

용접부의 피로강도 시험평가 및 해외규격과의 비교연구

구 병 춘* · 김 재 훈*

*한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부

Fatigue Tests of Welded Joints and Comparison Study of Foreign Codes

Byeong-Choon Goo* and Jai-Hoon Kim*

*Rail System Safety Department, Korea Railroad Research Institute, Uiwangsi 437-050, Korea

Abstract

A lot of fatigue tests on a material, JIS SM490A, with yielding strength of about 350 MPa and tensile strength of about 520 MPa were carried out. Various butt-welded specimens such as reinforcement removed, as-welded and weld toe ground, several types of fillet-welded specimens and full-size box type components were used. After having obtained S-N curves for the above-mentioned specimens, fatigue strengths were compared to those of foreign design codes, AWS, BS 7608 and ENV. It was found the fatigue strengths at low cycles are not in a good agreement with the foreign codes, but the fatigue limits are in a good agreement.

* Coresspond Author : bcgoo@krri.re.kr

(Received July 26, 2006)

Key Words: AWS, BS 7608, Butt weld, Cruciform fillet weld, ENV-1993, Fillet weld

2. 시험편 형상 및 용접조건

1. 서 론

용접은 금속을 접합하는데 있어 매우 유용한 수단이지만 강도평가 측면에서는 용접부의 결함이나 비드의 복잡한 형상으로 인하여 어려움이 많다. 미국, 영국, 일본 등 선진 외국에서는 용접부의 피로설계기준 제정을 위해 많은 비용과 시간을 투자하여 자체 기준을 확보하고 있다. 이러한 규정의 제정에는 20-30여년의 오랜 시간이 소요되고, 많은 비용이 투입되어야 한다. 본 연구에서는 다양한 종류의 맞대기 용접, 필렛 용접 시험편에 대해 많은 피로시험을 수행하였다. 그러나 다양한 하중조건과 용접 유형을 모두 고려하여 독자적인 설계 기준을 정하는 것은 시간적, 경제적으로 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 본 실험에서 구한 데이터와 외국의 기준을 비교 분석하여 향후 용접구조물 설계나 피로수명평가에 활용할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 비교한 해외 규격은 BS 7608^{1,2)}, ENV-1993³⁾, AWS⁴⁾이다.

앞에서 언급한 BS 7608, ENV-1993 및 AWS 규격은 실제 현장에서 사용되는 용접 구조물의 형상을 대표적인 용접 형상으로 구분하여 각 용접 유형에 대해 기준 피로선도를 제시하고 있다. 이들 규격과 비교를 위해 이들 규격에서 제시하는 대표적 용접 유형과 실제 산업 현장에서 사용되고 있는 용접 유형을 고려하여 Fig. 1과 같이 여러 종류의 용접 유형을 시험대상으로 선정하였다. 모든 시험편은 두께 10 mm인 SM490A⁵⁾ 판재로 만들어졌다. Fig. 1(a)-(f)는 인장피로 시험용 시험편이며, Fig. 1(g)-(i)는 실물 크기의 3점 굽힘피로 시험용이다. Fig. 1(a)는 모재 시험편, (b)는 맞대기 용접 시험편으로 후열처리를 하지 않은 시험편 (AAN), 후열처리를 한 시험편 (AAY), 용접 지단부를 그라인딩 한 시험편 (GAY) 그리고 후열처리와 용접 지단부 그라인딩을 한 시험편 (GAY)으로 잔류응력의 영향과 용접 지단부의 곡률반경의 영향을 알아보기 위한 것이다. (c)는 한쪽 면에 웨브가 필렛 용접된 시험편, (d)는 십자형 필렛 용

접 시편으로 필렛 용접부가 하중을 지탱하는 구조이고, (e)는 십자형 필렛 용접이나 필렛 용접부가 하중을 지탱하지 않는 구조, (f)는 하중 작용방향으로 맞대기 용접을 한 시편이다. Fig. 1(g)-(i)는 판재를 이용하여 사각형 모양의 보를 만든 경우로 (g)는 웨브가 없고, (h)는 중심부에 수직으로 웨브가 용접된 경우, (i)는 바닥면에 편편하게 작은 판이 용접된 경우이다. 이들 부재는 실제 철도차량의 대차 프레임에 사용되는 보와 유사한 크기와 형상을 가지며 용접도 유사한 방법을 적용하였다.

용접 후 잔류응력을 제거하기 위해 후열처리를 하는

경우 가열 및 냉각 속도는 120°C/h 하였고, 590±20°C에서 3시간 동안 유지하였다. 꺼낼 때 노의 최고 온도는 200°C로 하였다.

용접은 가능한 현장에서 사용되는 방식과 유사하게 하였다. AAN, AAY, GAN, GAY 시편의 경우 GMAW 반자동 로봇용접으로 전류 300 A, 전압 30 V에서 1 패스 용접하였다. TN, CN 및 NCN 시편의 경우는 전류 270 A, 전압 28 V에서 작업하였다. LN 시편의 경우는 3 패스 용접하였고, 전류와 전압은 첫 번째 패스는 150 A, 22 V, 두 번째 및 세 번째 패스는 270 A, 28 V를 적용하였다. 박스형 빔의 경우는 첫 번째 패스

