

|||||
論 文
|||||

주철의 열적 성질에 미치는 흑연형상 및 첨가원소(Mn, Ni)의 영향

盧戊根, 權赫茂

The Influences of Graphite Shape and Alloying Elements(Mn, Ni) on the Thermal Properties of Cast Iron.

Moo-Kun Roh, Hyuk-Moo Kwon

Abstract

SGCI(Spheroidal Graphite Cast Iron), CVGCI(CV Graphite Cast Iron) and FGCI(Flake Graphite Cast Iron) having different contents of Mn(0.25%~0.85%) and Ni(0.3%~1.2%) were produced, respectively. The thermal expansion and thermal conductivity of the cast iron were investigated in the temperature range of 50°C~300°C. As the graphite nodularity of the cast iron increases, thermal expansion coefficient increases, thermal conductivity and electrical conductivity to thermal conductivity ratio decrease. The thermal expansion coefficient of the cast iron increases with increasing Mn content and decreases with increasing Ni content. The thermal conductivity of the cast iron decreases with increasing Mn and Ni contents.

1. 서 론

주철을 내연기관의 피스톤링이나 실린더 라이너와 같이 반복적으로 열을 받는 재료로 사용하는 경우에 주철의 열팽창계수나 열전도도와 같은 열적 성질은 그 구성품의 성능을 결정하는 중요한 성질이며 이와 같은 열적 성질은 주철에 정출한 흑연의 형상이나 기지조직에 따라 달라진다.^{1~4)}

주철은 화학조성이 같은 경우에도 흑연의 형상이 편상흑연, CV흑연, 구상흑연으로 구상화율이 커지면 그 기계적 성질이 현저하게 향상되며, 그 동안 이에 관하여는 많은 연구가 발표되어 이러한 공업적 성질은 어느 정도 명확하여 지고 있으나 그 열적 성질에 대하여는 아직도 불명확한 점이 많다.

본 연구에서는 C와 Si가 일정한 조성범위인 용탕을 구상화처리 한 후 페이딩법을 이용하여 구상흑연주철, CV흑연주철 및 편상흑연주철을 제조하

고 흑연의 구상화율이 열팽창계수와 열전도도에 미치는 영향을 조사하였다.

한편 흑연의 구상화를 크게 저해하지 않는 합금원소 중에서 Mn과 Ni을 각각 첨가하여 이들 합금원소가 열팽창계수와 열전도도에 미치는 영향을 조사하고, 또한 전기저항을 측정하여 흑연의 형상이 다른 주철에서 열전도도와 전기전도도의 관계를 비교하였다.

2. 실험방법

2.1. 용탕의 제조 및 주조

본 연구에 사용된 원료의 화학조성은 Table 1과 같다.

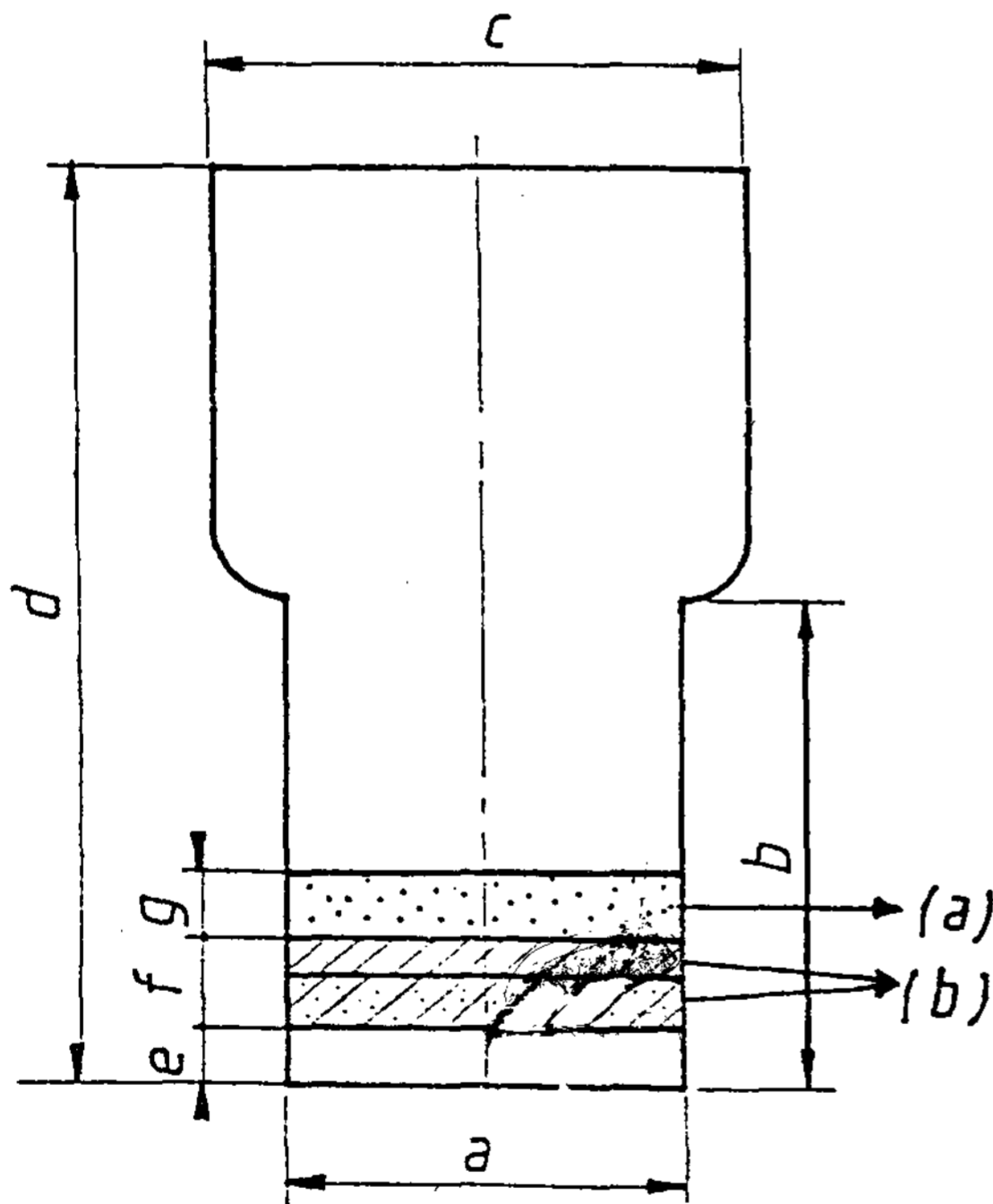
원료선을 고주파 전기 유도로(10KHZ, 36lb)에서 용해 후 가탄제 및 Fe-Si으로 탄소와 규소를 조절하고 Mn 및 Ni을 목표조성이 되도록 각각 첨가하였다. 흑연구상화 처리는 Fe-Si-Mg을 플러저법으로 첨가하고 즉시 주입한 것에서 부터 구상화

忠南大學校 工科大學 (Dept. of Metallurgical Engineering, Chung-nam National University)

Table 1. Chemical composition of raw materials.(wt %)

components material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Remarks
pig iron	3.22	1.06	0.20	0.02	0.02		Mg : 9.50
ferrosilicon	0.10	75.30	0.07	0.01	0.01		
Fe-Si-Mg	0.10	48.50	0.05	0.01	0.01		
ferromanganese	1.90	0.50	74.50	0.03	0.01		
elect nickel	0.007		0.001		0.001	99.98	

처리 후 용탕을 주입할 때 까지 용탕의 유지시간을 5분, 10분, 15분 및 20분으로 변화시켜 잔류 Mg 함유량을 다르게 하여 흑연형상이 구상, CV 및 편상인 주철을 만들었으며 각각 주입직전에는 용탕량의 0.5% Fe-75%Si으로 접종처리 하여 Fig 1과 같은 CO₂주형에 주입하였다.



mm.						
a	b	c	d	e	f	g
φ60.	50.	φ75.	100.	4.	8.	7.

Fig. 1 Shape and dimension of mold for specimen preparation. (a) thermal expansion, elect. resistance (b) thermal conductivity

2.2. 흑연조직 및 열처리

조직시편은 주조한 시료의 하부저면으로부터 20mm부위를 절단 채취한 후 연마하여 준비하였다. 한편, 흑연구상화율의 측정은 면적율법⁵⁾에 의하여 구하였고, 시료는 기지조직의 영향을 받지않게 하기 위하여 Fig 2의 열처리 곡선과 같이 어닐링 하여 페라이트기지가 되도록 하였다.

