

# 고 강도 극 세선의 피로 특성 향상을 위한 특정 인자 제시

양요셉<sup>1</sup> · 배종구<sup>2</sup> · 박찬경<sup>#</sup>

## Critical Parameters to Improve the Fatigue Properties in the High Carbon Steel Wires

Y. S. Yang, J. G. Bae, C. G. Park  
(Received October 11, 2007)

### Abstract

The governing parameters affecting the fatigue properties have been investigated experimentally in the high carbon steel wires with 0.94 wt.%C. In order to find the crucial factors, the advanced analysis techniques such as optical 3-D profiler, focused ion beam(FIB) and transmission electron microscope(TEM) were used. The two-type steel wires with different drawing strain were fabricated. The fatigue properties were measured by hunter rotating beam tester, specially designed for thin-sized steel wires. It was found that the fatigue properties of the steel wires with high drawing strain was higher than that with other wires because of low residual stress and high adhesion condition of brass coating layer.

**Key Words** : Fatigue Properties, Residual Stress, Surface Defect, Microstructure, Hyper-eutectoid Steel Wire

### 1. 서 론

고 탄소 pearlitic 강선은 비정상적인 가공 경화율(work hardening rate)로 인하여 상온 신선을 거칠 경우 높은 강도 특성을 보인다[1~4]. 따라서 우수한 강도 특성을 요구하는 트럭/버스 용 타이어의 카카스 및 벨트 부분에 보강재(steel cord)로 사용된다. 일반적으로 스틸 코드는 극 세선을 만들기 위한 다단의 신선(drawing), 미세 펄라이트를 형성시키기 위한 열처리(patenting) 및 코드를 만들기 위한 연선(stranding)의 공정을 거쳐 제조된다.

최근 환경에 대한 관심과 각종 규제가 증가되면서 경량화를 통한 에너지 절감 연구가 활발히 진행되고 있으며 스틸 코드 또한 극 세선의 강도 향상을 통해 경량화를 이루고 있다. 극 세선의 강도는 1960년대 제안된 Embury-Fisher의 제안식[5]에 따라 (i) 펄라이트 층간 간격의 감소 및 (ii) 신

선 가공량 증가를 통해 증가된다.

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k_p}{\sqrt{2\lambda_p}} \exp\left(\frac{\varepsilon}{4}\right) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_0$ 는 마찰 응력,  $k_p$ 는 Hall-Petch 상수,  $\lambda_p$ 는 초기 펄라이트 층간 간격( $\lambda_p$ ),  $\varepsilon$ 는 신선 가공량이 다.

극 세선은 정적 응력이 작용하는 환경이 아닌 인장과 압축 응력이 반복적으로 작용하는 동적 환경에서 사용되기 때문에 고 강도 외 우수한 굽힘 피로 특성 (bending fatigue property)을 필요로 한다. 기존 연구자들은 피로 특성에 영향을 미치는 인자로 펄라이트 층간 간격[1,5], 비정상 세멘타이트[6], 표면 결함[7] 등을 제시하였다. J. Llorca[2] 등은 고 강도를 갖는 극 세선 제조시 다이스(dies)에 의해 표면 결함이 쉽게 표면에 형성되고 이로 인해 낮은 응력에서도 파괴되어 피로

1. 포항공과대학교  
2. 고려제강 기술연구소  
# 교신저자 : 포항공과대학교, cgpark@postech.ac.kr

특성이 저하된다고 보고하였다. 그러나 최근 신선 제조법 발달로 인해 표면에 형성되는 표면 결함 크기 및 분포가 적기 때문에 이의 영향은 미흡하다. 따라서 극 세선의 피로 특성에 영향을 미치는 인자 규명을 통해 문제점을 찾아내고 이를 통해 공정의 개선 방법을 해결할 필요가 있다.

본 연구에서는 극 세선의 피로 특성에 영향을 주는 인자 고찰 및 규명을 목표로 한다. 이를 위하여 선경이 다른 두 극 세선(0.21mm, 0.185mmφ)을 신선 가공량에 차이를 두어 제조하였다. 극 세선의 기계적 특성 평가 후 광학 3-D profiler, TEM, FIB 등의 최신 분석기기를 사용하여 피로 특성에 영향을 미치는 핵심 인자 고찰 및 규명을 시도하였다.

