

# 유압피스톤 모터용 습동부재의 마모실험에 관한 연구

## (A Study on the Wear Testing of Sliding Members of Hydraulic Rotary Actuator)

김광영, 함영복, 류병순, 이태세(KIMM, 기계부품연구부)

### Abstract

This study discusses the development of hydraulic rotary actuator design technology for industrial machinery and earthmoving equipment. The lubrication and wear analysis of sliding components of the machinery are very important parameters to strengthen the design technique. The analysis and wear test are performed for the selected materials of the above mentioned coupled sliding members using the experimental results. One can select the better combination of sliding components.

Key Words: 증장비(Earthmoving equipment), 액츄에이터(Actuator), 습동부재(Sliding member), 마모(Wear), 마멸분(Wear debris), 윤활(Lubrication)

### 1. 서 론

최근 유압기기에 대한 개발 동향이 소형경량화, 고출력 밀도화의 방향으로 진행 되어 감에 따라, 고압화, 고속화가 필연적으로 요구 되어지고 있다. 특히 고압화, 고속화에 대해서는 습동부재의 누유증대에 대한 대책 뿐만아니라, 내마모 및 소착방지에 대한 기술과 각 구성부품들의 강도 향상기술을 동시에 필요로 하고 있다. 건설기계용 유압기기는 주로 고압, 대용량을 필요로 하기 때문에 설계기술뿐만 아니라, 제조기술 및 고압주물 개발을 포함한 신소재 응용기술, 정밀가공기술, 작동유의 오염도 관리기술, 이종재질 접합기술, swaging기술등 제조기술에서부터 성능 및 신뢰성은 물론 내구성 시험등, 시험/평가 기술에 이르기까지 연구개발 된다.

그러나 국내 유압기술은 선진국에 비해 그 낙후성을 면하지 못하고 있으며, 유압펌프/모타에 대한 독자개발은 물론, 이들 설계 factor에 대한 data 축척 또한 미흡하며, 연구 및 기술개발이 시급한 실정이다. [1] 특히 Rotary Actuator 내부 부품들의 상호적인 운동은 모두 유압평형을 이루는 상태에서 작동되므로 습동부에 대한 유압적 윤활방식의 해석과 정압베어링 설계가 이루어 져야 한다. [2,3] 따라서 습동부에 대한 윤활공학적 해석과 시험을 통한 습동부 설계기술의 정립 및 상호 재질개선은 모든 유압운동부품에 적용되는 선진화된 유압 핵심요소 기술이다. 유압식 회전구동기(Hydraulic Rotarr

Actuator)의 내부 습동부분을 크게 3가지 부분으로 나누면 Slipper Pad 와 Swash Plate사이, Valve Plate와 Cylinder Block 사이 Piston과 Cylinder Block Bore 사이이고 이들 모두의 윤활상태의 해석이 Rotary Actuator 개발에 대한 핵심 요소 기술이며, 이들 3가지 부분에 있어서의 습동부재상호간의 소착방지 기술과 더불어 유압부품의 고속화, 고압화 하는 문제와도 직결된다.

본 연구에서는 선진국에서 사용하고 있는 회전구동기 습동부재의 상대재료로 사용되어지고 있는 각 재료에 대하여 기계 윤활운동면에서 발생하는 마멸분을 화상처리시스템을 이용하여 정량적으로 해석하므로써 [4,5] 습동면에서 가장 이상적인 재료를 조합하여 회전구동기의 설계시에 원가절감 및 사용효율을 높이고자 하며 또한 마멸분 형태를 분석할 수 있는 기술을 확보하므로써 기계구동계의 작동상태진단을 위한 기초자료로 활용코자 한다.

### 2. 윤활마모실험

습동부재 상호재질에 대한 마모실험을 위하여 우선 기계윤활면을 모의한 Pin-Disc 윤활마모 실험으로부터 발생하는 마멸분을 채취하고 이 마멸분의 해석을 위하여 컴퓨터 화상처리 시스템을 이용한다. 그리고 마멸분 형태 Parameter (50% 체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도)를 분류, 평가할 수 있는 Program으로 마멸분의 형태해석을 행하였다.

