

크레인시브와 로프소선간의 미끄럼 마멸특성에 관한 기초연구

류중복[†] · 채영훈^{*} · 김석삼^{**}

(2003년 4월 8일 접수, 2003년 10월 8일 심사완료)

A Fundamental Study for the Sliding Wear Characteristics of the Crane Sheave Against a Rope Wire

Jung Buk Ryu, Young Hun Chae and Seock Sam Kim

Key Words: Crane(크레인), Sheave(시브), Wire-rope(와이어 로프), Carbon Steel Castings(탄소 주 강품), High Carbon Steel Wire Rods(경강선재)

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.

1. 서 론

산업시설에서 중량의 물체를 이송코자 할 경우 일반적으로 크레인(crane)⁽¹⁾을 이용한다. 그러나 이를 사용하는 자들의 유지소홀을 비롯하여 권상 기계장치인 시브(sheave)⁽²⁾의 흠에서 존재하는 마멸결함 때문에 안전사고가 가끔 발생되고 있으며, 이는 막대한 인적, 경제적 손실까지 유발하고

있다.⁽³⁾ 이러한 시브의 흠과 와이어 로프(wire rope)⁽⁴⁾사이의 마찰, 마멸은 중량물을 정지, 권상, 권하, 정지의 동작을 반복적으로 수행하면서 발생하게 된다. 그러므로 시브의 흠과 와이어 로프 접촉조건에서 발생된 마멸상태를 계속 방지한 채 사용한다면 스커픽(scuffing)이라고 하는 예상하기 어려운 표면파괴가 발생된다. 이러한 스커픽은 미끄럼 표면의 파괴형태를 말하는데, 이는 마찰력의 증가와 함께 표면이 거칠어지는 과정을 수반한다.

따라서, 시브 부품을 사용하기 전에는 반드시 안전점검과 보수를 동시에 실시하여 사전에 안전성을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 시브와 로프소선간의 연구동향을 살펴보면, Verschoof⁽¹⁾는 두 재료가 상호 접촉시 미끄럼접촉의 반복발생에

* 경북대학교 대학원 기계공학과

E-mail : jbryoo@korea.com

TEL : (053)957-4361 FAX : (053)950-5577

** 회원, 경북대학교 트라이볼로지 연구소

† 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부

따른 하중조건의 변화, 시브 재료의 열처리 불만족과 부적절한 윤활요인 등이 주된 결함요인으로 보고하고 있다. 또한, Batchelor와 Stachowiak⁽⁵⁾은 와이어 로프와 시브의 재질개선을 통하여 로프의 수명을 연장함이 더 효과적임을 강조하였다. Hamblin⁽⁶⁾ 등은 로프소선과 시브간의 마멸은 사용환경과 시브의 재질에 따라 변화함을 주장하였다. 따라서 오늘날 다수의 연구자들이 수행해 온 연구과제는 와이어 로프의 피로수명 판정을 중심으로 연구 활동이 시도되어 왔을 뿐, 시브 강재의 미끄럼마멸특성에 대한 트라이볼로지적 연구 활동은 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 크레인 시브와 로프소선간의 윤활과 무윤활조건에서 탄소 주강품의 미끄럼마멸 특성을 알아보고자 한다. 또한, 접촉하는 두 표면이 미끄럼운동을 하게 될 때 시험편 어닐링처리 후의 마멸기구를 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 하부 시험편은 Table 1과 같은 화학성분과 기계적 성질을 가진 탄소 주강품 (SC 46)⁽⁷⁾으로서 크레인 시브의 재질로 산업현장에서 가장 널리 사용되고 있다. 탄소 주강품 시험편의 표면성상을 확인하기 위하여 완전어닐링(full annealing)을 실시하였다. 일반적으로 탄소 주강품은 어닐링 절차없이 주조 상태로 사용하면 잔류응력과 조직의 조대로 인해 마멸현상이 심하게 발생한다.⁽⁸⁾ 시험편에 적용한 어닐링처리 방법은 시험편을 열처리로에 넣고, 시간당 200°C 미만으로 승온하여 1.5시간동안 850°C로 유지한 다음, 서서히 노냉시켰다.

