

Al5083-O GMAW 용접부의 외관검사 및 방사선투과검사에 관한 연구

A Study on the Visual Inspection and Radiographic Test in Al5083-O Aluminum Alloy Welding Zone

이 동 길*, 양 훈 승**, 정 재 강***

* 조선대학교 대학원 기계공학과

** 목포기능대학 산업설비과

*** 조선대학교 공과대학 기계공학부

1. 서 론

최근 알루미늄과 그 합금을 이용한 대형구조물의 건조가 증가되고 있는 추세에 따라 종래의 재질 보다 강도가 높은 새로운 용접구조용 알루미늄 합금재가 개발되고 있으며, 용접법의 개발 중 MIG용접법과 그 기구의 개발에 의하여 알루미늄 후판도 고능률적으로 용접이 가능하게 되었다¹⁾.

Al-Mg계 알루미늄합금 중에서 Al5083은 약 4.5%의 Mg을 함유하고 있는 대표적인 용접구조용 합금으로서 비열처리합금 중에서는 강도가 높고, 용접성, 내식성 및 저온취성 등이 우수하므로 액화천연가스(LNG) 수송 및 보관용 탱크에 사용되고 있으며, 앞으로 더욱 늘어날 것으로 기대된다²⁾. 현재 국내에서 건조중인 LNG 저장탱크는 크게 Moss방식과 Membrane 방식 2종류로 구분된다. Moss방식의 LNG 탱크의 재료로서는 9% Ni강 또는 A5083-O의 Al합금을 사용하여 왔으나 최근의 건조실적을 보면 취성과파괴의 방지가 더욱 용이한 A5083-O의 Al합금을 사용하는 경향이 두드러지고 있다³⁾.

그러나 LNG선의 설계 및 건조 시에는 많은 기술과 주의를 요하는데 특히 LNG Tank의 용접 및 조립기술 등은 선박 건조 시에 있어서 가장 중요한 핵심기술 분야라고 할 수 있으며, Moss형 Tank 제작 시에 적용되고 있는 용접법은 주로 GMAW 용접을 실시하고 있다. 현재 국내의 LNG선 제조실적은 세계적으로 인정받는 수준이라 할 수 있으나, 용접 기술력 보유 측면에서는 외국에 대부분 의존하고 있는 실정이므로 매우 부족하다고 할 수 있다. 특히 Al-Mg 후판 용접 시 기공이 많이 발생하고 있으며, 용접에 사용하는 보호가스로서 고가(高價)의 He을 많이 사용하므로 용접비용이 크게 증가하여 결국 선박 건조비용이 높아지는 원인이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 적절한 보호가스 혼합비율을 사용하여 기공의 발생량을 줄이고, 충분한

용입을 얻으며, 용접 기술력 확보 및 저비용 고효율의 용접을 얻고자 Ar와 He 혼합가스비율을 Ar100%+He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+He50% 및 Ar33%+He67%의 4종류로 분류하고, 각각의 혼합비율에서 입열량을 저·중·고입열 3종류로 나누어 용접을 실시한 후 보호가스의 혼합비율 및 입열량에 따른 용접부의 용접성을 분석하여 가장 양호한 불활성 가스의 혼합비와 입열량을 조사하였다.

2. 시험편 및 MIG용접

시험재료는 LNG 저장탱크 중 Moss형 제작에 적용되고 있는 Al-Mg계 알루미늄 합금재인 A5083-O으로서 모재 및 용접선재 A5183-WY의 화학적 성분은 Table 1에 기계적 성질은 Table 2에 각각 나타내었다.

일반적으로 Al-Mg계 합금은 용접금속에 균열의 발생을 조장하는 Si와 같은 원소가 고용한도 이상으로 첨가될 경우는 Mg₂Si라는 결정이 입계에 편석하여 내고온균열성을 저해하며^{4, 5)}, 될 수 있는 한 용접와이어의 Mg함량이 모재의 Mg함량보다 높은 것으로 조합해야 된다고 하였다⁶⁾. 따라서 Si 함량은 낮고 Mg 함량이 높은 용접와이어를 사용하였으며, 용접기는 Inverter Pulse MIG/MAG/CO₂ HITACH 350 CAP2이며, 보호가스 및 입열량에 따른 용접조건은 Table 3과 같다. 용접된 판재로부터 외관검사 및 방사선 투과검사를 위한 시험편 채취는 (사)한국선급의 규정⁷⁾에 따라 용접된 판재로부터 고루 채취하여 시험의 정확도를 높이고자 하였다.

