

인청동의 내마모설에 관한 연구

고려대학교 송권익
고려대학교 송권익

1. 서론

현재 엘리베이터용 worm gear의 wheel로서 가장 많이 사용되고 있는 것은 인청동이다. 일반적으로 청동에 인의 함량이 0.05% - 0.5% 정도 잔류하는 인청동은 용탕의 유동성이 좋아지고, 합금의 강도, 경도가 증가하며 내마모성, 탄성이 증가한다(1). 또한 P는 극소량 Cu 중에 고용하나 그 외에는 겹하고 취약한 Cu_3P 상으로 존재하고, P의 함유에 따라 Sn의 고용도가 저하하므로 주조 조직중에 δ 상($Cu_{31}Sn_8$)이 증가하여 Sn을 증가한 때와 같이 경도가 커지는 효과가 있다. 이같이 기지상 중에 단단한 3원 공정부 ($\alpha + \delta + Cu_3P$)상이 산재하여 있어 이것이 마찰상대면을 지탱하여 내마모 역할을 하기 때문에 인청동이 내마모 재료로서 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 가공경화, 4) 경계윤활 조건하에서의 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.

2. 실험

인청동의 내마모성 향상을 위해 실험용 합금의 조성(표1. 참조)으로 wheel의 제작 시와 동일하게 주조하여 wheel의 tooth부분에서 시편을 절취하여 SAE#10 기유를 사용한 boundary lubrication system하에서 ring-on-block형태의 마모시험기를 사용하여 실험을 행하였다. 이때 각 재질에 따른 물성의 차이를 비교하고 내마모에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 시편의 경도, 인장강도, 표면조도, 열팽창계수, 가공경화지수, Young's modulus 등을 미리 조사하였으며 시험조건은 ring의 회전속도를 200rpm(32cm/sec)으로 일정하게 하고 하중은 13.6Kg, 40.8Kg, 68.0Kg으로 변화를 주었으며 마모시험시간은 1시간, 2시간, 3시간으로 변화를 주어 실험을 행하였다. 또한 상대금속도 SCM21종과 SCM4종의 2가지로 실험을 행하였다. 실험이 끝난 직후에 oil sample을 채취하여 ferrography방법에 의해 debris의 크기 및 형태를 조사하였고, 실험하기 전후에 시편을 normal-hexane으로 완전히 세척하여 automatic chemical balance로써 0.1mg까지 칭량하여 마모량을 구하였으며 광학현미경과 SEM을 이용하여 ring과 block의 마모면의 관찰을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 조직의 분석

Photo. 1 에 시편에 따른 주조조직의 사진을 나타내었다. Cu-Sn 의 상태도에 의하면 Sn의 최고 고용도는 520°C에서 약 15.8%이다. 그러나 청동의 특징은 용고 온도 범위가 매우 넓어 결정편식이 많이 일어난다는 것이다. 이렇게 편식이 일어날 경우 초정 α 가 용고하고 나면 남아있는 용액은 Sn%가 많아져서 520°C 에서 $\alpha + \delta$ 상이 생기는데 이 δ 상은 Cu_3Sn 의 조성으로 Sn이 32.5% 함유되어 있는데 이것은 350°C -375°C 에서 $\alpha + \epsilon(Cu_3Sn)$ 으로 공식변태하나 변태속도가 대단히 느리기 때문에 실제로는 δ 상이 상온에서 그대로 존재한다.

이와 같이 Cu-Sn은 용고시 결정편식이 강하게 일어나기 때문에 본 연구에 사용된 10%Sn의 합금에서도 δ 상이 나타난다. 이 $(\alpha+\delta)$ 공석점이 내마모성에 지대한 영향을 하기 때문에 보통 주조조직을 그대로 사용하는 경향이 있다.

Photo.2에 띄게 나타난 부분이 $\alpha+\delta$ 의 공석조직이며 P의 첨가에 따라 δ 상의 양이 증가 한다는 보고가 있다. 이는 P는 Cu중에 극소량만이 고용하고 그 나머지는 결합하고 취약한 Cu_3P 상으로 존재하면서 Sn의 고용도를 저하시키기 때문이다(7).

Photo.1에서 볼수있는바와 같이 #1 시편에서 부터 #6 시편까지 모두 다 주조조직의 일반적인 형태인 dendritic structure 를 보이고 있으며 다소간의 주조결함도 보이고 있다. 특히 #8 의 경우에는 매우 많은 주조결함을 보이고 있는데 이는 후술하겠지만 wear mechanism에도 지대한 영향을 주어 마모량에도 영향을 줄 것으로 생각된다.

또한 Fe를 첨가한 #4 및 #6 시편의 경우 $(\alpha+\delta)$ 공정부 주위에 미세한 빗살무늬가 발견 되는데 EDAX로 성분분석을 해본 결과 Sn의 역편식에 의한 조직인 것으로 나타났다. 이는 표면쪽의 Sn농도가 증가할 것을 예측할 수 있게 해주며 표면쪽의 Sn농도증가는 δ 상의 증가로 생각할 수 있기에 표면쪽의 δ 상이 내마모성에 유의하게 거동할 것으로 사려된다.

3-2. 여러가지 인청동의 성질

조성에 따라 주조한 wear wheel에서 시편을 절취하여 인장시험,경도시험을 한 결과를 그림1에 나타내었다. 그림1에서 볼 수 있듯이 Si를 첨가한 #5, #6 의 시편에서는 강도, 경도의 향상이 있었으나 연신율은 현저하게 감소하는것을 볼수 있었다. 이는 0.5%의 Si를 첨가하여 고용체 강화를 일으켜서 경도 및 강도가 증가하게 되고 강도가 증가함에 따라 소성변형이 어려워짐으로써 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 제작시 주조물 내의 결함 및 편석에 기인한 결과로 사려된다.

또한 표면조도의 측정결과를 표 2에 나타내었다. 시편인 block의 경우는 비슷한 표면조도값을 나타내고 있으나 상대금속인 Ring의 경우는 SCM 21종의 것이 SCM 4종보다 좀 더 거칠은 표면조도를 나타내고 있다.

표 3은 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 확률 K값이 더 커지게 되고(8, 9) 이에 따라 마모량이 증가할 것이므로 #4 시편의 경우가 가장 적은 용착 마모를 일으킬 것으로 생각되며 #5의 경우가 가장 큰 용착마모를 일으킬 것으로 생각된다.

3-3. 일반적인 마모경향

그림 2.에 68Kg의 하중을 주어 1시간동안 마모시험을 행하였을 때의 각 시편에 대한 마모량을 나타낸 것이다. 이같은 경향은 하중을 13.6Kg으로 낮추었을 때도 동일하게 나타났으므로 이 결과를 토대로하여 내마모성이 우수하게 나타나는 #1, #2, #4의 시편에 대한 실험을 중점적으로 하여 내마모성 및 마모기구를 살펴 보았다.

3-4. 하중이 따른 마모량의 변화

그림 3.에 하중의 변화에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. 그림3.에서 볼 수 있듯이 시편의 구분 없이 하중이 감소함에 따라 마모량이 줄고 있음을 알 수 있다. 이는 하중이 증가함에 따라 마모량이 증가한다는 일반적인 wear model식에 잘 일치하고 있다(10). Archard(11)에 의하면 마모량과 하중의 관계는 다음의 식으로 나타난다.

$$W \propto P \cdot S$$

W: 마모량
P: 하 중
S: 거 리

여기서 adhesive wear인 경우 하중과 마모량과의 관계는 직선적인 비례관계가 있으나 본 실험에서는 직선인 관계로부터의 편차가 나타나는데 이것은 본 실험의 마모기구가 adhesive만이 아니라 여러가지 기구가 복합되어서 일어나고 있다는 사실을 암시하고있는 것이다.

또한 여기서 주목해야 할 것은 하중이 실제 접촉면의 stress가 아니라는 것이다. 처음에 하중이 걸리면 접촉면은 금속의 elastic properties와 yield strength에 의해 결정된다고 보고(12)하고 있으며 hard한 환형의 ring이 soft한 편평한 block을 누르고 있을 때 실제 접촉면에서의 stress값은 E 값에 의존하게 된다. 즉

$$r \propto 1.1 \{ W(1/E_1 - 1/E_2) / 2 \}$$

W: load
E, E : moduli of materials
r: contact circle radius

의 식에서 steel ring의 E 값(E_2)이 일정하기 때문에 block의 E 값이 커질수록

r값이 감소하게 되며 결국 하중이 걸리는 면적이 감소하므로 실제 접촉면적에 걸리는 stress값은 증가하게 된다. 이는 E 값이 증가함에 따라 마모량이 증가할 것을 예견할 수 있게 한다.

그림 4.에 E 값과 마모량과의 관계를 나타내었다. 이 그림에 의하면 E 의 값이 $9 \times 10^6 - 12 \times 10^6$ (psi) 정도를 나타낼 때가 마모량이 적은 것을 알 수 있었다. 이는 E 값의 감소에 따라 접촉면적이 증가하고 따라서 실제 접촉응력은 낮게되나 이 때의 응력이 plastic deformation을 일으킬 수 있을 정도로 충분히 크다면 asperity contact junction이 증가하게 되어 마모량이 증가하게 되고 E 값이 커지는 경우 접촉면적은 작아지지만 상대적인 응력이 커지기 때문에 마모량이 증가하는 것으로 사려된다. 또한 하중이 작아질수록 E 값의 영향은 적어지는 것으로 나타나는데 이는 뒷 식에서 고려해 볼 때에도 하중이 작아질수록 E 값에 의한 효과가 감소됨을 알 수 있다.

