

고강도 강선의 인장 및 회전굽힘 피로특성

우병철*·김상수*·김병걸*·서창민**

Characteristic of fatigue properties with tension and bending loading using high strength steel wire

Byung-chul Woo, Sang-soo, Kim, Byung-guel, Kim and Chang-min, Suh

Key Words : High strength steel wire(고강도 강선), Fatigue strength(피로강도), Nakamura fatigue(중촌식 피로), Overhead Transmission Wire(가공송전선)

Abstract

The overhead transmission wires operating both at warm temperature and tighten state for a long period of time in a power transmission plant are degraded by air pollution, wind, creep and slip between steel wire and aluminium conductor.

The objective of this study is to investigate a high carbon steel wire. We tested for basic mechanical properties and 3 types fatigue behavior, tension-tension, 4 points bending and 3 points bending fatigues. In this study, a conventional fatigue strengths between 4 points bending and tension-tension fatigue were determined by Gerber, Sorderberg and Goodman's theory and we investigated S-N diagram for bending and tensile loading.

1. 서론

발전소에서 얻어진 전력을 각 가정에 공급하기 위해서는 고압의 송전과정과 저압의 배전과정을 거치면서 변전소와 분기점을 통과하게 된다. 이러한 송전에서 전력 수송은 가공송전과 지중송전으로 이루어지며 송전선은 전력수송을 담당하는 전도체(conductor)와 지지를 담당하는 강선(steel wire)로 구성되어 있다.

가공송전선으로 사용되는 강선은 일반적으로 고강도 탄소강이 많이 사용되고 있으며 자연환경에서 발생할 수 있는 부식을 방지하기 위해서 알루미늄피복강선(aluminium welded steel wire)이

많이 사용되며 알루미늄 도체와 강선 사이에 미끄럼으로 인한 손상을 방지하기 위해서 윤활제를 도포하여 사용하고 있다.

현재 사용하고 있는 송전선(Aluminum Conductor Steel Reinforced, ACSR)에서 강선의 특성은 인장강도의 허용치로서 설계에 이용하고 있으며 제조 공정상 발생할 가능성이 큰 굽힘에 대한 절대수치로서 통과시험을 시행하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 가공송전선으로 사용하고 있는 강선의 굽힘과 인장피로 시험을 시행하여 인장과 굽힘에서의 특성치를 분석하였으며 인장강도와 비교하였다. 또한 굽힘과 인장피로시험에서 얻은 강도와 파단반복수를 이용하여 S-N diagram을 얻었으며 Gerber, Goodman 및 Solderberg's diagram으로 평균응력의 영향을 비교하였다. 또한 가공송전선으로 사용되고 있는

* 한국전기연구소 신소재응용연구그룹

** 경북대학교 공과대학 기계공학부

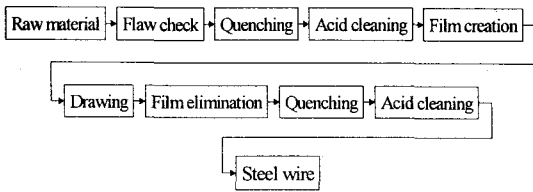


Fig. 1 Manufacturing process of steel wire

꼬인 강선(stranded steel wire)을 이용하여 3점 굽힘 피로시험을 시행하여 단선의 피로특성과 비교하여 나타내었다.

본 연구에서 사용된 강선은 Fig. 1과 같은 생산공정으로서 가공송전선으로 사용되고 있는 고강도 강선을 사용하였으며 8mm로 압출된 선재를 약 15-20%의 단면감소율로 신선하여 제조하였다. 이러한 공정을 거치면서 강선은 가공경화에 의한 강도증가와 연신율 감소현상이 발생하며 압하율은 재료에 결함이 발생하지 않는 조건으로서 열처리 과정 없이 가공되었다.

2. 실험 방법

2.1 실험재료

본 시험에서 사용한 고강도 탄소강은 현수교 또는 크레인 등의 지지와 송전선의 강심재료로 널리 사용되고 있는 재료를 사용하였고 화학적 성분분석(Atomic Emission Spectrometer, ICP) 및 탄소분석기(Elementary Analyzer)를 이용하여 화학적 조성을 분석하여 Table 1에 나타내었다.

