

구조용 내화강의 기계적 성질과 피로균열전파 특성에 관한 연구

김현수* · 남기우** · 강창룡***
(2000년 1월 8일 접수)

The Characteristics of Mechanical Properties and Fatigue Crack Propagation of Fire Resistance Steel for Frame Structure

Hyun-Soo Kim, Ki-Woo Nam and Chang-Young Kang

Key Words: Fire Resistance Steel for Frame Structure(구조용 내화강재), Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열전파속도), Anisotropy(이방성), Low Yield Ratio(저항복비)

Abstract

This study is to investigate the mechanical properties and the fatigue crack propagation of fire resistance steel for frame structure as the chemical composition was changed by addition of N, B and rolled end temperature was varied. We used two kinds of specimen, the one is parallel and the other is perpendicular to the rolling directions. As rolled end temperature increased, volume fraction of ferrite and pearlite decreased, but volume fraction of bainite and grain size increased. Micro-hardness decreased as rolled end temperature increased, but tensile and yield strength increased. Volume fraction of ferrite and pearlite decreased by addition of N. But volume fraction of bainite, tensile and yield strength increased. Microstructure was changed to martensite by addition of B, and tensile and yield strength increased. Fatigue life of TL direction specimen was shorter than that of LT direction specimen. There was no significant effect to fatigue crack propagation rate by addition of N and changing rolling condition, but fatigue life was increased by addition of B.

1. 서 론

철골구조의 건축물은 화재가 발생하여 열을 받게 되면, 철골구조의 강도가 저하하게 되어, 건축물로서의 내력이 떨어져 붕괴될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 골조를 이루는 강재를 내화피복처리 하여 철골을 보호하는 것이 건축법에 의무화되어 있다. 최근 도심의 건축물은 토지와 공간을 보다 효율적으로 활용하려는 사회적 요구에 부응하려는 측면에서 초고층화 되어가고

있을 뿐만 아니라, 사용효율이 높은 실내공간확보 및 환경문제해결 등을 위하여 철근콘크리트 구조에서 철골구조로 변화되고 있다. 최근의 강재는 기존의 강재보다 높은 강도 및 고성능(내진성, 용접성, 내화성 등)화와 같은 특수한 성질이 요구되고 있다.^(1~3) 철골구조는 다른 건축구조에 비하여 건물자체의 자중이 적고, 높은 강도와 우수한 연성을 지니고 있기 때문에 내진성이 뛰어난 장점을 지니고 있다.⁽⁴⁾ 이 이유로 도심의 고층 건물은 철골구조로 빠른 전환이 이루어지고 있으며, 이에 따라 최근의 건축구조용 강재의 개발 방향은 고강도화 및 고성능화를 지향하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 건축 구조용 강재의 화학조성에 여러 합금원소를 미량 첨가한 강을 개발하여, 이 재료의 기계적 특성과 피로균열전파특성을 규명하였다.

* 부경대학교 대학원

** 회원, 부경대학교 재료공학부

E-mail : namkw@pknu.ac.kr

TEL : (051)620-1640 FAX : (051)624-0746

*** 부경대학교 재료공학부

Table 1 Chemical compositions of materials (wt%)

SP.	C	Si	Mn	Mo	Ti	N	B
A	0.16	0.32	1.38	-	-	-	-
T	0.11	-	0.97	0.48	0.02	-	-
TN	0.11	-	1.04	0.48	0.018	0.015	-
B	0.12	-	1.16	0.49	-	-	>0.0144

2. 실험방법

2.1 시험편 및 실험재료

본 연구에 사용된 시험편은 기존에 건축구조용 재료로 사용되고 있는 재료(A재료)를 기초로 하여 기계적 물성치를 향상시키기 위하여 합금 설계한 다음 진공용해하여 제조한 것이다. 즉, 건축구조용 내화강의 탄소함량(0.13~0.16)보다 탄소량을 약간 낮추는 대신에 Ti를 첨가한 것(이하, T로 명명), N와 Ti를 함께 첨가한 것(이하, TN으로 명명) 및 B를 첨가한 것(이하, B로 명명)으로서, 그 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

한편, 시험편의 압연시 압연종료온도변화는 미세조직의 변화를 초래하여 강도특성 및 피로특성에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 압연종료온도에 따른 강도와 피로특성을 조사하기 위하여 첨가원소가 다른 세 가지 시험편을 1200℃로 가열한 후, 압연종료온도를 750℃와 950℃로 압연한 다음 공랭하였다. 그때의 압연조건을 Table 2에 나타내었다.

