

AISI 304 스테인리스 강으로 제작된 LNG배관 용접부의 극저온 샤르피 충격시험

김정현* · 최성웅** · 박두환* · 이제명*[†]

*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

**한국기계연구원 극한에너지기계연구실

Cryogenic Charpy Impact Test based on GTAW Method of AISI 304 Stainless Steel for LNG Pipeline

Jeong-Hyeon Kim*, Sung-Woong Choi**, Doo-Hwan Park* and Jae-Myung Lee*[†]

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

**Dept. of Extreme Energy Systems, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, 305-343, Korea

[†]Corresponding author : jaemlee@pusan.ac.kr

(Received April 21, 2014 ; Revised June 18, 2014 ; Accepted June 20, 2014)

Abstract

AISI 304 austenitic stainless steel is widely used for LNG pipes for LNG transmission thanks to its good metallurgical and mechanical properties. In the present research, impact toughness of a gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel pipe was evaluated between room and liquid nitrogen (-196°C) test temperatures. In addition, a comparative study was made of the fracture behavior of FCC crystal structured stainless steel weldments and BCC crystal structured mild steels(A-grade and SS400). The results showed a slight decrease in the impact energy of the AISI 304 base metal, heat affected zone(HAZ), and welded zone with decreasing test temperature. In addition, the welded metal has the highest absorbed impact energy, followed by HAZ and the base metal.

Key Words : Charpy V-notch impact test, Welded LNG pipe, AISI 304 austenitic stainless steel

1. 서 론

액화천연가스(Liquefied natural gas, LNG)는 천연가스(Natural gas)를 -163°C 온도 이하의 환경에서 인공적으로 액화시켜 부피를 약 1/600로 줄인 것으로, 저장 및 운송이 용이한 장점을 지닌 청정 에너지이다. 전 세계적으로 지구온난화를 예방하기 위한 환경적 규제가 심해지고 있는 시점에서, 석유자원을 대체할 수 있는 가장 현실성 있는 에너지원으로 주목 받고 있으며, 셰일가스(Shale gas)에 대한 수출 본격화로 수요와 공급이 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다¹⁾. 이러한 LNG를 운송하기 위해 유럽이나 인프라가 잘 갖춰진 선진국에서는 LNG 배관을 이용하여 청정 에

너지를 운송하지만, 이들 국가를 제외한 대부분의 국가에서는 -163°C 극저온 환경에서도 안전성을 확보할 수 있도록 방열시스템이 장착된 LNG선을 이용하여 청정 에너지를 안전하게 운반한다. 그 후 육상 LNG 저장시스템으로 이동하기 위해 저온 환경에서도 기계적 성능이 우수하다고 보고되고 있는 오스테나이트계 스테인리스 강(Austenitic stainless steel)으로 제작된 LNG 배관이 이용된다.

오스테나이트계 스테인리스 강은 변태유기소성(Transformation induced plasticity, TRIP)강으로 마르텐사이트 상 변태로 인해 저온 영역에서도 강도, 용접성, 내식성, 연성 등에서 장점을 보이는 특성이 있으며, 주로 저온 영역에서 가동되는 구조물에 적용되는 재료이다. 특히, 조선·해양 산업에서는 LNG선의 멤브레인

