

## 보호가스 혼합비율에 따른 Al5083-O 용접부의 저온 인성에 관한 연구

정재강\* · 양훈승\*\* · 이동길\*\*\*

\*조선대학교 공과대학 기계공학부

\*\*목포기능대학 산업설비과

\*\*\*조선대학교 대학원 기계공학과

### The Low Temperature Toughness of Al5083-O Welding Zone According to the Mixing Shield Gas Ratio

Jae-Kang Chung\*, Hoon-seung Yang\*\* and Dong-gil Lee\*\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

\*\*Dept. of Industrial Installation Technology, Mokpo Polytechnic College, Mokpo 530-400, Korea

\*\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Chosun Graduate School, Kwangju 501-759, Korea

#### Abstract

In this study, the low temperature toughness was evaluated by using the instrumented Charpy impact testing procedures for Al5083-O aluminum alloy used in the LNG carrying and storage tank. The specimens were GMA(Gas Metal Arc) welded with four different mixing shield gas ratios (Ar100%+He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+He50%, and Ar33%+He67%), and tested at four different temperatures(+25, -30, -85, and -196°C) in order to investigate the influence of the mixing shielding gas ratio and the low temperature. The specimens were divided into base metal, weld metal, fusion line, and HAZ specimen according to the notch position.

From experiment, the maximum load and displacement were shown the highest and the lowest at -196°C than the other test temperatures. The absorption energy of weld metal notched specimens was not nearly depends on test temperature and mixing shield gas ratio because the casting structure was formed in weld metal zone by melting welding wire. On the other hand, the others specimens was shown that the lower temperature, the higher absorption energy slightly up to -85°C but the energy was decreased so much at -196°C.

(Received March 18, 2002)

Key Words : Low temperature toughness, Impact test, LNG(Liquefied Natural Gas), Mixing shield gas ratio, Weld metal, Fusion line, HAZ, Absorptio

#### 1. 서 론

용접 보호가스는 용접의 품질과 작업효율의 향상을 위하여 중요한 역할을 하며 He, Ar 등의 기체가 주로 사용된다. 이러한 기체들은 불활성 기체로서 고온에서도 매우 안정적이기 때문에 용접보호가스로서 이상적이거나 이들은 밀도, 열전도도, 전기전도도 및 이온화에너지 등의 특성상 차이가 있으므로 아크 특성과 보호효과

에도 차이가 있기 때문에 혼합가스로 사용될 혼합비율에 따라 용접부의 기계적특성과 파괴에 대한 감수성이 달라질 뿐만 아니라 용접원가에 직접 관계되기 때문에 재료와 사용목적에 따라 적합한 혼합비율의 선정이 요구된다<sup>1,2)</sup>.

또한, Al-Mg계 알루미늄합금 중에서 Al5083-O재는 약 4.5%의 Mg을 함유하고 있는 대표적인 용접구조용 합금으로서 비열처리합금 중에서는 강도가 높고, 용접성, 내식성 및 저온취성 등이 우수하므로 액화현

가스(LNG: Liquefied Natural Gas) 수송·보관용 탱크, 선박, 자동차 및 항공기 등 다양한 분야에 사용된다<sup>3)</sup>.

LNG의 수요 증대에 따라 LNG 수송선 및 저장용기 제작 사업도 급속히 신장되어 여러 업체에서 제작이 이루어지고 있다. LNG 운반탱크는 부피를 1/600로 압축시킨 영하 162도의 액화천연가스를 주입, 저장 및 송출을 반복함에 따라 압력과 온도변화에 따른 수축과 팽창을 반복적으로 받게 되므로 사용수명과 파괴에 대한 안정성을 확보하기 위하여는 정적강도와 함께 동적 강도를 고려하지 않으면 안된다. 따라서 알루미늄 합금 용접부의 저온인성을 고려한 용접조건의 최적화가 요구된다<sup>4)</sup>.

일반적으로 알루미늄 및 그 합금의 GMA용접 시 기공 등의 결함발생을 억제하고 보호 및 청정효과를 위하여 사용되는 가스로서 고가(高價)의 He이 다량 사용되므로 용접비용이 크게 증가하여 결국 선박 건조비용이 높아지는 원인이 되고 있으며, 이에 따른 비용절감이 요구되고 있다.