3-5. 시간에 따른 마모량의 변화

그림 5.에 마모시간에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. Mulheann과 Samuels의 보고(13)에 의하면 abrasive wear인 경우 시간이 증가함에 따라 마모량이 parabolic 하게 증가한다고 보고하였는 바, 본 실험에서도 3시간까지 행해 본 결과 이와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

물론 abrasive wear뿐 아니라 adhesive wear도 동시에 발생하고 있겠지만 초기의 primary asperity가 일단 제거되고 나면 점차 시편의 표면이 smooth해집 것이고 steel의 asperity도 smooth해집 것이므로 소심변형을 야기시키는 asperity의 접촉 수도 감소하여 이때에는 재료들 사이의 직접마모 보다는 재료들 사이의 윤활유에 의한 film의 역할이 상대적으로 커지게 되어 점차 마모량이 감소 할 것임을 알수있다.

마찰계수와 마모량의 관계가 일반적으로는 마찰계수가 큰 것이 마모량이 많은 것으로 알려져 있으나, 실제로는 모든 asperity의 접촉점이 마찰력에는 관계하지만 마모에는 모두가 관계하지 않으므로 마찰계수와 마모량이 전적으로 비례하지는 않을 수도 있다. 더우기 boundary lubrication의 경우 adhesive wear는 접촉점에서 일부의 lubricant film이 깨지는 곳에서 adhesion이 발생하기 때문에 film의 두께 및 film의 전단강도에도 상당한 영향을 받을 것이라고 사려된다. film의 두께나 전단강도는 oil의 온도에 크게 의존하므로 마찰열에 의한 온도상승도 마모에 큰 영향을 미칠 것으로 생각되나 본 실험에서는 온도상승에 대해서는 data를 구하지 못하였으므로 상세한 기술은 계속적인 연구에서 밝혀져야 할 것이다. 본 실험에서 각 인정동의 시편을 SCM 21종과 SCM 4종을 상대금속으로 하여 윤활유 내에서 1 시간 동안 13.6Kg, 40.8Kg의 하중하에서 마모시험을 행하였을때 이들 사이의 마찰계수 변화를 그림 6-1, 6-2에 나타내었다. Dynamic한 상태에서 직접 마찰계수를 측정하는 것이므로 모든 절대값이 모두 정확하다고 말하기는 어려우며 ring의 회전을 방해하는 마찰력이 모두 다 마모분을 형성할 수 있는 것은 아니기에 즉, 마찰계수에는 관계하지만 마모에는 관계하지 않는 접촉들로 인하여 마찰계수 자체가 마모량에 대한 직접적인 평가가되지는 못하겠지만 대체적인 특징은 마모초기의 마찰계수는 마모전의 asperity로 인하여 높으며 마모가 계속됨에 따라 마찰계수는 감소하고 그 감소하는 량은 점점 둔화된다는 것이다. 즉 이러한 대체적인 경향은 시간에 따라 마모량이 점점 둔화된다는 사실과 잘 일치한다. 특히 하중이 제일 낮은 13.6Kg인 경우에는 마모량이 제일 작은 #2와 #4가 제일 낮은 마찰계수를 나타내어 직접적인 관계를 나타낸다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 각 시편들이 마모량이 증가하는 경향이 둔화되고 있음을 나타내고 있다. 이는 본 실험이 boundary lubrication의 조건하에서 실시되고 있기 때문에 표면이 smooth해질수록 lubricat film이 깨져 metal-metal contact junction이 발생될 수 있는 확률이 줄어들어 따라 마모량이 감소되기 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 윤활조건하에서의 마모기구에 대해 알아보기로 하겠다.

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

첫째, 마찰시 마찰열에 의한 연화와 이에 수반되는 소성유동에 의해 생기는 Baileys layer의 형성(14)과 이의 분리.

둘째, 그림 6에 개략적인 모식도로 나타낸 바와 같은 thermally activated wear.

첫째의 경우 마찰에 의한 열의 발생이 인청동의 표면온도를 상승시키고 이에 따라 표면층이 연화되면 하중과 sliding motion에 의한 전단응력에 의해 surface layer가 쉽게 유동을 하게 된다. 이의 사진이 Photo.3에 나타나 있다. 이렇게 소성유동을 한 layer는 소성유동시 가공경화가 되어 연신율이 감소되고(15) 반복되는 asperity의 pass에 의해 피로균열이 전파하여 matrix로부터 분리되는 경우가 있고 다른 한편으로는 local contact부위의 높은 열과 압력으로 인한 adhesion의 발생으로 metal transfer가 일어나고(Photo.4 참조) 일단 steel ring에 부착된 인청동이 다시 박리하여 lamina wear debris가 되는 경우도 있다. 이 때에 ring에 부착되었던 금속이 다시 인청동의 표면으로 재부착 되는 경우도 있는데(16) 그 때의 사진을 Photo.5에 나타내었다. 이러한mechanism에 의한 wear debris는 수십 μm 정도의 크기를 갖는 flake type으로 생성된다(17). 이의 사진이 Photo.6에 나타나 있다.

두번째의 경우 그림 6에 도식되어 있듯이 우선적으로 소성유동하는 인접동의 asperity가 인접한 asperity까지 밀려나와 냉간용접상태가 되는 경우 두개의 asperity 사이에 윤활 oil이 밀폐된 상태로 entrapped되고 이것은 마찰열에 의해 decomposition되어 이때 발생하는 높은 압력과 열에 의해서 lamina layer가 파손되어 wear debris가 생긴다. 따라서 이렇게 생성된 wear debris는 가장 인접한 asperity까지의 소성이동이 가장 빈번히 일어날 것이다. 따라서 이러한 mechanism에 의해 생성된 wear debris는 아주 작은 마모분으로 탈락되며 oil의 decomposition때 발생하는 carbon과 열의 영향을 받아서 검은색을 띄는 것이 보통이다(18) (Photo.7).

Beilby layer의 형성에 의해 생성되는 debris의 두께를 알아보기 위하여 ferrography에 의해 glass에 deposit시킨 debris를 gold coating하여 SEM으로 살펴본 결과 평균 3 - 4 μ m 정도의 두께인 것으로 나타났으며 그때의 사진을 Photo. 8에 실었다. 또한 #3 시편의 경우 높은 마찰열에 의해서 local melting이 일어난 흔적들이 가끔 나타나는데 이는 가공경화지수가 가장 높은 까닭에(그림 7 참조) 다른 시편에 비해 상대적으로 표면의 소성유동이 쉽지않아 회전하는 ring에 대해 상대적인 마찰력증가에 의해 발생하는 현상인 것으로 사려되며 이 때의 사진을 Photo.9에 나타내었다.

생성된 마모입자에서는 수많은 crack을 볼 수 있는데 특히 마찰방향과 수직된 방향으로 생긴 crack은 asperity의 pass가 주기적으로 일어날때 asperity의 전방에는 compressive stress가 후방에는 tensile stress가 발생하여 최대응력이 마찰방향과 수직된 방향으로 생기기 때문이다(19). 이렇게 형성된 particle의 사진을 Photo.10에 실었다. 또한 이때에 oil이 decomposition 될 때 발생하는 carbon에 의해 worn surface에는 carbon의 high content 부위가 있게 된다. Photo.11에서 겉게 나타난 부위가 바로 이렇게 하여 생성된 곳이다.

4. 결 론

1. 인청동의 기본조성이 Fe만을 첨가한 #4의 내마모성은 6가지 화학성분 중 #2와 함께 제일 우수하거나 특히 하중이 낮을 때는 #2보다도 우수하게 나타났다.
2. 하중의 증가에 따라 마모량이 증가하며 또한 마모시간에 따라 마모량이 증가하지만 이 경우에는 시간이 지남에 따라 마모증가량이 점점 둔화된다.
3. 인청동의 윤활유 내에서의 마모기구에는 일부 adhesive도 있기는 하지만 abrasive가 주된 마모기구이다.
4. 특히 Beilby layer를 형성하는 소성유동에 의한 마모와 소성유동에 따라 oil이 국부적으로 entrap되어 마찰열에 의해 분해됨에 의한 마모가 병행하여 이루어지고있다.

5. 참고 문헌

- 1) 양 훈 영, 김 수 영. 금속재료학. 문운당
- 2) Kenji Higuchi, Noboru HJima. 윤활 Vol. 15. No. 7 (1970) 407-415
- 3) Nobuyasu 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, Teexas. Oct. 14-16. 1969
- 7) 홍 종 휘. 금속재료 보심문화사.
- 8) J.F. Archard. J. of Applied Phy. Vol. 32. 8. (1961)
- 9) R.T. Spurr. Wear 65 (1981) 315-324
- 10) T.S. Eyre. Tribology international April. 1978. 91-96
- 11) J.F. Archard. J. of Applied Phy. Vol. 32. 8. (1961)
- 12) Hans Kravs, Winfried Tackenberg. Wear 64 (1980) 291-302
- 13) S.F. Murry, M.B. Peterson, F.E. Kenndy. ASLE Transaction Vol. 20. 4. 321-327
- 14) N.P. SUH. Wear. 44. (1977) 1-16
- 15) T.H.C. Childs. Tribology International. Dec. 1980. 285-293
- 16) Peter J. Blau. Wear. 72 (1981) 55-66ril. 1978. 91-96
- 17) W.A. Glasser. ASLE Transaction. Vol. 26. 4. 517-522
- 18) 권 오 관. Tribology에 대한 고찰. 윤활학회지. Vol.1. No.1.(1985)
- 19) S. Jahanmir, N.P. SUH. Wear. 44.(1977) 17-38.

