

## 해양 구조물용 강재 FCAW 용접부의 파괴인성 특성에 관한 연구

강성원\* · 김명현\* · 김용빈\* · 신용택\*\* · 이해우\*\*

\*부산대학교 조선해양공학과

\*\*삼성중공업 생산기술연구소

### A Study on the Fracture Toughness Characteristics of FCAW Weldment of Steel for Offshore Structures

Sung-Won Kang\*, Myung-Hyun Kim\*, Yong-Bin Kim\*, Yong-Taek Shin\*\* and Hae-Woo Lee\*\*

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

\*\*Institute of Industrial Technology, Samsung Heavy Industries, Geoje 656-710, Korea

#### Abstract

Fracture toughness is an important parameter in designing offshore structures to ensure resistance to fracture at various temperatures. In this study, a series of experiments is carried out to obtain fracture toughness values (CTOD) of API 2W Gr.50B, welded using FCAW(Flux Cored Arc Weld). In particular, a comparison of absorbed impact energy and CTOD values are made with respect to two different welding groove shapes; double-V-groove and double-bevel-groove. Charpy impact tests are performed for specimens sampled near the root gap, and CTOD tests are carried out for three point bending specimens having the notch at weld zone. While Charpy impact test result is determined to be a good qualitative measure of fracture toughness, no quantitative correspondence between impact absorbed energy and CTOD values was found. Based on the experiment, it is observed that double-V-groove welds give lower transition temperature than those of double-bevel-groove.

\* Corresponding author : swkang@pusan.ac.kr

(Received August 20, 2004)

Key Words : Fracture toughness, Flux cored arc weld, Welding groove, Transition temperature, Charpy impact test, M-A(Martensite-Austenite constituents), Ductile-to-Brittle transition temperature

#### 1. 서 론

조선 산업은 전통적으로 큰 수요를 이루었던 대형 탱커선, 벌크캐리어 및 컨테이너선에서 LNG선, FPSO선 등의 상대적으로 부가가치가 높은 선종을 중심으로 시장의 중심이 바뀌어 가고 있으며, 해양구조물 역시 최근의 고유가 추세에 따라 고정식 설비에서 벗어나 TLP, SPAR 등의 심해 유전개발이 가능한 부유식 설비 형태로 시장규모가 급속히 증가하고 있는 실정이다.

현재 국내 조선, 해양산업은 지난 10여 년간의 기술 축적을 통하여 비약적으로 발전하여 왔지만, 새로운 개념의 LNG선, LNG FPSO/FSRU 및 해양 복합구조

물(FPSO, DRILL Ship, TLP, SPAR)의 건조에 있어서 아직 해결해야 할 많은 과제를 안고 있다. 또한, 최근의 해양구조물은 사용조건이 더욱 가혹해지고 있을 뿐만 아니라 경량화 요구가 점증하고 있어 이들의 안전성은 이전보다 한층 더 요구되고 있다. 특히 두께 60mm 이상의 후판용접에 있어 파괴인성(CTOD) 시험은 필수시험으로 요구하고 있으며, 저온에서의 인성 확보에 큰 관심이 집중되고 있다.

현업의 후판용접에 있어서 생산성 및 변형해소를 위하여 X형 그루브 및 K형 그루브를 선호하고 있는 실정이지만, 동일 용접조건에서 용접 홈 형상에 따른 저온 파괴인성(CTOD) 결과를 직접적으로 비교할 자료는 찾아보기 힘들다. 즉, 대부분의 자료는 용접개발, 특정 강

**Table 1** Chemical compositions of base metal from specification

													Unit: wt%	
Section	C	Mn	P	S	Cu	Si	Ni	Mo	Ti	Al	Cr	Nb	V	
API 2W Gr. 50B	0.16	0.15~1.60	0.030	0.010	0.35	-	0.75	0.08	0.02	0.012	0.25	0.0144	0.0040	
Filler metal	0.04	1.32	0.012	0.01	-	0.38	-	-	-	-	-	-	-	