시험편은 1차 연삭하여 형상 및 크기를 같게 가공하고, 연마지를 #600Cw, #800Cw, #1000Cw, #1200Cw 순으로 물을 묻혀서 0.5μm Rmax(최대 표면 조도)로 연마하였다. 시험편의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 하부 시험편은 직경 30mm, 두께 8mm의 원판으로 제작하였다. 어닐링 처리한 시험편의 표면 경도를 Table 1에 나타내었다. 상부 시험편인 소선은 길이 100mm, 소선수량 2개, 소선직경 φ0.93mm, φ1.56mm 및 φ2.30mm의 경강선재(HSWR 72B)⁽⁹⁾ 규격품 소선을 선정하였다.

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)	YP(Mpa)	Elongation(%)
	473.3	267.3	30.2
Hardness	Annealed-casted 180(Hv)		

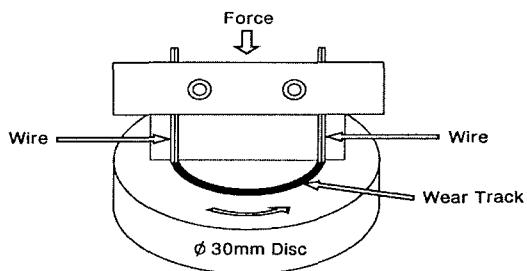


Fig. 1 Schematic illustration of pin on disk rig wear tester

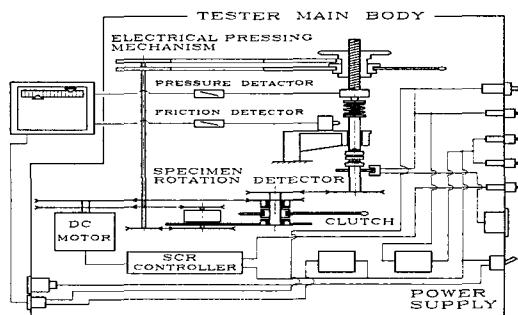


Fig. 2 Schematic diagram of wear testing apparatus

2.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 마찰·마멸시험기(TOYO BALDWIN Co., EFM-3-E)는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 회전운동에 의한 미끄럼마찰 운동하는 기구장치이며, 0.2mm~2000mm/sec 범위의 속도를 무단변속할 수 있으며, 가압하중은 0.02N~5000 N 범위에서 조정할 수 있다. 마찰토크를 측정하기 위하여 로드셀을 사용하였으며, 로드셀에서 나오는 모든 신호는 아날로그/디지털변환기(PCL816 Analog/Digital Converter)를 통해서 컴퓨터에 입력

하였다. 본 실험에서는 Fig. 1과 같이 회전하는 원판위에 소선을 고정시킨 지그(jig)를 얹어 일정한 하중으로 가압하는 핀온 디스크(pin on disk rig)로 마찰·마멸실험을 수행하였다. 실험장치는 상단부와 하단부로 나눌 수 있으며, 상단부는 하중을 가해주는 수직축과 그 밑에 소선을 고정하는 지그를 제작하여 소선을 고정하였다.

본 연구는 초음파세척, 건조, 표면거칠기 순으로 측정하였다. 실험조건은 윤활 또는 무윤활상태에서 29.4N, 49.0N 및 68.6N의 하중과 220mm/sec의 속도로 실험하였으며, 이때 윤활그리아스는 리튬(Lithium) 비누기 그리아스(P-crown EP-1)를 사용하였다. 특히, 크레인 시브의 실제 작업조건과 실험간의 상관관계를 최적화하기 위해 시험하중의 설정은 Drucker⁽¹⁾ 등이 주장한 시브와 소선간의 접촉압력식에 따라 다음과 같은 관계식에서 구하였다.

