

|||||
論 文
 |||||

固體炭素에 의한 鐵의 浸炭機構에 對한 研究

*權 鎬 泳 趙 統 來 **姜 世 善

A Study on the Carburization Mechanism of Iron by Solid Carbon

Ho-Young Kwon, Tong-Rae Cho, Sei-Sun Kang

Abstract

The experiment was carried out for the purpose of studying the carburization of pure iron ingot and sintered iron powder by solid carbon in the atmosphere of CO gas.

The velocity of carburization was estimated by the diffusion coefficient D calculated by carburization equation.

The results obtained were as follow:

1. The higher the carburization temperature, carburization depth and carbon concentration were increased, and the melting zone which had 2.8~3.4 %C at the 3~4mm from interface of carburization was formed at 1300°C.
2. The main carburization mechanism of pure iron ingot and the sintered iron powder were proceeded by CO gas up to 1100°C, solid carbon over than 1300°C, respectively.
3. The main carburization mechanism of pure iron ingot at 1200°C was proceeded by solid carbon, and sintered iron powder was proceeded by CO gas, however, in case the reaction time, the carburization was proceeded by solid carbon over than 5hrs.
4. The diffusion coefficient D of carbon were
 $0.559 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ at 1100°C,
 $0.237 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ at 1200°C,
 $0.087 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ at 1300°C,
 in case of pure iron ingot carburized.
5. The diffusion coefficient D of carbon were
 $0.124 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ at 1100°C,
 $0.102 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ at 1200°C,
 $0.480 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ at 1300°C,
 in the case of sintered iron carburized at the pressuring 4ton / cm².

*忠南大學校 工科大學 金屬工學科

(Department of Metallurgical Engineering, Chung Nam National University, Tae - jon 301 - 764)

**大田工業大學 金屬工學科

(Department of Metallurgical Engineering, Taejon National University of Technology, Tae - jon 300-172)

1. 서 론

주강품의 기계적 성질을 개선하기 위해서 표면경화법으로 침탄 열처리 방법을 사용하는 경우가 있다. 침탄 열처리 방법은 철 속에 탄소가 확산함으로서 이루어지는 것이며, 이러한 과정을 규명 하려면 철 속으로 침탄이 진행되는 침탄기구를 조사하는 것이 필요하다. 또한 최근에는 가탄제를 사용할 때 용탕내의 가탄기구에 대한 연구가 많이 행해져 가탄은 용탕과 가탄제와의 접촉에 의한 표면확산 반응이라는 보고¹⁾가 있으며, 한편 순수한 고체탄소에 의한 순철의 침탄기구에 대한 연구²⁾도 진행되고 있다. 철 속으로 침탄이 일어나는 침탄기구에 관한 연구는 연구자에 따라 산화철의 환원과정에서 산화철이 완전히 환원된 후 침탄이 일어난다는 이론과, 산화철의 환원과 동시에 침탄이 일어난다는 이론등 침탄에 관한 이론이 아직 명백하지는 않다. 산화철이 환원될 때의 침탄기구는 앞의 2가지 이론중 어떤 과정으로 침탄이 진행되는가를 조사한 연구가^{3)~7)} 있으나 아직 그에 대한 이론이 확립되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 철 속에 침탄이 진행될 때의 침탄기구를 규명하기 위해서 순철잉고트 및 순철분말 소결체를 CO가스 분위기에서 고체침탄 실험을 하여 침탄층의 두께를 측정하고 침탄된 탄소농도를 조사 비교하였으며 또한 침탄기구를 규명하기 위한 기초적 자료로서 순철잉고트 및 소결된 분철중에서 탄소의 확산계수를 산출하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료 제작

본 실험에 사용된 시료의 조성은 Table 1에 보인 것처럼 순도 99.99% Fe인 순철잉고트 및 분말을 사용하였고, 순철잉고트의 침탄실험은 잉고트를 절

단하여 10mm×10mm×25mm의 정방형 형태로 만든 다음 이 시료위에 $\phi 5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 인 고체 탄소봉 (분광 분석용 탄소전극)을 시료와 잘 접촉되도록 연마하여 니크롬선으로 묶은 다음, CO가스 분위기에서 고체탄소에 의한 침탄실험을 행하였다. 한편, 소결된 분철의 침탄실험은 -200mesh인 순철분말을 4ton/cm²의 압력으로 압축 성형하여 $\phi 13\text{mm} \times 13\text{mm}$ 의 원주형으로 만든 다음, 질소가스 분위기에서 1250℃의 온도로 3시간 소결한 후 노냉하여 시료로 사용하였다. 이 시료 위에 고체탄소봉을 올려 놓고 니크롬선으로 묶은 다음 CO가스 분위기에서 침탄실험을 하였다.

2.2 침탄실험

순철의 침탄실험은 두가지 과정으로 하였다. 첫째는 순철잉고트를 CO가스 분위기에서 고체탄소봉에 의한 고체침탄 실험을 하였고, 둘째로 순철분말을 4ton/cm²로 성형 압축하여 소결시킨 분철을 CO가스 분위기에서 고체침탄 실험을 하였다. 실험장치는 Fig.1의 장치를 사용하였으며 분철을 소결하여 사용한 이유는 산화철의 환원 과정에서 침탄될 때 환원되어 생성된 철층은 다공질철이기 때문에 이와 같은 형태로 하기 위해서 분철을 압축 성형하여 실험하였다. 분위기가스로 사용한 CO가스는 Fig. 1의 장치에서 코크스를 넣어 1250℃로 가열시킨 CO가스 발생로에 CO₂가스를 유입시켜 CO가스를 발생시켰으며, KOH용액과 SCARITE II 용액이 든 CO₂가스 흡수병을 통과시켜 CO가스중에 혼합된 미반응 CO₂ 가스를 제거시켜 사용하였다. 침탄방법은 CO가스 분위기에서 1100℃, 1200℃ 및 1300℃의 반응온도로 0.5~5.0 시간동안 침탄실험을 행하였으며 침탄된 시료는 종축으로 반으로 절단하여 연마한 후 피크린산 5% 알콜용액으로 7~10초 동안 부식시킨 다음 광학현미경 및 주사전자현미경을 사용하여 시료와 밀착된 고체탄소봉 직하에서부터 내면으로 0.5mm 간격으로 사진 촬영을 하여 탄소함량과 침탄층의 깊이를 조사하였다 각 침탄층의 깊이별 탄

Table 1 Chemical composition of the Fe ingot and Fe powder

Element	Cr	Cu	Si	Mn	Ni	Zn
Fe ingot	0.0014	0.0012	0.0004	0.0018	0.0018	0.0010
Fe Powder	0.0018	0.0012	0.0004	0.0012	0.0018	0.0024

(wt %)

소의 농도는 단위 면적당의 시멘타이트, 퍼얼라이트 및 페라이트의 면적율을 측정하고 이값을 다음식에 대입하여 산출하였다.

$$C\% [6.667 \times \text{시멘타이트}(\%) + 0.8 \times \text{퍼얼라이트}(\%) + 0.025 \times \text{페라이트}(\%)] / 100.$$

이와 같이 구한 탄소함량은 표준 현미경 조직 사진집의 조직과 비교할 때 탄소 함량이 잘 일치함을 확인하였다. 또한 이와 같이 산출한 탄소함량 및 침탄층의 깊이를 Fick's 확산식에 대입하여 수치해석적으로 차분법을 적용하여 탄소의 확산계수를 산출하였다.

