

계장화 압입시험기를 이용한 EH36 후판 용접재의 저온특성 평가

Evaluation of Low Temperature Properties in EH36 Thick Steel Plate Welded Material by Instrumented Indentation Equipment

김귀남* · 이종석* · 현장환** · 정용길*** · 허선철****†

Gwi-Nam Kim*, Jong-Seok*, Jang-Hwan Hyeon**,
Yong-Gil Jung*** and Sun-Chul Huh****†

(접수일 : 2013년 09월 04일, 수정일 : 2014년 07월 24일, 채택확정 : 2014년 07월 24일)

Abstract: In this study, EH36 is thick steel plate, which welded by auto CO₂ gas welding machine, has been applied on offshore field. The specimen was examined by indentation tester and it was measured for fracture toughness at 18°C, 0°C, -20°C and -45°C by low temperature chamber, respectively. The absorbed energy was got on same temperature by Charpy impact tester. The weld surface was observed for watch of changed crystalline structure by optical microscope, and fracture surface of impact test specimen were observed by scanning electron microscope(SEM).

Key Words : Fracture Toughness, Indentation Method, AIS3000, Thick Plate Welded Material

1. 서 론

최근 해양플랜트 분야는 극한의 환경에서도 구조적으로 안전하게 작업을 할 수 있도록 높은 강도의 소재가 요구되고 있다. 따라서 사용하는 소재로는 EH, DH, AH와 같은 고강도 극후판 소재가 주로 사용되고 있다. 이와 같은 소재들은 사용 환경의 특성상 부식 등에 의한 두께 감소나, 용접 및

후열처리 공정에 의해 발생하는 균열, 설비 운용 중의 크리프, 피로와 같은 미세 손상의 축적에 따라 균열의 발생 및 전파, 재질의 열화와 같은 손상을 입게 된다.¹⁾ 그리고 이러한 손상들은 구조물의 수명과 연관되고 해양플랜트의 운용비용에 직접 영향을 미치기 때문에 반드시 고려해야 한다.

이와 같이 선박의 대형화에 따른 고강도 극후판물 사용 및 대입열 용접공정 적용에 따른 용접

**** 허선철(교신저자) : 경상대학교 에너지기계공학과

E-mail : schuh@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9111

*김귀남, 이종석 : 경상대학교 대학원

**현장환 : 주) 칸

***정용길 : 경상대학교 에너지기계공학과

**** Sunchul Huh(corresponding author) : Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

E-mail : schuh@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9111

*Gwinam Kim, Jongseok Lee : Graduate School of Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

**Janghwan Hyeon : Khan Co., LTD

***Yonggil Jung : Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

이음부 파괴인성저하 및 피로파괴수명 감소로 일부 국외선급(일본선급: NK, 독일선급: GL)에서는 제한 및 관련규정을 강화하여 엄격한 파괴설계기준을 요구하고 있다.²⁾

용접 시 국부적인 가열에 의하여 불균일한 온도분포를 갖게 되어 용접부 및 모재에 열응력이 발생한다. 모재의 온도가 상승하면 항복응력은 저하하고 열응력은 증가하기 때문에 용접시의 열응력은 항복응력을 초과하여 소성변형을 일으키고, 냉각 수축 후, 재료내부에 잔류응력을 생성시킨다.³⁾ 그리고 잔류응력은 용접변형, 저온균열, 피로 파괴, 취성파괴와 여러 가지 영향들을 미치고, 특히 취성 파괴는 균열의 전파형태가 불규칙하고 급속도로 일어나기 때문에 취성파괴에 저항하는 인성인 파괴 인성치를 비교하여 설계에 사용할 수 있다.

다음과 같은 팩터들을 측정하는 방법들은 이미 CTOD(Crack Tip Opening Displacement) 측정법들을 통하여 기존에 측정해 왔다. 하지만 기존 측정법들은 경험적인 평가에 의존하는 단점이 있고, 결과 값의 추정으로 인한 오차가 크게 발생하고 있다. 그리고 KS규정에 부합한 시험편을 별도로 제작해야 할 필요가 있고 시험방법이 복잡하거나 오랜 시간이 걸린다는 단점을 가지고 있다.

