GTAW 맞대기 용접의 루트패스에서 용접속도에 따른 변형에 관한 연구

유창민* · 김상열* · 박정현* · 서기정* · 조상명*,†

*부경대학교 신소재시스템공학과

A Study on Deformation According to Welding Speed of Root Pass in GTAW Butt Joint Welding

Chang-Min Yu*, Sang-Yeol Kim*, Jung-Hyun Park*, Gi-Jeong Seo* and Sang-Myung Cho*,†

*Dept. of Advanced Materials System Engineering, Pukyong Nat'l Univ, Busan, 48513, Korea

†Corresponding author : pnwcho@pknu.ac.kr

(Received December 20, 2018 ; Revised January 21, 2019 ; Accepted August 22, 2019)

Abstract

In carbon steel butt joint welding, uniform back bead formation and reduction of weld deformation are important. In most industrial sites, Ceramic backing is used for V-grooves for uniform back bead formation in FCAW and SAW. In this case, because the root pass has a large deposition area and a high heat input, a problem can occur where angular distortion occurs during cooling. In this study, to reduce weld deformation and form uniform back beads that angular distortion was measured using ceramic backing and Cu backing using GTAW with ER70S-60 C-filler.

Angular distortion was measured according to welding speed for the same deposition area for each kind of backing. And we also examined the angular distortion phenomenon in relation to the type of backing.

Key Words : Angular distortion, GTAW, Butt joint welding, Welding deformation, Root pass, Back bead

1. 서 론

탄소강 맞대기 용접에서 안정적인 이면비드 형성 및 용접부의 변형 감소는 중요하다. 대부분의 산업현장에서는 안정적인 이면비드 형성을 위해 루트갭을 띄우고 루트면이 없는 V-그루브에서 세라믹 백킹을 대고 FCAW, SAW로 용접을 한다. 이 경우 루트패스의 용착단면적과 입열량 과대로 생각하는 과정에서 각변형과 수축 변형이 일어나는 문제점이 있다¹⁻⁴⁾. 또한 수동 GTAW로 루트패스 용접을 하여 이면비드를 형성시키는 경우는 생산성이 낮고 용접속도가 느리기 때문에 y방향(비드폭 방향)의 열전도가 증가하여 각변형과 수축변형이 커지

기 쉽다. 한편 루트패스 용접에서 백킹을 사용하는 자동 GTAW는 수동 GTAW 보다 용접속도가 빨라 y방향의 열전도가 감소하여 각변형과 수축변형이 적고, 안정적인 이면비드를 형성할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 자동 GTAW 루트패스 용접에서 안정적인 이면비드를 가지고 변형을 감소하기 위한 용접공정의 지속적인 개발이 필요한 시점이다. 본 연구에서는 ER70S-6 C형 용가재를 사용하는 GTAW 공정으로 용접속도 10, 12, 14, 16, 18 cm/min에 따른 전류변경실험을 하여 적정 조건을 선정하였다. 또한 선정된 조건으로 세라믹, 구리 백킹을 부착하여 z방향의 변형량을 측정해서 각도로 환산한 후 각변형으로 나타내었고, FCAW의 각변형과 비교하여 고찰하였다.

2. 실험 재료

2.1 실험 재료

본 연구에서의 모재는 200 mm × 150 mm × 5 mm의 AH36 모재를 사용하였으며, 용가재는 단면적이 5 mm²인 ER70S-6의 C형 용가재를 사용하였다⁵⁻⁶⁾. Fig. 1은 본 실험에 사용된 모재의 모식도를 나타내고 있고 Table 1은 모재의 조성을 나타내고 있다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 C형 용가재의 단면을 나타내고 있고 Table 2는 C형 용가재의 조성을 나타내고 있다. Fig. 3은 본 실험에서 사용된 백킹의 횡단면을 나타내고 있으며 (a)는 세라믹 백킹, (b)는 구리 백킹을 나타내었다.

