



### 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



2010년 2월

교육학석사(기계·금속교육)학위논문

알루미늄합금 용접의 보호가스  
영향에 관한 연구

조선대학교 교육대학원

기계·금속 교육전공

모 성 창

# 알루미늄합금 용접의 보호가스 영향에 관한 연구

A Study on Influence of Shield Gas  
in Aluminium Alloy Welding

2010년 2월

조선대학교 교육대학원  
기계·금속 교육전공  
모 성 창

# 알루미늄합금 용접의 보호가스 영향에 관한 연구

지도교수 : 정 재 강

이 논문을 교육학석사(기계·금속교육) 학위  
논문으로 제출함

2009년 10월

조선대학교 교육대학원  
기계·금속 교육전공  
모 성 창

# 모성창의 교육학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 조선대학교 교수 이 규 태 

심사위원 조선대학교 교수 최 병 기 

심사위원 조선대학교 교수 정 재 강 

2009년 12월

조선대학교 교육대학원

# 목 차

목차 .....	I
List of Tables .....	IV
List of Figures .....	V
List of Photographs .....	VII
Nomenclature .....	VIII
Abstract .....	IX
제 1 장 서 론 .....	1
제1절 연구 배경 및 목적 .....	1
제2절 연구방법 및 내용 .....	4
제 2 장 이론적 배경 .....	6
제1절 알루미늄 합금의 기계적 특성 .....	6
제2절 GMA 용접 특성 .....	11
1. GMA 용접 .....	11

2. 금속이행	12
3. 용접공정 변수	15
제3절 용접 보호가스의 특성	16
제 3 장 실 험	19
제1절 시험재료 및 GMA용접 조건	19
제2절 시험편 및 실험방법	27
1. 인장시험	27
2. 충격시험	28
3. 저온실험	31
제 4 장 결과 및 고찰	34
제1절 보호가스 혼합비와 입열량이 용접성에 미치는 영향	34
1. 용접부 형상 변화	34
2. 기공발생의 양상	40
제2절 보호가스 혼합비와 용접부의 기계적 특성에 미치는 영향	43
1. 미소경도	43
2. 인장강도	45

제3절 보호가스 혼합비의 동적 흡수에너지에 미치는 영향	… 49
제 5 장 결 론	… 59
REFERENCES	… 60

## LIST OF TABLE

Table 2-1 Division of the aluminum alloy .....	6
Table 2-2 Chemical compositions of aluminum alloys for ship building .....	7
Table 2-3 Physical properties of the aluminum alloy .....	7
Table 2-4 LNG ship tank types .....	9
Table 2-5 Using materials according to the designed temperature and welding methods .....	9
Table 2-6 Welding method for the materials .....	10
Table 2-7 Physical properties of the shielding gas .....	17
Table 2-8 Shielding gas for GMA .....	18
Table 3-1 Chemical compositions of base metal and welding wire .....	20
Table 3-2 Mechanical properties of base metal and welding wire .....	20
Table 3-3 GMA welding condition .....	21
Table 3-4 Welder and working condition .....	22
Table 3-5 Charpy impact testing machine and test condition .....	29
Table 3-6 Testing equipments .....	33
Table 4-1 Radiographic inspection results .....	42

## LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 GMA welding method diagram .....	11
Fig. 2-2 Spray and globular transfer .....	13
Fig. 2-3 Short-circuit transfer .....	14
Fig. 2-4 Relations of the complete short-circuit cycle, voltage and current .....	14
Fig. 2-5 Output current and transfer of pulse current .....	14
Fig. 3-1 GMA welding specimen .....	21
Fig. 3-2 Cutting method of the welded plate for specimen .....	23
Fig. 3-3 Micro-vickers hardness distribution of weld .....	26
Fig. 3-4 Geometry of tensile test specimen .....	27
Fig. 3-5 Geometry of Charpy impact test specimen .....	30
Fig. 3-6 Schematic diagram of low temperature testing chamber apparatus ..	32
Fig. 4-1 Schematic diagram of bead shape .....	35
Fig. 4-2 Relation between the bead width and the welding heat input .....	38
Fig. 4-3 Relation between bead geometry and the welding heat input .....	38
Fig. 4-4 Relation between bead geometry and the welding heat input .....	39
Fig. 4-5 Relation between dilution and the heat input .....	39
Fig. 4-6 Micro-vickers hardness distribution .....	43
Fig. 4-7 Relations between tensile strength and heat input .....	46
Fig. 4-8 Relations between yield strength and heat input .....	47
Fig. 4-9 Relations between maximum percent strain heat input .....	48
Fig. 4-10 Comparison of the energy between manual impact and instrumented impact test .....	51

Fig. 4-11 Relations between Charpy absorbed energy and temperature and for weld metal specimens .....	52
Fig. 4-12 Relations between Charpy absorbed energy and temperature for fusion line specimens .....	53
Fig. 4-13 Relations between Charpy absorbed energy and temperature for HAZ specimens .....	54
Fig. 4-14 Relations between notch position and Charpy absorbed energy at +25°C .....	55
Fig. 4-15 Relations between notch position and Charpy absorbed energy at -30°C .....	55
Fig. 4-16 Relations between notch position and Charpy absorbed energy at -85°C .....	56
Fig. 4-17 Relations between notch position and Charpy absorbed energy at -196°C .....	56
Fig. 4-18 Load-deflection curve for base metal .....	57
Fig. 4-19 Load-deflection curve for Ar33%+He67% weld metal specimens .....	57
Fig. 4-20 Load-deflection curve for Ar33%+He67% fusion line specimens .....	58
Fig. 4-21 Load-deflection curve for Ar33%+He67% HAZ specimens .....	58

## LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 3-1 Macro-photograph and schematic diagram of the weld section .....	22
Photo. 3-2 Micro-structure of the weld zone ( $\times 100$ ) .....	26
Photo. 3-3 Welded impact test specimens .....	30
Photo. 4-1 Photographs of the bead shape measurement .....	37
Photo. 4-2 Photographs of radiographic test film .....	41
Photo. 4-3 Micro-structure of the weld zone ( $\times 100$ ) .....	44

## Nomenclature

A	:	Ampare
$A_1$	:	Reinforcement area for equation of dilution
$A_l$	:	Penetration area for equation of dilution
B	:	Bead width
DT	:	Designed temperature
F	:	As fabricated
H	:	High heat input condition
H	:	Work hardened
$H_l$	:	Bead height for equation of dilution
$H_2$	:	Penetration depth for equation of dilution
$H_v$	:	Micro-Vickers hardness
L	:	Low heat input condition
M	:	Middle heat input condition
O	:	Annealing
t	:	Thickness of base metal
T	:	Solution treatment
v	:	Welding velocity
V	:	Voltage
$\alpha$	:	Angle of the hammer before fracture
$\beta$	:	Angle of the hammer after fracture

## ABSTRACT

### A Study on Influence of Shield Gas in Aluminium Allow Welding

Mo, Sung-Chang

Advisor : Prof. Chung, Jae-Kang Ph.D.

Mechanical & Metallurgical Education

Graduate School of Education, Chosun University

This study was to evaluate welding strength of Al5083-O aluminum alloy according to the shield gas mixing ratio and heat input. The GMA(Gas Metal Arc) welding of the base metal was carried out with four different shield gas mixing ratios(Ar100%+He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+He50%, and Ar33%+He67%). Tensile and Charpy impact test were performed from room temperature(+25°C) to cryogenic temperature (-30°C, -85°C, and -196°C). The specimens were specified by base metal, weld metal, fusion line, and HAZ specimen according to the machined notch position to investigate the strength of the specified weld zones.

The summarized results from the experiment are as follows ;

- 1) Regarding the influence on the bead shape of the shield gas mixing ratio, the bead width was greatest in pure Argon. But the bead depth and area were greatest in Ar33%+He67% mixture considering that the lower Argon gas ratio, the higher bead depth and area. Also, the dilution was also best in the mixing shield gas ratio.

- 2) The size and number of defects were least in Ar33%+He67% mixture. Higher Helium gas ratio resulted less defects in the radiographic test.
- 3) The tensile strength was not affected greatly from shielding gas mixing ratio, heat input, yield strength and elongation were not affected from heat input. But, the higher yield strength and elongation were obtained with the higher Helium gas mixing ratio.
- 4) The Charpy absorbed energy level was lowest in weld metal, and it increased in order of fusion line, base metal and HAZ. Ar33%+He67% mixture resulted the best toughness and it can be consider the more Helium gas results the higher absorption energy. The energy increased with the temperature from +25°C to -85°C but it decreased at -196°C.

# 제 1 장 서 론

## 제1절 연구배경 및 목적

알루미늄 합금은 비중이 철의 1/3정도로 매우 가벼우나 강도는 철과 대등하고 가공 성형성, 내구성 및 경제성 들이 우수하여 유망한 대체 재료로 주목받으며 여러 분야에 걸쳐 다양하게 사용되어지고 있다<sup>1~2)</sup>.

일본 자동차 업계의 소재 사용비율을 예로 보면<sup>3)</sup>, 1989년을 기준으로 철은 73%, 수지8%, 알루미늄은 5%정도이었지만 2000년에는 철이 20%로 감소한 반면 수지는 26%, 알루미늄은 35% 정도로 크게 증가된 것으로 보고되고 있다. 이러한 추세와 함께 국내 알루미늄 수요 또한 더욱 증가될 것으로 예측된다.

알루미늄 합금 Al-Mg계(5000 시리즈)는 알루미늄(Al)에 마그네슘(Mg)을 단독으로 혹은 망간(Mn)과 함께 첨가시켜 강도를 크게 향상시킨 재료이며, 내식성 및 용접성이 우수한 점 등의 많은 장점이 있다. 따라서 용접 구조용합금으로 뿐만 아니라 저온 저장용기에도 광범위하게 사용되어가고 있는 추세이다<sup>4)</sup>.

이 Al-Mg계 알루미늄합금 중에서 Al5083-O재는 약 4.5%의 Mg을 함유하고 있는 대표적인 용접구조용 합금으로서 비열처리합금 중에서는 강도가 높고 저온취성 등이 우수하므로 액화천연가스(LNG; Liquefied Natural Gas) 수송·보관용 탱크, 선반, 자동차 및 항공기 등에 사용된다<sup>5)</sup>.

특히, 세계 에너지 자원의 고갈과 공급 불안정 문제를 해소하기 위한 대체 에너지원으로서 액화천연가스는 저공해, 안전성, 경제성 및 편리성 등의 여러 면에서 장점을 가지고 있으므로 급격한 수요 증대를 가져오게 되었으며, 이에 따른 LNG 수송선, 저저장탱크, 공급라인 등 공급시설의 수요가 급속히 커지고 있으며<sup>6)</sup>, LNG 수송선 및 저저장용기 제작 산업도 급속히 성장하고 있다.

국내에서 건조중인 LNG 저저장탱크는 크게 Moss방식과 Membrane 방식으로 구분된다. Moss방식의 탱크 재료로서는 9% Ni강 또는 Al5083-O재를 주로 사용하며,

최근의 건조실적을 보면 취성파괴의 방지가 더욱 용이한 후자를 사용하는 경향이 두드러지고 있다<sup>7)</sup>.

알루미늄 합금의 용접과 관련된 연구동향을 살펴보면 다음과 같다.

비드형상과 용접공정 변수와의 상관관계에 관한 최근의 연구로서 GMA(Gas Metal Arc)용접 공정 중 용접변수들이 용접폭에 미치는 영향에 관한 연구<sup>8)</sup>, 최적의 용접비드 형상을 예측하기 위한 수학적 모델 개발에 관한 연구<sup>9)</sup>, 용접 아크 및 용융 풀의 유동을 고려한 용접부의 수치해석에 관한 연구<sup>10)</sup>, 그리고 박판 GMA용접에서 단락주파수를 이용한 이면비드 제어에 관한 연구<sup>11)</sup> 등이 있다.

알루미늄 합금 및 용접부의 기계적 성질에 대한 연구로서는 기공의 분포정도 및 분포량이 인장강도에 미치는 영향에 대한 연구<sup>12)</sup>, 저온하에서 용접부의 인장강도 특성에 대한 연구<sup>13~14)</sup> 및 보호가스 혼합비율이 기계적성질에 미치는 영향에 대한 연구<sup>15~16)</sup> 등을 들 수 있다.

용접부의 충격인성에 대한 일반적인 연구로는 미세조직과 용접 입열량이 용접부의 인성에 미치는 영향에 대한 연구<sup>17)</sup>, 스테인리스강 용접부의 저온 충격인성에 관한 연구<sup>18)</sup> 및 동적파괴인성에 영향을 미치는 인자들에 대한 연구<sup>19)</sup> 등이 있다.

일반적으로 알루미늄 합금의 용접부는 모재와 용접봉이 완전히 혼합된 지역으로 주조조직을 형성하는 용융금속(weld metal), 용융부와 열영향부의 중간지역으로서 액상선과 고상선 온도사이로 가열된 지역인 부분용융부(partially melted zone), 모재의 조성과 가열최고온도 및 시효정도에 따라 다르게 구분되는 열영향부(heat affected zone, HAZ) 및 용접열에 의해 조직적 변화가 전혀 일어나지 않는 모재(unaffected base metal) 4지역으로 구분된다<sup>20)</sup>. 이 지역들은 모재의 조성, 가열 최고온도 등에 따라 다르게 구분되며, 결함발생 및 가열 온도 등에 의하여 낮은 강도 및 연성을 가지는 부위가 나타날 수 있다. 또한, 알루미늄 합금 용접시 발생하는 가장 큰 문제점으로는 고온균열과 기공을 들 수 있으며, 이러한 결함들은 용접부의 강도를 저하시키는 원인으로 그 방지는 중요한 문제가 되고 있다<sup>21)</sup>.

알루미늄 합금의 GMA용접 시 사용되는 보호가스로서는 Argon(Ar), Helium(He) 및 탄산가스(CO<sub>2</sub>) 등이 있으며, 국내 조선소에서 Moss방식 LNG 저장탱크 제작 용

접에 주로 사용되는 보호가스로서는 Ar과 He의 혼합가스를 사용한다.

Ar과 He은 불활성이므로 보호가스로 자주 사용되는 가스이나 이들은 밀도, 열전도, 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 아래 보기 자세에서 용융금속을 보호한다는 관점에서 보면 Ar가스가 보다 효율적인데, He가스로서 같은 정도의 보호효과를 얻으려면 2~3배 정도의 유량이 필요하게 된다. 또한, Ar 가스는 열 전도성이 낮아서 에너지가 플라즈마 중앙부에 집중되어 종 모양의 비드를 만드는 반면, He가스는 열전도성이 높기 때문에 에너지가 아크 내에 균일하게 분산되어 타원형의 비드 형상을 가지게 된다<sup>22)</sup>. 그리고 He의 이온화에너지가 Ar보다 높기 때문에 용접전압에 스패터가 많이 발생하고 비드 외관이 거칠어진다는 단점이 있다. 따라서 Ar과 He가스를 혼합해서 사용하게 되면 두 가지 가스의 장점을 모두 얻을 수 있다<sup>23)</sup>. 반면, 고가(高價)의 He이 다량 사용되면 용접비용이 증가하여 원가가 높아지는 원인이 된다. 따라서 재료의 용접품질을 높이고 용접비용을 절감하기 위한 적절한 혼합비를 선정하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 알루미늄합금 중에서도 최근 크게 주목을 받으며 저온용기 등에 많이 사용되고 있는 Al5083-O재에 대한 용접특성을 고려하여 저비용 고효율의 용접조건을 찾기 위한 실험을 수행하였다. 불활성가스는 Ar과 He의 혼합비율을 Ar100%+He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+He50% 및 Ar33%+He67%의 4종류로 분류하여 GMA용접을 실시한 후 용착금속부, 용접선 및 용접선으로부터 2mm떨어진 열영향부 시험편에 노치를 가공하여, 용접부 특성을 면밀히 파악하기 위한 시험을 수행하였다. 시험온도를 +25°C, -30°C, -85°C 및 -196°C로 상온에서부터 극저온까지 단계적으로 낮추어가며 인장시험, 충격시험 및 저온시험 등을 실시하여 불활성가스의 혼합 비율 및 시험온도에 따른 강도를 비교·분석하였다.

## 제2절 연구방법 및 내용

본 연구에서는 현재 국내 조선소에서 LNG 저장 탱크 재료로 사용되고 있는 Al5083-O재를 대상으로 Ar과 He의 불활성가스 혼합비를 Ar100%+He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+He50% 및 Ar33%+He67%의 4종류로 분류하여 GMA용접을 실시한 후 용접부를 용착금속(weld metal), 용접선(fusion line), 열영향부(HAZ) 및 모재(base metal)부로 나누어 강도를 평가하였다.

또한 본 연구에서 사용한 재료가 주로 저온에 사용되므로 시험온도를 +25°C, -30°C, -85°C 및 -196°C로 상온에서부터 극저온까지 단계적으로 낮추어가며 실시하였다.

저온시험 중 -30°C 및 -85°C의 경우 코일형 동판을 내부에 삽입하여 자체 제작한 챔버에 석유에테르를 채운 뒤 액체질소를 동판의 한쪽 끝에서 주입하여 다른 끝을 통해 대기 중으로 배출하는 방식을 사용하였으므로 냉매인 액체질소가 석유에테르와 직접적인 접촉 없이 동파이프를 통해 간접적으로 설정온도에 도달할 수 있었다. 이 때 자동 온도조절을 위해 씨모커플, 온도조절장치 및 솔레노이드 밸브가 장치되었으며, 석유에테르의 균일한 온도분포 및 원활한 열전달을 위해 챔버 내부에 소형 교반기를 설치하였다. 따라서 온도는 솔레노이드 밸브의 자동 개폐에 의해 약 ±1.5°C의 오차범위 내에서 일정하게 유지되었으며, 챔버 내의 시험편은 설정온도에서 약 30분간 유지시킨 후 실험을 실시하였다.

한편, 극저온인 -196°C 시험은 석유에테르의 빙점이 약 -116°C 정도이므로 이를 사용하지 않고 액체질소 자체를 시험편이 장착된 챔버 내에 직접 주입하는 방식을택하였다. 이 때 씨모커플은 장착된 시험편의 윗면 보다 높게 설치하여 솔레노이드 밸브 및 자동온도조절장치에 의해 액체질소가 자동으로 보충되어 시험편은 항상 액체질소에 잠긴 상태로 실험할 수 있었으므로 온도편차는 거의 0(zero)에 가깝다고 할 수 있다.

본 연구는 불활성가스 혼합비율 및 시험온도가 용접부의 강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 인장시험, 충격시험 및 저온실험 등을 수행하여 결합의 발생이 적

으면서도 강도가 우수한 저비용 고효율의 GMA 용접을 고찰하고자 다음과 같이 논문을 구성하였다.

