

## EHA 유압펌프 부품의 플라즈마 질화기술 적용에 관한 연구

김은영, 김범석, 이상을\*

한국항공대학교 항공재료공학과

### A study for Application of Ion Nitriding on EHA Hydraulic Pump Parts

Eun-Young Kim, BomSok Kim, SangYul Lee\*

Department of Materials Engineering, HanKuk Aviation University, Koyang 412-791, Korea

(Received 1 November 2005 ; accepted 22 November 2005)

#### Abstract

In this study, ion nitriding of a EHA pump part made of AISI 4340 steel was performed under different applied power conditions to study the relationship between dimensional changes of specimens and the type of applied power source. Microstructures and microhardness distribution at different processing conditions were also examined. Duplex surface treatment of ion nitriding with the optimum process conditions to produce the minimum dimensional variation in a EHA pump part and a TiN thin film coating by unbalanced magnetron sputtering was performed and the specimens with a duplex surface treatment were subjected to a high speed wear test to evaluate the wear performance of EHA hydraulic pump parts with various surface treatment conditions. Results indicated that uniform and continuous surface layer with a minimum dimensional variation could be obtained by ion nitriding with bipolar mode power source and much enhanced wear characteristics with a duplex surface treatment could be obtained, compared with results from ion nitriding or single-layered TiN coating specimens.

*Keywords* : Ion nitriding, Bipolar power supply, EHA (Electro Hydrostatic Actuator), TiN PVD coating, High speed wear test

## 1. 서 론

일반적인 전기 유압식 서보 구동장치는 유압펌프를 중앙에 배치하여 조종면, 브레이크, 역추력장치, 착륙장치 및 도어 등과 같은 작동기에 필요로 하는 에너지를 공급하는 방식으로 동적인 응답이 빠르다는 장점이 있으나 서보 밸브에서의 압력손실로 인해 이론적 최대효율이 38%를 넘을 수 없게 되어 있다. 또한 펌프와 작동기들 사이의 에너지를 교환할 수 있는 고가의 유압 배관 및 서보 밸브가 요구되며 배관의 높은 유지 및 보수 비용, 관의 무게로 인한 중량 증가 그리고 배관에서의 추가적인 유체 에너지 손실 등의 문제가 발생한다. 현재 항공기 유압펌프의 개발은 경량화와 운용비용의 최소화를 목표로 한다. 최근 주목받고 있는 EHA system(이하

EHA로 약칭)은 조종면과 같은 작동 장치 가까이에 작동기를 위치시키며, 각 EHA는 자체 유압저장용기와 전기모터로 구동되는 유압펌프를 가지고 있다<sup>1)</sup>. 따라서 유압발생장치와 작동기 사이에 요구되는 파이프가 줄어들게 되며 펌프는 압축오일을 생성해서 필요로 하는 장치에 공급하게 된다. 현재 EHA system은 밸브플레이트, 실린더 배럴, 피스톤, 샤프트 등으로 이루어진 유압펌프의 부품에 요구되는 기계적 성질을 향상하기 위하여 이온 질화를 포함한 다양한 표면처리 연구가 진행되고 있다.

이온 질화법은 다른 표면처리법과 비교하여 낮은 온도에서 실시하는 저온 표면 처리법으로 열변형이 적으며 불활성기체인 아르곤과 반응하여 상대적으로 안정하고 균일한 화합물층을 형성하여 내마모성<sup>2-5)</sup>, 내피로성, 내열응착성, 내식성, 내열충격성이 우수하기 때문에 자동차부품, 기계부품, 공구부품 등 산업 전반에 널리 사용되고 있다. 이온 질

\*Corresponding author. E-mail : sylee@hau.ac.kr

화에 영향을 미치는 인자에는 가스조성, 처리온도, 처리시간 등이 있으며 이를 공정변수로 하여 현재에도 다양한 연구가 이루어지고 있다<sup>6)</sup>. 그러나 이온 질화 공정에서 발생하는 열 변형은 다른 표면처리법에 비교하면 극소이지만 항공기용 유압펌프의 부품과 같이 10000 rpm 이상의 빠른 속도와 높은 작업압력이 요구되는 환경에서는 펌프의 효율성과 안정성의 문제와 직결되기 때문에 이온 질화시 발생하는 열변형을 극소화할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 이온 질화시 발생하는 열 변형을 극소화하면서도 균일하고 안정된 화합물층 생성을 위하여 플라즈마를 발생하는 전원의 종류와 공정변수를 변화하여 최적의 이온 질화 조건을 확립하고자 하였다. 또한 공정변수인 bipolar 전원의 duty ratio를 변화시킴으로써 수반되는 홀 사이즈의 변형 및 경도 특성을 분석하였다. 그리고 최근에 PVD 박막을 펌프 부품에 적용하여 부품의 성능을 향상시키는 연구가 활발하게 진행되고 있는데 본 연구에서는 모재에 실시하는 이온 질화 처리가 펌프 부품의 성능을 향상시키기 위해 적용되고 PVD TiN 박막 코팅의 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