Fig. 1 Schematic of base metal(dimensions in mm)

Table 1 Chemical composition of base metal (wt%)

Classification	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni
AH36	0.15	0.39	1.5	0.02	0.003	0.08	0.03	0.01

Fig. 2 Cross section of C-Filler

Table 2 Chemical composition of filler metal (wt%)

Classification	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni
ER70S-6	0.06	0.8	1.4	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15

Fig. 3 Cross sections of backing. (a) Ceramic backing, (b) Cu backing

3. 실험 방법

3.1 실험 조건

Fig. 4는 본 연구에서의 실험 모식도를 나타내고 있다. Table 3은 실험 1의 용접조건을 나타내었다. 실험 1은 균일한 이면비드를 형성하기 위한 AH36 맞대기 용접 실험이다. 루트패스 용접속도는 10-18 cm/min이며 균일한 이면비드를 형성하기 위해 전류변경실험을 진행하였다. Table 4는 실험 2의 실험조건을 나타낸 것이다. 실험 2는 실험 1에서 건전한 이면비드를 형성

Fig. 4 Schematic of experiment

Table 3 Welding condition of experiment 1

Fixed	Base metal	AH36, thickness 5 mm	
	Filler metal	ER70S-6, C-Filler (5 mm ²)	
	Shield gas	Ar 100%	
	Bead height (mm)	3	
	Deposition area(mm ²)	26	
Varied	Welding speed(cm/min)	10, 12, 14, 16, 18	
	Feeding rate(cm/min)	52, 63, 73, 84, 94	
	Deposition rate(kg/h)	1.2, 1.5, 1.7, 1.9, 2.2	
	Current(A)	150 ~ 270	

Table 4 Welding condition of experiment 2

Fixed	Base metal	AH36, thickness 5 mm					
	Filler metal	ER70S-6, C-Filler (5 mm ²)					
	Shield gas	Ar100%					
	Progressive angle(°)	15					
	Bead height (mm)	3					
	Backing	Ceramic, Cu					
Varied	Pass	1			2		
	Deposition area(mm ²)	26			30.3		
	Specimen	A	B	C	D	E	A-E
	Welding speed(cm/min)	10	12	14	16	18	30
	Feeding rate(cm/min)	52	63	73	84	94	215
	Deposition rate(kg/h)	1.2	1.5	1.7	1.9	2.2	5.0
	Current(A)	170	190	210	230	250	450

한 조건에 세라믹 백킹과 구리 백킹을 부착하여 변형량을 측정하는 실험이다. 루트패스에서 용착단면적은 26 mm^2 로 동일하고, 용접속도는 시험편 A의 경우 10 cm/min , B는 12 cm/min , C는 14 cm/min , D는 16 cm/min , E는 18 cm/min 으로 용접 하였으며 캡핑패스는 용착 단면적 30.3 mm^2 , 용접속도 30 cm/min 으로 동일하게 용접하였다.

3.2 측정 방법

Fig. 5는 루트패스 용접 후 시험편의 횡단면의 이면 비드 폭과 높이 측정 모식도를 나타내고 있다. Fig. 6은 각변형 측정방법을 나타내고 있다. 왼쪽 모재끝에 8인치C형 클램프로 $80\text{--}98 \text{ N} \cdot \text{m}$ 토크로 구속시켜 고정시킨 후 구속시키지 않은 오른쪽 모재에 그림처럼 다이얼게이지 2개를 설치하여 변형량을 측정하였다. 다이얼게이지의 위치 P_{R1} 은 시험편의 끝으로부터 75 mm 지점, P_{R2} 는 1 mm 지점에 위치하며 각각의 위치에서 z방향의 변형량을 측정하여 아래와 같이 각도로 산출하였다.