제 1 장은 연구배경 및 목적과 연구방법을, 제 2 장은 본 연구와 관련된 LNG 운반선에 사용된 알루미늄 합금의 용접성을 고찰하고, 용접결합 원인과 대책 및 기계적 성질에 영향을 미치는 인자 등에 대해서 기술하였고, 제 3 장에서는 시험편, 실험장치, 실험조건 및 실험방법 등에 관하여 기술하였다.

제 4 장은 용접부 형상 및 방사선 투과검사, 인장시험, 충격시험, 저온실험을 통하여 다음과 같은 내용을 분석·고찰하였다.

불활성가스의 혼합비에 따른 비드 형상을 고찰하고자 각각의 용접조건에서 얻어진 용접부의 비드폭, 깊이, 높이 및 희석률(dilution)을 고찰하였으며, 방사선 투과검사를 KS D 0242에 준하여 실시하여 기공검사 및 등급평가를 실시하였다. 또한 보호가스의 혼합비율 및 시험온도에 따른 항복응력, 인장응력 및 연신율 등의 기계적 성질은 인장시험을 통하여, 용접부의 동적흡수에너지의 변화는 계장화 살피충격시험을 통해 고찰하였다.

제 5 장에서는 본 논문의 결론을 기술하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 제1절 알루미늄 합금의 기계적 특성

알루미늄 합금은 Table 2-1과 같이 분류되며, 선박용 알루미늄의 화학적 조성은 Table 2-2와 같다<sup>24)~26)</sup>.

Table 2-3은 알루미늄 합금의 물리적 성질을 나타내고 있다<sup>27),28)</sup>.

Table 2-1 Division of the aluminum alloy

	Main components	Examples	Remark
Non-heat treated type	Pure Al	1050, 1100, 1200	
	Al-Mn	3003, 3203	
	Al-Si	4032	
	Al-Mg-Mn	5052, 5083, 5086	
Heat treated type	Al-Cu-Mg	2014, 2017, 2024	
	Al-Mg-Si	6061, 6063, 6N01	
	Al-Zn-Mg	7003, 7075, 7N01	

#### ※ 합금 번호의 구성

- i . 첫째자리 숫자 1은 순수한 알루미늄을, 2~9는 알루미늄 합금에 대해서는 주요 첨가 원소에 따라 주요 합금계를 의미한다.
- ii . 둘째자리수 0은 기본합금을, 1~9는 기본합금의 변화를, N은 독자적으로 개발한 합금을 의미한다.
- iii . 셋째자리수와 넷째자리수는 기본합금 이외의 원소에 따라 분류된다.
- iv . 위의 숫자에 이어, 후처리에 따라 다음과 같이 표시한다.

F : (As fabricated) 제조한 그대로    H : (Work Hardened) 냉간가공 처리  
O : (Annealing) 풀림처리                      T : (Solution Treatment) 용체화 열처리

**Table 2-2 Chemical compositions of aluminum alloys for ship building**

Alloy	Chemical compositions						Remark
	Mg	Si	Mn	Cr	Cu	Al	
5052	2.5	–	–	0.25	–	REM	JIS
5083	4.45	–	0.7	0.15	–	REM	
5086	4.0	–	–	0.15	–	REM	
5454	2.7	–	0.75	0.13	–	REM	
5456	5.2	–	0.75	0.13	–	REM	
6061	1.0	0.6	–	0.20	0.28	REM	
6N01	0.6	0.65	–	–	–	REM	
6082	0.9	1.0	0.7	–	–	REM	

**Table 2-3 Physical properties of the aluminum alloy**

Properties	Aluminum alloy	Al	Mg	Al-Mg (Al 5083-O)
Melting point (°C)	660	650	595~640	
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.70	1.74	2.66	
Latent heat (cal/g)	93	–	93	
Average specific heat (cal/g°C)	0.22	–	0.23	
Thermal conductivity (cal/cm°C)	0.53	0.38	0.31	
Young's modulus (10 <sup>3</sup> kg/mm <sup>2</sup> )	6.90	–	7.0	
Coefficient of linear expansion (10 <sup>-6</sup> /°C)	23.8	15	25	
Electric resistance (μΩ cm)	2.65	3.5	2.65	
Thermal conduct rate (%)	62	–	62	
Melting point of oxidized substance (°C)	2,050	–	–	
Oxidized substance	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO	

LNG 수송용 구형 탱크에 사용되는 재료 Al5083-O는 Al-Mg 계열의 풀림처리된 비열처리 타입으로서 액화천연가스 수송 또는 보관용 탱크와 여객선의 선각에도 사용되는 등 용도가 다양하다.

액화천연가스(LNG)의 주성분은 메탄 ( $\text{CH}_4$ )으로 비점이  $-162^{\circ}\text{C}$ 이기 때문에 대기압하에서  $-162^{\circ}\text{C}$ 로 낮추면 천연가스는 액화하게 되고 체적은 1/600으로 감소하게 된다<sup>24)</sup>. 이와 같이 대기압 상태의 극 저온화물을 보관하는 LNG 탱크의 내부는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 극저온인 환경하에서도 충분한 기계적 성질을 갖는 재료로 구성된다. LNG선에서는 화물 탱크의 설계 온도가 낮다고 하는 것이 가장 큰 특징이므로 화물 탱크의 저온대책이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.

따라서 LNG선의 화물 탱크 재료로서 요구되는 성질은<sup>29)</sup> 극저온에서 충분한 강도와 인성 및 내식성, 성형가공성 그리고 용접성이 양호해야 한다. 이러한 요구를 만족하는 Moss형 탱크에서는 Al-Mg합금 (Al5083-O)재료가 가장 폭넓게 이용되고 있는 실정이다.

Table 2-4는 이들 3종류의 형식에서의 몇 가지 특성들을 비교하여 나타낸 것이다<sup>25)</sup>.

설계온도(분위기 온도와 관련)에 따라 사용되는 저온용 재료는 IMO(국제 해사협회)의 IGC Code에 잘 나타나 있으며 요약하면 Table 2-5와 같다<sup>30)</sup>. 여기서 알루미늄을 제외하고는 모두 철강 재료임을 알 수 있다.

Table 2-6은 현재 사용 가능한 저온재료별 용접 방법을 나타내고 있다.

**Table 2-4 LNG ship tank types**

Tank	Membrane type		Moss type
	Gaz Transport	Technigaz	
Type	Invar Membrane	Ripple Membrane	Ball shape independent tank
Properties	Heat expansion by using the Invar	Heat expansion by deformation of Ripple	Possibility of stress analysis by simple shape
Material	Invar (36%Ni)	Austenite stainless	Al 5083-O

**Table 2-5 Using materials according to the designed temperature and welding methods**

Designed Temp. (DT, °C)	Materials	Impact test temperature	Remark
-55≤DT<0	C-Mn	$t \leq 25\text{mm} : -5^\circ\text{C}$ $25 < t \leq 30\text{mm} : -10^\circ\text{C}$ $30 < t \leq 35\text{mm} : -15^\circ\text{C}$	LPG tank
-60≤DT<-55	1.5% Ni	-65°C	
-65≤DT<-60	2.25% Ni	-70°C	
-90≤DT<-65	3.5% Ni	-95°C	
-105≤DT<-90	5% Ni	-110°C	
-165≤DT<-105	9% Ni	-196°C	Ethylene storage
	Austenite stainless steel	-196°C	STS304(L), 316(L), 321 and 347 for LNG tank
	Al alloy		Al 5083 for LNG tank
	36% Ni		Invar steel

**Table 2-6 Welding method for the materials**

Design Temperature (DT, °C)	Materials	Welding method	Remark
-55≤DT<0	C-Mn	SAW Multipass FCAW( $t \leq 30\text{mm}$ ) SMAW, Gravity	
-60≤DT<-55	1.5% Ni	SAW Multipass FCAW( $t \leq 25\text{mm}$ ) GMAW SMAW, Gravity	
-65≤DT<-60	2.25% Ni	SAW Multipass GMAW SMAW	
-90≤DT<-65	3.5% Ni	SAW Multipass (GMAW) GTAW SMAW	
-105≤DT<-90	5% Ni	SAW Multipass GTAW SMAW	
-165≤DT<-105	9% Ni	SAW Multipass GTAW SMAW	LNG storage Ethylene storage
	Austenite stainless steel	SAW Multipass FCAW SMAW	304(L), 316(L), 321, 347 and LNG ship
	Al Alloy	GMAW GTAW	5083, LNG ship
	36% Ni	GTAW	Invar

## 제2절 GMA용접 특성

### 1. GMA용접

GMA 용접은 일반적으로 MIG(Metal Inert Gas)용접으로 더 잘 알려진 방법으로 소모전극용 와이어를 사용한다. GMA 용접은 모재와 연속적으로 공급되는 소모전극용 와이어간에 발생한 아크열에 의해서 용접이 이루어지고 용접봉 홀더를 통해서 보호가스를 흘려 보냄으로써 용접봉, 용융지, 아크와 모재의 인접한 지역에 공기의 오염을 막아 용착금속을 보호한다. 그 원리는 Fig. 2-1과 같다.

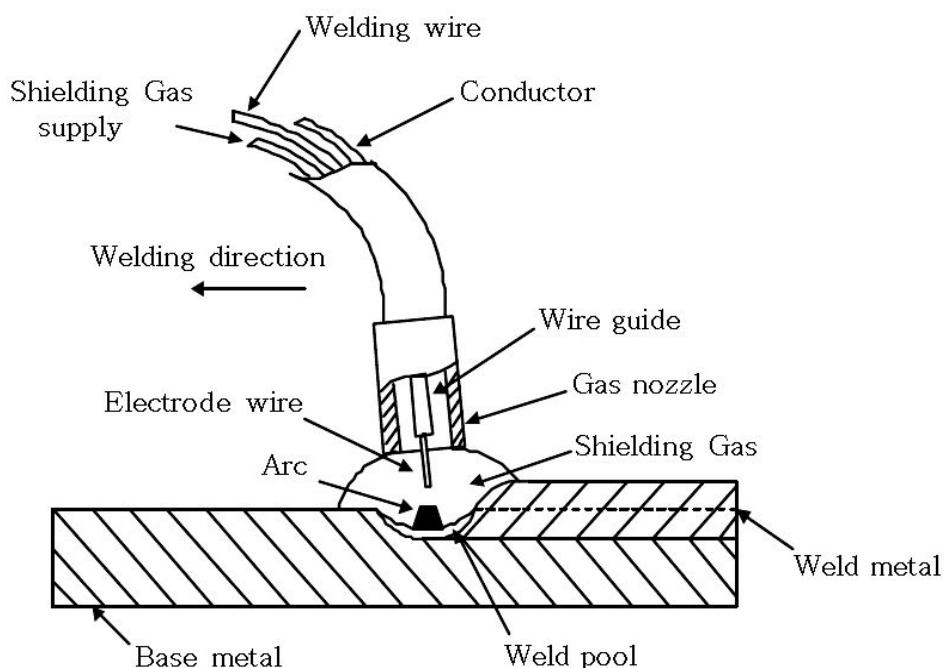


Fig. 2-1 GMA welding method diagram

## 2. 금속이행

GMA 용접방법은 금속 이행(metal transfer) 형태에 따라 분무형 이행(spray transfer), 입적 이행(globular transfer), 단락형 이행(short-circuit transfer), 맥동 아크 이행(pulsed arc transfer) 등으로 나뉘어진다<sup>31)</sup>.

분무형 이행은 와이어 전극의 입자가 매우 작게 용융되어, 와이어 끝에서 아크의 플라즈마 기류를 통하여 모재로 신속히 투사된다. 이때 와이어 용융방울(용적)은 Fig. 2-2 (a)와 같이 전극의 직경보다 작거나 같다. 용접 시 용융방울의 입자는 작기 때문에 전류의 흐름을 방해하지 않고, 지속적인 분무형으로 이행이 이루어질 수 있다. 따라서 분무형 이행은 고전류 밀도를 요하게 되며, 고전류 밀도에서 아크는 조용하고 안정된 불꽃기둥을 형성한다.

입적 이행은 천이 이행(분무형 이행과 입적이행 사이의 경계 전류)이하에서만 발생되며, 저전류 범위에서는 초당 적은 수의 용융방울이 이행하지만 고전류 범위에서는 작고 많은 입자들이 이행한다. 입적이행 시 용융방울의 크기가 Fig. 2-2 (b)와 같이 원래 용접봉 직경보다 2~3배 크게 되었을 때 용접봉으로부터 분리되어 아크를 통해 모재로 이행되며, 아크의 물리적 성질 때문에 아크는 불규칙하고 회전운동을 하게 된다. 이와 같은 현상은 입적 이행 시 전극과 모재 사이의 방전을 방해하여 아크가 커지기도 하며 재발생하기도 한다. 이러한 결과로 아크는 불안정하고, 용입은 얇으며 많은 스파터(spatter)가 발생한다.

단락형 이행은 Fig. 2-3의 (a)~(e)와 같이 용융와이어가 모재로 전달될 때 용융방울은 와이어 끝에서 분리되기 전에 용융풀과 접촉된다. 이때의 전기적 회로상태를 단락이라고 하며 아크는 소멸된다. 전자기적 핀치효과(pinch effect)에 의하여 와이어의 용융방울은 수축되어 모재로 전달되면 아크는 재발생한다. 단락의 횟수는 미리 설정한 조건에 따라 다르지만 보통 20~200회/sec 정도 이행하는데 이와 같은 연속적인 이동형태와 그 때의 전류와 전압은 Fig. 2-4와 같다. 용접봉이 용융지에 접촉할 때 전류는 증가하고, 아크가 재발생될 때까지 계속 증가하는데 전류 증가량은 용가재가 모재로 이동되기 전까지 용접봉 끝이 녹을 만큼 충분해야 한다. 그러

나 전류 증가량이 너무 많아지면 용접봉으로부터 용융금속이 모재로 이동하면서 스파터를 발생시키므로 전원 속의 인덕턴스 조정으로 전류 증가량을 조정한다. 전원의 개로 전압(open circuit voltage)은 용접 중 아크가 연속적으로 발생되지 않도록 충분히 낮아야 한다. 단락형 이행 형태는 단락 중에 용융금속의 이동이 이루어지므로 보호가스에 의한 영향은 거의 받지 않는다.

맥동아크 이행 형태는 최근에 개발된 형태로서 분무형 이행 전류와 입적 이행 전류범위 사이의 맥동전류에 의해 이루어진다. Fig. 2-5와 같이 용접봉으로부터 모재로의 금속 이동 형태는 일정한 맥동주기에 따라 발생하게 되며 맥동전류의 최대값은 분무형 전류의 범위이고 최소값은 입적 이행의 전류범위이다. 맥동전류 주기 동안 용접금속은 아크를 통해서 분무형태로 용접 이음부에 용착되는데 일반적인 분무형 이동형태와 같이 연속적으로 이행하는 것이 아니라 전원으로부터 공급되는 맥동전류의 주기에 따라 이행한다. 이와 같이 일반적인 분무형 용접에서 필요로 하는 전류보다 작은 평균 전류값에서 분무형으로 이행이 이루어진다.

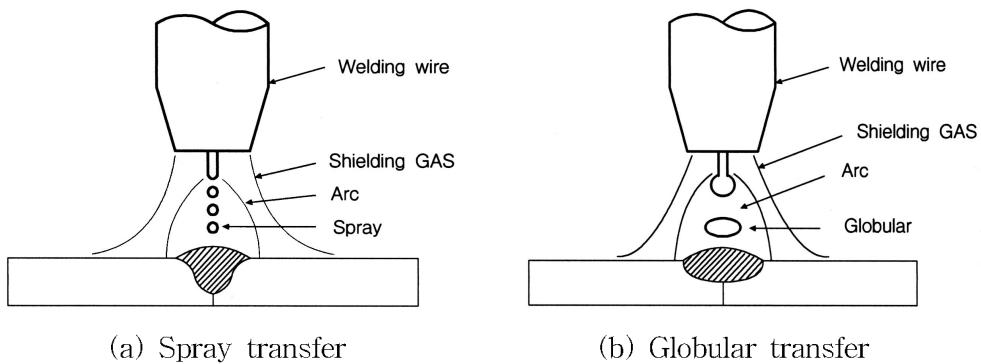


Fig. 2-2 Spray and globular transfer

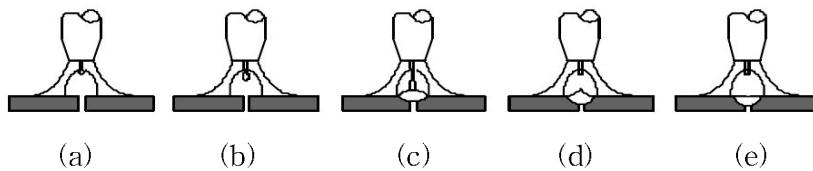


Fig. 2-3 Short-circuit transfer

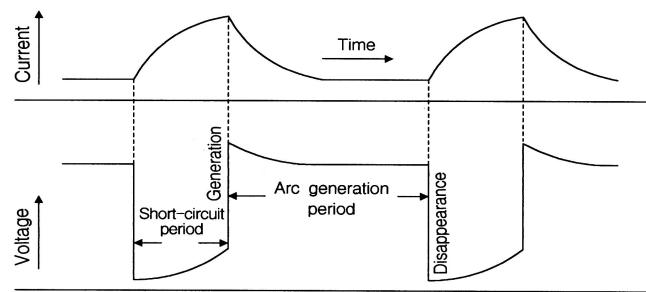


Fig. 2-4 Relations of the complete short-circuit cycle,  
voltage and current

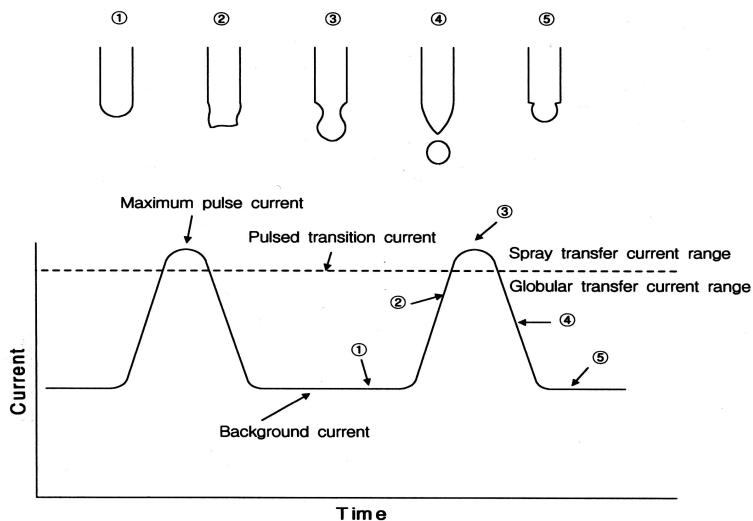


Fig. 2-5 Output current and transfer of pulse current

### 3. 용접공정 변수

일반적으로 용접의 품질에 영향을 미치는 변수는 용접전류, 아크전압, 이송속도, 보호가스, 용접자세 및 토치 겨냥 각도, 와이어의 직경, 표면의 산화청정 정도 등이 있으나 이 중에서 용접품질에 가장 영향을 많이 미치는 변수는 용접전류, 아크전압, 이송속도 등이다<sup>32)</sup>.

