

구상흑연주철의 경화능

이 영 호

산업과학기술연구소 압연연구부 공정연구실

Hardenability of Ductile Cast Iron

Y. H. Lee

Research Institute of Science and Technology

ABSTRACT

The hardenability of alloyed ductile cast irons was studied for 54 different alloy compositions obtained from eight commercial and laboratory foundries. The alloying elements investigated for their effects on hardenability were Si(2.0 to 3.0%), Mn(0.0 to 0.8%), Mo(0.0 to 0.6%), Cu(0.0 to 1.5%), and Ni(0.0 to 1.5%).

Two hardenability criteria, a first - pearlite hardenability criterion and a half - hard hardenability criterion, were used to determine hardenability of ductile irons.

Prediction models for each hardenability criterion were developed by multiple regression analysis and were well agreed with previous experimental results. Molybdenum was the most potent hardenability promoting element followed by manganese, copper and nickel ; silicon had little effect on hardenability and reduced the haedenability as silicon content increased. When alloying elements were presented in combination, strong synergistic effects on the hardenability were observed especially between molybdenum, copper and nickel.

The hardenability of ductile iron was strongly influenced by austenitizing temperature. Increasing austenitizing temperature up to 955°C, hardenability increased gradually but decreasing rate and then decreased as temperature increased above 995°C. Unless reducing segregation by very long - time annealing treatment, the hardenability of ductile iron was not significantly influenced by segregation of alloying elements.

1. 서 론

1940년대 말 구상흑연 주철이 최초로 소개된 이래 이의 생산량은 계속 증가하여 전세계적으로 연간 수백만톤에 달하고 있다. 구상흑연주철의 기계적 성질은 구상흑연(graphite)을 둘러싸고 있는 기지조직에 근본적으로 영향을 받으며 적당한 열처리를 통하여 조직을 변화시켜 향상시킬 수 있다. 구상흑연주철은 주로 주조상태, 소둔 혹은 템퍼드 마르텐사이트(tempered martensite)상태로 사용되었으나 최근 오스텝퍼드 구상흑연주철(austempered ductile

iron : ADI)의 개발로 중요한 공업소재의 하나로 대두되었다. ADI출현으로 인해 구상흑연주철의 경화능에 대한 신빙성있는 자료가 요구되고 있다.⁽¹⁻¹⁴⁾

지금까지 구상흑연주철의 경화능에 대한 연구는 Reynolds,⁽¹⁵⁾ Boyes,⁽¹⁶⁾ Scholz⁽¹⁷⁾ 그리고 Cias⁽¹⁸⁾에 의해 행해진 바 있으나 실험 방법의 미흡 및 연구규모의 제한 등에 기인하여 실제로 이용 가능한 경화능에 대한 자료를 제공하지 못했다. 구상흑연주철의 경화능은 널리 알려진 강철의 경화능과는 달리 합금원소에 의한 영향 이외에도 오스테나이트화 처리온도와 합금원소의 편석에 의해 영향⁽¹⁹⁾

을 받는다. 구상흑연주철의 경화능에 대한 실험과 예측 수식 모델 개발에는 상기한 요소들이 함께 고려되어야 한다.

본 연구의 목적은 구상흑연 주철 경화능에 영향을 미치는 중요 요소에 대한 선정, 합금 원소의 영향 분석, 경화능 예측 모델 개발에 있다. 경화능 측정에는 조미니(Jominy) 실험 방법이 이용되었고 경도와 광학현미경을 이용한 두가지 경화능 기준이 이용되었다. 경화능 예측 모델은 회귀 분석 기술이 사용되었다.

2. 실험방법

2.1 시험 재료

본 실험에 사용된 구상흑연 주철은 8개의 미국 주물 공장으로 부터 Y-block, 환봉, 판의 형태로 공급되었다. 공급된 재료의 종류는 54종으로 저합금으로부터 고합금까지 다양하게 구성되어 있다. 재료의 화학성분은 각 주물 공장에서 제공하였고 John Deere Co.에 의해 재확인 되었으며 Table 1과 같다. 구상흑연 주철 경화능 연구에 사용된 합금원소로는 Si, Mn, Mo, Cu, Ni 등이다. 각 합금 원소량의 범위와 잔류 화학성분의 종류와 양은 Table 2와 같다. 합금 원소중 탄소의 함량은 총 탄소 함량과 계산된 기지조직 탄소 함량으로 구분하였으며 잔류원소중 Mg는 구상화 처리를 위해 첨가하였다.

2.2 경화능 실험

ASTM A-225 규격에 명시된 조미니 실험방법이 구상흑연 주철의 경화능 측정에 사용되었다. 시편의 크기와 엔드 퀸취(end-quench)시 요구되는 사항들은 Fig.1과 같다. 구상흑연 주철의 기지조직 탄소량은 오스테나이트화 처리온도에 영향을 받고 탄소 함유량은 경화능에 영향을 미치므로 강철 경화능 실험에서와는 달리 하나의 변수로 처리했다. 사용된 오스테나이트화 처리 온도 범위는 870°C와 955°C사이이며 1050°C에서의 부분적인 실험도 오스테나이트화 처리 온도가 경화능에 미치는 영향을 검토하기 위해 수행됐다.

합금원소의 편석은 구상흑연 주철에 있어서 피할 수 없는 현상이며 불균일한 조직의 변태를 초래하고 경화능에도 영향을 미친다. 구상흑연 주철의 편석은 장시간의 소둔이나

Table 1 Chemical Analysis of the Ductile Iron Alloys.