재 및 용접법에 대한 인성을 평가하는데 관심을 보이고 있는 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 동일한 입열량으로 용접하였을 경우 용접 홈 형상에 따른 충격흡수에너지 특성 및 CTOD 특성을 조사하고, 온도에 따른 파괴인성치를 실험적으로 측정하여 용접구조물의 설계 및 제작기법에 유용한 자료를 제공하는데 있다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

본 시험에 사용된 시험재는 API 2W Gr. 50B를 사용하였고, 플럭스코드와이어는 AWS A5.29 E80 T1-K2로 국외에서 생산된 것을 사용하였다. 그리고 시험재 및 플럭스코드와이어에 대한 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1과 2에 나타내었다.

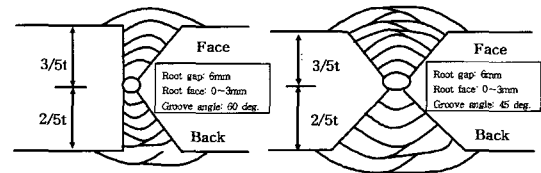
시험편은 길이 1000mm, 넓이 250mm, 두께 44mm인 직사각형 판을 60° X형 그루브와 45° K형 그루브를 기계가공하여 FCAW(Flux Cored Arc Welding)로 용접하였으며, 앞면을 용접하고 난후 뒷면은 백가우징을 하여 용접을 수행하였고, 자동용접용 Carriage를 이용하여 다층용접을 하였다. 그리고 Fig. 1에는 용접 홈 형상에 따른 모식도를 나타내었고, Fig. 2는 용접후의 매크로 단면을 나타내었으며, 용접조건은 Table 3에 나타내었다.

시험 전 먼저 용착금속에 대한 기계적 특성을 관찰하기 위하여 인장시험편을 용착금속의 전면과 후면에서 각각 1개씩 채취하여 ASTM E8에 따라 인장시험을 실시하였다. 시험을 통하여 얻어진 항복강도( $\sigma_{YS}$ )와 인장강도( $\sigma_{TS}$ )는 이들 평균값을 이용하여 피로균열생성시험에 필요한 하중계산 시 사용하였으며, 또한 용착금속의 충격인성의 영향을 관찰하기 위하여 동일한 강재와 용접조건을 사용하여 제작된 충격시험편(10mm×10mm)을 채취하여 X형 그루브는 -80~60°C, K형 그루브는 -80~40°C에서 ASTM E23에 의거하여 샤르피 충격시험을 실시하였다.

화학시험은 건식분석방법인 스펙트로 분석기를 이용하여 3회 분석하여 그 평균값을 사용하였으며, 미세조직검사는 3% Nital 및 Picric 용액을 사용하여 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였

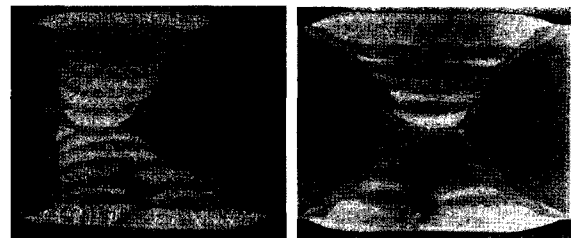
**Table 2** Mechanical properties

			Unit: MPa	
Section	Tensile stress	Yield stress		
API 2W Gr. 50B	448	345		
Filler metal	600	540		



(a) Double-bevel-groove (b) Double-V-groove

**Fig. 1** Schematic diagram of welding procedure



(a) Double-bevel-groove (b) Double-V-groove

**Fig. 2** Macrostructure of weld metals

**Table 3** Welding conditions

Groove shape	Double-V	Double-bevel
Welding method	Flux Cored Arc Welding	
Groove angle	60°	45°
Root gap (mm)	6	
Back gouging	○	
Heat input (KJ/cm)	25 ~ 30	
Pass number	16	20
Interpass temp. (°C)	Min. 65 ~ Max. 140	
Current (A)	320	
Voltage (V)	36	
Welding speed (CPM)	25	

고, 경도시험은 시험편의 노치위치를 따라 두께방향으로 ASTM E92에 의거하여 수행하였다.

