용접 이음 형상별 피로거동에 관한 실험적 연구

구병춘†(철도기술연구원)·김재훈*(철도기술연구원)·오창록**(철도기술연구원)

Experimental Study on the Fatigue Behavior of Welded Joints

B. C. Goo, J. H. Kim and C. L. Oh

Key Words: Fatigue (피로), Post Weld Heat Treatment (용접후열처리), Residual Stress (잔류응력), S-N Curve (S-N 선도), Welded Joint (용접 이음)

Abstract

We investigated the effect of weld details on fatigue behavior of a material, JIS SM 490 A, with yielding strength of about 350 MPa and tensile strength of about 520 MPa. Tensile tests, instrumented indentation tests and fatigue tests were carried out on double V-grooved butt weld plates such as reinforcement removed, as-welded and weld toe ground. In addition plates with transverse fillet welded web, load carrying cruciform fillet welded plates, non-load-carrying cruciform fillet welded plates and longitudinal butt welded plates were tested. S-N curves for the above specimens were obtained and analyzed

기호설명

σ, ε : 국부 응력, 국부 변형률

S : 공칭응력

K_f : 피로노치계수

K_t : 응력집중계수

1. 서 론

외국의 경우 용접 이음부의 피로 거동에 대해 많은 연구를 수행하여 설계자들이 유용하게 사용할 수 있는 규격이 제정되어 있다. 강의 피로에 관한 영국의 BS 5400[1], BS 7608[2], 일본의 경우 강구조협회의 피로설계지침[3], 유럽의 ENV규격[4], 압력용기, 파이프 및 저장용 탱크에 관한 미국의 API-579 규정[5] 등 많은 규정이 있고, 본 연구에서 취급하고 있는 철도분야에서는 독일[6], 일본[7,8], 미국[9] 등은 피로 설계를 위한 자체 규정을 보유하고 있다. 용접 이음의 종류가 많은 관계로 이러한 규정을 만들기 위해서는 20-30 여년의 긴 시간과 수많은 시험을 필요로 하므로 대부분의 경우 국가적인 사업으로 진행하였음을 알 수 있다. 국내의 경우 피로 파손에 관한 체계적이고 종합적인 연구를 통한 규정제정이 된 사례는 찾아보기 어렵고 이는 철도 분야에서도 마찬가지이다. 현재는 주로 일본이나 외국의 자료를 준용하여 활용하는 수준으로 설계자들은 애로를 토로하고 피로파손이 발생시 문제점을 정확히 진단하지 못해 적절한 해결책을 제시하지 못하는 것이 현실이다.

본 연구에서는 국내 철도차량의 구조용 강으로 많이 사용되고 있는 SM 490A를 대상으로 여러 가지 용접시편을 제작하여 용접부의 경도측정, 계장화 압입시험을 통한 응력-변형률 관계 그리고 각 용접이음에 대한 S-N 선도를 작성하여 실제 산업현장에서 유용하게 사용할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

† 한국철도기술연구원 차량기계연구본부
E-mail : bcgoo@krri.re.kr
TEL : (031) 460-5243 FAX : (031) 460-5289
* 한국철도기술연구원
** 한국철도기술연구원

2. 시편 및 시험의 종류

2.1 시편 제작

시편의 종류는 Table 1과 같다. 종방향 맞대기 용접시편은 수용접으로 제작하고 나머지 시편은 반자동 로봇 용접으로 제작되었다. 용접절차는 실제 산업체 현장에서 사용되는 조건과 가능한 유사하게 하였다. 모든 시편은 방사선 투과시험을 하였다. AAY와 GAY에 대해서는 590±20 ℃에서 3시간 용접 후열처리를 하였다. 용접 토우부의 그라인딩은 실린더형 세라믹 그라인더를 사용하여 직경이 약 3ϕ가 되게 가공하였다[11].

Table 1 Fatigue test specimens

Specimen types	Specifications	Symbols
Base material	200×25×10t	BM
Double V-groove butt weld - as welded	200×25×10t	AAN
Double V-groove butt weld - annealed	200×25×10t	AAY
Double V-groove butt weld - reinforcement removed	200×25×10t	RN
Double V-groove butt weld - weld toe ground	200×25×10t	GAN
Double V-groove butt weld - weld toe ground and annealed	200×25×10t	GAY
Plate with transverse fillet welded rib	300×25×10t, rib length=30, leg length=8	TN
Load-carrying cruciform fillet welded joint	300×25×10t, rib length=30, leg length=8	CN
Non load-carrying cruciform fillet welded joint	300×25×10t, rib length=30, leg length=8	NCN
Longitudinal double V-groove butt weld	300×25×10t	LN

2.2 인장 및 피로시험

인장 및 피로시험은 ASTM E 466[10]에 따라 Instron 모델 8802 (25톤)과 8503 (50톤)에서 20 Hz로 수행하였다.