### 2-1. 시험조건 및 시험편

습동부재의 마모시험조건은 실제 사용조건하에서의 Rotary Actuator의 스핀들속도와 부하상태를 Table 1과 같이 설정하였다. Table 2는 이러한 습동부재의 조합을 정리하였다. 또한 본 연구에 사용한 시험편은 Fig. 1과 같이 Pin 시험편은 직경 5.0mm, Disk 시험편의 형상은 직경50mm, 두께 10mm이고, 이를 emery paper #1200으로 정밀 연마하여 접촉면의 표면조도를  $R_{max} 0.2 \mu\text{m}$ 로 일정하게 하였다. 그리고 실험에 사용한 윤활유는 경남하우톤의 H.DRIVE HPS 46을 사용하였다. 또한 최종 미끄럼거리는 시험편 모두 113.04m 까지로하여 22.608m의 구간마다 마멸분을 Oil Bath내의 윤활유로부터 공경  $0.45 \mu\text{m}$ 의 Membrane Filter를 사용하여 채취하였다.

Table 1. Testing condition

R.Arpm	S.speed	F.coefficient	C.force	S.force	Torque
1200	71.628 m/sec	0.3	151.7 $\text{Kg/cm}^2$	19.10 Kg	0.114 $\text{Kg-m}$

Table 2. List of contact materials

번호	재료명	열처리	적용부품명	비고
1	SCM 415	침탄	Shoe plate Piston Valve plate	· Cylinder block and piston · Shop plate and shoe · Valve plate and cylinder block
2	SCM 440	순질화	Cylinder block	
3	SACM 645	순질화	Piston	
4	FCD 45	연질화	Cylinder block	
5	LBC 3		Valve plate	
6	HBSC 3		Valve plate	
7	P31CE		Bushing	
8	C 6783		Bushing	

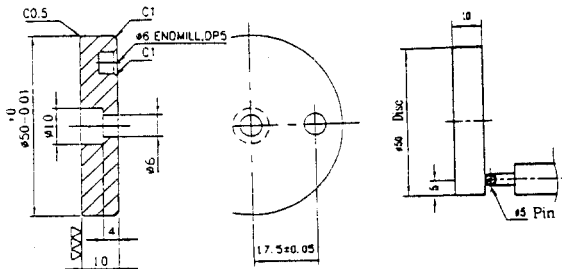


Fig.1 Specimen geometry and dimensions(mm)

### 2.2 마모실험장치

실험장치는 Pin-Disk형 마찰·마멸시험기에 의하여 윤활마찰 실험하였으며, 이것은 회전하는 Disk 시험편에 Pin을 압착시켜 마찰하는 것으로 이의 개략도를 Fig.2에 나타내었다.

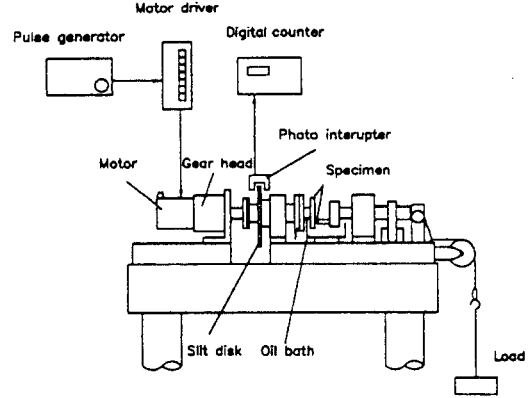


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

그림에서 처럼 모터는 무접점 속도제어 모터로서 여기에 감속기어를 부착시켜 그 미끄럼 속도를 임의 조정 할수있으며, 접촉하중은 추로써 가감할 수 있는 구조이다. 그리고 윤활장치부에서는 시험편 접촉점 하부에 Oil Bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환 펌프로써 Silicon Tube를 통하여 시험편 접촉점에 적하시켰으며, Pin 시험편은 추를 이용하여 사하중을 걸어 Disk에 가압하였다. 그리고 마멸분 Oil Bath내의 윤활유로 부터 공경  $0.45 \mu\text{m}$ 의 Membrane Filter가 부착된 윤활유 채취기구를 통하여 마멸분을 채취하였다.

