

技術資料

合金鑄鐵

조남돈, 김용남

Alloy Cast Iron

N.D. Cho, Y.N. Kim

1. 서론

국내의 각종산업이 발전함에 따라 수요되는 주물의 생산량이 증대됐을 뿐만 아니라 그 용도도 다양해졌다.

특히, 자동차공업의 호황으로 최근 들어 보다 성질이 우수한 합금주철이 요구되고 있다.

합금주철이라 함은 보통주철의 기계적 성질의 향상, 특수한 물리적성질의 부여, 내마모성, 내열성, 내식성 등의 공업적 성질을 개선한 주철을 일컬어 일반적으로 합금주철 또는 특수주철로 불리어 진다. 이와 같은 성질을 개선하기 위하여 보통주철에 첨가되는 합금원소는 Ni, Cr, Mo, Cu, V, B, Al 등이며 이들 중 1종 또는 2종 이상의 원소를 첨가하여 합금주철을 제조한다.

내마모성을 향상시키기 위해 표면을 급냉해서 백주철로 하고 중심부는 회주철로 한 조직학적으로는 일종의 복합주물인 칠주물을 영국의 Hicking은 1799년에 Ni을 첨가하여 특허를 얻었고, 미국에서도 1912년에 Ni, Cr이 포함된 칠주물의 제조를 시작하였다.

최근에는 사용목적에 적합하도록 재질이 다른 주철끼리, 또는 주철과 강을 복합시킨 복합주물이 실용되고 있으며, 소성가공이 곤란하다고 되어 있던 주철도 가공조건을 선택하면 고온단조나 압연이 가능한 합금주물이 생산되고 있다. 그러나 주조성, 가공성, 경제성등 몇가지 문제점이 따르고 있어 합금주철에 대한 연구는 합금강(특수강)에 비해 매우 늦어지고 있다.

이미 합금주철에 대한 참고자료가 다수 발표된바^{1)~7)} 있고 앞으로도 이에 대한 연구가 활발히 진행되리라

확신하면서 본 자료와 함께 많은 도움이 되었으면 한다.

2. 조직

주철의 조직에 미치는 영향은 합금원소의 종류, 조성에 따라 다르나, 흑연 또는 탄화물조직에 영향을 주는 원소와 기지조직에 주로 영향을 주는 원소로 나눌 수 있다.

즉, 첨가합금원소의 종류와 량에 의하여 흑연의 정출이 없는 백주철조직과 흑연이 정출한 회주철조직으로 나눌 수 있으며 기지조직에 의하여 pearlite계, ferrite계, martensite계, austenite계 및 bainite계로 세분할 수 있다.

합금주철을 조직에 따라 분류하면 표 1과⁸⁾ 같이 나타낼 수 있으며 주철조직에 미치는 합금원소의 영향을 표 2⁹⁾에 나타내었다.

주철의 응고시 흑연화와 백선화작용에 미치는 각원소 강약의 정도에 따라 회주철조직이나 백주철조직을 결정하는 요소가 되므로 아래에 그 순서를 배열하였다.

흑연화 Al > Si > Ti > N > Cu > Co > P

백선화 W < Mo < Mn < Sn < S < Cr < V

또 Si의 흑연화능을 1로 기준할 때 다른원소와 비교한 도표가 표 3에 나타나 있다. -부호는 백선화능을 나타낸다.

이상과 같이 주철의 조직은 흑연결정(Fe₃C결정), 흑연의 형상분류, 크기, 정출기지조직, austenite 변태조직으로 표현되며 이들은 austenite - C계 공정반응, 응고반응, austenite의 변태 반응에 의해서 결정되므로 합금원소를 포함한 몇가지 평형상태도를 이해하여야 한다.

표 1. 합금주철의 조직에 의한 분류

조직	기 지 명 칭	대표적주철의 명 칭	주요 성분		용 도	
			원소	(%)		
백주철 조직	ferrite	Craifer주철	Al	6.0 ~ 7.5	내열용	
		고 Cr 주철	Cr	1.75	내열, 내식용	
martensite	Ni-Hard주철	Ni-Hard주철	Ni	4.2 ~ 4.7		내마모용
			Cr	1.4 ~ 2.5		
회주철 조직	pearlite	Cr 주철	Cr	0.2 ~ 1.25	기계용	
		Cr-Cu 주철	Cr	0.1 ~ 0.5	기계용	
		Ni-Cr 주철	Ni	1.0 ~ 1.5	기계용	
	bainite	accicular주철	Ni	0.5 ~ 4.5	기계용	
ferrite	Silal 주철	Silal 주철	Si	5 ~ 7	내열용	
			고규소주철	Si	14 ~ 16	내식용
austenite	Ni-Resist주철	Ni-Resist주철	Ni	12 ~ 22	내식용	
			Ni-Crosilal 주철	Ni	16 ~ 22	내열, 내식용
			No-Mag 주철	Ni	9 ~ 10	비자성용
			Mn	5 ~ 6		

표 2. 철의 여러가지 성질에 미치는 합금원소의 영향

원소	용해도(최고%)		ferrite에 미치는 영향	austenite에 미치는 영향	탄화물 생성 경향
	r - Fe	α - Fe			
Al	1.1(c에 의하여 증가)	36	고용체로 되어 상당 경화	고용하여 약간 경화능 증가	흑연화
B	0.018 ~ 0.026	0.002 ~ 0.0082	대단히 미량의 석출 경화	강한 경화능 증가	Mn보다 크고 Cr보다 작다.
C	2.0	0.025 ~ 0.035	고용체로 되어 석출경화	경화능 증가	-
Cb (Nb)	2.0	1.8	고용체로 되어 석출경화	저 C강에서는 경화능 증가	강 (Ti, Zr에 다음)
Co	전용고용	75		고용되면 경화능 감소	Fe보다 작음

원소	용해도(최고%)		ferrite에 미치는 영향	austenite에 미치는 영향	탄화물 생성 경향
	r - Fe	α - Fe			
Cr	12.8 (0.5%에서 20%)	전용고용	약간 경화 (부식 저항증가)	중정도 경화능 증가	Mn보다 크다.
Cu	8.5(1% C에서 8%)	1% (700 °C) 0.2%(RT)	고용체에서 내부식성 증가	약간 경화능 증가	흑연화
Mn	전용고용	3	현저히 경 화	중정도 경화능 증가	Cr > Mn > Fe
Mo	3(0.3% C에서 0.8%)	37.5 (저온에서 감소)	고 Mo-Fe 합금에서 시효경과	경화능을 강하게 증가 Mo > Cr	강함
N	2.7	0.45	고용체로 되어 약간 경화	경화능을 강하게 증가	
Ni	전용고용	10(C%에 무관계)	고용체에서 강도, 인성증가	약간 경화능 증가	흑연화
P	0.5	2.8(C%에 무관계)	고용체에서 강한 경화		
Si	2(0.35% C에서 9%)	1.85(C%에 의하여 변화)	소성을 감소하여 경도증가	중정도 경화능 증가	흑연화
Ti	0.75 (0.25% C에서 1%)	6 ± (저온에서 감소)	고 Ti-Fe에서 시효경화		최 강
V	1(0.20% C에서 4%)	전용고용	중정도 경 화	고용하여 강한 경화능 증대	대단히 강 (Ti, Cb보다 소)
W	6(0.25% C에서 11%)	33 (저온에서 감소)	고 W-Fe에서 시효경화	소량으로 강한 경화능 증대	강 (V정도)
Zr	0.7	0.3 ±	고용체로 되어 약간 경화	경화능 약간 증 대	강 (Ti다음)

표 3. 각종 원소의 흑연화능

원소명	Si	Al	Ni	Cu	Mn	Mo	Cr	V
능 력	1	0.5	0.3 ~ 0.4	0.2 ~ 0.35	-0.25	-0.35	-1	-2

2-1 Fe-C-Si 계

그림 1¹⁰⁾에 나타난 바와같이 Si량의 증가에 의해

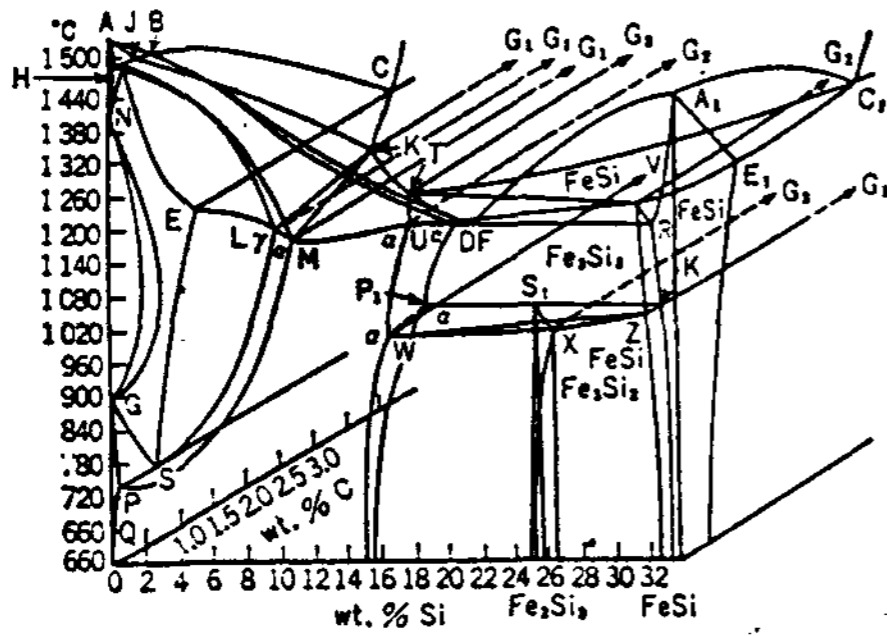


그림 1 Fe-C-Si계 투영상태도

γ 상은 차차로 감소하여 Si 을 다량 고용한 상(Si-lico ferrite)이 안정하며, 기지조직의 주 성분이 된다.

