

# 고강도강 맞대기 용접 시험편의 루트갭 변경에 따른 피로강도 평가

김호정·강성원·김명현<sup>†</sup>  
부산대학교 조선해양공학과

## Fatigue Assessment of High Strength Steel with Butt Welded Joints for the Root Gap Difference

Ho-Jung Kim · Sung-Won Kang · Myung-Hyun Kim<sup>†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

### Abstract

In this study, a series of fatigue tests was conducted to evaluate fatigue strength for the root gap difference with high strength steel with butt welded joints. A finite element analysis using effective notch stress method was also performed to compare effective notch factors each other with butt welded specimens made by copper backing. The results of fatigue tests were classified according to the root gap difference. Fatigue life of butt welded specimens is presented for determining the root gap of high strength steel with butt welded joints in terms of fatigue strength. Then effective notch stress was applied to interpret fatigue strength of butt welded specimen model which is reflected actual measured dimensions. As a result, fatigue strength of high strength steel with butt welded specimens is increased by root gap gets longer in length.

**Keywords** : Fatigue(피로), High strength steel(고강도 강), Butt welded joint(맞대기 용접), Root gap(루트 갭), Effective notch stress(유효 노치응력법), Copper backing(동당금)

## 1. 서론

선박 및 기계구조물의 접합 방법으로는 작업속도의 용이성, 구조물의 단순화, 수밀 우수성 등의 장점 때문에 용접법을 사용하여 접합한다. 이렇게 용접으로 이루어진 강 구조물은 피로에 취약한데, 이는 용접에서 발생하는 용접결함, 잔류응력, 기하학적 불연속 부의 응력집중 등에 기인한다. 특히 용접부는 비드형상 파라메타인 프랭크각, 곡률반경, 비드높이 등의 영향에 의해 피로강도가 결정된다는 연구결과가 있다(Lee, et al., 1998). 이렇게 발생한 용접 노치부의 응력집중은 항복강도 이하의 반복적인 피로하중이 작용할 시 균열이 발생하여 전파되고 종단에는 파단에 이르는 결과를 초래한다(Radaj, 1996). 한편, 선박 및 기계구조물의 대형화 추세에 따른 경량화가 요구되고 있고(Choi, et al., 2002), 이를 위해 고강도 강재를 사용하여 두께를 줄이면서도 기계적 성질을 만족시키는 강재의 개발과 피로특성의 파악이 필요하다(Nagai, 1976). 특히, 고장력 재료의 사용 확대 등으로 종래의 설계수단만으로는 효과적인 구조물 안전성 평가가 어렵다. 이는 재료의 열처리 및 취급과정에서 생긴 미소결함이나 제조과정에서 생긴 결함 등을 충분히 고려할 수 없기 때문이다(Han, et al., 1991).

본 연구에서는 인장강도 700 MPa 급 고강도강을 사용하여 선박 및 기계구조물에 많이 쓰이는 맞대기 용접을 동당금 배킹(copper backing)을 사용하여 제작하고 루트 갭의 길이를 변경하는 사례 연구를 통한 고강도강 맞대기 용접부의 피로특성을 파악하며 유효노치 응력법을 이용한 유한요소해석을 통하여 해석결과와 시험 값을 비교, 검토하였다.

## 2. 시험 준비

### 2.1 시험편 준비

본 시험을 진행하기 위해 Fig. 1 과 같이 시험편을 준비하였다. 루트갭을 제외한 그루브 각, 시험편의 두께, 용접조건 등과 같은 치수는 동일한 조건으로 시험편을 제작하였다.

Fig. 2 에는 사용된 동당금의 깊이, 폭, 루트갭을 나타내는 치수 도면을 나타내었고, 동당금의 깊이와 폭은 일정한 값을 가지므로 루트갭의 길이 변화에 따른 시험편의 종류를 'CASE-숫자' 와 같이 구분하여 정의하고, Table 1 에 나타내었다.

