

계장화 살피 시험법에 의한 A15083-O MIG 용접부의 저온 동적파괴 인성에 관한 연구

The Low Temperature Dynamic Fracture Toughness on A15083-O Aluminum Alloy MIG Welding Zone by Instrumented Charpy Test

이 동길*, 이 상열**, 김 건호***, 정 재강****

* 조선대학교 대학원 기계공학과

** 목포과학대학 자동차과

*** 군산대학교 해양과학대학 해양생산학·기관공학부

**** 조선대학교 공과대학 기계공학부

1. 서 론

여러 가지 공학재료들의 기계적, 물리적인 특성들은 하중상태, 온도 등 재료들이 사용되는 조건에 알맞게 대응하도록 결정되어야 한다. 특히 원자력발전의 핵심부인 원자로 및 가스 압력용기 등의 설계, 제조 및 가동중의 감시시험 등 동적 하중에 대한 기초적인 파괴특성이 규명을 위해 살피충격시험은 필수적인 시험항목 중 하나이다¹⁾. 따라서 1906년 프랑스의 Charpy에 의하여 창안된 살피 충격시험이 많이 이용되고 있으며, 이 방법은 비교적 쉽게 동적 균열개시 인성치를 산정할 수 있다고 알려져 있다²⁾.

한편, 최근 알루미늄과 그 합금을 이용한 대형 구조물의 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 되었다³⁾. Al-Mg계 알루미늄합금 중에서 A15083은 약 4.5%의 Mg를 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 기대된다.

따라서 본 연구에서는 A15083-O MIG용접에 대한 기술력 확보 및 저비용 고효율의 용접을 얻기 위하여 보호가스 Ar과 He의 혼합비율을 Ar100%+He0%, Ar67%+He33%, Ar50%+He50% 및 Ar33%+He67%의 4종류로 분류하고, 각각의 혼합비율에서 시험온도를 +25, -30, -85 및 -196℃로 단계적으로 낮추어가며 충격시험을 실시하여 동적파괴 인성을 평가하였다.

2. 실 험

2.1 시험재료 및 MIG용접

본 연구에 사용한 시험재료는 소형고속선박과 LNG 저장용기에 많이 사용되고 있는 Al-Mg계 알루미늄 합금재인 A15083-O으로서 모재 및 ϕ 1.2mm 용접선재 A5183-WY의 화학적 성분 및 기계적 성질은 각각 Table 1과 2에와 같다.

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 ⁵
Welding Wire	18.6	32.7	14	7.0×10 ⁵

MIG용접은 루트 간격없이 두께 12mm인 판을 전면 3패스, 후면 1패스로 충격시험편 노치의 길이방향이 압연방향과 수직이 되도록 실시하였으며, 그 용접 조건은 Table 3과 같으며, 사용한 용접기는 Inverter Pulse MIG/MAG/CO₂ HITACH 350 CAP2이다.

알루미늄 합금 중 특히 Al-Mg합금은 의 표면에는 두껍고 강한 산화피막이 형성되어 용접부의 품질에 나쁜 영향을 미친다. 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 용접

선 부근을 강하게 구속한 후 용접을 실시하였으므로 산화피막 및 용접변형에 따른 용접결함은 없었다고 사료된다. 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 실시하였으므로 용접환경에 따른 결함발생 또한 없었다고 사료된다.

Table 3 MIG welding conditions

GAS rate	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)
Ar100%+He0%	220	21	40	6.93
Ar67%+He33%		23		7.59
Ar50%+He50%		26		8.58
Ar33%+He67%		29		9.57

2.2 시험편 및 실험방법

용접된 판재로부터 충격시험편 가공을 위한 채취는 (사)한국선급의 규정4)에 따라 고루 채취하여 시험의 정확도를 높이고자 하였으며, 채취된 시료를 상하 1mm씩 절삭하여 10mm 두께로 만든 후 부식액(Kellers 용액)을 사용하여 노치가 가공될 시험편의 중심이 용융중심부(weld zone), 용융부와 모재의 경계인 용접선(weld line) 및 용융 중심부로부터 2mm 떨어진 HAZ부에 정확히 위치하도록 가공하였으며, 노치는 0.3mm의 두께의 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 2mm의 깊이로 해당 위치에 가공하였다.

