

# 대기중의 습도에 따른 탄소강의 마모와 마찰

오홍국\*, 연구현\*\*, 김태훈\*\*\*

## Wear and Friction of the Carbon Steel for Atmospheric Humidity

Hung-Kuk Oh\*, Kyu-Hyun Yeon\*\*, Tae-Hun Kim\*\*\*

### Abstract

The atmospheric humidity is varied between 30% and 90% with season in Korea. Thus the influence of humidity on the behavior of wear is important to predict the wear for tools and dies. This paper presents the influence of atmospheric humidity on the wear of carbon steels for the un-lubricated pin-on-disk sliding contact.

It was found that the severe wear is dominant at a low humidity and the mild wear is strongly related with the carbon concentration of the steel at a high humidity in this study. The experiments were carried out in a chamber where the humidity was accurately maintained by humidifier. To investigate the relationship, three different carbon steels such as 1020, 1041, and 1045 steels were used.

**Key Words** : wear, friction, humidity

### 1. 서론

1942년에 독일 과학자 다이(Die)<sup>1)</sup>에 의해서 산화마모(Oxidative Wear)에 대한 연구가 처음으로 시작되었으며, 그는 마모율의 감소는 표면을 손상으로부터 보호하는 산화물(Oxide)의 형성과 관계가 있다고 하였다. 1953년 아처드(Archard)<sup>2)</sup>는 마모과정을 연한 마모와 심한 마모로 구분하였고, 미끄럼 표면 위의 산화가 연한 마모에서 아주 중요하다고 주장하였다. 그들의 연구 후에 많은 연구

자들이 연한 마모 현상에 대한 깊이 연구하였다. 대부분의 연구가 미끄럼 속도(Sliding Speed)와 온도의 영향에 대해서 또는 산화막(Oxide Film)에 대한 하중의 영향에 대해서 초점이 맞춰졌다. 이러한 영향들에 대해서 퀴(Quinn)<sup>3)</sup>와 스토틀(Stott)와 우드(Wood)<sup>4)</sup>에 의해서 잘 연구가 되어왔다.

그러나 산화막에 대한 대기중의 습도의 영향은 거의 연구된 바가 없다. 웨츠(Uetz)가 1968년에 습도와 산화에 대한 관계를 관찰하기 위하여 가습기를 사용한 연구 이후

\* 아주대학교 기계 및 산업공학부  
\*\* 영진전문대학 기계계열  
\*\*\* 아주대학교 기계공학과

에는 대기중의 습도의 영향에 대한 보고를 논문에서 찾기가 어렵다.<sup>6)</sup>

한국에서는 뚜렷한 4계절을 갖고 있다. 봄, 여름, 가을 그리고 겨울이다. 1월에서 4월까지의 대기중의 습도가 30%로 낮고, 7월에는 90%로 최고치에 다다른다. 따라서 한국에서는 금형과 공구에 대한 연한 마모 또는 심한 마모의 영향은 습도와 밀접하게 관계되어 있다. 탄소강은 드로잉(Drawing)과 타발(Stamping)과 같은 철판 성형공정의 금형을 만드는데 대중적으로 사용한다. 이런 성형공정은 제품 생산에서 하중(Load)이 변하지 않는다. 프레스기계의 속도가 일정하기 때문에 미끄럼속도(Sliding Speed) 또한 일정하다. 따라서 금형의 온도 또한 변하지 않는다. 심한 마모가 되느냐 또한 연한 마모가 되느냐 하는 인자(Factor)는 전적으로 주위 환경의 습도에 달려있다.

이 연구에서는, 탄소강에서 산화막의 발생은 습도와 관계가 있다는 것을 증명하였다. 증명을 위하여, 실험이 35%습도에서부터 70%습도 범위 사이에서 시행되었다. 탄소강의 탄소함량과 산화막과의 관계를 조사하기 위하여 SM20C, SM41C, SM45C의 세가지의 탄소강으로 비윤활 편온디스크(PIN-ON-DISK)형식으로 미끄럼 마모 실험을 하였다.

