

인청동의 내마모성향상에 대한 연구

송 건 · 권숙인 · 차영현*

고려대학교 금속공학과

*금강전원(주) 부설 소재연구소

A Study on the Improvement of the Wear Resistance of P-bronze

Kun Song, Sook In Kwun and Young Hyun Cha *

Department of Metallurgical Engr., Korea University

* Kum Kang-Dengen Metal Co., Ltd.

Institute of Material Research and development.

ABSTRACT

The wear resistance of P-bronze which is widely used as worm gear material was investigated. In order to study the effect of additional elements on the wear resistance of P-bronze, the applied load and sliding time were selected as variables, and SCM4, were used as against metal.

The addition of Fe improve wear resistance, for it precipitates hard Fe₃P phase and the work hardening coefficients are lowered due to decreasing solubility of P. When Fe is added in conventional P-bronze, the alloy is rather sliding than forming wear debris by frictional force during wear test.

Experimental results indicated that the wear mechanisms for P-bronze are mainly consisted of abrasive wear due to Beilby layer forming mechanism and adhesive wear due to thermally activated wear mechanism. Moreover, the weight loss is decreased in accordance with increasing load and time. However the rate of wear loss is decreased as the sliding time is increased.

1. 서 론

일반적으로 청동에 인의 함량이 0.05% ~ 0.5% 정도 잔류하는 인청동은 용탕의 유동성이 좋아지고, 합금의 강도, 경도가 증가하여 내마모성, 탄성이 증가한다 (1). 또한 P는 극소량 Cu 중에 고용하나 그 외에는 경하고 취약한 Cu₃P상으로 존재하고, P의 함유에 따라 Sn의 고용도가 저하하므로 주조 조직중에 δ상(Cu₃₁Sn₈)이 증가하여 Sn을 증가한 때와 같이 경도가 커지는 효과가 있다. 이같이 기지상 중에 단단한 3원 공정부(α

+ δ + Cu₃P)상이 산재하여 있어 이것이 마찰상대면을 지탱하여 내마모 역할을 하기 때문에 인청동이 내마모 재료로써 많이 쓰이고 있는 것이다. (2,3) 또한 표면에 P의 농도가 커지게 되면 이 P가 metal – metal의 adhesion을 방해하는 효과가 있어 내마모에 훌륭한 기여를 한다고 보고되고 있으며 (4) 표면에 있는 P는 마모시 마찰열에 의해 Sn이 표면으로 이동하는 것을 제한한다고 알려져 있어 표면의 P는 Cu – Sn alloy의 마찰과 마모에 매우 중요한 역할을 한다고 보고되고 있다 (5). 보편적으로 알려진 인청동의 성질은

1) 낮은 탄성계수, 2) 좋은 열전도도, 3) 빠른 가공 경화, 4) 경계 윤활 조건 하에서의 seizure에 대한 저항성이 큰 것이다(6). 더우기 미량의 첨가원소에 의해서 강도, 경도, 연신율 등의 기계적 성질을 향상시킬 수 있으므로 이에 대한 합금설계에 의해 내마모성의 향상을 기대할 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 기존에 생산하고 있는 worm gear의 재료인 인청동을 실제 사용되고 있는 상대금속(SCM 4종, SCM 21종)과의 마모시험을 통하여 내마모성을 평가하고, 이를 바탕으로 보다 나은 내마모성 인청동합금을 설계하고자 하였다.

2. 실험방법

2-1. 인청동의 화학조성의 선택

인청동은 내마모성 및 내식성이 우수하여 현재 엘리베이터의 기어용 합금으로 많이 쓰이고 있으나 이의 내마모성이란 상대적인 값일 뿐 절대적인 값이 아니므로 실제 사용중의 worm gear는 수명이 그다지 길지 못하다. 따라서 이의 수명(life time)을 개선하기 위해서 새로운 합금설계가 수행되었다.

인청동에 0.3% 이내의 Fe를 첨가하면 연신율에는 영향을 미치지 않으면서 강도와 경도를 증가시키고 0.3% 이상을 첨가하면 인장력이 다소 감소되면서 경한 compound를 형성한다고 보고(7) 되고 있다. 한편 Si를 인청동에 첨가하면 내식성을 향상시켜 마모시에 응력부식균열에 대한 저항성을 증진시킨다고 보고(8)되고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 인청동 화학조성에 0.2%의 Fe와 0.5%의 Si를 단독 또는 둘다 첨가하여 보다 훌륭한 내마모성 인청동을 개발하고자 하였다.

또한 본 연구에서는 기존의 제품 뿐 아니라 시판되고 있는 수입품들의 내마모성도 아울러 조사 비교하고 있으므로 그들의 화학조성도 함께 Table 1에 비교하였다. 따라서 앞으로의 표기에 있어서 기존의 제품을 #1, A국의 수입품을 #2, B국의 수입품을 #3, #1에 Fe만 첨가한 것을 #4, #1에 Si만 첨가한 것을 #5, #1에 Fe와 Si 두 가지 다 첨가한 것을 #6이라 칭하겠다.

Table 1 Chemical composition of specimens.

(단위 : wt %)

번 호	화 학 조 성							
	Sn	Ni	Fe	P	Zn	Pb	Si	Cu
# 1	11.8	1.30		0.12				Bal
# 2	11.6			0.12				Bal
# 3	9.9	1.05	0.04	0.22	1.0	0.48		Bal
# 4	11.5	1.24	0.05	0.11				Bal
# 5	11.6	1.14		0.12			0.52	Bal
# 6	11.8	1.16	0.15	0.13			0.55	Bal

2-2. worm wheel의 제작 및 마모시편 채취

시편의 제작은 앞에서 언급한 조성으로 제품 생산시와 동일하게 주조하여 필요한 부분에서 시편을 채취하도록 하였다. 이때 인청동은 δ 상의 분포가 내마모성에 중요한 영향을 미치며 δ 상은 10% Sn의 경우에서도 응고편석 때문에 α 상 사이에 δ 상의 산재가 가능하고(9) 이렇게 δ 상이 산재하여 있는 편이 내마모성에 좋기 때문에 일반적으로 주조조직을 그대로 사용한다. 그러므로 좀 더 전선한 주조조직을 얻기 위하여 특별한 탐구방안 및 냉금을 설치하였다.

주조시의 용해장입순서는 Table 2에 나타나 있다. 이때 사용한 mold는 첫수가 정밀한 장점을 갖는 CO₂ mold 법을 사용하였다.

합금의 용해온도는 1190°C에서 행하였으며 주조시 pouring 온도는 1170°C에서 행하였다.