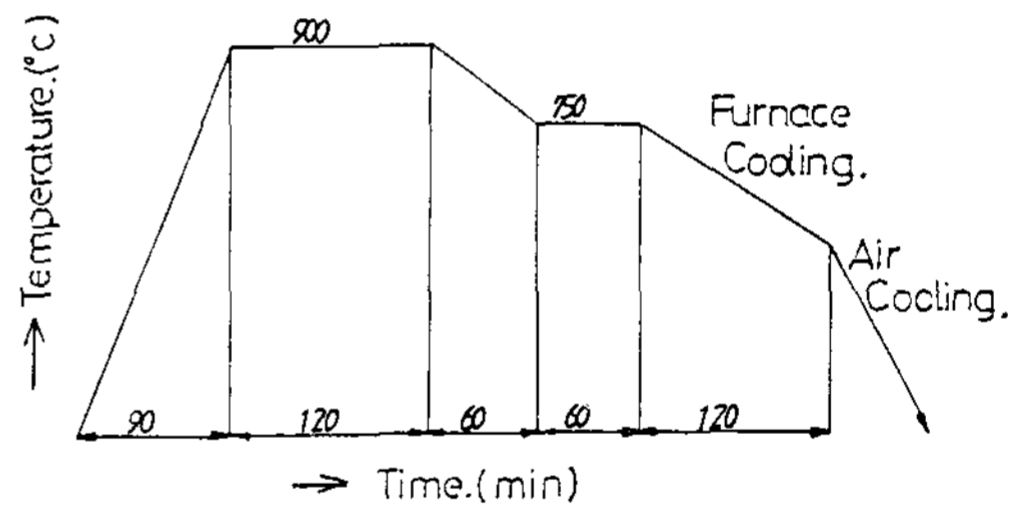


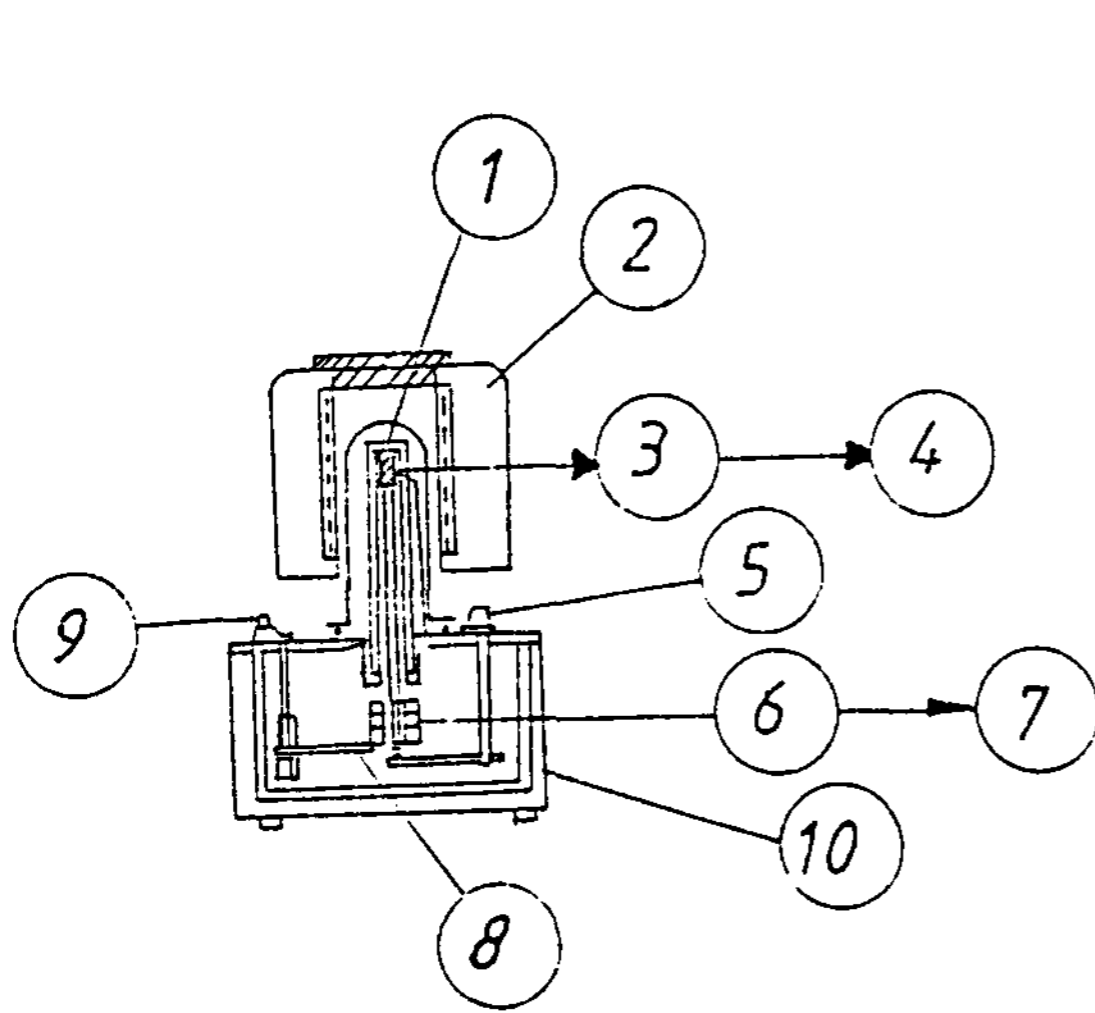
Fig. 2 Heat treatment cycle of specimens

2.3. 열팽창의 측정

φ5×15mm로 가공한 시료를 Fig 3과 같은 열팽창계(ULVAC TA-1500)를 사용하여 적외선 가열로에 내장된 석영관에서 5°C/min.의 가열속도로 시편에 가한 온도를 20°C~100°C, 20°C~200°C 및 20°C~300°C로 하여 온도증가에 의한 시편의 길이 변화를 자동기록계로 측정하고 이로부터 선팽창계수를 구하였다.

2.4. 열전도의 측정

전열정수의 측정은 측정원리에 의하여 정상법⁶⁾, 준정상법⁷⁾ 및 비정상법⁸⁾ 등으로 분류할 수 있다. 정상법은 측정에 소요되는 시간이 길지만 열흐름이 정상적인 상태에서 직접 열전도도를 구하는 방법이며 본 연구에서는 정상법에 의해 표준시편과 측정시편의 열흐름시 온도구배를 비교하여 열



1. Test piece
2. Electrical furnace
3. Cold junction
4. Programming temperature controller
5. Dial for regulation of load
6. Dilatometer circuit unit
7. 2-Pen recorder
8. Differential transformer
9. Length calibration dial
10. Sample assembly

Fig. 3 Apparatus for the measurement of thermal expansion.

전도도를 산출하였다.

Fig 4는 열전도도 측정장치의 개략도이다. 시편에 가한 온도는 50°C~300°C로 50°C 간격으로 하고, 측정시편의 열전도도 K는 다음 식에 의해 구하였다.

$$K = (L_b - L_a) / [(L_b / K_b) \cdot (L_b / K_a)] \quad (1)$$

$$\text{여기서, } K_a = [(\Delta T_R \cdot L_a) / (\Delta T_a \cdot L_R)] \cdot K_R \quad (2)$$