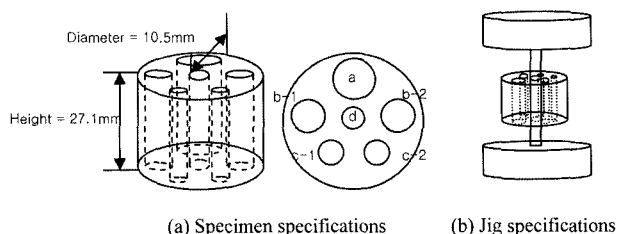


Fig. 1. Specimen and jig specifications for ion nitriding; (a) Specimen specifications, (b) Jig specifications.

Table 1 Average hole size (mm)

Hole	a	b-1	b-2	c-1	c-2
Size (diameter)	7.6	5.7	5.7	3.6	3.6

Table 2 Conditions for ion nitriding

Specimens	A	B	C	D
Temperature	500°C	500°C	500°C	500°C
Total pressure	2 torr	2 torr	2 torr	2 torr
Sputtering time	1 hr	1 hr	1 hr	1 hr
Processing time	5 hr	13 hr	13 hr	13 hr
Voltage	600 V	600 V	600 V	600 V
Power supply	<b>D.C mode</b>	Unipolar mode pulse on time: pulse off time = 8 μs : 8 μs	Bipolar mode - Duty ratio: +Duty ratio = 50%:50%	Bipolar mode - Duty ratio: +Duty ratio = 70%:30%

## 2. 실험방법

본 실험의 시편은 유압 부품과 유사한 재질인 AISI 4340을 사용하였으며 형상은 실제 펌프의 부품 형상을 고려하여 그림 1(a)와 같이 5개의 홀을 포함하여 제작하였다. 그림 1(b)는 지그에 장착한 시편의 형상이며 표 1에는 시편의 홀 평균 크기를 나타내었다. 실험 전 시편 표면의 청정을 위하여 SiC 연마재 #1500과 #2000로 연마한 후 아세톤과 알코올에 각각 10분씩 초음파 세척을 하여 사용하였다. 세척과정을 거친 시편을 질화 장비 내에 장착시키고 진공도가  $4 \times 10^{-2}$  torr가 되면 챔버 내의 압력이 1 torr가 되도록 H<sub>2</sub>를 넣어준 후 일정량의 Ar을 흘려주어 스퍼터링을 1시간 동안 실시하였다. 스퍼터링을 마친 후 H<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>를 챔버 내로 유입시켜 챔버 내의 압력을 2 torr로 유지하며 13시간 동안 질화 처리를 하였다. 이때 초기 전압은 600 V, 챔버의 온도는 250°C로 셋팅해주며 질화 처리 동안 시편의 온도는 500°C로 유지해준다. 질화 처리는 표 2에서와 같이 각각 A, B, C, D의 조건으로 실시하였다.

이온 질화 처리를 한 시편의 홀 내부에 균일한 화합물층 형성을 확인하기 위하여 광학현미경을 사용하여 미세조직을 관찰하였다. 광학현미경은 세 곳의 위치를 지정하여 각 실험 조건별로 촬영하였다.

각 시편의 홀 내부 화합물층의 경도는 Matsuzawa MXT-Knoop 미소 비커스 경도기를 이용하여 시험하중 0.5 N에서 시편당 총 10회 압입을 하였으며 최소, 최대 값을 제외한 나머지 값들의 산술 평균치를 이용하여 경도 값으로 취하였다.