Table 1 Chemical compositions (wt. %)

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A5083-O (Base metal)	0.40	0.40	0.10	0.70	4.45	0.15	0.25	0.14	REM
A5183-WY (Welding wire)	0.10	0.27	0.01	0.58	4.55	0.11	0.06	0.11	REM

Table 2 Mechanical properties

Materials	Y. S. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	El. (%)	E (kg/mm ²)
Base Metal	19.0	34.2	14	7.0×10 ⁴
Welding Wire	18.6	32.7	14	7.0×10 ⁴

알루미늄 합금의 표면에는 강한 산화피막이 형성되므로 용접을 실시하려면 이 피막의 처리가 아주 중요하다. 특히 Al-Mg합금에서는 피막이 강하고 피막 두께가 두껍다. 이러한 피막의 존재는 너그의 안정화에 방해된다는 설과 접촉저항의 증가에 의해 용접부 품질이 향상된다는 설이 있으나 전극의 소모가 많아지는 등 좋지 않는 면이 더 큰 것으로 보고되고 있다⁸⁾. 또한 알루미늄 합금의 용접변형은 일반 강재에 비하여 매우 크므로 이에 대한 특별한 주의도 요구된다.

따라서 본 연구에서는 용접 전처리로서 산화피막 및 청결을 위해 스테인리스강제 와이어 브러쉬 및 줄을 이용하여 연마를 용접 바로 직전에 실시하였으며, 용접변형을 방지하기 위하여 강성이 높은 지그로 용접선 부근을 강하게 구속하여 아래보기 반자동 용접을 실시하였다. 또한, 용접 후처리로서 응력집중에 의한 균열이 발생하지 않도록 용접비드 시종단에 예리한 노치가 없도록 그라인더를 이용하여 제거하였다. 따라서 산화피막 및 용접변형에 따른 용접결함은 없었다고 사료된다. 한편, 용접은 작업장 환경 즉, 온도, 습도 및 풍속 등에 큰 영향을 받으므로 용접 시공 시 맑은 날씨를 택하였으며, 그 작업장 환경조건으로서 온도 23℃, 습도 60% 및 풍속 0.6m/sec 이하의 조건에서 실시하였으므로 용접환경에 따른 결함발생은 없었다고 사료된다.

Table 3 MIG welding conditions

GAS rate	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)
Ar100%+He0%	220	21	50	5.54
			40	6.93
			30	9.24
Ar67%+He33%		23	50	6.07
			40	7.59
			30	10.12
Ar50%+He50%	26	50	6.86	
		40	8.58	
		30	11.44	
Ar33%+He67%	29	50	7.66	
		40	9.57	
		30	12.76	

3. 결과 및 고찰

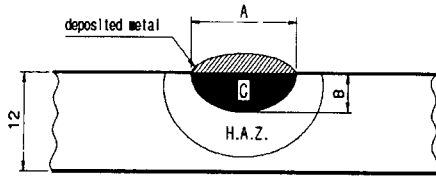
3.1 외관 검사(Visual inspection)

Gas Metal Arc Welding(GMAW)은 일반 아크용접에서 발전한 것으로 보호가스와 전류, 전압 등 용접변수를 적절하게 선택함에 따라 요구되는 품질의 용접이 가능하고, 자동화의 편리함과 경제적인 이점 때문에 크고 작은 많은 기계구조물 제작에 쓰이고 있다. 그러나 다층용접을 실시할 경우 첫 패스는 용탕이 빨리 식으므로 가스나 슬랙이 미처 빠져나가지 못하고 용융부 내에 갇히는 경우가 많으므로 첫 패스가 가장 중요하다⁹⁾. 따라서 외관검사를 위한 시험편은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 12mm두께의 판을 bead on plate로 1 패스 용접한 다음 비드 형상을 비교·측정하였다.

