

## Al5083-O GMAW 용접시 불활성가스 혼합비가 용접부의 인성에 미치는 영향에 관한 연구

이 동 길\*, 김 건 호\*\*

### The Influence of Shield Gas Ratio on the Toughness of Al5083-O GMAW Weld Zone

Dong-Gil Lee, Gun-Ho Kim

\* 조선대학교 대학원 기계공학과

\*\* 군산대학교 해양생산학·기관공학부

**Abstract :** In this study, the toughness was evaluated by using the instrumented Charpy impact testing procedures for Al5083-O aluminum alloy used in the LNG carrying and storing tank. The specimens were GMAW 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℃) in order to investigate the influence of the mixing shield gas ratio and the low temperature. The specimens were divided into base metal, weld metal, fusion line, and HAZ specimen according to the worked notch position.

From experiment, the maximum load increased a little up to -85℃, and the maximum load and maximum displacement were shown the highest and the lowest at -196℃ 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. In the other hand, the others specimens was shown that the lower temperature, the higher absorption energy slightly up to -85℃ but the energy was decreased so mush at -196℃.

**Key words:** GMAW(Gas Metal Arc Welding), Absorbed energy(흡수에너지), Mixing shield gas ratio(보호가스 혼합비), Weld metal(용착금속), Fusion line(용접선), HAZ(열영향부)

#### 1. 서 론

Al-Mg계 알루미늄 합금의 하나로서 Al5083-O 재는 약 4.5%의 Mg을 함유하고 있는 용접구조용 합금으로서 비열처리합금 중에서는 강도가 높고, 용접성, 내식성 및 저온취성 등이 우수하므로 액화천연가스(LNG; Liquefied Natural Gas) 수송·보관용 탱크, 선박, 자동차 및 항공기 등에 사용된다<sup>1)</sup>.

현재 국내에서 제조 중인 LNG탱크는 크게

Moss방식과 Membrane 방식 2종류로 구분하며, Moss방식의 LNG 탱크의 재료로서는 9% Ni강 또는 Al5083-O의 Al합금을 사용하여 왔으나 최근의 건조실적을 고찰하여 보면 취성파괴의 방지가 더욱 용이한 Al5083-O 알루미늄 합금을 사용하는 경향이 두드러지고 있다<sup>2)</sup>.

알루미늄 합금의 GMAW 용접 시 사용되는 보호가스로서는 Ar, He 및 CO<sub>2</sub> 등이 있으며, 국내 조선소에서 Moss방식 LNG 저장탱크 제작 용접에 주로 사용되는 보호가스로서는 Ar과 He의 혼

합가스를 주로 사용한다.

Ar과 He은 불활성이므로 보호가스로 자주 사용되는 가스이나 이들은 밀도, 열 전도도, 전기 전도도 및 이온화 에너지 등의 특성들에 차이가 있기 때문에 아크 특성 및 보호 효과에도 차이가 있다. 따라서 일반적으로 용접하고자하는 재료의 특성에 맞추어 적당한 비율로 혼합하여 사용한다. Ar은 공기보다 약 1.4배 무거운 반면, He은 약 0.14배 정도 가볍다. 따라서 아래보기 자세에서 용융금속을 보호한다는 관점에서 보면 Ar가스가 보다 효율적인 반면 He가스로서 같은 정도의 보호효과를 얻으려면 2~3배 정도의 유량이 더 필요하게 된다. 또한, Ar 가스는 열 전도성이 낮으므로 에너지가 플라즈마 중앙부에 집중되어 종모양의 비드를 만드는 반면, He가스는 열전도성이 높기 때문에 에너지가 아크 내에 균일하게 분산되어 타원형의 비드 형상을 가지게 된다<sup>3)</sup>. 그러나 He은 이온화에너지가 Ar보다 높기 때문에 용접전압에 스파터가 많이 발생하고 비드 외관이 거칠어진다는 단점이 있다. 따라서 Ar과 He가스를 혼합해서 사용하게 되면 두 가지 가스의 장점을 모두 얻을 수 있으나 He은 고가(高價)이므로 용접비용이 증가하여 원가가 높아지는 원인이 된다<sup>4)</sup>.