## 2. 3차원 결정화 파이 결합과 마모 기구

미끄럼 접촉의 영향은 재료의 표면에 소성 전단 변형을 일으킨다. 표면의 전단은 표면돌기(Asperity) 사이에서의 응착력(Adhesion)에 의해서 일어나기도 한다. 또한 더 단단한 물체에 있는 꺼칠함이 표면에 흠을 파는(Plowing)것에서 일어날 수도 있다. 이 흠을 파는 작용은 재료에 연한 층(Soft Layer)이 있는 경우에는 더 심해 질 수가 있다. 표면에서 마찰력에 의한 전단응력은 입자들 안의 원자들을 재정렬 시키고 입자들(Single grains)을 회전(Rotation)시킨다. 이것이 입자들의 경계들에서 크랙들을 유도한다. 크랙들은 성장해서 정수(Hydrostatic)응력성분의 압축성이 최소인 곳으로 성장하는데 그것은 인장성분이 3차원 결정화 파이 결합에 의해서 방향 재정립을 시키기 때문이다.<sup>6-11)</sup>

기구에 의해서 얇은 층으로 찢은 판재 같은 극히 작은 입자(Particle)들이 발생된다. 단단한 작은 입자의 경계에서 크랙들은 쉽게 생겨날 수 있으므로 크랙들은 또한 단단한 카바이드 입자의 선을 따라서 전개 될 수가 있다.

## 3. 심한 마모와 연한 마모의 차이

아처드(Archard)와 허스트(Hirst)는 마모과정을 연한 마모(Mild Wear)와 심한 마모(Severe Wear)로 크게 구별하였다. 심한 마모는 금속과 금속의 접촉에 의해서 발생하는데 또는 응착(Adhesion), 탄성변형, 맞물림(Junction)의 형성, 재료가 이쪽저쪽으로 왔다 갔다 하는 것과 같은 일을 하고 있는 재료의 짝(Partners)사이에서 접촉에 의해서 발생한다. 심한 마모는 미끄러지고 있는 한 쌍의 표면을 거칠게 하고 또 마모의 크기가 연한 마모의 크기보다 적어도 2~3배가 더 크다. 연한 마모는 산화층(Oxide layer)에서 일어나던가 또는 미끄럼 접촉(Sliding contact) 동안 어떤 트라이보케미칼(Tribochemical) 반작용에 의해서 만들어진 표면층위에서 일어난다. 이들 표면층은 오직 하중을 받고 있는 면적에서만 발생하고 또 그 층의 형성과 층의 조직(Structure)은 마찰열에 의한 접촉온도, 미끄럼속도, 하중과 주위 조건인 온도, 습도, 산소분압(Partial Oxygen Pressure)등에 달려있다. 이 층들은 금속과 금속의 접촉을 방지 하므로 결국 마찰과 마모를 감소시킨다.

산화막층은 두가지 역할을 한다. 경도가 높기 때문에 산화막층은 그 밑의 층을 기계적 손상으로부터 보호한다. 그러나 이 보호 효과는 산화막층이 매우 얇기 때문에 아주 작다. 주된 효과로 비비고 있는 금속사이에서 분자의 접촉 상호작용을 걸러(Screening) 내는 것이다. 산화막은 비비고 있는 표면으로부터 전위(Dislocations)를 막는 울타리이다.

심한 마모과정에서 재료의 손실은 주로 소성변형과 접촉에 의해서 일어난다. 대부분의 마모찌꺼기(Debris)는 주로 미끄럼 방향으로 길어진 박편(Flake-like) 형상의 재료로 구성된다. 연한 산화마모과정에서 산화막은 임계두께로 자라게 된다. 산화막의 경도는 감소하고 막은 쉽게 깨져서 작은 마모 부스러기를 만든다. 두꺼운 산화막 또는 두꺼워진 산화막이 제거된 뒤에는 하중을 지탱하는 다른 표면이 산화섬(Oxide Island)을 만들고 그리고 비비는 접촉에 의해서 성장하여 새로운 산화막을 만들어 임계두께로 되는 이러한 과정이 끊임없이 반복된다. 연한 마모 동안에는 재료의 손실은 층 이탈 과정(Delamination Process)에 의해 일어나며, 이 과정은 표면 아래에서 마찰력에 의한 전단 응력이 입자들을 회전시키고 재정렬시킴으로 입자경계에서 크랙이 발생하게 된다. 이 크랙들은 3차원 결정화 파이 결합이 인장성분의 방향을 재정립시키기 때문에 정수 응력성분의 압축성이 최소인 곳으로 성장

하여 크랙들이 길게 전개되므로 산화물이 덮인 금속의 얇은 편이 표면으로부터 떨어져 나가는 것이다.