3. 시험결과

3.1 경도, 인장, 압입

Fig. 1은 마이크로 경도의 측정 위치를 보여주고, Fig. 2는 경도의 분포를 보여준다[11]. Hv=145~210의 범위에 있다. Fig. 3은 계장화 압입시험으로 측정한 열영향부와 용접금속의 응력-변형률 관계이다[12]. 동일한 변형률에서 경도가 높은 용접금속의 응력이 열영향부의 응력보다 높음을 알 수 있다. Fig. 4는 1 mm/min으로 시험한 인장시험 결과이다. 항복응력 350 Mpa, 인장강도 520 MPa이다.

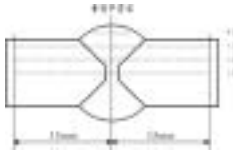


Fig. 1 Measuring points

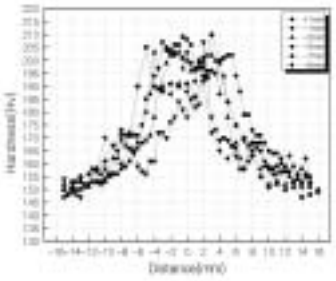
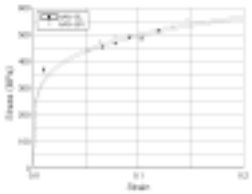
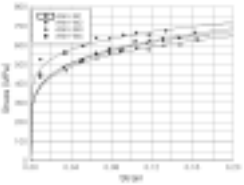


Fig. 2 Hardness, AAN



(b) HAZ



(c) Weld metal

Fig. 3 Stress-strain curves obtained by indentation test for AAN

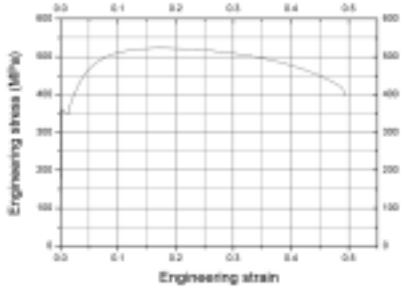


Fig. 4 Tensile strain-stress curve

3.2 피로

각 시편에 대한 피로강도는 Fig. 5~21과 같다. 피로거동에서 발견되는 몇 가지 특징을 살펴보면 다음과 같다. Fig. 6에서 보면 $N < 10^5$영역에서

AAN의 피로강도가 AAY 보다 높고, $N > 2 \times 10^5$ 영역에서는 반대의 경향을 보인다. 이러한 거동은 주로 용접 잔류응력의 영향에 의한 것으로 판단된다. Fig. 9와 10은 직경 3ϕ의 세라믹 그라인더에 의한 용접 토우부의 가공은 피로강도에 큰 영향을 미치지 않음을 보여준다. 이는 용접상태에서 토우 반경이 직경 3ϕ보다 약간 작은 범위에 주로 분포한다[11]는 사실로부터도 추론이 가능하다. Fig. 17과 18로부터 TN의 피로강도가 HCN 보다 약간 높음을 알 수 있다. HCN의 경우 리브가 양쪽에 있어 용접에 의한 영향을 더 많이 받았고 취약부위도 더 많아 상대적으로 균열발생이 더 쉽기 때문이다. Fig. 19는 하중 비지지형 십자형 용접이음이 하중 지지형보다 피로강도가 약간 높음을 보여준다. Fig. 20에서 보면 R=0.1에서 굽힘의 경우가 인장의 경우보다 피로강도가 상당히 높음을 알 수 있다.