및 침탄층의 탄소농도가 다소 증가함을 보였다. Fig. 2는 1100°C, 1200°C에서 침탄시간에 따라 침탄깊이와 침탄양과의 관계를 나타낸 것이다 침탄시간이 길어짐에 따라 침탄깊이는 비례적으로 증가하고, 동일한 깊이에서 탄소농도가 증가함을 알 수 있었다. 표면에서의 침탄양은 0.4~0.7% C이고 침탄깊이는 반응시간 5시간 일때 1.2mm 까지 침탄됨을 보였다. 1100°C에서 순철잉고트의 침탄은 graphite의 활성화가 미약하여 침탄양 및 침탄깊이가 적었다. 그러나 질소가스 분위기에서는 이 온도에서 침탄이 진행되지 않으므로 주된 침탄기구는 CO가스에

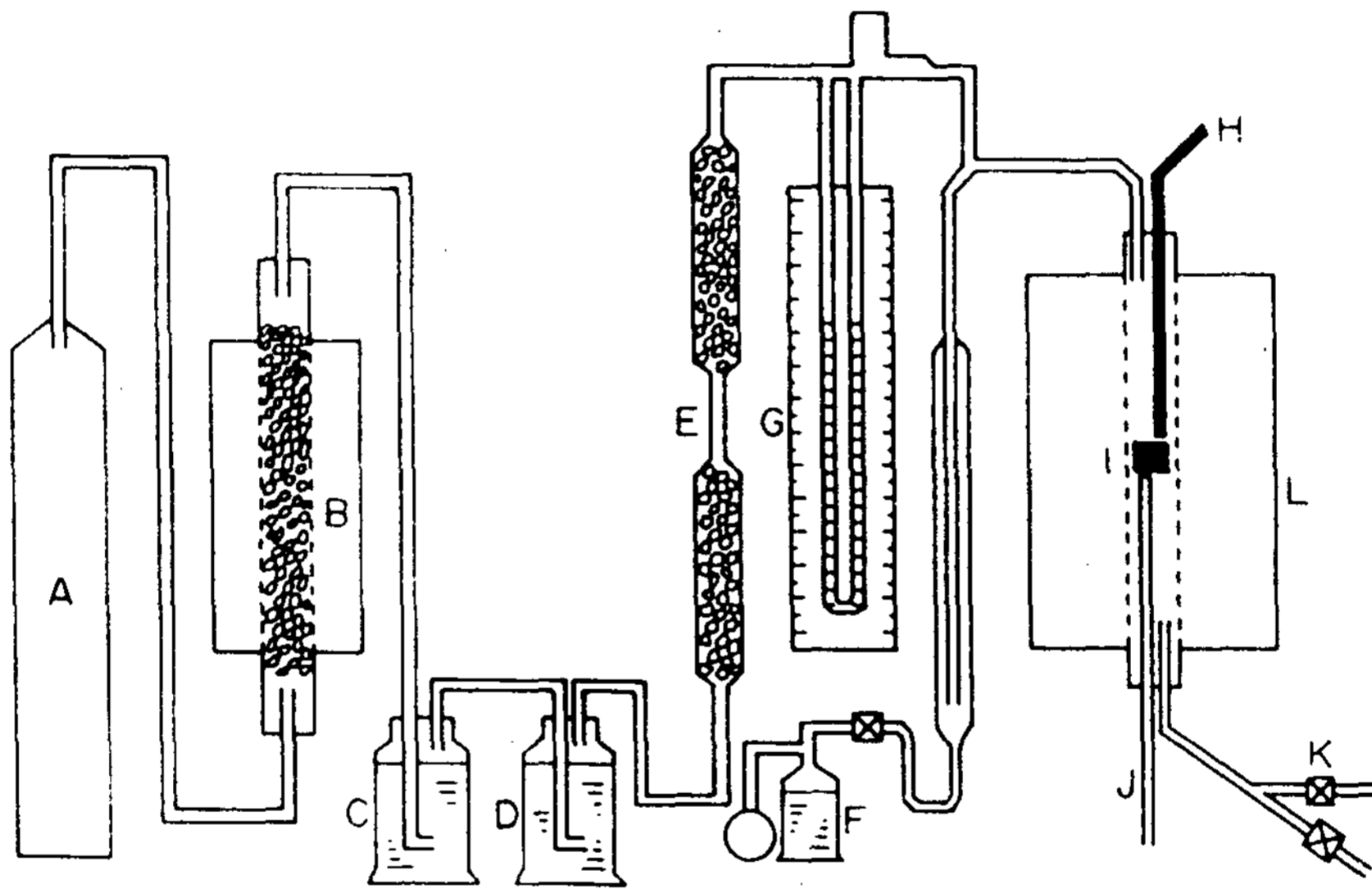


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|--|--|
| A. N ₂ , CO ₂ Bomb | B. Furnace (Co Occuring) |
| C. KOH | D. CO ₂ Absorber (SCARITE II) |
| E. Silica Gel | F. Pump |
| G. Gas Flow Meter | H. Pt-Pt / Rh Thermocouple |
| I. Specimen | J. Specimen Supporter |
| K. Vacuum Valve | L. Furnace |

3. 실험결과 및 고찰

3.1 순철잉고트의 침탄

CO가스 분위기에서 고체탄소에 의한 순철잉고트의 침탄은 1100°C에서부터 시료의 표면에서 침탄이 서서히 일어나고 1200°C까지 큰 변화없이 침탄깊이

의한 침탄이라 사료된다. 또한 1200°C에서는 질소가스 분위기에서 고체탄소에 의한 침탄이 CO가스 분위기에서의 침탄보다 활발하여 침탄깊이 및 침탄양이 많았다. 따라서 이온도에서의 순철잉고트의 주된 침탄기구는 고체탄소에 의한 침탄이라 사료된다.