(표 1) * 인정동의 화학조성 *

(단위 : wt %)

시 편 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	0.038	0.22	1.0	0.48		Bal
# 4	11.5	1.24	0.049	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

(표 2) 링의 재질과 시편에 따른 표면조도.

시편	SCN4 RING	SCN21 RING	1	2	3	4	5	6
Surface rough- ness (Ra, μ m)	0.36	0.55	0.27	0.28	0.30	0.28	0.26	0.32

(표 3) T.M.A.로 측정된 각 시편의 열팽창계수.

Specimen Number	1	2	3	4	5	6
Heat Expansion Coefficient $\times 10^{-6} \text{ mm/}^\circ\text{C}$	19.10	19.09	19.43	19.06	19.84	19.59

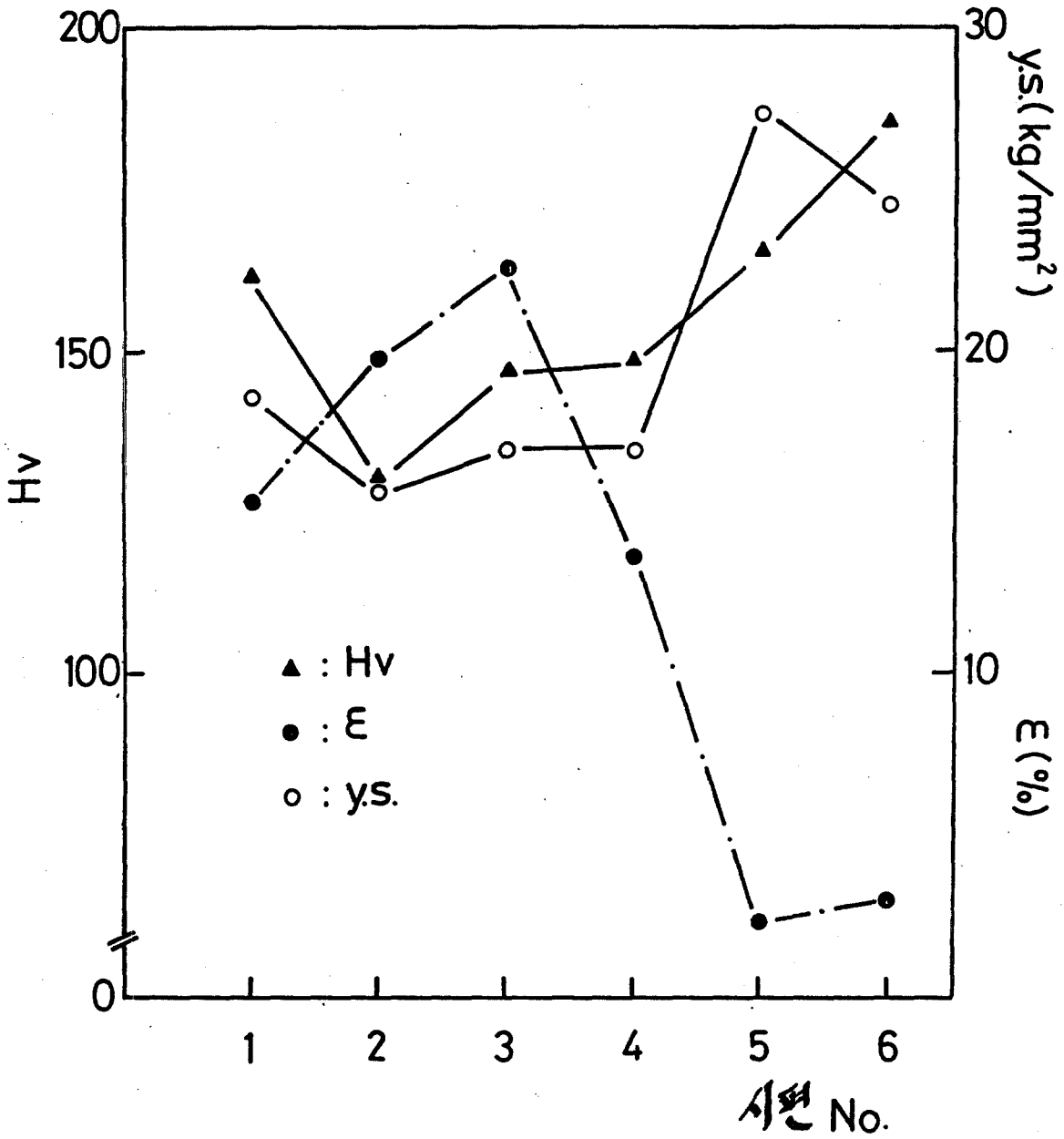


그림 1. 여러가지 인청동의 성질.

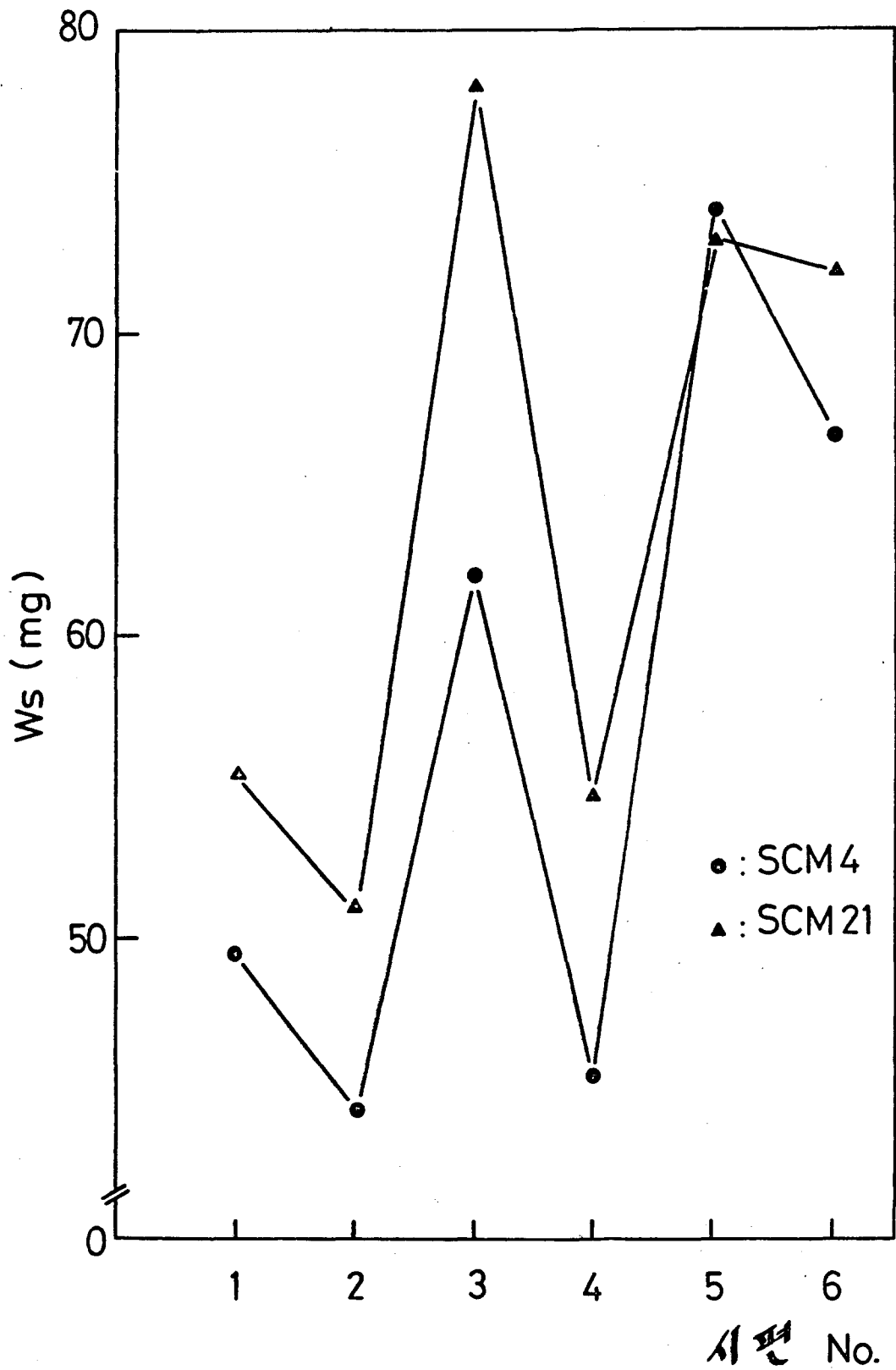


그림 2. 각 시편의 마모량의 변화.