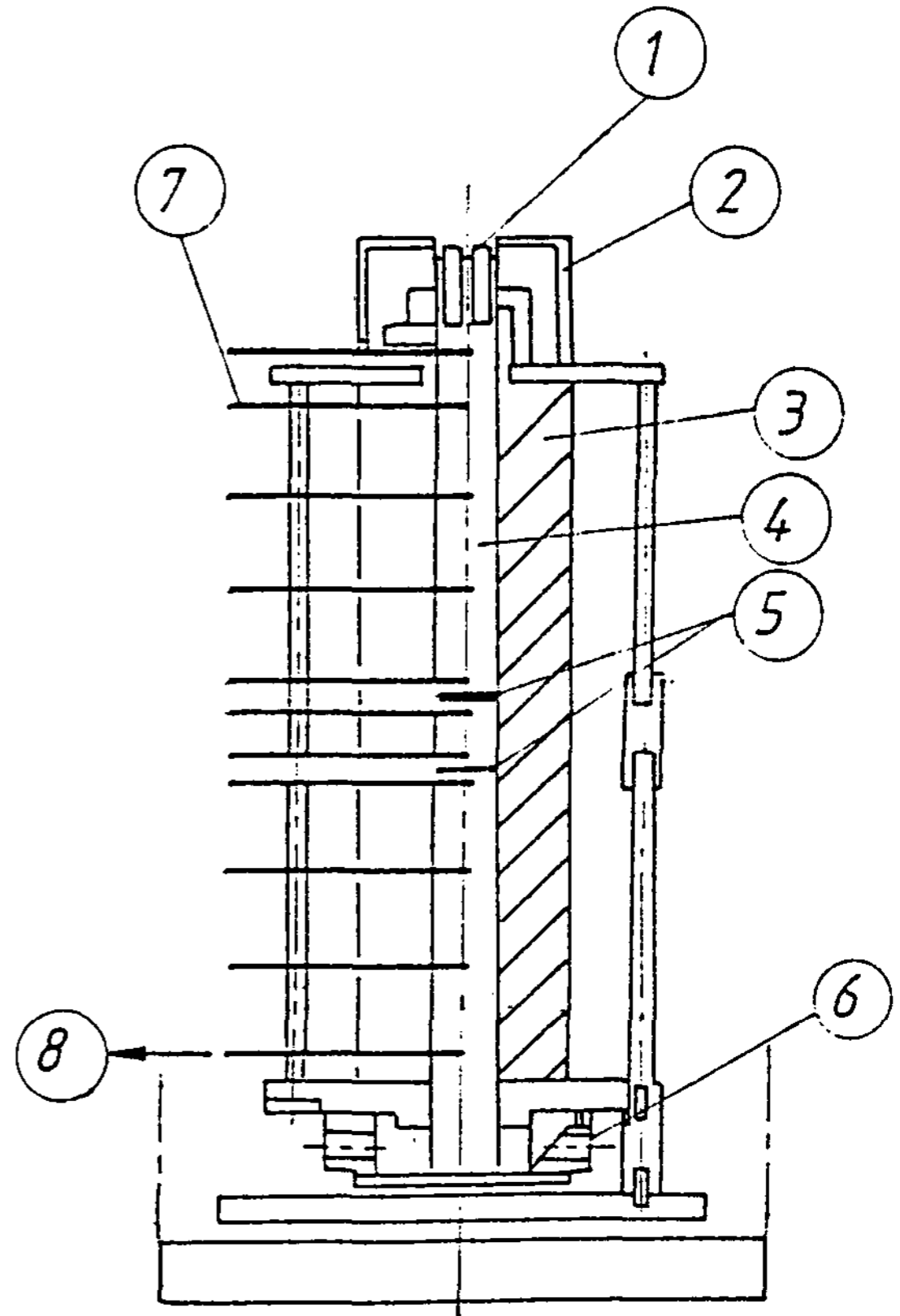
$$K_b = [(\Delta T_R \cdot L_b) / (\Delta T_b \cdot L_R)] \cdot K_R \quad (3)$$

이고, K_a, K_b : 측정시편과 표준시편 사이의 열전도도를 포함한 측정시편의 열전도도

K_R : 표준시편의 열전도도

$\Delta T_a, \Delta T_b$: 측정시편의 온도차

ΔT_R : 표준시편의 온도차



1. Electric heater
2. Protector
3. Insulator(glass wool)
4. Standard cylinder(Cu)
5. Test piece
6. Chill water
7. C-A Thermocouple(No 1~10)
8. To thermometer

Fig. 4 Apparatus for the measurement of thermal conductivity.

L_a, L_b : 측정시편의 두께

L_R : 표준시편의 두께

이다.

열전도도 측정에 사용한 측정시편의 치수는 $\phi 40 \times 2\text{mm}$ 및 $\phi 40 \times 4\text{mm}$ 이고, 표준시편으로 $\phi 40 \times 30\text{mm}$ 인 Cu를 사용하여 Fig 4의 7과 같은 No. 1~No. 10의 CA열전대로 부터 시편의 온도를 각각 측정하였다.

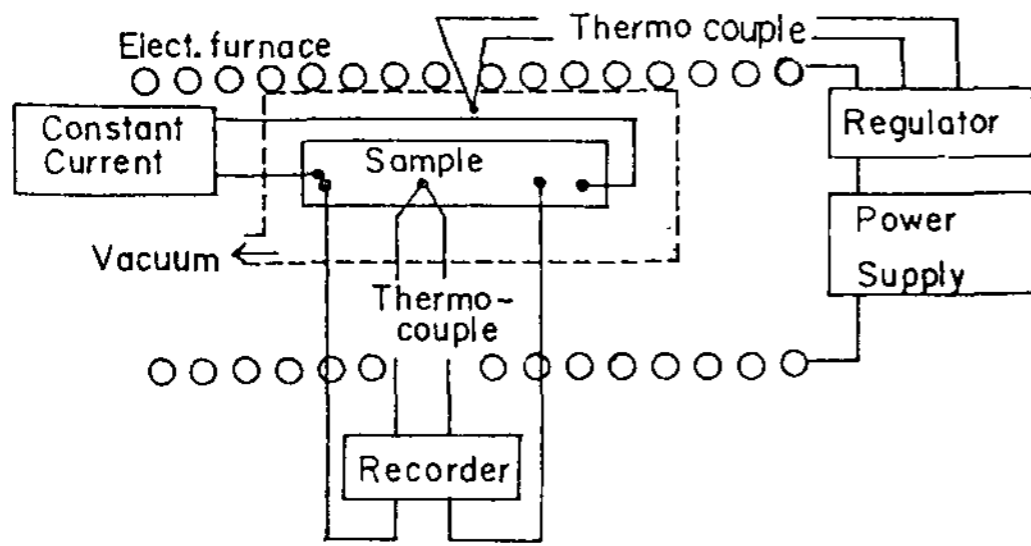


Fig. 5 Schematic diagram of electrical resistance measuring apparatus.

2.5. 전기저항의 측정

전기저항은 Fig 5와 같은 전기저항 측정장치 (Naruse-Kagakukikai Co.)를 사용하였다. 시편은 4단자법으로 단자와 시편을 점용접하였고 시편에 가한 전류는 100mA이며 1mΩ의 표준저항에 의해 보정하였다.

측정시 시편은 가열 및 냉각속도 : 5°C/min, 진공도 : 5×10⁻³ Torr, 가열온도 : 상온~300°C이고, 측정된 전기저항값으로부터 시편의 전압단자간 거리와 단면적으로 전기비저항을 구하고 그 역수치로 전기전도도를 산출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 페이딩 현상과 흑연의 현상

Fig 6은 흑연구상화 처리 후 용탕의 유지시간과 잔류 Mg 함유량의 관계이다.

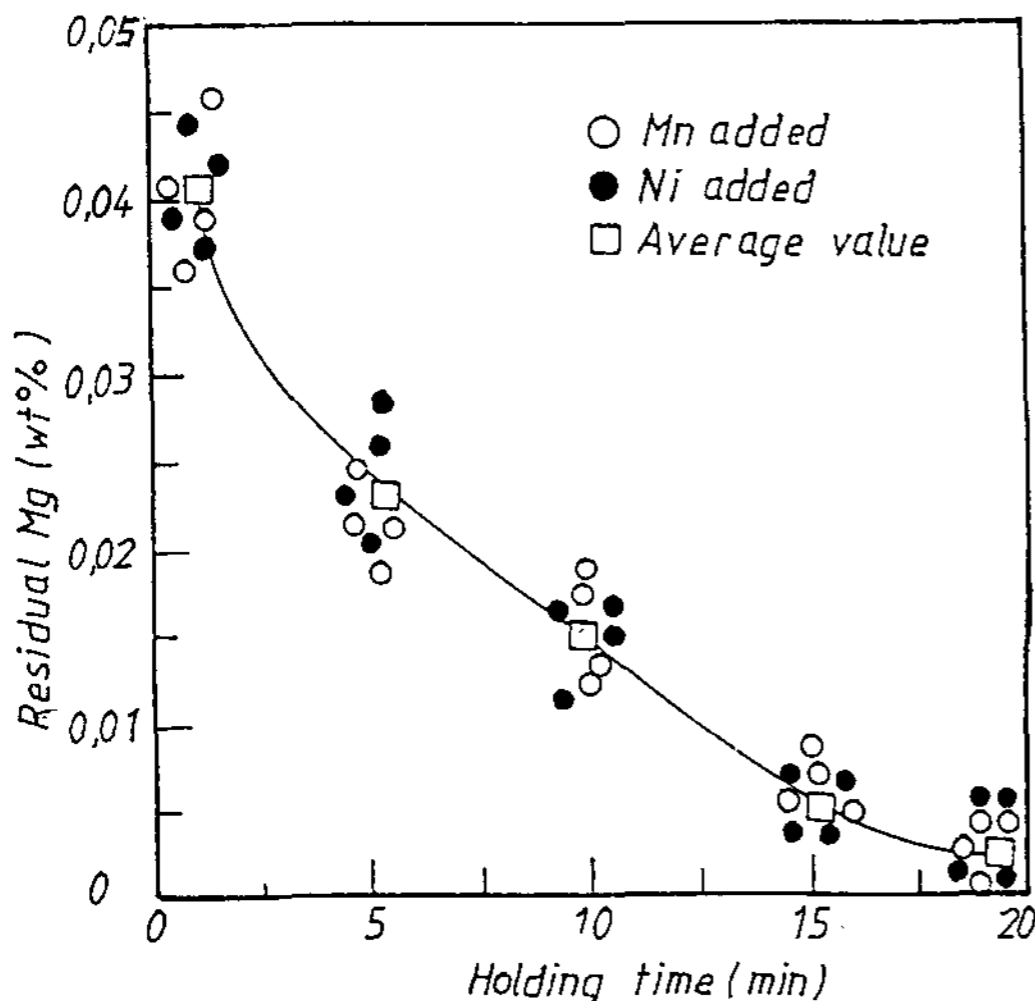


Fig. 6 Relation between holding time after spheroidization treatment and residual Mg in cast iron.

