



오스템퍼링한 구상흑연주철의 마모특성에 미치는 기지조직의 영향에 관한 연구

김 윤 복*** 김 창 규** 최 창 옥*

A Study on the Wear Characteristics of Austempered Ductile Iron

Yun-Bog Kim*** Chang-Gyu Kim** Chang-Ock Choi*

Abstract

This study has been carried out to investigate into the rolling wear characteristics of austempered ductile iron under unlubricated dry rolling condition by Amsler type test with 9.09% sliding ratio. Wear amount is increased with increasing of ferrite and retained austenite and it has been found that the amount of rolling wear is decreased when the hardness of matrix are higher. The rolling life up to generation of abnormal condition is conspicuously increased and amount of rolling wear is increased as rolling revolution is increased and wear of austempered ductile iron under dry rolling condition. Matrix has been obtained to upper bainite, low bainite at heat treatment, obtained to bull's eye structure at as cast. It has been found that the amount of rolling wear is decreased when the tensile strength of the casting are increased and then the rolling life up to generation of abnormal wear is conspicuously increased and amount of wear was intend to graphite content.

1. 서 론

구상흑연주철은 편상흑연주철에 비하여 기계적 성질이 우수하여, 인장강도가 약 40kg.f/mm² 이상이고 특수한 경우에는 100kg.f/mm² 이상의 것도 얻을 수 있다. 또한 강과 비교하여 용점이 낮고 주조성이 양호하여 복잡한 형상의 주물까지 용이하게 제작할 수 있으므로 자동차용 부품 및 일반산업용 기계부품등 공업용 재료로 많이 사용되고 있다. 또한 강에 가까운 높은 강도와 인성, 우수한 내식성 및 양호한 절삭성등 많은 이점이 있으므로 단강품이나 주강품으로 부터 값이 싼

구상흑연주철품으로 재질의 대체가 이루어지고 있는 실정이다.¹⁾

최근 구상흑연주철의 고강도화에 대한 연구가 활발히 진행되어 인장강도 80kg.f/mm² 이상의 재료를 개발하여 자동차용 기어, 크랭크샤프트 등에 실용화되고 있으나, 주방상태의 재질은 내열성 및 내마모성등의 측면에서 불리한 점이 많이 언급되어지고 있으므로 고강도이면서 고인성, 내열성 및 내마모성을 증가시키기 위하여 일반 구상흑연주철에 합금성분을 소량 첨가하여 각종 오스템퍼링 처리를 실시하여 90kg.f/mm² 이상의 인장강도와 5% 이상의 연신율을 가진 재료로 개발, 일반산업용 기계부품 및 자동차용부품의 소

***동아대학교 대학원(Graduate school Dong-A University)

**부산공업대학 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering Pusan National Institute of Technology)

*동아대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering Dong-A University)

재로 활용하고 있다.^{2),3)}

따라서 본 연구에서는 합금성분으로 Cu, Ni 및 Mo 를 소량 첨가하여 구상흑연주철시편을 제조한 후 오스테퍼링 열처리를 실시하여 오스테퍼드구상흑연주철로 제조한 후 Amsler형 무윤활 건식 로링 마모시험기를 사용하여 마모특성에 미치는 오스테퍼링 열처리 온도 및 기지조직의 영향에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

본 실험에 사용된 시료는 구상흑연주철용 저 Mn 주철에 합금원소인 Cu, Mo, 및 Ni 을 첨가하여 고주파유도용해로(15Kw-10kg) 에서 목표 조성으로 용해한 후 흑연구상화제(Fe-Si-Mg) 로 샌드위치법에 의해 구상화처리 및 접종재(Fe-Si)로 후접종하여 CO₂ 주형(35mmφ×350mm 1)에 주입시켜 주조하였다.

주조한 시료의 화학조성분석 결과는 Table 1 과 같다.

주조한 시료를 Fig.1과 같은 형상 및 치수의 마모시험편과 인장시험편(KSD 4호) 및 경도시험편으로 각각 가공한 후 오스테퍼링 열처리를 Fig.2와 같이 실시하였다.

2.2 실험방법

기계적 성질시험은 만능재료시험기로서 인장강도, 연신율을 측정하였으며, 브리넬경도시험기로서 경도값을 측정하였다. 또한 주방상태 및 오스테퍼링처리한 시험편의 조직사진을 광학현미경(일본, Union사 model UN 20N, NEC-5) 으로 관찰하였으며, 마모시험한 후의 마모면을 광학현미경 및 주사전자현미경(일본, JEOL, model JSM-35CF)으로 관찰하였다. 마모시험은 Amsler형 마모시험기(일본, Shimadzu사, type II) 를 사용하여 Fig.3과 같이 상부에 주조한 시험편을, 하부에 상대마모시험편을 고정하고 상하

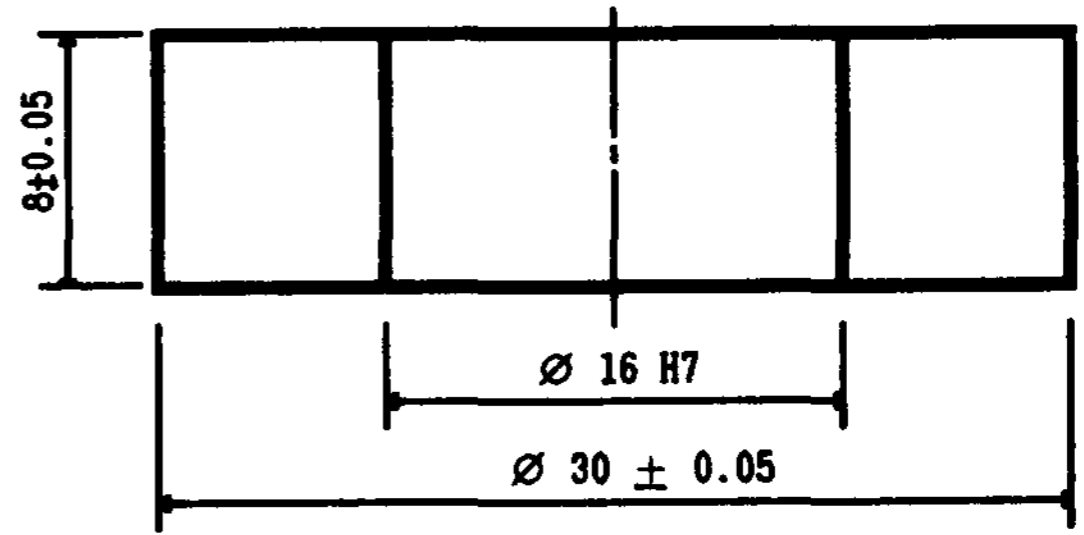


Fig. 1. Specimen of Amsler type wear test.

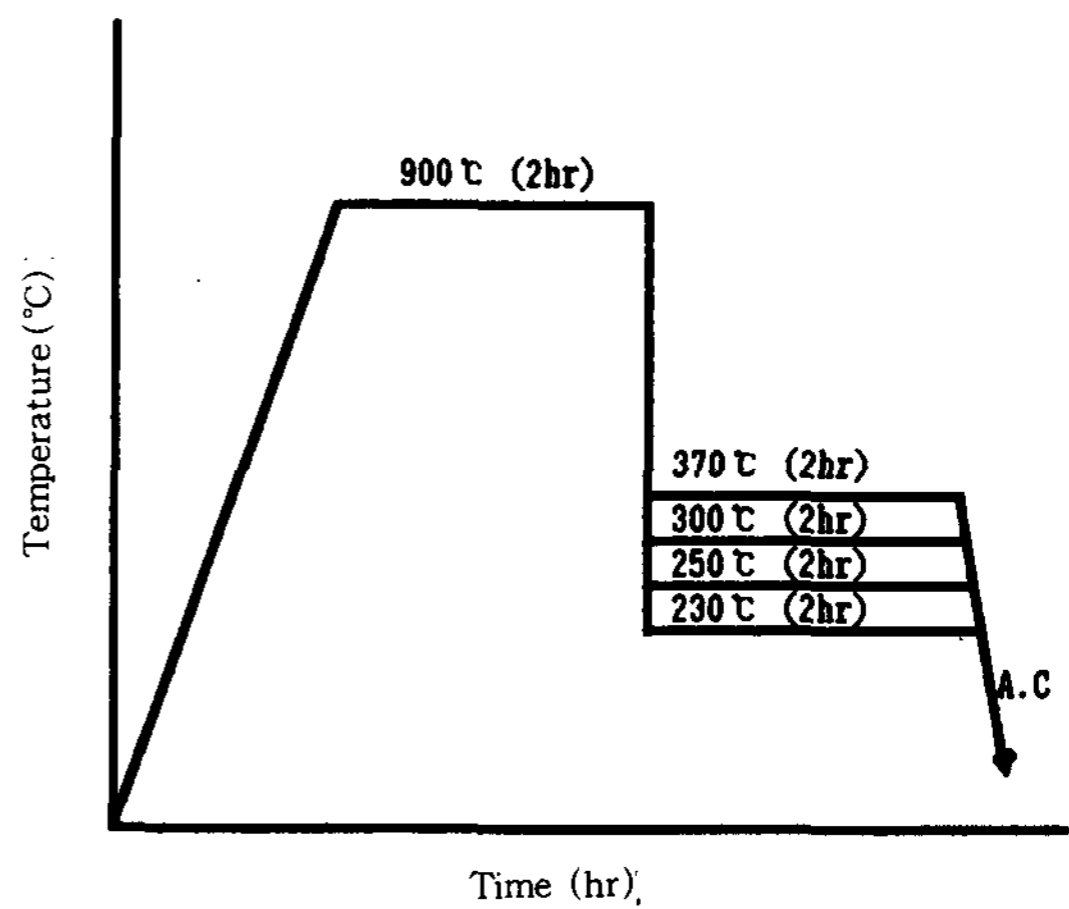


Fig. 2. Typical austempering heat treatment cycles.

회전수를 달리하여 9.09% 슬립율을 주어 행하였으며, 상대마모시험편은 탄소강(S45C)을 가공하여 잔류응력을 제거한 후 열처리하여 경도값이 HRC 60 이상 되도록 제작, 사용하였다. 또한 상부시험편의 미끌림 마찰속도는 0.78m/sec이며, 마모시험시 접촉 하중은 30, 50 및 70kg 의 압축 하중을 주었으며, 회전수를 초기 10,000 회전에서 20,000 회전씩 증가시키면서 110,000 회전까지 변화시켜 최대압축하중과 회전수 변화에 따른 마모량을 화학천칭으로 칭량하여 마모특성을 관찰 하였다.

Table 2. Chemical composition of specimen (wt. %)

specimen	comp.	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cu	Mg
SG		3.67	2.73	0.34	0.02	0.01	0.34	1.00	0.87	0.04

