

技術資料

오스텨퍼드구상흑연주철

김윤복\*, 천병욱\*, 이종영\*\*

Austempered Ductile Cast Iron

Y. B. Kim, B. U. Chun, J. Y. Lee.

1. 서 론

구상흑연주철은 강도와 경도가 비교적 높고, 내마모성이 양호한 관계로 자동차, 산업기계, 공작기계 등의 부품소재로서 매우 광범위하게 사용되고 있으며, 편상 흑연을 갖인 회주철에 비해서 연성, 인성이 우수하지만, 강에 비하면 강도면에서 불리한 재료로 되어 있으나 이러한 기계적성질은 흑연의 형상 및 기지조직에 의해서 변화하게 되므로 구상흑연주철의 기계적성질을 개선하기 위하여 기지조직의 강화가 필요하다.

구상흑연주철의 기지조직을 강화시키는 방법으로서 Ni, Mo, Cu 등 합금원소를 첨가하여 개선하는 방법과 열처리에 의한 방법이 있다. 또 열처리방법으로서 austempering이 있으며, 이는 구상흑연주철의 기지조직을 상부 혹은 하부 bainite로 하여 강인하게 하는 방법이다.

일반적으로 구상흑연주철의 austempering처리를 행하는 몇가지 이유로서 치수변화가 적고 균열의 위험성이 없으며 내마모성, 강도 및 인성이 좋은 특성을 지니고 있기 때문에 이 방법을 실용화하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 그러나 구상흑연주철의 austempering에 의한 bainite화에서는 소재의 화학성분, 흑연의 형태 주조품의 두께와 형상등의 조건과 austenite화의 온도와 시간, austempering 온도와 유지시간등 많은 조건이 관계 된다. 현재 자동차용 부품소재로서 주목받고 있는 오스텨퍼드 구상흑연주철에 대하여 조직, 기계적 성질 및 공업적 성질 등의 여러가지 특성에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 조직

구상흑연주철은 다량의 탄소를 함유하고 있어 그 탄소가 대부분 구상흑연의 형태로 존재하고 있으며 이것이 austenite화로 가열중에 탄소의 저장소로 하여 기지조직에 탄소를 확산시킨다. 따라서 austempering 한 구상흑연주철의 기지조직은 침상 또는 판상의 bainite와 austenite와의 미세한 혼합조직으로 되어 있어 ferrite상의 형태와 austempering의 온도및 시간의 조건에 따라 변화한다. 따라서 오스텨퍼드 구상흑연주철은 austempering처리를 실시하여 기지조직을 상부 혹은 하부 bainite기지로 만들어서 고강도, 고인성의 구상흑연주철이 되게 한것이다.

구상흑연주철에 있어서 Mo, Ni, Cu는 CCT 곡선의 pearlite와 bainite의 생성구역을 장시간측으로 이동하기 때문에 이러한 합금원소의 첨가량을 증가시키면 기지조직은 ferrite+pearlite→ferrite+pearlite+bainite→bainite+martensite→martensite와 같이변화한다.

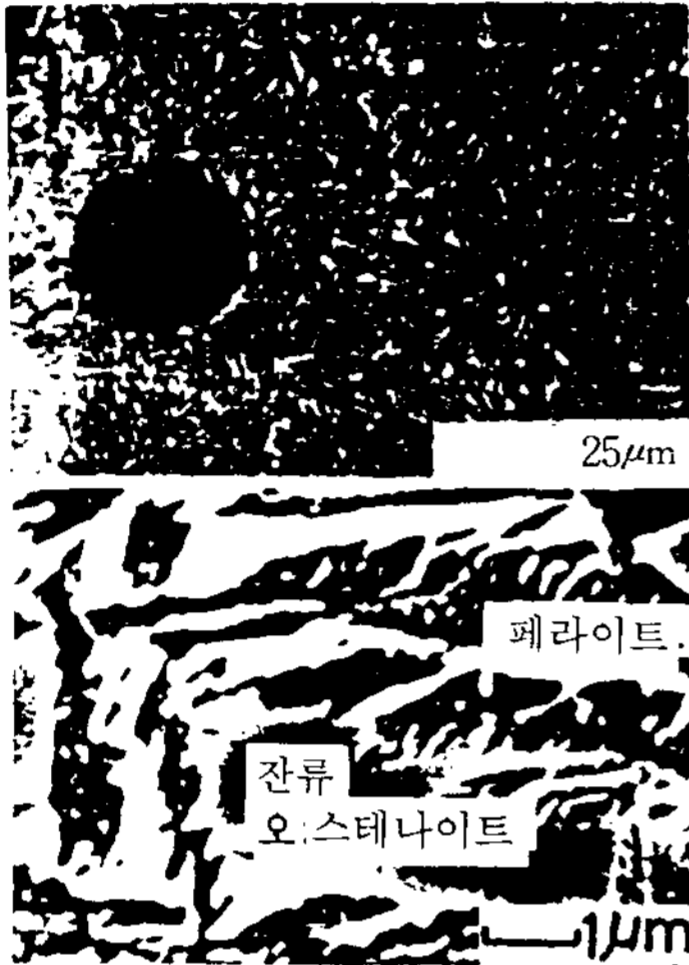
Mo를 증가시키면 pearlite의 형성이 양호하나 백색의 Mo탄화물이 공정셀 경계와 가지상에 석출한다. 또 각 조직이 혼재하고 있는 공정셀 경계부는 주위의 조직과는 다르기때문에, network상의 조직으로 되어 있는것이 많다. Mo는 기지조직을 bainite화 하는데 큰 효과가 있지만 탄화물 형성 경향이 강하고, 탄화물은 강인성에 악영향을 미친다고 생각되기 때문에 소량첨가 하는 것이 좋다. 고용Mo량은 공정셀 경계부에 높게 되어 있지만, 평균 0.1~0.15%이며 그외는 탄화물을 형성, 석출하여 잔류한다고 생각된다.

그림1은 austempering 처리한 bainite 조직이다. ferrite 와 잔류 austenite의 혼합조직으로 되어있다. 항온유지중에 austenite 입계 및 austenite-흑연계면에 대해서 ferrite가 핵생성하여 성장함에 따라서 과포

\* 동아대학교 공과대학

\*\* (주) 통일 제3공장

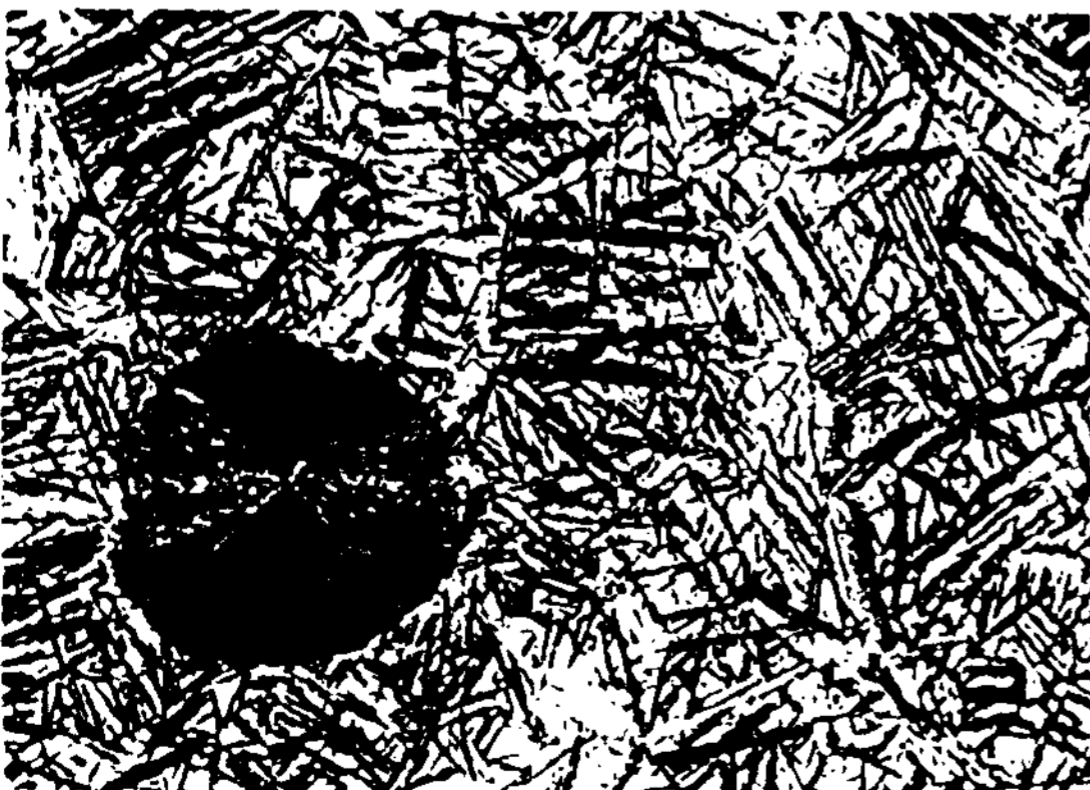
화한 탄소가 austenite중에 돌출된다. 주철에서는 고 Si로 인해서 탄화물의 형성이 억제되고, austenite는 탄소의 농축으로 인해서 안정화되고 그 후의 공냉 함으로서도 변태하여 잔류 austenite로 되고 이 현상은 탄소강에서는 나타나지 않으나, Si강에서는 동일한 형태로 나타낸다.



오스테나이트 875°C × 2h  
향온변태, 375°C × 2h

그림1. 오스템퍼드 구상흑연주철(ADI)의 조직

그림2 는 저온 austempering 온도( 약 235~330°C )에서 열처리 했을때의 하부 bainite가 형성된 조직사진이다.



오스테나이트 325°C

그림2. 하부 bainite 조직의 ADI (×500)

이는 acicular 혹은 매우 미세한 탄화물이 함유한 ferrite계상으로 구성되어 있다. 하부 bainite 기지조직을 가진 구상흑연주철은 매우 높은 경도값(Hv 500 이상)을 가지며, 1,200~1,600N/mm<sup>2</sup>의 인장강도로서 매우 강하다. 그러나 연신율은 1~3%로서 낮다.

그림3은 고온 austempering 온도에서 (약 370~450°C) 열처리 했을때의 조직사진이며, 상부 bainite가 형성되며 고탄소의 잔류 austenite로서 탄화물과 free ferrite가 산재한 우모상의 조직으로 구성되어 있다.

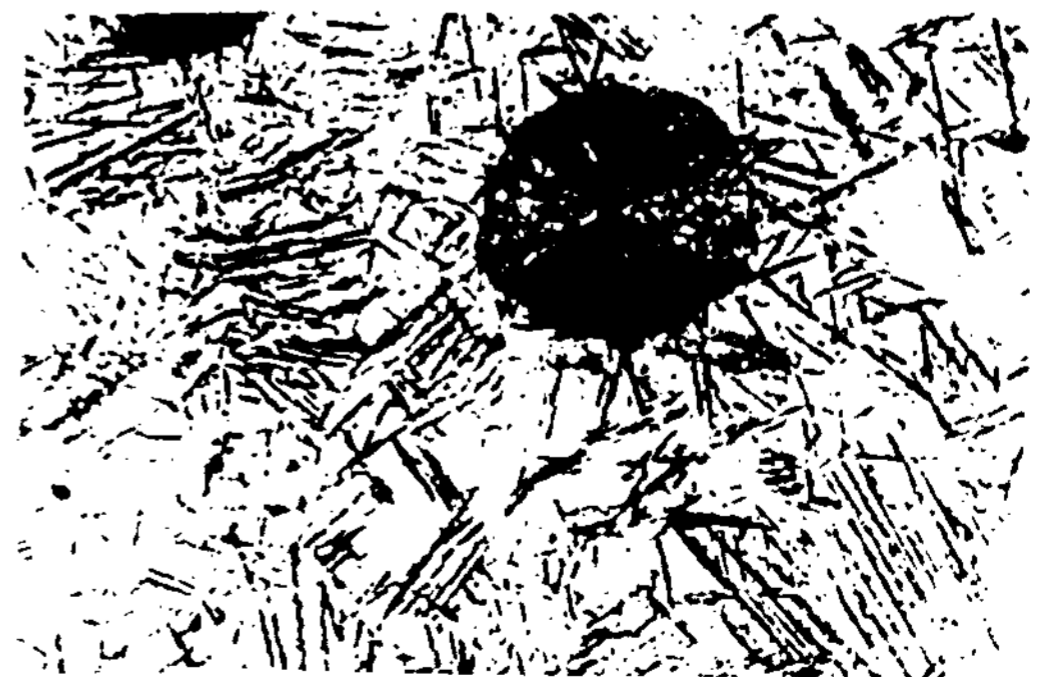


오스테나이트 375°C

그림3. 상부 bainite 조직의 ADI (×500)

상부 bainite 기지조직을 얻기위한 austempering 한 구상흑연주철(ADI)은 낮은 경도값 (280~320HB) 과 900~1050N/mm<sup>2</sup> 사이의 인장 강도를 가지며 6~12%의 높은 연신율을 가진다.

