

< 논문 >

Hot-spot 응력을 이용한 십자형 필렛 용접재의 피로강도 평가

석창성* · 김대진* · 구재민* · 서정원** · 구병춘**
(2005년 4월 25일 접수, 2005년 9월 27일 심사완료)

Fatigue Strength Assessment of the Cruciform Fillet Welded Joints Using Hot-spot Stress Approach

Dae-Jin Kim, Chang-Sung Seok, Jae-Mean Koo, Jung-Won Seo and Byeong-Choon Goo

Key Words: Hot-Spot Stress(구조적 응력), Structural Stress Concentration Factor(구조적 응력집중 계수), Expected Crack Path(예상 균열 진전 경로)

Abstract

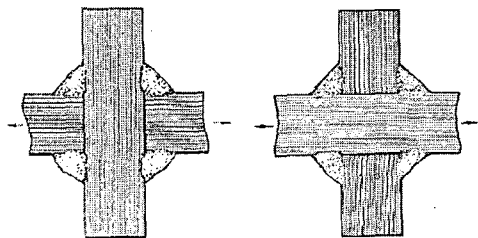
In this study, fatigue tests to obtain S-N curves and FE analyses to obtain structural stress concentration factors were conducted for the two types of cruciform fillet welded joints, that is, load-carrying and non load-carrying types. Then we changed the obtained S-N curve of load-carrying joint to that based on hot-spot stress. As a result, the S-N curve of load-carrying joint based on hot-spot stress was almost exactly coincided with that of non load-carrying joint based on nominal stress. So we have concluded that the fatigue strength of a welded joint with different geometry from the non load-carrying cruciform joint could be estimated by the structural stress concentration factor obtained by considering the stress distributions along the expected crack path.

1. 서론

용접재의 피로설계 기준으로 사용되고 있는 각 코드들^(1,2)은 조인트의 연결 형태와 작용하중의 형태에 따라 비슷한 피로강도를 나타내는 부류를 모아서 등급을 정하고 각각의 등급에 따른 설계 기준 S-N 선도를 제시하고 있다. 그러나 이러한 S-N 선도들은 공칭응력을 기준으로 한 것으로서, 용접부와 구조물의 형상에 따른 응력집중의 영향을 고려할 수 없으므로 복잡한 용접구조물의 설계시에는 적용이 어려운 문제점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하는 방안으로 최대응력 발생지점에 해당하는 용접 지단부에서의 가상응력인 hot-spot 응력을 피로 문제에 적용하고 있으며, hot-spot 응력에 의한 S-N 선도를 복잡한 용접 구

조물에 적용할 경우 보다 효율적인 설계가 가능하게 된다. 이러한 이유로 여러 가지 형태의 용접 연결부에 대하여 용접지단부의 응력집중을 고려한 hot-spot 응력 기준 S-N 선도의 도출이 요구되고 있다.

한편, 십자형 용접재는 여러 가지 용접이음 중에서도 가장 기본적인 이음 형태로서 Fig. 1과 같이 하중 전달형(Load-Carrying; LC)과 하중 비전달형(Non Load-Carrying; NLC)으로 분류될 수 있다. 이중, NLC의 경우는 그동안 여러 연구자들에 의해 피로강도 평가에 관한 다양한 연구가 이루어



(a) Load-carrying (b) Non load-carrying

Fig. 1 Fillet welded cruciform joints⁽³⁾

* 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : seok@skku.edu

TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 회원, 철도기술연구원

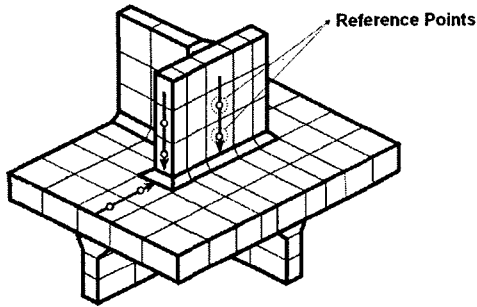


Fig. 2 Schematic example of linear extrapolation paths for hot-spot stress evaluation⁽⁷⁾