Si 량이 15 ~ 16 % 정도가 되면 공정반응에 의해 ϵ 상(Fe Si)이 정출하기 시작한다. Si는 강한 흑연화 촉진 원소이므로 고 규소주철의 C는 급냉하지 않는 한 흑연으로 정출된다.

2-2 Fe - C - Ni 계

Ni은 흑연화를 촉진하지만 주철조직에 대한 영향은 흑연조직보다 기지조직에 대한 영향이 더 크게 나타난다.

그림 2에 Fe-C-Ni계 조직도¹¹⁾를 나타냈으며 다음 3가지 영역으로 구분된다.

- (1) Ni 4 % 이하의 pearlite기지를 갖는 영역
- (2) Ni 4 ~ 20 %의 bainite와 austonite의 혼합기지를 갖는 영역
- (3) Ni 20 %이상의 austenite 기지를 갖는 영역

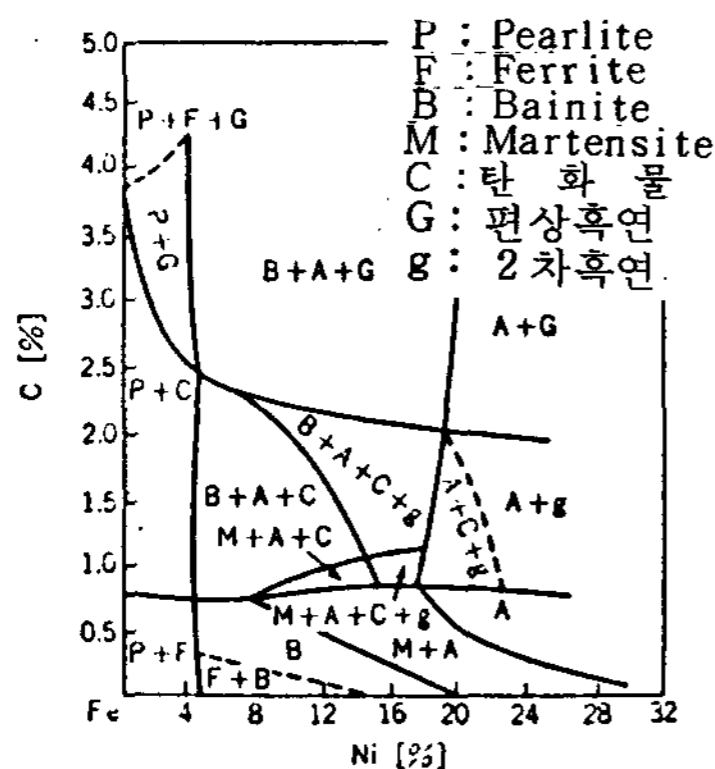


그림 2. Fe-C-Ni계 합금의 조직도

2-3 Fe - C - Cr 계

Fe-C-Cr계 3원계 상태도¹²⁾는 그림 3에 나타난 바와 같이 주철의 조직은 Cr 함유량에 의해 크게 변화한다.

Cr은 강한 탄화물 생성원소이기 때문에 기지보다 탄화물에 많이 고용하며 선철중에 이것이 합금으로 첨가되면 흑연의 정출이 억제되며 백선화가 조장되어 3 % Cr 이상에서는 완전한 백선조직이 된다.

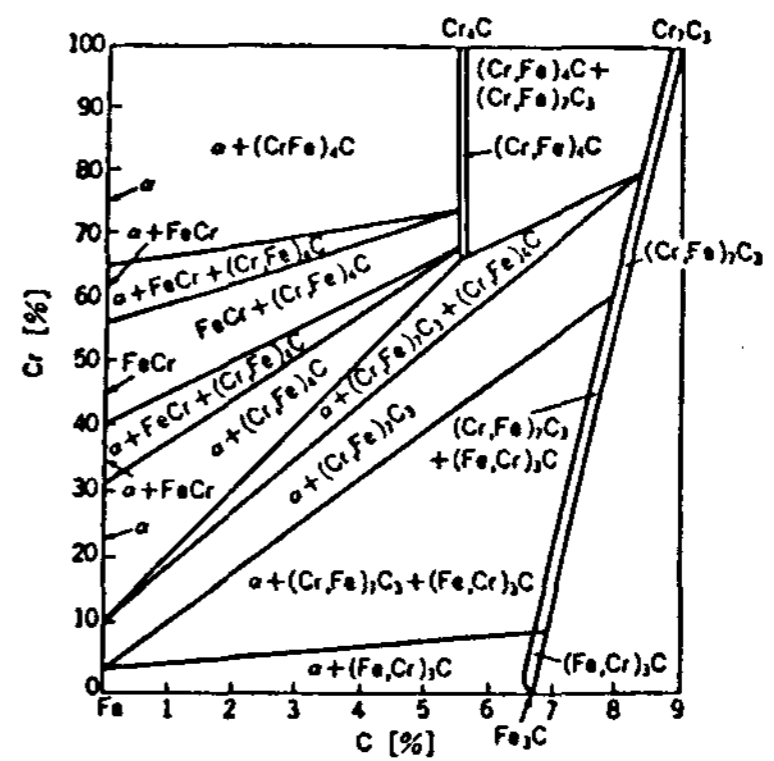


그림 3. Fe-C-Cr계 합금의 상온에 있어서의 조직도

2-4 Fe - C - Mo 계

Mo는 Cr과 같이 흑연화를 방지하여 철화를 촉진한다. 그러나 그 작용은 Cr만큼 강하지 않다.

그림 4의 상태도¹³⁾ 상으로는 Mo는 austenite구역을 저탄소, 고온측에 이동시켜 균일 γ 의 정출영역을 좁게 한다.

Mo가 조직에 미치는 영향은 austenite의 변태 특성에 대한 영향이 더 심하다.

2-5 Fe - C - Cu 계

Cu가 주철중에 합금이 되면 흑연화가 진행되나 그 효과는 Si의 1/5 ~ 1/10 정도이며, Cu가 적당량 포함되면 흑연화가 균일하게 되어 pearlite가 치밀화한다.

2-6 Fe - C - V 계

V는 cementite를 안정화하며, 흑연화를 심히 방해

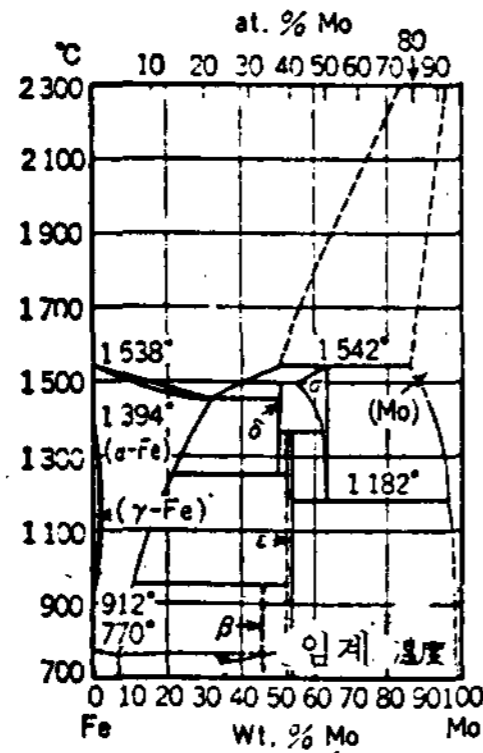


그림 4. Fe-C-Mo 계 평형상태도

한다. 0.1~0.5% 정도의 소량을 첨가하면 주철중의 흑연을 미세화하여 균일하게 분포시킨다.

기지조직도 V에 의해 치밀화 하여 Sorbite 조직이 된다.

V는 Fe-C계의 공정점 및 공석점을 고온고탄소측으로 이동시키는데¹¹⁾, austenite에 별로 고용하지 않기 때문에 austenite의 변태특성에는 거의 영향을 주지 않는다.