## 2. 실험 방법

열간 압연된 5.5mmφ 봉형의 강선을 본 소재로 하여 극 세선으로 가공하였고 Fe-0.94C-0.2Cr-0.44Si-0.28Mn-0.0036S-0.007P 를 합금 조성으로 하였다. 1×0.21+18×0.185 구조를 갖는 스틸 코드에 사용되는 극 세선이기 때문에 0.185, 0.21mmφ 두 선경을 시험재로 선택하였다. 신선 가공량(ε)에 차이를 두어 극 세선을 제조하였으며 자세한 조건은 표 1에 나타내었다.

극 세선의 피로 특성을 측정하기 위하여 스틸 코드용 굽힘 피로 시험기인 Hunter rotating beam 피로 시험기(Fig. 1)를 사용하였으며 인장 강도의 30%에 해당하는 1550MPa 외부 응력 하에서 피로 실험을 수행하였다. 상온 인장 시험기(Instron 4206)를 이용하여 강도 특성을 평가하였으며 cross head speed는 0.83mm/sec 조건에서 실시 하였다.

표면 결함 분석을 위하여 비 접촉 식 방법인 광학 3-D profiler(wyko NT1100)를 이용하였으며 45×60μm<sup>2</sup> 영역을 분석하였다. 극 세선의 길이 방향에 존재하는 응력은 이미 소성가공학회 지를

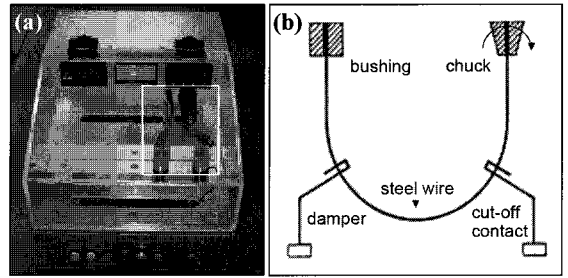


Fig. 1 (a) Automated hunter rotating beam fatigue tester, specially designed for thin-sized steel wires and (b) schematic diagram showing the several components

발표된 ‘FIB-DIC’법을 이용하여 측정되었다. 이에 SEIKO 사의 듀얼빔 FIB(SEI 3050)와 correlated solutions 사의 VIC-2D 가 사용되었다. 표면 코팅 층과 소재 금속(펄라이트)의 계면 분석을 위하여 JEOL 사의 TEM (JEOL 2100 LaB<sub>6</sub>)가 사용되었으며 TEM 시편은 FIB(SEI 3050)를 이용하여 제조되었다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 강도 및 굽힘 피로 특성

신선 가공량에 차이를 두어 제조된 극 세선의 기계적 특성 결과를 Fig. 2 에 나타내었다. A 가공법을 사용하여 제조된 극 세선(A-1, A-2)이 B 가공법을 통하여 제조된 극 세선 (B-1, B-2)에 비해 상대적으로 높은 강도치를 나타내었다. 여기서 A 가공법은 B 가공법에 비해 신선 가공량이 높다. 얻어진 결과는 앞에서 언급한 Embury-Fisher 관계식 (1)에 크게 의존하는 것으로 보인다. 즉, 신선 가공량이 높을수록 강도는 증가하기 때문에 신선 가공량이 높은 A 가공법으로 제조된 극 세선이 높은 강도치를 보인다.

Fig. 2(b)는 인가 응력 1550MPa 에서 극 세선의 피로 특성을 나타낸다. A 가공법을 통해 제조된 극 세선(A-1, A-2)이 B 가공법에 비해 제조된 극 세선(B-1, B-2)에 비해 우수한 것으로 확인되었다. A 가공법을 통해 제조된 시험재는 10<sup>6</sup> 회(=타이어 피로 수명)에 근접한 값을 갖지만 B 가공법을 통해 제조된 시험재(B-1, B-2)는 1000 싸이클 수로 매우 낮은 피로 특성을 갖는다. 또한, 거의 비슷한 신선 가공량을 갖는 경우(A-1, A-2)에도 피로 특성에 큰 차이가 있는 것으로 확인되었다.