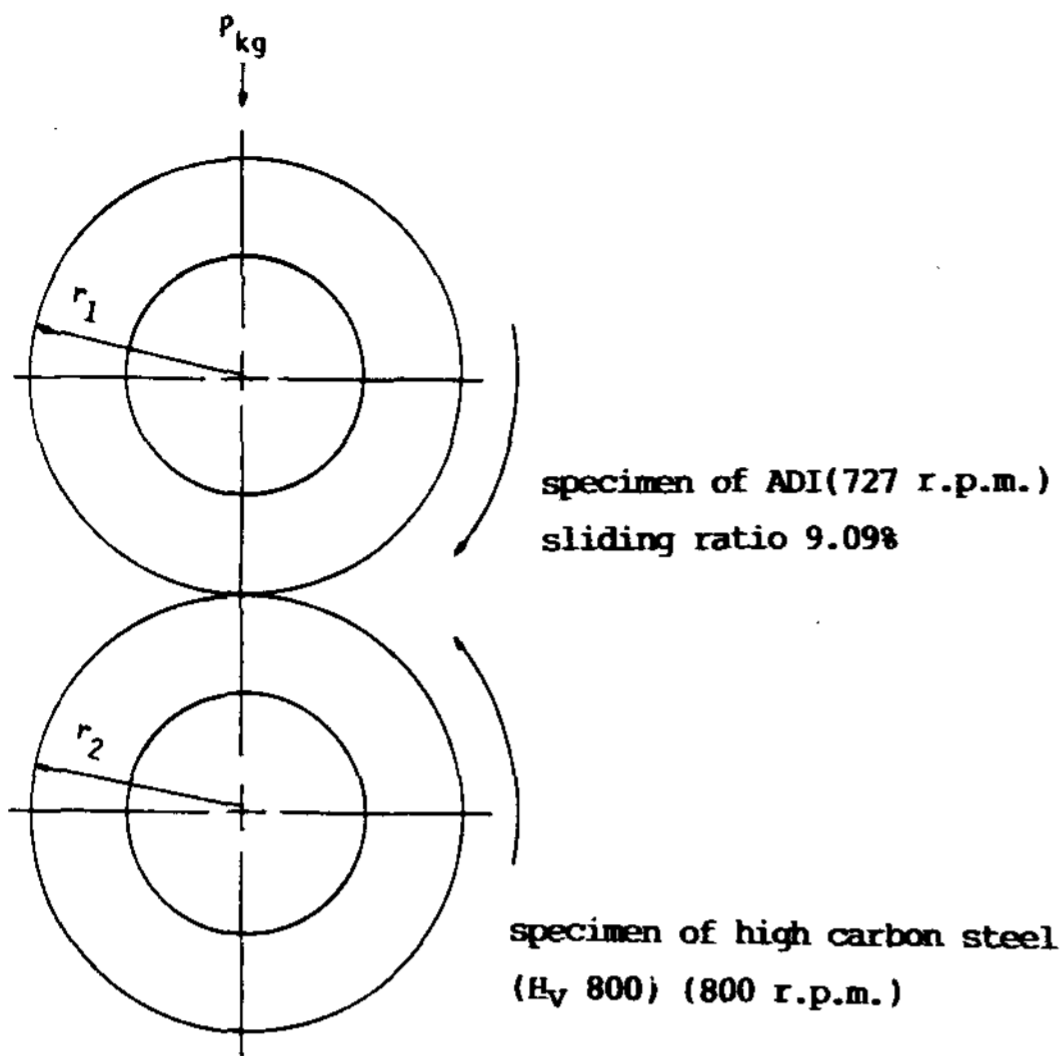


Fig. 3 Schematic representation of Amsler type wear test.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열처리온도에 따른 조직 및 기계적 성질변화

Table 2는 오스템퍼링온도에 따른 기계적 성질시험 결과를 나타내었으며, 현미경조직은 Photo1에 나타내었다.

Table 2에서 보인 바와 같이 오스테나이트화 온도를 900°C로 일정하게 하고 오스템퍼링 열처리온도가 낮을수록 인장강도 및 경도는 증가하지만 연신율은 감소하였다. 이는 열처리 전후의 현미경 조직에서 알 수 있는 바와 같이 열처리전의 조직에 있어서는 흑연 주위에 페라이트와 다량의 퍼얼라이트가 혼재하여 있는 불즈아이 조직이었

으나, 오스템퍼링 열처리 후의 ADI90에 있어서는 다량의 잔류 오스테나이트가 포함되어 있는상부 베이나이트가 나타났으며, ADI100에 있어서는 약간의 잔류 오스테나이트가 존재하는 상부와 하부의 중간상 베이나이트를 나타내었다. 또한 ADI 110 및 ADI 120에 있어서는 다량의 마르텐사이트 또는 시멘타이트가 존재하는 하부 베이나이트를 나타내었다.

따라서 오스템퍼링 열처리 후 재료의 기계적 성질은 기지조직에 의존하는 것으로 기지조직 내에 잔류 오스테나이트량이 많으면 강도와 경도는 감소하는 경향을 나타내었다. 잔류 오스테나이트는 고온에서 안정한 조직이지만 저온으로 갈수록 불안정하게 존재하여 강도, 경도 및 충격치 등은 감소하며, 인성과 연성은 다소 증가하는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 일반적으로 오스테나이트화 영역으로 부터 오스템퍼링 열처리 시에 두 단계의 변화가 일어난다. 900°C에서 오스테나이트화 시킨 조직을 베이나이트 변태구역인 250 ~ 450°C 사이에서 오스템퍼링 시키면 오스테나이트 입계로 부터 베이나이트계 페라이트가 생성되어 오스테나이트 구역으로 방향성있게 성장하고 페라이트 내부에서 과포화된 탄소가 주위의 오스테나이트로 방출되어 페라이트와의 경계에서 고탄소 오스테나이트의 성장을 방해하기 때문에 이것에 의해서 베이나이트계 페라이트 형성과 잔류 오스테나이트량이 결정된다. 고온에서 베이나이트계 페라이트의 핵생성 숫자는 적으나 확산이 쉽게 진행되기 때문에 베이나이트계 페라이트의 조직은 조대하게 되고 오스테나이트가 다량으로 존재하게 된다. 저온 일수록 베이나이트계 페라이트의 핵성장속도는 느리나 핵생성 숫자가 많기 때문에 베이나이트계 페라이트의 모양은 날카롭고 치밀하

Table 2. Mechanical properties of specimens as casted and austempered.

Specimens	Tensile strength (kg.f/mm ²)	Hardness (HB)	Elongation (%)	Austenitizing and Austempering temperature(°C)
SG	68.8	225	8	as-cast
ADI90	91.13	285	6.2	900°C ~ 370°C (2hr)
ADI100	106.68	379	5	900°C ~ 300°C (2hr)
ADI110	116.32	430	3	900°C ~ 250°C (2hr)
ADI120	126.42	454	1.2	900°C ~ 230°C (2hr)

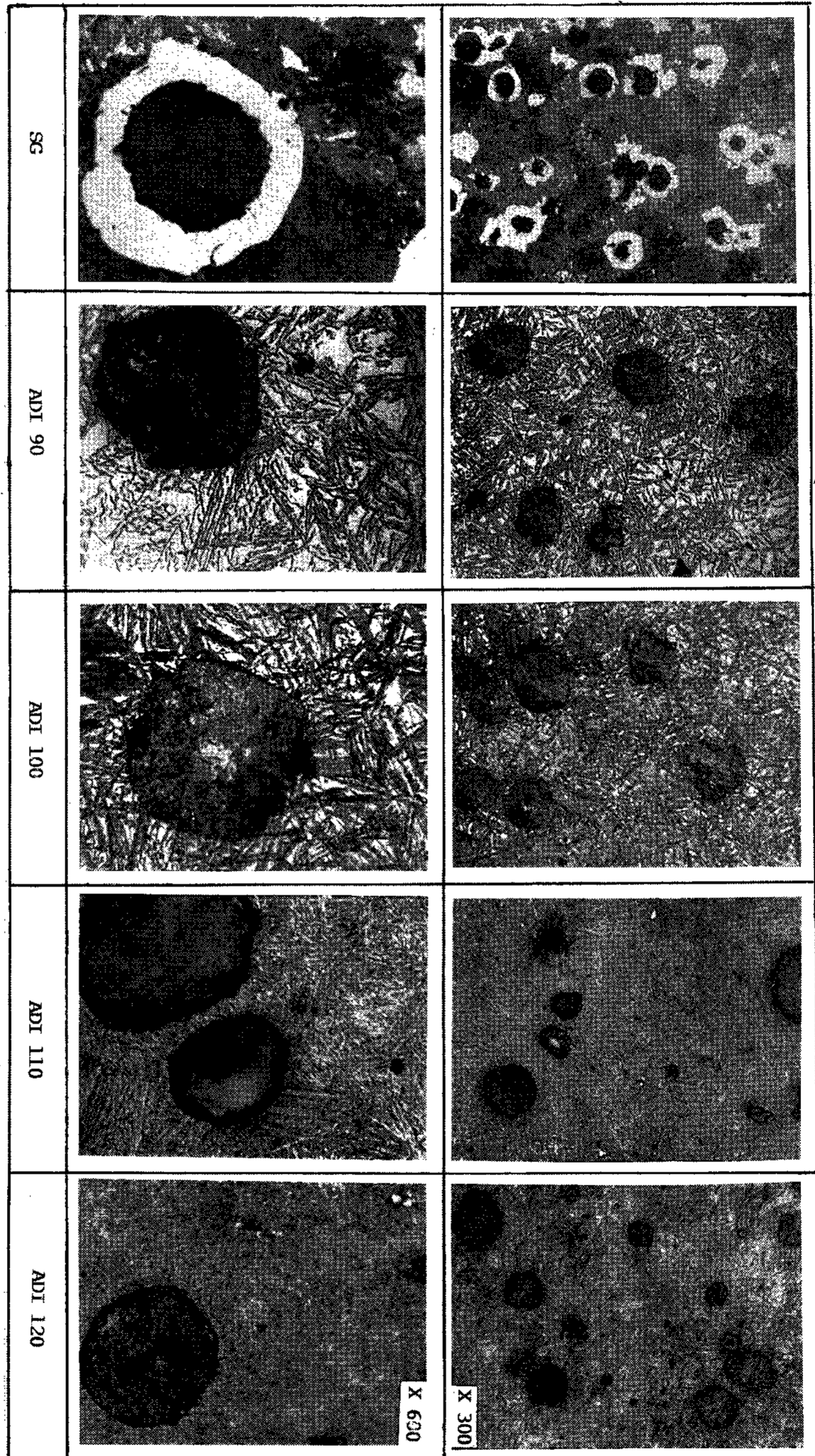


Photo 1. Micro structure of austempered ductile iron.

게 되고 오스테나이트는 소량으로 잔류하게 된다.⁴⁾

따라서 적절한 합금성분을 첨가하면 베이나이트로 변태시 퍼얼라이트 변태 시점을 늦추어주는 효과를 얻어 양호한 베이나이트변태를 촉진시켜 준다. 첨가되는 합금성분은 베이나이트 형성에 직접적인 영향을 주지 못하고 단지 오스테나이트 구역 확대형 원소인 Mn, Ni 및 Co 등은 베이나이트 변태온도 범위를 넓혀주고 오스테나이트 구역 폐쇄형 원소인 Cr, Mo, W 및 Ti 등은 베이나이트 변태온도 범위를 좁혀준다. 즉 Mn, Ni, Co 등의 원소를 첨가하면 그 첨가량에 따라서 베이나이트가 형성될 수 있는 오스테나이트 조직을 안정화 시켜주기 때문에 쉽게 베이나이트 조직을 얻을 수 있고 Cr, Mo, 및 Ni 등을 첨가하면 그 량에 따라서 베이나이트 변태 온도 범위가 좁아져서 그 만큼 오스텨퍼링 온도에 제한을 받게 된다.^{5),6)7)}

3.2 최대압축하중과 마모량과의 관계

마모시험은 상하 시험편의 미끄럼 마찰속도를 0.78m/sec 으로 하고 압축하중을 30, 50 및 70kg으로 각각 가하였을 때 압축하중에 따른 마모량의 변화를 조사하였다.

압축하중 P와 접촉내면의 최대압축응력 σ_{MAX} 의 사이에는 식(1)⁸⁾과 같은 관계가 성립된다.

$$\sigma_{max} = 0.418 \sqrt{\frac{P \cdot E}{B} \left(\frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} \right)} \dots\dots\dots(1)$$

- 여기서, σ_{MAX} : max. comperssive stress
kg.f/mm²
- P : Load, kgof
- E : modulus of elasticity of test specimen : 20,000 kg.f/mm²
- γ_1 : radius of upper side test specimen : 15mm
- γ_2 : radius of low side test specimen : 15mm
- B : width of test specimen : 8mm

슬립율 9.08%의 로링 마모시험에 있어서 시험편의 회전수와 총 마모량과의 관계를 최대압축응력 σ_{MAX} 이 42, 54 및 65kg.f/mm²인 경우에 대하여 각각 Fig.4에서 Fig.8까지 재질별로 나타내었다. Fig.4에서는 구상흑연주철의 주방상태