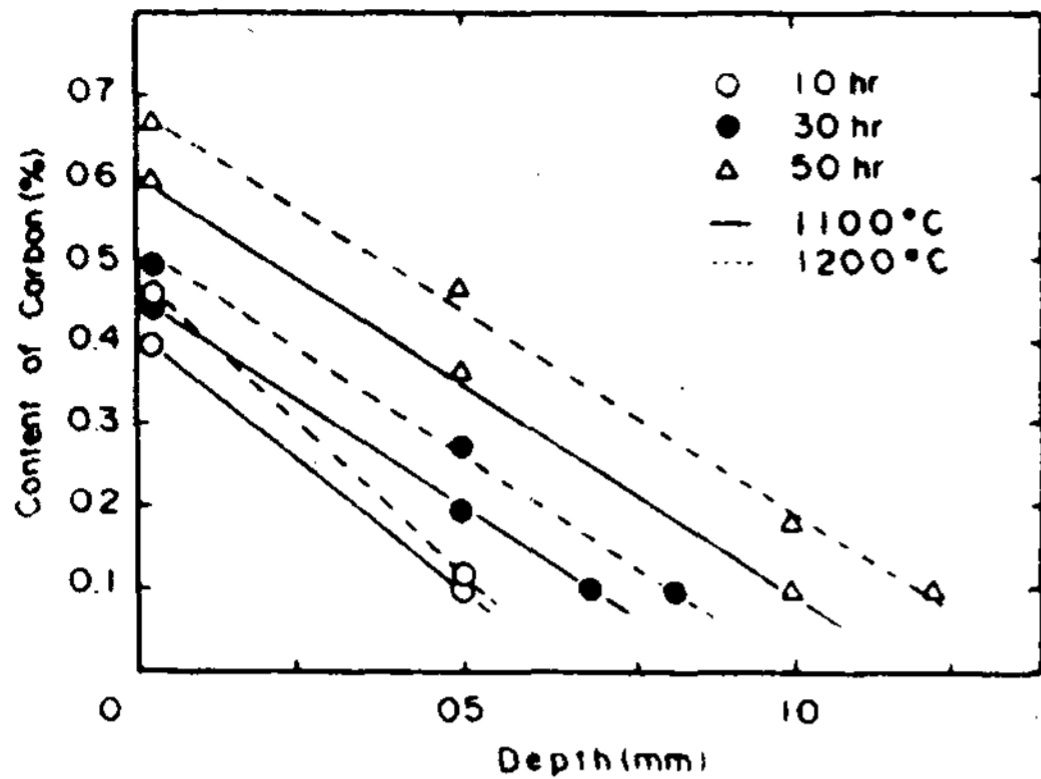


Fig. 2 Relation between carbon content and carburization depth in Fe ingot by solid carbon (Pure CO, 1100°C and 1200°C)

Fig. 3은 1300°C에서 1.0 및 2.0 시간 침탄시켰을 때 침탄깊이와 침탄양과의 관계를 나타낸 것이다. 표면에서의 침탄량은 2.6~2.8 %C의 범위이고, 침탄 깊이는 3.0mm 까지 침탄됨을 알 수 있었으며 이를 질소가스 분위기에서의 순수한 고체탄소만의 침탄과 비교하면 1200°C와 같이 침탄깊이 및 침탄량이 감소함을 알 수 있었다. 따라서 1300°C에서의 순철 잉고트의 주된 침탄기구에는 고체탄소에 의한 침탄임을 확인할 수가 있었다. 1300°C에서 반응시간 2시간 이후 부터는 침탄이 일어나는 표면에 용융현상이 일어났다. 이와 같이 용융현상이 일어나는 이유는 침탄이 진행됨에 따라 철표면의 탄소농도가 증가하여 1.5%C 이상이 되면 용융점이 낮아져 고상선의

온도가 1300°C 이하가 되므로 철표면에 액상이 용출될 것이며 이러한 경우 용출된 용체 Fe에서 탄소의 확산속도는 고체에서 탄소의 확산보다 현저하게 빠르므로 침탄층의 탄소농도를 가속적으로 상승시켜 고상선이 1130°C까지 저하하므로 시료의 용융현상을 일으키는 것으로 사료된다.

Photo 1은 1300°C에서 순철 잉고트를 CO가스 분위기에서 2시간 고체탄소에 의한 침탄시험을 한 내부조직을 보인 것이다. 표면에서 부터 약 1.0mm까지 시멘타이트 조직을 보이고 2.0mm까지는 퍼얼라이트의 층을 형성하며 내면으로 갈수록 기지조직인 페

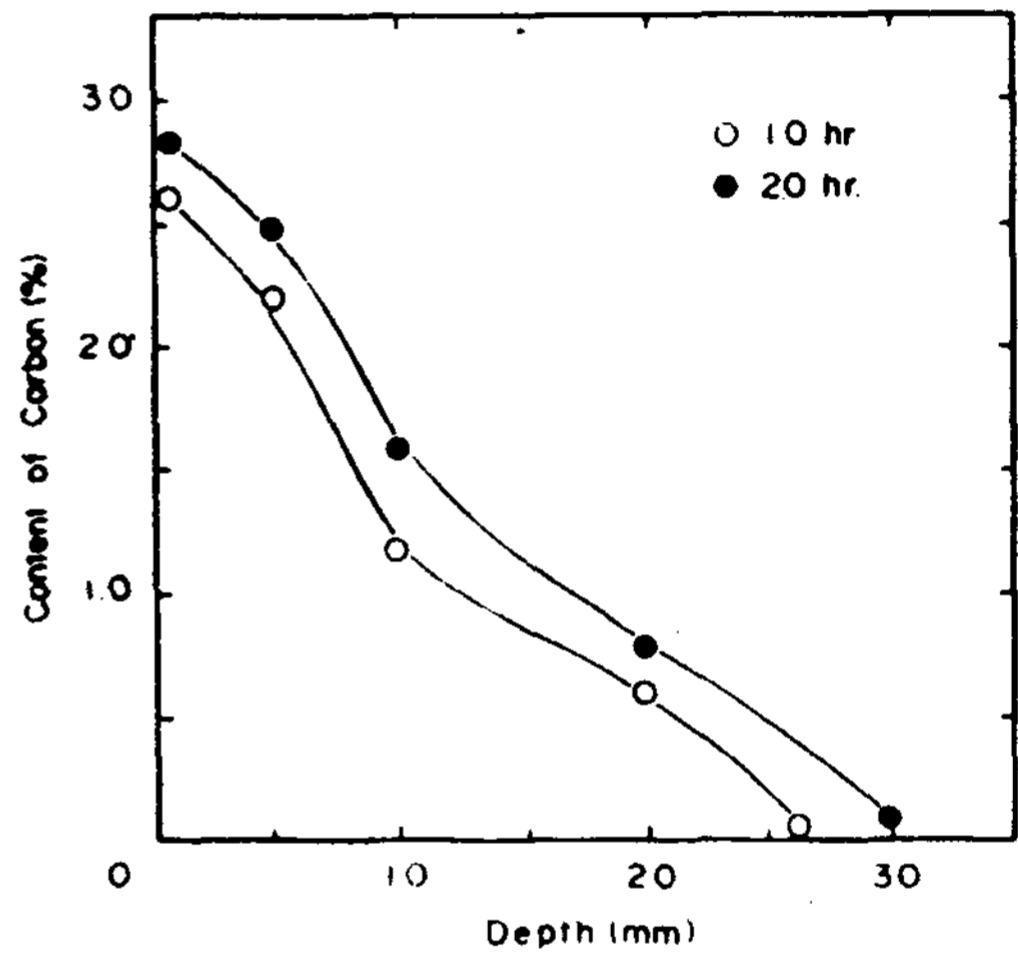


Fig. 3 Relation between carbon content and carburization depth in Fe ingot by solid carbon. (Pure CO, 1300°C)