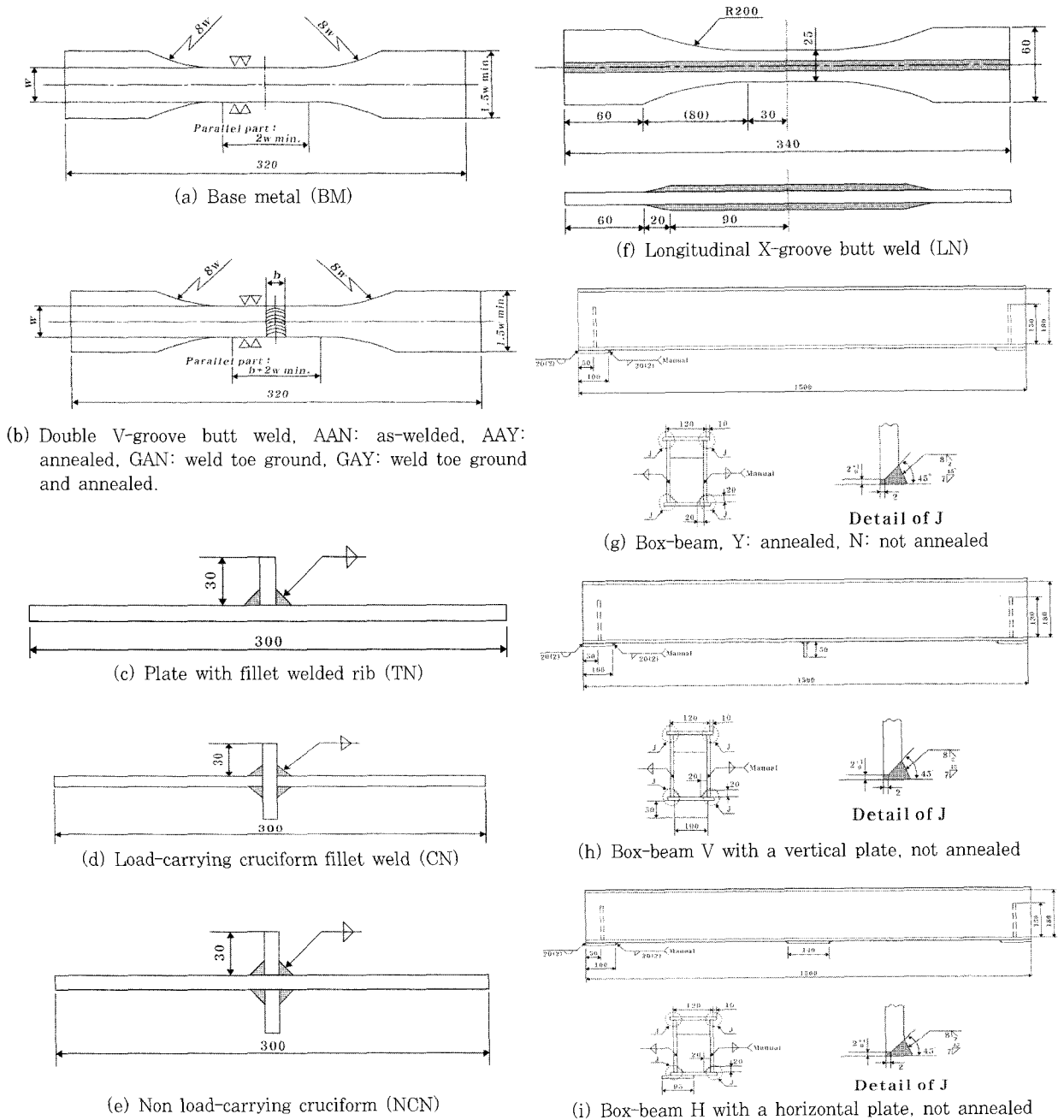


Fig. 1 Shapes of the specimens

는 280 A, 29 V, 두 번째 패스는 280 A, 29 V를 적용하여 2 패스 용접으로 제작하였다. 모든 시편에 대해 용접봉은 $\phi 1.2$ 인 AWS ER 70S-6을 사용하였고 보호 가스는 (Ar 80 % + CO₂ 20%)를 적용하였으며 용접봉의 이동속도는 30 cm/min로 하였다.

3. 피로강도 비교 연구

외국의 규격과 비교 검토를 위해 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 ASTM E466⁶⁾에 따라 하였고 특별히 언급한 경우를 제외하고는 응력비는 R=0.1, 작용 응력의 주파수는 10~20 Hz 범위에서 수행하였다. 시편의 경우는 완전한 파단이 일어나는 수명을 기준으로 하였고, 부재의 경우는 균열이 20 mm 진전하였을 때를 수명으로 하였다. 상세한 내용은 참고문헌 7-9에서 자세히 기술하였다.

3.1 BS 7608

3.1.1 규격 특성

BS 7608 규격에서는 피로설계에 대한 일반적인 지침과 피로특성에 따라 연결부위에 대한 세부분류를 하였으며, 그 특징은 다음과 같다.

㉠ 피로균열을 유발하는 응력의 반복적인 회수는 응력진폭에 영향을 받으며, 최대응력과는 무관하다.

㉡ 연결부위 분류에 따라 S-N 선도를 구분하여 규정하였다. (이때 각각의 S-N 선도의 기울기 $m \geq 3$)

피로설계의 기본적인 사항으로서 연결부위에 대한 세부분류는 피로강도별로 10개의 등급으로 분류하고 있으며, 이때 용접세부에서의 잔류응력, 용접세부 자체 및 볼트, 리벳, 작은 드릴구멍 등에 의한 응력집중 효과는 응력계산에 무시하였다. 모재의 피로설계 응력은 잠재 균열에 인접한 모재의 주응력으로 하며, 단면은 진단면을 사용하였다. 피로수명의 예측은 Palmgren-Miner 법칙을 기초로 하였다. 이밖에도 관심이 되는 저응력에 대한 사이클의 처리는 다음과 같다.

① 일정진폭하중의 경우 비 진전 응력범위(non-propagation stress range)는 외부환경과 초기결함의 크기에 영향을 받지만, 일반적으로 $N=10^7$ cycle 에 준하는 σ_0 로 정의한다.

② 응력범위 σ_r 이 σ_0 를 기준으로 크거나 작은 값을 갖는 변동하중 하에서는 σ_0 보다 큰 σ_r 은 초기결함을 성장시키며, 이는 σ_0 수준을 낮추는 효과를 갖는다.

③ 일반적으로 σ_0 이하의 σ_r 을 무시하고 계산된 파손 수명은 실제 수명보다 큰 값을 갖는다.

④ 응력범위 σ_r 이 σ_0 보다 작은 경우, σ_r 에 의한 반복회수를 그대로 적용하지 않고, 일정비율로 감소시켜 가며, Palmgren-Miner 법칙을 적용한다. BS 7608 에서 규정한 S-N 선도와 세부분류 및 계수는 다음 Table 1, Fig. 2와 같다. Table 1에서 σ 는 LogN의 표준편차이며 d 는 상수이다²⁾.

