

# 마멸입자 형태해석에 의한 유압피스톤용 모터의 상태감시

문병주\*, 조연상\*, 박흥식\*\*, 전태옥\*\*

## Condition Monitoring of Hydraulic Piston Motor using Morphological Analysis of Wear Particles

Byung-Joo Moon\*, Yon-Sang Cho\*, Heung-Sik Park\*\*, Tae-Ok Jun\*\*

### Abstract

Morphological analysis of wear particles is one of useful methods for machine condition monitoring because it is well reflected in machine driving state. This paper was undertaken to apply to the condition monitoring of hydraulic piston motor. The lubricating wear test was performed under different experimental conditions using the wear test device and wear specimens of the pin on disk type was rubbed in paraffinic base oil by three kinds of lubricating materials, varying applied load, sliding distance. The four shape parameters (50% volumetric diameter, aspect, roundness and reflectivity) are used for morphological analysis of wear particles. The results showed that the four shape parameters of wear particles depend on a kind of the lubricating materials. It was capable of calculating presumed wear volume for three kinds of materials on driving time to foresee a damage condition of lubricating materials.

**Key Words :** Morphological analysis(형태해석), Hydraulic piston motor(유압용 피스톤 모터), Shape Parameter(형태 파라미터), Wear particles(마멸입자), Condition monitoring(상태감시)

## 1. 서 론

최근 유압기기의 개발동향이 소형경량화, 고출력 및 고밀도화의 방향으로 진행됨에 따라 각종 유압 기계시스템에 사용되고 있는 유압펌프, 유압실린더 및 유압모터 등과 같은 유압기기의 습동부에서는 필연적으로 마찰에 의한 마멸이 일어나기 마련이고, 이때 발생되어진 마멸분은 습

동부위의 누유증대 또는 소착상태를 유발하여 각종 유압 기기의 고장 요인이 되고 있다.<sup>(1-2)</sup>

유압용피스톤 모터(Hydraulic piston motor)의 내부 습동부는 Slipper pad와 Swash plate 사이, Valve plate와 Cylinder block 사이, Piston 과 Cylinder block bore의 크레 3가지로 구분되고 이들 모두가 습동부의 윤활해석이 유압모터의 개발에 핵심적인 요소기술이며, 습동부재의 상호간

\* 동아대학교 대학원  
\*\* 동아대학교 기계·산업시스템공학부

의 소착방지 및 이들 습동부재의 고속 및 고압화 문제와 직접적으로 관계하고 있다.

그러나 이러한 유압기기의 윤활습동면에서 발생된 각종 습동부재의 마멸분의 형태해석이 가능해지면 각종 유압기기의 윤활특성 및 그 작동상태 예지와 진단에 많은 정보를 제공해 준다는 것을 충분히 인식하고 있다.<sup>(3,5)</sup> 그럼에도 불구하고 유압기기의 습동부에 대한 윤활공학적 해석과 설계를 위한 습동부재의 윤활특성에 관한 자료가 극히 미흡한 실정이다. 이는 각종 유압시스템의 작동상태를 직접 눈으로 관찰하기 곤란하므로 이들 습동부재의 작동상태와 손상상태의 monitoring을 위해서는 전문가 또는 숙련된 기술자의 지식을 필요로 하며<sup>(6)</sup>, 또한 작동중에 발생하는 습동부재의 다양한 마멸분에 대한 데이터의 정리와 이를 위한 정리방법이 확립되어 있지 않기 때문이라고 생각된다.

이를 위하여 각종 유압기기의 습동부의 작동상태와 손상상태를 monitoring 하기 위해서는 작동중에 있는 윤활유종의 마멸분 입자의 형태해석을 보다 정량적으로 해석할 수 있는 방법이 필요하게 된다. 이것이 가능해 진다면 작동중의 유압 피스톤 모터를 분해하지 않고서도 습동부재의 상태감시가 가능하리라 생각된다.