용접전류는 용접와이어의 연소율, 용융깊이, 모재의 용융량을 변화시킨다. 만일 전류량이 너무 많으면 용융깊이는 아주 길어지고, 또한 부재를 관통시켜 용락을 발생시키며 높은 열로 인한 인접한 강판의 열영향부를 크게 만든다. 또한 너무 많은 전류량은 전력의 소모 및 과도한 용접 금속의 덧붙이로 용접봉의 과다한 소모를 가져오게 되며, 반대로 전류량이 너무 적으면 작업물에 용입 및 덧붙이가 충분치 못하게 된다<sup>33)</sup>.

아크전압은 용접와이어의 텁과 용융된 용접금속 표면 사이의 전기적 전압차이다. 아크전압은 용접와이어 및 용융된 용접금속사이의 간격의 길이로 변하는데 간격이 커지면 전압도 높아지고, 간격이 작아지면 용접전압도 낮아진다. 용접전압은 용접 와이어의 용착량에 약간 영향을 미치며, 용접부의 외관 및 용접 덧붙이를 결정한다. 즉, 높은 전압은 폭이 넓고 평평한 비드외관을 형성하고, 낮은 전압보다 용입을 얇게 만든다. 그러나 용착금속의 용착속도는 주로 용접전류에 의하여 결정된다<sup>34)</sup>.

이송속도는 아크가 용접 이음부를 따라 움직이는 속도로서 단위는 보통 cm/min이다. 일정한 전류밀도에서 이송속도가 감소되면 용접 입열이 많아져서 용입이 깊어지며, 용접부 단위 길이당 용착금속량이 증가하여 비드높이와 폭이 커진다. 만약 속도가 너무 느리면 필요 없는 표면 덧살이 많아져서 용융불량과 용입이 깊어지고 기공, 슬래그 혼입과 비드외관이 불규칙하게 된다<sup>35)</sup>.

### 제3절 용접 보호가스의 특성

Ar(Argon)은 현재 GTA 용접 방법에서 현재 가장 많이 사용되는 불활성 가스이며, 공기보다 큰 밀도를 가져 높은 보호효과를 가지며 아크 안정성도 우수하다. Ar의 이온화 에너지는 15.8eV로써 낮아서 아크발생이 쉽고 아크 기둥은 원추형을 나타낸다. GMA 용접 방법에서 용입은 비드 높이가 높은 유두형 형태를 보이는데 그 이유는 낮은 아크 에너지, 낮은 입열, 빠른 냉각속도로 높은 표면 에너지가 발생하기 때문이다.

He(Helium)은 화학적으로 불활성이나 매우 낮은 밀도와 높은 가격이라는 단점이 있다. 따라서 이러한 점 때문에 사용이 제한되어 왔었다. 그리고 이온화 에너지가 24seV로써 높아서 GTA용접시 아크발생이 다소 어렵고 Ar에 비하여 전압이 높아서 입열도 높게 된다. 비드의 형태는 높이가 적고 넓게 퍼지는 형태를 보인다. 용융성이 매우 좋으며 입열이 높으므로 용접 속도가 매우 빠르다. 따라서 열전도율이 높은 알루미늄과 같은 비철금속의 용접에 많이 사용된다.

보호가스의 역할<sup>36)</sup>은 크게 용융금속의 보호, 청정효과, 아크의 안정성이며, 비드 형상 및 용접부의 조직에 영향을 미친다. 보호가스가 GTA 용접에서는 텅스텐 용접전극과 용융을 공기에 의한 오염으로부터 막아주며, GMA 용접에서는 용접재와 용적을 공기로부터 보호한다. 산소와 질소는 용접시 아크열에 의하여 대기 중에 있던 가스가 해리 되면서 유입되고, 수소는 물이나 탄화수소 등이 아크열에 의하여 해리 되면서 용착 금속에 유입되어 용접부의 성질을 나쁘게 한다. 또한, 산소는 거의 모든 금속과 반응하고 산화물을 형성하여 용착금속 내에 존재함으로써 용접부의 성질을 나쁘게 한다. 질소는 반응성이 높은 Ti, Ta, V, Nb과 반응하여 불용성 화합물을 형성하고 Fe, Mn, Cr, W등과 반응하여 용해되는 화합물 등을 형성한다. 그리고 수소는 모든 금속 내에 용해되는데 Ti, Zr 및 Nb와 반응하여 화합물을 형성하기 때문에 나쁜 영향을 미치게 된다.

GMA 용접의 경우 용융금속은 많은 양의 수소와 산소를 함유하는데 온도가 낮아짐에 따라 용해도가 감소되므로 대부분 증발하지만 완전히 증발하지 못한 것은

용착금속에 남아서 기공을 형성한다.

일반적으로 알루미늄 합금에서는 주로 수소가 기공을 형성하고, 일반강에서는 질소가 형성하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 현상은 용착금속의 화학 성분과 보호용 가스의 성분에 따라서 크게 달라진다.

산화 현상은 일반적으로 산화물을 용착금속에 남게 하므로 좋지 않으나 GMA 용접에서는 약간의 산화물을 용착금속 응고시 핵 생성을 도울 수 있지만 특정 값 이상이 되면 용접부의 성질을 나쁘게 한다. 용접용 보호가스의 흐름에 있어서 요동이 있으면 용착 금속의 오염이 커져서 용착 금속의 성질을 나쁘게 한다.

Table 2-7은 대표적인 보호가스의 밀도와 이온화 에너지를 나타내고 있는데 일반적으로 밀도가 높은 Ar은 바람에 의한 영향을 적게 받고 He은 밀도가 낮아서 바람의 영향을 크게 받는다. GTA 용접방법에서 아크의 안정성은 이온화 에너지가 낮으면 용접시 아크가 안정화되고 아크의 발생도 매우 쉽다. 그리고 플라즈마 기둥의 열전도율에 따라서 플라즈마 기둥의 크기가 달라진다. 즉, 열전도도가 큰 경우는 플라즈마 코어 직경을 작게 만들어 전압의 상승효과를 가져온다. 또한 아크 루트의 안정성은 보호가스에 크게 좌우되는데 산화성 가스를 사용할 경우 안정성이 증가한다.

용접 비드 모양은 Ar에 He을 첨가할 경우 아크에너지가 증가하여 전체적인 용융역을 증가시킨다. 그러나 회석량과 용입의 형태는 용접재와 보호가스에 따라 결정된다. 예를 들어 Ar만을 사용할 경우 용접 비드의 형상은 유두형태의 용입을 나타내는 반면, He을 혼합하면 용입은 넓어지며 동시에 깊게 된다.

Table 2-7 Physical properties of the shielding gas

Elements	First Ionization Potential (Electron Volts)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Argon	15.75	1.784
Helium	24.58	0.178
Carbon dioxide		1.770

Ar은 알루미늄과 그 합금의 주요 보호가스이지만 모재의 높은 열전도로 인하여 용입 불량과 거칠은 비드 외관을 형성하기 때문에 사용하기 어렵다. 따라서 He을 많이 첨가하면 높은 열과 용융금속의 높은 유동성으로 개선할 수 있고, 유동성으로 기공 발생도 크게 감소시킬 수 있다.

보호가스로 Ar만 사용시 용입 형태가 유두모양이 되어 용합불량의 가능성성이 많기 때문에, He을 혼합함으로서 용입 폭이 넓어지고 용합 불량을 방지하기 쉽고, 용입을 증가시킬 수 있어 용접시 용접 패스 수를 감소시켜 작업능률을 높일 수 있으나 He은 고가이므로 용접비용이 증가하고 아크의 생성이 어렵기 때문에 Ar과 He의 비를 적당히 조절함으로서 용접품질을 향상시키고 비용을 최소화할 수 있는 혼합비를 도출하는 것이 필요하다.

Table 2-8은 재질에 따른 GMA 용접시 사용되는 일반적인 보호가스를 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 현재 가장 많이 사용되는 용접용 보호가스는 Ar이다. 그리고 열전도도가 높은 재료의 용접시 He이 첨가된 혼합 보호가스가 사용됨을 알 수 있다.

Table 2-8 Shielding gas for GMA

Materials	Shielding gas							
	Ar	He	Ar/He	Ar- > 0~5 CO <sub>2</sub> >0~3O <sub>2</sub>	Ar/He>11/2 ~ 2CO <sub>2</sub>	Ar>5~25% CO <sub>2</sub> >3~1002	Ar>5~50% CO <sub>2</sub> >B~15 O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
C-Mn steel				△		○	△	
Alloy steel				○	△	△		○
Stainless steel	△		△	○	○			
Aluminum	○	△	○					
Copper	○		○					
Nickel alloy	○							
Titanium	○							

## 제 3 장 실 험

### 제1절 시험재료 및 GMA용접 조건

일반적으로 Al-Mg계 합금은 용접에 대한 내균열성이 큰 구조용 재료이므로 용접할 때 특별히 부적당한 시공법으로 용접하지 않는 한, 균열발생은 실제로 큰 문제가 되지 않는다고 알려져 있다<sup>37)</sup>. 그러나 용접금속에 균열의 발생을 조장하는 Si와 같은 원소가 고용한도 이상으로 첨가될 경우는 Mg<sub>2</sub>Si라는 결정이 입계에 편석하여 내고온균열성을 저해한다<sup>38~40)</sup>. 그러므로 이 합금의 용접에는 Si가 함유된 용접와이어의 사용을 삼가는 것이 좋고, 반드시 씨야할 경우는 결정 미세화 원소를 함유하고 있는 용접와이어를 선택하는 것이 바람직하며, 될 수 있는 한 용접와이어의 Mg함량이 모재의 Mg함량보다 높은 것을 사용해야 한다고 하였다<sup>41~42)</sup>.

본 연구에 사용한 시험재료는 소형고속선박과 LNG 저장용기에 많이 사용되고 있는 Al-Mg계 알루미늄 합금 Al5083-O재로서 모재 및 직경 Ø1.2mm 용접선재 Al5083-WY의 화학적 성분은 Table 3-1에, 기계적 성질은 Table 3-2에 각각 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 용접선재의 Si함량이 낮은 반면 Mg함량은 모재보다 높은 와이어를 사용하였으므로 Mg<sub>2</sub>Si 결정 편석에 의한 고온균열 발생은 없었다고 사료된다.

인장시험, 충격시험을 위한 용접은 Fig. 3-1에 도시한 바와 같이 두께 12mm인 판을 루트간격 1mm로 전면 3패스, 후면 1패스로 맞대기 GMA용접을 실시하였다. 이 때 사용한 보호가스는 Ar과 He으로서 혼합비율을 Ar100%+He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+He50% 및 Ar33%+He67%의 4종류로서 He의 혼합량을 증가시켜가며 실시하였다. Photo. 3-1은 용접된 비드의 대표적인 단면형상을 나타내고 있다.

한편, 불활성가스 혼합비가 비드형상에 미치는 영향을 고찰하기 위한 용접은 동일한 두께의 판을 bead on plate로 1패스 실시하였다.

Table 3-3은 시험편 제작을 위한 용접조건으로서 각각의 불활성가스 혼합비 및

페스수에 따른 전압, 전류 및 용접속도를 나타내고 있다. 이 때 He의 혼합량이 증가할수록 전압을 높게 설정한 이유는 Ar의 이온화전위는 약 15.8eV인데 비해 He은 약 24.6eV로서 크게 높으므로 동일한 와이어의 돌출길이에서 He의 혼합량이 증가할수록 순수 Ar보다 높은 전압을 사용하여 스프레이이행을 얻을 수 있기 때문이다<sup>43)</sup>.

Table 3-4는 본 연구의 GMA용접에 사용한 용접기 및 용접방법을 나타내고 있다.

용접된 판재로부터 각각의 시험편의 채취는 (사)한국선급의 규정<sup>44)</sup>에 따라 Fig. 3-2와 같은 방법으로 고루 채취하여 시험의 정확도를 높이고자 하였다.

**Table 3-1 Chemical compositions of base metal and welding wire  
(wt, %)**

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al5083-O (base metal)	0.40	0.40	0.10	0.70	4.45	0.15	0.25	0.14	REM
Al5183-WY (welding wire)	0.10	0.27	0.01	0.58	4.55	0.11	0.06	0.11	REM

**Table 3-2 Mechanical properties of base metal and welding wire  
(Ø1.2mm)**

Materials	Y.S.(kg/mm <sup>2</sup> )	T.S.(kg/mm <sup>2</sup> )	El. (%)	Hv (100g)	E.(kg/mm <sup>2</sup> )
Al5083-O (base metal)	19.0	34.2	14	102	$7.0 \times 10^3$
Al5183-WY (welding wire)	18.6	32.7	14	80	$7.0 \times 10^3$

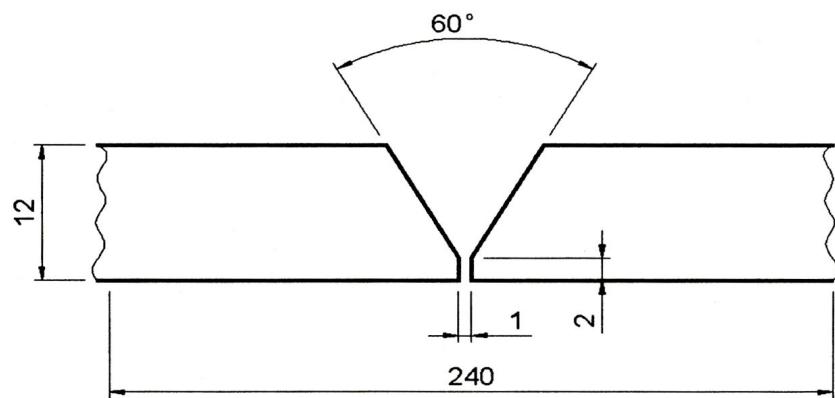


Fig. 3-1 GMA welding specimen

Table 3-3 GMA welding condition

Gas ratio(%) \ conditions	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	220	40
	2	23		
	3	25		
	4	23		
Ar50%+He50%	1	24	220	40
	2	26		
	3	28		
	4	26		
Ar33%+He67%	1	27	220	40
	2	29		
	3	31		
	4	29		

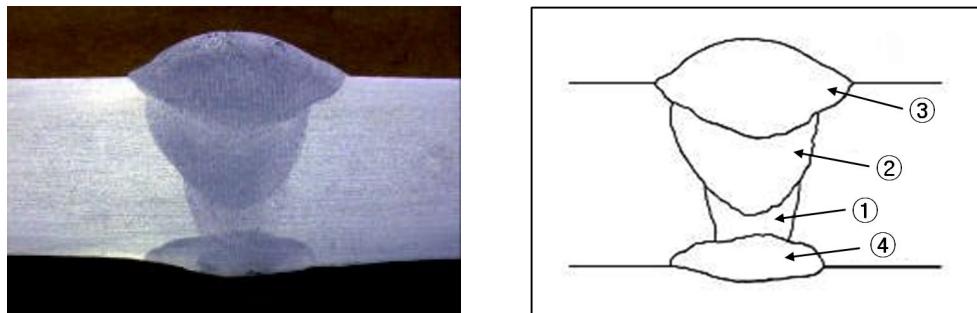


Photo. 3-1 Macro-photograph and schematic diagram of the weld section

Table 3-4 Welder and working condition

Welder	Model	Invert Pulse CAP II	HITACH 350 CAP2 Sumitomo, Japan
	Type and polarity	Type	Invert
		Polarity	DCRP
	Wire supply device	Rolller	2 Roller U-Type
		Wire absorption device	Wire heating (45°C)
		Torch type	air cooling type
Welding conditions	Cleaning		Sus granding Sus wheel brush
	Nozzle diameter	16mm (inner diameter)	
	Stick out	15~20mm	
	Torch angle	Push 10~15°	
	Shield gas flow rate	1 pass	20 ℥ /min
		over 1 pass	25 ℥ /min
	Welding method	Semi-auto	

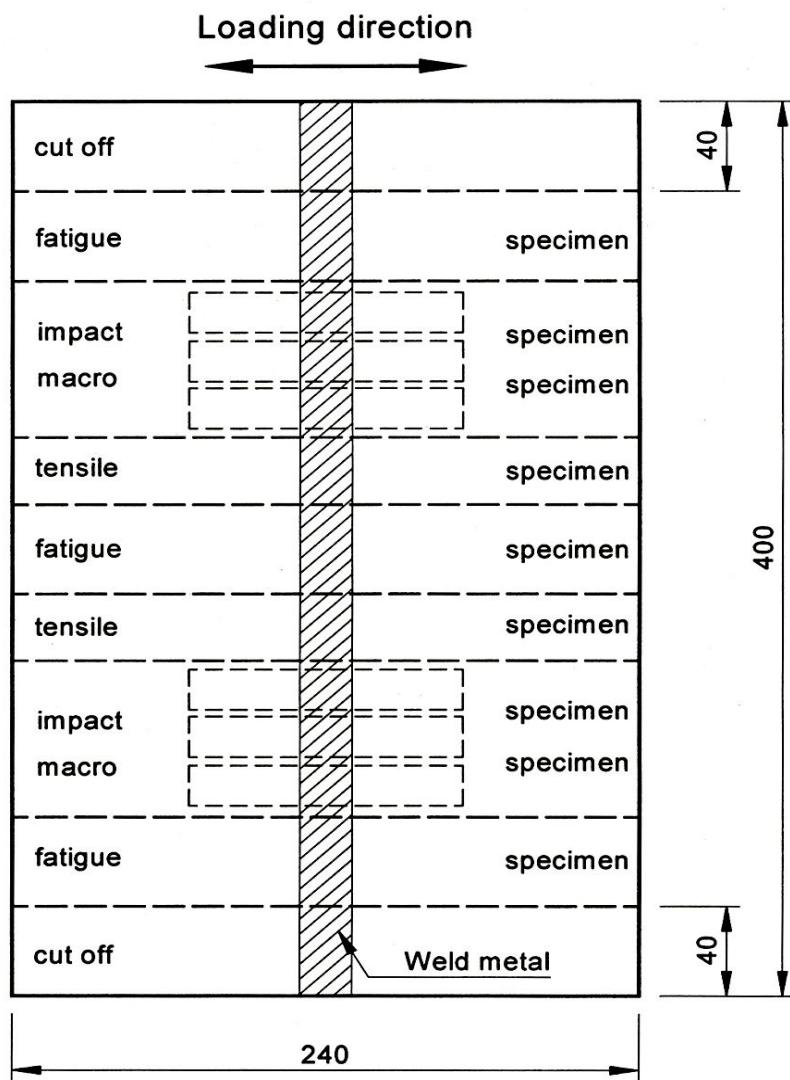


Fig. 3-2 Cutting method of the welded plate for specimen

알루미늄 합금의 표면에는 보통 아주 얇은 층의 알루미늄의 산화막이 형성되는 데 이 막의 용접은 약 2,050°C로 매우 높기 때문에 막이 있는 상태에서 용접을 실시하면 산화막을 포함한 용융 알루미늄이 입상(粒狀)으로 응집되어 서로가 융합을 하여 견전한 용접이 되지 않는다. 이 산화물은  $\text{Al}_2\text{O}_3$  외에도 결정수(結晶水)를 포함하는  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$  또는  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 와 같이 되므로 용접 중에 결정수가 분해되어 수소를 방출하고 이것은 비드의 기공을 만드는 원인이 된다. 특히 Al-Mg 합금에서는 피막이 강하고 두께가 두꺼우며, 이러한 피막의 존재는 너깃의 안정화에 방해되며 전극의 소모가 많아지는 부정적인 영향과 아크용접의 경우 접촉저항의 증가에 의해 용접부 품질이 향상되는 긍정적인 영향이 있는 것으로 알려지고 있으나 좋지 않는 면이 더 큰 것으로 보고<sup>45)</sup>되고 있다.