계장화 압입 시험법은 별도의 부속품을 이용하여 현장에서 직접 평가가 가능하고, 간단한 압입 시험을 통하여 항복강도, 최대인장강도, 경도, 잔류응력, 파괴인성 값을 구할 수 있다. 그리고 KS B 0950 “금속재료의 계장화 압입시험-압입 인장 물성평가”, KS B 0951 “철강 용접부의 계장화 압입 시험-잔류응력 측정” 등으로 이미 인증된 시험법이다. 또한 시험기 조작이 비교적 간단하여 초보자도 쉽게 사용가능한 장비이며, 1회 압입 시간이 매우 짧기 때문에 수회에 걸쳐 측정을 하더라도 시험 시간이 비교적 짧다는 장점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 해양플랜트의 용접재로 주로 쓰이는 EH36강을 CO₂ Auto welding machine을 이용하여 용접을 실시하고 계장화 압입시험기인 AIS3000를 사용하여 물성치를 측정하였다. 그리고 저온특성을 검토하기 위해 상온(18℃), 0℃,

-20℃, -45℃에서의 모재, 열영향부, 용접부의 파괴인성을 측정하였다. 조선 선급 규격에서 충격시험을 통해 얻어지는 흡수에너지 값을 규정하고 있기 때문에 파괴인성과 같은 온도 조건에서 샤르피 충격시험(Charpy Impact Test)을 통해 흡수에너지 값을 구하였고, 파단 된 시편의 파면을 관찰하여 그 변화를 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 용접재 제작

실험에는 Fig. 1에 나타낸 CO₂ 오토 용접기를 이용하였다. 구성은 CO₂ 가스와 기본 설정을 할 수 있는 Welding unit, 자동 용접기를 이송시키는 Carriage rail, 용접속도와 용입속도를 조절하고 용접기가 설치되어있는 Carrier와 작업이 이루어지는 Workbench로 이루어져 있다.

소재는 조선 분야에서 흔히 사용되는 고강도 용접재인 EH36강 40t를 Fig. 2의 형태로 V-홈 맞대기 용접을 실시하였다. 처음에는 3 mm 간격을 두어 TIG용접을 실시한 후, 70°각도로 다층용접을 실시하였다. 용접 조건은 Table. 1과 같이 최초 TIG용접을 실시한 후 각 비드별로 조건을 적용하였다. 두께 40t 후판을 맞대기 용접을 실시하였기 때문에 양면의 측정 결과가 유사할 것으로 판단하며, 제작된 시편은 워터 젯으로 200x300x20 mm로 채취하여 실험 하였다.

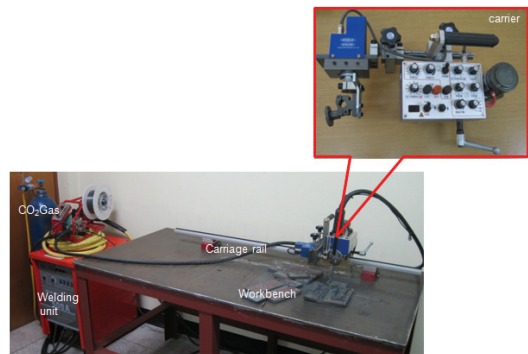


Fig. 1 Photo graph of automatic welding machine

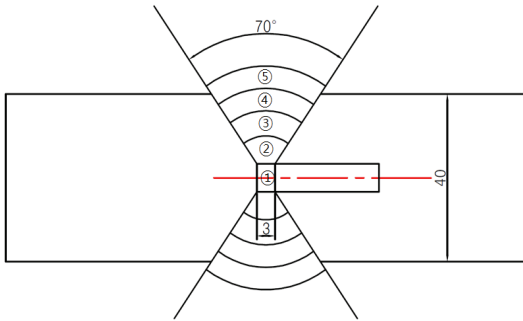


Fig. 2 Cross section of welding part

Table 1 The welding condition of specimen

Welding sequence	Welding machine	Voltage (V)	Current (A)	Welding time(Sec)
1	TIG		160	90
2	CO ₂	25	220	130
3	CO ₂	26	250	135
4	CO ₂	26	250	140
5	CO ₂	26	250	150