3.1.2 시험결과와 비교

BS 7608 규격의 피로설계에 대한 일반적인 지침과 피로특성에 따른 연결부위의 세부분류에 따라 본 연구에서 수행한 맞대기, 필렛 용접 등의 시편에 대한 피로 시험 결과를 분류하고 BS 7608의 각 세부분류 S-N 선도와 비교하였다. 이때 BS 7608 규격과 비교를 위해 실제 시험을 통해 얻은 각 용접시편의 S-N 선도를 50% 파손확률일 때의 S-N 선도를 적용하였다. Figs. 3-11은 비교결과를 보여준다. 맞대기 용접시편 AAN, AAY, GAN과 GAY의 경우 이들과 유사한 구조인 BS 7608의 C class와 비교할 때 10^5 사이클 이하에서 본 연구의 피로강도가 BS 7608의 피로강도보다 약간 낮

Table 1 Parameters of BS 7608

Class	C ₀		m	standard deviation, σ	
	Log10	Loge		Log10	Loge
B	15.3697	35.3900	4.0	0.1821	0.4194
C	14.0342	32.3153	3.5	0.2041	0.4700
D	12.6007	29.0144	3.0	0.2095	0.4824
E	12.5169	28.8216	3.0	0.2509	0.5777
F	12.2370	28.1770	3.0	0.2183	0.5027
F2	12.0900	27.8387	3.0	0.2279	0.5248
G	11.7525	27.0614	3.0	0.1793	0.4129
W	11.5662	26.6324	3.0	0.1846	0.4251
S	23.3284	53.7156	8.0	0.5045	1.1617
T	12.6606	29.1520	3.0	0.2484	0.5720

S-N curve : $\log N = \log C_0 - d\sigma - m \log \sigma_r$

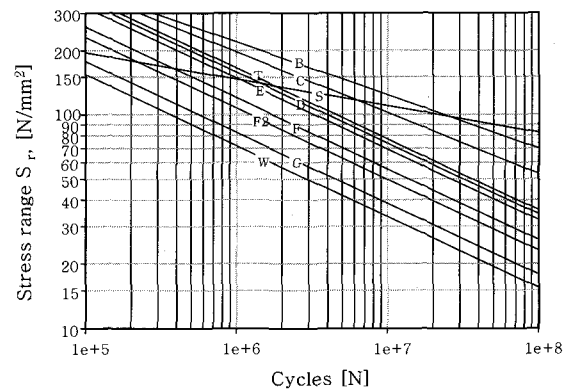


Fig. 2 BS 7608 basic S-N curves

으나 피로한도는 매우 유사함을 알 수 있다. 맞대기 시편 LN의 경우 대응하는 유사한 구조가 없어 BS 7608의 D class와 비교하였는데 실험값이 훨씬 크다. 노형 필렛용접의 경우 F_2 class와 비교할 때 실험에서 얻은 피로강도가 더 높다. 십자형 필렛용접의 경우는 F_2 class와 비교할 때 거의 유사한 피로한도를 갖는다. 박스형 부재의 경우 웨브가 용접된 Box beam-H가 피로강도가 제일 작고 BS 7608의 G class와 거의 일치하는 피로강도를 갖는다는 것을 알 수 있다.

1) 맞대기 용접 시편(AAN, AAY, GAN, GAY: C class/ LN: D class)

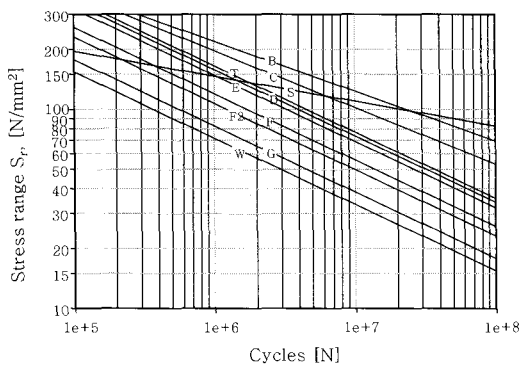


Fig. 3 C class vs. AAN

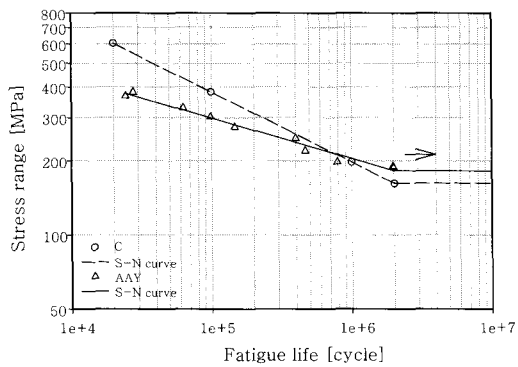


Fig. 4 C class vs. AAY

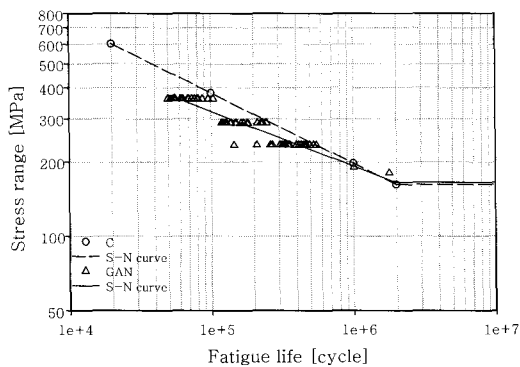


Fig. 5 C class vs. GAN

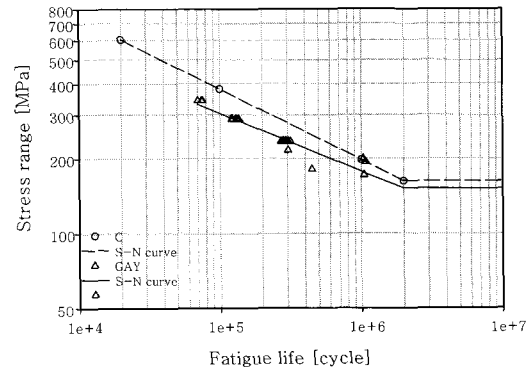


Fig. 6 C class vs. GAY

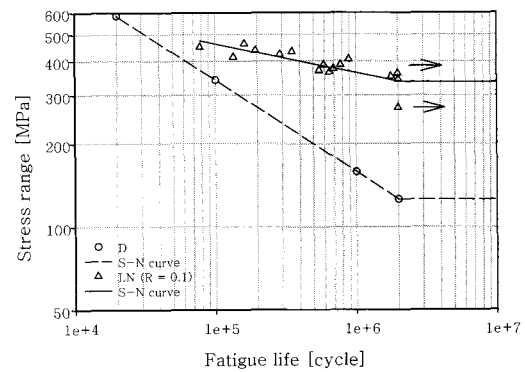


Fig. 7 D class vs. LN

2) 필렛용접 시편(TN, CN, NCN: F_2 class)

