

탄소주강품과 경강선재간의 미끄럼 마멸특성

류중복[†] · 채영훈* · 김석삼^{**‡}

경북대학교 대학원 기계공학과, *경북대학교 트라이볼로지연구소, **경북대학교 기계공학부

The Sliding Wear Characteristics of the Carbon Steel Castings against High Carbon Steel Wire Rods

Jung-Buk Ryu[†], Young-Hun Chae* and Seock-Sam Kim^{**‡}

Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

Engineering Tribology Research Institute Kyungpook National University

^{**}Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

Abstract – The sliding wear characteristics of the crane sheave were investigated using a pin-on-disk rig tester. The experiment was conducted using a high carbon steel wire that was upper material, also carbon steel castings that was disk material. There are various operating conditions in this work. At the room temperature, we carried out the wear test under a grease lubrication and dry condition. The results of wear test showed that an annealed-casted have lower, also the wear curves are linearly increased with increasing of sliding distance. For the specific wear rate of annealed-casted, the wear resistance was increased with decreasing diameter of wire. The wear of a wire and a disk have a different mechanism, the one is the abrasive wear due to fatigue wear under lubrication, another is the adhesion wear under dry condition.

Key words – crane, sheave, wire-rope, pulley, carbon steel castings, high carbon steel wire rods.

1. 서 론

산업현장에서 화물운반 장비로 사용되고 있는 크레인(Crane)[1-2]은 전 산업부문에서 효용성이 높은 대표적인 운반 장비이다. 이와 같이 크레인은 생산공정과 밀착된 연관성을 가지면서 기업의 제조원가에도 중요한 영향을 미치기도 하며, 또한 안전사고의 위험성도 내포하고 있다. 최근 3개년 간에 걸쳐서 사용빈도가 가장 높은 동력크레인에서만 440명이 작업 중에 중·경상해를 입었으며 특히, 크레인의 시브(Sheave)[3]등 기계장치에 의한 사고가 20%나 차지하고 있는 점을 비추어 볼 때, 이는 막대한 인적, 경제적 손실까지 유발하고 있음을 알 수 있다[4]. 크레인 시브의 작동조건으로는 와이어로프(Wire-rope)[5]를 안내하는 홈 붙이 풀리(Pulley)구조의 마찰, 마멸의 요구특성으로 인하여, 사용

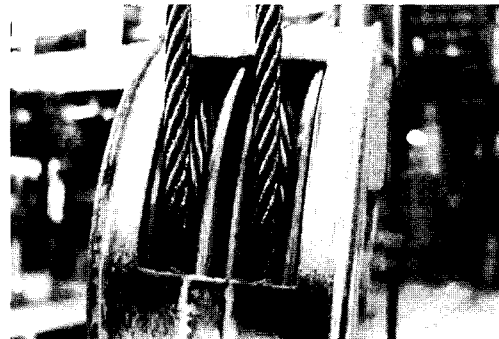


Fig. 1. A surface damage of sheave.

중에는 시브홈과 로프간의 접촉압력에 의해 Fig. 1과 같은 어브레시브 마멸(Abrasive Wear)을 나타내 보이기도 한다. 특히 미국 철강협회에서 분석한 자료에 의하면, 시브와 로프간의 마멸요인으로 높은 접촉압력, 충격력 및 미끄럼접촉의 반복에 따른 하중조건의 변화, 시브의 열처리 불만족 및 부적절한 윤활 등이 주요 문제점인 것으로 보고하고 있다[6]. 이렇듯 시브와 와이어로프간

[†]주저자 : jbyoo@korea.com

[‡]책임저자 : sskim@knu.ac.kr

의 기존 연구 활동으로는 주로 와이어로프의 피로수명 등으로 집중적인 연구가 시도되어 왔을 뿐, 시브의 내마멸성에 대한 체계적인 연구는 미흡한 실정에 있다. 그러므로 이러한トライ볼로지 분야에 대하여 산업현장에서 가장 많이 사용하고 있는 탄소주강품[7] 시브와 경강선재[8] 소선간에 미끄럼 마멸특성의 연관성을 규명하는 것이 무엇보다도 중요하다 하겠다. 이와 더불어 탄소주강품 시브의 내마멸성 향상과 부품의 수명연장을 위한 방법으로는 시브홈에 고주파 표면 경화처리를 하거나 어닐링 처리를 거친 다음, 사용단계에서는 극압제 그리이스(Grease) 도포 등이 적극 권장되고 있다.