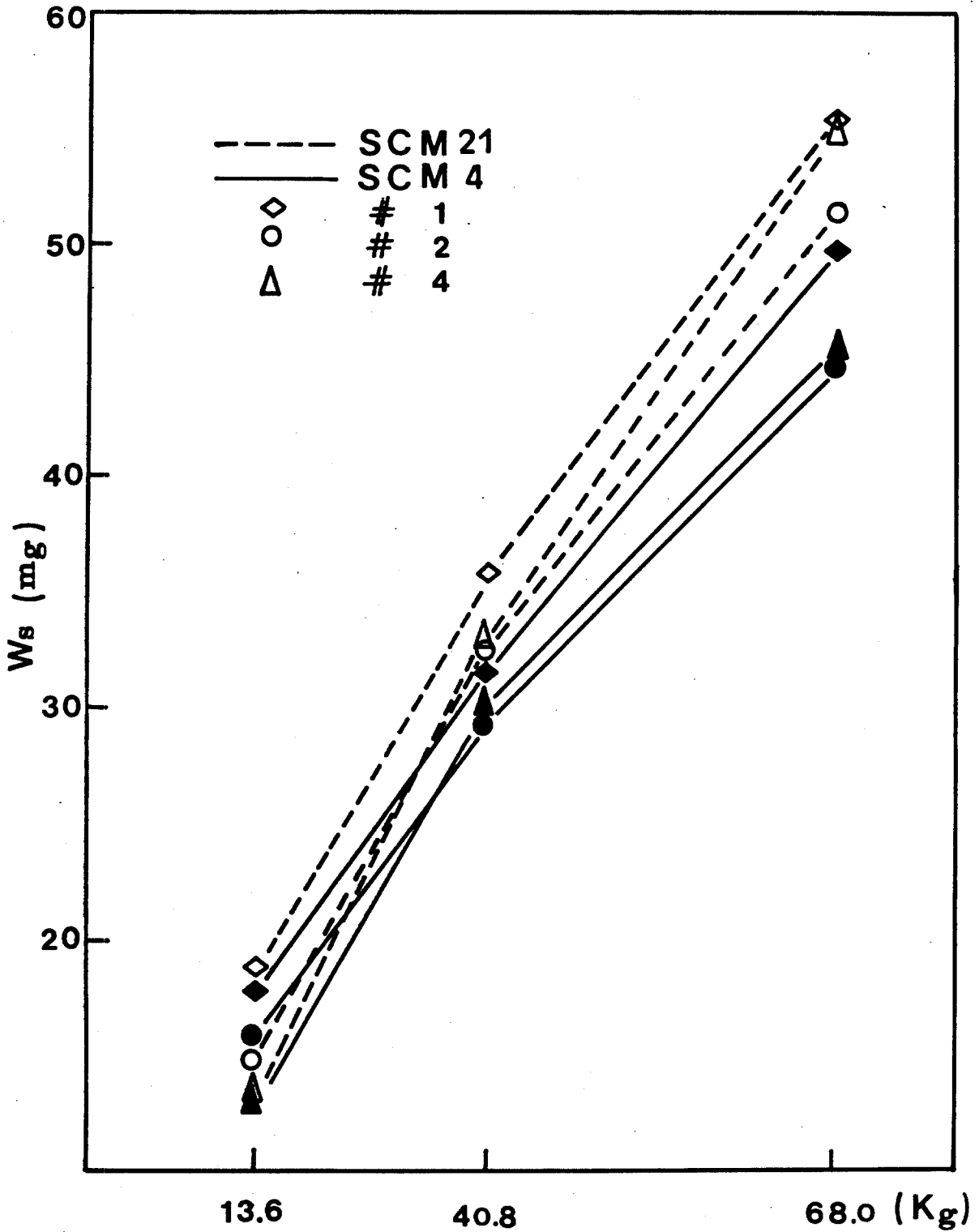


그림 3. 하중의 변화에 따른 마모량의 변화. (68Kg, 1hr)

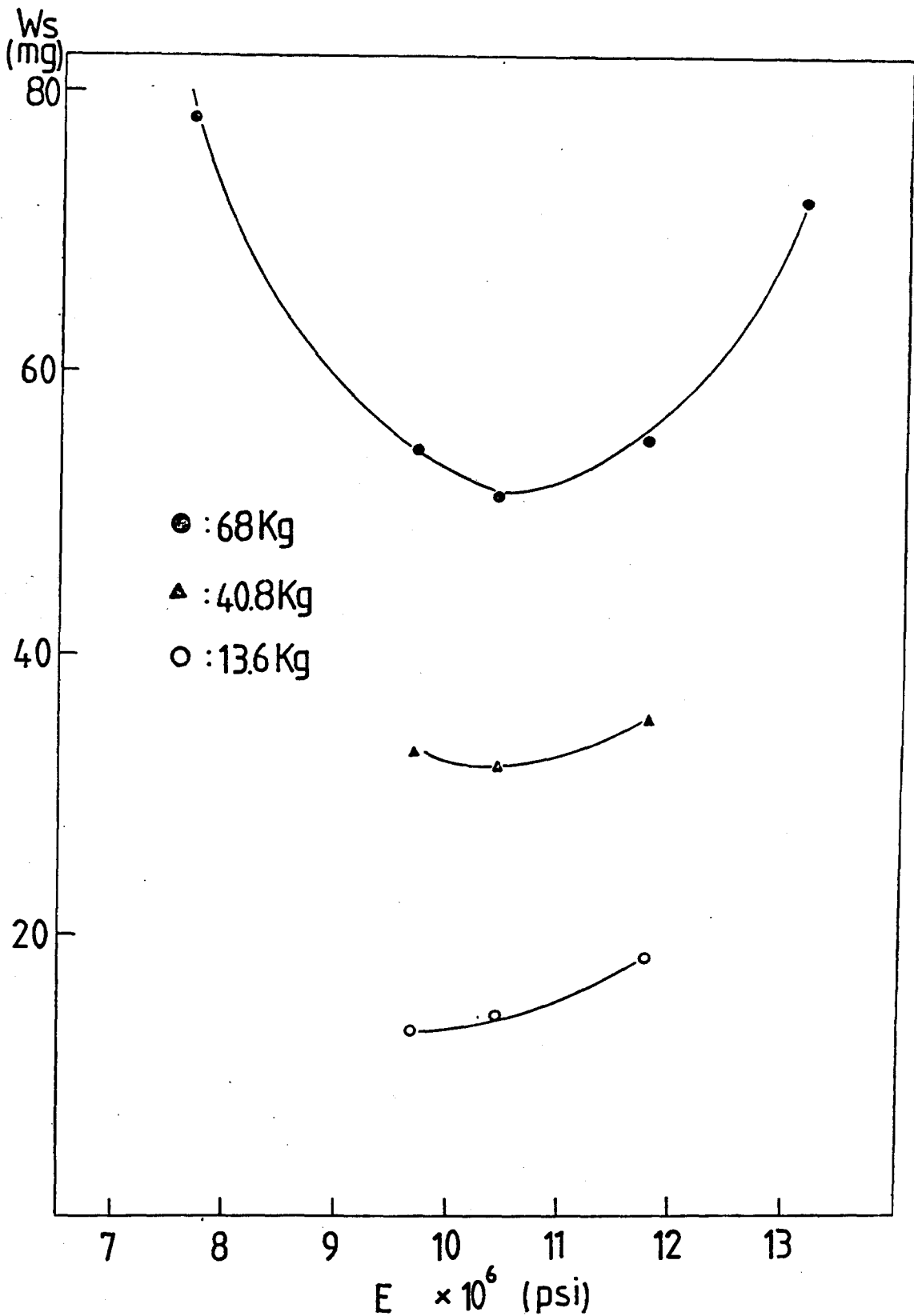


그림 4. Young's modulus의 변화에 따른 마모량의 변화.