또한 모재의 표면에 유지(油脂)와 그 밖의 이물질들이 있으면 이들도 분해하여 수소를 발생시키고 기공을 만들며, 분해가 되지 않은 이물질은 함께 섞여서 견전한 용착금속을 얻을 수 없게 된다. 따라서 용접전에 모재의 표면을 매우 청결하게 하여야 한다. 이와 같은 작업을 용접 전처리라고 하며 알루미늄의 용접에 있어서는 다른 금속보다도 이 작업이 매우 중요하다.

알루미늄 합금의 표면에 생성되는 산화피막을 제거하는 방법으로서는 크게 기계적인 방법과 화학적인 방법이 있다. 전자는 그라인더 또는 스테인레스강제 와이어 브러쉬로 강하게 연마하는 방법이며, 후자는 5~10% 가성소다(NaOH) 용액을 약 70°C로 유지하며 30~60초간 침전 후 물로 세척한 다음 약 15% 초산(상온상태)에 약 2분간 침전하고 따뜻한 물로 세척 후 충분히 건조시키는 방법이다. 위의 2가지 방법 중 일반적으로 기계적인 방법이 많이 사용되고 있으며, 이러한 전처리 작업을 될 수록 용접직전에 실시하는 것이 좋다.

또한 알루미늄 합금의 용접변형은 일반 강재에 비하여 매우 크다는 것은 물리적 기계적 성질에서 알 수 있으므로 변형방지를 위한 특별한 주의도 요구된다.

따라서 본 연구에서는 용접 전처리로서 산화피막 및 청결을 위해 스테인리스강제 와이어 브러쉬를 이용하여 연마를 용접 바로 직전에 실시하였으며, 용접변형을 방지하기 위하여 강성이 높은 지그로 용접선 부근을 강하게 구속하여 용접을 실시

하였다. 그리고 용접 후처리로서 응력집중에 의한 균열이 발생하지 않도록 하고, 용접비드 시종단에 결합이나 노치를 그라인더를 이용하여 제거하여 산화피막, 용접변형 및 응력집중에 따른 용접결합을 최소화하도록 하였다.

한편, 용접은 작업장 환경 즉, 온도, 습도 및 풍속 등에 큰 영향을 받으므로 용접시공 시 맑은 날씨를 택하였으며, 그 작업장 환경조건으로서 온도 23°C, 습도 60% 및 풍속 0.6m/sec 이하의 조건에서 실시하였으므로 용접 작업장 환경에 따른 결합발생 또한 없었다고 사료된다.

본 연구는 불활성가스의 혼합비율뿐만 아니라 노치 가공위치에 다른 강도평가를 수행하기 위해 시험편 가공 시 특별한 주의를 하였다. 우선, 용접된 판재로부터 시험편 제작을 위해 적당한 가공여유를 두고 압연방향과 평행하게 채취한 후 노치가 가공될 위치가 시험편 중앙에 위치하도록 확인하기 위해 일반적으로 순수알루미늄, Al-Mg합금 및 Mg-Si합금의 부식에 주로 사용하는 Kellers 용액 [Methanol(25㎖) + Hydrochloric acid(25㎖) + Nitric acid(25㎖) + Hydrofluoric acid(3㎖)]을 사용하여 부식하여 용접부의 비드 형상이 잘 나타나도록 하여 가공하였다.

Fig. 3-3은 Ar만을 100% 사용하여 용접한 시험편의 비드 중앙에서부터 모재쪽으로 0.5mm간격으로 측정한 마이크로비커스 경도값 분포로서 모재부 및 용착금속부의 경도값은 각각 약 77 및 108로서 용착금속부가 약 30정도 높게 나타났다.

Photo. 3-2는 본 연구에서 사용한 Al5083-O 용접부에서 실제로 노치가 가공될 위치인 모재부(a), 용접선(b) 및 용착금속부(c)의 조직사진을 나타내고 있다. 이들 사진에 나타난 바와 같이 용착금속부의 조직은 Mg이 Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>의 고용체로서 전체에 미세하게 분산 석출된 모습을 볼 수 있다. 또한 보호가스에 He의 사용량이 증가할 수록 기공은 감소하여 Ar33%+He67%에서는 기공이 거의 나타나지 않고 있다.

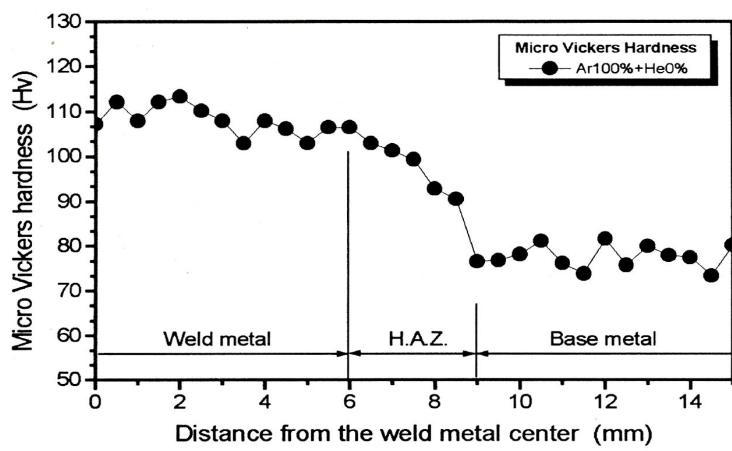


Fig. 3-3 Micro-vickers hardness distribution of weld

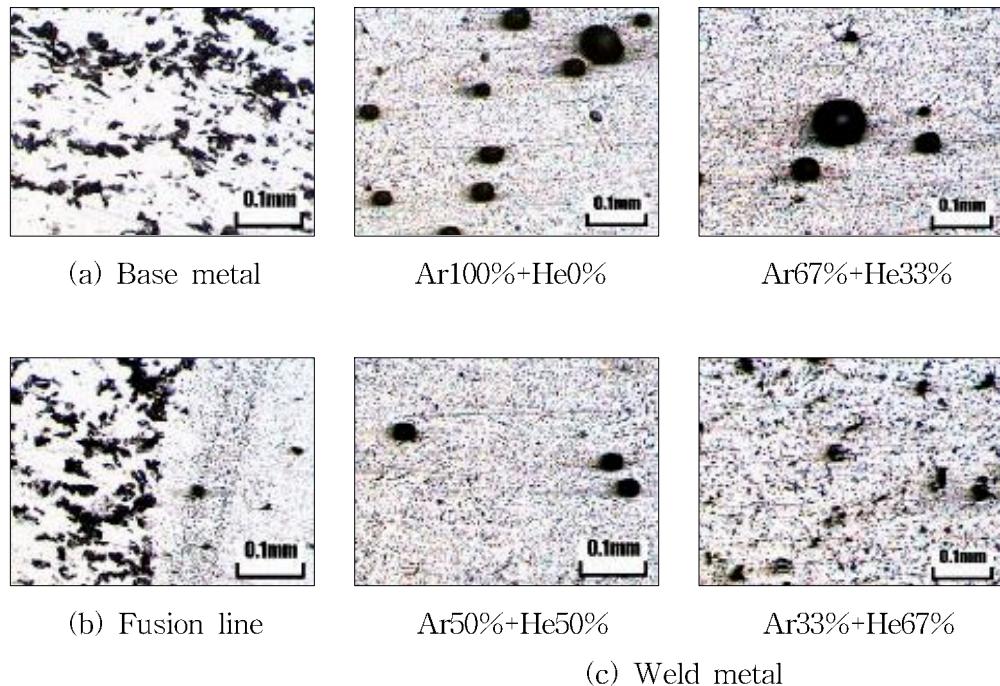


Photo. 3-2 Micro-structure of the weld zone ( $\times 100$ )

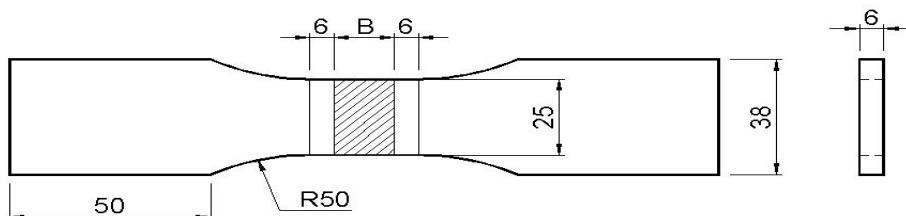
## 제2절 시험편 및 실험방법

### 1. 인장시험

인장시험편의 형상 및 치수는 Fig. 3-4와 같이 (사)한국선급<sup>44)</sup>의 규정에 맞게 용접 비드폭(B)을 중심으로 하여 양쪽으로 6mm씩 평활부가 되도록 페이스 밀링커터를 이용하여 이송속도를 0.05mm/rev로 가공하였다.

저온시험은 단열재로 되어있는 빙 용기 내부에 시험편의 평화부가 충분히 위치하도록 고정한 후 씨모커플을 시험편으로부터 약 2mm 떨어져 평활부 중심에 위치하도록 장착하였다. -30°C 및 -85°C 시험 시 온도조절 방법은 빙 용기 내에 석유에 테르를 채운 다음 액체질소를 설정온도에 도달할 때까지 서서히 직접 주입하는 방법을택하였으며, 설정온도에 도달 후 시험편 전체가 균일한 온도분포가 되도록 약 30분간 유지 후 시험을 실시하였다. 한편, 극저온인 -196°C 시험은 석유에 테르의 빙점이 약 -116°C정도이므로 이를 사용하지 않고 액체질소 자체를 시험편이 장착된 용기 내에 직접 주입하여 평활부가 충분히 잡기도록 부족되는 양을 계속 보충하면서 수행하였다.

인장시험에 사용한 기기는 Instron 4206(15ton)으로서 cross head speed는 2mm/min로 실험을 실시하였다.



B : Bead width

Fig. 3-4 Geometry of tensile test specimen

## 2. 충격시험

충격시험편은 용접이 끝난 판재를 적당한 가공여유를 두고 압연방향과 평행하게 절단하여 단면의 크기가 샬피 표준시험편의 크기인  $10 \times 10\text{mm}$ 가 되도록 밀링가공을 실시하였다. 이렇게 만들어진 길이가 긴 사각봉재는 다시 용접부를 잘 연마 후 Kellers용액으로 에칭하여 용접부의 형상이 잘 나타나도록 한 후 노치를 가공할 위치를 표시하였다. 그리고 이 위치가 시험편의 중앙에 오도록 길이의 잉여분을 절단 제거 하였다. 표시된 위치에 노치가공은  $0.15\text{mm}$  두께의 다이아몬드 휠 커터를 이용하여  $2\text{mm}$ 의 깊이로 해당 위치에 가공하였다. 이 때 용접이 압연방향에 직각으로 수행되었으므로 노치의 길이방향 역시 압연방향에 수직으로 가공되었다.

저온시험 중  $-30^{\circ}\text{C}$  및  $-85^{\circ}\text{C}$ 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  $3^{\circ}\text{C}$ 씩 냉각되었으며, 설정온도에 도달 후 시험편 전체가 균일한 온도분포를 할 수 있도록 약 30분 간 유지시킨 후 실험을 실시하였다. 이 때 자동 온도조절을 위해 씨모커플, 온도조절장치 및 솔레노이드 밸브가 장치되었으며, 석유에테르의 균일한 온도분포 및 원활한 열전달을 위해 챔버 내부에 소형 팬을 설치하였다. 따라서 온도는 솔레노이드 밸브의 자동 개폐에 의해 약  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위 내에서 일정하게 유지되었다. 또한  $-196^{\circ}\text{C}$  시험은 인장시험과 동일한 방법으로 액체질소 자체를 이용하였다.

일반적으로 저온 충격시험의 경우 시험편을 샤르피시험기의 앤빌상에 15초간 방치하였을 때의 온도상승을 점검한 결과에 따르면,  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 시료는  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $-60^{\circ}\text{C}$  시료는  $3^{\circ}\text{C}$ ,  $-100^{\circ}\text{C}$  시료는  $3.5^{\circ}\text{C}$ ,  $-190^{\circ}\text{C}$  시료는  $5^{\circ}\text{C}$ 만큼 온도가 상승한다<sup>46)</sup>. 그러나 본 연구에서는 시료를 챔버에서 꺼내어 충격을 가하기까지 약 5초 이내로 소요되었으므로 실험하고자 하는 온도와 큰 차이가 없었다고 사료되어 온도보정은 따로 실시하지 않았다.

한편, 실험에 사용한 시험기는 용량이  $30\text{kg} \cdot \text{m}$ 이며, 로드셀이 계장화된 샬피 충

격시험기로서 시험편에 충격하중을 가하면 시험편과 텁의 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 분석함으로서 정확성 및 신뢰성을 높이고자 하였다.

시험 전 시험기의 점검사항으로서 해머의 고정부와 축 회전부의 조임 상태는 물론 노치의 뒷면을 해머가 정확히 충격을 주기 위하여 앤빌 위의 중앙에 해머가 정확히 위치하는지의 여부를 센터인디케이터(centre indicator)로 확인하였으며, 시험 시 앤빌 위에 시험편을 위치시킬 때에도 해머의 칼날이 정확히 노치의 뒷부분에 충격을 주도록 사용하였다.

Table 3-5는 사용한 충격시험기의 제원 및 실험방법을 나타내고 있으며, Fig. 3-5는 한국산업규격<sup>47)</sup>에 맞게 가공한 충격시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있다.

Photo. 3-3은 가공이 완료된 충격시험편중 대표적인 시험편의 사진으로서 각각의 불활성가스 혼합비율에서 노치 가공 위치에 따라 용착금속부, 용접선 및 열영향부 시험편으로 구분된다.

**Table 3-5 Charpy impact testing machine and test condition**

Model	CIEM-30	Angle	142°
Capacity	30kgf · m	Impact speed	about 5m/sec
Maker	TORSEE, Japan	Test temperatures	25°C, -30°C -85°C, -195°C

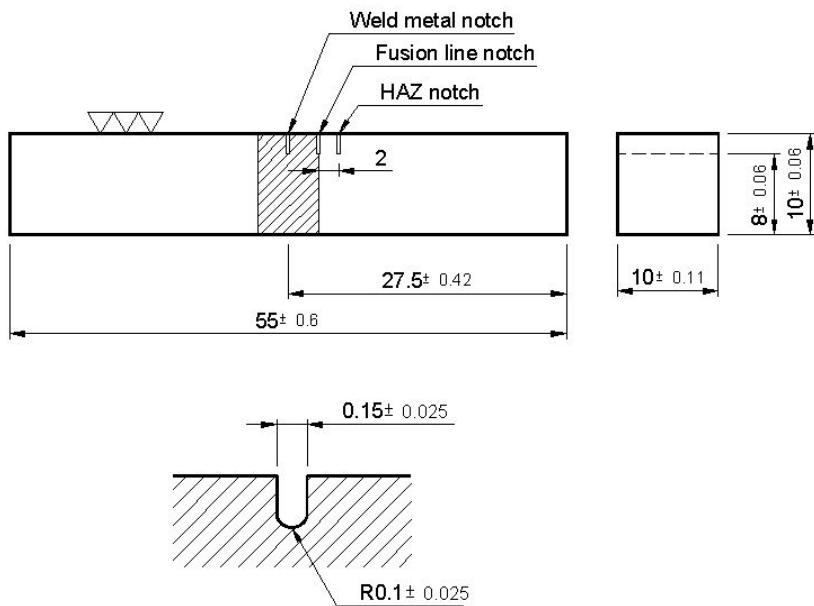


Fig. 3-5 Geometry of Charpy impact test specimen



(a) Weld metal specimen



(b) Fusion line specimen



(c) HAZ specimen

Photo. 3-3 Welded impact test specimens

### 3. 저온실험

본 연구에서 사용한 5000계열의 Al5083-O재가 액화천연가스 저장용기에 주로 사용되므로 반복적으로 약 -162°C인 저온과 접촉하므로 저온 기계적 성질에 대한 고찰이 필요하다고 사료되며, 또한 GMA 용접시 사용하는 불활성가스 Ar과 He의 혼합비에 따른 영향을 분석하여 상온뿐만 아니라 저온에서도 강도가 우수하면서 저비용 고효율의 용접을 얻을 수 있는 혼합비를 찾고자 하였다.

저온시험은 모든 보호가스 혼합비율에서 중입열에 해당하는 시험편만을 -30°C, -85°C 및 -196°C로 상온에서부터 극저온까지 단계적으로 온도를 낮추어가며 실시하였다.

저온인장시험은 단열재로 되어 있는 빈 용기 내부에 시험편의 평활부가 충분히 위치하도록 고정한 후 씨모커플을 시험편으로부터 약2mm 떨어져 평활부 중심에 위치하도록 장착하였다. -30°C 및 -85°C 시험 시 온도조절 방법은 빈 용기 내에 석유에테르를 채운 다음 액체질소를 설정온도에 도달할 때까지 서서히 직접 주입하는 방법을 택하였으며, 설정온도에 도달 후 시험편 전체가 균일한 온도분포가 되도록 약 30분간 유지 후 실시하였다. 한편, 극저온인 -196°C 시험은 석유에테르의 냉점이 약 -116°C정도이므로 이를 사용하지 않고 액체질소 자체를 시험편이 장착된 용기 내에 직접 주입하여 평활부가 충분히 잠기도록 부족되는 양을 계속 보충하면서 수행하였다.

한편, 저온충격시험 중 -30°C 및 -85°C의 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°C씩 냉각되었으며, 설정온도에 도달 후 시험편 전체가 균일한 온도분포를 할 수 있도록 약 30분간 유지시킨 후 실험을 실시하였다. 이 때 자동 온도조절을 위해 씨모커플, 온도조절장치 및 솔레노이드 밸브가 장치되었으며, 석유에테르의 균일한 온도분포 및 원활한 열전달을 위해 챔버 내부에 소형 팬을 설치하였다. 따라서 온도는 솔레

노이드 벨브의 자동 개폐에 의해 약  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 의 오파범위 내에서 일정하게 유지되었다. 또한  $-196^{\circ}\text{C}$  시험은 인장시험과 동일한 방법으로 액체질소 자체를 이용하였다.