또한 강도특성을 알아보기 위해서 10개의 시험편을 준비하였고 인장시험결과를 Figure 2에 나타내었으며 사용된 시험편은 4mm 선재로서 KS 2호 시험편 규격에 맞추어 시험하였다. 인장시험용 재료의 표면은 특수 연삭공정과 #800에서 #2000번까지의 사포를 사용하여 정밀 가공하였으며 시험 결과 5%이내의 시험오차를 가지고 있었다.

Table 1 Composition of test specimen

C	N	O	S	Cr
0.61	0.43	0.42	0.061	0.02
Cu	Mn	Co	Ni	Si
0.01	0.56	0.01	0.12	0.13

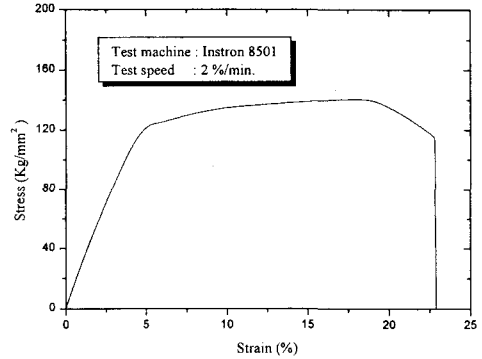


Fig. 2 Tensile property of steel wire

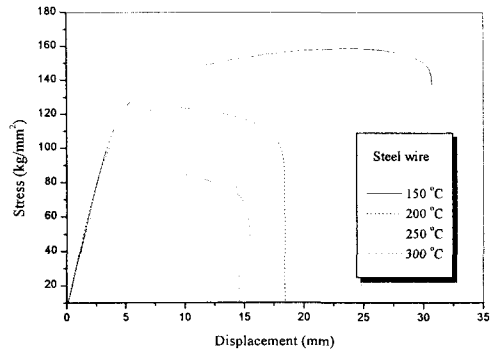


Fig. 3 Tensile properties of high temperature

Figure 3은 온도를 150, 200, 250, 300°C로 올린 다음 약 30분간 노에서 유지한 후 인장시험한 결과로서 시험기의 그림 위치를 일정하게 한 다음 시험편을 고정된 후 시험한 결과이다.

2.2 경도측정

경도측정은 미소경도측정기(Micro-Vickers Hardness tester)를 사용하였으며 Diamond saw를 이용하여 강선의 인발 방향 및 그 수직방향으로 강선을 잘라서 측정하였다. 시험조건은 500g을 15초간 유지하여 측정하였으며 0.2mm 간격으로 측정하여 표면부와 중심부의 경도치를 비교하였다.

2.3 피로시험

고강도 송전선용 강심재료 사용하기 위해서는 우수한 강도와 더불어 피로강도가 우수한 재료를 사용하여야 한다. 전선은 자체하중과 바람 등으로 인해서 연속적인 피로하중을 받게 되며 낮과

밤, 여름과 겨울에 따른 저주기 피로하중도 더불어 받게 된다.

전선의 피로과정은 좌우, 상하, 애자나 연결부에서 굽힘과 비틀림 등으로 여러 형태의 피로하중을 받게 되어 피로시험은 여러 형태로 시험되어야 한다. 본 연구에서는 인장-인장, 3점 굽힘과 4점 굽힘에 따른 강선과 7선의 stranding wire의 피로수명을 평가하였으며 시험방법은 다음과 같다.

2.3.1 인장-인장 피로시험

인장-인장 피로시험은 Instron 8501 model을 사용하여 6Hz의 속도로 피로시험을 수행하였고 신율계(extensometer)를 사용하여 변형율도 측정하였다. 또한 Instron에서 제공된 MAX를 사용하여 하중과 피로시험을 수행하였으며 이를 이용하여 수명평가에 이용하였다.

시험편의 형상은 4mm의 강선 표면을 3.8mm 직경으로 가공하고 사포를 사용하여 #800에서 #2000까지 경면으로 가공하였다. 또한 시험편과 그립 사이의 미끄럼을 방지하기 위해서 선재 시험용인 Wire Lock 제품을 사용하였으며 그립과 시험편 사이의 완전한 밀착을 확인하였다. 본 시험에서 사용한 Wire Lock 제품은 열경화성 수지로서 4mm 직경의 고강도 탄소강과 Wire Lock 제품을 5mm 내径의 일반 탄소 환봉 사이에 넣은 다음 약 1시간이상 경화 후 시험하였다. 본 제품은 Instron에서 고강도 선재의 피로시험용으로 사용되고 있는 제품으로 선재와 그립사이의 미끄럼을 완전히 없앨 수 있다고 알려져 있다.