본 연구에서는 Ar과 He의 혼합보호가스 중 He가스의 사용량을 적절히 제어함으로써 용접성과 용접비용을 최소화하기 위한 연구의 하나로써 보호가스 혼합비율에 따른 용접부의 저온 인성 변화거동을 고찰하고자 하였다. 시험온도는 +25℃, -30℃, -85℃ 및 -196℃로 상온에서부터 극저온까지 단계적으로 실시하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 GMAW 용접

시험재료는 LNG 저장용기 재료로 많이 사용되고 있는 Al-Mg계 알루미늄 합금재인 Al5083-O이다. 모재 및 본 용접에 사용된 용접와이어 Al5183-WY(φ1.2mm)의 화학적 성분은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 각각 나타내었다. GMAW 용접은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 V-Butt 용접을 하였으며, 이 때 루트간격은 1.0mm로 전면 3패스, 후면 1패스 아래보기 용접을 실시하였다. 용접조건은 Table 3과 같다. 이 때 사용된 불활성가스는 Ar과 He으로서 혼합비율을 Ar100%+He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+

He50% 및 Ar33%+He67%의 4종류로 분류하여 실시하였다. 이 때 혼합된 불활성가스는 순도 99.995%의 He과 Ar을 혼합비율에 맞게 미리 혼합 주문하여 제조함으로써 혼합비의 오차를 최소화하였다. 또한, 시료채취는 (사)한국선급의 규정<sup>5)</sup> 따라 용접된 판재로부터 적당한 가공여유를 두고 고루 채취하여 시험의 정확도를 높이고자 하였다.

알루미늄 합금의 표면에는 보통 아주 얇은 층의 알루미늄의 산화막이 형성되어 기공을 만드는 원인이 된다<sup>6)</sup>. 특히 Al-Mg합금에서는 피막이 강하고 두께가 두껍다. 따라서 본 연구에서는 용접 전처리로서 산화피막 및 청결을 위해 스테인리스 강재 와이어 브러쉬를 이용하여 연마를 용접 바로 직전에 실시하였다<sup>7)</sup>. 그리고 용접 후처리로서 응력집중에 의한 균열 발생을 최소화하기 위하여 용접 비드 시종단에 예리한 노치가 없도록 그라인더를 이용하여 제거하였다. 또한, 용접은 작업장 환경 즉, 온도, 습도 및 풍속 등에 큰 영향을 받으므로 용접 시공 시 맑은 날씨를 택하였으며, 온도 23℃, 습도 60% 및 풍속 0.6m/sec 이하의 조건에서 실시함으로써 결함발생을 최소화하였다.

Table 1 Chemical compositions(wt. %)

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Al5083-O	0.40	0.40	0.10	0.70	4.45	0.15	0.25	0.14
Al5183-WY	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>4</sup>
Al5183-WY	18.6	32.7	14	7.0×10 <sup>4</sup>

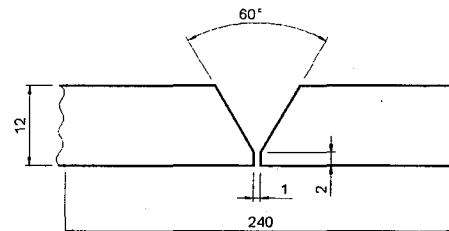


Fig. 1 GMAW method

Table 3 GMAW conditions

Gas ratios	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		

2.1 시험편 가공 및 실험 방법

충격시험편은 용접이 끝난 판재를 적당한 가공 여유를 두고 압연방향과 평행하게 절단하여 단면의 크기가 샤프 표준시험편의 크기인 10×10mm가 되도록 밀링가공을 실시하였다. 이렇게 만들어진 길이가 긴 사각봉재는 다시 용접부를 잘 연마후 Kellers용액[Methanol(25 ml)+Hydrochloric acid(25 ml)+Nitric acid(25 ml)+Hydrofluoric acid(3 ml)]으로 에칭하여 용접부의 형상이 잘 나타나도록 한 후 노치를 가공할 위치를 표시하였다. 그리고 이 위치가 시험편의 중앙에 오도록 길이의 잉여분을 절단제거 하였다. 표시된 위치에 노치가공은 0.15mm 두께의 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 2mm의 깊이로 해당 위치에 가공하였다. 이 때 용접이 압연방향에 직각으로 수행되었으므로 노치의 길이방향 역시 압연방향에 수직으로 가공되었다.