따라서 본 연구는 탄소주강품 시브와 경강선재간 트라이볼로지적 연구 활동이 미흡한 실정을 감안하여 윤회와 무윤회조건에서 탄소주강품의 마멸특성을 조사하고 또한, 어닐링처리 후의 마멸기구를 관찰하고자 한다.

2. 실험

2-1. 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 하부 시험편은 Table 1과 같은 화학성분과 기계적 성질을 가진 탄소 주강품(SC 46)으로서 크레인 시브의 재질로 산업현장에서 가장 널리 사용되고 있다. 탄소 주강품 시험편의 표면성상을 확인하기 위하여 완전어닐링(full annealing)을 실시하였다. 일반적으로 탄소 주강품은 어닐링 처리없이 주조상태로 사용하면 잔류응력과 조직의 조대로 인해 마멸현상이 심하게 발생한다[9]. 시험편에 적용한 어닐링처리 방법은 시험편을 열처리로에 넣고, 시간당 200°C 미만으로 승온하여 1.5시간동안 850°C로 유지 한 다음, 서서히 냉각시켰다. 시험편은 1차 연삭하여 형상 및 크기를 같게 가공하고, 연마지를 #600Cw, #800Cw, #1000Cw, #1200Cw 순으로 물을 묻혀서 0.5 μm Rmax (최대 표면 조도)로 연마하였다. 시험편의 형상과 크기는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 하부 시험편은 직경

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of specimen

Chemical element	C	P	S
Composition (wt.%)	0.24	0.018	0.017
Mechanical properties	UTS (Mpa) 473.3	YP (Mpa) 267.3	Elongation (%) 30.2
Hardness	Annealed-casted 180(Hv)		

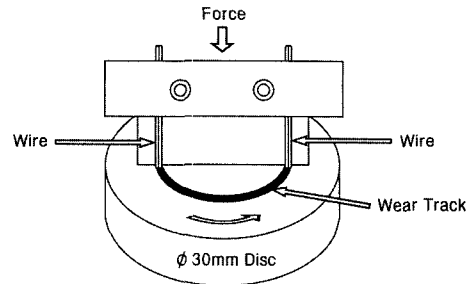


Fig. 2. Schematic illustration of pin on disk rig wear tester.

30 mm, 두께 8 mm의 원판으로 제작하였다. 어닐링 처리한 시험편의 표면 경도를 Table 1에 나타내었다. 상부 시험편소선은 길이 100 mm, 소선수량 2개, 소선직경 φ0.93 mm, φ1.56 mm 및 φ2.30 mm의 경강선재(HSWR 72B)를 사용하였다.

2-2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 마찰·마멸시험기(TOYO BALDWIN Co., EFM-3-E)는 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 회전운동에 의한 미끄럼마찰 운동하는 기구장치이며, 0.2 mm~2000 mm/sec 범위의 속도를 무단변속할 수 있으며, 가압하중은 0.02 N~5000 N 범위에서 조절할 수 있다. 마찰토크를 측정하기 위하여 로드셀을 사용하였으며, 로드셀에서 나오는 모든 신호는 아날로그/디지털변환기(PCL816 Analog/Digital Converter)를 통해서 컴퓨터에 입력하였다. 본 실험은 Fig. 2와 같이 회전하는 원판위에 소선을 고정시킨 지그(jig)를 얹어 일정한 하중으로 가압하는 핀온 디스크(pin on disk rig) 형태로 마찰·마멸실험을 수행하였다. 실험장치는 상단부와 하단부로 나눌 수 있으며, 상단부는 하중을 가해주는 수직축과 그 밑에 소선을 고정하는 지그를 제

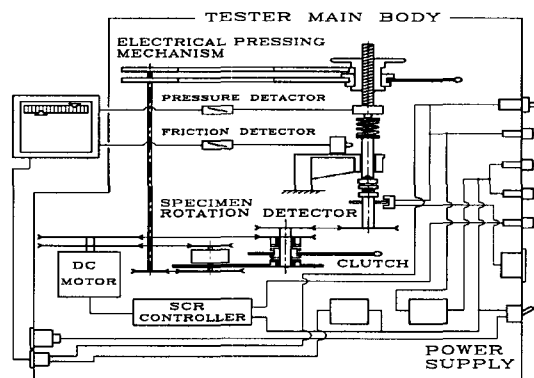


Fig. 3. Schematic diagram of wear testing apparatus.

