

## 선체구조물의 용접부 파괴 특성

박 정 응 · 안 규 백

### Fracture Toughness of Thick Steel Plate for Ship Building

Jeong-Ung Park and Gyu-Baek An

#### 1. 개 요

조선업을 포함한 다양한 산업 분야에서 후판 강재의 수요량의 증가와 사용범위의 폭이 넓게 되고 있다. 후판의 사용에 따라서 강재의 파괴인성에 문제가 여러 측면에서 제기 되고 있는 실정이다. 특히, 최근 선박 산업에서는 컨테이너선의 대형화에 따라서 H/C을 비롯한 여러 부분에서 극후판이 사용되고 있으며, 조선산업에서 용접이 차지하는 비중은 약 40%정도에 달하고 있다. 주로 파괴인성은 이러한 용접에 의해서 더욱 취약하게 나타나고 있으며, 선박의 모든 연결부는 용접프로세스를 사용하고 있으며, 선체구조물의 용접부 및 모재의 안전성평가는, 선체구조물의 안전성과 직결된다. 선체에 용접프로세스를 적용한 이래 제2차 세계대전 중 미국에서 건조된 전용접 전시표준함의 용접부 취성파괴에 의한 손상으로 많은 연구가 수행되어 모재 및 용접재료의 개발과 연구가 진행되었고, 이를 통해 여러 가지 기준을 제시할 수 있는 단계가 되었다.

최근, 이러한 기준은 고강도 강재의 개발, 선박건조의 생산성 향상을 위한 용접프로세스 개발(대입열용접), 컨테이너선의 초대형화에 따른 극후판 강재의 사용에 따라서, 일부 선급협회(현재는 NK:일본선급협회)에서는 극후판 대입열용 TMCP강에 대하여 취성균열 전파 정지 특성에 대하여 문제를 제기 하고 있으며, 용접부 건

전성평가방법의 재검토가 요구되고 있는 실정이다. 따라서 여기서는 선체구조물의 용접부 취성파괴 발생의 원인과, 파괴인성평가법 및 특성에 대해 기술 하고자 한다.

#### 2. 선체구조물의 파괴특성

취성파괴의 실제적인 기점이 되는 노치는 용접결합(균열, 용입부족, 날카로운 언더컷, 오버랩 등)과 용접불연속부로부터 발생, 성장한 날카로운 피로균열이 대부분이다. 손상선박을 대상으로 조사한 자료에 의하면 취성파괴 기점이 되는 노치의 종류와 특징은 표.1<sup>1)</sup>과 같다. 조사에 의하면 구조적 응력집중부와 용접결합을 기점으로 대부분 발생하는 것으로 나타났다.

용접결합별 특성을 보면 블로홀과 슬래그혼입과 같은 입체결합의 대부분은 안정적으로 균열이 발생하여 전파되므로 연성파괴로 이어지고, 용접균열, 용접부족, 언더컷과 같은 표면균열은 취성파괴 또는 연성파괴로 나타난다. 따라서 취성파괴를 방지하기 위해서는 표면균열을 발생하지 않도록 주의해야한다.

취성파괴가 발생하기 위해서는 ①응력집중에 의한 노치, ②인장응력, ③노치인성 부족과 같은 3가지 조건을 모두 만족해야 한다. 첫 번째 조건인 응력집중부의 일반적인 노치는 비파괴검사를 통해 검출할 수 있으나, 제작상의 미소균열이나 사용 중에 발생하는 미소 피로

표 1 취성파괴의 노치의 종류와 특징<sup>1)</sup>

노치의 종류	취성파괴발생 비율(%)	내 용
구조적 불연속에 의한 노치	50	응력집중
용접결합에 의한 노치	40	블로홀, 슬래그혼입, 균열, 용입부족, 언더컷 등
금속적 노치	10	가스절단, 열영향부의 강도불균일부 등