### 2.3 화상처리시스템

실험조건 별로 채취한 마멸분을 정량적으로 해석하기 위한 화상처리 시스템의 개략도를 Fig.3에 나타내었다. 광학현미경은 투과조명 및 낙사조명의 2가지 할로겐램프를 가지며 현미경 예의해 관측된 화상은 상부의 Color CCD 카메라를 통하여 의하여 PC의 Frame Grabber에 저장된다. 또한 Viedo Print는 Monitor Screen의 마멸입자화상을 그대로 출력할 수 있다. 본 연구에 사용한 Frame Grabber는 화소수  $640 \times 480$ , 화소당 분해능은 RGB 각 8bit (256 grey level)이고, 정방형 1 화소의 길이는  $0.426 \mu\text{m}$ 이다. 이것은 마멸분 채취부분의 Filter 직경 35mm

인 것을 고려하면 모니터 1 화면의 면적시스템의 운용 Program을 통하여 채취한 마멸의 형태정보(둘레, 면적, 형상, 크기분포, 입자수 및 색정보)을 얻었으며, Frame Grabber의 제어 및 이의 Program처리는 모두 자작의 C언어(일부는 기계어)로써 행하였다.

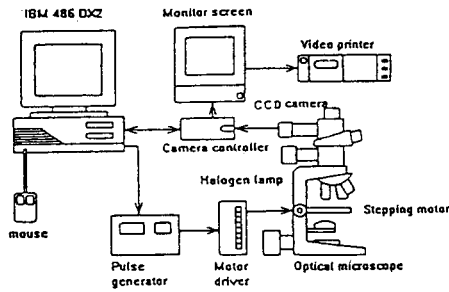


Fig. 3 Schematic diagram of image processing system

### 3. 마멸분 형태 Parameter

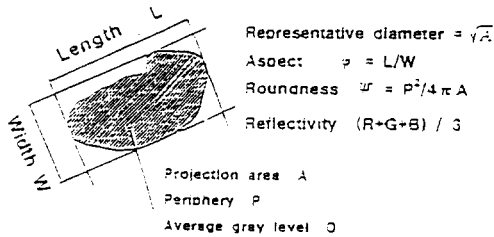


Fig. 4 Shape parameter of wear debris.

마멸분 형태 Parameter는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 50%의 체적경, 장단경, 복잡도, 및 광택도의 4가지이며, 마멸분 화상에서 마멸분의 형태정보(형상, 크기분포, 입자수 및 색정보)를 실험조건에 따라 화상처리 한다. 또한 마멸분 형태 Parameter의 정의는 다음과 같다.

#### a) 대표경 (Representative diameter)

마멸분의 형상에 관계없이 그 면적의 평방근을 취한 것

#### b) 장단도 (Aspect)

각 마멸분에서 가장 긴 직경을 장경이라고 하였을 때 단경에 대한 장경의 비율.

#### c) 복잡도 (Roundness)

마멸분이 원형에 가까운정도를 나타내 주며, 이것은 식 (1)과 같이 정의한다. 즉, 마멸분이 원형일 때 가장 최소(약  $4\pi$ )가 되고, 원형이 복잡하게 될 수록  $\psi$  값이 크게 된다.

$$\psi = P^2 / 4\pi A \quad (1)$$

#### d) 광택도 (Reflectivity)

마멸분으로 부터 렌즈계로 향하여 정반사되는 빛의 백색 기준면의 Grey level(200)에 대한 마멸분의 3색 Grey level R(red), G(green), B(blue), Grey level과의 비율로써, CCD 카메라의 출력신호 D는 일반적으로 카메라에 입력하는 광량 E에 비해하지 않는다. 이것을  $\gamma$  특성이라 하며, 여기서 C와  $\gamma$ 를 상수로 하면  $D=C \cdot E^\gamma$ 의 관계를 가진다. 본 연구에서 사용한 CCD 카메라의  $\gamma$ 는 0.57이다. 여기서 출력치를 정확히 구하기 위하여 3 원색의 출력치  $D_r, D_g, D_b$ 로 부터 각 화소의 3 색 Grey level를 식 (2)로 부터 구하였다.

$$\begin{aligned} R &= (D_r / D_{r0})^{1/\gamma} R_0 \\ G &= (D_g / D_{g0})^{1/\gamma} G_0 \\ B &= (D_b / D_{b0})^{1/\gamma} B_0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $D_{r0}, D_{g0}, D_{b0}$ 는 백색 기준면 ( $R_0=G_0=B_0$ )에 대한 출력치이다.