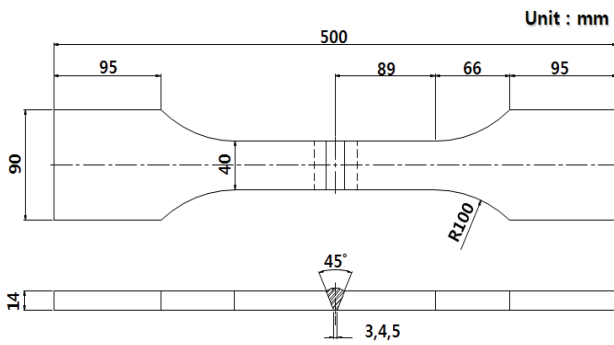


Fig. 1 Specimen dimension of fatigue test

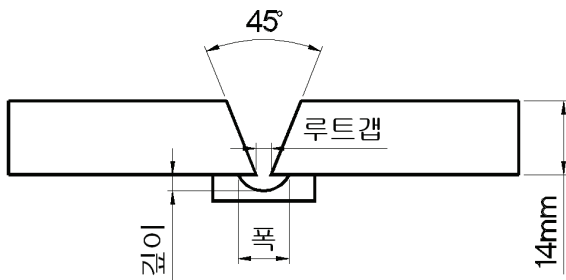


Fig. 2 Definition of dimension

Table 1 Dimension of each case

	폭	깊이	루트갭
CASE-1	6	1	3
CASE-2	6	1	4
CASE-3	6	1	5

이와 같이 정의된 치수에 따라서 각 시험편을 아래의 Fig. 3 과 같이 제작하였다. 아래그림에서 왼쪽 위로 확대되어 있는 사진 이 전면 비드이며, 오른쪽 아래에 확대되어 있는 사진은 이면 비드이다.

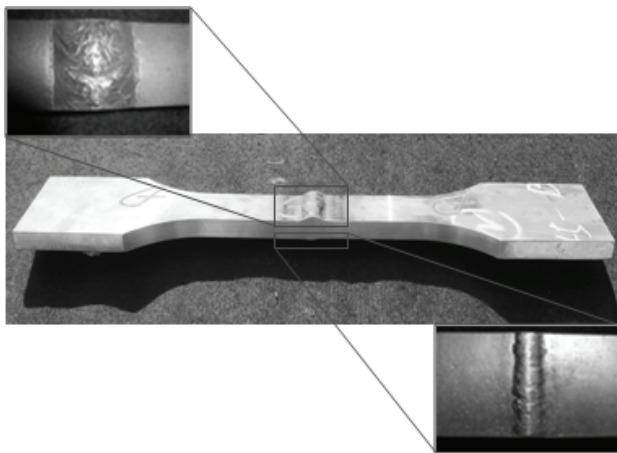


Fig. 3 Fabricated butt welded specimen

본 시험에 사용된 맞대기 용접의 배킹방법은 동당금을 사용하였다. 동당금 방법은 열전도성이 우수하고(Raghu & Philip, 2006), 칠러를 사용한 수냉이 용이하며, 용접 후 동당금 배킹을 제거할 수 있으므로 스틸 배킹을 사용하여 용접 후 배킹을 제거하지 않은 맞대기 용접보다 응력집중을 줄일 수 있다. Fig. 4 는 시험편 제작에 사용된 동당금의 형상을 나타내었다.



Fig. 4 Shape of copper back plate

본 시험에 사용된 강재는 고강도 강인 ATOS70 으로 인장강도 700 MPa급 강재이며, 모재의 기계적 특성 및 화학적 조성을 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties and chemical composition of ATOS70

	$\sigma_p$ [MPa]	$T.S$ [MPa]	Elong. [%]
ATOS70	620	700	33

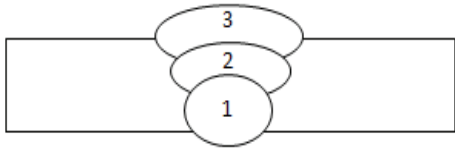
(a) Mechanical properties

[Unit: %]				
	C	Si	Mn	P
ATOS70	0.07	0.19	2.0	0.007
	S	Cr	V	$C_{eq}$
	0.002	0.2	0.025	0.45