일반적으로 저온 충격시험의 경우 시험편을 샤르피시험기의 앤빌상에 15초간 방치  $3^{\circ}\text{C}$ ,  $-100^{\circ}\text{C}$ , 시료는  $3.5^{\circ}\text{C}$ ,  $-190^{\circ}\text{C}$  시료는  $5^{\circ}\text{C}$ 만큼 온도가 상승한다<sup>46)</sup>. 그러나 본 연구에서는 시료를 챔버에서 꺼내어 충격을 가하기까지 약 5초 이내로 소요되었으므로 실험하고자 하는 온도와 큰 차이가 없었다고 사료되어 온도보정은 따로 실시하지 않는다.

Fig. 3-6은 본 논문의 저온시험에 사용한 시험 장치를 도시화한 것이다.

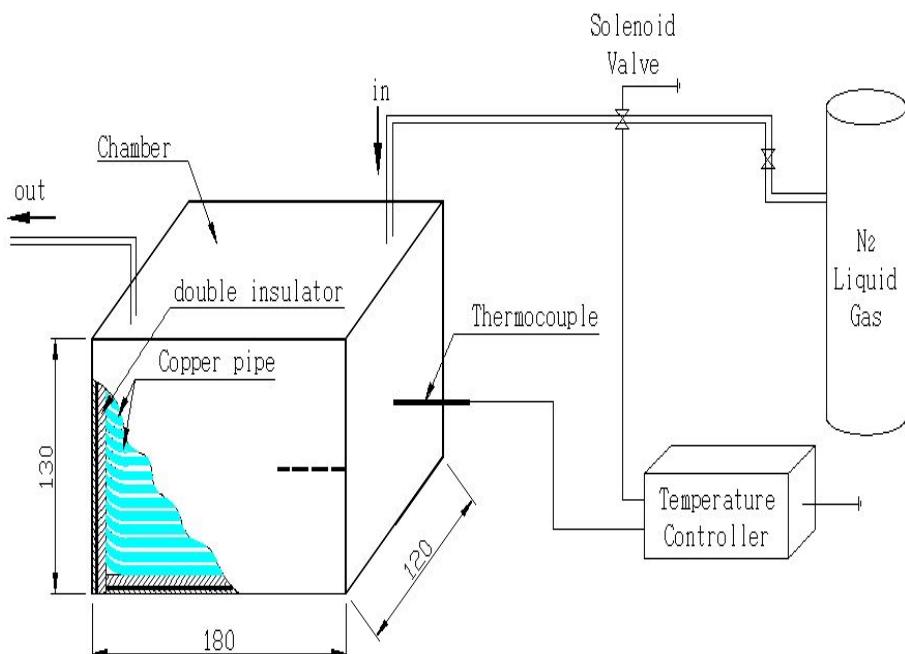


Fig. 3-6 Schematic diagram of low temperature testing chamber apparatus

본 연구에 사용한 시험기기의 전반적인 제원은 다음과 같다.

**Table 3-6 Testing equipments**

Equipments	Model	Specifications	Remarks
GMA Welder	MIG/MAG/Co <sub>2</sub> Hitach, 350 CAP2	Inverter Pules type 350A	
Universal testing M/C	UTM4206, Instron, USA	15 Ton	
Impact testing M/C	CIEM-30, Shimadzu, Japan	30kg-m	
Radiographic tester	Hitach, Japan	150KVP	
Optical microscope	BHC-U, Olympus, Japan	×100~2,000	
Polisher	C-POS2, Jeil, Korea	160W	
Digital camera	DC-4, Ricoh, Japan	600,000 pixel	
Planimeter	KP-90, Koizumi, Japan	within ±0.2%	
hardness tester	Micro-Vikers, Shimadzu, Japan		
Inert gas mixture	Certificate of Analysis, USA	cylinder type	
Low temperature chamber		180×120×130mm (b×l×h)	
Temperature controller	T4M-B3RPOC, Autonics	-99.9~199.9°C	
Thermocouple	C100/1215S, Korea	-200°C~800°C	
Solenoid Valve	SEV-603BXF, Japan	-200°C~400°C	

## 제 4 장 결과 및 고찰

### 제1절 보호가스 혼합비와 입열량이 용접성에 미치는 영향

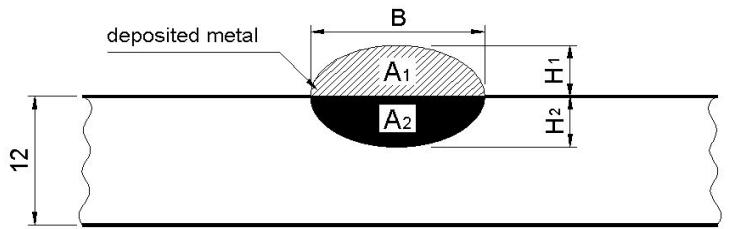
#### 1. 용접부 형상 변화

용접조건에 따른 비드의 형상 변화를 고찰하기 위하여 용접된 부재의 단면을 채취하여 용접부의 비드 폭, 높이, 면적, 용입깊이 및 희석률 등을 세분하여 Fig. 4-1과 같이 측정·평가하였다.

여기서 희석률은 비드 형상비를 나타내는 계수의 하나로서 비드 전체 단면적과 덧살 단면적의 비를 말하며 0.5에 가까울수록 이상적인 형태로 평가할 수 있다<sup>48)</sup>. 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Dilution = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Photo. 4-1은 각각의 용접조건으로부터 얻어진 비드의 단면을 연마 후 부식한 사진을 나타낸 것이며, Fig. 4-2~Fig. 4-5는 불활성가스의 혼합비율 및 입열량에 따른 비드형상 변화의 결과를 나타낸 그림이다.



$B$  : bead width

$H_1$  : bead height

$A_1$  : reinforcement area

$H_2$  : penetration depth

$A_2$  : penetration area

Fig. 4-1 Schematic diagram of bead shape

Photo. 4-1에 나타난 바와 같이 모든 불활성가스 혼합비율에서 입열량이 증가함에 따라 비드폭, 용입깊이 및 면적은 증가하는 경향을 보였으며, Ar만을 100% 사용한 경우 비드폭은 큰 반면 용입깊이 및 면적은 작았다. He의 혼합량이 증가할수록 비드폭은 감소하면서 용입깊이 및 면적은 증가하며 Ar33%+He67%의 경우 Ar만을 100% 사용했을 때 보다 약 2배 정도 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4-2는 혼합가스 비율에 따른 비드폭과 입열량의 관계를 나타낸 것이다. 입열량이 증가함에 따라 비드폭은 증가하는 경향을 보였으며, Ar33%+He67%가 가장 높고 Ar67%+He33%가 가장 낮은 값을 나타냈다.

Fig. 4-3는 비드 높이 및 용입깊이와 입열량의 관계를 나타낸 것이다. 입열량이 증가함에 따라 비드 높이 및 용입깊이는 증가하는 경향을 보이며, Ar100%+He0%가 가장 낮고 Ar33%+He67%가 가장 높은 값을 나타냈다. 특히, Ar33%+He67%에서 용입깊이가 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4-4는 덧살 면적 및 용입 면적과 입열량의 관계를 나타낸 것으로서 입열량이 증가할수록 면적이 증가함을 알 수 있으며, Ar67%+He33%에서 가장 낮고 Ar33%+He67%에서 가장 높게 나타났다. 특히, Ar33%+He67%에서 용입면적이 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4-5는 불활성가스 혼합비율에 따른 희석률과 입열량의 관계를 나타낸 것이다. 희석률은 Ar100%+He0% 혼합비에서 가장 높게 나타났으며, Ar33%+He67%에서 가장 낮으며 50%에 균접함을 알 수 있다.

다중 용접시 비드 높이가 깊이에 비해 지나치게 높으면 다음 패스 용접에 불리하며, 비드 깊이 및 용융 면적이 적으면 용융성이 부족하여 역시 우수한 비드형상을 얻을 수 없다. 따라서 비드의 단면 형상은 희석률이 50%정도 되면서 비드폭, 깊이, 높이 및 용입면적이 균형을 이루어야 양호한 비드형상이라 할 수 있으므로 본 연구에서 수행한 결과 불활성 가스의 혼합비율 Ar33%+He67%인 조건에서 가장 양호한 비드형상을 얻었다고 할 수 있다.

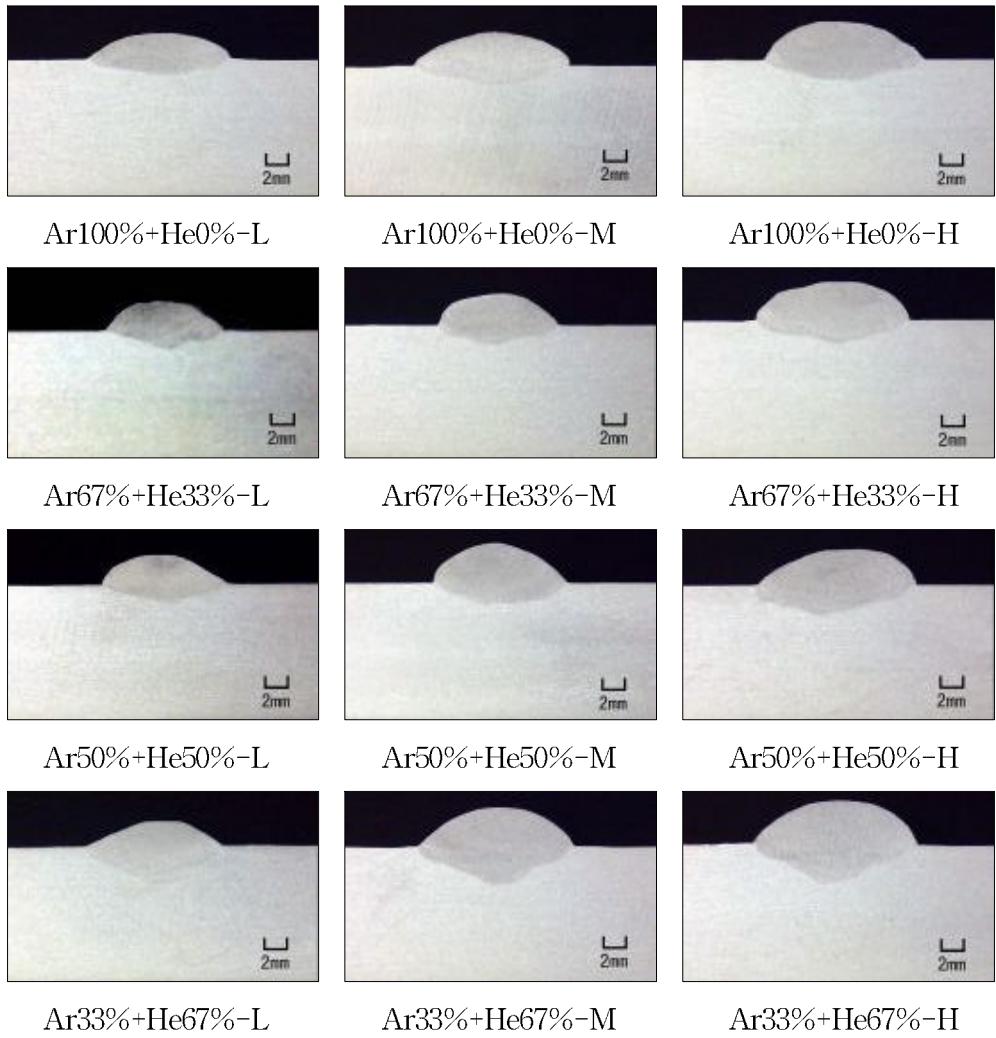


Photo. 4-1 Photographs of the bead shape measurement

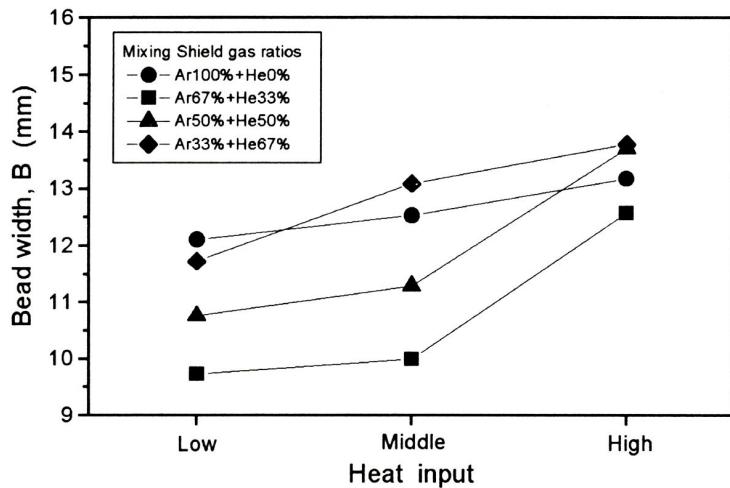


Fig. 4-2 Relation between the bead width and the welding heat input

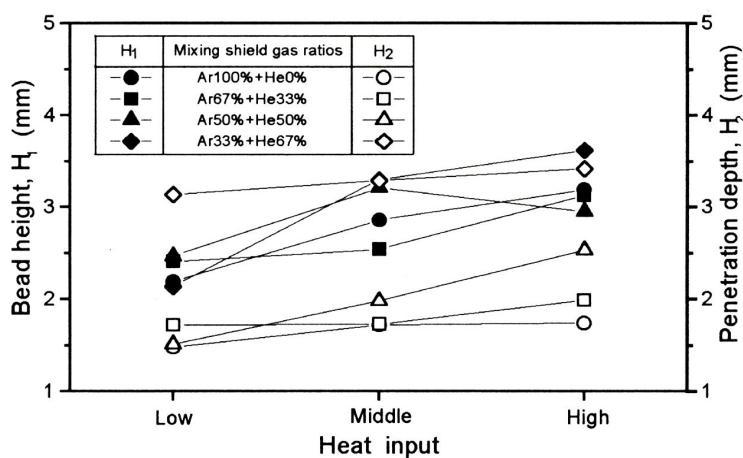


Fig. 4-3 Relation between bead geometry and the welding heat input

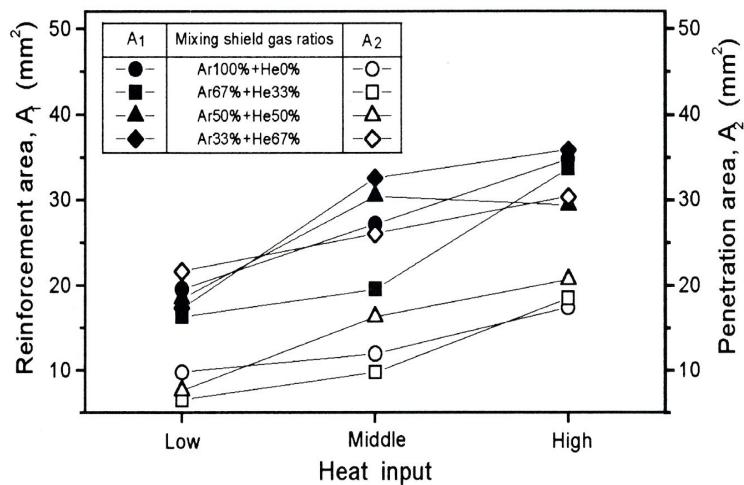


Fig. 4-4 Relation between bead geometry and the welding heat input

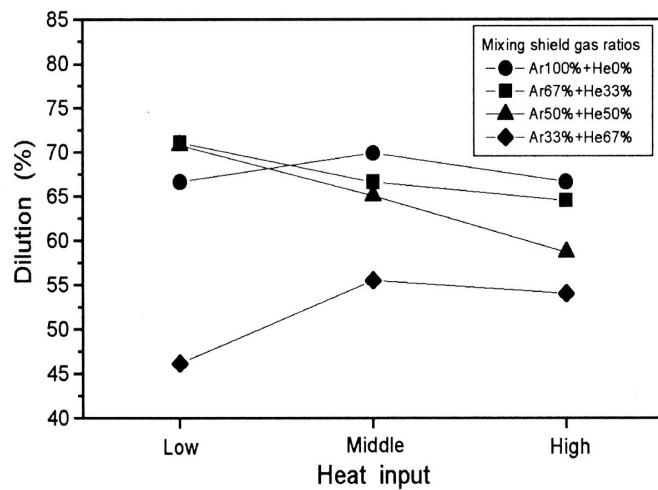


Fig. 4-5 Relation between dilution and the heat input

## 2. 기공발생의 양상

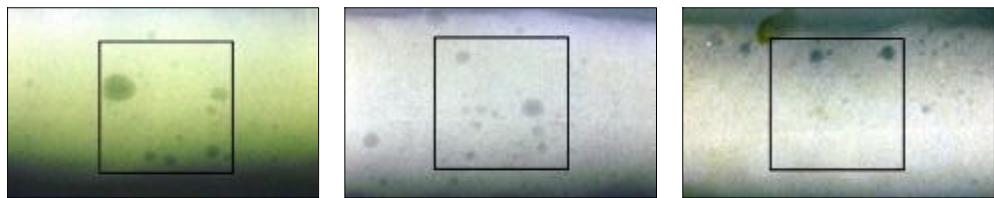
보호가스 혼합비율 및 입열량이 내부 기공발생에 미치는 영향을 평가하기 위하여 알루미늄합금 용접부에 대한 방사선투과검사를 KS D 0242에 준하여 실시하였다.

Photo. 4-2는 방사선투과 필름 중 등급판정에 사용한 시야  $10 \times 10\text{mm}$ (□ mark)를 포함하는 부분의 사진으로서, 산출된 결합점수 및 등급은 Table 4-1과 같다.

방사선투과검사 결과 모든 조건에서 기공 이외의 결함인 고온균열 및 산화파막 혼입 등은 발견되지 않았는데 이는 GMA 용접시 사용한 용접와이어에 Si함량이 적고 Mg함량이 모재 보다 높으므로 Mg<sub>2</sub>Si라는 결정이 입계에 편석하여 내고온균열성을 저해하지 않았고, 용접 전처리 및 후처리를 철저히 실시하였기 때문으로 사료된다.

Photo. 4-2 및 Table 4-1에 나타난 바와 같이 He의 혼합량 및 입열량이 증가할 수록 기공의 크기 및 숫자는 크게 감소하여 결합점수가 낮아지는 경향을 보였으며, 등급 판정결과 Ar100%+He0% 및 Ar67%+He33%의 경우는 모든 입열량에서 2등급으로 조사된 반면, Ar50%+He50%의 경우 중입열과 고입열량 및 Ar33%+He67%의 모든 입열량에서 1등급으로 판정되었다. 특히, Ar33%+He67%의 조건에서는 결합점수에 반영되는 결합크기 0.4mm이상의 크기를 갖는 결함이 발견되지 않아 가장 양호한 용접을 얻을 수 있었다. 이와 같은 결과는 Ar에 He을 약 50% 이상 혼합하여 사용하면 Ar의 장점인 보호효과 및 He의 장점인 용융성이 우수하게 되어 양호한 비드가 얻어졌다고 판단된다.