저왔고 특히, 구조 형상에 의한 응력집중 효과가 없음을 확인되었으나⁽⁴⁻⁶⁾ LC의 경우 피로강도 평가에 관한 정량적인 연구가 상대적으로 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 하중 전달형(LC)과 하중 비전달형(NLC) 십자형 필렛 용접재를 제작하였고 이에 대한 축방향 피로시험 및 유한요소법을 이용한 응력집중계수 해석을 수행하여 LC와 NLC의 피로강도를 정량적으로 비교·고찰하고자 한다.

2. Hot-spot 응력

응력집중이 발생하는 용접지단부에서의 최대응력 σ_{peak} 는 다음과 같이 응력집중계수 K_t 와 공칭응력 σ_n 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{peak} = K_t \times \sigma_n = (K_w \times K_s) \times \sigma_n \quad (1)$$

여기서, 용접지단부에서의 응력집중계수 K_t 는 다시 비드형상 자체에 의한 응력집중계수 K_w 와 구조형상 변화에 따른 구조적 응력집중계수 K_s 로 구분될 수 있다. 이때 hot-spot 응력은 K_w 의 영향은 배제하고 K_s 만 고려하는 것으로서 다음식과 같이 정의된다.

$$\sigma_{hot} = K_s \times \sigma_n \quad (2)$$

Hot-spot 응력을 구하는 방법은 여러 가지로 정의되어 있으나, 판형 용접재의 경우 일반적으로 용접지단부로부터 어느 정도 떨어진 지점(reference points)에서의 응력값을 용접지단부까지 선형적으로 외삽(linear extrapolation)하여 hot-spot 응력을 구하고 있다.

Table 1 Chemical composition of SM490A (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
~0.20	~0.55	~1.60	~0.035	~0.035	Bal.

Table 2 Mechanical properties of SM490A

Material	σ_{ys}	σ_u	Elongation
SM490A	331 MPa	514 MPa	17 %

Table 3 Welding condition

Welding Method	GMAW Semi-auto Robot	
Welding Condition	Pass	1
	Current (A)	270
	Voltage (V)	28
	Travel Speed (cm/min)	30
Wire Size	Φ 1.2	
Welded Material	Filler Metal Spec : KC-28, Classification : AWS ER 70S-6 Yield Strength : 480 MPa Ultimate Strength : 580 MPa	
Shield Gas	Ar + 20% CO ₂	

Fig. 2는 두 기준점으로부터 외삽에 의해 hot-spot 응력을 결정하는 방법을 개략적으로 나타내고 있다.

3. 공칭응력 기준 S-N 선도의 도출

3.1 시험재료 및 시험편

SM490A를 시험재료로 사용하였으며, 화학적 조성 및 기계적 물성치를 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 300mm×300mm의 평판위에 Side Attachment를 GMAW 반자동 로봇용접으로 우선 용접한 후, 25mm 폭만큼 절단하여 십자형 시험편을 제작하였다. Table 3은 구체적인 용접 조건을 나타낸 것이다. 하중 전달형, 하중 비전달형 십자형 용접재 및 맞대기 용접 후 그라인딩을 통해 비드를 제거한 시험편⁽⁸⁾의 형상과 치수를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 시험 장치 및 방법

시험장비로는 25ton 용량의 유압식 만능시험기(Instron 8802)를 사용하였다. 하중제어 방식으로 20Hz, R=0.1인 일정진폭 하중을 가하여 시험이 양단 분리되는 순간을 파단 시점으로 정의하였으