구상화처리 후 즉시 주입한 것은 잔류 Mg 함유량이 0.036%~0.046%인 구상흑연주철이고, 유지시간 5, 10분인 것은 잔류 Mg 함유량이 0.012%~0.028%인 CV흑연주철이며 유지시간이 15, 20분인 것은 잔류 Mg 함유량이 0.001%~0.008%인 편상흑연주철이 되었다.

구상구상화처리 후 유지시간이 길어짐에 따라 구흑연이 점차로 감소되어 편상흑연으로 되는 페이딩 현상이 일어난 것은 구상화처리 온도 1500°C인 용탕 중의 Mg의 증기압은 11.7 기압으로서 매우 높으므로 Mg이 용탕내에서 급격한 반응을 일으켜서 시간에 따라 감소한 것이고, 이는 Mg의 산화손실로 인한 감소⁹⁾이거나 S 등과의 결합으로 손실¹⁰⁾되기 때문인 것으로 설명되고 있다.

그리고 Mg 기포가 용탕상부로 부상하여 용탕중의 Mg 기포량은 감소하므로 Mg 기포농도 C는 시간 t에 관계하여 다음 식⁹⁾으로 주어진다.

$$C = C_0 \exp(-Kt) \tag{4}$$

여기서, C₀ : Mg 기포의 초기농도

K : 비례상수

이다.

한편, Mn이나 Ni을 첨가한 시료의 흑연구상화율을 조사한 결과 첨가합금원소가 구상화율에 미치는 영향은 2%이하이고, 흑연화율은 Mn 함유량이 0.85%일 때는 0.25%일 때 보다 1% 감소하였고 Ni 함유량이 1.2%일 때는 첨가하지 않은경우 보다 1.3% 증가하였으며 이와 같은 시료에 대하여 열팽창계수와 열전도도를 조사하였다.

3.2. 열팽창 계수

Fig 7은 Mn 함유량이 0.25%~0.85%인 시편의 흑연구상화율과 20°C~300°C에서의 평균 열팽창계수와 관계이다.

Mn 함유량이 0.25%에서 0.85%까지 증가하고 흑연구상화율이 증가하면 열팽창계수가 증가한다. 편상흑연주철과 CV 흑연주철의 열팽창계수의 차이는 0.2×10⁻⁶/°C인 것에 비하여 구상흑연주철과 CV흑연주철의 열팽창계수의 차이는 0.8×10⁻⁶/°C로서 CV흑연주철의 열팽창계수는 구상흑연주철보다 편상흑연주철에 가까운 값이다.

이와 같이 구상화율이 증가하면 열팽창계수가 증가하는 경향이 구상화율에 일차함수적으로 비례하지 않는 것은 흑연의 연속성, 흑연의 성장방향 및 기지조직과 흑연조직과의 열팽창계수의 차이등

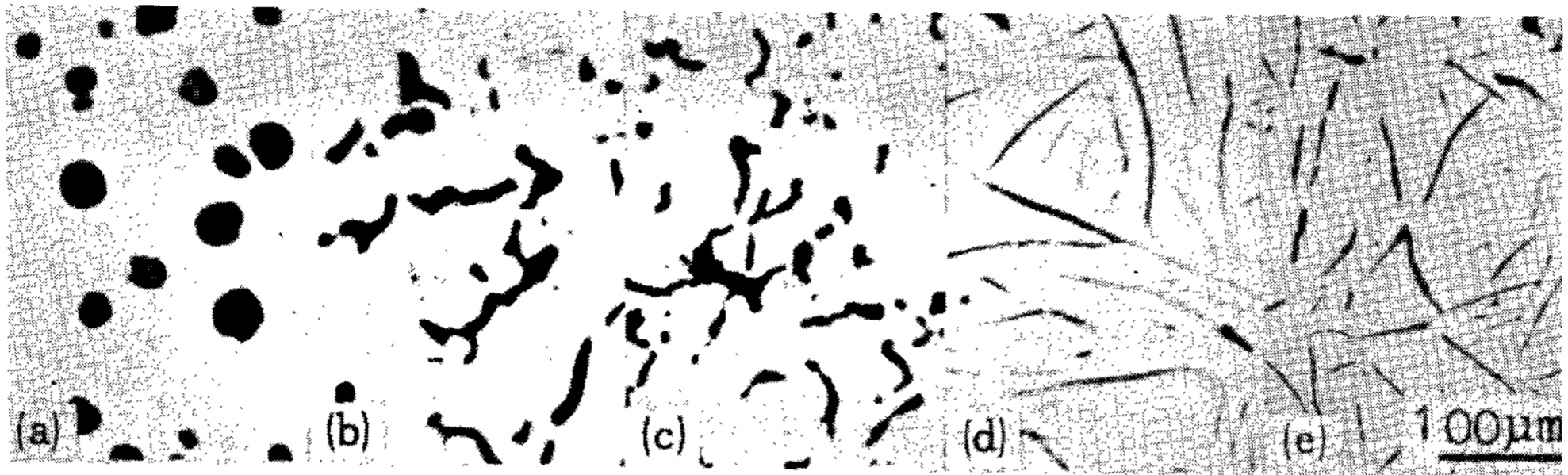


Photo. 1 The change of graphite form by holding time after spheroidization treatment in Mn 0.25% contents cast iron. (a) 1, (b) 2, (3) 10, (4) 15 and (e) 20 min.

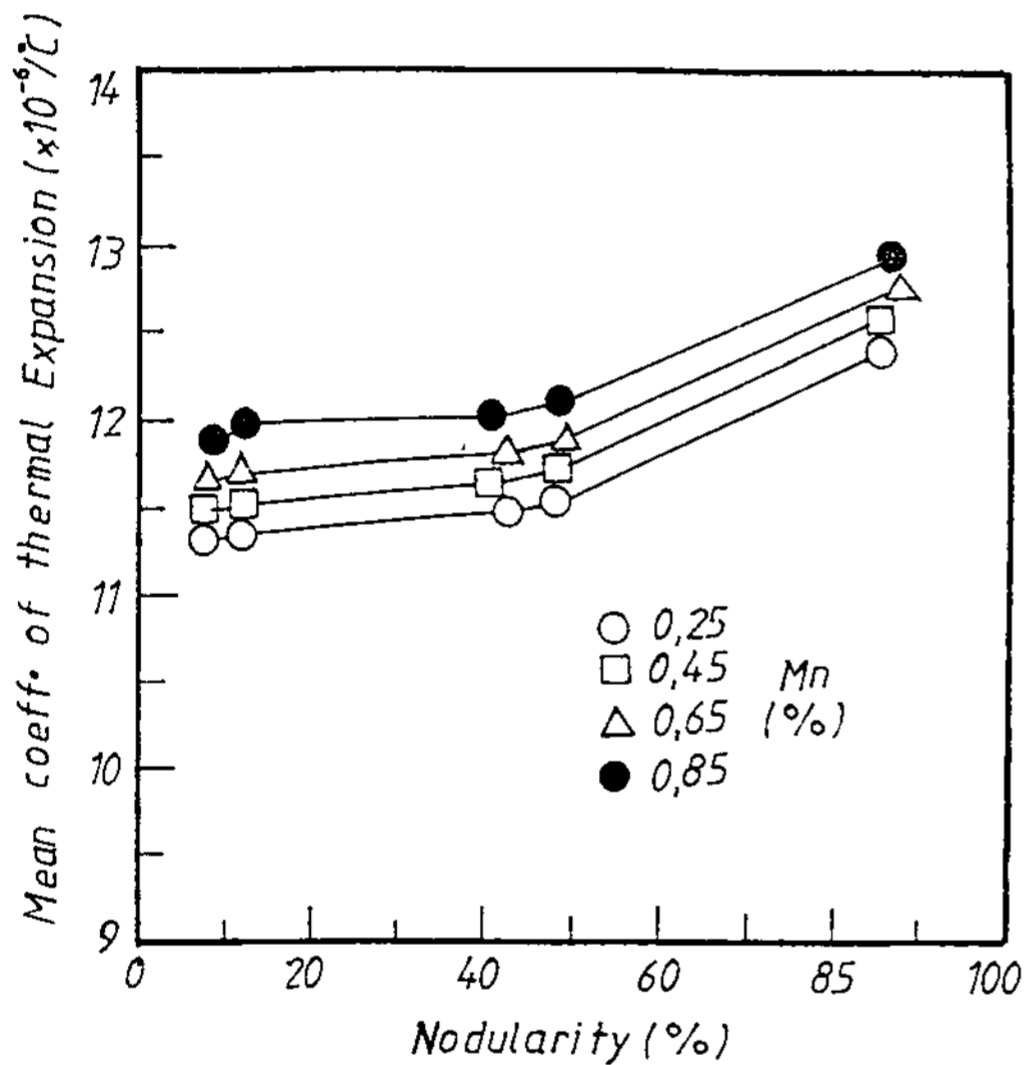


Fig. 7 Relation between graphite nodularity and mean coefficient of thermal expansion at variation of Mn contents in cast iron at 20°C~300°C.