홀의 크기는 Zeiss사의 Prismo7 3차원 측정기로 정밀측정(정밀도  $\leq 1.7 \mu\text{m}$ )하였다. 치수 측정은 실험 전 시편의 홀 치수를 측정 후 질화 후의 치수를 측정하여 편차를 구하였다. 또한 홀 내부의 위치에 따른 질화 정도의 차이가 발생하여 위치에 따른 치수 변형의 정도가 다르게 발생했는지 확인하

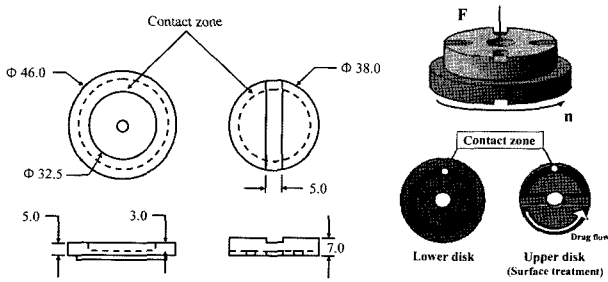


Fig. 2. Specimens specifications for wear test.

기 위하여 시편 윗면으로부터 각각 3 mm, 15 mm 위치에서 홀 크기를 측정하였다.

유압 펌프 부품에 실시하는 이온 질화가 마찰계수에 미치는 영향을 규명하기 위하여 고속 마모실험을 실시하였다. 마모실험에 사용된 시편의 형상을 그림 2에 나타내었으며, 시험 장비와 관련된 자세한 설명은 다음 논문을 참고하여 알 수 있다<sup>7)</sup>. 모든 시편은 표면 처리 전에 Ra=0.2 μm의 표면조도 값을 갖도록 연마하였다. 표면 처리된 상부 시편은 하부 시편에 링 형태로 접촉하며, 마모 시험 후 이 접촉면과 비 접촉면의 높이차 및 표면 상태를 비교하여 내마모 특성을 평가하였다. 마모시편에 대해서는 본 연구에서 확보된 최적의 이온 질화

조건을 사용하여 처리하였으며 마모실험에는 무처리시편, 이온 질화 처리만 실시한 시편, 무처리시편에 TiN코팅을 실시한 single-layerd TiN코팅 시편, 그리고 이온 질화처리와 TiN코팅을 결합하는 duplex TiN코팅 시편 등 총 4종류의 시편을 제작하여 각 시편의 내마모 특성을 분석하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 이온질화를 실시한 AISI 4340의 미세조직

그림 3에서 보여주는 바와 같이 직류전원을 공급한 시편 A에서는 홀 직경의 크기에 관계없이 두꺼운 화합물층이 생성되지만 그 두께가 고르지 않으며 시편의 각 부위별로 불균일한 화합물층을 갖는 것으로 나타났다. Unipolar 전원을 공급한 시편 B에서는 시편 A에서와 같이 두꺼운 화합물층이 생성되지만 위치별, 홀 크기별 차이가 크게 발생하지 않고 상대적으로 균일하게 형성됨을 알 수 있으며 내부조직 역시 시편 A에 비하여 고르게 분포되었음을 확인하였다. Bipolar 전원을 공급한 시편 C(-duty ratio : +duty ratio = 50% : 50%)는 표면의 화합물층이 매우 균일하며 홀 직경의 크기에 관계없이 고른 내부조직을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있었으