2-7 Fe-C-B계

그림 5는 Fe-C-B계 3원계 상태¹²⁾도를 나타낸 것인데, Fe₃C는 B를 고용하여 Fe₃(CB)가 되는데 Fe₂B는 C를 고용하지 않는다.

주철에 있어서 소량의 B는 조직을 미세화시키며 흑연화를 심히 방해하여 0.25%로 완전한 백선이 된다.

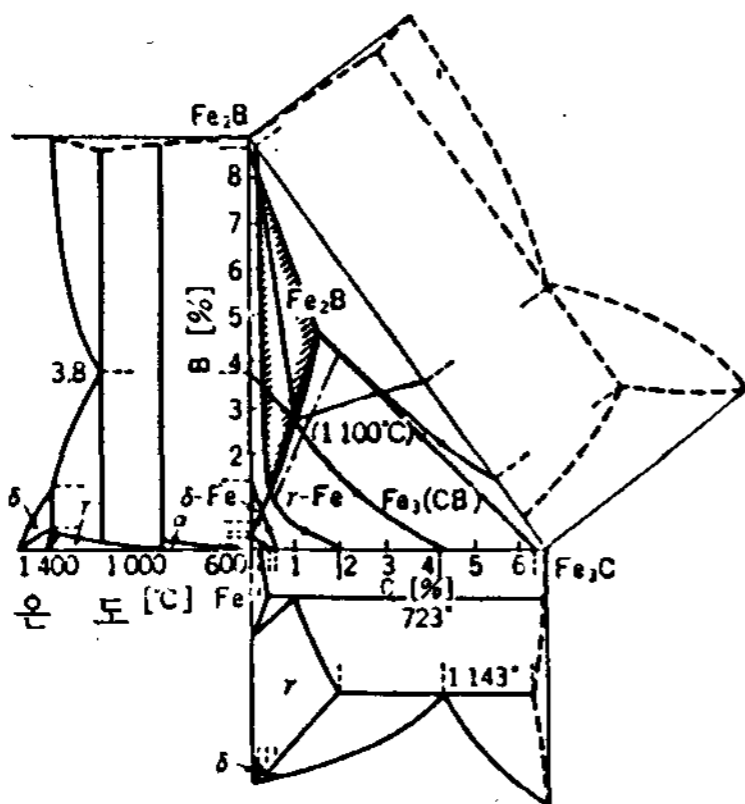


그림 5. Fe-C-B계 평형상태도의 단면도

2-8 Fe-C-Al계

Al은 강한 흑연화 촉진 원소로 고탄소 주철에서는 0.5~0.7%, 저탄소 주철에서는 1~1.5%가 Si 1%의 흑연화율에 상당한다.

여러 학자의 연구에 의한 그림 6에 나타난 것과 같이 Al이 4% 이상이 되면 흑연화율이 최대가 되며 기지조직이 ferrite화 한다.

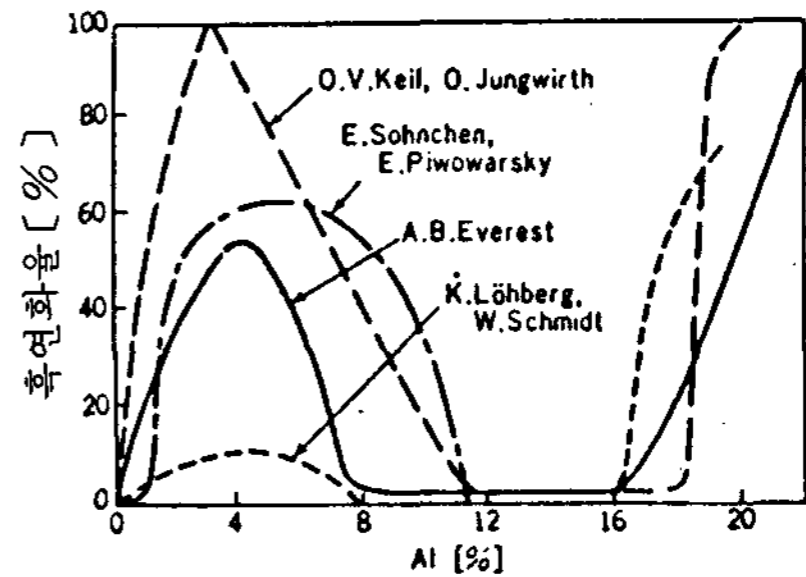


그림 6. 주철의 흑연화율 [(흑연 / T.C) × 100]과 Al의 관계

3. 합금주철의 성질 및 종류

3-1 기계적 성질

주철에 합금원소를 첨가하는 목적의 하나가 기계적 성질의 향상에 있기 때문에 이것에 관해서는 많은 연구가 행해져 왔다.

1947년 구상흑연주철이 발견된 이래 주철의 기계적 성질의 향상에는 합금원소의 첨가보다 오히려 흑연의 구상화에 의한 쪽이 용이하였으나 오늘날에는 회주철이나 구상흑연주철에 합금원소를 첨가하는 것이 기계적 성질의 향상외에 내마모성, 내열성, 내식성등의 공업적 성질의 개선과 주물의 두께감수성의 감소에 목적을 두기도 한다. 이중 두께감수성에 따라 기계적 성질이 크게 변화한다는 것을 알았으며 합금주철주물의 특징의 하나로 되었다. 이것은 주철의 조직이 냉각속도의 영향을 받기 때문이다.

합금원소중 특히 Ni의 첨가는 주물의 두께감수성을 저하하는 효과가 있다는 것을 그림 7¹⁴⁾로 부터 알 수 있다.

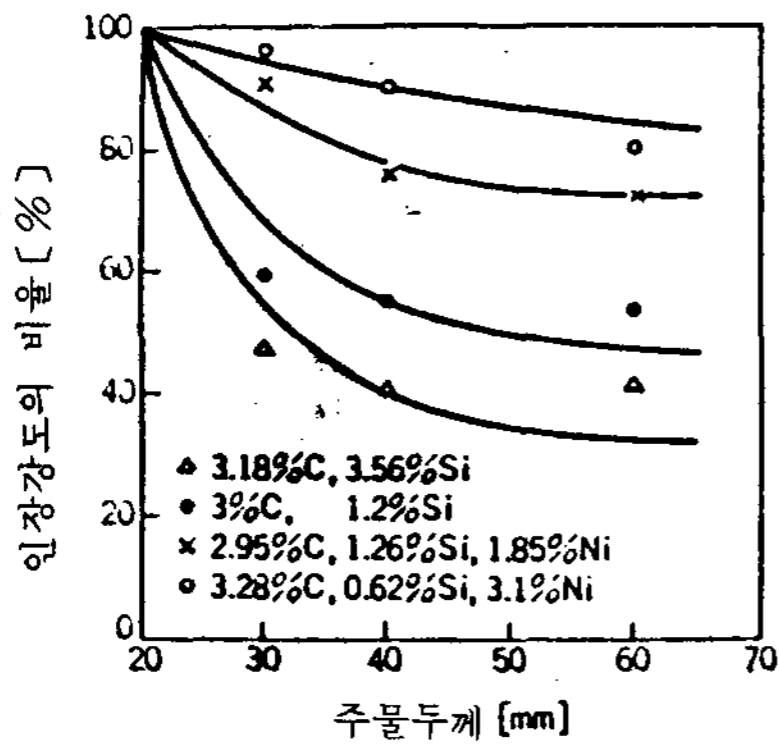


그림 7. 보통주철의 두께 감수성에 미치는 Ni의 영향

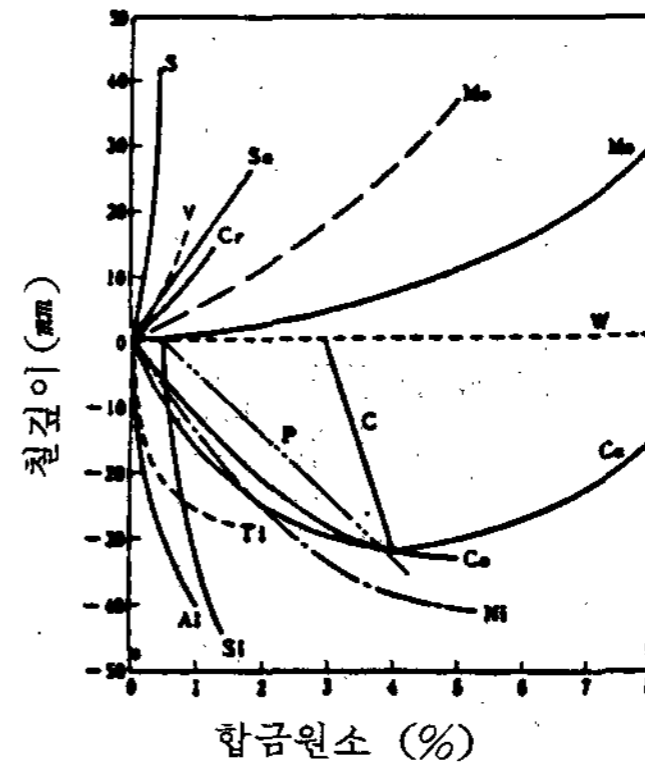


그림 8. 회주철의 취에 미치는 합금원소의 영향

회주철의 인장강도 및 경도에 미치는 합금원소의 영향은 V, Cr, Mo는 소량 첨가하여도 개선효과가 큰데 반하여 Cu, Ni, Mn는 개선효과가 작다. 한편 V, Cr, Mo 등의 탄화물 생성원소는 그림 8¹¹⁾에 나타난 것처럼 취화의 경향을 조장하나 Al, Si, Ni, Cu 등의 흑연화 촉진원소는 취를 감소한다. 따라서 회주철의 강도를 향상시킬 목적으로 V, Cr, Mo를 첨가할 때에는 취화를 일으키지 않을 정도의 소량을 첨가하거나 흑연화를 조장하는 Si, Ni, Cu와 조합시켜 사용할 필요가 있다.

