

# 마멸입자 해석을 통한 유압모터용 Slipper - Pad 의 손상상태 추정

전성재\*, 조연상(동아대원), 서영백, 박홍식(동아대)

## Presumption of Slipper-pad Fault Condition for Hydraulic Rotary Actuator

Sung-Jae Jun\*, Yon-Sang Cho, Young-Baek Seo, Heung-Sik Park

### ABSTRACT

This paper was undertaken to do morphological analysis of wear debris for slipper-pad of hydraulic rotary actuator. 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 debris. The results showed that the four shape parameters of wear debris depend on a kind of the lubricating condition. It was capable of presuming wear volume for slipper-pad of hydraulic rotary actuator on driving time.

Key Words : Slipper-pad, Morphological Analysis, Wear Debris, Shape Parameters, Wear Volume

### 1. 서 론

최근 유압기기는 소형 경량화, 고출력 및 고밀도화의 방향으로 진행됨에 따라 각종 유압 기계 시스템에 사용되고 있는 유압펌프, 유압실린더 및 유압모터 등과 같은 유압기기의 습동부에서는 필연적으로 마찰에 의한 마멸이 일어나기 마련이고, 이때 발생되어진 마멸분은 습동부위의 누유증대 또는 소착상태를 유발하여 각종 유압기기의 고장 요인이 되고 있다<sup>1)</sup>.

유압 회전구동기(Hydraulic Rotary Actuator)의 습동부는 Slipper pad와 Swash plate 사이, Valve plate와 Cylinder block 사이 및 Piston과 Cylinder block bore의 크게 3가지로 구분되고 이들 모두가 습동부의 윤활해석이 회전구동기의 개발에 핵심적인 요소기술이며, 습동부재의 상호간의 소착방지 및 이들 습동부재의 고속 및 고압하중 문제와 직접적으로 관계하고 있다.

그러나 이러한 유압기기의 윤활습동면에서 발생된 각종 습동부재의 마멸분의 관찰과 해석이

가능해지면 각종 유압기기의 윤활특성 및 그 작동상태예지와 진단에 많은 정보를 제공해 준다는 것을 충분히 인식하고 있다<sup>2-6)</sup>. 그럼에도 불구하고 유압기기의 습동부에 대한 윤활공학적 해석과 설계를 위한 습동부재의 윤활특성에 관한 자료가 극히 미흡한 실정이다. 이는 각종 유압시스템의 작동중에 있는 습동부위의 작동상태를 직접 눈으로 관찰하기 곤란하므로 이들 습동부재의 작동상태와 손상상태를 예지하고 진단하기 위하여는 숙련된 기술자의 지식을 필요로 하며<sup>7)</sup>, 또한 작동중에 발생되는 습동부재의 다양한 마멸분에 대한 데이터의 정리와 이를 위한 정리방법이 확립되어 있지 않기 때문이라고 생각된다.

이를 위하여 각종 유압기기의 습동부 윤활특성과 작동상태와 손상상태를 예지 및 진단하기 위해서는 작동중에 있는 윤활유중의 마멸분 관찰 및 해석에 의한 습동부재의 마멸분 데이터의 정리와 해석이 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 유압피스톤 액츄에이터용 slipper-pad의 윤활특성 및 손상상태를 추정하기 위하여 윤활마찰, 마멸실험을 통하여 마멸분을 채취하여 이를 컴퓨터 영상처리 시스템으로부터 마

떨분의 형태정보를 추출하고 이를 해석함으로써 유압기기의 손상상태 해석에 적용하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 습동부재의 윤활마찰실험

본 연구에 사용한 습동재료는 Fig. 1과 같은 유압 액추에이터(hydraulic actuator)의 Slipper-pad의 재료로 사용되어지는 황동주물 HBsC3 (160 Hv)를 사용하였으며 Table 1에는 이의 화학성분을 나타내었다.

