

인산망간 피막의 마찰, 마모 특성에 관한 연구

박영도*(경상대학교), 유상희(경상대학교 기계항공공학부)

A Study on Friction and Wear of Manganese Phosphate Thin Film

Y. D. Park*(GSNU), S. H. Yoo(Mechanical & Aerospace Dept., GSNU)

ABSTRACT

In these days, wear resistance is an essential condition because the relative movement between machine parts is being accelerated and those connected with the drive parts transmit power and force. Also wear resistance is closely related to reliability and life of products, therefore the study on friction and wear is very important in many fields.

In this paper, wear test was conducted to know properties about friction and wear of manganese phosphate being used widely. Test type is 1 ball on disk and we compared manganese phosphate thin film with non-coated material. Through this study, we could know the effect of this surface treatment method, and then it is assumed that the reliability of parts will be secure.

Key Words : Manganese Phosphate Thin Film (인산망간피막), Wear (마모), Friction coefficient (마찰계수), Reliability (신뢰성)

1. 서론

방청, 외관미화, 내마모성, 전기절연, 전기전도성 등의 폭 넓은 목적을 달성시키고자 부품의 금속 재료 표면에 이종재질을 전기적, 물리적, 화학적 처리방법 등을 통해 보호표면을 생성시키는 조작을 통해 표면처리가 행해지고 있다. 그 중에서도 화성 피막의 일종인 인산염피막은 1960년 W.T.Coslett (英)에 개발되어 현재는 도장 하지용, 내식성, 냉간 가공용, 내마멸성 등의 목적으로 여러 분야에서 사용되고 있다. 인산염피막에는 여러 종류가 있으나 도장하지용으로는 인산아연피막이 내마모성, 내마멸성에는 인산망간피막이 주로 이용되고 있다.⁽¹⁾

오늘날의 기계부품들이 고속화 되어가고 있고 그 중에서도 구동부 관련 부품들은 상대부품들 간의 접촉으로 동력을 전달하고 있기 때문에 내마모성은 필수조건이라 하겠다. 내마모성은 그 부품의 수명과 직접적으로 연관되어 있을 뿐만 아니라 제품의 신뢰성까지 좌우하므로 중요시되고 있다. 인산망간피막처리는 금속끼리의 직접 접촉을 방지하

는 목적으로 도료의 눈부신 진보와 아울러 최신의 결정 생성 제어 기술에 의해 광범위한 습동 분야에 사용되어지고 있으며 회생적으로 마모해 보다 평평한 습동 표면을 만든다. 이 효과에 의해 마찰계수가 저감되어 표면처리를 하지 않은 것과 비교해 마찰열의 발생이 억제되고 마찰열의 발생은 금속 표면의 경도를 내리거나 윤활유를 열화 시키는 등 트러블의 원인이 되는 경향이 있지만 인산망간피막처리를 함으로써 초기 길들임 과정을 순조롭게 진행시킨다. 그리고 습동 표면으로부터 생성된 마모입자, 인산망간피막 입자가 윤활제 역할을 하기 때문에 내마모성을 요구하는 기계부품류에 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 화성피막의 일종인 인산망간 피막의 마찰특성에 대한 연구가 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 인산망간 피막처리를 시편의 마찰 마모 특성을 알아보기 위하여 점접촉부터 선접촉, 면접촉의 단계로 진행될 수 있는 '1Ball on Disk' Type으로 마모시험을 행하였다. 이를 통하여 이 표면처리법 효과를 파악하고 그에 따르는 부품의 신뢰성을 확보할 수 있을 것이라 생

각된다.

2. 인산망간피막의 마찰, 마모 실험

2.1 시편제작 및 분석

마모시험에서 사용한 Disk의 강종은 KS규격으로 SM45C를 사용하였다. Fig. 1의 (a)에서 보는 것과 같이 강을 마모시험에 적합하도록 직경 31.6mm, 두께 9.5mm의 Disk형태로 가공하였고, Disk표면은 R_{max} 가 $2\mu m$ 이하가 되도록 연삭 가공하였다. 가공 후 $1\sim 3\mu m$ 정도의 박막으로 인산망간피막 처리된 시편을 제작하였다. 아래의 Table 1은 인산망간피막의 공정을 나타내고 있다. Ball은 고 탄소강이면서 크롬 함량이 많은 직경이 12mm 인 베어링용 강, KS 규격으로 SUJ2를 사용하였다. 시편의 표면 상태를 알기 위해서 (b)는 인산망간피막의 표면을 4000배로 SEM촬영한 것으로 입자가 방향성을 띄며, 균일하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. (c)는 피막의 두께를 확인하기 위해 cutting후 단면을 4000배로 SEM 촬영한 것으로 약 $2\mu m$ 로 측정되었다.