여기서 x 는 오른쪽 모재의 횡방향 길이이며, h 는 z방향의 변형량이다. 기하학적으로 P_{R1} , P_{R2} , $P_{R2}-P_{R1}$ 각각에 의한 각변형은 동일하지만 측정오차를 고려하여 3가

Fig. 5 Schematic of cross section measurement

Fig. 6 Measurement method of angular distortion. (a) Schematic of experiment, (b) Schematic of angular distortion measurement method

지의 측정 각변형을 평균내어 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 맞대기 용접 실험 결과

Fig. 7-11은 Table 3의 조건으로 용접속도 $10\text{--}18 \text{ cm/min}$ 에서 전류변경실험 했을 때 비드 외관 결과를 나타낸 사진이다. 전류가 부족할 때는 부족 이면비

Current		Bead appearance	Cross section
150A	Front		
	Back		
170A	Front		
	Back		
190A	Front		
	Back		

Fig. 7 Bead appearances of welding speed 10 cm/min

Current		Bead appearance	Cross section
170A	Front		
	Back		
190A	Front		
	Back		
210A	Front		
	Back		

Fig. 8 Bead appearances of welding speed 12 cm/min

Current		Bead appearance	Cross section
190A	Front		
	Back		
210A	Front		
	Back		
230A	Front		
	Back		

Fig. 9 Bead appearances of welding speed 14 cm/min

Current		Bead appearance	Cross section
210A	Front		
	Back		
230A	Front		
	Back		
250A	Front		-
	Back		

Fig. 10 Bead appearances of welding speed 16 cm/min

Current		Bead appearance	Cross section
230A	Front		
	Back		
250A	Front		
	Back		
270A	Front		-
	Back		

Fig. 11 Bead appearances of welding speed 18 cm/min

Table 5 Measurement results of back bead width and height according to welding speed

Welding speed	Current	Back bead width(mm)	Back bead height(mm)	Back bead
10 cm/min	150A	7.4	0.9	Insufficient
	170A	8.0	1.1	Adequate
	190A	9.4	1.2	Excessive
12 cm/min	170A	7.1	0.9	Insufficient
	190A	8.0	1.1	Adequate
	210A	8.7	1.1	Excessive
14 cm/min	190A	7.0	0.9	Insufficient
	210A	8.0	1.1	Adequate
	230A	9.9	1.1	Excessive
16 cm/min	210A	6.7	1.0	Insufficient
	230A	8.0	1.1	Adequate
	250A	x	x	Humping
18 cm/min	230A	7.8	0.8	Insufficient
	250A	8.0	1.1	Adequate
	270A	x	x	Humping

드가 관찰되었고, 적정 전류에서는 적정 이면비드, 과대 전류일 때는 과대 이면비드와 험핑비드와 관찰되었다.

Table 5는 용접속도에 따른 이면비드 폭과 높이를 측정된 결과를 표에 나타내었다. 전류가 증가할수록 이

Fig. 12 Weldable area of butt joint welding by GTAW using C-Filler

면비드의 비드폭과 비드높이는 증가하는 경향을 나타내었고 16 cm/min 250A, 18 cm/min 270A에서 강한 아크력에 기인하는 것으로 판단되는 험핑비드가 생겼다⁷⁾. Fig. 12는 Table 3의 실험에서 루트패스 용접속도에 따라 이면비드가 형성되는 범위를 나타낸 것이다. 파란색 원형기호로 표시한 조건을 적정 이면비드 구간이라 판단하였으며, 상기 구간의 기준은 백킹재의 폭 8 mm ± 0.5 mm와 깊이 1.1 mm ± 0.2 mm만큼 이면비드가 형성되었을 때로 정의했다.

4.2 변형량 측정 실험 결과

변형량 측정 실험은 세라믹 백킹 부착 후 적정 이면비드 구간에서 진행하였으며 루트패스 용접에서 용접속도는 시험편 A의 경우 10 cm/min, B는 12 cm/min, C는 14 cm/min, D는 16 cm/min, E는 18 cm/min이며, Pass2는 30 cm/min으로 동일하게 용접하였다.

Fig. 13은 Table 4의 조건으로 루트패스 용접했을 때 z방향의 변형량을 측정한 그래프이고, Table 6에 P_{R1} , P_{R2} , P_{R2-R1} 의 z방향의 변형량과 각변형 θ_R 을 산출하여 나타내었다. 용접속도가 빠를 때 z방향의 변형량과 각변형이 감소한 것을 확인할 수 있다. Fig. 14는 Table 4의 조건으로 캡핑패스 용접했을 때 z방향의 변형량을 측정한 그래프이고, Table 7은 P_{R1} , P_{R2} , P_{R2-R1} 의 z방향 변형량 측정결과를 이용하여 각변형 θ_R 을 산출하여 나타낸 것이다. Fig. 15는 루트패스 용접속도에 따른 각변형을 나타낸 것으로 용접속도가 증가할수록 각변형이 감소하는 것을 볼 수 있다.