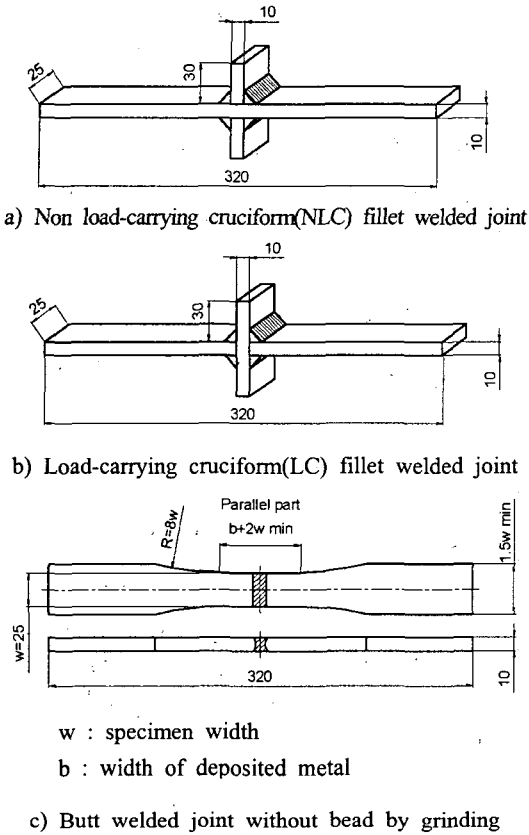


Fig. 3 Specimens for fatigue test

며, 최대 2×10^6 cycle 에서 미파단 시편이 발생할 때까지 실험을 진행하였다.

3.3 축방향 피로시험 결과

Fig. 4에 피로시험 결과인 S-N 선도를 나타내었다. 무한수명을 일관적인 강도의 경우에서와 같이 2×10^6 cycle로 가정했을 때, 모재의 피로한도는 270MPa로 나타났다. 십자형 용접재의 경우 피로한도는 LC가 83MPa, NLC는 102MPa로 모재보다 각각 69%와 62% 낮게 나타났다. 하중 비전달형 십자형 용접재와 비드를 제거한 맞대기 용접재는 피로강도와 S-N 선도의 기울기에 있어서 큰 차이를 보였다. 이는 비드를 제거하여 모재의 성향과 가까워진 맞대기 용접재는 균열 발생까지의 수명이 전체 피로수명의 대부분을 차지하는 반면, 십자형 용접재의 경우 피로수명이 아크 용접 과정에서 발생하는 용접 결함인 intrusion⁹⁾의 균열 진전에 의해 지배되므로 전체수명의 대부분을 균열진전수명이 차지함으로 인해 나타나는 현상이라고 할 수 있다.