(b) Chemical composition

여기서 탄소당량( $C_{eq}$ )의 정의는 냉간 균열에 미치는 합금원소의 영향을 탄소를 기준으로 탄소가 등가로 환산한 것을 말하며 일반적으로 탄소성분이 높을수록 임계점에서의 냉각속도가 빠르므로 예열이 필요하다. 탄소당량은 열영향부의 최고경도에 영향을 주는 것으로 열 영향부의 경화기준으로 이용된다. 또한 수소균열 측면에서 용접성과 용접성에 미치는 합금 원소의 영향을 평가하는 간단한 방법이다. 탄소당량은 열 영향부의 경화기준 뿐만 아니라 용접시공에서도 사용재료의 선택이나 예열, 용접 후 열처리 기준으로 이용된다. 일반적으로  $C_{eq}$  값이 0.4 이하일 때는 용접성이 우수, 0.4~0.45 일 때는 용접성이 양호, 0.46~0.52 일 때는 용접성이 보통, 0.52 이상의 값일 때는 용접성이 불량한 것으로 평가되므로 본 ATOS70 강재의 용접성은 양호한 것으로 판단된다. ATOS70 강재는 인장강도 660 MPa 급 SC-80M, 1.2  $\phi$  용접봉을 사용하여 FCAW 용접법으로, 아래보기 자세로 용접하였다. Table 3 에는 시험편의 용접조건을 나타내었다.

Table 3 Welding procedure

Bead Sequence				
				
Pass No.	Welding Parameter			Heat Input [KJ/cm]
	Ampere [A]	Volt [V]	Speed [CPM]	
1	220	24	29,1	10,9
2	280	31	28,5	18,3
3	280	31	22,3	22,3

시험편의 제작 정도를 확인하기 위하여 피로시험 전 치수, misalignment, angular distortion 을 측정하였으며, 각 case 에 따른 전체 시험편의 misalignment 와 angular distortion의 측정 평균값을 Table 4 에 나타내었다.

Table 4 Misalignment and angular distortion

	Misalignment [mm]	Angular distortion [rad]
CASE-1	0,132	0,00435
CASE-2	0,432	0,00268
CASE-3	0,492	0,00214

### 2.2 정하중 테스트

피로시험을 진행하기 전에 시험편에 작용하는 하중이 적절하게 부여되는지 확인하기 위하여 정하중 테스트를 실시하였다. Fig. 5 에 보이는 위치와 같이 5mm 단축 스트레인 게이지를 응력 집중예상부인 전면 그리고 이면 비드의 토우부로부터 시험편 두께의 0.5, 1.5 배 떨어진 위치에 8 개의 스트레인 게이지를 부착하였고, 하중을 15 kN, 30 kN, 45 kN, 60 kN 으로 선형적으로 증가시키며 일정시간동안 부과된 하중을 데이터 레코더에 저장하여 테스트를 실행하였다(Do, et al., 2009).

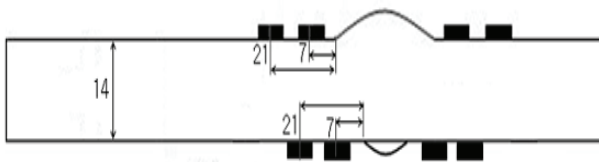


Fig. 5 Strain gage location for static test

정하중 테스트의 결과는 Fig. 6 에 보이는 바와 같이 하중이 증가하는 만큼 시험편에 발생하는 응력 또한 선형적으로 증가하며, 토우부에 근접 할수록 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있다.

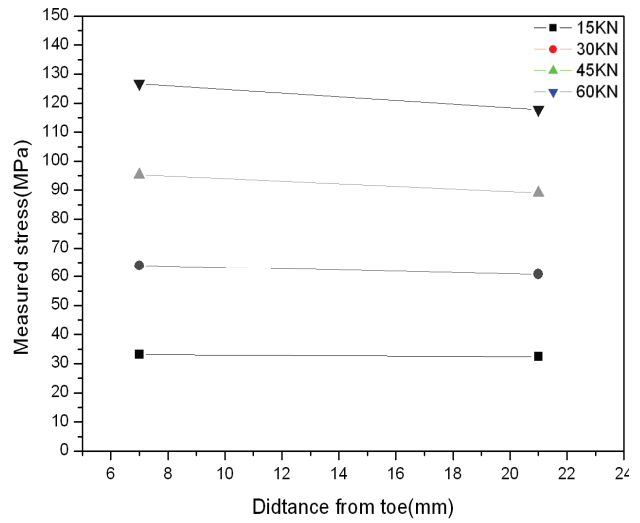


Fig. 6 Static test result

## 3. 피로시험

### 3.1 피로시험 방법 및 시험조건

본 연구에 사용된 피로 시험기는 Instron 사의 8803 model 로 최대용량 ±50 ton 인 축 인장/압축 유압 서보 시험기이다. 피로 하중의 파형은 사인 정현파를 사용하였고, 하중제어 방식으로 응력비 를 0.1로 하여 편진 하중이 작용하도록 설정하여 최대, 최소 하중을 부하하였다. 루트갭 3 mm 시험편 9 개, 4 mm 시험편 7 개, 5 mm 시험편 11 개, 총 27 개의 시험편에 대하여 응력범위 (stress range)를 기준으로 S-N 데이터를 취득하였고, 응력 범위를 120~ 280 MPa 로 설정하여 전체 피로시험을 수행하였다.