저온실험 중 -30℃와 -85℃는 자체 제작한 챔버 내에 석유에테르(Petroleum Ether)를 채운 뒤 액체질소(N₂)를 냉매로 이용하여 코일형 동관을 통해 챔버 내부를 순환하여 외부로 배출하는 과정에서 냉각이 되도록 제작하였다. 이때 보다 원활한 열전달이 되도록 내부에 팬(fan)을 설치하였으며, 냉각속도는 약 3℃/min이었다. 또한, 온도조절은 써모커플, 솔레노이드밸브 및 자동온도조절장치에 의해 약 ±0.9℃ 이내의 오차 내에서 유지되었으며, 설정온도에서 약 20분간 유지하여 후 실험을 실시하였다.

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

일반적으로 저온 충격시험의 경우 시험편을 샬피시험기의 앤빌상에 15초간 방치하였을 때의 온

도상승을 점검한 결과에 따르면, -20℃의 시료는 1℃, -60℃ 시료는 3℃, -100℃ 시료는 3.5℃, -190℃ 시료는 5℃만큼 온도가 상승한다고 알려져 있다⁵⁾. 그러나 본 연구에서는 시료를 챔버에서 꺼내어 충격을 가하기까지 약 5초 이내로 소요되었으므로 실험하고자 하는 온도와 큰 차이가 없다고 사료되어 온도보정은 따로 하지 않았다.

실험에 사용한 시험기는 용량이 30kg·m이며, 로드셀이 계장화된 Charpy 충격시험기로서 시험편에 충격하중을 가하면 시험편과 텀의 접촉순간의 하중으로부터 파단하중까지 빠르게 변화하는 하중을 정확히 측정할 수 있다.

Fig. 1과 Photo. 1은 한국산업규격⁶⁾에 맞게 가공한 충격시험편의 형상 및 치수 및 가공이 완료된 충격시험편을 부식시킨 사진으로서 각각의 불활성가스 혼합비율에서 용융부, 용접선 및 HAZ 노치 시험편으로 구분된다.

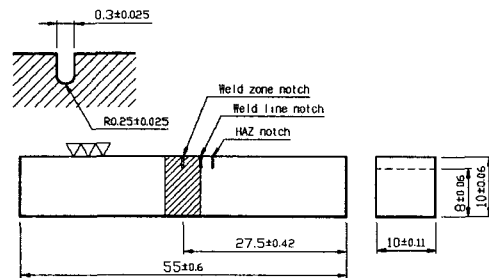


Fig. 1 Geometry of Charpy impact test specimen

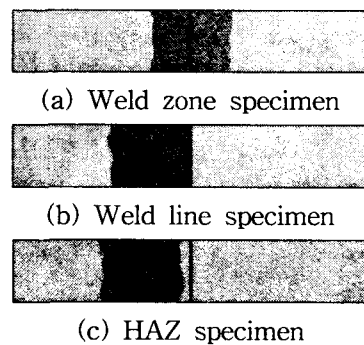


Photo. 1 Welded impact test specimens

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부의 조직

일반적으로 Al-Mg계 합금은 용접에 대한 내균열성이 큰 구조용 재료이므로 용접할 때 특별히 부적당한 시공법으로 용접하지 않는 한, 균열 발생은 실제로 큰 문제가 되지 않는다⁷⁾. 그러나 용접금속에 Si원소가 고용한도 이상으로 첨가될 경우는 Mg₂Si라는 결정이 입계에 편석하여 내고온균열성을 저해한다⁸⁾. 따라서 이 합금의 용접에

는 Si가 함유된 용접와이어의 사용을 삼가는 것이 좋고, 반드시 써야할 경우는 결정 미세화 원소를 함유하고 있는 용접와이어를 선택하는 것이 바람직하며, 될 수 있는 한 용접와이어의 Mg함량이 모재의 Mg함량보다 높은 것을 사용해야 한다고 하였다⁹⁾. 따라서 본 연구의 MIG용접시 Mg함량이 모재보다 높은 와이어를 사용하였으므로 고온균열 발생에 영향을 미치지 않았다고 사료된다.

Photo. 2는 본 연구에서 사용한 Al5083-O 모재 및 용접선의 조직사진으로서 열영향부 및 탄화물이 불규칙하게 분포되어 있는 모습을 볼 수 있다. Photo. 3은 각각의 불활성가스 혼합비율에 따른 용융부를 나타낸 것으로서 조직이 치밀하며, He의 사용량이 증가할수록 기공은 감소하여 Ar33%+He67%에서는 기공이 거의 발견되지 않았다.