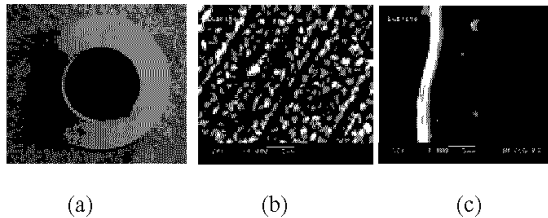


Fig. 1 Disk Specimen

단계	내용	목적
1	알칼리 탈지#1	표면의 오염물질 제거
2	알칼리 탈지#2	표면의 오염물질 제거
3	알칼리 탈지#3	표면의 오염물질 제거
4	수세	알칼리 수세 : 정화
5	표면조정	표면에 인산망간 핵 형성 및 표면 활성화
6	인산망간피막	표면에 인산망간 피막입자 생성
7	수세	산 수세 : 중화
8	방청	수용성 단기방청

Table 1 Surface Treatment Process

2.2 실험 장치 및 방법

마모시험은 '1 Ball on Disk' Type으로 건조 상태에서 시험을 행하였으며 실험 장치는 Fig. 2와 같이 FALEX社의 'Friction & Wear Test Machine'을 이용하였다.

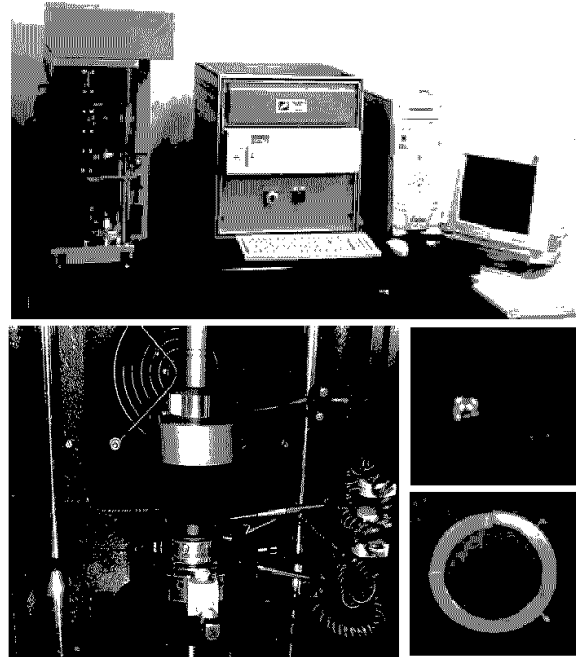


Fig. 2 FALEX- Friction & Wear Test Machine

본 시험을 위한 인산망간피막의 조건은 아래의 Table 2에서 보여지는 것과 같이 Load와 Rpm을 변화시켰으며 실험 시간은 1시간으로 하였다. 그리고 Load를 먼저 정상 Load까지 가하고 Rpm을 부여하는 방식으로 마모시험을 행하였으며 정상 Rpm까지 상승하는데 약 35s에서 40s정도 소요되었다.

Load(N)	Rpm			Time
	50	100	200	
8.9 (21b)	○	○	○	1hour
13.35 (31b)	○	○	○	
22.25 (51b)	○	○	○	

Table 2 Test condition

마모시험 후 마찰 계수의 Data를 Minitab을 통한 통계적 방법으로 분석, 원소제와 비교하기 위한 최적의 조건을 정하고 이 조건에서 인산망간피막의 마모 특성을 고찰함과 동시에 원소제의 시편과 인산망간피막처리된 한 시편의 마찰, 마모 특성을 비교 분석/고찰하였고, Disk와 Ball의 마모 상태를 표면 SEM촬영, Dot mapping, 실물현미경 촬영으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

실험조건에 따라 실험한 결과를 Load와 Rpm에 따른 평균 마찰 계수를 Fig. 3에 나타내었다. 각 Rpm별로 Load가 증가 할수록 마찰 계수가 낮게 나타났으며 저Load, 저Rpm일수록 마찰 계수가 높게 나타났다. 또한, 각 Load에서 200rpm일 때 가장 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Minitab을 통한 회귀분석법⁽²⁾으로 본 시험에 주 변수로 둔 Load와 Rpm이 마모에 미치는 영향력을 알아보기 위해 Fig. 4와 Fig. 5는 각각 Load와 Rpm에 대해서 산점도와 회귀곡선을 나타낸 것이다.

