

Al5083-O GMA 용접부의 입열량과 보호가스 혼합비율에 따른 강도 평가

The Strength Evaluation of Al5083-O GMA Welding Zone According to the Heat Input and Mixing Shield Gas Ratio

이 동 길*, 양 훈 승**, 정 재 강***
Donggil Lee, Hoonseung Yang, Jaekang Chung

ABSTRACT

This study was to evaluate mechanical properties and toughness of the Al5083-O aluminum alloy welding zone according to the mixing shield gas ratio and heat input change. The GMA(Gas Metal Arc) welding of the base metal was carried out with four different mixing shield gas ratios(Ar100%+He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+ He50%, and Ar33%+He67%) and three different heat inputs(low, medium, and high). To investigate the Charpy absorbed energy of the weld zone, the specimens were divided base metal, weld metal, fusion line, and HAZ notched specimen according to the worked notch position.

The different gas ratio and heat input had little effect upon the tensile strength. But Ar33%+He67% mixture had the greatest mechanical properties considering that the more He gas ratio concentrations, the higher yield strength and elongation. The maximum load and displacement of the weld metal notche specimen was so much low more than that of the base metal, but fusion line and HAZ notched specimens showed almost same regardless of the mixing shield gas ratio and heat input. The Charpy absorbed energy was lowest in weld metal notched specimen, and increased in the fusion line, and HAZ notche specimen in order. Ar33%+He67% mixture had the greatest toughness considering that the more He gas ratio, the higher absorption energy.

주요기술용어 : GMA welding(Gas Metal Arc welding), Absorbed energy(흡수에너지), Mixing shield gas ratio(보호가스 혼합비), Weld metal(용착금속), Fusion line(용접선), HAZ(열영향부)

1. 서 론

알루미늄 합금 Al-Mg계(5000 시리즈)는 Al에

Mg을 단독으로 혹은 Mn과 함께 첨가시켜 강도를 크게 향상시킨 재료이며, 내식성 및 용접성이 우수하다는 등의 많은 장점이 있다. 따라서 용접 구조용합금으로 뿐만 아니라 저온 저장 용기에도 광범위하게 사용되어가고 있는 추세이다.¹⁾

Al-Mg계 알루미늄 합금의 하나로서 Al5083-O

* 회원, 조선대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 목포기능대학 산업설비과

*** 회원, 조선대학교 기계공학부

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.²⁾

액화천연가스는 저공해, 안전성, 경제성 및 편리성 등의 여러 면에서 장점을 가지고 있으므로 급격한 수요 증대를 가져오게 되었으며, 이에 따른 LNG 수송선, 저장탱크, 공급라인 등 공급시설의 수요가 급속히 커지고 있다.³⁾

현재 국내에서 제조 중인 LNG선은 크게 Moss 방식과 Membrane 방식 2종류로 구분하며, Moss 방식의 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.⁴⁾

알루미늄 합금의 GMA용접 시 사용되는 보호가스로서는 Ar, He 및 CO₂ 등이 있으며, 국내 조선소에서 Moss방식 LNG 저장탱크 제작 용접에 주로 사용되는 보호가스로서는 Ar과 He의 혼합가스를 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 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.⁵⁾ 그리

고 He의 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.⁶⁾ 따라서 재료의 용접품질을 높이고 용접비용을 절감하기 위한 적절한 혼합비를 선정하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 또한, 알루미늄은 열전도성이 높아 용접에 필요한 국부적 용융을 어렵게하고 열영향부의 폭을 확대시키므로 용접부의 기계적성질을 저하시키는 단점이 있으므로 용접 시 세심한 주의가 필요하다.

본 연구에서는 He가스의 사용량을 적절히 제어함으로써 용접성과 용접비용을 최적화하기 위한 방법의 일환으로서 보호가스의 혼합비율 및 입열량에 따른 용접부의 기계적성질 및 인성을 분석함으로써 저비용 고효율의 용접을 얻을 수 있는 불활성 가스의 혼합비와 입열량을 찾고자 한다.