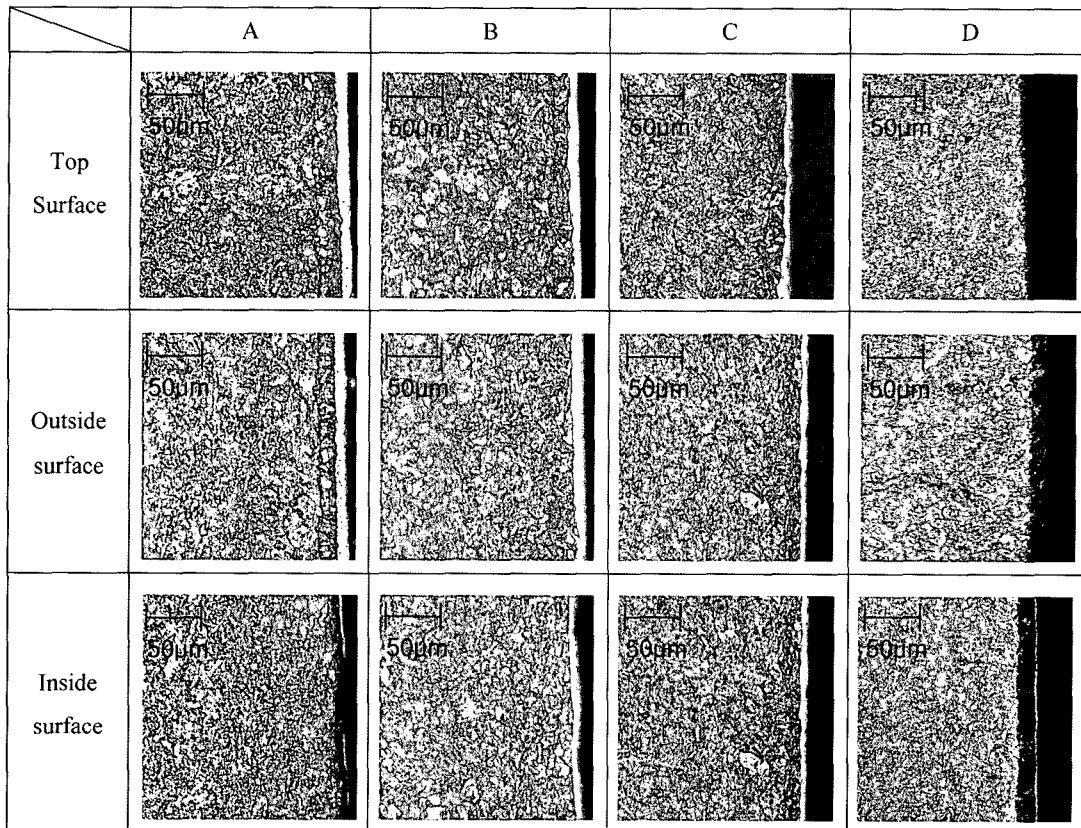


Fig. 3. Optical micrographs from various location of the ion nitrided specimen.

며 Bipolar 전원을 공급한 시편 D(-duty ratio : +duty ratio = 70% : 30%) 역시 시편 C에서와 마찬가지로 홀 직경의 크기에 관계없이 상당히 균일한 내부조직과 안정된 화합물층을 얻을 수 있었으며 결과적으로 전원공급의 방법에 따라 화합물층의 두께와 질화의 균일도에 차이가 있음을 확인하였다.

이 결과는 이온질화시 발생하는 표면반응과 공급해주는 전류의 관계로 설명이 가능하다. 이온 질화는 방출된 2차 전자에 의해 질소원자는 이온화되며 이온화된 질소원자가 음극표면에 충돌하여 철원자를 스퍼터링하게 된다. 이때 스퍼터링에 의해서 방출된 철원자는 질소원자와 결합을 하게 되고 반응으로 생성된 화합물층이 표면 흡착작용에 의해 표면반응이 일어나게 된다. 직류전원에 비하여 unipolar 전원은 정규적인 방전 소멸기간이 존재하여 전자와 이온의 재결합으로 인한 표면 반응속도의 감속을 유도한다. 즉, 이온화된 질소원자가 음극의 표면에 충돌하게 되어 철원자를 방출시키기 위한 전자와 재충돌이 일어나야 하므로 방출시간이 지연되며 방전유지기간에 전기적인 힘에 의해 일정가속도를 가지고 운동하던 질소이온이 방전 소멸기간 동안 전기적인 힘이 제거되므로 철원자를 방출시킬 만큼의 충분한 운동에너지를 갖지 못하게 되어 화합물층의 형성이 감소되는 것으로 사료된다.

3.2 이온질화를 실시한 AISI 4340의 경도

이온 질화시 전원공급의 차이에 따른 경도 분포를 그림 4에 나타내었다. Bipolar 전원을 공급한 시편 C(-duty ratio : +duty ratio = 50% : 50%)와 시편 D(-duty ratio : +duty ratio = 70% : 30%)는 각각 761Hv<sub>0.05</sub>, 781Hv<sub>0.05</sub>를 나타내었으며, unipolar 전원을 공급한 시편 C가 671 Hv<sub>0.05</sub>를 나타냈다. 직류전

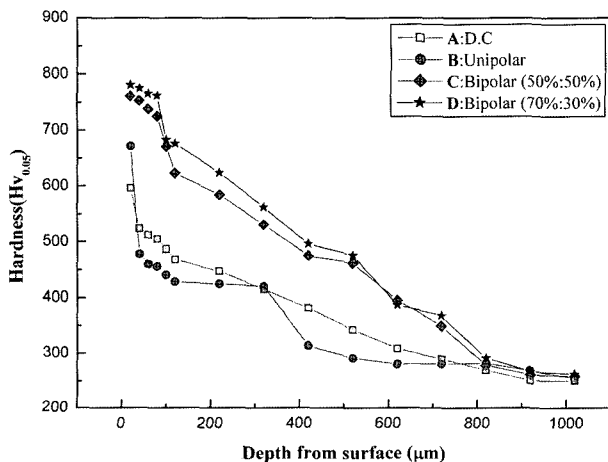


Fig. 4. Results from microhardness measurement.