2.2 경도측정

합금원소 첨가 및 압연종료온도 변화에 따른 미소경도값을 측정하기 위한 경도시험은 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 500g의 하중에서 측정하였다. 이때 경도값은 한 시험편당 10회 측정하여 평균하였다.

2.3 미세조직의 관찰 및 분석

시험편의 미세조직 관찰은 1% 나이탈용액을 사용하여 부식시킨 후 광학현미경으로 관찰하였다. 페라이트, 펄라이트 및 베이나이트의 체적분율과 각 상의 결정립 크기는 광학현미경에 의하여 얻어진 미세조직을 이용하여 점분석법과 화학분석시험기에서 측정하였다.

Table 2 Rolling conditions of materials used

Specimen	R.S.T*(°C)	R.E.T**(°C)
T	75	1200
	95	"
TN	75	"
	95	"
B	75	"
	95	"

* R.S.T : Rolled start temperature

** R.E.T : Rolled end temperature

2.4 인장시험

합금원소 첨가와 압연종료온도 변화가 인장성질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 인장시험기(Zwick/Z100)의 크로스 헤드 속도를 1mm/min으로 상온에서 시험하였다.

2.5 피로실험

구조용강의 이방성에 따른 피로균열전파 특성을 평가하기 위하여 압연방향에 평행한 방향(TL방향)과 수직인 방향(LT방향)으로 노치를 기계가공하였다. 그리고 피로시험은 최대용량 10톤의 만능피로시험기를 사용하였으며, 실온에서 정현파를 이용하여 모든 시험편에 예비균열을 2mm 삽입한 후, 하중반복수 10Hz, 용력비 $R=0.1$, $P_{max}=5.88kN$ 의 일정하중으로 실시하였다. 균열길이는 clip gage를 이용한 컴플라이언스 법을 사용해서 측정하였으며, 용력확대계수 K 는 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 그리고 피로균열전파속도 (da/dN)는 얻어진 $a-N$ 선도에서 중분다항식법을 사용하여 구하였다. 이때 사용한 CT 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Fig. 2는 T, TN 및 B시험편의 미세조직을 나타낸 것이다.

이 그림에서 T와 TN시험편에서는 페라이트의 기지조직에 소량의 펄라이트와 베이나이트가 공존하고 있다. 그리고 B시험편에서는 경화능이 큰 B의 첨가에 의해 마르텐사이트의 기지조직에 미세한 탄화물들이 석출되어 있음을 알 수 있다.

$$K = \left[\frac{P}{(B \cdot W^{1/2})} \right] \cdot f(x), \quad (X = a/W) \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{(2+X)(0.886+4.64 \cdot X-13.32 \cdot X^2+14.72 \cdot X^3-5.6 \cdot X^4)}{(1-X)^{3/2}}$$

이 식은 $0.2 \leq a/W < 1$ 에서 적용 가능하다.

Table 3은 Fig. 2에서 얻은 T시험편과 TN시험편의 미세조직을 정량분석하여 나타낸 것이다.

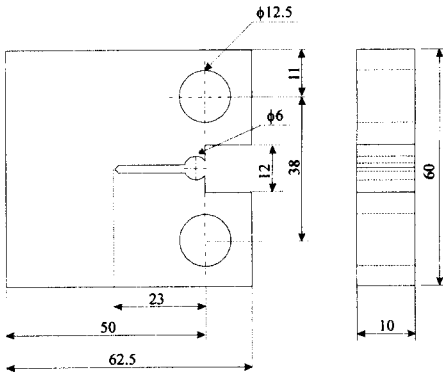


Fig. 1 Dimension of fatigue specimens (Unit : mm)

이 표에서 T시험편과 TN시험편은 압연종료 온도가 증가하면 페라이트와 펄라이트의 체적분율이 낮아지는데 반하여, 베이나이트 조직이 생성되고 있음을 알 수 있다. 그러나 B시험편에서는 압연종료 온도 변화에 관계없이 마르텐사이트 조직만 존재하였으며 체적분율 및 제2상의 체적분율 변화가 거의 나타나지 않았다.

