

|||||  
技術講座  
|||||

## 주철의 응고(IV) - 주철의 접종(1) -

권해욱 · Carl R. Loper, Jr. \*

### Solidification of Cast Irons (IV) - Inoculation of Cast Iron, Part I -

Hae-Wook Kwon · Carl R. Loper, Jr. \*

#### 1. 서 언

주철 용탕을 주형에 주입하기 전에 접종 처리를 하는 것은 그 역사가 오래되었으나 1930년대 후기에 와서야 그 중요성을 인식하게 되었다. 그 시기에 주철 용탕에 흑연이나 어떤 페로실리콘 합금을 첨가하면 주철의 칠 깊이가 감소한다는 사실이 잘 알려졌다. 주철에 칠이 형성하는 경향을 현저하게 감소시키고, 따라서 주물의 구석 부분에 칠과 경도가 비정상적으로 높은 부분이 생기지 않게 할뿐만 아니라 주철의 인장 강도를 증가시키는 데에 특정한 접종제가 그렇게 많이 필요하지는 않았다. 이와 같은 접종 효과는 핵을 용탕에 첨가하여서 응고가 일어나는 동안 흑연이 잘 형성하였다는 사실 때문이었을 것이다.

그 시기에는 접종제가 효과를 나타내는 기구가 주물 기술자들에게 잘 알려지지 않았다. 그러나 시행착오를 통하여 몇 가지의 페로실리콘 합금과 몇 가지의 탄소 제품은 접종제로서 효과가 없다는 것을 알게 되었다. 즉, 이와 같은 합금이나 제품은 칠을 감소시키지 않았으며 인장 강도를 개선시키지는 못하였다. 더욱이, 몇 가지 종류의 효과적인 접종제는 불결한(dirty) 것으로 나타났다. 즉, 그것들은 용탕 위에 바람직하지 못한 슬래그가 형성하게 하고 형성한 슬래그는 용탕과 함께 주형 속으로 유입된다. 더군다나, 이 접종제의 효과는 시간에 따라 달라진다. 즉 접종제의 효과는 시간에 따라 떨어지며 레이들의 크기가 작을수록 그리

고 용탕의 온도가 높을수록 그 효과가 떨어지는 속도는 더 크다.

#### 2. 주철의 접종제

접종 처리란 공정 응고에 대한 핵생성 자리의 수를 증가시킴으로써 주철의 미세 조직과 성질을 조절하는 과정이다. 오스테나이트-흑연 공정의 응고가 일어나게 하면 주철의 과냉이 감소하고 더 바람직한 모양의 흑연이 형성한다. 효과적인 접종제는 응고가 일어나는 동안 가능한 높은 온도에서 오스테나이트-흑연 공정 반응을 일어나게 하는 기구를 마련한다.

다음과 같은 세 가지 집단의 물질이 주철의 효과적인 접종제로 작용한다: 규화 칼슘(calcium silicide), 선택된 몇 가지의 페로실리콘 합금 및 흑연

#### 3. 주철의 응고

접종은 응고 과정을 변화시켜 미세 조직을 달라지게 하고 따라서 성질을 달라지게 한다. 이와 같은 효과는 여러 탄소 당량의 회주철에 대한 그림 1에서 보이는 바와 같다. 접종제가 회주철의 인장 강도를 증가시키는 효과는 탄소 당량이 더 낮은 조성에서 더 현저하다. 접종 처리가 어떻게 인장 강도를 증가시키는지 하는 것을 다음과 같은 2가지 종류의 주철을 예를 들어 설명하고자 한다: 아공정 회주철(탄소 당량이 4.3

영남대학교 공과대학(College of Eng., Yeungnam University)

\*Professor, University of Wisconsin-Madison, U.S.A.

