

Fe계 합금 분말 소결품(SMF9060)의 마모 특성 연구

김상윤* · 김대욱* · 박영민* · 신동철** · 김태규†

*부산대학교 나노융합기술학과, **거제대학교 기계공학과, 부산대학교 나노메카트로닉스공학과

A Study on Tribological Characteristics of Powder Sintered Fe-base Alloy (SMF9060)

Sang Youn Kim*, Dae Wook Kim*, Yeong Min Park*, Dong Chul Shin**, Tae Gyu Kim†

*Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Pusan 627-706, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Koje College, Geoje, Gyeongnam 656-701, Korea

Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University, Pusan 627-706, Korea

Abstract SMF9060 material is a Fe-based powder sintered alloy that is used for several automobile components such as Synchronize Hub, oil pump and transmission. These components are required excellent wear resistance and durability. In this study, we have performed a dry wear test at the ambient air and Ar gas conditions in the room temperature, and a lubricant wear test at the room temperature and engine oil temperature of 100°C. The amount of wear volume and coefficient friction are measured by a Profilometer and a Ball on disk type wear tester. The wear volume in Ar gas condition was a little higher than that in the ambient air condition. However the wear volume in the lubricant wear condition was much lower than in the dry wear condition. XRD analysis of the debris in Ar gas condition showed that the oxide film was not formed.

(Received December 20, 2013; Revised December 31, 2013; Accepted January 6, 2014)

Key Words: SMF9060 material, Wear test, Ball on disk type wear test, Profilometer, XRD

1. 서 론

최근 자동차부품 생산업체에서는 생산 공정을 개선하여 효율적인 생산, 제조원가 절감을 통해 가격 경쟁력 확보와 경량재료의 개발로 연비향상을 충족시키고자 많은 노력을 하고 있다.

자동차용 기어재료는 주철이나 합금강에 표면경화 처리하여 많이 사용하고 있다. 주철은 흑연함량이 많아 오일을 공급하면 내마모성이 우수하지만, 생산 공정이 많고 소재불량과 가공여유가 많아 생산원가가 높은 단점이 있다[1, 2]. 따라서 자동차용 기어제품의 대체 재료로 성분조성과 생산 공정이 간단하며 가공여유도 비교적 적은 소결합금 재료의 적용을 시도하고 있다. 소결합금은 고주파 경화 및 침탄으로 표면을 경화시켜 내마모성을 부여할 수 있으며, 소결품의 단점인 내부결함 즉, 기공을 이용하여 주철의

흑연과 같이 오일을 장시간 정체시키는 역할을 하여 마찰 면에 오일을 공급하고 마찰마모 특성을 크게 향상시킬 수 있는 장점이 있다[3, 4].

기계부품을 장시간 사용하다 보면 성능이 떨어지고 소음이 나게 되어 부품이 파괴되지 않았는데도 교체하여야만 한다. 이것은 사용재료가 마모되므로 금속 표면의 형태가 바뀌거나 재료의 체적이 줄거나 또는 마모분배에 의한 영향으로 원래의 기능을 다하지 못하는데서 기인하는 것이다. 마모는 실생활에서 가장 많이 볼 수 있는 일반적인 현상이다. 최근에 에너지 절감과 내구성 향상의 측면에서 마모분야는 큰 관심을 끌고 있는 연구 분야인 동시에 공업적으로도 매우 중요한 영역이다.

마찰력이 작으면 마모가 감소하는 것이 일반적이다. 이로 인해 기계장치의 원활한 작동과 마모감소를 위해 윤활제를 사용하는데 두꺼운 윤활 막에 의해서만

†Corresponding author. E-mail : tgkim@pusan.ac.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