Heat No.	Composition, wt. Pct.*					
	C	Si	Mn	Mo	Cu	Ni
1	3.86	2.00	0.22	—	—	—**
2	3.48	3.14	0.22	—	—	—
3	3.79	2.34	0.42	—	—	—
4	3.66	2.51	0.60	—	—	—
5	3.58	2.57	0.80	—	—	—
6	3.60	2.55	0.21	0.15	—	—
7	3.70	2.50	0.20	0.30	—	—
8	3.59	2.29	0.21	0.39	—	—
9	3.68	2.59	0.51	0.23	—	—
10	3.64	2.46	0.21	—	0.53	—
11	3.51	2.58	0.22	—	1.52	—
12	3.60	2.46	0.42	—	0.49	—
13	3.74	2.50	0.62	—	1.02	—
14	3.64	2.35	0.21	—	—	0.52
15	3.67	2.54	0.22	—	—	0.99
16	3.70	2.42	0.39	—	—	0.53
17	3.65	2.36	0.59	—	—	1.01
18	3.58	2.48	0.21	0.39	1.51	—
19	3.67	2.37	0.22	0.24	—	0.77
20	3.59	2.92	0.22	0.25	—	0.79
21	3.52	2.57	0.20	0.39	—	1.53
22	3.57	2.52	0.22	0.15	0.51	1.09
23	3.57	2.51	0.21	0.29	0.78	1.52
24	3.77	2.57	0.47	—	—	—
25	3.63	2.53	0.48	0.22	—	—
26	3.66	2.69	0.48	0.36	—	—
27	3.71	2.58	0.48	0.60	—	—
28	3.72	2.60	0.50	0.20	—	0.98
29	3.66	2.75	0.51	0.22	1.00	—
30	3.52	2.55	0.48	0.20	0.49	0.54
31	3.51	2.52	0.48	0.20	0.99	0.52
32	3.67	2.63	0.50	0.20	0.53	1.03
33	3.50	2.66	0.46	0.20	0.94	0.96
34	3.66	2.59	0.50	—	0.44	0.55
35	3.59	2.61	0.48	—	0.96	0.54
36	3.65	2.60	0.49	—	0.42	0.94
37	3.56	2.47	0.50	—	0.95	0.97
38	3.44	2.39	0.28	—	—	0.61
39	3.53	2.35	0.29	—	0.11	—
40	3.55	2.32	0.57	—	0.50	—
41	3.65	2.07	0.26	—	0.45	—
42	3.56	2.76	0.63	—	0.26	—
43	3.55	2.82	0.55	—	0.57	—
44	3.60	2.41	0.28	0.28	0.70	—
45	3.68	2.07	—	—	—	—
46	3.72	2.10	0.11	—	—	—
47	3.87	2.24	0.40	—	0.10	—
48	3.88	2.28	0.40	—	0.19	—
49	3.85	2.24	0.44	0.22	0.28	0.40
50	3.60	2.73	0.33	—	—	—
51	3.58	2.62	0.28	—	—	—
52	3.63	2.47	0.34	—	0.10	—
53	3.62	2.58	0.22	0.29	0.83	—
54	3.60	2.40	0.25	0.32	—	1.53

* Major alloying elements only. Residual and tramp elements are not listed.

** Trace amount (less than 0.07 %)

구상흑연숫자(nodule count)를 증가시켜서 현저히 감소시킬 수 있으므로 편석이 경화능에 미치는 영향은 소둔된 시편과 주물 상태의 시편에 대한 비교와 구상흑연숫자가 다른 시편에 대한 비교로 검토될 수 있다.

시편의 소둔은 아르곤 분위기에서 1000°C로 일주일간 행해졌으며 소둔된 시편은 조미니 시험 이전에 탈탄층을 제거하기 위한 표면 가공을 했다. 오스테나이트화 처리는 900°C에서 두시간 동안 했으며 조미니 실험을 한 이후 주물상태의 시편과 비교검토했다. 또한 합금 성분은 같으나 구상흑연수가 125와 200 nodules/mm²로 다른 시편을 사용하여 경화능을 비교 검토하였다.

구상 흑연 주철의 경화능 기준(criteria)으로 first-pearlite와 half-hard 기준이 사용되었다. First-pearlite 기준은 기지 조직의 변태를 현미경으로 관찰하여 설정되었으며 퍼어라이트가 기지조직에 최초로 발생하는 거리를 의미한다. 이 기준은 오스템퍼링 열처리후 퍼어라이트 변환이

되지 않는 조직이 요구됨을 부응키 위해 선택되었다. Half-hard 기준은 철강 경화능 곡선으로 부터 결정하였으며 최고 및 최저 경도값의 평균값에 해당하는 거리를 의미한다.

2.3 경화능 예측 모델개발

경화능 예측 모델의 개발은 회귀 분석 기술을 이용하였다. First-pearlite와 Half-hard 경화능 기준에 대한 예측 모델을 분리하여 개발했다. 회귀분석에 사용된 독립 변수로는 개별 합금 원소(Si, Mn, Mo, Cu, Ni)들과 합금원소의 복합식(즉 MnMo, MoCu 등) 그리고 오스테나이트화 처리온도가 이용되었다. 독립 변수의 선정방법은 Sterwise selection 방법이 이용되었다. 회귀분석은 상용화된 통계학 Package인 SPSS(Statistical Package for Social Science)를 사용하여 수행했다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 구상 흑연 주철 경화능

First-pearlite 및 half-hard 경화능 기준에 의해 얻어

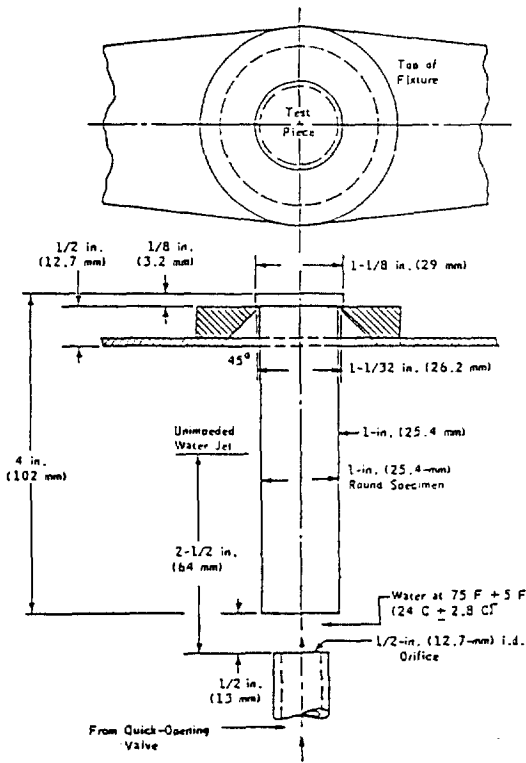


Fig.1 ASTM A-255 requirements for the Jominy end-quench test specimen, support, and water-quench(36).

Table 2. Summary of Chemical Analysis Data..