T 및 TN 시험편에서 압연종료온도가 증가하면 Fig. 2 및 Table 3에 나타낸 것처럼 결정립 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Phase Volume fractions and grain size for materials used

	Ferrite (%)	Pearlite (%)	Bainite (%)	Grain size (μm)
T75	92	9.73	-	9.3
T95	86.78	8.7	3.49	11.3
TN75	91	9	-	6.9
TN95	82.6	3	17.4	13.5

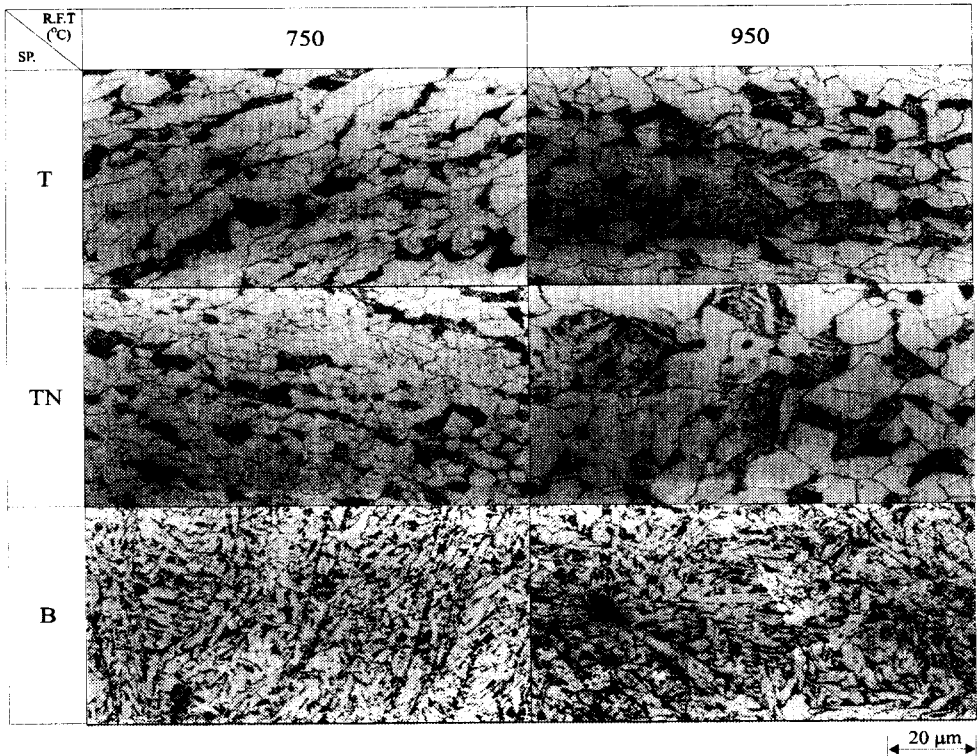


Fig. 2 Optical micrographs showing the effect of rolling finished temperature of specimens

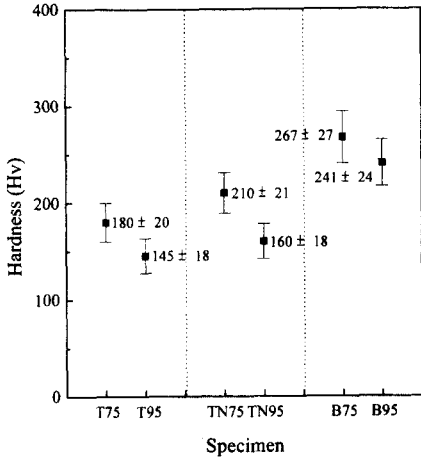


Fig. 3 Relationship between vickers hardness and rolling finished temperature of specimen

3.2 경도 및 인장강도 변화

Fig. 3은 합금원소 첨가 및 압연종료온도 변화가 미소경도값에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 세 가지 시험편 모두 압연종료온도가 높아질수록 경도값이 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 압연종료온도가 낮아지면 압연에 의한 많은 전위들이 도입될 뿐만 아니라 결정립이 미세화 되기 때문에 압연종료온도가 높은 경우보다 경도값이 증가한다고 판단된다. 일반적으로 결정립의 크기와 재료강도 사이에는 Hall-Petch식이 성립하고 있다. 즉, 결정립 크기가 감소하면 재료의 강도는 증가한다.⁽⁸⁾ 또한, T시험편 및 TN시험편보다 B시험편의 경우가 경도값이 높게 나타났다. 이것은 Fig. 2의 조직사진에서 알 수 있는 바와 같이 T 및 TN시험편은 기지조직이 페라이트에 펄라이트로 구성되어 있는데 반하여, B시험편은 기지조직이 페라이트와 펄라이트보다 단단한 마르텐사이트로 구성되어 있기 때문이다.