따라서 Al5083-O재의 GMA 용접시 혼합 보호가스에 He을 50%이상 혼합하여 사용함으로서 용접결함의 발생이 적은 우수한 용접비드를 얻을 수 있으리라 사료된다.

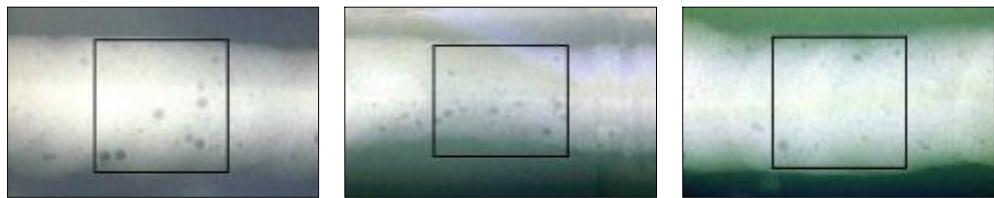


Low

Middle

High

(a) Ar100%+He0%

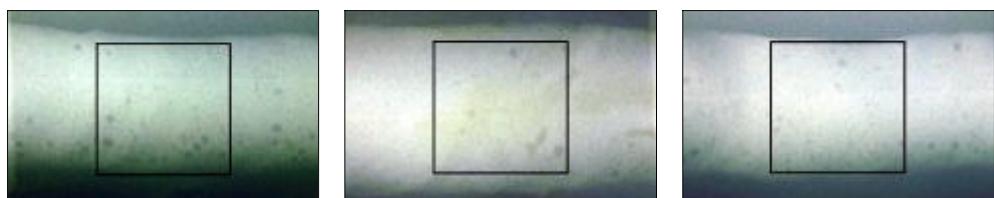


Low

Middle

High

(b) Ar67%+He33%

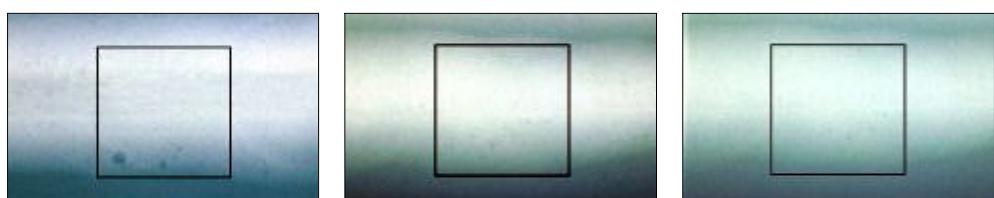


Low

Middle

High

(c) Ar50%+He50%



Low

Middle

High

(d) Ar33%+He67%

Photo. 4-2 Photographs of radiographic test film

(□ : test sight(10mm×10mm))

**Table 4-1 Radiographic inspection results**

Mixing shield gas ratios		Defect size and numbers		Total defect score	Evaluation result
		under 1.0	1.0 ~ 2.0		
Ar100%+He0%	L	12	0	13	grade 2
	M	7	2	11	
	H	4	2	8	
Ar67%+He33%	L	8	2	12	
	M	9	0	9	
	H	5	0	5	
Ar50%+He50%	L	7	0	7	grade 1
	M	4	0	4	
	H	3	0	3	
Ar33%+He67%	L	2	0	2	
	M	0	0	0	
	H	0	0	0	

(L : Low heat input, M : Middle heat input, H : High heat input)

## 제2절 보호가스 혼합비율과 입열량이 용접부의 기계적 특성에 미치는 영향

### 1. 미소경도

Fig. 4-6은 용접 비드 중앙에서부터 모재쪽으로 0.5mm간격으로 측정한 마이크로비커스 경도값 분포를 나타내고 있다. 그럼에 나타난 바와 같이 용착금속부의 경도는 Hv100~Hv110 정도의 분포를 나타내며 Ar100%+He0%혼합비에서 가장 높게 나타났다. 또한, 열영향부를 지난 모재부의 경도값은 Hv80~Hv90 정도의 분포를 나타내며 Ar 33%+He 67%혼합비에서 가장 높게 나타났으나 불활성가스 혼합비에 따른 용접부의 경도는 큰 차이가 없다고 사료된다.

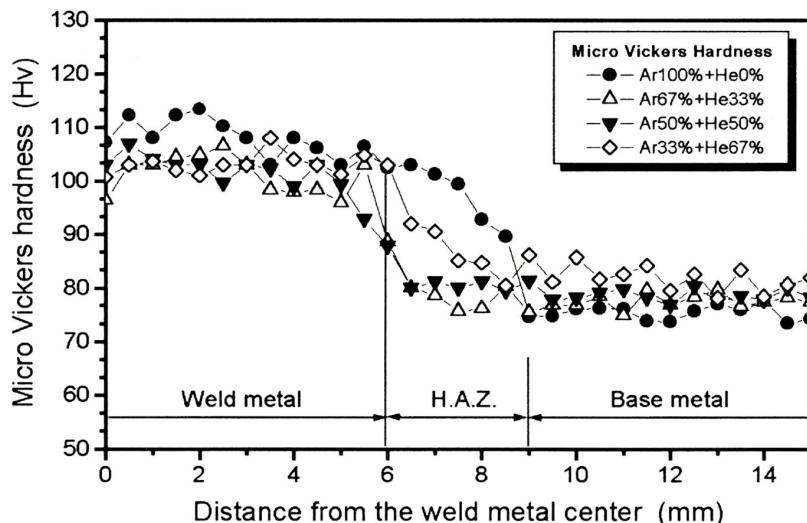


Fig. 4-6 Micro-vickers hardness distribution

Photo. 4-3은 본 연구에서 사용한 Al5083-O 용접부에서 실제로 노치가 가공될 위치인 모재부(a), 용접선(b) 및 용착금속부(c)의 조직사진을 나타내고 있다. 이들 사진에 나타난 바와 같이 용착금속부의 조직은  $Mg\circlearrowleft$   $Mg_2Al_3$ 의 고용체로서 전체에 미세하게 분산 석출된 모습을 볼 수 있다. 또한 보호가스에 He의 사용량이 증가할 수록 기공은 감소하여 Ar33%+He67%에서는 기공이 거의 나타나지 않고 있다.

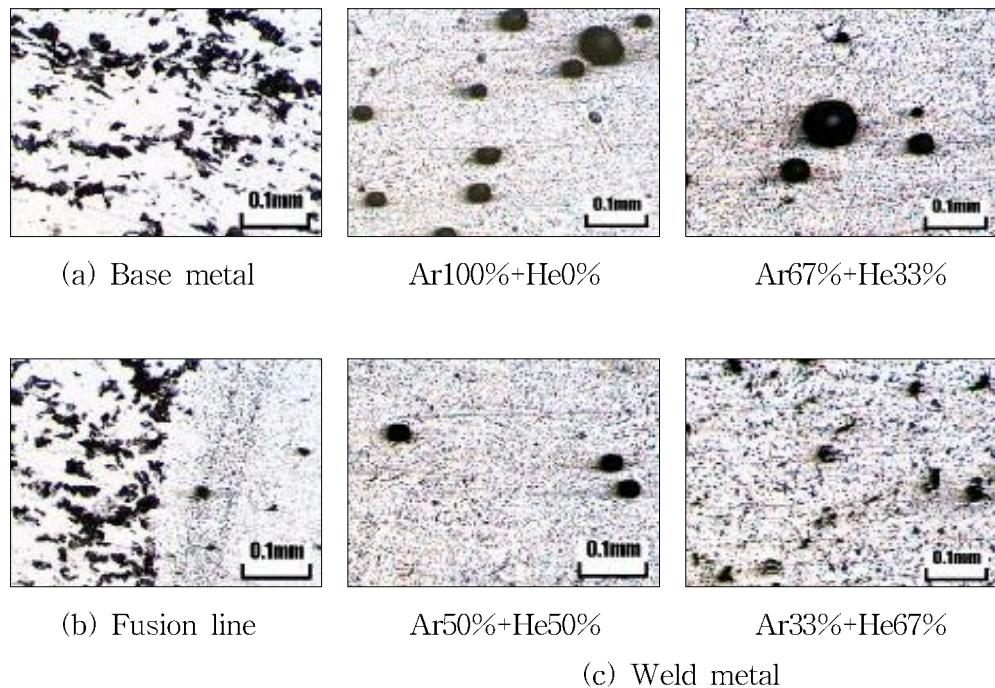


Photo. 4-3 Micro-structure of the weld zone ( $\times 100$ )

## 2. 인장강도

용접금속의 인장강도에 영향을 미치는 인자로서 응고조직, 결정립도, 결정결합, 화학조성, 석출물의 양과 그 분포형태 등을 들 수 있다. 또한 용접부에 포함된 기공이 용접부 강도에 미치는 영향을 알루미늄 합금에 따라 다르나, 미세한 기공이 균일하게 분포될 경우는 큰 영향을 주지 않는다. 일반적으로 작은 기공일 경우 기공이 7%가 넘게 되면 강도와 연신율이 급격히 감소하게 되므로 기공의 크기는 강도 및 연신율에 결정적인 영향을 미친다고 할 수 있다. 기공의 크기가 0.4mm 이하인 경우 강도에는 큰 변화를 보이지 않으나, 기공이 1.6mm가 되면 10%이상 감소되며, 단면감소율은 45% 이상 감소하게 된다는 보고도 있다<sup>49)</sup>.

Figs. 4-7~9는 각각의 불활성가스 혼합비에서 기계적 성질과 입열량의 관계를 나타내고 있다.

Fig. 4-7은 인장강도와 입열량의 관계를 나타낸 그림으로서 인장강도는 불활성가스 혼합비 및 입열량에 관계없이 모재와 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4-8은 항복강도와 입열량의 관계를 도시한 것으로서 항복강도는 He의 혼합량이 증가할수록 증가하여 Ar만을 100% 사용한 경우 가장 낮고, Ar33%+He67%에서 가장 높게 나타났다. 이를 모재의 항복강도와 비교하여 보면 Ar100%+He0%는 약 50% 낮고, Ar67%+He33%는 거의 유사하며, Ar50%+He50% 및 Ar33%+He67%에서는 높은 값을 나타내고 있다. 그러나 입열량은 항복강도에 영향을 미치지 않았다.

Fig. 4-9는 불활성가스 혼합비율에 따른 연신율과 입열량의 관계를 나타낸 것이다. 연신율 또한 He의 혼합량이 증가할수록 증가하는 경향을 알 수 있으며, Ar33%+He67%에서 가장 높은 값을 나타내고 있다. 그러나 Ar33%+He67% 고입열을 제외한 모든 조건에서 모재의 연신율보다는 낮게 나타났다.

인장시험 결과 인장강도는 보호가스 혼합비율 및 입열량에 관계가 없었으며, 항복강도 및 연신율은 입열량과는 관계가 없었으나 He의 혼합량이 0%, 33%, 50% 및 67%로 높아질수록 증가함을 알 수 있었다.

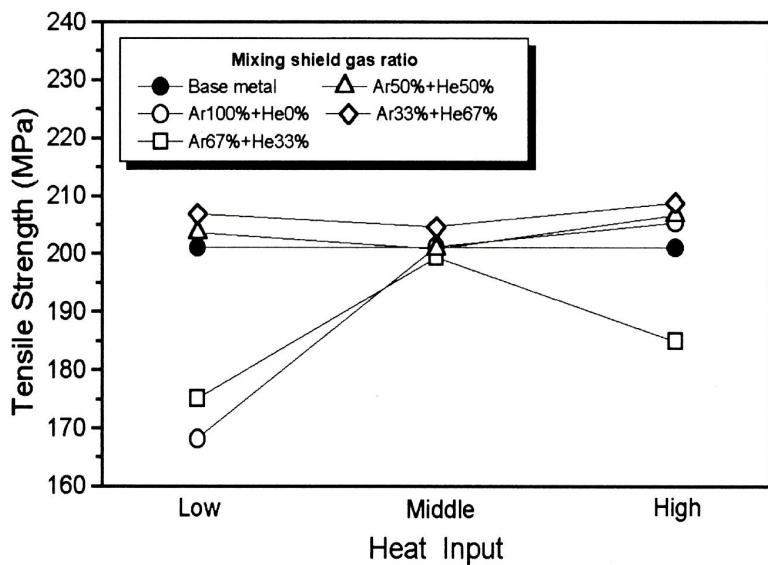
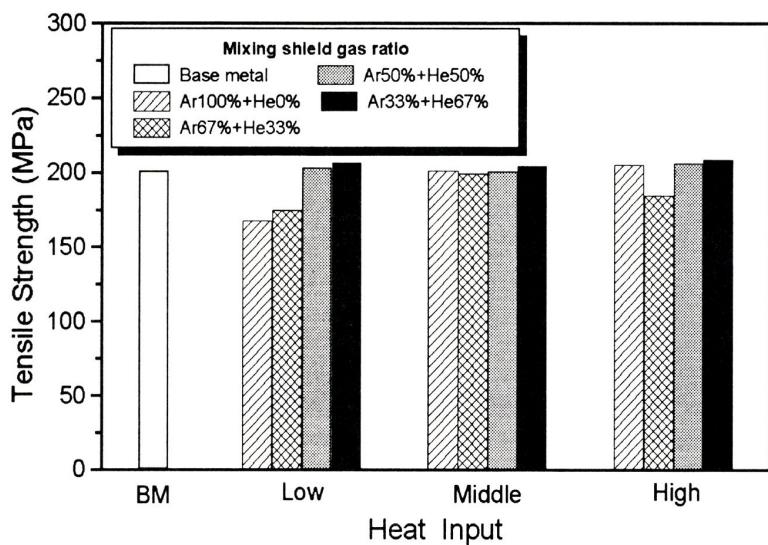


Fig. 4-7 Relations between tensile strength and heat input

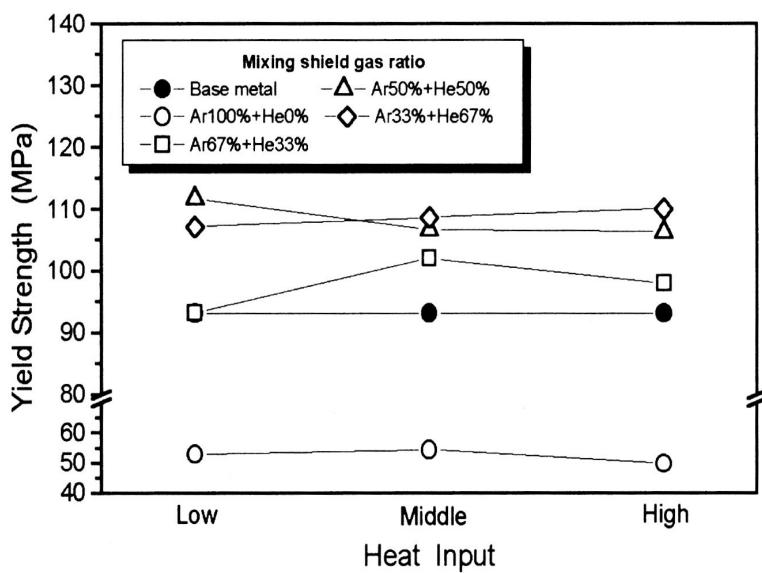
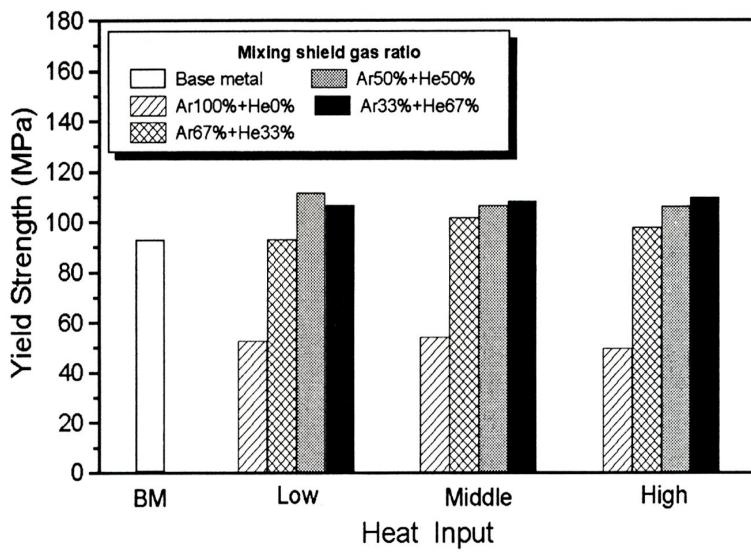


Fig. 4-8 Relations between yield strength and heat input

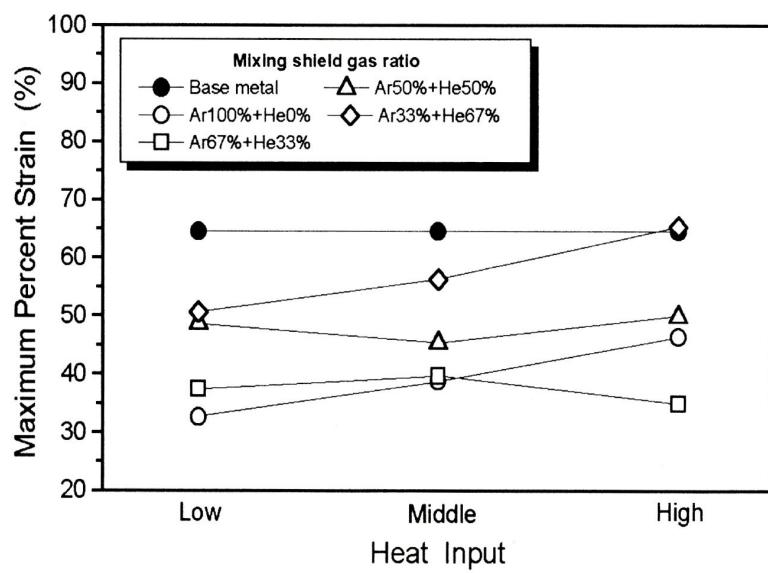
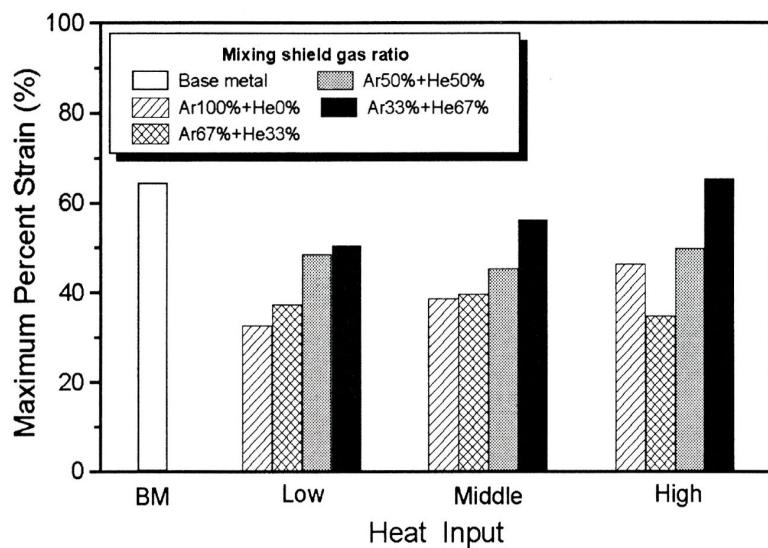


Fig. 4-9 Relations between maximum percent strain heat input

### 제3절 보호가스 혼합비의 동적 흡수에너지에 미치는 영향

일반적으로 충격시험이란 부하 후  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  sec 이내에서 파단하거나 부하 후 항복까지의 시간이  $10^{-3}$  sec 정도의 단시간인 고속 파괴시험으로서 파괴기구의 해명을 위한 충격시험의 경우 종래의 아날로그 방식으로는 정확한 값을 구하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 신속성과 경제성이 우수하고 정밀도가 좋으며, 변위와 하중을 전기적인 값으로 측정하여 컴퓨터로 직접 얻을 수 있는 자동기록형 또는 계장형 충격시험을 실시하였다.