2.2 물성치 측정

용접을 하기 전, 후 용접부에서 발생하는 물성치를 측정하기 위하여 계장화 압입 시험기(AIS3000)를 이용하여 모재, 용접부에 압입 시험을 실시하였다. 압입자의 크기가 μm 단위의 작은

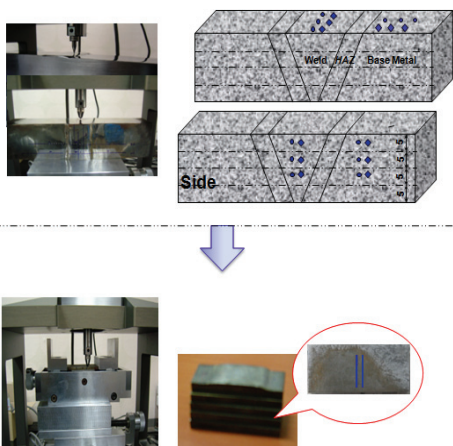


Fig. 3 Experimental process for the material properties

크기이기 때문에 측정 데이터의 정확도를 높이기 위하여 #1000이상의 샌드페이퍼를 이용하여 폴리싱을 실시한 후, Fig. 3에 나타낸 시험순서와 같이 실험을 진행 하였다. 상부와 측면 부를, 비커스 압입자와 스피리컬 압입자를 이용하여 각각 3 mm 간격으로 측정을 실시하였다. 여기서 3 mm의 간격을 두는 이유는 압입자가 압입되면서 Sink-in이나 Pile-up과 같은 소성변형이 발생되는데 압입자의 반경을 고려하여 압입 위치간의 간섭을 피하고자 하였다.

다음으로는 시험편 내부의 잔류응력을 측정하기 위하여 시험편을 5 mm 간격으로 와이어 컷팅을 실시하여 내부의 물성치를 측정하였다.

다음으로 용접 시험편의 조직적인 변화를 관찰하기 위하여 표면에 에칭을 실시 한 후 주사전자현미경을 이용하여 조직 관찰을 실시하였다. 에칭액은 질산(NO₃)과 에틸알코올(C₂H₅OH)을 1:4의 비율로 혼합해서 15분가량을 부식시킨 후 건조시켜 관찰하였다.

2.3 파괴인성 측정

저온 환경에서 파괴인성을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 계장화 압입시험기인 AIS3000에 고/저온 챔버를 연결하였다. 챔버는 고온은 0~650°C 분위기 까지 제어 할 수 있고, 저온은 -160~0°C까

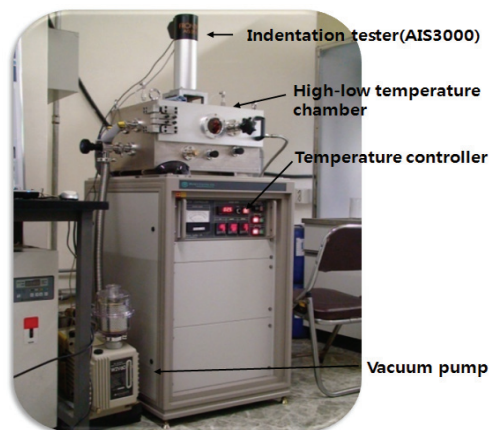


Fig. 4 Image of indentation tester with high-low temperature chamber

지 제어가 가능하다. 실험 진행시 대류로 인한 시험장비 손상을 방지하기 위하여 진공펌프를 이용하여 진공분위기에서 실시하였다. 저온 분위기 조성을 위해 액화 질소를 이용해 온도를 18℃, 0℃, -20℃, -45℃ 환경에서 각각 파괴인성 값 측정을 실시하였다.

실험은 Fig. 5와 같이 용접부, 열영향부, 모재를 각각 구형 압입자와 비커스 압입자를 10mm 간격으로 측정을 하였다.