그림4는 중간 austempering 온도(약 330~370°C)에서 열처리 했을때 조직이다. Austempering 온도가 변화함으로써 조직이 변화하며, 판상의 ferrite계의 조직과 형태학적으로 두형태의 bainite조직을 구분하기란 매우 어렵다.



오스테나이트 350°C

그림4. 상부 및 하부 bainite 조직의 ADI (X500)2% nital

이러한 조직은 하부와 상부 bainite 계 조직으로 혼합되어 있다. 혼합 bainite 조직을 가진 ADI는 950~1250N/mm<sup>2</sup>의 인장강도와 3~6%의 연신율을 가진다.

### 3. 성질

#### 3-1 기계적 성질

종래 구상흑연주철에 비해서 오스템퍼드구상흑연주철(ADI)은 기지에 하부 bainite를 함유한 경우 인장강도 130~160kg·f/mm<sup>2</sup>, 연신율 2~4%로 매우 높은 강도를 얻을 수 있고, 상부 bainite의 경우에는 인장강도 90~120kg·f/mm<sup>2</sup>, 연신율 6~13%로서 고강도, 고인성을 얻을 수 있다. 또한 피로강도도 단강품에 유사한 30~40Kg·f/mm<sup>2</sup>정도를 얻을 수 있다.

인장강도, 항복강도, 연신율, 경도 및 충격치에 대하여 항온변태온도에 따른 변화를 그림5 및 그림6에 표시하였다. 이는 항온변태온도에 따라서 크게 변화함을 나타내고 있다.

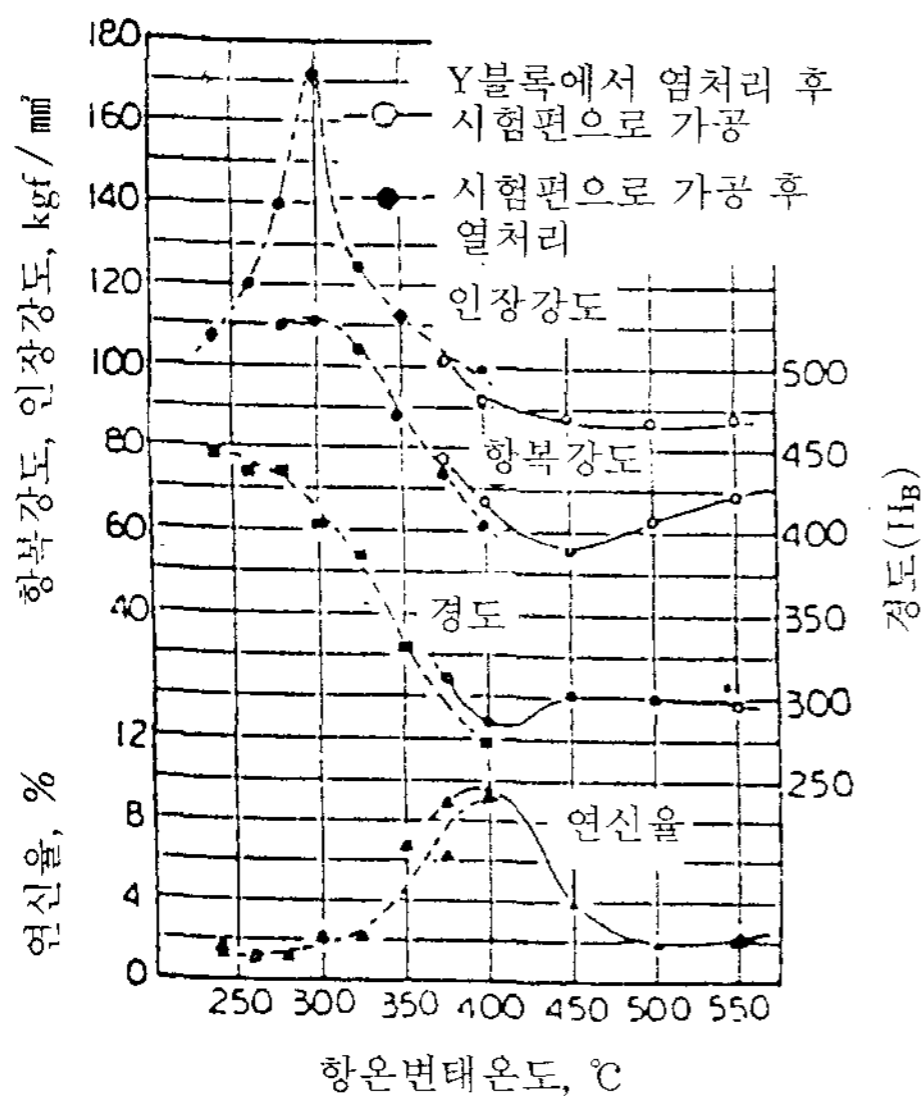


그림5. 기계적 성질에 미치는 항온변태온도의 영향

오스템퍼드구상흑연주철에 있어서 기계적 성질 및 잔류 austenite량에 미치는 두께 및 Mo량의 영향을 그림7에 표시하였다. 두께가 크게되면 그림7에 표시한 것과 같이 pearlite의 석출이나, Mo등의 합금

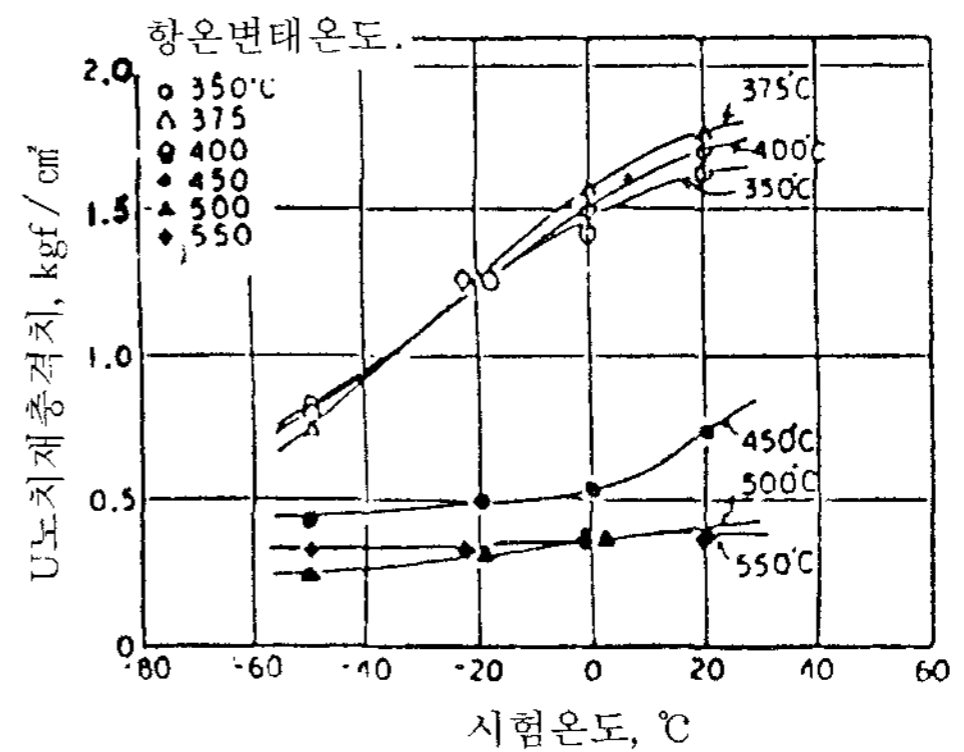
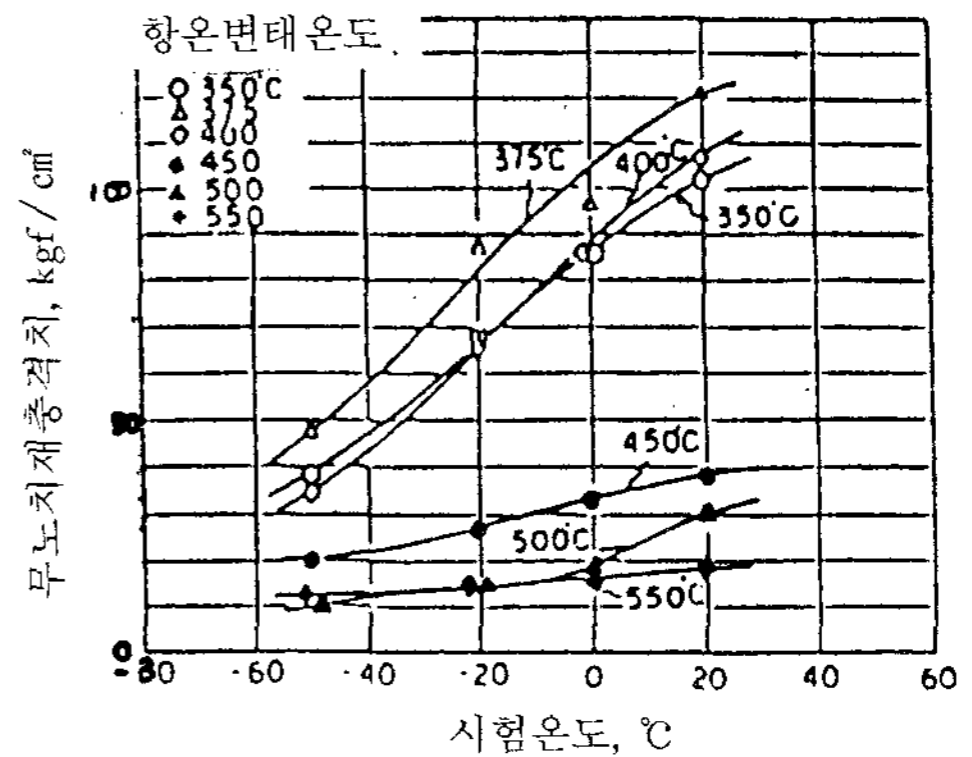