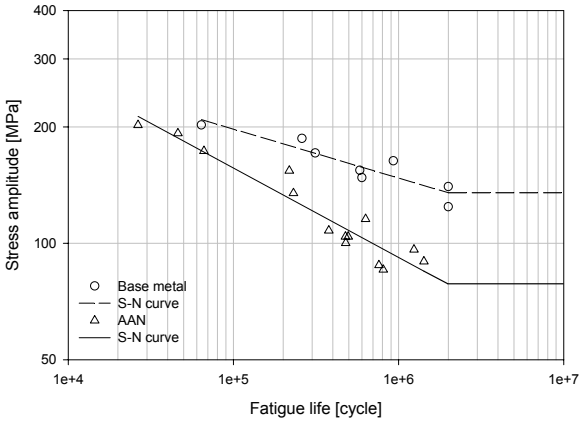


Fig. 5 BM and AAY

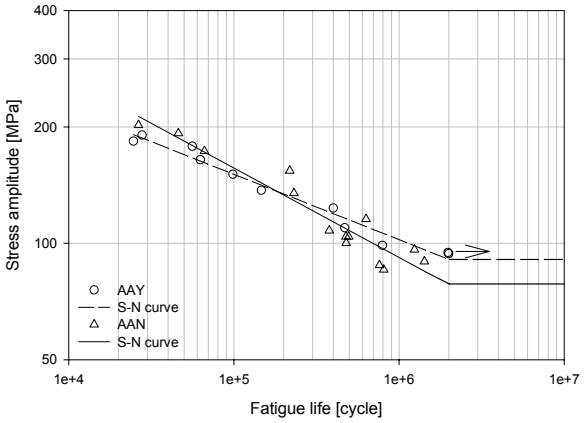


Fig. 6 AAN and AAY

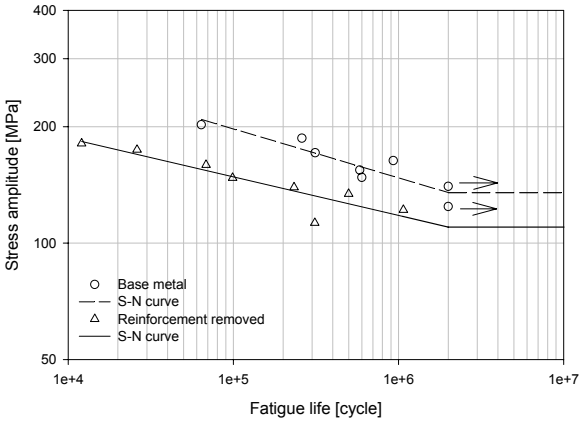


Fig. 7 BM and RN

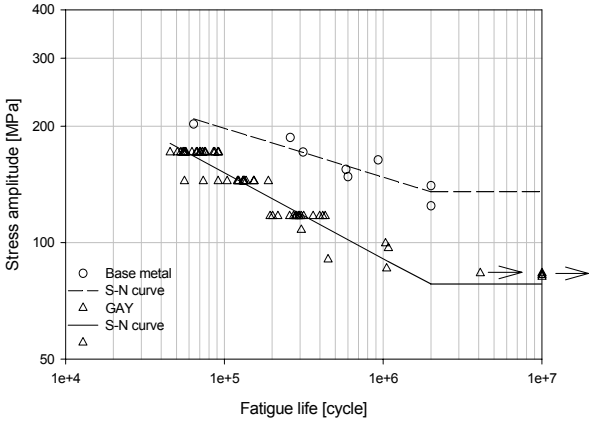


Fig. 8 BM and GAY

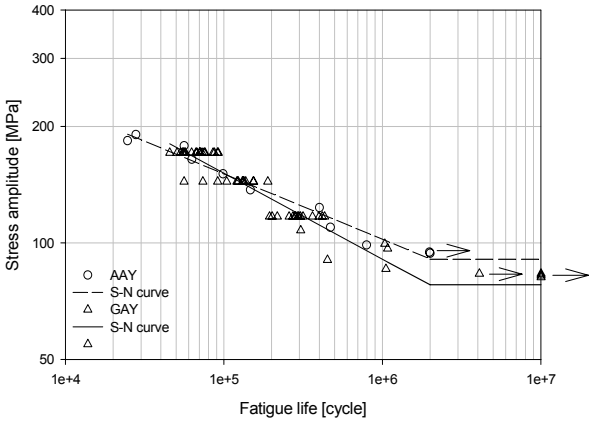


Fig. 9 AAY and GAY

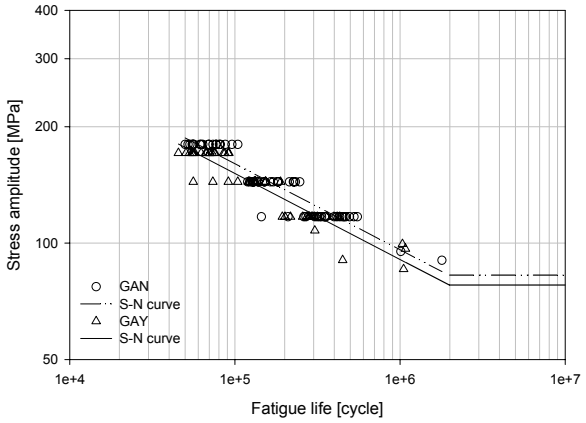


Fig. 10 GAN and GAY

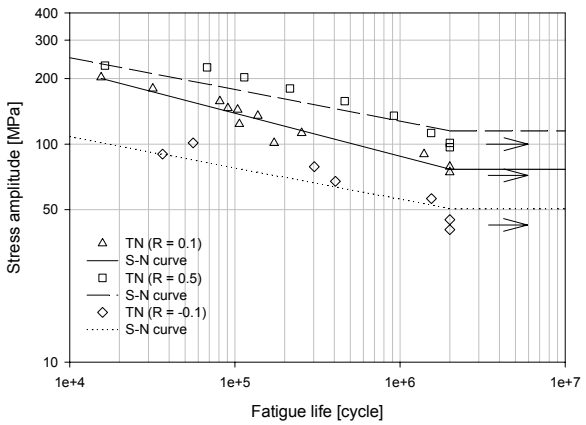


Fig. 11 TN

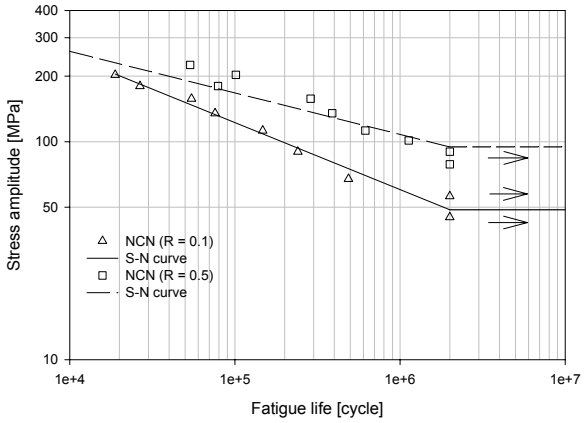


Fig. 12 NCN

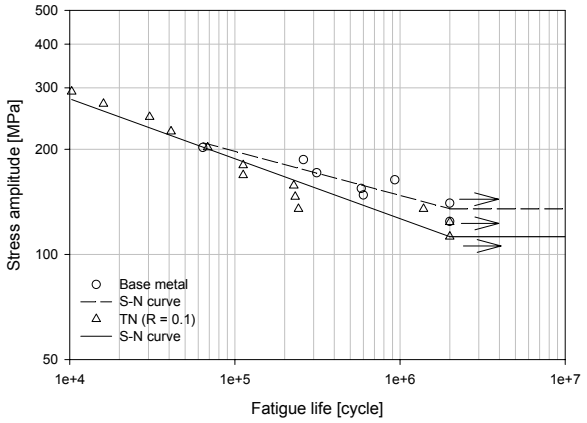


Fig. 13 BM and TN

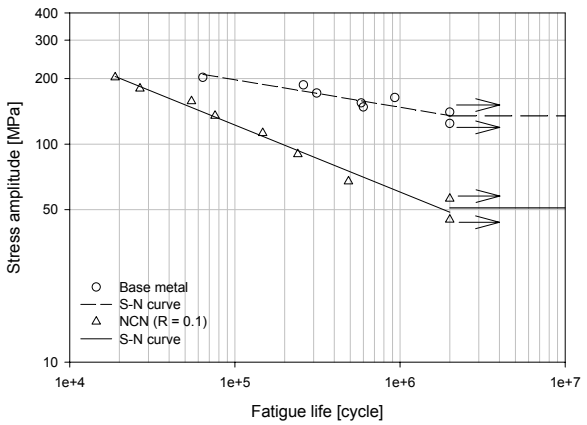


Fig. 14 BM and NCN

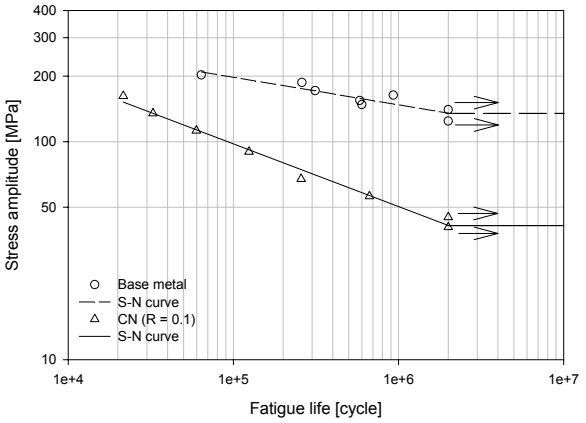


Fig. 15 BM and CN

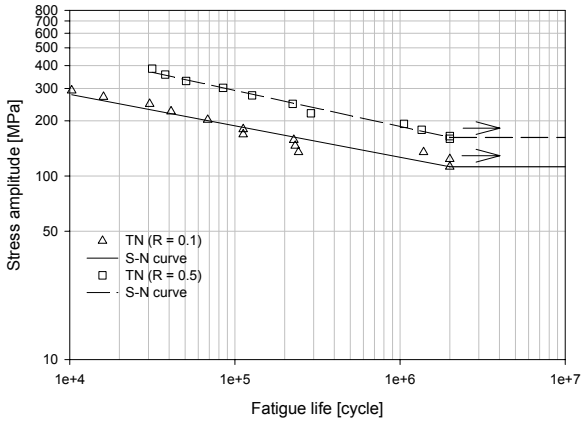


Fig. 16 TN, bending