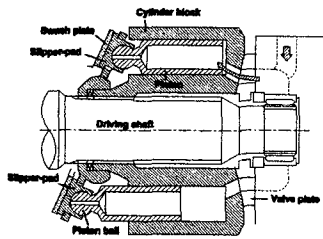


Fig. 1 Hydraulic actuator

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	-	-	-	-	-

이들 습동재료는 Fig. 2에 나타낸 바와같이, pin 시험편은 직경 5.0 mm의 베어링 강구인 STB2 (Hv760)를, disk 시험편은 직경 50mm, 두께 10mm 인 HBsC3를 사용하였으며, pin on disk 형의 윤활마찰 실험장치를 이용하여 마찰·마멸 실험을 수행하였다. 그리고 윤활마찰 실험을 위하여 디스크 시험편은 emery paper #1200으로 정밀연마하

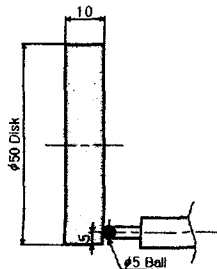


Fig. 2 Shape and dimensions of specimen

여 그 표면조도를  $R_{max} 0.2\mu m$ 로 일정하게 하였으며, 실험에 사용한 윤활유는 무첨가 파라핀(paraffine)계 광유(8.2cSt@40°C)를 사용하였다.

윤활마찰 실험은 7.23 mm/sec로 일정하게 회전하는 디스크 시험편에 베어링 강구를 압착시켜 마찰하는 것으로 이의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유는 순환펌프로써 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 공급하였으며, 핀 시험편은 하중을 걸어 디스크에 가압하였다. 그리고 마멸분은 oil bath 내의 윤활유로부터 공경 0.45  $\mu m$ 의 membrane filter가 부착된 마멸입자 채취기구를 이용하여 채취하였다.

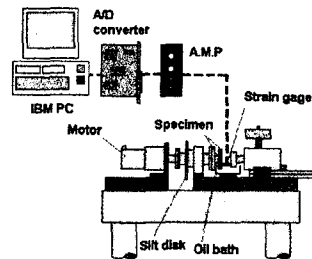


Fig.3 Schematic diagram of pin on disk type wear test

여기서 미끄럼거리는 하나의 시험편의 마찰시간(총 24시간)에서 6시간씩의 미끄럼거리를 세분화하여 0~156m, 156~312m, 312~468m 및 468~624m로 각각 4 단계로 구분하여 실험하였고, 작용하중은 3kg, 9kg 및 15kg으로 하였다. 또한 마찰계수를 측정하기 위하여 핀 홀더에 스트레인 게이지를 부착하였으며, PC(personal computer)에 장착한 A/D변환기를 사용하여 마찰계수를 측정하였다.

### 2.2 컴퓨터 영상처리 시스템

윤활실험 후 발생된 slipper-pad의 마멸분의 크기를 정량적으로 해석하기 위한 컴퓨터 영상처리 시스템을 Fig. 4에 나타내었다. 광학현미경은 반사조명 및 투과조명의 2가지 할로겐 램프를 가지며 관측된 영상은 상부에 부착된 CCD 카메라에 의하여 PC의 frame grabber에 저장된다.

본 연구에 사용된 frame grabber는 화소수 640 x480, 화소(pixel)당 분해능은 R(Red), G(Green), B(Blue) 각 8 bit (256 gray level)이고, 정방형 1 화소의 길이는 0.426 $\mu$ m이다. 이것은 마멸분 채취 부분의 filter 직경이 35mm인 것을 고려하면 모니터 1 화면의 면적은 filter의 17,302분의 1이 된다. 컴퓨터 영상처리 시스템의 frame grabber의 제어