주파수는 4~10 Hz 범위에서 적용하중에 따라 다르게 설정하여 적용하였고, 시험의 종료 시점은  $2 \times 10^6$  반복수로 설정하여 시험을 수행하였다. 이는 본 시험편으로부터 얻어진 데이터를 기준으로 평가되어질 구조물의 예상 피로 수명을 선정하여 적용한 것이다. 본 연구에 사용된 피로시험기의 사진 및 피로시험조건은 Fig. 7 및 Table 5 에 나타내었다.



Fig. 7 Fatigue test machine

Table 5 Fatigue test condition

Load pattern	Sine wave
Frequency	4~10 Hz
Stress ratio	0.1

### 3.2 피로시험 결과

피로시험 결과 모든 시험편의 응력 집중부인 전면, 이면 비드의 토우부에서 균열이 발생하여 두께방향으로 진전하고 파단에 이르렀다. CASE-1 시험편 9 개 중 시험 종료 반복수인  $2 \times 10^6$  반복수를 상회한 2 개의 시험편을 제외한 7 개의 시험편 중 전면 비드 토우 부 1 개, 이면비드 토우부 6 개에서 균열이 발생, 파단하였다. CASE-2 의 시험편 7개 중 시험 종료 반복수를 상회한 3 개의 시험편을 제외한 4 개의 시험편 중 전면비드 토우 부 2 개, 이면비드 토우 부 2 개에서 균열이 발생, 파단하였다. CASE-3 의 시험편 11 개 중 시험 종료 반복수를 상회한 5 개의 시험편을 제외한 6 개의 시험편 모두 이면비드 토우부에서 균열이 발생, 파단하였다. 각 CASE 에 따른 균열 위치는 Table 6 에 나타내었다.

Table 6 Crack initiation location

	Toe (전면)	Toe (이면)	$2 \times 10^6$ 반복수 이상
CASE-1	1	6	2
CASE-2	2	2	3
CASE-3	-	6	5

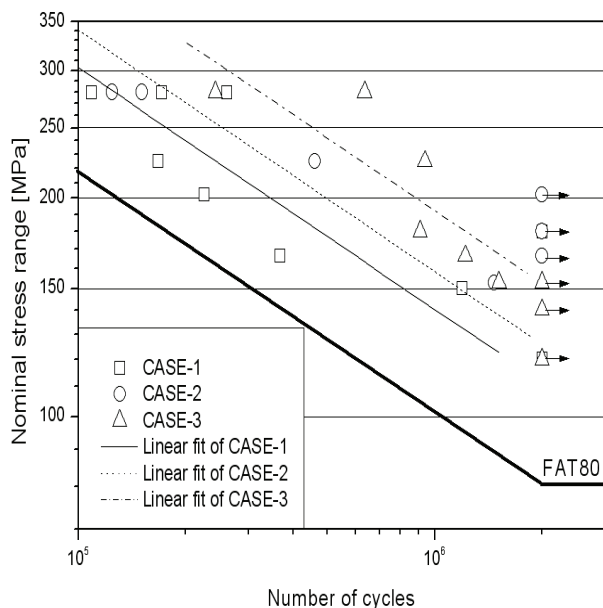


Fig. 8 Nominal stress based S-N curve

루트 갭의 차이 이외에 다른 시험 조건이 동일하기 때문에 동당금을 사용한 고강도강 맞대기 시험편의 경우 루트간격이 상대

적으로 긴 CASE-3 의 피로강도가 높고 다음으로 CASE-2, CASE-1 의 순으로 피로강도가 낮음을 Fig. 8 에 나타나 있는 S-N 선도를 기준으로 판단할 수 있다. 본 S-N 선도는 CASE-1~3 의 피로시험 결과를 바탕으로 평균 선도(mean curve)를 나타내었고, 기울기  $m$  값을 3 으로 고정하여 피팅(fitting)한 것이다.