Table 1 Fabrication conditions of the steel wires

		P.W. (mmφ)	F.W. (mmφ)	Drawing strain (ε)
A	-1	1.220	0.185	3.77
	-2	1.404	0.21	3.80
B	-1	1.131	0.185	3.61
	-2	1.131	0.21	3.36

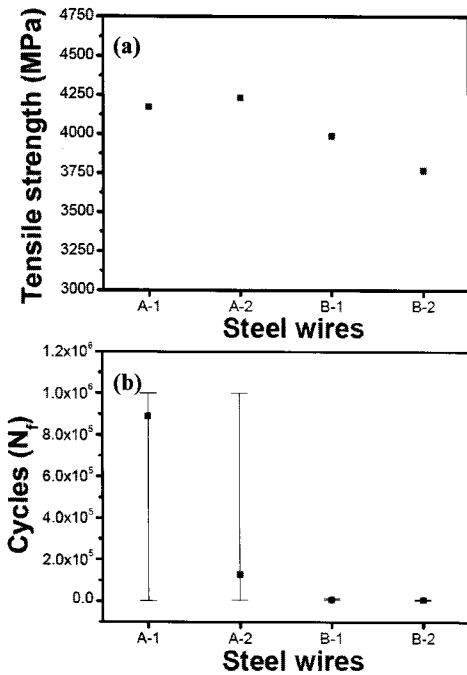


Fig. 2 Behavior of the mechanical properties of the steel wires depending on the drawing strain; (a) tensile strength, (b) fatigue property

즉, A-1 시험재는  $\sim 9 \times 10^5$ 의 평균 사이클 수를 A-2 시험재는  $\sim 1 \times 10^6$ 의 평균 사이클 수로 A-1 이 A-2에 비해 피로 수명이 크다.

일반적으로 피로 특성은 강도와 밀접한 관계가 있어 강도의 증가는 피로 특성을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 우수한 강도를 갖는 시험재 (A-1, A-2)가 B 가공법을 통해 제조된 극 세선에 비해 우수한 피로 특성을 갖는 것은 당연한 사실이다. 그러나 강도가  $\sim 200\text{MPa}$ 의 차이를 보이는데 반해 피로 특성은 매우 큰 차이를 보인다. 또한, 거의 유사한 신선 가공량을 갖는 A-1, A-2 시험재 에서도 9 배 정도의 피로 특성 차이를 보이는데 이에 영향을 미치는 인자 고찰이 필요하다.

### 3.2 표면 결함

광학 3-D profiler를 이용하여 분석한 극 세선의 대표적인 표면 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 본 여충 10번의 분석을 시도하였다. 사진에 나타난 영역은  $45 \times 60 \mu\text{m}^2$ 로 시편에 상관없이 일정하다. 모든 극 세선 표면에 신선 시 다이스(dies)에 의해 형성된 표면 'grooves'가 존재하였다. A-1 극 세선

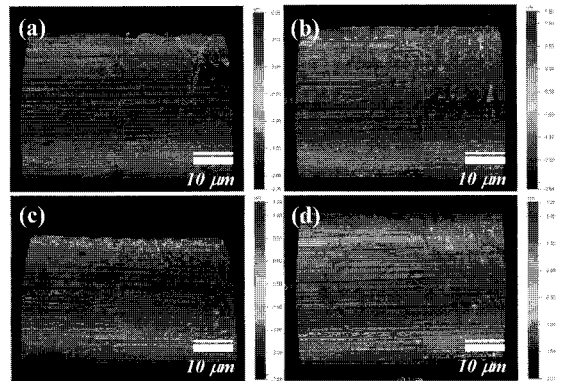


Fig. 3 3-D interferometric images of the steel wires; (a) A-1, (b) A-2, (c) B-1, (d) B-2

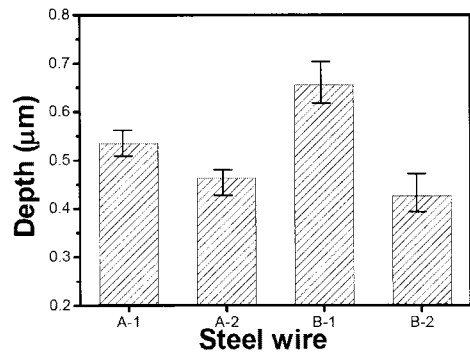


Fig. 4 Depth of grooves formed on the surface of the steel wires

표면에서 scratch가 부분적으로 관찰되었다. 표면 grooves를 포함하여 깊이 파인 부분을 선택하여 깊이 방향으로의 결함 깊이를 측정하였으며 이의 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 극 세선의 크기, 신선 가공량에 상관없이 결함 측정 시 큰 오차 범위를 보였으며, 결함은 약  $0.4\sim 0.6 \mu\text{m}$ 의 크기를 갖는 것으로 측정되었다. 이는 결함은 가공법 즉, 신선 가공량에 크게 영향을 받지 않은 것을 의미한다.