회주철의 인장강도, 압축강도, 비틀림강도, 피로강도 및 경도와는 표 4¹²⁾ 및 5¹¹⁾에 나타난 바와 같이 밀접한 관계가 있기 때문에, 합금원소를 첨가하여 인장강도를 크게 하면 기타의 기계적 성질도 향상된다.

표 4. 회주철의 기계적성질간의 상호관계

ASTM 규격	인장강도 [kgf/mm ²]	압축강도 [kgf/mm ²]	비틀림강도 [kgf/mm ²]	탄 성 계 수 (× 10 ²)		양진동구부 림피로한도 [kgf/mm ²]	굽힘강도 30×460 mm [kgf]	경도 [HB]
				인장력 [kgf/mm ²]	비틀림 [kgf/mm ²]			
20	15.5	58.4	18.3	67.5 ~ 98.4	27.4 ~ 39.4	7.0	839	156
25	18.3	68.2	22.5	80.9 ~ 104.1	32.3 ~ 42.2	8.1	986	174
30	21.8	76.6	28.1	91.4 ~ 115.3	36.6 ~ 46.4	9.8	1145	201
35	25.7	87.2	34.1	102.0 ~ 120.9	40.8 ~ 48.5	11.3	1292	212
40	29.9	98.4	40.1	112.5 ~ 140.6	45.0 ~ 54.8	13.0	1440	235
50	36.9	115.3	51.3	132.2 ~ 160.3	50.6 ~ 56.3	15.1	1632	262
60	43.9	131.8	62.2	143.4 ~ 165.2	54.8 ~ 59.8	17.2	1678	302

표 5. 회주철의 피로강도

인장강도 [kgf/mm ²]	피로한도 [kgf/mm ²]	내 구 비	용력집중계수
14.1	6.54	0.46	1.00
16.3	8.30	0.51	1.05
21.3	10.55	0.50	1.09
23.6	15.47	0.65	1.40
26.1	13.71	0.52	1.20
29.9	16.94	0.57	1.26

3-2 공업적 성질

(1) 내열성

고온에서 사용되는 재료가 구비해야 할 조건으로는 성장이 작고, 내산화성이 커야 하며, 고온강도가 크고 creep신장이 작으며 피로 및 열균열에 강하여야 하는

등이 있으며 이들중 하나 또는 그 이상의 성질을 구비하여야 한다.

주철의 성장을 적게하고 내산화성을 향상하는데 유효한 합금원소는 Si, Cr 및 Al 등으로 이들 원소의 산화피막의 생성이 유효하게 작용한다.

Ni은 특히 고온에서 연성을 크게 하며 Cr, Mo은 고온강도, creep 강도의 향상에 적합하다. 따라서 A₁점 이하에서 사용되는 내연기관등의 주물에는 pearlite 을

안정하게 합과 동시에 내산화성, 고온강도 및 열균열 강도등의 성질을 개선하기 위해 Cr, Mo를 함유하는 저합금 회주철 또는 구상흑연주철이 사용된다.

고온에서 사용되는 경우에는 표 6에 나타난 바와 같이 고온합금 내열주철이 이용된다.

내열주철의 종류와 화학성분 및 최고사용온도가 표 7에 나타나 있다.

표 6. 고합금 내열주철의 화학조성과 기계적 성질

종 류		5% Si 주철 (Silal)	고 Ni 주철 (Ni-Resist)	고 Ni-Cr-Si (Nicrosilal)	고 Al 주철	고 Cr 주철
화 학 조 성 (%)	C	1.6 ~ 2.5	1.8 ~ 3.0	1.8 ~ 2.6	1.3 ~ 1.7	1.0 ~ 3.0
	Si	4.0 ~ 6.0	1.0 ~ 2.75	5.0 ~ 6.0	1.3 ~ 6.0	0.5 ~ 2.5
	Mn	0.4 ~ 0.8	0.4 ~ 1.5	0.4 ~ 1.0	0.4 ~ 1.5	0.3 ~ 1.5
	Ni	—	14.0 ~ 30.0	13.0 ~ 32.0	—	< 5.0
	Cr	—	1.75 ~ 5.5	1.8 ~ 5.5	—	15.0 ~ 35.0
	Cu	—	< 7.0	< 10.0	—	—
	Mo	—	< 1.0	< 1.0	—	—
	Al	—	—	—	7 ~ 10	—
기 계 적 성 질	인장강도 [kgf/mm ²]	17 ~ 30	17 ~ 30	14 ~ 30	20	21 ~ 63
	압축강도 [kgf/mm ²]	63 ~ 105	70 ~ 112	49 ~ 70	—	70
	항 절 력 [kgf]	0.7 ~ 1.7	1.3 ~ 2.1	1.3 ~ 1.8	—	1.4 ~ 2.5
	굽 힘 량 [mm]	4.6 ~ 8.9	5.1 ~ 25.4	7.6 ~ 35.6	—	1.5 ~ 3.8
	아이조트衝擊值 [ft·lbf]	15 ~ 23	60 ~ 150	80 ~ 150	—	20 ~ 35
	경 도 [HB]	170 ~ 250	130 ~ 250	110 ~ 210	100 ~ 120	250 ~ 500

표 7. 내열주철의 종류와 화학성분 및 최고 사용온도

종 류	화 학 성 분 [%]					최 고 사 용 온 도 [°C]
	C	Si	Ni	Cr	Al	
저 Cr 주 철	3.2	2.0	—	1.2	—	600
저 Ni-Cr 주철	3.1	1.0	1.8	0.8	—	//
Silal	2.5	4 ~ 6	—	—	—	850
Cralfer	3.0	1.0	—	0.75	7.5	900
Alsilon	2.0	5 ~ 6	—	—	2 ~ 4	//
Ni-Resist II 종	<3.0	1 ~ 2	18 ~ 22	1.8 ~ 2.5	—	800
Ni-Resist III 종	<2.75	1 ~ 2	28 ~ 32	2.5 ~ 3.5	—	850
Nicrosilal	<2.4	4 ~ 5	18 ~ 30	2 ~ 4	—	950
고 Al 주 철	2.0	1 ~ 4	—	—	9 ~ 10	1100
고 Cr 주 철	<3.0	1 ~ 2	—	25 ~ 35	—	1100

(2) 내마모성

마찰속도가 적고 저하중 및 표면온도가 거의 상승하지 않는 마모 조건 즉, 주철의 미끄럼마모에 대해 저항을 크게 하는 합금원소는 pearlite 을 안정하게 하는 Cr, Mo, Mn 등의 탄화물 생성원소를 함유한 저합금주철이 내마모성이 우수하다. 굽힘마모에는 경도의 영향이 크므로 경도가 큰 백주철중 기지조직이 martensite 인 것이 좋다.

표 8은 내마모 합금의 순위를 나타내고 있다.

표 8. 내마모 합금의 순위

순 위	합 금	비 고
내 1	composite 탄화 텅스텐	마찰면은 거침
↓	고 Cr 주철	내산화성도 있음
모 3	martensite 계 백주철	압축강도가 큼
↓	Co 기 합금	내산화성, 내식성 있음
성 4	Ni 기 합금	내식성이 있으며, Creep 강도大
↑		
인 5		
↑		
성 6	martensite 계 강	
大 7	pearlite 계 강	값이 싸다.
8	austenite 계 강	가공경화가 심함

(3) 내식성

주철의 내식성은 흑연의 유무에 상관없이 화학성분이 같으면 큰 차이가 없고 일반적으로 산에는 부식되기 쉬운데 알카리에는 강하다. 대기, 해수 및 토양에 대한 내식성은 부식조건에 의해 변화하는데 주철은 가격이 싸고 두께가 크기 때문에 공업적으로는 주철관등으로 많이 사용되고 있다.

주철은 소량의 합금원소를 첨가하여도 내식성에는 별로 효과가 없는데 내알카리 부식에 대해서는 3~5% Ni의 첨가, 약산 또는 S를 함유한 원유에 의한 부식에 대해서는 0.5~1.0% Cu의 첨가가 유효하다고 알려져 있다.