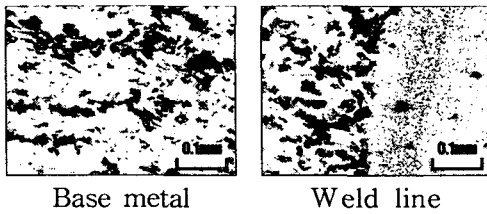


Photo. 2 Micro-structure of base metal and weld line ($\times 100$)

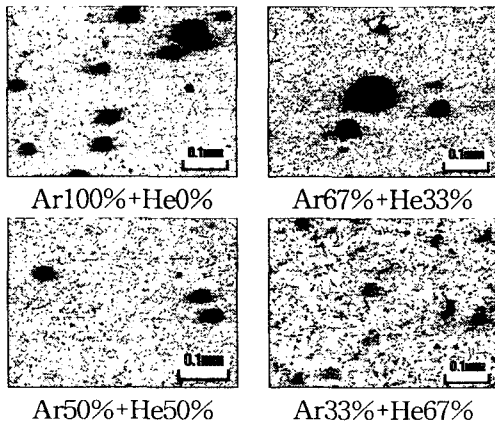


Photo. 3 Micro-structure of weld zone for all shield GAS rate ($\times 100$)

3.2 하중-변위 선도

Fig. 2~5는 하중-변위 선도 중 대표적인 모재 및 Ar100%+He0%로 용접된 시험편의 25°C, -30°C, -85°C 및 -196°C에서 측정된 대표적인 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 그래프는 최초의 가공경화현상을 나타내지 않고 직접 최대하중에 도달한 후 균열이 노치 직하부터 전파하는 양상

을 나타내고 있으며, 이때 최대하중은 그대로 파괴인성값을 구하는데 있어서 매우 중요하다. 또한 시험온도가 낮을수록 최대하중은 차츰 증가하다가 -196°C에서는 크게 증가하는 경향이 나타난 반면에, 변위는 25~-85°C까지는 큰 차이가 없었으나 -196°C에서는 큰 감소를 나타내었다. 특히, 용융부 시험편은 시험온도와 관계없이 거의 유사한 곡선을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 용접와이어의 용융부이기 때문에 기공 등의 용접결함의 함수이기 때문으로 분석된다.

이상으로 미루어보아 Server와 Tetelman¹⁰⁾이 주장하고 있는 동적파괴인성은 온도, 스트레인 속도, 시험편의 두께, 균열의 날카로운 정도 등의 함수와 본 실험의 결과는 잘 일치하고 있다.