에 의한 영향이 있다고 해석된다.

즉, 흑연은 조밀육방정의 구조이며 조밀육방정의 기저면에 평행한 방향[1010]인 a축의 열팽창계수가 $6.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{11)}$ 인 반면, 기저면에 수직인 방향[0001]인 C축은 $26.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{11)}$ 로써 C축으로의 열팽창계수가 a축보다 약 4배 더 크다.

그리고 구상흑연, CV흑연 및 편상흑연은 성장방향¹²⁾의 차이에 의해 적층구조가 다르다. 즉, 편상흑연은 조밀육방정의 기저면에 평행한 방향이 흑연의 가지가 긴 방향으로 주로 성장되어 있고, 구상흑연은 다결정의 방사상으로 성장한 것으로 기저면에 수직인 방향으로 성장된 구조이므로 구상

흑연주철은 편상흑연주철보다 열팽창계수가 크다. 또한 CV흑연주철은 CV흑연의 긴가지 방향이 편상흑연과 같이 a축으로 주로 성장된 구조¹²⁾이므로 편상흑연주철에 가까운 열팽창계수를 나타낸다. 그리고 본 실험에서 시료의 기저조직은 열처리하여 완전한 페라이트이고 Si이 2.6% 고용되어 있으며 이러한 기저 조직과 Si함유량이 유사한 Fe-0.01%C-2.35%Si강의 열팽창계수는 $14.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{13)}$ 이므로 시편의 기저조직의 열팽창계수는 흑연의 a축 방향의 열팽창계수 보다 약 2배 더 크고, 흑연의 C축 방향의 열팽창계수는 기저조직 보다 약 2배 더 크다.

따라서 흑연간의 거리가 짧고 연속성 있는 흑연이 주로 a축으로 성장하는 편상흑연은 그 기저조직보다 열팽창계수가 작으므로 편상흑연주철은 구상흑연주철에 비하여 열팽창계수가 작다.

한편, Mn 함유량이 0.85%인 것은 0.25%일 때보다 열팽창계수가 $0.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 더 크다. 이러한 현상은 Mn의 열팽창계수가 $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로서 기저조직 보다 1.5배 더 크므로 기저 중에 Mn의 고용량이 증가하여 주철의 열팽창계수를 상승시키는 것으로 해석된다.

그림 8은 Ni 함유량이 0~1.2%일 때 흑연구상화율과 20°C~300°C에서의 평균 열팽창계수의 관계이다. Ni 함유량이 1.2% 증가하면 열팽창계수는 $0.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 감소하고, 흑연구상화율이 증가하면 열팽창계수는 증가한다.

Ni의 열팽창계수는 $13.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로써 전술한 2.35%Si강의 열팽창계수 보다 $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 더 작으며 Ni은 기저조직인 페라이트에 고용되는 원소이므로 Ni 함유량이 증가하면 열팽창계수가 감소하는 것으로 해석된다.

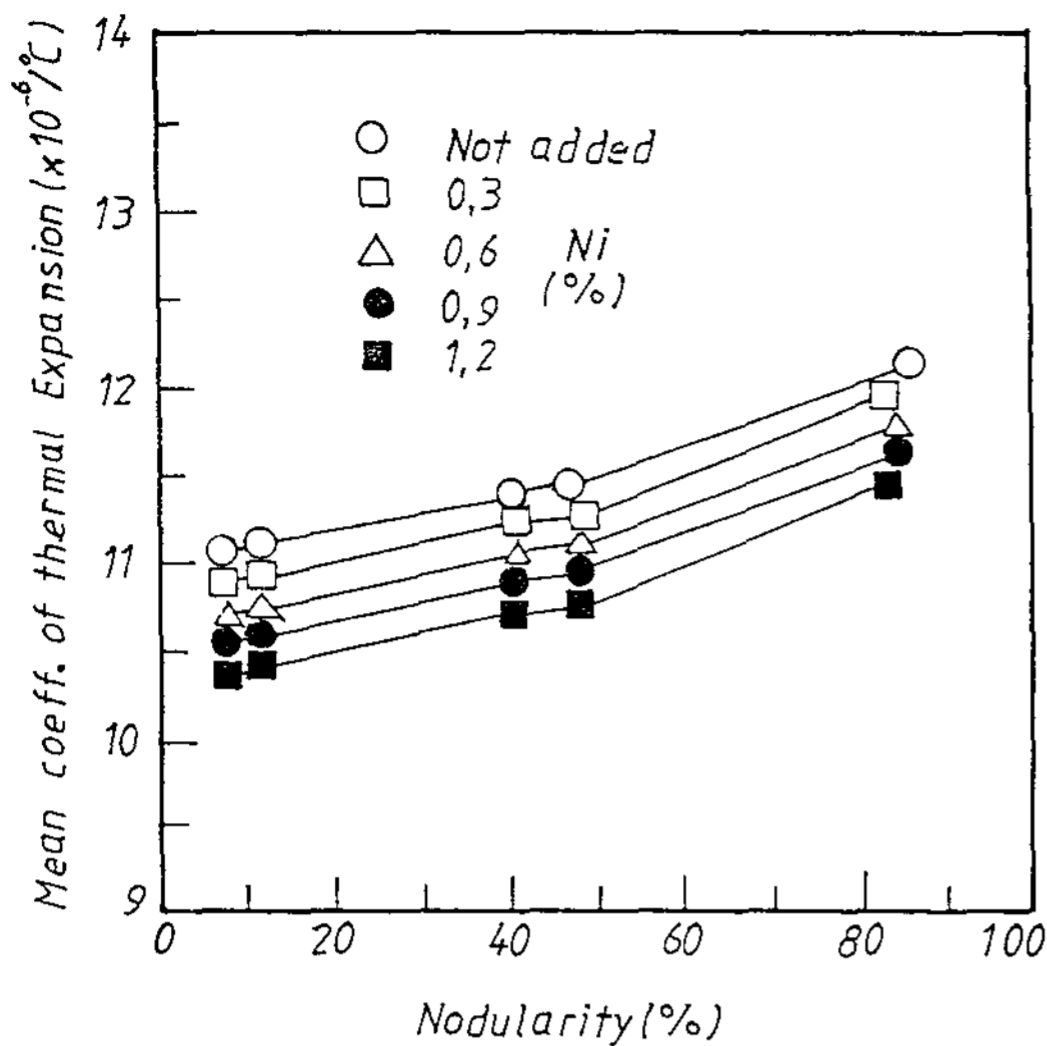


Fig. 8 Relation between graphite nodularity and mean coefficient of thermal expansion at variation of Ni contents in cast iron at 20°C~300°C.