피로균열생성실험은  $a/W=0.5$ 를 기준으로 하여 X형 그루브는 5mm, K형 그루브는 4mm까지 균열을 생성하였다. 피로균열생성은 ASTM E647에 의거하여 응력비 0.1, 주파수 3Hz에서 실행하였으며, 대부분 18,000~35,000회 정도 사이클에서  $a/W=0.5$  균열을 생성하였다. 그리고 CTOD 시험은 BS 7448에 따라 수행하였고, 천이온도(Ductile-to-Brittle Transition Temperature)를 얻기 위하여 저온에서부터 실시하였으며, 노치위치(BS 7448 Part II의 NP방향)는 용접 중심선에서 가공하였고, 그 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 그리고 CTOD 시험편의 형상 및 크기는 Fig. 4와 Table 4에 나타내었다.

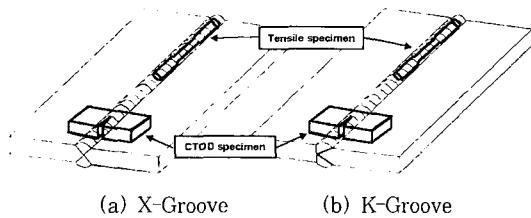


Fig. 3 Schematic diagram of weld panel

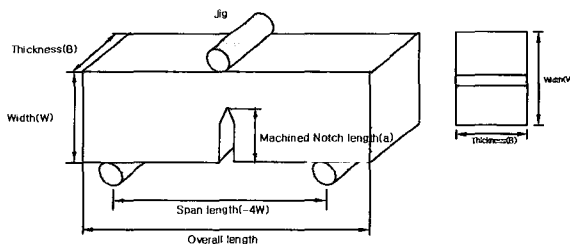


Fig. 4 Schematic diagram of CTOD test specimen

Table 4 Dimensions of specimens

Unit: mm

Groove shape	Thickness	Width	Span length	Notch length
Double-V-groove	42	84	336	37
Double-bevel-groove	42	84	336	38

Table 5 Chemical compositions of weldmetal

Unit: wt%

Section	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	V
Double-V-groove	0.047	0.301	1.218	0.0143	0.0173	1.204	0.024	0.012	0.051	0.0396	0.0164
Double-bevel-groove	0.038	0.345	1.283	0.0118	0.0137	1.376	0.020	0.009	0.035	0.0373	0.0171

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 인장시험 및 화학성분

Table 5와 6에 용착금속에 대한 화학성분 및 기계적 특성을 나타내었다.

본 연구에 사용된 시험편의 화학조성을 살펴보면 용착금속내의 인성과 밀접한 관계가 있는 Mn 및 Ni은 X형 그루브에서 조금 낮게 나타나고 있으나, Evans<sup>3)</sup>의 연구에 기초해 볼 때, Mn과 Ni의 상호작용에 의한 영향은 X 및 K형 그루브 모두 동일하다고 판단된다.

인장특성은 냉각속도 및 용접부의 화학조성에 따라 차이를 보이고 있으나, 본 시험의 결과는 파괴인성에 큰 영향을 주지 않는 범위라고 판단된다. 또한 두 그루브형상의 회석률을 비교해 볼 때, A. C. Hunt 등<sup>6)</sup>은 저회석률(40%)이 고회석률(70%)상태보다 인성이 좋은 것으로 평가하고 있다. 그러나 본 연구에서의 회석률은 Table 7에서 보인바와 같이 동일수준으로 인성이 미치는 영향은 동등한 것으로 보인다.

