

技術講座

주철의 응고 (III)

권해욱

Solidification of Cast Irons (III)

Hae-Wook Kwon

1. 구상 흑연의 성장

ASTM 사양의 흑연의 7가지 기본 형태는 그림 1에서 보이는 바와 같다. 이중 형태 I~V까지의 흑연을 구상 흑연의 각각 K, L, M, N 및 P형으로 분류한다. K형(형태I)이, L형(형태II)이 존재하여도 성질이 거의 변하지 않는, 구상 흑연 주철에서 보통 나타나는 모양이다.

철-탄소-규소 3원계 용탕 중에서 오스테나이트와 흑연이 동시에 성장하는 공정은 금속-비금속 간의 비정상 공정이다. 그러나 보통의 주철 용탕에는 산소와 황이 존재하기 때문에 이들 원소가 흑연 결정의 a-면에 흡착하여 이 면의 표면 에너지를 감소시키기 때문에 편상 흑연이 성장한다.

황과 산소는 화학적으로 매우 비슷한 거동을 보이

며 따라서 이 두 가지 원소는 흑연의 핵 생성과 성장에서도 비슷하고 서로 부가적인 영향을 미친다. 산화물과 황화물에 관한 자유 에너지 곡선을 비교해 보면 효과적인 탈산제인 동시에 탈황제 역할을 하는 원소들이 많이 있다. 특히 마그네슘과 희토류 원소 등과 같은 원소를 주철 용탕에 첨가하면 이 원소들은 효과적인 탈산제인 동시에 탈황제로 작용한다. 따라서 그림 2에서 보이는 바와 같이 흑연이 흑연 결정의 c-축 방향으로 성장하여 구상 흑연이 형성한다. 구상 흑연은 공통의 중심으로부터 성장하는 주상정의 집합체이다. 각 구상 흑연의 표면은 각 주상정의 기저면(basal plane)으로 되어있다.

과공정 구상 흑연은 외부 표면에 탄소 원자들이 달

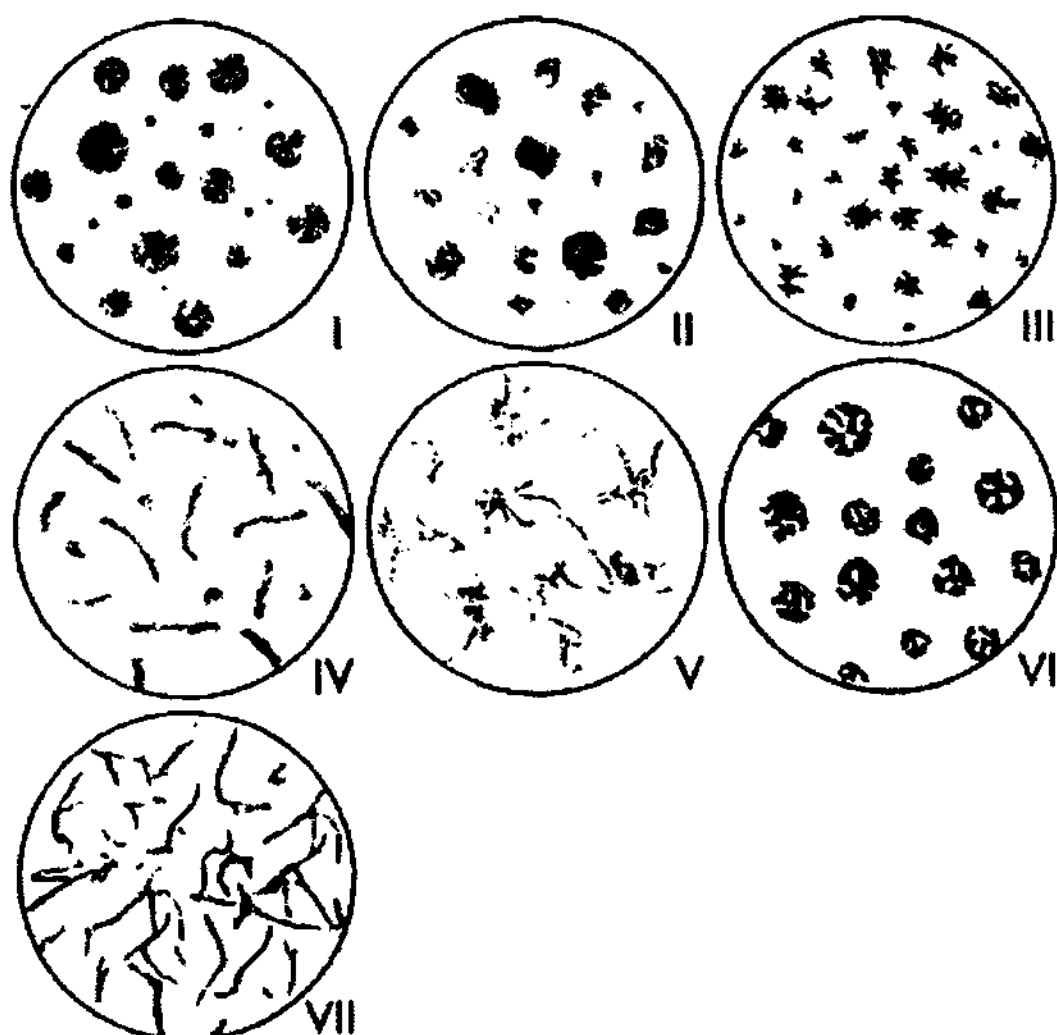


그림 1. ASTM A-247 사양의 7가지 흑연의 형태.