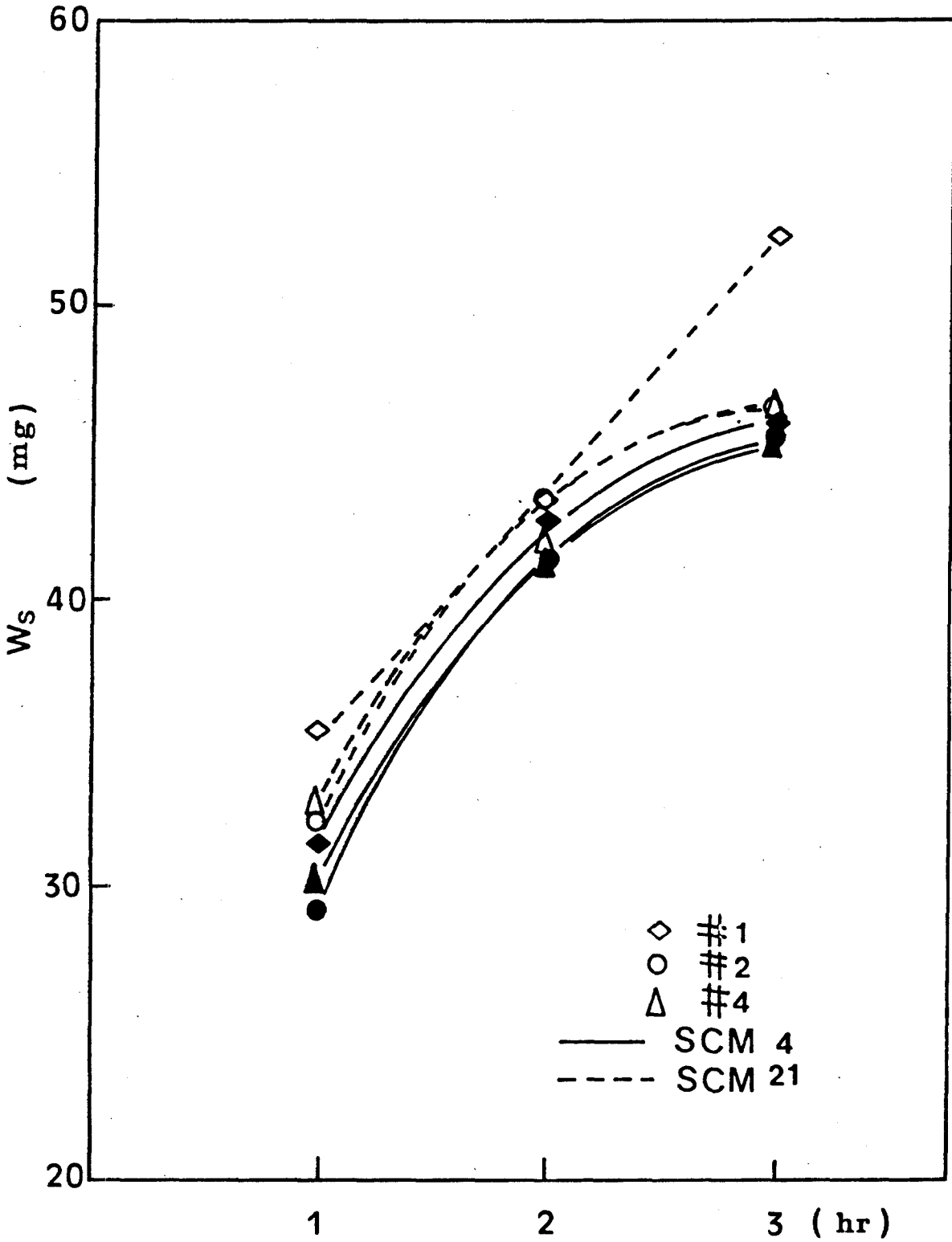
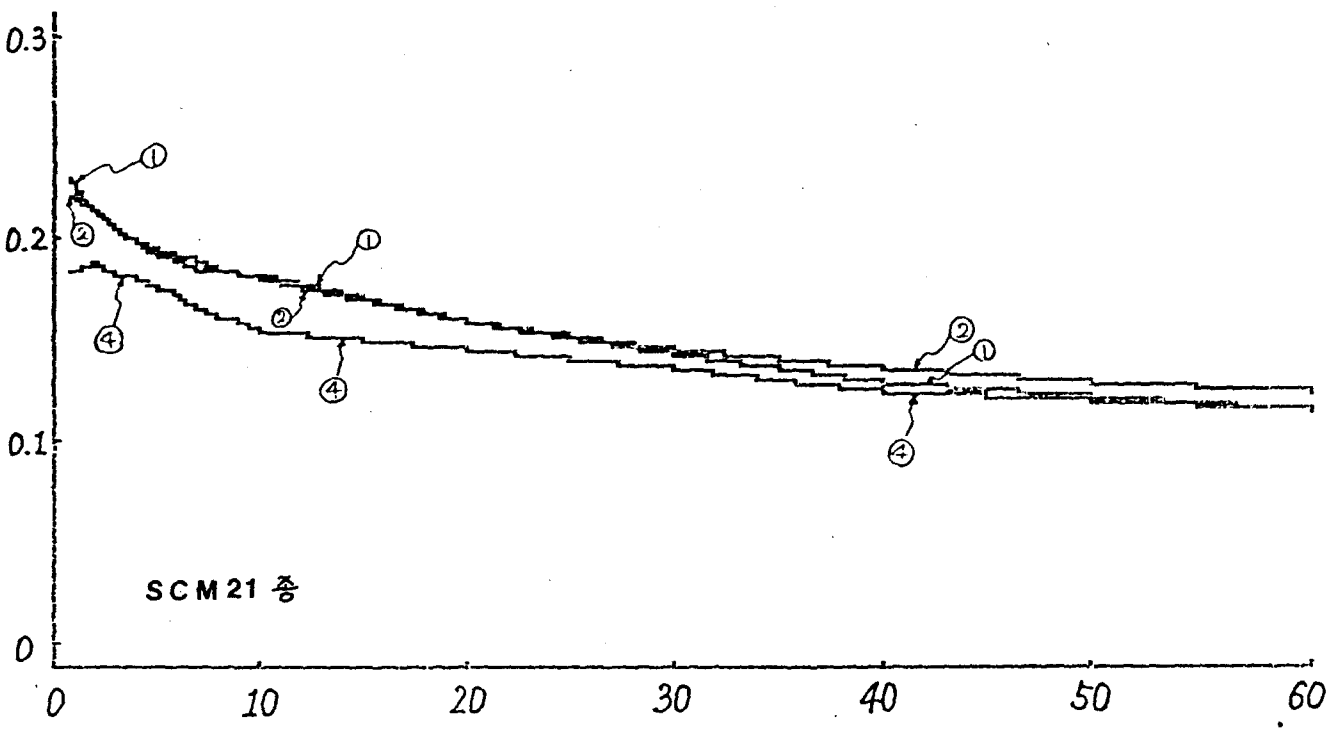
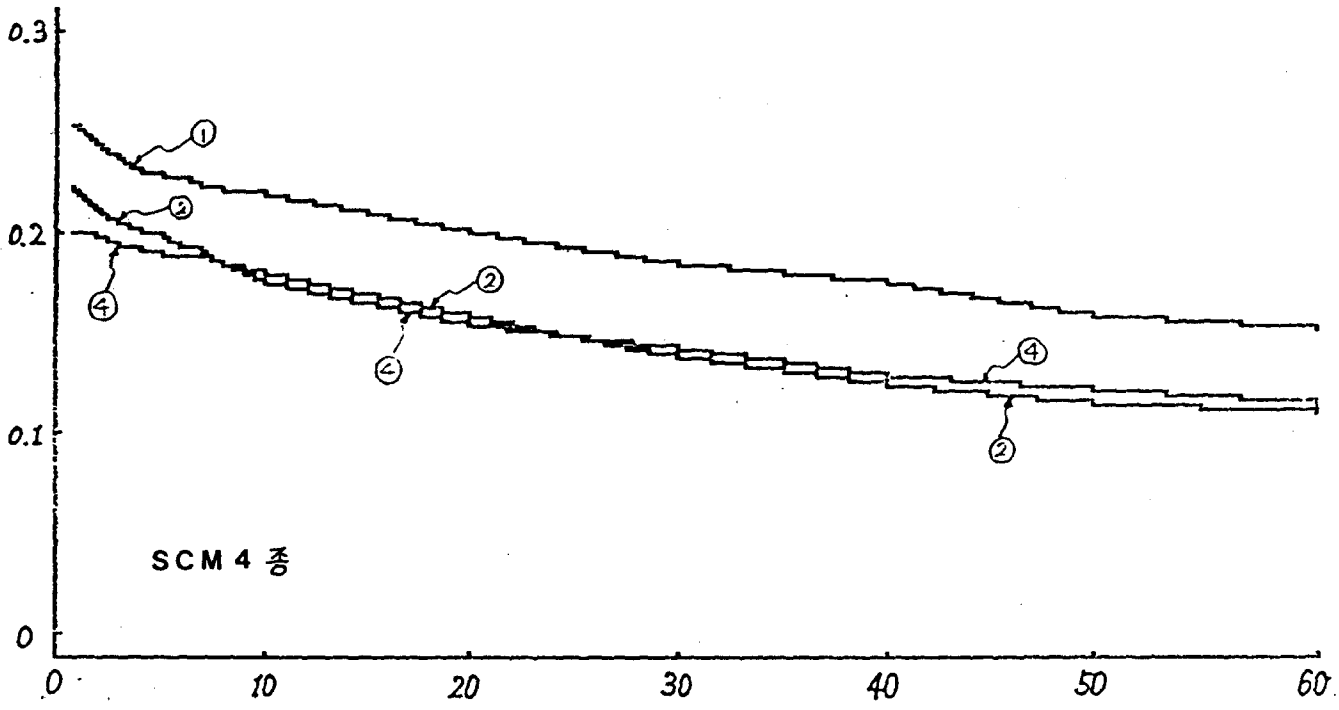


