

## 십자형 용접부 피로강도 산정을 위한 국부응력법의 비교연구

양박달치<sup>†\*</sup>, 안정현<sup>\*</sup>  
울산대학교 조선해양공학부<sup>\*</sup>

### A Comparative Study of the Fatigue Strength on Cruciform Joints by Local Stress Methods

Park Dal Chi Yang<sup>†\*</sup> and Jung Hyun Ahn<sup>\*</sup>

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Ulsan University<sup>\*</sup>

#### Abstract

The notch effects on the fatigue strength of welded joints are both stress concentration and fatigue strength reduction. In the notch stress approach, the notch effects are usually approximated by introducing weld-bead parameters for the local detailed weld joints. In this paper, well-known notch stress approaches – critical distance method, area method and fictitious rounding method are presented for the fatigue strength of cruciform joints. The estimated results of the present methods are applied to the experiments performed in this study and reported in the references. The results of the application show that the fatigue-life scatterness of the experimental data expressed in the nominal stress is significantly reduced by introducing the effective fatigue stress of the present study.

※Keywords: Notch stress analysis(노치응력해석), Fatigue effective notch stress(유효노치피로응력), Fatigue strength of cruciform joints(십자형 용접 연결부 피로 강도)

#### 1. 서론

용접 연결부의 피로 강도평가는 구조물의 수명과 관련된 주요 설계상의 문제이다. 용접부 피로 강도 해석의 어려움은 용접비드형상의 불연속과 불균일성으로 인한 응력집중과 재료의 저하로 인해 강도상의 취약부가 된다는 점과 용접 비드부의 기하학적 형상과 재료의 특성을 정확히 정의하기 힘든 것에 기인한다. 따라서 용접연결부의 피로강

도 평가의 실제적인 문제의 하나는 용접부의 형상을 충분히 정밀하게 정의하고 응력해석에 적용하는 데 있어서의 어려움이라고 할 수 있다. 현재의 용접부의 피로강도 평가에 폭 넓게 사용되고 있는 방법은 연결부의 종류와 하중의 방향에 따라 여러 등급으로 나누어 S-N곡선을 적용하는 공칭응력법(Radaj et al. 2006)과 피로균열 발생 부위인 용접부의 핫스팟 위치의 응력을 유한요소 응력해석법을 사용하여 국부적인 용접비드의 기하학적인 형상을 제외하고 모든 연결 구조 형상의 영향을 고려할 수 있는 핫스팟 응력법이 있다. 구조응력법이라고도 불리는 핫스팟 응력법은 통합 S-N선도를

접수일: 2010년 3월 24일, 승인일: 2010년 5월 25일

† 교신저자: pdcyang@mail.ulsan.ac.kr, 052-259-2159

사용하여 피로 수명을 추정한다(Kim et al. 2008, Kang et al. 2008). 이 방법은 같은 등급 내에서 용접부의 연결 형상이 다른 경우의 피로강도 해석에 매우 유용하게 적용될 수 있으나 구조응력의 역학적인 정의가 명확하지 않아 피로 균열의 발생에 큰 영향을 끼치는 용접 비드의 국부 형상을 고려할 수 없다 또한 부재가 연속적으로 연결되지 않은 용접 끝단부의 기하학적 불연속부에서 구조응력을 계산하기 위한 유한요소 모델이 국부요소의 크기에 큰 영향을 받는다면, 용접 루트부에서 시작되는 균열에 대해서는 적용할 수 없다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 용접 연결부의 비드로 인한 영향을 고려하여 용접부의 피로강도를 추정하는 노치응력법에 대해서 다룬다. 노치응력법은 노치 부근의 급격한 응력 구배를 고려하여 노치로부터 일정 영역 내에서의 응력구배 또는 평균응력이 피로 강도에 관련이 있다는 가설하에 기본적으로 피로 한도(Fatigue limit)의 기준응력을 구하는 데 적용된다(Radaj et al. 2006, Taylor et al. 2002). 현재 용접부의 피로강도에 적용되는 노치응력법은 핫 스팟 부위의 유효피로응력(Fatigue effective stress)을 결정하는 응력해석에 따라 여러 방법이 제안되고 있다. 본 연구에서는 심자형 용접 연결부에 대하여 용접비드의 형상을 고려하여 피로 한도를 추정하는 국부응력법의 임계거리법, 가상노치라운드법과 면적법을 검토하고 기존의 실험결과에 적용하였다. 그 결과 본 연구에서 채택한 3가지 노치응력법은 모두 이상화된 비드 형상을 고려하여 피로강도를 산정할 수 있음을 알 수 있었다. 응력해석모델링에 있어서는 가상노치라운드법이 수렴성이 좋아 다른 두 방법에 비해 유리함을 확인하였다.