### 4. 탄소강의 마모실험

#### 4.1. 실험방법

실험에 사용한 재료는 한국공업규격으로 SM20C, SM41C, SM45C의 봉재로서 AISI규격의 1020강, 1041강 그리고 1045강과 대등한 재료이다.

재료는 한국공업규격을 따라 해석하기 위해서 같은 봉재에서 인장실험, 마모실험에 사용될 시편을 잘라냈다. 실험의 흐름은 Fig. 1과 같은 순서로 시행하였다. 핀온디스크(PIN-ON-DISK) 마모실험을 행하였는데, 이는 실험하는 동안 핀(PIN)과 디스크(DISK)사이에서 접촉면을 일정하게 측정할 수 있기 때문이다. 마찰력은 검출 요소를 통해서 컴퓨터에 의해서 기록되었다. 회전수는 Fig. 2에서처럼 디지털 카운터기로 세어졌다. 습도의 변화에 따라서 마모율과 마찰력이 변하는 것을 평가하기 위하여 가습장치와 핀온디스크(PIN-ON-DISK) 마모시험기를 챔버 안에 설치하고, 습도범위가 30%에서 70%사이에서  $\pm 2\%$ 의 정밀도로 조정이 가능하도록 하였다.

완성된 장치는 Photo.1에서처럼 되었다. 디스크는 지름이 50mm이고 두께가 5mm를 사용했다. 그리고 핀

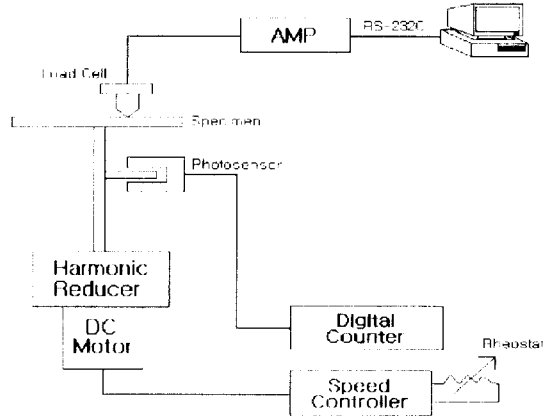


Fig. 2 Measuring system for the wear tester

은 6mm의 지름이고 길이가 70mm이다. 이들은 어닐링(Annealing)하였고 실험을 하기 전에 알코올로 닦아냈다.

핀과 디스크 사이의 접촉면은 경면 래핑(Mirror lapping)을 하여 평균 면조도가 0.03 마이크로(Ra0.03 $\mu$ m)이다. 마찰열에 의한 영향을 최소로 하기 위해서 선속도를 18.3cm/sec 에서 20.9cm/sec 사이(70~80 rpm)로 저속도를 유지하였다. 10,000회전이 되면 핀과 원판은 초음파세척을 하여 마모부스러기를 제거한 후에 무게를 측정하여 마모량을 계산하였다. 마찰력은 로드 셀로 30초 간격으로 컴퓨터로 기록하였다. 마모된 표면은 에폭시 수지를 올려 놓고 전자현미경으로 조사하여 분석하였다.