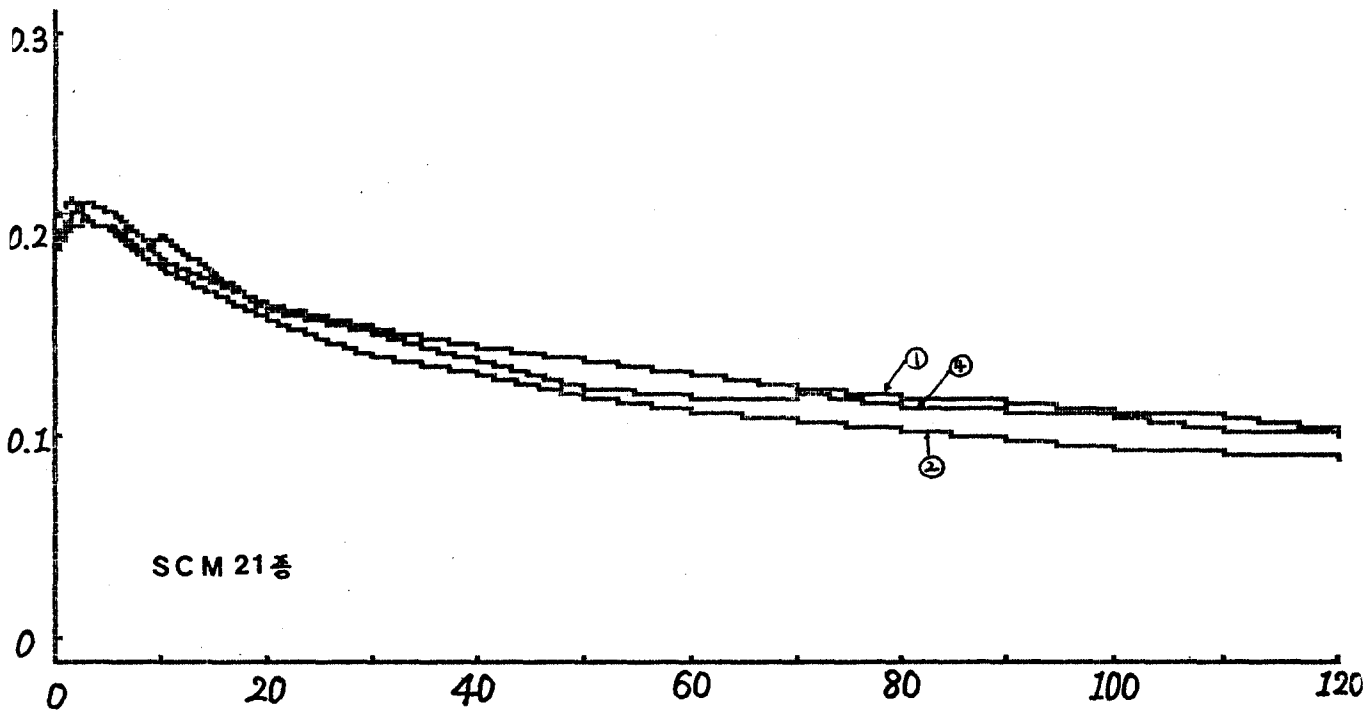
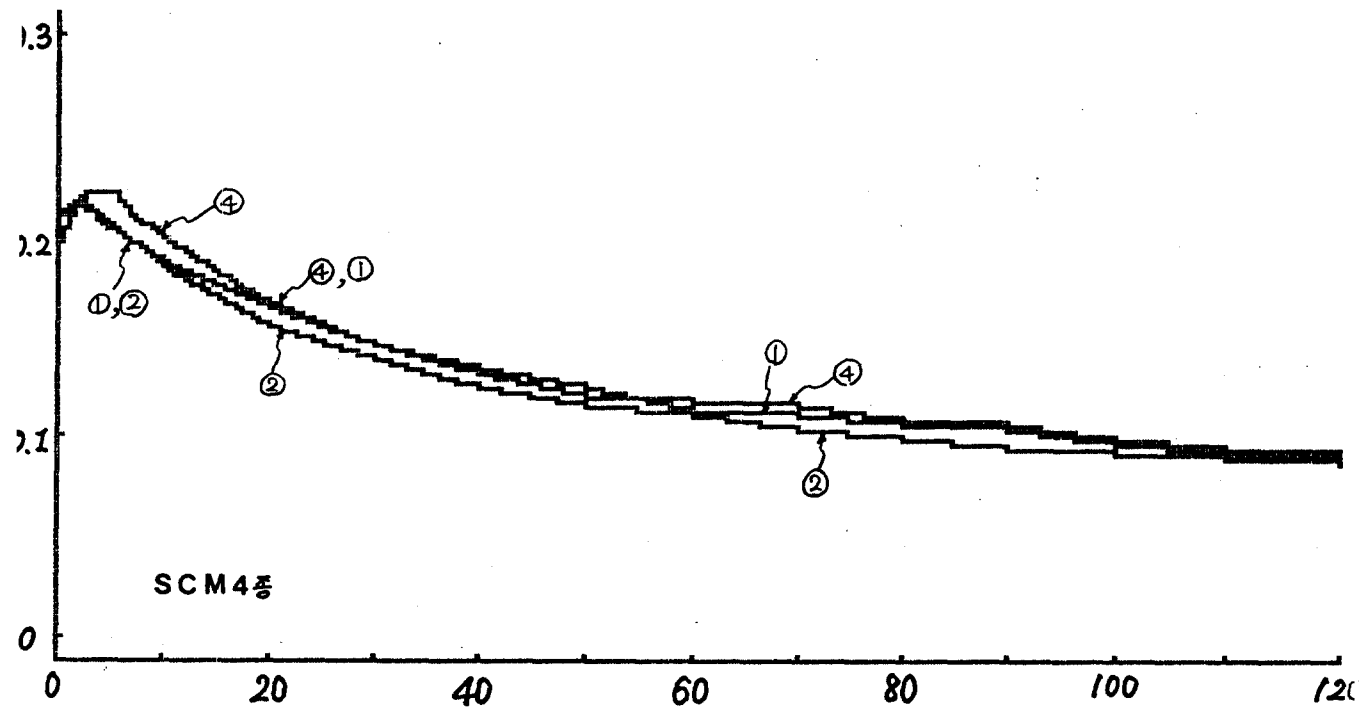
그림5. 시간의 변화에 따른 마모량의 변화.



(1)

그림6. 각 시편의 마찰계수의 변화.

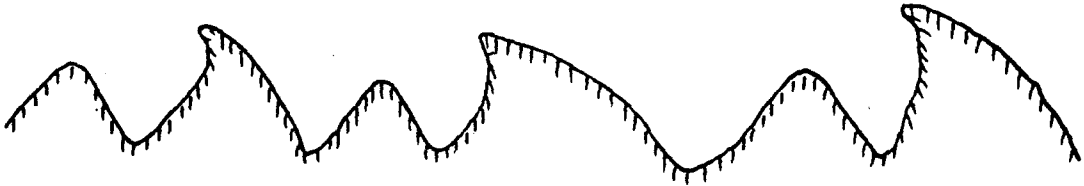
- 1) 40.8Kg, 2hr.
- 2) 13.6Kg, 1hr.



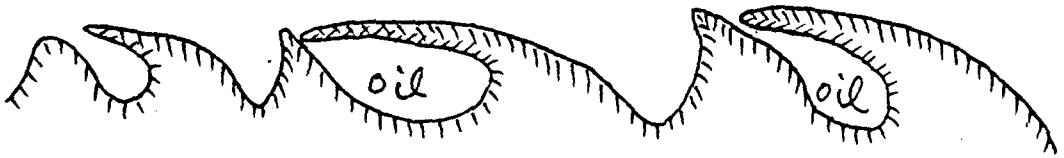
(2)



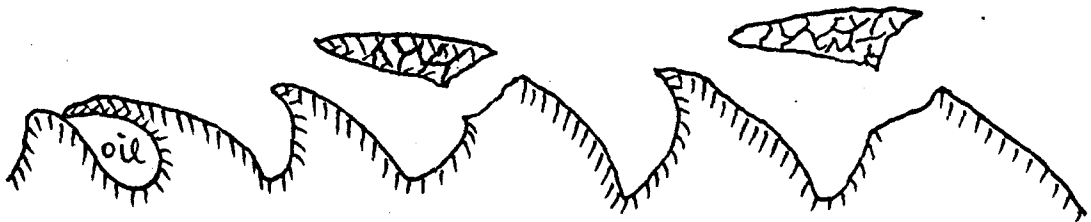
specimen with asperity.



Stage 2: plastic flow.



Stage 2: oil entrapped.



Stage 3: explosion due to accumulation heat and oil decomposition.

그림 7. Beilby layer forming mechanism.