원을 공급한 시편 A는 다른 조건에 비하여 가장 낮은 596.4 Hv<sub>0.05</sub>를 나타내었다. 이와 같은 결과 역시 표면과 전류와의 관계로 설명이 가능하다. 직류전원의 경우 방전 소멸기간이 존재하지 않으므로 홀 내부의 Hollow cathode discharge 효과에 의해 홀 외부보다 홀 내부에 전자의 이온 농도가 높아져서 홀 내부로 갈수록 중성 질소 원자의 이온화율이 증대되므로 질소 원자의 농도는 감소하게 되고 그 결과 이온의 음극충돌에 의해 스퍼터 된 철원자가 중성질소원자와 결합하지 못하게 되어 화합물층 형성이 어려워진다. 그러나 unipolar, bipolar 전원의 경우 방전 소멸기간 동안에 전자와 이온의 재결합에 의한 중성 질소 원자 농도를 증가시킬 수 있으므로 경도가 우수하게 나타나는 것으로 분석된다. Bipolar 전원을 사용한 경우에 unipolar 전원보다 더 높은 경도와 고른 화합물층을 갖는 이유는 unipolar는 방전 휴지기간에 질소의 자연중화로 재결합이 발생하나 bipolar는 duty ratio를 이용하여 강제적으로 재결합을 유도하므로 재결합속도가 unipolar보다 빠르기 때문인 것으로 분석된다.

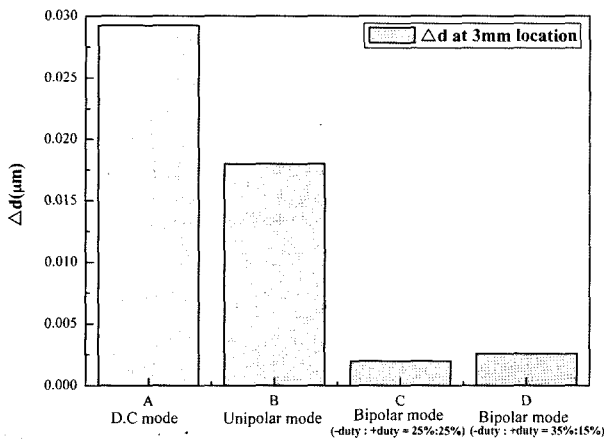
3.3 이온질화를 실시한 AISI 4340의 홀 사이즈 변화

표 3에는 이온 질화를 실시한 시편의 홀 내부의 치수변화를, 그림 5에서는 전원공급방법에 따른 시편 홀 내부의 치수변형을 비교하여 나타내었다. 직류전원을 공급한 시편 A에서는 평균 0.0284의 홀 치수 변형을 보였으며 unipolar 전원을 공급한 시편 B에서는 0.0162로 시편 A에서보다는 적은 변형이 확인되었다. 그러나 bipolar 전원을 공급한 시편 C와 D의 경우에는 시편 A나 시편 B보다 치수변형이 극소화됨을 알 수 있다.