## 2. 유효피로응력

용접 토우부 또는 용접 루트부에 기하학적 특성이 있는 경우의 탄성응력분포는 최대응력이 토우부에 접근할수록 증가한다. 노치응력법에 의한 피로한도는 최대응력  $\sigma_k$  보다 작은 크기인 유효피로응력  $\sigma_f$ 을 사용하며 다음 식과 같이 노치피

로계수에 의해 표시될 수 있다.

$$\sigma_f = K_f \sigma_n \quad (1)$$

여기에서  $\sigma_n$ 은 공칭응력의 진폭이다. 노치피로계수는 피로한도에 대한 유효 응력집중계수로 해석될 수 있는데 이는 이론적인 탄성노치응력과 균열발생과 관련되는 재질 특성에 의해 결정된다. 여기서는 이를 결정하기 위한 임계거리법, 가상노치라운드법과 면적법에 대해 간략히 언급한다.

### 2.1 임계거리법(Critical distance method, CDM)

임계거리법은 응력 집중부 임계영역 안에서의 응력에 기초한 판단기준으로 여기서는 Taylor et al. (2002)이 제안한 임계거리  $L_C$ 의 값을 재료의 균열 발생조건인 응력확대계수의 한계치  $K_{th}$ 와 재료의 피로한도  $\sigma_E$ 로 표시한 다음 식을 사용한다.

$$L_C = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{th}}{\sigma_E} \right)^2 \quad (2)$$

이 식에 의한 임계거리  $L_C$ 은 노치의 형상과는 무관한 재료의 특성치이다.

간단한 형태의 임계거리법 중에 최대응력점으로부터 주응력과 수직 방향으로  $L_C/2$  떨어진 위치의 응력을 사용하는 점응력법(Point method)과 최대응력점과  $2L_C$  거리의 점 사이의 선상에서의 평균응력을 사용하는 선응력법(Line method)이 있다(Taylor et al. 2002).

### 2.2 가상노치라운드법 (Fictitious notch rounding method, FNR)

이 방법은 피로균열 발생 위치의 형상에 가상반경  $\rho_f$ 의 원 또는 원호를 삽입하여 최대응력 보다 작은 크기의 유효노치응력을 구하는 방법에 기초한다. 가상반경  $\rho_f$ 는 원래의 노치반경  $\rho$ 와 재료의 미세조직길이(Microstructural length parameter)  $\rho^*$ 와 응력상태의 다축성 계수(Multi-axiality)  $s$ 의 조합으로 정의된다(Radaj et al. 2006).

$$\rho_f = \rho + s\rho^* \quad (3)$$

이 식에서 다축성계수는 평면변형을 상태의 von Mises 판단 기준의 경우  $s=2.5$ 로 알려져 있다(Radaj et al. 2006). 극단적으로 취약한  $\rho=0$

인 경우 용접 강구조에 대하여  $\rho^*$  와  $\rho_f$  는 각각 0.4와 1.0mm이다.

**2.3 면적법(Area method, AM)**

Bellet et al.(2005)이 제안한 면적법을 수정하여 Yang and Park(2009)은 균열 전단부의 탄성 응력장과 균열 발생조건을 결합하여 균열 전단부 반구 체적내의 평균응력을 노치부의 유효피로응력으로 사용하는 방법을 제안하였다. 이 개념을 2차원 균열에 적용하여 균열 전단부 원의 임계반경을  $r_c$  를 표시하면 다음과 같다(Yang and Park 2009).

$$r_c = 0.337 \left( \frac{K_{Ih}}{\sigma_E} \right)^2 \tag{4}$$

식(2)와 (4)를 비교하면 임계반경  $r_c$  와 임계거리  $L_c$  의 관계, 즉  $r_c = 1.058L_c$  를 얻을 수 있다. 이 방법은 실제 용접 비드의 형상의 불규칙성을 고려할 수 있는 것으로 유효피로응력을 핫 스팟을 중심으로 반경  $r_c$  의 원내의 임계 면적  $A_c$  에 대한 평균 주응력 값으로 나타낸다. 유효피로응력  $\sigma_f$  에 대한 피로균열 발생조건은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\sigma_f = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} \sigma_i dA \geq \sigma_E \tag{5}$$