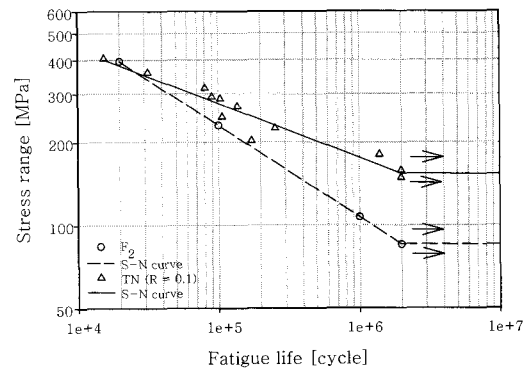


Fig. 8 F_2 class vs. TN type

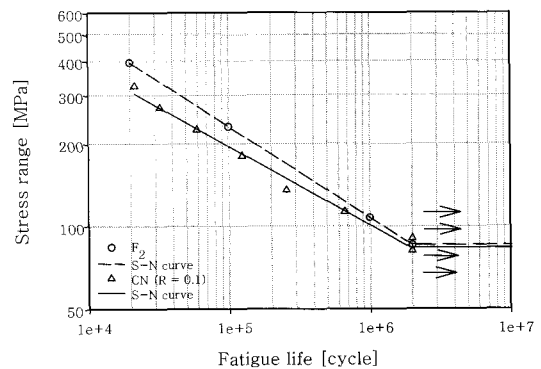


Fig. 9 F_2 class vs. CN type

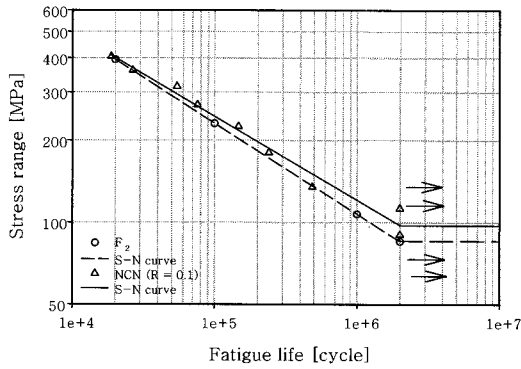


Fig. 10 F₂ class vs. NCN

3) 부재 (Box beam Y, N, V, H: G class)

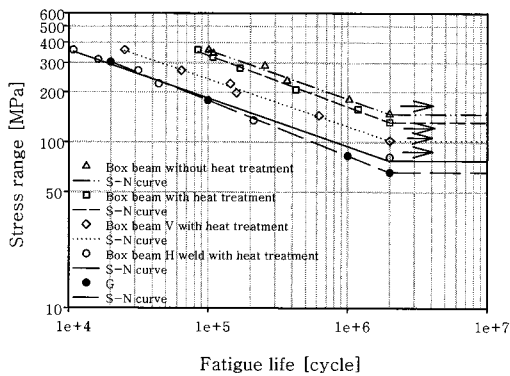


Fig. 11 G class vs. Box beam

3.2 ENV-1993 규격

3.2.1 규격 특성

ENV 규격은 모재와 용접재에 대한 피로응력을 제시하고 있다. 모재의 경우에 피로 해석시 공칭 또는 hot-spot 응력을 사용하고 있으며, 연결부위의 경우에는 좌굴 등에 의한 응력 재분포를 포함하여 1, 2차 응력을 고려하고 있다. 또한 용접재의 경우에는 피로응력으로서 수직응력과 전단응력을 고려하고 있다. 그리고 피로평가의 절차는 다음과 같이 규정되어 있다. 일반적으로 누적손상 또는 등가응력범위 중에 하나를 적용하여 안전성 여부를 검증해야 하며, 세부 등급이 정의된 경우에는 공칭응력범위를 적용하며, 세부 등급이 정의되지 않는 경우에는 hot-spot 응력 범위를 적용하도록 규정되어 있다. 이밖에도 공칭응력 범위에 기초한 피로평가에서는 일정진폭하중과 변동진폭하중을 구분하여 기술하고 있다. 일정진폭하중이 작용하는 경우 피로평가는 $Y_R \cdot \Delta\sigma \leq \Delta\sigma_R / Y_{Mf}$ 식을 따른다. 여기서 $\Delta\sigma$ 은 수직응력범위(normal stress range), $\Delta\sigma_R$ 은 세부 등급에 따른 피로강도를 나타내고, Y_R , Y_{Mf} 는 안전계수이다. 변동진폭하중의 경우에는 피로평가를 위하여 Palmgren-Miner 법칙을 이용하여, 변동하중의 최대응

력범위가 일정진폭피로한도 (Constant Amplitude Fatigue Limit, CAFL)를 초과하는 경우, 누적손상과 등가의 일정진폭을 이용하여 피로평가를 실시하도록 되어 있다. 하지만 누적손상을 계산할 때에는 구체적으로 다음의 3가지 방법을 선택하도록 규정하고 있다. ① 기울기 $m=3$ 인 S-N 선도를 이용하는 방법, ② CAFL을 기준으로 기울기 $m=3$ 과 5로 변환되는 S-N 선도를 이용하는 방법, ③ CAFL을 기준으로 기울기 $m=3$ 과 5로 변환되는 S-N 선도에서 $N=10^8$ cycle 을 기준으로 cut-off limit를 적용하여, cut-off limit 이하의 응력범위는 무시하는 방법이다. 그리고 등가의 일정진폭 계산에 있어서는 기울기 $m=3$ 과 5인 S-N 선도에서 cut-off limit를 고려하여 등가 일정진폭 응력범위를 계산하도록 규정하고 있다.

그리고 BS 7608과 마찬가지로 ENV-1993은 용접형상 및 크기, 응력방향, 잔류응력 등 연결부위에 대한 세부분류를 나누어 S-N 선도를 규정하고 있다. 이때, 세부분류에 따른 피로강도($N=2 \times 10^6$ cycle)는 5% 파손확률 (95% probability of survival for logN)의 75% 신뢰구간 범위에서 얻어야하며, 데이터 수는 최소 10개 이상이어야 한다. ENV-1993에서 규정한 S-N 선도와 세부분류 및 계수는 Table 2, Fig. 12 와 같다.