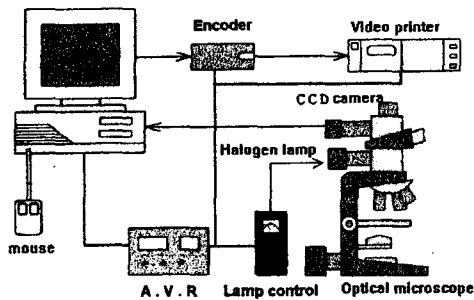


Fig. 4 Image processing system

및 이의 program 처리는 모두 C 언어(일부는 기계어)로써 행하였다. 이상의 각 실험조건은 모두 대물렌즈 40배로서 필터내의 50화면에 포함되는 대표경 1.345 $\mu$ m (10화소 이상)되는 마멸분 전체에 대하여 이들의 파라미터를 계산하였다.

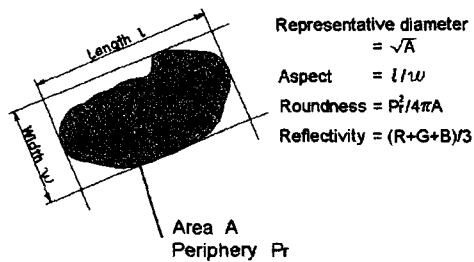


Fig. 5 Shape parameters of wear particle

마멸분은 발생조건에 따라 다양한 형태를 가지기 때문에 그 형태의 분류 및 평가를 위하여 본 연구에서 이용한 마멸입자의 형태정보를 분류하여 컴퓨터 영상처리하고, 이것을 이용하여 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 50%체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도의 4가지의 형태 파라미터(parameter)를 화상해석하였다,

## 2.3 추정 마멸체적의 계산

본 연구에서는 전술한 마멸분 형태정보를 이용하여 추정 마멸체적의 계산치를 구하였다. 이것은 눈으로 직접 보는 것이 곤란한 유압기기를 구성하는 slipper-pad의 마멸체적을 추정하는 데 극히 유효한 수단이라고 생각된다. 여기서 추정 마멸체적의 계산은 마멸입자의 두께를 Fig. 5의 대표경과 대동하다고 가정하고, 마멸입자의 면적에 이 대표경을 곱하여 총 마멸체적을 추정하였다. 즉, 마멸분이 분포되어 있는 1 화면내의 하나의 마멸입자 체적을  $V_{ij}$ 라하고, 1 화면내의 입자개수를  $n$ 으로 두었을 때 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 마찰계수와 형태 파라미터의 분포

작용하중 9kg에서 slipper-pad의 습동재료인 HBsC3의 미끄럼거리 624 m까지의 마찰계수의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와

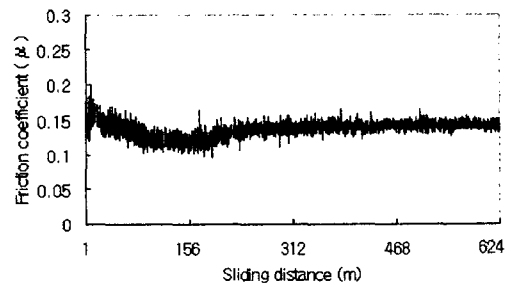


Fig. 6 Relation between friction coefficient and sliding distance.

같이 미끄럼거리가 약 200 m까지는 마찰계수의 변화가 불안정하여 마찰 시작과 함께 그 값이 급상승하였다가 점차 감소하지만 이 이상의 미끄럼거리 부터는 안정된 마찰이 진행되고 있다는 것

을 볼 수가 있다. 마찰계수가 마찰의 시작과 함께 급상승하는 것은 초기마찰 상태로서 running-in 과정으로 생각되며, 이 상태가 불안정하게 진행하다가 이후의 미끄럼거리에서는 안정적인 마찰상태가 진행된다는 것을 나타내주고 있다.