본 연구에서는 Ar과 He의 혼합보호가스 중 He가스 혼합량의 변화에 따른 용접부의 품질을 평가하기 위한 연구의 하나로서 보호가스 혼합비율에 따른 용접부의 저온 인성 변화거동을 고찰하고자 하였다. 시험온도는 +25℃, -30℃, -85℃ 및 -196℃로 상온에서부터 극저온까지 단계적으로 실시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험재료 및 GMA 용접

시험재료는 Moss형 LNG 저장용기 등에 널리 사용되고 있는 Al-Mg계 알루미늄 합금재인 Al5083-O재이다. 모재 및 직경  $\phi 1.2\text{mm}$  용접와이어 Al5183-WY의 화학적 성분 및 기계적 성질은 각각 Table 1 및 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions(wt. %)

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Al5083-O (base metal)	0.40	0.40	0.10	0.70	4.45	0.15	0.25	0.14
Al5183-WY (wire $\phi 1.2\text{mm}$ )	0.10	0.27	0.01	0.58	4.55	0.11	0.06	0.11

Table 2 Mechanical properties

Materials	Y. S. (kg/mm <sup>2</sup> )	T. S. (kg/mm <sup>2</sup> )	Elong. (%)	E (kg/mm <sup>2</sup> )
Al5083-O	19.0	34.2	14	7.0×10 <sup>3</sup>
Al5183-WY	18.6	32.7	14	7.0×10 <sup>3</sup>

GMA용접은 Inverter Pulse MIG/MAG/CO<sub>2</sub> HITACH 350 CAP2를 이용하여 Fig. 1과 같이 두께 12mm인 판을 루트간격 1.0mm로 전면 3패스, 후면 1패스 아래보기로 실시하였다. 이 때 용접방향은 충격 시험편 노치의 길이방향이 압연방향과 수직이 되도록 하였다.

또한, 사용된 불활성가스는 Ar과 He으로서 혼합비율을 Ar100%+ He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+He50% 및 Ar33%+ He67%의 4종류로 분류하였다. Table 3은 용접조건을 나타내고 있다.

알루미늄 합금 중 특히 Al-Mg합금의 표면에는 두껍고 강한 산화피막이 형성된다<sup>5)</sup>. 따라서 용접 전처리로서 연마를 스테인리스강제 와이어 브러쉬를 이용하여 용접 바로 직전에 실시하였다. 용접은 작업장 환경 즉, 온도, 습도 및 풍속 등에 큰 영향을 받으므로 온도 23℃, 습도 60% 및 풍속 0.6m/sec 이하의 표준조건에서 실시함으로써 작업장 환경에 따른 결함 발생을 최소화하였다.

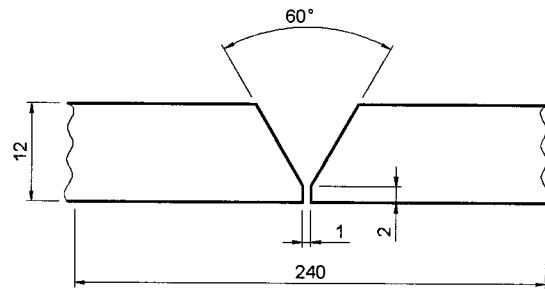


Fig. 1 Preparation of weld joint for GMAW

Table 3 GMAW conditions

Conditions / Gas ratio	Pass number	Voltage (V)	Current (A)	Speed (cm/min)
Ar100%+He0%	1	19	220	40
	2	21		
	3	23		
	4	21		
Ar67%+He33%	1	21		
	2	23		
	3	25		
	4	23		
Ar50%+He50%	1	24		
	2	26		
	3	28		
	4	26		
Ar33%+He67%	1	27		
	2	29		
	3	31		
	4	29		

### 2.2 시험편 및 실험방법

시료채취는 (사)한국선급의 규정<sup>6)</sup>에 따라 용접된 판 재료부터 적당한 가공여유를 두고 고루 채취하여 시험의 정확도를 높이고자 하였다.