그림6. 충격치에 미치는 항온변태온도의 영향

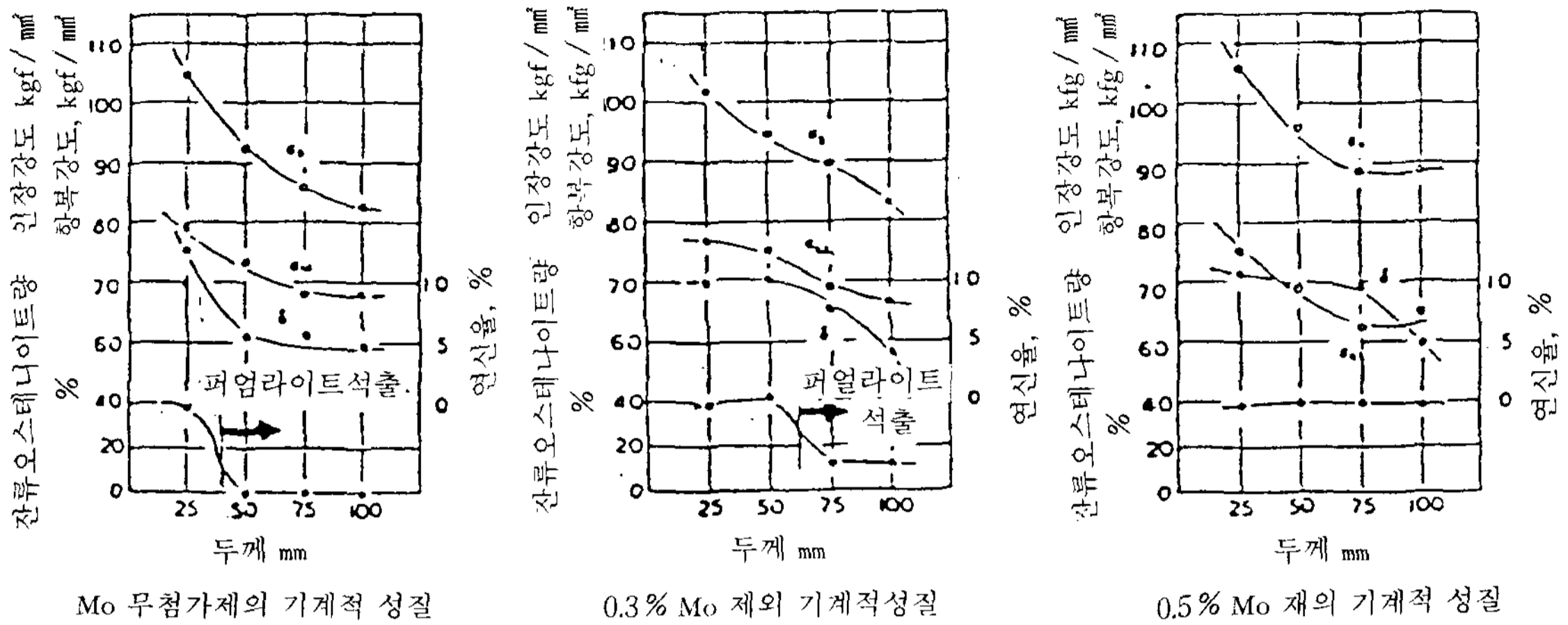
원소를 첨가하여도 두께가 두꺼운 곳에 따른 흑연립수의 감소등으로 인해서 연신율이 저하한다.

ADI의 피로강도는 그림8에 나타난 것과 같이 항온변태온도와는 거의 무관한 것을 나타내고 있으며 또한 기계구조용탄소강(SM35C)의 피로강도를 동시에 표시하지만 ADI의 것은 SM35C와 거의 동등하게 나타나 있고 또 쇼트피이닝처리를 행하면 양호한 결과를 얻을 수 있다.

구상흑연주철과 상부 bainite계 ADI의 인장강도와 연신율과의 관계를 그림9에 표시하였다.

또한 그림10에는 단강재와 ADI의 피로강도와 연신율과의 관계를 비교한 것으로 이중 ADI(U)는 상부 bainite 계, ADI(L)은 하부 bainite계를 표시한다. 따라서 단강재와 비교하여 충분한 피로강도를 얻을 수 있을 것이다.

-40°C까지 냉각하여 저온 상태에서 인장시험을 행한 결과를 그림11에 표시 하였다. 연신율과 항복강도는 점점 저하한다. 또한 -40°C까지 냉각한후에 실온에서 tempering를 행하여 인장시험을 행한 경우에는 거의 변화를 하지 않은것을 알수 있다. 또



Mo 무첨가제의 기계적 성질

0.3% Mo 제의 기계적 성질

0.5% Mo 제의 기계적 성질

그림7. ADI의 기계적성질 및 잔류오스테나이트량에 미치는 두께 및 Mo 첨가량의 영향 (항온변태 처리온도 375°C)