**3. 십자형 연결부 실험모델**

본 연구에서 고려한 십자형 연결부 실험모델은 Fig. 1에서 보인 것과 같이 횡 보강판이 양면에 부착된 십자형 연결부(Non-load-carrying)이다. 이 모델은 Maddox(1987)과 Gurney(1991)이 발표한 구조용 강 재료의 십자형 용접연결 시편 중에서 Table 1에서 보인 것과 같이 12-series에 대해서 판의 두께는 13~100mm의 다양한 범위를 가지는 것으로 총 67개의 시편에 대한 것을 고려하였다. 이 시편들은 용접 후 가공을 하지 않은 용접 그대로이며 인장하중 만을 작용시킨 것으로 이들의 파단은 모두 용접 토우부에서 시작된 것이

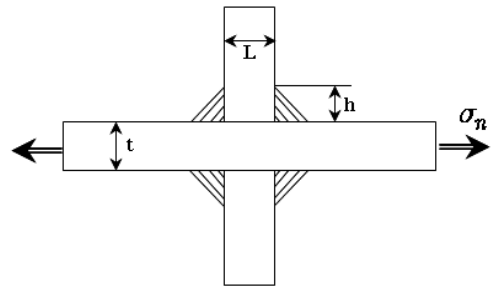


Fig. 1 Geometry of the cruciform specimen

**Table 1** Geometrical parameters of the non-load-carrying cruciforms, fatigue strength  $\Delta\sigma_E$  ranges at  $5 \times 10^6$  cycles, and results of the notch stress analyses [experimental data from Lazzarin et al.(1998)]

Series	Geometrical data and endurance limit				Fatigue notch factor, $K_f$		
	t (mm)	h (mm)	L (mm)	$\Delta\sigma_E$ (MPa)	CDM	AM	FNR
1	13	8	10	79.52	1.888	2.002	2.598
2	50	16	50	59.64	2.867	2.936	3.903
3	100	16	50	55.47	3.014	3.085	3.871
4	13	5	3	91.70	1.601	1.619	2.251
5	13	10	8	76.68	1.937	1.973	2.619
6	25	5	3	93.92	1.684	1.711	2.160
7	25	9	32	66.02	2.365	2.414	3.209
8	25	15	220	59.72	2.494	2.558	3.332
9	38	8	13	68.89	1.955	1.999	2.887
10	38	15	220	45.46	2.867	2.942	3.841
11	100	5	3	95.70	1.590	1.612	2.231
12	100	15	220	40.09	3.780	3.879	3.872

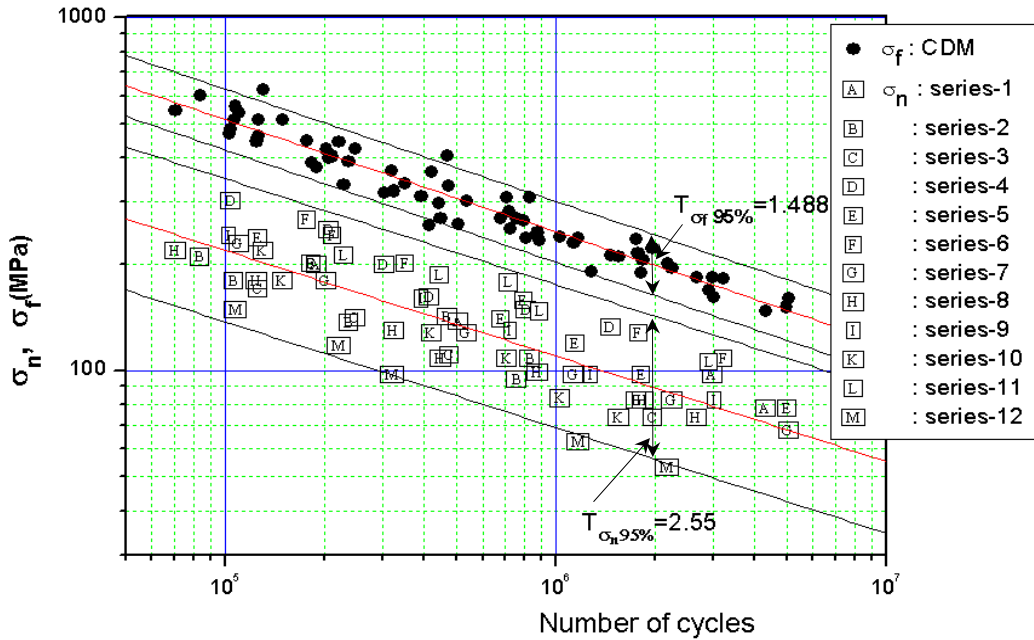


Fig. 2 Fatigue strength of the experimental results in terms of nominal stress( $\sigma_n$ ) and fatigue effective stress by CDM