#### 3.2 미세조직

용착금속의 마이크로 조직사진을 Fig. 5에 나타내었다. 회계 보이는 부분이 입계페라이트(Grain Boundary Ferrite, GBF)이며, 이 결정립계를 따라 lath형으로 발달한 것이 페라이트 사이드 플레이트(Ferrite Side Plate, FSP)이다. 그리고 검게 보이는 부분은 저온인성을 향상시키는 침상페라이트(Acicula Ferrite, AF)

Table 6 Mechanical properties of weld metal

Unit: MPa

Groove shape	Tensile stress	Yield stress
Double-V-groove	601.3	539.4
Double-bevel-groove	632.1	576.7

Table 7 Dilution rate of weldment

Unit: %

Double-V-groove	Double-bevel-groove
17.9	17.5

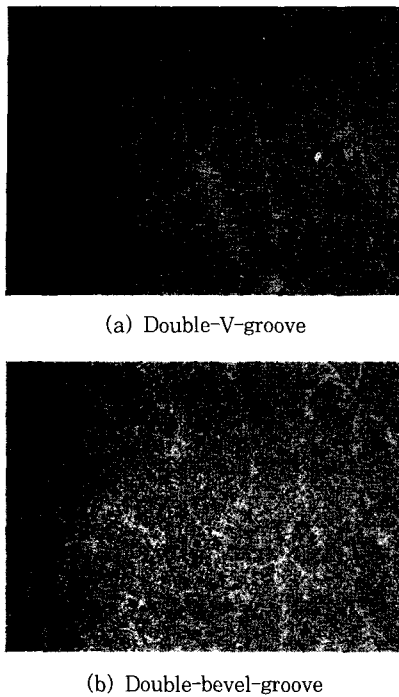


Fig. 5 Microstructure of weld metals

이다. 지금까지 알려진 바로는 양호한 용접부 물성을 얻기 위해서는 미세한 AF가 고분율로 형성되어야 하고, 동시에 GBF, FSP 및 베이나이트의 생성을 최소화하여야 한다<sup>1)</sup>.

그림의 (a)는 X형 그루브의 미세조직을 나타낸 것인데, FSP가 많이 발달되어 있고, 또한 AF가 고분율로 형성되어 있으며, GBF의 맥(Vein)이 좁아지고 있음을 확인할 수 있다. (b)는 K형 그루브의 미세조직을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 (a)의 X형 그루브에 비하여 미세조직의 GBF가 좁게 나타나고 있으며, 또한 FSP도 덜 발달되어 있는 것으로 보아 K형 그루브의 냉각속도가 X형 그루브 보다 빠르다고 판단된다. 또한 두 미세조직의 Grain Size를 측정해본 결과 (a)의 X형 그루브는 155, (b)의 K형 그루브는 124로 K형 그루브에 비하여 X형 그루브의 Grain size가 크게 나타났으며, 이 결과를 바탕으로 두 그루브형상의 냉각속도를 비교할 경우 X형 그루브보다 K형 그루브의 냉각속도가 빠른 것으로 사료되어진다.

Table 8에 미세조직 분율을 보여주고 있다. K형 그

Table 8 Microstructural constituents of weld metal

Groove shape	Ferrite type (%)			M-A (%)	
	AF	GBF	FSP	Reheated	Weld
Double-V-groove	76	21	4	1.29	0.88
Double-bevel-groove	86	14	0	1.45	2.29