용접된 부재의 단면을 보면 용접부 품질평가의 주요 기준인 비드형상(bead geometry)을 볼 수 있는데, 이는 비드 폭(bead width), 높이(bead height), 깊이(bead depth) 및 용입면적(area)으로 구분할 수 있다¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서도 Ar과 He의 불활성가스의 혼합 비율에 따른 외관검사로서 비드형상에 대해 면밀한 조사를 수행하고 최적의 혼합가스 비율을 찾고자 한다. Photo. 1은 각각의 용접조건으로부터 얻어진 비드를 연마 후 부식액(Vilella 용액)을 이용하여 부식한 사진을 나타내고 있으며, Table 4는 구적계(KP-90)를 이용하여 비드 형상을 측정된 결과를 나타내고 있다.

Fig. 3~5는 불활성가스의 혼합량 및 입열량에 따른 비드형상의 변화를 나타낸 그림으로서 모든 불활성가스 혼합비율에서 입열량이 증가함에 따라 비드 폭, 깊이 및 용입면적은 증가하는 경향을 보였다. 한편, Ar만을 100% 사용한 경우 비드폭은 크게 조사된 반면 비드깊이 및 면적은 He을 혼합하여 사용한 경우보다 매우 작게 조사되었다. He의 혼합량이 증가할수록 비드깊이 및 용입 면적이 증가하여 Ar33+He67의 경우 Ar만을 100% 사용했을 때 보다 비드깊이 및 면적이 약 2배 이상 증가 함을 알 수 있다.

용접부의 형상으로서 용접성을 판단하는 기준은 비드폭도 중요하지만 비드깊이와 용입 면적이 양호 해야 좋은 용접성을 나타낸다고 할 수 있으므로 따라서 본 연구에서 수행한 불활성가스의 혼합비율 중 He을 50%이상 사용한 Ar50%+He50% 및 Ar33%+He67%인 조건에서 양호한 용접을 얻을 수 있었다.



(A : bead width, B : bead depth, C : bead area)
 Fig. 1 Schematic bead geometry for Visual inspection