작하여 소선을 고정하였다. 본 연구는 초음파세척, 건조, 표면거칠기순으로 측정하였다. 실험조건은 윤활 또는 무윤활상태에서 29.4 N, 49.0 N 및 68.6 N의 하중과 220 mm/sec의 속도로 실험 하였으며, 이때 윤활그리이스는 리튬(Lithium) 비누기 그리이스(P-crown EP-1)를 사용하였다. 특히, 크레인 시브의 실제 작업조건과 실험간의 상관관계를 최적화 하기위해 시험하중의 선정은 Drucker[1]등이 주장한 시브와 소선간의 접촉압력식에 따라 다음과 같은 관계식에서 구하였다.

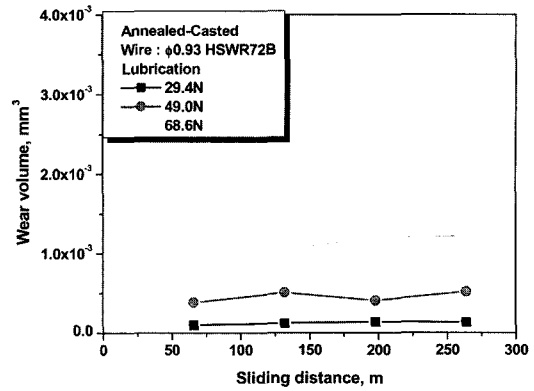
$$P=2 \cdot T/D \cdot d \text{ (Mpa)} \quad (1)$$

여기서, P 는 시브의 표면압력, T 는 로프소선의 인장하중, D 는 시브의 직경, d 는 로프소선의 직경이다. 크레인 시브와 로프소선간의 실제 작업조건은 다음과 같이 가정하였다. $T=51,000$ N, $D=400$ mm, $d=$ 주어진 3가지 소선시험편에 대한 직경이며, 이때의 소선직경별 총 소선수는 222(6×37 로프꼬임)이다. 따라서, 실제 작업조건을 식(1)에 대입한 결과치에서 각 소선별 단면적과 소선시험편 2개를 곱하면 소선에 작용하는 다음의 하중값을 얻을 수 있다. 소선시험편 $\phi 0.93$ mm = 1.67 N, $\phi 1.56$ mm = 2.80 N, $\phi 2.30$ mm = 4.06 N이다. 그러나, 산업현장에서는 정격하중 범위내 다양한 변동 하중하에서 사용되고 있는 점을 감안, 소선시험편 2개에 작용하는 시험하중을 다소 높게 선정하였다. 또한, 시험하중과 로프소선의 인장하중 적합성을 감안하여 미끄럼 속도는 한국공업규격(KS B 6239)에 명시된 크레인의 로프감아올리기 속도범위인 130 mm/sec~260 mm/sec 사이에서 임의로 선정하였다. 이와 같이 미끄럼 속도에서 실험시간은 윤활조건에서 5분, 무윤활조건에서 1분간 4번 반복실험을 하였다. 이때, 마멸측정을 위하여 10분간 초음파세척후 표면거칠기 측정장치(Mitutoyo, Surf-test-500)를 사용하여 시험편의 트랙(track)을 4곳의 단면곡선을 얻어서 측정하였다. 여기서 얻어지는 곡선을 면적계(Planimeter)를 이용하여 마멸부피를 계산하였다. 마멸면에 대한 파괴면의 미시적 관찰은 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 미끄럼 마멸기구를 관찰하였다.

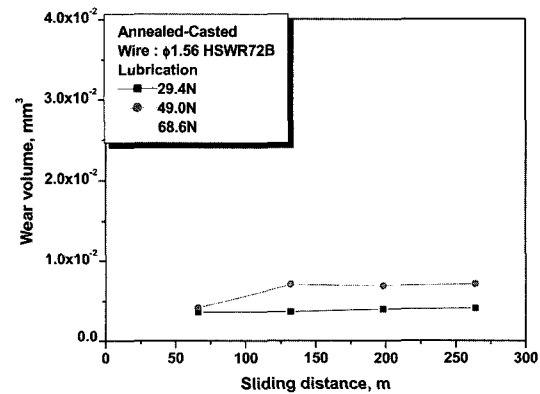
3. 실험결과 및 고찰

3-1. 윤활조건에서 탄소주강의 마멸특성

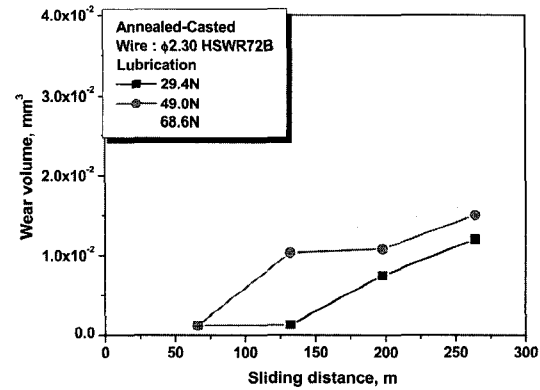
Fig. 4는 윤활조건에서 어닐링처리 후 탄소 주강품에 대해 미끄럼거리에 따른 마멸량의 변화를 각 소선