(a) Range of Elements Varied to Determine Effects of Alloying Element on Hardenability		
Element	wt. Pct.	Remarks
C	3.4 - 3.9	Total Carbon
C(matrix)	0.6 - 1.2	Matrix Carbon
Si	2.0 - 3.1	
Mn	0.0 - 0.8	
Mo	0.0 - 0.6	
Cu	0.0 - 1.5	
Ni	0.0 - 1.5	
(b) Minor Elements Held Constant for All Specimens		
P	< 0.045	Nominal Addition
S	< 0.040	Nominal Addition
Cr	< 0.060	Noimnal Addition
Al	< 0.050	Nominal Addition
Mg	0.030 - 0.065	

1. Calculated value using the following expression ;

$$\%C(\text{matrix}) = T_r / 420 - 0.17 (1Si) - 0.95$$

Table 3 Hardenability of Ductile Irons Studied.
Hardenability values in 1/16 inch (values in parentheses are in mm).

a) First Pearlite Criterion			
Heat	Austenitizing Temperature(°C)		
	871	900	954
1	5.5 (8.7)	— *	6.2 (9.9)
2	3.8 (6.0)	—	7.0 (11.1)
3	7.0 (11.1)	—	8.0 (12.7)
4	9.4 (14.9)	—	10.2 (16.2)
5	12.0 (19.1)	—	—
6	7.0 (11.1)	—	8.1 (12.9)
7	8.0 (12.7)	—	10.3 (16.4)
8	12.2 (19.4)	—	13.6 (21.6)
9	11.8 (18.7)	—	—
10	7.0 (11.1)	—	9.0 (14.3)
11	8.3 (13.2)	—	12.8 (20.3)
12	8.5 (13.5)	—	9.6 (15.2)
13	11.0 (17.5)	—	—
14	6.7 (10.6)	—	8.2 (13.0)
15	8.0 (12.7)	—	10.2 (16.2)
16	9.2 (14.6)	—	9.6 (15.2)
17	12.6 (20.0)	—	14.5 (23.0)
18	11.0 (33.4)	—	—
19	12.4 (19.7)	—	13.6 (21.6)
20	11.2 (17.8)	—	13.0 (20.6)
21	26.0 (41.3)	—	33.6 (53.4)
22	16.0 (25.4)	—	—
23	48.2 (76.5)	—	—
24	7.8 (12.4)	—	9.3 (14.8)
25	10.7 (17.0)	—	12.4 (19.7)
26	12.8 (20.3)	—	16.4 (26.0)
27	18.1 (28.7)	—	20.8 (33.0)
28	21.8 (31.4)	—	23.6 (37.5)
29	20.5 (32.6)	—	22.6 (35.9)
30	21.5 (34.1)	—	25.0 (39.7)
31	24.0 (38.1)	—	—
32	30.5 (48.4)	—	—
33	31.2 (49.6)	—	—
34	12.0 (19.1)	—	13.6 (21.6)
35	12.4 (19.7)	—	16.5 (26.2)
36	13.6 (21.6)	—	17.2 (27.3)
37	16.4 (26.0)	—	20.0 (31.8)
38	6.5 (10.3)	—	—
39	5.5 (8.7)	—	—
40	10.2 (16.2)	—	—
41	6.4 (10.2)	8.1 (12.9)	9.2 (14.6)
42	8.9 (14.1)	12.0 (19.1)	13.0 (20.6)
43	9.7 (15.4)	12.3 (19.5)	13.8 (21.9)
44	12.6 (20.0)	—	16.0 (25.4)
45	4.4 (7.0)	—	7.0 (11.1)
46	5.3 (8.4)	—	7.3 (11.6)
47	6.8 (10.8)	8.3 (13.2)	9.0 (14.3)
48	7.0 (11.1)	8.3 (14.0)	9.3 (14.8)
49	1.6 (2.0)	—	6.8 (26.7)
50	5.3 (8.4)	6.8 (10.8)	7.4 (11.8)
51	4.8 (7.6)	6.4 (10.2)	6.3 (10.0)
52	5.6 (8.9)	7.9 (12.6)	9.4 (14.9)
53	16.8 (26.7)	20.2 (10.3)	22.0 (34.9)
54	14.2 (38.4)	—	27.4 (43.5)

b) Half - Hard Criterion			
Heat	Austenitizing Temperature (°C)		
	871	900	954
1	6.5 (10.3)	—	7.9 (12.6)
2	4.9 (7.8)	—	9.4 (14.9)
3	8.5 (13.5)	—	9.6 (15.2)
4	11.3 (17.9)	—	12.2 (19.4)
5	13.8 (21.9)	—	—
6	8.5 (13.5)	—	10.7 (17.0)
7	10.2 (16.2)	—	13.2 (21.0)
8	14.5 (23.0)	—	18.2 (28.9)
9	15.6 (24.8)	—	17.4 (27.6)
10	7.9 (12.6)	—	11.1 (17.6)
11	9.9 (15.7)	—	14.4 (22.9)
12	9.7 (15.4)	—	11.6 (18.4)
13	13.3 (21.1)	—	—
14	8.1 (12.8)	—	11.0 (17.5)
15	9.9 (15.7)	—	13.6 (21.6)
16	10.6 (16.8)	—	11.8 (18.7)
17	16.5 (26.2)	—	18.6 (29.5)
18	33.0 (52.4)	—	—
19	16.0 (25.4)	—	18.9 (30.0)
20	14.1 (22.4)	—	18.2 (28.9)
21	38.6 (61.3)	—	—
22	21.0 (33.4)	—	—
23	—	—	—
24	9.0 (14.3)	—	12.0 (19.1)
25	13.6 (21.6)	—	16.2 (25.7)
26	15.7 (24.9)	—	23.2 (36.8)
27	22.5 (35.7)	—	28.2 (44.8)
28	29.8 (47.3)	—	31.2 (49.6)
29	26.5 (42.1)	—	29.8 (47.3)
30	28.0 (44.5)	—	32.2 (51.1)
31	30.8 (48.9)	—	—
32	38.2 (60.6)	—	—
33	—	—	—
34	14.1 (22.4)	—	17.4 (27.6)
35	14.3 (22.7)	—	19.8 (31.4)
36	15.8 (25.1)	—	21.2 (33.7)
37	19.5 (31.0)	—	23.5 (37.3)
38	8.0 (12.7)	—	—
39	7.0 (11.1)	—	—
40	12.2 (19.4)	—	—
41	7.8 (12.4)	9.2 (14.6)	10.1 (16.0)
42	12.3 (19.5)	14.0 (22.2)	14.2 (22.6)
43	12.8 (20.3)	14.8 (23.5)	15.1 (24.0)
44	14.8 (23.5)	—	23.5 (37.3)
45	5.6 (8.9)	—	8.8 (14.0)
46	6.2 (9.9)	—	9.2 (14.6)
47	7.4 (11.8)	9.3 (14.8)	11.1 (17.4)
48	8.7 (12.2)	10.2 (16.2)	11.8 (18.7)
49	18.2 (28.9)	—	24.2 (38.4)
50	6.4 (10.2)	7.9 (12.5)	8.7 (13.8)
51	5.8 (9.2)	6.8 (10.8)	7.5 (11.9)
52	6.8 (10.8)	8.2 (13.0)	10.8 (17.2)
53	18.6 (29.5)	21.8 (31.4)	25.1 (39.9)
54	28.2 (44.6)	—	33.2 (52.7)

* Values are not given because of either limitation on material supply or difficulty of determination of hardenability.