다. 이 시편의 피로 파단에 대한 사이클 수와 공칭응력의 관계인 S-N곡선을 Fig. 2에 보였다. 12개 시편계열들이 각각 서로 다른 판 두께와 부착판의 크기를 가지고 비드의 형상도 서로 달라 다양한 기하학적 형상으로 인해 실험 결과는 아주 큰 분산을 보이고 있다. Fig. 2의 아래 부분에서 보인 공칭응력( $\sigma_n$ )의 분포는 파괴확률 95%이내에 드는 응력 폭은  $T_{\sigma_n,95\%} = 2.55$ 의 큰 값을 나타내었다.

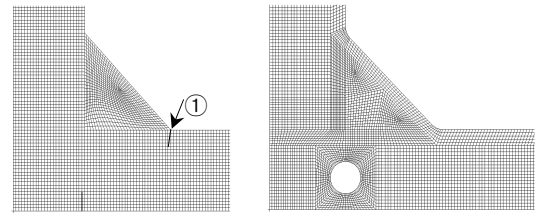


Fig. 3 Finite element meshes used for (left) the critical distance method and (right) the fictitious notch rounding method

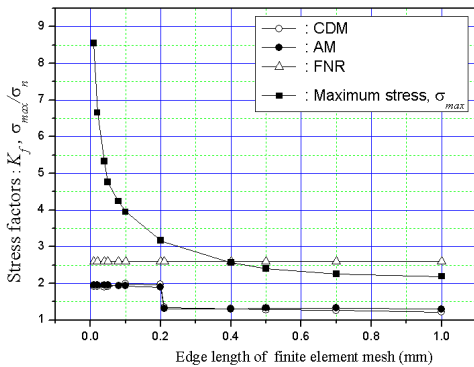
#### 4. 십자형 용접연결부의 피로강도

##### 4.1 노치응력해석(Notch stress analysis)

노치응력법을 적용하여 유한 유효피로응력을 계산하기 위해 Fig. 3에서 보인 것과 같이 십자형 연결부에 대해 용접 토우부와 루트부의 유한요소분할을 사용하였다. Fig. 3의 왼쪽 그림은 임계거리법(CDM)과 면적법(AM)을 적용하기 위한 유한요소해석 모델이고 오른쪽은 가상노치라운드링법(FNR)을 적용하기 위한 모델이다. PM과 AM의 경

우 요소의 분할 정도는 임계반경  $L_C$ 보다 요소의 변의 크기를 작게 해야 한다. 본 연구에서는 구조용 강철의 임계거리에 대한 Bellet et al.(2005), Lazzarin and Tovo(1998)과 Radaj et al.(2006)이 제시한  $L_C = 0.28mm$ 를 사용하였다.

Fig. 3의 예는 4절점 사각형 요소를 사용한 요소변의 최대길이를 0.05mm 기준으로 분할된 결과이다. 이 그림에서 ①로 표시된 선은 피로파손 예상부위인 토우부의 최대응력점으로부터 주응력 방향과 수직인 선을 나타낸 것으로 이 선상의 점



**Fig. 4** Fatigue effective fatigue stresses and the maximum stress for various minimum edge length of the finite element models

들의 응력 값으로부터 유효피로응력을 계산한다. 적절한 요소분할 정도를 구하기 위하여 Series-1에 대하여 수렴성을 검토하였다. 요소의 길이를 0.01~1.0mm 범위에 대해서 노치응력법에 의한 노치피로계수를 계산하였다. Fig. 4에 그 결과를 보였는데, 최대응력은 용접토우부에 근접할수록 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 가상노치라운딩법에 의한 결과는 모든 요소 길이의 변화에 대해 거의 일정한 노치피로계수  $K_f = 2.598$  을 보이는데 이는 특이점을 가지는 노치를 원형화시킨 결과로 볼 수 있다. 이에 대하여 CDM과 AM은 요소 길이가 0.2mm 보다 작은 경우에 일정한 값으로 수렴하는 것을 보였다. 이는 임계 길이  $L_C = 0.28mm$  와 관련되는 것으로 요소 길이가 0.2mm 보다 큰 경우의 값은 의미가 없는 것이다. 본 연구에서는 CDM과 AM에 의한 노치피로계수는 최소 요소 길이 0.1mm 를 사용하여 계산하였다. 이는 FNR이 CDM과 AM에 비해 요소 분할에 있어 유리함을 의미한다. 그러나 임의 형상을 가지는 실제 비드 형상의 모델링과 같은 3차원 형상에 대한 유한요소 모델링에 있어서는 FNR은 가상노치반경을 추가하여야 하는 어려움으로 적용하기 곤란하다 (Yang and Park 2009).