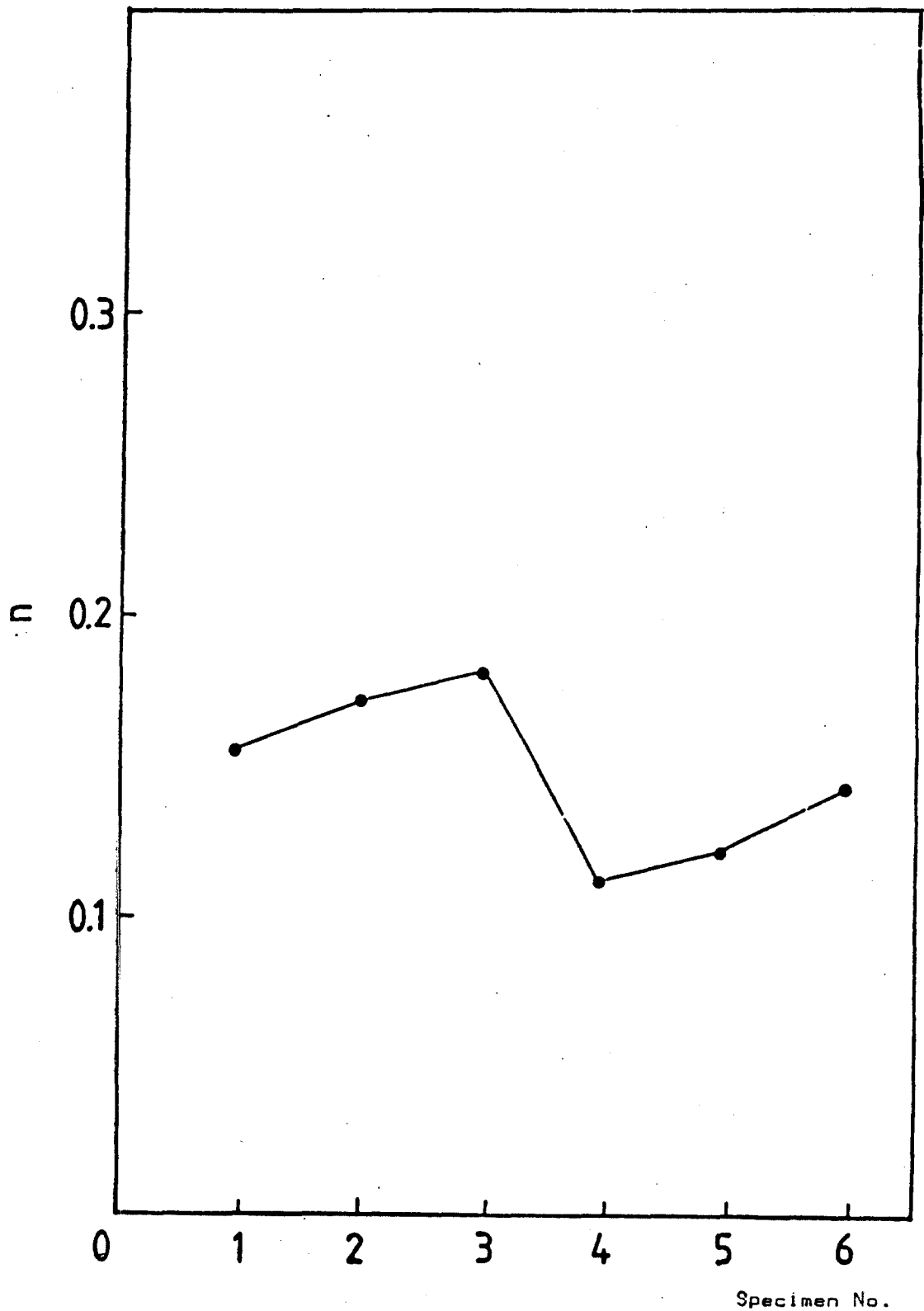


그림8. 각 시편의 가공경화지수.

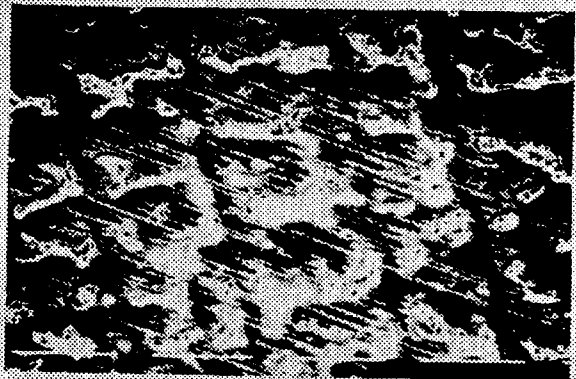
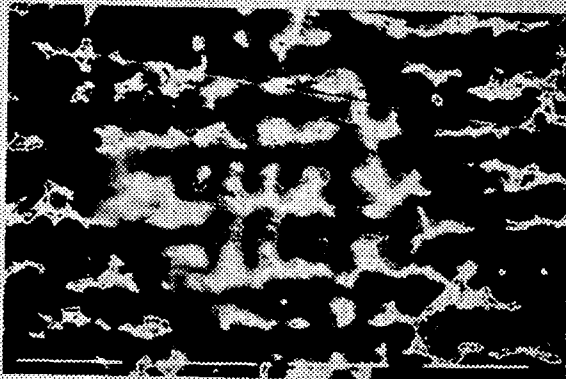
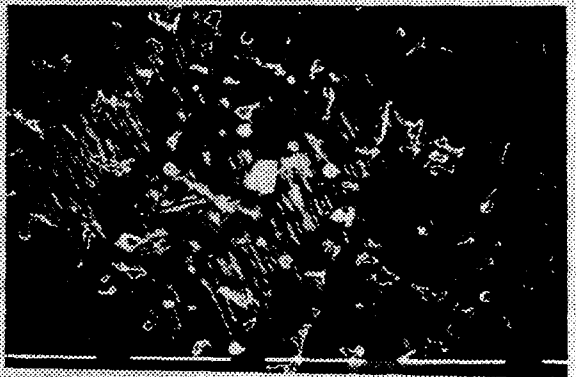
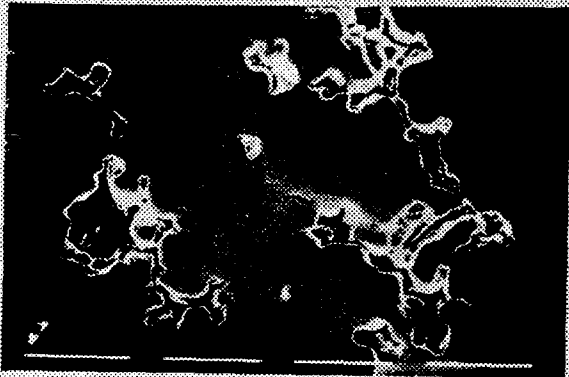
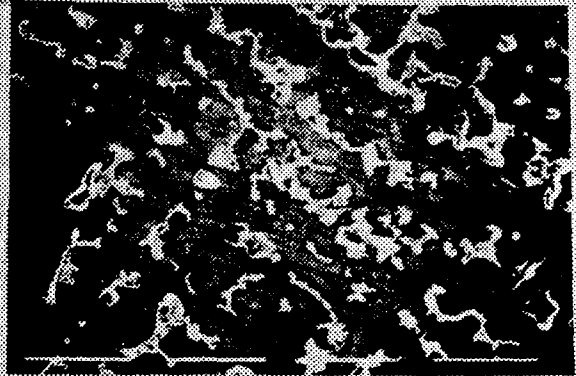


Photo 1. Structure of as-casted P-Bronze. (X200)

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



Photo 2. (+) phase 의 SEM 사진 (#2 X2000)

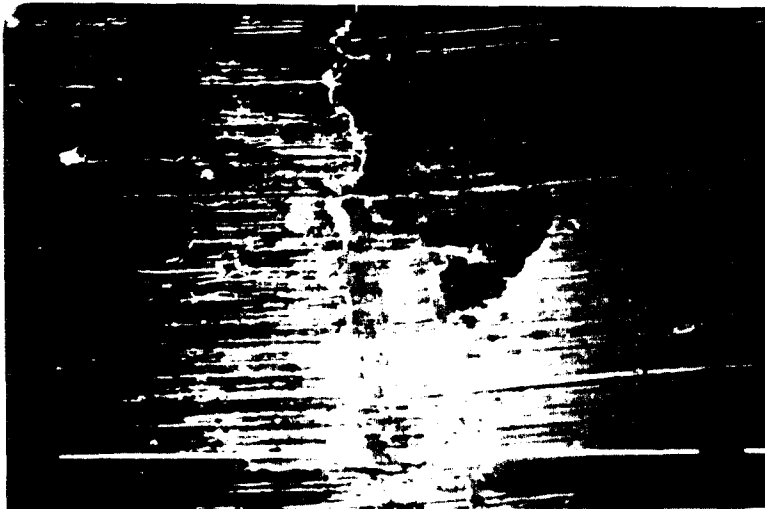


Photo 3. 소성 유동한 시편의 사진

#5 SCM 4종, 1hr 40.8Kg (X800)