따라서 본 연구에서는 유압피스톤 모터용 습동부재의 손상상태를 monitoring 하기 위하여 윤활마찰, 마멸실험을 통하여 마멸분을 채취하여 이를 화학처리 시스템으로부터 마멸분의 형태정보를 추출하고 이를 해석함으로써 유압기기의 윤활특성과 작동상태의 예지 및 진단에 활용하고자 하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 습동부재의 윤활마찰실험

본 연구는 Fig. 1과 같은 유압피스톤 모터의 Piston ball과 Slipper-pad에 사용되는 SCM415(침탄열처리, 770Hv), 황동주물HBsC3(160Hv) 및 청동주물 LBC3 (85Hv)를 사용하였으며, 이의 화학성분은 Table 1에 나타내었다.

이들 습동재료는 pin on disk 형의 윤활마찰 실험장치를 이용하여 실험을 수행하였으며, Fig. 2에 나타낸 바와같이 핀(pin) 시험편은 직경 5mm의 베어링 강구인 STB2 (Hv760)를, 직경 50mm, 두께 10mm인 디스크(disk) 시험편은 SCM415, HBsC3 및 LBC3를 사용하였다. 윤활마찰 실험을 위하여 디스크 시험편은 emery paper #1200으로 정밀연마하여 그 표면거칠기를  $0.2\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 로 일정하

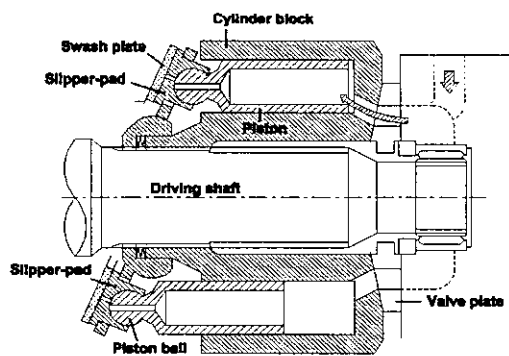


Fig. 1 Hydraulic piston motor

Table 1 Chemical composition of materials

Material	Chemical compositions (wt.%)												
	Cu	Zn	Mn	Fe	Al	Sn	Pb	Si	P	C	S	Cr	Mo
HBsC3	60	27.7	3.5	3	5	0.5	0.2	0.1	-	-	-	-	-
LBC3	78	1	-	0.38	0.01	9.0	10	0.01	0.1	-	-	-	-
SCM415	-	-	0.74	97.6	-	-	-	0.25	0.03	0.15	0.03	1	.2

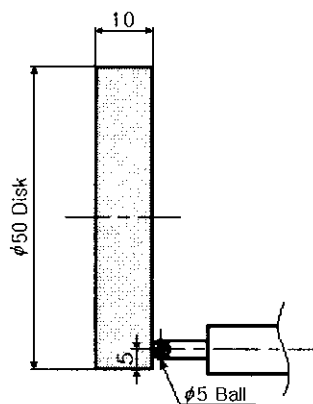


Fig. 2 Shape and dimensions of specimen

게 하였으며, 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀(paraffine)계 광유(8.2cSt@ 40℃)를 사용하였다.

윤활마찰 실험은 회전하는 디스크 시험편에 베어링 강구를 압착시켜 마찰하는 것으로 이의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로서 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 공급하였으며, 핀 시

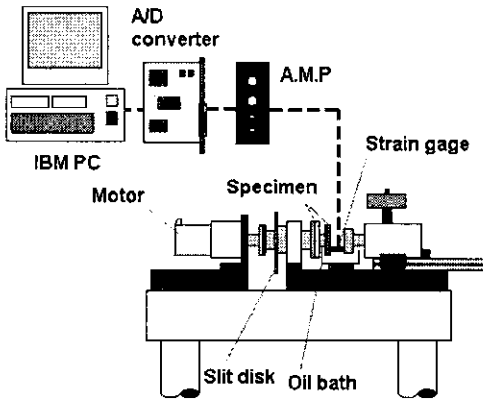


Fig. 3 Schematic diagram of pin on disk type wear test

험편은 하중을 걸어 디스크에 가압하였다.