시험편 제작과정은 다음과 같다. 우선 채취된 시료를 상하 1mm씩 절삭하여 단면의 크기가 샤프(Charpy) 표준시험편의 크기인 10×10mm가 되도록 밀링가공을 실시하였다. 이렇게 만들어진 길이가 긴 사각봉재는 다시 용접부를 잘 연마후 Kellers용액을 이용하여 에칭하여 용접부의 형상이 잘 나타나도록 하였다. 노치가공 위치 표시는 용착금속(weld metal), 용접선(fusion line) 및 용접선으로부터 모재쪽으로 2mm 떨어진 열영향부(HAZ)에 금긋기를 하였다. 그리고 이 위치가 시험편의 중앙에 오도록 길이의 잉여분을 절단제거 하였다. 표시된 위치에 노치가공은 0.15mm 두께의 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 2mm의 깊이로 해당 위치에 소형 밀링머신을 이용하여 가공하였다. 이 때 용접이 압연방향에 직각으로 수행되었으므로 노치의 길이방향 역시 압연방향에 수직으로 가공되었다.

Fig. 2는 가공된 시험편의 형상 및 치수를 나타낸 것으로서 각각의 불활성가스 혼합비율에서 노치가공 위치에 따라 용착금속부, 용접선 및 HAZ 시험편으로 구분된다.

실험에 사용한 시험기는 용량 30kg·m의 계장화 Charpy 충격시험기이다. 보다 정확한 데이터를 얻고자 고속 A/D변환기(PowerDAQ PD2-MF)를 이용하여 애플에서 출력되는 하중 및 변위 값은 직접 컴퓨터에 입력되고 DASyLab 5.0을 이용하여 분석함으로써 정확성 및 신뢰성을 높이고자 하였다.

-30℃ 및 -85℃ 시험은 코일형 동관을 내부에 삽입하여 자체 제작한 챔버 내에 석유에테르(petroleum

ether)를 채운 뒤 동관의 한쪽 끝에서 액체질소를 주입시켜 다른 끝을 통해 대기 중으로 배출시키는 방식을 사용하였다. 챔버에는 써모커플, 온도조절장치 및 솔레노이드 밸브를 연결하여 자동 온도조절이 되도록 하였다. 또한 석유에테르의 균일한 온도분포 및 원활한 열전달을 위해 챔버 내부에 소형 교반기(Stirrer)를 설치하여 계속 교반하였다. 이러한 장치들에 의해 시험편은 액체질소와 직접적인 접촉 없이 간접적으로 설정온도에 도달된 후 약 ±1.2℃의 오차범위 내에서 일정하게 유지되었다.

한편, 극저온인 -196℃ 시험은 석유에테르를 사용하지 않고 액체질소를 챔버 내에 직접 주입하여 시험편이 항상 잠겨있도록 하였으므로 온도편차는 거의 0(zero)에 가깝다 할 수 있다.

또한 시험편 전체의 균일한 온도분포를 위하여 챔버 내의 시험편을 설정온도에서 약 30분간 유지시킨 후 실험을 실시하였다.

일반적으로 저온 충격시험의 경우 시험편을 샤프 시험기의 앤빌(anvil)에 15초간 방치하였을 때의 온도상승을 점검한 결과에 의하면, -60℃ 시료는 3℃, -100℃ 시료는 3.5℃, -190℃ 시료는 5℃만큼 온도가 상승한다<sup>7)</sup>. 그러나 본 실험에서는 시료를 챔버에서 꺼내어 충격을 가하기까지 약 5초 이내로 소요되었으므로 실험하고자 하는 온도와 큰 차이가 없을 것으로 보고 온도보정은 따로 하지 않았다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 용접부의 조직 및 경도

Photo. 1은 Al5083-O 모재 및 용접선의 조직사진이다. 사진에 나타난 바와 같이 탄화물이 불규칙하게 분포되어 있는 모습을 볼 수 있다.

Photo. 2는 각각의 불활성가스 혼합비율에 따른 용착금속부 조직을 나타낸 사진이다. 사진에 나타난 바와 같이 Mg이 Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>의 고용체로서 전체에 미세하게 분산석출된 모습을 볼 수 있다. 또한 보호가스에 He의 사용량이 증가할수록 가공은 감소하여 Ar33%+He67%에서는 기공이 거의 나타나지 않고 있다. 이와 같이 모든 불활성가스 혼합비율에서 고온균열 및 산화피막 혼입 등은 발견되지 않았는데 이는 GMA용접 시 사용된 용접와이어에 Si함량이 적고 Mg함량이 모재 보다 높으므로 Mg<sub>2</sub>Si결정이 입계에 편석하여 고온균열을 억제하였기 때문으로 생각된다<sup>8)</sup>.