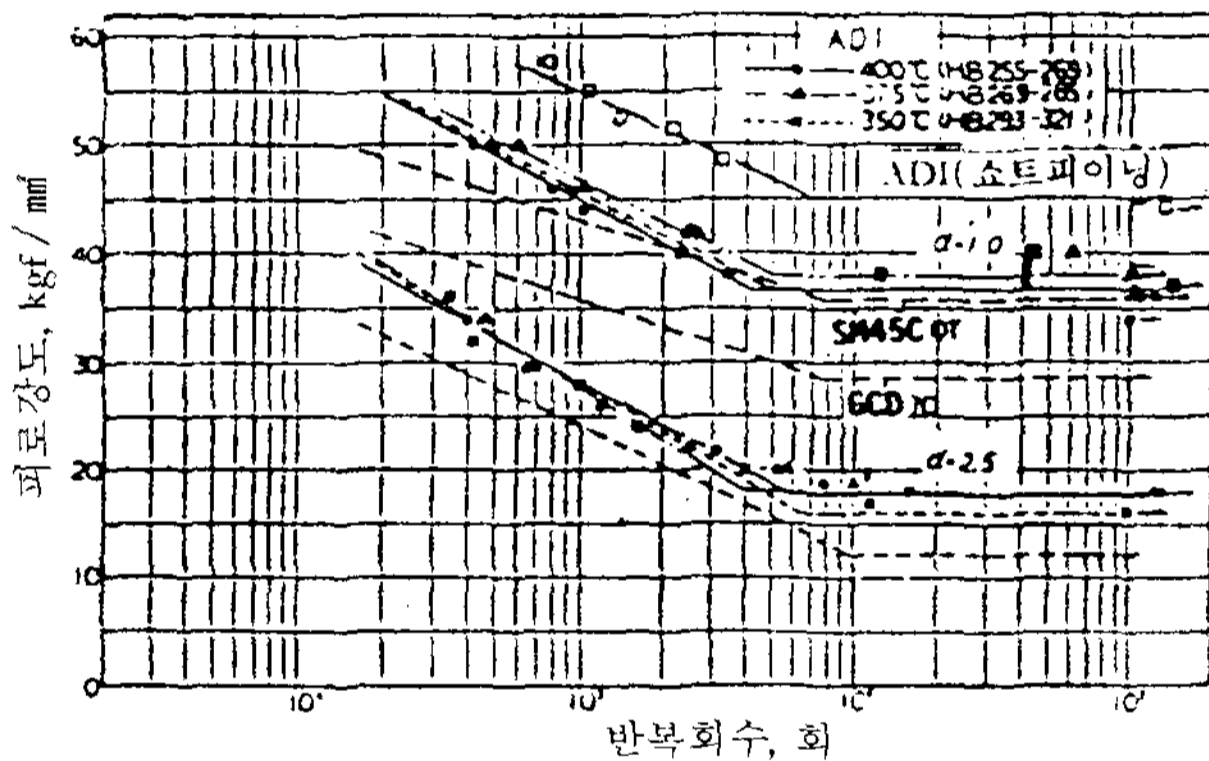


그림8. ADI, GCD 및 SM45C의 피로강도에 미치는 항온변태온도의 영향

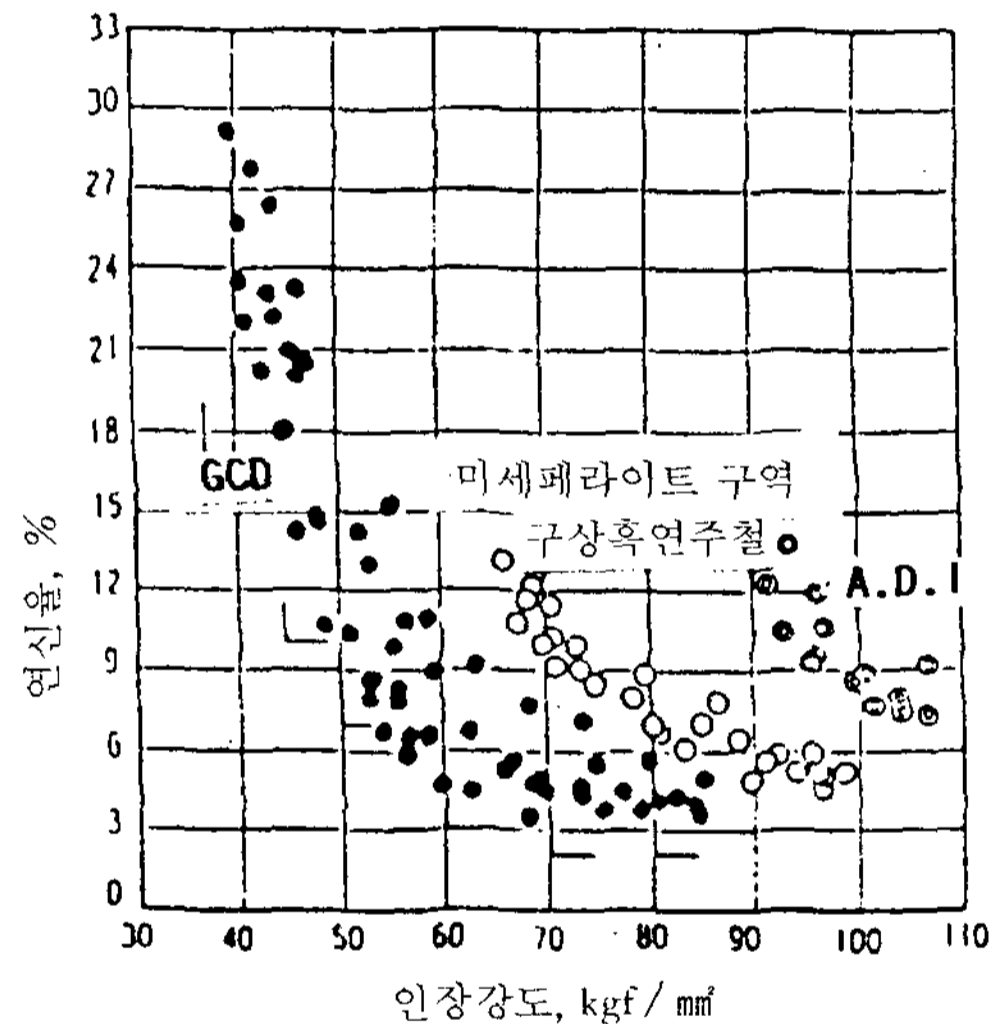


그림9. 각종 구상흑연주철에 있어서 인장강도와 연신율의 관계

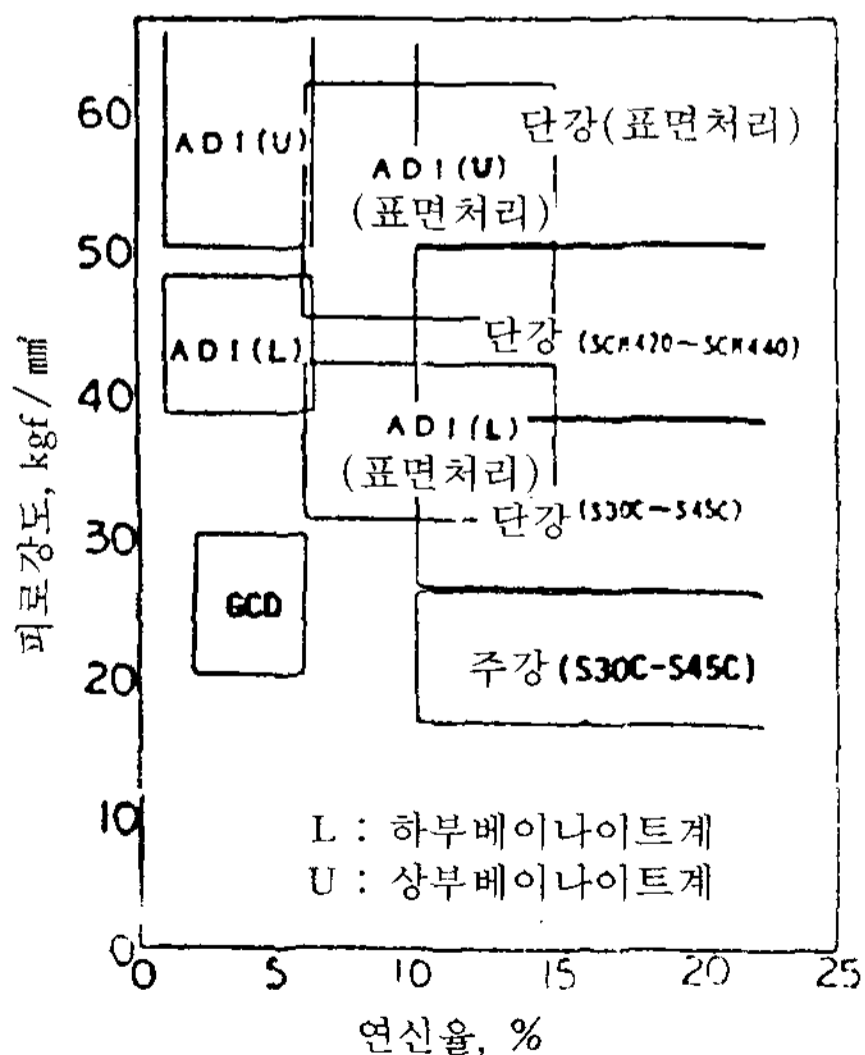


그림10. 각종재료에 따른 연신율과 피로강도와의 관계

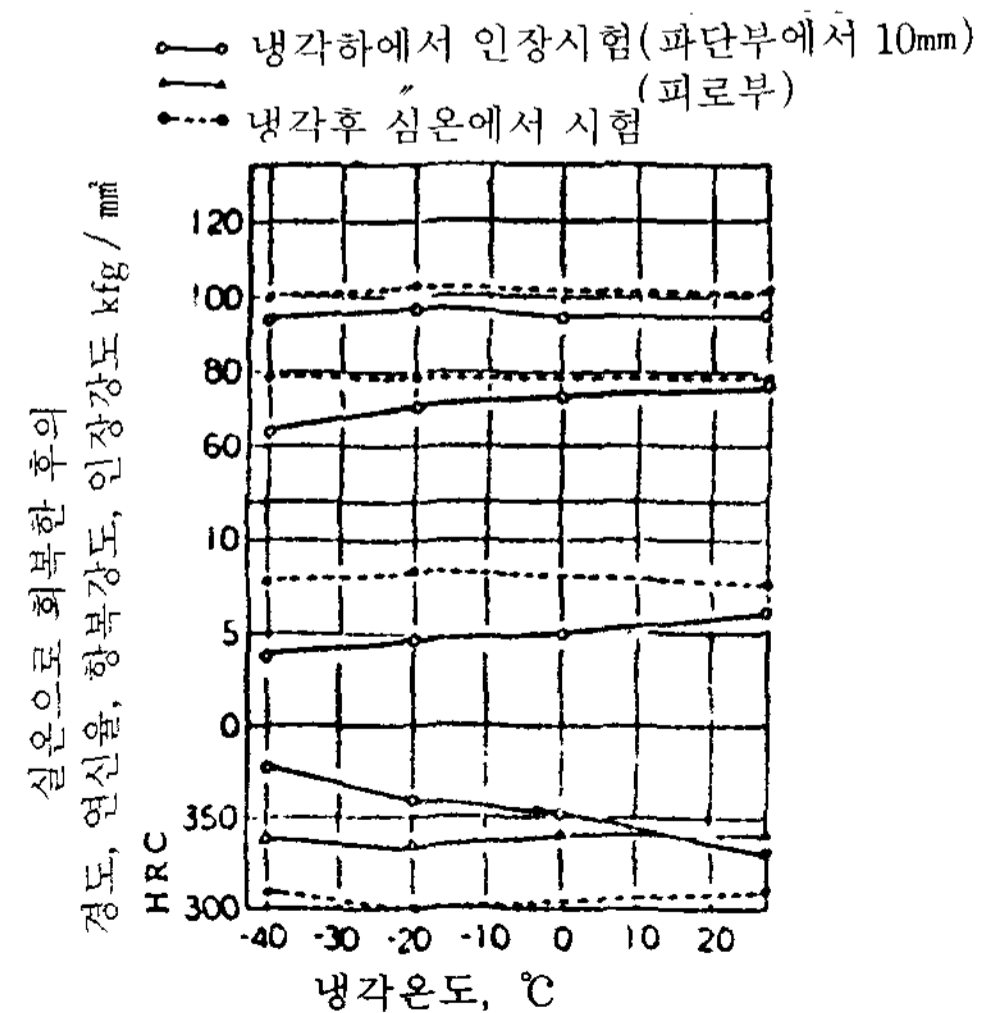


그림11. 기계적 성질에 미치는 냉각온도의 영향

한 그림 12 및 그림 13에서는 저온에서 냉각할 때의 잔류 austenite와 경도의 변화를 표시한 것으로, -50℃까지는 양자의 변화가 거의 보이지 않으므로 이 온도에서 안정한 것을 알 수 있다.

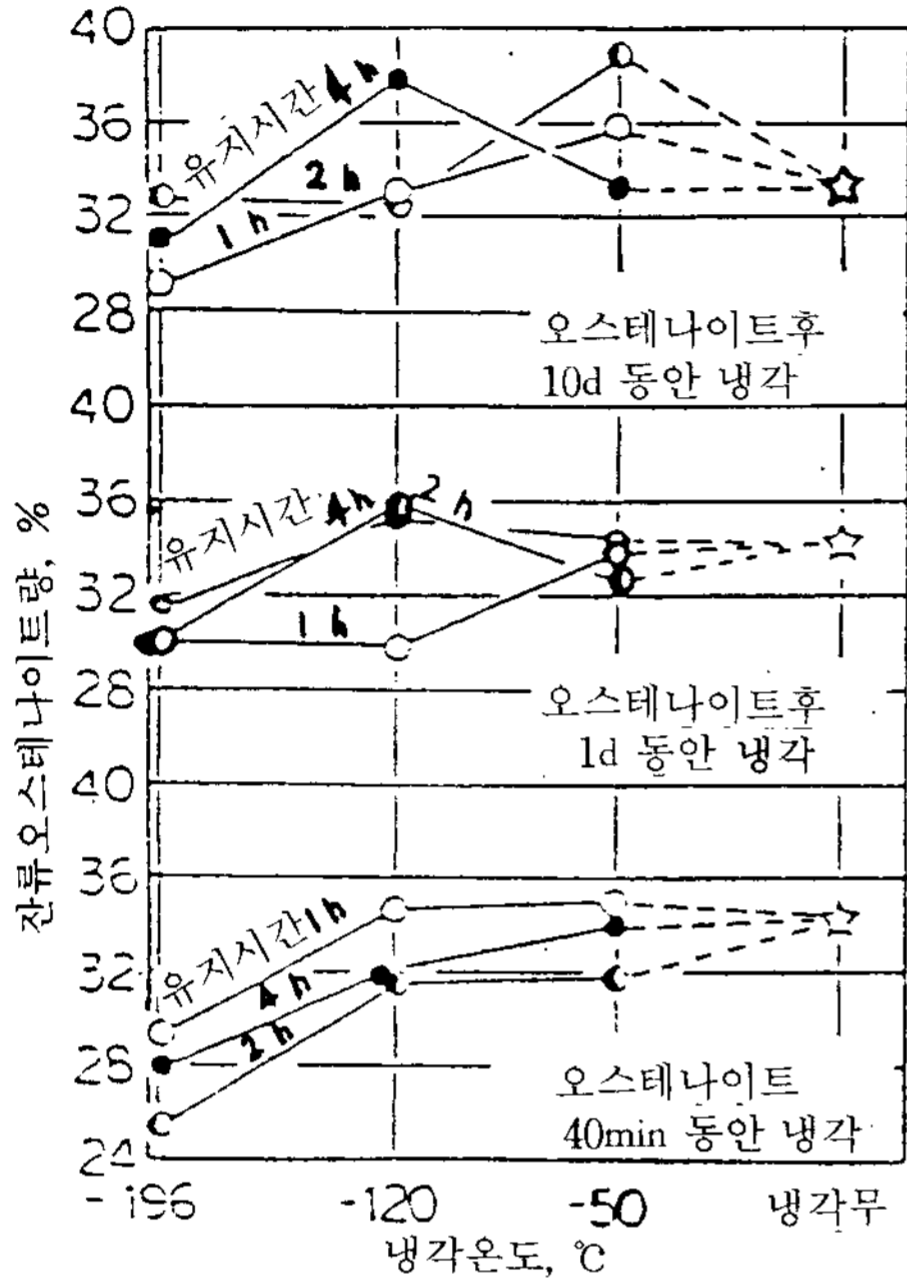


그림 12. 잔류오스테나이트량에 미치는 냉각온도의 영향

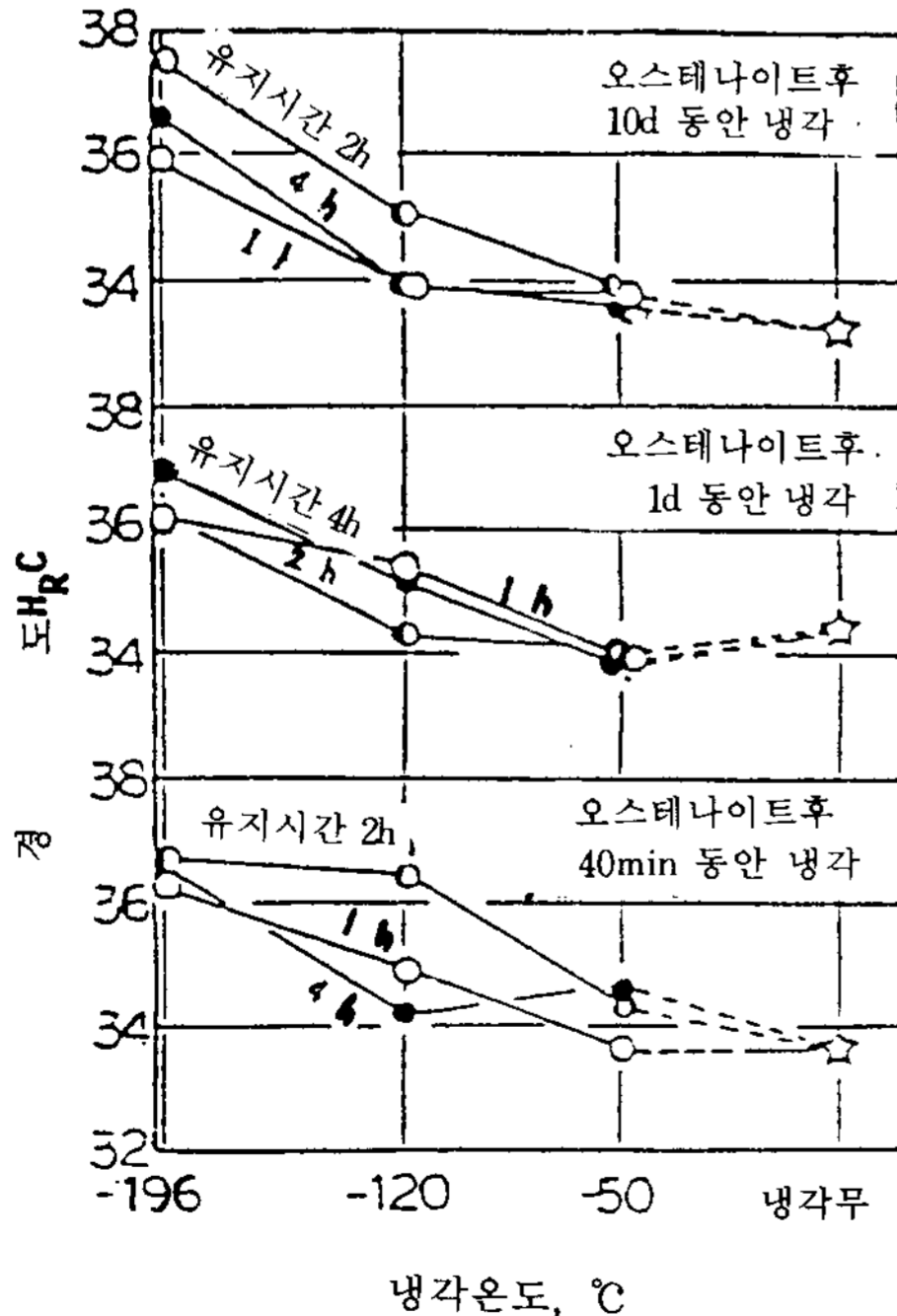


그림 13. 경도에 미치는 냉각온도의 영향

그림 14는 고온에서의 인장시험결과를 표시 하였다. 300℃까지는 인장강도, 연신율은 큰 변화를 나타내지 않지만 400℃에 달하면 양쪽의 성질은 고온에 도달한 후 실온까지 냉각하여 인장시험을 행하면 인장강도는 큰 변화가 없지만 연신율은 400℃를 초월하면 저하한다. 이것은 잔류 austenite가 400℃를 초월하면 변태가 일어나는 것으로 되어 있다.