(a) Lubrication, wire $\phi 0.93$ mm



(b) Lubrication, wire $\phi 1.56$ mm



(c) Lubrication, wire $\phi 2.30$ mm

Fig. 4. Wear volume under the lubrication condition.

직경별로 나타낸 것이다.

Fig. 4의 (a)는 소선 $\phi 0.93$ mm일 때, 수직하중 29.4 N과 49.0 N에서 미끄럼거리 증가에 따라 정도는 상이

하나 고하중 68.6 N에서는 마멸초기부터 선형적인 곡선을 나타내면서 마멸량이 일정하게 증가하는 특성을 나타내 보인다.

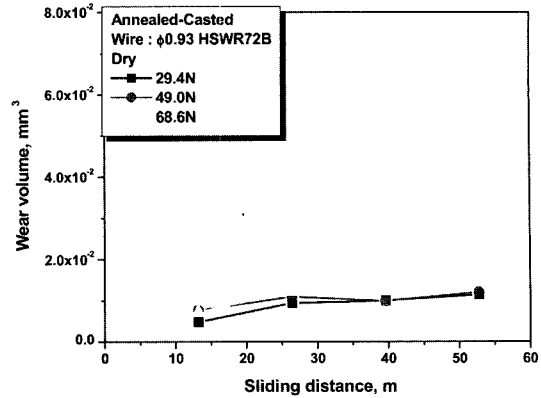
Fig. 4의 (b)는 소선 $\phi 1.56$ mm일 때, 어닐링 후의 마멸량의 변화로서 소선 $\phi 0.93$ mm의 경우와 비슷한 마멸거동 형태로 증가함을 보인다. 이러한 현상은 경한 소선재질이 연한 시험편표면을 상대로 정상마멸이 이루어짐에 따른 접촉면적 증가에 기인함을 알 수 있다.

Fig. 4의 (c)는 소선 $\phi 2.30$ mm일 때, 수직하중 29.4 N과 49.0 N에서 각각 미끄럼거리 132 m 이후부터는 시험편표면의 미끄럼 유효표면층과 모재내부가 파괴되면서 마멸트랙에서는 잔류응력에 의해 마멸곡선의 기울기가 커짐으로 추측된다[10-11]. 또한, 고하중 68.6 N에서는 대체적으로 마멸량이 일정하게 증가하는 경향을 보인다. 이 시점에서 마찰계수는 0.41 정도이며 소선 $\phi 1.56$ mm일 때, 마찰계수인 0.28 보다는 다소 높게 나타났다. 특히 소선 $\phi 2.30$ mm에서 탄소 주강품의 표면거칠기 변화를 관찰하였을 때, 미끄럼거리 264 m에서 수직하중 49.0 N과 68.6 N에서의 마멸트랙 최대 높이는 각각 $55 \mu\text{m}$ 와 $58 \mu\text{m}$ 를 나타내었으며, 이는 수직하중과 미끄럼거리 증가에 따라 시험편표면에서 형상변화가 진행되었음을 확인할 수 있다. 이것은 앞서 나타내보인 작은 소선직경보다 굵은 소선직경이 시험편표면과의 접촉시 탄성응력이 충분히 높아져서 균열 발생에 필요한 정도가 되면 소성변형이 진행되기 전에 균열이 발생하고 전파될 것으로 보인다.

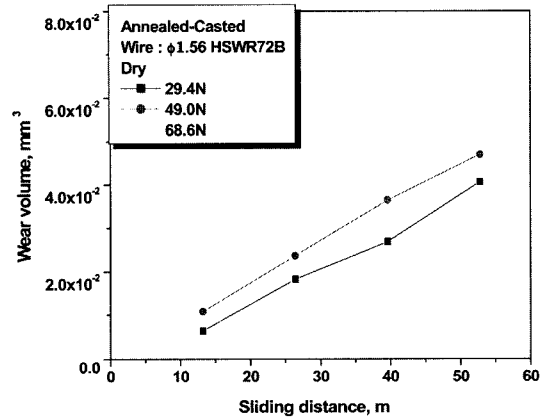
따라서 탄소 주강품의 내마멸 우수성을 비교 평가할 때, 소선직경의 크기보다는 유효의 영향이 훨씬 지배적임을 알 수 있다.