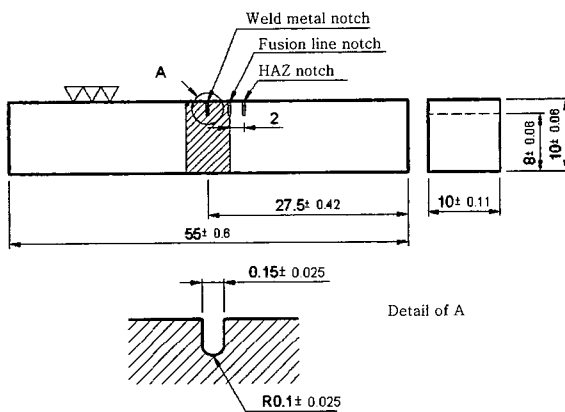
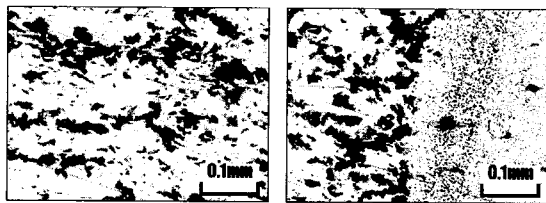


Fig. 2 Geometry of impact test specimen

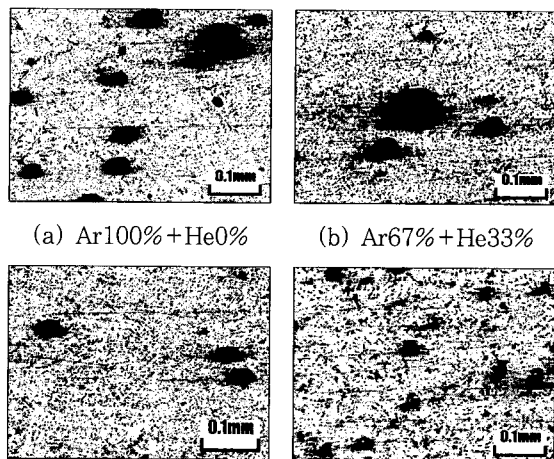
Fig. 3은 용접 비드 중앙에서부터 모재쪽으로 0.5mm 간격으로 측정한 마이크로비커스 경도분포를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 용착금속부의 경도는 Hv100~Hv110 정도의 분포를 나타내며 Ar100%+He0%혼합비에서 가장 높고, 모재부의 경도는 Hv80~Hv90 정도의 분포를 나타내며 Ar33+He67%혼합비에서 가장 높게 나타났으나 불활성가스 혼합비에 따른 용접부의 경도는 큰 차이가 없다고 사료된다.

Pohto. 1 Micro-structure of base metal and fusion line



(a) Base metal (b) Fusion line

Pohto. 2 Micro-structure of weld metal for all shield gas ratio



(a) Ar100%+He0% (b) Ar67%+He33%  
(c) Ar50%+He50% (d) Ar33%+He67%

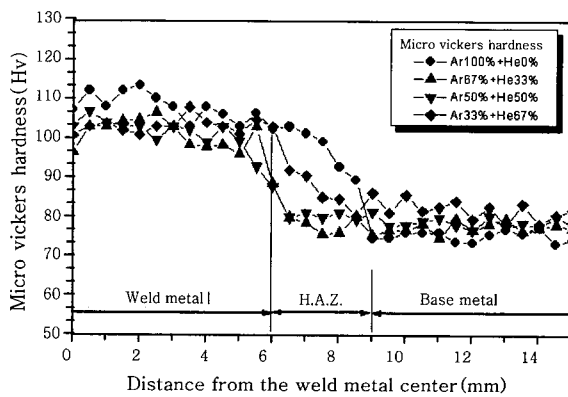


Fig. 3 Micro-vickers hardness distribution

### 3.2 하중-변위 선도에 미치는 영향

Fig. 4~Fig. 7은 전형적인 모재 및 Ar33%+ He67% 시험편에 대한 각 온도에서의 하중-변위 선도를 나타내고 있다.