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

여기서, P는 시브의 표면압력, T는 로프소선의 인장하중, D는 시브의 직경, d는 로프소선의 직경이다. 크레인 시브와 로프소선간의 실제 작업조건은 다음과 같이 가정하였다. T=51,000N, D=400mm, 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 $\Phi 0.93\text{mm} = 1.67\text{N}$, $\Phi 1.56\text{mm} = 2.80\text{N}$, $\Phi 2.30\text{mm} = 4.06\text{N}$ 이다. 그러나, 산업현장에서는 정격하중 범위내 다양한 변동하중하에서 사용되고 있는 점을 감안, 소선시험편 2개에 작용하는 시험하중을 다소 높게 설정하였다. 또한, 시험하중과 로프소선의 인장하중 적합성을 감안하여 미끄럼 속도는 한국공업규격(KS B 6239)에 명시된 크레인의 로프감아울리기 속도범위인 130mm/sec~260mm/sec 사이에서 임의로 설정하였다. 이와 같은 미끄럼 속도에서 실험시간은 윤활조건에서 5분, 무윤활조건에서 1분간 4번 반복실험을 하였다. 이때, 마멸측정을 위하여 10분간 초음파세척후 표면거칠기 측정장치(Mitutoyo, Surftest-500)를 사용하여 시험편의 트랙(track)부를 4곳의 단면곡선을 얻어서 측정하였다. 여기서 얻어지는 곡선을 면적계

(Planimeter)를 이용하여 마멸부피를 계산하였다. 마멸면에 대한 파괴면의 미시적 관찰은 주사형전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 미끄럼 마멸기구를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 윤활조건에서 마멸특성

Fig. 3은 윤활조건에서 어닐링처리 후 탄소주강품에 대해 미끄럼거리에 따른 마멸량의 변화를 각 소선직경별로 나타낸 것이다.

Fig. 3의 (a)는 소선 $\Phi 0.93\text{mm}$ 일 때, 수직하중 29.4N과 49.0N에서 미끄럼거리 증가에 따라 정도는 상이하나 고하중 68.6N에서는 마멸초기부터 선형적인 곡선을 나타내면서 마멸량이 일정하게 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 3의 (b)는 소선 $\Phi 1.56\text{mm}$ 일 때, 어닐링 후의 마멸량의 변화로서 소선 $\Phi 0.93\text{mm}$ 의 경우와 비슷한 마멸거동 형태로 증가한다. 이러한 현상은 경한 소선재질이 연한 시험편표면을 상대로 정상마멸이 이루어짐에 따른 접촉면적 증가에 기인함을 알 수 있다.

Fig. 3의 (c)는 소선 $\Phi 2.30\text{mm}$ 일 때, 수직하중 29.4N과 49.0N에서 각각 미끄럼거리 132m 이후부터는 시험편표면의 미끄럼 윤활표면층과 모재내부가 파괴되면서 마멸트랙에서는 잔류응력에 의해 마멸곡선의 기울기가 커짐으로 추측된다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

또한, 고하중 68.6N에서는 대체적으로 마멸량이 일정하게 증가하는 경향을 보인다. 이 시점에서 마찰계수는 0.41 정도이며 소선 $\Phi 1.56\text{mm}$ 일 때, 마찰계수인 0.28 보다는 다소 높게 나타났다.

특히 소선 $\Phi 2.30\text{mm}$ 에서 탄소주강품의 표면거칠기 변화를 관찰하였을 때, 미끄럼거리 264m에서 수직하중 49.0N과 68.6N에서의 마멸트랙 최대높이는 각각 55 μm 와 58 μm 를 나타내었으며, 이는 수직하중과 미끄럼거리 증가에 따라 시험편표면에서 형상변화가 진행되었음을 확인할 수 있다. 이것은 앞서 나타내 보인 작은 소선직경보다 굵은 소선직경이 시험편표면과의 접촉시 탄성응력이 충분히 높아져서 균열발생에 필요한 정도가 되면 소성변형이 진행되기 전에 균열이 발생하고 전파될 것으로 사료된다.