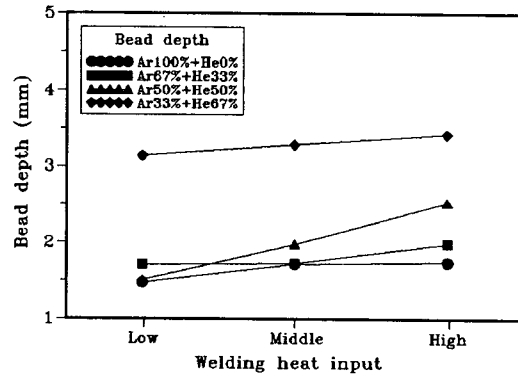


Fig. 4 Relation between the bead depth and the mixed GAS rate

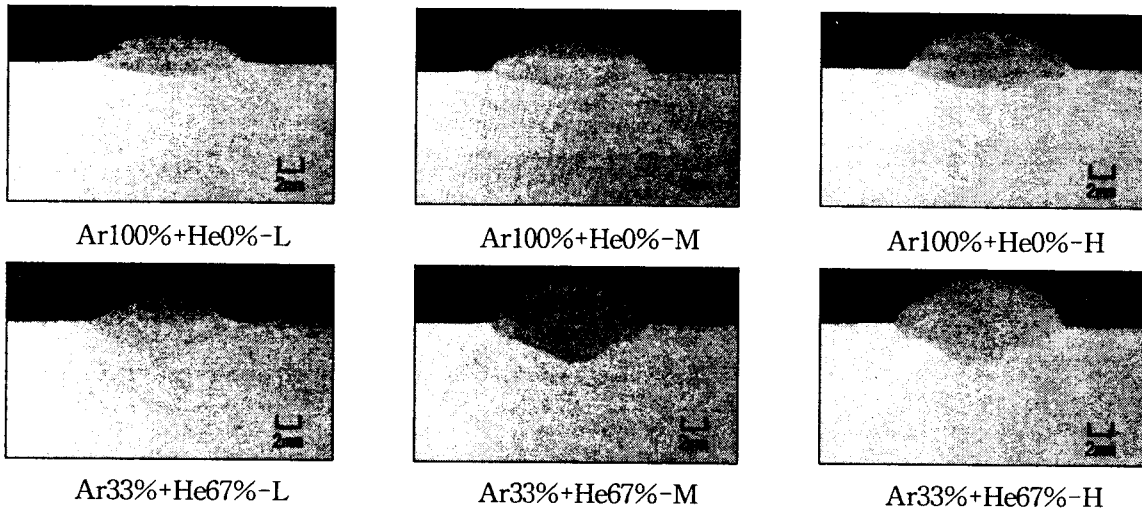


Photo. 1 Photographs of the bead shape measurement

Table 4 The evaluation of welded bead shapes

GAS Rate	Bead		Bead width (mm)	Bead depth (mm)	Area (mm ²)
	L	M			
Ar100%+He0%	L	M	12.110	1.476	9.8
	M	H	12.531	1.718	12.0
	H		13.181	1.744	17.4
Ar33%+He67%	L	M	11.734	3.139	21.7
	M	H	13.090	3.285	23.9
	H		13.788	3.423	30.4

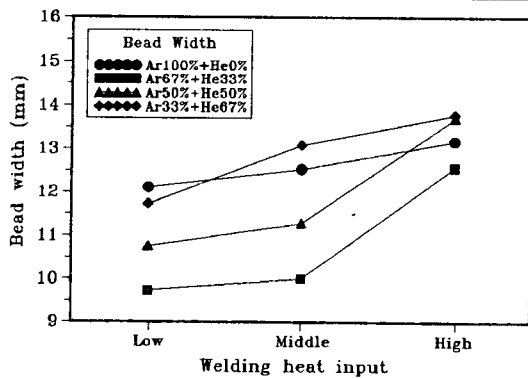


Fig. 3 Relation between the bead width and the mixed GAS rate

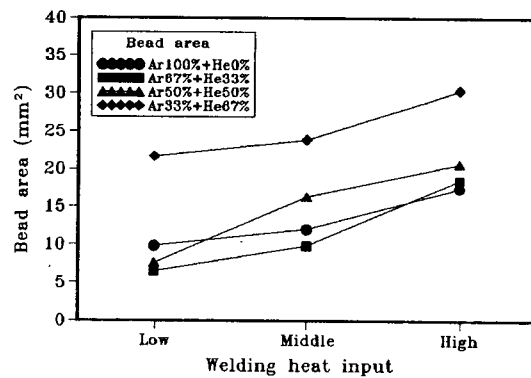


Fig. 5 Relation between the bead area and the mixed GAS rate

3.2 방사선 투과검사

방사선 투과검사를 위한 시험편은 Fig. 6에 도시한 바와 같은 방법으로 아래보기 용접을 실시하였다. 용접검사 시 육안으로 볼 수 있는 결함은 물론 내부결함 및 인접한 모재부의 결함도 조사할 필요가 있다. 현재 알루미늄합금 용접부에 대한 기공 검사 및 평가 방법에는 방사선 투과검

사, 확대 투영기에 의한 단면검사, 비중측정 및 가스분석의 4가지 방법이 실시되고 있으나 주로 방사선 투과검사를 사용하고 있다. 이러한 방사선 투과검사법은 광범위한 검사가 가능하고 방법이 매우 간편하며, 저비용으로 대량처리가 가능하기 때문에 공업적 목적은 물론 연구목적으로도 넓게 이용되고 있다. 알루미늄 및 알루미늄합금의 용접부에 대한 방사선 투과검사는 KS D 0242에 규정되어 있으며¹¹⁾, 투과사진에 의해 산출된 결함점수에 따라 1급~4급까지의 등급을 정하는 것으로 되어있다. 따라서 본 연구에서도 KS규정에 따라 방사선 투과검사를 실시한 후 등급을 분류하였으며 검사에 사용한 검사기는 SMART 583E이다.