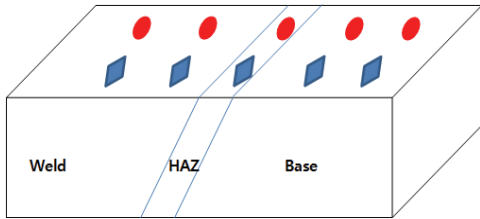


Fig. 5 Schematic diagram of fracture toughness measurement

다음으로 조선 규격에서는 40t 이상 소재에 대하여 흡수에너지를 필수적으로 요구하고 있다. 따라서 용접 시험편을 Fig. 6과 같은 형태로 두께 방향으로 충격시험편을 채취하여 샤르피 충격 시험을 실시하였다. 실험에 사용된 충격시험은 50 Kgf·m 용량으로 최대각도는 -135°로 설정하여 실험을 진행하였다. 그리고 저온환경에서 실험하기 위하여 KS B 0810에 의거하여 각 온도 조건에서 5분 이상 유지시켜 금속 내부까지 충분히 온도가 전달되도록 하였고, 이후 3초 이내로 타격을 가하였다. 실험온도는 앞에 파괴인성 측정온도와 동일하며 각 위치 당 20개의 시험편에 대해서 실험을 하였다.

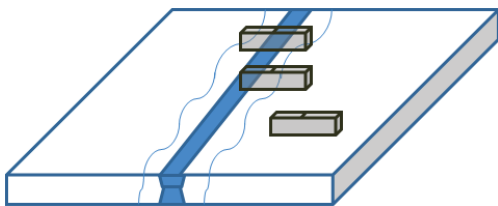


Fig. 6 Position of specimen extraction

3. 결과 및 고찰

3.1 물성치측정 결과

인텐테이션 장비를 이용하여 EH36의 물성치를 측정된 결과를 테이블로 나타내었다. Table. 2는 상부 모재와 용접부를 측정된 결과를 나타낸다. 모재의 항복강도 294 MPa, 최대인장 강도 638 MPa로 측정되어 일반 인장시험의 결과와 유사한 경향을 보였다.⁴⁾ 용접부에서는 항복강도, 최대인장강도, 경도값 모두가 증가하는 경향을 보였다. 이 결과는 모재가 용접이 되면서 용융이 되고 다시 재결정 되는 과정을 거칠 때 조직내부의 변화로 인해 다음과 같은 결과를 보인다.

Table 2 Results of mechanical properties on the top side

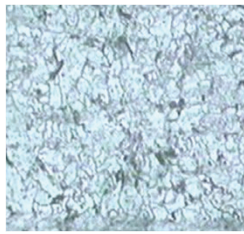
Field	Yield Strength [Mpa]	Tensile Strength [Mpa]	HV
Base Metal	294	638	209
Welding Part	345	749	234

Table 3은 깊이 방향으로 측정된 결과를 나타낸다. 항복강도 값과 최대인장 강도는 깊이가 5, 10, 15, 20 mm 로 깊어질수록 값이 증가하는 경향을 보였고, 특히 20 mm에서 큰 폭의 변화를 보인다. 이와 같은 결과는 첫 번째 생성된 비드가 다음 비드가 생성될 때의 용입열을 간접적으로 받게 되고, 풀림과 같은 열처리 효과를 받게 되면서 강도가 증가하는 것으로 생각한다.

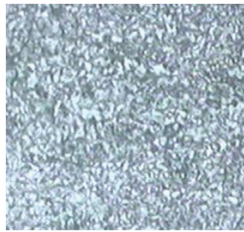
Table 3 Comparison of metal property on the depth (welding part)

Depth [mm]	Yield Strength [Mpa]	Tensile Strength [Mpa]	HV
5	331	717	227
10	322	694	219
15	332	721	234
20	396	863	257

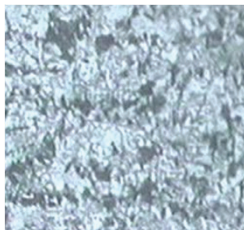
Fig. 7은 모재부와 용접부의 조직을 비교하기 위하여 에칭된 시편을 광학현미경을 이용하여 관찰한 결과이다. 용접이 진행되면서 열 영향에 의해 Grain Size 크기의 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 결정 구조가 가장 치밀한 부분은 열영향부로 나타났고, 모재, 용접부 순으로 입자 크기가 크게 증가하는 것으로 관찰된다. 모재는 미세한 페라이트와 펄라이트 2상 조직으로 나타나고 있으나, 용접부는 용접 중 가열에 의해 펄라이트를 구성하고 있는 시멘타이트의 일부가 구상화합물 동시에 펄라이트 일부는 오스테나이트로 변태하기 때문에 모재에 비해 펄라이트의 변화가 증가하기 때문에 앞에서 물성치 측정 결과를 보아 강도 값이 증가하는 것으로 판단한다. 그리고 형성