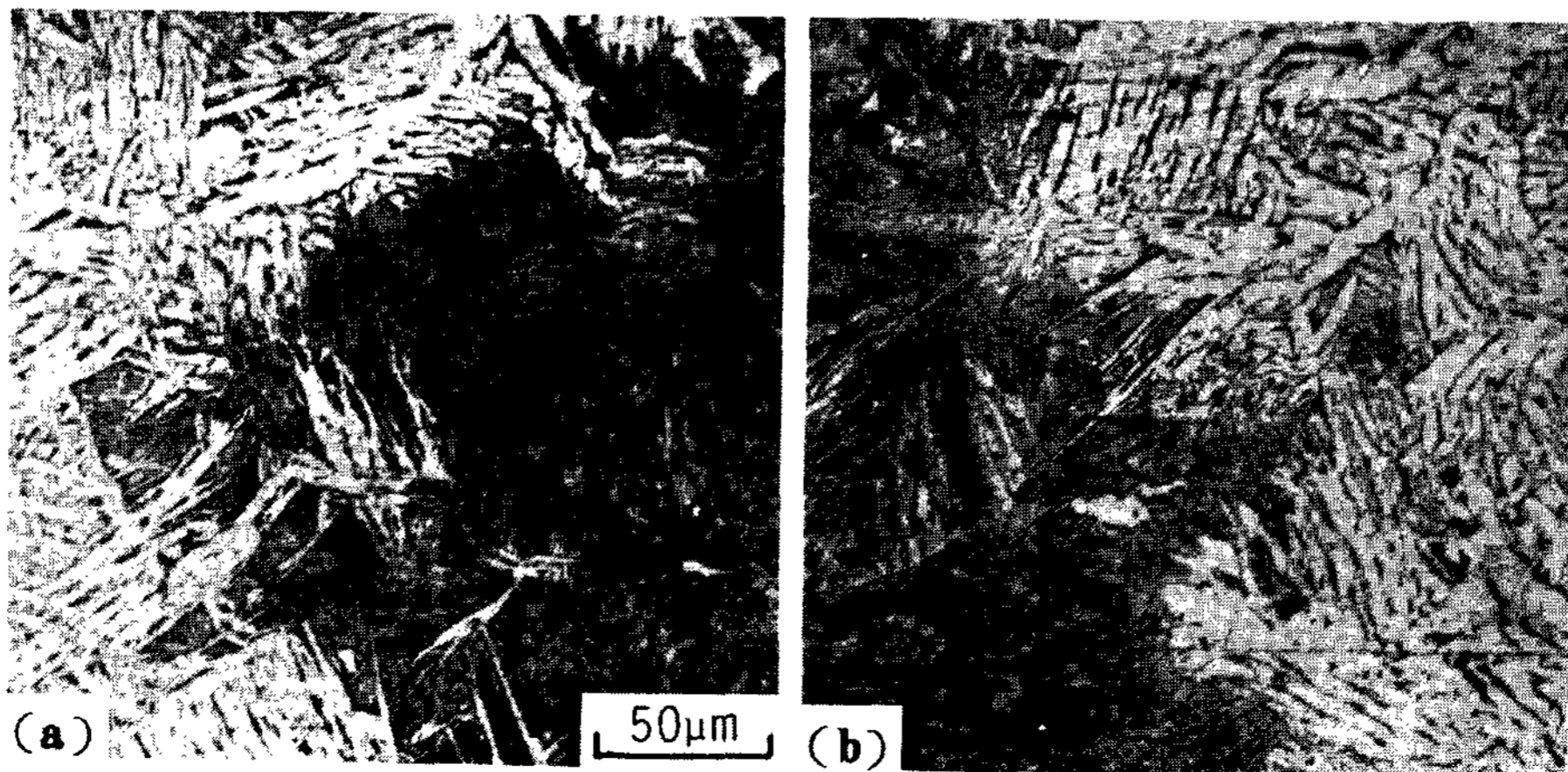
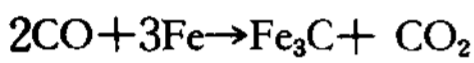


Photo 1. Microstructure of carburization in Fe ingot by solid carbon for 2.0hr. at 1300°C (pure CO, X 300)
(a) 1.0mm (b) 2.0mm

라이트가 됨을 보였다. 대체적으로 시멘타이트층은 반응시간 및 반응온도에 따라 좁거나 넓어질 수 있으나 퍼얼라이트의 층은 거의 일정한 폭으로 내부로 확산되어 가는 것을 알 수 있었다.

3.2 소결된 분철의 침탄

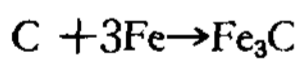
CO가스 분위기에서 고체탄소에 의한 소결된 분철의 침탄은 4ton/cm²의 성형압력 하에서 1100℃에서부터 침탄이 일어났다. 이때 침탄량은 적으나 시료전체에 침탄이 일어났다. 이 이유는 압분된 분철에 존재하는 기공을 통해서 CO가스가 유동되므로 다음과 같은 가스반응을 거쳐 침탄이 진행되기 때문이다.



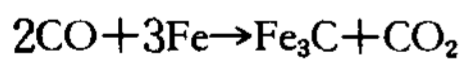
따라서 1100℃에서 소결된 분철의 주된 침탄기구(主)는 CO가스에 의한 침탄임을 알 수 있으며, 한편 1200℃에서 고체탄소만의 침탄과 비교하면 표면의 침탄량은 적으나 침탄깊이가 증가함을 알 수 있었다. 압분된 분철 표면에서의 침탄량은 0.5%C정도이고 내부로 갈수록 미소하게 감소하나 시료전체에 침탄이 되었다. 이 이유는 압분된 분철이 CO가스 속에서 고체탄소에 의해 침탄될 때에는 순수한 고체탄소에 의한 침탄과, 또한 압분된 분철에 존재하는 기공으로 CO가스가 유동하여 CO가스의 침탄이 부가됨으로써 탄소의 확산이 빨라 침탄깊이가 증가하는 것으로 사료되었다.

Fig.4는 이와 같은 관계를 비교하여 나타낸 것이다.