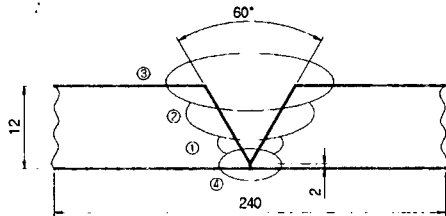


Fig. 6 Welding method for radiographic test

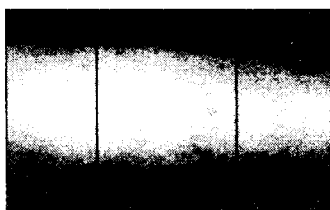
우선 시험시야는 시험부 전체 면적 중 결함점수가 가장 커지는 부분을 대상으로 10mm×10mm로 설정였다. 결함점수 계산 시 0.4mm이하의 결함은 점수화하지 않고, 각각의 결함크기에 따라 점수를 부여하여 총 합계점수를 산출하였으며, 등급분류는 모재의 두께와 결함점수에 의한 등급분류표에 의하여 실시하였다. 또한, 기공이외의 결함인 산화피막 혼입 등에 대해서도 각각의 규정에 따라 결함 점수를 산출하여 합계의 결함 점수를 구하였다.

Photo. 2는 방사선 투과 필름 중 등급판정에 사용한 시야 10mm×10mm(□ mark)를 포함하는 부분의 사진을 나타내고 있으며, 산출된 결함 점수 및 등급은 Table 5와 같다.

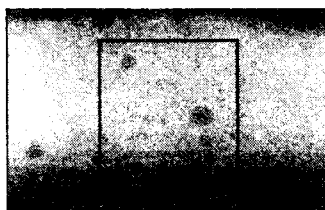
방사선 투과검사 결과 He의 혼합량 및 입열량이 클수록 결함의 크기는 및 숫자는 크게 감소하여 결함점수가 낮아지는 경향을 보였으며, 등급판정결과 Ar100%+He0% 및 Ar67%+He33%의 경우는 모든 입열량에서 2등급으로 조사된 반면, Ar50%+ He50%의 경우 중입열 조건에서 1등급이 나타났으며, Ar33%+He67%의 경우 모든 입열량에서 1등급으로 판정되었다. 따라서 보호가스에 He을 50%이상 혼합하여 사용함으로써 용접결합의 발생이 적어지므로 양호한 용접을 얻을 수 있으리라 사료된다.

Table 5 Radiographic inspection results

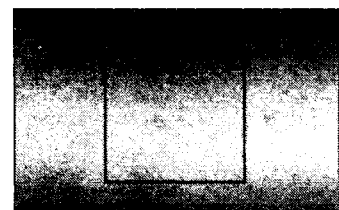
GAS rate and heat input		Defect size and numbers (mm)			Total defect score	Grade
		under 1.0	1.0 ~ 2.0	over 2.0		
Ar100%+He0%	L	12	0	0	12	II
	M	7	2	0	11	II
	H	4	2	0	8	II
Ar67%+He33%	L	9	0	0	9	II
	M	5	0	0	5	II
Ar50%+He50%	L	7	0	0	7	II
	M	4	0	0	4	I
	H	8	2	0	12	II
	L	0	0	0	0	I
Ar33%+He67%	M	0	0	0	0	I
	H	2	0	0	2	I



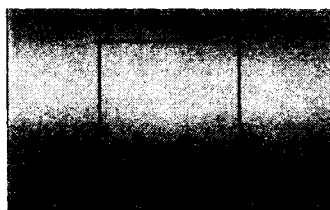
Ar100%+He0%-L



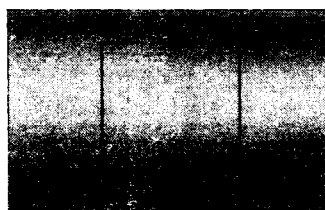
Ar100%+He0%-M



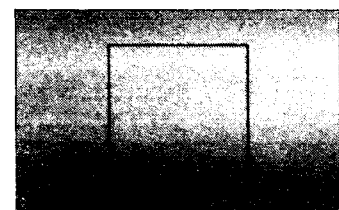
Ar100%+He0%-H



Ar33%+He67%-L



Ar33%+He67%-M



Ar33%+He67%-H

Photo. 2 Photographs of radiographic test film (□ : test sight(10mm×10mm))