그리고 마멸분은 oilbath 내의 윤활유로부터 공경 0.45  $\mu\text{m}$ 의 membrane filter가 부착된 마멸입자 채취기구를 통하여 마멸분을 채취하였다.

여기서 미끄럼거리는 하나의 시험편의 마찰시간(총 6시간)에서 2시간씩의 미끄럼거리를 세분화하여 0~52m, 52~104m 및 104~156m를 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기로 구분하여 실험하였으며, 작용하중은 3kg, 6kg 및 9kg으로 하였다. 또한 마찰계수를 측정하기 위하여 핀 홀더에 스트레인게이지를 부착하여 A/D변환기를 사용하여 마찰계수를 측정하였다.

## 2.2 화상처리 시스템

윤활실험 후 발생한 3가지 습동재료의 마멸분 형태해석을 위한 화상처리 시스템은 Fig. 4에서 처럼 광학현미경은 반사조명 및 투과조명의 2가지 할로젠 램프를 가지며, 관측된 화상은 상부에 부착된 CCD 카메라에 의하여 PC의 frame grabber에 저장된다.

본 연구에서 사용한 화상입력을 위한 frame grabber는 화소수 640x480, 화소(pixel)당 분해능은 R(Red), G(Green), B(Blue) 각 8 bit (256 gray level)이고, 정방형 1 화소의 길이는 0.426 $\mu\text{m}$ 이다. 이것은 마멸분 채취부분의 필터 직경이 35mm인것을 고려하게 되면 모니터 1화면의 면적은 필터의 17,302분의 1이 된다. 그리고 화상처리 시스템의 frame grabber의 제어 및 이의 프로그램 처리는 모두 C 언어(일부는 기계어)로써 행하였다.

이상의 각 실험조건은 모두 대물렌즈 40배로서 필터내의 50화면에 포함되는 대표경 1.345 $\mu\text{m}$  (10화소 이상)되

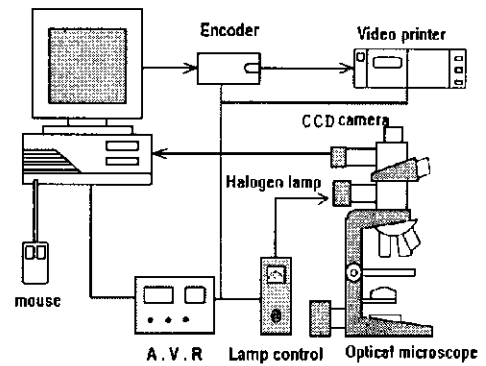


Fig. 4 Image processing system

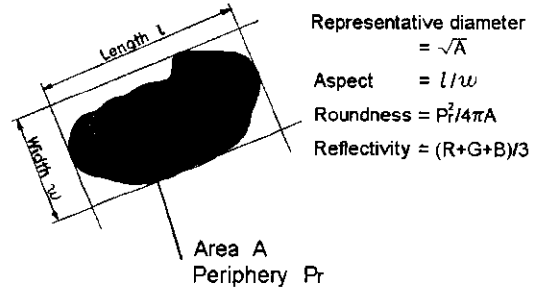


Fig. 5 Shape parameters of wear particle

는 마멸분 전체에 대하여 이들의 파라미터를 계산하였다.

마멸분은 발생조건에 따라 다양한 형태를 가지기 때문에 그 형태의 분류 및 평가를 위하여 본 연구에서 이용한 마멸입자의 형태정보를 분류하여 화상처리하고, 이것을 이용하여 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 대표경, 장단도, 복잡도 및 광택도의 4가지의 형태 파라미터(parameter)<sup>9)</sup>를 화상처리 하였다.