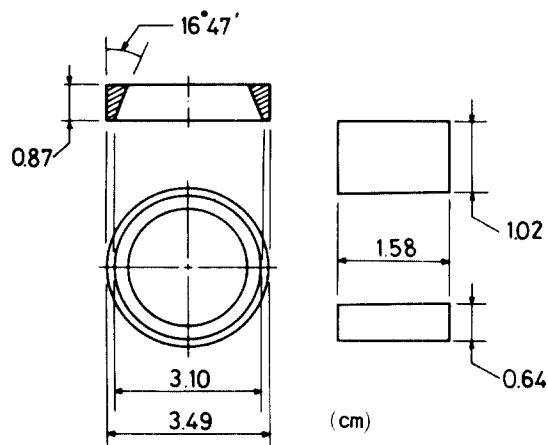


Fig. 1. Schematic illustration of wear specimen and against metal.

또한 마모시편의 채취는 wheel 의 tooth 부분 즉, shaft 와 만나 힘을 받으면서 미끄러지는 부분을 채취하여 실제의 마모조건을 그대로 simulate 할 수 있도록 하였으며 시편의 칫수 및 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

Table . 2 Melting process .

제품명	용 해 장 입 순 서
# 1	**Cu+Cu-10%Ni-용해-Sn-용해-Cu-15%Pn
# 2	Cu-용해-Sn-용해-Cu-15%P
# 3	Cu+Cu-10%Ni-용해-Cu-10%Fe+Sn-용해-Cu-15%P
# 4	Cu+Cu-10%Ni-용해-Cu-10%Fe+Sn-용해-Cu-15%P
# 5	Cu+Cu-10%Ni-용해-Cu-10%Si+Sn-용해-Cu-15%P
# 6	Cu+Cu-10%Ni-용해-Cu-10%Si+Cu-10%Fe-Sn-용해-Cu-15%P

* 각 원소들의 산화온실율은 다음과 같이 계산하여 장입하였다.
Sn : 3%, Ni : 2%, P : 30%, Zn : 10%, Fe : 0%, Pb : 3%,
Si : 5%

** Cu는 모두 99.98%의 순동을 사용하였다.

2-3. 조직의 관찰

2-2에서 설명한 방법으로 제작된 worm gear로 부터 채취한 시편을 가지고 조직을 관찰하였다. 먼저 시편을 120번, 400번, 800번, 1200번의 abrasive paper에 polishing 한 후 iron chloride 20 g, ethanol 100 ml, hydrochloric acid 10 ml 를 넣은 시약을 중류수에 3:1정도의 비율로 섞은 후 Cr₂O₃를 첨가하여 Buehler cloth에 뿐리면서 polishing 하여 Leitz microscope 와 SEM으로 조직의 관찰을 행하였다.

2-4. 경도시험

경도시험은 실제 wheel 과 shaft 가 접촉하여 미끄러지는 부분에서 직육면체의 시편을 절취하여 Brinell Hardness tester 와 Micro - Vickers hardness tester 로써 경도값을 측정하였다. 이때 Micro - Vickers hardness 는 일정 간격으로 7개의 point에서 값을 구한 뒤 이들의 평균값을 취했다.

2-5. 인장시험

인장시험은 ASTM E - 8 subsizze 규격의 환봉을 준비하여 만능시험기 (Instron Model No. 1350)를 사용하여 2×10⁴ 의 strain rate 로써 시험을 하였으며 시험에 사용된 시편의 규격을 Fig. 2에 나타내었다.

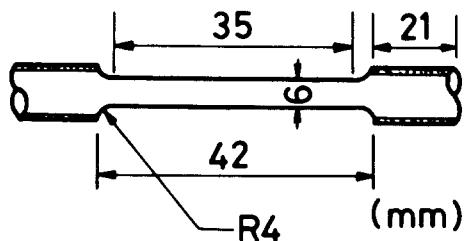


Fig. 2 Schematic illustration of tensile specimen.

2-6. 열팽창 시험

Worm gear의 실제 사용시 마찰열에 의한 열팽창으로 인하여 실제 접촉면적에 변화를 줄 수 있을 것으로 사려되어 모든 재료들의 열팽창계수들을 측정하였다. 열팽창계수는 T. M. A (Thermo Mechanical Analysis)를 사용하여 상온부터 400°C 까지에서 측정하였다.

2-6. 표면조도 측정

마모량은 표면 거칠기에도 밀접한 관계가 있으므로 ring 과 block 의 표면조도를 측정한 후에 마모시험을 행하는 것이 바람직하므로 마모시험을 하기 전에 최종 준비된 ring 과 Block 의 표면조도를 Talysurf - 6 Model 의 surface roughness tester 로 측정하였다. 이때 ring 은 연마기에서 연마된 것의 상태를 그대로 사용하였으며 block 은 일정한 힘으로 일정한 거리를 emery paper 에 운동시킨 것을 사용하였다.

2-7. 마모시험

마모시험은 SAE 10 기유를 사용한 윤활상태에서 ALPHA Model LFW - 1 Friction and Wear Testing Machine 으로 행하였다. 이 마모시험기의 특징은 ring - on - block system 으로 마모시험을 하며 마모시험 동안에 kinetic friction 을 연속적으로 측정할 수 있으며 compound lever system 에 의해 하중을 가하기 때문에 하중의 정확도를 ±1 % 로 할 수 있으며 sliding 속도의 정확도는 ±2 % 정도를 얻을 수 있는 특징이 있다.

시험조건은 ring 의 회전속도를 200 rpm (32cm / sec)으로 일정하게 하였으며, 하중은 13.6 kg, 40.8 kg, 68.0 kg 으로 변화를 주었고, 시간은 1시간, 2시간, 3시간으로 변화를 주어 실험을 행하

였다. 또한 상대금속도 SCM 21, SCM 4종의 2 가지로 실험을 행하였다. 실험이 끝난 직후에 oil sample 을 채취하여 debris 의 형태 및 크기를 조사하였고, 실험을 하기 전에 시편을 normal - hexane 으로 완전히 세척한 후 automatic chemical balance 로써 0.1mg 까지 측정하였으며 실험이 끝난 후 다시 normal - hexane 으로 완전히 세척하여 칭량한 후 무게의 감량을 구해서 마모량을 측정하였다.

2-8. R. P. D. 에 의한 wear debris 의 관찰

마모입자의 크기 및 형태의 조사는 R. R. D. 방법에 의하였다. 이 방법으로 마모입자를 substrate glass 에 분산 교착시켜 이 입자들을 optical microscope 로써 관찰하였으며 좀 더 자세한 입자의 분석을 위해서 입자들을 gold coating 시킨 후 SEM 을 이용하여 관찰을 시도하여 윤활 system 에서의 마모진행과정 및 마모기구의 정성적인 분석을 시도하였다.