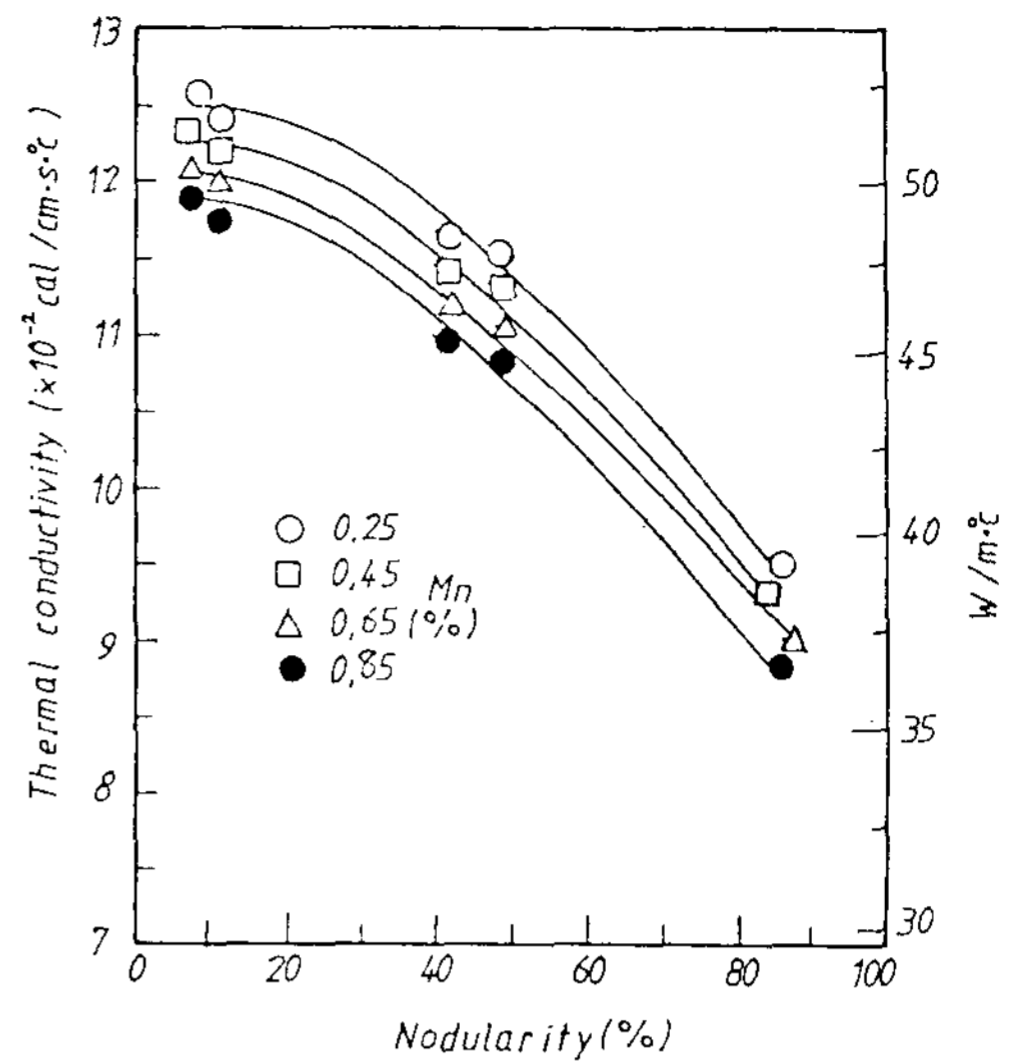


Fig. 9 Relation between graphite nodularity and thermal conductivity at variation of Mn contents in cast iron at 300°C.

3.3. 열전도도

Fig 9 및 Fig 10은 각각 Mn 함유량이 0.25%~0.85%인 시편과 Ni 함유량이 0~1.2%인 시편의 흑연구상화율과 열전도도의 관계이다. Mn 함유량이 0.85%일 때가 0.25%일 때 보다 0.7~10⁻²cal/cm.S.°C 더 작고, Ni 함유량이 1.2%일 때는 무첨가 때 보다 1×10⁻²cal/cm.S.°C 더 작으며, 첨가원소에 관계없이 흑연구상화율이 증가하면 열전도도가 감소한다. 한편 구상흑연주철과 CV흑연주철의 열전도도의 차이는 2×10⁻²cal/cm.S.°C이고, 편상흑연주철과 CV흑연주철의 열전도도의 차이는 0.7×10⁻²cal/cm.S.°C로서 CV흑연주철의 열전도도는 편상흑연주철에 가까운 값이다.

흑연에서의 열전도도는 결정방향에 따라 다른 것으로 보고되고 있다.¹⁴⁾ 즉, 흑연의 기저면에 평행한 a축으로의 열전도도는 100°C에서 1.0cal/cm.sec.°C이고 c축으로 0.2cal/cm.sec.°C로서 a축이 c축보다 열전도도가 약 5배 더 크다.

그러므로 흑연의 가지가 주로 기저면인 a축으로 성장하는 편상흑연주철은 열전도도가 크고, 방사상으로 성장한 c축 방향이 주된 열전도경로인 구상흑연주철은 편상흑연주철에 비하여 열전도도가 적으며, CV흑연주철은 흑연정출형태가 편상흑연주철에 가깝게 주로 a축으로 성장된 것이므로 열전

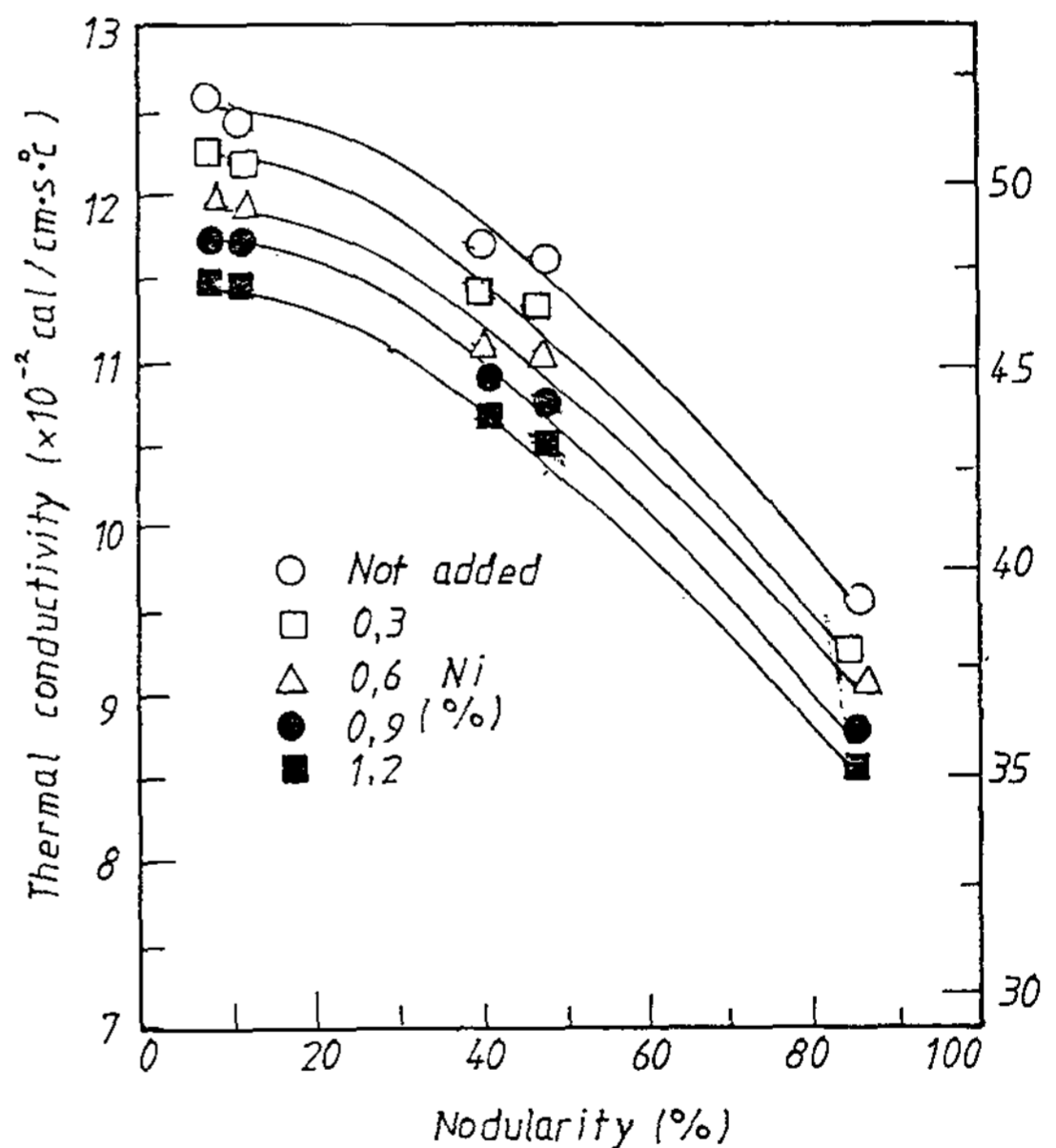


Fig. 10 Relation between graphite nodularity and thermal conductivity at variation of Ni contents in cast iron at 300°C.

도도가 편상흑연주철에 가까운 값을 갖는 것으로 해석된다.

또한 기저조직인 페라이트의 열전도도는 0.19cal/cm.s.°C로서 흑연의 c축의 열전도도와 거의 같고 a축 보다는 5배 더 작다. 편상흑연주철에서는 흑

연편이 연결되어 있거나 상호 근접하여 존재하여 열의 전도가 흑연의 a축방향을 따라 이루어지기가 용이하여 열전도도가 크게 나타나고, 구상흑연주철에서는 흑연편이 불연속적이어서 열의 전도가 주로 기지에 의해 이루어지므로 편상흑연주철에 비하여 열전도도가 작다.

Fig 11 및 Fig 12는 각각 Mn 함유량이 0.85%인 시편과 Ni 함유량이 1.2%인 시편의 열전도도의 온도의존성을 조사한 결과이다.

열전도도의 온도의존성은 흑연형상에 따라 다르다. 즉, 편상흑연주철은 온도가 증가하면 직선적으로 감소하는 경향이지만 CV흑연주철과 구상흑연주철은 200°C전후에서 증감하는 경향이다.