## 2.3 마멸체적의 추정

본 연구에서는 전술한 마멸분 형태정보를 이용하여 작동시간에 따른 습동재료의 마멸체적 추정치를 계산으로 구하였다. 이것은 눈으로 직접 보는 것이 곤란한 유압기구를 구성하는 습동부재의 마멸체적을 추정하는 데 극히 유효한 수단이라고 생각된다.

여기서 마멸체적의 추정치 계산은 마멸입자의 두께를 Fig. 5의 대표경과 대등하다고 가정하고, 마멸입자의 면적에 이 대표경을 곱하여 하나의 마멸입자 체적으로 하여 전체의 마멸입자를 곱하여 총 마멸체적을 추정하였다. 즉,

마멸분이 분포되어 있는 1 화면내의 하나의 마멸입자 체적을  $V_{ij}$ 라하고, 1 화면내의 입자개수를  $n$ 으로 두어 50화면 전체의 총 마멸체적  $V_t$ 를 식 (1)로부터 구하였다.

$$V_t = \left( \sum_{i=1}^{50} \sum_{j=1}^n V_{ij} \right) \quad (1)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 습동재료의 마찰계수

Fig. 6은 작용하중 9kg에서 습동재료 SCM415의 미끄럼거리 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로 각 미끄럼거리 구간 마찰계수 값은 이들 미끄럼거리 구간에서의 평균값을 사용하였다. 그림에서 미끄럼거리가 초기 약 30m까지는 마찰계수의 변화가 불안정하게 나타나며, 이 이상의 미끄럼거리부터는 안정된 마찰이 진행되고 있다는 것을 볼 수가 있다. 마찰계수가 미끄럼거리 초기 약 30m까지 불안정한 마찰을 나타내는 것은 양 마찰부재의 초기마찰 상태로서 running-in 과정으로 생각되며, 이 이후의 미끄럼거리에서는 안정적인 마찰상태가 진행된다는 것을 나타내주고 있다.

Fig. 7은 작용하중 3kg에서 3가지의 습동재료에 대하여 미끄럼거리에 따른 마찰계수를 나타낸 것으로, HBsC3의 마찰계수 값이 가장 높으며, 다음으로 LBC3, SCM415의 순으로 마찰계수가 낮은 값을 가진다는 것을 볼 수 있다. 두 종류의 동합금에서 청동인 LBC3의 마찰계수가 낮은 값을 나타내는 것은 LBC3의 경우 Table 1에서 처럼 마찰시 윤활제의 역할을 하는 Pb<sup>100</sup>가 10% 정도 함유된 결과라고 생각된다.

여기서 침탄열처리를 한 SCM415의 마찰계수가 가장 적

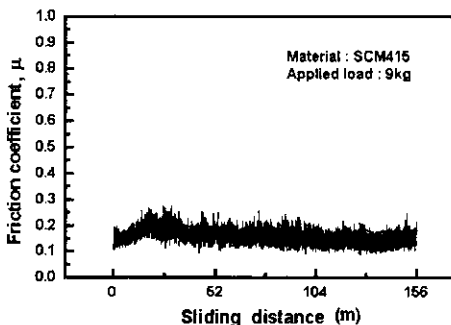


Fig. 6 Relation between friction coefficient and sliding distance

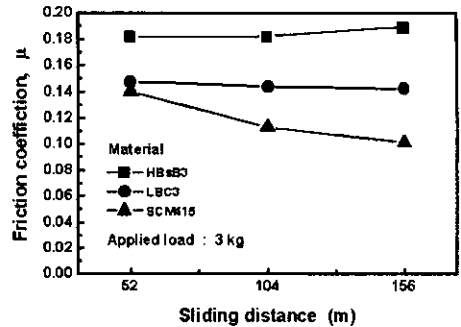


Fig. 7 Friction coefficient for specimens

은 값을 가지는 것은 SCM415가 고경도재료로서 마찰시의 핀 시험편에 의한 접촉면적이 동합금에 비해 적기 때문이라고 생각된다. 그리고 미끄럼거리가 증가함에 따라 두 종류의 동합금은 마찰계수의 평균값은 대체로 일정하지만 SCM415의 경우는 미끄럼거리의 증가와 함께 마찰계수가 감소하고 있다. 이것은 SCM415의 경우는 마찰시간의 증가와 함께 접촉부의 산화가 진행된 결과라고 생각된다.