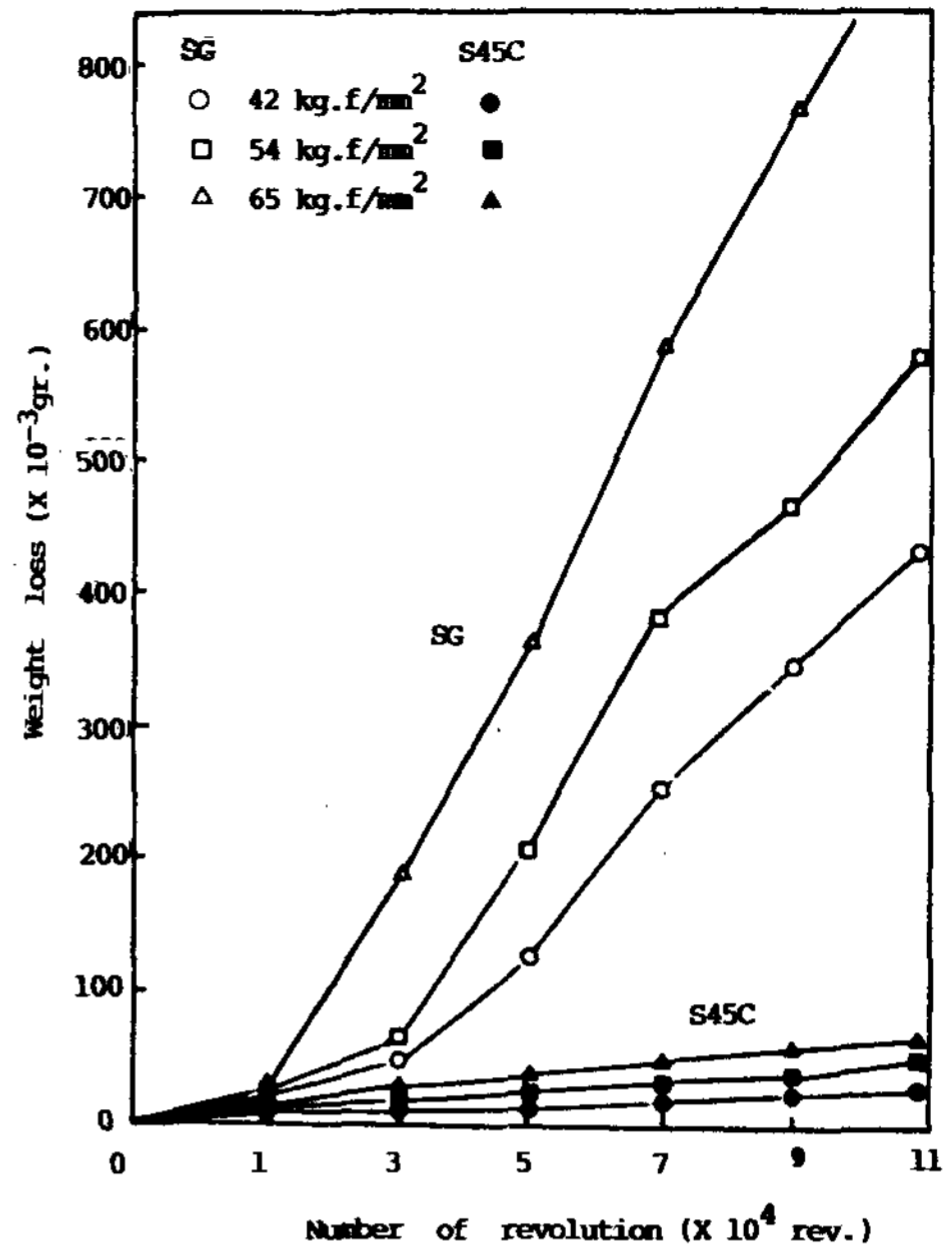


Fig. 4. Relation between weight loss and the number of revolution for various specimens of ductile cast iron(SG), sliding ratio 9.09%.

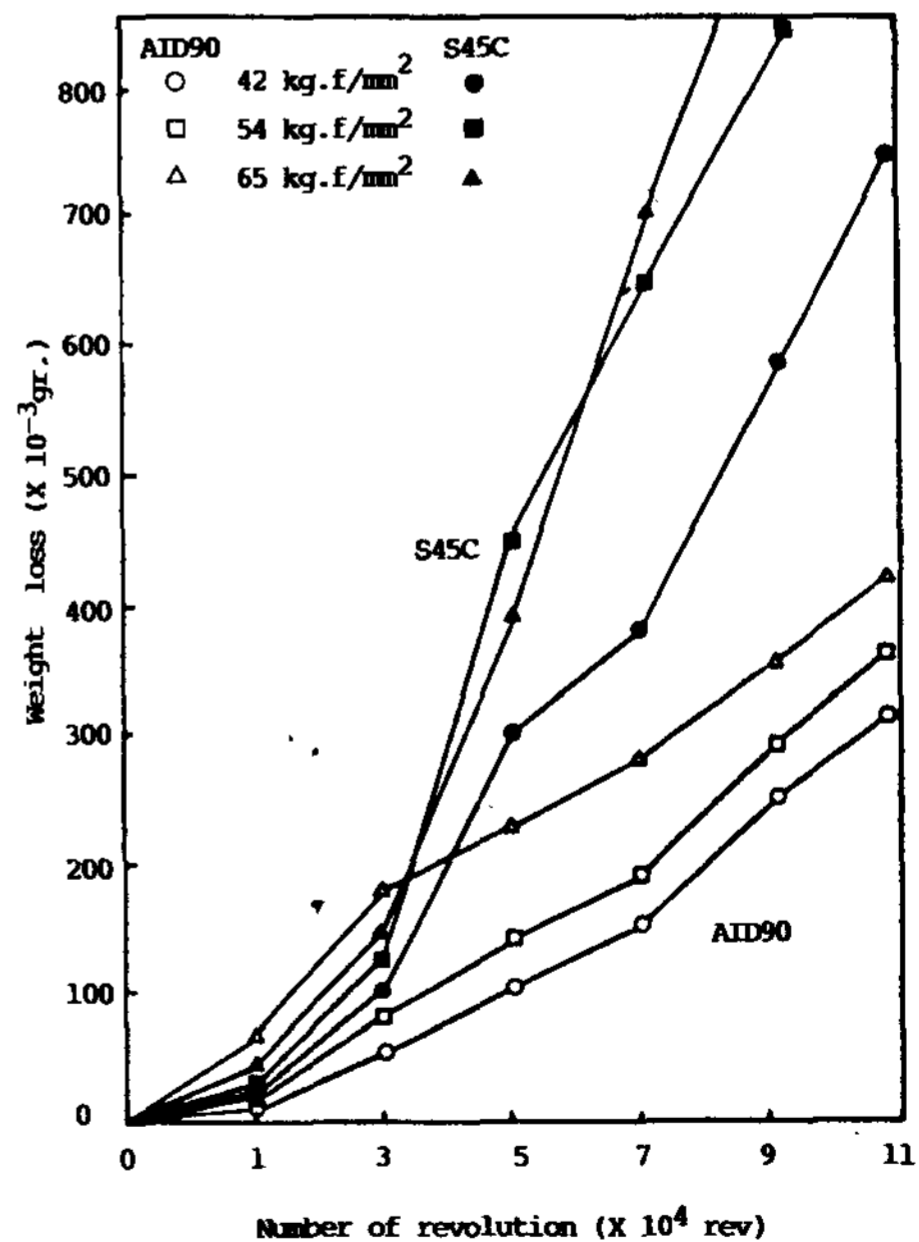


Fig. 5. Relation between weight loss and the number of revolution for various specimens of austempered ductile iron (AID 90), sliding ratio 9.09%

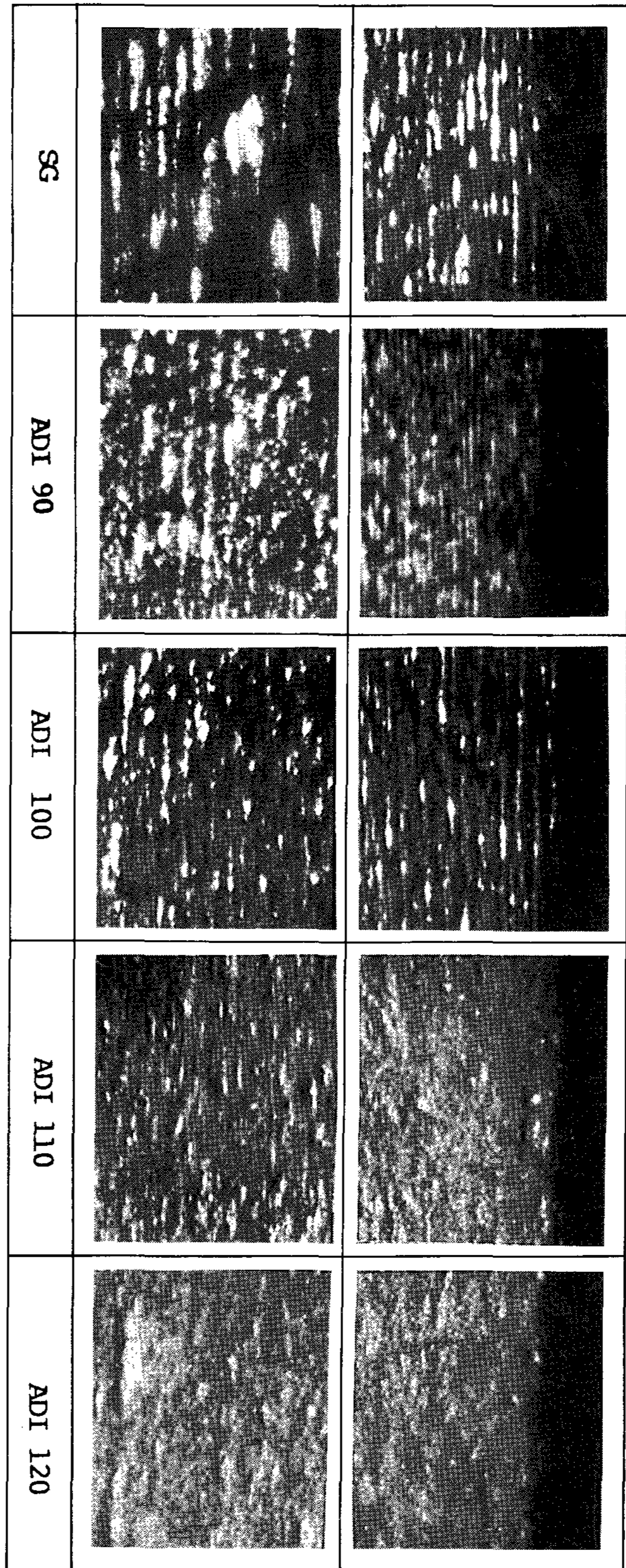


Photo 2. Macro structure of showing wear surface for various specimens of ADI, (70kg, 11×10^4)

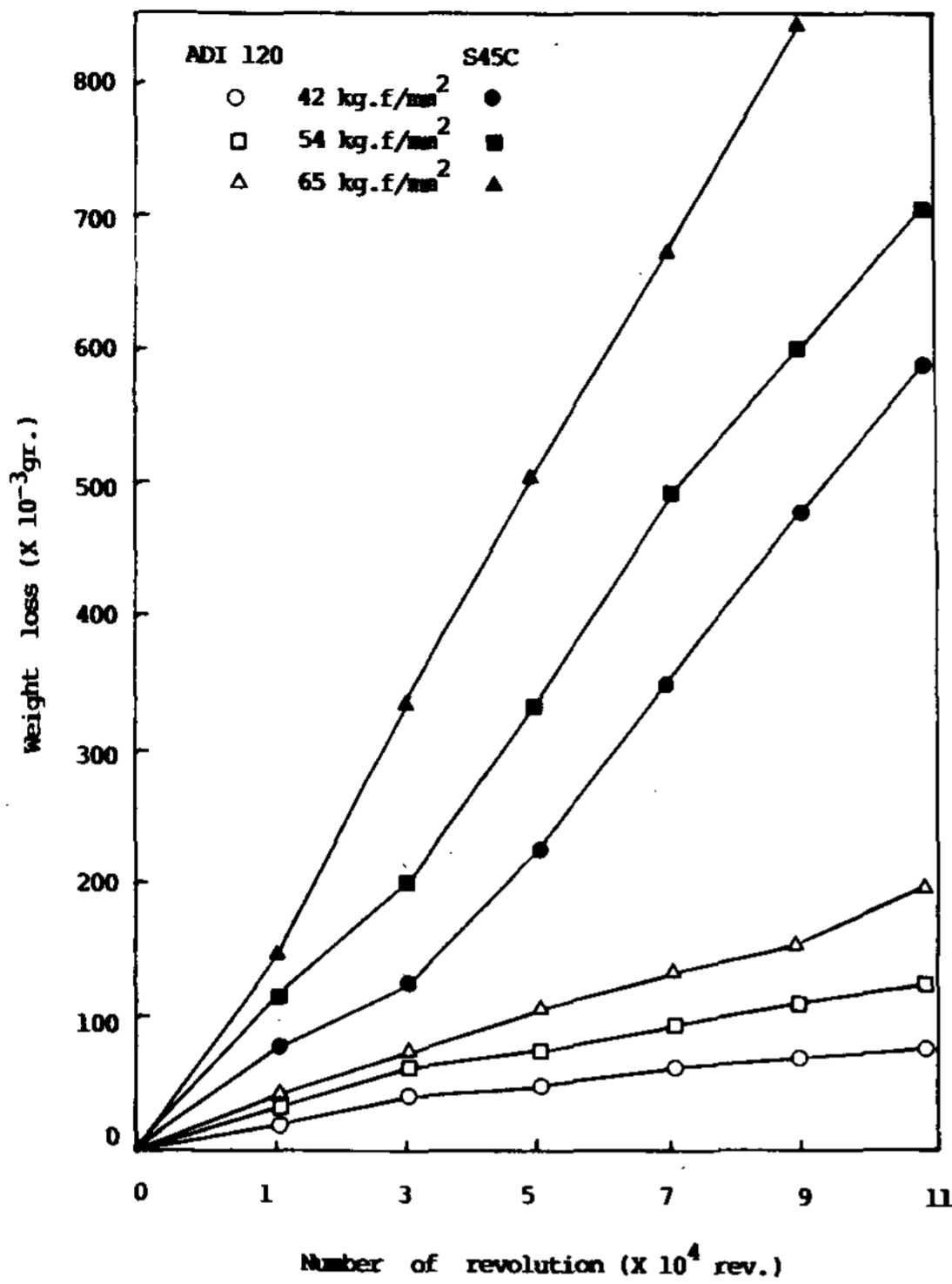


Fig. 6. Relation between weight loss and the number of revolution for various specimens of austempered ductile iron(ADI120) sliding ratio 9.09%

시험편은 상대재인 S45C 강 보다 마모량이 현저히 많음을 알 수 있으며, 초기는 마모량의 변화가 거의 없으나 회전수와 하중이 증가함에 따라서 마모량이 증가하고 마모의 폭도 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. Fig.5 및 Fig.6은 오스템퍼링 처리한 시험편으로 상대재인 S45C 강 보다 마모량이 감소하는 것을 알 수 있으며, 또한 회전수와 하중이 증가함에 따라서 마모량이 증가하였다.