#### e) 50% 체적경 (50% Volumetric diameter)

여기서 50% 체적경은 마멸분의 대표경의 분포로 부터 구하였으며 이것은 그 직경 이하의 경을 가진 마멸분의 체적의 합계가 전마멸체적의 정확히 50%가 되는 직경. 이상의 각 실험조건은 모두 현미경의 대물렌즈 40배로서 Filter내의 50 화면에 포함되는 대표경  $1.345\mu m$ (10화소 이상)되는 마멸분 전체에 대하여 이들의 Parameter를 계산하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 마찰조건에 따른 형태Parameter의 특징

Table 3은 실험하중 10Kgf, 미끄럼거리 113.04m (5hr.)에서의 4종류의 Pin에 대한상대 Disk와의 마모 시험편에 대하여 계산한 형태 Parameter인 50%체적경, 복잡도, 장단도 및 광택도의 전체 마멸분 전체의 평균치를 정리한 것이다. LBC3와 SCM415는 상대 마찰시험편에서도 Pin시험편과 Disk시험편에 따라서 50%체적경이 많은 차이를 보였다. 나머지 3가지 부분에서는 비슷한 결과를 나타내었다.

Table 3. Average values of shape parameter Load ; 10Kgf, Sliding distance ; 90.432~113.04m(5hr.)

Pin	LBC3	FCD45			SCM415	HBSC3
Disk	SCM415	LBC3	SCM415	HBSC3	FCD45	SCM415
50% Vol, Dia	10.712	4.6	2.4	5.49	2.71	4.43
Roundness	1.39	1.1	1.19	1.24	1.05	1.18
Aspect	1.75	1.51	1.53	1.76	1.56	1.73
Reflectivity	0.57	0.69	0.38	0.54	0.39	0.57

Fig. 5는 Table 3의 형태Parameter를 몇가지 재료에 대하여 값의 대소를 간략화 하여 나타낸 선도이다. 그림에서 사각형의 형태가 재료에 따라 각각 다르기 때문에 각값들의 특징을 확실하게 구별할 수 있다. LBC3/SCM415의 경우는 50%Vol. dia비가 크고, 비원형의 마멸분형상을 보이며, SCM415/LBC3, SCM440/FCD45, FCD45/SCM415는 3가지의 형상 parameter 모두가 LBC3/SCM415 재료보다 작다는 것을 보면 입자 크기가 현저하게 작고 둥글다는 것을 알 수 있다. 그리고, Aspect에서는 4종류의 시험편 모두가 대체로 유사하지만, 50%Vol.dia 경우에서는 현저한 차이를 가진다는 것을 나타내 주고 있다. 따라서, 본 연구에서 측정된 마멸분이 그 재료의 특성을 대표하는데 충분할 수 있다고 가정하면 Fig. 5의 마멸분 패턴의 차이에 의한 특징을 충분히 식별할 수 있다고 생각된다.

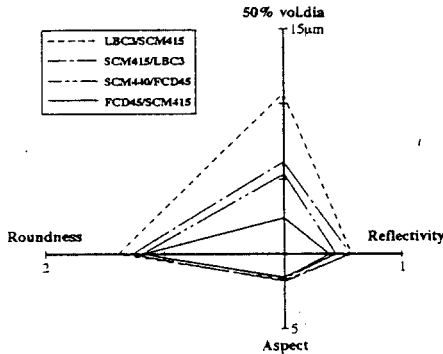
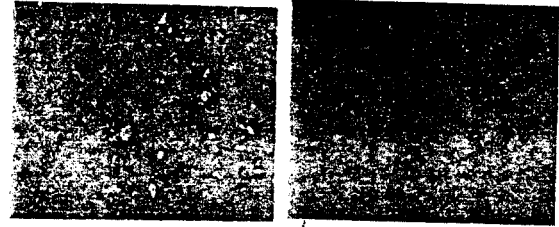