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

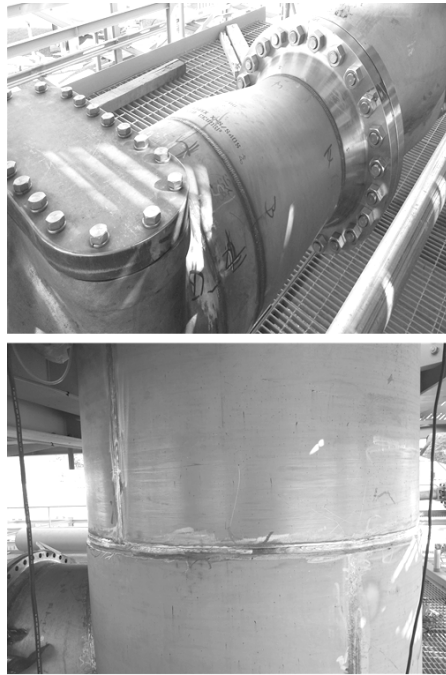


Fig. 1 Photograph of welded stainless steel pipe for LNG transmission

(Membrane), 극저온 밸브(Cryogenic valve), 배관(Pipe)과 같은 LNG 관련 산업에서 그 활용도가 높은 것으로 알려져 있다. 과거 저자의 연구에 있어서 오스테나이트계 스테인리스 강의 온도 및 변형률속도, 예비 변형률(Prestrain)에 따른 실험적 연구를 수행하여 그 우수성을 증명한 바 있다²⁻³⁾.

극저온 배관의 경우 일정한 규격으로 생산되나, Fig. 1과 같이 두 개 이상의 직관을 연결하거나 직관과 곡관을 연결할 경우 용접을 이용하여 연결하게 된다. 용접 프로세스로 인한 불연속(Discontinuity)현상과 -163°C의 극저온 유체를 운송하는 구조물의 특성상 작은 균열에도 강재가 쪼개져 쉽게 파괴될 위험이 있기 때문에 용접 구조물의 인성 측정이 반드시 요구된다⁴⁻⁵⁾. 강재의 인성을 표현하는 방법에는 CTOD(Crack tip opening displacement), J적분(J-integral), 평면변형률 파괴 인성(Plane strain fracture toughness, KIC), 등

여러 가지가 있으나 시험평가의 간편성, 소요시간 및 비용적 측면 등을 고려할 때 샤르피 충격시험(Charpy impact test)을 수행하여 시험온도와 흡수에너지로 표현하는 것이 가장 일반적이다⁶⁾.

이와 관련하여 오스테나이트계 스테인리스 강 용접부를 대상으로 다양한 연구가 수행 되었으며 용접 방법(SMAW vs. GTAW), 모재의 종류(304L vs. 316L), 그리고 충격시험기의 낙하속도에 따른 샤르피 충격시험을 수행하여 충격 흡수에너지를 비교·분석 하였다⁷⁻⁹⁾. 또한 에너지 수송을 담당하는 배관을 대상으로 X70강, X80강에 대한 샤르피 충격시험에 대한 연구도 수행되었다¹⁰⁻¹¹⁾. 하지만 에너지 수송을 담당하는 배관에 대한 연구 중 오스테나이트계 스테인리스 강으로 제작된 LNG배관의 구조를 대상으로 샤르피 충격시험을 통한 충격흡수 에너지를 측정 한 연구는 찾아보기 힘들며, 더욱이 열영향부와 용착금속부를 고려한 시험적 연구에 대해서는 거의 보고된바 없다.

본 연구에서는 오스테나이트계 스테인리스 강으로 제작된 LNG 배관의 모재부(Base metal, BM), 열영향부(Heat affected zone, HAZ), 그리고 용착금속부(Welding zone, WZ)에 대한 샤르피 충격시험을 수행하여 온도에 따른 충격 흡수에너지의 거동에 대해 분석 하였다. 또한, 체심 입방(Body centered cubic, BCC) 결정 구조를 가지는 두 가지 종류의 연강(Mild steel)을 선정하여 샤르피 충격시험을 수행 하였으며 이를 통해 재료의 결정구조에 따른 샤르피 충격거동 특성에 대해 조사 해 보았다.

2. 시편제작 및 시험 시나리오

2.1 시험 재료

본 연구에서는 FCC 결정구조를 가지는 AISI 304 스테인리스 강으로 제작된 15.1mm 두께의 LNG배관(Fig. 1)을 대상으로 모재부, 열영향부, 용착금속부에 대한 샤르피 충격시험을 수행하였다. BCC 결정구조를

Table 1 Chemical composition of investigated steels

Material	Chemical composition (wt. %)								
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	S	P	Si	Cu
AISI 304	0.022	18.8	8.3	-	1.62	0.002	0.035	0.53	-
SS 400	0.16	-	-	-	0.87	0.005	0.009	0.17	-
A - grade	0.18	0.09	0.03	-	0.35	0.020	0.017	0.19	-
ER 308L	0.016	19.95	10.39	0.08	1.87	0.48	0.022	0.48	0.11