Fig. 4는 합금원소 첨가 및 압연종료온도의 변화가 인장성질에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 세 시험편 모두 압연종료온도가 증가할수록 인장 및 항복강도가 약간 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 압연종료온도가 증가하면 결정립이 조대화 됨에도 불구하고 인장 및 항복강도가 약간 증가하는 이유는 Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 연질의 페라이트의 체적분율이 감소하

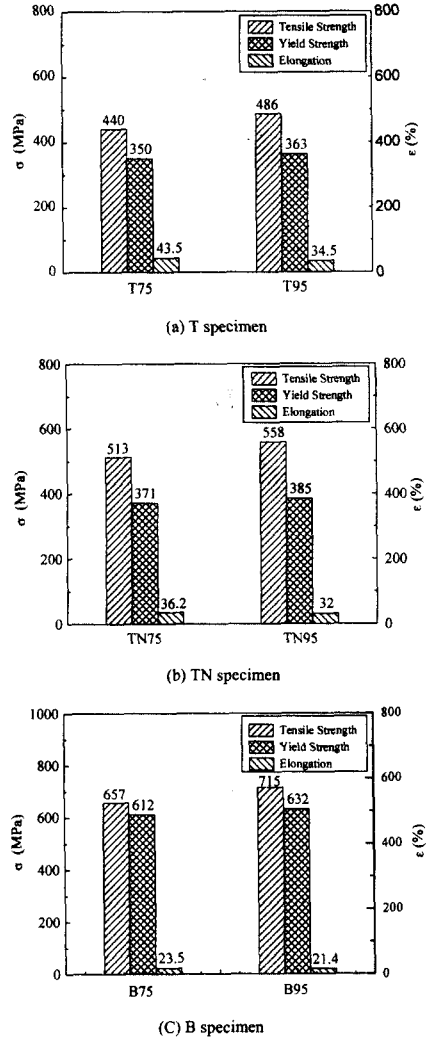


Fig. 4 Effect of rolling finished temperature on the tensile properties of specimens

고 경질의 베이나이트의 체적분율이 상대적으로 증가하기 때문이라고 판단된다. 즉, 결정립 조대화에 의하여 감소하는 강도값보다 상의 변화에 의하여 증가하는 강도값이 더 크기 때문에 이러한 결과가 나타난다고 판단된다. 또 TN시험편이 T시험편에 비하여 높은 인장 및 항복강도 값을 나타내고 있다. 이것은 Ti탄화물이 석출되는 강화 효과 이외에 N의 첨가에 의한 고용강화 효과가 함께 나타나기 때문이라 판단된다.⁽⁵⁻⁶⁾ 또한, B시험편의 경우가 다른 시험편들에 비하여 인장강도 및 항복강도가 높게 나타나고 있다. 이것은 B의

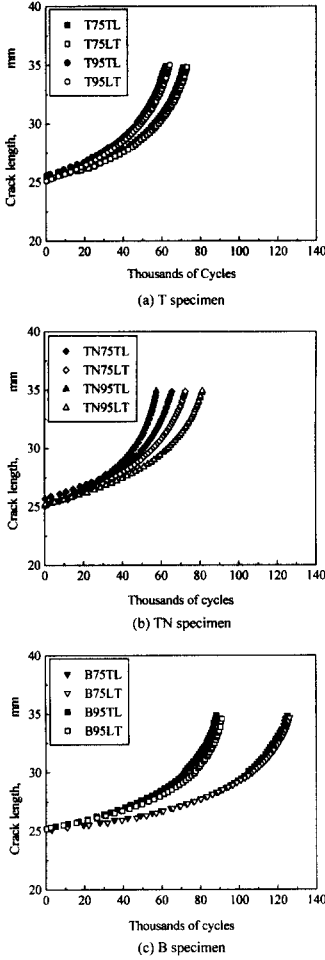


Fig. 5 a-N curves for chemical composition and anisotropy

첨가에 의하여 경화능이 크게 높아지는데 기인되어 Fig. 2의 미세조직사진에서 나타나는 것처럼 기지조직이 마르텐사이트로 될 뿐만 아니라 고용되고 남은 붕소가 탄화물로 석출되어 존재하기 때문인 것으로 판단된다.⁽⁷⁾

3.3 피로균열전파거동

합금원소 첨가 및 압연종료온도 변화는 미세조직과 인장특성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 따라서 이것은 피로특성에도 영향을 미칠 것으로 판단되어 조직의 이방성에 따른 피로 실험을 실시하였다.^(8~11)