Fig. 4는 모재에서 시험온도가 낮아질수록 최대하중은 증가하다가 -196℃에서는 크게 증가하는 경향을 보여준다. 그러나 변위는 +25~-85℃까지는 차이가 없었으나 -196℃에서는 큰 감소를 나타내고 있다.

Fig. 5는 용착금속부 시험편의 시험온도와 하중-변위와의 관계로서 최대하중 및 변위는 시험온도와 관계없이 낮은 값을 나타내며 유사한곡선을 보이고 있다.

Fig. 6과 7은 각각 용접선 및 HAZ시험편으로 모재의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다.

전체적으로 볼 때, 용착금속은 가장 낮은 최대하중을 나타내었으며, 용접부는 모재보다 낮은 값을 나타내었다. 온도에 따라서는 온도가 낮아질수록 높은 값을 나타내었으나 변위가 감소함으로써 인성은 감소하는 경향을 나타내었다.

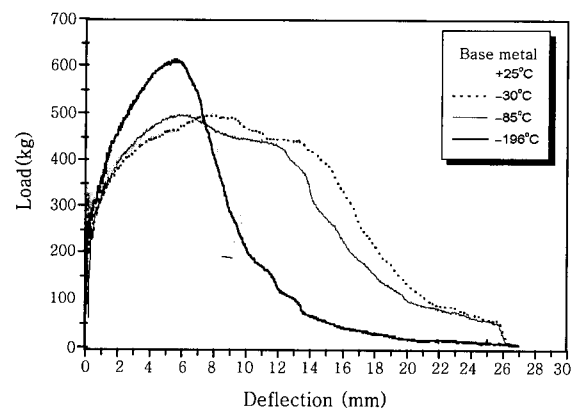


Fig. 4 Load-deflection curve for base metal

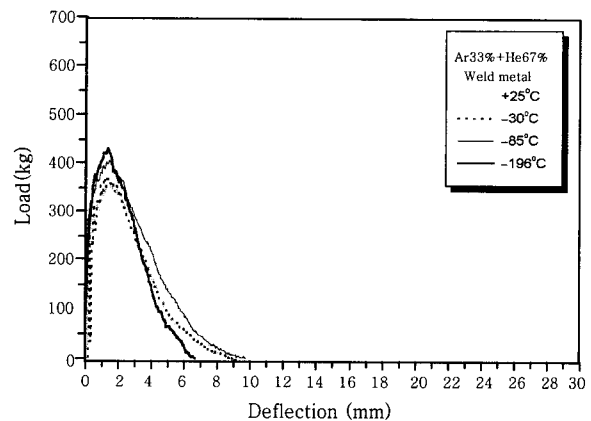


Fig. 5 Load-deflection curve for Ar33%+He67% weld metal specimens

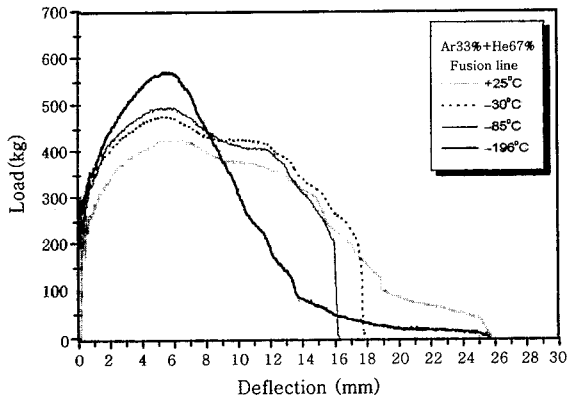


Fig. 6 Load-deflection curve for Ar33%+He67% fusion line specimens

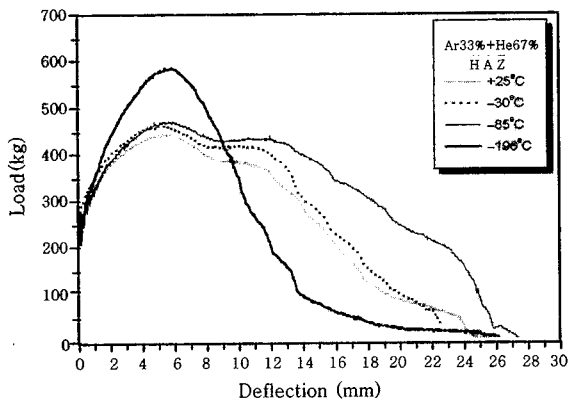


Fig. 7 Load-deflection curve for Ar33%+He67% HAZ specimens

### 3.3 저온 인성에 미치는 영향

Fig. 8~Fig. 10은 용접 영역별 보호가스 혼합비에 따른 흡수에너지와 온도와의 관계를 나타내고 있는 그래프이다.