Table 2 Welding conditions and process parameters

	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
1st pass	116-149	22.3-28.2	75.5	2.06-3.34
2nd pass	128-181	20.1-26.2	133.9	1.15-2.13
3rd pass	130-161	22.4-24.7	87.0	2.01-2.74

가지는 연강의 경우 SS400과 A-grade강을 채택하여 시험을 수행하였다. 일반구조용 강으로 널리 알려져 있는 SS400은 탄소 함량이 적고 열처리가 되지 않으며 선박 및 차량 등 모든 분야에서 널리 사용되지만, 단순 기계를 지탱해주는 부위에만 사용된다는 한계가 있다. 또한 A-grade는 선박 및 해양구조물에서 활용도가 높은 연강으로 주로 선체를 구성하기 위해 사용된다. 상기 채택 재료들에 대한 화학구성비를 Table 1에 정리하였다.

2.2 용접 조건

본 연구의 대상인 LNG배관은 가스텅스텐 아크용접 (Gas tungsten arc welding, GTAW)을 수행하여 연결되었다. GTAW는 용접입열, 운봉속도, 용가재 등을 사용자가 직접 제어할 수 있고 아크(Arc) 안정성이 높아 스테인리스 강, 알루미늄 합금 등 산화-질화에 민감한 재료의 용접에 사용되는 기법이다. 전 산업에서 널리 채택되거나 조선해양산업에 있어서 배관, LNG선의 멤브레인 및 용접 후 가공이 필요치 않는 박판(Thin plate)의 용접에 주로 이용된다. 용가재로는 2.4mm의 ER308L이 채택되었으며, Table 2에 LNG 배관용접 시 이용된 용접의 전기적 특성에 대해 정리하였다.

2.3 충격 시험편

샤르피 충격 시험은 ASTM의 E23을 준수하여 길이 55mm × 폭 10mm × 두께 10mm의 표준 시편 규격으로 제작하였다. V-노치는 45도의 사각 및 2mm의 깊이를 가지고 노치 끝 부분의 반지름은 0.25mm이다. 이러한 규정에 맞게 제작된 시편의 구체적인 형상 및 치수를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 또한, AISI 304 스테인리스 강으로 제작된 LNG배관의 모재부, 열영향부, 용착금속부의 시편을 제작하기 위해 샤르피 충격시험의 노치부의 위치를 Fig. 2(b)와 같이 다르게 두어 용접 시편을 제작하였다. 연강의 경우 FCC결정구조를 가지는 AISI 304와의 충격거동 특성을 비교하기 위한 목적으로 채택 되었기에 열영향부 및 용착금속부는 고려되지 않았다.

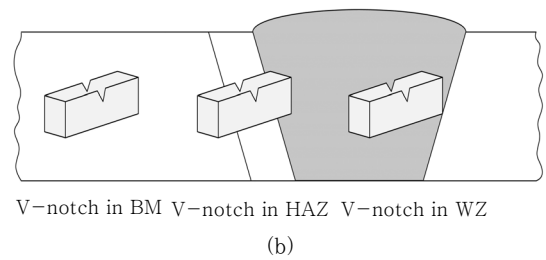
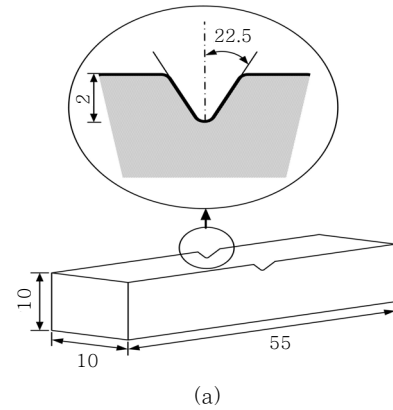


Fig. 2 Schematic diagram of (a) dimension and (b) sampling method for Charpy V-notch impact testing specimen