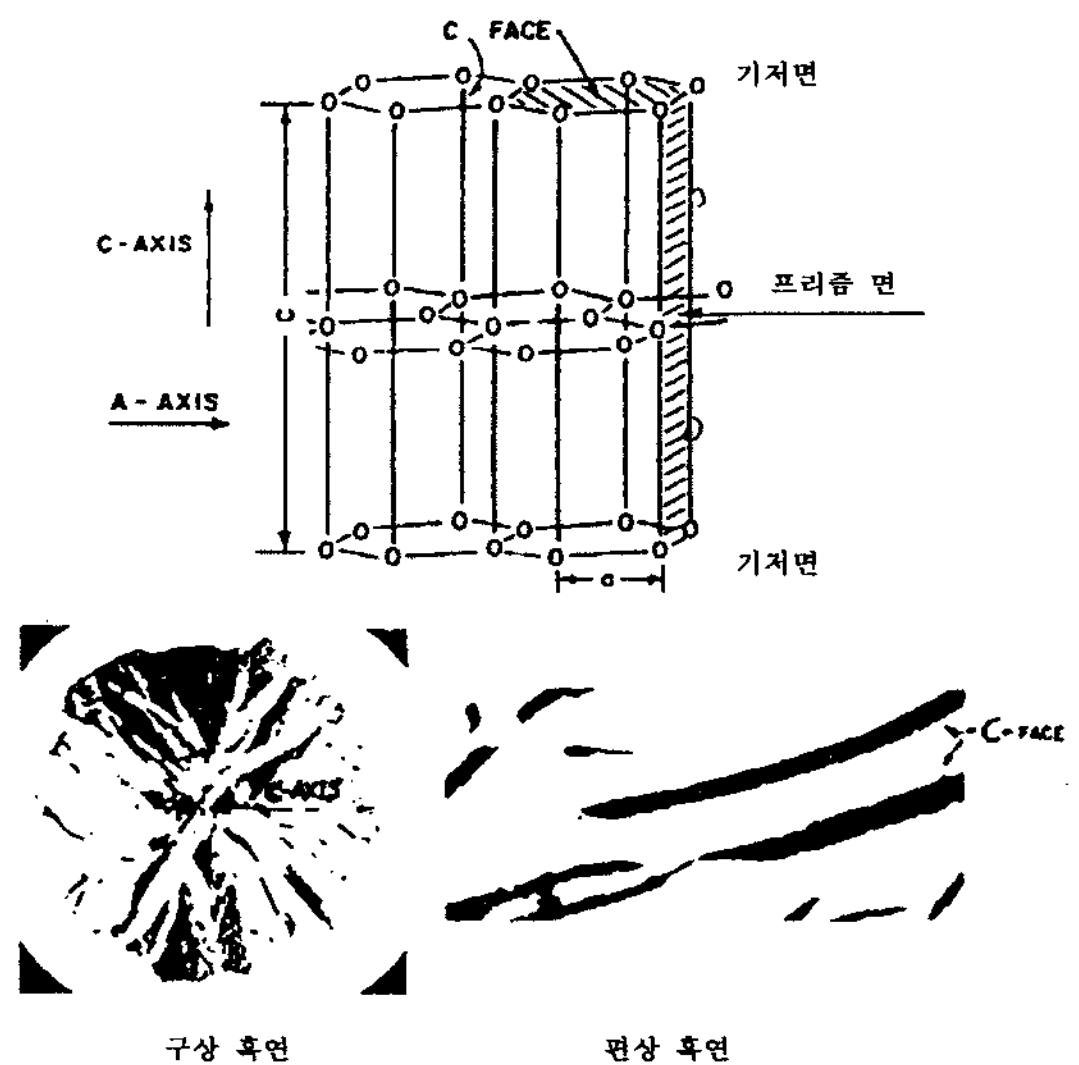


그림 2. 흑연의 결정 구조와 구상 흑연과 편상 흑연의 성장 방향.

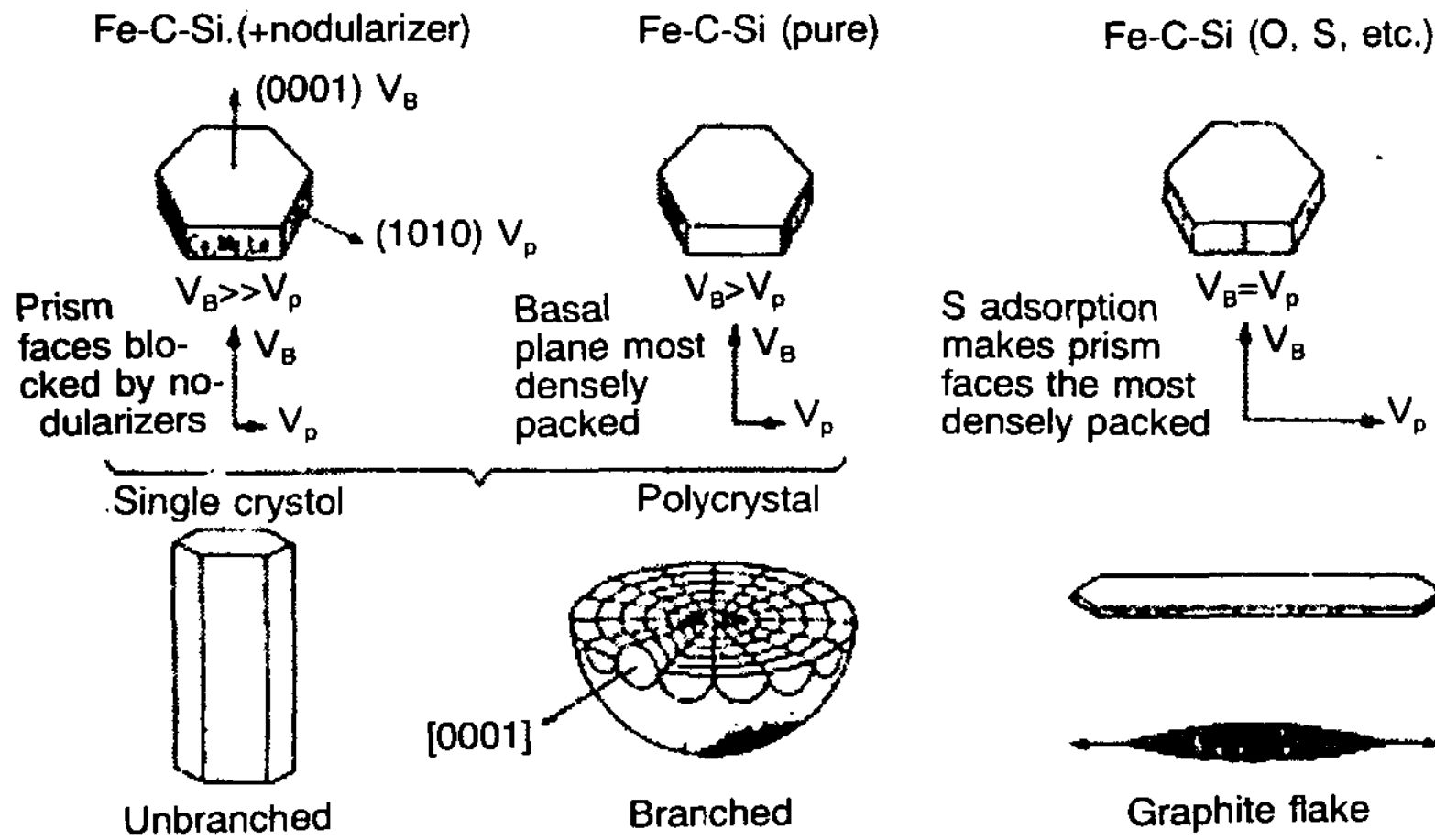


그림 3. 서로 다른 원소의 흡착에 의한 흑연의 성장 속도 변화.

라 붙으면서 액상과 접촉하고 있다. 아 공정 구상 흑연의 경우, 구상 흑연은 흑연이 편상 흑연과는 달리 오스테나이트와 접촉하고 있는 상태에서 성장하지 않는다는 뜻에서 divorced eutectic의 방법으로 액상과 접촉한 상태에서 성장한다. 그리고 궁극적으로는 공정 구상 흑연이 오스테나이트로 둘러 싸이게 되고 흑연은 성장을 멈춘다. 이와 같은 흑연 형상의 변화는 액상 내에 황과 산소 원자들이 없고 이른바 구상화 원자들이 흑연 결정의 기저면과 프리즘면에 모여서 주로 기저면에 수직 방향으로 성장하게 하는 사실로부터 나타난다. 이와 같은 거동은 그림 3에서 개략적으로 보이는 바와 같다. 즉 이 그림에서는 1) 구상화제를 함유하고 있는 철-탄소-규소 합금, 2) 순수하거나 황과 산소와 같은 원소로 오염이 되어있지 않은 철-탄소-규소 합금, 그리고 3) 황과 산소로 오염이 되어있는 철-탄소-규소 합금의 액상에서의 거동을 보여주고 있다. 구상화제의 효과를 설명하기 위하여 여러 가지 이론이 제안되어 있으나 이 이론들은 모두가 구상화 원소가 흡착하고 흑연의 특정한 결정면에서 황과 산소를 제거하여 성장을 조정하는 사실과 관련이 있다. 액상 내에 산소가 존재하고 적어도 얼마간의 구상화 저해 원소들이 존재하면 이들 원소는 흑연 결정의 프리즘면에 흡착된다는 것은 실험적으로 확인된 바 있다. 따라서 이 면에서 액상-흑연간 표면 장력이 감소하고 따라서 편상 흑연이 성장한다. 이와 같은 원소가 존재하지 않으면, 프리즘면의 표면 에너지가 더 높고 따라서 기저면에 수직 방향으로 성장하여 구상 흑연이 형성한다.