Fig. 8에서 용착금속부는 시험온도가 상온에서 -85°C까지 감소할수록 흡수에너지는 증가하는 경향을 보이거나 -196°C에서는 감소함을 보여준다. 흡수에너지는 모재가 가장 높았고 Ar100%+He0%가 가장 낮은 값을 나타냈으며, 모재와 용접재의 흡수에너지 차이가 크게 나타났다.

Fig. 9는 용접선 시험편의 경우로서 모재와 유사한 경향을 나타내고 있으나 -196°C에서는 흡수에너지가 크게 감소함을 알 수 있다. 상온에서부터 -85°C까지는 모재가 가장 높으나 -196°C에서는 Ar33%+He67%가 가장 높게 나타났으며, 모든 시험온도에서 Ar100%+He0%가 가장 낮게 나타났다.

Fig. 10은 열영향부 시험편의 경우로서 시험온도 저

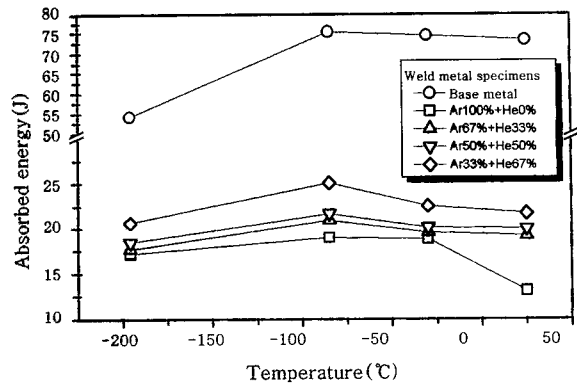


Fig. 8 Relations between absorbed energy and temperature for weld metal specimens

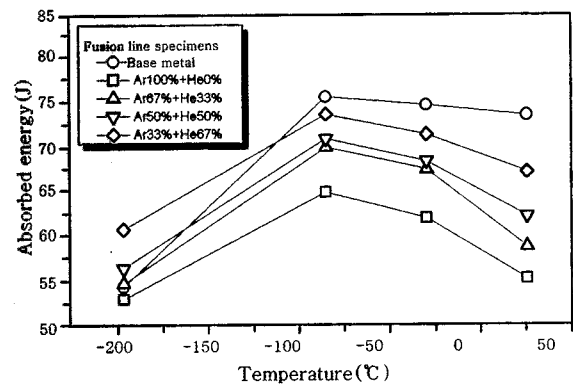


Fig. 9 Relations between absorbed energy and temperature for fusion line specimens

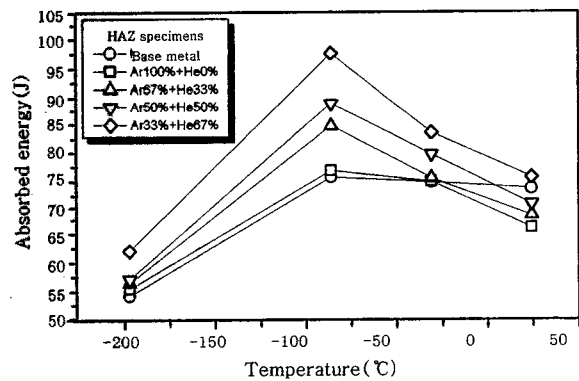


Fig. 10 Relations between absorbed energy and temperature for HAZ specimens

하에 따른 흡수에너지의 변화는 용접선 시험편의 경우와 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 흡수에너지가 상온에서 -85°C까지는 용접선 시험편 보다 약 20J정도 증가하였으나 극저온인 -196°C에서는 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 또한 모든 시험온도에서 Ar33%+He67%가 가장 높았으며, Ar100%+He0%가 가장 낮은 흡수에너지를 나타내고 있다.