2. 실험

2.1 시험재료 및 GMA 용접

시험재료는 소형고속선박과 LNG 저장용기 재료로 많이 사용되고 있는 Al-Mg계 알루미늄 합금재인 Al5083-O이다. 모재 및 본 용접에 사용된 용접와이어 Al5183-WY(직경 ϕ 1.2mm)의 화학적 성분은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 각각 나타내었다. GMA용접은 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. 이때 사용된 불활성가스는 Ar과 He으로서 혼합비율을 Ar100%+He0%, Ar67%+ He33%, Ar50%+ He50% 및 Ar33%+He67%의 4종류로 분류하였다. 각각의 혼합비율은 다시 Table 3에 표시된 바와 같이 저(L), 중(M), 고입열량(H)의 3종류로 나누어 용접을 실시하였다. 혼합된 불활성가스는

순도 99.995%의 He과 Ar을 혼합비율에 맞게 미리 혼합 주문하여 제조함으로써 혼합비의 오차를 최소화하였다. 또한, 시료채취는 (사)한국선급의 규정⁷⁾ 따라 용접된 판재로부터 적당한 가공 여유를 두고 고무 채취하여 시험의 정확도를 높이고자 하였다.

Photo. 1은 용접단면의 비드형상을 나타내고 있는 사진 및 이를 도시화한 형상으로서 각각의 패스 수를 나타내고 있다.

알루미늄 합금의 표면에는 보통 아주 얇은 층의 알루미늄의 산화막이 형성되어 가공을 만드는 원인이 된다.⁸⁾ 특히 Al-Mg합금에서는 피막이 강하고 두께가 두껍다. 따라서 본 연구에서는 용접 전처리로서 산화피막 및 청결을 위해 스테인리스강재 와이어 브러시를 이용하여 연마를 용

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. (MPa) | T. S. (MPa) | Elong. (%) | E (MPa) |
|-----------|----------------|----------------|---------------|----------------------|
| Al5083-O | 186.2 | 335.2 | 14 | 68.6×10 ³ |
| Al5183-WY | 182.3 | 320.5 | 14 | 68.6×10 ³ |

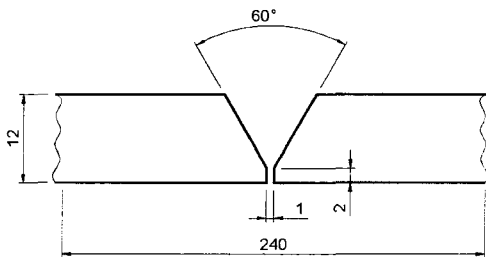


Fig. 1 GMAW method

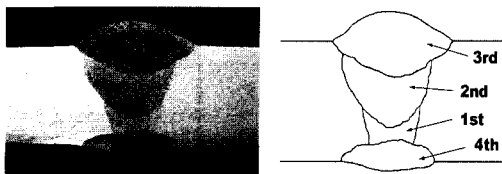


Photo. 1 Macro-photograph and schematic diagram of the weld section

접 바로 직전에 실시하였다.⁹⁾ 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.

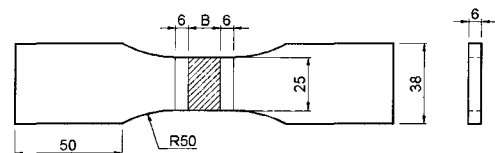
Table 3 GMAW conditions

| Condition Gas ratios | Heat input | Speed (cm/min) | Voltage (V) | Current (A) |
|-------------------------|------------|-------------------|----------------|----------------|
| Ar100%+He0% | L | 50 | 21 | 220 |
| | M | 40 | | |
| | H | 30 | | |
| Ar67%+He33% | L | 50 | 23 | |
| | M | 40 | | |
| | H | 30 | | |
| Ar50%+He50% | L | 50 | 26 | |
| | M | 40 | | |
| | H | 30 | | |
| Ar33%+He67% | L | 50 | 29 | |
| | M | 40 | | |
| | H | 30 | | |

2.2 시험편 및 실험방법

인장시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2와 같이 (사)한국선급의 규정⁷⁾에 맞게 용접 비드폭(B)을 중심으로하여 양쪽으로 6mm씩 평활부가 되도록 페이스 밀링커터를 이용하여 이송속도를 0.05mm/rev로 가공하였다. 인장시험은 Instron 4206(15ton)을 이용하였으며, cross head speed는 2mm/min로 실시하였다.