Table 2 Parameters of ENV S-N curves

Detail category ($N=2 \times 10^6$) $\Delta\sigma_C$ (N/mm^2)	log a for $N < 10^8$		Stress range at constant amplitude fatigue limit ($N=5 \times 10^6$) $\Delta\sigma_D$ (N/mm^2)	Stress range at cut-off limit ($N=10^8$) $\Delta\sigma_L$ (N/mm^2)
	$N \leq 5 \times 10^6$ ($m=3$)	$N \geq 5 \times 10^6$ ($m=5$)		
160	12.901	17.036	117	64
140	12.751	16.786	104	57
125	12.601	16.536	93	51
112	12.451	16.286	83	45
100	12.301	16.036	74	40
90	12.151	15.786	66	36
80	12.001	15.536	59	32
71	11.851	15.286	52	29
63	11.701	15.036	46	26
56	11.551	14.786	41	23
50	11.401	14.536	37	20
45	11.251	14.286	33	18
40	11.101	14.036	29	16
36	10.951	13.786	26	14
S-N curve : $\log N = \log a - m \log \Delta\sigma_R$				
Detail category $\Delta\sigma_C$ (N/mm^2)	log a for $N < 10^8$ ($m=5$)	-	-	Stress range at cut-off limit ($N=10^8$) $\Delta\sigma_L$ (N/mm^2)
100	16.301	-	-	46
80	15.801	-	-	36
for fillet welds and for partial penetration butt welds in shear				

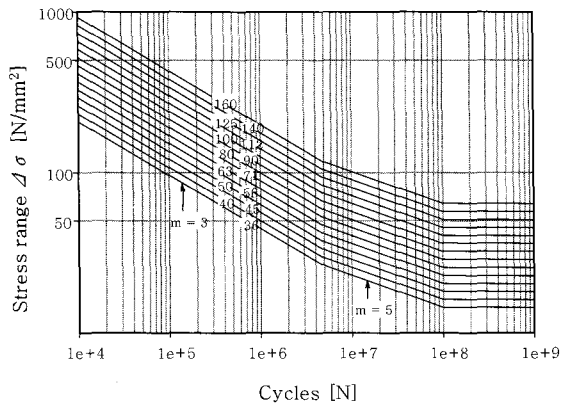


Fig. 12 ENV-1993 S-N curves

여기서, $\Delta\sigma_C$: $N=2 \times 10^6$ cycle 에서의 피로강도 기준값 (공칭응력)

$\Delta\sigma_D$: 일정진폭하중에 대한 피로한도

$\Delta\sigma_L$: Cut-off limit

3.2.2 시험결과와 비교

ENV-1993 규격의 피로설계에 대한 일반적인 지침과 피로특성에 따른 연결부위에 대한 세부분류에 따라 본 연구에서 수행한 맞대기, 필릿 용접 등의 시편에 대한 피로시험 결과를 분류하고 ENV-1993 규격의 각 분류 S-N 선도와 비교하였다. 이때 ENV-1993 규격과 비교를 위해 실제 시험을 통해 얻은 각 용접시편의 S-N 선도는 5% 파손확률일 때의 S-N 선도를 계산하여 적용하였다. Figs. 13-20에서 파선으로 표현된 것이 ENV 규격의 S-N 곡선이고 실선으로 표현된 것이 본 연구에서 얻은 실험 데이터로부터 얻어진 S-N 선도이다. ENV 규격에서는 용접 유형에 따라 2×10^6 사이클에서 응력진폭 $\Delta\sigma$ 의 크기로 등급을 구별하고 있다. 맞대기 용접시편 AAN, AAY, GAN 및 GAY와 이에 대응하는 ENV의 112 class를 비교할 때 피로한도는 매우 유사함을 알 수 있다. LN 경우는 대응하는 적절한 유형을 찾기가 어렵다. TN과 NCN은 유사 구조인 ENV 80 class와 비교할 때 피로한도가 약간 크고, CN은 ENV 36 class와 비교할 때 유사하다. 박스형 부재의 경우 ENV의 100 class와 비교할 때, 실험값이 상당히 작다. 이에 대한 추가적인 비교검토가 필요하다고 판단된다.

- 1) 맞대기 (AAN, AAY, GAN, GAY, LN : 112 class)