루트갭이 3 mm 인 CASE-1 대비 루트 갭이 4 mm 인 CASE-2 의 피로강도는 약 13 % 향상되었고, 루트 갭이 3 mm 인 CASE-1 대비 루트갭이 5 mm 인 CASE-3 의 피로강도는 약 36 % 향상됨을 확인할 수 있다. 이는 루트갭이 커질수록 전면 및 이면비드의 형태가 달라져 토우부의 곡률반경과 프랭크 각이 커지므로 토우부의 응력집중이 감소하며, 용가재의 유동성 확보 차원에서 용입 차이로 인한 것으로 사료된다. 각 시험편의 대표적인 파단면을 Fig. 9 에 나타내었다.

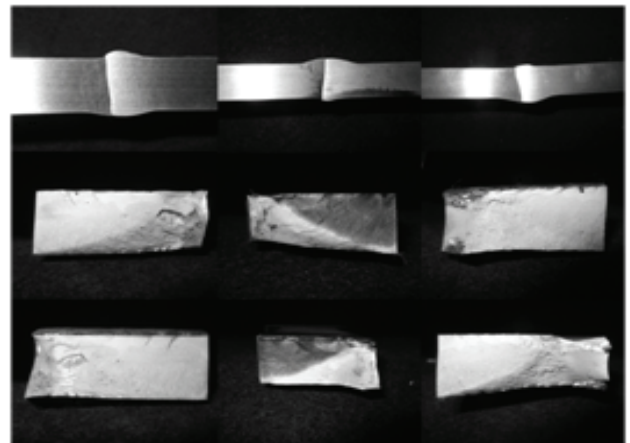


Fig. 9 Fracture surface of each case(left row: CASE-1, middle row: CASE-2, right row: CASE-3)

본 연구에 사용된 맞대기 용접 시험편의 피로강도평가 기준이 되는 FAT 80 class 와 CASE-1 의 피로강도를 비교하면, CASE-1 의 피로강도가 약 40 % 높음을 확인할 수 있다.

## 4. 유한요소해석

### 4.1 유효노치응력

본 연구에서는 International Institute of Welding(Hobbacher, 2004)에서 제시하는 가상의 노치반경을 적용하여 맞대기 용접 시험편의 피로강도 평가를 수행하였다. 사용한 가상의 노치 반경은 식 (2) 에 의해서 정의되며  $\rho_f$  는 가상의 노치 반경,  $\rho$  는 실제 노치 반경이다.  $s$  는 다축성 계수로서 용접부의 경우 2~3 의 값을 가지므로 평균 값인 2.5 를 사용하였고,  $\rho^*$  는 미세조직 길이이며, 인장강도 혹은 항복강도에 따라  $\rho^*$  가 결정된다(Neuber, 1946).

$$\rho_f = \rho + s\rho^* \tag{1}$$



피로노치계수는 유한요소해석을 통한 유효노치응력으로부터 계산 된다. 유한요소 해석에 사용한 요소의 최소 크기는 0.1 mm 이하로 하였고, 기본적으로 4 개의 노드를 갖는 2 차원 평면 변형률요소를 사용하였다. 본 해석에서는 시험편 전체를 모델링하여 해석하였고, 각 CASE 별 시험편을 식 (2) 에 따라 얻어진 가상 노치반경과 실제 제작된 시험편의 측정 평균치를 적용한 전면 및 이면비드의 그루브 폭과 높이를 반영하여 상세 모델링을 수행하였고 이를 Fig. 10 에 나타내었다.

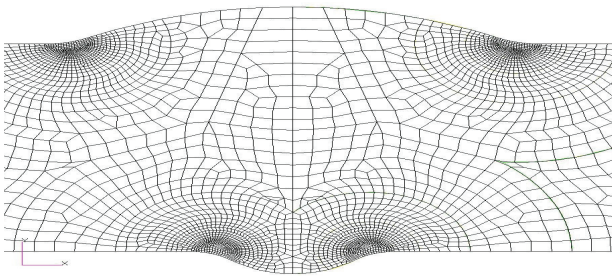


Fig. 10 Detailed modeling of notch

경계조건은 모델의 X 축을 기준으로 A 그룹부의 변위와 회전 모두 구속하고, B 그룹부의 Y 축 방향 변위만 구속하였다. 하중 조건은 B 그룹부분에 X 축 방향으로 인장이 작용하도록 Total load 를 부하하였다. 이러한 경계조건을 Table 7 에 나타내었다.