3.3 기계적 성질과 마모량과의 관계

회전수와 최대압축하중 변화에 따른 재질별 마모량을 Fig.7 및 Fig.8 에 나타내었다.

Fig.7은 최대압축응력 σ_{MAX} 42kg.f/mm² 인 경우에는 회전수가 증가하여도 마모량의 차이는 거의 없으나, Fig.8 의 최대압축응력 σ_{MAX} 이 65 kg.f/mm²인 경우에는 회전수가 증가함에 따라서 초기에는 마모량이 적으나 30,000회전 이상이 되

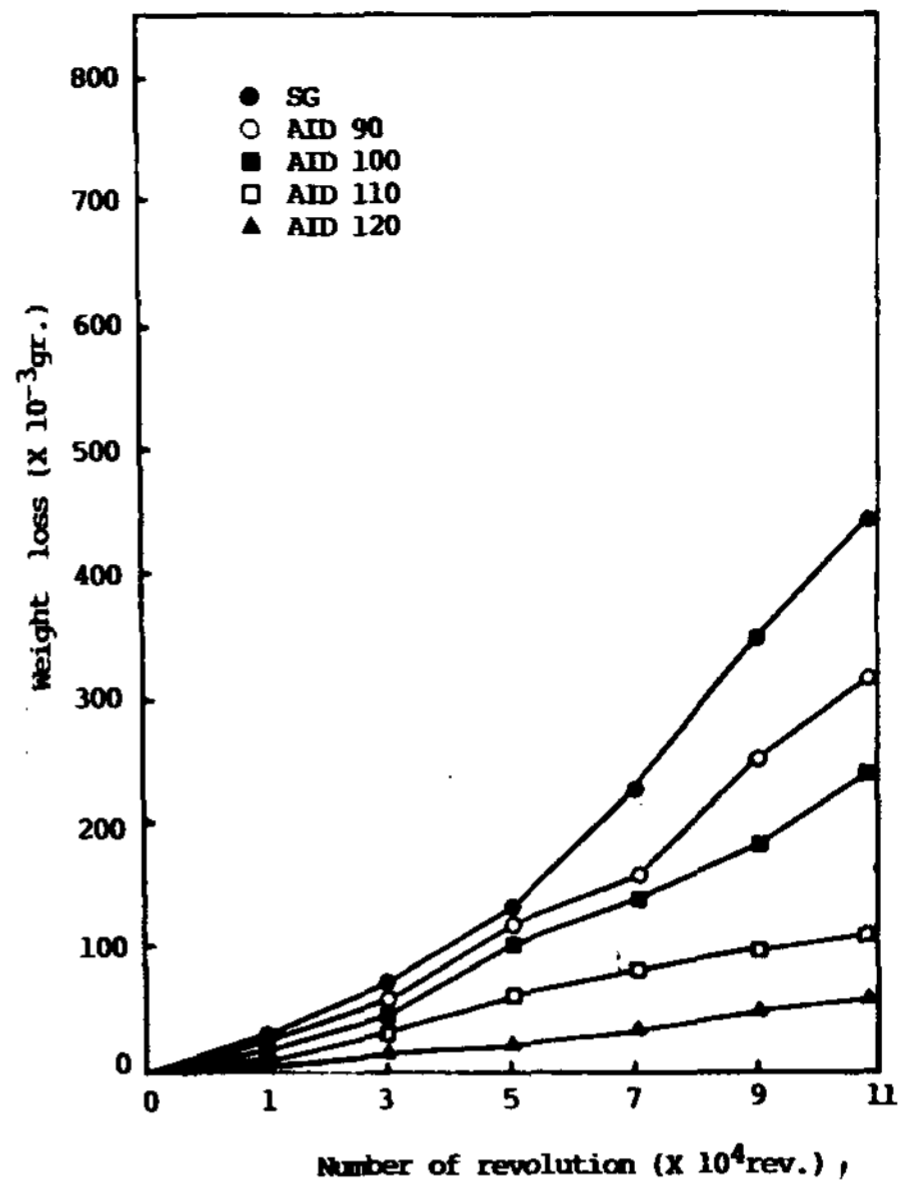


Fig. 7. Relation between weight loss and the number of revolution for various specimens of austempered ductile iron, maximum compressive stress 42 kg.f/mm² sliding ratio 9.09%

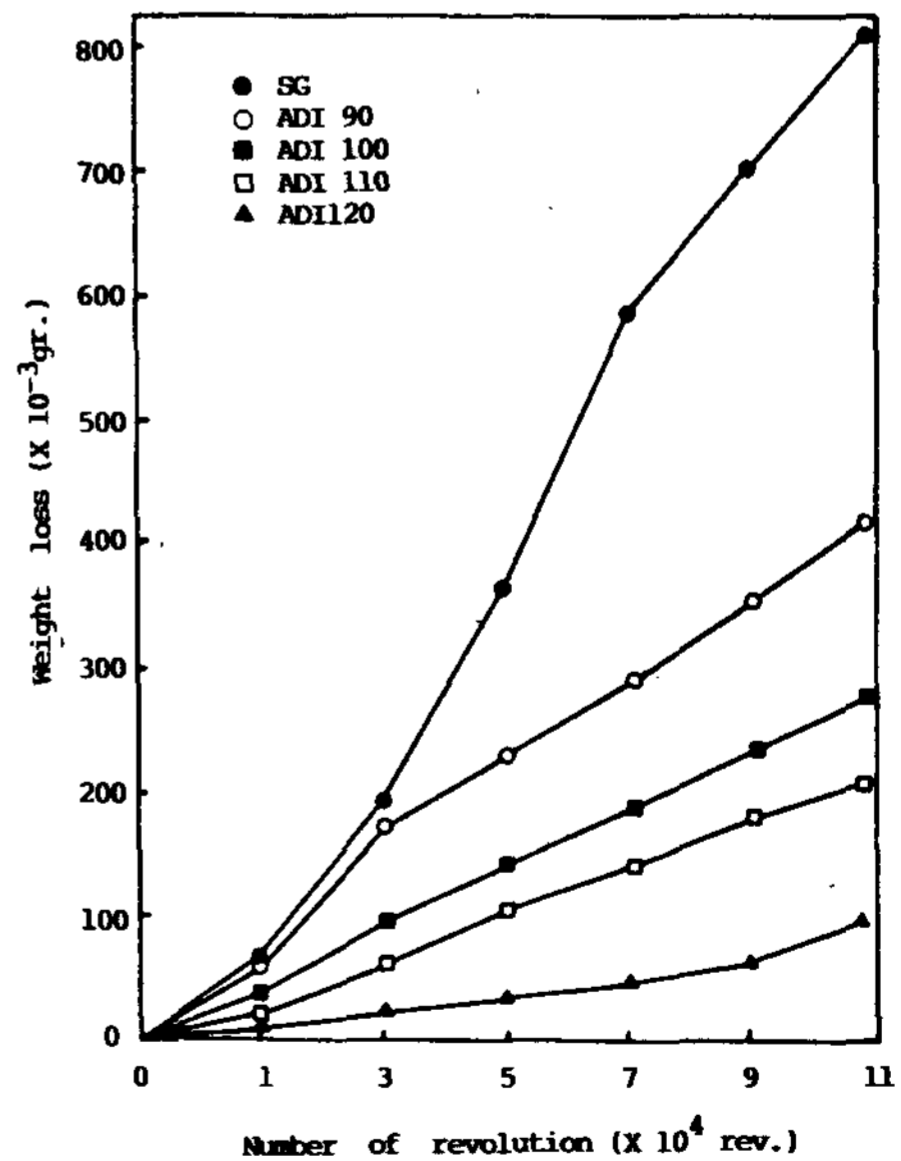


Fig. 8. Relation between weight loss and the number of revolution for various specimens of austempered ductile iron, maximum compressive stress 65 kg.f/mm² sliding ratio 9.09%

면 초기마모의 형태를 나타내는 기계적 파괴 마모가 일어나 마모량이 증가하며, 회전수가 더욱 증가함에 따라서 정상적인 마모의 형태를 나타내었다.

또한 최대압축하중과 회전수의 변화에 의한 재질별 비마모율의 관계를 Fig.9 및 Fig.10에 나타내었다. 일반적으로 비마모율을 나타내는 척도는 여러가지 형태가 있으나 마모가 진행됨에 따라서 초기마모, 제2산화마모 및 정상마모등의 형태로 나타내므로 비마모율은 정상마모구간을 알아보기 위한 척도라 할 수 있다.

비마모율은 일반적인 방법으로 식 (2)와 같이 나타낸다.^{9,10)}

$$W = k \frac{L}{P} \times I = \frac{L}{P} \cdot L \cdot I = C \cdot L \cdot I$$

- 여기서, C ; specific wear rate (mg / kg.f / mm)
- L ; load(kg.f)
- l ; wear distance(mm)
- W : wear amount(mg)