3-2. 무윤활조건에서 탄소주강의 마멸특성

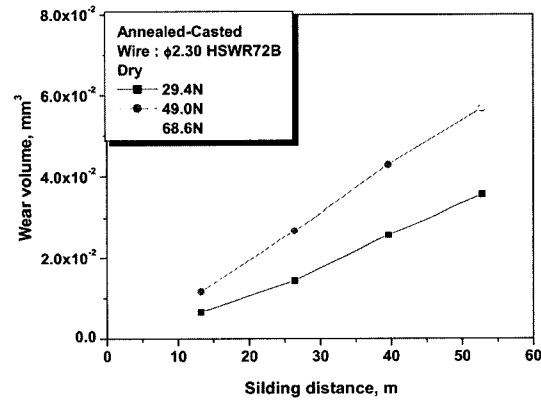
무윤활조건의 마찰, 마멸하에서 미끄럼운동을 하는 금속재료 표면의 특성변화에 관한 연구들이 오래전부터 많은 연구의 대상이 되어왔다[12-15]. Fig. 5는 무윤활조건에서 어닐링처리 후 탄소주강품에 대해 미끄럼거리에 따른 마멸량의 변화를 각 소선직경별로 나타낸 것이다. Fig. 5의 (a)는 소선 $\phi 0.93$ mm일 때, 수직하중 29.4 N과 49.0 N을 제외하고는 Fig. 5의 (b)와 (c)인 소선 $\phi 1.56$ mm와 $\phi 2.30$ mm에서 각각 마멸초기 단계에서부터 미끄럼거리에 비례하여 마멸량이 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 무윤활조건에서 와이어로프 소선직경이 커질수록 시브에서 마멸량이 더욱 심하게 나타날 수 있음을 암시한다.



(a) Dry, wire $\phi 0.93$ mm



(b) Dry, wire $\phi 1.56$ mm



(c) Dry, wire $\phi 2.30$ mm

Fig. 5. Wear volume under the dry condition.

3-3. 탄소주강의 비마멸율

윤활과 무윤활조건에서 시험편 표면손상에 미치는 내마멸성 영향을 평가하기 위하여 비마멸율을 규명하

는 것은 무엇보다 중요하다고 생각된다. 비마멸율은 일반적으로 강의 수명평가를 예측하는데 많이 사용되고 있으며, 이는 마멸량을 수직하중과 미끄럼 거리로 나눈 값이다.

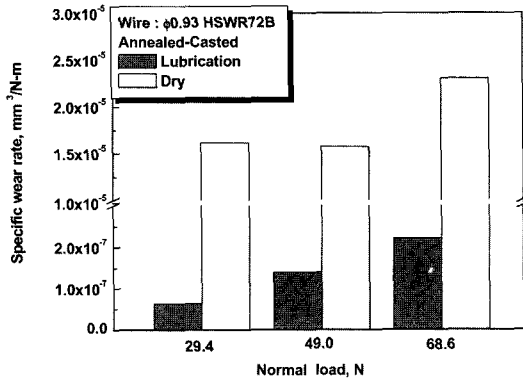
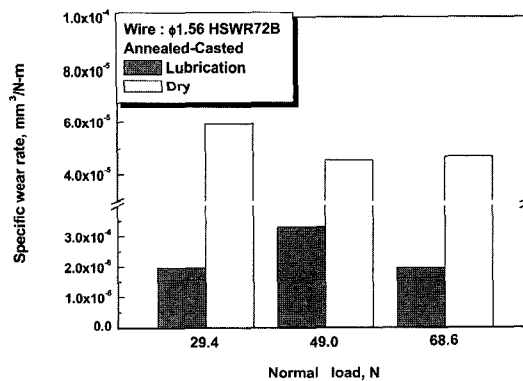
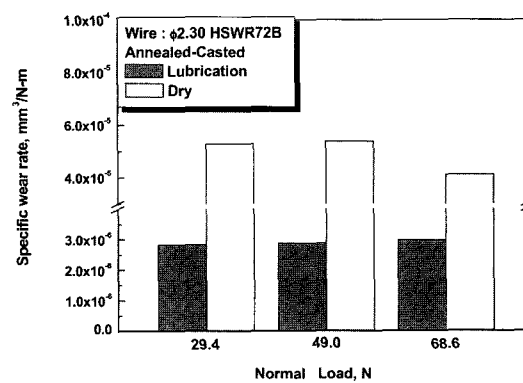
(a) wire $\phi 0.93\text{mm}$ (b) wire $\phi 1.56\text{mm}$ (c) wire $\phi 2.30\text{mm}$

Fig. 6. Specific wear rate of carbon steel castings.