Fig. 5는 조직의 이방성에 따른 피로균열전파특성을 조사하기 위하여 LT시험편과 TL시험편을

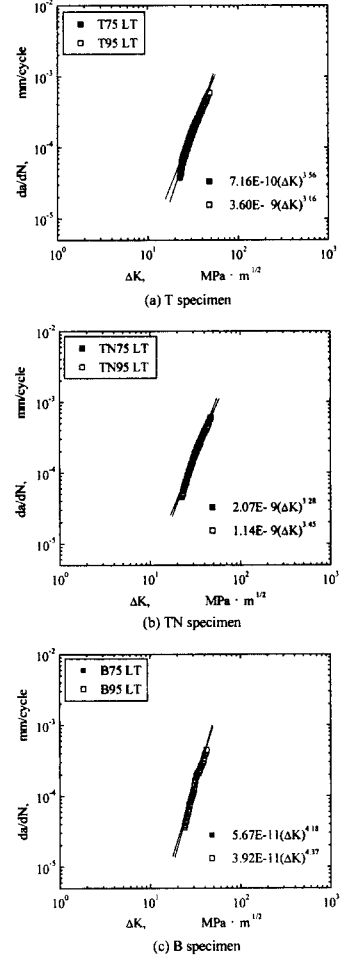


Fig. 6 Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range for rolling finished temperature

사용하여 얻은 a-N선도를 나타낸 것이다. 이 그룹에서 3종류 시험편 모두 압연종료온도에 관계없이 TL시험편이 LT시험편에 비하여 피로수명이 짧게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 TL시험편은 압연에 의하여 기지조직이 대체로 압연방향을 따라 길게 연신되어 있기 때문에, 균열이 조직의 경계를 따라서 용이하게 전파하였기 때문이라 판단된다. T시험편의 경우는 TN시험편에 비하여 이방성에 따른 피로수명에 있어서 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 그러나 TN시험편은 T시험편에 비하여 N을 첨가함으로써 이방성에 따른 수명의 차이를 나타내고 있다. 따라서 질소의 첨가는 이방성에 따른 피로수명에 영향을 미

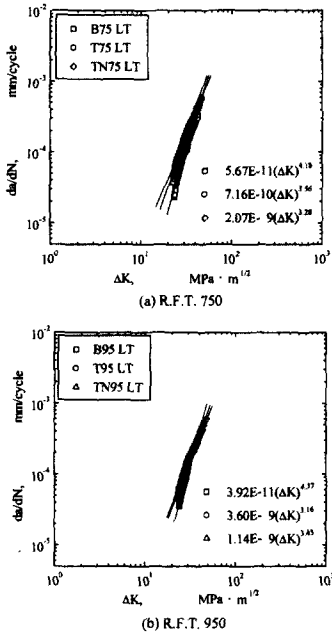


Fig. 7 Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range according to rolling finished temperature

치는 것으로 판단된다. B시험편의 경우 또한, 압연방향에 따른 피로수명의 차이를 나타내었고, T 및 TN시험편에 비하여 피로수명이 향상되었음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 경화능이 큰 B의 첨가에 의하여 기지조직이 마르텐사이트 조직으로 이루어져 있기 때문이라고 판단된다.

Fig. 6은 각 시험편의 압연종료온도 변화가 피로균열전파속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 시험편(LT방향)의 균열전파속도 da/dN 과 응력확대계수의 변동폭 ΔK 와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에서 T시험편의 경우는 압연온도가 낮은 경우가 피로균열전파속도가 더 빠르게 나타났다. 그러나, Fig. 6(b)와 (c)의 TN과 B시험편은 압연종료온도가 높은 경우, 피로균열전파속도가 더 빠르게 나타났다. 이와 같이 T시험편의 압연종료온도가 낮은 경우 피로균열전파속도가 빠르게 나타나는 이유는 Fig. 2와 Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 압연종료온도가 낮은 경우는 연한 페라이트의 체적분율이 높고 비교적 경한상인 베이나이트가 적기 때문이라고 판단된다. TN시험편의 경우는 질소의 첨가에 의하여 압연종료온도가 950℃인 경우에는 베이나이트 상이

나타나기 때문에 피로균열전파가 빠르다고 판단되고, B시험편의 경우는 압연종료온도가 950℃와 750℃일 때 모두 내부조직은 동일하지만 압연종료온도가 높은 경우에는 조직이 조대화 되기 때문에 피로균열전파가 빠르다고 판단된다. 그러나, 전체적으로 보아 각 LT시험편에서 압연종료온도 변화에 따른 피로균열전파속도의 차이는 적다고 말할 수 있다.