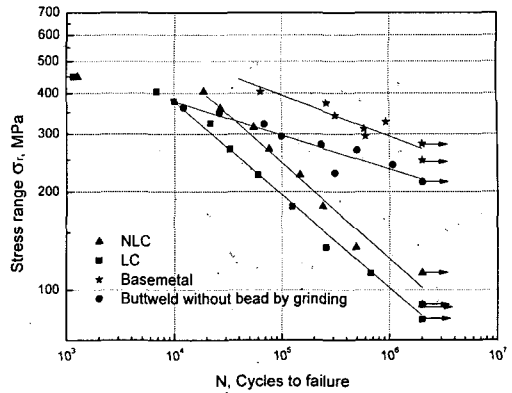


Fig. 4 S-N curves for axial fatigue tests

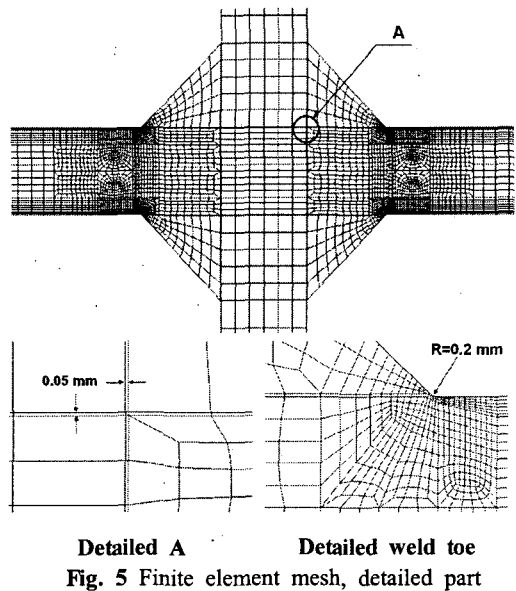


Fig. 5 Finite element mesh, detailed part

NLC와 LC의 S-N 선도의 기울기는 서로 유사한 경향을 나타내었고, 피로시험을 통해 얻은 NLC와 LC에 대한 공칭 응력 기준 S-N 선도는 각각 $N=1.33 \times 10^{13} \cdot \sigma_r^{-3.40}$ 과 $N=1.1 \times 10^{13} \cdot \sigma_r^{-3.51}$ 로 얻어졌다.

4. 유한요소법을 이용한 응력집중계수 해석

4.1 해석 모델 및 방법

디지털 형상측정기(CV-4000 S4, Mitutoyo)를 이용한 비드형상 측정결과 피로시험에 사용된 모든 시험편에 대한 평균 비드 형상치수는 다리길이 9.1mm, 비드높이 9.6mm, 지단부의 반경 $r=0.2$ mm 였고 이러한 치수들을 유한요소 모델링에 적용하

였다. Fig. 5에 유한요소망의 일부를 나타내었다. LC와 NLC의 경우를 하나의 모델로 구성하였고, LC인 경우 좌·우측, NLC인 경우 상·하 부분에 모재 사이가 0.05mm만큼 떨어져 있다고 가정하였다. 8절점 솔리드 요소(C3D8 Element)를 33,984개 적용하였고 절점 수는 41,069개이다. 탄성계수 $E=200\text{GPa}$, 프와송 비 $\nu=0.3$ 을 적용하였고, 모델링과 유한요소해석에 각각 PATRAN Ver. 7.0과 ABAQUS Ver. 6.4를 사용하였다.

4.2 해석 모델의 검증

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 양끝단에 1ton의 인장하중을 작용시켰을 때, NLC와 LC에 대한 길이방향 응력분포를 해석에 의해 구한 결과이다. NLC의 경우 최대응력이 용접지단부에서 발생하지만 LC의 경우는, 떨어진 모재 사이에서 최대응력이 발생하며 하중이 비드를 통해서 전달되고 있음을 알 수 있다. 한편, 피로시험 결과 LC의 피로파괴는 최대응력 지점과는 다른 용접지단부에서 발생하였는데, 이는 실제 용접지단부에는 intrusion⁹⁾이나 undercut과 같은 용접결함이 존재하기 때문에 응력해석으로부터의 최대응력 발생지점이 아닌 용접지단부에서 파괴가 일어난 것으로 판단된다. Fig. 8은 유한요소해석 및 스트레인 게이지(FXV-1-11-002LE, TML)를 이용한 변형률 측정 실험을 통해 구한 응력집중계수 결과를 함께 나타낸 것으로서, 실험과 해석이 거의 일치하여 유한요소망의 유효성을 확인하였다.

4.3 구조적 응력집중계수 K_s 의 도출

4.3.1 표면에서의 응력집중계수

Fig. 9는 유한요소망 중에서 표면에서의 응력분포를 구하기 위해 응력값을 취한 절점들을 나타낸다. Fig. 10에 표면에서 용접지단부로부터 떨어진 거리에 따른 응력집중계수의 변화를 나타내었다. 용접지단부에서의 최대응력집중계수 (K_s)_{peak}는 LC가 4.45로 NLC의 3.58보다 24.3% 높게 나타났다. 국제용접학회(International Institute of Welding; IIW)에서 제시하고 있는 외삽 기준점(0.5t, 1.5t)을 적용하여 구한 NLC의 K_s 는 1.01로서 이러한 결과는, NLC의 경우 용접지단부에 작용하는 응력 중 구조적인 형상변화에 의한 항은 존재하지 않고 단지 공칭응력 성분과 용접비드의 형상에 따른 응력의 비선형 성분만이 작용하므로 NLC의 K_s 가 1