충격시험편의 제작과정은 다음과 같다. 우선 채취된 시료를 상하 1mm씩 절삭하여 단면의 크



B : Bead width

Fig. 2 Geometry of tensile test specimen

기가 샤프 표준시편의 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 용착금속부(weld metal), 용접선(fusion line) 및 용접선으로부터 모재쪽으로 2mm 떨어진 HAZ에 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.

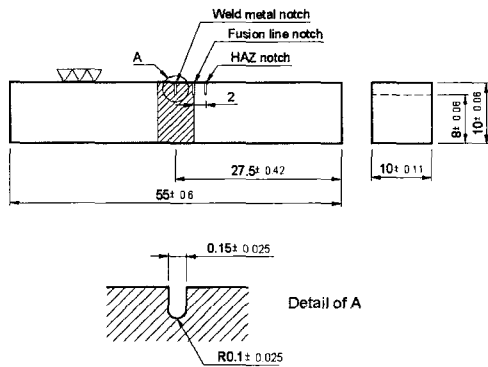


Fig. 3 Geometry of Charpy impact test specimen

Fig. 3은 가공된 시험편의 형상 및 치수를 나타낸 것으로서 각각의 불활성가스 혼합비율에서 노치가공 위치에 따라 용착금속부, 용접선 및 HAZ에 노치가 가공된 시험편으로 구분된다.

충격시험에 사용한 기기는 용량이 294.3N·m이며, 로드셀이 계장화된 Charpy 충격시험기로서 정확한 데이터를 얻고자 A/D변환기(PowerDAQ PD2-MF)를 이용하였다. 따라서 앰프에서 출력되는 하중 및 변위 값은 직접 컴퓨터에 입력되며, DASYLab 5.0을 이용하여 분석함으로써 정확성 및 신뢰성을 높이고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조직 및 경도

Photo. 2는 각각의 불활성가스 혼합비율에 따

른 용착금속부의 사진으로서 중입열 조건이다. 사진에 나타난 바와 같이 Mg이 Mg₂Al₃의 고용체로서 전체에 미세하게 분산석출된 모습을 볼 수 있다. 또한 보호가스에 He의 사용량이 증가할수록 기공은 감소하여 Ar33%+He67%에서는 기공이 거의 나타나지 않고 있다. 또한 모든 불활성가스 혼합비율 및 입열량에서 고온균열 및 산화피막 혼입 등은 발견되지 않았는데 이는 GMA용접 시 사용한 용접와이어에 Si함량이 적고 Mg함량이 모재 보다 높으므로 Mg₂Si 결정이 입계에 편석하여 내고온균열성을 저해하지 않았고, 용접 전처리 및 후처리를 철저히 실시하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 Ar만을 100% 사용하여 용접한 시험편의 비드 중앙에서부터 모재쪽으로 0.5mm간격으

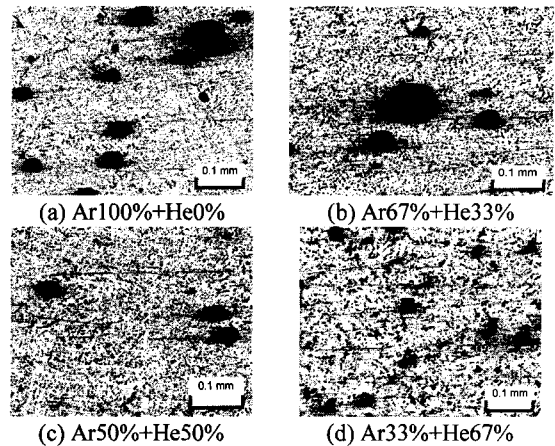


Photo. 2 Micro-structure of weld metal for mixing shield gas ratios in medium heat input (×100)

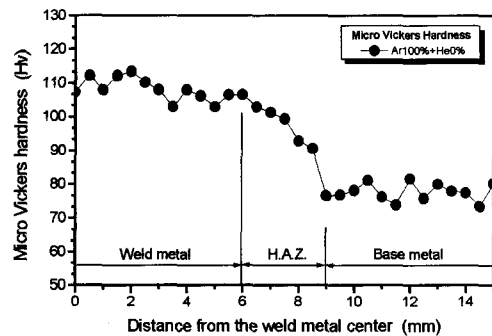


Fig. 4 Micro-vickers hardness distribution

로 측정된 마이크로비커스 경도값 분포를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 모재 및 용착금속부의 경도값은 약 77 및 108 정도로서 용착금속부가 약 30 정도 높게 나타났으며, 열영향부 폭은 약 1.5mm를 나타내고 있다.