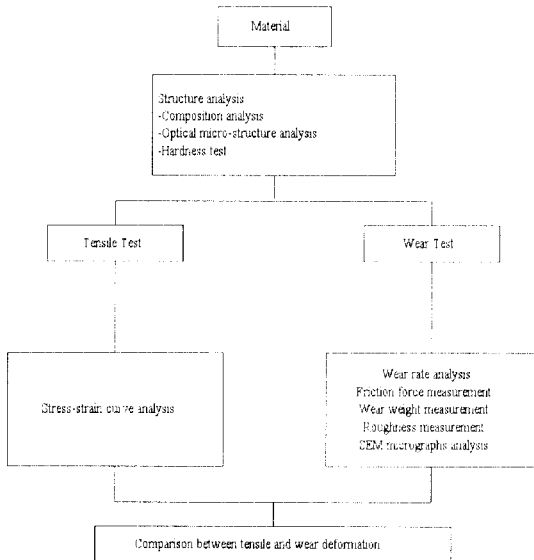


Fig. 1 Experimental flow chart

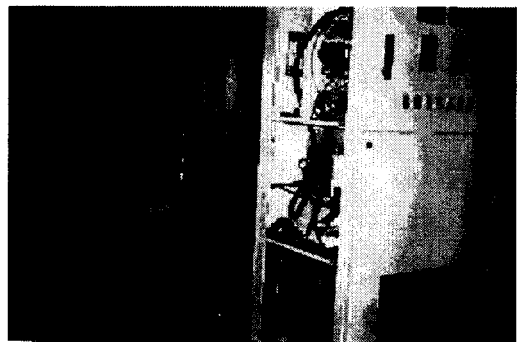


Photo. 1 Experimental set-up for adjusting the humidity of the chamber in which the pin-on-disk wear tester is located

### 4.2. 실험결과

탄소강의 마모거동에 미치는 상대습도(Relative Humidity)의 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 습도가 변화할 때 마모율의 천이(Transition of Wear rate)는 강의 탄소함유량과 관계가 있다. 본 연구에서는 강의 탄소농도가 감소함에 따라 이러한 천이 현상은 상대적으로 더욱 낮은 습도에서 일어남이 관찰되었다. 1020 강은 심한 마모에서 연한 마모로 천이가 되는 갑작스런 마모율의 떨어짐이 습도가 45%인 부근에서 일어난다. 그러나 1041강과 1045강의

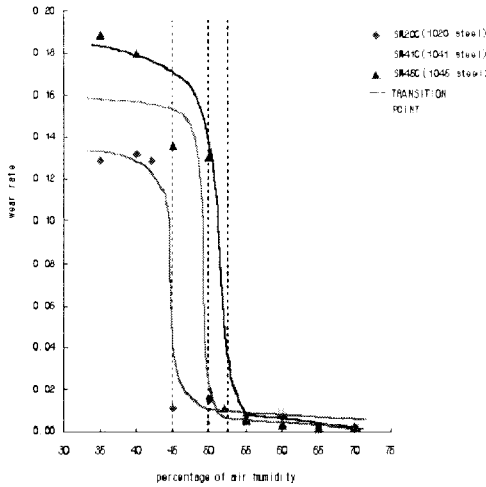


Fig. 3 Wear rate as a function of humidity

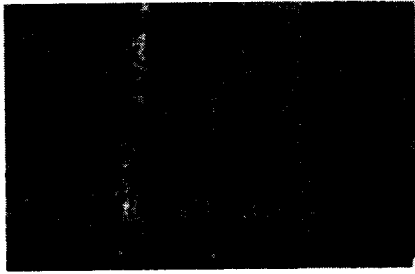
경우에 있어서는 습도가 거의 동일한 약 50%부근에서 마모량의 급격한 감소를 보였으며, 1041강의 경우 1045강에 비해 약간 낮은 습도에서 이러한 감소가 관찰 되었다. 이는 Table 1에서 마모량이 급격히 증가하는 습도에서 쉽게 확인 될 수 있다.

강에서 탄소의 양이 많아지면 시멘타이트( $Fe_3C$ )양이 증가한다. 일반적으로 시멘타이트는 더 안정된 그래파이트(Graphite)로 분해가 된다. 강에서 과포화된 탄소는 시멘타이트의 핵 형성이 그래파이트의 핵 형성보다 훨씬 쉽게 일어나기 때문에 시멘타이트의 그래파이트로의 분해는 거의 일어나지 않는다. 그러므로 일단 시멘타이트가 형성 되면 그 조직은 매우 안정하다. 강의 경우 시멘타이트의 양은 탄소의 양이 증가할 때 증가한다. 탄소강의 미세 구조는 Photo.2에 나타냈다. 이 미세조직사진에서 탄소함유량이 증가하면 펄라이트(Pearlite)가 증가하는 것을 보여 주고 있는데, 이는 탄소함유량이 0.8% 이하인 강에서 일반적으로 관찰되는 것이다. 펄라이트는 실제적으로 단일상(Single Phase)이 아니라 시멘타이트와 웨라이트( $\alpha$ -Fe)의 혼합물이다. 즉 펄라이트는 시멘타이트와 탄소를 함유하지 않는 웨라이트가 교차되는 상으로 구성되어있다. 그러므로 1020강은 같은 습도상태에서 낮은 탄소 함유량을 가지므로 1041강이나 1045강보다도 더 빠르게 산화가 될 수 있다. 그러나 1041강과 1045강 사이에는 커다란 차이는 관찰되지 않았다.