윤활 되는 이상적인 유체윤활 상태가 계속해서 유지 되는 경우는 극히 드물다. 따라서 상대운동이 존재하는 두 면 사이에서는 완전한 유체윤활 상태가 아닌 경계윤활 상태 혹은 건조마찰 상태가 빈번히 발생하게 된다. 기계시스템이 고온상태나 고충정 상태에서 만 운전되는 경우에는 윤활제를 따로 사용하기 어렵기 때문에 건조마찰이 필연적으로 발생하게 된다. 각종 미끄럼부의 윤활제 공급이 원활하지 못한 경우에는 일시적인 과 하중으로 유막 두께가 급격히 줄어드는 경계윤활상태에서 운전되기도 한다. 이러한 상황에서 도 원활한 운전이 되기 위해서는 경계윤활 혹은 건조마찰이 일어나더라도 마찰계수의 급격한 증가 없이 효과적으로 대처할 수 있는 시스템을 설계하는 것이 바람직하다. 이러한 설계를 위하여 상대 운동부에 사용되는 미끄럼 면의 건조마찰 혹은 경계윤활 상태에서의 마찰 및 마모 특성을 이해하는 것이 필수적이다[5-7].

자동차의 고출력, 고속화 개발로 인해 윤활유의 역할이 중요해지고 있다. 이러한 요구 조건을 만족하기 위해서 윤활유의 성능 향상이 요구되고 있으며 자동차 부품 개발과정에 윤활유에 대한 특성과 성능을 고려하고 있다. 본 연구에서는 내충격성과 내마모 특성이 요구되는 승용차의 Synchronize Hub, 엔진오일펌프의 Rotor 및 변속기 부품으로 많이 적용되는 Fe계 저합금 분말 소결품(SMF 9060)에 대해서 실제 사용되는 조건의 마모시험을 실시하고 그 특성을 연구하고자 하였다. 즉, 일반적인 대기압 분위기와 불활성 기체인 Ar 가스분위기 상태 그리고 자동차용 엔진오일을 사용한 윤활상태에서의 온도변화에 따른 마모 특성을 비교분석 하였다.

2. 실험

2.1 시험편 및 실험조건

본 실험에서 사용된 시험편은 Fe 분말에 Cu 1.5%, Ni 4.0%, Mo 0.5%를 확산 시킨 후 C 0.7% 혼합하여 130 Ton press 에서 $\phi 12 \times 4t$, 밀도 7.0 g/cm^3 으로 성형하여 소결시킨 후 연마 하여 초음파 세척하였다. 소결한 시험편의 화학성분을 Table 1에 나타내었고 완성된 마모시험편의 형상을 Fig. 1에 나타내었으며 시험편의 표면조도 Ra는 0.2

Table 1. Chemical composition of sintered materials

(wt%)				
C	Cu	Ni	Mo	Fe
0.7	1.5	4.0	0.5	Bal.

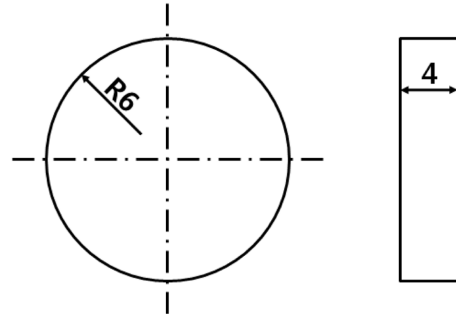


Fig. 1. Schematic of wear specimen dimension.

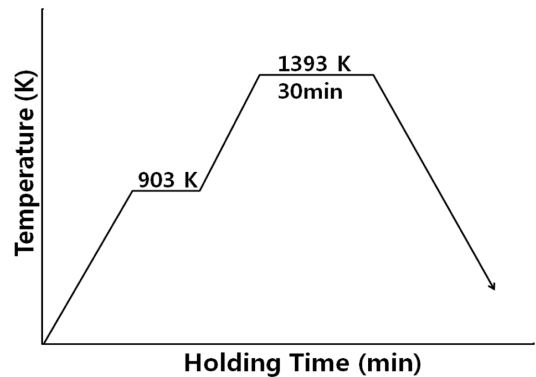


Fig. 2. Schematic diagram of sintering process.

μm 로 정밀 연마 하였다.