2-9. 마모면의 관찰

마모시험이 끝난 후 block 과 ring 에 대한 마모면의 관찰을 행하였다. 마모시험 직후에 normal - hexane 으로 마모시편을 완전히 세척한 후 optical microscope 와 SEM 으로써 block 의 마모면을 조사하였으며, 또한 SEM 으로 ring 으로의 transferred metal 에 대한 관찰을 실시함과 동시에 transferred metal 에 대해 Cu 성분의 분포를 알아보기 위해서 EDAX 로 composition image 를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 조직의 분석

Photo. 1에 시편에 따른 주조조직의 사진을 나타내었다. Cu - Sn 의 상태도에 의하면 Sn 의 최고 고용도는 520°C에서 약 15.8 %이다. 그러나 청동의 특징은 응고온도 범위가 매우 넓어 결정편석이 많이 일어난다는 것이다. 이렇게 편석이 일어날 경우 초정 α 가 응고하고 나면 남아있는 용액은 Sn% 가 많아져서 520°C에서 $\alpha + \delta$ 상이 생기는데 이 δ 상은 $Cu_{31}Sn_6$ 의 조성으로 Sn 이 32.5 % 함

유되어 있으며 이것은 350°C - 375°C에서 $\alpha + \epsilon$ (Cu_3Sn)으로 공석변태하나 변태속도가 대단히 느리기 때문에 실제로는 δ 상이 상온에서 그대로 존재한다.

이와 같이 Cu - Sn 은 응고시 결정편석이 강하게 일어나기 때문에 본 연구에 사용된 10 % Sn 의 합금에서도 δ 상이 나타난다. 이 ($\alpha + \delta$) 공석정이 내마모성에 지대한 역할을 하기 때문에 보통 주조조직을 그대로 사용하는 경향이 있다.

Photo. 2에 회계 나타난 부분이 $\alpha + \delta$ 의 공석조직이며 P 의 첨가에 따라 δ 상의 량이 증가한다는 보고가 있다. 이는 P 는 Cu 중에 극소량 고용하고 그 외에는 경하고 취약한 Cu_3P 상으로 존재하면서 Sn 의 고용도를 저하시키기 때문이다 (10).

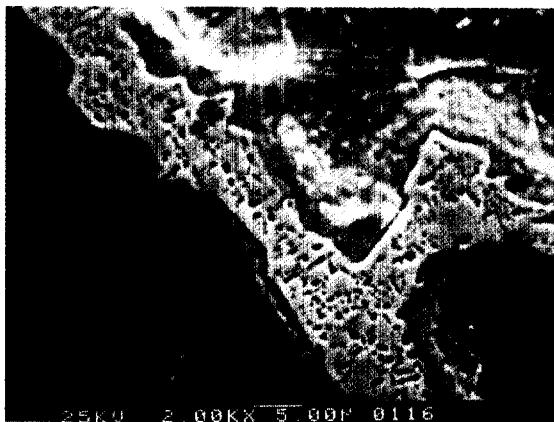


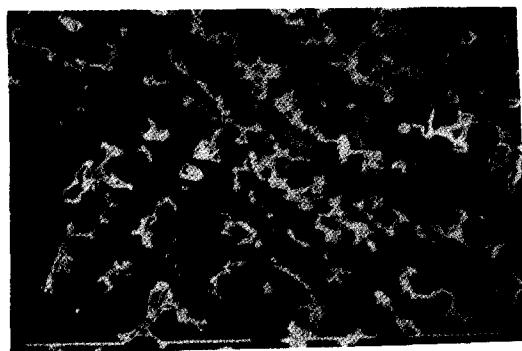
Photo. 2 SEM micrograph of ($\alpha + \delta$) Phase (#2, X2000)

Photo. 1에서 볼수있는바와 같이 #1 시편에서부터 #6 시편까지 모두 다 주조조직의 일반적인 형태인 dendritic structure 를 보이고 있으며 다소간의 주조결함도 보이고 있다. 특히 #3의 경우에는 매우 많은 주조결함을 보이고 있는데 이는 후술 하겠지만 마모기구에도 지대한 영향을 주어 마모량에도 영향을 줄 것으로 생각된다.

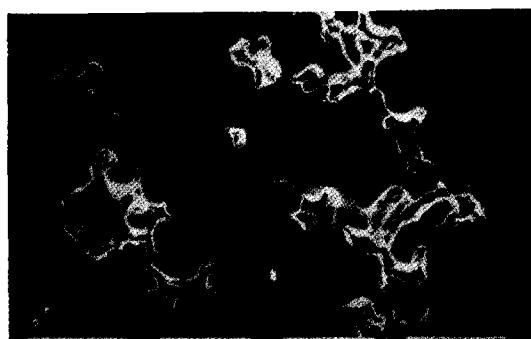
또한 Fe 를 첨가한 #4 및 #6 시편의 경우 ($\alpha + \delta$) 공정부 주위에 미세한 빛살무늬가 발견 되는데 EDAX 로 성분분석을 해본 결과 Sn 의 역편석에 의한 조직인 것으로 나타났다. 이는 표면쪽의 Sn 농도가 증가할 것을 예측할 수 있게 해주며



a)



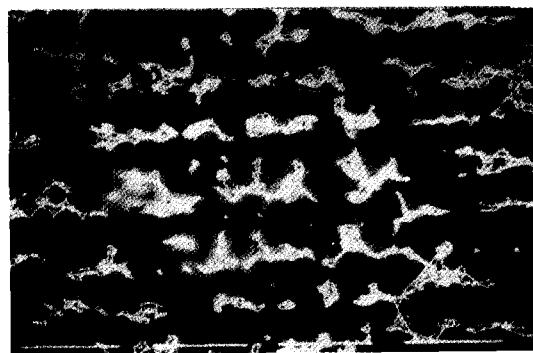
b)



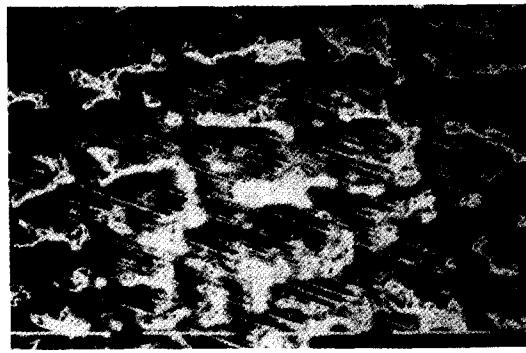
c)



d)



e)



f)

Photo. 1 Structure of as-casted P-Bronze. (X2000)

a) #1 b) #2 c) #3 d) #4 e) #5 f) #6

표면쪽의 Sn 농도증가는 δ 상의 증가로 생각할 수 있기에 표면쪽의 δ 상이 대마모성에 유익하게 작동할 것으로 사려된다.

3-2. 여러가지 인청동의 성질

조성에 따라 주조한 worm wheel에서 시편을 절취하여 인장시험, 경도시험을 한 결과를 Fig.