2.4 시험 시나리오

본 연구에서는 상온에서 액체질소 온도에 이르는 총 9개의 온도(-196, -163, -125, -100, -75, -50, -25, 0, 25°C)를 채택하여 샤르피 충격시험을 진행하였다. 상온(25°C)과 -196°C의 시험 케이스를 제외한 저온 시험의 경우 극저온용 챔버를 설치한 후 액체질소를 분사시켜 저온 환경을 구축하였다. 챔버 내부에 있는 3개의 온도계와 온도 컨트롤러를 통해 극저온 온도를 제어하였으며, 시편 내부의 열 평형상태를 고려하기 위해 40분~60분 동안 예비냉각을 실시하였다. -196°C 환경에서의 시험 케이스는 특수 제작된 저장용기에 액체 질소를 일정량 채워 시편을 30분 이상 방치하여 열적 평형을 유지시킨 후 시험편을 꺼내어 5초 이내에 충격 시험을 수행하는 것을 원칙으로 하였다. 시험의 반복성을 검증하기 위해 각각의 시험 케이스에 대해 4번의 반복시험을 수행하였으며 5개의 시편에 대해 총 180회의

Table 3 Scenario for Charpy V-notch impact test

Type	Material	Temperature(°C)
Mild Steel	SS400	25
	A-grade	0
		-25
AISI 304 Stainless Steel	BM	-50
	HAZ	-75
		-100
	WZ	-125
		-163
		-196

시험을 수행하였다. Table 3에 시험 시나리오를 정리하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 A-grade, SS400 연강

Fig. 3에 온도에 따른 연강의 샤르피 충격흡수 에너지를 나타내었다. BCC결정구조를 가지는 연강의 경우 충격흡수 에너지가 급격하게 감소하는 천이온도(Ductile to brittle transition temperature, DBTT)가 발생하는 것을 알 수 있다. A-grade연강의 경우 -25°C와 -50°C 사이의 온도에서 발생하였으며 SS400연강의 경우 0°C와 -25°C 사이의 온도에서 DBTT가 발생하였다. DBTT가 발생하기 전 최대흡수 에너지의 경우 A-grade와 SS400 연강은 각각 182J과 58J로 나타났으며 A-grade연강이 SS400에 비해 약 3배정도 높은 최대흡수 에너지를 보였다. 또한, 취성파괴가 발생하는 DBTT이후의 저온환경에서도 A-grade 조선용 연강재의 인성이 더 우수함을 알 수 있었다. 상온(25°C)과 -196°C의 시험을 비교했을 때 A-grade 연강과

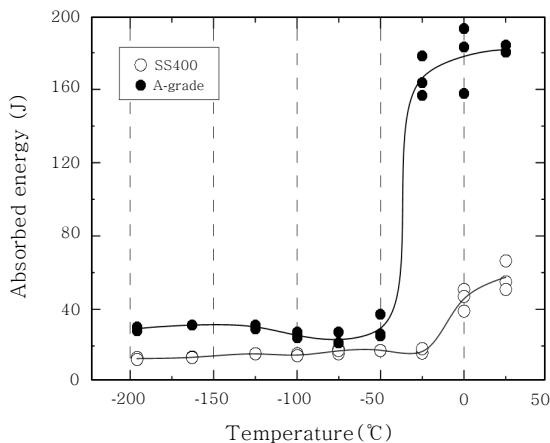


Fig. 3 Temperature dependent absorbed energy for SS400 and A-grade mild steels

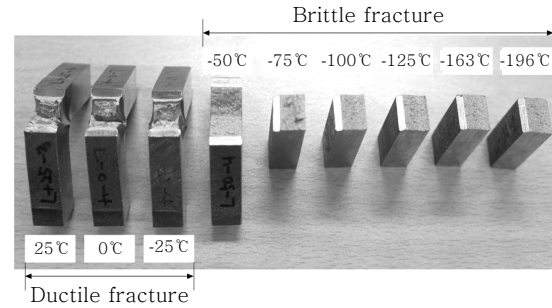


Fig. 4 Fractured surface of A-grade mild steel specimens

SS400의 충격흡수 에너지의 감소율은 약 83%와 77%로 각각 나타났다.