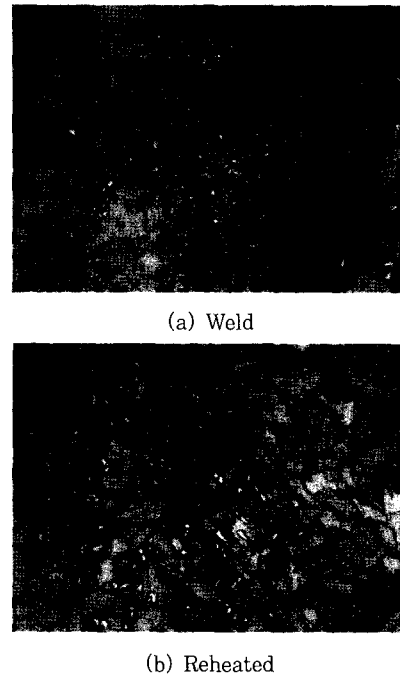


Fig. 6 M-A of double-bevel-groove

루브에서 AF가 보다 많이 형성되어있으며, AF는 대바구니와 같은 모양으로 서로 얽혀져 있기 때문에 균열저항력이 향상되는 성질을 가지고 있다. 그러나 Zhang & Farrar<sup>4)</sup>의 연구에서는 60~80%의 분율이 최적의 인성을 보인다고 보고하고 있다. 따라서 K형 그루브의 AF분율은 적정 침상페라이트 분율을 초과하여 X형 그루브보다 인성저하를 가져올 수 있다고 판단된다.

Fig. 6은 M-A(Martensite-Austenite constituents)의 대표적인 경우를 나타내었으며, 점분석방법을 사용하여 측정하였다. M-A인 경우 균열 초기원으로 작용하여 인성저하를 가져온다고 보고되고 있다. M-A성분이 인성저하를 유발시키는 원인은 M-A성분에 의하여 국부적으로 응력집중현상이 발생되고, 이로 인하여 M-A 성분에서 마이크로 void가 발생한다. 이러한 void들은 전단력에 의하여 서로 합체되고 결국은 파단에 이르는 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>. 따라서 Table 8에서 알 수 있듯이 K형 그루브가 X형 그루브에 비해 M-A분율이 높게 형성되어 있으며, 이로 인한 많은 균열원에 의하여 균열저항력 저하 등으로 인하여 인성 저하를 가져온 것으로 사료된다.

### 3.3 경도분포

용착금속의 노치위치에 있어 두께방향 경도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 사각형으로 된 것이 X형, 원으

로 된 것은 K형 그루브의 경도분포를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 X형 그루브와 K형 그루브 모두 중심부에서 최대 경도를 나타내고 있다. 그리고 0~20mm사이에서는 거의 비슷한 값을 보이고 있으며, 25~50mm사이에서는 K형 그루브가 X형 그루브보다 높은 값을 나타내고 있다. 또한 재가열 부위가 columnar 조직보다 20 HV5 정도 낮게 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 이들의 평균치를 보면 X형 그루브는 212 HV5, K형 그루브는 220 HV5로 조금 높은 경향을 보여주고 있다.

### 3.4 충격시험 (Root부)

Fig. 8은 용착금속의 충격인성을 알아보기 위하여 각 시험편의 Root부에 대한 충격흡수에너지와 온도와의 관계를 나타낸 것이다.

시험결과 충격흡수에너지는 뚜렷한 차이를 보이고 있으며, 이는 동일한 조건하에서 용접을 실시하였다 할지라도 용접 그루브 형상에 따라 냉각속도에 따른 미세조직 차이에 기인한다고 판단된다. 또한 충격흡수에너지의 최대흡수에너지와 최저흡수에너지의 평균값을 천이온