3.2 기계적성질에 미치는 영향

Figs. 5~7은 각각의 불활성가스 혼합비에서 기계적성질과 입열량의 관계를 나타내고 있다.

Fig. 5는 인장강도와 입열량의 관계를 나타낸 그림으로서 인장강도는 불활성가스 혼합비 및 입열량에 관계없이 모재와 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 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. 7은 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 증가할수록 증가함을 알 수 있었다.

3.3 하중-변위 선도에 미치는 영향

Figs. 8~10은 대표적인 Ar33%+He67% 시험편에 대한 하중-변위 선도를 모재와 비교하여 도시한 것이다.

Fig. 8은 모재와 용착금속부에 노치가 가공된 시험편의 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 최대 하중 및 변위는 모재의 경우 각각 약 4500N 및 약 25mm인 반면, 용착금속부에 노치가 가공된 시험편은 약 3600N 및 약 9.8mm로서 모재보다 매우 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 모재와 큰 차이가 있음을 알 수 있으며, 용착금속부에 노치가 가공된 시험편의 하중-변위 선도는 입열량에 관계없이 모두 유사한 곡선을 나타내고 있다.

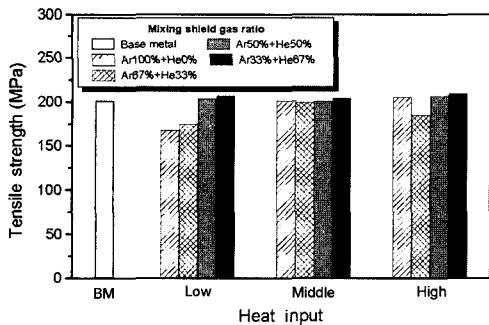


Fig. 5 Relations between tensile strength and heat input

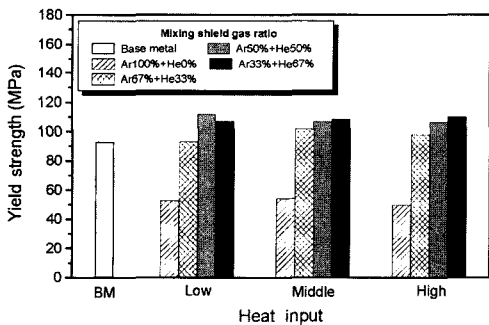


Fig. 6 Relations between yield strength and heat input

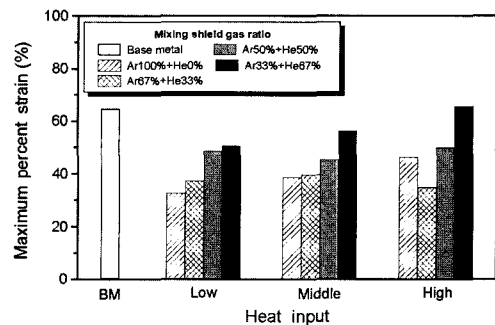


Fig. 7 Relations between maximum percent strain and heat input

Fig. 9와 10은 용접선 및 HAZ에 노치가 가공된 시험편의 하중-변위 선도로서 용착금속부에 노치가 가공된 시험편과는 달리 모재의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한, 입열량에 관계