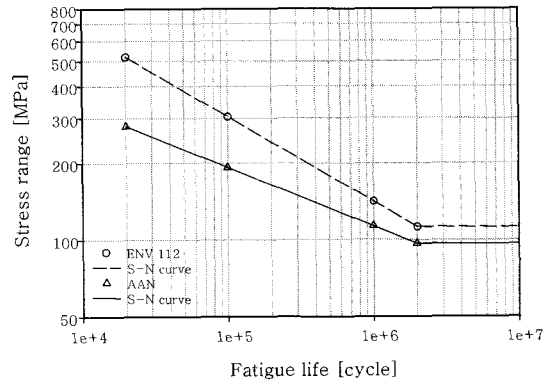


Fig. 13 ENV 112 class vs. AAN

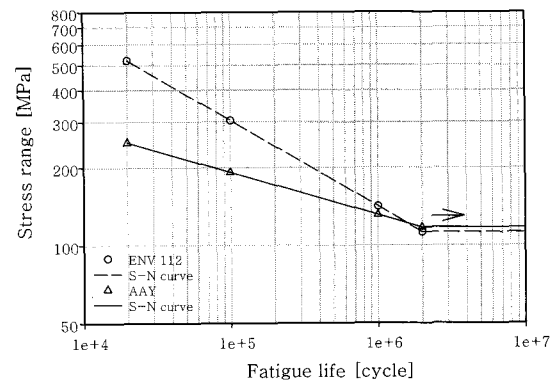


Fig. 14 ENV 112 class vs. AAY

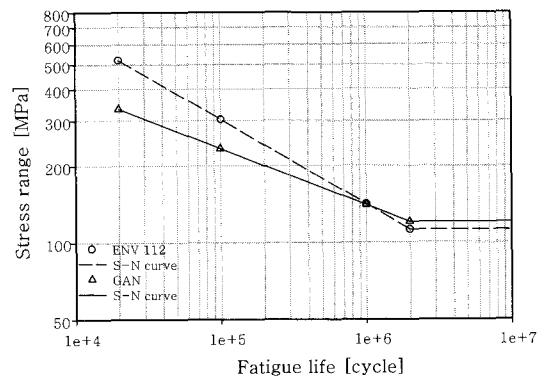


Fig. 15 ENV 112 class vs. GAN

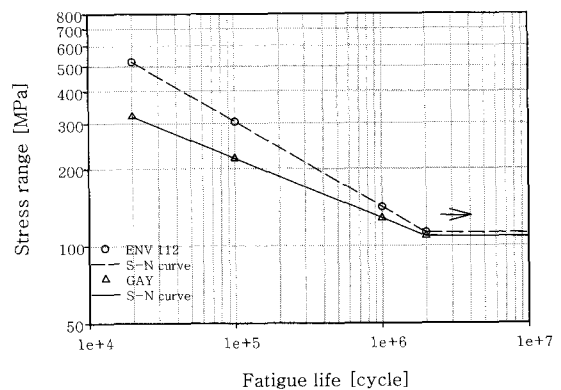


Fig. 16 ENV 112 class vs. GAY

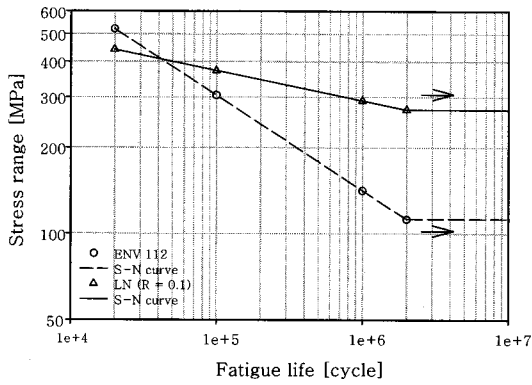


Fig. 17 ENV 112 class vs. LN

2) 필렛용접(TN, NCN: 80 class, CN: 36 class)

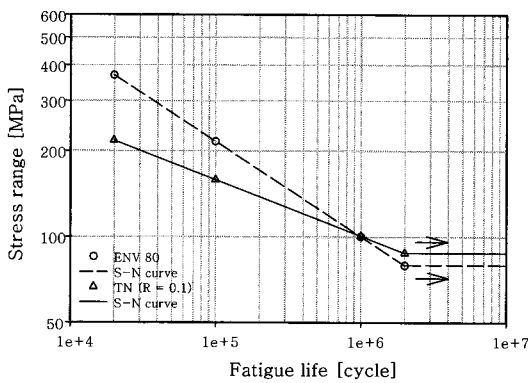


Fig. 18 ENV 80 class vs. TN

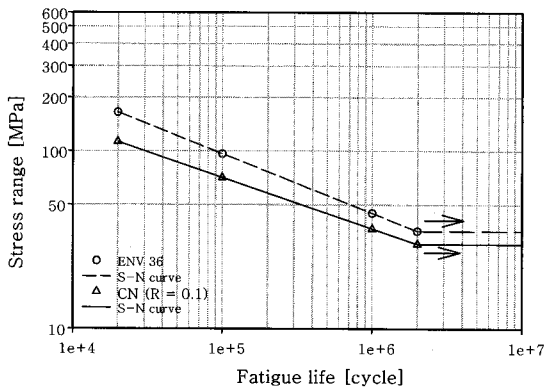


Fig. 19 ENV 80 class vs. NCN

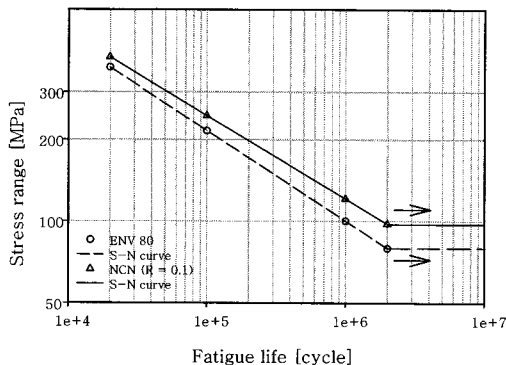


Fig. 20 ENV 36 class vs. CN

3) 부재 (Box-beam Y, N, V, H: 100 class)

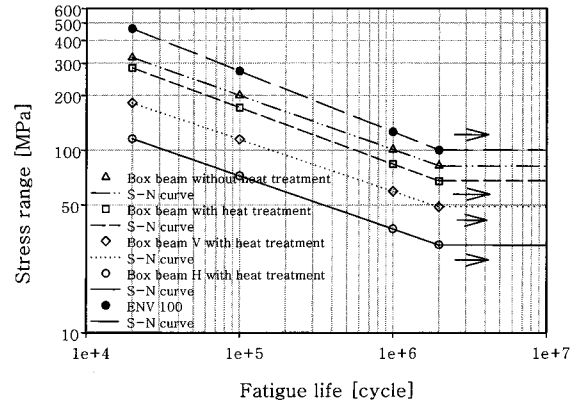


Fig. 21 ENV 100 class vs. Box

3.3 미국용접학회(AWS) 규격

3.3.1 규격 특성

미국용접학회 규격도 용접부위의 허용응력과 허용응력 범위에 대하여 정의하고 있다. 미국용접학회에서 규정한 용접방식에 따라 허용응력을 정의하고 있다. 4가지 용접방식에 따라 작용된 응력 종류별로 허용응력에 이에 따른 용착금속의 강도를 정의하고 있다.