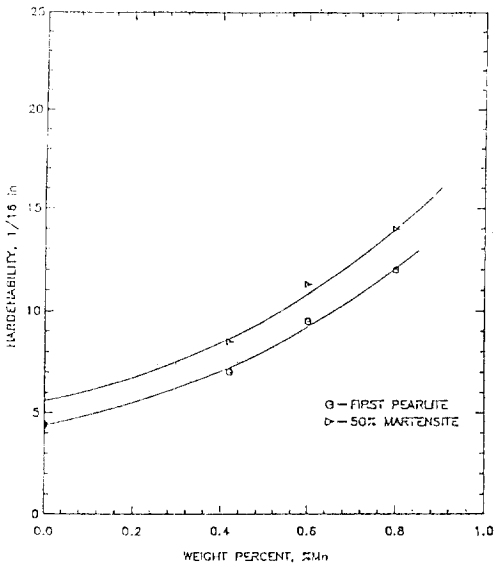


Fig. 2 Effects of manganese on the hardenability (J_D) for the first-pearlite and the half-hard criteria.

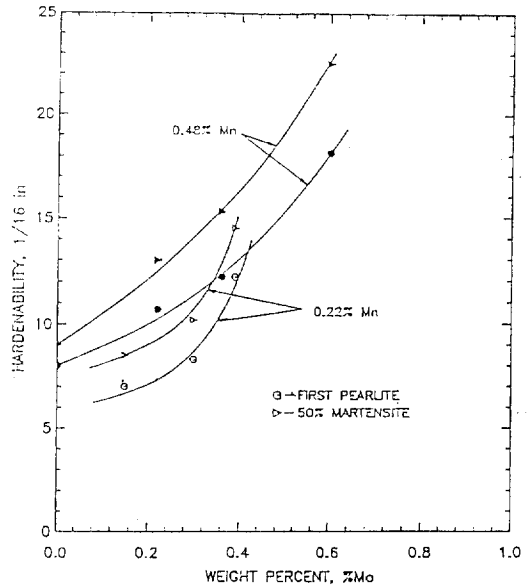


Fig. 3 Effects of molybdenum on the hardenability (J_D) for the first-pearlite and the half-hard criteria.

전 경화능 결과는 Table 3 과 같다. 경화능 값은 조미니 거리 (J_d : 1/16 inch)로 나타냈으며 대부분이 870°C 및 955°C의 오스테나이트화 온도에서 얻어졌다. 900°C에서 얻어진 제한된 수의 경화능 값도 포함되었다. Half-hard 기준의 경우 고합금(high alloyed) 구상 흑연 주철의 경화능 값이 대단히 커서 조미니실험으로는 정확하게 결정할 수 없기 때문에 제외되었다. 합금 원소가 경화능에 미치는 영향은 합금 원소의 첨가에 따른 경화능의 변화를 비교검토하였고, 개별 합금원소와 합금원소의 조합에 의한 영향으로 구분하였다.

3.1.1 개별 합금원소의 영향

개별 합금원소의 영향은 첨가에 따른 경화능의 변화 및 상대적인 효능을 비교하기 위해 조사하였다. 본 연구에서는 Si, Mn, Ni, Cu 및 Ni의 경화능에 대한 영향을 조사했으며 Si 이외의 모든 합금원소의 증가에 따라 경화능도 증가됨을 알 수 있었다. 개별 합금원소들이 경화능에 미치는 영향을 정리하면 다음과 같다.

Si ;

Si가 경화능에 미치는 영향은 가장 작았으며 Si 함량이 증가할수록 경화능은 감소되었다. 이와 같은 Si의 영향은 저합금 및 고합금 구상흑연 주철에서 유사하였으며 고합금

인 경우 Si 첨가에 따른 경화능의 변화량이 저합금의 경우보다 다소 컸다. Si량이 증가할수록 경화능이 감소하는 원인은 오스테나이트 상태에서 탄소 함량이 감소하기 때문이다.

Mn ;

Mn이 경화능에 미치는 영향은 0.0%와 0.8% 사이에서 조사하였으며 Fig.2에 보인 바와 같이 Mn량이 증가할수록 경화능도 증가함을 알 수 있다. Mn은 cell 경계에 강력히 편석되는 경향을 보였다. 이와 같은 Mn의 편석 현상은 미세 조직 연구에 의해 잘 나타났으며 퍼어라이트 기지조직에 부분적인 마르텐사이트와 잔류 오스테나이트 조직들이 셀(cell) 경계에 집합되어 있었다.

Mo ;

Mo가 경화능에 미치는 영향은 0.0%와 0.6% 사이에서 조사하였으며 Fig.3에 보인 바와 같이 Mo량이 증가할수록 경화능도 급속도로 증가함을 알 수 있다. Mn량을 증가시킬 경우 Mo량이 증가할수록 경화능의 증가율은 다소 감소하였으나 유사한 경향을 보였다. Mo량의 증가에 따른 경화능의 증가율은 half-hard 기준에 의해 측정된 값이 first-pearlite 기준의 경우보다 컸다. Mo 또한 셀 경계에 편석되는 경향을 보였다.

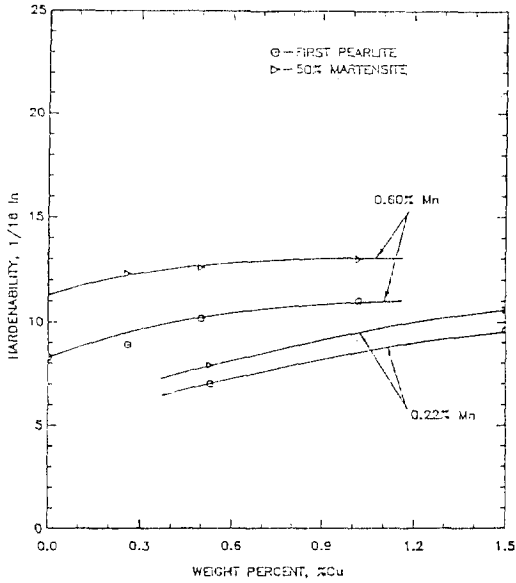


Fig. 4 Effects of copper on the hardenability (J_D) for the first-pearlite and the half-hard criteria.

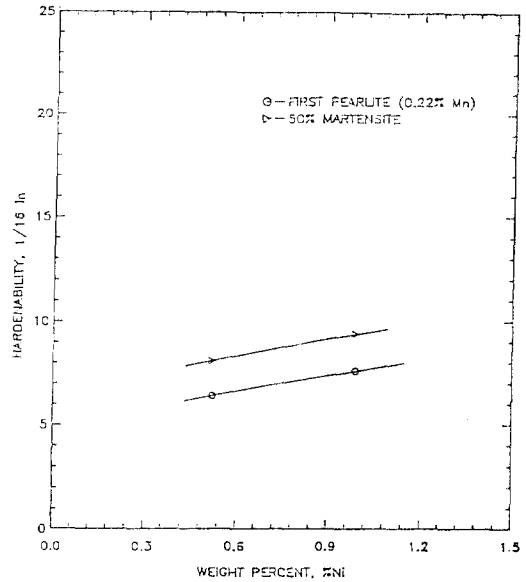


Fig. 5 Effects of nickel on the hardenability (J_D) for the first-pearlite and the half-hard criteria.