Fig. 5 Diagram of shape parameter

Fig. 6에는 접촉하중 10Kgf, 미끄럼거리 90.432~113.04m(5hr.) 구간에서의 시험한 LBC3/SCM415, 시험편의 마멸분 사진을 보여 주고 있다. 연질재료와 경질재료의 마멸분을 뚜렷이 구분할 수 있으며 마멸분 형태도 현저한 차이를 보이고 있다. LBC3의 굵은

입자, 또는 뭉쳐진 덩어리의 마멸분이 보이며, SCM415 등 경한재료는 미세하며 둥그란 입자, 또는 가늘고 짧은 침상의 입자로 존재하며 일부는 산화되어 검게보인다. 광택도에서 연질재료가 하중에 의해 일부 시험면에서 더욱 밝게 보였다.



LBC3/SCM415

SCM415/FCD45

Fig. 6 Photo of wear debris for specimen, Load: 10Kgf, Sliding distance : 90.432~113.04m

Fig. 7은 부하하중 10kg인 경우 50%vol. dia, Reflectivity, Aspect, Roundness에 대해 시간의 경과 별로 나타낸 경우이다. a)인 50%vol. dia의 경우 전체적으로 3부분으로 구분 할 수 있다.

LBC3/SCM415의 경우 마모거리가 증가함에 따라 50%vol. dia도 증가하고 있으며, 재료가 비슷한 HBSC3/SCM415는 감소하면서 작은 값을 가지는 다른 현상을 보여주었다. 이와같은 결과는 분포 상태에서도 알 수 있는 바와같이 연질편과 경질 디스크로 이루어진 경우가 그렇지않은 다른 시험편들 보다 50%vol. dia값이 높음을 알 수 있다. 이것은 초기 마멸분의 대부분은 연질 편에 의해 나타나는 것으로 재료의 경도가 50%vol. dia에 있어서는 우선적으로 작용함이라 생각된다. b)의 경우, Reflectivity는 FCD45/LBC3, 예에서 알 수 있듯이 편과 디스크 두개중 어느 한 재료가 연질일 경우 광택도는 높아짐을 알 수 있다. 또한 LBC3/SCM415 경우처럼 시간에 따라 광택도가 점차적으로 감소하는 경우가 대체적으로 모든 시료에서 나타났다 이것은 시간이 지남에 따라 재료성분중 산화가 일어난 것으로 생각된다. c)의 경우 FCD45/SCM415가 가장 낮은 Aspect비를 나타내고 있음을 알 수 있다. 대체적으로 Aspect비는 대부분의 시료에 있어서 감소하는 경향을 보이고 있으나 FCD45/LBC3와 SCM415/HBSC3의 경우처럼 경질 편과 연질 디스크의 경우가 경질의 상대재료보다 형상비는 크게 나타났다. d)의 경우, 연질 편과 경질 디스크의 경우에 있어서 마멸분 입자의 형태가 다양

하게 변화함을 알 수 있다. 특히 LBC3/SCM415의 경우 Roundness에 있어서 높은 값을 나타내고 있으며 HBSC3/SCM415, FCD45/HBSC3는 마모시간에 따라서 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 부하하중에 따른 경질 편에 의해 디스크의 마멸이 이루어지나 이후에는 편에 의한 산화의 영향이 점차적으로 증가함에 따라 마모량은 감소한다고 생각된다.

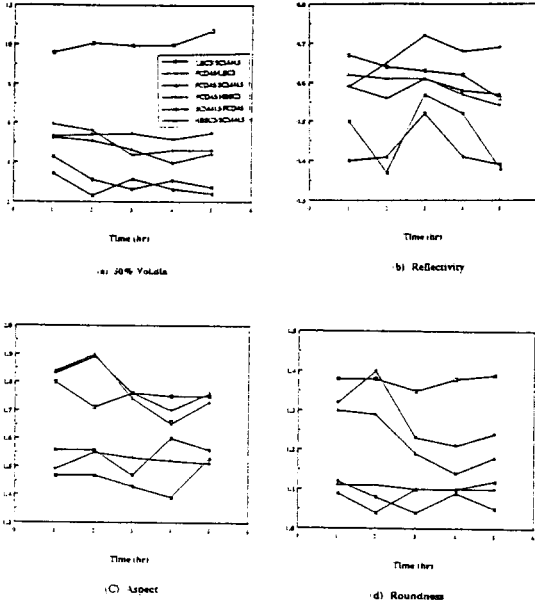


Fig. 7 Average value of shape parameter for total wear debris in sliding distance