또한 미국용접학회 규격의 허용응력 범위 Table 3과 Fig. 22와 같이 8등급(A, B, B', C, D, E, E', F)으로 정의되며, 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

먼저 A, B, B', C, D, E, E 등급의 경우에 허용응력범위는 다음의 식 $F_{SR(1)}$ 에서 계산한 값을 초과하지 말아야 한다. (C_f 와 F_{TH} 는 Table 3 참고)

$$F_{SR(1)} = (C_f \times 329/N)^{0.333} \geq F_{TH} \quad (1)$$

$F_{SR(1)}$ = Allowable stress range [MPa]

C_f = Constant

N = Number of cycles of stress range in design life

F_{TH} = Threshold fatigue stress range, that is the maximum stress range for infinite life [MPa]

또한 F등급의 경우에 허용응력범위는 다음 식의 $F_{SR(2)}$ 값을 초과하지 않아야 한다.

$$F_{SR(2)} = \left(\frac{C_f \times 11 \times 10^4}{N} \right)^{0.167} \geq F_{TH} \quad (2)$$

3.3.2 시험결과와 비교

앞에서 설명한 미국용접학회 규격의 피로설계에 대한

Table 3 Allowable stresses range

Stress Category	Constance C_f	Threshold F_{TH} [MPa]
A	250×108	166
B	120×108	110
B'	61×108	83
C	44×108	69
D	22×108	48
E	11×108	31
E'	3.9×108	18
F	150×1010	55

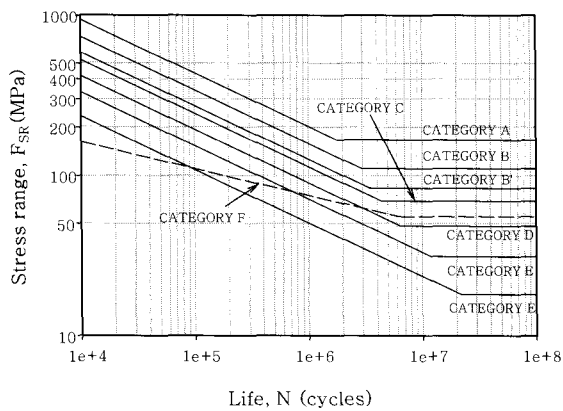


Fig. 22 Basic S-N curve

일반적인 지침과 연결부위에 대한 세부분류에 따라 본 연구에서 수행한 맞대기, 필렛 용접 등의 시편에 대한 피로시험 결과를 분류하고 규격의 S-N 선도와 비교하였다. 이때 규격과 비교를 위해 실제 시험을 통해 얻은 각 용접시편의 S-N 선도는 5% 파손확률일 때의 S-N 선도를 계산하여 적용하였다. Figs. 23-31은 비교결과를 보여준다. 맞대기 용접시편 AAN, AAY, GAN 및 GAY의 경우 대응하는 AWS B 등급과 비교할 때 피로한도는 매우 유사한 값을 갖는다. LN의 경우 대응하는 적절한 유형이 없어 B 등급과 비교할 때 피로강도가 매우 커 대단히 튼튼한 구조임을 알 수 있다. TN, CN 및 NCN은 대응하는 AWS C와 4×10^6 사이클에서 피로한도를 비교할 때 매우 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 박스형의 경우 AWS의 B'에 해당되는데 실험에서 얻은 피로강도가 낮다.

- 1) 맞대기 용접 시편(AAN, AAY, GAN, GAY: B Type, LN: C Type)

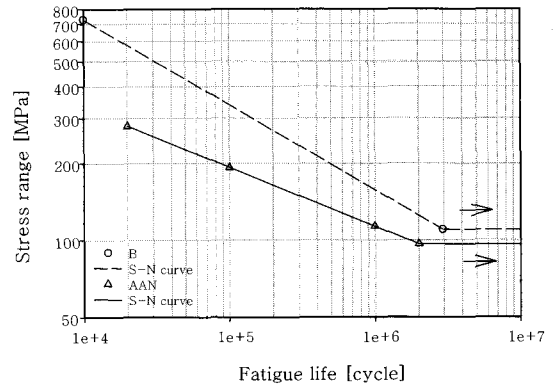


Fig. 23 B type vs. AAN

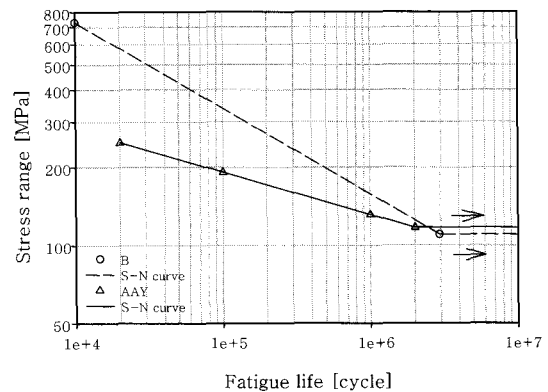


Fig. 24 B type vs. AAY

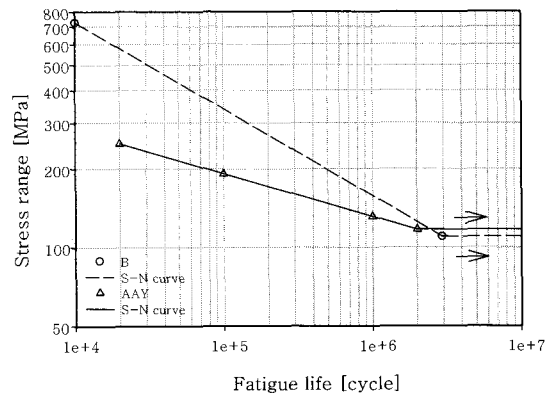


Fig. 25 B type vs. GAN

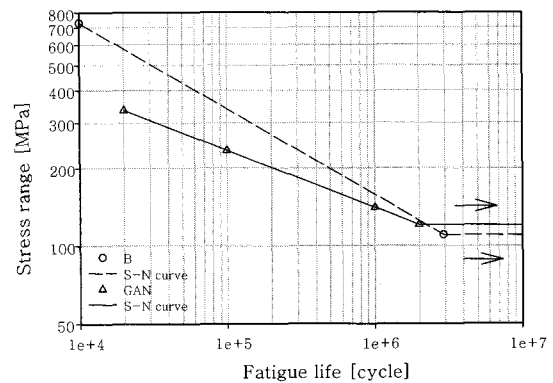


Fig. 26 B type vs. GAY

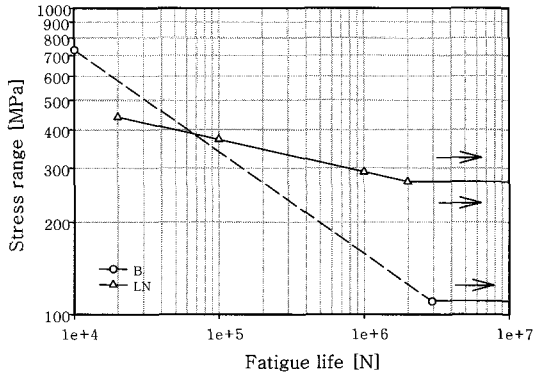


Fig. 27 B type vs. LN

2) 필렛 용접 시편(TN, NCN, CN : C type)