표 2 파괴역학에 기초한 파괴인성 시험법<sup>27)</sup>

파괴특성		파라메타	시험방법	규격
발생	정적하중	$K_{Ic}$	- 소형인장시험(Compact Tension) - 3점 굽힘시험	ASTM E399, BS 7448
		$J_{Ic}$		ASTM E813, JSME S001
		CTOD		BS7448, ASTM E1290
		$K_c$	- Deep Notch - 표면노치 광폭인장시험	
	CTOD			
	동적하중	$K_{Ic}^{(1)}$	- 소형인장(Compact Tension) - 3점 굽힘시험	ASTM E399
		$J_{Id}$		ASTM E813
		CTOD		
$K_d$		- CCA(Compact Crack Arrest)		
진전	동적해석	$K_{ID}$	- CCA	ASTM E1221
정지	정적해석	$K_{Ia}$	- ESSO - 2중 인장법	WES
		$K_{ca}$		

균열을 완전히 검출하는 것은 불가능하다. 두 번째 조건인 인장응력은 외적하중과 용접잔류응력에 의해 발생한다. 용접잔류응력은 응력제거법(SR)에 의해 어느 정도는 제거할 수 있으나, 외적하중에 의해 인장응력은 감소시킬 수는 있지만, 완전하게 제거할 수 없다. 세 번째 조건인 노치인성은 모재와 용접부에 대해 파괴인성 평가법에 의해 평가해야한다. 위에서 설명한 것과 같이 어떠한 조건도 완벽하게 제거할 수 없으므로, 구조물의 중요성과 용도에 맞는 취성파괴가 발생하지 않도록 3가지 조건을 적절히 관리해야한다.

### 3. 파괴인성과 역학적 지배인자

파괴역학적 파괴인성을 파괴의 각 단계별로(발생, 전파, 정지)에 정리하여 표. 2<sup>27)</sup>에 나타내었다. 각각의 파괴특성에 따라서 다른 시험법이 사용되는데, 이들 중 대형시험의 특징은 특히 용접구조부재와 같이 용접잔류응력, 제작오차 등과 같이 독립적으로 고려하기 힘든 인자들을 포함한 실물에 가까운 상태의 부재에 대해 파괴인성을 평가할 수 있는 것이다.

재료의 파괴인성은 측정에 사용하는 시험방법에 의해 그 값이 영향을 받는다. 그것은 구속조건, 노치선단의 영향, 노치비등의 역학적 요인에 의해 영향을 받기 때문이다. 여기서는 각각의 조건에 대하여 알아본다.

#### 3.1 구속조건

취성파괴가 발생하기 위한 중요한 조건중 하나는 균

열선단 근방에 발생하는 3축응력상태의 존재이다. 그러한 3축응력상태는 재료를 구속하여 변형을 발생하지 못하게 하여 균열선단근방의 응력을 크게 하여 그 결과 취성파괴의 발생을 용이하게 한다. 구속조건을 지배하는 것은 두께, 노치형상, 하중작용상태 등이다. 시험편의 두께를 감소시키면 본래 평탄한 파면을 가진 시험편이 먼저 표면근방에 전단파면이 발생하고, 더욱 얇아지면 평탄한 파면이 시험편 두께의 중심부에 약간 남을 정도를 제외한 나머지가 전단파면이 된다. 그림 1과 같이 파면이 평탄형으로부터 전단형으로 이용함에 따라 파괴 흡수에너지는 크게 되고, 파괴인성 값도 크게 된다.

그림 2는 18% Ni강에 대한 시험편 형상, 특히 두께가 파괴인성에 미치는 영향을 보여주고 있다. 두께를 증가함에 따라 연성파면율이 감소하고,  $K_c$ 도 감소하다가 일