I. Verpoest 등은 선경이 큰 봉형 선재에 있어 마이크로 결함이 존재하면 이의 영향에 의해 피로 특성은 감소하는 것으로 보고한 바 있다[7]. 이는 결함이 피로 특성에 미치는 영향이 큰 것을 의미하는데 본 연구에서 형성된 결함이  $1 \mu\text{m}$  이하로, 피로 시험 시 결함 형성 억제층 역할을 하는 황동층에 형성되었기 때문에 결함의 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

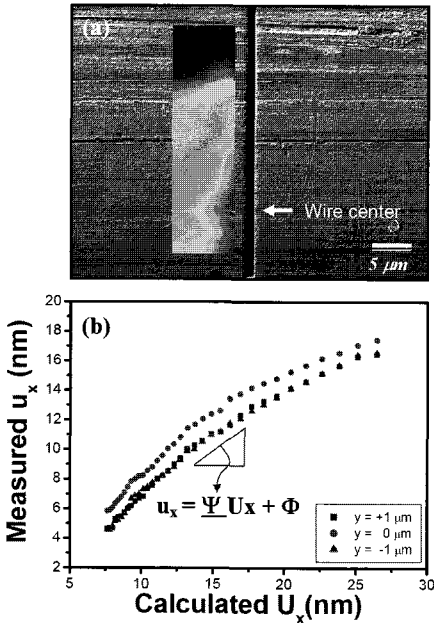


Fig. 5 (a) Typical photographs showing the contour in the displacement fields and (b) comparison between the measured displacement and calculated displacement

Table 2 Summary of the equation and residual stress obtained from the steel wires

	Equation ( $u_x = \Psi U_x + \Phi$ )	Residual stress (MPa)
A	-1 $u_x = 0.24447U_x + 22.52$	244.47
	-2 $u_x = 0.69680U_x + 35.59$	696.80
B	-1 $u_x = 0.91929U_x - 1.250$	919.29
	-2 $u_x = 0.62172U_x + 8.480$	621.72

### 3.3 표면 잔류 응력

Fig. 5 는 FIB-DIC 법을 이용하여 측정된 잔류 응력 측정 결과를 보여준다. 본 저자는 이 방법을 이용한 극 세선에서의 잔류 응력 측정을 이미 자세히 소개한 바 있다[8]. Fig. 5(a)는 FIB 이온 빔에 의해 형성된 슬롯 주변에서의 응력 변위장을 contour map 으로 나타낸다. Fig. 5(b)는 극 세선 중심 부근의 특정 영역( $y=+1, 0, -1\mu\text{m}$ )에서 측정된 변위값과 가상 응력  $\sigma_{VS}=-1\text{GPa}$  이 존재할 때 가상 변위( $U_x$ )와 실제 변위( $u_x$ )을 비교해 놓은 것이다. 여기서 기울기 ( $\Psi$ )는 잔류 응력( $\sigma_R$ )을 의미하며,  $y$  절편( $\Phi$ )인 SEM 이미지 작업 시  $x$  방향으로

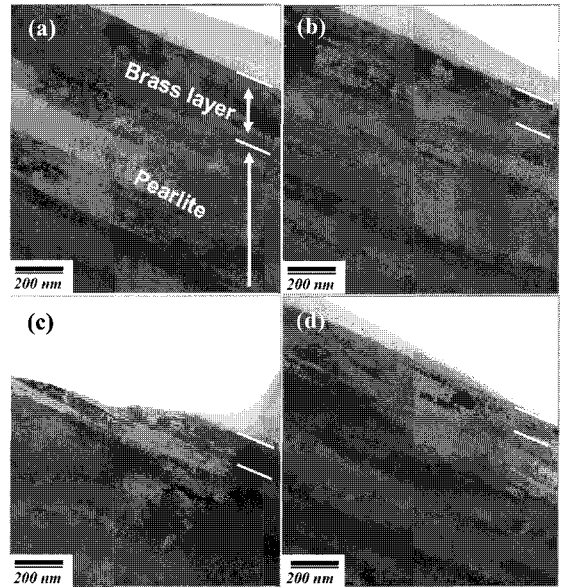


Fig. 6 TEM micrographs showing both pearlite and brass coating layer in the steel wires; (a) A-1, (b) A-2, (c) B-1, (d) B-2