4. 결 론

본 연구에서는 Al5083-O재의 GMAW 용접에 대한 부족한 국내 기술력 확보와 저비용 고효율의 용접성을 위한 보호가스의 혼합비율 및 입열량에 따른 용접성을 평가하고자 용접부의 외관검사 및 방사선 투과검사를 실시하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모든 불활성가스 혼합비율에서 입열량이 증가함에 따라 비드폭, 깊이 및 용입면적이 증가하는 경향을 보였으며, Ar만을 100% 사용한 경우 비드폭은 큰 반면 비드깊이 및 면적은 He를 혼합하여 사용한 경우보다 매우 작게 조사되어 입열이 부족함을 알 수 있었다.
- 2) He의 사용량이 증가할수록 용입이 양호해지며, Ar33%+He67%의 경우 다른 혼합비율과 비교해 보면 비드깊이 및 면적이 크게 증가하였다.
- 3) 방사선 투과검사 결과 He의 혼합량 및 입열량이 증가할수록 대체적으로 결함 점수는 낮게 조사되어 Ar100%+He0% 및 Ar67%+He33%의 경우 모든 입열량에서 2등급으로 조사되었고, Ar50%+He50%의 경우는 중입열에서만 1등급이 나타났으며, Ar33%+He67%의 경우는 모든 입열량에서 1등급으로 판정되었다.
- 4) 용접부의 외관검사 및 방사선 투과검사 결과를 종합해 보면 보호가스로서 He의 사용량이 증가할수록 용입이 양호해지며, 용접결함 발생이 줄어드는 경향을 보였는데 이러한 원인은 He증가에 따라 입열이 높아져 기포발생률이 적어졌기 때문으로 사료된다. 따라서 He의 적정 사용량은 최소한 50% 이상 사용하여야 양호한 용접을 얻을 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

1. 朴鍾段, 尹英燮 : 알루미늄 합금의 熔接部에서 의 氣孔, 大韓造船學會誌, 第15卷, 第1號, 1978, 19
2. 김중희, 박동환 : 후판 알루미늄 합금 용접의 기공 발생과 방지대책, 大韓熔接學會誌, 第12卷 第1號, 1994, 7-11
3. 한종만, 한용섭 : GT Membrane형 LNG선의 용접기술과 용접부 강도, 大韓熔接學會誌, 第11卷 第4號, 1993, 24-25
4. Baba, Y., Hagiwara, M. and Hamada, J. : Stress Corrosion Cracking of Commercial Al-Mg Alloys and its Prevention, Sumitomo Light Metal Technical Reports, 1973, 22-28
5. Hay, R. A. : No. 3 of a Series on Welding Aluminum, Welding Journal, Practical Briefs, 1974, 225-226
6. 박종단, 조대식 : 알루미늄 합금의 熔接 龜裂, 大韓造船學會誌, 第15卷, 第1號, 1978, 53
7. 선급 및 강선규칙 : 제2편 재료 및 용접, 한국 선급, 1998, 68
8. 강성수 : 알루미늄 합금의 저항용접 기술의 현황과 전망, 大韓熔接學會誌 第15卷, 第2號, 1997, 19
9. 최선철 : 熔接解説, 성안당, 1998, 535-552
10. 이재범, 방용우, 오성원, 장희석 : GMAW에서 비드형상제어에 관한 연구, Journal of KWS, Vol. 15, No. 6, 1997, 116
11. 한국산업규격 KS D 0242, 알루미늄 용접부의 방사선 투과시험 방법 및 투과사진의 등급 분류 방법, 1987, 226-274