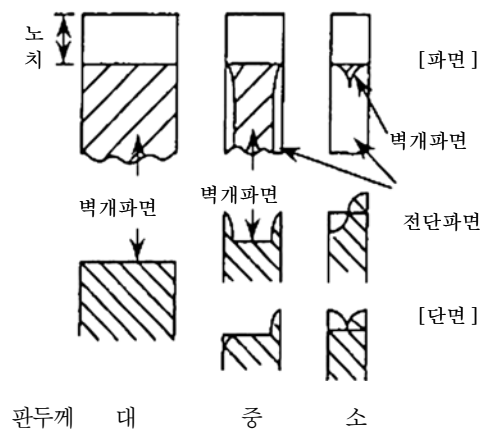


그림 1 파면형태에 미치는 판두께의 영향<sup>8)</sup>

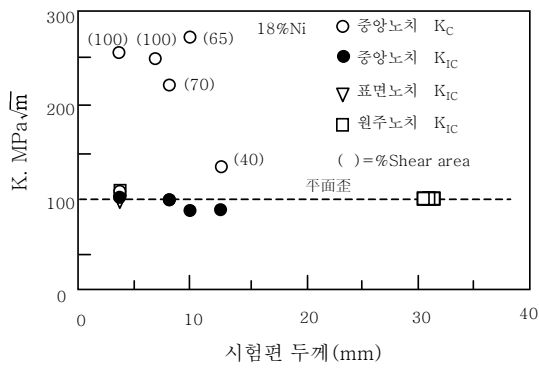


그림 2 18% Ni강의 파괴인성에 미치는 시험편 두께의 영향

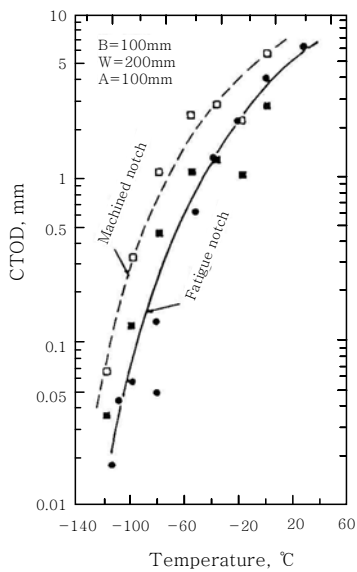


그림 3 CTOD에 미치는 노치형상의 영향

정한 값을 가진다. 이것이 평면변형 파괴인성  $K_{IC}$ 이다.

### 3.2 노치선단형상

그림 3은 두께 100mm 연강에 대해 3점 굽힘시험시 노치형상이 CTOD에 미치는 영향을 조사한 것이다. 노치는 피로균열노치와 선단반경 0.1mm로 기계 가공한 노치, 2종류이다. 노치가 날카로운 것의 CTOD의 온도 의존성 곡선이 고온측으로 이동하고, 그 경우 이동량은 약 30°이다. 그림 중에 피로균열에 대한 CTOD-온도곡선은 기계노치에 대한 CTOD로부터 available CTOD  $\delta_a$ 를 구한 것이다. 그 평가방법은 통상 구한 CTOD는 파괴에 영향을 주지 않은 CTOD와 직접파괴에 영향을 주는 available CTOD로 이루어지고, 전자는 기계가공노치 아래 부분의 변위이고, 노치선단에 형성되는 소성영역의 크기에는 영향을 주지 않기 때문이라는 가정아래에 이루어진다.

### 3.3 실험방법

그림 4는 두께 25mm의 780MPa급 고장력강에 대한 Deep Notch시험, 3점굽힘시험 및 Compact시험에 의해 구한 CTOD의 온도의존성을 보여주고 있다. 시험에 사용한 모든 노치는 선단반경을 0.1mm 기계가공 했다. 저온에서는 시험방법의 영향을 거의 받지 않으나, 대규모 항복상태가 되는 고온에서는 시험방법에 영향을 받았다. 그런 고온영역에서는 3점굽힘시험과 Compact시험이 굽힘시험 값이 제일 작았고, 양측노치(SN), 중양노치(CN)은 노치선단의 구속조건이 부드러워짐에 따라 CTOD 값은 크게 되는 경향을 보였다.