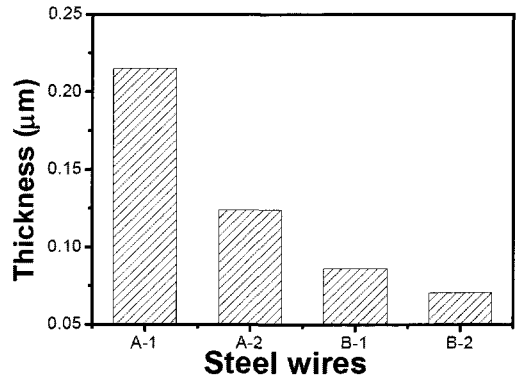
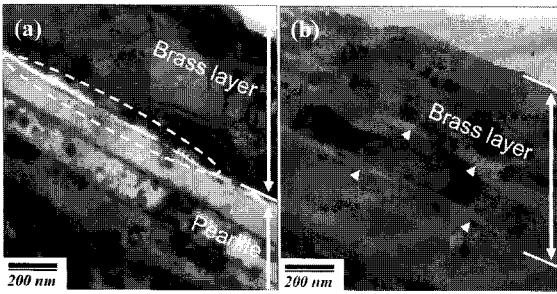


Fig. 7 The thickness of brass coating layer in the steel wires

의 병진 운동이 발생해서 나타난 흠어짐을 의미한다.

측정된 잔류 응력치를 정리하여 표 2 에 나타내었다. 인장 잔류 응력이 모든 시험체의 표면에 형성되어 있는 것으로 확인되었다. A-1 극 세선의 잔류 응력은 다른 극 세선과 비교 했을 때 가장 낮은 값인 244.4MPa을 갖는데 이의 피로 특성은 다른 극 세선의 특성 치보다 높은 것으로 보아 피로 특성에 크게 영향을 미치는 인자는 신선 제



**Fig. 8** TEM micrographs showing the conditions of brass layer. Fig. (a) shows the cracks along the interface between pearlite and coating layer. Several small cracks are found in coating layer (b)

**Table 3** ICP results in all steel wires

	A-1	A-2	B-1	B-2
g/kg	5.02	5.00	5.05	5.05

조 시 발열 현상, 다이스 형상, 조건 등에 영향을 받는 잔류 응력은 판단할 수 있다. 즉, 낮은 인장 잔류 응력은 굽힘 응력이 인가되었을 때 표면 결합에 응력이 집중되는 것을 억제시켜 비교적 높은 하중에서도 파괴되지 않도록 한다.

또 다른 잔류 응력에 영향을 미치는 미세 (minor) 인자가 있는 것을 A-2와 B-2의 길이 방향에 존재하는 잔류 응력치과 굽힘 피로 특성의 비교를 통해 확인하였다. 극 세선 A-2와 B-2의 잔류 응력치는 각각 696.8과 621.7 MPa로 인장 잔류 응력에는 큰 차이가 없었으나 Fig. 2(b)에서 보인 바와 같이 굽힘 피로 특성은 큰 차이를 보인다.

### 3.4 황동층의 영향

신선 시 필요한 연성을 추가하고 스틸 코드와 고무의 접착을 좋게 하기 위하여 시효 확산법을 이용하여 황동을 소재 금속에 코팅시킨다. 또한, 최종 극 세선에서의 황동층은 소재 금속에 존재하는 표면 groove에 응력의 집중을 줄여 낮은 응력 하에서 균열이 형성되는 것을 방지한다.

Fig. 6은 모든 극 세선의 표면 황동층과 소재 금속인 펄라이트를 보여주는 TEM 사진이다. FIB를 이용하여 TEM 시편을 제조하였기 때문에 황동층 위에 복합 탄소 층(compound C layer)가 부분적으로 존재하였다. 극 세선에 따라 황동층 두께가 다

른 것을 알 수 있는데 A 가공법에 비해 B 가공법을 통해 제조된 B-1, B-2의 황동층의 두께가 작은 것으로 확인되었다. 두께 측정 결과 (Fig. 7) A-1, A-2는 0.214, 0.124  $\mu\text{m}$ 이었으며 B-1, B-2는 약 0.080  $\mu\text{m}$ 로 큰 차이를 보였다. 그러나 TEM은 국부적인 영역을 관찰 하여 전체를 대변하기 어려우므로 전체 성분 분석을 통한 고찰이 필요하다. 표 3은 ICP 분석을 통한 극 세선의 표면에 존재하는 황동층 양을 보여준다. 모든 시험재에서 약 5.02 g/kg 도금층이 형성되어 있었다. 따라서 TEM 분석 결과에 따른 극 세선 표면에 형성된 황동층 두께 편차는 국부적인 영역 해석인 것으로 보이며 실질적으로는 거의 동일한 양의 황동층이 존재하는 것으로 판단된다. 이는 황동 도금층 두께가 굽힘 피로 특성에 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다.