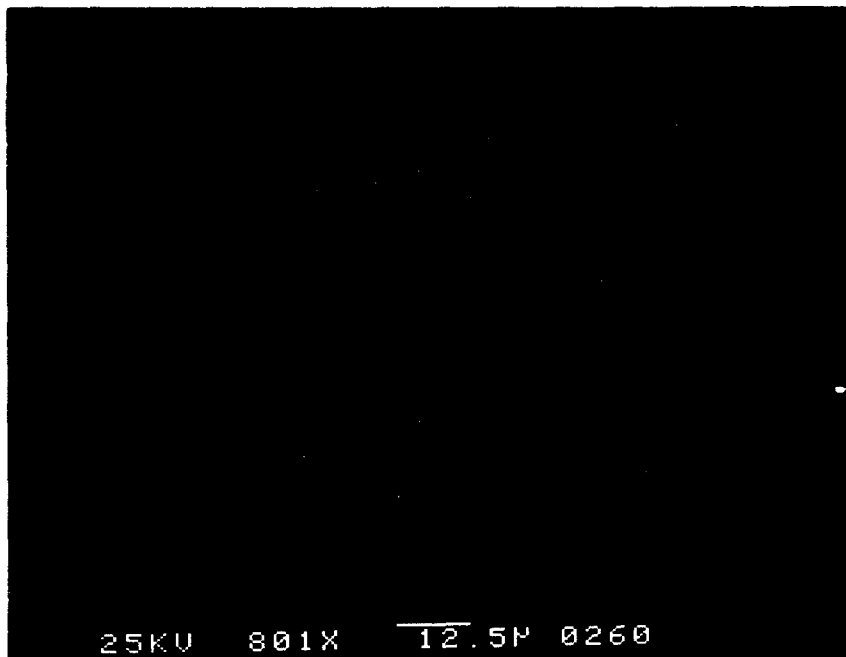
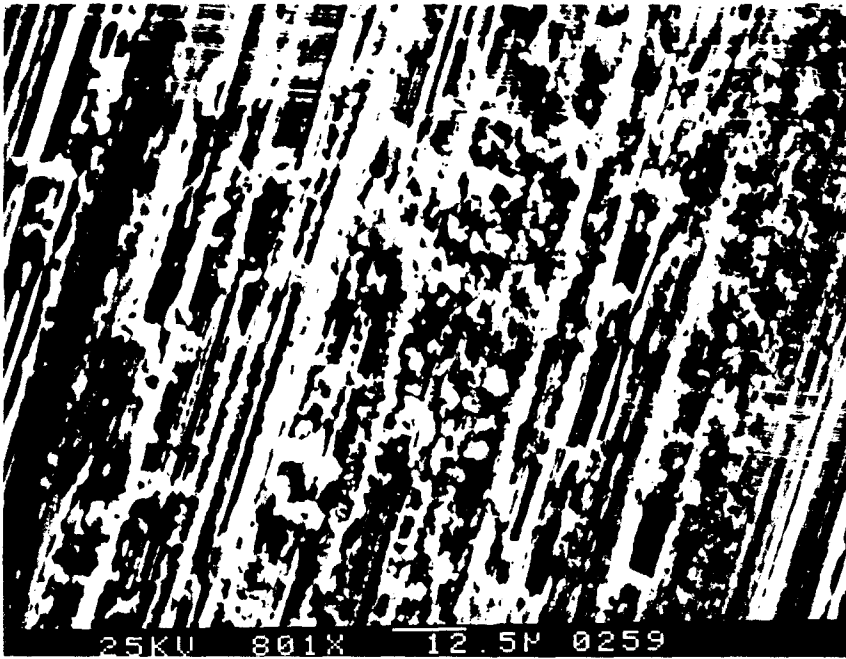


Photo 4. ring에 부착된 transferred metal에 대해 EDAX로 분석한

Cu의 composition image 사진

#2, SCM 4종, 1hr, 40.8Kg. (X800)

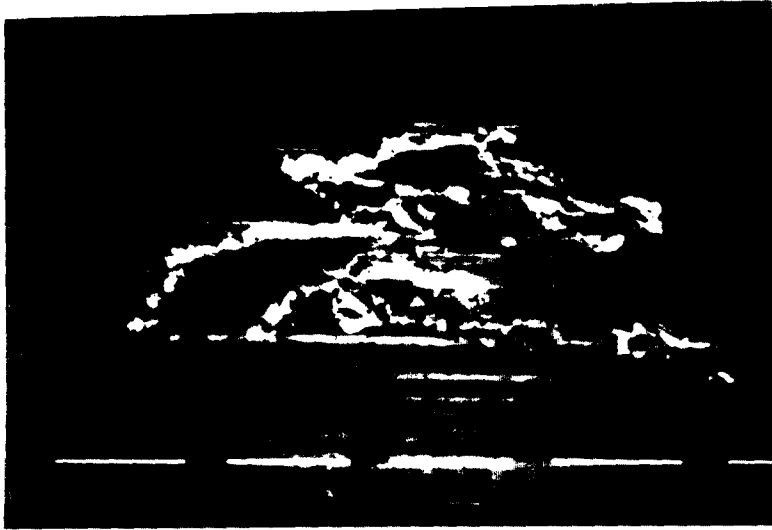


Photo 5. ring으로부터 재부착된 transferred metal의 사진

#1, SCM 4종, 1hr, 40.8Kg. (X2000)

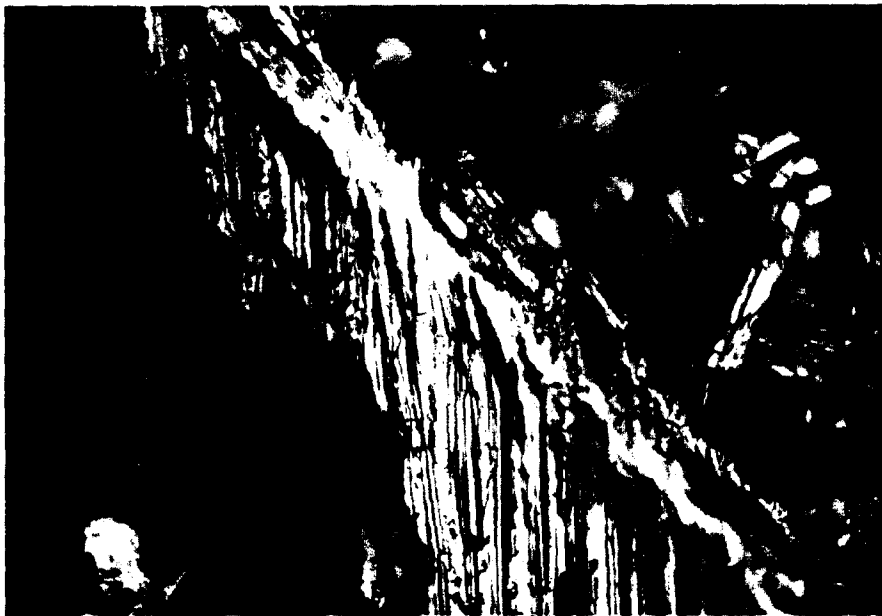


Photo 6. 소성유동에 의해 형성된 wear debris

#5, SCM 21종, 1hr, 40.8Kg. (X400)



Photo 7. Thermally activated wear에 의해 형성된 debris

#1, SCM 21종, 1hr, 13.6Kg. (X200)



Photo 8. SEM으로 관찰한 Beilby layer의 두께

#1, SCM 4종, 2hr, 40.8Kg. (X2000) 85° tilting



Photo 9. Local melting이 일어났던 부위의 사진
#3. SCM 21종, 1hr, 40.8Kg. (X3500) 1hr

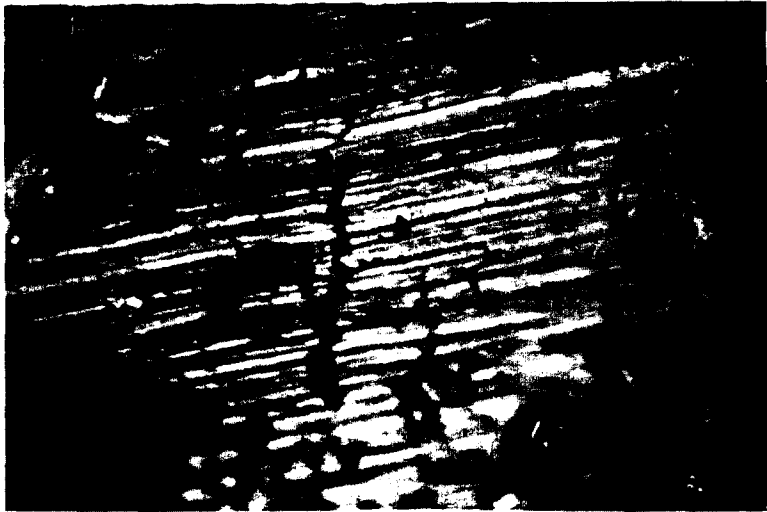


Photo 10. 소성유동부위에 가해진 응력에 의해 마모방향과 수직된
crack이 발생한 debris의 사진
#4. SCM 21종, 1hr, 68.0Kg. (X400)

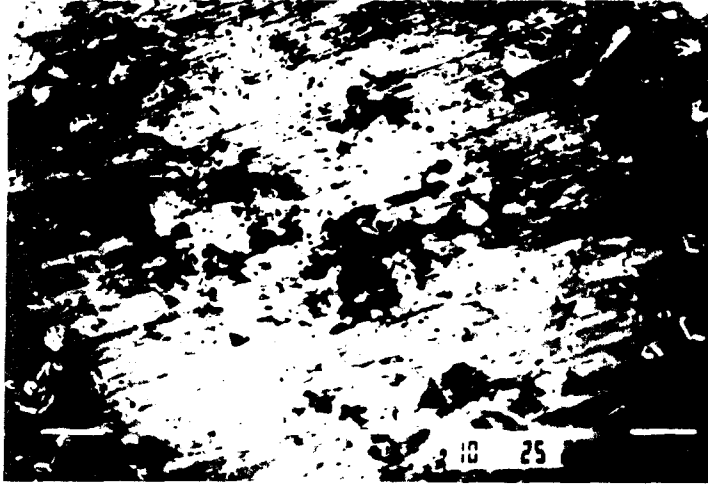


Photo 11. Thermally activated wear에 의해 oil이 분해되어 high carbon content를 이루는 부위의 사진
#2, SCM 21종, 1hr, 40.8Kg. (X1000)