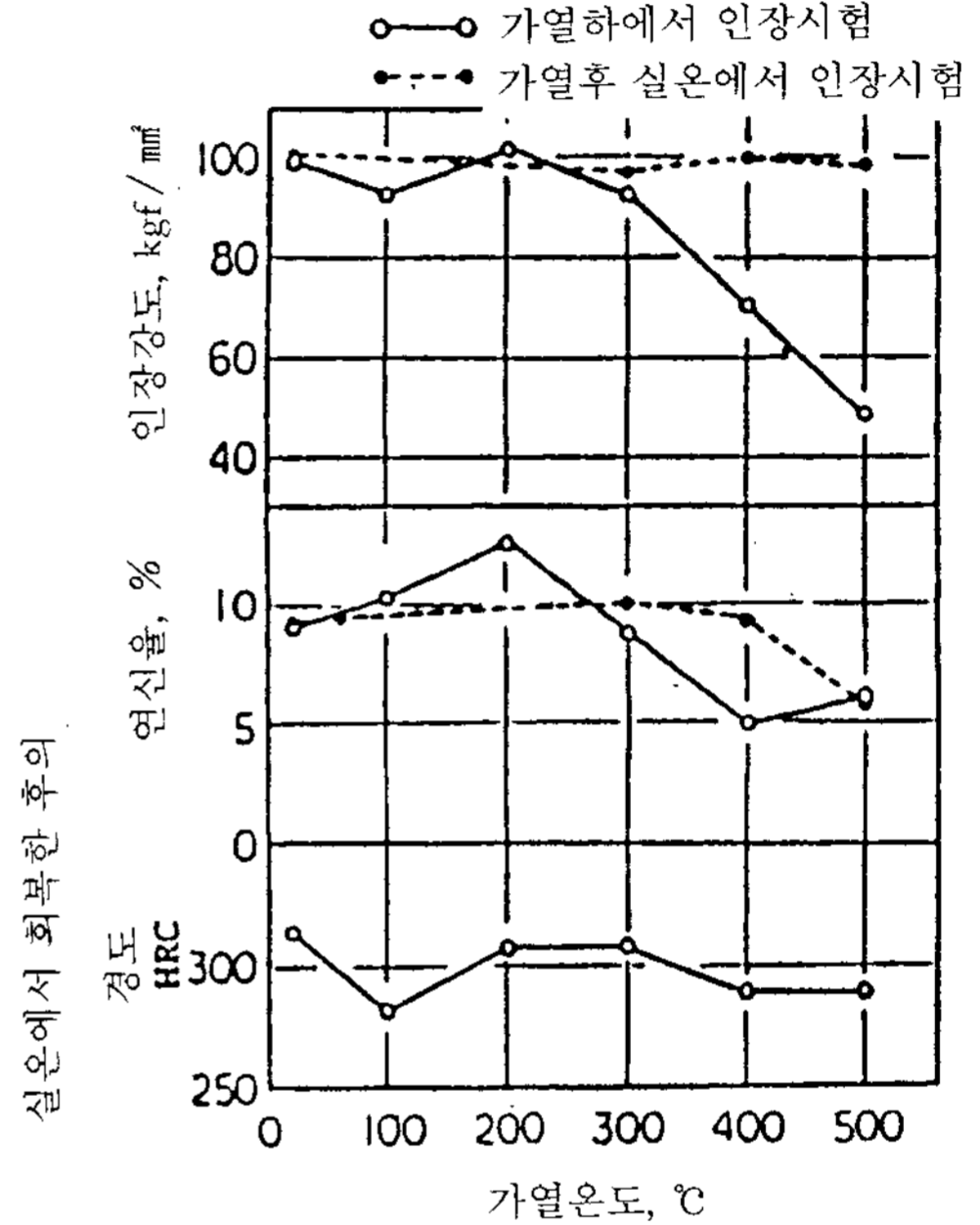


그림 14. 기계적성질에 미치는 가열온도의 영향

그림 15는 150℃에서 반복하여 가열, 냉각을 행한 경우의 잔류 austenite량과 경도의 변화를 표시한 것으로, 이 온도에서는 큰 변화를 보이지 않았다. 이 재질의 성질이 이 온도에서는 안정한 것으로 보인다.

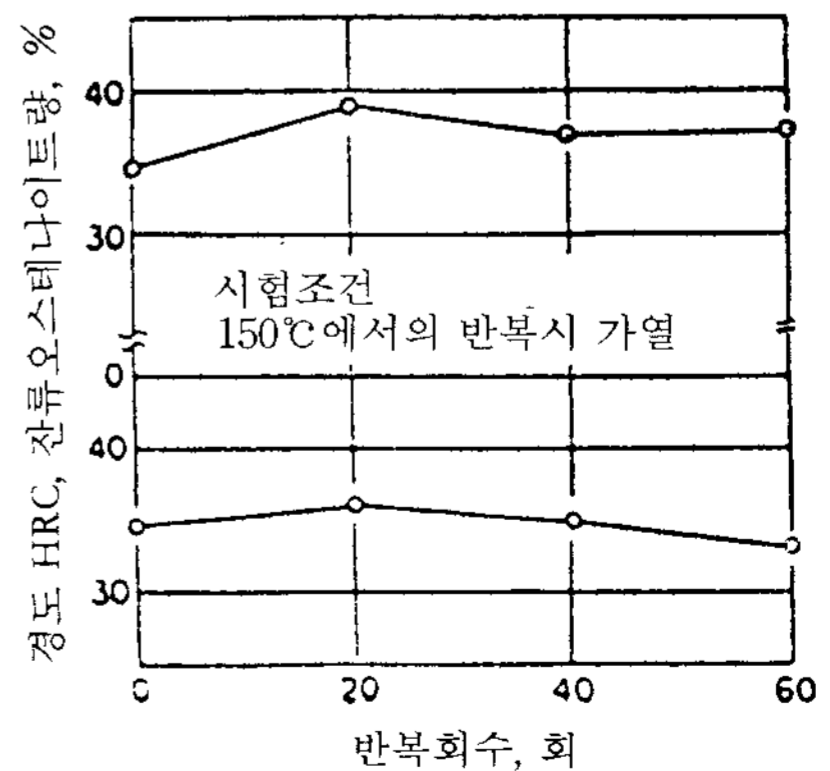
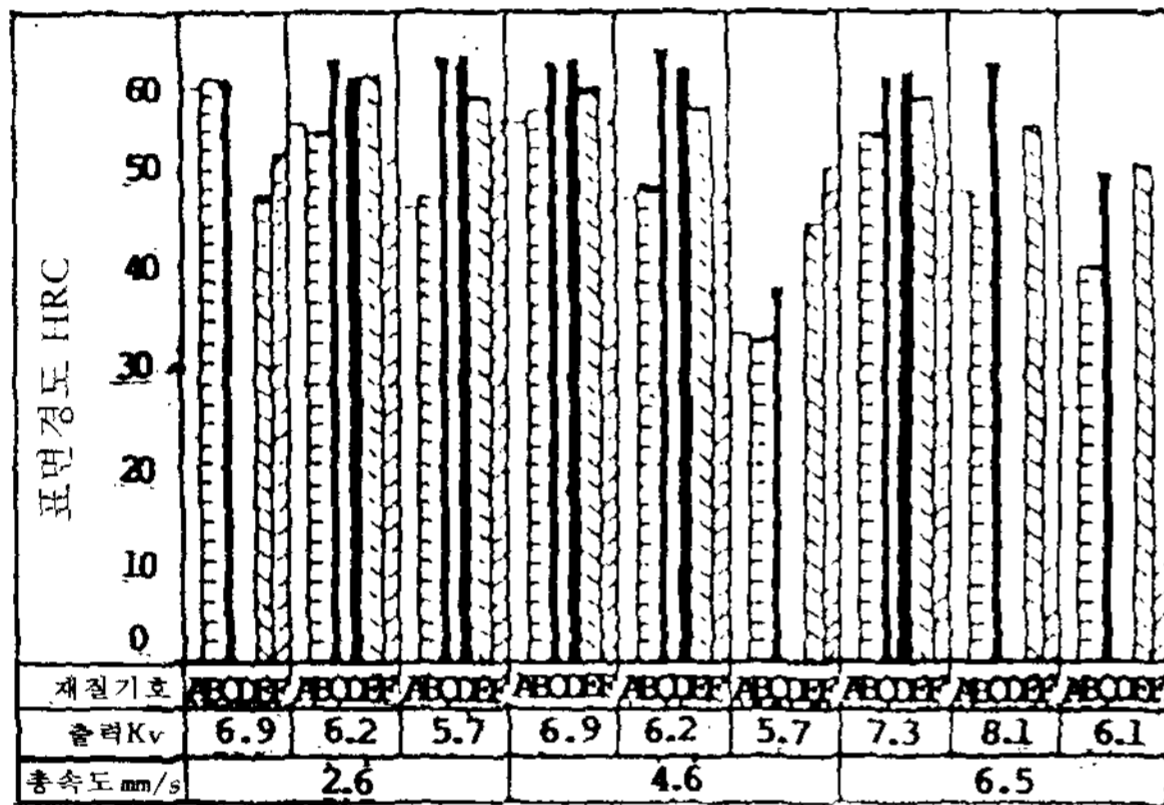


그림 15. 잔류오스테나이트량 및 경도에 미치는 가열 반복회수의 영향



3-2 공업적 성질

그림16은 ADI(0.3% Mo첨가제)의 고주파소입성을 다른 재료와 비교한 결과를 표시하였다. 소입의 깊이, 표면경도도 SM45C나, 기타 주철재와 비교하여 우수한 것을 알수 있다. 따라서 ADI는 다른 재료 이상의 큰 가공경화를 얻을수 있고, 내마모성이 향상하는 것으로서 소정의 고경도를 요구할 경우를 제외하고 고주파 소입을 필요치 않는것으로 생각된다.