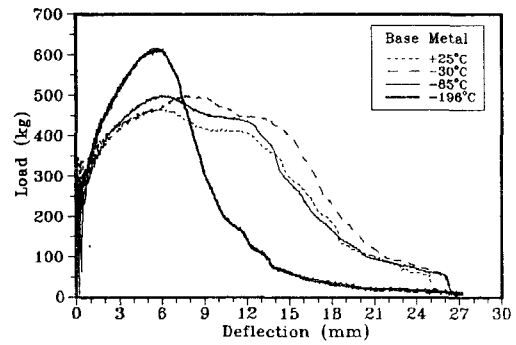


Fig. 2 Load-Deflection curve for base metal

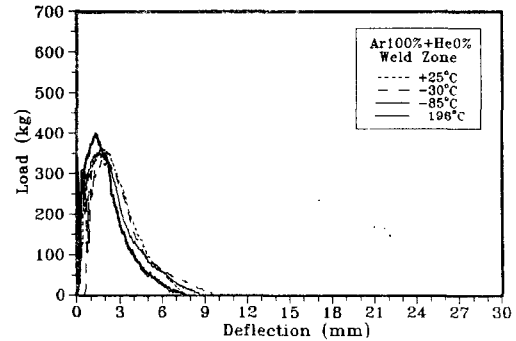


Fig. 3 Load-Deflection curve for Ar100%+He0% weld zone notched specimens

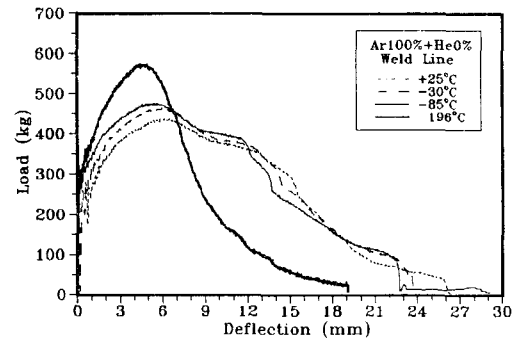


Fig. 4 Load-Deflection curve for Ar100%+He0% weld line notched specimens

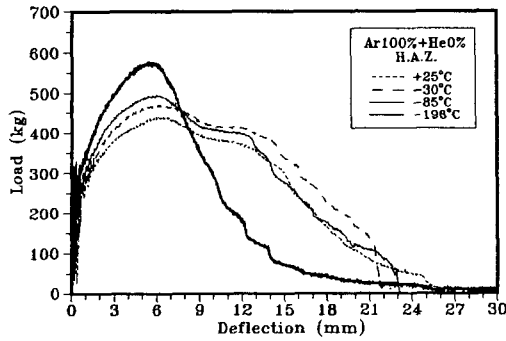


Fig. 5 Load-Deflection curve for Ar100%+He0% weld zone notched specimens

3.3 충격인성

충격인성에 대한 일반적인 연구를 살펴보면, 용접부의 충격인성은 오스테나이트의 양이 많을수록 증가하고 탄화물, 질화물 및 개재물의 존재 유무와 크기 및 양에 따라 좌우된다고 하였으며, 온도변화에 따른 충격인성은 온도가 강하함에 따라 어떤 한계온도에 도달하면 급격히 감소한다고 알려져 있다¹¹⁾.

Fig. 6~12는 각각의 시험온도에서 보호가스 혼합비율 및 시험온도에 따른 흡수에너지의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 시험온도에서 대체적으로 He의 사용량이 증가할수록 흡수에너지는 증가하는 경향을 보여 Ar33%+He67%의 경우 가장 큰 흡수에너지를 보였다. 또한 용융부시험편의 경우는 모재보다 매우 낮게 조사된 반면, 용접선 및 HAZ시험편의 경우는 모재와 거의 동등하거나 높게 조사되었다.

또한, 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.

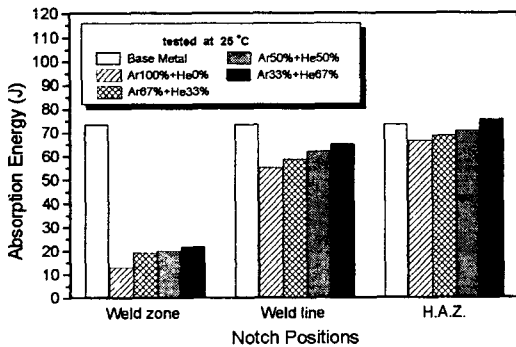


Fig. 6 Relation between notch position and absorption energy at +25°C

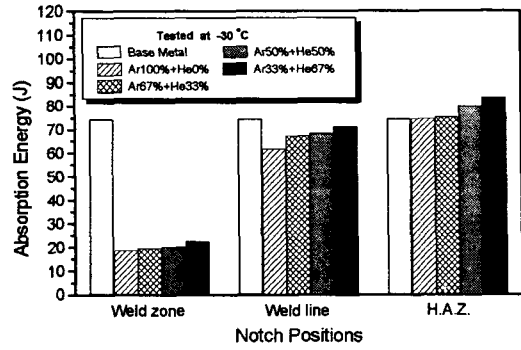


Fig. 7 Relation between notch position and absorption energy at -30°C

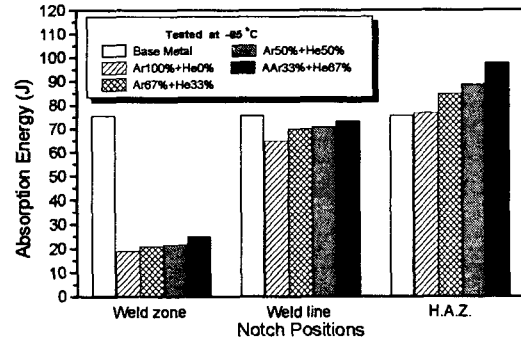


Fig. 8 Relation between notch position and absorption energy at -85°C

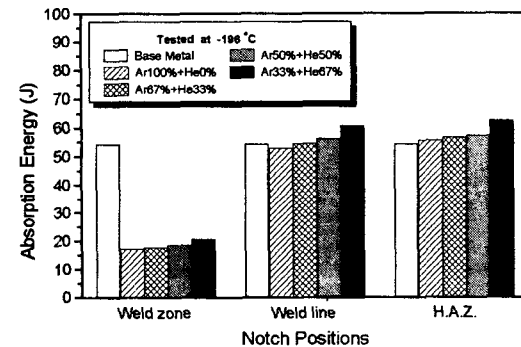


Fig. 9 Relation between notch position and absorption energy at -196°C

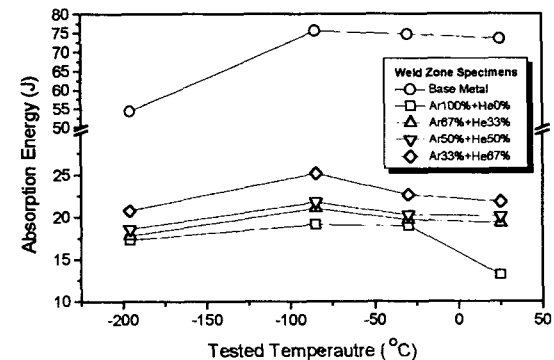


Fig. 10 Relation between tested temperature and absorption energy for weld zone specimens