2.2 실험조건

시험편을 소결하는 조건은 자동차 부품의 소결공정과 동일한 조건으로 제작 하였으며, 선행연구결과와 같다[8].

소결열처리로는 Muffle type 연속식 mesh belt를 사용하였으며 소결 후 냉각 시 탈탄방지를 위해 인리치 가스를 주입하였고 Fig. 2와 같이 데이터 값이 도출되었다.

2.3 마모시험

본 실험에서는 Ball-on-disk 마모시험기(Tribo-meter, CSM)를 사용하였고, Fig. 3에 실험장치의

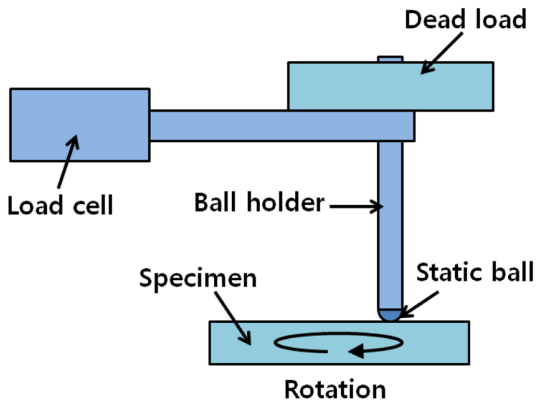


Fig. 3. Schematic of ball-on-disk wear tester.

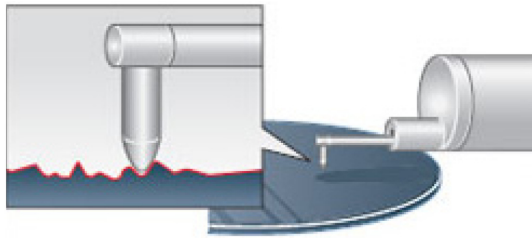


Fig. 4. Schematic of profilometer scanning.

개략도를 나타내었다. 시험편에 하중을 부가하고 시험편을 회전시킬 때 Ball과 시험편에 작용하는 마찰력을 하중계(Load cell)로 측정하고, 측정된 마찰력을 작용하중과의 관계식으로 마찰계수를 구하는 방식이다. 마모량은 마모분(debris)의 무게나 시험편의 마모 실험 전 후의 무게차 등을 정밀 측정하여 계산하는 종래의 방법이 있으나 본 실험에서는 마모트랙부의 마모량을 정밀측정 할 수 있는 프로파일 측정기(profilometer)를 사용하여 마모형상과 마모면적을 관찰하면서 측정하였다.

마모시험은 상온에서 대기상태(ambient air condition)와 Ar 가스를 사용한 환원성 분위기 상태에서 각각 실험하고 마모거리를 300 m로 고정하여 실험하였다. 또한, 윤활유 적용 상태에서의 마모시험은 윤활유 온도를 상온과 100°C 상태에서 각각 마모시험을 실시하였고 이때의 마모거리는 300 m, 10000 m로 고정하여 비교 실험하였다. 마모시험의 실험조건은 Table 2에 나타내었으며, 실험에 사용한 윤활유는 자동차용 엔진오일(HX7 5W-40, Shell, Netherlands)이며 사양은 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Condition of wear test

Material of the static ball		Ball diameter (mm)	Load (N)	
Al ₂ O ₃		3	10	
Radius (mm)	Speed (rpm)	Distance (m)	Temperature (°C)	
5	120	300 10000	Room, 100	

Table 3. Specifications of car engine oil

Kinematic viscosity (40°C)	82.5 cSt
Kinematic viscosity (100°C)	14.4 cSt
Density (15°C)	0.860 kg/l
Flash point (°C)	220
Pour point (°C)	-39

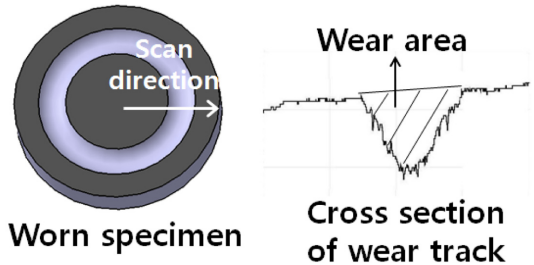


Fig. 5. Schematic of wear track measurement.