4.3 구리 백킹 부착 맞대기 용접 변형량 측정 실험 결과

구리 백킹 부착 변형량 측정실험은 루트패스 용접속

Fig. 13 z-direction deformation of root pass in experiment 2

Table 6 Angular distortion θ_R of root pass in experiment 2

Specimen	Welding speed	P_{R1} (mm)	P_{R2} (mm)	$P_{R2}-P_{R1}$ (mm)	Ave. θ_R
A	10 cm/min	0.42	0.84	0.42	0.32
B	12 cm/min	0.38	0.76	0.38	0.29
C	14 cm/min	0.30	0.63	0.32	0.24
D	16 cm/min	0.27	0.53	0.26	0.20
E	18 cm/min	0.24	0.25	0.25	0.19

도 14 cm/min, 16 cm/min, 18 cm/min으로 실험하였다. 시험편 C의 경우 14 cm/min, D는 16 cm/min, E는 18 cm/min이었으며, Pass2는 30 cm/min의 속도로 동일하게 용접하였다. Fig. 16은 Table 4의 조건으로 루트패스 용접했을 때 z방향의 변형량 측정 값을 나타낸 것이다. 시험편 모두 z방향의 변형량이 증가하다가 감소한 것을 확인 할 수 있었으며 시험편 D와 시험편 E에서는 변형량이 감소하면서 P_{R2} 와 P_{R1} 이 역전되는 구간이 있는 것을 확인 할 수 있었다. Table 8은 루트패스 후의 P_{R1} , P_{R2} , $P_{R2}-P_{R1}$ 의 z방향의 변형량 측정결과를 이용하여 각변형 θ_R 을 산출하여 나타낸 것이다.

Fig. 17은 Table 4의 조건으로 캡핑패스를 용접했을 때 z방향의 변형량을 나타낸 것이고, Table 9는 P_{R1} , P_{R2} , $P_{R2}-P_{R1}$ 의 z방향의 변형량 측정결과를 이용하여 각변형 θ_R 을 산출하여 나타낸 것이다. Fig. 18은 루트패

Fig. 14 z-direction deformation of capping pass in experiment 2

Table 7 Angular distortion θ_R of capping pass in experiment 2

Specimen	Welding speed	P_{R1} (mm)	P_{R2} (mm)	$P_{R2}-P_{R1}$ (mm)	Ave. θ_R
A	30 cm/min	1.16	2.38	1.22	0.92°
B	30 cm/min	1.20	2.27	1.07	0.87°
C	30 cm/min	1.24	2.30	1.06	0.88°
D	30 cm/min	1.32	2.64	1.32	1.02°
E	30 cm/min	1.25	2.48	1.23	0.95°

Fig. 15 The angular distortion according to root pass welding speed

Fig. 16 The z-direction deformation of root pass in Experiment 2

Table 8 Angular distortion θ_R of root pass in experiment 2

Specimen	Welding speed	P_{R1} (mm)	P_{R2} (mm)	$P_{R2}-P_{R1}$ (mm)	Ave. θ_R
C	14 cm/min	0.29	0.52	0.23	0.20°
D	16 cm/min	0.16	0.27	0.11	0.10°
E	18 cm/min	0.10	0.19	0.09	0.07°

Fig. 17 The z-direction deformation of capping pass in experiment 2

Table 9 Angular distortion θ_R of capping pass in experiment 2

Specimen	Welding speed	P_{R1} (mm)	P_{R2} (mm)	$P_{R2}-P_{R1}$ (mm)	Ave. θ_R
C	30 cm/min	0.86	1.71	0.85	0.66
D	30 cm/min	0.89	1.76	0.87	0.68
E	30 cm/min	0.85	1.74	0.89	0.67

스 용접속도에 따른 각변형을 나타낸 것이다. 용접속도가 증가할수록 각변형이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 앞에서 Fig 15와 비교 했을 때 세라믹 백킹을 부착하고 있을 때보다 각변형이 작은 것을 확인 할 수 있다.