따라서 탄소주강품의 내마멸 우수성을 비교평가할 때, 소선직경의 크기보다는 윤활의 영향

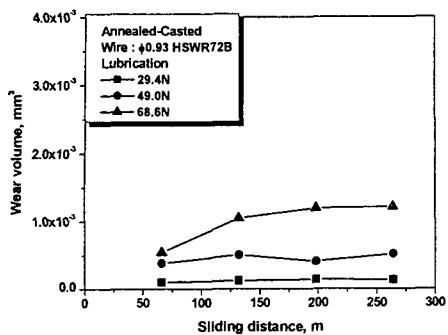
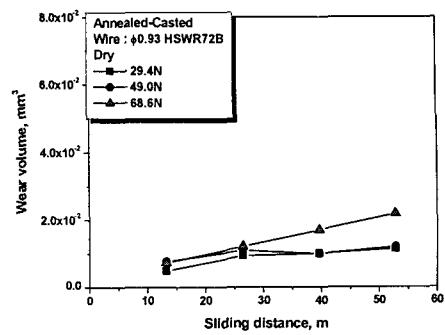
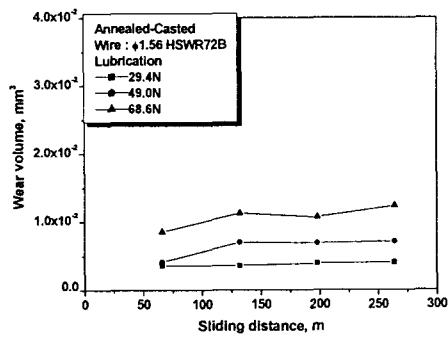
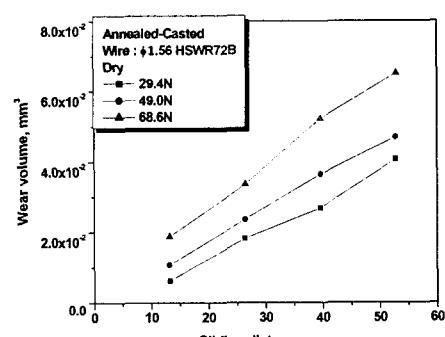
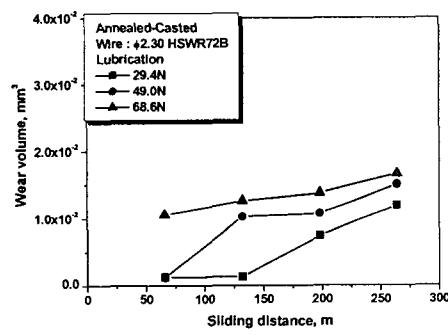
(a) Lubrication, wire $\phi 0.93\text{mm}$ (a) Dry, wire $\phi 0.93\text{mm}$ (b) Lubrication, wire $\phi 1.56\text{mm}$ (b) Dry, wire $\phi 1.56\text{mm}$ (c) Lubrication, wire $\phi 2.30\text{mm}$

Fig. 3 Wear volume under the lubrication condition

이 훨씬 지배적임을 알 수 있다.

3.2 무윤활조건에서 마멸특성

무윤활조건의 마찰, 마멸하에서 미끄럼운동을

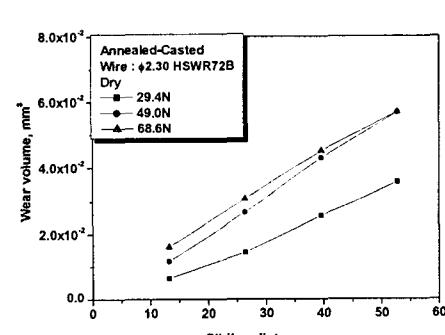
(c) Dry, wire $\phi 2.30\text{mm}$

Fig. 4 Wear volume under the dry condition

하는 금속재료 표면의 특성변화에 관한 연구들^{10~15} 오래전부터 많은 연구의 대상이 되어왔다.

Fig. 4는 무윤활조건에서 어닐링처리 후 탄소주

강품에 대해 미끄럼거리에 따른 마멸량의 변화를 각 소선직경별로 나타낸 것이다.

Fig. 4의 (a)는 소선 $\phi 0.93\text{mm}$ 일 때, 수직하중 29.4N과 49.0N을 제외하고는 Fig. 4의 (b)와 (c)인 소선 $\phi 1.56\text{mm}$ 와 $\phi 2.30\text{mm}$ 에서 각각 마멸초기 단계에서부터 미끄럼거리에 비례하여 마멸량이 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 무윤활조건에서 와이어로프 소선직경이 커질수록 시브에서 마멸량의 거동변화가 더욱 심하게 나타날 수 있음을 암시한다.

3.3 비마멸률

윤활과 무윤활조건에서 시험편 표면손상에 미치는 내마멸성 영향을 평가하기 위하여 바마멸률을 규명하는 것은 무엇보다 중요하다고 생각된다. 비마멸률은 일반적으로 강의 수명평가를 예측하는데 많이 사용되고 있으며, 이는 마멸량을 수직하중과 미끄럼 거리로 나눈 값이다.