#### 4.2 마멸분 형태 Parameter 사이의 관계

Table 4에는 각 시험편 재료의 작용하중 10Kgf에서 미끄럼거리에 따른 sample에서 채취한 정량적인 마멸분의 총수를 나타낸 것이다. Table 4에서 보는 바와같이 총 마멸입자 수는 LBC3의 Pin과 SCM415, Disk조합에서 마멸분 입자수가 대체로 많고, FCD45Pin과 SCM415의 Disk와 SCM415Pin과 FCD45 Disk조합에서 극단적으로 적으며 또한 LBC3, HBSC3 등 대부분의 시험편 재료 모두 미끄럼거리의 증가에 따라 마멸분의 총수도 증가하고 있다. LBC3와 HBSC3의 Disk시험 조합일 때는 마모거리가 증가하면서 마멸분 총수가 감소하는 것은 상대재료와 윤활유에 의한 경도의 상승, 초기마멸상태가 지나고 금속의 안정마멸단계의 상태로 마멸이 진행된다고 생각된다.

Table 4. Total numbers of wear debris on sliding distance : Load ; 10Kgf

Pin	LBC3	FCD45			SCM415	HBSC3
	SCM415	LBC3	SCM415	HBSC3	FCD45	SCM415
1(hr)	6140	1628	214	799	578	726
2(hr)	12261	1708	74	673	154	645
3(hr)	7842	1658	71	1166	175	853
4(hr)	7787	2166	60	1106	135	1035
5(hr)	7682	1672	40	1114	55	445

Fig. 8에는 마멸분 입자의 형태 parameter 사이의 특징을 알기 위하여 작용하중 10Kgf, 미끄럼거리 말기인 90.432~113.04m의 경우 LBC3/SCM415 시험편의 장단도와 복잡도와의 관계를 Table 4의 마멸분 입자 총수에서 입자수 50개, 100개 및 200개 마다의 작은 집단으로 나눈 평균치를 나타내었다.

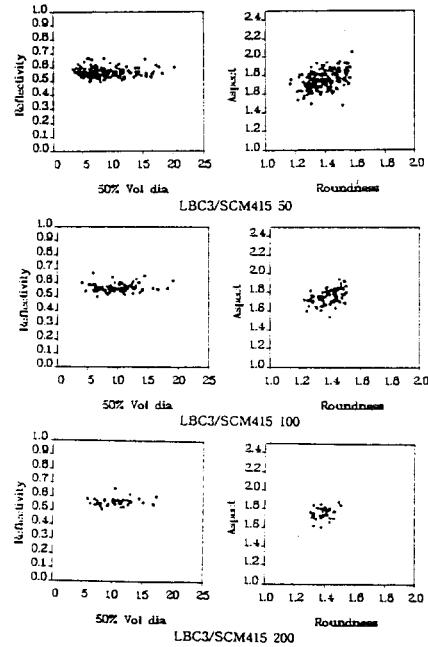


Fig. 8 Average value of shape parameter for LBC3/SCM415 in every (a)50, (b)100 and (c)200 wear debris, sliding distance : 90.432~113.04m

여기서 각 형태 parameter의 값에서 LBC3 Pin과 SCM415 Disk 조합 실험에서는 마멸분입자 50개와 100개 마다의 평균치 값은 마멸분 입자 200개 마다의 평균치값 보다 형태 parameter의 값이 너무 분산되어 각 작동조건에 따른 마멸분의 특징을 정확히 알기 어렵기 때문에 본 연구에서는 모든재료조합에 대하여 마멸분 입자수 200개 마다의 평균치값으로 생각되어 200개 마다의 평균값을 사용하였다. 특징을 평가하는데 무리가 없다고 SCM440의 Pin과 FCD45의 Disk시험편에서는 50개보다 200개의 산포가 분산되는 경우도 있었으나 재료의 조합이 경한재질과 연한재질, 경질과 경질의 조합등 여러 가지 실험조건에 따라 마멸입자의 평균값은 달라질 것으로 생각된다.