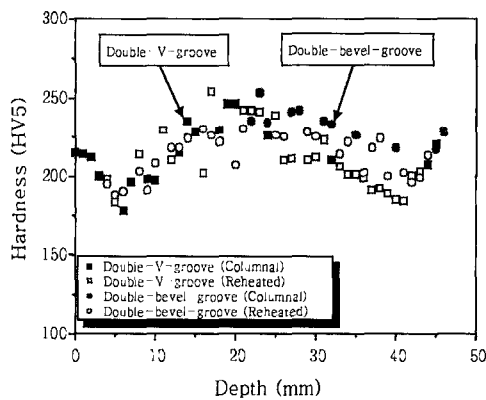


Fig. 7 Hardness distribution of the notch location in thickness direction

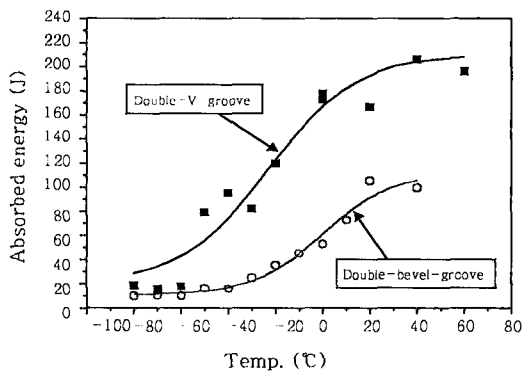


Fig. 8 Charpy V-notch energy absorption impact tests

도로 볼 때 X형 그루브는 약 -30°C 에서 천이온도가 나타났고, K형 그루브는 약 0°C에서 천이온도가 나타났다.

이 결과를 바탕으로 충격특성을 이용하여 동일한 재료와 용접법을 사용하여 구조물을 설계 할 경우, K형 그루브 보다 X형 그루브가 더 낮은 천이온도를 가지며, 또한 충격인성도 좋은 것으로 나타났다.

### 3.5 CTOD 특성 및 SEM 관찰

CTOD 시험시 초기 피로균열의 형상은 인성에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 시험의 유효성 확보를 위하여 피로균열 형상의 검토를 수행하였고, 그 결과를 Table 9에 나타내었다.

일반적으로 시험편의 중심부는 평면변형을 상태에 놓여지고, 표면은 평면응력상태에 놓이게 된다. 따라서 국부적인 파단은 균열선단부의 높은 소성 구속력이 존재하는 중심부에서 발생하기 시작한다. 이로 인하여 균열선단부의 형상은 파괴역학 파라메타에 큰 영향을 미칠 수 있다.

G. P. Nikishkov<sup>9)</sup> 등은 두개의 형상 파라메타 곡률  $\alpha$ 와 P를 다음의 식을 이용하여 균열선단부의 형상을 평가하였고, 90% 이상의 시험편이  $0.012 < \alpha < 0.030$  내에 존재하였으며, P는 두께에 따른 변화가 없었으나,  $\alpha$ 는 두께 감소에 따라 증가 하였다.

$$a(0) - a(z) = \alpha W(2abs(z)/B)P$$

$z$  : 두께방향의 좌표계,  $-B/2 < Z < B/2$

$\alpha$  : 시험편의 표면과 중심부의 피로균열 차이를 특징화 하는 곡률 파라메타

$$\alpha = (a(0) - a(B/2))/W$$

이를 바탕으로 P를 상수로 두고, 곡률  $\alpha$ 가 증가함에 따라 CTOD 및 J적분에 큰 영향을 있음을 보여주었다. 즉  $\alpha=0.02$ 와  $0.03$ 을 비교했을 때, 중심부 CTOD값은 표면에 비하여 약 5~10%감소함을 보여주었다. 이를 기준으로 볼 때, 두 그루브 형상에 따른 조금의 곡률차이는 있으나 전반적으로 인성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Table 9 Average values of the crack front fit parameters

Section	Double-V-groove	Double-bevel-groove
Curvature( $\alpha$ )	0.0297 ± 0.0034	0.0332 ± 0.008
Shape Parameter(P)	2.47 ± 0.43	1.83 ± 0.29

온도에 따른 CTOD특성을 조사하여 Fig. 9에 나타내었다. 용착금속에 대한 CTOD 시험 결과로 X형 그루브는 -5°C 근처에서 천이온도가 나타났고, K형 그루브는 20°C 근처에서 천이온도가 나타났다.