식 (2) 에 따라 계산된 가상의 노치반경( $\rho_f$ )를 본 시험에 사용된 맞대기 용접 시험편 모델의 전면 및 이면 비드 토우부에 적용하여 해석을 수행하였다.

Patran 2007 r1b 01-Oct-10 20:12:40  
Fringe: cob5, A2:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, At Z2

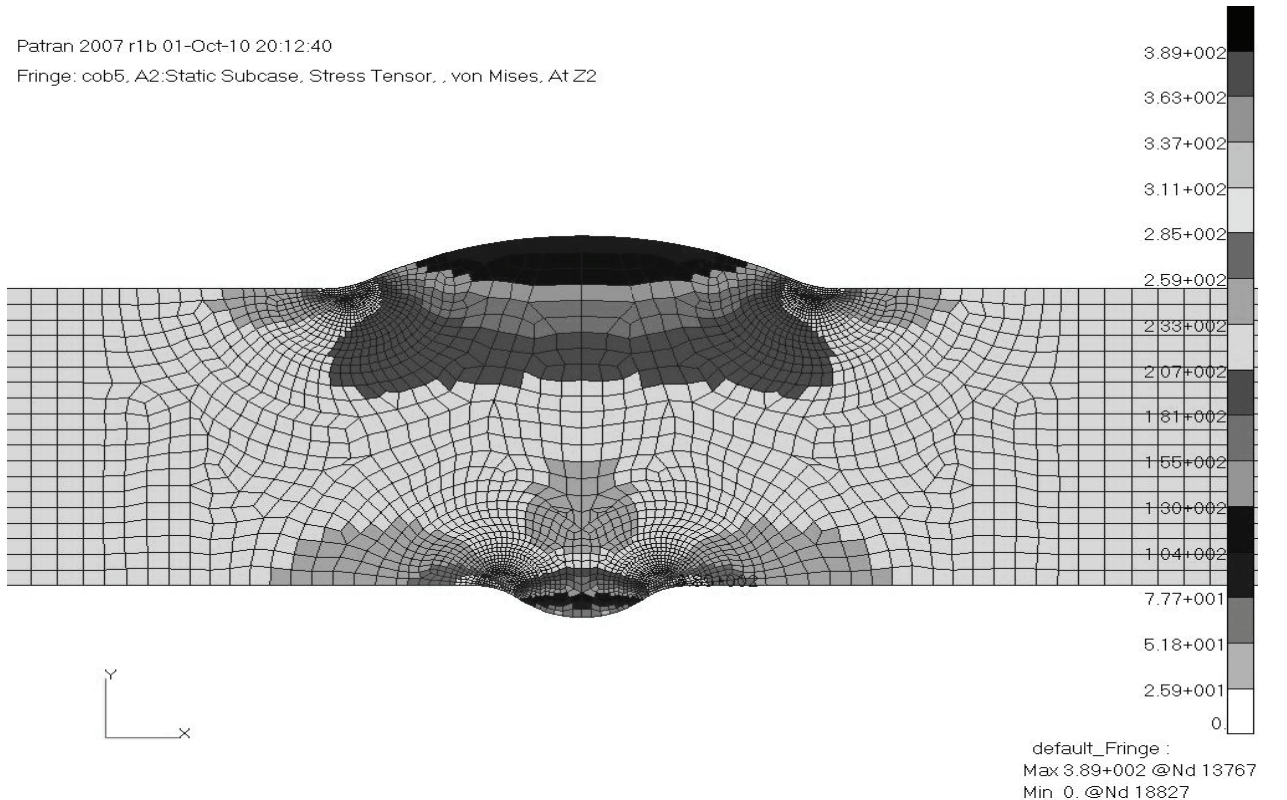


Fig. 11 Analysis result of butt specimen

수행한 해석결과의 대표적인 사례로 루트갭 5 mm 인 시험편 모델의 해석결과를 Fig. 11 에 나타내었다.

Table 8 에는 실제 곡률이 반영된 가상 노치반경을 적용한 유한요소해석 후, 최대응력집중부인 이면비드 토우부에서의 최대 응력 값을 공칭응력 값으로 나누어 준 유효노치응력계수( $K_f$ ) 값과 시험 시 파단이 일어난 전면비드 토우부에서의 유효노치응력계수 값을 나타내었다.