2.4 마모량 측정

마모시험 후 프로파일 측정기(Surtronic 25, Taylor Hobson, England)를 이용하여 Fig. 5와 같이 마모단면을 스캔하였다. 마모면의 단면형상과 마모면적을 측정하고 마모면의 원주길이를 곱하여 마모 부피 즉, 마모량(Wear volume)을 측정 하였다. Fig. 5는 프로파일 측정시험기에 의한 실험모식도이다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 마모시험 결과

Fig. 6 및 Fig. 7에 상온상태에서 공기와 Ar gas 분위기와 윤활유의 온도변화에 따른 마모시험 결과를 나타내었다. Fig. 6에서 Ar gas를 사용한 환원성분위기와 대기상태(ambient)에서의 마모실험 결과인 마찰계수 값은 초기마모에서는 시험편 연마과정에 형성된 얇은 산화막과 흡착된 오염물질 등에 의해 낮은

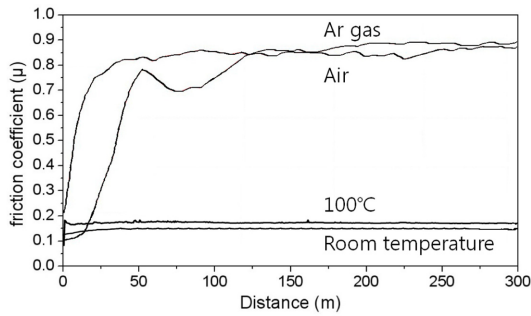


Fig. 6. Friction coefficient of wear test in the ambient air condition.

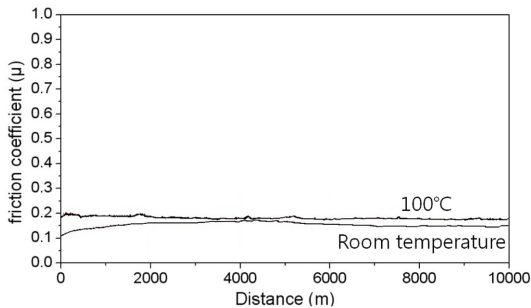


Fig. 7. Friction coefficient of wear test in the lubricant condition.

마찰계수를 나타냈지만 마모거리가 150 m부터는 각각 $0.88 \mu\text{m}$, $0.79 \mu\text{m}$ 로 안정된 마찰계수 값을 나타내었다.

불활성 기체인 Ar gas 분위기에서 마모시험결과에서 마모초기 상태에서는 마모의 불안정성 및 Ar gas의 영향 등으로 인해 마찰계수의 변화가 나타남을 알 수 있었다. 마모거리 120 m부터는 Ar gas의 안정된 분위기하에서 마모가 이루어져서 일정한 마찰계수가 나타남을 확인 할 수 있었다. 이 현상은 공기 중에서 형성된 산화막과 환원성 분위기인 Ar gas 영향의 상호작용에 기인한 것이라 추측된다[9].

운환상태에서의 마모시험은 Fig. 6의 건식마모시험결과와 비교했을 때 현저히 작은 마찰계수를 보였다. 또한, 윤활유의 온도차에 따른 마모거동에서 상온에서 마찰계수가 $0.15 \mu\text{m}$, 인데 비해서 윤활유온도 100°C 에서의 마찰계수는 $0.18 \mu\text{m}$ 로 상온보다 다소 상승하는 것으로 나타났다. 이 현상은 Table 3에 나타난 바와 같이 윤활유 온도상승에 의한 점도(viscosity) 감소 즉, 볼과 시험편 사이의 유막점성이

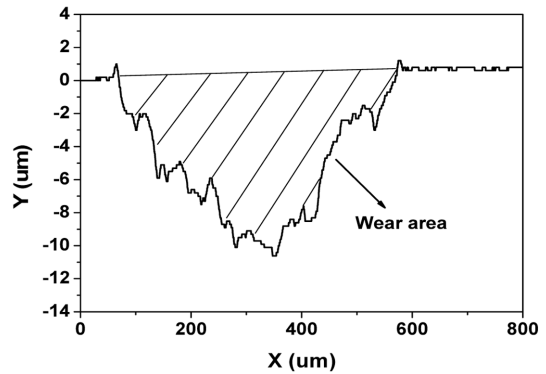


Fig. 8. Wear area shape of the sample tested in ambient air condition.