Fig. 11~Fig. 14는 각각의 시험온도에서 불활성가

스 혼합비율에 따른 흡수에너지와 노치가공 위치와의 관계를 도기한 것이다.

Fig. 11은 상온 25°C에서 수행된 결과로서 흡수에너지는 용착금속부, 용접선 및 HAZ 순으로 증가하였다. 모재가 가장 높고 불활성가스 혼합비율에 He의 혼합량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 12~13은 -30°C 및 -85°C에서 수행된 결과를 나타내고 있다. 상온의 결과와 동일하게 흡수에너지는

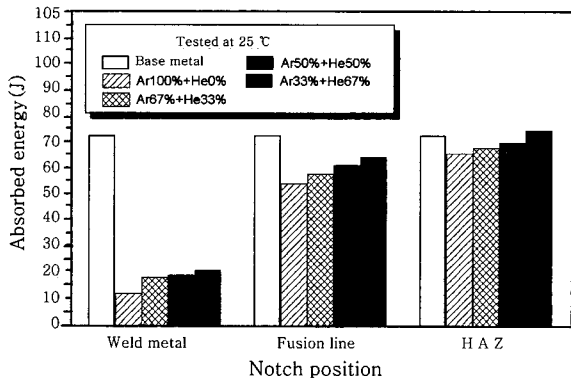


Fig. 11 Relations between notch position and absorbed energy at +25°C

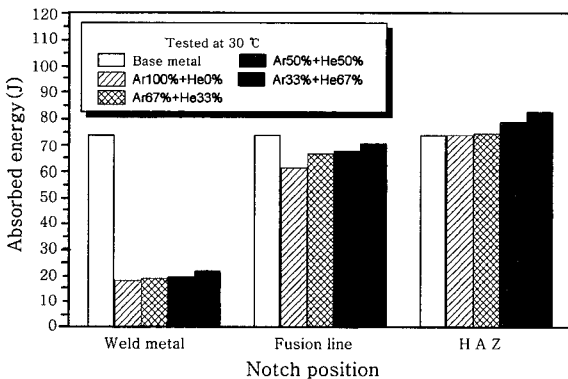


Fig. 12 Relations between notch position and absorbed energy at -30°C

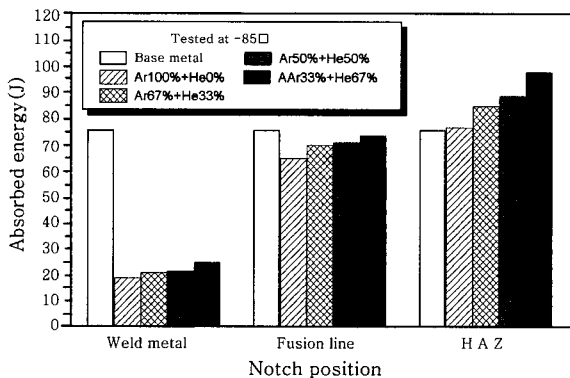


Fig. 13 Relations between notch position and absorbed energy at -85°C

용착금속부, 용접선 및 HAZ 순으로 증가하며, He의 혼합량이 증가할수록 흡수에너지는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 HAZ의 흡수에너지가 모재의 흡수에너지보다 높은 값을 나타내고 있다.

Fig. 14는 극저온인 -196°C에서 수행된 결과로서 시험온도 및 He의 혼합량에 따른 흡수에너지 증가 경향은 위의 시험온도들과 동일하게 나타나고 있으나 HAZ와 용접선의 흡수에너지가 모재의 흡수에너지보다 높은 값을 보이고 있다.