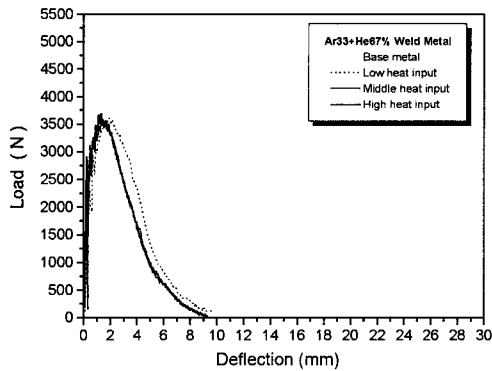


Fig. 8 Load-Deflection curve for Ar33%+He67% weld metal notched specimens

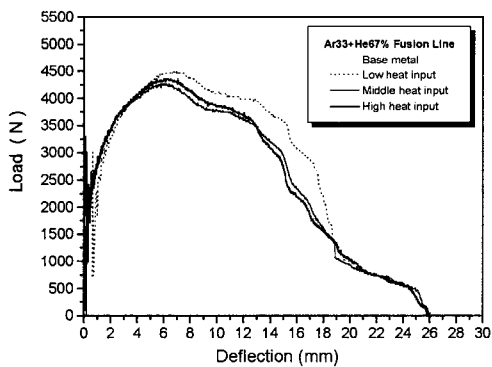


Fig. 9 Load-Deflection curve for Ar33%+He67% fusion line notched specimens

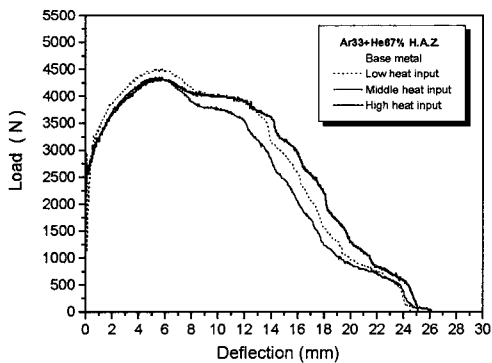


Fig. 10 Load-Deflection curve for Ar33%+He67% HAZ notched specimens

없이 거의 유사한 곡선을 보였다.

따라서 하중-변위선도에서 용착금속부에 노치가 가공된 시험편은 모재의 최대하중 및 변위와 큰 차이를 보이는 반면 용접선 및 HAZ에 노치가 가공된 시험편에서는 차이가 없었으며, 입열량은 하중-변위선도에 영향을 미치지 않았다.

3.4 흡수에너지에 미치는 영향

Figs. 11~13은 각각의 보호가스 혼합비율에서 샤피충격 흡수에너지와 입열량의 관계를 모재와 비교하여 나타내고 있는 그림이다.

Fig. 11은 용착금속부에 노치가 가공된 시험편의 입열량에 따른 흡수에너지의 변화를 나타낸 그림이다. 입열량에 따른 흡수에너지의 변화를 살펴보면 Ar33%+He67%는 저입열, 중입열, 고입열 순으로 입열량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 Ar33%+He67% 외의 혼합비에서는 중입열, 고입열 저입열 순으로 증가하는 경향을 알 수 있다. 또한 모든 입열량에서 He의 혼합량이 증가할수록 흡수에너지는 증가하여 Ar100%+He0%에서 가장 낮고, Ar33%+He67% 혼합비에서 가장 높게 나타났다. 특히, 용착금속부에 노치가 가공된 시험편의 흡수에너지는 모재의 약 30% 정도로 매우 낮은 값으로 나타났는데 이와 같은 결과는 용착금속부가 용접와이어가 녹아 형성된 주조조직을 갖기 때문으로 분석된다.

Fig. 12는 용접선에 노치가 가공된 시험편의 입열량에 따른 흡수에너지의 변화를 나타낸 그림이다. 입열량이 증가할수록 흡수에너지는 증가하는 경향을 보이며 Ar100%+He0%에서 가장 낮고, Ar33%+He67%에서 가장 높게 나타나고 있다. 그러나 모든 불활성가스 혼합비 및 입열량에서 모재보다 낮은 흡수에너지를 보이고 있다.

Fig. 13은 열영향부에 노치가 가공된 시험편의 경우로서 흡수에너지는 중입열, 저입열, 고입열 순으로 증가하고 있다. 불활성가스에 He의 혼합량이 증가할수록 흡수에너지는 높아져 Ar100%

+He0%가 가장 낮은 흡수에너지를 나타내었고 Ar33%+He67%에서 가장 높게 나타났다. 또한, 용착금속부 및 용접선에 노치가 가공된 시험편의 경우와는 달리 Ar33%+He67% 중입열 및 고입열에서 모재보다 높은 흡수에너지를 보였다.