저온시험 중 -30℃ 및 -85℃의 경우 코일형 동관을 내부에 삽입하여 자체 제작한 챔버 내에 석유에테르를 채운 뒤 액체질소를 동관의 한쪽 끝에서 주입하여 다른 끝을 통해 대기 중으로 배출하는 방식을 사용하였으므로 액체질소와 석유에테르는 직접적인 접촉 없이 동파이프를 통해 간접적으로 매 분당 약 3℃씩 냉각되었으며, 설정온도에 도달 후 시험편 전체가 균일한 온도분포를 할 수 있도록 약 30분간 유지시킨 후 실험을 실시하였다. 이 때 자동 온도조절을 위해 써모커플, 온도조절장치 및 솔레노이드 밸브가 장치되었으

며, 석유에테르의 균일한 온도분포 및 원활한 열 전달을 위해 챔버 내부에 소형 교반기(Stirrer)를 설치하였다. 따라서 온도는 솔레노이드 밸브의 자동 개폐에 의해 약 ±1.5℃의 오차범위 내에서 일정하게 유지되었다. 또한 -196℃ 시험은 시험편을 액체질소에 담가두는 방식을 사용하였다.

한편, 실험에 사용한 시험기는 용량이 30kg·m 이며, 로드셀이 계장화된 샤프 충격시험기로서 시험편에 충격하중을 가하면 시험편과 텅의 접촉순간부터 파단까지 빠르게 변화하는 하중을 측정할 수 있다. 또한, 정확한 데이터를 얻고자 A/D변환기(PowerDAQ PD2-MF)를 이용하여 앰프에서 출력되는 하중 및 변위 값을 오실로스코프 및 XY레코더 대신 직접 컴퓨터에 입력되는 값을 DASyLab 5.0을 이용하여 분석함으로써 정확성 및 신뢰성을 높이고자 하였다.

Table 4는 사용한 충격시험기의 제원 및 실험 방법을 나타내고 있으며, Fig. 2는 한국산업규격<sup>8)</sup>에 맞게 가공한 충격시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있다.

Table 4 tester and test condition

Model	CIEM-30	Angle	142°
Capacity	30kgf·m	Speed	5m/sec
Maker	TORSEE, Japan	Test temp.	25℃, -30℃ -85℃, -196℃

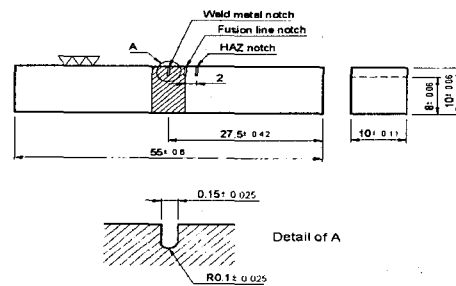


Fig. 2 Geometry of impact test specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부의 조직 및 경도

Photo. 1은 각각의 불활성가스 혼합비율에 따른 용착금속부의 사진으로서 충격시험편의 노치 선단에 해당하는 깊이 2mm 위치이다. 사진에 나타난 바와 같이 Mg이 Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>의 고용체로서 전체에 미세하게 분산석출된 모습을 볼 수 있으며, 보

호가스에 He의 사용량이 증가할수록 기공은 감소하여 Ar33%+He67%에서는 기공이 거의 나타나지 않고 있다. 또한 모든 불활성가스 혼합비를 및 입열량에서 고온균열 및 산화피막 혼입 등은 발견되지 않았는데 이는 GMAW 용접 시 사용한 용접와이어에 Si함량이 적고 Mg함량이 모재보다 높으므로 Mg<sub>2</sub>Si 결정이 입계에 편석하여 내고온균열성을 저해하지 않았고, 용접 전처리 및 후처리를 철저히 실시하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 3은 Ar만을 100% 사용하여 용접한 시험편의 비드 중앙에서부터 모재쪽으로 0.5mm간격으로 측정된 마이크로비커스 경도값 분포를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 모재 및 용착금속부의 경도값은 약 77 및 108정도로서 용착금속부가 약 30정도 높게 나타났으며, 열영향부는 약 1.5mm를 나타내고 있다.