(a) Base Metal(X500)



(b) HAZ(X500)



(c) welding zone(X500)

Fig. 7 Surface microstructure observation using the optical microscope

되는 조직은 변태전의 오스테나이트 결정립 지름에 의존하고 결정립 지름이 큰 경우에는 조직이 크게 되고 미세한 경우에는 거기에 대응한 조직이 된다. 그리고 경계부인 열영향부는 가열속도가 크며, 가열시간이 대단히 짧아서 급속히 냉각된다. 따라서 조직에서는 마르텐사이트와 베이나이트 조직을 이루게 되고 조직의 크기도 미세화 되게 된다.

3.2 파괴인성 측정결과

저온 환경에서 파괴인성을 측정한 결과는 Fig. 8과 같다. 모재에서는 상온에서 가장 높은 파괴인성 값을 보였고, 온도가 0℃로 낮아지면서 파괴인성 값은 감소를 한다. 하지만 Base1, 2에서 -20℃에서는 크기는 다소 차이가 나지만 파괴인성 값이 증가하는 경향을 보였다.

이 결과는 -20℃에서 연성재질에서 취성재질로 바뀌게 되는 천이영역을 거치면서 발생된 결과로 생각한다. 그리고 -45℃에서는 완전 취성영역으로 파괴인성 값은 제일 낮은 값을 보였다. 열영향부의 경우 상온에서는 모재부보다 낮은 측정값을 보였고, 온도가 낮아지게 되면서 모재부와 마찬가지로 파괴인성 값은 저하되고 -20℃에서는 크게 증가하는 경향을 보였다. 용접부 역시 같은 경향을 보였고 모재와 열영향부와 비교하였을 때 저온에서 가장 낮은 파괴인성 값을 보였다.

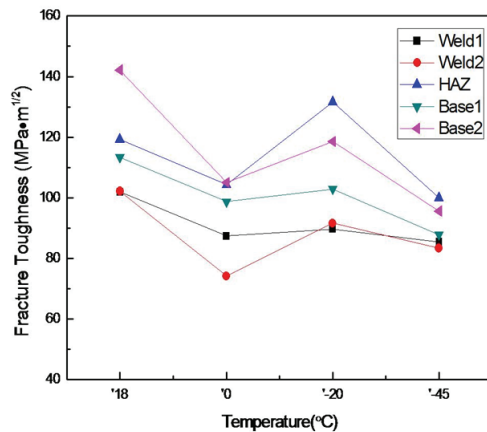


Fig. 8 Comparison graph of fracture toughness results

Fig. 9는 충격시험을 실시한 결과를 나타내었다. 모재부에서는 다른 부분과 비교하였을 때 가장 높게 측정이 되었고, 0℃에서 흡수 에너지 값이 235 J로 가장 높은 값을 보였다.

온도가 낮아지면서 점점 흡수에너지가 감소되어, -45℃에서는 150 J로 나타났다. 용접부에서는 모재부와 온도별로 조금 낮지만 같은 경향으로 나타났다. 하지만 열영향부는 다른 부분과는 달리 온도에 상관없이 가장 낮은 흡수 에너지 값을 보이며 온도가 저하 되었지만 약 75 J로 일정한 흡수 에너지 값을 보였다. 다른 연구결과를 보면 저온에서 충격 시험을 실시한 결과와 비교하였을 때, 저온으로 갈수록 소재는 취성적인 성질로 바뀌게 되면서 흡수 에너지 값이 감소하는 경향을 보였다.^{5, 6)}

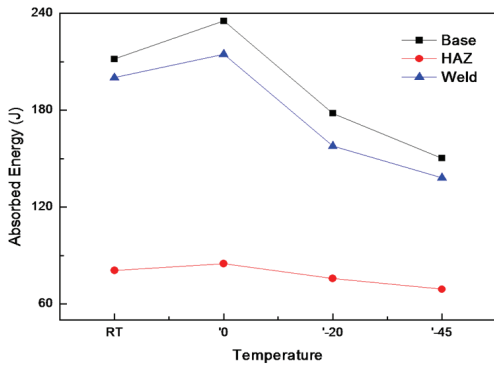


Fig. 9 Results of the Charpy impact test

다음은 저온 환경에서 충격시험을 통해 얻어진 파면을 주사전자 현미경을 이용하여 1000배율로 관찰한 결과를 나타내었다.