편상흑연주철의 열전도도의 온도의존성은 흑연기저면의 열전도도의 온도의존성이 온도증가에 따라 직선적으로 감소하는 것과 같은 경향¹¹⁾이므로 흑연에 의한 온도의존성이 크고, 구상흑연주철 및 CV흑연주철은 Fig 11 및 Fig 12에서 점선으로 표시한 0.01% C, 2.01% Si강의 열전도도의 온도의존성¹⁵⁾ 경향과 같으므로 기지의 영향이 큰 것으로 사료된다.

한편, Wiedemann-Frantz¹⁶⁾는 열전도도와 전기전도도를 비교하여 다음 식으로 나타내었다.

$$W-F \text{의 비} = K/\sigma = K\rho \quad (5)$$

여기서, K : 열전도도(cal/cm.s.°C)

σ : 전기전도도($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)

ρ : 전기비저항(Ωcm)

이고, $L = K\rho/T = K/\sigma T \quad (6)$

여기서, L : 로렌쯔 수(cal.Ω/s.°K²)

T : 절대온도

이며, L 은 온도에 무관하고 금속마다 일정한 값을 가지므로 열전도도가 큰 재료는 전기전도도가 큰 것으로 설명되고 있다.

본 실험에서는 열전도도와 전기전도도에 미치는 흑연형상의 영향을 비교하기 위하여, Mn 함유량이 0.25%인 시편에 대한 전기전도도의 온도의존성을 조사하여 Fig 13에 나타내었다.

시편의 온도가 증가하면 100°C당 전기 전도도는 약 $0.25 \times 10^4 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 감소하고 흑연구상화율이 증가하면 전기전도도는 증가한다. 흑연형상에 관계없이 온도의존성의 경향은 거의 유사하고 이는 그림 13에서 점선으로 표시한 0.01% C, 2.01% Si강의 온도의존성 경향과 같으므로, 주철의 전기전도도는 흑연의 형상에 의존하지 않고 기지조직에 의존

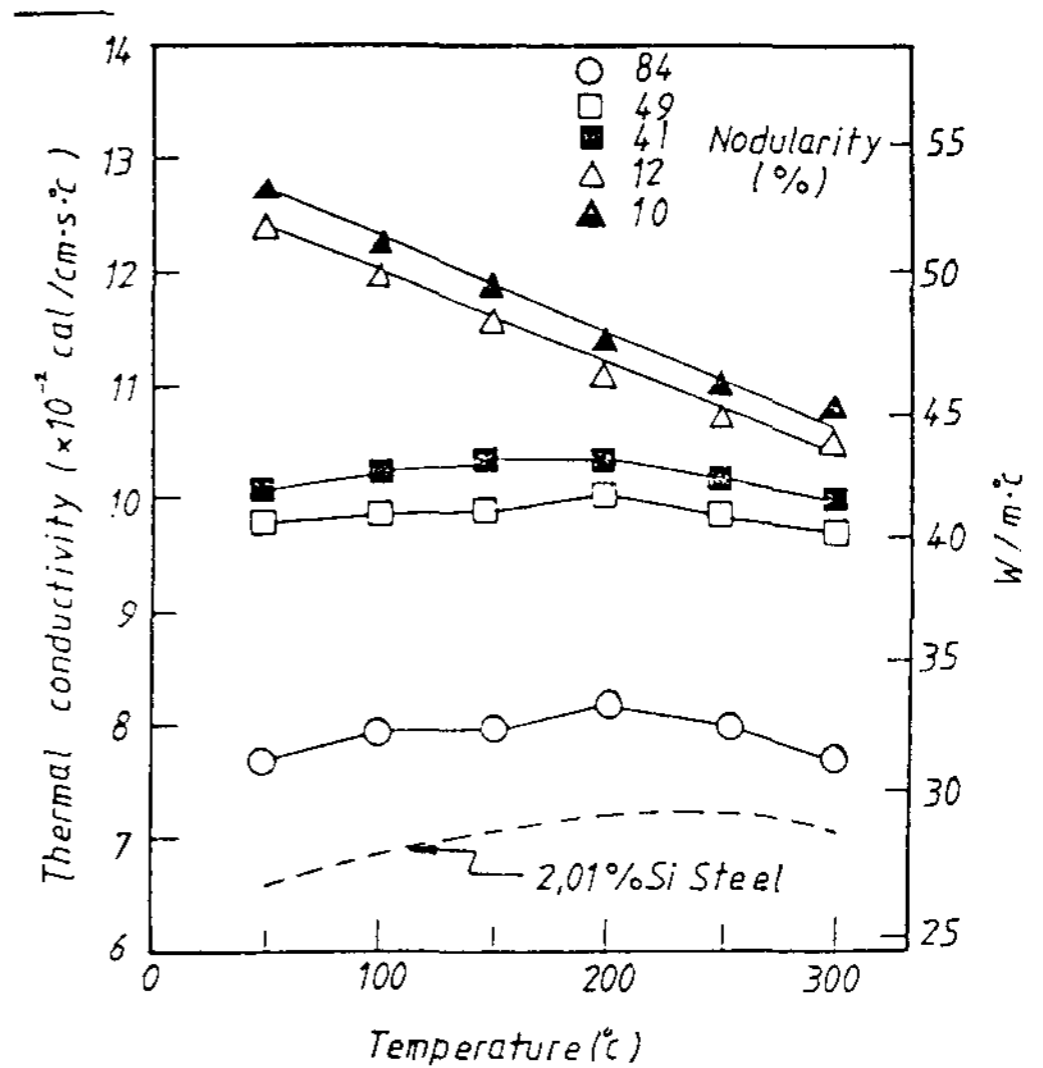


Fig. 11 Temperature dependence of thermal conductivity at variation of nodurity for 0.85% Mn contents cast iron.

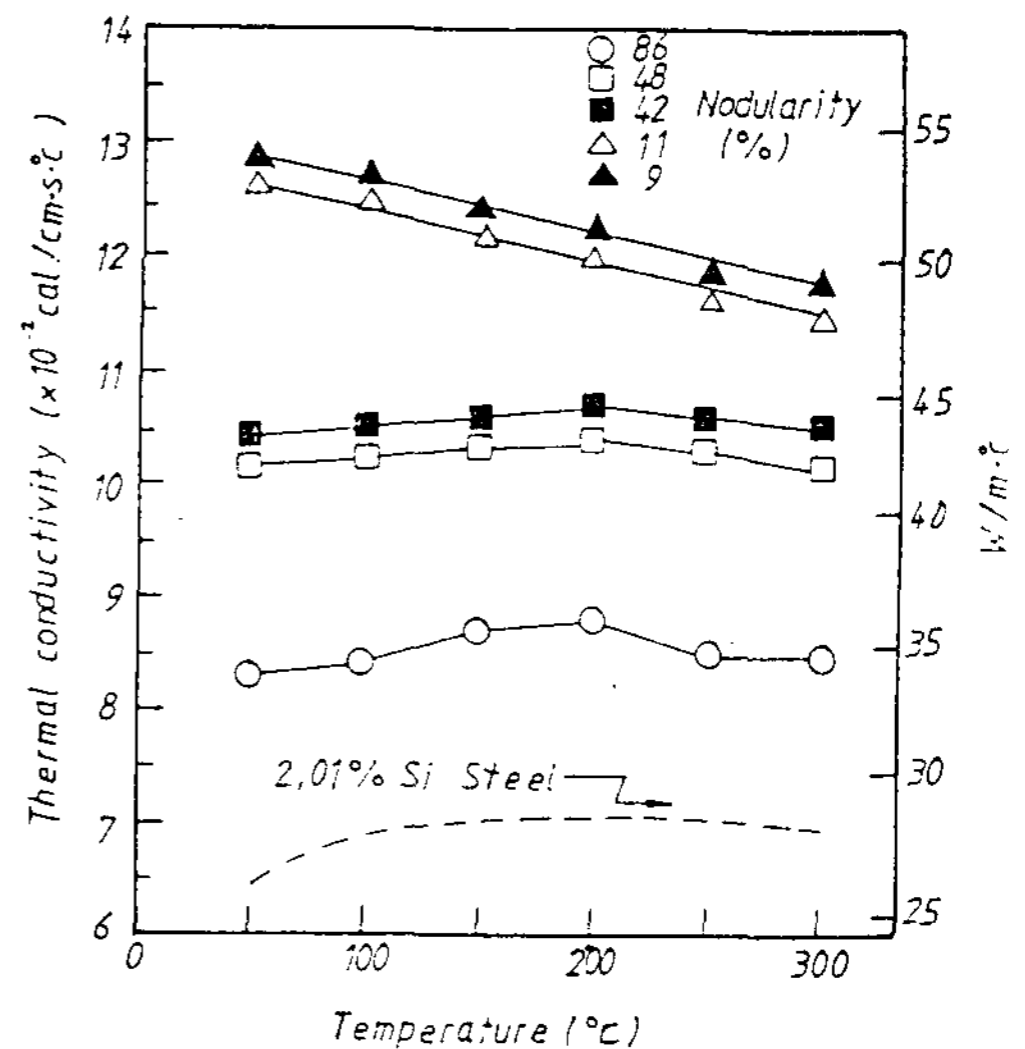


Fig. 12 Temperature dependence of thermal conductivity at variation of nodularity for 1.2% Ni contents cast iron.