Fig. 8은 마찰트랙과 산화의 정도를 알기 위하여 작용하중 3kg에서 3 종류의 실험재료의 마찰트랙과 조사한 빛의 농도값을 나타낸 것으로서, (a)HBsC3, (b)LBC3 및 (c)SCM415이다.

여기서 빛의 농도값을 측정하기 위하여 현미경에 부착한 4개의 대물렌즈에 적색 단색광을 설치하여 조사한 것이다.

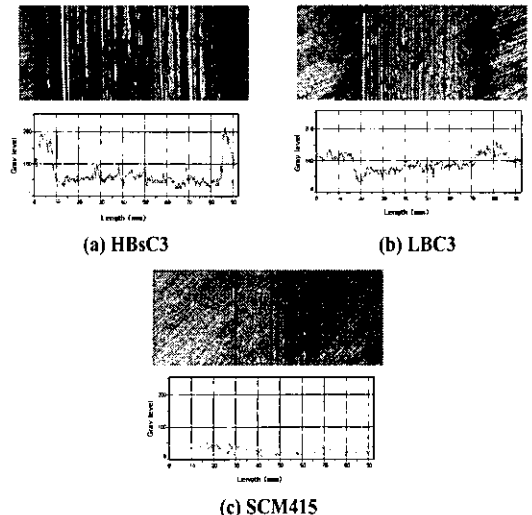


Fig. 8 Track and gray level of rubbed surface

그림에서 마찰면의 경우 디스크의 마멸 폭은 HBsC3, LBC3, SCM415 순으로 감소하고 있고, 핀과 접촉부의 마찰흔도 동일한 순으로 평탄해짐을 볼 수 있다. 그리고 핀과 디스크의 접촉부에서 빛의 농도값의 경우는 LBC3가 높고, SCM415가 가장 낮은 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 동합금보다는 강의 경우가 산화반응이 조속히 일어나며, 동일한 동합금의 경우 황동인 HBsC3가 LBC3보다 산화 진행이 빠르다는 것을 나타내 주고 있다.

### 3.2 습동재료의 형태 파라미터 특징

Fig. 9는 작용하중 6kg, 총 미끄럼거리 156m에서 각 습동재료의 화상해석에 의한 4가지 형태 파라미터의 평균 값을 도식화하여 나타낸 것이다. 여기서 50%체적경은 전체의 마멸체적의 50%가 되는 직경을 나타내낸 것으로서, 이것은 마멸입자 직경의 평균적으로 나타내는 데 유효한 파라미터이다.

그림에서 각 습동재료의 특징에서 HBsC3의 경우, 4가지 형태 파라미터의 값이 다른 재료에 비하여 모두 높은 값을 가진다는 것을 알 수 있으며, 이는 마멸입자의 형태적 특징이 다른 두 재료에 비해 큰 괴상의 형태를 가지며 또한 마멸분 입자의 금속광택이 높다는 것을 보여주고 있다. 그러나 SCM415의 경우는 4가지 형태 파라미터가 가장 작은 값을 가지는 것에서 마멸입자가 매우 작고 둥글며, 또한 산화된 입자로 구성되어 있다는 것을 나타내 주고 있다.

Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 작동조건에서 3가지의 습동재료의 마멸분을 나타낸 것이다. 그림에서 (a) HBsC3의 경우는 황동자체의 광택을 가지는 큰 괴상의 마멸입자와 부분적으로는 미세한 산화물 입자도 볼 수 있다. (b)LBC3와 (c)SCM415는 (a)HBsC3와는 달리 큰 괴상의 입자는 볼 수 없지만 대체로 산화물 입자로서 형성되어 있는 것

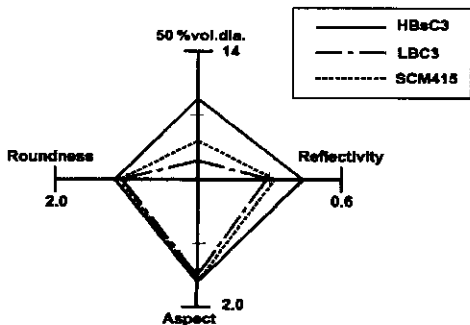


Fig. 9 Diagram of shape parameters

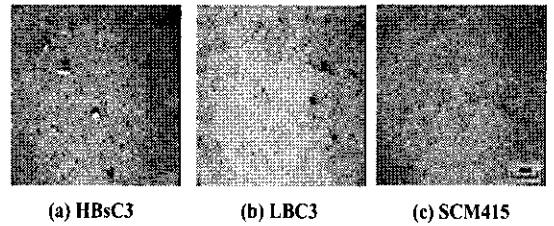


Fig. 10 Photographs of wear particles for materials

을 알 수 있다.

### 3.3 작동조건에 따른 마멸체적의 추정치

본 연구에서는 앞에서 전술한 바와 같이 마멸분 형태정보를 이용하여 미끄럼거리 0~156m(실험시간 총 6시간)까지의 3종류 습동재료인 HBsC3, LBC3 및 SCM415의 작용하중에 따른 작동조건에 따른 총 마멸체적의 추정치를 식(1)을 이용하여 구하였다.

Fig. 11은 3 가지의 작용하중에서 미끄럼거리에 따른 HBsC3의 마멸체적을 나타낸 것이다. 그림에서 미끄럼거리가 증가함에 따라 선형적으로 마멸체적이 증가하며, 작용하중이 증가함에 따라 마멸체적은 증가하지만 작용하중의 증가와는 비례적으로 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다.

이것은 작용하중이 증가하면 핀 시험편의 접촉 면적이 증가하여 마멸체적은 증가하지만 작용하중이 6kg 이상이 되면 접촉압력의 증가에 따른 핀 시험편의 접촉면적이 비례적으로 증가하지 않기 때문으로 생각된다.

Fig. 12는 3종류 습동재료와 미끄럼거리의 변화에 따른 누적 마멸체적을 동시에 나타낸 것으로서, 3단계의 각 미끄럼거리에서 HBsC3가 마멸체적이 가장 많고, 다음으로 LBC3, SCM415 순으로 적다는 것을 볼 수 있다. 동일한

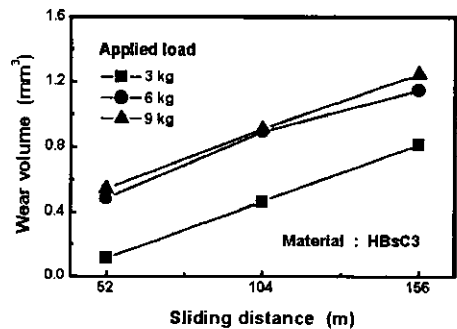


Fig. 11 Effect of sliding distance on wear volume

동합금으로 경도가 작은 LBC3의 경우가 경도가 큰 값을 가지는 HBSc3보다 마멸체적이 적게 나타나는 것은 LBC3에 함 유되어 있는 전술한 바와같이 Pb의 영향으로 금속간의 윤활성이 향상된 결과라고 생각된다.

여기서 본 연구의 마멸체적의 추정치는 실험완료 후의 디스크 시험편을 감도 0.1mg으로 실제측정한 마멸중량과 비교하여 보았지만 약간의 오차가 발생하였다. 그러나 이 오차는 실제 측정시의 오차와 본 연구에서 처럼 마멸체적의 계산에서 마멸입자의 두께를 2 차원적인 대표경으로 환산하였으며, 마멸분도 10화소 이상되는 것만 채취한 결과라고 생각되지만 대체로 본 연구의 계산결과는 충분한 타당성을 가진다고 생각된다.