Fig. 10은 모재부의 파면을 온도별로 나타낸 결과이다. 상온에서 결과는 연성파괴의 대표적인 특징인 덩플의 형상이 크고 작게 분포되어 있는 모습을 보인다. 0℃로 온도가 저하 되면서 미세한 덩플들은 소멸되고 큰 덩플의 형상만이 관찰되었다. -20℃에서부터는 취성파괴의 특징인 벽면파괴의 형태가 관찰되었다. 이상을⁶⁾연구와 비슷한 경향을 보이는 것을 보아 모재부 자체는 저온환경에 적합한 소재인 것으로 판단한다.

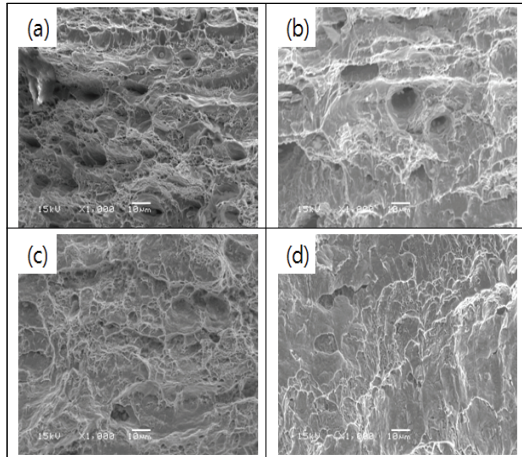


Fig. 10 SEM image of fracture surface in base on temperature : (a) 18℃, (b) 0℃, (c) -20℃, (d) -45℃

Fig. 11은 열영향부의 파면을 측정된 결과 최소 상온에서는 연성파괴의 덩플형태를 보이고 있었다. 온도가 낮아지면서 -45℃에서의 파면 역시 파면형태의 변화 없이 연성 파괴의 특징을 보이고 있었다. 열영향부는 앞에서 조직관찰에서도 관찰하였듯, 입 열량의 변화가 급격하게 바뀌면서 조직적인 원인으로 생각한다.

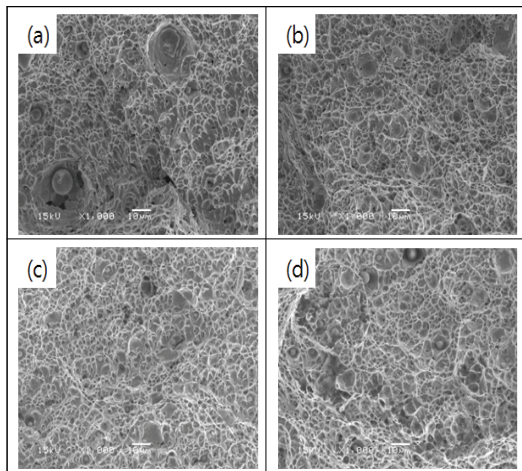


Fig. 11 SEM image of fracture surface in HAZ on temperature : (a) 18℃, (b) 0℃, (c) -20℃, (d) -45℃

Fig. 12는 용접부의 파면을 관찰한 결과를 나타내고 있다. 상온에서 다른 파트와는 다르게 상온에서부터 벽개 파면의 특징이 뚜렷해지는 경향을 보이고 있다.

용접부는 모재부에 비해 열 영향으로 인해 시멘타이트가 구상화하면서 강도 값은 증가를 하지만 취성적인 성질이 증가하는 것으로 생각한다.

다음에 결과는 충격흡수 에너지 값이 낮아질수록 파면은 취성적인 성질을 나타내고 있다. 하지만 열영향부의 경우 용접시에 발생하는 잔류응력의 영향으로 연성파괴의 모습을 보이면서도 가장 낮은 흡수에너지를 보이는 것으로 판단한다.