떨어져서 연삭마모로 인해 마찰계수가 증가현상으로 판단된다[9].

특히 운환상태에서 마모거리 300 m에서는 건식 마모시험조건과는 달리 볼과 시험편사이에서 마모가 거의 발생하지 않아서 마모량을 측정 할 수가 없었다. 따라서 마모거리를 10000 m로 늘려서 추가로 실험을 진행 하여 마모량을 측정하였다. 하지만, 마모거리 300 m와 비교했을 때 마찰계수의 변화는 거의 나타나지 않음을 확인 할 수 있었다.

3.2 마모형상 및 마모부피 측정결과

Fig. 8-11은 마모시험 후의 시험편 각각의 마모단면을 프로파일 측정기(Profilometer)로 측정한 결과를 나타내었다. 또한 Table 4 및 Table 5는 프로파일 측정기에서 측정된 마모트랙부의 마모넓이, 마모 깊이 및 마모면적을 나타내었다.

이때 측정된 마모트랙부의 마모면적에 마모면의 원주길이를 곱한 값으로 마모량을 계산하였다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 Fig. 6의 마찰계수측정 시험편으로 프로파일 측정기를 이용하여 마모단면 형상과 마모면적을 측정한 결과이다. 마찰계수가 높을 때 마모면적이 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

Fig. 10 및 Fig. 11의 윤환상태에서의 마모단면 형상 및 마모면적의 측정결과도 Fig. 7의 마찰계수를 측정한 시험편의 마모단면 형상 및 면적을 나타낸 결과이다. 마찰계수가 건식마모시험보다 월등히 낮은 결과로 인하여 마모면적도 작게 나타남을 확인할 수 있었다.

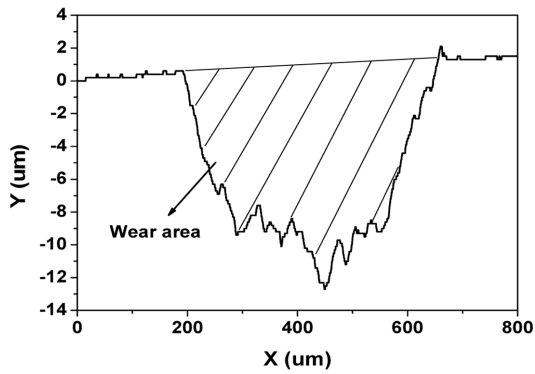


Fig. 9. Wear area shape of the sample tested in Ar gas at the room temperature.

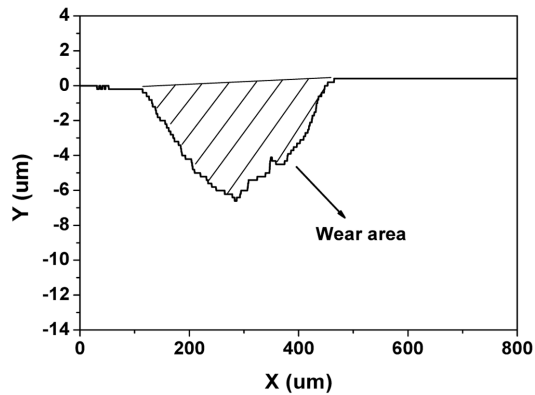


Fig. 10. Wear area shape of the sample tested in the lubricant condition at the room temperature.