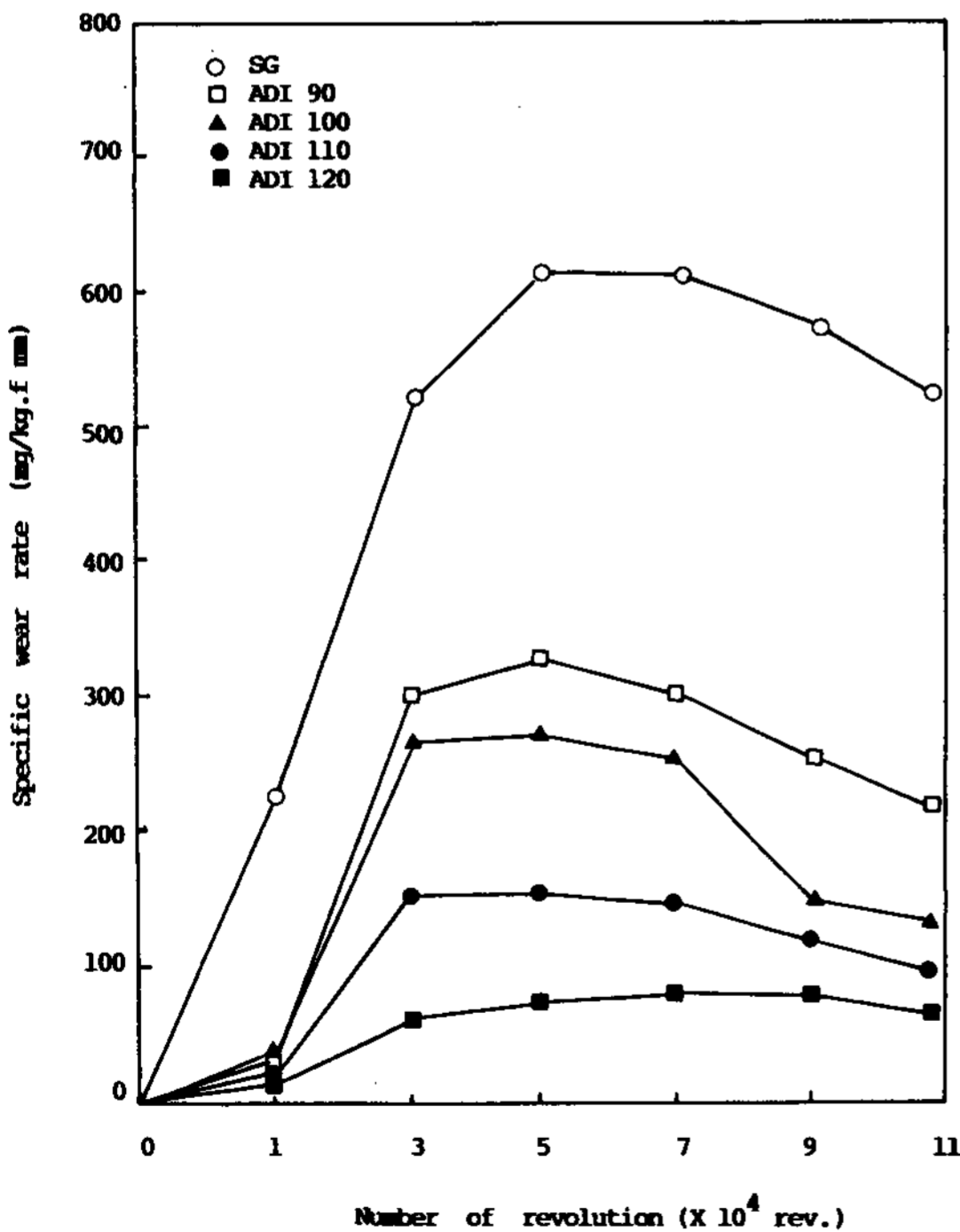


Fig. 9. Relation between specific wear rate and the number of revolution for various specimens of ADI, 42 kg.f/mm² sliding rate 9.09%.

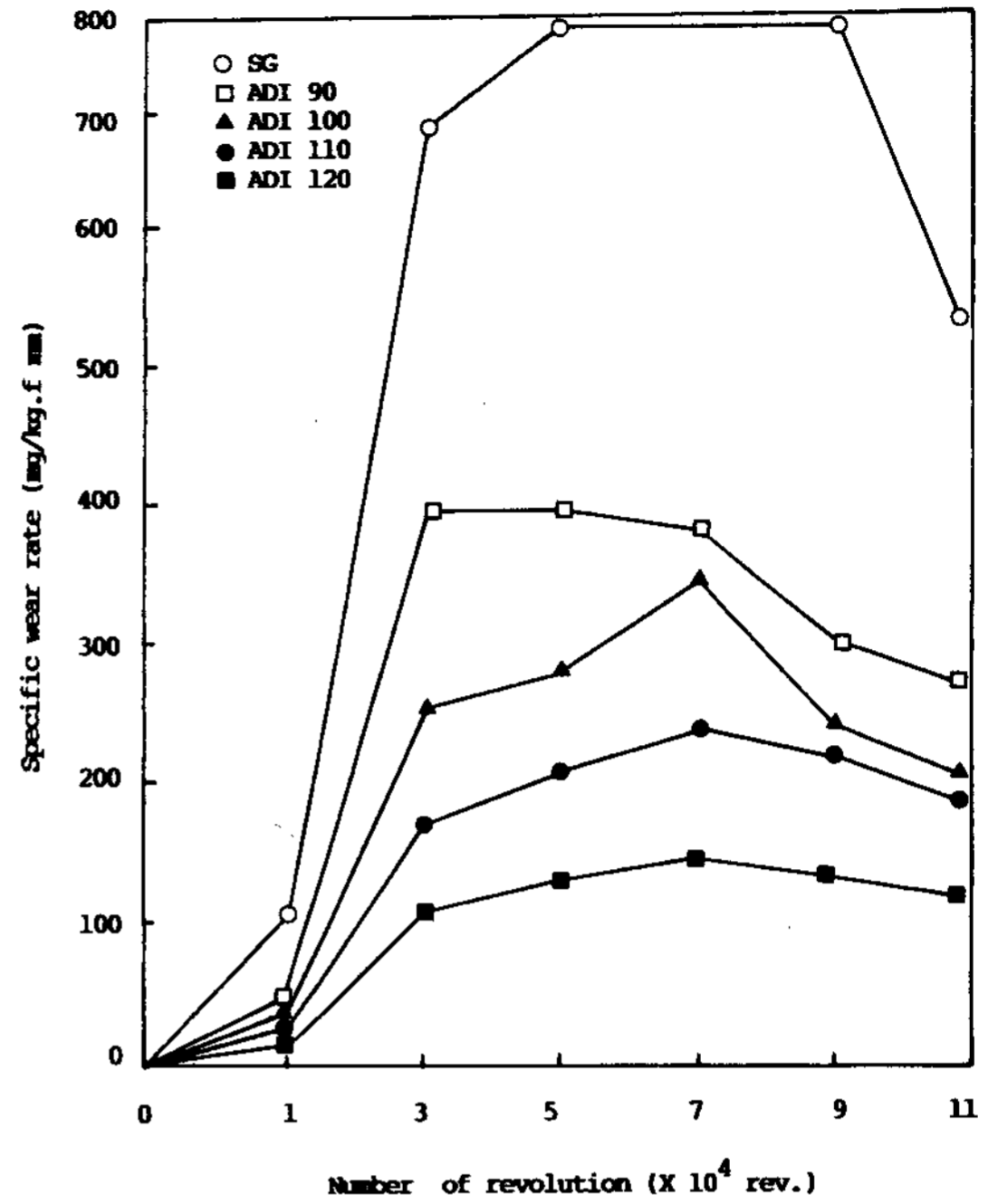


Fig. 10. Relation between specific wear rate and the number of revolution for various specimens of ADI, 65 kg.f/mm² sliding rate 9.09%

Fig.9에서 Fig.14까지 나타낸 바와 같이 최대 압축응력 42 및 65kg.f/mm²에 있어서 회전수에 의한 마모의 초기에는 기계적 파괴 마모를 나타내며, 마모의 후반에는 정상마모의 형태로 진행되어 감을 알 수 있었다. 또한 하중이 증가할수록 구상흑연주철에 있어서는 정상마모구간이 짧음을 알 수 있으나, 오스템퍼드 구상흑연주철에 있어서는 정상마모구간이 일정하게 계속 진행되어 감을 알 수 있었다. 즉 마모의 초기구간에서는 기계적 파괴마모에 의한 급격한 마모형태를 나타내었으나, 정상마모구간에서는 상대 재료의 마모분과 시료인 주철에서의 흑연이 고체 윤활제 작용으로 미끄러져 가는 미끌림 마모형태가 일어나는 것으로 사료 되었다. 경도는 금속재료의 대략적인 재질을 판정하는 가장 보편적인 항목으로서 Hoim-Archard 식¹¹⁾에 의하면 마모량은 마찰되는 두개의 재료중 경한쪽의 경도와 반비례하는 것으로, 한 예로서 화학성분의 조정으로 경도를 변화시킨 회주철의 퍼얼라이트 기지의 마모와 경도의 관계에 있어서 윤활의 유무에 관계없이 마모는 경도의 상승에 따라서 감소하므로Cr,

Cu등의 합금성분 첨가에 의하여 마모는 감소하게 된다. 이는 재료의 기지조직이 퍼얼라이트로 동일하게 되어 있기 때문에 C,Cu는 페라이트의 석출을 억제시키고 퍼얼라이트를 안정화 시키므로 동일한 탄소량으로 경도를 높게 함으로서 내마모성을 향상시키는데 유효하다.⁴⁾

따라서 Fig.11에서 나타낸 바와 같이 하중과 회전수가 증가함에 따라서 다소 마모량의 차이는 있으나 경도가 높은 재료일수록 마모량은 현저히 저하함을 알 수 있었다.

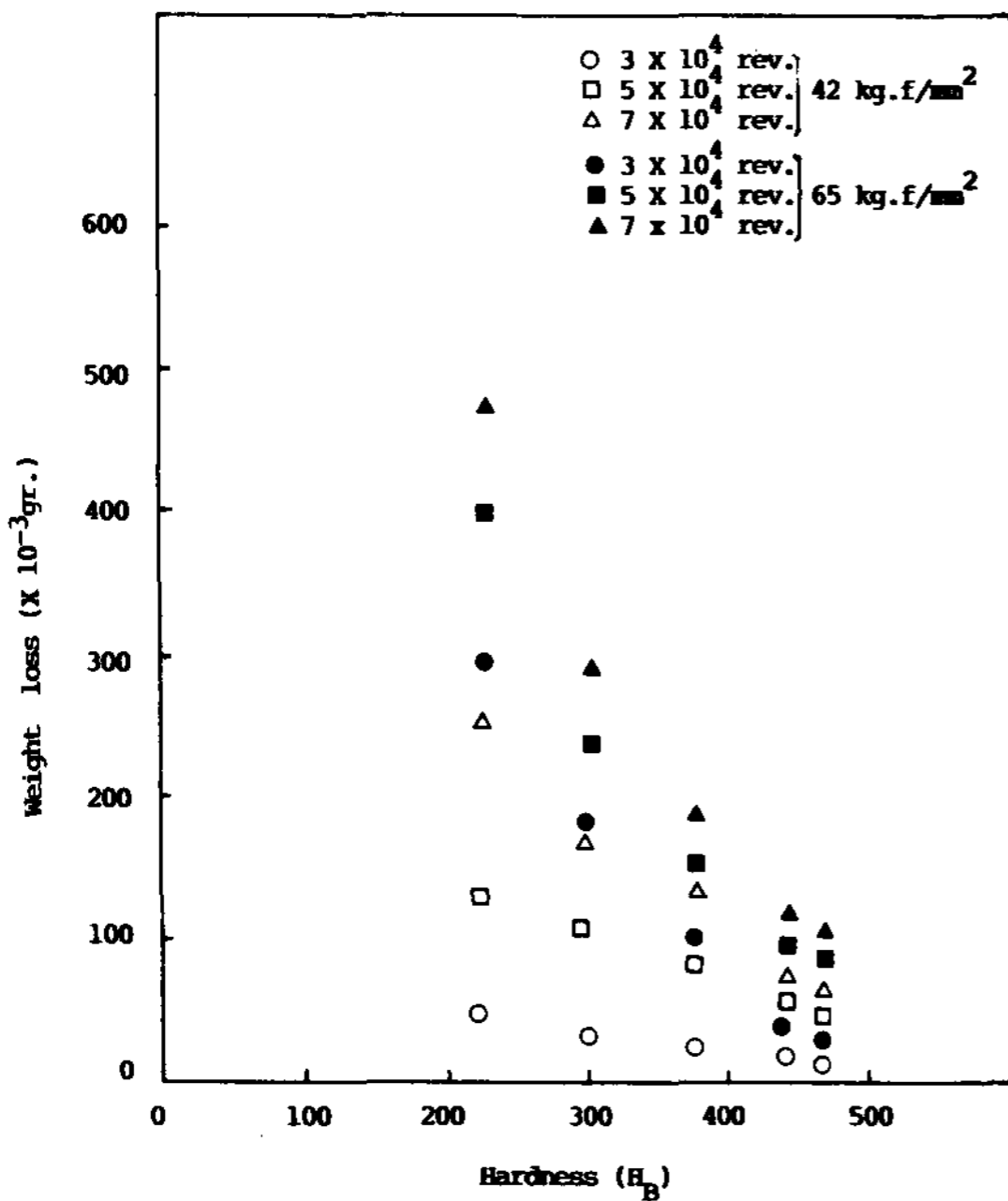


Fig. 11. Relation between weight loss and hardness (HB) for various specimens of ADI.

3.4 마모에 미치는 기지조직의 영향

페라이트의 석출은 경도의 저하를 초래함과 동시에 퍼얼라이트 보다 내마모성이 둔화되는 것으로 사료되며, 슬라이딩 접촉에서의 마모된 면에 소착부와 접촉부 사이에서의 응착부가 형성되면 기계적 파괴 마모의 형태를 나타내기도 하며, 또한 퍼얼라이트 중의 시멘타이트는 경하게 되므로 응착이 어려울 것이며, 건식마찰의 경우에는 소량의 페라이트가 존재하여도 내마모성은 저하하지만 윤활상태에서는 다소 페라이트가 존재하여도 마모량은 적어진다.