Fig. 4에 A-grade 연강의 파단면을 나타낸 그림을 보인다. 통상 DBTT를 기준으로 오른쪽은 연성파괴, 왼쪽은 취성파괴가 일어난다고 알려져 있으며 A-grade연강의 경우에도 DBTT가 발생하는 -25°C와 -50°C 사이의 온도를 기준으로 시험의 파단면이 연성파괴에서 취성파괴로 바뀌는 것을 관찰할 수 있다.

3.2 오스테나이트계 스테인리스 강 용접부

Fig. 5에 FCC 결정구조를 가지는 AISI 오스테나이트계 스테인리스 강 배관의 모재부, 열영향부, 용착금속부에 대한 샤르피 충격시험 결과를 보인다. BCC결정구조의 A-grade 및 SS400 연강의 결과와는 달리 뚜렷한 DBTT현상 없이 온도가 감소함에 따라 충격에너지도 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 연강과는 달리 저온 환경에서도 제한 없이 사용할 수 있다는 사실을 보여준다. 더욱이 본 연구에서 특징적인 현상은 용착금속부에서 오히려 더 높은 충격흡수 에너지 거동을 보인다는 것이다. 대부분의 용접관련 연구를 살

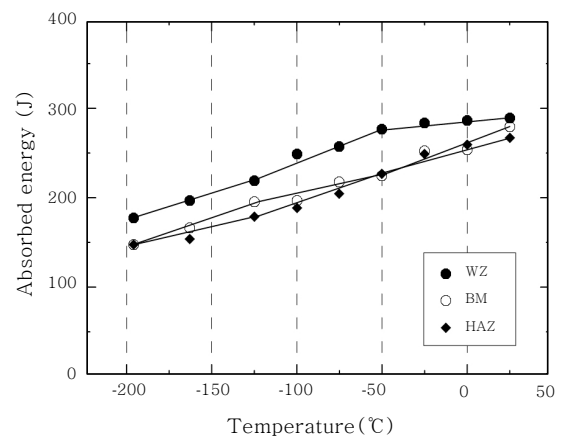


Fig. 5 Temperature dependent absorbed energy for AISI 304 stainless steel

퍼보면 용착금속부에서의 인성이 급격하게 떨어지는 현상이 많이 보고 되고 있지만¹²⁻¹³⁾, GTAW의 경우 용가재를 채택함에 있어 모재와 화학적 구성이 비슷한 재료로 사용하게 되므로 용착금속부에서 오히려 충격흡수 에너지가 더 높게 측정되기도 한다고 보고된바 있다¹⁴⁾. 또한, 재료의 미시학적인 관점에서 결정입자의 크기 (grain size)는 재료의 인성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 용착금속부에서 모재보다 상대적으로 더 큰 결정입자가 관찰된다는 것이다. 본 연구에서 재료의 미시적 관점에서 접근하지는 않았으나, 이와 유사한 이유로 용착금속부의 인성이 더 크게 측정된 것으로 생각된다. 상온(25°C)과 -196°C의 극저온 환경에서 충격 에너지를 비교해 보면 모재부, 열영향부, 용착금속부에서 각각 47%, 45%, 39%의 에너지 감소를 보이는 것으로 조사되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 LNG운송을 담당하는 LNG배관의 모재부, 열영향부, 용착금속부에서 샤르피 충격시험을 수행하였다. FCC 결정구조인 오스테나이트계 스테인리스 강 결과와 비교를 수행하기 위해 BCC결정구조를 가지는 연강에 대한 샤르피 충격시험 또한 수행 하였으며 아래에 본 연구에서 수행된 결과를 간략히 정리하였다.

1) BCC결정구조인 A-grade 및 SS400 연강의 경우 각각 -25°C에서 -50°C, 0°C에서 -25°C 온도 범위에서 연성-취성 천이온도가 발생하였으며 특히 A-grade 연강의 경우 DBTT 기준으로 온도가 낮을수록 취성 파괴, 온도가 높을수록 연성파괴가 발생하는 것을 파단면 분석을 통해 알 수 있었다.

2) DBTT의 발생 이전에는 A-grade 연강이 SS400 연강에 비해 최대흡수에너지가 약 3배 정도 높은 수치를 보였으며 DBTT이후의 구간에서도 약 10~20J 가량 높은 충격 에너지 수치를 보였다.

