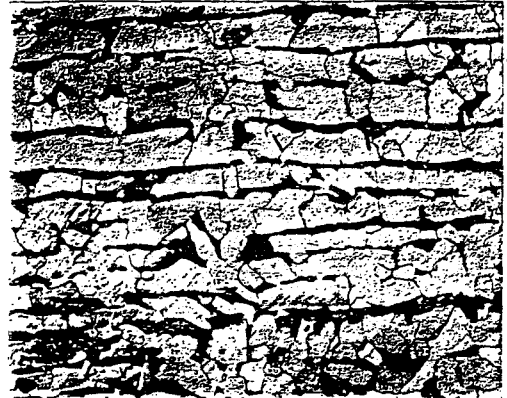
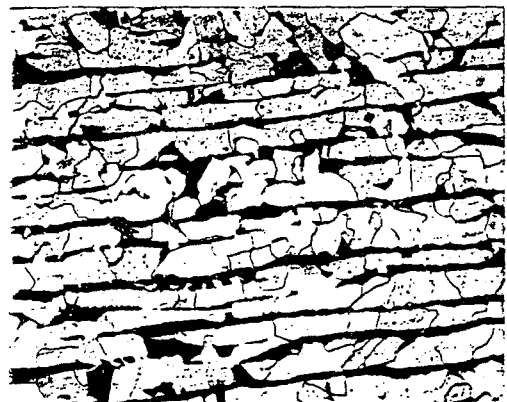
(a) Welding metal zone ($\times 400$)(b) H.A.Z (heat affected zone ($\times 400$))(c) Base metal ($\times 400$)

Photo 1 Illustration of microstructure of submerged self-den specimen

가능하므로 두께 12mm 판의 SWS 50의 저온에서의 K값을 구하고 a, B, W에 관한 시편의 크기 조건을 측정 후 K_C 혹은 K_{IC} 를 결정할 것이다. ASTM E399-78에 기술한 방법에 의하여 실험이 이루어졌다. 우선 K_{IC} 해석⁴⁾에서 가정한 Notch 끝의 반경이 거의 0인 상태와 근접하게 하기 위하여 기계로 가공된 Notch에 피로파괴를 이용하여 예비균열(Precrack)을 3mm 정도 만들었다. 마지막 피로횟수 중의 소성영역이 실제 K_C 실험중에 생기는 크기보다 작게 제작하기 위하여 $K_{fmax}/E \leq \sqrt{0002}$ 를 만족하면서 예비균열을 가공하였다.

실제로 피로 예비균열을 가공시의 소성영역 크기를 통제하는 것은 K_C 를 저온에서 실험할 경우에 매우 중요하다. 변위계이치를 시편에 장착한 후에 하중재하속도를 1 MPa \sqrt{m} /sec로 하였다.

2.2.3 파면관찰

재료의 파단면 관찰은 파괴의 진행상황을 밝히는 귀중한 도구가 된다. 그러므로 파괴된 시편의 파면을 관찰함으로써 파괴의 진행과정에 있어서의 온도의 영향을 밝힐 수 있으며 이미 수치화 된 기계적 성질에 관한 자료를 고찰하는데 증거가 된다.

본 실험에서는 저온에서의 인장, 충격, 파괴인성 실험 후 파괴된 시편을 진공조에 보관하여 파면이 공기 중에서 부식되어 주사형 현미경(SEM) 관찰시 원래의 파면을 볼 수 없는 경우를 방지하였다. 파면관찰에 사용된 SEM은 HITACHI S-500을 사용하였으며 배율은 $\times 200 \sim \times 5000$ 까지 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부의 기계적 성질

용접한 판재에서 채취한 조밀인장 시편의 잔류응력을 측정한 결과 용접선 부근에서 약 280 MPa정도의 인장잔류응력이 존재하고 용접선에서 30mm정도 떨어진 곳에서 0의 잔류응력이, 그리고 끝단에서 거의 120 MPa정도의 압축잔류응력이 존재하였다.