Fig. 4-10은 보통의 아날로그 방식의 샤르피 흡수에너지와 본 연구에서 사용한 자동기록형 샤르피 시험기에 의한 하중-변위 곡선의 적분을 통해 얻어진 흡수에너지를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 보통 샤르피 충격값보다 자동기록형으로 얻은 흡수에너지가 시험기의 베어링 마찰, 공기저항 및 충격시 발생하는 소음 등에 의한 손실에너지가 발생하였기 때문에 다소 낮으나 거의 유사한 값을 나타냄으로서 본 연구에서 사용한 시험장치에 신뢰성이 있다고 사료된다.

Figs. 4-11~13는 각각의 시험온도에서 노치가공 위치에 따른 흡수에너지의 변화를 나타내고 있다.

그림에 나타난 바와 같이 모든 시험온도에서 대체적으로 He의 사용량이 증가할 수록 흡수에너지는 증가하는 경향을 보여 Ar33%+He67%의 경우 가장 큰 흡수에너지를 보였다. 또한 용착금속부의 경우는 모재 보다 매우 낮게 조사된 반면, 용접선 및 열영향부는 모재와 거의 동등하거나 높게 조사되었다. 이렇게 용착금속부에 노치가 가공된 시험편의 경우 시험온도 및 불활성가스 혼합비율에 관계없이 매우 낮은 흡수에너지 값으로 조사된 원인으로서 용착금속부는 모재 및 용접와이어가 용융되어 형성된 주조조직으로서 경화되었기 때문으로 분석된다.

Figs. 4-14~17는 각각의 시험온도에서 보호가스 혼합비율에 따른 흡수에너지의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 모재를 포함한 모든 시험편의 흡수에너지 값은 대체적으로 -85°C까지 온도가 낮아질수록 증가하다가 -196°C에서는 크게 감소하는 경향을 나타냄으로서 극저온에서는 다소 취성적인 거동이 나타남을

알 수 있다.

Figs. 4-18~21는 시험편 중 대표적인 모재 및 Ar33%+He67% 시험편에 대한 load-deflection curve로서 각각 +25°C, -30°C, -85°C 및 -196°C에서 측정한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 시험온도가 낮아질수록 최대하중은 차츰 증가하다가 -196°C에서는 크게 증가하는 경향이 나타난 반면에, 변위는 +25°C~-85°C까지는 큰 차이가 없었으나 -196°C에서는 큰 감소를 나타내었다. 또한 용착금속부 시험편은 시험온도와 관계없이 낮은 최대하중 및 변위를 나타내고 있으며, He의 혼합량이 증가할수록 흡수에너지는 증가하여 Ar33%+He67% 혼합비에서 저온인성이 가장 우수하게 나타났다.

이상으로 미루어보아 Server와 Tetelman<sup>50)</sup>이 주장하고 있는 동적파괴인성은 온도, 스트레인 속도, 시험편의 두께, 균열의 날카로운 정도 등의 합수 및 탄화물, 질화물 및 개재물의 존재 유무와 크기 및 양에 따라 좌우된다는 결과에 본 잘 일치하고 있다. 또한, 온도변화에 따른 충격인성은 일반적으로 온도가 강하함에 따라 감소하다가 어떤 한계온도에 도달하면 급격히 감소한다<sup>51)</sup>고 하였으나 일반적으로 강은 체심입방격자의 구조이나 본 연구에서 사용한 재료는 면심입방격자의 구조로서 저온취성이 거의 없기 때문에 상이한 결과가 얻어졌다고 생각된다.

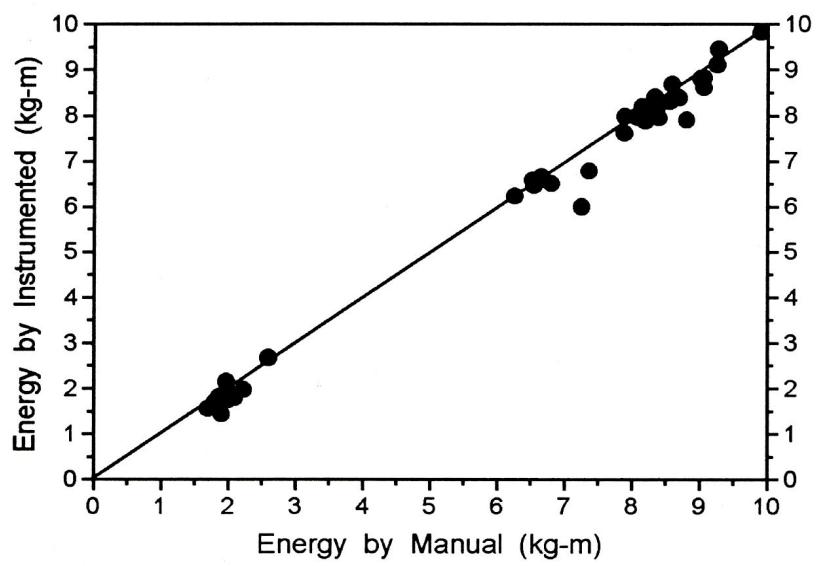


Fig. 4-10 Comparison of the energy between manual impact and instrumented impact test

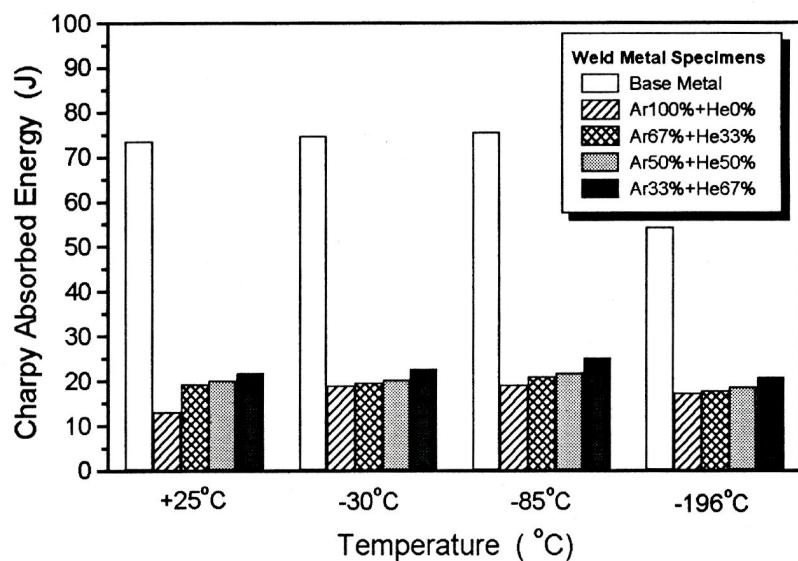
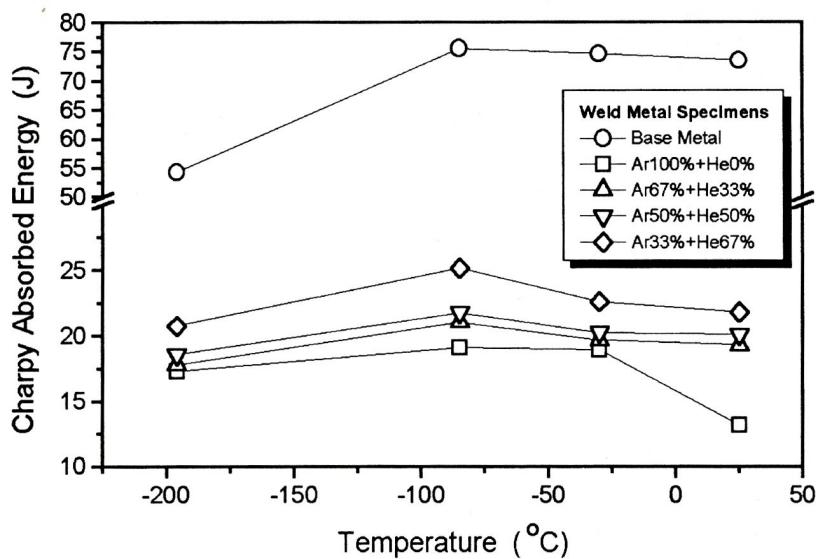


Fig. 4-11 Relations between Charpy absorbed energy and temperature and for weld metal specimens

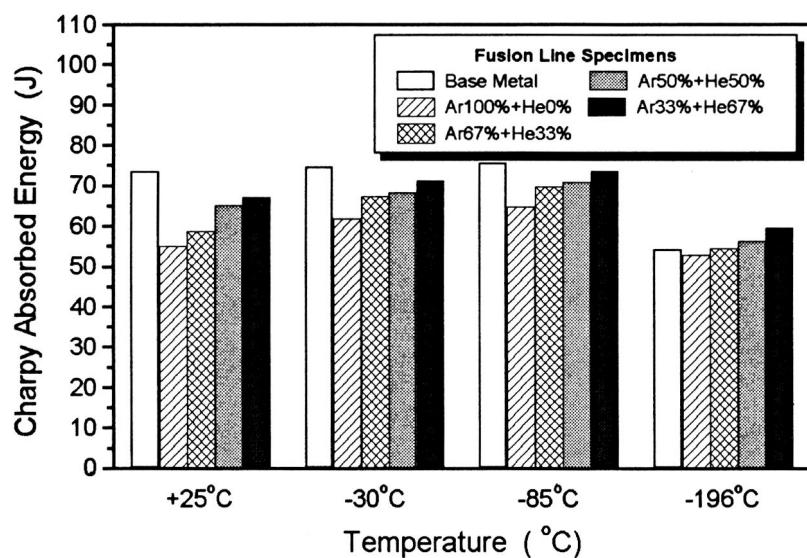
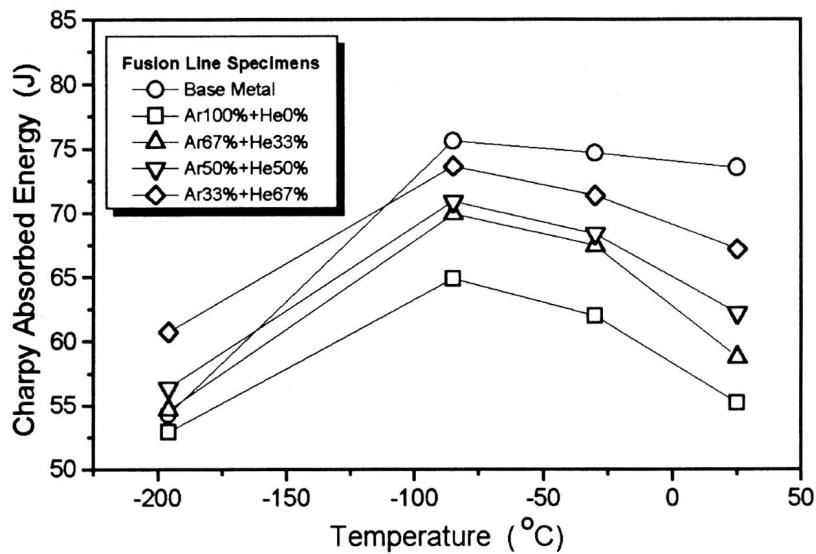


Fig. 4-12 Relations between Charpy absorbed energy and temperature for fusion line specimens

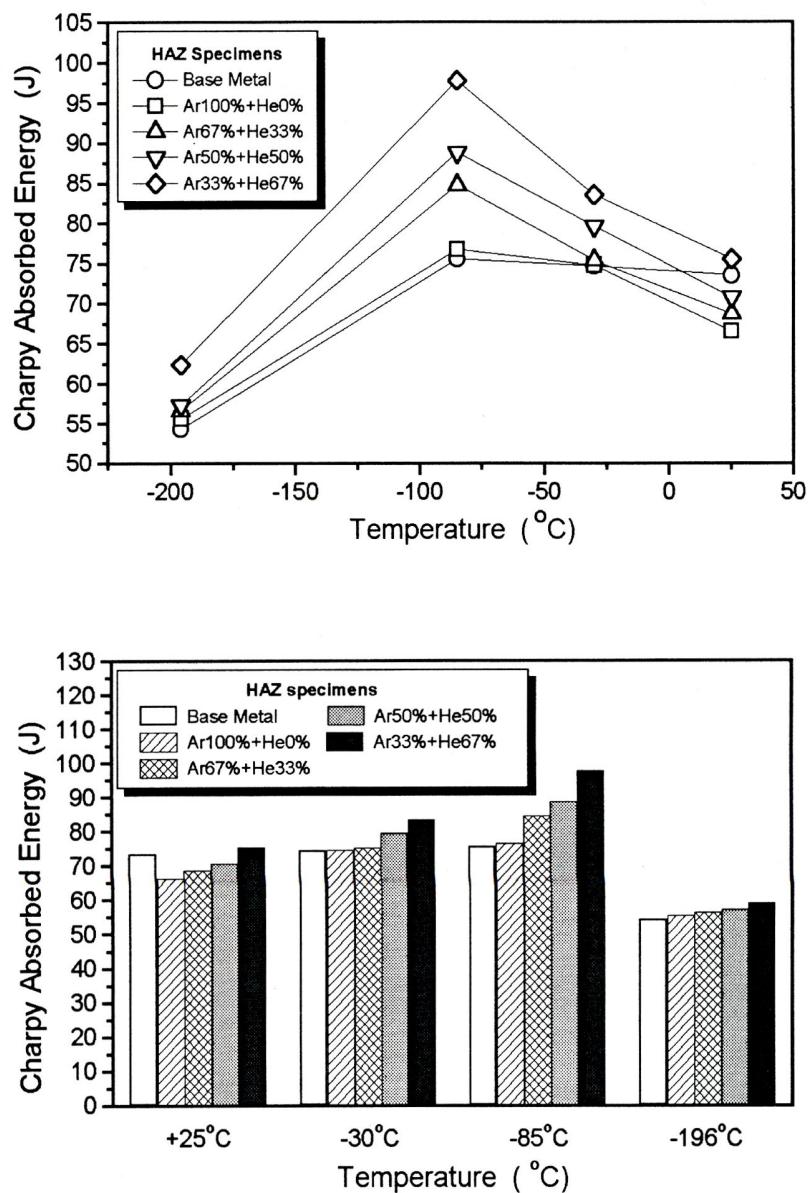


Fig. 4-13 Relations between Charpy absorbed energy and temperature for HAZ specimens

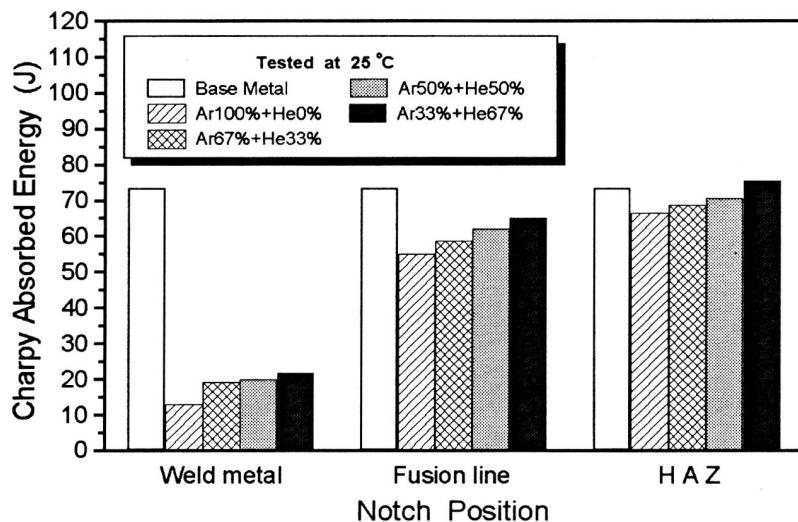


Fig. 4-14 Relations between notch position and Charpy absorbed energy at +25°C

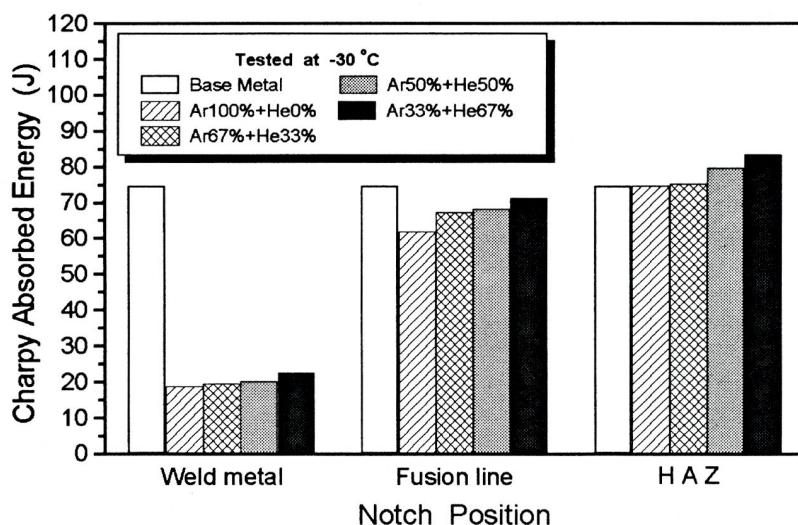


Fig. 4-15 Relations between notch position and Charpy absorbed energy at -30°C

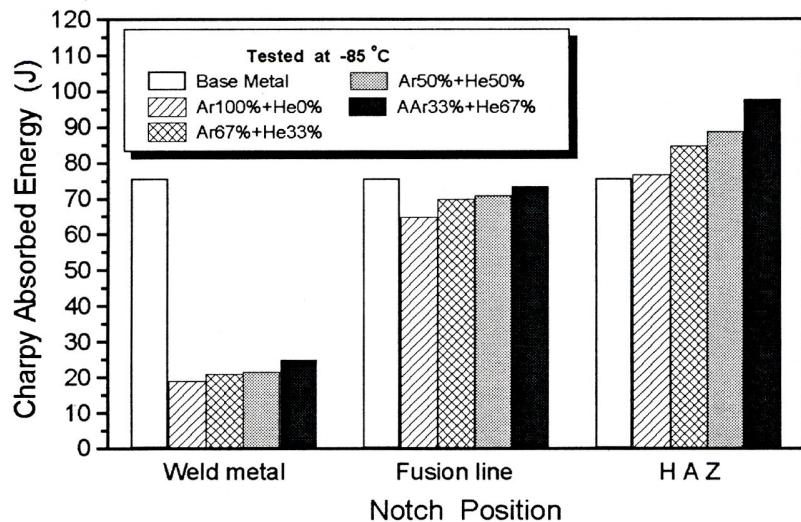


Fig. 4-16 Relations between notch position and Charpy absorbed energy at  $-85^{\circ}\text{C}$