3) FCC 결정구조를 가지는 AISI 304 스테인리스 강으로 제작된 LNG배관의 경우 DBTT의 발생 없이 모재부, 열영향부, 용착금속부에서 시험 온도가 감소함에 따라 충격흡수 에너지가 감소하는 거동을 보였다.

4) AISI 304의 경우 용착금속부의 충격흡수 에너지가 모재와 열영향부의 충격흡수 에너지보다 더 높은 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 GTAW 용접으로 인한 결정입자의 크기에 기인한 것으로 생각된다.

향후 연구에서 재료의 미시적 관점에서 파단시편을

면밀히 관찰 후 분석을 수행하고 충격흡수에너지와의 관계를 파악해 볼 계획이다. 또한, 용접배관 및 연강에 대한 재료 서브루틴을 개발하여 수치 시뮬레이션 결과와 시험 결과를 비교하여 유효성을 검증해 볼 예정이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 연구되었음.

Reference

1. S Kumar, HT Kwon, KH Choi, JH Cho, WS Lim and I Moon : Current status and future projections of LNG demand and supplies: A global prospective, *Energy Policy*, **39-7** (2011), 4097-4104
2. JH Kim, WS Park, MS Chun, JJ Kim, JH Bae, MH Kim and JM Lee : Effect of pre-straining on low-temperature mechanical behavior of AISI 304L, *Materials Science and Engineering A*, **543** (2012), 50-57
3. JH Kim, SK Kim, MH Kim and JM Lee : Numerical model to predict deformation of corrugated austenitic stainless steel sheet under cryogenic temperatures for design of liquefied natural gas insulation system, *Materials & Design*, **57** (2014), 26-39
4. SW Kang, MH Kim, YB Kim, YT Shin and HW Lee : A study on the fracture toughness characteristics of FCAW weldment of steel for offshore structures, *Journal of KWJS*, **22-6** (2004), 543-549 (in Korean)
5. DH Lee and HS Kim : A study on the correlation between advanced small punch test and Charpy v-notch test on X20CrMoV121 and 2.25Cr1Mo steels weldment, *Journal of KWJS*, **26-3** (2008), 251-258 (in Korean)
6. CH Lee, SH Shin, KT Park and SH Yang : Evaluation of the applicability of structural steels to cold regions by the Charpy impact test, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, **23-4** (2011), 483-491 (in Korean)
7. K Chandra, V Kain, V Bhutani, VS Raja, R Tewari, GK Dey and JK Chakravartty : Low temperature thermal aging of austenitic stainless steel welds: Kinetics and effects on mechanical properties, *Materials Science and Engineering A*, **534-1** (2012), 163-175
8. OJ Ibrahim, IS Ibrahim and TAF Khalifa : Impact behavior of different stainless steel weldments at low temperatures, *Engineering Failure Analysis*, **17** (2010), 1069-1076
9. T Michler : Toughness and hydrogen compatibility of austenitic stainless steel welds at cryogenic temperatures, *International Journal of Hydrogen Energy*, **32** (2007), 4081-4088

10. BC Hwang, SH Lee, YM Kim, NJ Kim and JY Yoo : Correlation of rolling condition, microstructure, and low-temperature toughness of X70 pipeline steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **36** (2005), 1793-1805
11. SY Shin, BC Hwang, SH Lee, NJ Kim and SS Ahn : Correlation of microstructure and charpy impact properties in API X70 and X80 line-pipe steels, *Materials Sciences and Engineering A*, **458** (2007), 281-289
12. Y Chen, J Feng, L Li, S Chang and G Ma : Microstructure and mechanical properties of a thick-section high-strength steel welded joint by novel double-sided hybrid fibre laser-arc welding, *Materials Science and Engineering A*, **582** (2013), 284-293
13. JS Ku, NJ Ho and SC Tjong : Properties of electron beam welded SAF 2205 duplex stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **63** (1997), 770-775
14. W Zhou and KG Chew : Effect of welding on impact toughness of butt-joints in a titanium alloy, *Materials Science and Engineering A*, **347** (2003), 180-185