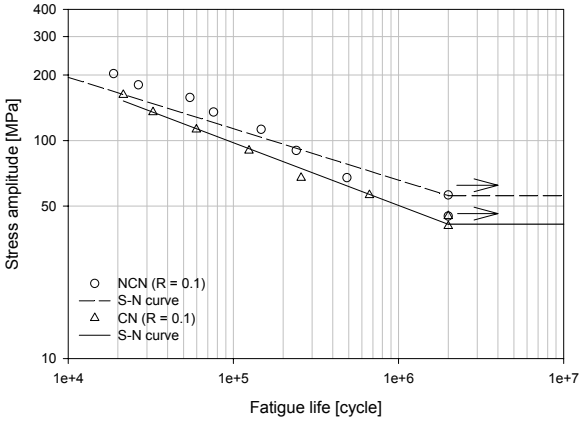


Fig. 19 NCN and CN

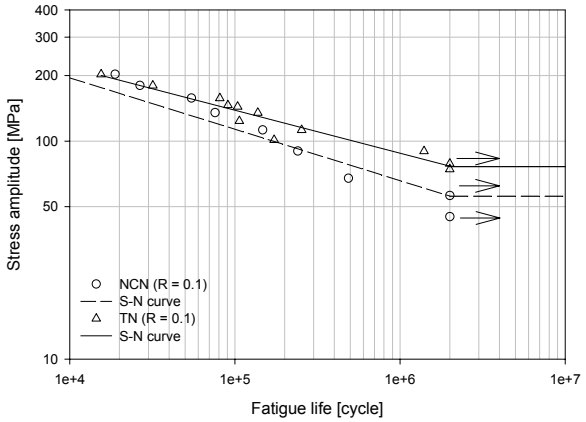


Fig. 17 NCN and TN at R=0.1

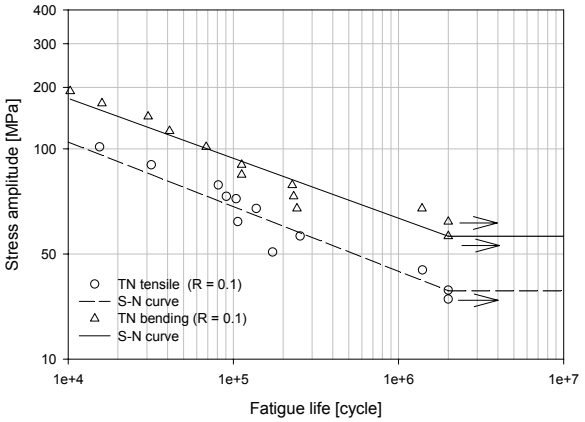


Fig. 20 TN tensile and TN bending

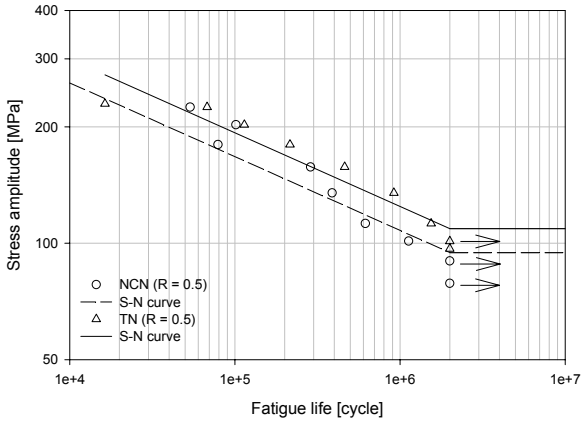


Fig. 18. NCN and TN at R=0.5

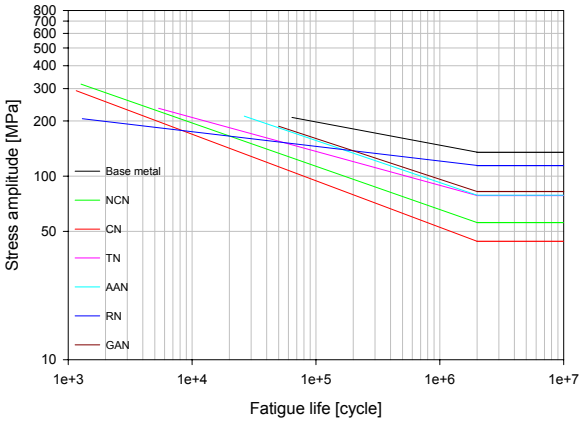


Fig. 21 S-N curves for the various welded joints

4. 결 론

본 연구에서는 일반 구조물이나 철도차량의 용접 구조물에서 사용될 수 있는 대표적 용접이음 10여 가지에 대해 피로시험을 수행하여 용접 비드, 토우부의 가공, 열처리 등의 영향을 살펴보고 각 경우에 대해 S-N 선도를 도출하였다. 국내의 경우 그동안 이러한 S-N 선도가 없어 주로 외국의 자료를 인용하여 설계나 수명평가를 하는 것이 현실임을 고려할 때 본 연구결과는 산업체의 실무자나 수명평가를 하는 연구원들에게 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 현재 대차 프레임의 경우 용접후열처리를 하고 있는데 본 연구결과를 바탕으로 후열처리를 하지 않아도 될 것으로 보인다. 후열처리 공정 하나만 줄여도 생산에 소요되는 비용과 시간을 크게 줄일 수 있을 것이다. 