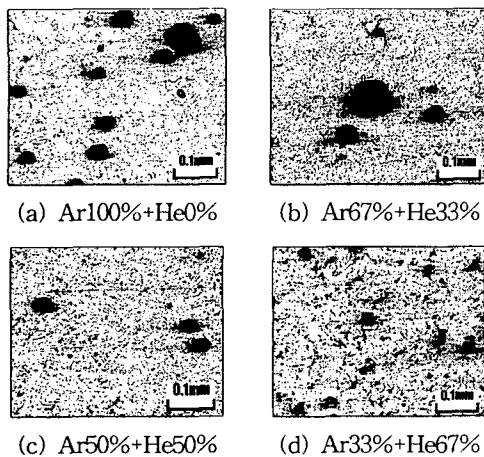


Photo. 1 Micro-structure of weld metal

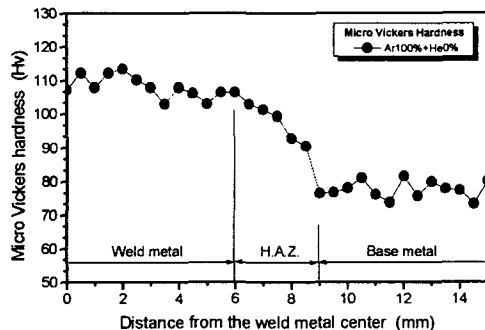


Fig. 3 Micro-vickers hardness distribution

### 3.2 하중-변위 선도에 미치는 영향

Fig. 4~Fig. 7은 전형적인 모재 및 Ar100%+He0% 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 감소하는 경향을 나타내고 있다.

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

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

전체적으로 볼 때, 용착금속은 가장 낮은 최대하중을 나타내었으며, 용접부는 모재보다 낮은 값을 나타내었다. 또한 시험온도가 낮아질수록 최대하중은 다소 증가하여 -196℃에서 가장 크게 나타났으나 변위는 감소하는 경향을 나타내었다.