Fig. 6의 (a)는 소선 $\phi 0.93\text{mm}$ 일 때, 하중증가에 따른 비마멸율의 변화를 나타낸 그래프이다. 윤활과 무윤활조건에서 비마멸율은 수직하중 29.4N에서 가장 큰 차이를 나타내 보였다. 이때 윤활조건에서 비마멸율은 $1.58 \times 10^{-8}\text{mm}^3/\text{N-m}$ 인 반면, 무윤활조건에서 비마멸율은 $5.75 \times 10^{-6}\text{mm}^3/\text{N-m}$ 로서 무윤활조건에서 비마멸율이 윤활조건보다 최대 364배 증가하여 극심한 대조를 이루었다. 이것은 윤활조건에서의 저하중 29.4N에서 내마멸성이 최대 364배 우수하다고 평가할 수 있다.

Fig. 6의 (b)는 소선 $\phi 1.56\text{mm}$ 일 때, 하중증가에 따른 비마멸율의 변화를 나타낸 그래프이다. 무윤활조건에서 수직하중의 증가에 따라 비마멸율은 서서히 감소하는 경향을 보였고, 윤활조건에서는 수직하중 49.0N에서 약간 증가한 후 다시 감소하였다. 이는 상온에서 미끄럼거리의 증가에 따라 실접촉 면적은 넓어져 상대적으로 접촉압력이 감소되어 비마멸율이 감소된 것으로 판단된다.

Fig. 6의 (c)는 소선 $\phi 2.30\text{mm}$ 일 때, 하중증가에 따른 비마멸율의 변화를 나타낸 그래프이다. 윤활조건에서 수직하중의 증가에 따라 비마멸율은 거의 일정한 모습을 나타낸다. 무윤활조건에서는 수직하중 29.4N과 49.0N에서 일정한 경향을 보이다가 고하중 68.6N에서 다시 감소하였다. 이러한 경향을 나타내는 이유는 시험편의 경도분포와 열처리의 영향, 진류응력의 변화, 마멸면의 기하학적 형상, 하중이 가해지는 방법등 다양한 마멸변화의 혼합성 때문에 시험편간의 마멸거동은 기복변화가 심한 것으로 추정된다.

3-4. 마멸면의 미시적 관찰

Fig. 7의 (a)는 윤활조건에서 미끄럼거리 264 m, 수직하중 49.0N으로 소선 $\phi 0.93\text{mm}$ 일 때, 어닐링처리 후 탄소 주강품의 마멸면을 보여주는 SEM 사진이다. 시험편표면에서 마멸트랙의 정확한 검출이 어려울 만큼, 작은 트랙이 관찰되었으며, 이는 전단과 소성변형의 영향에 의한 윤활보호막의 파괴로 보여진다.

Fig. 7의 (b)는 무윤활조건에서 미끄럼거리 52.8 m, 수직하중 49.0N으로 소선 $\phi 0.93\text{mm}$ 일 때, 어닐링처리 후 탄소 주강품의 마멸면을 보여주는 SEM 사진이다. 마멸면이 심한 트랙중앙부에서 미끄럼방향으로 표면곳곳에서 보호막의 분리작용과 산화막이 부서진 입자(debris)에 의해 연삭작용이 가해졌음을 알 수 있다.