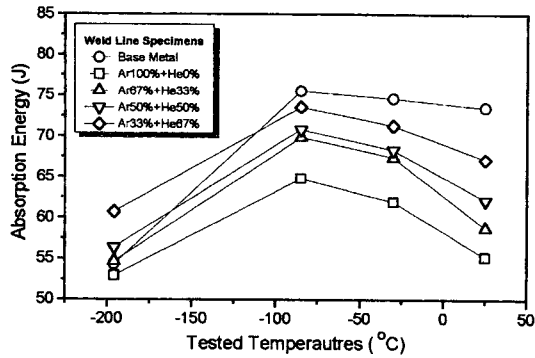


Fig. 11 Relation between tested temperature and absorption energy for weld line specimens

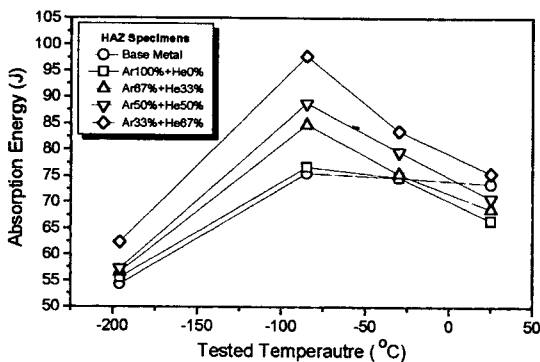


Fig. 12 Relation between tested temperature and absorption energy for HAZ specimens

4. 결 론

본 연구에서는 계장화된 샤피 충격시험을 이용하여 Al5083-O 알루미늄 합금재의 GMAW 용접부(weld zone, weld line 및 HAZ)에 대하여 시험온도를 25, -30, -85 및 -196°C로 낮추어가며 인성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중-변위 선도를 조사한 결과 최초의 가공경화현상을 나타내지 않고 직접 최대하중에 도달한 후 균열이 노치 직하부터 전파하는 양상을 보였다. 이 때 최대하중은 시험온도가 낮을수록 점차 증가하다가 -196°C에서는 크게 증가하는 경향을 나타낸 반면, 변위는 25~ -85°C까지는 큰 차이가 없었으나 -196°C에서 큰 감소를 나타내었다.
- 2) 모든 시험온도에서 대체적으로 He의 사용량이 증가할수록 흡수에너지는 증가하는 경향을 보여 Ar33%+He67%의 경우 가장 큰 흡수에

너지를 보였다. 또한 용융부시험편의 경우는 모재보다 매우 낮게 조사된 반면, 용접선 및 HAZ시험편의 경우는 모재와 거의 동등하거나 높게 조사되었다.

- 3) 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.

참고문헌

1. 김훈, 김주학, 지세환, 홍준화 : 샤피 충격시험에 있어서 시험편 크기의 영향, 大韓機械學會論文集(A), 第21卷, 第1號, 1997, 93-103
2. A. Ewing and L. Raymond : Instrumented Impact Testing of Titanium Alloys, ASTM STP 563, 1974, 180-202
3. 朴鍾段, 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, 1978, 19
4. 선급 및 강선규칙 : 제2편 재료 및 용접, 한국선급, 1998, 68
5. 윤한기, 오환섭, 박원조, 최병기 : 재료시험 입문, 원창출판사, 2000, 124-125
6. 금속재료 충격 시험편 : 한국산업규격(KS B 0809), 1995, 1974
7. 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), 1997, 46-53
8. 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
9. Japanese Welding Society : Welding Handbook, 3rd Edition, Vol. 2 Chapter 13, 1967, 221-228
10. W.L. Server, A.S. Tetelman : U.S. Army Research Office-Durham Technical Report, No. 6, 1971
11. 김효중, 이성근 : 2상 스테인리스강 용접부의 저온충격인성과 내용력 부식성에 관한 연구, 韓國海洋工學會誌, 第9卷, 第1號, 1995, 152-160