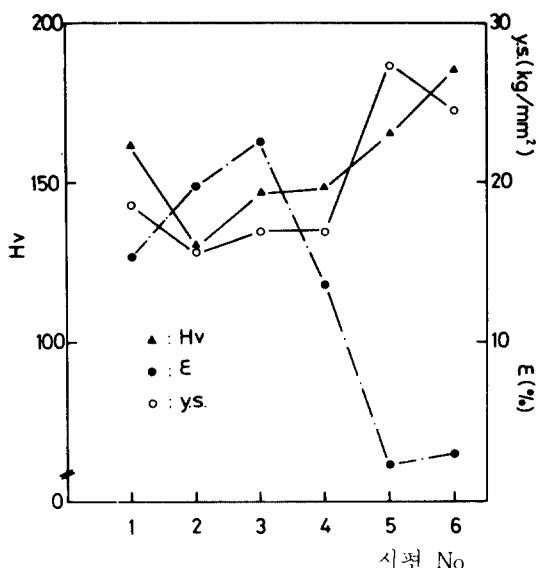


Fig. 3. Mechanical properties of specimens

3에 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 Si를 첨가한 #5, #6의 시편에서는 강도, 경도의 향상이 있었으나 연신율은 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이는 0.5%의 Si를 첨가하여 고용체 강화를 일으켜서 경도 및 강도가 증가하게 되고 강도가 증가함에 따라 소성변형이 어려워 점으로써 연신율은 현저히 감소하게 되는 것으로 사려된다.

#4 시편에 있어서는 Fe의 첨가량이 의도한 바의 량에는 미치지 않는 성분분석 결과가 나왔지만 경도와 강도의 향상을 기대할 수 있다는 보고와는 달리 경도, 강도, 연신율 모두가 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 본 시편의 세작시 주조물 내의 결함 및 편석에 기인한 결과로 사려된다.

또한 표면조도의 측정결과를 Table. 3에 나타내었다. 시편인 block의 경우는 비슷한 표면조도 값을 나타내고 있으나 상대금속인 ring의 경우는 SCM 21종의 것이 SCM 4종보다 좀 더 거칠은 표면조도를 나타내고 있다. Table. 4는 열팽창시험을 한 결과이다. #4의 경우가 가장 낮은 열팽창계수를 나타내고 있으며 #5의 경우는 가장 높은 값을 나타내고 있다. 이는 열팽창계수가 높은 경우 ring과 block과의 밀착이 용이하여 wear debris로 될 확률이 커지게 되어 마모량이 증가할 것으로 생각되므로 #4시편의 경우가 가장 적은 용

Table. 3 Surface roughness of specimens and against metal.

시편	SCM 4 Ring	SCM 21 Ring	1	2	3	4	5	6
Surface roughness ($R_a, \mu m$)	0.36	0.55	0.27	0.28	0.30	0.28	0.26	0.32

Table. 4 Heat expansion coefficient of specimens.

시편 No.	1	2	3	4	5	6
heat expansion coefficient $\times 10^5$ mm/m°C	19.18	19.09	19.43	19.06	19.84	19.59

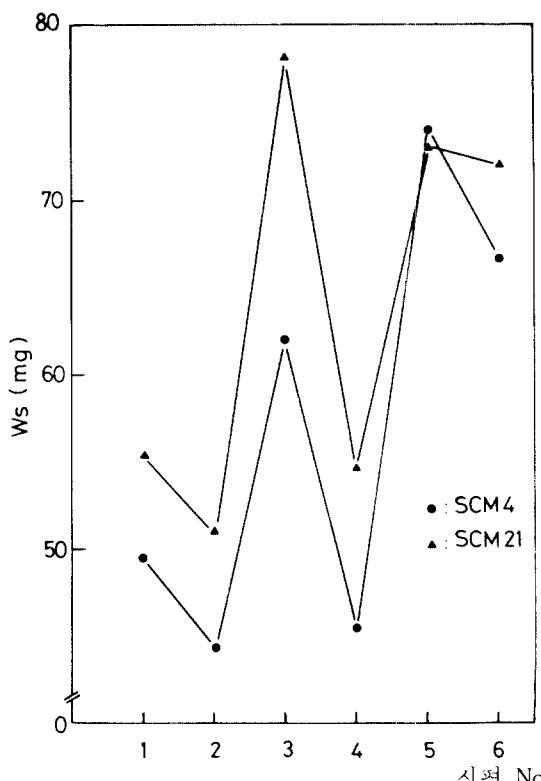


Fig. 4 Ws (weight loss) of each specimen under constant load. (68.0kg, 1hr)

착마보를 일으킬 것으로 생각되며, #5시편의 경우가 가장 큰 용착마보를 일으킬 것으로 생각된다.

3-3. 일반적인 마모경향

Fig. 4에 68kg의 하중을 주어 1시간동안 마모시험을 행하였을 때의 각 시편에 대한 마모량을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같은 마모경향은 하중을 13.6kg으로 낮추었을 때도 동일하게 나타났으므로 이 결과를 토대로 하여 내마모성이 우수하게 나타나는 #1, #2, #4의 시편에 대한 실험을 중점적으로 하여 이들의 내마모성 및 마모기구를 살펴보았다.

3-4. 하중에 따른 마모량의 변화

Fig. 5에 하중의 변화에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 시편의 구분이 없이 하중이 감소함에 따라 마모량이 줄고 있음을 알 수 있다. 이는 하중이 증가함에 따라 마모량이 증가한다는 일반적인 wear model에 잘 일치하고 있다(11). Kraus(12) 등에 의하면 마모량과 하중의 관계는 abrasive의 경우 직선적인 관계가 있음을 보여 주었다. 즉 마모량과 하중의 관계는

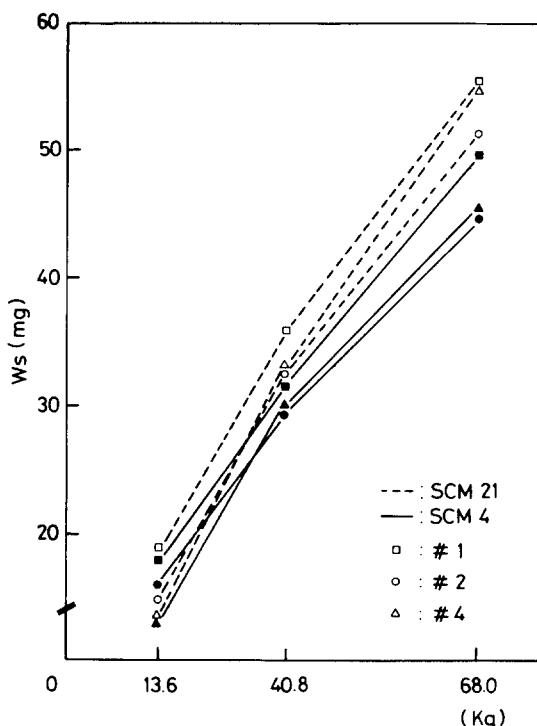


Fig. 5 Plot of W_s (weight loss) as a function of load. (1 hr)

다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$W \propto P \times S$$

$$P : \text{하중}$$

$$S : \text{거리}$$

여기서 abrasive wear인 경우 하중과 마모량과의 관계는 직선적인 비례관계가 있으나 본 실험에서는 직선적인 관계로부터 편차가 나타나고 있는데 이것은 본 실험의 마모기구가 abrasive wear 만이 아니라 adhesive wear 등의 여러 가지 기구가 복합적으로 일어나고 있다는 사실을 암시하고 있는 것이다.