Fig. 5의 (a)는 소선 $\phi 0.93\text{mm}$ 일 때, 하중증가에 따른 비마멸률의 변화를 나타낸 그래프이다. 윤활과 무윤활조건에서 비마멸률은 수직하중 29.4N에서 가장 큰 차이를 나타내 보였다. 이때 윤활조건에서 비마멸률은 $1.58 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 인 반면, 무윤활조건에서 비마멸률은 $5.75 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 로서 무윤활조건에서 비마멸률이 윤활조건보다 최대 364배 증가하여 극심한 대조를 이루었다. 이것은 윤활조건의 저하중 29.4N에서 내마멸성이 최대 364배 우수하다고 평가할 수 있다.

Fig. 5의 (b)는 소선 $\phi 1.56\text{mm}$ 일 때, 하중증가에 따른 비마멸률의 변화를 나타낸 그래프이다. 무윤활조건에서 수직하중의 증가에 따라 비마멸률은 서서히 감소하는 경향을 보였고, 윤활조건에서는 수직하중 49.0N에서 약간 증가한 후 다시 감소하였다. 이는 상온에서 미끄럼거리의 증가에 따라 실접촉 면적은 넓어져 상대적으로 접촉압력이 감소되어 비마멸률이 감소된 것으로 판단된다.

Fig. 5의 (c)는 소선 $\phi 2.30\text{mm}$ 일 때, 하중증가에 따른 비마멸률의 변화를 나타낸 그래프이다. 윤활조건에서 수직하중의 증가에 따라 비마멸률은 거의 일정한 모습을 나타낸다. 무윤활조건에서는 수직하중 29.4N과 49.0N에서 일정한 경향을 보이다가 고하중 68.6N에서 다시 감소하였다. 이러한 경향을 나타내는 이유는 시험편의 정도분포와 열처리의 영향, 잔류응력의 변화, 마멸면의 기하학

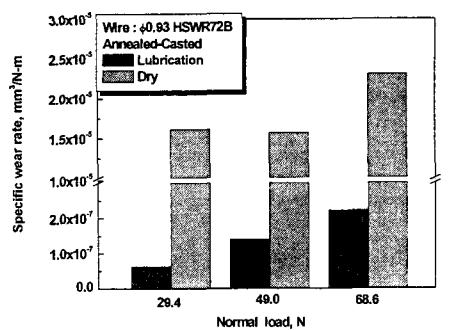
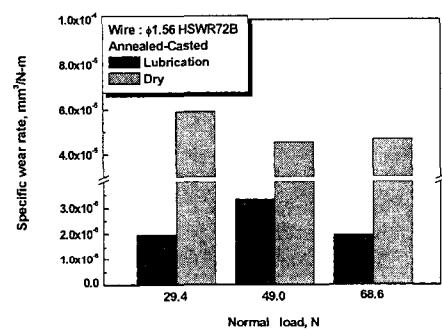
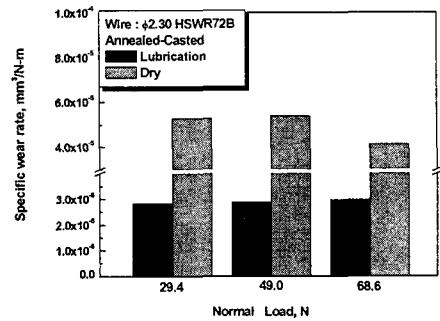
(a) Wire $\phi 0.93\text{mm}$ (b) Wire $\phi 1.56\text{mm}$ (c) Wire $\phi 2.30\text{mm}$

Fig. 5 Specific wear rate of carbon steel^적
castings

형상, 하중이 가해지는 방법등 다양한 마멸변화의 혼합성 때문에 시험편간의 마멸거동은 기복변화가 심한 것으로 추정된다.

3.4 SEM을 이용한 마멸면의 관찰

Fig. 6의 (a)는 윤활조건에서 미끄럼거리 264m,

수직하중 49.0N으로 소선 $\phi 0.93\text{mm}$ 일 때, 어닐링 처리후 탄소 주강품의 마멸면을 보여주는 SEM 사진이다. 시험편표면에서 마멸트랙의 정확한 겹출이 어려울 만큼, 작은 트랙이 관찰되었으며, 이는 전단과 소성변형의 영향에 의한 윤활보호막의 파괴로 보여진다.