하는 것으로 해석된다. 즉, 주철중의 흑연은 기지조직인 페라이트에 비하여 매우 전기비저항이 크고 비전기전도도는 1×10^{-3} 배 이어서 흑연은 전기전도에 대한 저항체로서 작용하기 때문이다.

또한 구상화율이 클수록 전기전도도가 더 큰 것은 흑연의 연속성에 의한 영향이다. 즉, 편상흑연

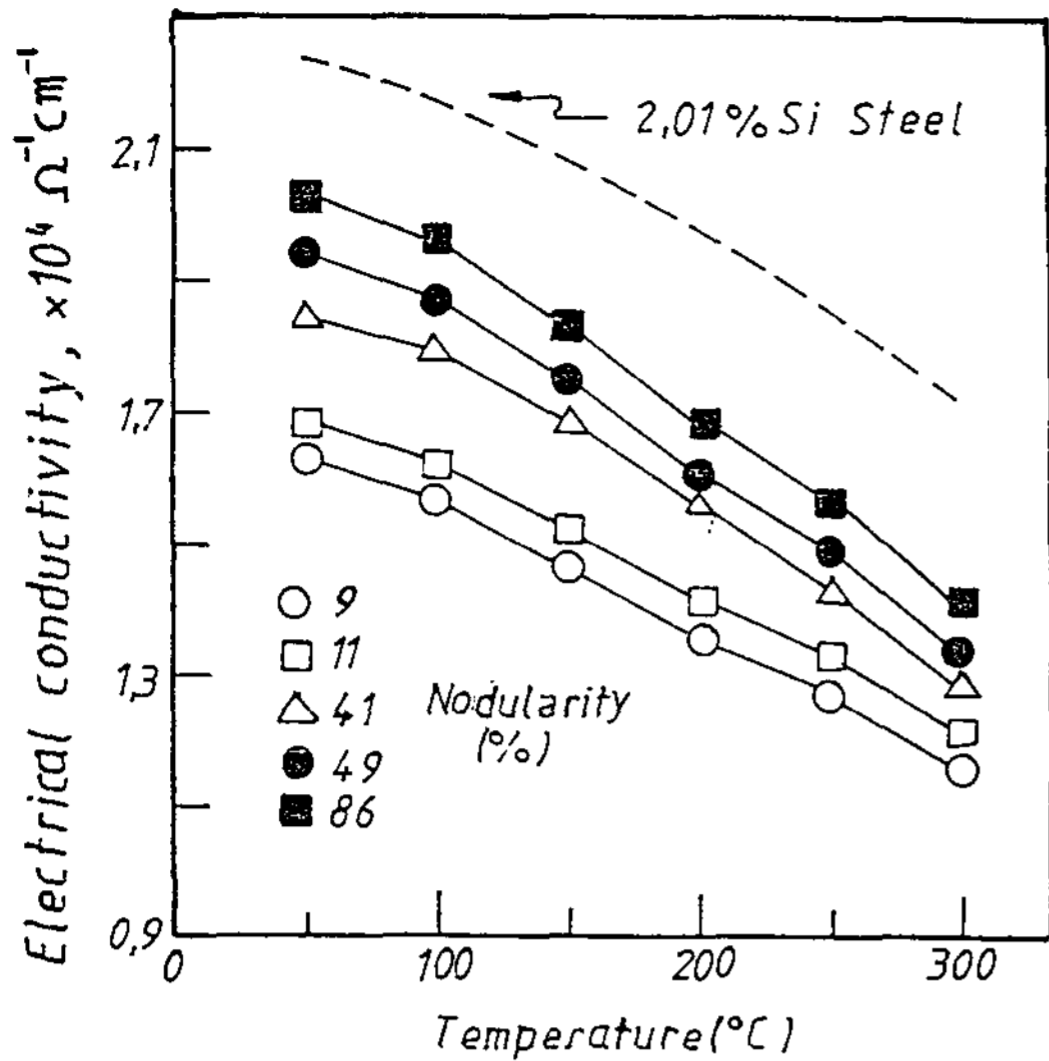


Fig. 13 Temperature dependence of electrical conductivity at variation of nodularity in cast iron.

주철은 기지의 연속성이 적으므로 전도전자가 흑연보다 전기비저항이 적은 기지조직을 통하여 이동할 평균자유행로가 감소되어 구상흑연 주철보다 전기전도도가 작은 것으로 사료된다.

Mn 함유량이 0.25%인 시편의 온도가 100°C, 200°C 및 300°C일 때 구상흑연주철, CV흑연주철 및 편상흑연주철의 열전도도 K와 전기전도도 σ 의 비

K/ σ 를 조사한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 편상흑연주철은 구상흑연주철보다 K/ σ 값이 더 크고, 흑연형상에 관계없이 온도증가에 따라 K/ σ 값이 증가하지만 온도에 직선적으로 비례하지 않는다.

이와 같이 주철에서는 흑연의 형상이 열전도도와 전기전도도에 영향을 주므로 흑연형상과 무관하게 열전도도가 좋으면 전기전도도가 크다고 할 수 없으며, 구상화율이 클수록 열전도도가 작고 전기전도도는 크게 된다.

4. 결 론

주철 용탕에 Mn(0.25%~0.65%) 및 Ni(0.3%~1.2%)을 각각 단독 첨가하고, 구상흑연주철, CV흑연주철 및 편상흑연주철을 제조하여 50°C~300°C에서의 열팽창계수 및 열전도도를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열팽창계수는 흑연구상화율이 증가하면 커진다.
2. 열팽창계수는 Mn 함유량이 증가하면 커지고 Ni 함유량이 증가하면 작아진다.
3. 열전도도는 흑연구상화율이 증가하면 감소하고, Mn 및 Ni 함유량이 증가하면 감소한다.

Table. 2. Relation between thermal conductivity, K and electrical conductivity, σ at variation of temperature in 0.25% Mn contents cast iron.

Materials	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	K (cal/cm.s. $^{\circ}\text{C}$)	σ ($\times 10^4 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)	K/ σ ($\times 10^{-6}$)	Remarks.
FGCI(1)	100	0.136	1.57	8.66	C : 3.52%
	200	0.132	1.37	9.63	Si : 2.53%
	300	0.126	1.20	10.50	Mg : 0.004%
CVGCI(2)	100	0.117	1.90	6.15	C : 3.50%
	200	0.119	1.64	7.25	Si : 2.56%
	300	0.115	1.39	8.31	Mg : 0.025%
SGCI(3)	100	0.094	1.95	4.82	C : 3.46%
	200	0.097	1.60	5.84	Si : 2.60%
	300	0.095	1.41	6.73	Mg : 0.039%

(1) FGCI : flake graphite cast iron.

(2) CVGCI : CV graphite cast iron.

(3) SGCI : spheroidal graphite cast iron.

4. 흑연구상화율이 증가하면 열전도도에 대한 전기전도도의 비는 작아진다.

참 고 문 헌

1) 旗手, 中村 : 鑄物, 58(1986) 12
 2) 岩淵, 成田 : 鑄物, 59(1987) 3
 3) 小林, 新家 : 鑄物, 58(1986) 4
 4) P. A. Green, A. J. Thomas : AFS. Trans., 79 (1971) 569
 5) T. Noguchi : Bull. of Fac. Eng., Hokkido Univ., 87(1978) 57
 6) Japan Industrial Standard : JISA, (1985) 1412
 7) H. Saito : AFS. Trans., 84(1976) 614

8) A. J. Angatom : Phil. Mag., 25(1963) 130
 9) 張 博, 系藤 : 鑄鍛造と 熱處理, 4(1982) 1
 10) S. I. Karsay : DCI I. Production, 2nd Ed.(1976) 98
 11) R. O. Grisdale, A. C. Pfister : Bell sys. Tech. J., 30(1951) 271
 12) B. Lux : Giessereiforschung, 22(1970) 2
 13) R. W. Powell : Research, 492(1954) 499
 14) A. W. Smith, N. S. Rasor : Phys. Rev., 104 (1956) 885
 15) K. B. Palmer : BCIRA J., 8(1960) 266
 16) V. Vlack : Mat. Scien. for Eng., (1969) 248