2. 흑연의 성장 기구

구상화 원소는 액상 내의 흑연의 표면 활성화 원소들의 잔류 농도를 조절하는 역할을 하는 것은 이미 언급한 바와 같다. 황과 산소와 같은 원소들이 흑연의 프리즘면에 흡착하여 프리즘면을 성장 속도가 느린 원자적 규모에서 평활한 면으로부터 성장 속도가 빠른 원자적 규모에서 거친 면으로 변화시킨다. 그러면 거친 프리즘면의 성장은 오스테나이트의 성장에 필적할 만하게 되고, 이 두 상은 비교적 약하기는 하지만 coupled eutectic의 방법으로 동시에 성장하여 회주철에서 나타나는 서로 연결된 편상 흑연이 형성한다.

액상에서 표면 활성화 원소들을 점점 제거하면 프리즘면이 원자적 규모에서 결정학적으로 평활한 면이 되고 속도론적인 저항이 점점 회복되고 따라서 프리즘면의 성장이 제한된다. 평활한 프리즘면이 성장하는 데에 대한 속도론적인 장벽을 넘기 위하여 필요한 과포화가 기저면에서 나선형으로 성장하는 데에 대한 장벽을 넘기 위하여 필요한 것보다 능가하게 된다. C.V. 흑연의 형상은 편상과 구상 흑연의 형상 사이의 천이를 나타낸다.

성장 속도가 느린 평활한 기저 계면은 결함에 의하여 결정되는(나선형 성장) 기구에 의하여 성장하고 오스테나이트 계면의 성장 속도보다 매우 느리다. 이와 같은 성장 속도의 차이로 인하여 오스테나이트와 구상 흑연 사이에 divorced eutectic이 형성한다. 결과적으로 나타나는 각각 독립적으로 핵 생성을 하고 어느 정도 자유로이 성장한 후에 오스테나이트로 둘러싸이

는 고립된 독특한 흑연 조직이 구상 흑연 주철에 나타난다.

성장 속도가 빠른 거친 계면을 가지는 시멘타이트는 주어진 구동력(driving force)에 대하여 흑연 기저면보다 훨씬 더 빠르게 성장한다. 시멘타이트의 성장을 위한 구동력은 흑연의 기저면 성장의 경우 주어진 성장 속도에 대하여 필요한 구동력의 일부에 지나지 않으며 과냉이 작은 조건 하에서조차도 시멘타이트의 성장이 일어나기 쉽다. 탄화물 형성을 억제하기 위하여 철-탄소 2원계 합금에 규소와 같은 적당한 제 3의 원소를 첨가하여 흑연 성장을 위한 구동력을 공급하여야 한다. 이것은 조성적 또는 열역학적 평형 효과이다. 후접종과 같은 부가적 핵 생성 과정을 통하여 핵 또는 구상 흑연의 수를 증가시키면 주어진 냉각 속도에 대한 속도론적 과냉이 감소하고 따라서 시멘타이트의 핵 생성과 성장에 필요한 온도보다 매우 높은 온도에서 흑연이 기저면으로 성장한다. 따라서 핵 생성 및 응고 성장 변수가 오스테나이트와 흑연 또는 시멘타이트의 성장에 대한 구동력에 영향을 미친다.

2.1 흑연 형상의 조정

주철에서 흑연 현상을 조정하기 위해서는 용탕의 화학적 조성, 핵 생성 및 응고의 성장 변수의 함수로서 흑연의 성장 기구를 근본적으로 확립하여야 한다. 주철의 조직은 오스테나이트, 흑연 및 시멘타이트 사이의 성장 경쟁으로 합리화 할 수 있다. 흑연 성장은 편상 흑연의 경우와 같이 프리즘 면 위에서 우세하게 일어날 수 있으며 또는 Morrogh가 지적한 바와 같이 구상 흑연의 경우 기저면 위에서 우세하게 일어날 수도 있다. 각 계면의 속도는 (1)계면의 이동도(mobility) 즉 주어진 구동력에 대한 계면의 이동 속도 그리고 (2)가능한 실제의 구동력으로 분석할 수 있다.

구동력은 탄소 과포화 또는 속도론적 과냉에 관련 지을 수 있다. 가능한 구동력은 용탕의 조성(열역학적 평형 효과)과 불균질 핵생성 및 응고 성장 변수(속도론적 효과)의 함수이다.

2.2 계면의 이동도

응고가 일어나는 동안 계면의 이동도는 결정 성장 기구에 의하여 결정된다. 평활하지 않은 면은 원자적 규모에서 거칠다고 간주하며 보통의 성장 기구에 의하여 이동한다. 이와 같은 계면의 이동도가 높으며 거

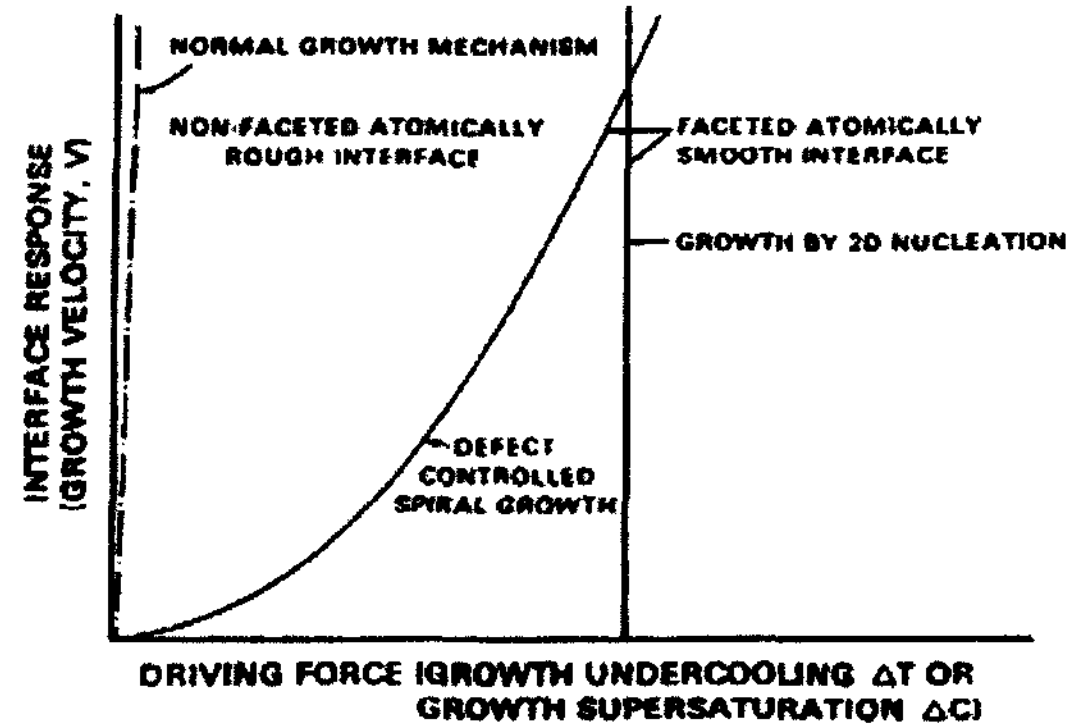


그림 4. 이론적 결정 성장 곡선.