또한 여기서 주목해야 할 것은 하중이 실제 접촉면의 stress가 아니라는 점이다. 처음에 하중이 걸리면 접촉면은 금속의 elastic properties와 yield strength에 의해 결정된다고 보고(13)하고 있으며 hard한 환형의 ring이 상대적으로 soft한 평평한 bolock을 누르고 있을 때 실제 접촉면

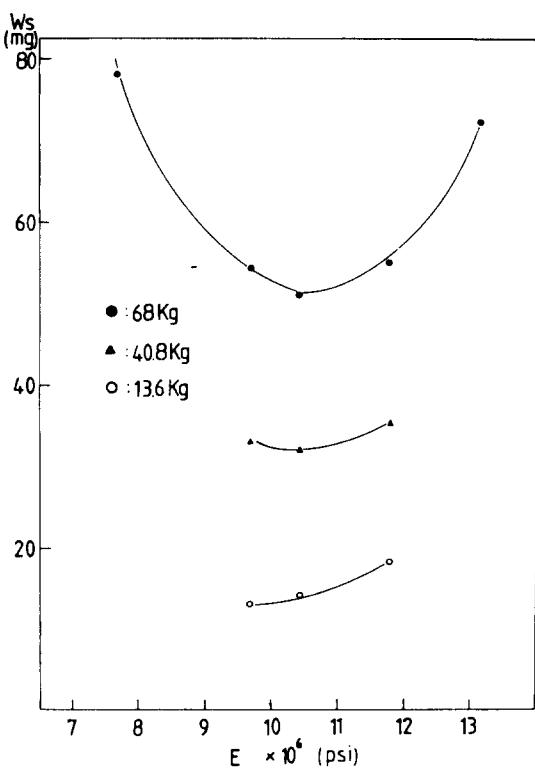


Fig. 6 Plot of W_s (weigh loss) as a function of E (Young's modulus of specimen) (1 hr)

에서의 stress 값은 두 material의 E 값에 의존하게 된다. 즉 steel ring의 E 값이 일정하기 때문에 block의 E 값이 커질수록 접촉부위의 넓이가 감소하게 되며 결국 하중이 걸리는 면적이 감소하므로 실제 접촉면적에 걸리는 stress 값은 증가하게 된다. 이는 block의 E 값이 증가함에 따라 마모량이 증가할 것을 예견케 해준다.

Fig. 6에 block의 E 값과 마모량과의 관계를 나타내었다. 그림에서 볼 때 #3시편의 경우가 E 값이 가장 작으므로 접촉면적이 가장 크게 되어 이에 따른 접촉응력은 가장 작을 것이므로 마모량이 적을 것으로 생각되나 실제로는 가장 큰 마모량을 나타내고 있는 것은 앞서 언급한 바와 같이 #3시편이 주조결함이 가장 많아 이에 따른 영향과 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 가공경화지수가 가장 높은 까닭에 표면이 shear stress를 받을 때 쉽게 미끄러지지 못하고 가공경화를 일으켜 축적되는 응력에 의해 마모분으로 탈락되기 때문인 것으로 생각된다.

또한 Fig. 6에 의하면 E의 값이 $9 \times 10^6 - 12 \times 10^6$ (psi) 정도로 나타낼 때가 마모량이 적은 것을 알 수 있었다. 이는 E 값의 감소에 따라 접촉면적이 증가하고 따라서 실제 접촉응력은 낮게되나 이 때의 응력이 metal의 항복응력보다도 충분히 크다면 형성되는 마모입자가 증가하게 되어 마모량이 커지게 되고 E 값이 커지는 경우 접촉면적이 작아져 실제적인 접촉응력이 커지기 때문에 마모량이 증가하는 것으로 사려된다.

3-5. 시간에 따른 마모량의 변화

Fig. 7에 마모시간에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. Rabinowicz (14)에 의하면 abrasive wear인 경우 제한된 구역으로 상대운동이 계속적으로 운행된다면 운행거리가 늘어남에 따라 마모량의 증가속도가 둔화되고 있다고 보고하고 있다.

물론 abrasive wear뿐 아니라 adhesive wear도 동시에 발생하고 있겠지만 초기의 primary asperity가 일단 제거되고 나면 점차 시편의 표면이 smooth해질 것이고 steel의 asperity도 smooth해질 것이므로 소성변형을 야기시키는 asperity의 접촉수도 감소하여 이때에는 재료들 사이의 직접마모 보다는 재료들 사이의 윤활유에

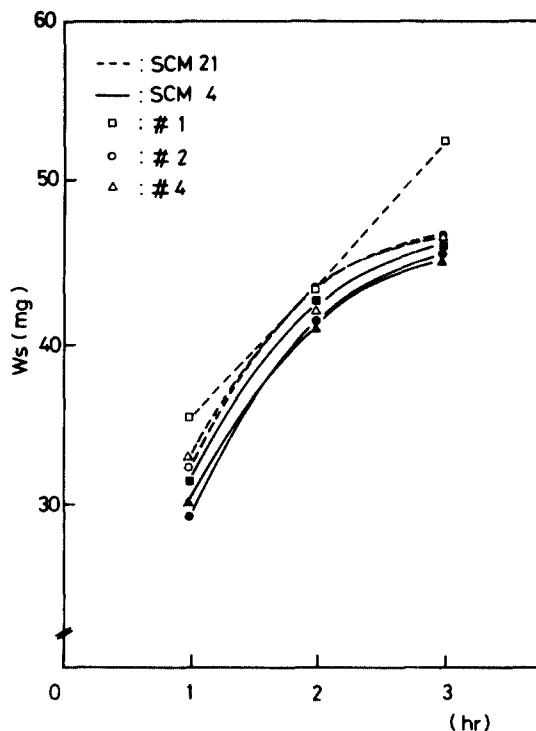


Fig. 7 Plot of Ws (weight loss) as a function of sliding time. (40.8kg)

의한 film의 역할이 커지게 되어 점차 마모량이 감소할 것임을 알 수 있다.

또한 Photo. 3에서 볼 수 있듯이 steel ring으로 transferred 된 metal에 의한 영향 때문에도 마모량의 증가속도가 둔화되고 있는 것으로 생각된다.