A:GCD50, B:GCD60, C:GCD70, D:A.D.I. E:PMC60, F:SM45C

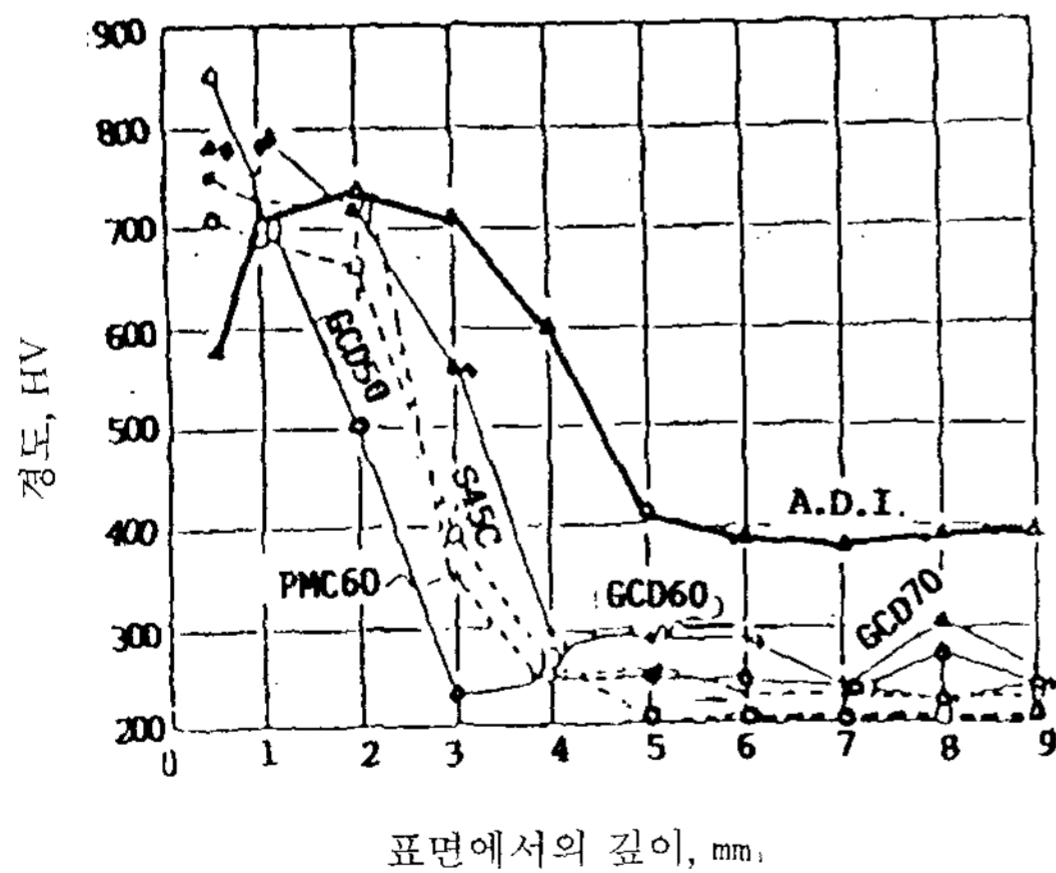
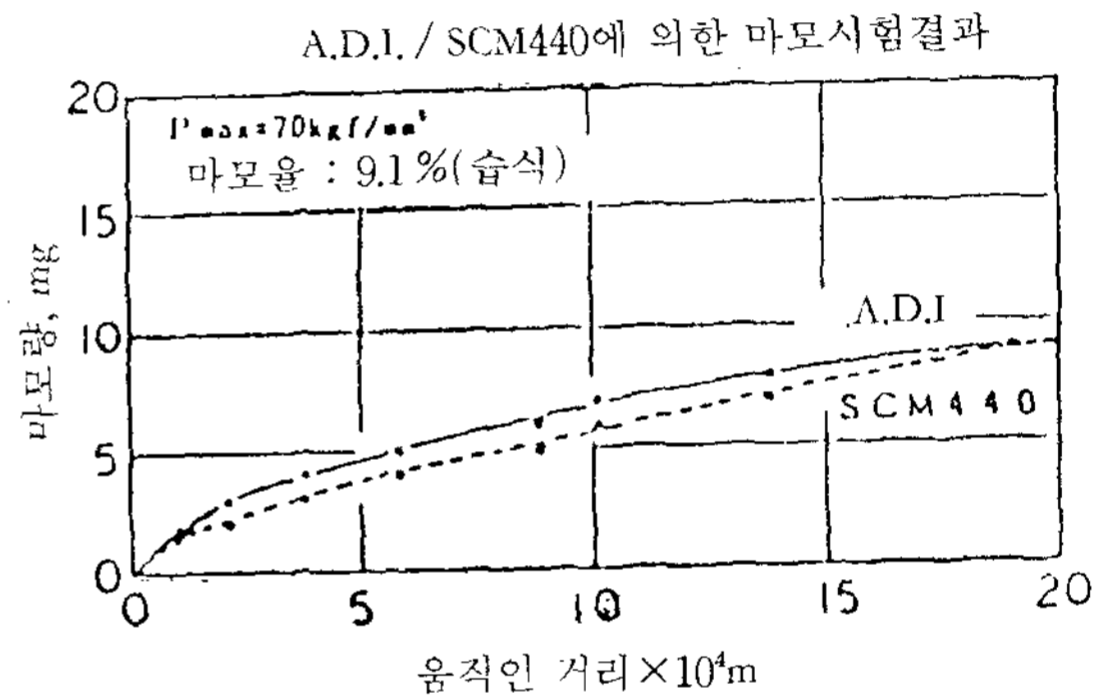
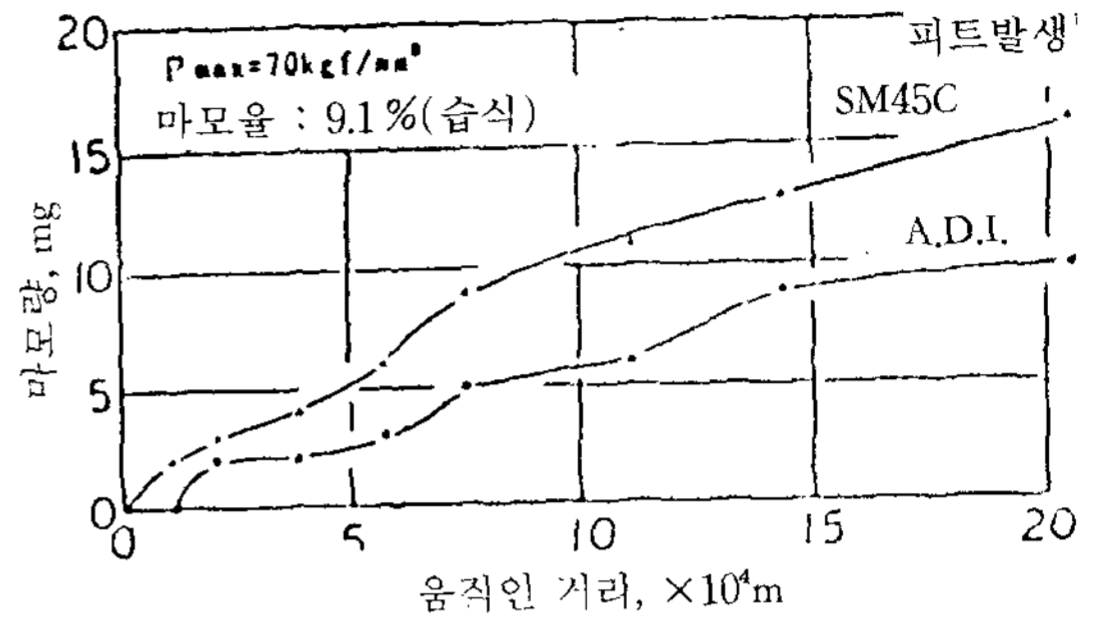


그림16. 각종재질의 고주파소입을 한 경우, 표면경도 및 소입된 깊이 비교

그림17은 西原式 마모시험기로서 시험한 결과를 표시하였다. SCM 조질재와 동등의 마모특성을 가지고 있는 것을 알수있다.

그림18에서와 같이 쇄석에 시험편을 작용시킬때

일어나는 마모에서는 경도가 낮은 상부 bainite계 ADI 보다 경도가 높은 하부 bainite계 ADI 쪽이 내마모성이 양호한 것으로서 그 상황에서는 그 재질의 선택을 필요로 한다.



A.D.I. / SM45C에 의한 마모시험결과  
그림17. 서원식 마모시험기에 의한 마모 비교

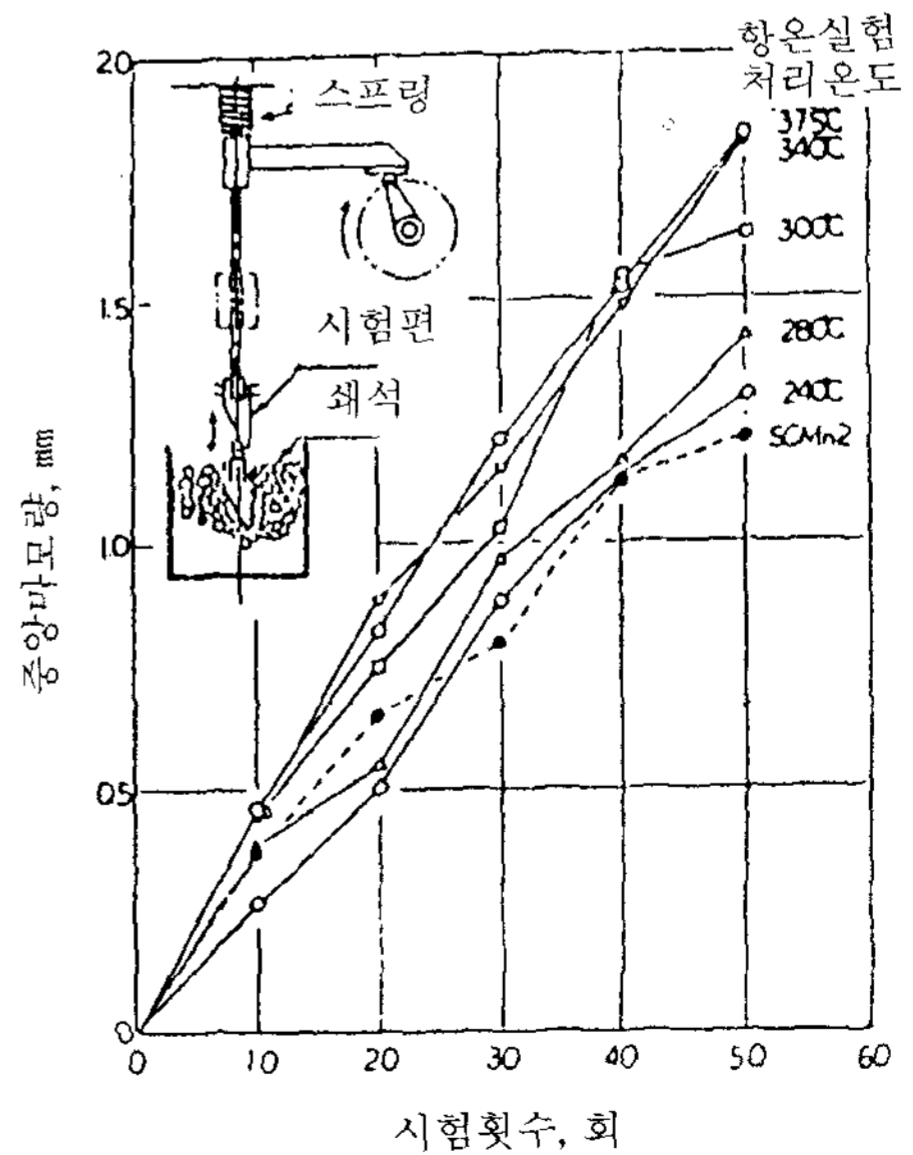


그림18. 쇄석 분쇄에 의한 마모

그림19는 절삭저항의 비교를 나타냈다. 다른 재료와 비교해서 높은 값을 나타내고 있다. 이것은 경도가 높은 것과 가공경화에 기인되는 것이라고 생각된다. 그렇지만 주물의 형상의 자유도를 생각해서 절삭부가 작게 되지 않게 하는 쪽보다 전체적인 가공비를 낮게 조절하는 것이 옳다고 사료된다.

재질	경도 H <sub>B</sub>	절단저항(kgf)			
		주분역	승분역	배분역	합력
ADI	262	91	55	37	112
ADI	285	100	62	36	123
ADI	302	101	75	43	132
GCD 80	285	49	51	31	107
SM45QCT	243	102	52	29	111
SCM35QCT	269	103	55	33	121

선삭시의 절삭저항

재질	경도 H <sub>B</sub>	절단저항	
		Torque(kgf.cm)	Thrust(kgf)
ADI	262	37	96
ADI	285	37	94
ADI	302	40	95
GCD 80	285	32	40
SM48CQCT	244	45	96
SCM35QCT	253	46	91

드릴링시의 절삭저항

그림19. 각종 재질의 절단저항 비교

표1에 단조제품에 대하여 ADI로 대체하여 사용한 경우의 가공시간과 공구비의 증감을 표시했다.

또한 절삭분을 그림20에 나타냈다. ADI의 절삭분은 통상의 구상흑연주철과 동일한 양상의 불연속적이고 가공의 마찰에 강재의 절삭분과 같이 완만하게 되고 가공의 무인화에 적당한 재료로 되고 있다.

표1. ADI를 단조제품의 대체제로써 사용한 경우의 가공시간 및 공구비 증감

공정의 종류	정미가공시간(%)				공구비(%)			
	증	0	-10	-20	증	0	-2	-4
1. 샌타가공	●				●			
2. 선삭	●				●			
3. 드릴				-9				●
4. 탭				-3				●
5. 보링				-4				●
6. 프레이즈	●							●
합계				16%감				18%감

그림21에는 ADI와 종래의 구상흑연주철을 압연할 때의 압하율(압연후의 판두께 / 압연전의 판두께)과 경도와 관계를 표시하였다. ADI의 높은 가공경화성을 나타내고 있다. 이는 잔류austenite의 martensite 변태가 일어나는 것으로 생각된다.