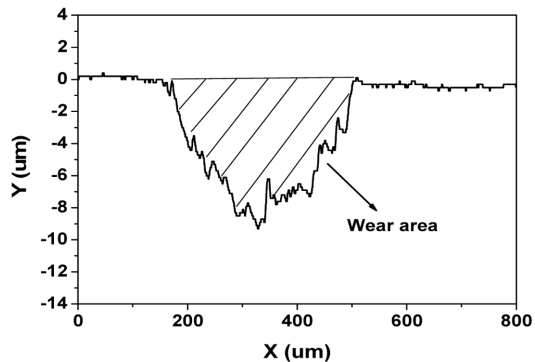


Fig. 11. Wear area shape of the sample tested in the lubricant condition at 100°C.

Fig. 12는 Fig. 8 및 Fig. 11에서 프로파일 측정기로 측정된 마모면적에 마모면의 원주길이를 곱하여 계산한 마모부피를 나타낸 결과이다. Ar gas 분위기

Table 4. Profile data of dry wear condition at the distance of 300 m

Conditions	Wear distance (300 m)	
	Dry wear condition	
	Air	Ar
Wear width (μm)	503	487
Wear depth (μm)	10.61	12.91
Wear area (μm ²)	3247.3	4422.8

Table 5. Profile data of the sample tested in lubricant wear condition at the distance of 1000 m

Conditions	Wear distance (10000 m)	
	Lubricant wear condition	
	Room temperature	100°C
Wear width (μm)	353	377
Wear depth (μm)	6.61	9.41
Wear area (μm ²)	1422.5	2165.8

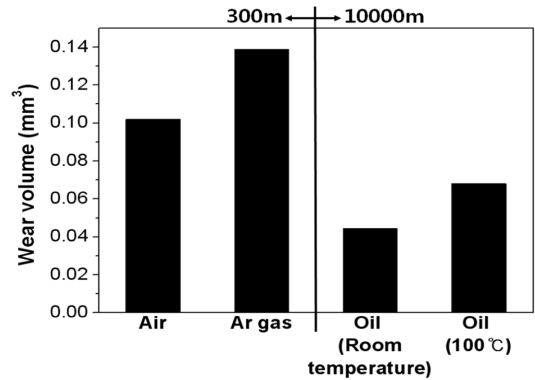


Fig. 12. Wear volume of 300 m and 10000 m.

에서의 마모량은 대기상태의 마모량보다 크게 나타났는데, 이는 마모트랙부에 산화막이 형성되지 않아 응착마모(adhesion wear)현상이 많이 발생되었기 때문으로 판단된다. 또한, 윤활상태에서의 마모는 유체의 얇은 막이 형성되어 두 접촉면이 분리되어 마모발생이 어렵고 또한, 산화막이 형성되지 않아서 연삭마모(Abrasive wear)나 응착마모가 발생되지 않는 것으로 판단된다[10, 11].

3.3 마모면의 XRD 분석

대기 상태(ambient)와 불활성 gas 상태인 Ar 분

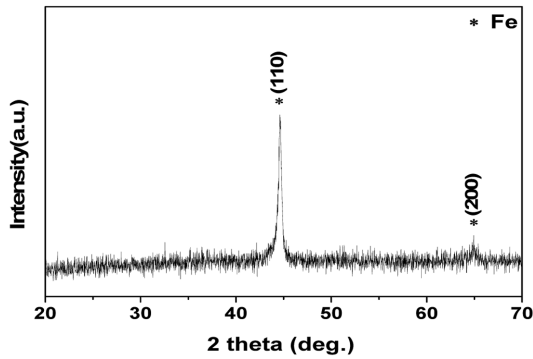


Fig. 13. XRD result of wear debris formed during the wear test in Ar gas wear condition.