마찰계수와 마모량의 관계가 일반적으로는 마찰계수가 큰것이 마모량이 많은 것으로 알려져 있으나, 실제로는 모든 asperity의 접촉점이 마찰력에는 관계하지만 마모에는 모두가 관계하지 않으므로 마찰계수와 마모량이 전적으로 비례하지 않을 수도 있다. 더욱이 boundary lubrication인 경우 adhesive wear는 접촉점에서 일부의 lubricant film이 깨지는 곳에서 adhesion이 발생하기 때문에 film의 두께 및 전단강도에도 상당한 영향을 받을 것이라고 사려된다. film의 두께나 전단강도는 oil의 온도에 크게 의존하므로 마찰열에 의한 온도상승도 마모에 큰 영향을 미칠것으로 생각되나 본 실험에서는 온도상승에 대해서는 data를 구하지 못하

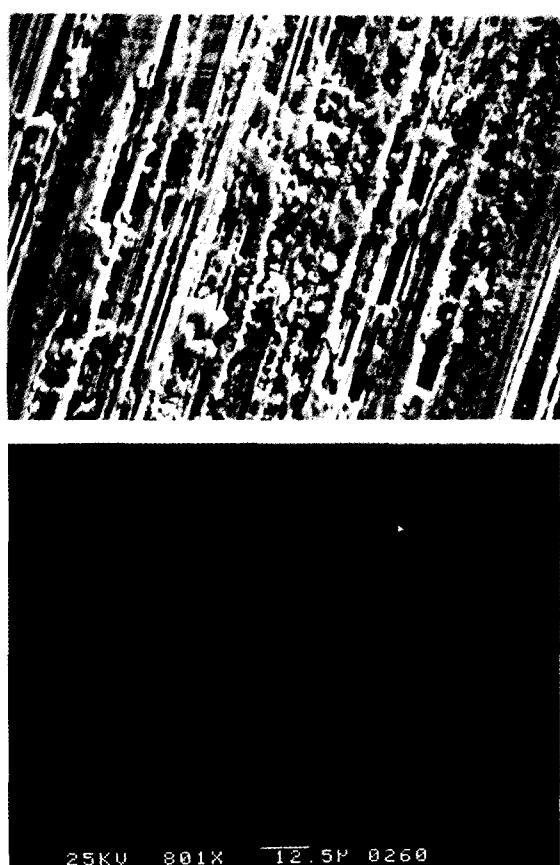


Photo. 3 Transferred material on ring and its Cu composition image. (#2, SCM4, 1 hr, 40.8kg, X800)

였으므로 상세한 기술은 계속적인 연구에서 밝혀야 할 것이다.

본 실험에서 각 시편을 SCM 4종과 SCM 21종을 상대금속으로 하여 윤활유 내에서 1시간 동안 13.6kg, 40.8kg, 60.0kg의 하중하에서 마모시험을 행하였을 때 이들 사이의 마찰계수의 변화를 Fig. 8, 9, 10에 나타내었다.

Dynamic 한 상태에서 직접 마찰계수를 측정한 것이므로 모든 절대값이 모두 정확하다고는 말하기는 어렵겠지만 대체적인 특징은 마모초기의 마찰계수는 마모전의 asperity로 인하여 높으며 마모가 계속됨에 따라 마찰계수는 감소하며 그 감소하는 경향은 점점 둔화된다는 것이다. 즉 이러한 대체적인 경향은 시간에 따라 마모량의 증가가 점

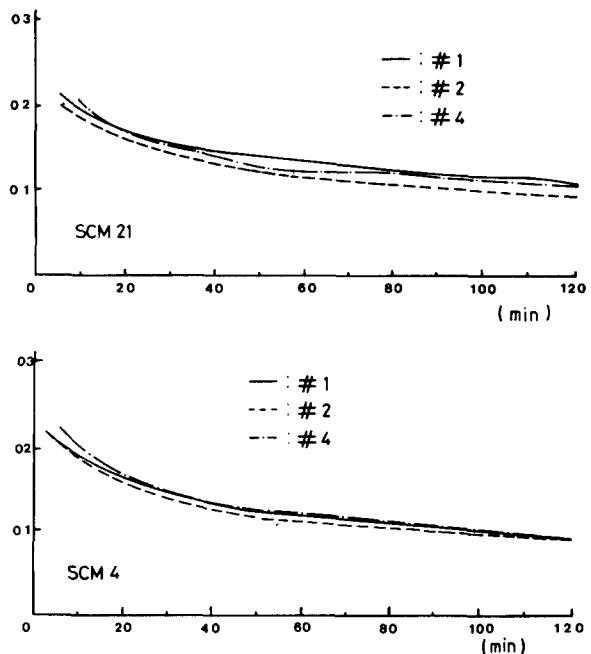


Fig. 8 Plot of friction coefficient as a function of sliding time. (13.6kg)

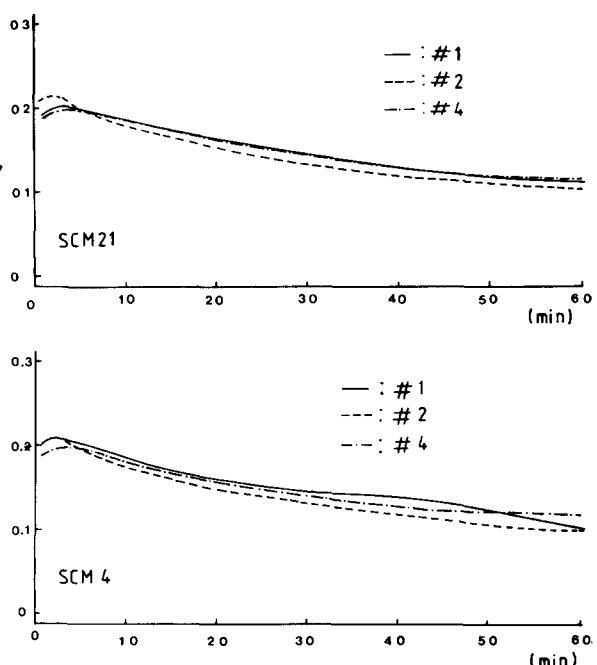


Fig. 9 Plot of friction coefficient as a function of sliding time. (40.8kg)

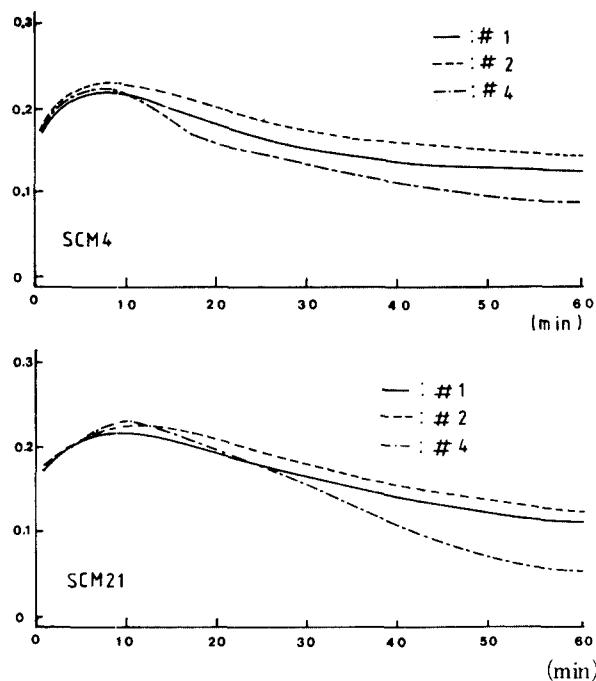


Fig. 10 Plot of friction coefficient as a function of sliding time. (68.0kg)

점 감소한다는 사실과 잘 일치한다.