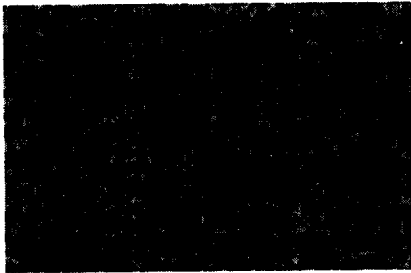
또한 공기 중에 습도가 증가함에 따라서 마찰 계수가 증가하고 연한마모에서 심한 마모로의 천이로 마모량은

Table 1 Wear rate and coefficient of friction at a various relative air humidities (vertical load = 0.5kg ; sliding speed = 18.3cm/sec)

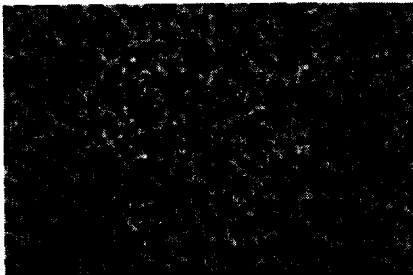
Relative Air Humidity	Materials					
	1020 steel		1041 steel		1045 steel	
	Wear rate (x1/1000gr)	Average friction force(gr)	Wear rate (x1/1000gr)	Average friction force(gr)	Wear rate (x1/1000gr)	Average friction force(gr)
70%	1	216	0.6	232	2	221
65%	2	258	1	246	2	246
60%	7	299	1	256	3	282
55%	7	287	4	288	5	270
52%					11	278
50%	15	319	4	312	131	291
48%			141	309		
45%	11	332	155	306	136	306
42%	129	318				
40%	132	324	154	311	180	311
35%	129	341	161	316	189	314



(a)



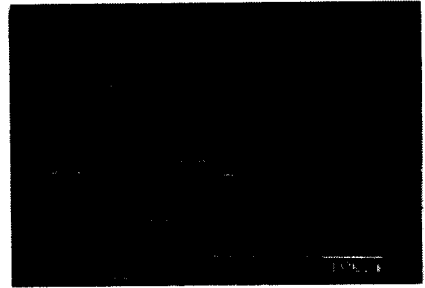
(b)



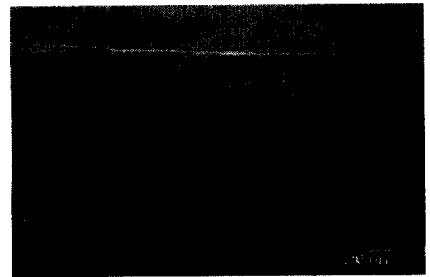
(c)

**Photo. 2 Microstructures of carbon steels**  
 (a) 1020 steel (b) 1041 steel (c) 1045 steel  
 (mag × 200)

거의 2배곱배로 증가하였다. 마모량의 크기는 재료에 따라서 다르며 특히 심한 마모지역에서는 그 차이가 컸다. 1045(HB164)강이 테이터의 값들이 가장 크고 1020(HB114)강이 가장 작았는데, 이것은 강의 경도값의 순서와 일치하였다. 심한 마모구역에서는 재료의 마모손실이 금속의 꺼칠함(Asperity)에 의해서 금속과 금속이 접촉되어 뒤 이어지는 큰 전단 과정에 의해서 발생하므로 금속의 경도가 중요한 인자이다. 그러나 연한 마모구역에서는 탄소함유량에 관계없이 마모량에 큰 차이가 없었다. 이러한 결과는 강 표면의 산화층에 잘 나타나있다. 이러한 산화막이 밀층(Underlying Layer)을 꺼칠한 것의 전단 작용



(a)