Fig. 7의 (c)는 윤활조건에서 미끄럼거리 264 m, 수직하중 49.0N으로 소선 $\phi 1.56\text{mm}$ 일 때, 어닐링처리

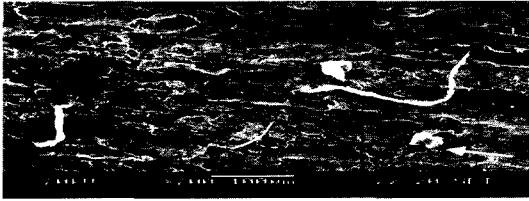
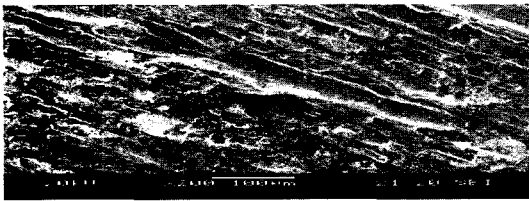
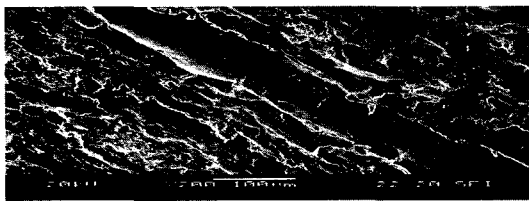
(a) Lubrication, wire $\phi 0.93\text{mm}$ (b) Dry, wire $\phi 0.93\text{mm}$ (c) Lubrication, wire $\phi 1.56\text{mm}$ (d) Dry, wire $\phi 1.56\text{mm}$ (e) Lubrication, wire $\phi 2.30\text{mm}$ (f) Dry, wire $\phi 2.30\text{mm}$

Fig. 7. SEM photographs worn surface of carbon steel castings.

후 탄소 주강품의 마멸면을 보여주는 SEM 사진이다. 마멸트랙 중앙부에서 미끄럼방향으로 윤활보호막이 연화되면서 그리이스와 시험편표면과의 산화로 마멸입자가 탈락되면서 표면층마다 미세한 균열에 의한 피로마멸로 관찰된다.

Fig. 7의 (d)는 무윤활조건에서 미끄럼거리 52.8 m, 수직하중 49.0 N으로 소선 $\phi 1.56\text{ mm}$ 일 때, 어닐링처리 후 탄소 주강품의 마멸면을 보여주는 SEM 사진이다. 마멸트랙의 곳곳에서 생성된 산화물이 미끄럼방향으로 점진적인 플로잉 기구(Plowing Mechanism)를 생성하고 있음을 보여준다.

Fig. 7의 (e)는 윤활조건에서 미끄럼거리 264 m, 수직하중 49.0 N으로 소선 $\phi 2.30\text{ mm}$ 일 때, 어닐링처리 후 탄소 주강품의 마멸면을 보여주는 SEM 사진이다. 전체적으로 윤활상태가 가혹하게 되면서 유막의 두께가 얇아지고 소선과의 접촉시 소성변형과 미세한 균열을 일으키면서 재료가 미끄럼방향의 수평방향으로 밀려나가는 형태를 보인다. 이것은 수직하중으로 인한 접촉면의 가장자리부에 점진적인 피로마멸과 소성유동이 진행되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7의 (f)는 무윤활조건에서 미끄럼거리 52.8 m, 수직하중 49.0 N으로 소선 $\phi 2.30\text{ mm}$ 일 때, 어닐링처리 후 탄소 주강품의 마멸면을 보여주는 SEM 사진이다. 마멸트랙의 중앙부에서 미끄럼방향으로 소성유동과 전단응력이 집중 발생하여 입자가 탈락되면서 표면에 깊은 골이 파여진 부분을 볼 때, 연삭마멸이 쉽게 발생하였음을 보여준다. 특히 Fig. 7의 (f)는 소성변형에 의해 버거스벡터(burgers vector) 방향이 마멸면 위로 향함에 따라 소성변형후 전단에 의한 얇은 박판 탈락으로 진행된 형태를 보인다. 이와 같은 현상은 탄소 주강품 시브재료와 로프소선간의 전형적인 마멸로 많은 연구자들의 실험결과와 잘 맞다고 볼 수 있다[16-18].

Fig. 8은 상대재료인 소선 $\phi 2.30\text{ mm}$ 의 마멸면으로 윤활과 무윤활조건에서 어닐링처리 후의 수직하중 29.4 N, 49.0 N 및 68.6 N에서 미끄럼거리 950.4 m 동안 소선 교체없이 실험을 수행하였다. 소선은 탄소 주강품 시험편과의 심한 마찰로 인하여 마멸입자가 탈락된 후에 곳곳에 흠이 파인 흔적과 주름무늬모양으로 미세한 균열을 동반하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 소선표면에 마멸입자를 형성하는 접촉면사이에 국부적으로 응착마멸을 일으키면서 피로균열 전파에 의한 미시적인 연삭마멸이 동시에 진전된 것으로 보여진다.