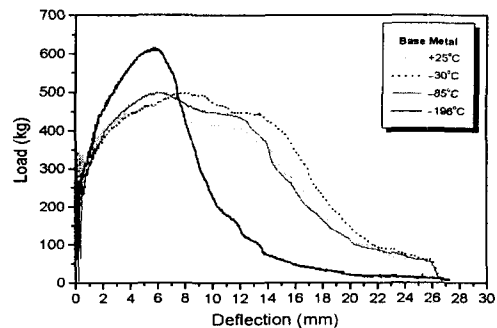


Fig. 4 Load-deflection curve for base metal

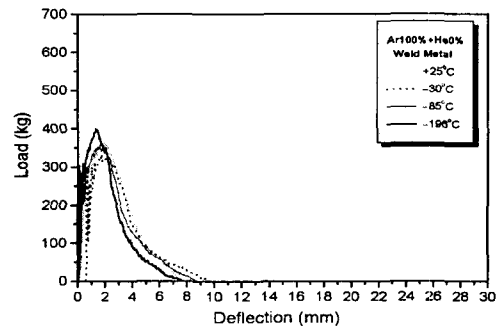


Fig. 5 Load-deflection curve for Ar100%+He0% weld metal specimens

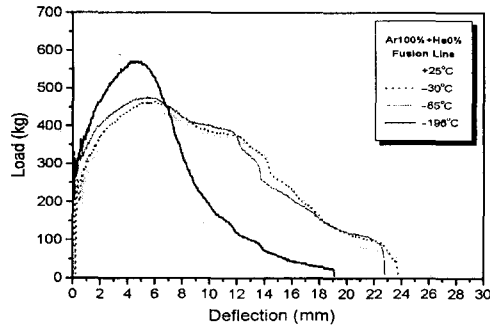


Fig. 6 Load-deflection curve for Ar100%+He0% fusion line specimens

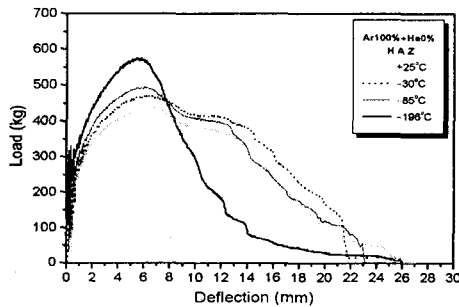


Fig. 7 Load-deflection curve for Ar100%+He0% HAZ specimens

### 3.3 저온 인성에 미치는 영향

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

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

Fig. 9는 용융선 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 시험 온도 저하에 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.

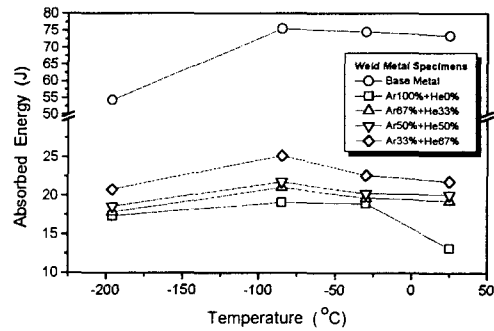


Fig. 8 Relations between absorbed energy and temperature for weld metal specimens

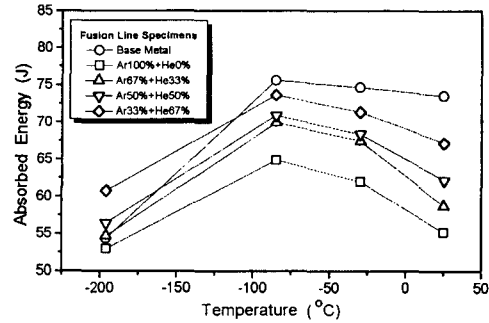


Fig. 9 Relations between absorbed energy and temperature for fusion line specimens

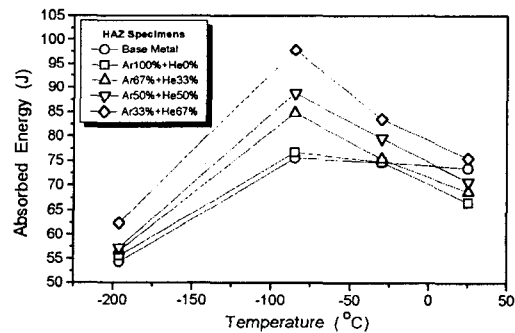


Fig. 10 Relations between absorbed energy and temperature for HAZ specimens

Fig. 11~Fig. 14는 각각의 시험온도에서 불활성가스 혼합비율에 따른 흡수에너지와 노치 가공 위치와의 관계를 도시한 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 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.

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 주조조직을 갖기 때문으로 분석된다.