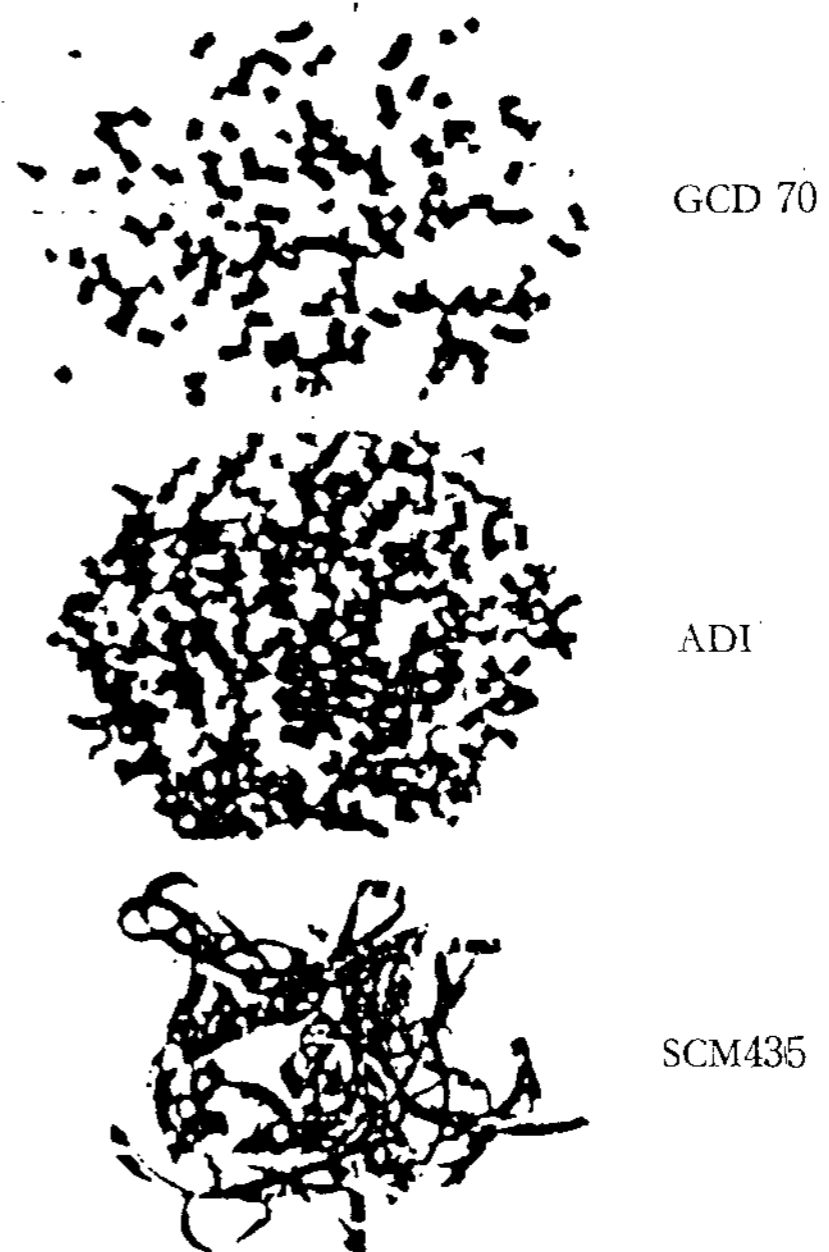


그림20. 각종 재질의 절삭분 비교

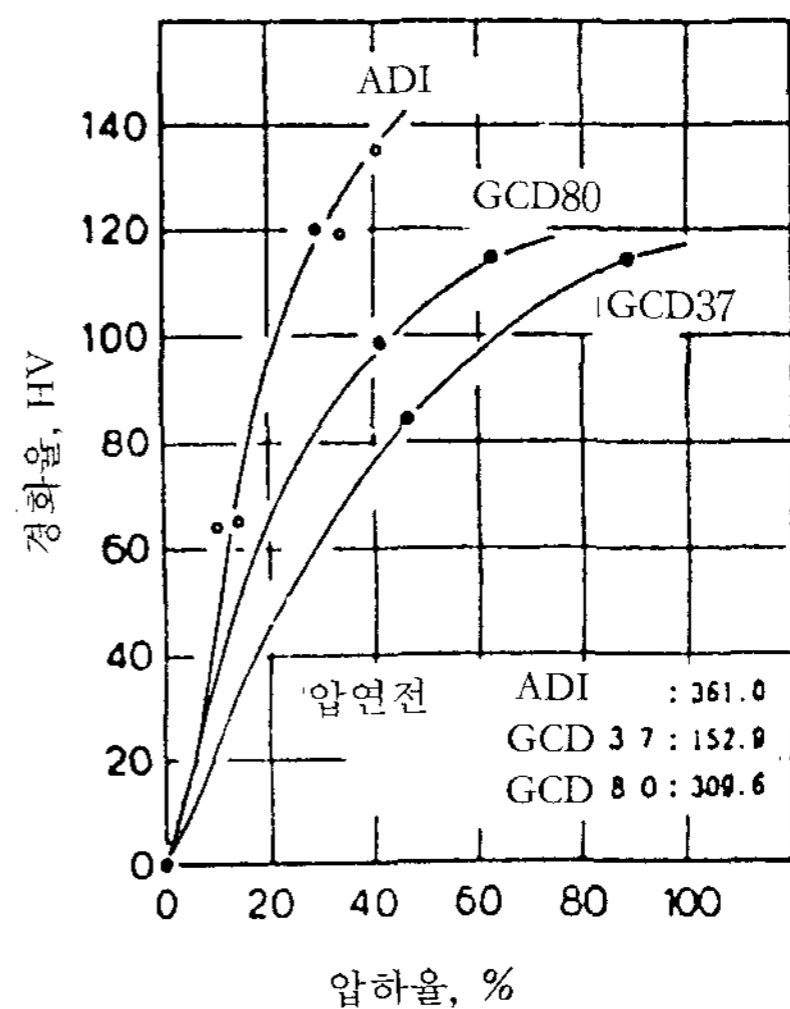


그림21. 구상흑연주철을 압연할 때의 경화율의 비교

### 3-3 물리적 성질

표2에서는 ADI, 단강재 및 GCD70의 물리적 성질을 비교하였다. ADI는 GCD70과 동일한 형태의 단강재에 비해 경하고 감쇄능이 높은것을 알수 있다. 또한 탄성계수는 단강재에 비해서 20%정도 낮다.

표2. ADI 및 각종재료 물리적 성질

	ADI	SM48C	SCM 430	GCD 80
밀도 g/cm <sup>3</sup>	7.10~7.20	7.80~7.90	7.85~7.95	7.10~7.20
종탄성계수×10 <sup>4</sup> kgf/mm <sup>2</sup>	1.65	2.08	2.07	1.73
횡탄성계수×10 <sup>4</sup> kg kgf/mm <sup>2</sup>	0.637	0.801	0.805	0.668
비감쇄율	0.295	0.297	0.289	0.294
포아송비 %	2~4	1~2	1~2	2~4

### 4. 화학성분

표3은 일반적인 화학성분 범위를 나타낸다. 또한 austempering 온도로서는 230~550℃의 범위이다. 항복강도는 austempering 온도 300℃부근에서 가장 높고 상부 bainite와 하부 bainite의 경계는 320℃ 전후가 적당하다.

제품의 두께가 크게되면 합금원소의 첨가가 필요한것으로 Mo 및 Ni의 첨가가 가장 효과적이다. 합금원소의 첨가량과 제품두께의 관계는 표4와 같다.

항온변태온도나 유지시간이 부적당 할때 완전히 bainite로 변태되지 않고 일부 pearlite로 변태되는 부분이 있으면 인성이 저하된다. 이러한 인성의 저하를 방지하기 위해서는 austempering 처리가 용이하도록 합금원소를 첨가할 필요가 있다.

Bainite화의 촉진원소로서는 Mo, Ni, Cu, Sn, Mn

표3. ADI의 일반적인 화학성분범위

(Wt %)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	Mo	Ni
3.50	2.10	0.30	0.04	0.02	0.04	0.40	0.04	0.30	
-3.70	-2.30	-0.45				-0.50	-0.05	-0.35	

등이 있으며 특히 Mo, Ni는 bainite화에 현저하게 영향을 미친다. Bainite 화촉진 원소들은 CCT 곡선에서 알수 있듯이 pearlite변태구역을 우측으로 이동시키므로 냉각속도가 적은 경우에도 pearlite로 변태되지 않고 bainite조직을 쉽게 얻을 수 있어 austempering 처리가 용이해 진다. 이들 합금원소중 특히 소입경화능이 있는 Mo을 Ni또는 Cu와 함께 첨가하면 효과적이다. 그러나 Mo, Ni등이 고가인 점을 고려할 때 Mn, Sn, Cu 등으로 대체 사용이 필요하다.

표4. 제품 두께와 첨가 합금량 (Wt %)

제품두께(mm φ)		<25	- 50 -	- 75 -	- 100 -
첨가 합금	Mo	-	0.3	0.4	0.55
	Ni	-	-	1.0	1.5

### 5. 규격 및 종류

ADI에 대한 한국공업규격(KS)이 제정되어 있지 않다. 지금까지 조사된 바에 의하면 국가규격보다 단체규격으로 제정, 발표한바있어 이를 표5에 표시한다.

표5. MEEHANITE 규격의 ADI 종류

MEEHANITE Type	ADI 900	ADI 1000	ADI 1200
% 잔류 austenite	30-40	20-30	10-20
인장강도 N/mm <sup>2</sup> (min)	900	1000	1200
항복강도 N/mm <sup>2</sup> (min)	675	875	960
연신율(%)	8-12	5-8	2-5
경도 (H <sub>B</sub> )	280-310	300-350	380-430
피로한계 un-notched notched N/mm <sup>2</sup>	440	466	510
	270	320	350
내구비 un-notched	0.49	0.46	0.43



표5에 나타낸 Meehanite규격에 의하면 잔류 오스테나이트의 량에 의하여 3종류로 분류하고 있다.

### 6. 용도

구상흑연주철은 자동차부품, 건설기계부품, 수도관계부품등의 공업용재료로서 다방면에서 사용되고 있는 것으로 강에 가까운 강도와 인성을 갖게 되며, 단조품과 비교하여 여러가지 잇점이 있으므로 그 용도는 증가할것으로 기대된다. 최근 구상흑연주철을 austempering 처리에 의해서 고강도, 고인성으로 하는 재료의 개발에 관한 연구를 수행하여 자동차관계의 기어, 크랭크축등에 적용하고 있다. 따라서 구상흑연주철의 재질개선에 의하여 그 용도는 다양하여 각종산업에 사용되는 금형재료로서도 ADI를 이용하게 되었다. ADI에대한 실용화의 예를 들어보면 다음과 같다.

단조로 만든 spring 및 공업용 기계부품이 ADI로 대체하여 생산되고 있다. 이 부품은 내마모성, 고강도의 특성을 요구하고 있다. 내마모성의 비교를 그림22에 표시 하였다. 또다른 한 예는 단조로서 만든 체인을 ADI에 비교한 예로서 마모와 부식과의 관계를 그림23에 나타내었다.

ADI의 재질의 보정은 종래의 구상흑연주철에 대해서 경도측정에서는 인성을 현저하게 저하시키는 pearlite 석출을 판별하기가 어려우며, 이러한 재질에 관한 보정은 자기적성질을 이용하는 것으로 행해지기도 한다.