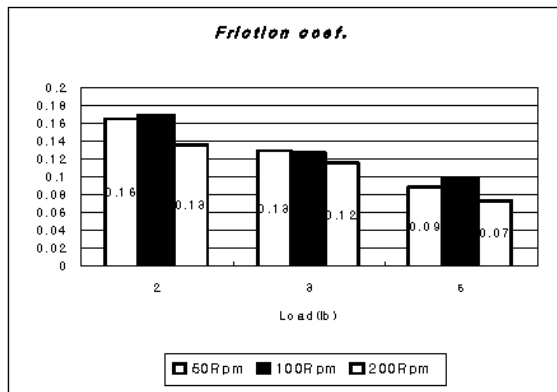


Fig.3 Average Friction coefficient with respect to wear time for each Load and Rpm

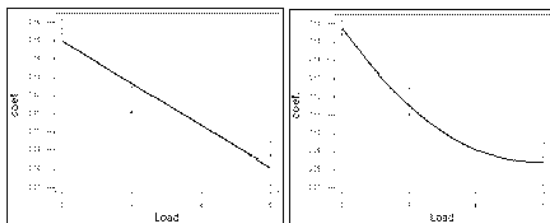


Fig.4 Scatter Diagram and Regression Curve of Friction coefficient for Load

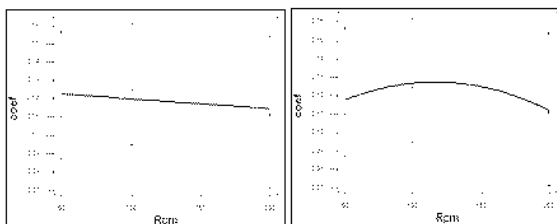


Fig.5 Scatter Diagram and Regression Curve of Friction coefficient for Rpm

아래의 Table 3은 Load의 회귀분석표이다. 여기서 R-Sq의 값을 보면, 1차식의 R-Sq는 87.8%이며, 2차식의 R-Sq는 94.8%를 나타내고 있다. 즉, Load와 마찰 계수의 관계식이 성립됨을 의미하고 Load가 매우 유의함을 의미한다.

The regression equation is					
* coef.=0.195947-0.023099Load					
S=0.012182	R-Sq=87.8%	R-Sq(adj)=86%			
* coef.=0.293588-0.08569Load+0.008763Load**2					
S=0.008627	R-Sq=94.8%	R-Sq(adj)=93%			
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.008062	0.004031	54.1712	0
Error	6	0.000447	7.44E-05		
Total	8	0.008509			

Table 3 Polynomial Regression Analysis : coef. Versus Load

다음의 Table 4는 Rpm의 회귀분석표이다. 결정 계수 R-Sq의 값을 보면 1차식의 R-Sq는 1.2%이며 2차식의 R-Sq는 3.9%를 나타내어 Rpm은 유의하지 않음을 의미한다.

The Regression Equation is					
* coef.=0.125253-0.000054Rpm					
S=0.034655	R-Sq=1.2%	R-Sq(adj)=0%			
* coef.=0.097729+0.000512Rpm-2.2E-06Rpm**2					
S=0.036908	R-Sq=3.9%	R-Sq(adj)=0%			
Analysis Of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.000336	0.000168	0.123317	0.886
Error	6	0.008173	0.001362		
Total	8	0.008509			

Table 4 Polynomial Regression Analysis : coef. Versus Rpm

인산망간피막시편과 원소재의 마모 특성을 비교 하기 위해 상기 조건으로 시험을 행한 후 이로부터 나온 Data를 바탕으로 Taguchi 방법⁽³⁾으로 최적의 조건을 정하고, 이 조건으로 원소재에 대한 마모 시험을 행하여 비교 분석, 고찰하였다.