보통주철, 저합금주철의 내식성에 비해 고합금의 Ni-Resist, 고Si 내산주철 및 고Cr 주철은 우수한 내식합금이다.

고Cr 주철은 강한 Cr 탄화물을 다량 함유하므로 굽힘마모에 강하므로 펌액처리와 sand pump 재료로서 사용되고 있다.

Ni-Resist 주철은 기지가 austenite 이기 때문에

환원성의 산과 염류에 강한데다 구조성이 아주 복잡한 주물을 만들기 쉽고 기계적성질도 우수하므로 약산과 공장폐수를 취급하는 밸브와 펌프에 사용된다.

고Si 내산주철은 산류에 대해 우수한 내식성을 갖는데 특히 3% Mo을 첨가한 것을 내염산재료로서 사용된다.

(4) 피삭성

흑연계주철에서는 유리흑연이 절분을 파쇄하여 윤활제로서의 작용도 하기 때문에 공구마모를 감소시켜 수명을 연장하므로 다른 재료에 비해 피삭성이 좋다. 한편 백주철은 단단한 탄화물을 다량 함유하기 때문에 피삭성은 극히 나쁘다. 따라서 흑연계 합금주철에 있어서 V, Cr, Mo와 같은 탄화물 생성원소를 첨가하는 경우에는 주물제품의 크기 두께를 고려하여야 하며 외부철을 생기지 않도록 첨가 합금원소량을 결정하는 것이 매우 중요하다.

(5) 구조성

주물로서는 ① 필요한 성질을 구비하고 있을것, ② 구조결합이 없을 것, ③ 주물치수가 정확할 것의 3가지 조건을 구비하고 있는 것이 필요한데 그를 위해서는 용탕의 화학성분과 유동성 및 주형, 구조방안이 적당하여야 한다.

용탕의 유동성은 주철의 화학성분과 온도에 따르는데 합금주철중 산화하기 쉬운 Al 및 Cr을 다량으로 함유한 용탕에서는 표면피막을 용이하게 생성하여 이것이 주입시 주형내에 유입할 뿐만 아니라 주형내에서 용탕이 난류를 발생하여 산화피막이 제품에 혼입하여 구조결합이 되므로 주입 및 구조방안에는 충분한 배려를 요한다.

치수정도가 좋은 주물을 만들기 위해서는 주철의 종류에 따르는 수축여유를 감안한 모형을 사용하지 않으면 안되는데 주형내에 있어서 용탕의 수축은 주형조건과 형상에 의해 똑 같은 것은 아니다.

회주철의 수축여유는 10/1000, 구상흑연주철에서는 4/1000~13/1000이 표준으로 되어 있는데 동일한 회주철에서도 austenite 기지의 Ni-Resist, Nicrosilal 고Si 내산주철은 수축이 크기 때문에 16/1000으로 되어 있다. 백주철은 응고시에 있어서 흑연의 정출에 따른 팽창이 없으므로 수축이 크고 Ni-hard와 고Cr 주철의 수축여유는 20/1000~22/1000으로 하는 것이 보통이다.

3-3 물리적 성질

(1) 응고수축 및 영팽창

주물의 응고수축은 주물의 치수정도와 수축공 발생에 관련된 중요한 성질이다. 주철의 수축은 액체수축, 응고시에 있어서의 팽창수축 및 고체수축의 3종으로 분류한다.

액체의 선수축은 아주 작으나 응고시에 수축은 흑연량에 의해 심하게 변화되며 흑연량이 많을 경우에는 수축하지 않고 팽창한다.

고체수축은 주철을 구성하는 ferrite, cementite 및 흑연의 존재 비율에 의해서 변화된다. 순 Fe의 열팽창에 미치는 합금원소의 영향은 그림 9에 나타내었다.

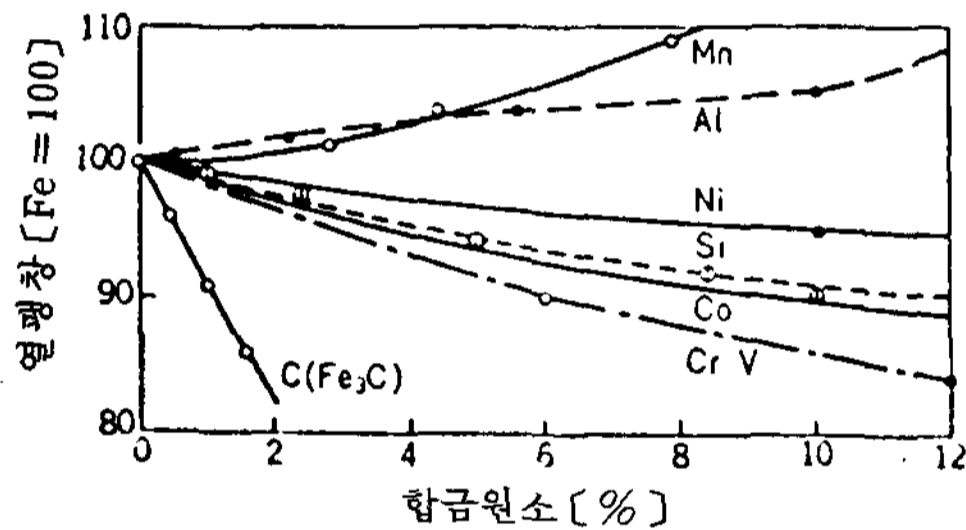


그림 9. 순 Fe의 열팽창에 미치는 합금원소의 영향

(2) 전기적 성질

주철의 전기적성질은 화학조성과 조직에 의해 현저히 변화한다.

표 9에서는 주철을 구성하는 각 조직의 전기 전도도와 열전도도를 나타내고 있는데 흑연계 주철이 백주철보다 큰 것을 알수 있으며, 또한 합금원소의 고용량이 증가할수록 저하된다는 것을 그림 10로부터 알수 있다.

표 9. 각조직의 전기도도와 열전도도

종 별	전기전도도 [$10^{-4} \Omega \cdot cm$]	열전도도 [$cal/cm \cdot s \cdot ^\circ C$]
ferrite	9.569	0.174
cementite	0.174	0.017
temperd C	0.667	0.037
pearlite	-	0.124
흑 연	-	0.057

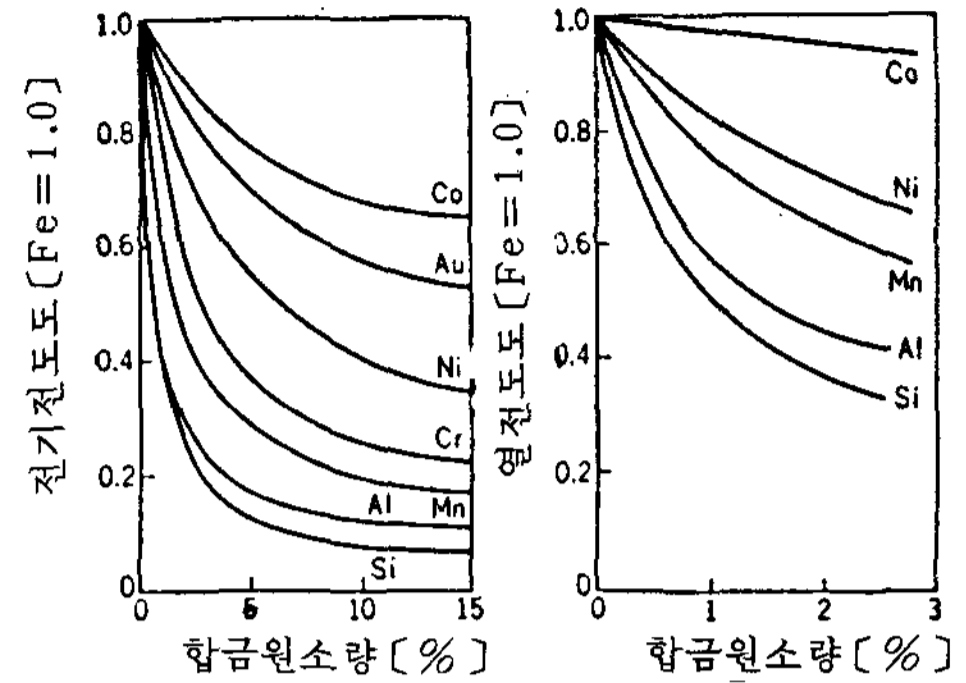


그림 10. 순 Fe의 전기전도도와 열전도도에 미치는 합금의 영향

(3) 비중, 열용량, 비열 및 용해잠열

회주철의 비중이 6.95~7.35인데 반해 백주철은 약 7.7로서 높은 것은 주철을 구성하는 각 조직의 비중이 다르기 때문으로 특히, 비중이 작은 흑연량이 많으면 비중이 저하된다.

합금원소는 흑연의 정출에 영향을 주므로 합금원소의 종류와 량에 의하여 변화된다.