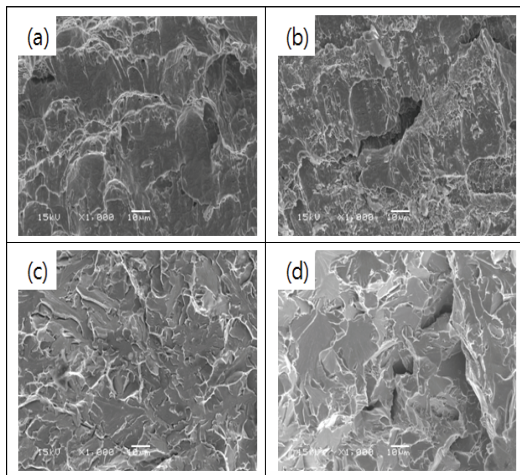


Fig. 12 SEM image of fracture surface in weld on temperature : (a) 18°C, (b) 0°C, (c) -20°C, (d) -45°C

4. 결 론

본 연구에서는 고강도 극후판인 EH36강을 사용하여 다충용접을 실시한 후에 비파괴적 측정방법인 인텐테이션 측정법을 이용하여 소재의 물성치와 잔류응력을 측정하였다. 그리고 저온환경에서의 파괴특성을 알아보기 위하여 저온 챔버와 인텐테이션 측정 장비를 연결하여 측정환경을 18°C, 0°C, -20°C, -45°C 환경에서의 파괴인성을 측정하였다. 그리고 저온환경을 조성한 후 충격시험을

통하여 흡수에너지 값의 변화를 측정하였고, 그 파면을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 계장화 압입시험기를 이용하여 재료 물성 값을 측정한 결과, 모재보다 용접부에서 높게 측정되었고 깊이방향으로 깊어질수록 강도 값이 증가하는 경향을 보였다. 용접부에서는 열 영향으로 인해 펄라이트 조직이 오스테나이트로 바뀌게 되면서 강도 값이 증가하는 것으로 생각한다.

2. 파괴인성 측정 결과 평균적으로 열영향부, 모재, 용접부 순으로 나타났고, 모든 파트에서 온도가 저하될수록 파괴인성 값이 저하되지만 -20°C 만 증가하는 경향을 보인다. 그 이유로는 용접재가 천이온도 영역을 거치면서 나타나는 현상으로 생각한다.

3. 충격시험을 통해 흡수에너지 값을 구한결과 모재, 용접부, 열영향부 순으로 나타났으며 모재, 용접부는 온도가 저하될수록 흡수에너지 값도 감소하는 경향을 보였다. 하지만 열영향부는 온도변화에 관계없이 가장 낮은 흡수에너지 값을 일정하게 보이는데, 이 결과는 열영향부에서 갖는 잔류응력의 영향으로 생기는 현상이라고 판단된다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2010-0015199)와 지식경제부 산업원천기술개발사업(No.10035350)의 지원을 받아 수행된 연구결과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

Reference

1. D. S. Ro, J. W. Hong, K. H. Kim, J. J. Lee, 2009, "High-temperature Mechanical Properties Measurement and Life Assessment of Boiler Equipment by Instrumented Indentation Technique", Journal of The Korean Society of safety, Vol. 24, No. 3, pp. 1-6.
2. H. S. Bang, H. S. Bang, Y. K. Lee, H. S. Kim, K. J. Lee, 2010, "A Study of the Residual Stress

- Characteristics of FCAW Multi-Pass Butt joint for an Ultra-Thick Plate", Journal of the Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 24, No. 2, pp. 62-66.
3. J. H. Park, C. S. Seok, M. W. Suh, J. W. Park, 1996, "Evaluation of Welding Residual Stress of High Tension Steel by Means of Finite Element Method", pp. 73-78.
 4. H. I. Kim, C. S. Seok, J. P. Kim, 2005, "A Study on the Nondestructive Evaluation of Material Properties", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 130-136.
 5. J. H. Lee, H. S. Sin, K. T. Park, S. H. Yang, 2011, "Evaluation of the Applicability of Structural Steels to Cold Regions by the Charpy Impact Test", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 23, No. 4, pp. 483-491.
 6. S. U. Lee, 2002, Evaluation of Low Temperature Impact energy and Fracture Toughness for High Strength Low Alloy Steel, MS thesis, Chungnam National University, DaeJeon, Korea.