또한 Fig. 3에서와 같이 충격치는 일반적으로 용접부위의 열처리에 관계없이 온도가 감소함에 따라 저하함을 볼 수 있다. 각 온도에 따라 충격치를 비교할 때 충격치는 22°C에서 열처리한 열영향부가 가장 컸으며 용착부가 가장 작았다. -3°C에서는 열처리한 용착부와 열처리하지 않은 용착부가 -40°C에서는 모재와 열처리한 용착부가 그리고 -70°C에서는 열처리한 열영향부와 용착부가 각각 최고 및 최저의 충격치를 나타냈다.

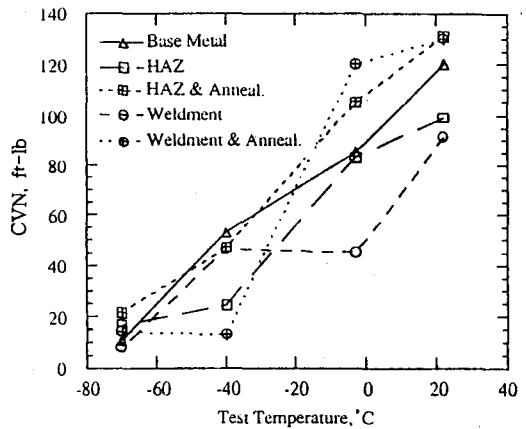


Fig. 3 Charpy impact values of welding joints at different temperatures

또한 최대인장강도는 온도가 저하하면서 Fig. 4, 5에서와 같이 일반적으로 증가함을 보였으나 온도에 따른 연신률의 결과는 Fig. 6에서와 같이 용접부는 온도가 저하함에 따라 연신률이 감소하는 경향을 보였으나 나머지 다른 부위는 증가하는 양상을 나타냈다.

22°C에서 항복응력은 열처리한 용착부가 최대치, 열처리한 열영향부가 최소치를, 최대인장강도는 용착부가 최대치, 열처리한 열영향부가 최소치, 연신율은 열영향부가 최대치, 모재부가 최소치를 그리고 단면수축률은 모재부가 최대치, 용착부가 최소치를 나타냈다. 그러나 -70°C에서 항복응력은 용착부가 최대치, 열영향부가 최소치를, 최대인장강도는 용착부가 최대치, 열처리한 열영향부가 최소치를, 연신율은 열처리한 열영향부가 최대치, 용착부가 최소치를 그리

고 단면수축율은 모재부가 최대치, 용착부가 최소치를 나타냈다.

3.2 파괴인성시험

파괴인성시험에서 구한 K_Q 를 조건 B, $a \geq 2.5(K_Q/\sigma_{ys})^2$ 를 이용하여 K_{IC} , 혹은 두께 12 mm SWS 50 판재의 K_C 인지를 조사하여 본 실험에서 얻은 모든 K_Q 들이 K_C 에 해당됨을 확인하였다.