특히 하중일 제일 낮은 13.6kg인 경우에는 마모량이 제일 작은 #2와 #4가 제일 낮은 마찰계수를 나타내어 직접적인 관계를 보인다. 그리고 경도 및 강도가 제일 높은 #5 및 #6의 시편에서는 초반기의 마찰계수가 낮음을 볼 수 있는데 이것은 비교적 강도가 높은 재료는 처음 asperity의 소성변형이 어려움을 잘 나타내 주고 있다. 이같은 경향은 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 각 시편들의 마모량이 증가하는 경향이 들판되고 있음에서도 알 수 있다.

이는 본 실험이 boundary lubrication의 조건하에서 실시되고 있기 때문에 표면이 smooth 해질수록 lubricant film이 깨져 metal – metal contact junction이 발생될 수 있는 확률이 줄어듬에 따라 마모량이 감소하기 때문이라고 사려된다.

3-6. 인청동의 마모기구

보통 마모의 기구는 대단히 복잡하고 또한 복합적으로 발생하기 때문에 뚜렷이 구분하여 마모기구를 파악하는 것은 매우 어려운 일이다.

그러나 하나의 마모 system에서 가장 특징적인 마모기구는 몇 가지로 대별하여 축소할 수 있으며, 여기서는 본 실험을 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 확인할 수 있었던 가장 특징적이고 지배적인 인청동의 경계 윤활조건하에서의 마모기구에 대해 알아보기로 하겠다.

연한 기지조직 내에 경한 particle이 분포되어 인청동의 경우 sliding wear mechanism은 다음의 두 가지로 대별될 수 있다.

첫째, 마찰시 마찰열에 의한 열화와 이에 수반되는 소성유동에 의해 생기는 Beilby layer의 형성(15)과 이의 분리.

둘째, Fig. 11에 개략적인 모식도로 나타낸 바와 같은 thermally activated wear가 있다.

첫째의 경우 마찰에 의한 열의 발생이 인청동의 표면온도를 상승시키고 이에 따라 표면층이 열화되면 하중과 sliding motion에 의한 전단응력에 의해 surface layer가 쉽게 유동을 하게 된다. 이의 사진이 photo. 4에 나타나 있다. 이렇게 소성

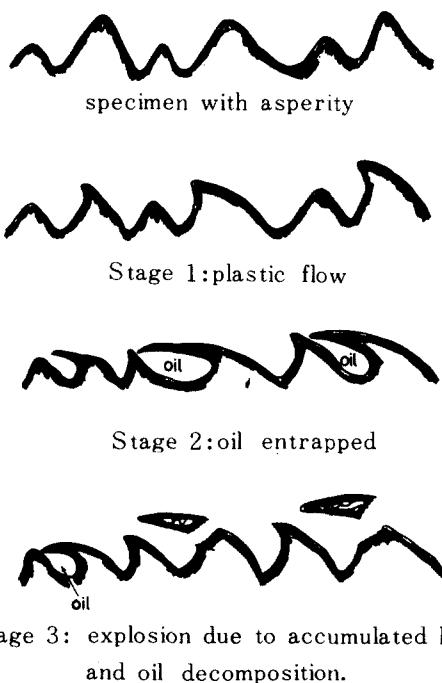


Fig. 11 Schematic illustration of thermally activated wear mechanism.

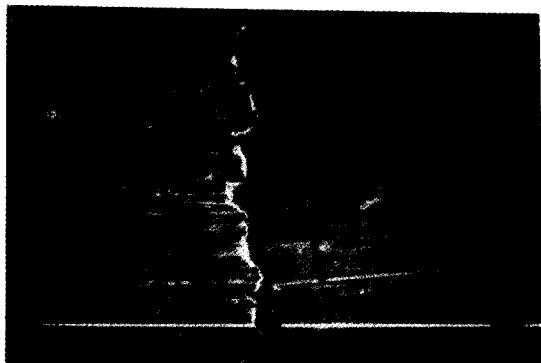


Photo. 4 Plastic deformed surface layer.
(# 5, SCM4, 1 hr, 40.8kg, X800)



Photo. 6 Micrograph of wear debris made
by Beilby layer forming mechanism.
(# 5, SCM21, 1 hr, 68.0kg, X400)

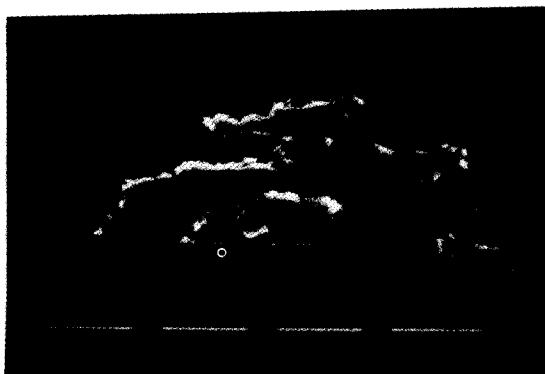


Photo. 5 Back transferred material on spec-
imen surface. (# 1, SCM4, 1 hr,
40.8kg, X2000)



Photo. 7 Wear debris made by thermally
activated wear mechanism. (# 1,
SCM21, 1 hr, 13.6kg, X 200)

유동을 한 layer는 소성 유동시 가공경화가 되어 연신 유효이 감소되고(16) 반복되는 asperity의 pass에 의해 파로균열이 전파하여 matrix로 부터 분리되는 경우가 있고 다른 한편으로는 local contact 부위의 높은 열과 압력으로 인한 adhesion의 발생으로 metal transfer가 일어나고 (Photo. 3 참조) 일단 steel ring에 부착된 인청동이 다시 빠리하여 lamina wear debris가 되는 경우도 있다. 이 때에 ring에 부착되었던 금속이 다시 인청동의 표면으로 재부착 되는 경우도 있는데(17) 그 때의 사진을 Photo. 5에 나타내었다.