의 무시할 수 있을 정도로 작은 구동력 조건 하에서 성장한다. 금속의 계면이 일반적으로 이동도가 높은 계면의 좋은 예이다. 이와 같이 이동도가 높은 계면의 성장은 액상 내에서 용질의 계면으로의 이동에 의하여 결정되며 액상 내에서 유체의 흐름이 없는 조건 하에서 액상 내에서의 용질의 확산에 의하여 조절된다.

계면이 평활하면 결정학적으로 매끄러운 면에서 측면으로의 성장 기구가 작용하며 보통 이동도가 낮다. 따라서 성장이 결함에 의하여 조절되는 기구에 의하는지 또는 2차원적 핵 생성에 의하여 조절되는 기구에 의하는지에 따라 다르지만 구동력은 크다. 서로 다른 결정 성장 기구를 정성적으로 비교한 결과는 그림 4에서 보이는 바와 같다. 속도로 나타낸 계면의 이동도를 구동력 즉 속도론적 과냉 ΔT 에 대하여 나타내었다. 어떤 계면에 대해서도 2차원적 핵 생성에 의하여 조절되는 성장은 결함에 의하여 조절되는 성장에 비하여 매우 더 큰 구동력이 필요하다.

표면 활성화 원소, 특히 황과 산소의 함량 변화에 따른 액상과 접촉하고 있는 흑연의 기저면과 프리즘 면의 계면 에너지를 측정된 결과가 발표된 바 있다. 그 결과는 황과 같은 표면 활성화 원소가 흑연의 프리즘 면에 우선 흡착되는 것으로 나타났다. 이 경우에 프리즘 면의 이동도가 매우 높아 편상 흑연이 성장한다.

2.3 흑연의 성장 속도

구상 흑연의 형성은 열역학적 평형론적 요소라기 보다는 속도론적인 결과이다. 황의 함량이 낮은 액상 철 내에서의 흑연은 프리즘 면이 평활한 반면에 황의 함량이 높은 액상 철 내에서의 프리즘 면은, 성장 속도가 방향에 따라 다른 이방성을 나타내는 증거는 약

하지만, 거칠며 그 이동도가 매우 높다.

더욱이 황과 같은 표면 활성화 원소가 흑연 표면에 흡착되면 흑연 계면의 평활도를 감소시키고 따라서 과냉이 작은 상태에서 이 계면의 성장을 촉진시킨다 (즉 편상 흑연이 형성한다). 따라서 이와 같은 표면 활성화 원소를 점차 제거하면 프리즘 면이 점점 평활해지고 결함을 통하여 기저면의 수직 방향으로 나선형 성장을 촉진하여 C.V. 또는 구상 흑연이 형성한다.

마그네슘, 세륨 및 칼슘과 같은 활성이 큰 원소들은 직접 표면에 흡착하기보다는 프리즘 면에 흡착하는 황 및 산소를 제거하는 역할을 한다. 이와 같은 활성 원소들의 탈산 및 탈황 생성물은 흑연의 불균질 핵생성 서브스트레이트(substrate)로 작용한다.

2.4 응고 해석

흑연이 기저면으로의 성장이 프리즘 면의 성장보다 더 잘 일어나는 현상은 평활한 프리즘 면의 성장에 대한 속도론적 장벽이 평활한 기저면 성장에 대한 장벽보다 더 크다는 것을 의미한다. 구상 흑연이 성장하는 동안의 열 분석으로부터 전형적인 성장 과냉을 계산한 결과를 보면 기저면 성장은 결함에 의하여 조절되는 것으로 나타났다.

기저면에서의 계면이 조정하는 나선형 성장에 대한 포물선적 성장 상수의 추정치는 시멘타이트의 확산 조정 성장에 대한 포물선적 성장 상수값의 천분의 몇 정도로 작은 것으로 나타났다. 이 결과는 액상 내에서 시멘타이트와 자유로이 성장하는 구상 흑연의 성장 속도를 비교한 결과이다. 시멘타이트는 계면 이동도가 높고 따라서 시멘타이트의 성장은 액상 내에서의 탄소의 확산에 의하여 조절된다.

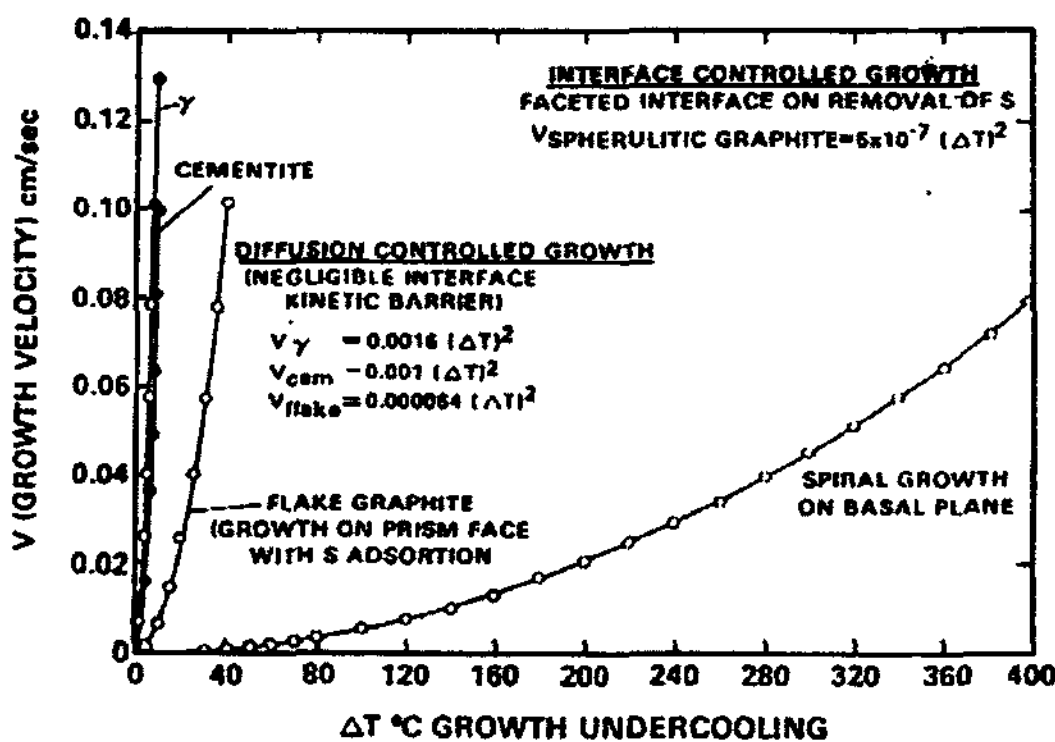


그림 5. 주철 중 각 상의 추정 성장 속도 곡선.

시멘타이트, 오스테나이트 및 편상 흑연의 거친 계면에 대한 확산 조정 성장에 대한 속도론적 성장 곡선의 추정 결과는 그림 5에서 보이는 바와 같다. 분명히 시멘타이트, 오스테나이트 그리고 불순물이 흡착된 편상 흑연에 관련된 거친 계면의 경우에 비하여 평활한 기저면의 계면 성장의 경우 더 큰 구동력이 필요하다.

2.5 공정 응고시 저 이동도 상의 영향

한 상의 이동도가 낮은 결과로 divorced eutectic이 나타난다. 흑연의 기저면의 성장 속도는 오스테나이트의 성장 속도보다 매우 느리다. 따라서 구상 흑연은 고립되어 성장하고 근본적으로 오스테나이트와 함께 성장하지 않는다.