Cu :

Cu가 경화능에 미치는 영향은 0.0%와 1.5%사이에서 조사했으며 Cu량의 증가에 따른 경화능의 증가는 Fig.4에 보인바와 같이 미소했다. 이와 같은 경향은 Mn 량(0.6% mn)이 증가한 경우도 유사했으며 이는 Cu와 Mn 사이에 효과가 없음을 보여준다. 미세조직 연구에 의하면 Cu가 첨가된 구상흑연주철의 경우 퍼라이트의 생성이 구상흑연 주위와 결정립계에서 동시에 시작됨을 알 수 있었다(다른 합금의 경우 퍼어라이트는 구상흑연 주위에서만 형성된다). 이같은 현상은 오스테나이트화 처리온도가 낮아질수록 그리고 Cu 첨가량이 높아질수록 분명했으며 높은 오스테나이트화 처리 온도에서는 현저히 감소됨을 알 수 있었다.

Ni ;

Ni가 경화능에 미치는 영향은 1%까지 조사했으며 경화능의 증가는 Cu 처럼 Fig.5에 보인바와 같이 미소하였다. Ni는 셀 간에 편석되지 않았고 비교적 균일한 기지조직의 변태를 보였다.

상기한 합금원소의 상대적인 효능을 first-pearlite 기준에 의해 요약하면 Fig.6과 같다. 제일 효능이 큰 합금원소는 Mo 이고 그 다음은 Mn이었다. Cu와 Ni는 단독으로 이용될 경우 아주 미약함을 알 수 있었다. 이와 같은 합금

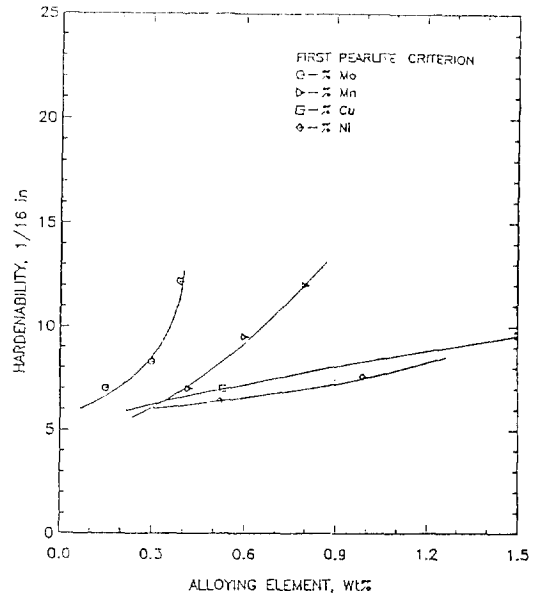


Fig. 6 The effects of manganese, molybdenum, copper and nickel content on the first pearlite hardenability.

원소의 영향은 ADI 연구에서도 유사한 경향을 보였다.⁽¹²⁾

3. 1. 2 합금원소의 조합에 의한 영향

구상 흑연 주철의 경화능은 합금원소들이 조합적으로 첨가될 경우 개별적으로 첨가될 때 보다 월등히 증가됨을 알 수 있었다. Si 혹은 Mn과 다른 합금원소와는 조합에 의한 영향은 미소하였다. Mo, Cu, Ni의 조합이 경화능에 대한 효과는 Table 4와 같으며 다음과 같은 사항을 관찰할 수 있었다.

1. Cu-Ni 조합이 개별 Mo보다 효과적이다.
2. Cu-Ni 조합에 Mo를 첨가할 경우 경화능이 급속도로 증가했다.
3. 작은 양의 여러 합금원소의 조합이 많은 양의 단독 합금원소보다 효과적이다.

3.2 경화능 예측 모델

조미니 실험과 두가지 경화능 기준에 의해 결정된 경화능 값들을 종속변수로 하고 개별 합금원소, 합금원소 조합, 오스테나이트화 처리 온도를 독립 변수로 하여 회귀분석한 결과 각 경화능 기준에 따른 예측 모델이 구해졌다.

First-pearlite 기준에 대한 예측 모델은 다음과 같다.

A) $HDI = 1.8 Tr + 11.4 Mn + 15.9 Mo + 3.8 Cu + 18.0 MoCu + 24.3 MoNi + 8.6 MnNi + 32.0 MoCuNi - 51.8$ (1 a)

B) $HDI = 2.9 Tr + 18.2 Mn + 25.3 Mo + 6.0 Cu + 28.6 MoCu + 38.6 MoNi + 13.6 MnNi + 50.9 MoCuNi - 82.2$ (1 b)

여기서 Tr=오스테나이트화 처리 온도의 제곱근
 HDI=경화능 값 : in Jd(식 1 a),
 in mm(식 1 b)
 합금원소 함량 : wt%

Table 4 Effect of Alloy Combinations on Hardenability.

Composition			Hardenability Jd (1/16 in)
Mo	Cu	Ni	
0.0	0.0	0.0	8.0
0.2	0.0	0.0	10.7
0.0	0.5	0.5	12.0
0.2	0.5	0.5	20.8
0.2	1.0	1.0	31.2
0.4	0.0	0.0	12.2
0.4	0.5	0.5	42.0

Table 5는 예측 모델(1)에 대한 통계 자료로서 예측 모델이 실험자료와 잘 조화됨을 보여준다. 전술하였던 합금원소 조합의 효능은 예측 모델에도 잘 나타나 있다. 개별 합금원소 중에서 Si에 의한 영향은 통계학적으로 중요하지 않아서 예측모델에서 제외되었으며 Ni는 다른 합금원소와 조합 형태로만 포함되었다. 합금원소의 조합중 Mo-Cu, Mo-No, Mo-Cu-Ni 조합이 매우 효과적임을 알 수 있다. 오스테나이트화 처리온도는 Cu와 효능이 비슷했다. Fig. 7은 실험에 의해 얻어진 경화능 값과 모델에 의해 계산된 경화능 값을 비교한 것으로 Dorazil의 ADI 경화능 자료(9)와 예측 모델에 의해 계산된 경화능 값을 비교한 것이다. 비록 급냉(quenching) 소재(물과 소금)가 달라 직접적인 비교는 불가능 하나 상대적인 비교를 통한 일반적인 경향은 알 수 있었다. Fig. 8은 ADI 경화능 값과 경화능값을 비교한 것으로 합금원소의 조합 및 오스테나이트화 처리 온도에 따른 두 경화능의 변화가 유사함을 알 수 있다. 경화능 값으로부터 ADI 경화능 값을 직접 얻기 위해서는 오스템퍼링 급냉소재(소금, 기름 등)의 급냉도 값이 필요하므로 급냉도에 대