침탄시간이 증가할 수록 침탄깊이도 증가하며 침탄깊이가 깊을수록 침탄량은 감소한다. 압분된 분철에서 순수한 고체탄소에 의한 침탄반응은



가 된다. 이 반응은 미약하게 진행되고 여기에 CO가스에 의한 침탄반응



의 반응이 부가되어 순수한 고체탄소만의 침탄과 비교해서 더욱 빠르게 침탄되며 시료전체에 침탄되었다. 이때 침탄깊이는 시료의 중량을 기준으로 5mm까지로 정했다. 따라서 압분된 분철의 주된 침탄기구는 1200℃에서 CO가스에 의한 침탄임을 알 수 있었다. 한편 반응시간이 길어짐에 따라 즉 5시간 이후부터 급격히 침탄량이 증가하는데 이것은 압분된 분철이 반응시간이 길어짐에 따라 소결현상이 일어나 내부조직이 치밀화 되어 순수한 고체탄소에 의한 침탄과 압분된 분철에 주로 작용하는 CO가스의

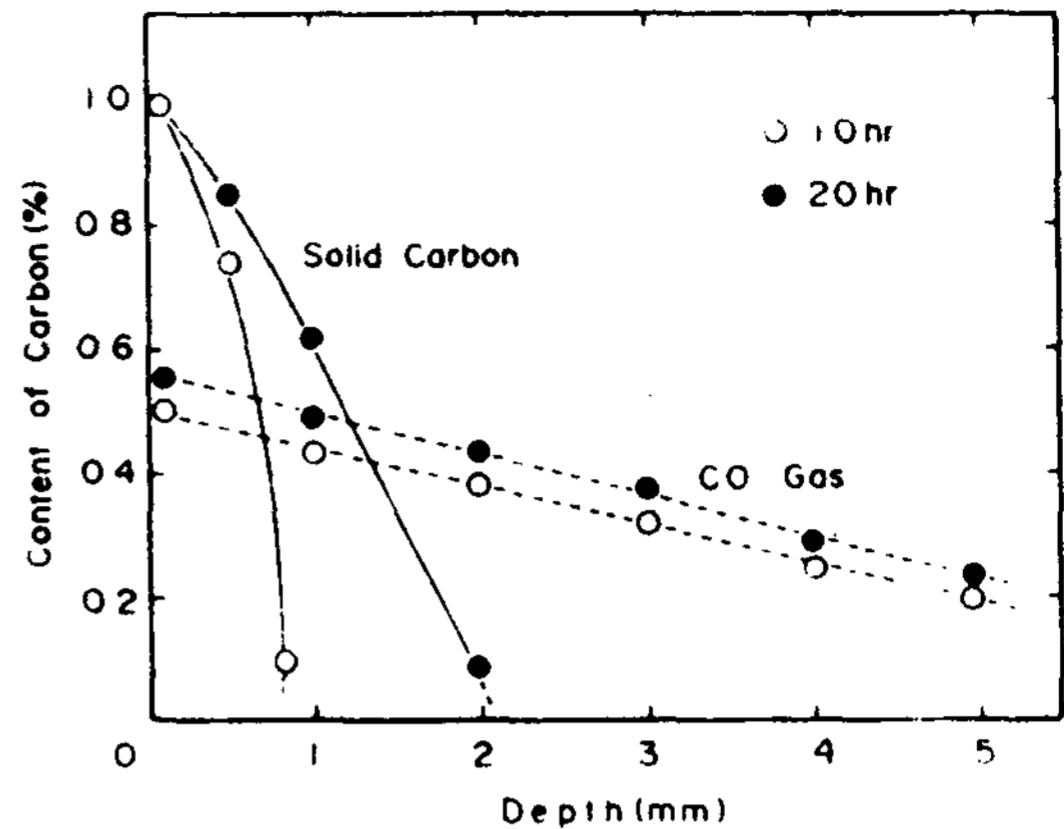


Fig. 4 Relation between carbon content and carburization depth in intered Fe (pre ; 4 ton / cm²) by solid carbon and CO gas at 1200℃

침탄이 부가됨으로서 일어나는 현상이다. 따라서 반응시간이 길어지면 주된 침탄기구는 CO가스의 침탄이 아닌 고체탄소에 의한 침탄이 주된 침탄기구라고 생각되어진다. 즉 압분된 분철은 1200℃에서 반응시간 5시간 이후에는 주된 침탄기구가 CO가스에 의한 침탄에서 고체탄소에 의한 침탄으로 변화됨을 의미한다.

Fig.5는 Fig.4에서와 같은 압력으로 압분하여 만든 분철을 1300℃로 CO가스 분위기에서 고체탄소로 침탄시켰을 때 침탄시간에 따라 침탄량과 침탄깊이와의 관계를 순수한 고체탄소만에 의한 침탄과 비교한 것이다. 이 온도에서는 graphite가 매우 활성화되어 시료표면에서의 침탄량이 많으므로 용융현상이 일어나 시료표면은 약 3.3~3.4%C의 높은 침탄량을 보이며 표면으로부터 2~4mm깊이에서 용융되었던 금속과 고체의 경계면이 있으며, 이 경계면에서 부터 탄소농도가 급격히 감소함을 보인다. 이것은 시료표피가 용융된 상태에서는 탄소의 확산속도가 빨라 탄소의 농도가 증가한 것이고, CO가스에서 고체탄소의 침탄은 분철속에 기공이 존재하므로 그 공극부로 CO가스 자체의 유동속도가 빠르게 되면서 침탄이 진행되므로 표면에서의 용융현상에 의한 고체-액체 공존부의 두께가 두꺼워진다. 따라서 1300℃의 온도로 CO가스 분위기에서 압분된 분철을 고체침탄할 때 주된 침탄기구는 고체탄소에 의한 침탄이 주된 침탄기구임을 알 수 있다.

Photo 2는 4ton/cm²로 압분된 분철을 1300℃로 CO가스 분위기에서 고체탄소에 의해 침탄실험을 한 내부조직 사진이다.