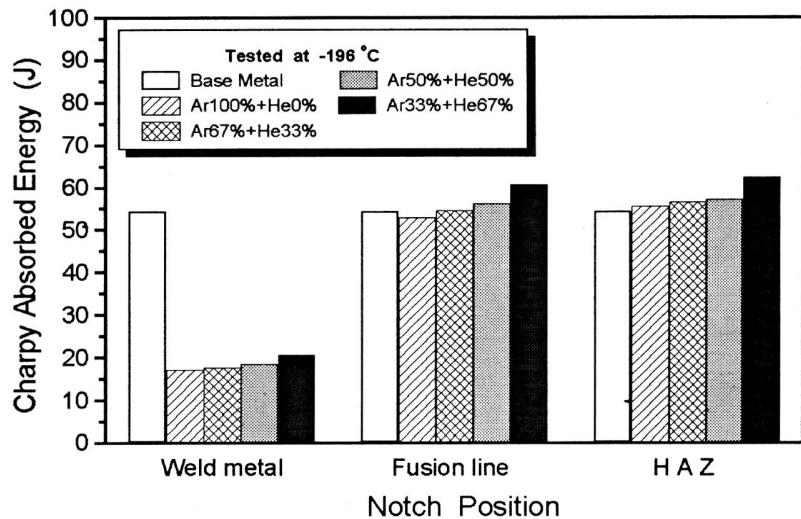


Fig. 4-17 Relations between notch position and Charpy absorbed energy at  $-196^{\circ}\text{C}$

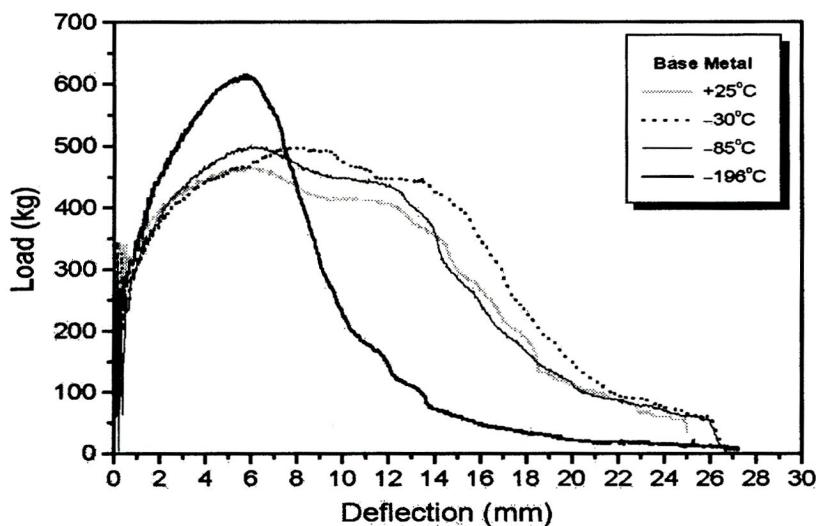


Fig. 4-18 Load-deflection curve for base metal

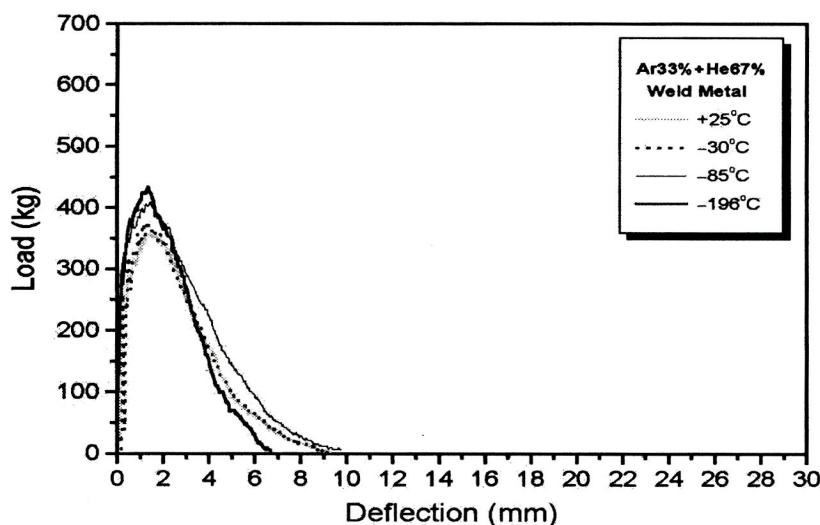


Fig. 4-19 Load-deflection curve for Ar33%+He67% weld metal specimens

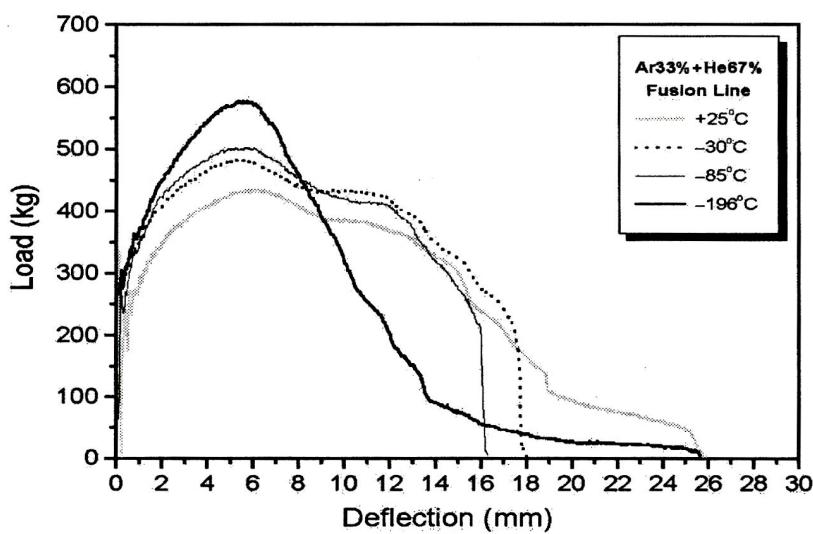


Fig. 4-20 Load-deflection curve for Ar33%+He67% fusion line specimens

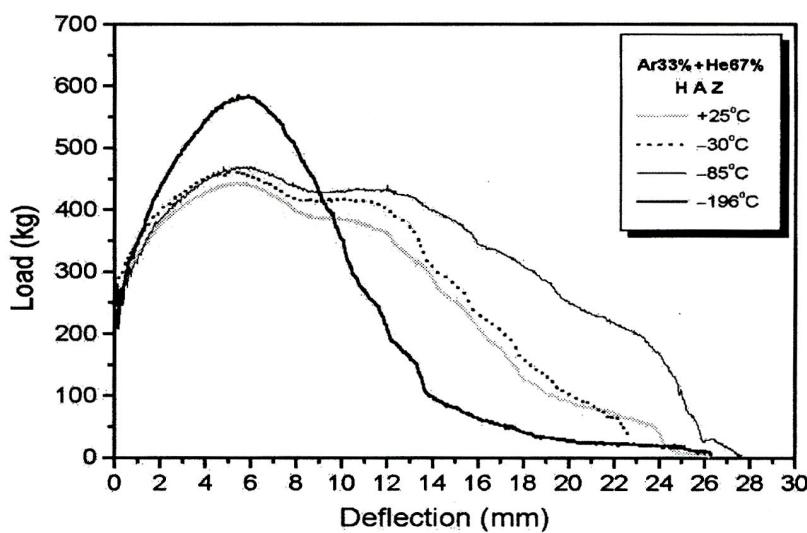


Fig. 4-21 Load-deflection curve for Ar33%+He67% HAZ specimens

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 저온용기 등에 많이 사용되고 있는 알루미늄 합금 Al5083-O재에 대한 보호가스 혼합비율과 강도와의 관계를 규명하고자 혼합가스 비율을 여러 가지로 달리하여 GMA 용접을 하였다. 시험온도는 상온에서 극저온까지 단계적으로 낮추어가며 인장시험, 충격시험 등을 실시하였다. 실험으로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 불활성가스 혼합비율이 비드형상에 미치는 영향에서 비드폭은 Ar만을 사용한 경우 가장 크게 나타난 반면, 비드깊이 및 면적은 Ar 혼합량이 낮아질수록 증가하여 Ar33%+He67%에서 가장 크게 나타났으며, 희석률(dilution)도 가장 양호하였다.
- 2) 방사선 투과검사 결과 Ar33%+He67%의 혼합비에서 결합의 크기 및 수가 가장 적게 나타났으며, He의 혼합량이 감소할수록 결합이 많아지는 경향을 보였다.
- 3) 인장강도는 보호가스 혼합비율 및 입열량과 관계가 없었으며, 항복강도 및 연신율은 입열량과는 관계가 없었으나 He의 혼합율이 높아질수록 증가함을 알 수 있었다.
- 4) 흡수에너지에는 용착금속부가 가장 낮았으며 용접선, 모재, 열영향부의 순으로 높아졌다. 또한 He의 혼합량이 증가할수록 흡수에너지에는 증가하는 경향을 보이며 Ar33%+He67%에서 가장 높았다. 상온에서 -85°C까지 흡수에너지에는 증가하였으나, -196°C에서는 감소하였다.

## REFERENCE

1. 李載淳, 吳澤烈, “알루미늄合金板材(Al5083)의 疲勞特性에 미치는 淬火壓延量과 安定化處理의 영향”, 自動車工學會誌, Vol. 5, No 2, pp. 31~40, 1983.
2. 徐昌敏, “알루미늄產業의 重要性과 問題點”, 大韓機械學會誌, Vol. 24, No. 1, pp. 10~12, 1984.
3. 김영석, “알루미늄 판재의 成形기술의 현황과 과제”, 大韓機械學會誌, 第 32卷, 第 7號, pp. 620~631, 1992.
4. 黃昌奎, “알루미늄 材料技術(I)”, 大韓機械學會誌, 第 29卷, 第 1號, pp. 23~28, 1989.
5. 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.
6. 홍성호, “액화천연가스 저장탱크의 현황 및 전망”, Journal of KWS, Vol. 13, pp. 1~7, 1995.
7. 한종만, 한용섭, “GT Membrane형 LNG선의 용접기술과 용접부 강도”, 大韓熔接學會誌, 第 11卷, 第 4號, pp. 24~25, 1993.
8. 김일수, 권옥현, 박창언, “GMAW 공정중 용접변수들이 용접축에 미치는 영향에 관한 연구”, 大韓熔接學會誌, 第 14卷, 第 4號, pp. 204~213, 1966.
9. 김일수, “GMA 용접에 최적의 용접비드 형상을 예측하기 위한 수학적 모델 개발”, 大韓熔接學會誌, 第 15卷, 第 3號, pp. 250~259, 1997.
10. 김원훈, 나석주, “용접 아크 및 용융 풀의 유동을 고려한 용접부의 수치해석”, 大韓熔接學會誌, 第 15卷, 第 1號, pp. 26~35, 1997.
11. 안재현, 김재웅, “박판 GMA 용접에서 단락주파수를 이용한 이면비드 제어에 관한 연구”, 大韓熔接學會誌, 第 13卷, 第 4號, pp. 330~339, 1995.
12. 朴種段, 尹英燮, “알루미늄合金의 熔接部에서의 氣孔”, 大韓造船學會誌, 第 15卷, 第 1號, pp. 19~27, 1978.

13. 한국과학기술원, 용접용 고장도 알루미늄 소재 개발 (II), 과학기술처, pp. 4 3~62, 1993.
14. 윤광희, 한용섭, “알루미늄 합금의 GMAW 용접”, 大韓熔接學會誌, 第 12卷, 第 1號, pp. 24~26, 1994.
15. Kaufman, J. G., and Wanderer, E. T., Machine Design, Nov. P. 199, 1965.
16. 한기영, 한종만, 이민우, 이은배, 한용섭, “고능률 GMAW의 용접성에 미치는 보호가스의 영향”, 大韓容接學會 春季學術大會, Vol. 13, No. 1, pp. 559~569, 1995.
17. 張雄成, 方國守, 張來雄, 嚴基元, “容接構造用 高張力鋼의 容接部 韌性에 미치는 微細 組織과 容接 入熱量의 影響”, 大韓熔接學會誌, 第 7卷, 第 2號, pp. 44~54, 1989.
18. 김효종, 이성근, “2상 스테인리스강 용접부의 저온충격인성과 내응력 부식성에 관한 연구”, 韓國海洋工學會誌, 第 9卷, 第 1號, pp. 152~169, 1995.
19. Server, W. L., Tetelman, A. S., “U.S. Army Research Office-Durham Technical Report”, No. 6, 1971.
20. 李昌禧, 張來雄, “알루미늄 합금의 용접특성(Part II)”, 大韓熔接學會誌, 第 11 卷, 第 1號, pp. 2~7, 1993.
21. 강성수, “알루미늄 합금의 저항용접 기술의 현황과 전망”, 大韓熔接學會誌, 第 15卷, 第 2號, p. 19, 1997.
22. David L. OLSON, “Welding Theory and Practice”, Vol. 8, North-Holland, pp. 182~199, 1989.
23. Bill lucas, “Shielding gases for arc welding-part I”, Welding & Metal Fabrication, pp. 218~225, 1992.
24. “용접 · 접합 편람”, 대한용접학회, p.242, 1998.
25. Yukio Kameko, Katsuzi, Takeuchi, “Lectures on Aluminium Fishing Boats Builduing (II)”, 輕金屬容接, Vol. 29, No. 10, pp. 475~492, 1991.
26. 이승평, 『금속재료』, 도서출판 청호, 1998, pp. 467~484.

27. 염기원, 이원평, 『용접공학』, 원화출판사, 1980, pp. 342~346.
28. 용접전문기술자 교육과정, “재료”, 한국기계연구원, KWE, Vol. II, pp. 2~25, 1993.
29. 김일수, 권옥현, 박창언, “GMAW 공정중 용접변수들이 용접폭에 미치는 영향에 관한 연구”, 대한용접학회지, 제 14권, 제 4호, pp. 204~213, 1996.
30. “용접접합편람”, 대한용접학회, pp. 131~141, 1998.
31. 嚴基元, 『最新容接工學』, 東明社, 1996, pp. 10~24.
32. 吳奐敎, 鄭在康, 車龍勳, 『신편 용접공학』, 원창출판사, 1993, pp. 27~31.
33. 李基英, “Pulsed-MIG 용접에 의한 고강도 알루미늄합금의 용접특성에 관한 연구”, 全北大學校 碩士學位論文, pp. 1~14, 1999.
34. 權度亨, “GMA 용접공정의 비드형상 추론기술”, 慶北大學校 碩士學位論文, pp. 2~10, 1998.
35. 吳世奎, 鄭淳億, 『最新容接工學』, 普成閣, 1996, pp. 11~55.
36. 한라중공업(주), 『용접기술』, 1995, pp. 36~258.
37. Minoda, K., Irisawa, T. and Nagoka, H., “Weldability of Al-Mg Alloy 5083-O Thick Plates Report 2”, Journal of the Japan Welding Society, Vol. 46(10), pp. 46~53, 1997.
38. Rabkin, D. M., “Nature of Hot Cracks Initiating in Welding the Aluminum Alloys and Some Methods of Crack Prevention”, Cracking and Fracture in Welds, Proceeding of the First International Symposium, sub-session II -D1 to II-D5, 1997.
39. Baba, Y., Hagiwara, M. and Hamada, J., “Stress Corrosion Cracking of Comercial Al-Mg Alloys and its Prevention”, Sumitomo Light Metal Technical Reports, pp. 22~28, 1973.
40. Hay, R. A., “No. 3 of a series on Welding Aluminum”, Welding Journal Practical Briefs, pp. 225~226, 1974.

41. 박동단, 조대식, “알루미늄合金의 容接 龜裂”, 大韓造船學會誌, 第 15卷, 第 1號, p. 53, 1978.
42. Japanese Welding Society, “Welding Handbook”, 3rd Edition, Vol. 2 Chapter 13, pp. 221~228, 1967.
43. 崔善哲, 『容接解說』, 성안당, 1998, pp. 229~270.
44. 선급 및 강선규칙, 『제2편 재료 및 용접』, 한국선급, 1998, p. 68.
45. 嚴基元, “알루미늄과 그 合金의 容接”, 大韓機械學會誌, Vol. 19, No. 4, pp. 229~306, 1979.
46. 윤한기, 오환섭, 박원조, 최병기, 『재료시험입문』, 원창출판사, 2000, pp. 124~125.
47. 금속재료 충격 시험편, 한국산업규격(KS B 0809), 1995, P. 1974, 1995.
48. R.S. Chandel, “Mathematical modeling of melting rates for submerged arc welding”, Welding Journal, 제 66권, 제 5호, pp. 135-s-140-s, 1987.
49. 이창희, 장래웅, “알루미늄 합금의 용접특성”, 대한용접학회지, 제 10권, 제 3호, pp. 1~11, 1992.
50. 金亘寧, 金基侯, 林鍾汶, “Al5083-O 알루미늄 合金材의 鎔接部位의 平面굽힘 疲勞에 의한 疲勞균열成長 特性에 관한 研究”, 韓國舶用機關學會誌, 第 10卷, 第 1號, pp. 71~72, 1986
51. 金宗河, “金屬材料 疲勞強度의 設計資料”, 日本機械學會 編, pp. 21~37, 1995.

## 저작물 이용 허락서

학 과	기계·금속교육	학 번	20078146	과 정	(석사), 박사
성 명	한글 : 모 성 창	한문 :牟性昶	영문 : Mo Sung-chang		
주 소	광주광역시 남구 봉선1동 라인하이츠 105동 608호				
연락처	E-MAIL : mosi0711@naver.com				
논문제목	한글 : 알루미늄합금 용접의 보호가스 영향에 관한 연구 영어 : A Study on Influence of Shield Gas in Aluminium Alloy Welding				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

### - 다 음 -

- 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
- 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
- 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
- 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
- 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
- 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
- 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(  ) 반대(  )

년              월              일

저작자 :        모 성 창        (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하