이는 앞서 수행한 루트부의 충격시험에 의해 구한 천이온도와 같은 경향을 보이고 있다. 한편 시험편의 전면과 후면에서 채취한 충격 시험편에 대한 천이온도는 이와 같은 경향을 보이는 것을 바탕으로 3축 응력이 제일 크게 작용되는 중심부의 충격값이 CTOD에 가장 크

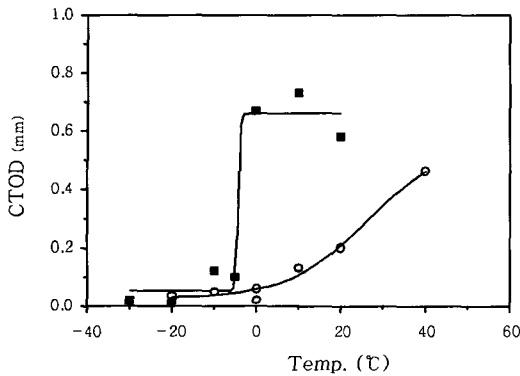


Fig. 9 Correlation between CTOD and temperature

게 연관성을 가진다고 볼 수 있다. 또한, 냉각속도 차이에 기인한 고분율의 경(埂)한 미세조직 및 상대적으로 높은 M-A분율에 의해 K형 그루브의 인성 값이 낮게 형성되었다고 판단된다.

Fig. 10은 -20°C에서 파단면을 S.E.M을 이용하여 관찰한 것이다. 파면에서 결정립이 클수록 단위하중하에서 결정립계에 축적되는 변형의 양이 많아지고, 결정립계에 미세균열이 생성되기 위한 임계하중이 낮은 응력확대계수하에서 미세균열을 생성하게 되어 균열이 생성, 전파하게 된다<sup>3)</sup>. 즉, 그림(Fig. 10)의 (a)와 (a')에서 알 수 있듯이 X형 그루브와 K형 그루브 모두 취성벽개모드나, facet의 크기가 X형 그루브가 K형 그루브보다 상대적으로 적게 나타나고 있으며, 이에 따라 균열저항력이 클 것으로 판단된다.

또한 국부적 LBZ(Local Brittle Zone)가 X형 그루브에 비해 K형 그루브가 많이 형성되어 있음을 확인할 수 있다. (b)에서는 SZ(Stretch Zone)을 보여주고 있는데, stable crack arrest의 진전방향이 상대적으로 완만하게 나타난 것을 볼 수 있고, K형 그루브가 국부적으로 LBZ가 많이 존재하고 있음을 확인할 수 있다.