Fig. 7은 미끄럼거리 312m, 468m 및 624m에서 각 작용하중에 대한 마멸분 100개 마다의 4 가지 형태 파라미터의 평균값의 분포를 나타낸 것으로 작용하중이 증가함에 따라 50% 체적경, 장단도 및 복잡도의 분포범위는 점차 넓어지고 서로 중첩되고 있으며, 그리고 광택도는 대체적으로 감소하는

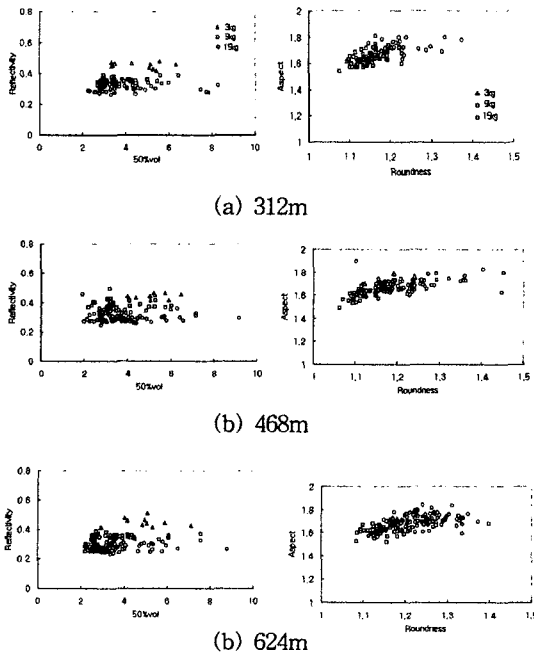


Fig. 7 Average value of shape parameters for applied load in ever 100 wear debris

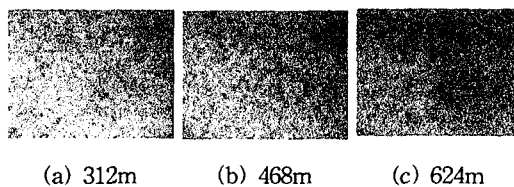


Fig. 8 Photographs of wear particles for sliding distance ; Applied load : 9kg

것을 볼 수가 있다. 이는 작용하중이 증가함에 따라서 마멸분 수의 증가와 함께 그 크기와 형상이 매우 다양하게 형성된 결과라고 생각되어진다. 그리고 광택도의 경우 작용하중 증가에 따라 그 값이 감소하는 것은 마찰트랙의 면적이 크게 되어 산화면적이 증가하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 8에는 작용하중 9kg에서 미끄럼거리에 따른 마멸분의 사진을 나타낸 것이다. 미끄럼거리의 증가에 따라 마멸입자의 수와 그 크기도 비교적 크다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 습동재료의 형태 파라미터 특징

Fig. 9은 작용하중 3kg, 9kg, 15kg, 미끄럼거리 0~624m에서 습동재료인 HBsC3를 컴퓨터 영상 해석에 의한 4가지 형태 파라미터의 평균값을 도식화하여 나타낸 것이다. 그림에서 형태 파라미터의 특징을 살펴보면 작용하중이 증가함에 따라 그 입자의 형상이 비교적 큰 형태를 가진다는 것을 나타내고 있으며, 마멸분의 산화가 빨리 진행된다는 것을 보여주고 있다.

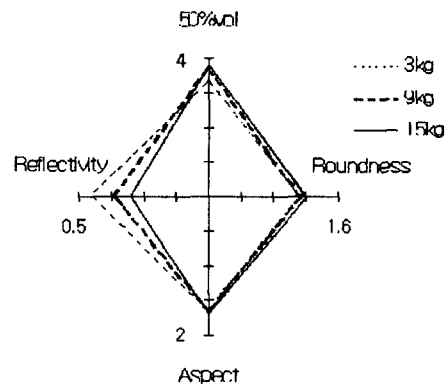


Fig. 9 Diagram of shape parameter

Fig. 10는 각 작용하중에 따른 마멸분을 나타낸 것으로서 하중 3kg에서는 밝은 광택을 가진 입자들이 존재하고 있다는 것을 볼 수가 있다. 그리고 하중이 증가함에 따라 마멸분이 증가하고 있으며 대체로 산화물 입자와 큰 괴상의 마멸입자들로 형성되어 있다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 미세한 입자들은 대체로 그 형상이 비슷하다는 것을 알 수 있으며, 이들이 다량 존재함으로써

Fig. 9의 결과와 같이 복잡도와 장단도의 평균값을 통해서만 마멸분의 형태적인 특징을 명확히 구분할 수 없다고 생각되어진다.