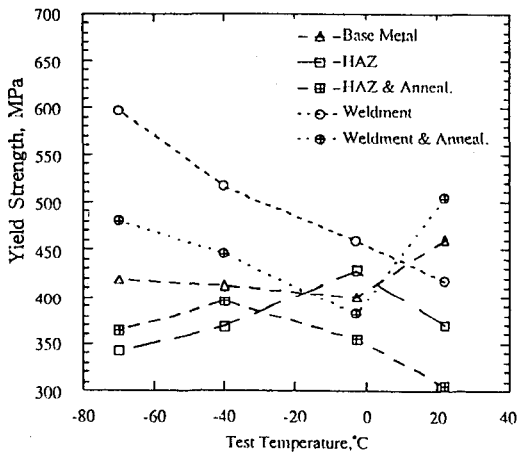


Fig. 4 Yield strength of welding joints at different temperatures

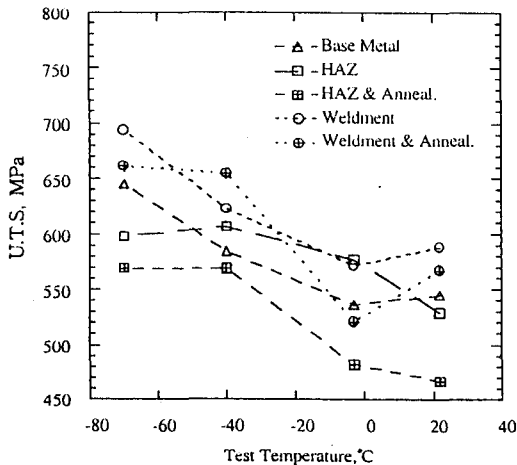


Fig. 5 U.T.S. of welding joints at different temperatures

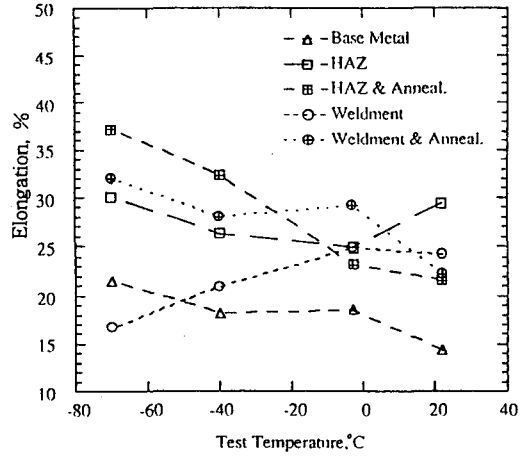


Fig. 6 Elongations of welding joints at different temperatures

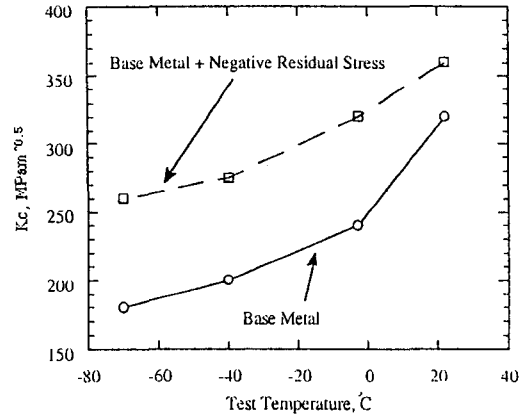


Fig. 7 Critical stress intensity factors of base metal with negative residual stress at different temperature

Fig. 7에서와 같이 모재의 K_C 는 온도가 저하하면서 감소함을 알 수 있다. 그러나 압축잔류응력을 내포한 모재의 경우 일반 모재와 비교하여 온도가 저하함에 따라 좀 더 완만하게 감소하며 -40°C 의 경우 일반 모재보다 $75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 정도 더 큰 값을 알 수 있다. 두 시편의 재질이 동일한 것으로 가정하면 그 차이는 압축잔류응력의 영향이라고 볼 수 있다. 즉, 조밀인장 시편에 인장하중이 가해질 때 시편에 존재하는 압축잔류응력이 인장응력을 그만큼 상쇄시키므로 시편이

좀 더 높은 하중에 견딜 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 만일 균열선단이 인장잔류응력의 범위에 있다면, 그 재료 본래의 K_{IC} 에서 보다도 작은 K_{IC} 에서 파괴될 수 있으므로, 특히 균열이 보통 용접선 부근에 용접결함에 의하여 존재하므로 용접선 주변의 인장잔류응력은 파괴역학적 측면에서 중요하다고 사료된다. Fig. 8은 파괴인성치 K_{IC} 와 충격시험에서 구한 CVN(Charpy V notch impact value)을 비교한 것이다. 물론 두 수치들간의 단위는 다르지만 물리적량의 개념은 동일하므로 비교를 하였다. 두 CVN, K_{IC} 간에 기울기는 다르지만 온도가 저하하면서 서로 저하하는 비슷한 양상을 보였다.

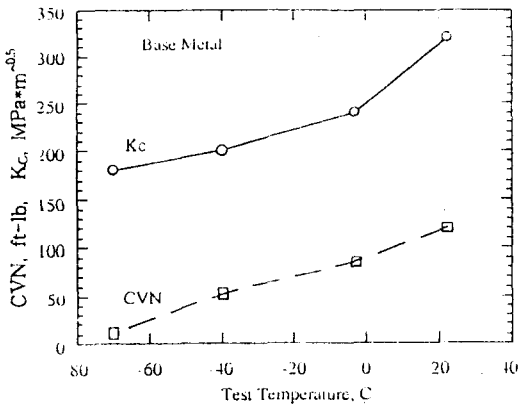


Fig. 8 Critical stress intensity factors and CVN of base metal at different temperature

3.3 파면해석(Fractography)

용착부, 열영향부와 모재부의 파괴근원 및 파괴진행과정에 있어서 온도의 영향을 조사하기 위하여 주사형 전자현미경(SEM)을 이용하여 22°C와 -70°C에서 인장과 충격시험 후 파괴된 시험편의 파면을 관찰, 비교하였다.