2.6 coupled eutectic과 divorced eutectic에 대한 상대적 과냉

coupled growth는 두상이 모두 고 이동도의 계면을 가지고 성장할 때 쉽게 성립한다. 고상과 액상은 각 계면에서 국부적으로 평형을 이루고 따라서 성장 속도는, 주로 확산에 의하여 결정되는, 액상 내에서의 이동 속도에 의하여 결정된다. 이에 관련된 구동력은 계면 이동 속도에 합당한 확산을 야기시키는 데 필요한 것이며 이에 일치하는 과냉이 열분석 곡선(냉각 곡선)의 등온 성장 온도에 나타난다. 따라서 냉각 곡선의 등온 성장 온도는, 확산에 의한 이동에 해당하는 과냉을 나타내는, 공정 온도에 가까운 온도에서 나타난다.

divorced eutectic의 경우에는, 두 상 중 한 상의 이동도가 낮고 등온 성장 온도는 공정 온도보다 매우 낮아서 저 이동도 계면에 필요한 큰 구동력을 제공한다. 저 이동도 계면은 성장하는 동안 국부적으로 평형 상태에서 많이 벗어난 상태에서 성장한다.

구상 흑연 성장에 대한 divorced eutectic의 경우는 그림 6에서 개략적으로 보이는 바와 같다. 초기의 조성과는 상관없이, 공정 온도 아래로 오스테나이트가 계속 성장하여 탄소가 과포화된다. 탄소의 과포화도가 계면에서 떨어진 곳의 액상으로부터 성장하는 흑연으로의 탄소의 확산뿐만 아니라 계면 반응을 유지하기에 충분하게 탄소가 과포화될 때까지 잔류 액상 내에 탄소가 농축된다. 따라서, 보통의 결정 성장 기구에 의하여 성장하기 때문에 오스테나이트는 무시할

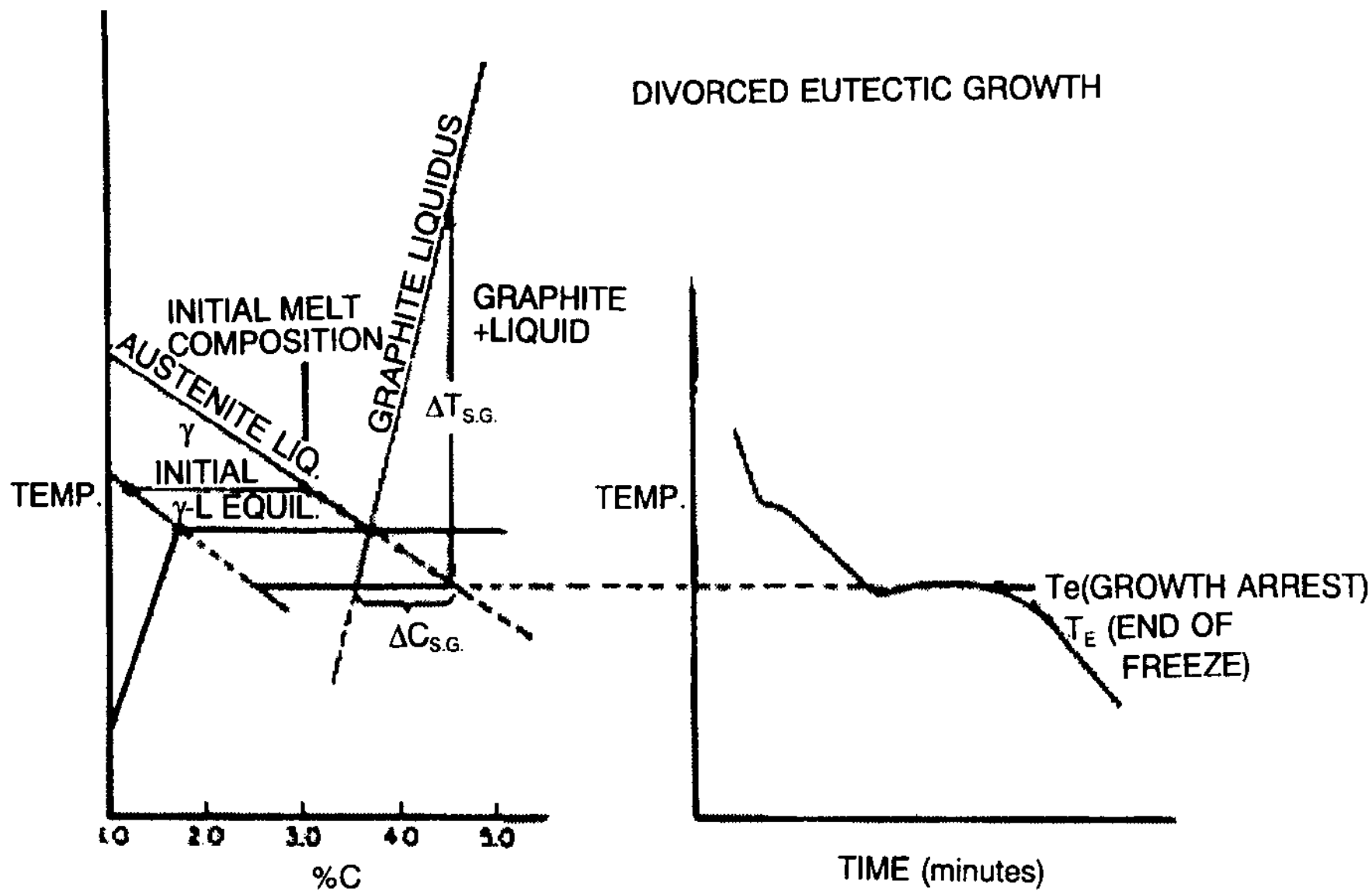


그림 6. Divorced eutectic 성장.

정도로 과냉이 작은 상태에서 성장하고 오스테나이트의 성장은 오스테나이트의 계면으로부터 확산해 사는 탄소의 이동 속도에 의하여 제한된다. 평활한 기저면의 성장은 큰 구동력이 필요하고 구상 흑연의 성장에 대한 전형적인 과냉으로부터 결함에 의하여 조정되는 나선형 성장 기구가 작용한다는 것을 알 수 있다. 오스테나이트의 성장에 필요한 무시할 수 있을 정도로 작은 과냉에 비하여 기저면의 나선형 성장의 경우에는 큰 과냉이 필요하여 divorced eutectic 반응이 일어난다. 기저면 성장이 진행함에 따라서 확산에 대한 구동력이 점차 증가한다.

2.7 구상 흑연의 성장 모델

구상 흑연은 처음에 불균질 핵 생성하여 액상과 접촉한 상태에서 자유로이 성장하고 성장이 끝나는 단계에서 구상 흑연이 오스테나이트로 둘러싸인다.

2.7.1 액상과 직접 접촉한 구상 흑연의 성장

액상과 접촉한 상태에서의 구상 흑연의 자유로운 성장은 2단계로 나눌 수 있다. 첫단계는 주로 계면의 반응으로 율속되며 두 번째 단계는 확산에 의하여 율속된다.

첫단계는 완전히 계면 율속인 상태로 시작한다. 흑연 계면은 날카로운 곡률을 가지고 따라서 기저면의 나선형 성장에 필요한 전체 구동력을 감소시키는 방향으로 상태를 변화시킨다. 구상 흑연의 반경이 매

우 작은 단계에서, 탄소의 과포화도에 의한 전체 구동력은 곡률 효과로 크게 감소한다. 이 감소한 구동력의 대부분은 계면 반응에 필요한 것이고 나머지 일부는 액상으로부터 확산에 의한 탄소의 공급에 필요한 것이다. 오스테나이트에 비하여 구동력에 대한 흑연 계면의 반응(성장 속도)이 느리기 때문에, coupled growth는 불가능하고 완전한 divorced eutectic이 성립된다.