2.3.2 Nakamura 피로시험기의 제작과 시험

인장-인장 피로시험은 단축인장상태의 조건으로 시험되지만 케이블용으로 사용되는 고강도 강선은 대부분 회전굽힘과 비틀림 응력을 받는다.

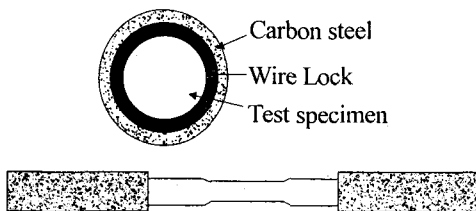


Fig. 4 Fatigue test specimen with Wire Lock

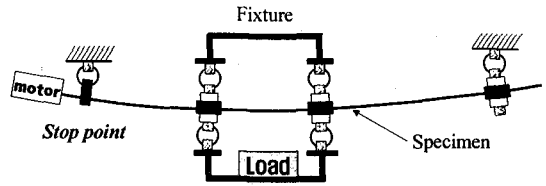


Fig. 5 Apparatus for Nakamura fatigue tester

Nakamura(中村) 피로시험은 회전굽힘 피로시험기의 일종으로서 시험편을 회전시키면서 시험편의 양쪽에 고정된 부분에 하중을 가하여 피로수명을 평가하는 형태로 구성되어 있다. 즉 시험편을 고정하는 양쪽의 부위는 2점 지지부 역할을 하고 하중을 가하는 부분은 2점에서 하중을 부과하는 형태로서 4점 굽힘 하중이 작용하게 된다. Nakamura식 피로시험은 일반적인 회전굽힘 피로시험기와 달리 활처럼 선재를 굽힌 다음 시험하는 방법으로서 Figure 5와 같은 형상이다.

2.3.3 3 점 굽힘 피로시험

Nakamura식 피로시험은 고강도 강선의 단선용 굽힘 피로시험으로 널리 사용되고 있는 방법이고 3점굽힘 피로시험은 꼬인 강선(stranding steel wire)의 굽힘 피로시험으로 널리 이용되고 있는 시험법이다. Figure 6에 나타난 것과 같이 3점 굽힘 점의 거리는 각 1000mm로 고정하고 중심점의 변위를 상하 50에서 100의 변위를 줄 경우 발생되는 피로반복수로서 피로수명을 측정한다. 여기서 사용되는 피로하중은 선재의 양단에 당기는 하중 값으로 나타내고 하중과 변위에 따라 피로강도가 결정되는 것이 일반적이다. 본 시험에서는 송전선의 강심용인 2.7mm, 7가닥으로 구성된 꼬인 강선을 사용하였으며 피로한도는 10^7 반복수로 정의하였다.

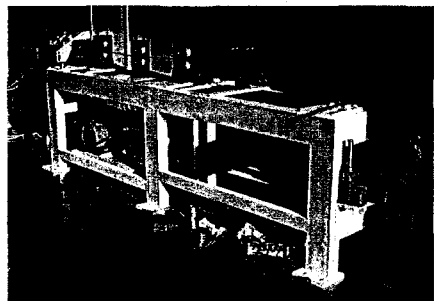


Fig. 6 Apparatus for 3 points bending fatigue tester

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 경도특성

고강도 강선의 제조과정상 열간압출로 제조된 재료를 인발공정으로 최종제품으로 제조되기 때문에 소성가공시 발생하는 표면의 잔류응력으로 인해서 표면부에서는 경도치가 다소 낮으나 표피에서 일정깊이로 접어들면서 경도가 올라간다고 알려져 있다. 이러한 경도 분포는 소성가공으로 인해서 발생된 소성에너지의 평형으로 인해서 발생되며 내부의 단면에서 발생하는 응력의 분포를 모두 조합하면 인장과 압축의 조합이 된다. 본 연구에서 측정한 값은 강선의 길이방향과 길이방향의 수직면을 따라 자른 면의 경도치이며 직경 3mm의 경도치이므로 표피의 영향을 고려하여 중심에서 표피에서 약 0.5mm까지의 경도치만 측정하였다.