4.4 변형량 측정 결과에 대한 고찰

Fig. 15와 Fig. 18에서 용접속도가 빠를수록 각변형이 작은 것을 확인 할 수 있었다⁸⁻⁹⁾. 이는 입열량으로 설명이 가능하며 용접속도가 빠를수록 입열량이 감소하여 각변형이 감소한 것으로 판단된다¹⁰⁾. Fig. 19는 용접속도에 따른 전류와 입열량 관계를 나타낸 것으로 용접속도가 빠를수록 입열량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 용접속도가 커져도 용착단면적은 일정해야 하므로 용착속도는 용접속도에 비례하여 증가되지만 전류는 그만큼 증가되지 않아도 용착이 가능하였음을 의미한다. 따라서 입열량은 용접속도 증가에 따라 다소 감소하는 경향을 보였고 이러한 특징이 C형 용가재를 쓰는 TIG 용접의 강점이라고 할 수 있다.

Fig. 20은 세라믹 백킹을 부착했을 때 z방향의 변형량을 측정된 그래프이며 +z방향으로만 변형이 일어난 것을 알 수 있었다. Fig. 21은 세라믹 백킹을 부착했을 때 상부로 오목한 형상의 각변형이 일어난 모식도이다. V-그루브 맞대기 용접을 할 때 상부의 용착단면적

Fig. 18 The angular distortion according to root pass welding speed

Fig. 19 The relationship between current and heat input according to welding speed

Fig. 20 The z-direction deformation of root pass in experiment 2

Fig. 21 Schematic of upper concave angular distortion

Fig. 22 The z-direction deformation of root pass in experiment 2

이 많기 때문에 용접 후 응고하면서 상부의 수축력이 크게 작용한다. 따라서 이 경우엔 상부 오목형 각변형이 일어났다고 판단하였다.

Fig. 22는 구리 백킹을 부착했을 때 z방향의 변형량을 측정한 그래프이고 Fig. 23은 하부로 오목한 형상의 각변형을 나타낸 모식도이다. Fig. 22를 보면 +z 방향으로 변형이 일어나다가 -z 방향으로 변형이 일어난 후 다시 +z 방향으로 변형이 일어난 것을 확인할 수 있다. 이는 구리 백킹에 닿아 있는 용융풀이 응고하면

Fig. 23 Schematic of bottom concave angular distortion

Table 10 Measurement results of angular distortion in FCAW

Welding condition	Heat input(kJ/cm)	θ
210A-24V-30LPM	17	1.43

Fig. 24 Comparison of angular distortion in FCAW and GTAW

서 하부의 수축이 일어나 하부 오목형 각변형이 먼저 일어나고, 다시 상부 오목형 각변형이 일어난 것으로 판단된다. 따라서 이러한 이유로 구리 백킹을 부착하면 세라믹 백킹을 부착했을 때 보다 각변형을 더 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

4.5 FCAW와 GTAW의 각변형 비교 및 고찰

Table 10은 FCAW로 AH36을 맞대기 용접했을 때의 각변형 데이터를 나타내었다. 입열량 17kJ/cm 조건에서의 각변형은 1.43이다. Fig. 24는 FCAW와 GTAW 각변형 데이터를 비교했을 때 FCAW는 1.43, 세라믹 백킹을 부착한 GTAW는 1.16, 구리 백킹을 부착한 GTAW는 0.79였다. 구리 백킹을 부착한 GTAW가 각변형이 제일 작았으며, 세라믹 백킹 부착 대비 24% 감소했고, FCAW용접 대비 38% 감소하였다. GTAW가 FCAW 대비 각변형이 작았던 이유는 GTAW는 FCAW보다 동

일 출력에너지에서 아크효율이 낮기 때문에¹¹⁾, 입열량이 동일하더라도 유효 입열량이 낮아 각변형이 작은 것으로 판단된다¹²⁾. 따라서 C형 용가재를 쓰는 GTAW용접은 유효 입열량이 작으면서도 용착속도가 높아 적당한 용착 단면적이 형성되고 각변형을 줄일 수 있는 용접공정으로 판단된다.