Table 5는 Load의 수준을 2lb, 3lb, 5lb으로 Rpm의 수준을 50rpm, 100rpm, 200rpm으로 하여 Taguchi 방법에 따른 분석결과표이다. Delta 통계량은 각각의 인자로부터 가장 큰 평균에서 가장 작은 평균값의 차이이다. 그리고 Rank는 마찰계수에 미치는 영향력을 나타내는 것으로 Load가 Rpm 보다

많은 영향력을 끼치는 것을 재차 확인할 수 있다. Fig. 6은 SN비로부터 주 효과의 그래프를 보여준다. 평균이 같은 두 집단에서 분산이 작을수록 SN비는 높으며, 그 값은 높을수록 좋다. 최적의 조건으로 산포에 가장 영향을 미치는 Load는 5lb가 적당하다. 그리고 RPM은 수준 간 별 차이가 없으며 수준을 바꾸는데 현실적으로 별 어려움이 없으므로 3수준인 200Rpm으로 정하였다.

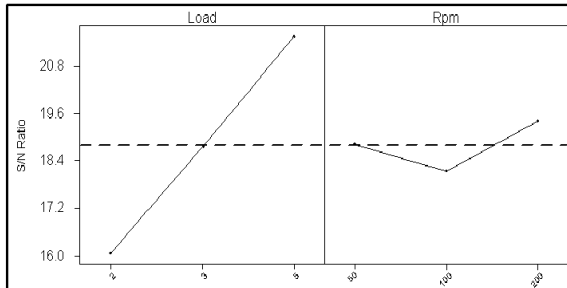


Fig.6 Main Effects Plot for S/N Ratio

Level	S/N(Load)	S/N(Rpm)
1	16.0693	18.8296
2	18.7716	18.1344
3	21.5533	19.4302
Delta	5.484	1.2953
Rank	1	2

Table 5 Response for Signal to Noise Ratios

위에서 Taguchi 방법으로 원소재와 비교하기 위하여 정한 최적의 조건은 5lb-200Rpm으로 이 조건으로 원소재의 마모시험을 행하였으며 Fig. 7은 시간에 따른 마찰계수 변화를 관찰하기 위해 매초마다 마찰계수에 대한 출력 값을 비교하기 위해 그래프로 표시하였다.

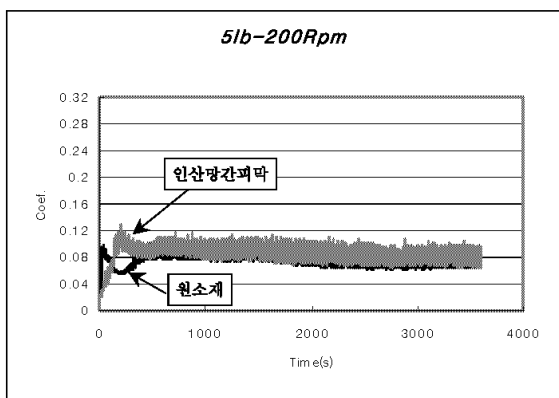


Fig. 7 Friction coefficient with respect to wear time for 5lb-200Rpm

위 그래프에서 보듯이 인산망간피막처리한 시편의 평균 마찰계수가 0.9, 원소재의 시편은 0.8정도로 비슷하게 나타나고 Duration time⁽⁴⁾ 또한 약 400s로 비슷한 값을 가지는 것으로 보아 평균 마찰계수 값으로는 내마모성을 목적으로 한 인산망간피막의 특성을 알 수 없다.

그러나 300s이내의 마모시험 초기에서는 서로 다른 마모양상을 보이고 있다. 원소재의 시편은 약 40s에 Peak 점에 도달하여 마찰계수가 낮아졌다가 다시 상승하는 모양을 띄고 있다. 이것은 표면 조도의 영향으로 Ball이 Disk 표면을 Sliding하는데 용이하여 Torque가 적게 작용한 것으로 보인다.

Fig. 8은 5lb-200Rpm의 조건으로 행한 마모시험의 Data를 300s까지만 추출하여 작성한 그래프이다.