Figure 7에 나타난 것과 같이 표피부와 중심부의 경도치보다는 표피와 중심부 사이의 경도치가 가장 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며 이러한 특징은 인발에 의해 발생된 소성변형의 영향으로 알려져 있다.

3.2 피로특성

피로시험은 고강도 강선을 대상으로 응력비 $R=0.5$ 의 인장-인장 피로시험, 응력비 $R=-1$ 인 Nakamura식 피로시험을 수행하였으며 7가닥의 stranding wire을 대상으로 3점 굽힘 피로시험을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

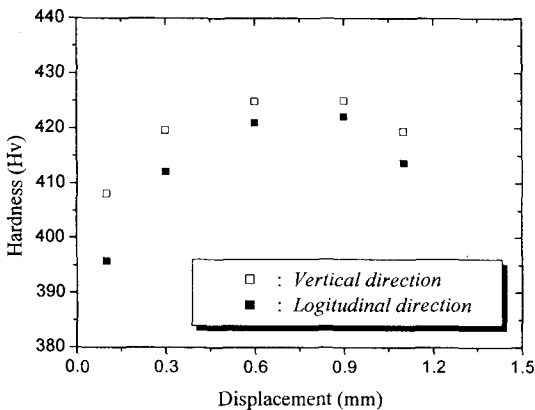


Fig. 7 Vickers Hardness with surface location

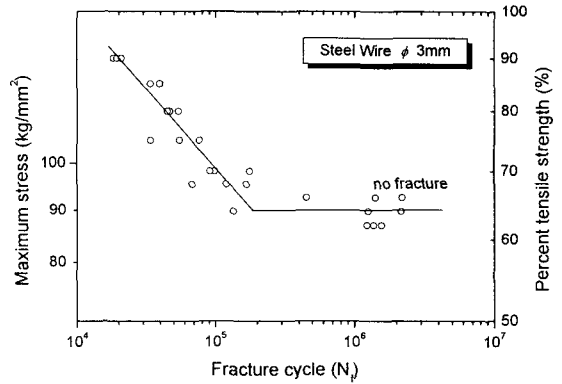


Fig. 8 S-N diagram for steel wire

3.2.1 인장-인장 피로특성

직경 4mm의 선재의 피로시험은 표준시험편의 규격에 맞춰서 시험할 수 없으므로 그 특성을 정량화하기가 어렵다. 시험재료는 8mm직경에서 4mm로 인발에 의해서 가공되었으며 가공경화에 의해서 강도를 높이는 공정이다. 제조된 강선의 특성을 정확히 측정하기 위해서는 최대한 변형없이 가공되어야 하므로 연삭과 사포를 이용하여 시험편을 가공 후 피로시험을 시행하였다.

본 시험에서 사용한 시험편은 각 응력영역에서 각각 3개씩 시험하였으며 피로한도는 인장강도의 65%이었다. 다음 식은 S-N곡선에서 기울기를 측정된 결과이다.

$$\log \sigma_{\max} = 2.713 - 0.143 \log N_f \quad (1)$$

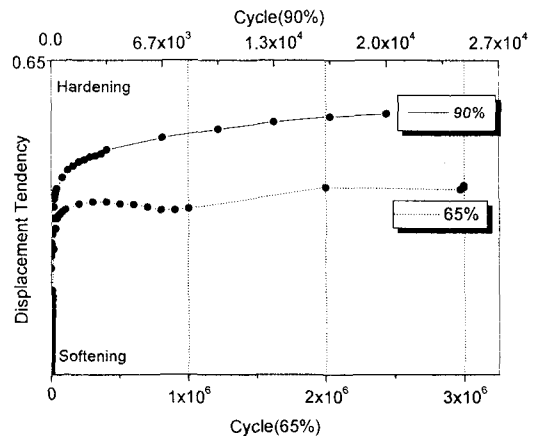


Fig. 9 Relation between displacement and cyclic number

Figure 9는 피로시험과정에서 얻어진 변형과 피로 반복수의 관계를 나타내고 있으며 Hollomon 식을 이용하여 가공경화의 정도를 확인할 수 있었고 다음 식과 같다.