22°C의 충격시험편 파면들의 경우 Photo 2(모재), Photo 3(열영향부)는 취성파괴의 대표적인 벽개파괴면(Cleavage facet)과 연성파괴의 경우에서 볼 수 있는 많은 Dimple들을 함께 볼 수 있다. 즉 Mixed Mode이다. 그러나 Photo 4(용착부)는 많은 Dimple로 이루어져 있으며 Dimple들 안에 구형상의 개재물(Inclusions)들을 볼 수

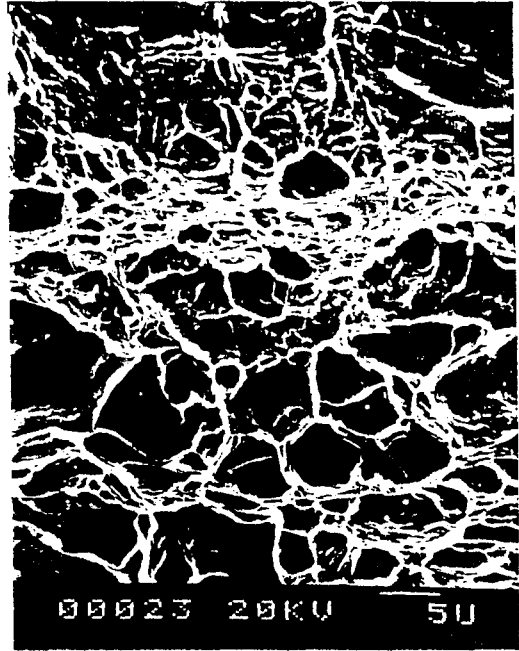


Photo 2 Fracture surfaces of base metal impact specimens at 22°C



Photo 3 Fracture surfaces of H.A.Z impact specimens at 22°C

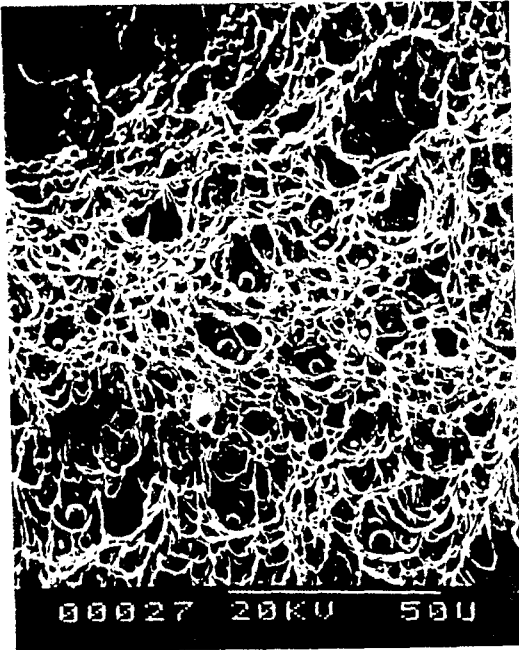


Photo 4 Fracture surfaces of weldment impact specimens at 22°C



Photo 6 Fracture surfaces of H.A.Z tensile specimens at -70°C



Photo 5 Fracture surfaces of base metal tensile specimens at -70°C

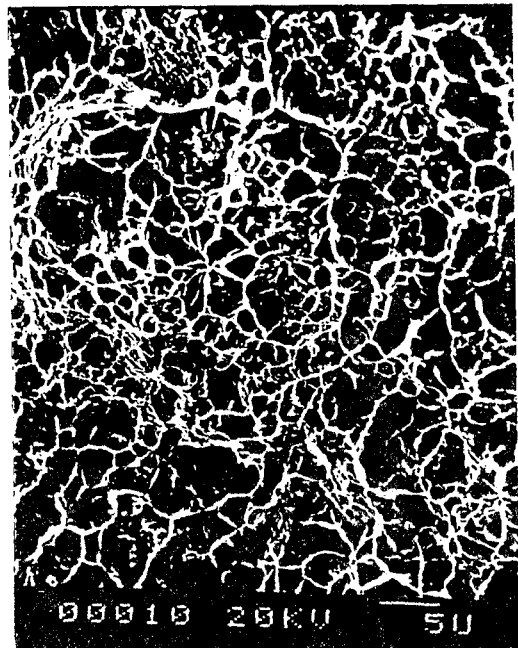


Photo 7 Fracture surfaces of weldment tensile specimens at -70°C

있다. 즉 개재물들에 의하여 연성파괴가 일어났다고 볼 수 있다.