기지조직 내의 페라이트의 석출은 통상 흑연의

주위에서 부터 시작하여 퍼얼라이트와 함께 볼즈 아이 조직으로 되어 나타나며 Fig.12 및 Fig.13에서 보면 오스템퍼링 전의 볼즈 아이 조직을 가진 시료에 있어서는 하중과 회전수가 증가함에 따라서 마모의 정도는 현저하게 증가하였다. 이는 기지조직 내의 페라이트가 다량 함유되어 있어 마모량은 현저하게 증가함을 알 수 있으며 오스템퍼드 구상흑연주철에 있어서는 잔류 오스테나이트가 다량 함유 될수록 마모량은 증가하였다. 또한 기지조직이 상부베이나이트를 가진 시료에 있어서는 다량의 잔류 오스테나이트가 함유되어 있기 때문에 마모량은 증가되지만 하부 베이나이트가 나타난 시료에 있어서는 기지조직내에 잔류오스테나이트가 거의 없는 완전변태가 일어나서 아주 미세한 기지조직을 형성하고 있어서 마모량은 현저하게 저하 함을 알 수 있었다.^{12), 13)14)}

또한 기지조직내에 페라이트와 잔류 오스테나이트를 다량 함유하면 마모가 진행됨에 따라서 극심한 기계적 파괴 마모가 일어남과 함께 응착 마모가 극도에 달하여 심한 마모현상을 초래하였

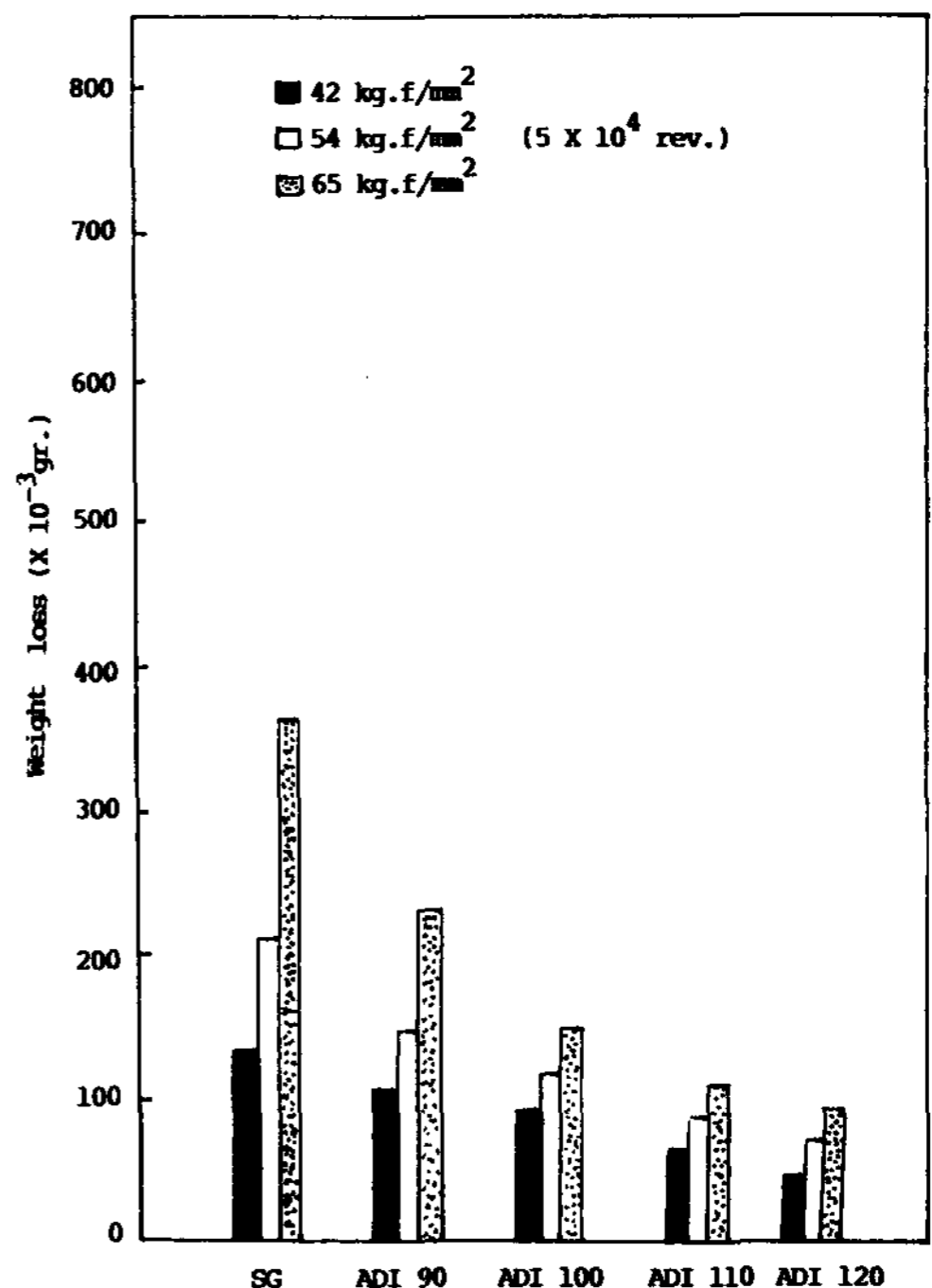


Fig. 12. Relation between weight loss and the number of revolution for structure of various specimens.

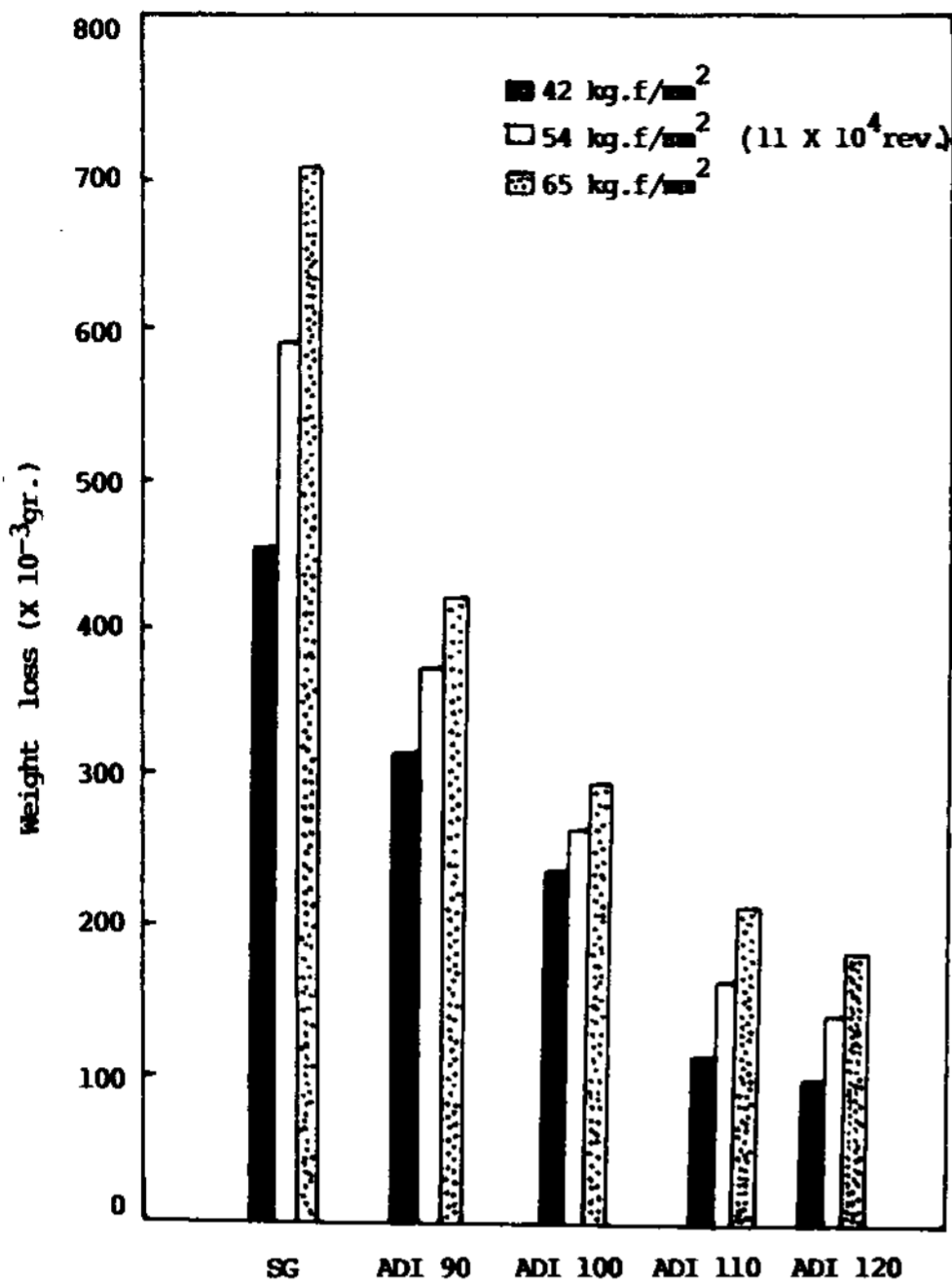


Fig. 13. Relation between weight loss and number of revolution for structure of various specimens.