주철의 열용량, 비열, 용해잠열은 C의 존재 형태에 따라 영향을 미치며, 각종 합금원소의 영향에 관련이 있는 정량적인 연구가 아직까지 부족하다.

4. 합금주철의 종류, 규격 및 용도

4-1 Si 합금주철

Si는 흑연화 촉진원소이며 주철에서는 없어서는 안될 원소중의 하나인데 Si를 4%이상 함유하는 주철은 보통주철에서는 얻을 수 없는 특수한 성질을 갖고 있다. 그중 하나는 Si 4~6%의 내열주철이며 다른 하나는 Si 13~16%의 내산주철이다.

고규소 내열주철은 Silal이라고 부르는 비교적 값이 싸고, 이 합금의 조직은 흑연과 ferrite로 되어 있으며 산화에 의해 SiO₂ 피막이 표면에 생성하여 부동태화가 일어나기 때문에 고온 산화가 적게 일어난다.

고규소 주철의 내열성, 기계적성질은 흑연이 편상 또는 공정상의 것보다 구상일때 더 좋으므로 구상흑연을 갖는 고규소 주철을 최근에 많이 사용한다.

고규소 내산주철은 각종 산에 대하여 우수한 내식성을 나타내므로 옛부터 잘 알려져 왔으며 조직은 미세한 편상흑연과 ferrite로 이루어져 있으나 ferrite는 Si를 다량 고용한 Silico-ferrite이기 때문에 너무

취약해서 부러지기 쉽다. Si 15% 이상이 되면 그림 11에서와 같이 내산성은 더욱 좋게되나 η상(Fe₅Si₂)이 준안정상으로 실온에서 나타남과 동시에 취약해지므로 실용적으로는 13~15% Si 주철이 사용된다.

C가 많으면 과공정 흑연이 편석되고 적으면 응고수축이 크게되어 균열이 발생하기 쉬우므로 0.5~1% C가 포함된 것이 적당하다.

고Si 내산주철의 내염산용에는 Mo 3.5%가 첨가된 것이 좋으며 각종 산제조공업에 널리 사용되고 있는데, 단단하고 기계 가공성이 좋지 않으며 외력에 의해 기계적 충격, 온도의 급변에 의한 열충격에도 약하므로 취급에 주의를 요한다. 주조성이 좋지 않아 건전한 주물의 제조가 어렵다.

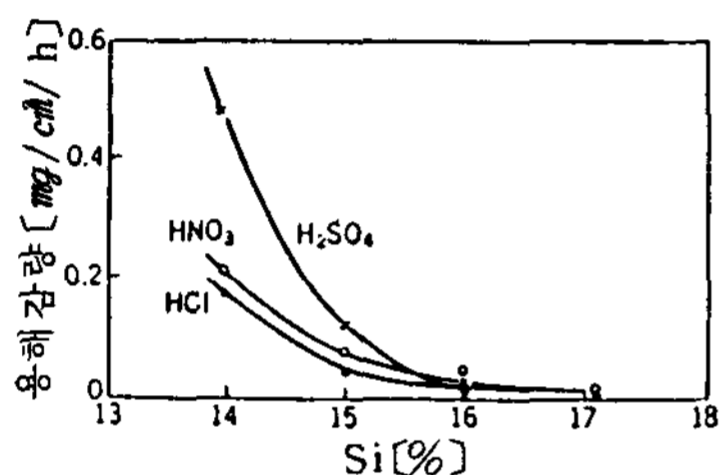


그림 11. 고 Si 내산주철의 내산성과 Si 량의 관계

4-2 Ni 합금주철

Ni 은 주철의 흑연화를 촉진하여 칠화를 감소시키는데 그 흑연화능은 Si의 약 1/3 정도이며, 주철에서는 탄화물을 거의 만들지 않고 cementite도 거의 고용하지 않으므로 기지중에 고용하여 그 조직에 영향을 미친다.

4% Ni 이하에서는 pearite와 ferrite, 4%를 초과하면 bainite, 더욱 Ni을 첨가하면 austenite 또는 martensite, 20% 이상에서는 austenite기 지 조직을 갖는다¹¹⁾.

Ni 합금 주철의 종류에는 주로 대형의 구상흑연주철 주물에 많이 사용되는 Ni을 4% 이하로 첨가한 저합금 Ni 주철과 Ni을 4~8% 함유한 기지조직이 martensite로서 경도가 높고 내마모성이 좋은 일종의 Ni-hard 주철로 불리우는 martensite 주철이 있으며, Ni을 12% 이상 함유한 고Ni austenite 주철은 기지조직이 austenite이며 기계적 성질이 우수할 뿐만 아니라 내열, 내식성이 좋고 비자성이다. 이러한 성질을 갖는 고Ni austenite 주철의 종류에는 Ni-Resist 주철, Nicrosilal 주철, 비자성 주철 등이 있다.

이중 Ni-Resist 주철의 내열성, 내식성은 각각 고Cr

주철, 고Al 주철과 고Si 주철, 고Cr 주철에 비해 떨어지지만 기계적 성질이 특히 우수하다.

4-3 Cr 합금주철

Cr 은 강한 탄화물 생성원소이며, 첨가량에 따라 주철의 조직을 크게 변화시키기 때문에 아래의 2가지로 구분한다.

① 소량첨가(1.5% 이하)하여 편상 및 구상흑연주철의 기계적성질과 내열, 내마모 및 내식성을 향상시킨다.

② 다량첨가(10~35%)로 백주철로 하여 회주철과 강에서 얻을 수 없는 우수한 내마모, 내열성 및 내식성을 얻는다.

저Cr 합금주철은 고온강도에 강하여 장시간 가열하여도 강도의 저하가 적으며 고온산화도 적게 일어나므로 실린더 라이너, 샤프트, 브레이크 드럼 등에 많이 쓰인다.

Cr 을 다량 함유한 주철은 고온산화 및 내식성이 스테인레스강보다 오히려 좋으며, 내열, 내식성도 우수하나 Cr 함유량이 많으므로 탄화물이 많고 기계적성질 특히, 연성이 낮아져 고강도 재료로서는 제한되며 역으로는 경한 탄화물이 다량 기지중에 존재하므로 내마모성에 대해서는 월등히 우수하다.

내열, 내식성이 좋으므로 고온 또는 부식환경에 있어서나 내마찰재료로서 많이 사용된다.

고Cr 합금 주철을 화학성분에 의해 세분하면 다음과 같다.

- ① martensite 조직의 12~20% Cr 주철 : 내마모, 내식용
- ② austenite 조직의 24~28% Cr 주철 : 내식, 내마모용
- ③ ferrite 조직의 30~35% Cr 주철 : 내열, 내식용

4-4 Ni-Cr 합금주철

Ni 은 흑연화 촉진원소로 응고시 흑연화를 조장하여 주물의 두께감수성을 작게 한다. 이에 반해 Cr 은 탄화물 생성원소로 백주철화를 조장하여 기계적성질 뿐만 아니라 내열, 내식성을 향상한다. 이와 같이 Ni 과 Cr 은 응고시의 흑연화 작용에 대해서 역작용을 일으키는데 이 두 원소를 함께 첨가하면 여러가지의 원소가 갖는 특성보다 더욱 더 우수한 성질을 갖기 때문에 Ni-Cr 주철은 옛날부터 저합금주철의 대표적 주물로 이용되어 왔다.

주로 사용되는 저 Ni-Mo-Cr 회주철의 화학성분과 기계적성질이 표 10에 나타내었다.

역시 Ni, Cr은 동시에 흑연 구상화에는 악영향을 미치지 않으므로 저 Ni-Cr 구상흑연주철은 고급흑연주철로 사용된다.

표 10. 저 Ni-Cr-Mo 주철의 화학조성과 용도에

종 류	화 학 조 성 (%)						경 도 [HB]	인장강도 [kg.f/ml]	용 도 예
	T.C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo			
Ni 주철	2.8~3.2	0.9~1.2	0.6~1.0	1.0~1.2	-	-	> 200	> 28	피스톤, 실린더
Ni-Cr	3.0~3.2	1.6~1.8	1.2~1.4	0.8~1.2	0.2~0.3	-	210~230	24~32	실린더라이나, 실린더카바
	2.9~3.1	1.4~1.6	0.4~0.6	1.2~1.4	0.2~0.3	-	220~235	30~33	실린더라이나
주 철	3.0~3.2	1.0~1.2	0.6~0.7	1.4~1.6	0.6~0.8	-	230~250	28~31	정유제품, 알미늄솔
	3.2~3.4	0.9~0.4	0.5~0.8	1.5~2.0	0.6~1.0	-	200~240	24~28	금속용해도가니
	3.0~3.2	2.0~2.2	0.6~0.9	3.0~3.5	0.2~0.4	-	240~260	30~35	밸브
Ni-Mo 주 철	3.0~3.3	2.2~2.4	0.6~0.9	0.1~0.3	0.3~0.5	0.3~0.5	207~240	28~30	실린더부록
	3.0~3.1	2.2~2.4	0.7~0.9	0.2~0.3	0.2~0.3	0.6~0.8	220~250	35~40	실린더헤드
	2.6~2.8	2.2~2.5	0.9~1.0	0.7~1.0	0.1~0.2	0.7~1.2	220~240	42~56	크랭크축
	3.0~3.2	2.0~2.2	0.7~0.9	0.4~0.6	0.8~1.0	0.4~0.6	280~310	35~42	캠 축

4-5 Mo 합금주철

Mo은 탄화물 생성원소인데 Cr, V에 비해 백선화 경향이 약하고, 오히려 austenite 중에 고용하여 공식 변태에 영향을 미치며 주철의 기지조직을 개선한다.