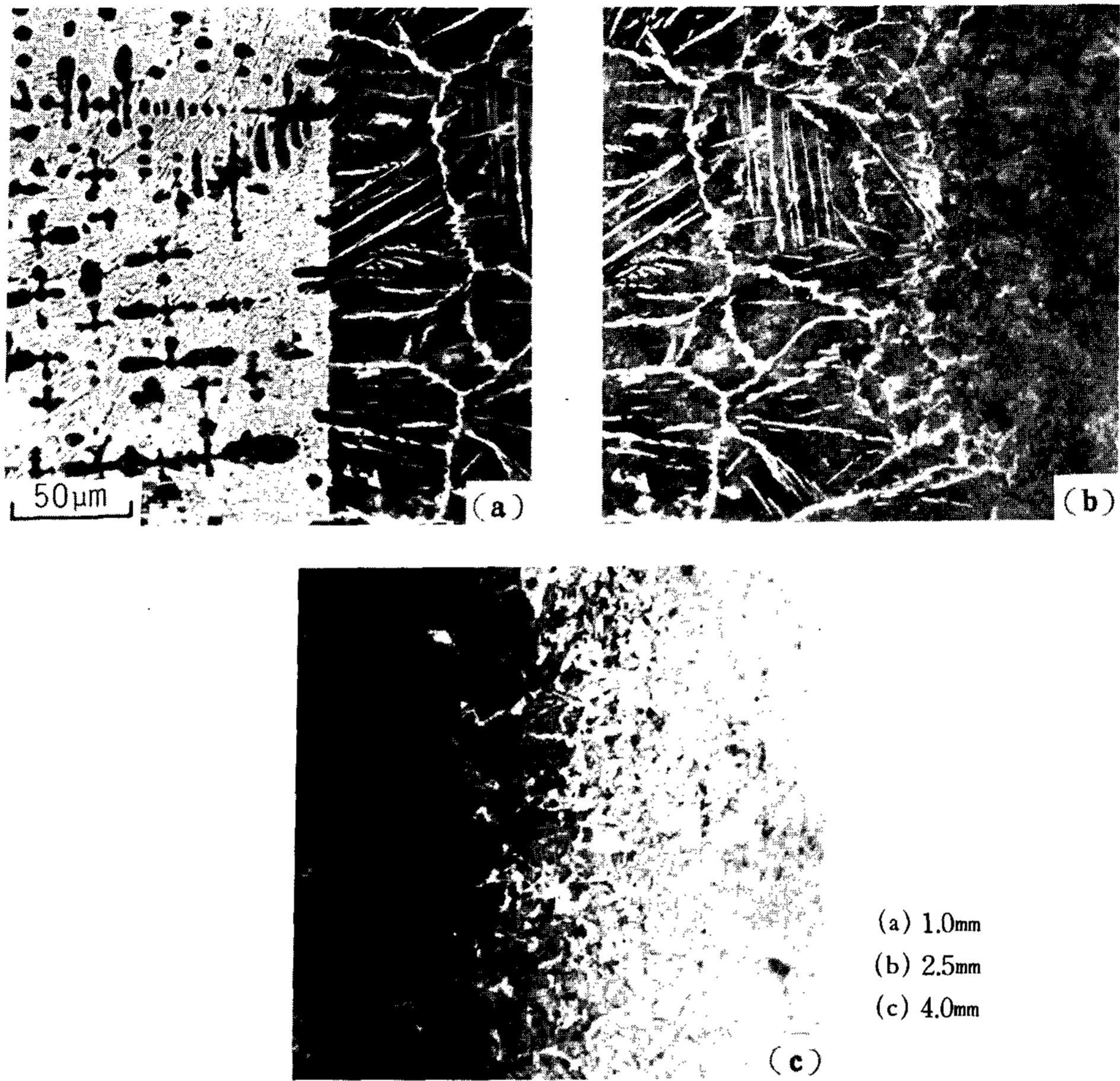


Photo 2. Microstructure of carburization in sintered Fe (Pre ; 4ton / cm³) by solid carbon a 1300°C for 3.0 hr. (Pure CO, X300)

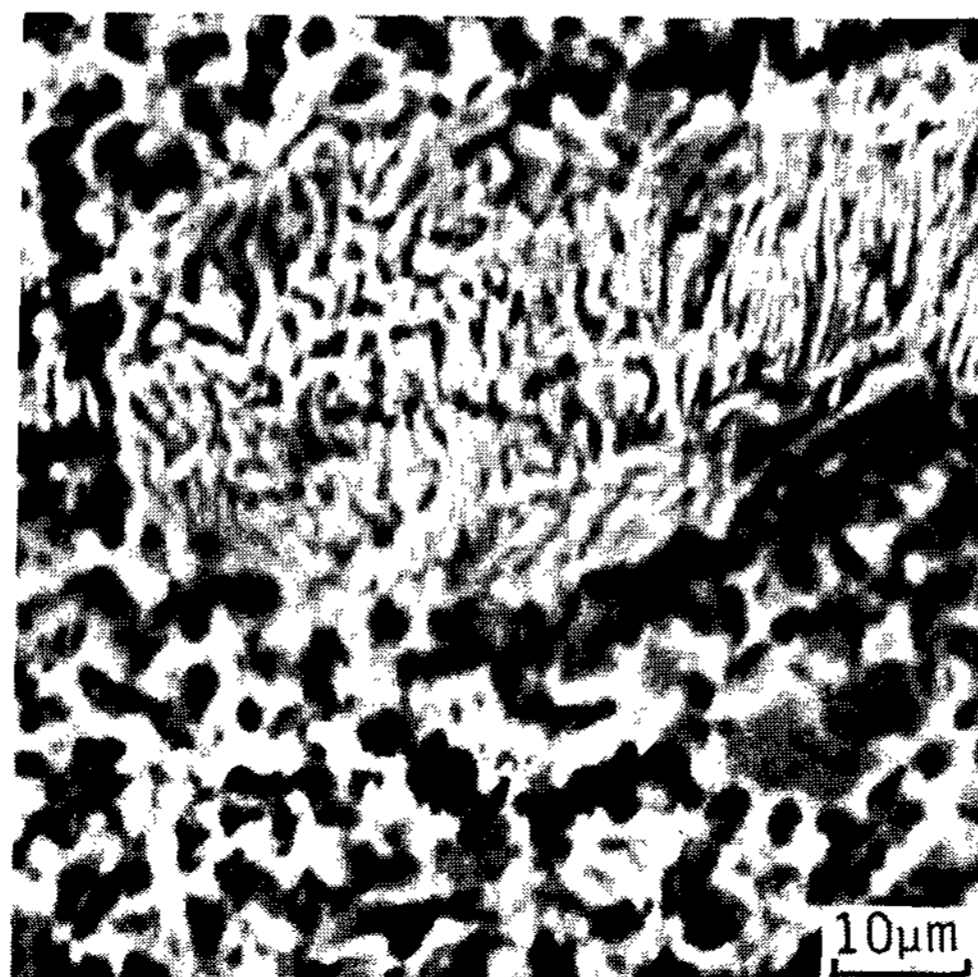


Photo 3. Scanning electron micrograph showing Photo.2(a)