액상과 접촉한 상태에서의 구상 흑연의 자유 성장의 두 번째 단계는, 냉각 곡선에서 등은 성장 온도에 해당하는, 확산 율속 등은 성장이다. 구상 흑연이 커짐에 따라 상태도에 미치는 곡률의 영향은 무시할 수 있게 되고, 따라서 증가한 전체 구동력의 대부분은 흑연 계면으로 확산에 의한 탄소 공급에 필요하다. 구상 흑연이 등은 성장함에 따라, 구상 흑연 주위의 액상에는 탄소가 고갈되고 흑연 계면으로의 탄소의 이동이 율속 단계가 된다. 따라서 구상 흑연이 커짐에 따라, 더 많은 분량의 전체 구동력이 탄소의 확산 공급에 쓰인다.

2.7.2 오스테나이트로 둘러싸인 후의 구상 흑연의 성장

구상 흑연의 등은 성장이 진행함에 따라, 흑연의 계면에서 액상 내의 탄소가 계속 고갈됨에 따라 오스테나이트의 불균질 핵 생성에 대한 구동력은 증가한다. 일단 오스테나이트 껍질이 형성하면 흑연의 성장은

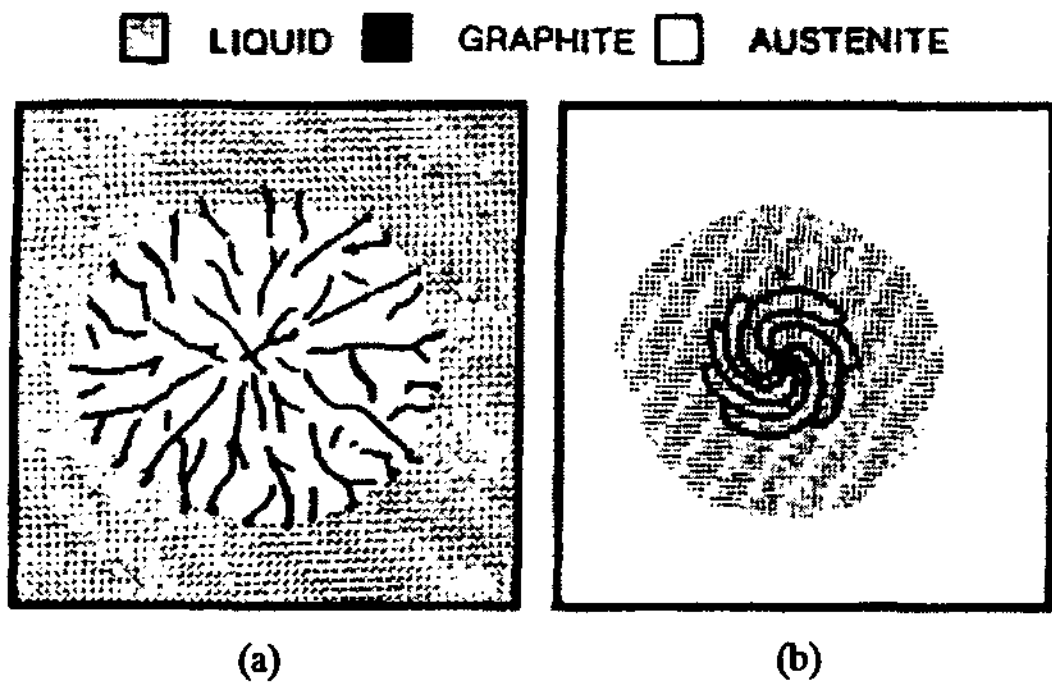


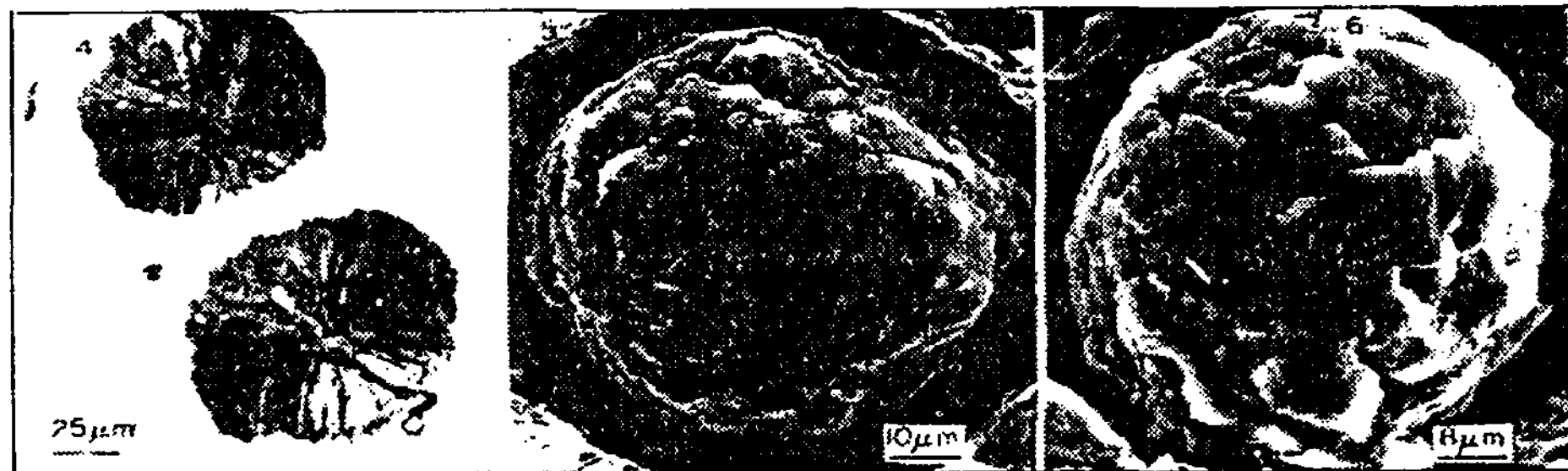
그림 7. 공정 셀 및 구상 흑연의 성장 모드.

탄소의 이동에 의하여 결정되고 전체 구동력은 확산 이동에 필요한 구동력으로 생각할 수 있다. 여기에서 흑연-오스테나이트 계면의 이동도는 흑연-액상 계면의 이동도와 비슷한 것으로 가정할 수 있다.