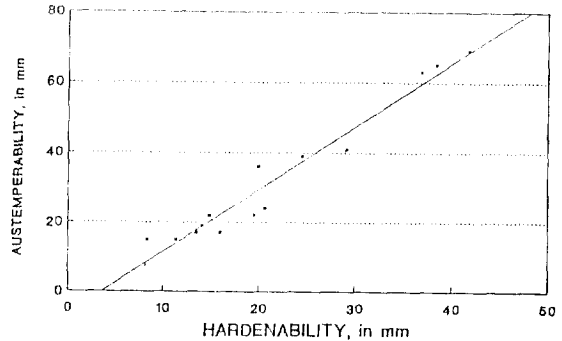


Fig. 7 Comparison of hardenability vs austemperability.

Table 5 Parameters Indicating the Goodness of fit for the Complex Equation (first-pearlite criterion, Eq. [1]).

Parameter	Value
Multiple correlation coefficient (R)	0.982
R ²	0.965
Adjusted R ²	0.962
Standard Error	1.43 (2.27 mm)
F-Ratio	321.6

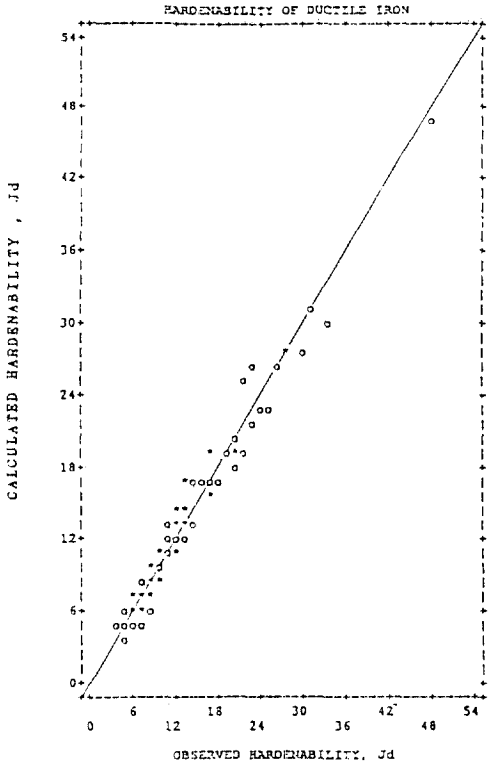


Fig.8 Observed hardenability vs calculated hardenability for the first-pearlite hardenability criterion(Eq.[1]).
*indicates multiple data points.

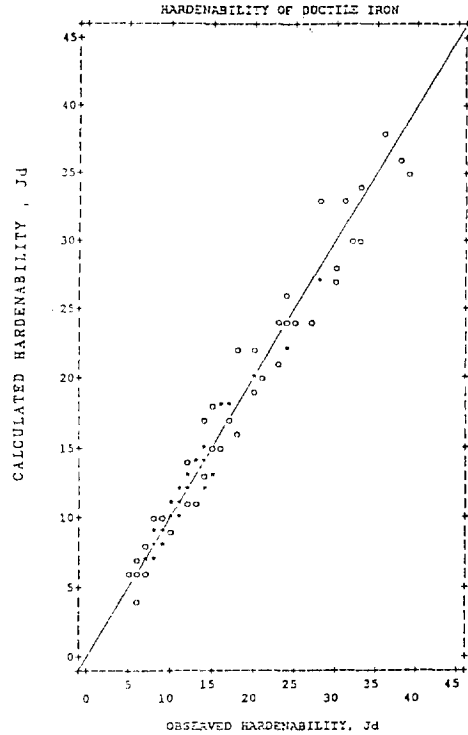


Fig.9 Observed hardenability vs calculated hardenability for the hardenability criterion (Eq.[2]). *indicates multiple data points.

한 상세한 연구가 필요하다.

Half-hard 경화능 기준에 대한 예측 모델은 다음과 같다.

A) $HDI = 2.5 Tr + 11.7 Mn + 12.8 Mo + 27.0 MnMo + 26.7 MoCu + 31.5 MoNi + 3.7 Cu + 13.9 MnNi + 34.9 MoCuNi - 69.7 \dots\dots\dots (2 a)$

B) $HDI = 3.9 Tr + 18.7 Mn + 20.3 Mo + 42.9 MnMo + 42.4 MoCu + 50.0 MoNi + 5.9 Cu + 22.1 MnNi + 55.4 MoCuNi - 110.7 \dots\dots\dots (2 b)$

Table 6은 예측 모델 (2)에 대한 통계 자료로서 예측 모델이 실험 자료와 잘 조화 됨을 보여준다. First-pearlite 기준 예측 모델과 유사한 합금원소 조합의 효능을 알 수 있다. Si 및 Ni 개별항은 모델에서 제외되었으며 Mo, Cu, Ni의 조합이 효과적이다. 오스테나이트화 처리 온도의 효

과는 first-pearlite 기준 예측모델에서 보다 약간 크다. Fig.9는 경화능 실험값과 모델에 의해 계산된 경화능 값을 비교한 것으로 예측 모델이 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. 기존의 경화능 자료와 half-hard 예측 모델에 의해 구해진 값을 비교하면 Fig.10과 같다. 모델에 의해 구해진 경

Table 6 Parameters Indication the Goodness of fit for the complex Equation(half-hard Criterion, Eq.[2]).

Parameter	Value
Multiple correlation coefficient (R)	0.984
R ²	0.968
Adjusted R ²	0.965
Standard Error	1.5 (2.4 mm)
F-Ratio	299.4

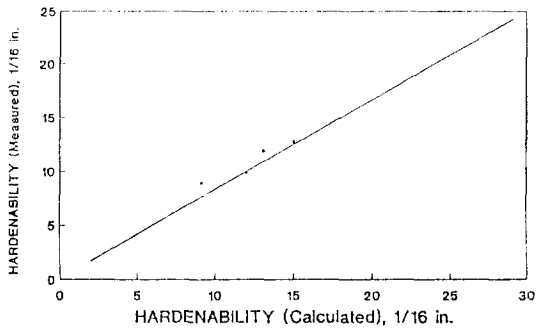


Fig. 10 Comparison of calculated hardrnability vs measured hardenability.

화능값이 차이가 나는 이유는 본 실험과 Scholz의 실험에서 사용된 오스테나이트화 처리시간의 차이에 기인한다.