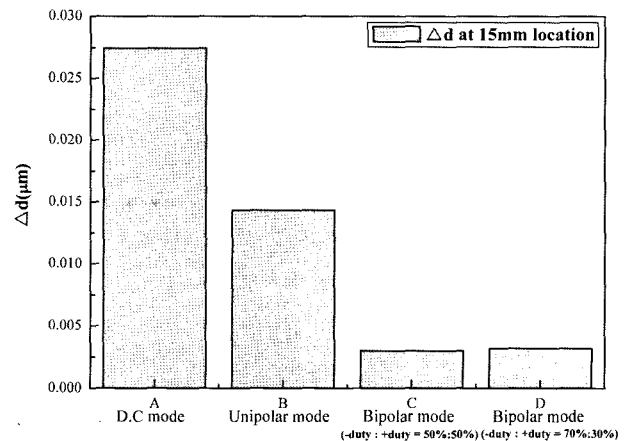
시편 A에서는 0.5%, 시편 B에서는 0.3%, 시편 C에서는 0.06%, 시편 D에서는 0.06%의 변화율을 나타내며 직류전원의 경우 bipolar 전원에 비하여 홀 치수가 약 8배가 증가하였으며 bipolar 전원은 unipolar 전원과 비교하여 약 5배 홀 치수가 감소하였음을 알 수 있었다. 이는 bipolar 전원이 직류전원과 unipolar 전원에 비교하였을 때 아크 방전이 전혀 발생하지 않을 뿐만 아니라 Hollow cathode discharge 효과가 매우 적게 발생하므로 시편의 균일한 온도가 유지 가능하여 질화시 발생하는 열변형량을 줄이는 효과를 얻을 수 있었기 때문인 것으로 사료된다. 결과적으로 이온 질화시 직류전원과 unipolar 전원을 공급할 때 발생하는 열변형을 bipolar 전원으로 공급하면 극소화할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 시편 C와 D의 변화율이 거의 유사함을 알 수 있는데 이로써 bipolar 전원

Table 3 Dimensional variation before and after ion nitriding

	Before ion nitriding		After ion nitriding		Deviation	
	3 mm location	15 mm location	3 mm location	15 mm location	3 mm location	15 mm location
(A)	7.5963	7.4932	7.6121	7.5131	0.0158	0.0199
	5.6847	5.6712	5.7095	5.7233	0.0248	0.0521
	5.6474	5.5928	5.6798	5.6138	0.0324	0.021
	3.5821	3.5612	3.6093	3.5831	0.0272	0.0219
	3.5911	3.6124	3.6372	3.6347	0.0461	0.0223
(B)	7.5913	7.5956	7.6141	7.6088	0.0228	0.0132
	5.6982	5.6951	5.7150	5.7116	0.0168	0.0165
	5.6982	5.7074	5.7163	5.7148	0.0181	0.0074
	3.5979	3.5936	3.6113	3.6132	0.0134	0.0196
	3.5966	3.5956	3.6155	3.6106	0.0189	0.0150
(C)	7.5780	7.5860	7.5760	7.5830	-0.0020	-0.0030
	5.6560	5.6680	5.6530	5.6660	-0.0030	-0.0020
	5.6660	5.6620	5.6630	5.6610	-0.0030	-0.0010
	3.5900	3.5780	3.5890	3.5760	-0.0010	-0.0020
	3.6080	3.5800	3.6070	3.5800	-0.0010	0
(D)	7.6220	7.6310	7.6210	7.6290	-0.0010	-0.0020
	5.5690	5.6300	5.5670	5.6270	-0.0020	-0.0030
	5.6710	5.6490	5.6700	5.6470	-0.0010	-0.0020
	3.5510	3.5320	3.5480	3.5310	-0.0030	-0.0010
	3.6090	3.5870	3.6030	3.5790	-0.0060	-0.0080



(a) 3mm location below the top surface inside hole



(b) 15mm location below the top surface inside hole

Fig. 5. Variation of hole diameter at different power conditions; (a) 3 mm location below the top surface inside hole, (b) 15 mm location below the top surface inside hole.

서 변수로 가하였던 duty ratio는 홀 사이즈 변화에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알 수 있었다. 즉, bipolar 전원에서 duty ratio는 홀 사이즈 변화에는 영향을 끼치지 않음을 확인하였다.

3.4 Duplex 처리한 EHA부품의 마모실험 결과

그림 6에서는 1700 rpm부터 감속하여 고속 마모

실험을 실시한 시편들의 Stribeck curve<sup>8)</sup>를 나타내었다. 무처리시편, 이온 질화 시편, 그리고 single-layered TiN코팅 시편 모두 마모실험 초기에는 약 0.08~0.09 정도의 높은 마찰 계수 값을 나타내는 반면 모재에 이온 질화 처리를 실시하고 그 위에 PVD TiN 코팅을 실시한 duplex TiN코팅을 실시한 시편은 마모실험 초기에 약 0.04의 낮은 마모계수를 나

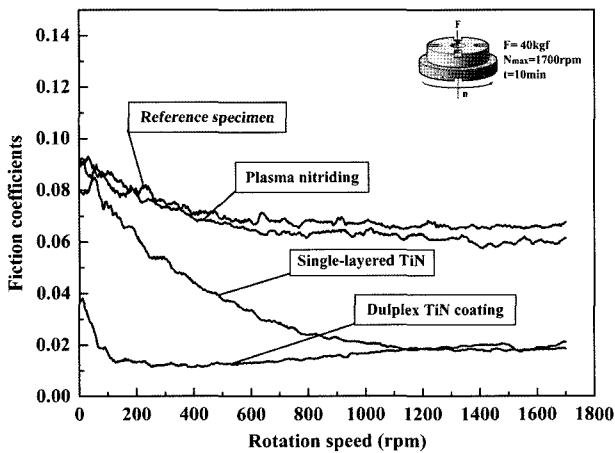


Fig. 6. Stribeck curves of AISI 4340 steel, ion nitrided, single-layered TiN and duplex TiN coated specimen.