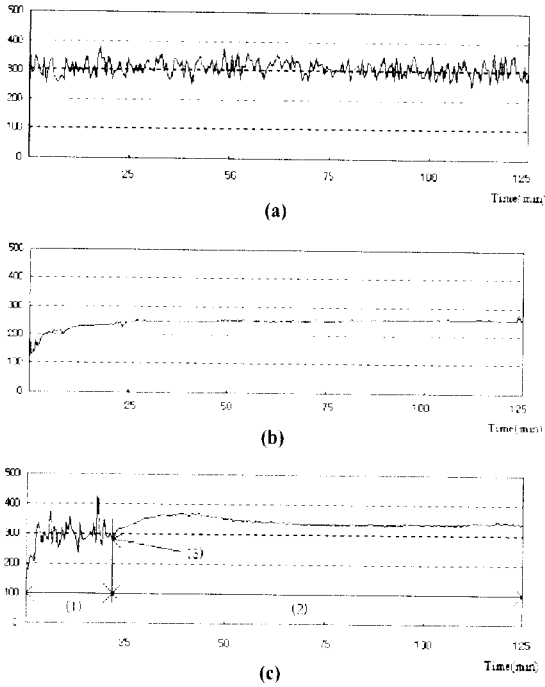
(b)

**Photo. 3 Micrographs of severely damaged worn surfaces in 1045 steel during severe wear sliding against the same steel at an air humidity of 45%**  
 (a) parallel to the wear track  
 (b) perpendicular to the wear track  
 Note the crack beneath the sub-surface  
 (normal load= 0.5kg ; sliding speed= 18.3cm/sec)

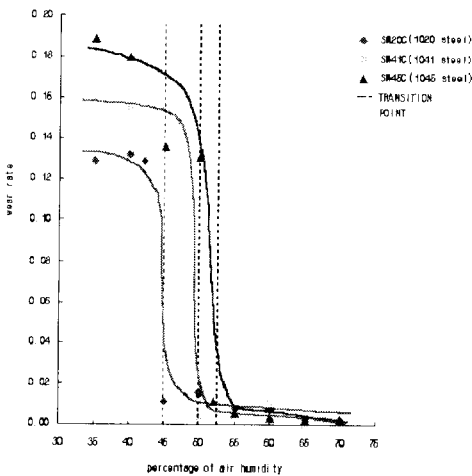
으로부터 보호하거나 또는 기계적 손상으로부터 보호한다. 실험결과에 의하면 연한 마모지역에서의 마모는 막의 분리작용(Delamination Process)과 산화막이 부서진 찌꺼기(Debris)에 의한 연마작용(Abrasive Action)에 의해서 주로 일어난다(Table 1).

전자주사현미경사진(SEM)에 의하면 심한 마모지역에서는 접촉하고 있는 금속표면에 있는 꺼칠함의 접촉으로 인하여 표면에 발생한 심한 손상들이 나타나고 있다(Photo.3). 반면에 연한 마모 지역에서는 산화막이 작동면 전체를 덮고 있으므로 손상을 감소시켜 비교적 부드러운 표면을 만들고 있고, 표면 바로 아래에 피로에 의한 크랙(Fatigue Cracks)이 발생되어 있는 것이 Photo.4에 관찰된다.

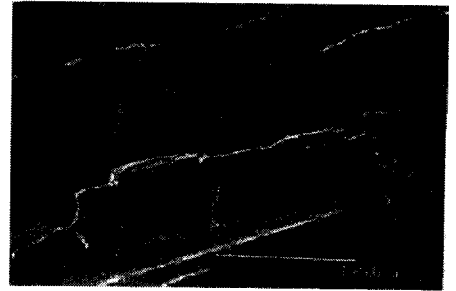
Fig. 4(a)는 심한 마모가 일어나는 동안 마찰력의 변화를 보여주고 있다. 데이터는 매 30초마다 입력이 되었고



**Fig. 4** The variation of friction force  
 (a) 1041 steel at a humidity of 35% (severe wear)  
 (b) 1041 steel at a humidity of 65% (mild wear)  
 (c) 1020 steel at a humidity of 45% (severe and mild wear)  
 (1) Severe wear region, (2) mild wear region,  
 (3) transition point  
 (Load = 500gr ; sliding speed = 18.3cm/sec)



**Fig. 5** Coefficient of friction as a function of air humidity



(a)



(b)

**Photo. 4** Micrographs of relatively smooth worn surface in 1020 steel during mild wear sliding against the same steel at an air humidity of 55%  
 (a) parallel to the wear track  
 (b) perpendicular to the wear track  
 Note the crack beneath the sub-surface  
 (normal load= 0.5kg ; sliding speed= 18.3cm/sec)

마찰력의 크기는 가해진 하중의 20%범위 내에서 파동을 치고 있다. 연한 마모 동안에는 Fig. 4(b)에서처럼 파동이 치지 않는다(가해진 하중에 2~3%에 불과하다). 그러므로 마찰력의 크기가 주의 깊게 모니터링이 된다면 심한 마모에서 연한마모의 천이 되는 시작점을 Fig. 4(c)에서와 같이 즉시 알 수 있다.