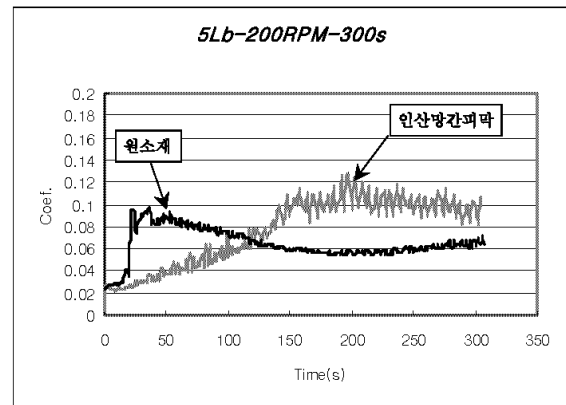


Fig. 8 Friction coefficient with respect to Wear time for 5lb-200Rpm-300s

인산망간피막처리 한 시편의 마모양상을 보면 180s까지 마찰계수가 완만하게 증가하여 Peak점에 도달하고 있다. 따라서 마모시험 초기에 짧은 시간 동안 인산망간피막의 내마모성과 윤활성의 효과가 나타나고 있다. 180s 이후에는 피막 층이 대부분 박리되어 원소재가 드러났다고 볼 수 있는데 아래의 Fig. 9는 시간에 따른 인산망간피막의 Dot mapping 결과이다. 흰색 Dot가 원소성분을 나타내고 있으며 분석은 인산망간 피막의 주성분인 P, Mn과 피막 박리 후 드러나는 Fe성분에 대해서 행하였다.

Fig.9를 보면 시험 전(0s)에 P와 Mn이 하얗게 보임을 알 수 있다. 마모 시험 후 ball이 지나간 흔적(검정색 line)이 뚜렷하게 보이며 이것으로부터 피막은 박리가 되었다고 할 수 있다. 또한 점차 Fe의 Dot가 나타나는 것에서 인산망간피막 층이 박

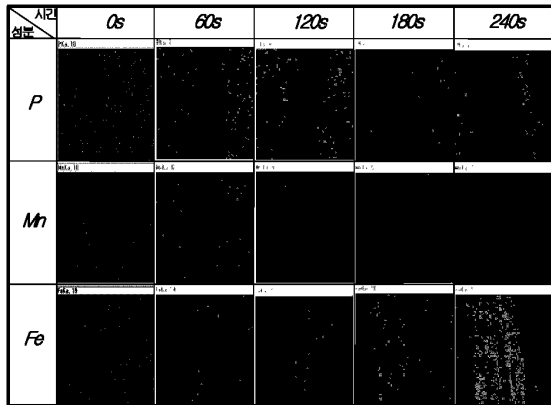


Fig. 9 Dot mapping for Manganese Phosphate Film Coating

리되고 원소재가 드러나고 있음을 확인할 수 있다.

180s에서 P와 Mn의 Dot가 거의 없는 것으로 보며 그 시간 부근에서 피막이 완전 박리된 것으로 보인다. 따라서 180s 이후에는 인산망간피막이 마모 특성에 영향을 주지 못하고 있음을 알 수 있다.

z Fig. 10은 일정 시간 마모시험 후 Ball과 Disk 표면 SEM촬영에서도 이와 같은 현상을 확인할 수 있다. (a)의 Ball는 50배 촬영했으며 Disk는 100배 촬영한 것이며 (b)와 (c)는 각각 검은색부분과 하얀색부분을 4000배 확대 촬영한 것이다.

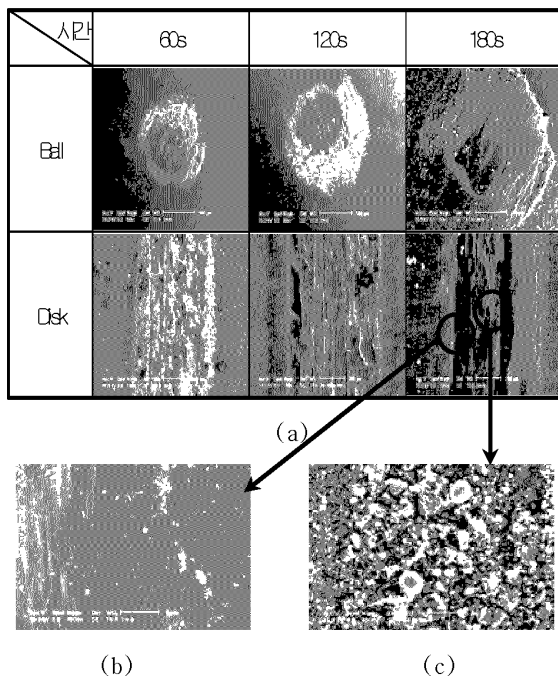


Fig. 10 SEM micrographs of Ball & Disk surface after wear test

위의 사진을 볼 때 하얀 부분이 인산망간피막의 입자이고 검정 부분은 피막 박리 후 드러나는 원소재임을 알 수 있다. 마모 시험 시간에 따른 Disk 표면을 보면 180s 이전에 거의 인산망간피막이 박리되었으며 원소재가 확연히 드러나는 것이 보인다. 또한 마모가 진행됨에 따라 인산망간피막의 입자가 Ball쪽으로 많이 묻어 있음을 확인할 수 있다

Type	마모시험 전		마모시험 후	
	R _{max}	R _z	R _{max}	R _z
인산망간피막시편	2.55	1.73	4.93	3.5
원 소 재	1.25	0.75	6.67	4.9

Table 6 Surface roughness

Fig.11은 51b-200Rpm-1Hour 조건에서 마모시험 후 Disk 표면의 마모면 사진을 실물현미경으로 관찰한 사진이다. (a)는 인산망간피막처리 시편의 마모 면이고 (b)는 원소재의 마모 면이다.