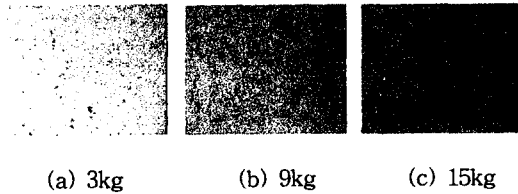


Fig. 10 Photographs of wear particles for applied load

따라서 본 연구에서는 형태적인 특징을 보다 명확히 나타내기 위한 방법으로 Fig. 9의 각 실험조건에 따른 50%체적경 보다 큰 마멸분에 대하여 이들의 형태적인 특징을 조사하였다. Fig. 11은 각 실험조건에서의 전체 마멸분 중 면적이 크기가 50 화소(대표경 약 3 $\mu$ m)이상인 마멸분에 대한 복잡도와 장단도의 평균값을 나타낸 것으로 비교적 큰 마멸분을 이용하였을 경우 각 실험조건에 대한 복잡도와 장단도의 평균값의 차이가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 이를 이용하여 마멸분의 형태적인 특징을 보다 명확히 구분 할 수 있다고 생각되어진다.

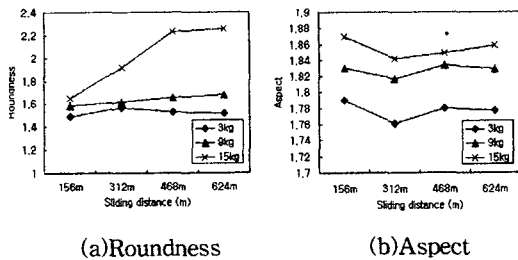


Fig. 11 Average value of roundness and aspect over 50 pixels for area of wear debris

### 3.3 작동조건에 따른 마멸체적의 추정치

본 연구에서는 유압액츄에터의 slipper-pad와 piston ball과의 작동상태를 눈으로 관찰할 수 없기 때문에 작동조건에 따른 마멸체적을 마멸분 형태정보를 이용하여 미끄럼거리 0~624m(실험

시간 총 24 시간)까지 습동재료인 HBsC3의 작용하중에 따른 총 마멸체적의 추정치를 구하였다.

Fig. 12는 작용하중에 따른 각 미끄럼거리에서의 마멸체적을 나타낸 것으로서, 각 작용하중에서 미끄럼거리의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하며, 작용하중이 상승함에 따라 마멸체적도 급격히 증가한다는 것을 볼 수 있다. 각 작용하중에서 미끄럼거리의 증가에 따라 총 마멸입자의 수가 증가하고, 또한 작용하중의 상승에 따라 마멸체적이 증가하는 것은 핀 시험편의 접촉면적이 비례적으로 증가한 결과라고 생각된다

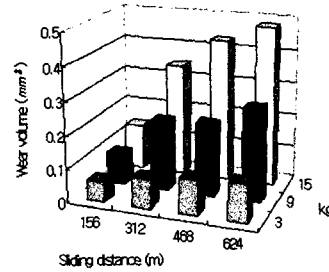


Fig. 12 Wear volumes

Fig. 13은 미끄럼 거리에 따른 누적 마멸 체적과 실험 후의 disk 시험편의 실측 마멸체적을 나타낸 것이다. 그림에서 마멸체적의 추정치와 실측치는 거의 유사한 결과를 가진다는 것을 볼 수 있다. 여기서 실측치는 실험완료 후의 디스크 시험편을 감도 0.1mg으로 실제 측정된 마멸중량을 체적으로 환산한 것이다. 해석치와 실측치와의 오차범위는 각 작용하중에 따라 다르지만 대체로 5~6%의 오차를 나타내었다. 이러한 오차가 나타나는 것은 해석치는 마멸체적의 계산에서 마멸입자의 두께를 2 차원적인 대표경으로 환산하였으며, 마멸분도 10화소 이상되는 것만 채취한 결과