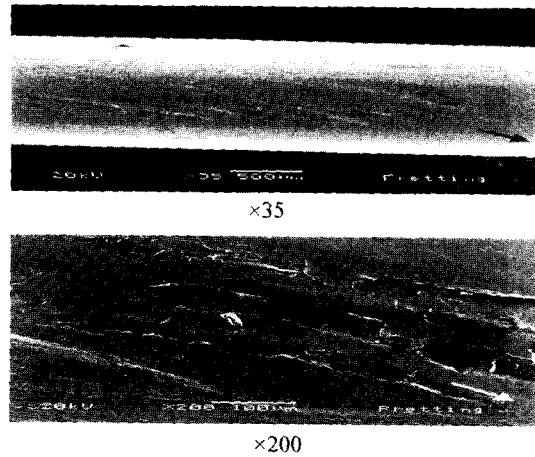


Fig. 8. SEM photographs worn surface of wire.

4. 결 론

크레인 시브의 안전성 평가측면에서 시브 재질인 탄소 주강품과 경강선재간의 미끄럼 마멸실험을 통하여 전술한 시험조건에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 어닐링처리 후의 탄소 주강품과 경강선재간의 마멸량은 윤활조건에서 안정적인 거동을 보인 반면, 무윤활조건에서는 기울기변화가 심하였다.

2. 탄소 주강품의 비마멸율은 소선직경의 크기보다는 윤활의 영향이 훨씬 지배적인 경향을 나타내 보였다. 또한, 재료강도면에서 소선직경이 작을수록 우수한 내마멸성을 가졌다.

3. 탄소 주강품의 마멸기구는 윤활조건에서 피로마멸이 주된 마멸기구였으며, 무윤활조건에서 연삭마멸로 발생하며, 경강선재는 국부적인 응착마멸을 일으키면서 피로균열 전파에 의한 미시적 연삭마멸이 수반된다.

4. 탄소 주강품의 마멸특성을 실용조건에 적절하게 적용한다면 시브의 내마멸성 재료 최적화에 큰 역할을 할 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. J. Verschoof, "Cranes-Design, Practice, Maintenance," Professional Engineering Publishing London and

- Bury St Edmunds, UK, pp.1-46, 2000.
2. KS B 0127, "크레인 용어(종류)," 한국공업규격, 1990.
 3. KS B 4731, "시브," 한국공업규격, 1994.
 4. Ministry of Labor Republic of Korea, "Injury Current Situation," Home Page, 1994.
 5. KS D 3514, "와이어-로프," 한국공업규격, 1997.
 6. American Iron and Steel Institute, "Wire-Rope Users Manual," second edition, American, pp.66-136, 1985.
 7. KS D 4101, "탄소주강품," 한국공업규격, 1990.
 8. KS D 3559, "경강선재," 한국공업규격, 1992.
 9. 한현수, 박인홍, 김정배, "기계재료," 크라운출판사, pp.269-302, 1994.
 10. 정중현, 김대은, "탄소강의 가공조건과 마찰·마멸과의 관계," 대한기계학회논문집, 제20권, 제5호, pp.1468-1476, 1996.
 11. 김진욱, 이영제, "잔류응력의 표면 파손과 마멸에 대한 영향," 대한기계학회논문집, 제26권, 제4호, pp.677-682, 2002.
 12. Leskovic, I. P., Ferlan, M. Sc. D. and Kovac, I. M., "Residual Stresses as Essential Criteria for the Evaluation of Production Processes," CIRP, Vol. 36, pp.409-412, 1987.
 13. T.F.J. Quinn, D.M. Rowson and J.L. Sullivan, "Application of the oxidational theory of mild wear to the sliding wear of low alloy steel," Wear, Vol. 65, pp.1-15, 1980.
 14. J.L. Sullivan and S.G. Hodgson, "A study of mild oxidational wear for conditions of low load and speed," Wear, Vol. 121, pp.95-100, 1988.
 15. R.Y. Lee and Z. Eliezer, "On the critical thickness of protective films at sliding interfaces," Wear, Vol. 95, pp.165-175, 1984.
 16. Endo, k., and Okada, T. and Iwai, Y, "Effect of cold-working and grain size on wear of steel," proceedings of the JSLE-ASLE International lubrication conference, Tokyo, pp.92-100, 1975.
 17. I.M.L. Ridge, C. R. Chaplin and J. Zheng, "Effect of degradation and impaired quality on wire rope bending of sheave fatigue endurance," Engineering Failure Analysis, Vol. 8, pp.173-187, 2001.
 18. Schrems, K. K. "Wear-related fatigue in a wire-rope failure," Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol.22, No.5, pp.490-499, 1994.