즉, 1.0% Mo이하의 첨가에서는 미세 pearlite 조직이지만, 1.5% Mo에서는 일부 ferrite를 포함하며, 2.0% Mo이상이면 거의 bainite 조직이 된다.

주철의 기계적성질의 개선 효과중 다른 합금원소에 비해 특징적인 것은 고온성질의 개선효과이다. Cr은 고온성질을 좋게하므로 Mo 단독보다 Cr-Mo 또는 Ni-Cr-Mo 주철로서 사용되는 경우가 더 많다.

Mo 주철의 고온강도에 대한 Mo의 영향을 표 11에 나타내었는데 Cr과 함께 혼합한 것이 가장 강하다.

표 11. Mo 주철의 고온 creep 파단강도 (100시간)
(kg f/ml)

온 도 [°C]	비합금 주 철	0.5% Mo 주철	0.6% Cr-0.5% Mo 주철
425	14.3	20.4	26.7
535	10.3	12.0	20.4
650	1.7	2.8	4.2

주) C 3.2~3.0% Si 1.7~1.9%

4-6 Ni-Mo 합금주철

Mo이 austenite 변태에 영향을 주어 bainite의 석출을 조장하는 것은 이미 전술하였지만, Ni을 함께 첨가하면 그림 12의 등온변태곡선¹⁵에 나타난 바와같이

pearlite의 생성이 억제되므로 bainite 조직을 갖는 accicular 라는 주철을 얻게 된다.

accicular 주철을 제조하는데 필요한 Ni량은 주물의 냉각속도, 즉, 주물 두께에 의해 조절할 필요가 있고 그 표준 첨가량은 표 12에 나타 내었다.

편상흑연을 갖는 accicular 주철의 인장강도는 35~45 kg f/ml이며 회주철중에서는 강도가 크지만 구상흑연을 갖는 accicular 주철은 100 kg f/ml 이상의 것도 얻을 수 있다. 최근 이에 대한 기초연구, 용도개발이 활발하다.

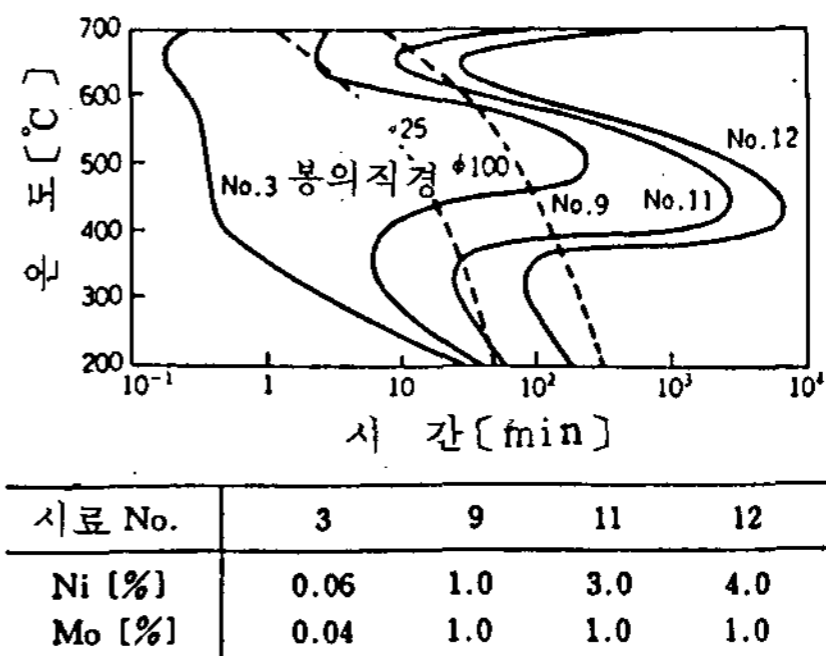


그림 12. 주철의 등온변태곡선에 미치는 Ni, Mo의 영향

표 12. 주물두께와 Ni 필요량 (Mo 0.8 ~ 1.0%)

단면두께 [mm]	Ni [%]
< 35	1.0 ~ 1.5
35 ~ 75	1.5 ~ 2.5
75 ~ 100	2.5 ~ 3.0
100 ~ 200	3.0 ~ 4.0

4-7 Cu 합금주철

Cu는 약한 흑연화 촉진원소이며 함유량이 작으면 기지중에 고용하여 pearite 석출을 조장하며 인장강도를 향상하는데 그 효과는 작다. 따라서 기계적성질의 향상에는 Cu 단독으로 사용하기 보다 Cr과 Mo을 함께 첨가한다.

Cu는 구상화를 저해하는 원소이므로 2%이하이면 그 악영향이 거의 없어지므로 강도를 필요로 하는 경우에는 Ni-Cr 상흑연주철의 대신 값이 싼 Cu-Cr 구상흑연주철이 많이 사용된다.

회주철에 대한 Cu의 효과는 기계적성질의 향상보다 오히려 내식성의 개선이 더 크고 묽은 황산과 같은 여러가지가 산 뿐만 아니라 특히 S을 함유한 분위기에 대한 내식성이 좋으므로 석유공업에 사용되고 있다.

일반적으로 많이 쓰이는 Cu합금주철의 예는 표 13과 같다.

표 13. Cu 합금주철의 예

종 류	C	Si	Mn	Cu	Cr	Mo	인장강도 (kg.f/mm ²)	경 도 (HB)
일 반 주 철	3.28	1.96	0.96				26.5	217
Cu 주 철	3.28	1.96	0.96	0.60			28.1	223
Cu-Cr주철	3.35	2.05	0.65	0.70	0.55		35.7	290
Cu-Mo주철	3.28	1.96	0.96	0.65		0.54	37.1	269

4-8 V 합금주철

V은 강한 탄화물 생성원소이기 때문에 주철에 소량 첨가하여도 흑연조직을 개선한 pearlite 을 미세화하여 기계적성질을 개선한다.

P합금주철에 V을 첨가하면 steadite 공정중에 판상 탄화물이 정출하여 그 경도는 steadite (HV≒600)와 pearlite (HV≒250)에 비해 높다. 따라서 디젤기관의 실린더 라이너와 같이 고온에서나 연소생성물에 의해 부식을 동반하는 마찰조건하에서 기지중에 일정하게 분

산하여 있는 steadite 및 판상탄화물의 존재로 내마찰성을 향상하므로 선박용 대형 실린더 라이너로 널리 사용된다¹⁶⁾.

4-9 B 합금주철

강의 경화능 향상에는 B를 0.003%이하의 미량첨가로도 효과가 나타나는데 회주철에서는 그 정도의 미량첨가로는 효과가 없다.

Bastien과 Guillet¹⁶⁾는 B를 0.8%까지 주철에 첨가하여 그 효과를 조사한 바 B는 흑연화를 방지하여 주철의 강도를 크게 한다고 보고 하였다.

회주철에서도 B의 백선화 조장 작용을 이용하여 roll의 칠깊이 조절과 표면 경도의 상승에 일부 이용되고 있다.

가단주철의 백선의 반선(mottle)방지제로서 0.001~0.003% B 첨가가 많이 이용되고 있다.

최근에는 P합금주철에 0.02~0.06% B를 첨가하면 V와 같이 steadite 중에 판상 탄화물이 생기며, 내마모성을 향상하므로 내연기관의 실린더 라이너 주물에 사용되고 있다.

4-10 Al 합금주철

Al은 강한 흑연화 촉진원소인데 8~18% Al에서는 흑연이 없는 ferrite와 K상(C와 Al의 탄화물)의 혼합조직이 된다. 주철의 기계적 성질에 미치는 Al과 Si의 영향을 그림 13¹⁷⁾에 나타내었다. Si의 함유량에 관계없이 Al 2%이상이면 경도는 증가하고 연성을 감소시킨다.