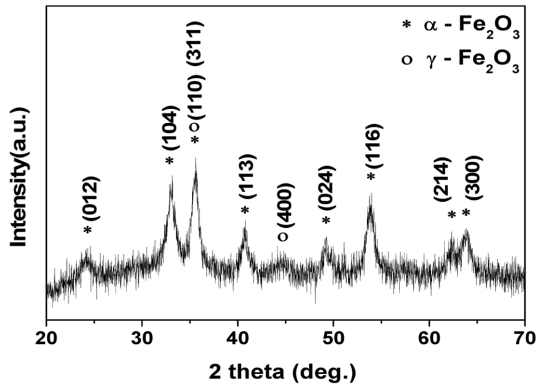


Fig. 14. XRD results of wear debris formed during the wear test in the ambient air condition.

위기 하에서 마모시험을 실시한 시험편의 마모분(debris)에 대한 XRD(X-ray diffractometer) 분석을 실시하여 산화막 형성과정을 관찰하였다.

Fig. 13 및 Fig. 14는 마모분의 XRD 분석결과를 나타낸 것으로, 먼저 Ar gas 분위기에서 마모시험을 실시한 시험편의 마모분은 [110], [200] Fe 성분구조 피크(peak)가 관찰되어 Ar 분위기에서는 산화막이 형성되지 않음을 알 수 있었다. 반면, 대기 상태에서 마모시험을 실시한 시험편의 마모분에서는 다량의 α 상 및 γ 상의 산화철 성분이 검출되어 마모분이 대기 상태에서는 급격한 산화막이 형성됨을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

내충격성과 내마모 특성이 요구되는 승용차의

Synchronize Hub, 엔진오일펌프의 Rotor 및 변속기 부품으로 많이 적용되는 Fe계 저합금 분말 소결품(SMF 9060)에 대해서 대기 상태, 불활성 Ar gas 분위기 상태 그리고 유회상태에서의 온도변화에 따른 마모거동을 비교 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 건식마모시험의 마찰계수는 불활성인 Ar gas 분위기보다 약간 높게 나타났으며, 이는 시험편 가공에서 형성된 산화막과 Ar gas의 상호작용에 기인한 것이라 판단된다.

2. 유회마모시험의 마찰계수는 건식마모시험에 비해서 우수한 마모거동을 나타냄을 확인 할 수 있었다. 하지만 유회유 온도가 100°C 인 고온에서는 점도가 감소하여 마찰계수가 상승하는 결과로 유회유의 적정온도유지가 중요함을 알 수 있었다.

3. 마모량은 마찰계수와 비례관계가 있음을 확인할 수 있었고, Ar gas 분위기에서의 마모량은 산화막이 형성되지 않은 응착마모로 보이고, 유회마모는 유체막의 형성으로 마모발생이 어렵고 또한, 산화막이 형성되지 않아서 연삭마모나 응착마모가 발생되지 않은 것으로 판단된다.

4. 마모시험에서 발생하는 마모분의 XRD 분석결과에서 Ar gas 분위기에서의 마모분은 산화철 성분이 발생되지 않았으나, 대기 상태 상태에서의 마모분은 다량의 산화철 성분이 검출되어 마모시험 시 마모분이 급격하게 산화가 진행됨을 알 수 있었다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. K. W. Park, Y. H. Han and S. Y. Lee : KSHT 9 (1996) 271-280.
2. M. K. Kim, B. H. Jung, H. S. Park, B. C. Lee, S. H. Shin and J. S. Lee : KSHT 12 (1999) 166-173.
3. T Hisakado and N Hashizume : Wear, 237 (2000) 98-106.
4. T. Hisakado and K. Akiyama : Wear, 224 (1999) 274-281.
5. Kazuhisa Miyoshi : Tribology International, 32

- (1999) 605-616.
6. Terumasa Hisakado and Hideyuki Tani : *Wear*, **224** (1999) 165-172.
7. Naofumi Hiraoka : *Wear*, **249** (2001) 1014-1020.
8. 김태현, 김상윤, 김태규, 한국기계가공학회지, **11** (2012) 139-144.
9. Zuomin Liu : *Wear* **262** (2007) 600-606.
10. M. M. Yazdaniyan : *Surface and Coatings Technology* **202** (2007) 1182-1188.
11. S. Dhanasekaran and R. Gnanamoorthy : *Wear* **262** (2007) 617-623.