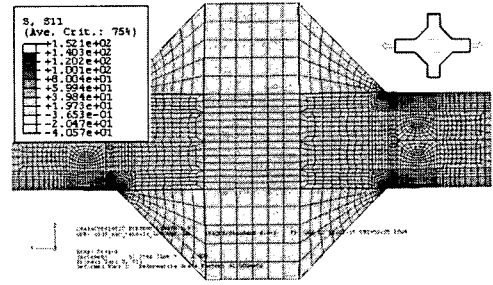


Fig. 6 Stress contour plot, σ_{11} , NLC

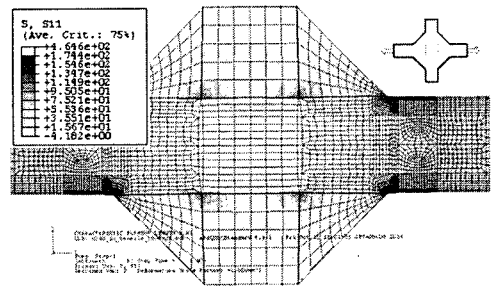


Fig. 7 Stress contour plot, σ_{11} , LC

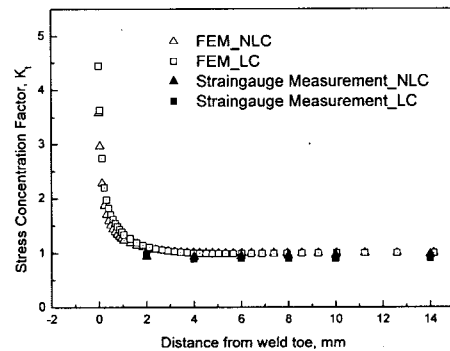


Fig. 8 K_s obtained by experiment and FEM

에 가까운 값이라고 보고한 한승호⁴⁾의 연구결과와 일치하였다. 한편, LC의 경우 K_w 는 비드형상이 동일하므로 NLC의 K_w 와 같으나 피로시험 결과 피로강도는 NLC 보다 낮게 평가되었다. 그러나 표면에서의 응력집중계수 해석결과를 통한 LC의 K_s 는 NLC와 같은 1.01로 얻어졌다. 따라서 표면응력 외삽법은 LC의 K_s 를 구하는 방법으로 적절하지 못함을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 두께방향에 따른 응력분포를 고려하는 방법을 적용하여 LC의 K_s 를 도출하였다.

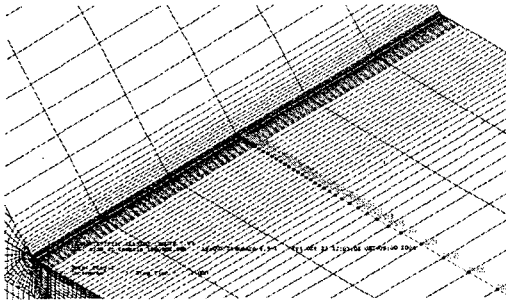


Fig. 9 Path along surface where stress values are picked as analysis results

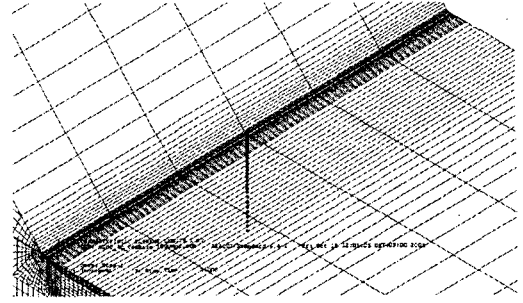


Fig. 11 Path through thickness where stress values are picked as analysis results