Al 주철을 산화 분위기중에서 가열하면 표면에 치밀

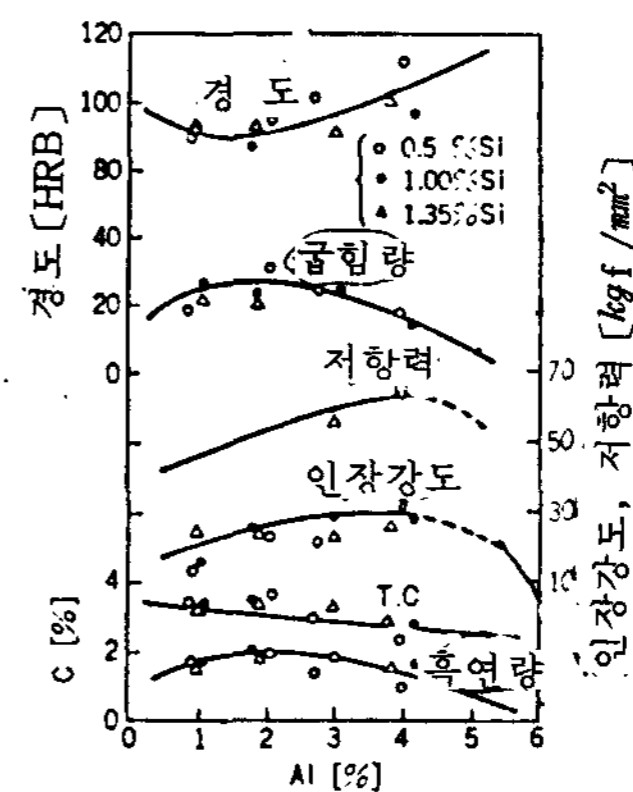


그림 13. 주철의 기계적 성질에 미치는 Al의 영향

한 Al_2O_3 피막이 생겨서 내산화 및 내성장성이 크기 때문에 8% Al 이상의 고Al 주철은 내열주철로서 우수한 성질을 가지고 있다. 그러나 고Al 주철은 주조시에 Al_2O_3 피막이 주물에 혼입하여 주조결함을 일으키기 쉽고 기계적성질도 좋지 않으므로 이런 결함을 완화하기 위해 Al 량을 감소시켜 Si 을 첨가한 Alsilon¹¹⁾과 Cr 을 첨가한 Cralfer 라고 불리는 내열주

철이 있다.

이들의 화학조성과 내열성은 표 7에 나타내었다.

Alsilon은 내산화와 내성장성이 우수하고 기계적성질중 특히, 고온강도는 Cralfer 가 더 우수하다.

표 14와 표 15는 각각 저합금주철과 고합금주철의 화학조성과 용도예를 나타내었다. 또한 표 16은 합금주철의 용도별 분류를 나타내었다.

표 14. 저합금주철의 화학조성과 용도 예

종류	화 학 조 성												경도 [HB]	인장강도 [kg.f/mm ²]	용 도
	T C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Ti	B			
A	3.0~ 3.2	0.6~ 1.3	0.8~ 1.0	0.2~ 0.6	<0.1	-	-	-	-	0.23 ~0.30	0.05 ~0.07		197~ 241	25~35	선박용 실린더라이나
B	3.36	2.23	0.74	0.031	0.067	-	0.33	0.23	-	-	-		195~ 216		자동차용 실린더부록
C	3.29	2.08	0.75	0.051	0.115	-	0.10	0.20					181~ 213		자동차용
D	3.54	2.14	0.69	0.250	0.061		0.75						583~ 598		자동차용캠축
E	3.10 ~3.50	2.00 ~2.30	0.70 ~0.90	<0.15	<0.15		0.25 ~0.40	0.45 ~0.65	0.25 ~0.40				179~ 235	≥ 25	농업기계용 실린더헤드
F	2.90 ~3.20	1.70 ~2.00	0.60 ~0.90	<0.30	<0.10	1.00 ~1.50	0.40 ~0.60	-	-	-	-	-	-	-	농업기계용 실린더라이나
G	3.10 ~3.40	2.15 ~2.45	0.60 ~0.90	<0.20	<0.17	0.20 ~0.40	0.85 ~1.20		0.40 ~0.60						자동차용캠축
H	3.00 ~3.40	0.90 ~1.50	0.60 ~0.80	0.20 ~0.40								0.20 ~0.30			선박용 실린더라이나
I	3.10 ~3.40	0.65 ~1.05	0.60 ~1.60	0.20 ~0.33	0.08 ~0.12					0.14 ~0.33	0.03 ~0.30				선박용 실린더라이나

표 15. 고합금주철의 화학조성과 용도 예

규격번호	종류	명 칭	화 학 조 성 (%)					최대 두께 (mm)	용 도
			T.C	Ni	Cr	Mo	Cu		
ASTM A532-75a	I-A	Ni-Cr-HC	3.0-3.6	3.3-5.0	1.4-4.0	< 1.0	-	200	다소 인성을 개선
	I-B	Ni-Cr-LC	2.5-3.0	3.3-5.0	1.4-4.0	< 1.0	-	200	
	I-C	Ni-Cr-GB	2.9-3.7	2.7-4.0	1.1-1.5	< 1.0	-	φ75	
	I-D	Ni-HiCr	2.5-3.6	5.0-7.0	7.0-11.0	< 1.0	-	300	인성개선을 위하여 HB 300 까지 소둔가능
	II-A	12% Cr	2.4-2.8	< 0.5	11.0-14.0	0.5-1.0	< 1.2	φ25	
	II-B	15% Cr-Mo-LC	2.4-2.8	< 0.5	14.0-18.0	< 1.0	< 1.2	100	
	II-C	15% Cr-Mo-HC	2.8-3.6	< 0.5	14.0-18.0	0.5-1.0	< 1.2	φ75	
	II-D	20% Cr-Mo-LC	2.0-2.6	< 1.5	18.0-23.0	1.0-3.0	< 1.2	200	
	II-E	20% Cr-Mo-HC	2.6-3.2	< 1.5	18.0-23.0	2.3-3.5	< 1.2	300	
III-A	25% Cr	2.3-3.0	< 1.5	23.0-28.0	< 1.5	< 1.2	200	인성개선을 위하여 HB 380 까지 소둔가능	

표 16. 합금주철의 용도별 분류

용도	명 칭	기 지 조 직	흑연조직
기 계 용	Ni 주 철	pearlite	흑연계
	Cr 주 철	//	//
	V-(Ti) 주철	//	//
	B주철	//	//
	Ni-Cr-(Mo)주철	//	//
	Cu-Cr 주철 Accicular 주철	bainite	//
내 열 내 식 용	고Al 주철	ferrite	백선계
	고Cr 주철	//	//
	Silal 주철	//	흑연계
	Ni-Resist 주철	austenite	//
	Nichrosilal 주철	//	//
내 마 모 용 비 자 성 용	Ni-Hard 주철	martensite	백선계
	고Cr-(Mo)주철	//	//
	No-Mag 주철	austenite	흑연계

5. 개발전망

합금주철은 강보다 오히려 우수한 성질을 갖는 것이 있다는 것을 알 수 있었다.

종래에는 주철에 특수한 성질을 부여하기 위해 합금 원소를 첨가하기 보다 열처리나 특수가공법에 더 많이 의존하였다. 따라서 이러한 방법들은 특수한 장비나 기술적인 문제, 경제적인 조건을 신중히 고려해야만 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

그러나 합금원소를 첨가하여 성질이 우수한 합금주철을 제조하는데에는 용해과정등을 신중히 고려한다면 손 쉽게 얻을 수 있다. 특히 자동차분야에서는 고성능화, 경제성 및 신뢰성에 대한 요구가 해마다 증가하고 있어 앞으로도 더욱 더 우수한 성질의 합금주철의 수요가 증대하리라 예상되고 있어 보다 많은 합금주철에

대한 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.

參 考 文 獻

1. 김수영, 홍종희, 강춘식, 나형용 : 鑄鐵工學, (1977)
2. 강춘식 : 주물기술 2, (1978)
3. 일본철강협회편 : 신관철강기술강좌 5, 강주물주철 주물, (1979)
4. 최창욱 : 한국주조공학회지, Vol.6, No.1, 와 No. 2 (1979)
5. 일본주물협회 : 주물편람 4, (丸善), (1986)
6. 梶山正孝 : 주조기술강좌 4, (1971)
7. 齊藤彌平 : 주철공학, (丸善), (1965).
8. Malleable Founders Society : Malleable Iron Castings, (1960)
9. E.Schüz, R.Stotz : Der Temperguss, Julius Sringer(1930)
10. H.A.Schwartz : American Malleable Cast Iron (1922)
11. 堤信久, 眞殿統 : 가단주철, (丸善), (1964)
12. 澤 民之助, 武田 勇 : 백심가단주철, 不二可鍛鑄鐵所 (1982)
13. H. Weber : Gjuteriet, 47, (1957) Castings, (1960)
14. 일본가단주철공학회 : 可鍛鑄鐵品ハンドブック, (1964)
15. R.Schenidewind, R.G.Mc Elwec : Trans, AFS, 58 (1950).
16. 일본주물협회 : 주물과 압탕설계 (1979)
17. 綜合鑄物センター鑄造 マニエアル委員會 : 鑄造マニエアル (1967)