### 3.4 노치비

그림 5는 노치길이와 시험편폭의 비(a/W)를 변화시

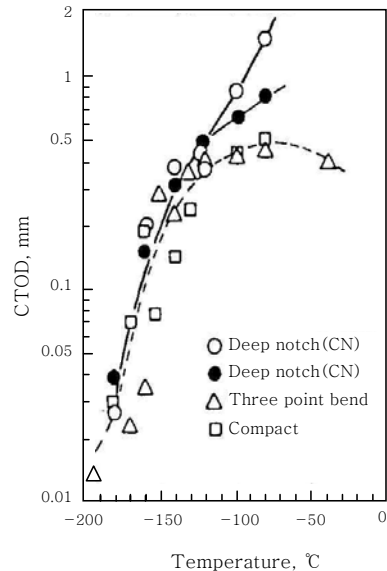


그림 4 CTOD에 미치는 실험방법의 영향

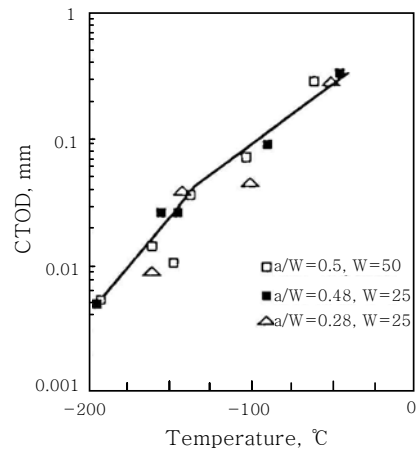


그림 5 CTOD에 미치는 노치비의 영향

켜 연장을 3점굽힘시험에 의해 구한 CTOD의 온도의존성을 보여주고 있다. 그 결과로부터  $a/W=0.3\sim 0.5$ 에서는 구한 파괴인성 값은 차이가 없다. 한편, 균열선단근방의 응력분포를 해석한 결과에서는  $a/W=0.5$ 에서 0.1로 됨에 따라 응력은 저하하고, 실험에서도  $a/W=0.1$ 이 0.3보다 큰 CTOD 값을 가졌다. 일반적으로는 노치비가 파괴인성에 미치는 영향은 실험온도에 의존하고, 상부영역에서는 크고, 하부 및 그 근방의 천이온도에서는 작거나 거의 영향이 없다(그림 6).

### 3.5 용접 잔류응력

용접구조물의 취성과파괴의 발생기점으로 매우 중요한 곳은 용접이음부이다. 잔류응력제거(SR)를 실시하지 않은 용접이음부는 필연적으로 용접잔류응력이 존재한다. 이러한 용접구조물의 균열정지실험은 그림 7과 같은 ESSO실험을 실시한다. ESSO실험은<sup>9)</sup> 대형취성과파괴시험의 일종으로 그림과 같이 시험편 한 쪽면에 노치

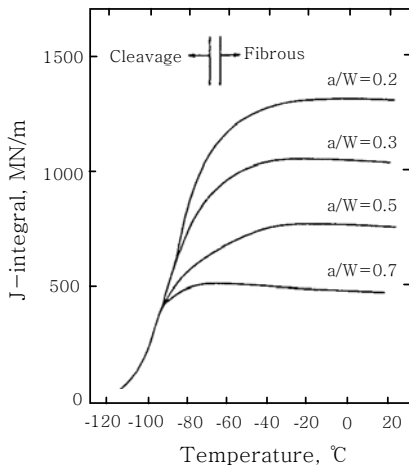


그림 6 파괴진전(J적분)에 미치는 노치비의 영향

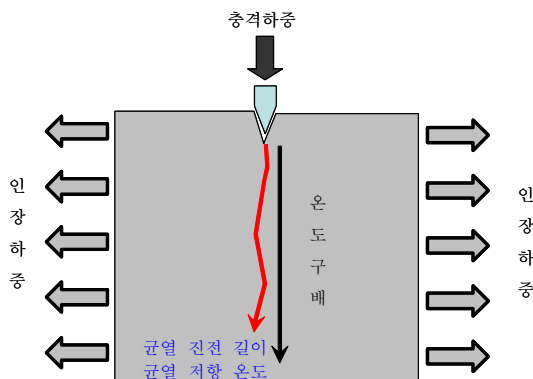


그림 7 ESSO 실험<sup>9)</sup>

를 가공한 대형 인장시험편을 인장한 상태에서 노치에 췌기를 박아 넣어 취성균열을 발생시켜 강재의 균열발생 및 저지 능력을 조사하는 시험이다.