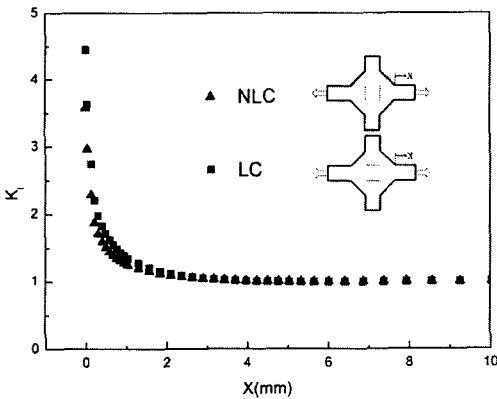


Fig. 10 K_t obtained by FEM, along surface

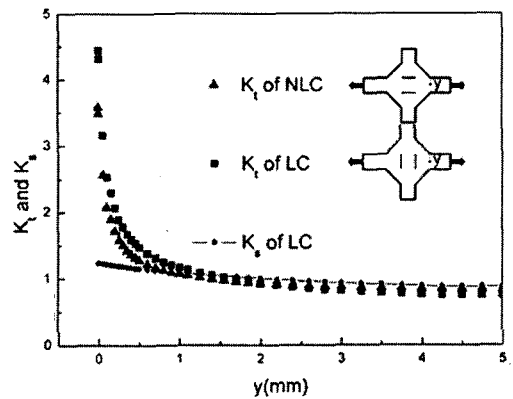


Fig. 12 K_t obtained by FEM, through thickness

4.3.2 두께방향에 따른 응력집중계수

Fig. 11에 두께방향에 따른 응력분포를 구하기 위해 응력값을 취한 좌표점들을 나타내었다. Fig. 12는 용접지단부로부터 수직방향으로 시편두께의 중앙부 위치까지 이르는 동안 깊이 에 따른 응력 집중계수의 변화를 나타낸다. 용접지단부로부터 깊이 y 인 지점에서 LC와 NLC의 응력집중계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽⁶⁾

$$[K_t]_{LC}(y) = [K_w]_{LC}(y) \times [K_s]_{LC}(y) \quad (3)$$

$$[K_t]_{NLC}(y) = [K_w]_{NLC}(y) \quad (4)$$

이때, LC의 K_w 는 NLC와 동일하므로 식 (3)을 식 (4)로 나누어 용접지단부로부터의 깊이 y 에 따른 LC의 K_s 분포를 구하였고 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. LC의 K_s 는 응력구배가 작으며 거의 선형적인 분포를 나타내었고 용접지단부에서의 최대 값은 1.24로 얻어졌다.

4.4 LC의 hot-spot 응력 기준 S-N 선도

4.3.2에서 도출한 LC의 K_s 를 다음 식에 적용하여 hot-spot 응력 기준 S-N 선도를 도출하였다.

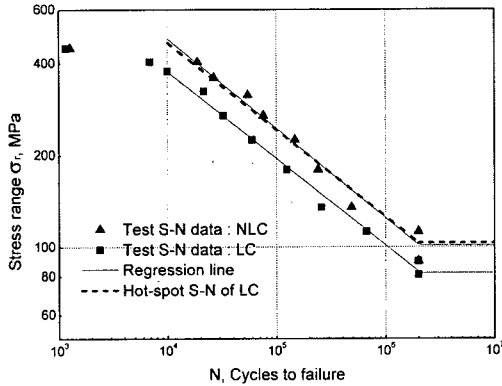
$$N = A \times (1/K_s)^{-m} \cdot (\sigma_{hot})^{-m} \quad (5)$$

$$= A^* \times (\sigma_{hot})^{-m}$$

Table 4에 실험상수 A , m 과 K_s 및 식 (5)의 관계로부터 구해지는 hot-spot 응력 기준 S-N 선도의 상수 A^* 를 정리하였다. Fig. 13은 NLC와 LC의 피로 시험 결과와 LC의 hot-spot 응력 기준 S-N 선도를 함께 나타낸 것으로서 LC의 hot-spot 응력 기준 S-N 선도가 피로시험을 통해 구한 NLC의 S-N 선도와 거의 정확히 일치하고 있음을 알 수 있다. LC와 NLC의 피로강도 차이는 하중 전달형인가, 비전달형인가의 구조적인 차이에만 기인하는 것인데, 해석적으로 구한 K_s 를 적용한 hot-spot 응력기준 S-N 선도가 실험적으로 구한 NLC의 공칭응력 기준 S-N 선도와 일치하였으므로 LC의 K_s 를 구하는