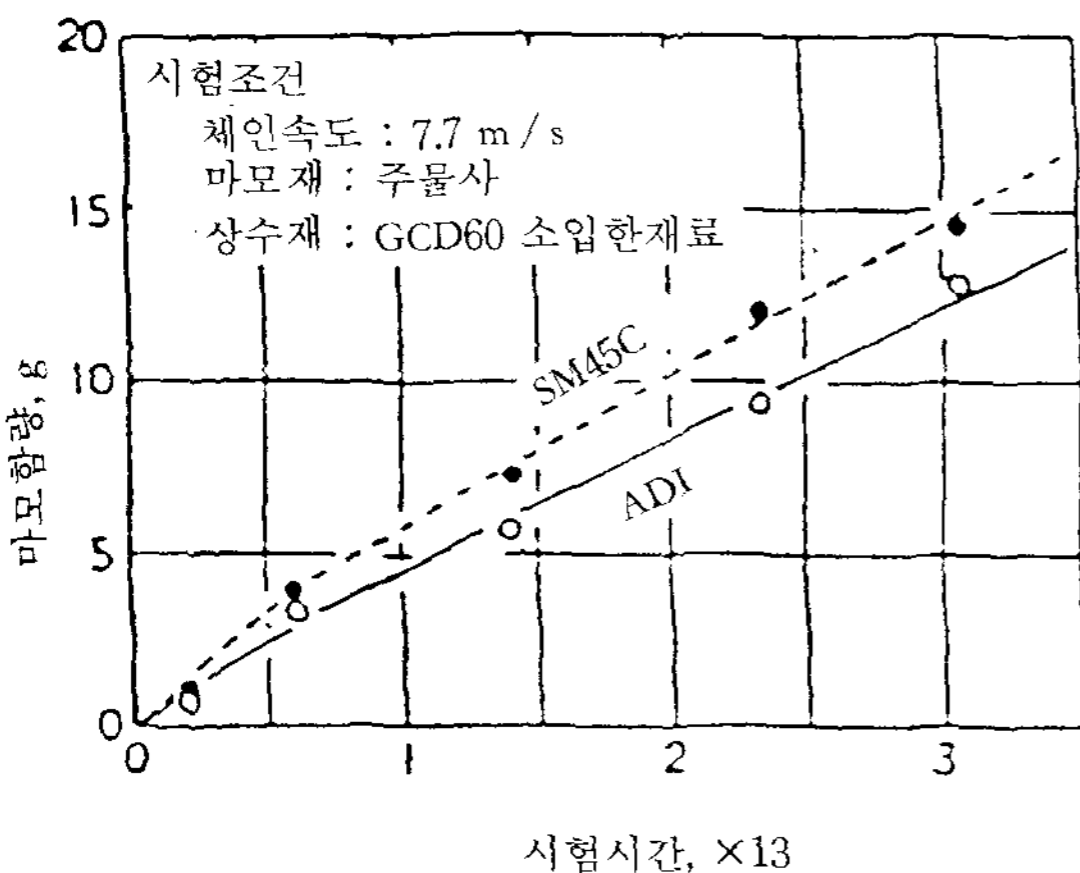


그림22. SM45C 체인 및 ADI 체인에 대한 마모비교

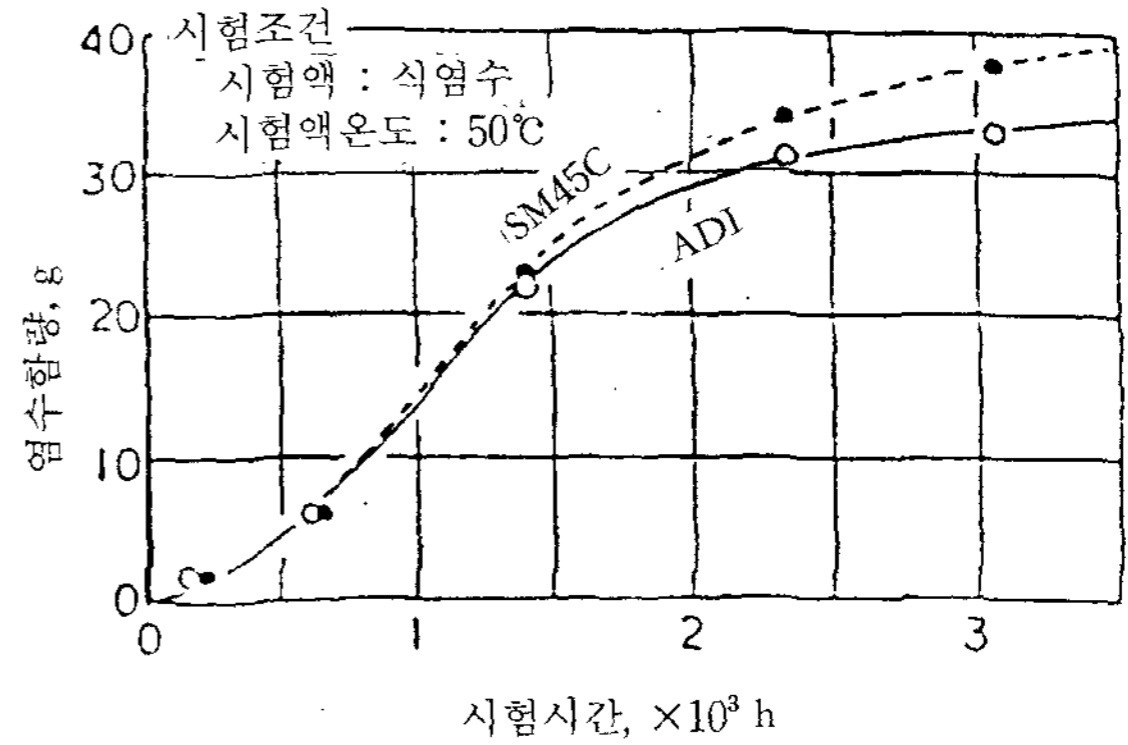


그림23. SM45C 체인 및 ADI 체인에 대한 염수부식 비교

또한 일반 산업용 소켓의 실제로서의 정적강도 실은 및 -30°C에서의 충격강도를 종래의 재료강도와 비교하여 그림24및그림25에 나타내었다. ADI를 종래 재료와 비교해보면 저온에 따른 충격강도에 대해서는 양호한 것으로 나타내었다.

피로강도의 결과로 종래와 대등한 결과를 알수 있었고 시험적 생산 후에 생산화에 들어가서 재료비의 절감 및 절삭성의 향상에 따른 비용의 감소와 경량화가 달성되며, 이제까지의 전반적인 문제는 생겨나지 않고있다.

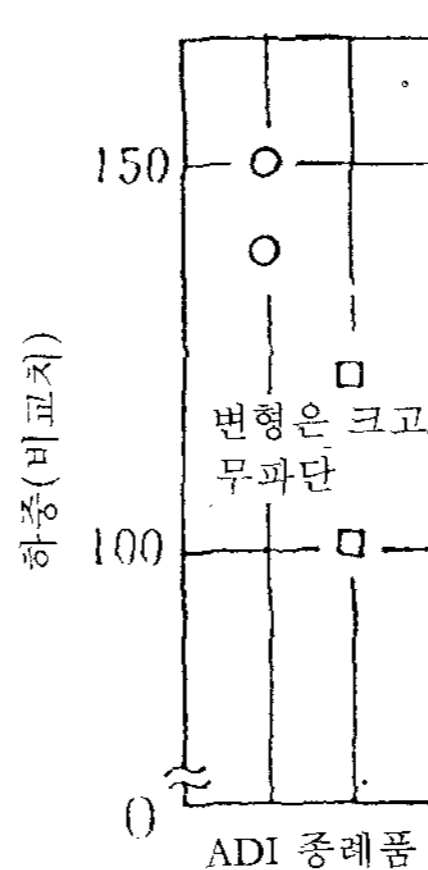
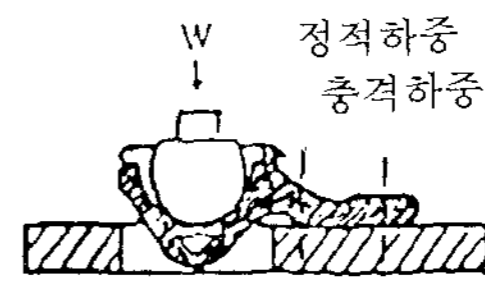


그림24. 정적강도시험

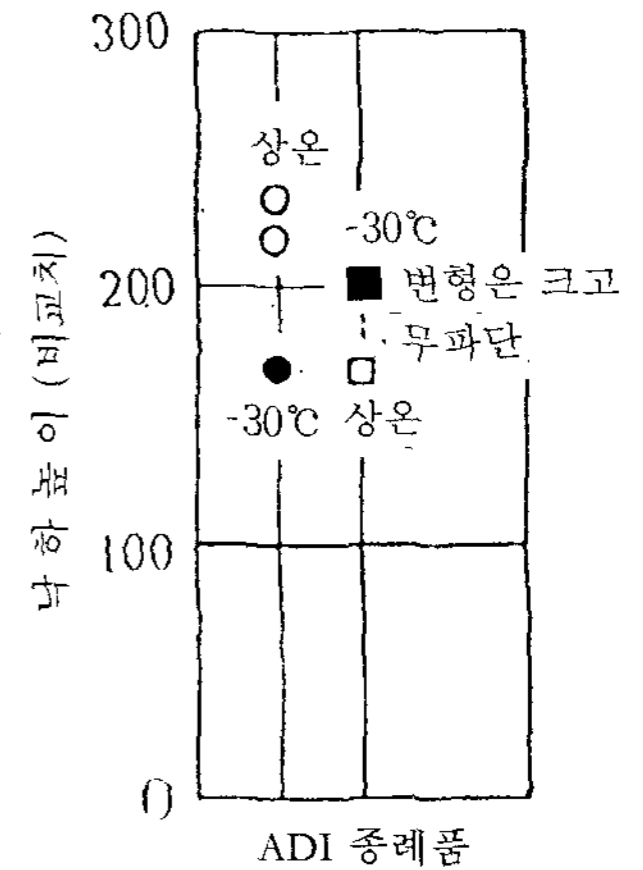


그림25. 충격강도시험

### 7. 개발전망

오스템퍼드구상흑연주철(ADI)이라 함은 일반구상흑연주철(KSD 4302)에서 규정한 인장강도 80kg · f/mm<sup>2</sup>보다 높은 값을 갖은구상흑연주철을 말하는 것으로서 구상흑연주철을 austempering 열처리방법에 의하여 인장강도 및 연신율이 높은 재료로 제조가 이루어지고 있다. ADI에 관한국내 개발활동은 아직 미흡하지만 국외활동은 매우 활발한 실정으로 이는 최근 새로운 소재개발의 분야로 주목을 받고 있다. 따라서 ADI의 개발은 국내 자동차 공업및 일반산업용 부품생산의 육성발전에 직접적인 소재로

서 사용함에 있어서 유용하게 이용할수 있어 그 전망이 기대된다.

### 8. 결론

종래 구상흑연주철과는 다른 특성을 가지고 있으며 또한 ADI는 단조품에 비해서 적은 비용으로서 주조품을 만들수 있으며 피로강도, 파괴인성 특히 내마모성이 양호한 재료로서 단련강에 비해서 가볍고 공업용 및 산업용 자동차 공업등의 여러용도에 이용이 용이하므로 제조방법에 대하여 개발이 이루어져 실용화가 되어야 할것이다.

## 55차 국제주물회의의 대표 및 발표자 파견

1988년 9월11~16일까지 제55차 국제주물회의가 소련국 모스크바에서 개최됨에 따라 당학회 제58차 이사회에서 대표자로 안두식 부회장을, 대표 및 발표자로 김동욱 부회장을 선임하여 파견키로 하였다. 55차 국제주물회의에서 당학회 대표논문으로 선정되어 발표될 논문제목은 "Computer Simulation of Solidification Process in the Gravity die Casting"이다.

## 일본주물협회 제113차 전국강연대회 회원파견

1988년 5월24~26일까지 일본국 오사카에서 개최되는 제113차 전국강연대회에 당학회는 최창욱이사를 대표자로 선정하고 약20명 정도의 회원을 인솔, 본대회에 참가하여 발표회 · 전시회 · 공장견학 등 각종행사에 참석할 예정이다.

### 1988年度 會費 納付案内

금년도 당학회 年會費는 아래와 같습니다.

아직 年會費를 納付치 못하신 會員께서는 조속한 시일내에 本會送金處에 納付하여 주시기 바랍니다. 年會費 納付期日은 每年 3月 末日입니다.

年會費 : ① 正 會 員 : 10,000원 ② 准 會 員 : 6,000원

③ 團 體 會 員 : 20,000원 이상

④ 特 別 會 員 : 1,000,000원 이상 ( 특 급 )

600,000원 이상 (1 등 급)

400,000원 이상 (2 등 급)

200,000원 이상 (3 등 급)

※ 會費送金은 우편대 채구좌 012211-31-1441351을 利用하시기 바랍니다.