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2)$$

Figure 9에서 알 수 있듯이 피로시험 중 가공량이 다소 많은 90% 인장강도의 변위가 65% 인장강도의 변위 변화보다 큰 것을 알 수 있으며 이것은 가공경화에 의한 효과가 더 크다고 할 수 있다. 또한 항복강도와 인장강도의 비가 1.4이상이면 가공경화가 지배적이라는 Manson의 정의를 이용한 결과 가공경화가 지배적인 2.0의 수치를 얻을 수 있었다.

Figure 10은 피로시험 결과 파면 사진으로서 SEM을 이용하였으며 표면부의 가공경화에 의해서 중심부와 많은 차이를 가지고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 Nakamura 피로특성

선재의 회전 굽힘 피로특성을 측정하는 Nakamura 피로시험은 회전부와 재료사이의 마찰을 보호할 수 있게 고무소재의 부싱을 사용하여 실험하였으며 40Hz의 속도로 10^7 회까지 시험하였다.

Nakamura 피로시험에서 최대응력은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{\max} = \frac{16WL}{\pi d^3} = 5.095 \frac{WL}{d^3} \quad [\text{kg/mm}^2] \quad (3)$$

여기서 W는 수직하중(kg), σ_{\max} 는 최대응력(kg/mm^2), L은 지지점과 회전부 사이의 거리로서 200mm이고 d는 시험편의 직경으로서 4mm이다.

Figure 11은 시험결과를 나타내고 있으며 회전 굽힘응력을 받는 조건에서 피로시험을 수행하게 되며 응력비 R=-1의 값을 가지게 된다. 즉 인장-인장 피로특성과 Nakamura 피로특성 결과를 분석해 보면 하중방향과 R 값의 차이를 가지게 된다. 이러한 특성을 이용하여 Gerber, Goodman, Solderberg선도에 나타낸 결과를 Figure 12에 나타내었으며 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

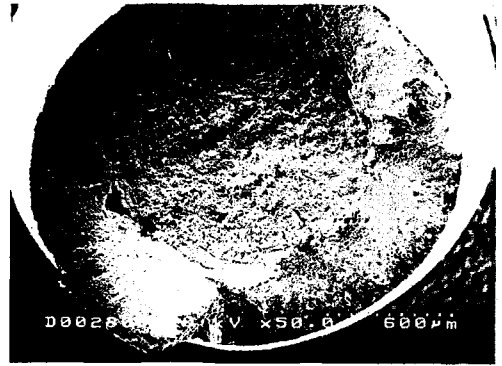


Fig. 10 Fatigue Fracture surface of steel wire

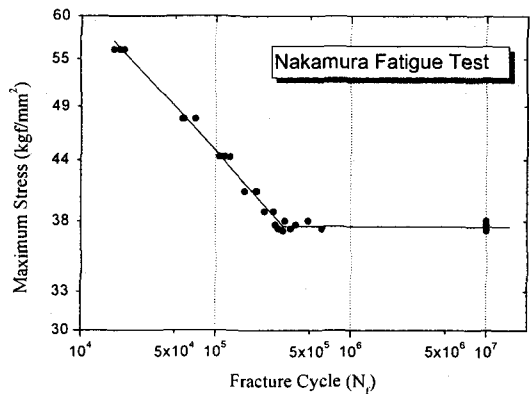


Fig. 11 S-N diagram by Nakamura fatigue tester for steel wire

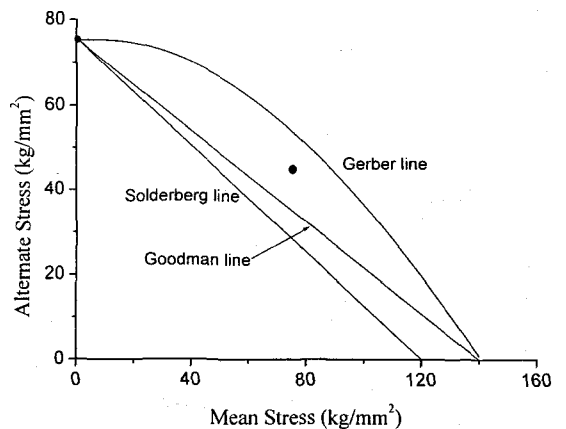


Fig. 12 Relation between mean stress and alternate stress for fatigue limit

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left[\frac{\sigma_m}{S_u} \right]^n = 1 \quad (4)$$

여기서 σ_a 는 변동응력, S_e 는 평균응력이 영(zero)상태의 피로한도, S_u 는 항복응력, σ_m 은 평균응력을 나타내고 Solderberg 선에서는 S_u 대신 항복응력인 S_y 를 사용한다.