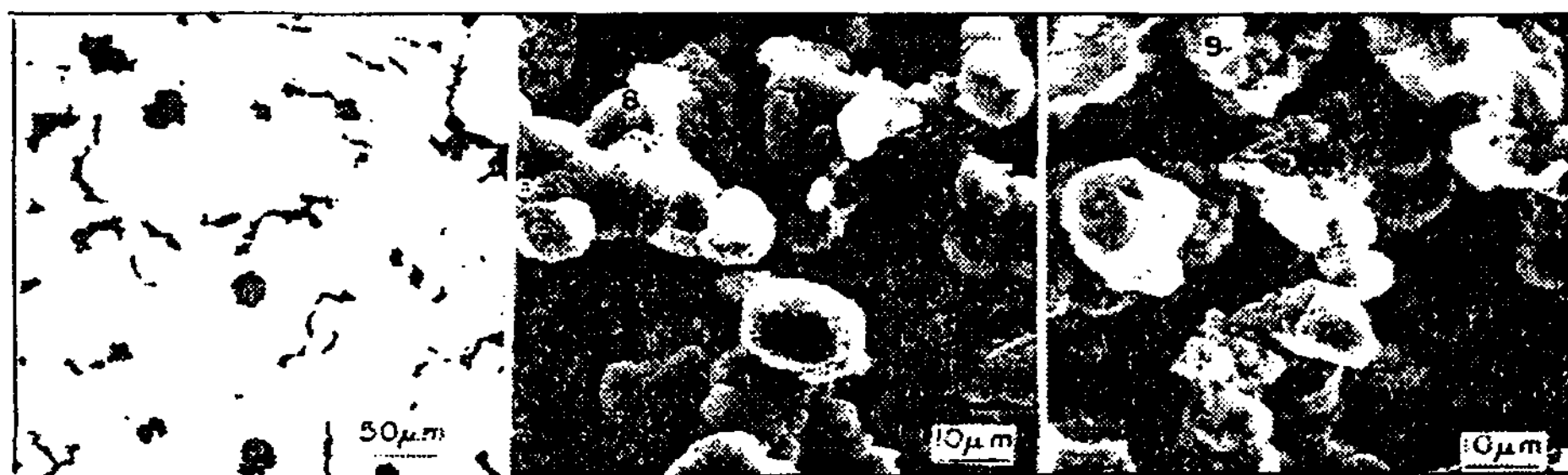
이와 같은 성장 모델은 구상 흑연 성장의 큰 과냉을 잘 설명하고 있으며 오스테나이트 껍질이 형성하기 전의 구상 흑연의 자유 성장 단계를 잘 설명하고 있다. 구상 흑연 성장의 초기 단계에는 계면 속도론이 우세하고, 성장의 후기 단계에서만 확산 율속 국부 평형 모델이 적용된다.



(a) Flake graphic unetched photomicrograph Flake graphite SEM photo Flake graphite within eutectic cell



(b) Spheroidal graphic unetched photomicrograph Spheroidal graphite, SEM photo Spheroidal graphite



(c) Compacted graphite, unetched photomicrograph Compacted graphite, SEM photo Compacted graphite

그림 8. 과도한 부식 후의 흑연의 광학 및 주사 전자 현미경 조직.

3. C. V. 흑연의 성장

C. V. 흑연은 과냉이 아주 작은 상태에서 성장하는 A 형태의 편상 흑연과 구상 흑연 주철의 구상 흑연 사이의 중간 형태의 한 형상을 가진다. 조직이 회주철과 구상 흑연 주철의 중간 형태이기 때문에 그 성질도 또한 이 두 가지 주철의 성질의 중간 정도이다. 따라서 C. V. 흑연 주철의 여러 가지 분야에 사용하고 있다. 일반적인 편상 흑연과 구상 흑연의 중간 형태의 과냉된 편상 흑연이나 코랄 흑연과 같은 다른 흑연 조직도 나타날 수 있다.

여러 가지 원소가 비교적 미량으로 존재할 때에 이와 같은 모양의 흑연에 영향을 미친다. 마그네슘, 세륨 및 칼슘과 같은 원소들은 흑연을 구상화시키기 위하여 첨가한다. 티타늄, 테루륨, 비소, 안티몬, 납, 비스머스 및 알루미늄과 같은 원소들은 구상화를 방해한

다. 황 및 산소와 같은 원소들은 위의 원소들과 결합하거나 흑연 성장 방향에 크게 영향을 미친다.

흑연의 이와 같은 형태는 성장을 기초로 명확하게 구분할 수 있다. 이미 언급한 바와 같이 편상 흑연은 흑연의 결정의 프리즘 면에 탄소 원자들이 달라붙어 성장하는 반면에 구상 흑연은 흑연 결정의 기저면 또는 c-면에 원자들이 달라붙어 성장한다. 이와 같은 성장 모드에 대한 지식은 성장을 조정하는 기구를 지적하고 각 조직을 얻는 데 필요한 정보를 습득하는 데 유익하다. 성장 거동의 주철의 성질에 미치는 영향은 매우 크다. 편상 흑연의 형태는 그림 7a에서 보이는 바와 같은 형태의 성장 모드로 각 공정 그레인 또는 공정 셀 내에서 서로 연결되어 있다. 편상 흑연과 오스테나이트는, 오스테나이트가 흑연보다 약간 앞서 나가는 상태에서, 두 상이 모두 액상과 접촉한 상태에서 coupled eutectic으로 성장한다. 따라서 공정 셀 내에서 서로 연결된 편상 흑연 조직이 생긴다. 그러나, 구상 흑연은 divorced eutectic으로 성장하고, 그림 7b에서 보이는 바와 같이 대부분의 성장이 일어나는 동안 액상으로 둘러싸여 있다. 따라서 각 구상 흑연 입자가 독립적으로 존재하는 조직이 형성한다.

C. V. 흑연은 서로 연결된 몇몇 부위가 보이고 더 균일하고 끝이 둥근 가지친 섬유상의 조직이 보이는 하지만 서로 연결되어 있다. 이와 같은 여러 가지의 흑연 형상을 구분하기 위하여 광학 현미경 조직뿐만 아니라 기지를 산으로 과도하게 부식시킨 후 주사전자 현미경으로 관찰하면 이해하는 데 도움이 된다. 이와 같은 목적으로 얻은 과도한 부식 후의 편상, 구