Fig. 6의 (b)는 무윤활조건에서 미끄럼거리 52.8m, 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. 6의 (c)는 윤활조건에서 미끄럼거리 264m, 수직하중 49.0N으로 소선 $\phi 1.56\text{mm}$ 일 때, 어닐링처리 후 탄소 주강품의 마멸면을 보여주는 SEM 사진이다. 마멸트랙 중앙부에서 미끄럼방향으로 윤활보호막이 연화되면서 그리이스와 시험편표면과의 산화로 마멸입자가 탈락되면서 표면층마다 미세한 균열에 의한 괴로마멸로 관찰된다.

Fig. 6의 (d)는 무윤활조건에서 미끄럼거리 52.8m, 수직하중 49.0N으로 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. 6의 (e)는 윤활조건에서 미끄럼거리 264m, 수직하중 49.0N으로 소선 $\phi 2.30\text{mm}$ 일 때, 어닐링처리 후 탄소 주강품의 마멸면을 보여주는 SEM 사진이다. 전체적으로 윤활상태가 가혹하게 되면서 유막의 두께가 얕아지고 소선과의 접촉시 소성변형과 미세한 균열을 일으키면서 재료가 미끄럼방향의 수평방향으로 밀려나가는 형태를 보인다. 이것은 수직하중으로 인한 접촉면의 가장자리부에 점진적인 괴로마멸과 소성유동이 진행되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6의 (f)는 무윤활조건에서 미끄럼거리 52.8m, 수직하중 49.0N으로 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. 6의 (f)는 소성변형에 의해 버거스

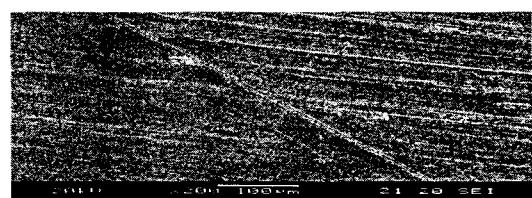
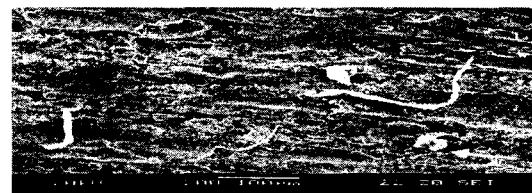
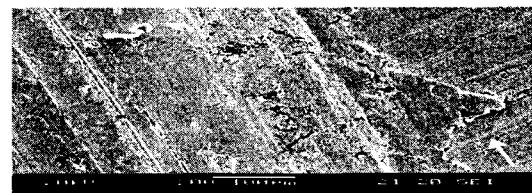
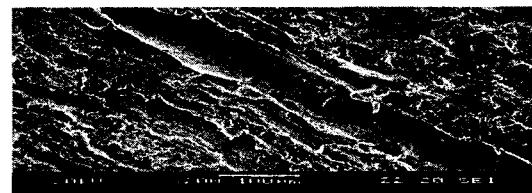
(a) Lubrication, wire $\phi 0.93\text{mm}$ (b) Dry, wire $\phi 0.93\text{mm}$ (c) Lubrication, wire $\phi 1.56\text{mm}$ (d) Dry, wire $\phi 1.56\text{mm}$ (e) Lubrication, wire $\phi 2.30\text{mm}$ (f) Dry, wire $\phi 2.30\text{mm}$

Fig. 6 SEM photographs worn surface of carbon steel castings

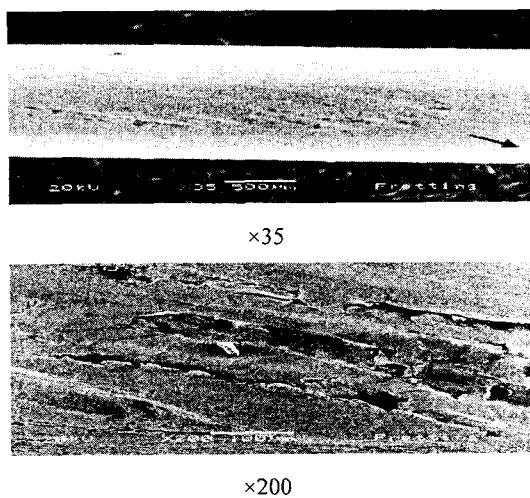


Fig. 7 SEM photographs worn surface of wire

벡터(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 맞는다고 볼 수 있다.^(16~18)

Fig. 7은 상대재료인 소선 φ2.30mm의 마멸면으로 윤활과 무윤활조건에서 어닐링처리 후의 수직 하중 29.4N, 49.0N 및 68.6N에서 미끄럼거리 950.4m 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.