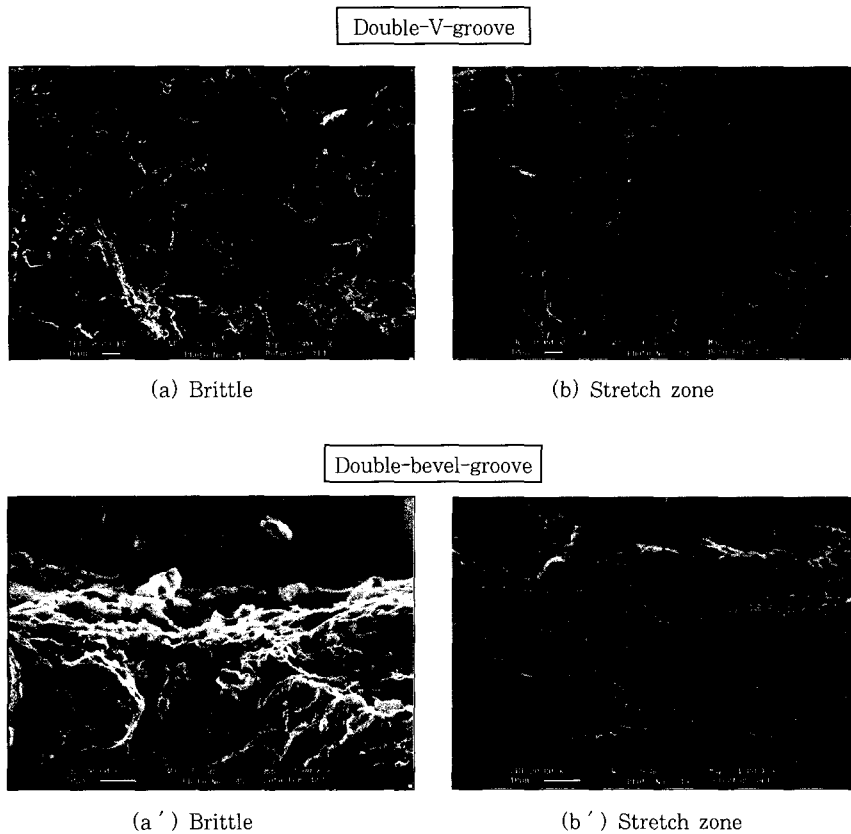


Fig. 10 SEM observation at fractured surfaces after CTOD test at -20°C

## 4. 결 론

해양구조물용 강재의 FCAW 용접부에 있어서 용접 그루브 형상에 따른 파괴인성특성에 관한 연구 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 샤르피 충격시험에서 X형 그루브의 천이온도는  $-30^{\circ}\text{C}$  근처에서 나타났고, K형 그루브는  $0^{\circ}\text{C}$  정도에서 천이온도가 나타났으며, CTOD 시험에서 X형 그루브는  $-5^{\circ}\text{C}$  근처에서 천이온도가 나타났고, K형 그루브는  $20^{\circ}\text{C}$  근처에서 천이온도가 나타났다.

(2) CTOD 특성으로 볼 때 X형 그루브의 천이온도가 K형 그루브 보다 낮은 천이온도를 가지므로, 동일한 용접조건으로 구조물에 적용시 X형 그루브가 K형 그루브보다 더 적합한 것으로 생각된다.

(3) 경도시험 결과 재가열 부위의 경도가 columnar 조직보다 20 HV5정도 낮게 형성 되었고, K형 그루브가 X형 그루브보다 8 HV5 정도 높은 값을 나타냈다.

(4) 미세조직 분석 결과 K형 그루브의 조직이 X형 그루브의 조직에 비해, 고분율의 침상페라이트, M-A형성 및 초석페라이트의 폭이 좁게 형성된, 냉각속도가 빠른 조직을 보여주고 있다.

## 후 기

본 연구는 삼성중공업(주) 산학협동연구비와 2003년도 부산대학교 공과대학 발전기금의 지원에 의하여 수행되었으며, 지원기관에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. H. W. Lee, Y. T. Shin, J. U. Park and H. G. Suk : A Study on Metallurgical Properties and Fatigue Strength depending on Bead Height in SAW Butt Joints, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, **35-3** (1998), 62-70 (in Korean)
2. H. H. Jung, C. M. Kim, H. S. Kim, W. S. Kim, and S. H. Hong : Effect of Heterogeneous Microstructure on the fracture Toughness of Weld Metal, *Journal of the Korean Welding Society*, **17-2** (1999), 98-105 (in Korean)
3. G. M. Evans : The Effect of Nickel on Microstructure and Properties of C-Mn all Weld Metal Deposits, *Welding Research Abroad*, **37-2/3** (1991), 70-73
4. Z. Zhang & R. A. Farrar : Influence of Mn and Ni on the Microstructure and Toughness of C-Mn-Ni Weld Metals, *Welding Journal*, **76-5** (1997), 183s-190s
5. A. C Hunt, A. O. Kuken and G. R. Edwards : Heat Input and Dilution Effects in Microalloyed Steel Weld Metals, *Welding Journal*, January (1994), 9a-14s
6. B. C. Kim, S. Lee, N. J. Kim, D. Y. Lee : Microstructure and Local Brittle Zone Phenomena in HSLA Steel Welds, *Metallurgical Transaction A*, **22a** (1991), 139-149
7. Gennadiv P. Nikishkov, Jurgen Heerens and Dieter Hellmann : Effect of Crack Front Curvature and Side Grooving on CTOD  $\delta_5$  and J-Integral in CT and 3PB Specimen, *Journal of Testing and Evaluation*, **17-5** (1999), 312-319