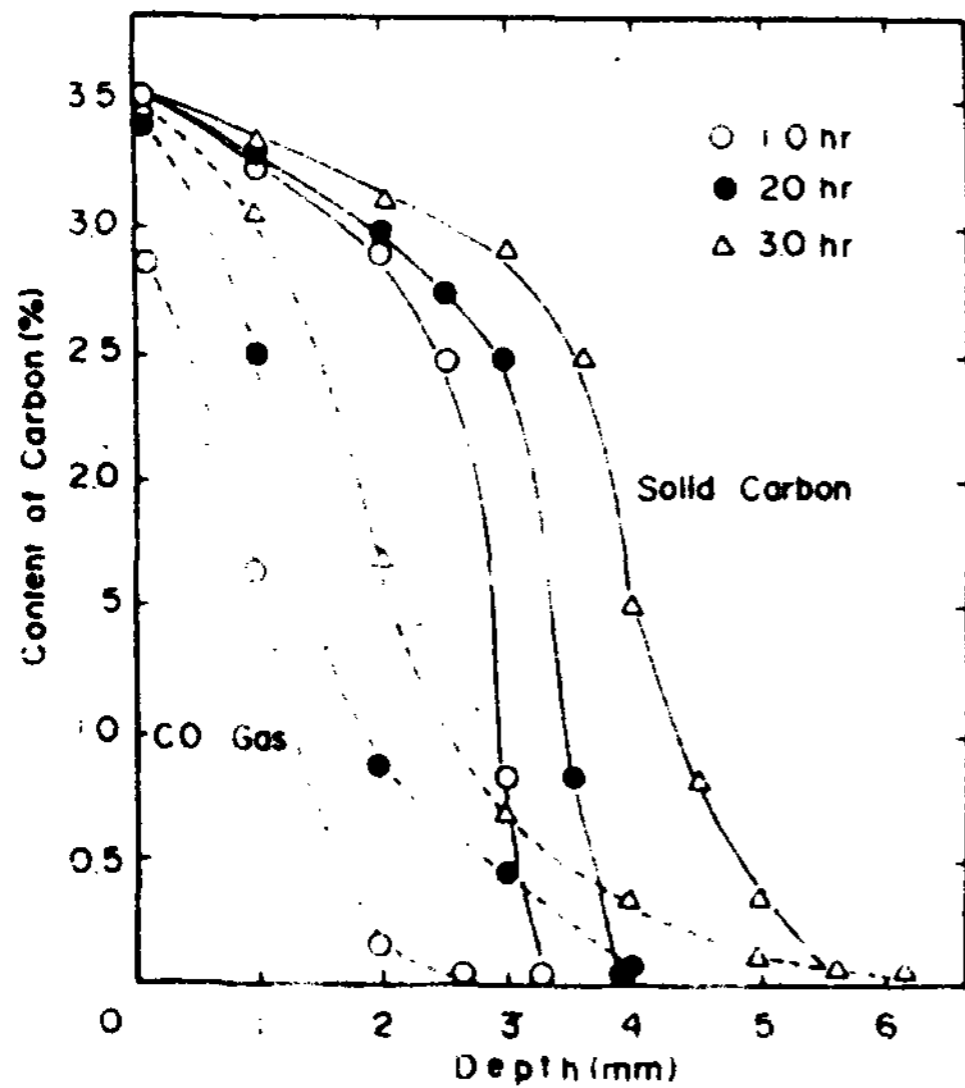


Fig. 5 Relation between carbon content and carburization depth in sintered Fe (pre : ton / cm³) by solid carbon and CO gas at 1300°C

(a)에서의 뚜렷한 경계선은 용융후 응고된 백주철과 같은 $\gamma + Fe_3C$ 의 조직과 고체와의 경계이고 용융되었던 경계면으로 부터 시멘타이트와 퍼얼라이트의 혼합조직을 갖고 내면으로 갈수록 (b)와 같이 시멘타이트의 양이 감소되고 퍼얼라이트의 조직이 되었다. (c)의 조직은 퍼얼라이트양이 감소되고 기지조직인 페라이트의 양이 증가함을 보인다.

Photo 3 은 용융된 후 응고된 Photo 2의 (a)에서 흑색 수지상정을 주사전자현미경으로 조사한 것이며 이 사진에서 수지상정은 초정 γ 로부터 퍼얼라이트로 변태한 것임을 알수 있었다.

Table 2 는 지금까지의 실험결과로 부터 순철잉고트 및 소결된 분철의 주된 침탄기구를 각 온도에서 요약하여 정리한 것이다. 1100°C 이하에서는 graphite의 활성화가 미약하여 CO가스에 의한 침탄이 주된 침탄기구이고, 1300°C 이상에서는 graphite가 매우 활성화되어 고체탄소에 의한 침탄이 주된 침탄기구이다 1200°C에서는 순철잉고트의 주된 침탄기구는 고체탄소에 의한 침탄이고, 압분된 분철의 주된 침탄기구는 CO가스에 의한 침탄이다. 그러나 침탄시간이 5시간 경과된 이후에는 분철의 소결현상 때문에 조직이 치밀화되어 주된 침탄기구가 CO가스에서 고체탄소에 의한 침탄으로 변하게 된다고 사료된다.

Table 2 Major carburization mechanism of Fe ingot and sintered Fe (Pre ; 4ton / cm³)

Temp (°C)	Fe Ingot	Sintered Fe
1100	CO gas	CO gas
1200	Solid carbon	CO gas
1300	Solid carbon	Solid carbon

* 1200°C, Sintered Fe에서 5.0 hr이상은 Solid carbon

3.3 속도론적 고찰

순철에 대한 침탄은 탄소가 철층을 통해 확산되어가는 과정이므로 침탄과정을 온도범위에 따라 탄소의 확산계수 D를 Fick's 확산식에 적용하여 수치해석적인 방법으로 계산하여 산출하였다.

H. Lee⁽⁹⁾ 는 산화철의 고체탄소에 의한 침탄연구에서 원주형 시료에 대해서 다음과 같이 해석하였다. 즉 cylindrical coordinate 상태에서 Fick's 확산식을 변형하면

$$1/D \cdot \partial c / \partial t = \partial^2 c / \partial r^2 + 1/r \cdot \partial c / \partial r + \partial^2 c / \partial z^2 - \quad (1)$$

이 된다.

그러나 본 실험에서는 시료의 중앙을 종축에 따라 침탄양을 산출하였기 때문에 r방향을 무시하고 z방향만을 고려하면 (1) 식은

$$1/D \cdot \partial c / \partial t = \partial^2 c / \partial z^2 - \quad (2)$$

와 같이 된다. 즉 전형적인 1차원 확산식으로 부터 해석될 수 있다.

(2)식을 풀기 위해서 편미분 방정식의 수치해석적 방법인 차분법 (Finite-Difference methods)을 사용했다. 여기서 초기조건은 t=0 일때

$$C(x,t)=0 - \quad (3)$$

경계조건은

$$D \cdot \partial c / \partial x /_{x=b} = K\{Co - C(b,t)\} - \quad (4)$$

C: 금속의 침탄농도

Co: 포화 침탄농도

D: 확산계수

K: 반응속도 정수

이다.

차분법을 사용하기 위해서는 \dot{C} 와 \ddot{C} 에 해당하는 차분 근사식이 필요하다. 먼저 \dot{C} 와 \ddot{C} 의 차분 근사식을 유도하면 적당한 자연수 N을 택하고 x에 대해서 구간 [0,b]를 N+1 등분하여 $X_i = ih$ 로 놓으면 구간 $h = b / (N+1)$ 가 된다. t에 대해서도 같은 방법으로 k를 정한다. (단 이 실험에서는 $h = 0.5mm, K = 1.$

5sec, b= 종축방향의 길이 이다.)

각 구간을 h와k 로 하여 각각의 좌표 C(x,t)를 첨자를 써서 C(i,j)나타낸다.

$$x=ih \quad i= 0,1,2,\dots b \quad - (5)$$

$$t=jk \quad j= 0,1,2, \dots L$$

즉 C (i,j) = C (ih, jk) 를 의미한다. 이 경우 각 격자점의 좌표는 (x_i,t_j)이고 여기서 x_i=ih 이고 t_j=jk이다.