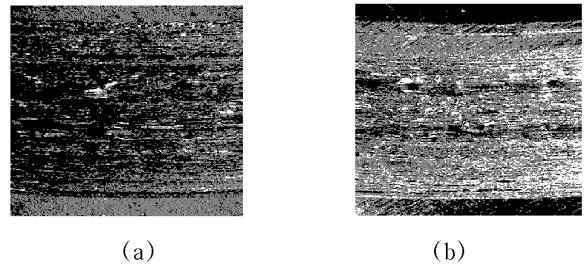


Fig. 11 Wear damaged surface

밝게 나타나는 곳이 마모시험 시 Ploughing⁽⁵⁾된 것으로 (b)에서 많이 나타나 마모 면이 거친 반면 (a)에서는 검은색의 입자들을 확인할 수 있는데 이것은 Ploughing 되어진 부분에 인산망간피막의 마모 입자가 메워져 마모 면을 매끄럽게 만들고 있는 것으로 보아 길들여짐 현상이 나타나고 있다. 이것은 Table 6에 나타난 마모시험 전, 후 조도의 변화로도 확인할 수 있다

4. 결론

본 연구에서는 금속끼리의 직접 접촉을 방지한 목적으로 널리 쓰이고 있는 인산망간피막의 마모 특성을 알기 위해 '1Ball on Disk' Type으로 마모시험을 행함과 동시에 이로부터 나온 Data의 통계적 분석을 통해 인산망간피막의 마모 특성을 확인하였다. 원소재와의 마모 특성을 비교하기 위해 마모시험 전, 후의 Dot mapping, 표면 SEM촬영 등을 통해

관찰하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인산망간피막의 마찰계수는 Load와 Rpm이 높아질수록 낮아지는 현상을 보였으며 특히, 각 Load 별 200Rpm일때 상대적으로 더 낮은 값을 나타내었다.

2. 마모시험에 주 변수로 두었던 Load와 Rpm에 대한 마찰 계수를 Minitab으로 회귀 분석한 결과 Load는 인산망간피막의 마모 특성에 큰 영향력을 미치고 있는 반면, Rpm의 영향력은 미비했다.

3. 인산망간피막은 원소재와의 비교에서 마모시험초기에 박리되어 그 이후에는 내마모성의 특성을 확인할 수 없었다. 그러나 마모초기 약 180s이내에는 마찰계수의 상승이 완만하게 나타나 탁월한 내마모성을 보였다.

4. 마모시험 후의 마모표면을 실물현미경을 관찰해보면 Ploughing되어진 곳에 인산망간피막입자가 메워져 있음을 확인되어지는데 이것은 길들여짐 현상이 나타난 것으로 생각된다.

5. 본 연구를 통해 인산망간피막의 마찰, 마모 특성을 파악 할 수 있었고, 건조상태에서 초기 내마모성이 우수함을 알았다.

후기

본 연구는 지역대학육성사업단(BK21), (주)성후테크의 지원으로 이루어졌으며, 이하 관계자 여러분의 노고에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김중건, "磷酸鹽 皮膜劑의 工程概念", 한국표면공학회지, 제5권, 제3호, pp. 86-88, 1972..
2. 박상규, 이영광, "Minitab을 활용한 현장 실무 중심의 실험계획법", 청호, pp. 267-300, 2003.
3. 이상복, "Minitab을 이용한 다구찌 기법 활용", 이레테크, pp. 61-76, 130-170, 2001.
4. Da-Ming Zhuang, You-Rdong Liu, Jia-Jun Liu, Xiao-Dong Fang, Ming-Xi Guang, YueCui "Microsturcture and tribological properties of sulphide coating produced by ion sulphuration" Wear, 225-229(1999)799-805.

5. 문봉호, "SEM Tribosystem에 의한 CVD TiN막의 미시적 마모 특성 평가", 한국표면공학회지, 제37권, 제3호, pp. 137-145, 2004.