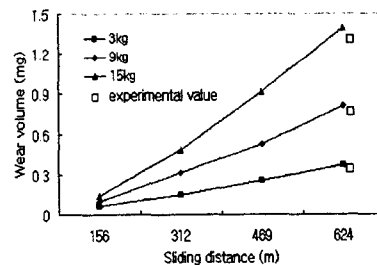


Fig. 13 Effect of sliding distance on wear volume

이고 또한 실측의 결과도 측정오차를 고려하면 대체로 본 연구의 해석결과는 충분한 타당성을 가진다고 생각된다. 따라서 본 연구의 결과를 이용하면 눈으로 그 손상과정을 볼 수 없는 유압피스톤 모터의 습동재료인 slipper-pad의 손상상태를 충분히 추정할 수 있다고 생각된다.

#### 4. 결 론

유압피스톤 모터의 습동재료인 slipper-pad의 윤활운동시 발생하는 손상상태를 추정하기 위하여 컴퓨터 영상처리로 해석하기 위하여 윤활마찰 실험장치를 통하여 마멸분 생성시의 작동조건인 작용하중, 미끄럼거리의 변화에 따른 마멸분의 형상특징과 누적 마멸량을 계산한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) HBsC3의 마찰계수는 미끄럼거리 초기 200m까지는 불안정한 값을 보이다가 그 이후에서는 안정적인 값을 가진다.
- (2) 작용하중과 미끄럼거리의 증가에 따라 마멸분의 형상은 큰 형태로 나타나고 있으며, 광택도는 감소한다.
- (3) 마멸분의 크기가 대표경 약 3 $\mu$ m(50좌소) 이상되는 비교적 큰 마멸분을 이용하였을 경우 작동조건에 따른 마멸분의 형태적인 특징을 보다 명확히 구분할 수 있다
- (4) 본 연구를 통하여 유압피스톤 모터의 slipper-pad의 작동조건에 따른 손상과정의 추정이 가능하다.

#### 참고문헌

1. T. Kazana, A. Yamaguchi, "Optimum Design of Bearing/Seal for Hydraulic Equipment", 油壓と空氣壓 23-6, 1992.
2. W. W. Siefert and V. C. Westcott, "A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil Wear", Wear, 21, pp.27~42. 1972
3. M. Shibata, "Tribological Characteristics and Diagnosis of Deteriorated Lubricating oil", JAST, Vol. 39, No. 7, pp.559~565. 1994.
4. B. J. Roylance and S. Raadnui, "The Morphological Attributes of Wear Particles - Their Role in Identifying Wear Mechanism" Wear, 175, pp.115~121. 1994.
5. 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.
6. B. J. Roylance, I. A. Albidewi, M. S. Laghari, "Computer-Aided Vision Engineering(CAVE) Quantification of Wear Particle Morphology", Lubr. Eng., 50, pp.111~116. 1993.
7. A. D .H. Thomas, T. Gavies, and A. R. Luxmoore, "Computer Image Analysis for Identification of Wear Particles" Wear, 142, pp.213-226, 1991.
8. 서영백, 박홍식, 전태욱, 이광영, "윤활운동면의 작동조건에 따른 마멸분 화상해석" 한국정밀공학회지, 제14권, 제5호, pp.43-49, 1997.
9. 신동명, 장백선, 염상길, 박용남, "기계재료학", 형설출판사, pp.266-269, 1999.