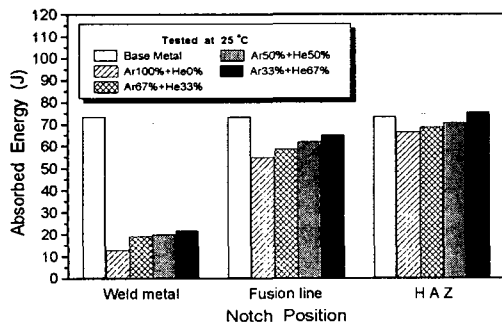


Fig. 11 Relations between notch position and absorbed energy at +25°C

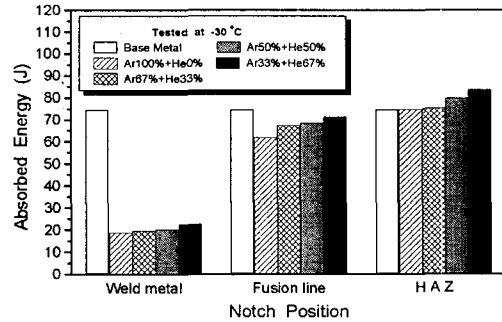


Fig. 12 Relations between notch position and absorbed energy at -30°C

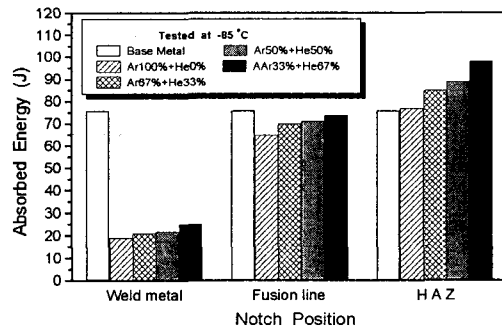


Fig. 13 Relations between notch position and absorbed energy at -85°C

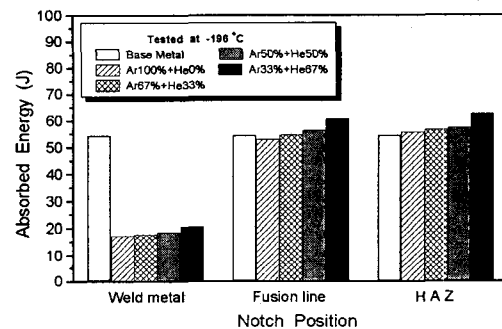


Fig. 14 Relations between notch position and absorbed energy at -196°C

#### 4. 결 론

본 연구에서는 저온용기 등에 많이 사용되고 있는 알루미늄 합금 Al5083-O재 용접부에 대한 기계적성질 및 충격인성을 평가하고자 혼합가스 비율 및 입열량을 여러 가지로 달리하여 GMA 용접을 하였다. 인장시험 및 계장화 살피 충격시험

험을 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 인장강도는 보호가스 혼합비율 및 입열량에 관계가 없었으며, 항복강도 및 연신율은 입열량과는 관계가 없었으나 He의 혼합량이 증가할수록 증가하여 Ar33%+He67%에서 가장 우수하였다.
- 2) 하중-변위선도에서 모든 불활성가스 혼합비 및 입열량에 관계없이 용착금속부의 최대하중 및 변위는 모재와 큰 차이를 보이지만 용접선 및 HAZ는 차이가 없었다.
- 3) 용착금속부의 흡수에너지는 모든 불활성가스 혼합비율 및 입열량에서 모재의 약 30% 정도로 낮게 나타났는데, 이러한 결과는 용착금속부는 용접와이어가 녹아 형성된 주조조직을 갖기 때문으로 분석된다.
- 4) 모든 불활성가스 혼합비율 및 입열량에서 흡수에너지는 용착금속부, 용접선 및 HAZ 순으로 증가하였다.
- 5) He의 혼합량이 증가할수록 흡수에너지는 증가하여 Ar33%+ He67%에서 가장 우수한 인성을 나타내었다.

참고문헌

- [1] 김종희, 박동환, “후판 알루미늄 합금 용접의 기공발생과 방지대책”, 大韓熔接學會誌, 第12卷, 第1號, pp. 7-11, 1994
- [2] 한종만, 한용섭, “GT Membrane형 LNG선의 용접기술과 용접부 강도”, 大韓熔接學會誌, 第1卷, 第4號, pp. 24-25, 1993
- [3] L. David. OLSON, “Welding Theory and Practice”, Vol. 8, North-Holland, pp. 182-199, 1989
- [4] L. Bill, “Shielding gases for arc welding-part”, Welding & Metal Fabrication, pp. 218-225, 1992
- [5] 한국선급, “선급 및 강선규칙, 제2편 재료 및 용접”, 한국선급, pp. 59-68, 1998
- [6] 嚴基元, “알루미늄과 그合金의 熔接”, 大韓機械學會誌, 第19卷, 第4號, pp. 229-306, 1979
- [7] 강성수, “알루미늄 합금의 저항용접 기술의 현황과 전망”, 大韓熔接學會誌 第15卷, 第2號, p 19, 1997
- [8] 금속재료 충격 시험편, 한국산업규격(KS B 0809), 1995, p. 1974