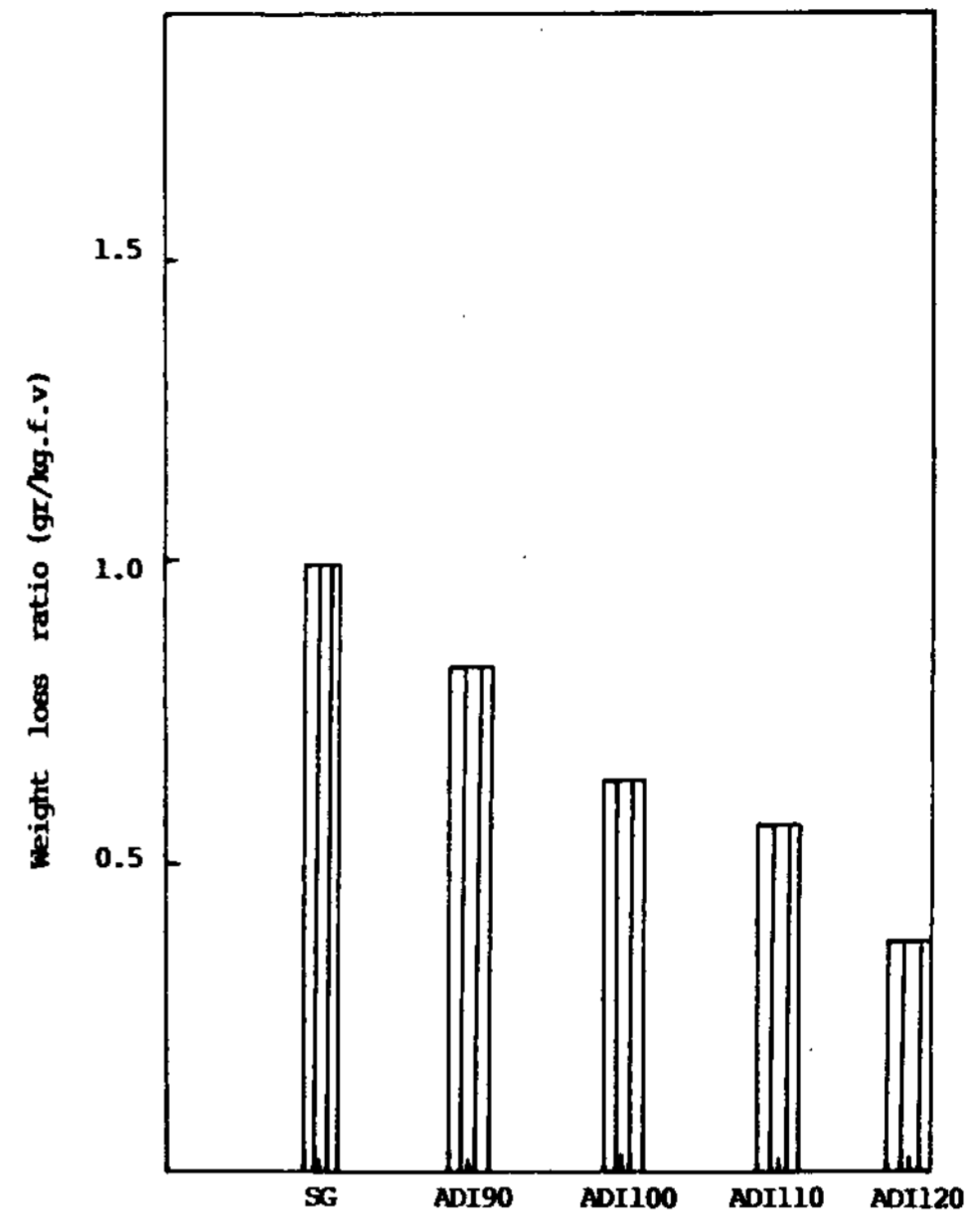
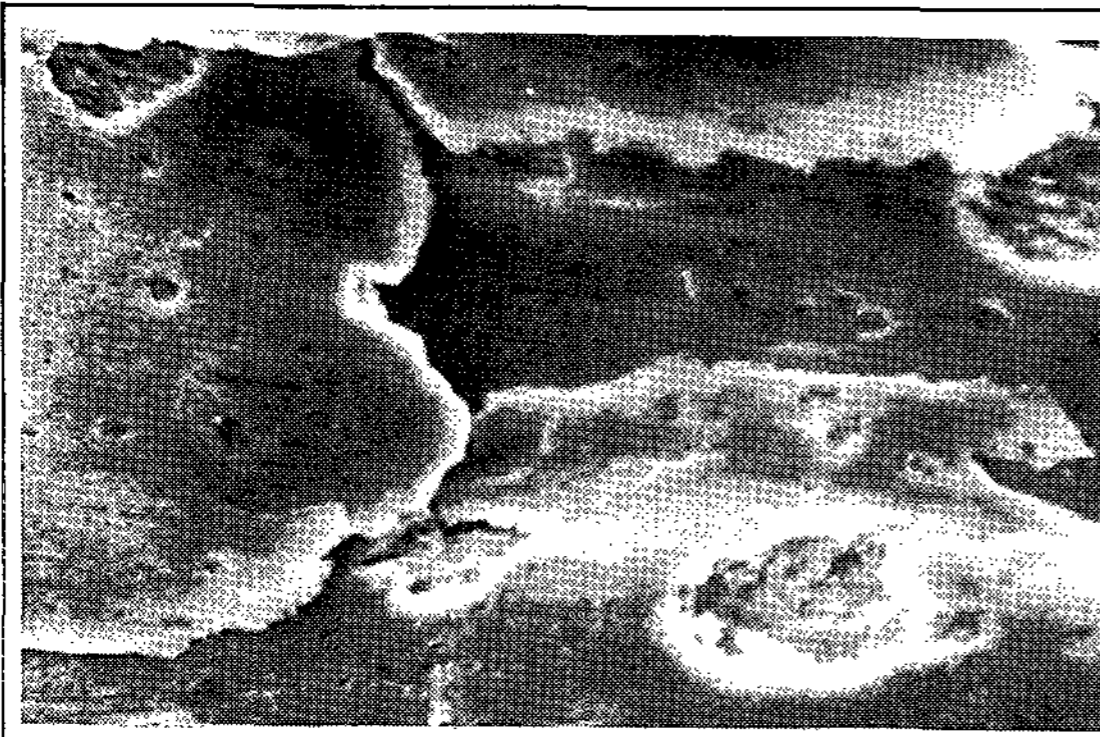
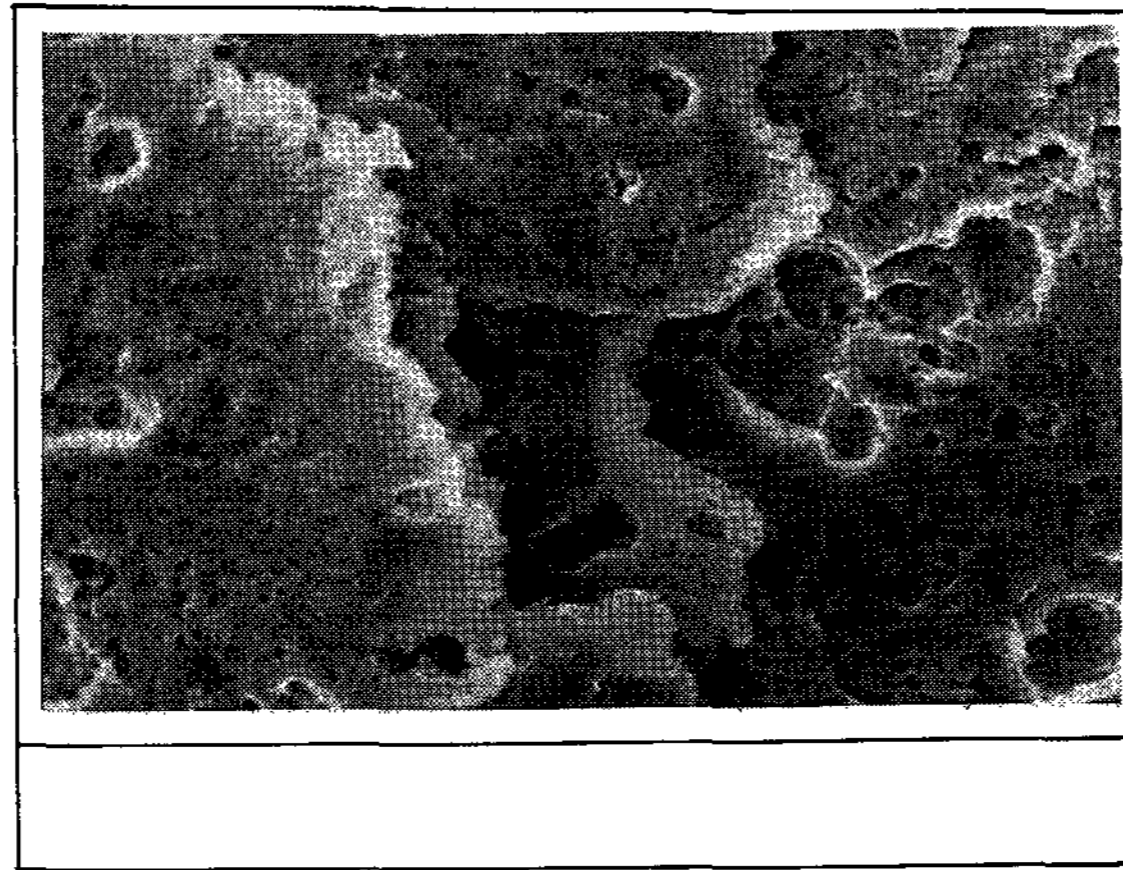


Fig. 14. Relation between weight loss ratio and various specimens of austempered ductile iron, maximum compressive stress 42 kg.f/mm²

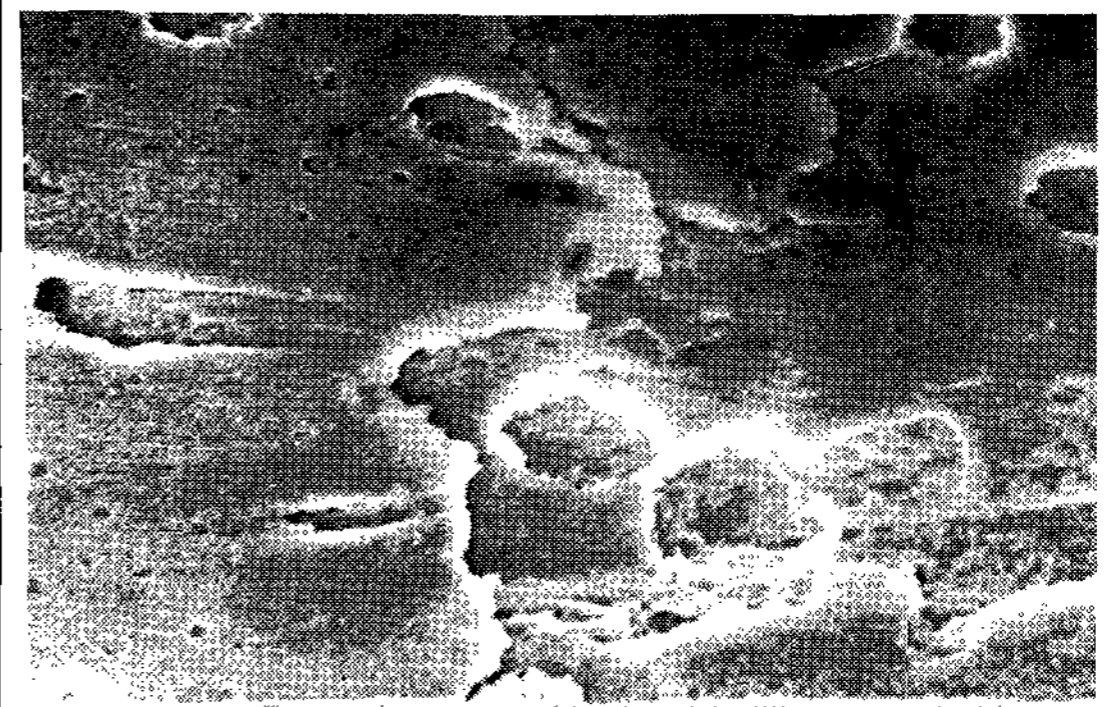
다. 그러나 아주 미세하게 형성된 베이나이트, 마르텐사이트 및 시멘타이트가 형성되어 있는 시료에 있어서는 약간의 기계적 파괴 마모만 있었다. 뿐만 아니라 단단한 기조직이기 때문에 응착 마모는 형성되지 않았다. 다만 마모가 진행됨에 따라서 주철조직중의 흑연이 고체 윤활제로서 작용하기 때문에 흑연이 윤활제로서 그 기능을 다 하면 다소 마모량은 생길 것으로 사료되었다. 1). 2). 3)

Fig.14는 최대압축응력 (σ_{MAX}) 이 42kg.f/mm²인 경우로서 50,000 회전 하였을 때 각 시료의 마모비를 나타낸 것이다. 즉 주방상태에 있어서 구상흑연주철(SG)의 마모비를 기준으로 하여 오스템퍼드 구상흑연주철(ADI)의 마모비를 비교하였다. 구상흑연주철(SG)에 비하여 ADI 110 이상은 약 50% 이하로 마모비가 감소하였다. Photo 3은 각 시료에 있어서 70kg의 최대압축하중으로 110,000 회전 후 관찰한 마모면을 나타내었다. 구상흑연주철에 있어서 마모가 진행됨에 따라서 기계적 파괴 마모가 일어나서 급격한 마모현상을 볼 수 있으나 오스템퍼드 구상흑연주철에 있어서는 기계적 파괴 마모가 아닌 상호 마

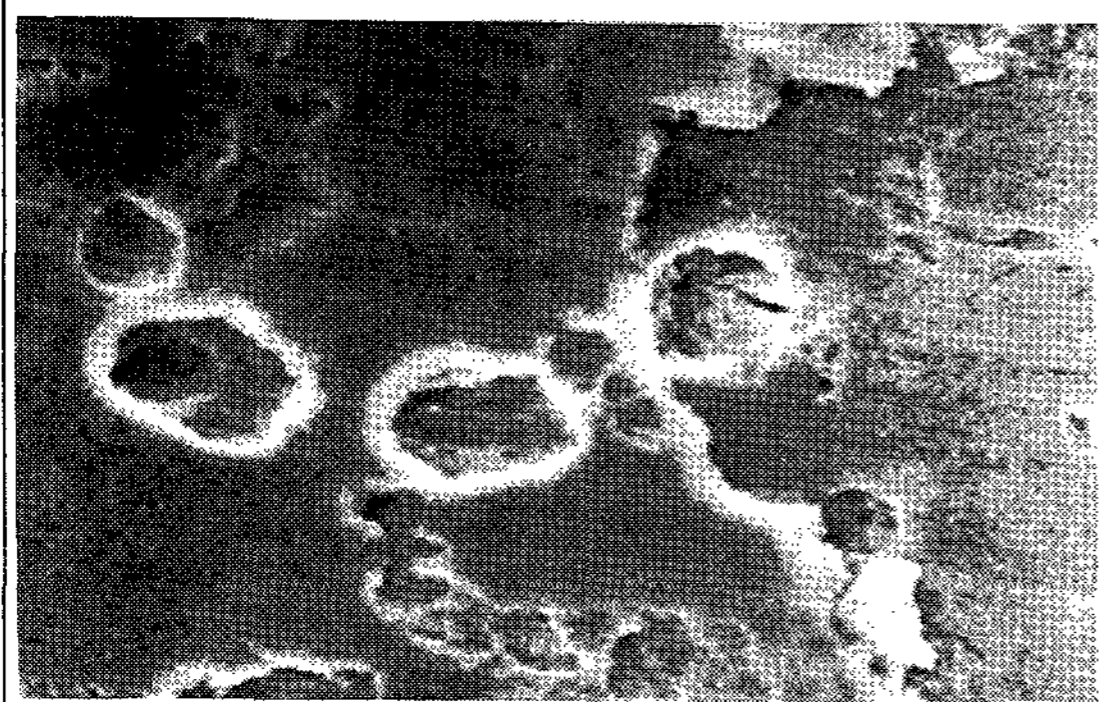
모분의 응착과 흑연의 고체 윤활제 작용으로 미끌림 마모가 진행되어 마모량은 현저하게 저하함을 알 수 있었다. Photo 4는 주사전자현미경으로 마모면을 관찰한 것으로서 주방상태의 구상흑연주철은 하중과 회전수가 증가됨에 따라 흑연이 빠져나와 고체 윤활제로 작용되었음을 볼 수 있었다. 또한 기반이 약한 기조직으로 인해서 흑연이 빠져나간 자리에서 피팅 현상이 발생하여 미소 균열로 전파되어 기계적 파괴 마모가 진행되었음을 알 수 있었다. 오스템퍼드 구상흑연주철에 있어서는 주방상태의 재질과는 달리 강한 조직으로 인해서 흑연의 고체 윤활제로서 강력하게 작용한 것을 볼 수 있었다. 또한 기조직내에 흑연의 양이 많고 미세할 수록 마모량은 저하되어 내마모성이 향상된 것으로 사료 되었다. Photo 4에서 마모기구를 보면 주철에서 흑연과 상대마모분이 마모기구로서 중요한 역할을 한 것으로 판단되었다. 즉 회전수와 하중이 증가함에 있어서 흑연과 상호마모분이 윤활제의 역할을 수행하면서 응고가 일어났을 때 흑연과 상대 마모분의 표면 균열에 의해서 깨어져 나가는 현상을 알 수 있었다. 15). 16)