**4.2 유효피로응력 계산 결과**

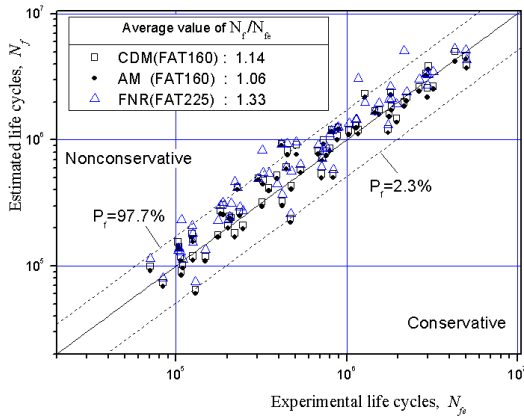
Table 1에 전체 실험 계열에 대하여 CDM, AM 과 FNR를 사용하여 계산된 노치피로계수를 오른

**Table 2** The negative slope of S-N curve and scatterness of the results of the fatigue strength by CDM, AM, and FNR for the experiments(Lazzarin et al. 1998)

	CDM	AM	FNR	$\sigma_n$
k	3.145	3.150	3.143	3.338
$T_{\sigma,95\%}$	1.488	1.489	1.518	2.550

쪽 부분에 나타내었다. 계산된 노치피로계수들은 식 (1)에서 정의한 것과 같이 각 실험 시편에 작용시킨 공칭응력에 곱하여 유효피로응력을 산정할 수 있다. Fig. 2에는 CDM에 의해 계산된 유효피로응력과 그 시편에 대한 실험 수명을 나타내었다. 또한 그들의 평균곡선인 S-N곡선과 분산폭 95%의 상한곡선( $P_f = 97.5\%$ )과 하한곡선( $P_f = 2.5\%$ )을 보였다. 그림에서 나타난 바와 같이 계산 결과들의 피로 강도는 그 분산도가  $T_{\sigma,95\%} = 1.488$ 로 공칭응력의 분산도 2.55에 비해 41.6%가 크게 감소한 것을 보이고 있다. 노치응력법의 다른 방법인 AM과 FNR에 의해 추정된 결과의 S-N곡선을 기울기  $k$  와 곡선 분산 폭  $T_{\sigma,95\%}$ 의 값을 Table 2에 보였다. 이 결과에서 노치응력법에 의해 추정된 S-N곡선의 평균 기울기는 3.14~3.15로 거의 비슷한 값을 보이는 반면에 공칭응력에 대한 기울기는 3.338로 약간 큰 값을 나타내었다.  $T_{\sigma,95\%}$ 의 값은 CDM과 AM이 1.49로 거의 같은 값을 보이고 FNR은 1.518로 약간 큰 값을 보이는데 이는 본 연구에서 고려한 실험 시편 두께가 다양한 것에 대해 FNR이 일률적으로 일정한 가상노치반경  $\rho_f = 1.0mm$  를 고려하여 부재 두께에 따라 정확도가 떨어지는 경향과 일치하는 것이다(Radaj et al. 2006).

각 시편에 대해 계산된 노치피로계수를 이용한 피로수명의 계산은 유효피로응력의 산정방법에 따라 정의되는 피로등급(Fatigue class, FAT)의 S-N 곡선에 의해 이루어진다. IIW에서는 FNR법에 의한 노치응력법을 적용하는 경우 기울기  $k=3$ , 피로한도 FAT225를 사용하도록 제안하였다(Hobbacher 2005). CDM과 AM의 경우는 아직 규정화된 바는 없으나 구조용 강 용접부의 피로한도는 150MPa~