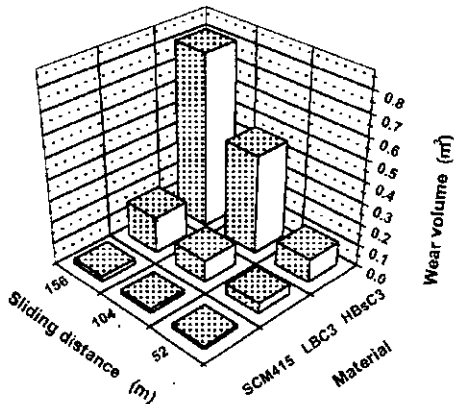


Fig. 12 Wear volumes for specimen

#### 4. 결 론

마멸입자 형태해석을 유압피스톤 모터의 손상상태 감시에 적용하기 위하여 윤활실험을 통하여 습동재료의 마멸분 형태특징과 추정 마멸체적을 구어 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 각 습동재료의 미끄럼거리에 따른 마찰계수는 HBSc3가 가장 높고, 다음으로 LBC3, SCM415의 순으로 마찰계수가 낮은 값을 가진다.
- (2) HBSc3의 마멸입자는 길고 과상의 형태의 금속 광택을 가지지만 LBC3와 SCM415의 경우는 마멸입자의 형상이 매우 작고 둥글며, 또한 주로 산화된 입자로 구성되어 있다.

- (3) 3종류의 습동재료에서 HBSc3의 경우가 마멸체적이 가장 많고, LBC3, SCM415 순으로 마멸체적이 작지만 특히 LBC3의 경우는 Pb의 영향으로 윤활성이 향상된다.
- (4) 본 연구를 통하여 습동재료의 작동조건에 따른 마멸체적의 추정치의 계산이 가능하여, 유압피스톤 모터의손상상태 감시에 적용이 가능하다.

#### 참 고 문 헌

- (1) T. Kazana and, A. Yamagucho, "Optimum Design of Bearing/Seal Paris for Hydraulic Equipment", 油壓と空氣壓 23, 6, 1992.
- (2) 김도태, 이상기, 横田眞一, "유압용 액셀 피스톤 펌프의 유량맥동 계측에 관한 연구" 한국공작기계학회지, 제8권, 제2호, pp. 35~43, 1999.
- (3) W. W. Sefert and V. C. Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil", Wear, 21, pp. 27~42. 1972.
- (4) M. Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating Oil", JAST, Vol. 39, No. 7, pp. 559~565. 1994.
- (5) B.J. Roynance and S. Raadnu, "The Morphological Attributes of Wear Particles-Their Role in Identifying Wear Mechanisms", Wear, 175, pp. 115~121. 1994.
- (6) T. B. Kirr, D. Panzera, R. V. Anamalay and Z. L. Xu, "Computer Image Analysis of Wear Debris for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis", Wear, 181, pp. 717~722, 1995.
- (7) B.J. Roynance, I.A. Albidewi and M.S. Laghari, "Computer-Aided Vision Engineering (CAVE)-Quantification of Wear Particle Morphology", Lubr. Eng., 50, pp. 111~116. 1993.
- (8) A. D. H. Thomas, T. Gavies, and A. R. Luxmoore, "Computer Image Analysis for Identification of Wear Particles", Wear, 142, pp. 213~226, 1991.
- (9) 서영백, 박홍식, 전태욱, 이광영, "윤활운동면의 작동조건에 따른 마멸분 화상해석" 한국정밀공학회지, 제14권, 제5호, pp. 43~49, 1997.
- (10) 신동명, 장백선, 염상길, 박용남, "기계재료학", 형설출판사, pp. 266~269, 1999.