본 연구에는 개발된 예측 모델들은 개발시 사용된 변수들의 범위 내에서만 정확하므로 예측 모델 사용시 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

1. 오스테나이트화 처리 온도의 범위가 870~955°C 사이라야 한다.
2. 합금원소들이 개별적으로 첨가될 시는 함량이 0.8%Mn, 6.0%Mo, 1.5%Cu, 1.5%Ni까지 가능하지만 동시에 첨가할 경우에는 Mn, Mo 함량을 0.5%, 0.3%으로 제한해야 한다.

3.3 구상 흑연 주철의 경화능에 영향을 미치는 요소

3.3.1 오스테나이트화 처리 온도

오스테나이트화 처리 온도를 변화시키므로써 얻어지는 효과는 오스테나이트 기지조직의 탄소함량의 변화와 상변태 속도의 변화로써 결과적으로 경화능에 지대한 영향을 미친다. Fig. 11은 오스테나이트화 처리 온도가 경화능에 미치는 영향을 보인 것이다. 오스테나이트화 처리 온도 범위가 870°C에서 955°C까지는 경화능이 증가하며 경화능의 증가율은 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 이와 같은 경화능의 변화는 두가지 요소가 복합적으로 작용하는데 기인한다. 첫째는 온도 증가에 따른 기지조직의 탄소함유량의 증가에 따른 경화능의 증가이고 둘째는 온도가 증가할수록 급냉시 냉각률 감소에 의한 경화능의 감소이다. 이 두가지 요소들은 상호 연관(interactively)되어 작용하며 오스테나이트화 처리 온도가 955°C이하에서는 탄소함량의 증가에 의한 효과가 냉각에 의한 효과를 압도하므로 경화능이 증가하며 (9) 그 이상의 온도에서는 냉각률의 감소와 탄소에 의한 효과

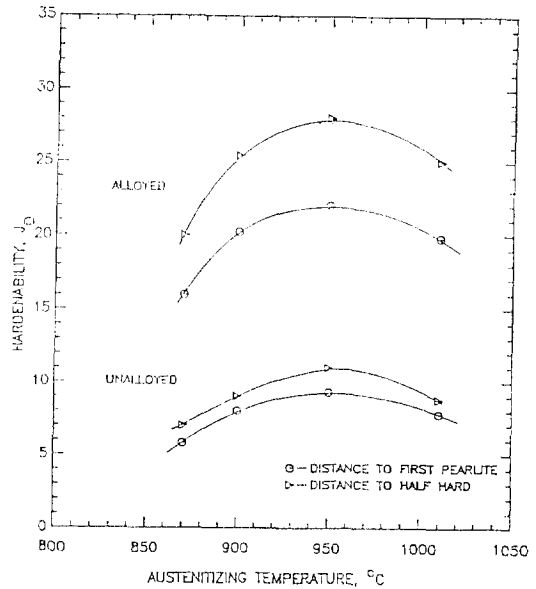


Fig. 11 The effect of austenitizing temperature on the hardenability of unalloyed and alloyed ductile irons.

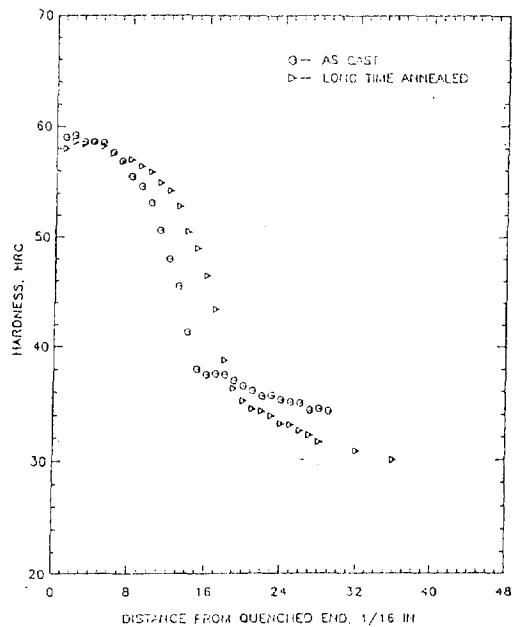


Fig. 12 Effects of long time annealing treatment on the hardenability of a 0.6% Mn-0.3% Cu ductile iron austenitized at 900°C for two hours.

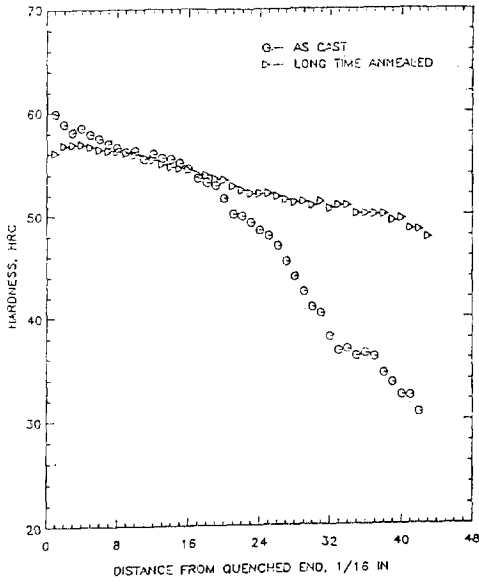


Fig. 13 Effects of long time annealing treatment on the hardenability of a 0.2% Mn-0.2% Mo-0.2% Cu ductile iron austenitized at 900 °C (1650 °F) for two hours.

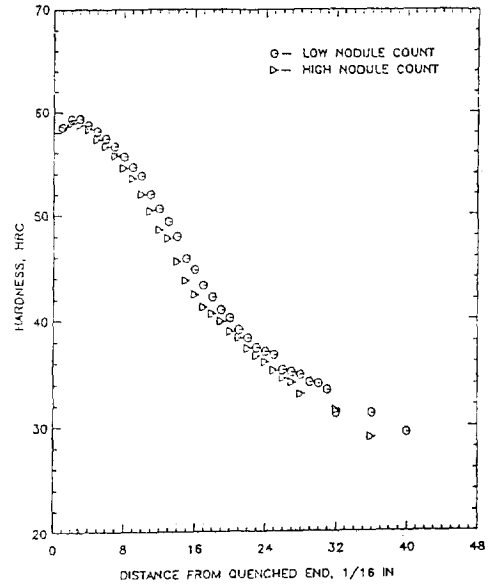


Fig. 14 Effects of nodule count on the hardenability of 0.2% Mn-0.3% Cu-0.4% Ni alloyed ductile iron austenitized at 871 °C (1600 °F) for two hours.

(20)가 점차적으로 감소하기 때문에 경화능 또한 감소한다.