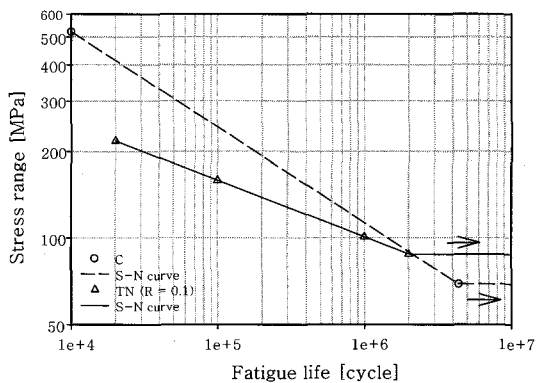


Fig. 28 C type vs. TN

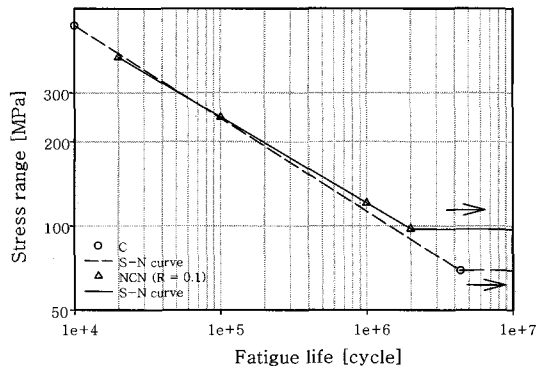


Fig. 29 C type vs. NCN

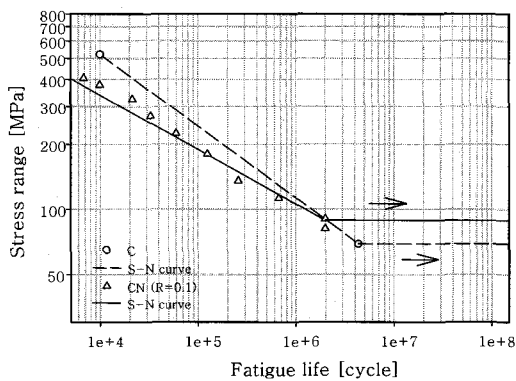


Fig. 30 C type vs. CN

3) 부재 용접 시편(Box beam Y, N, V, H : B' type)

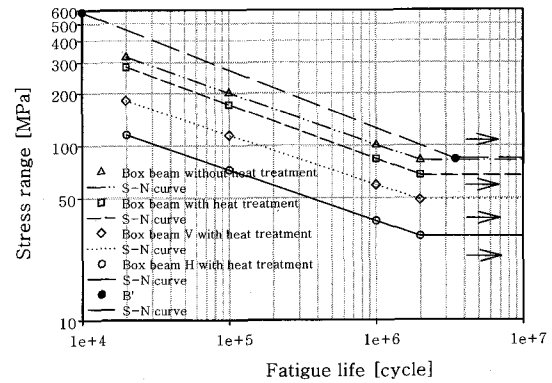


Fig. 31 B' type vs. Box beam

4. 검토 및 결론

BS 7608, ENV, AWS에서 규정하는 S-N 선도는 용접이음의 유형을 구분하고 각 유형에 대해 피로강도 기준을 제시하고 있다. 각 기준마다 용접이음에 대한 분류가 약간씩 다르고 기준응력 및 강도평가 방법도 차이가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 수행한 다양한 용접시편과 부재의 피로시험 결과와 이들 규격을 비교해 보면 다음과 같은 사실을 발견할 수 있다.

1) 전체적으로 본 연구에서 구한 S-N 선도의 기울기가 외국 규격의 기준선도보다 더 완만하였으나 2×10^6 사이클 부근에서의 피로강도의 크기는 대응하는 각 규격의 값과 유사함을 알 수 있다.

2) BS 7608과 비교하면 LN, TN, NCN, Box 형에서는 BS 7608보다 피로강도가 높고, 나머지 경우는 낮은 범위에 있다.

3) ENV와 비교하면 AAN, AAY, GAN, GAY, CN, BOX형은 ENV 규격보다 피로강도가 낮고, LN, NCN에서는 높다.

4) AWS와 비교하면 AAN, AAY, GAN, GAY, TN, CN은 AWS 규격보다 피로강도가 낮고, LN은 높고 NCN은 근사한 정도이며, BOX형은 다 낮았다.

5) 시험결과와 외국의 기준을 비교할 때 정확히 대응하는 용접이음 유형을 찾기가 어려운 경우가 있었다. 외국 기준을 준용하여 구조물의 피로설계를 하는 경우 준용하는 기준이 실제 사용하는 용접이음 유형의 강도보다 낮은 경우는 안전측의 설계가 되지만, 반대의 경우는 위험측의 예측을 (수명을 실제보다 길게 예측) 하여 문제가 될 수 있으므로 설계자가 사용하고자 하는 유형의 용접구조에 대해 몇 가지 피로시험을 실시하여 그 규격 사용의 타당성을 검토할 필요가 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도연구원의 기본연구사업의 일부로 수행된 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. BS 5400 Part 10, 1980, Steel, Concrete and Composite Bridge
2. BS 7608, 1993, Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures
3. ENV-1993-1-1, Eurocode 3: Design of Steel Structures
4. Structural Welding Code-steel 2004, American Welding Society, AWS
5. KS D 3515, 용접구조용 압연 강재, 1997
6. ASTM E466, "Standard Test Method for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials"
7. B. C. Goo et al. : Development of Remaining Life Estimation Techniques for Rolling Stock Structures, Ministry of Science and Technology, Report No. M1-0203-00-0104, (2004), (in Korean)
8. B. C. Goo et al. : Development of Remaining Life Estimation Techniques for Rolling Stock Structures, Korea Railroad Research Institute, Report No. KRRI-04-99, (2004), (in Korean)
9. B. C. Goo et al. : Development of Remaining Life Estimation Techniques for Rolling Stock Structures, Korea Railroad Research Institute, Report No. KRRI-05-84, (2005), (in Korean)