따라서 어떤평균값으로 나타내는 것이 가장 그 특징을 잘 표현할 수 있는나하는 문제는 많은 실험과 경험이 요구된다고 생각된다.

Fig. 9에는 마멸분 형태정보에서 각 시험편 재료의 작용하중과 미끄거리에 따른 마멸체적의 추정치를 나타낸 것으로서, LBC3/SCM415와 FCD45/SCM415 시험편의 경우에 작용하중 10kgf로서 각 미끄럼거리에 대하여 나타내었다. 여기서, 추정 마멸체적의 계산은 마멸분의 두께를 Fig. 5의 폭 대표경과 대등하다고 가정하고, 마멸분 면적에 이 대표경을 곱하여 총마멸체적을 추정하면 되나, 본 연구에서는 마멸분 숫자를 계산하였다. Wear loss는 LBC3/SCM415가 시간이 경과함에 따라 상당히 증가하였다가 감소하여 일정한 값을 유지한다. 이것은 마멸율이 시간과 함께 Severe wear에서 Mild wear로 천이하는 마멸과정이라고 생각된다. FCD45/SCM415는 초기에는 마멸량이 많다가 시간이 지날수록 적어져 표면의 안정화 단계로 마멸이 진행됨을 의미한다.

실제로는 마멸량을 중량으로 환산한 후 실험 완료시의 Disk와 Pin 시험편을 정밀한 저울로 측정된 결과와 마멸중량과를 비교하여야 충분한 타당성을 가질 수 있다고 생각된다.

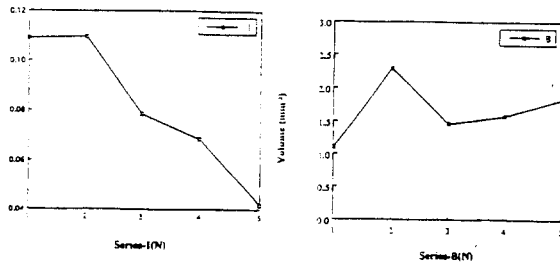


Fig. 9 Presumed wear loss.

## 5. 결 론

유압식 로타리 액츄에이터 습동부재의 사용재료에 마모에 대한 가장 이상적인 조합을 선택하기 위하여 시험편 실험을하고 마멸분 해석 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 습동부재에 대한 윤활 마모 실험으로 부터 마멸분 채취 및 해석 할 수 있는 시스템을 구성하였다.
2. 마멸분의 정확성 형태 Parameter의 식별을 위해서 마멸분 50개, 100개, 200개 마다 나눈 평균치중에서 본 연구 범위에서는 경질의 재료는 50개, 연질의 재료를 200개 마다의 평균치를 이용하는 것이 좋다.
3. 재료조합 실험의 결과 경질의 재료에서는 기계적 성질이 비슷한 재료일수록, 마모에 대한 저항이 좋다.
4. 연질의 재료에서는 입도가 크고 불규칙한 형태의 마멸분이 생성되고 경질의 재료는 둥글고 침상의 마멸분이 추출되었다.

## 참 고 문 헌

1. 2000년을 향한 산업기술개발 수요(6. 건설중장비 분야), 산업기술정책 연구소, 1996.
2. T. KAZANA, A. YAMAGUCHO, "Optimum Design of Bearing/Seal Paris for Hydraulic Equipment" 油壓と 空氣壓 23-6, 1992.
3. A.D.H. Thomas, T. Gavies, and A.R. Luxmoore, "Computer Image Analysis for identification of Wear Particles" Wear, 142, pp 213-226, 1991.
4. 서영백, 박홍식, 전태옥, "기계윤활운동면의 작동상태 진단을 위한 마멸분 해석", 대한기계학회 1996 추계학술대회 논문집, pp 1143-1148, 1996.
5. 서영백, 박홍식, 전태옥, 이광영, "윤활운동면의 작동조건에 따른 마멸분 화상해석" 한국정밀공학회 지 제14권 제5호 pp43-49, 1997.