Figure 12에서 알 수 있듯이 일반적으로 많이 사용하는 Goodman 선도에서 피로한도 영역 내에서 벗어나는 부분에 시험 결과가 있음을 확인하였고 본 연구에서는 Gerber의 피로한도 영역을 이용하여야 적절하다는 것을 알 수 있었다.

3.2.3 3점 굽힘 피로특성

3점 굽힘 피로시험은 단선의 강선을 대상으로 시험한 Nakamura 피로시험과 달리 7가닥의 단선을 이용하여 제조된 stranding wire의 굽힘피로강도를 해석하는 수단으로 많이 이용되고 있으며 본 연구에서도 송전선으로 사용하기 위해서 사용하는 시험기를 제조하여 시험하였으며 Figure 13과 같다.

7가닥의 stranding wire를 대상으로 시험한 3점 굽힘 피로시험의 결과로부터 피로한도는 약 38kg/mm^2 의 응력임을 확인하였으며 본 시험은 6Hz, $\pm 8\text{mm}$ 의 진폭에서 시험한 결과이다. 본 시험 결과는 단선으로 대상으로 시험한 결과와 달리 진폭의 변화에 따른 7가닥사이에서 미끄럼이 발생할 수 있으며 $\pm 12\text{mm}$ 의 시험결과 진폭이 일정 수치 이상이면 강선사이의 미끄럼과 소성역이 발생하여 파괴됨을 확인할 수 있었다.

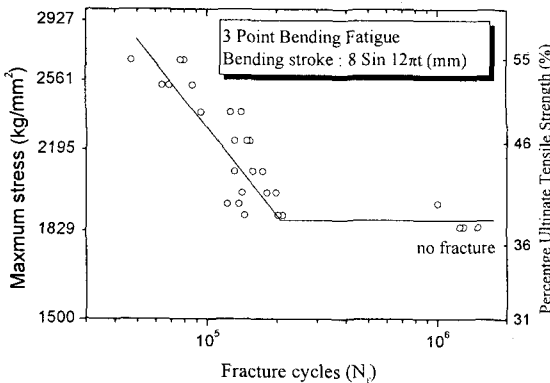


Fig. 13 S-N diagram by 3 points bending fatigue test for steel wire

3. 결론

크레인, 교량, 송전선용 강심재료로 널리 사용되고 있는 강선을 대상으로 피로특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인발에 의해 제조된 강선 단면의 경도는 길이 방향보다 수직방향의 경도치가 높았으며 최대 비커스 경도 값은 중심부에 비해서 약 30정도 높았다.
2. 항복강도와 인장강도의 비로서 가공경화를 측정하는 Manson의 법칙에 따르면 강선은 가공경화의 정도가 큰 값인 2.0의 수치를 가졌다.
3. 인장피로한도와 Nakamura 피로한도사의 관계로부터 평균응력에 따른 피로한도 곡선에서 강선의 경우 Gerber 곡선을 사용하는 것이 좋은 결과를 가질 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Robert M. Brunair, 1988, "An experimental evaluation of S-N curves and validity of miner's cumulative damage hypothesis for an ACSR conductor" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No.3, pp.1131-1140
- (2) Gibson, P. T., 1993, "Bending fatigue tests of ropes and cables", Proceedings, MTS'93, MTS
- (3) D.G. Havard, 1992, "Aged ACSR conductors", IEEE Transaction on Power Delivery, Vo.7, No.2, pp.581-587
- (4) 서창민, 김경렬, 1997, "세라믹 코팅된 1Cr-1Mo-0.25V강의 피로균열성장 특성", 대한기계학회논문집(A) 제 21권, 10호, pp.1674-1682
- (5) C.M.Suh, J.J.Lee, Y.G.Kang, H.J.Ahn & B.C.Woo, 1992, "A Simulaton of the Fatigue Crack Process in Type 304 Stainless Steel at 538 C", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.15-7, pp671-684
- (6) 김상수, 우병철, 김병걸, 이희웅, 김봉서, 1999, "가공송전선(ACSR)용 강선의 피로특성", 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp.90-95