한편 22°C에서의 충격시험 자료를 보면 모재부, 열영향부, 용착부 순으로 충격치가 크다. 즉 모재부, 열영향부가 용착부보다 충격치가 크나, 파면상으로 보면 모재부와 열영향부는 취성과 연성의 혼합형태, 용착부는 완전연성형태이다. 그러므로 용착부가 완전연성형태의 파면이나 재료의 조직상 다른 두 재료와 서로 상이하기 때문에 직접적으로 충격치와 비교평가할 수 없다. 다만 모재부와 열영향부를 비교하면 모재가 좀 더 많은 Dimple들을 보여주고 있어 모재부가 열영향부보다 충격치가 크다는 기계적 성질자료를 증명해주고 있다.

한편 -70°C의 경우 모재부, 열영향부와 용착부 모두 Cleavage Facet이나 River 형태의 파면으로 이루어져 전형적인 취성파괴를 나타내고 있다. 즉 22°C에 비해 취성파괴경향이 확연해지므로 22°C에 비하여 -70°C에서 모재부, 열영향부와 용착부 모두 충격치가 저하했다는 실험자료와 일치함을 보여주고 있다. 22°C의 인장시험편의 파면의 경우 모재부, 열영향부와 용착부 모두 많은 Dimple들을 볼 수 있다. 특히 모재부와 열영향부를 비교해서 열영향부가 좀 더 많고 작은 Dimple들로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그리고 -70°C의 인장시험편의 경우 모재와 열영향부의 경우 Cleavage Facet와 Dimple로 이루어져 있으며 22°C의 경우들과 비교하여 Dimple들의 숫자가 적음을 알 수 있다. 즉 22°C의 경우보다 좀 더 취성의 형태를 띄고 있음을 알 수 있다. 그리고 파단면들이 띠(Band) 형태로 이루어져 있음을 알 수 있다. Photo 1의 모재부와 열영향부의 미세조직을 살펴보면 Grain의 폭이 약 20 μm 정도임을 알 수 있다. 다시 말해 그 파단면 띠들이 Grain의 방향들과 연관성을 가지고 있을 것으로 추측된다. 그러나 용접부의 경우 많은 작은 Dimple들로 이루어진 연성파괴형태를 띄고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 SWS 50 강재의 모재부, 열영향부 및 용접부의 저온에서의 파괴거동과 용접부의 잔류응력이 파괴에 미치는 영향 등을 조사하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접부위, 열처리에 관계없이 온도가 저하하면서 충격치가 감소함을 보였다. 그리고 22°C와 -70°C 경우 모두 열처리한 열영향부의 충격치가 가장 컸으며 용착부가 가장 적음을 알 수 있었다.
- 2) 인장시험의 경우 22°C와 -70°C에서 최대인장강도는 일반적으로 용착부가 최대, 열처리한 열영향부가 최소치를 나타내었고 최대인장강도는 온도가 저하하면서 일반적으로 증가함을 보였다.
- 3) 파괴인성시험의 경우 온도가 저하하면서 파괴인성치가 저하함을 보였으며 특히 압축잔류응력이 존재할 경우 K_{IC} 가 증가함을 나타내었다.

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) Koichi Masubuchi, "Analysis of welded Structures", Massachusetts Institute of Technology, Pergamon Press, pp.114~130, 1980.
- 2) J.D. Harrison, "Further Techniques for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints", British Welding Journal Vol.13, No. 11, pp. 530~533, 1963.
- 3) J. Mathar, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformations around Drilled Holes", Trans. ASME, Vol. 56, pp. 249~254, 1934.
- 4) A.K. Shoemaker and S.T. Rolfe. "Static and Dynamic Low-Temperature K_{IC} Behavior of Steels", ASME Trans, pp. 261~287, september, 1969.