응력집중계수 K_t, 피로노치계수 K_f, 공칭응력 S, 용접 잔류응력과 같은 국부응력 σ 등을 사용한 용접 이음 형상에 대한 수명 예측 방법이 본 학회에서 발표될 것이다[13].

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(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) 日本鋼構造協會, 1993, 鋼構造物 疲勞設計指針・同解說, 技報堂出版

(4) ENV 1993-1-1, Eurocode 3 : Design of steel structures

(5) API-579, 2000, Fittness for service

(6) DV 952, 1977, “Vorschrift für das Schweißen metallischer Werkstoffe in Privatwerken”

(7) JIS E4207-1992, “Truck frames for railway rolling stock-General rules for design”

(8) JIS E4208-1988, “Test methods of static load for truck frames and truck bolsters of railway rolling stock”

(9) P. Przybylinski, S. Halcomb, 1977, “Interim AAR guidelines for fatigue analysis of freight cars,” Association of American Railroads.

(10) ASTM E 466, “Standard test method for conducting constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials”

(11) C. H. Oh, B. C. Goo, J. H. Kim, 2003, “A study on the characteristics of X-grooved butt weldments of SM 490 A,” Proceedings of the 2003 Autumn Annual Meeting of Korean Welding Society, Vol. 41, pp.204-206

(12) B. C. Goo, D. I. Kwon, Y. Choi, 2003, “Evaluation of mechanical properties of welding materials by an instrumented indentation test,” Proceedings of the 2003 Autumn Annual Meeting of Korean Welding Society, Vol. 41, pp.117-119

(13) B. C. Goo, S. Y. Yang, “Fatigue Life Evaluation of Welded Joints With Residual Stress,” Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Meeting A.