불활성가스 혼합비 및 입열량에 따른 흡수에너지의 변화를 분석한 결과 흡수에너지는 He의

혼합량이 증가할수록 증가하여 Ar33%+He67%에서 가장 우수한 인성이 나타났다. 또한, 용착금속부, 용접선, HAZ에 노치가 위치할수록 증가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 저온용기 등에 많이 사용되고 있는 알루미늄 합금 A15083-O재 용접부에 대한 기계적성질 및 충격인성을 평가하고자 혼합가스 비율 및 입열량을 여러 가지로 달리하여 GMA 용접을 하였다. 인장시험 및 계장화 살피 충격시험을 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 용착금속부에 노치가 가공된 시험편의 최대하중 및 변위는 모재와 큰 차이를 보이지만 용접선 및 HAZ에 노치가 가공된 시험편은 차이가 없었다.

3) 용착금속부에 노치가 가공된 시험편의 흡수에너지는 모든 불활성가스 혼합비율 및 입열량에서 모재의 약 30% 정도로 낮게 나타났다.

4) 모든 불활성가스 혼합비율 및 입열량에서 흡수에너지는 용착금속부, 용접선 및 HAZ에 노치가 가공된 순으로 증가하였다.

5) He의 혼합량이 증가할수록 흡수에너지는 증가하여 Ar33%+He67%에서 가장 우수한 인성을 나타내었다.

참고 문헌

- 1) 黃昌奎, "알루미늄 材料技術(I)," 대한기계학회지, 제29권 제1호, pp.23-28, 1989.
- 2) 김종희, 박동환, "후판 알루미늄 합금 용접의 기공발생과 방지대책," 대한용접학회지, 제12권 제1호, pp.7-11, 1994.

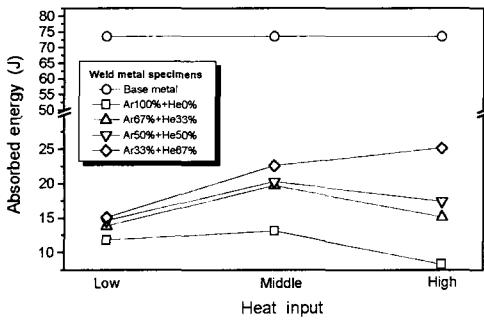


Fig. 11 Relations between Charpy absorbed energy and heat input for weld metal notched specimens

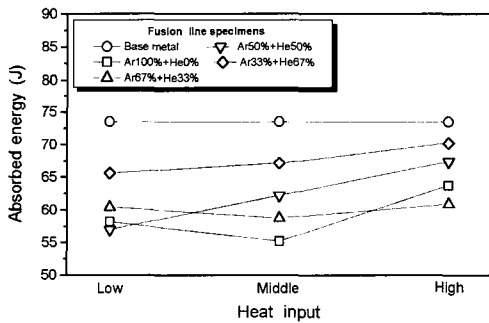


Fig. 12 Relations between Charpy absorbed energy and heat input for fusion line notched specimens

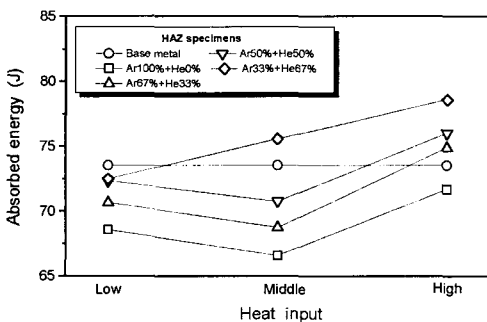


Fig. 13 Relations between Charpy absorbed energy and heat input for HAZ notched specimens

- 3) 홍성호, “액화천연가스 저장탱크의 현황 및 전망,” 대한용접학회지, 제13권, pp.1-7, 1995.
- 4) 한종만, 한용섭, “GT Membrane형 LNG선의 용접기술과 용접부 강도,” 대한용접학회지, 제1권 제4호, pp.24-25, 1993.
- 5) D. L. OLSON, “Welding Theory and Practice,” Vol.8, North-Holland, pp.182-199, 1989.
- 6) B. Lucas, “Shielding gases for arc welding-part,” Welding & Metal Fabrication, pp.218-225, 1992.
- 7) 선급 및 강선규칙, 제2편 재료 및 용접, 한국선급, pp.59-68, 1998.
- 8) 嚴基元, “알루미늄과 그 합금의 熔接,” 대한기계학회지, 제19권 제4호, pp.229-306, 1979.
- 9) 강성수, “알루미늄 합금의 저항용접 기술의 현황과 전망,” 대한용접학회지, 제15권 제2호, p.19, 1997.