아래한 기구에 의한 wear debris는 수십~수백

μm 정도의 크기를 갖는 flake type으로 생성된다(18). (Photo. 6 참조)

이러한 Beilby layer의 형성에 의해 생성되는 debris의 두께를 알아보기 위하여 R. P. D.에 의해 glass에 deposit 시킨 debris를 gold coating 하여 SEM으로 살펴본 결과 평균 3~4 μm 정도의 두께인 것으로 나타났으며 그때의 사진을 Photo. 7에 실었다. 또한 #3시편의 경우 높은 마찰열에 의해서 local melting이 일어난 흔적들이 가끔 나타나는데 이는 가공경화지수가 가장 높은

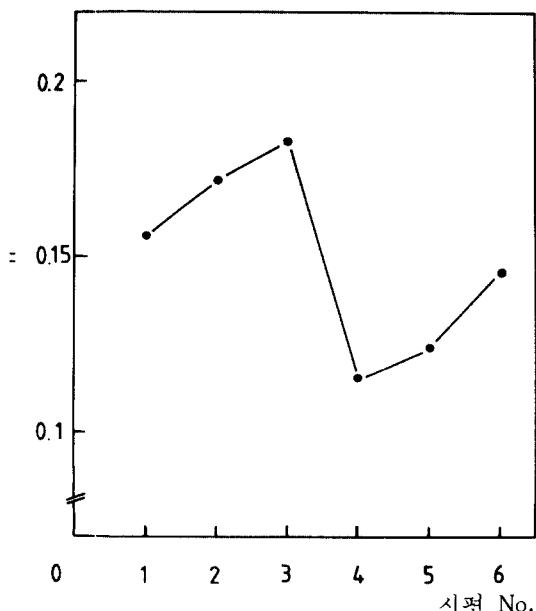


Fig. 12 Work hardening coefficient of specimens.



Photo. 8 SEM micrograph of thickness of Beilby layer. (# 1, SCM4, 2 hr, 40.8kg, X2000, 85 tilting.)

까닭에 (Fig. 12 참조) 다른 시편에 비해 상대적으로 표면의 소성유동이 쉽지 않아 회전하는 ring에 대해 상대적인 마찰력 증가에 의해 발생하는 현상인 것으로 사려되며 이때의 사진을 Photo. 8에 나타내었다.

또한 생성된 마모입자에서는 수많은 균열을 볼



Photo. 9 SEM micrograph of locally melted area. (# 3, SCM21, 1 hr, 40.8kg, X3500)



Photo. 10 Micrograph of cracks perpendicular to sliding direction. (# 4, SCM21, 1 hr, 68.0kg, X400)

수 있는데 특히 마찰 방향에 수직으로 생긴 균열은 speriety의 pass가 주기적으로 일어날 때 asperity의 전방에서는 압축응력이, 후방에서는 인장응력이 발생하여 최대응력이 마찰방향과 수직인 방향으로 생기기 때문이다(19). 이렇게 형성된 particle의 사진을 Photo. 9에 실었다.

두번째의 경우 Fig. 11에 도식되어 있듯이 우선적으로 소성유동하는 인체동의 asperity가 인접한 asperity 까지 밀려나와 냉간응집상태가 되는 경우 두개의 asperity 사이에 윤활 oil이 밀폐된 상태로 entrapped되고 이 것은 마찰열에 의해 분

해되어 이때 발생하는 높은 압력과 열에 의해서 lamina layer 가 파손되어 wear debris 가 생긴다. 따라서 이렇게 생성된 wear debris 는 가장 인접한 asperity 까지의 소성유동이 가장 빈번히 일어날 것이므로 이러한 기구에 의해 생성된 wear debris 는 아주 작은 마모분으로 탈락되며 oil 의 분해때 발생하는 탄소와 열의 영향을 받아서 검은색을 띠는 것이 보통이다(20). (Photo. 10)

4. 결 론

Worm gear에 쓰이는 인청동의 내마모성의 향상을 위하여 본 연구에서 기존 제품의 화학조성에다 Fe 및 Si 를 첨가한 개발품을 worm wheel 제품으로 똑같이 주조한 뒤 이들의 tooth 부분에서 채취한 시편들의 경계윤활분위기 하에서의 내마모성을 비교 조사하였다.

마모시험은 additive 가 첨가되지 않은 SAE 10 기유에서 행하였으며 상대금속으로는 steel 을 사용하였고 하중, 시간, 상대금속 등을 변화시켜가며 마모량을 조사하였다. 또한 마모 debris 들의 형태를 분석함으로써 인청동의 마모기구를 규명할 수 있었는데 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 기존에 많이 사용되던 인청동조성에 Fe 만을 첨가한 #4의 내마모성이 6가지 화학성분 중 가장 양호하였으며 특히 하중이 낮을 경우에는 보다 우수한 내마모성을 보였다.

2. 인청동의 경계윤활조건하에서의 마모기구는 일부 adhesive wear 도 있기는 하지만 abrasive wear 가 주된 마모기구이다.

3. 특히 Beilby layer 를 형성하는 abrasive wear 와 asperity 의 소성유동에 의해 oil 이 국부적으로 구속되어 마찰열과 압력에 의해 oil 이 분해될 때의 열과 압력에 의한 thermally activated wear 가 병행하여 이루어지고 있다.

4. 하중의 증가에 따라 마모량이 증가하며 또한 마모시간이 길어짐에 따라 마모량이 증가하지만 이 경우에는 시간이 지남에 따라 마모증가량이 점점 둔화된다.

Reference

- 1) 양훈영, 김수영, 금속재료학, 문운당.
- 2) Kenji Higuchi, Noboru Iijima. 윤활, Vol. 15, No. 7. (1970) 407 – 415.
- 3) Nobugasu Yamazaki, Fusao Hayama. 일본금속학회지. Vol. 31, No. 12. (1967) 1382 – 1386.
- 4) Yamazaki Taga, Koichi Nakajima. 일본금속학회지. Vol. 40, No. 4. (1976) 382 – 386.
- 5) Y. Taga, A. Isogai, K. Nakajima. Wear 44. (1977) 377 – 391.
- 6) J. Bathgate, F. Yates. Presented as an ASLE paper at the ASLE/ASME Lubrication Conference held in Houston, Texas. Oct. 14 – 16. (1969)
- 7) Information sheet 58. (Issued by Foundry Service Limited)
- 8) Metal Hand Book. (ASM. 8th ed.) Vol. 1.
- 9) T. Umeda, H. Takeguchi, H. Sugiyama. 주물 Vol. 49, No. 6. 345-349
- 10) 홍종희, 금속재료, 보성문화사.
- 11) T. S. Eyre. Tribology International. April 1978. 91 – 96.
- 12) H. Kraus, W. Tackenberg. Wear. 64. (1980) 291 – 302.
- 13) S. F. Murray, M. B. Peterson, F. E. Kenned ASLE Transaction. Vol. 20. No. 4. 321 – 327.
- 14) Rabinowicz. Friction and Wear.
- 15) N. P. Suh. Wear 44. (1977) 1 – 16.
- 16) T. H. C. Childs. Tribology International. Dec. 1980. 285 – 293.
- 17) Peter J. Blau. Wear 72. (1981) 55 – 66.
- 18) W. A. Glasser. ASLE Transaction. Vol. 26. No. 4. 517 – 522.
- 19) S. Jahamir, N. P. Suh. Wear 44. (1977) 17 – 38.
- 20) 권오관. Tribology에 대한 고찰, 윤활학회지. Vol. 1, No. 1. (1985)