4. 결 론

크레인 시브의 안전성 평가측면에서 시브 재질인 탄소 주강품과 로프소선간의 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 비마멸률은 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.

후 기

본 연구는 경북대학교 트라이볼로지 연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Verschoof, J., 1999, "Cranes Design, Practice, and Maintenance," *Professional Engineering Publishing Limited London and Bury St Edmunds, UK*, pp. 1~46.
- (2) Korean Standards Association, 1994, "Rope Sheaves for Electric Overhead Travelling Cranes," KS B 6407, pp. 1~8.
- (3) Ministry of Labor Republic of Korea, 1994, "Injury Current Situation," Home Page.
- (4) Korean Standards Association, 1997, "Wire Ropes," KS D 3514, pp. 1~10.
- (5) Batchelor, A. W. and Stachowiak, G. W., 1992, "Extending the life of Wire Ropes by the Development of Improved Wire Coating and Sheave Materials," *Trans. of Mechanical Engineering*, IE Aust., ME17, No.3, pp. 161~169.
- (6) Hamblin, M. G. and Stachowiak, G. W., 1990, "Environmental and Sheave Material Effects on the Wear of Roping Wire and Sheave," *Tribol. Int.*, 28, No. 5, pp. 307~315.
- (7) Korean Standards Association, 1990, "Carbon Steel Castings," KS D 4101, pp. 1~4.
- (8) Han, H. S., Park, I. H. and Kim, J. B., 1994,

- "Machine Material," *Crown Publishing Limited of Korea*, pp. 269~302.
- (9) Korean Standards Association, 1992, "High Carbon Steel Wire Rods," KS D 3559, pp. 1~3.
- (10) Jin-Wook Kim and Young-Ze Lee, 2002, "The Effect of Residual Stresses on Surface Failure and Wear," *Trans. of the KSME A*, Vol. 26, No. 4, pp. 677~682.
- (11) Jong-Hyun Jung and Dae-un Kim, 1996, "Effect of Machining Condition on Friction and Wear of Steel," *Trans. of the KSME A*, Vol. 20, No. 5, pp. 1468~1476.
- (12) Leskovar, I. P., Ferlan, M. Sc. D. and Kovac, I. M., 1987, "Residual Stresses as Essential Criteria for the Evaluation of Production Processes," *CIRP*, Vol. 36, pp. 409~412.
- (13) Quinn, T.F.J., Rowson, D.M. and Sullivan, J.L., 1980, "Application of the Oxidational Theory of Mild Wear to the Sliding Wear of Low Alloy Steel," *Wear*, Vol. 65, pp. 1~15.
- (14) Sullivan, J.L. and Hodgson, S.G., 1988, "A Study of Mild Oxidational Wear for Conditions of Low Load and Speed," *Wear*, Vol. 121, pp. 95~100.
- (15) Lee, R.Y. and Eliezer, Z., 1984, "On the Critical Thickness of Protective Films at Sliding Interfaces," *Wear*, Vol. 95, pp. 165~175.
- (16) Endo, K., and Okada, T. and Iwai, Y., 1975, "Effect of Cold-Working and Grain Size on Wear of Steel," *Proceedings of the JSLE-ASLE International Lubrication Conference*, Tokyo, pp. 92~100.
- (17) Ridge, I.M.L., Chaplin, C. R. and Zheng, J., 2001, "Effect of Degradation and Impaired Quality on Wire Rope Bending of Sheave Fatigue Endurance," *Engineering Failure Analysis*, pp. 173~187.
- (18) Schrems, K. K., 1994, "Wear-Related Fatigue in a Wire Rope Failure," *Journal of Testing and Evaluation*, *JTEVA*, 22, 5, pp. 490~499.