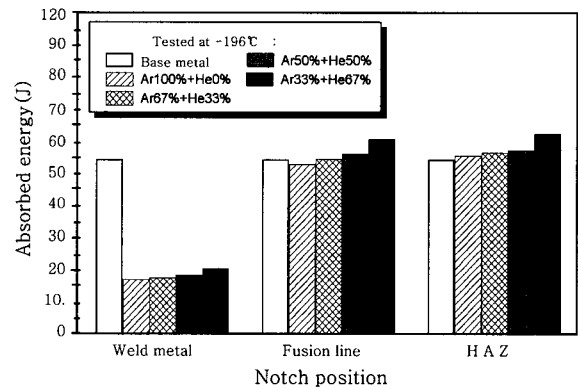


Fig. 14 Relations between notch position and absorbed energy at -196°C

위의 결과들을 종합하여보면 다음과 같다.

흡수에너지는 불활성가스에 He의 혼합량이 증가할수록 증가하여 Ar33%+He67% 혼합비에서 저온인성이 가장 우수하게 나타났다. 시험온도가 낮아질수록 흡수에너지는 증가하나 -196°C에서는 감소하여 취성적인 거동을 나타내었다. 그리고 저온에서 급격한 인성감소 현상은 나타나지 않았는데 이것은 Al5083-O재가 면심입방격자의 구조로서 저온취성이 거의 없기 때문으로 생각된다. 또한, 용착금속부는 모재에 비하여 매우 낮은 값을 나타낸 반면, 용접선 및 HAZ는 모재와 유사한 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 용착금속부가 주요 조직을 갖기 때문으로 분석된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 저온용기 등에 많이 사용되고 있는 알루미늄 합금 Al5083-O재에 대한 보호가스 혼합비율과 저온인성과의 관계를 규명하고자 혼합가스 비율을 여러 가지로 달리하여 GMA 용접을 하였다. 시험온도는 상온에서 극저온까지 단계적으로 낮추어가며 계장화 살피 충격시험을 실시하였으며 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 최대하중은 시험온도가 낮아질수록 증가하였으나 변위는 25℃부터 -85℃까지는 시험온도에 관계가 없었으나 -196℃에서는 크게 감소하였다.

2) 모든 시험온도 및 불활성가스 혼합비율에서 흡수에너지는 용착금속부, 용접선 및 HAZ 순으로 증가하였다.

3) 용착금속부의 흡수에너지는 시험온도 및 불활성가스 혼합비율에 관계없이 매우 낮게 나타난 반면, 용접선 및 HAZ시험편의 흡수에너지는 모재와 거의 유사한 값을 나타내었다.

4) 시험온도가 -85℃까지 낮아질수록 흡수에너지는 증가하였으나 -196℃에서는 감소하여 약간의 취성적인 거동이 나타났다.

5) 모든 시험온도에서 흡수에너지는 He의 혼합량이 증가할수록 증가하는 경향을 보여 Ar33%+He67%에서 가장 우수한 인성을 나타내었다.

## 후 기

본 논문은 2001년도 조선대학교 학술연구지원비에 의하여 연구되었음

## 참 고 문 헌

1. Bill Lucas : Shielding gases for arc welding-part I, *Welding & Metal Fabrication* (1992), 218-225
2. David L. OLSON : *Welding Theory and Practice*, North-Holland 8 (1989), 182-199
3. J.H. Kim, D.H. Park : Porosity in Thick Aluminium Alloy Welds(Causes and Prevention), *Journal of KWS*, 12-1 (1994), 7-15 (in Korean)
4. S.W. Kim, S.W. Lee, J.N. Lee : Finite Element Analysis of the Corrugated Membrane of LNG Storage Tank for Its Geometric Design, *Journal of KSPE* (1997), 620-624 (in Korean)
5. K.H. Lee and H.S. Jeon : Status and Prospect of Site Welding Technology for LNG Storage Tank, *Journal of KWS*, 13-3 (1975), 8-17 (in Korean)
6. *Rules for Classification Steel Ships : Part 2 Material and Welding*, Korean Register of Shipping (1998), 66-68 (in Korean)
7. B.K. Choi, H.K. Youn, W.S. Oh, W.J. Park : *Mechanical Test of Materials*, Wonchang(2000), 124-125 (in Korean)
8. D.M. Rabkin : Nature of Hot Cracks Initiating in Welding the Aluminum Alloys and Some Methods of Crack Prevention, Cracking and Fracture in Welds, *Proceedings of the First International Symposium* (1997), sub-session II-D1 to II-D5