Fig. 7은 동일온도에서 압연종료 한 세 시험편(LT방향)의 균열전파속도와 응력확대계수 변동폭과의 관계를 나타낸 것이다. 압연종료온도에 관계없이 B시험편이 T와 TN시험편보다 피로균열전파속도가 빠르게 나타났다. 이것은 B시험편은 T와 TN시험편과는 다르게 기지조직이 마르텐사이트로 이루어져 있기 때문이라고 판단된다. 압연종료온도가 750℃인 경우는 TN시험편이 피로균열전파속도가 가장 느리게 나타났고, 950℃인 경우에는 T시험편의 피로균열전파속도가 가장 느리게 나타났다.

4. 결론

고강도 저항복비를 갖는 구조용 강재의 합금원소 첨가와 압연종료온도 변화에 따른 강도 및 피로균열전파 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압연종료온도가 증가할수록 페라이트 및 펄라이트의 체적분율은 감소하는데 비하여, 베이나이트의 체적분율은 증가하였고, 결정립 크기도 증가하였다. 그리고, 압연종료온도가 증가할수록 경도값은 감소하였으나 인장강도와 항복강도는 증가하였다.

(2) 질소의 첨가에 의해 페라이트와 펄라이트의 체적분율은 감소하였으나 베이나이트의 체적분율은 증가하였고, 인장강도와 항복강도는 증가하였다. 그리고 이방성에 따른 피로수명에는 약간의 영향을 나타내었다.

(3) 붕소의 첨가에 의해서 기지조직은 마르텐사이트 조직이 얻어지며, 이에 따라 다른 시료들에 비하여 인장 및 항복강도가 높게 나타났고, 피로수명도 다른 두 종류보다 더 길게 나타났다.

(4) 균열 전파방향이 압연방향과 평행한 경우가 압연방향에 수직인 경우보다 균열전파가 용이하기 때문에 피로수명이 짧게 나타났다.

참고문헌

- (1) 中村秀司, 吉川秀章, 大失俊樹, 丸山 榮, 穂 蕨 實, 1995, “建築事業部における混合構造の開発,” 新日鐵技報 第356號, pp. 47~53.
- (2) 伏見光雅, 計良光一郎, 力石 寛, 1995, “建築耐火構造の開発,” 新日鐵技報, 第356號, pp. 31~37.
- (3) 谷 三郎, 金子康弘, 石黒守辛, 大浜通洋, 1995, “鋼構造用鋼材-土木・建築構造用鋼材,” 新日鐵技報, No. 150, pp. 1~6.
- (4) 藤田 徹, 服後裕一, 田中照夫, 浜中征一, 福村勝彦, 1996, “輕量鐵骨構造建築物用耐火鋼材の諸特性,” 新日鐵技報, No. 74, pp. 37~44.
- (5) 이태호, 정윤철, 김성준, 1999, “슈퍼 오스테나이트계 Fe-22Cr-21Ni-6Mo-(0.3N) 스테인리스강의 고온 석출거동 및 질소첨가 영향,” 대한금속학회지, 제37권, 제4호, pp. 400~408.
- (6) 이태호, 김성준, 1997, “고질소 오스테나이트계 내식강의 고온변형특성,” 대한금속학회지, 제35권, 제9호, pp. 1146~1155.
- (7) 박광일, 주성민, 최한철, 최담진, 1998, “Fe-38at.%Al합금의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 Cr, Mo, Nb 및 B의 첨가효과,” 대한금속학회지, 제36권, 제3호, pp. 377~384.
- (8) 한승호, 김정규, 1997, “철강구조물 부재의 강도평가 및 피로균열진전거동,” 대한기계학회논문집 A권, 제21권, 제10호, pp. 1694~1701.
- (9) 송삼홍, 강명수, 1997, “터빈용 Cr-Mo-V강의 고온 환경변화에 따른 피로거동에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 A권, 제21권, 제1호, pp. 173~179.
- (10) 소태원, 윤기봉, 정세희, 1996, “표면균열을 갖는 원형봉재 시편을 이용한 고온 피로균열 성장 연구,” 대한기계학회논문집 A권, 제20권, 제11호, pp. 3451~3423.
- (11) 부명환, 박영철, 廣瀬辛雄, 1998, “WC-Co초경합금의 피로균열진전특성에 미치는 미시조직의 영향,” 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제8호, pp. 1409~1417.