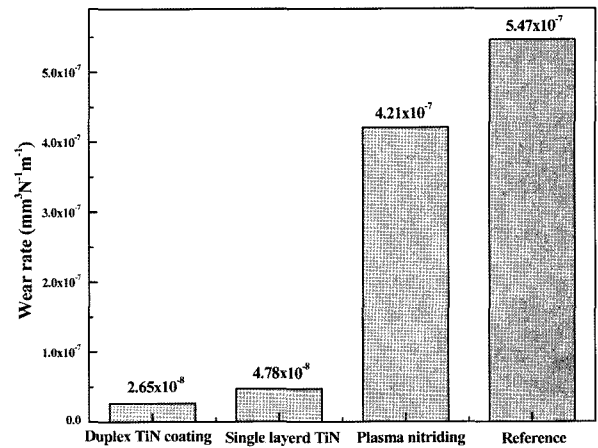


Fig. 8. Wear rates of each specimens during wear test at 1700 rpm.

타내었다. Stribeck curve의 관찰 결과를 고찰해보기 위하여 그림 7에서는 각 시편의 고속 마모 실험 후 마모면의 형상(그림 7의 a), b), c), d)을 주사 전자 현미경(SEM)으로 관찰하였으며 마모 단면의 형상을 (그림 7의 e), f), g), h) 도식화하였다. Duplex TiN 코팅과 single-layered TiN 코팅 시편 모두 일반적인 연삭마모 거동을 보였지만 single-layered TiN 코팅 시편의 마모 트랙 표면이 보다 거칠어졌음을 관찰할 수 있었다. 이온 질화 시편의 경우 소량의 응착 마모 거동을 보였고, 무처리시편의 경우 마모 표면의 대부분의 영역에서 응착 마모 거동을 나타내었다. 주사 전자 현미경(SEM)으로 관찰한 단면 형상을 이용, 마모량을 측정하여 그림 8에 각 시편의 wear rate를 나타내었다. Duplex TiN

코팅은 single-layered TiN 코팅 시편보다는 1.8배, 이온 질화 시편 보다는 10배 가량 wear rate가 감소함을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 TiN 코팅층의 아래에 존재하는 질소 확산층이 코팅층의 하중 지지력을 향상시켜 마모 거동의 향상을 가져오는 현상으로 인해 나타나는 현상으로 생각된다. 일반적으로 표면의 응력이 많이 가해지면 single-layered TiN코팅 시편의 경우 모재의 소성변형에 의하여 코팅층의 변형 및 파괴가 발생하는데, duplex TiN코팅 시편과 같이 이온 질화를 통하여 기존의 모재보다 3~4배 가량 경도가 높은 확산층을 생성한 후에, PVD 코팅을 하게 되므로 경도가 높아진 화합물층 때문에 모재의 소성변형을 억제하여 박막과 모재와의 결합력이 증대되어 박막의 특성을 크게 향상시킬 수 있다고 사료된다.