Table 4 Coefficients for hot-spot S-N curve of LC

K_s	A	m	A'
1.24	1.100×10^{13}	3.51	2.349×10^{13}

**Fig. 13** Hot-spot S-N curve of LC

방법으로서, 두께방향에 따른 응력을 고려한 본 논문의 방법이 타당함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 또한, 용접방식이 NLC와 동일하며 피로강도의 준위는 NLC보다 낮은, 구조형상이 다른 용접재의 경우, 해석적으로 K_s 를 구함으로써 별도의 피로시험을 수행하지 않고서도 NLC의 공칭응력 기준 S-N 선도를 이용하여 피로수명의 예측이 가능함을 암시한다.

5. 결론

본 논문에서는 두께 10mm의 하중 전달형 십자형 필렛 용접재(LC)에 대한 hot-spot 응력 기준 S-N 선도를 도출하였고, 이를 하중 비전달형 십자형 용접재(NLC)의 피로시험 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로시험 결과 LC의 피로강도는 NLC보다 낮게 평가되었으나, 국제 용접 학회가 제시하고 있는 외삽 기준점(0.5t, 1.5t)에서 표면응력 외삽법을 통하여 구한 구조적 응력집중계수는 NLC와 LC 모두 1에 가까운 값으로 나타나, 이 방법으로는 LC의 적절한 피로 수명 평가를 할 수 없음을 확인하였다.

(2) 용접방식이 NLC와 동일하고 피로강도의 준위는 NLC보다 낮은 용접재의 경우, 두께방향에 따른 응력분포를 고려하여 해석적으로 구조적 응력집

중계수를 구함으로써, 별도의 피로시험을 수행하지 않고서도 NLC의 공칭응력 기준 S-N 선도를 이용하여 피로수명의 예측이 가능하리라 예상된다.

후 기

본 논문은 BK21 사업과 과학기술부의 국가지정 연구실(NRL) 사업(철도기술연구원)에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) 1993, Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures, BS 7608.
- (2) 1992, European Committee for Standardization, Eurocode 3, Design of Steel Structures, Part 1-1.
- (3) Stephen John Maddox, 1991, Fatigue Strength of Welded Structures, Abington Publishing, p. 49.
- (4) Seung-Ho Han, Jeong-Woo Han and Byung-Chun Shin, 1998, "Fatigue Strength Estimation and Fatigue Design of Welded Members under Hot-Spot Stress Concept," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 22, No. 11, pp. 2072~2083.
- (5) Macdonald, K. A. and Haagenen, P. J., 1999, "Fatigue Design of Welded Aluminum Rectangular Hollow Section Joints," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 6, pp. 113~130.
- (6) Zhi-Gang Xiao and Kentaro Yamada, 2004, "A Method of Determining Geometric Stress for Fatigue Strength Evaluation of Steel Welded Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, pp. 1277~1293.
- (7) Doerk, O., Fricke, W. and Weissenborn, C., 2003, "Comparison of Different Calculation Methods for Structural Stresses at Welded Joints," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 359~369.
- (8) Jae Sil Park, Chang Sung Seok, Jae Mean Koo, Jae Ho Shin and Byeong Choon Goo, 2004, "Fatigue Characteristics of SM490A Welded Joints for Bogie Frame," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 12, pp. 146~154.
- (9) John Hicks, 1999, Welded Joint Design, third edition, Abington Publishing, p. 92.