B 가공법을 통해 제조된 극 세선의 미세 조직 및 코팅층 상태를 TEM으로 분석하였다. Fig. 8 (a)는 황동층과 소재 금속과의 집합상태를 보여주는 데 B-2 극 세선의 경우, 황동층이 소재 금속과 분리되어 있는 것으로 확인되었다. Fig. 8 (b)는 황동층 내 다수의 균열이 존재하는 것을 보여주는데 이러한 결합의 존재는 황동층이 균열 방지막 형성을 하지 못하여 동일 응력이 주어졌을 때 균열 형성을 억제하지 못하여 피로 특성을 악화시킨 것으로 보인다.

## 4. 결론

본 연구에서는 극 세선의 피로 특성에 영향을 미치는 인자 규명을 위하여 신선 가공량을 달리 하여 선경이 다른 극 세선을 제조하였다. 최신 기기를 이용하여 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 신선 가공량을 달리하여 선경이 다른 극 세선을 제조하였으며 신선 가공량이 많은 극 세선이 적은 극 세선에 비해 우수한 기계적 특성 (강도, 피로)을 나타내었다.
- (2) 표면 결합은 황동층이 입혀진 극 세선의 피로 특성에는 영향을 미치지 않는다. 정상적인 황동층이 형성된 극 세선의 피로 특성은 표면 잔류 응력에 영향을 크게 받는다. 피로 특성을 향상시키기 위해서는 200~600MPa의 낮은 잔류 응력을 표면에 형성시켜야 한다.
- (3) 황동층은 피로 특성을 향상시키기 위하여

열처리 중 표면 처리하지만 소재 금속과의 낮은 접합성, 황동 층 내 균열 형성은 피로 특성을 저하시키는 역할을 한다.

### 후 기

본 연구가 진행되도록 시편 제조와 연구비 지원을 해준 고려제강㈜ 기술연구소(KISWIRE R&D center), 포항 나노 집적 센터(NCNT), 국가 핵심 연구 센터(NCRC)와 BK21에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] M. Dollar, I. M. Bernstein, A. W. Thompson, M. Shemanski, 1988, Influence of deformation substructure on flow and fracture of fully pearlitic steel, *Acta Metall.*, Vol. 36, pp. 311~320.
- [2] J. LLorca, V. Sanchez-Galvez, 1989, Fatigue limit and fatigue life prediction in high strength cold drawn eutectoid steel wires, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 12, pp. 31~45.
- [3] Y. S. Yang, J.G. Bae, C.G. Park, 2007, Measurement of the Residual Stress in the Steel Wires by using Focused Ion Beam and Digital Image Correlation Method, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 16, pp.323-328.
- [4] W, J. Nam, K. T. Park, J. Y. Chung, 2004, Development of Steel Wires for Bridge Cables, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 13, pp.479-483.
- [5] J. D. Embury, R. M. Fisher, 1966, K. Katagiri, T. Sato, H. S. Shin, L. Takahashi, H. Tashiro, S. Sasaki, 1997, Effects of drawing strain and bluing on the fatigue strength of eutectoid steel wires, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 20, pp. 1677~1686.
- [6] K. Katagiri, T. Sato, H. S. Shin, L. Takahashi, H. Tashiro, S. Sasaki, 1997, Effects of drawing strain and bluing on the fatigue strength of eutectoid steel wires, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 20, pp. 1677~1686.
- [7] I. Verpoest, E Aernoudt, A Deruyttere, M De Bondt, 1985, The fatigue threshold, surface condition and fatigue limit of steel wire, 1985, *Int. J. Fatigue* Vol.7, pp.199-214.
- [8] Y. S. Yang, J. G. Bae, C. G. Park, 2007, Measurement of residual stress by using focused ion beam and digital image correlation method in the thin-sized wires used for steel cords, *J. of Physics*(under review)