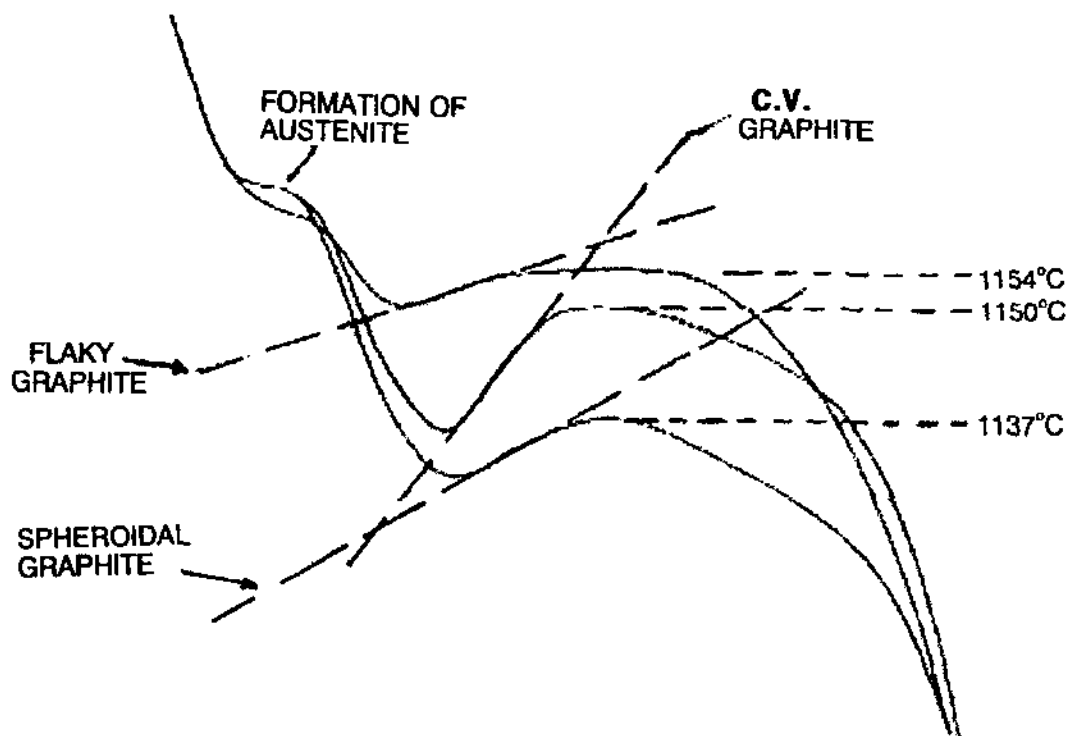
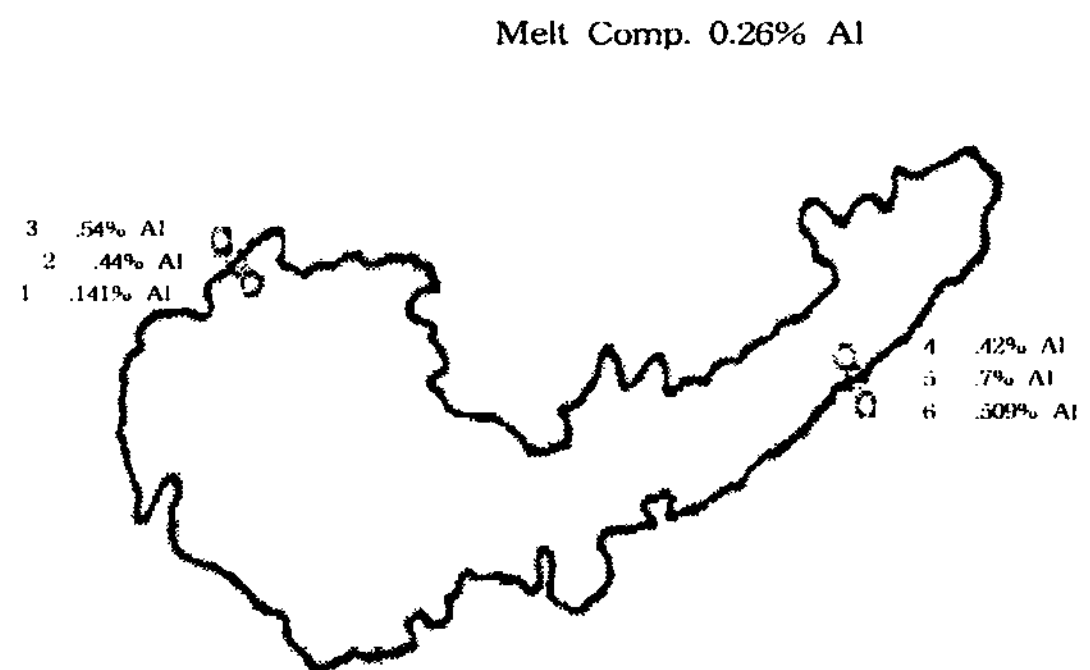


그림 9. 서로 다른 흑연 형태의 시편으로부터 얻은 냉각 곡선.



a) SEM photo of compacted graphite fluke examined in SEM-EDAX. 1300X.



b) Position of six points analyzed and results obtained for aluminum at these locaions.

그림 10. C. V. 흑연의 EDAX 분석 위치와 결과.

상 및 C. V. 흑연의 주사 전자 현미경 조직은 그림 8a, b 및 c에서 각각 보이는 바와 같다. 이 그림에서는 서로 연결된 편상 흑연, 독립적인 구상 흑연, 그리고 서로 연결된 C. V. 흑연을 보여 주고 있다. 그러나, 그림 8c에서 보이는 C. V. 흑연의 끝이 둥근 모양은 그림 8b에서 보이는 구상 흑연의 분열된 모양을 나타내고 있다. 이것은 C. V. 흑연은 탄소 원자들이 둥글어진 끝에서 기저면으로 달라붙고 프리즘면으로도 달라붙는다는 것을 가리킨다.

C. V. 흑연의 성장은 각 공정 셀의 중앙으로부터, 흑연이 액상과 접촉한 상태에서 성장한다. 그러나 흑연의 성장은 불안정하고 그 끝이 둥글게 된다. 이와 같은 거동은 마그네슘과 구상화 저해 원소들이 같이 존재하여 나타날 수 있다. 서로 다른 주철의 과냉의 양은 그림 9에서 보이는 바와 같다.

주철을 마그네슘으로 처리하고 알루미늄과 티타늄의 구상화 저해 원소를 첨가하여 C. V. 흑연으로 변환시킨 후 주사 전자 현미경의 EDAX 분석 설비로 연구한 바 있다. 그림 10a에서 보이는 바와 같이 편상 흑연 형태로 성장한 부분과 끝이 둥글어진 부분을 드러낸 C. V. 흑연을 선택하여 그림 10b에서 보이는 바와 같은 양쪽의 각각 세 위치에 대하여 EDAX 분석을 하였다.

알루미늄의 함량은 C. V. 주철의 편상 흑연 형태로 성장한 부분에서 흑연 내부에서 그리고 계면에서 그림 10b에서 보이는 바와 같이 더 높았다. 티타늄의 함량은 어느 부위에서나 크게 차이가 나지 않았으며 티타늄 carbonitride 형태로 존재하였다.

C. V. 흑연의 응고는 오스테나이트와 약한 cooperative eutectic의 형태로 편상 흑연과 동일한 방법으로 공정 셀 중심으로부터 성장한다. 편상 흑연 형태로 흑연이 성장하는 동안에는 흑연이 액상과 접촉하고

있고, 편상 흑연 형태의 성장이 끝이 둥글어진 상태에서 끝나면 오스테나이트로 둘러싸인다. 초기의 편상 흑연의 형태로 성장할 때에는 흑연 주조의 프리즘면에 탄소가 달라 성장하다가 둥글어진 흑연 끝에서 기저면의 성장 형태로 바뀐다. 알루미늄을 마그네슘으로 처리한 액상에 첨가하였을 때에는 흑연의 둥글어진 끝 부분보다는 편상 흑연쪽의 계면에 모여서 구상화 저해 원소로 작용한다.

참 고 문 헌

- [1] C. F. Walton and T. J. Opar., ed : "Iron Castings Handbook", Iron Castings Society, (1981).
- [2] J. F. Wallace : "Effects of Minor Elements on the Structure of Cast Irons", Trans. AFS, Hoyt Memorial Lecture, (1975).
- [3] J. F. Wallace : "Mechanism of Graphite Formation in Iron-Silicon-Carbon Alloys", Ann Arbor Press, (1967).
- [4] V. Submananian, D. Ghosh, D. A. R. Kay and Purdy : "Graphite Morphology Control in Cast Iron", Iron and Steel Magazine, pp. 18-25 (March, 1980).
- [5] J. Y. Su, C. T. Chow and J. F. Wallace : "Solidification Behaviour of Compacted Graphite", Trans. AFS, 90, pp. 565-574 (1982).
- [6] E. R. Evans, J. V. Dawson and M. J. Lalich : "Compacted Graphite Cast Irons and Their Production by a Single Alloy Adchition", Trans. AFS, 84, p. 216 (1976).
- [7] P. F. Wieser, C. E. Bates and J. F. Wallace : "Mechanism of Graphite Formation in Fe-Si-C Alloys", Malleable Founders Society, (1967).
- [8] P. C. Lin and C. R. Loper, Jr. : "Scanning Electron Microscope study of the Graphite Morphology in Cast Iron", Scanning Electron Microscopy, pp. 407-418 (1980).
- [9] G. F. Sergeant and E. R. Evans : "The Production and Properties of Compacted Graphite Irons", The British Foundryman, 71 (Part 5), pp. 115-124 (May, 1978).