3. 3. 2 편석

합금원소의 편석이 경화능에 미치는 영향은 장시간의 소둔에 의해 편석을 감소시키지 않는 한 거의 없었다. Fig. 12와 13은 주물 상태와 장시간 소둔 후의 경화능을 비교한 것이다. 소둔에 의한 편석의 감소로 경화능이 크게 증가함을 알 수 있다. 경화능의 증가량은 첨가된 합금 원소의 종류에 따라 차이가 있으나 Mo가 첨가된 구상 흑연 주철의 경우가 (Fig. 13) 가장 컸으며 주물 상태인 경우 Mo의 경화능에 대한 효과가 편석에 의해 부분적으로만 기여 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 14와 15는 구상 흑연수에 따른 경화능의 변화를 보인 것이다. 구상 흑연 수가 많을수록 경화능이 증가할 것으로 기대했으나 실제로는 그림에서 보는 바와 같이 경화능에는 거의 차이가 없거나 약간 감소하였다. 이는 구상 흑연 수를 증가시키므로써 편석량을 줄일수는 있으나 감소된 편석의 정도가 상대적으로 미소하고 또한 구상 흑연수를 증가시키며 따라 퍼어라이트 혹은 베이나이트의 핵생성위치(구상 흑연 주변)가 증가하기 때문이다.

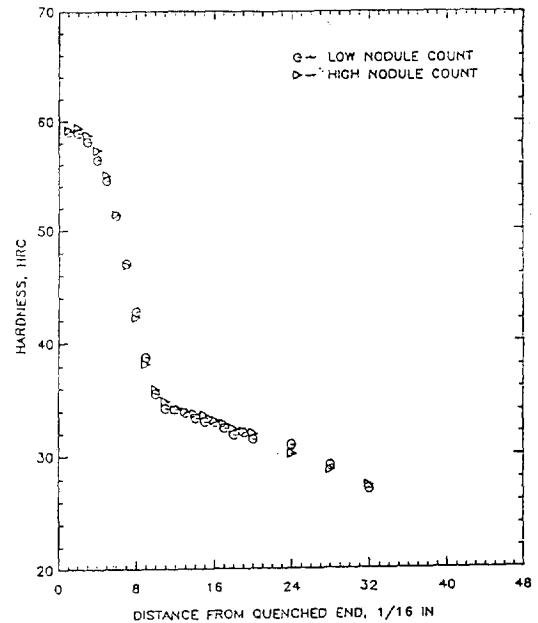


Fig. 15 Effects of nodule count on the hardenability of 0.2% Cu alloyed ductile iron austenitized at 870 °C (1600 °F) for two hours.

비록 장시간의 소둔이 구상흑연 주철의 편석을 감소시켜 경화능을 증가시킬 수 있으나 경제적인 측면에서 바람직하지 못하며 미소한 경화능의 증가를 위해 구상흑연수를 감소시키는 것도 기계적 성질을 해치므로 바람직하지 못하다. 그러므로 주물상태의 구상흑연주철의 경화능은 편석에 의한 영향이 적다.

4. 결 론

본 연구의 중요한 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 쥘미니 경화능 실험과 경화능 기준에 의해 결정된 경화능값을 회귀분석하여 두경화능 예측 모델이 개발되었으며 다른 연구에서 얻어진 실험 경화능 값과 모델에 의해 얻어진 경화능 값을 비교한 결과 잘 일치했다.
- 2) 합금 원소가 구상 흑연 주철의 경화능에 미치는 영향은 개별적으로 첨가될 경우 Mo가 가장 효과적이며 Cu 및 Ni는 미소 했다. 합금 원소가 조합으로 첨가 될 경우에는 상승 효과로 경화능이 크게 증가했으며 특히 Mo-Cu, Mo-Ni 및 Mo-Cu-Ni 조합이 효과적이었다.
- 3) 합금 원소가 구상 흑연 주철의 경화능에 영향을 미치는 요소는 오스테나이트화 처리 온도 및 편석이었다. 오스테나이트화 처리 온도가 955°C까지는 경화능이 증가했으나 955°C 이상에서는 감소하는 경향을 보였다. 편석은 장시간 소둔에 의해 최소화시킨 경우를 제외하고는 경화능에 큰 영향이 없었다. 구상 흑연수의 변화에 따른 경화능의 변화는 거의 없었다.

5. 참고문헌

1. R. C. Voigt and C.R.Loper : 1st. Intl. Conf. on Austempered Ductile Iron, Chicago, pp.38-103, 1985.
2. J.Dodd and R.B.Gundlach : BCIRA Conf. Paper No.15, 1984.
3. P.A.Blackmore : BCIRA Conf. Paper No.14, 1984.
4. S.E.Stenfors and R.Sandstrom : Tech. Report, Royal Inst. of Tech., Stockholm, Sweden, 1985.
5. R.B.Gundlach, J.F.Janowak, S. bechet and K. Rohrig : Proc. of the 3rd. Intl. Symp. on the Physical Metallurgy of Cast Iron, pp.399-409, 1984.
6. J.E.Bevan and W.G.Scholtz : Trans. AFS, Vol.85, pp.271-276, 1977.
7. J.M.Schissler, J.Saverna, and Others : Proc. of the 3rd. Intl. Symp. on the Physical Metallurgy of Cast Iron, 1984.
8. R.B.Gundlach and J.F.Janowak : 1st. Intl. Conf. on Austempered Ductile Iron, pp.1-12, 1984.
9. E.Dorazil, Vysokopevna Baitnica Litina, Academia, Praha, Czeck., 1985.
10. E.Dorazil and Others : AFS Intl. Cast Metals Journal, Vol.75, pp.52-61, 1982.
11. J.A.Lincoln : J. of Heat Treating, Vol.16, No.12, pp.30-34, 1984.
12. Y.J.Park, Unpublished Research, AMAX Material Research, 1985.
13. A.A.Cushway : BCIRA Report No.1602, pp.435-439, 1984.
14. R.Harding : 2nd. Intl. Conf. on Austempered Ductile Iron, pp.39-54, 1986.
15. C.C.Reynolds, W.T.Whittington, and H.F.Taylor, AFS Transactions, Vol.63, pp.116-122, 1955.
16. J.W.Boyes and N.Carter, BCIRA Journal, Vol.14, No.2, Report 828, 1966, pp.175-183.
17. W.Scholz and M.Semchyshen, J. of Modern Casting, Jan., 1968, pp.65-72.
18. W.W.Cias, Climax Molybdenum Co., Greenwich, Connecticut, 1977.
19. J.M.Schissler and J.Saverna : 1st. Intl. Conf. on Austempered Ductile Iron, pp.71-81, 1984.
20. C.F.Jaczak : Met. Trans., Vol.4, pp.2272-2281, 1973.