**Fig. 5** Comparisons of the fatigue life estimation by the CDM, AM and FNR for the cruciform specimens

170MPa의 범위의 값으로 발표된 바 있다(Bellet et al. 2005, Yang and Park 2009). 본 연구에서는 FNR에 대해서는 FAT225, CDM과 AM에 대해서는 FAT160을 적용하여 피로수명을 산정하였다. 유효피로응력을 사용하여 추정된 피로수명과 실험에 의한 피로 수명과의 관계를 Fig. 5에 보였다. 그림에 표시한 피로 수명 분산폭은 Table 2에 나타난 각 방법의 유효피로응력의 분산 폭을 참조하여  $T_\sigma = 1.5$ 에 대응하는  $T_{Nf 95\%}$ 에 대응하는 직선이다. 그림에서 나타난 바와 같이 각 방법에 의한 추정 피로수명의 실험결과의 수명에 대한 비의 평균값은 CDM이 1.14, AM이 1.06의 좋은 일치를 보였으나, FNR에 의한 추정 피로수명 비의 평균값은 1.33으로 약간 보수적이지 않은 편으로 오차를 보였다.

**5. 결론**

십자형 연결부의 피로 강도를 추정하기 위하여 노치응력법의 임계거리법, 면적법과 가상노치라운드법을 고찰하였고 기 발표된 구조용 강의 실험결과에 대해 적용하였다. 노치피로계수의 산정을 위하여 세밀한 유한 요소 분할을 하여야 하나, 상대적으로 FNR법이 1mm 정도의 조대 분할이 가능하고, CDM과 AM법은 임계거리보다 작은 요소분

할을 사용해야 한다. 본 연구의 노치응력법에 의한 피로강도 산정 결과는 피로수명 분산폭이 크기가  $T_\sigma = 1.5$ 를 보여 공칭응력에 비해 41% 감소한 것을 보였다. 또한 CDM, AM은 FAT160을 사용하고 FNR은 FAT225에 의한 피로수명 산정은 실험 결과와 비교하여 잘 일치하는 것을 나타내었다. 본 연구에서 고려한 3가지 노치응력법은 모두 이상화된 용접 비드의 형을 고려하여 토우부와 루트부에서 발생하는 피로강도에 적용할 수 있는 방법임을 확인하였다. 응력해석모델링의 수월성에 대해서 2차원 모델의 경우는 FNR이 CDM과 AM에 비해서 노치라운드링의 결과로 수렴성이 좋아 상대적으로 유리한 반면 실제 비드형상을 고려한 3차원 모델의 경우에는 FNR을 적용하기 곤란함을 확인하였다.

**참 고 문 헌**

- Bellet, D., Taylor, D., Marco, S., Mazzeo, E., Guillois, J. and Pircher, T., 2005, "The Fatigue Behaviour of Three-dimensional Stress Concentrations," International Journal of Fatigue, Vol. 27 pp. 207-221.
- Gurney T.R., 1991, "The Fatigue Strength of Transverse Fillet Welded Joints," Abbington Publishing, Abbington, Cambridge.
- Hobbacher A., 1996, "Fatigue Design of Welded Joints and Components," IIW Doc. XIII-1539-97/XV-845-96, Abbington, Cambridge.
- Kang, S.W., Kim, J.H., Klm, K.S., Kang, J.K., Heo, J.H., and Kim, M.H., 2008, "An Experimental Study for the Fatigue Strength Assessment of Longi-web Connections," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 1, pp. 87-92.
- Kim, M.H., Kang, S.W., Kim, J.H., Kim, S.M., Klm, K.S., Kang, J.K. and Heo, J.H., 2008, "The Application of Structural Stress Method for the Fatigue Strength Assessment of Longi-web Connections," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 1, pp. 81-86.

- Lazzarin, P. and Tovo, R., , 1998, "A Notch Intensity Factor Approach to the Stress Analysis of Welds," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 21, pp. 1089–1103.
- Maddox S.J., 1987, "The Effect of Plate Thickness on the Fatigue Strength of Fillet Welded Joints," Abbingdon Publishing, Abbingdon, Cambridge.
- Radaj D., Sonsico, C.M., and Fricke, W., 2006, "Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches," second edition, Woodhead Publ.
- Taylor, D., Barrett, N. and Lucano, G., 2002, "Some New Methods for Predicting Fatigue in Welded Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp. 509–518.
- Yang, P.D.C. and Park, C.M., 2009, "Notch Fatigue Analysis Based on the Actual Bead Shape of Welded Joint," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 46, No. 4, pp. 417–423.



< 양박달치 >



< 안 정 현 >