Table 7 Boundary condition

Translations and rotations restriction (fixed = 0)						
	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
A	0	0	0	0	0	0
B	-	0	-	-	-	-

Table 8  $K_f$  of the crack initiation position

	Location	$K_f$
CASE-1	Toe (이면 비드)	2.03
	Toe (전면 비드)	1.89
CASE-2	Toe (이면 비드)	1.72
	Toe (전면 비드)	1.58
CASE-3	Toe (이면 비드)	1.68
	Toe (전면 비드)	1.52

모든 CASE 에서 해석 결과, 이면비드 토우부에서의 피로노치 계수가 전면비드 토우부의 피로노치계수보다 더 높게 나왔으며, 이는 본 피로시험 결과와 일치하는 경향을 보인다. 각 시험편의 모든 CASE 에서 해석 결과, 이면비드 토우부에서의 피로노치 계수가 전면비드 토우부의 피로노치계수보다 더 높게 나왔으며, 이는 본 피로시험 결과와 일치하는 경향을 보인다. 각 시험편의 곡률반경을 고려하여 해석한 결과 루트갭이 커질수록 비드형상과 곡률반경이 커지므로 루트갭이 작을수록 노치부의 응력집중이 커지는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 인장강도 700 MPa급 ATOS70 강재의 루트 갭 길이에 따른 피로강도를 평가하고 유한요소해석을 통한 비교 평가를 수행하였다. 피로시험 결과와 유한요소해석 값을 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 고강도 ATOS70 강재의 맞대기 용접 시험편의 경우 루트갭을 3 mm 에서 4 mm, 5 mm로 증가 시킬 경우 피로강도가 각각 13 %, 36 % 향상됨을 확인하였다.

2) 루트갭이 작으면, 시험편을 제작함에 있어서 용가재의 유동성 부족으로 인한 용입 부족이나, 가장 큰 응력집중이 발생하는 용접 비드와 모재가 만나는 노치부의 곡률반경의 값이 작아지기 때문에 응력집중이 커지는 것으로 판단된다.

3) 제작된 시험편의 치수를 바탕으로 유효노치응력법 적용하여 해석한 결과 해석값과 시험값이 유사한 양상을 나타내고 있지만, 시험값을 바탕으로 한 유효노치계수 값과 피로시험 결과 값이 약 20 % 차이가 나는 이유로는, 시험편 제작 시 발생할 수 있는 결함이나 잔류응력 그리고 각변형 및 오정열(misalignment) 때문으로 판단된다.

4) 루트갭 이외의 다른 조건들이 같으므로 이면비드의 토우부에 응력 집중으로 인한 초기 균열 발생 시기가 피로강도를 결정하는데 있어 주요한 변수라고 사료된다.

## 후 기

본 논문은 지식경제부 중기거점 사업 및 첨단 조선공학연구센터의 지원으로 수행되었습니다. 위 기관의 후원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Choi, K.H., Choi, H.Y., Ha, J.H. and Park, Y.S., 2002. Fatigue Crack Growth Analysis of High Strength Steel (POSTEN80) with Out-of-plane Gusset. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 22(1-A), pp.123-130.
- Do, H.D., Kang, S.W., Han, J.H., Kim, S.M. and Kim, M.H., 2009. Fatigue Assessment in accordance with Back Plate of Butt Welded Specimens. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(1), pp.24-30.
- Han, M.S., Kim, J.D. & Lee, H.S., 1991. An Experimental Study on Fatigue Fracture Behaviour of Surface Crack in Finite Plates and Fillet Welded T-Joint. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 28(2), pp.275-284.
- Hobbacher, A., 1996. *Fatigue design of welded joints and components*. Recommendations of IIW Joint Working Group XIII-XV, The International Institute of Welding.
- Lee, H.W., Shin, Y.T., Park, J.U. and Suk, H.G., 1998. 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), pp.62-70.
- Nagai, K., 1976. Plastic Deformation Behaviors in the Longitudinal Butt Welded Joints between High Strength Steel and Mild Steel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 13(2), pp.45-51.
- Neuber, H., 1946. *Theory of Notch Stress*. JW Edwards Co, Ann Arbor, Michigan.
- Radaj, D., 1996. Review of fatigue strength assessment of non-welded and welded structures based on local parameters. *International Journal of Fatigue*, 18(3), pp. 153-170.
- Raghu, O. and Philip, J., 2006. Thermal properties of paint coatings on different backings using a scanning photo acoustic technique. *Measurement science and technology*, 17(11), pp.2945-2949.



김 호 정

강 성 원

김 명 현