5. 결 론

C형 용가재를 쓰는 탄소강GTAW맞대기 용접에서 구리, 세라믹 백킹을 부착시켜 안정적인 이면비드를 형성하면서 변형을 줄이기 위해 루트패스 용접속도에 따른 변형에 관한 연구를 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 루트패스의 각변형은 세라믹, 구리백킹을 부착했을 때 용접속도가 증가할수록 각변형은 감소하였다.

2) 변형량 측정 실험에서 세라믹 백킹을 부착 했을 때는 상부 오목형 각변형이 일어났으며, 구리백킹 부착 시에는 하부 오목형 각변형이 일어난 후 상부 오목형 각변형이 일어나 각변형이 감소하였다.

3) FCAW와C형 용가재를 쓰는 GTAW용접 각변형 데이터를 비교 했을 때 FCAW는 1.43, C형 용가재를 쓰는 GTAW용접에서 세라믹 백킹 부착 시에는 1.16, 구리 백킹 부착 시 0.79로 구리 백킹 부착했을 때 가장 작았으며 세라믹 백킹 대비 32%감소, FCAW대비 45% 감소하였다.

ORCID: Chang-Min Yu: <https://orcid.org/0000-0003-2664-2848>
 ORCID: Jung-Hyun Park: <https://orcid.org/0000-0003-1057-0915>
 ORCID: Sang-Myung Cho: <https://orcid.org/0000-0001-6258-3625>

References

1. T. L. TENG, C. P. Fung, P. H. Chang and W. C. Yang, Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds, *Int. J. Press. Vessels Piping*. 78(8) (2001) 523-538.
[https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(01\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(01)00074-6)
2. A. BACHORSKI, M. J. Painter, A. J. Smailes and M. A. Wahab, Finite-element prediction of distortion during gas metal arc welding using the shrinkage volume approach, *J. Mater. Processing Technol.* 92 (1999) 405-409.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00161-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00161-2)
3. H. LONG, D. Gery, A. Carlier and P. G. Maropoulos, Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates, *Mater. Des.* 30(10) (2009) 4126-4135.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.004>
4. D. DENG, W. Liang and H. Murakawa, Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements, *J. Mater. Processing Technol.* 183(2-3) (2007) 219-225.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.013>
5. J. H. Jun, S. R. Kim and S. M. Cho, A Study on Productivity Improvement in Narrow Gap TIG Welding, *J. Weld. Join.* 34(1) (2016) 68-74.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.68>
6. J. G. Byun and S. M. Cho, Trend of metal 3D printing by welding, *J. Weld. Join.* 34 (2016) 1-8.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.4.1>
7. S. M. Cho, Waveform Control and Welding Characteristics in Pulse Arc Welding Process, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 21(1) (2003) 27-34.
8. S. J. Yun, G. M. Hwang, H. S. Gong and S. M. Cho, The effect of melting efficiency on angular distortion of fillet weldment by flux cored arc welding, *Proceedings of the 2006 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society*, Kangwon, Korea (2006) 292-294.
9. S. W. Han, J. S. Lee and S. I. Kim, A Study on the Weld-Induced Deformation and Residual Stress Analysis at FPSO Moon Pool Structure. *J. Soc. Nav. Archit. Korea.* 48(5) (2011) 473-478.
<https://doi.org/10.3744/SNAK.2011.48.5.473>
10. S. K. Kang, J. S. Yang, Overview of research works regarding welding distortion, *J. Weld. Join.* 30(2) (2012) 37-42.
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.2.141>
11. Christensen, Distribution of Temperature in Arc Welding, *British Weld. J.* 2 (1965) 54-75.
12. H. S. Bang, H. S. Bang, Y. K. Lee, H. S. Kim and K. J. Lee, A Study of the Residual Stress Characteristics of FCAW Multi-Pass Butt Joint for an Ultra-Thick Plate, *J. Ocean Eng. Technol.* 24(2) (2010) 62-66.