마찰계수는 Fig. 5에서와 같이 대기중의 습도가 증가하면 감소한다. 습도가 65%보다 높은 곳과 45%보다 낮은 곳에서는 마찰계수의 변화가 매우 작음을 알 수 있다. 천이점은 Table 1에서 마모량이 급격히 증가하는 습도에서 쉽게 확인 될 수 있다.

## 5. 결론

- (1) 탄소강의 마모실험에서 습도가 감소하면 마모량이 갑자기 증가하는데 이는 연한마모(Mild wear)에서

심한 마모(Severe wear)로의 천이(Transition)다. 천이는 1020강의 경우에는 습도가 대략 45%에서 일어나고, 1041강은 50%에서 1045강에서는 52%에서 일어나며 이와 같은 천이점의 증가는 강의 탄소함유량의 증가와 일치한다.

- (2) 심한 마모의 마모량은 연한마모에서의 마모량보다 2배쯤배가 된다.
- (3) 심한 마모에서는 마모량이 재료의 따라서 아주 다르다. 1045강(HB164)이 마모량이 가장 크고, 1041강(HB148)이 중간이고 1020강(HB114)이 가장 작으며 이는 재료의 경도 크기와 탄소함유량의 크기와 순서가 일치한다. 연한 마모과정에서 산화막의 영향이 큰 인자이므로, 재료의 경도가 탄소함유량이 달라도 마모량에 큰 차이가 없다.
- (4) 습도가 45%에서 65%까지 증가하면서, 마찰계수는 서서히 감소하고 습도가 65%이상 되는 곳과 45%이하 되는 곳에서는 마찰계수의 변동이 아주 작으며 거의 일정하게 유지되고 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) Dies K., "Die Reiboxidations als Chemische Mechanische Vorgang", Techn. Mitteilungen Gruppe. Forschungsberichte, Heft 10, 1942, S.127.
- (2) Archard J.F., "Contact and Rubbing of Flate Surfaces", J. Appl. Phys., vol. 24, N 8, 1953, pp. 981~988.
- (3) T.F.J.Quin, D.M.Rowson, and J.L.Sullivan, "Application of the oxidational theory of mild wear to the sliding wear of low alloy steel", Wear ,65, pp. 1~20, 1980
- (4) F.H.Stott and G.C.Wood, "The influence of oxides on the friction and wear of alloys", Tribology international, pp. 211~218, 1978.
- (5) I.V.Kragelsky, "Friction and wear", pergamon press, p. 135.
- (6) Hung-Kuk Oh, "Behaviors of three-dimensional crystallizing (-bondings in engineering science", Ajou univ. press, ISBN 89-86161-03-793400, pp. 13~23, 1995.
- (7) Hung-Kuk Oh, "Conventional metallic bonding and three-dimensional crystallizing (-bondings", Journal of Materials Processing Technology, 69, pp. 134~147, 1997.
- (8) Hung-Kuk Oh, "Three-dimensional crystallizing (-bondings orbitals('O's' bonding) and plastic deformation by twins and dislocation", Journal of materials Processing Technology, 65, pp. 127~133, 1997.
- (9) Hung-Kuk Oh, "Three-dimensional crystallizing (-bondings orbitals('O's' bonding) and electrical and mechanical properties of alloy metals", Journal of Materials Processing Technology, 69, pp. 125~133, 1997.
- (10) Hung-Kuk Oh, "Three-dimensional crystallizing (-bondings and uniaxial tensile deformation in polycrystalline metals", Journal of Materials Processing Technology, 69, pp. 120~124, 1997.
- (11) Hung-Kuk Oh, "Some comments on three-dimensional crystallizing (-bondings, fatigue and fatigue limit", Journal of Materials Processing Technology, 66, pp. 153~157, 1997.
- (12) 김성청, 이재우, "페라이트의 연삭저항 및 연삭면 특성", 한국공작기계학회기술학회지, vol. 6, No. 3, pp. 17~25, 1997.