그림 8은 용접이음부의 ESSO시험편 내에 전파하는 균열이 용접선으로부터 벗어난 거리의 최대값과 부하응력의 관계를 조사한 것이다. 노치는 용접고속 및 용접열 영향부에 설치하였으나, 취화부에 노치를 설치하는 경우에도 균열은 용접선으로부터 떨어져 전파하여, 인성이 약한 부분으로 전파하지 않았다. 또 균열전파경로와 용접선으로부터 거리의 최대값은 부하응력이 작을수록 크게 나타나는 경향이 나타났다. 이와 같이 용접잔류응력은 취성균열의 전파경로에 큰 영향을 주고, 취성균열을 용접선으로부터 모재측으로 벗어나게 하는 작용을 하기 때문에 잘 이용하면 용접구조물 내의 취성균열전파정지에 관한 문제를 처리할 수 있다.

### 4. 마 무 리

최근, 컨테이너선의 초대형화(1300TEU 이상)에 따라서 가장 강도를 크게 받는 H/C (Hatch Coaming)부분에서는 80mmt이상의 극후판 강재가 사용되고, 대입열에 의한 용접이 이루어짐에 따라, 용접이음부의 파괴인성에 대한 문제가 제기 되고 있다. 따라서 여기서는 선박구조물의 용접부 취성과파괴 발생의 원인과, 파괴인성평가법 및 특성에 대하여 기술 하였다. 선박에서의 파괴는 주로 용접이음부의 용접결함과 피로균열이 기점이 되어서 발생하며, 이러한 발생원인들은 주로 응력집중에 의한 노치, 작용하중(응력), 노치선단의 인성등에

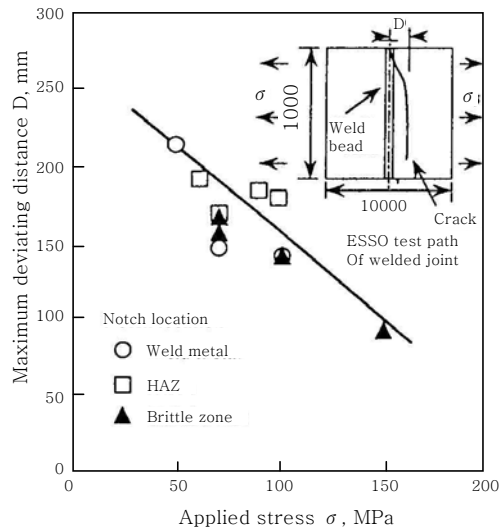


그림 8 ESSO 실험에 의한 부하응력, 전파균열과 용접선의 거리와의 관계

의해서 영향을 받게 된다. 발생원인을 모두 제거 하는 것은 불가능 하므로, 선박을 비롯한 용접구조물에서 용도에 맞게 적절한 관리가 필요하다. 또한, 강재의 극후관화와 대입열에 의한 용접에 의해서 용접구조물의 파괴인성의 문제들은 모재 뿐만아니라 용접금속을 포함하여 함께 평가가 이루어져야 할 것으로 판단 된다.

참 고 문 헌

1. 파괴역학실험법, 배성인, 한민구 역, 원창출판사, 19931.
2. Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials, ASTM Standard E399, 1983.

3. Fracture mechanics toughness test Part 1, Brittle Standard BS7448, 1991.
4. Standard test method for  $J_{Ic}$ , A measure of fracture toughness, ASTM Standard E813, 1988
5. 彈塑性破壞韌性 $J_{Ic}$  試驗方法 增補第 1版, JSME S001, 日本機械學會基準, 1992
6. Standard test method for crack-tip opening displacement (CTOD) fracture toughness measurement, ASTM Standard E1221, 1988
7. 綱種認定方法, 日本容接協會, 1978
8. 鐵鋼材料의破壞韌性(II, III), 日本鎔接學會志, 第 61卷 7号, 1992
9. 材料試驗法, 頁藤一, 内田老鶴圃, 1976



- 박정웅(朴正雄)
- 1966년생
- 조선대학교
- 용접강도 및 용접변형
- e-mail : jupark@chosun.ac.kr



- 안규백(安圭栢)
- 1970년생
- 포스코 기술연구소 접합연구그룹
- 용접 파괴 및 구조
- e-mail : gyubaekan@posco.com