구하고자 하는 구간내의 Mesk Point X_i 에서 미분 방정식 (2)의 근사해를 구하기 위해서 변수 x에 대해 3차 Taylor 다항식으로 C (x_i+1,t)와 C (x_i-1, t)를 전개한다. 단 C는 x에 대해 4차미분이 가능하다고 가정한다.

$$C(x_i+1,t) = C (x_i+ h,t)$$

$$=C (x_i,t) - h \cdot \partial / \partial x \cdot C (x_i,t)+h^2 / 2 \cdot \partial^2 / \partial x^2 \cdot C (x_i,t)+h^3 / 6 \cdot \partial^3 / \partial x^3 \cdot C (x_i,t) +h^4 / 24 \cdot \partial^4 / \partial x^4 \cdot C (\theta_i^+,t) - (6)$$

단 x_i<θ_i⁺<x_{i+1}

$$C(x_{i-1},t) = C (x_i- h,t)$$

$$=C (x_i,t) - h \cdot \partial / \partial x \cdot C (x_i,t)+h^2 / 2 \cdot \partial^2 / \partial x^2 \cdot C (x_i,t)+h^3 / 6 \cdot \partial^3 / \partial x^3 \cdot C (x_i,t) +h^4 / 24 \cdot \partial^4 / \partial x^4 \cdot C (\theta_i^+,t) - (7)$$

단 x_{i-1}<θ_i⁻<x_i

(6)식과 (7)식을 더하면

$$\partial^2 / \partial x^2 \cdot C (x_i,t) =1 / h^2 \cdot [C (x_{i+1},t) - 2C (x_i,t) + C(x_{i-1},t)]-h^2 / 24 [\partial^4 / \partial x^4 \cdot C(\theta_i^+,t) + \partial^4 / \partial x^4 \cdot C(\theta_i^-,t)] - (8)$$

이식은 중간치 정리에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\partial^2 / \partial x^2 \cdot C (x_i,t) =1 / h^2 \cdot [C (x_{i+1},t) - 2C (x_i,t) + C(x_{i-1},t)]-h^2 / 12 \cdot \partial^4 / \partial x^4 \cdot C(\theta_i,t) - (9)$$

단 x_{i-1}<θ_i<x_{i+1}

또한 2차 Taylor 다항식으로 C(x,t_{j+1})과 C (x, t_{j-1})을 t_j근방에서 전개하면

$$C(x,t_{j+1}) = C (x,t_{j+k})$$

$$=C (x,t_j)+h \cdot \partial / \partial t \cdot C (x,t_j)+h^2 / 2 \cdot \partial^2 / \partial t^2 \cdot C (x, \phi_j^+) - (10)$$

단 t_j<φ_j⁺<t_{j+1}

$$C(x,t_{j-1}) = C (x,t_{j-k})$$

$$= C (x,t_j) - h \cdot \partial / \partial t \cdot C (x,t_j)+h^2 / 2 \cdot \partial^2 / \partial t^2 \cdot C (x, \phi_j^-) - (11)$$

단 t_{j-1}<φ_j⁻<t_j

(10)식에서 (11)식을 빼면

$$\partial / \partial t \cdot C(x,t_j) = 1 / h [C (x,t_{j+1}) - C(x,t_{j-1}) - h^2 / 6 \cdot \partial^2 / \partial t^2 \cdot C(x, \phi_j)] - (12)$$

단 t_{j-1}<φ_j<t_j

가 얻어진다.

차분비 (Difference quotient) (9)식과 (12)식을 (2)식에 대입하여 차분법을 얻으면

$$1 / h^2[C(x_i+ h,t_j) - 2C (x_i,t_j) + C (x_i- h, t_j)]- 1 / D \cdot 1 / K [C(x_i, t_j+K) -C(x_i,t_j)] = 0 - (13)$$

이 된다. 이 방정식의 국소 절단오차는

$$\tau_{i,j} = 1 / D \cdot K \partial^2 / 2 \partial t^2 \cdot C(x_i,t_j+ \phi_j K) - h^2 \partial^4 / 12 \partial x^4 \cdot C(x_i+ \theta_i h, t_j) - (14)$$

이다. 여기서 θ_i와 φ_j는 -1<θ_i<1 이고 0<φ_j<1 인 임의의 수이다.

(13) 식을 D에 대해 풀면

$$D = 1 / K \{C(x_i,t_j+K) -C (x_i,t_j) \cdot 1 / h^2\{C (x_i+ h,t_j) -2C (x_i,t_j)+ C (x_i-h,t_j)\} - (15)$$

이 된다. 이 식에 실험에서 얻은 C(i,j)값을 대입하면 실험에 의한 D값을 얻을 수 있다.

Table 3 및 Table 4 는 이와 같은 방법으로 산출한 D 값을 나타낸 것이다.

Table 3 Diffusion coefficient of carbon in Fe ingot

Atmosphere	Temp (°C)	Diffusion Coefficient (cm ² · sec ⁻¹)
CO gas	1100	0.559 × 10 ⁻⁶
	1200	0.273 × 10 ⁻⁶
	1300	0.087 × 10 ⁻⁶

Table 4. Diffusion coefficient of carbon in sintered Fe (Pre : 4ton / cm³)

Atmosphere	Temp (°C)	Diffusion Coefficient (cm ² · sec ⁻¹)
CO gas	1100	0.124
	1200	0.102
	1300	0.480 × 10 ⁻⁶

4. 결론

순철잉고트 및 압분된 순철분말 소결체를 CO가스 분위기에서 고체탄소로 침탄처리 후 침탄기구와

탄소의 확산계수를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 침탄온도가 높을수록 침탄깊이 및 침탄량은 증가하며 1300°C에서 시료표면으로부터 3~4mm까지 2.8~3.4% C의 용융대를 형성하였다.

2) 순철잉고트 및 압분된 분철의 침탄에서 1100°C 이하에서는 CO가스에 의한 침탄이 주된 침탄기구이고, 1300°C 이상에서는 고체탄소에 의한 침탄이 주된 침탄기구이다.

3) 1200°C에서 순철잉고트의 주된 침탄기구는 고체탄소에 의한 침탄이고, 압분된 분철의 주된 침탄기구는 CO가스에 의한 침탄이지만, 5시간 이후에는 고체탄소에 의한 침탄으로 변화한다.

4) 순철잉고트의 탄소 확산계수 D는

1100°C에서 $0.559 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$,

1200°C에서 $0.273 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$,

1300°C에서 $0.087 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$, 이다

5) 압분된 분철의 탄소 확산계수 D는

1100°C에서 $0.124 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$,

1200°C에서 $0.102 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$,

1300°C에서 $0.480 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ 이다.

참 고 문 헌

1. R.G.Olsson, V. Koump, T.F.Perzak; Trans of the Metall Society of AIME, Vol.26(1966)pp.426~29.
2. 권鎬泳, 趙統來, 權赫茂: 韓國技術士會誌, Vol. 20(1987)4.pp.5~11.
3. 李海洙: 鐵と鋼, 61(1975)15,pp.3041.
4. 在藤彰, 荒金吾郎, 上平一茂, 吉松史朗: 鐵と鋼, 73(1987)pp.813..
5. E.T.Turkologan, J.V.Vinters: Carbon, Vol. 18 (1970) pp. 39.
6. 李海洙, 館充: 日本學術振興會, 49(1974)pp. 1~37.
7. 林昭二, 井口議章, 平尾次郎: 鐵と鋼, 71 (1985) 10, pp331.