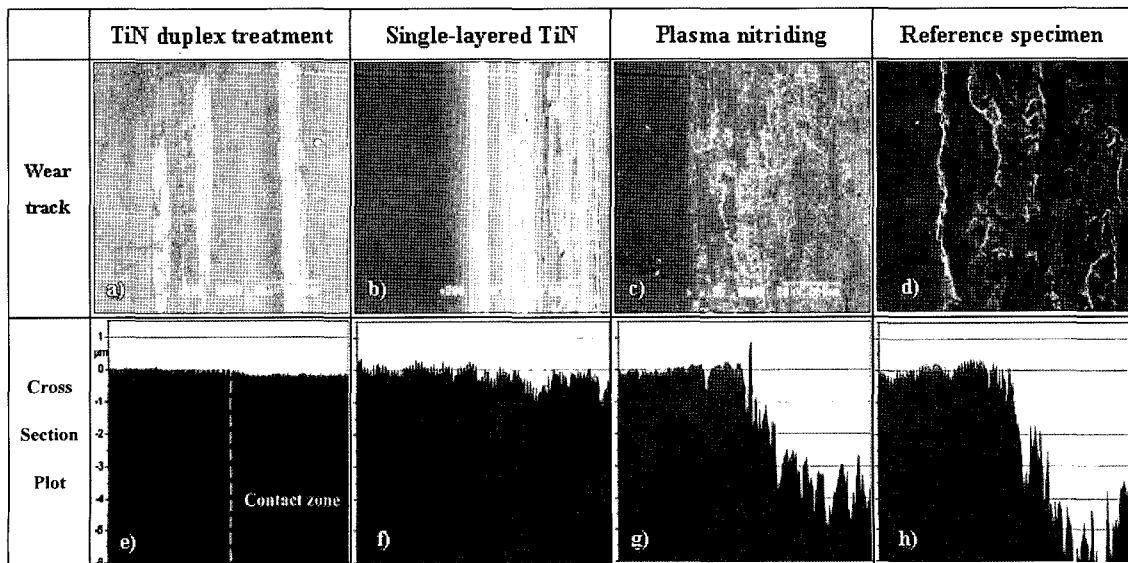


Fig. 7. SEM micrographs from worn track surfaces.

## 4. 결 론

EHA 펌프 부품의 내마모 특성의 향상을 위한 표면처리 기술 개발을 목적으로, 균일한 플라즈마 질화처리 공정개발, 저변형 이온 질화 공정 개발, 모재에 이온 질화를 실시한 후 코팅을 하는 duplex 표면 처리를 적용함으로써 펌프 부품의 마모, 윤활 특성의 향상을 실현하고자 하였으며 이 실험을 통해 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 기존의 직류전원으로는 홀 내부에 균일한 화합물층이 생성되지 않는 문제점을 unipolar, bipolar 전원공급을 대체함으로써 좁고 깊은 홀 내부에도 홀 직경의 크기에 관계없이 조직적으로 우수하며 균일한 화합물층을 형성할 수 있었다.

2. Bipolar 전원의 이온 질화 공정은 균일한 플라즈마 밀도를 형성하기 용이하여 기존의 가스 질화 방식과 unipolar 전원을 공급한 이온 질화보다 소량의 변형을 보였다. 이유는 bipolar 전원을 사용한 경우 아크방전이 전혀 발생하지 않을 뿐만 아니라 Hollow cathode discharge 효과가 미세하게 발생하므로 시편의 균일한 온도가 유지 가능하여 질화시 발생하는 열변형량을 줄일 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

3. TiN코팅 전에 이온 질화 처리를 실시하는 duplex TiN코팅의 고속 마모 실험 결과, 모재에 질화 처리 없이 TiN코팅을 하는 single-layered TiN코팅보다는 1.8배 wear rate가 감소함을 관찰할 수 있

었으며 또한 고체 영역의 마찰 계수 값 역시 다른 표면처리보다 2배 이상의 낮은 값(약 0.04)을 나타내었다. 이러한 결과는 이온 질화를 통하여 TiN 코팅층 아래에 존재하는 질소 확산층이 코팅층의 하중 지지력을 향상시켜 마모 거동의 향상을 가져오는 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. D. Howe, Sensors and Actuators A, Phys., 81 (2000) 268.
2. L. C. Gontijo, R. Macjhado, E. J. Miola, L. C. Casteletti, P. A. P. Nascente, Surface and Coating Technology, 183 (2004) 10.
3. H. Michel, T. Czerwicz, M. Gantois, D. Ablitzer, A. Ricard, Surface and Coating Technology, 72 (1995) 10.
4. R. Grün, H. Günther, Mater. Sci. Eng., A140 (1991) 435.
5. A. S. W. Kurny, R. M. Mallya, M. M. Rao, Journal of the Less Common Metals, 144 (1988) 201.
6. E. J. Miola, S. D. Desouza, P. A. P. Nascente, M. Olzon-Dionysio, C. A. Olivieri, D. Spinelli, American Vacuum Society, A 18 (2000) 2733.
7. S. Y. Lee, S. D. Kim, Y. S. Hong, Surface and Coating Technology, 193 (2005) 266.
8. G. Luengo, J. Israelachvili, S. Granick, Wear 200 (1996) 328.