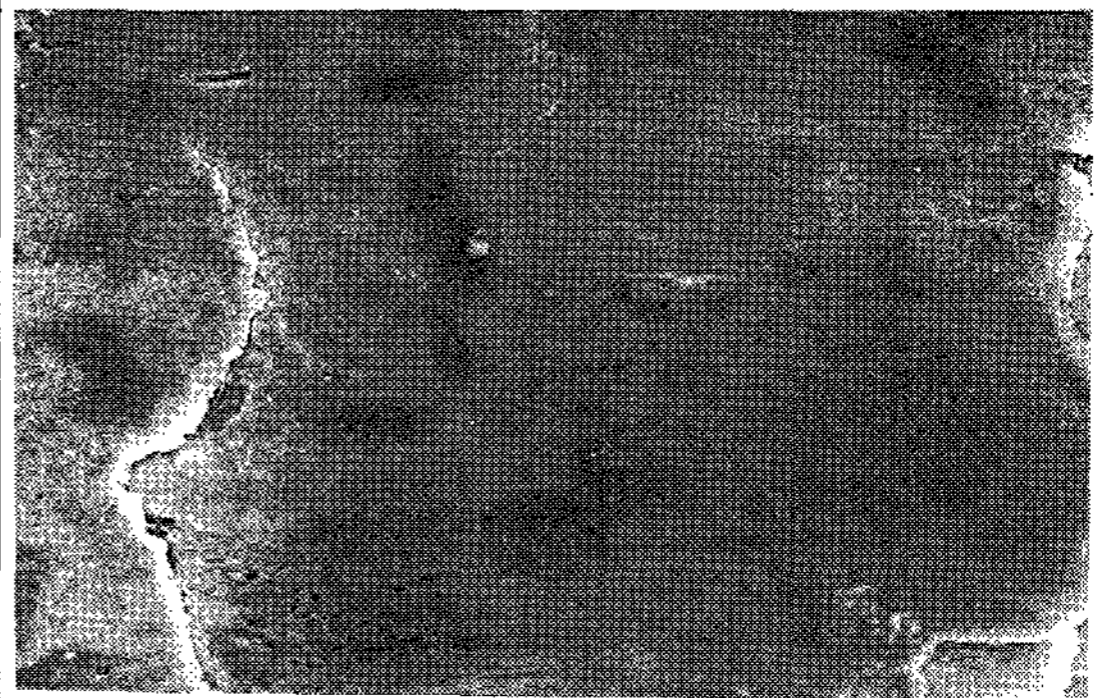
ADI 90



ADI 100



ADI 110



ADI 120

Photo 3. scanning electron micrographs showing wear surface for various specimens of (70kg, 11×10^4)

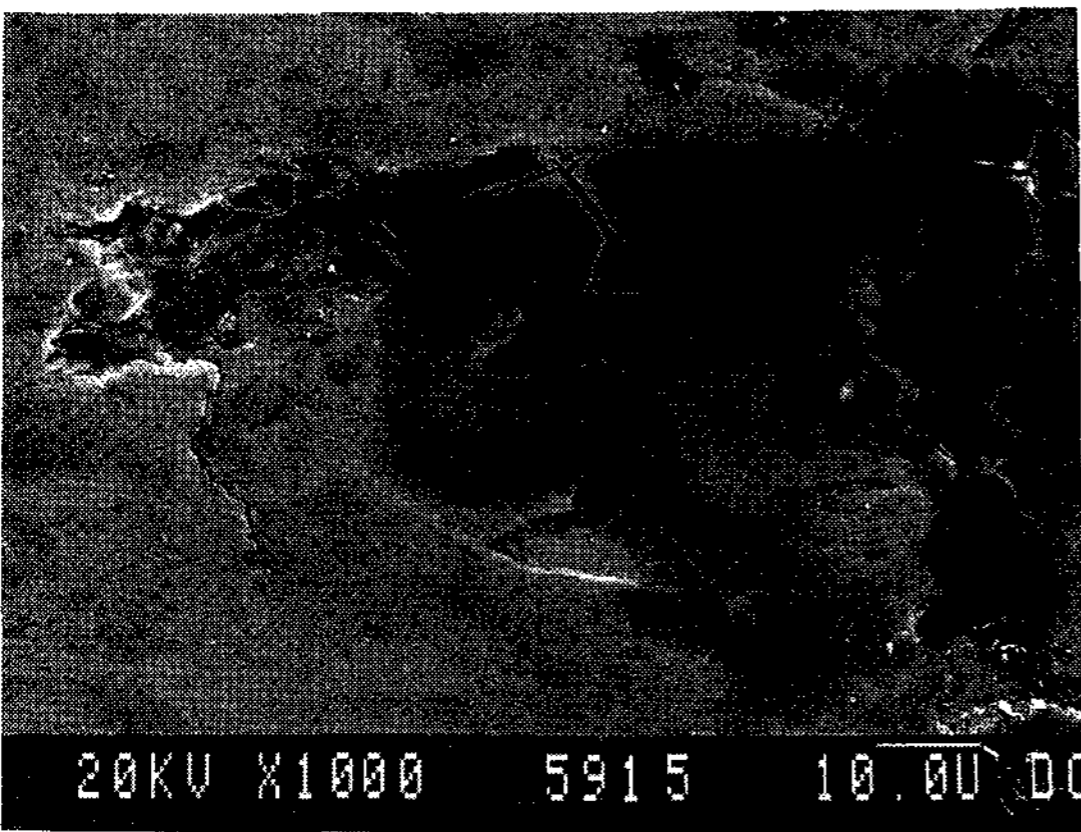
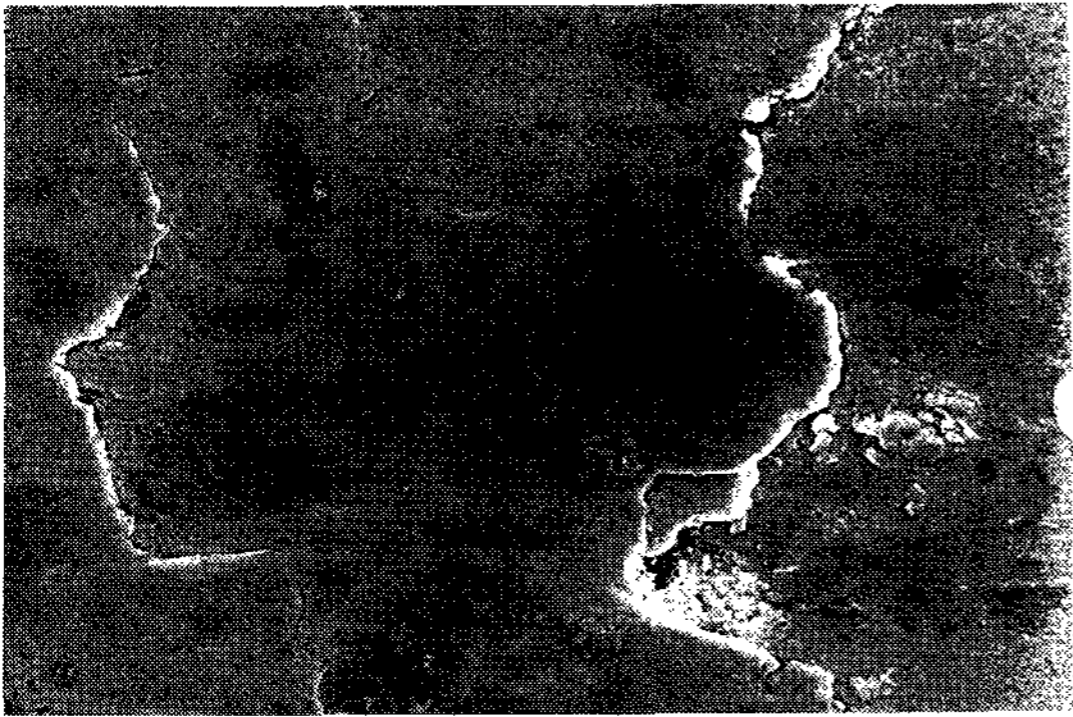


Photo 4 Macro structure of showing wear state for specimens of ADI 120, (70kg, 11×10^4)

4. 결 론

오스템퍼드 구상흑연주철의 마모 특성을 조사하고자 상대재로 고탄소강(S45C)을 사용하여 슬립을 9.09%로서 무윤활 건식조건 하에서 Amser 형 마모시험기에 의한 마모시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 구상흑연주철은 상대재인 고탄소강보다 30,000 회전 이상의 마찰에서는 마모량이 많으나, 오스템퍼드 구상흑연주철은 고탄소강 보다 마모량이 훨씬 적다.
- ② 구상흑연주철이나 오스템퍼드 구상흑연주철 조직 중의 흑연은 모두 고체윤활제로 작용을 하나 기지조직이 베이나이트 및 마르텐사이트로 된 오스템퍼드 구상흑연주철은 내마모성이 향상된다.
- ③ 마모에 미치는 기지조직의 영향은 기지조직 내에 페라이트와 잔류 오스테나이트량이 적

고 미세한 베이나이트 및 마르텐사이트 침상조직일수록 내마모성은 향상된다.

- ④ 구상흑연주철의 오스템퍼링 열처리 온도가 낮을수록 내마모성은 향상 된다.

후 기

본 연구는 1987년도 한국과학재단 연구비 지원에 의하여 수행된 연구의 일부로서 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Richard B. Gundlich and Jay F. Janowak : Metal Process, 5(1985) 92
2. E. Dorazil, B. barta : Technical University of Brno, 4(1982) 114
3. R. A. Haroing and G. N. J. Gilbert : The British Foundryman, 18(1986), 8
4. H. Jansen-IMMC Meehanite-ADI, Report No, E 1987
5. K. Takasawa : Quarterlre Reports, Railway Technical Rearch Institute, of Japan 3(1982), 23
6. J. Dodd : Giesserei, 65(1978), 4, 72
7. Z. Yicheng, et al : Gieserei, 67(1977), 71
8. Instruction manual of the Shimadzu-Nishihama metal abrasion testing machine, type 2, 5(1968)
9. N. Tenwick and S. W. Earles : Wear, 18(1971), 381
10. T. F. J. Quinn : Wear, 18(1971), 413
11. J. F. Archard : Journal of Applied physics, 981(1953)
12. A. P. Semenov : Wear, 4(1961) 12
13. E. Rabinowicz : Friction and Wear of Materials, John Wiley, Sons, Inc (1965) 142
14. M. Cockc : Wear, 9(1966), 4, 320
15. A. D. Lamb : British Foundryman, 69 (1976), 11, 279/280
16. D. G. Powell and S. W. Earles : SLE Trans. 15 (1972) 103