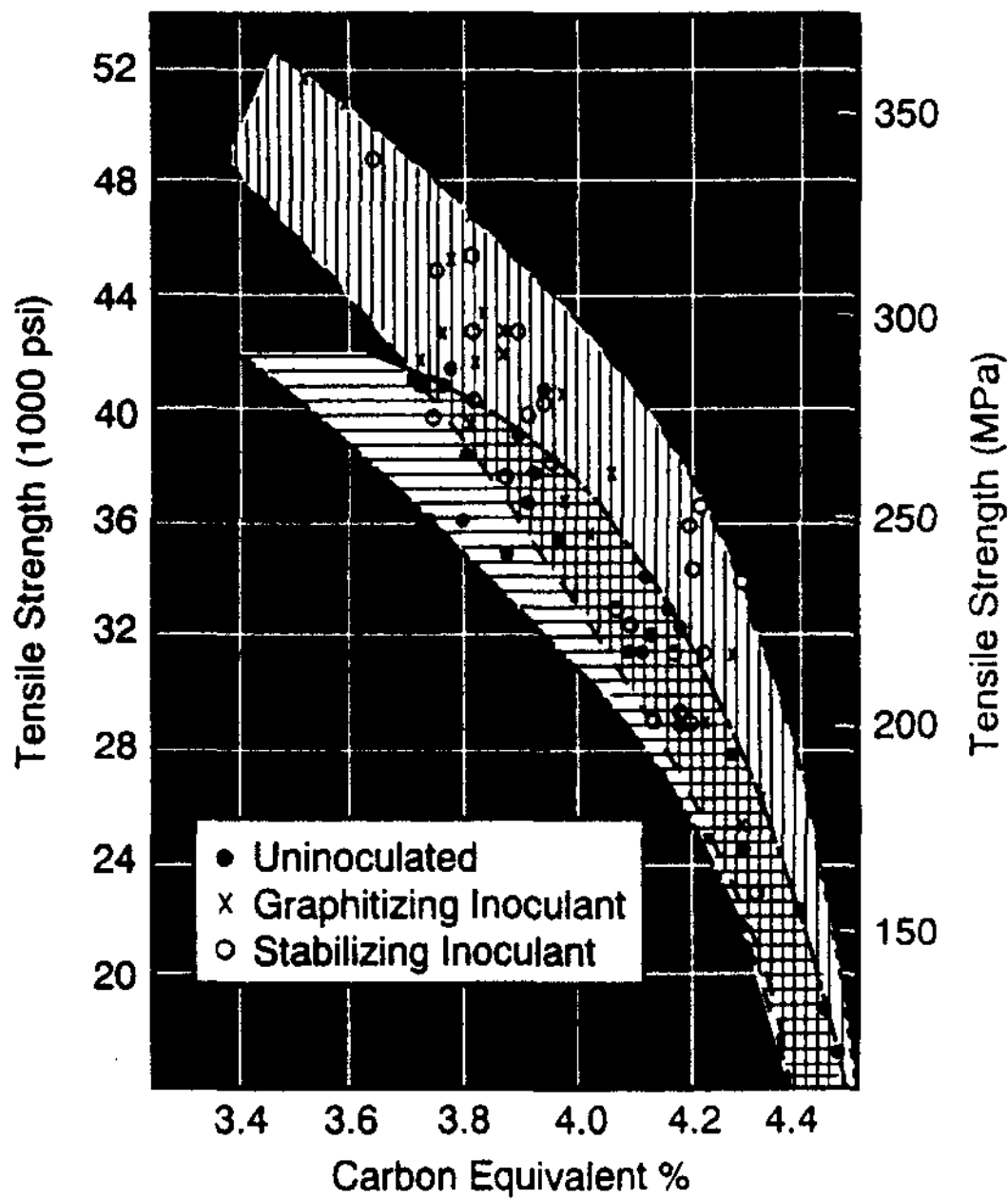


그림 1. 여러 가지 탄소 당량의 지름 30 mm인 봉재로 주조한 여러 가지 회주철의 인장강.

%보다 작은), 그리고 과공정 구상 흑연 주철(탄소 당량이 4.3 %보다 큰)

3.1 아공정 회주철

응고 중 제일 먼저 형성하는 고체는 초정 오스테나이트이다. 이 오스테나이트의 양은 온도가 떨어질수

록 그리고 탄소 당량이 낮을수록 증가한다. 오스테나이트가 형성함에 따라 액상 내의 탄소와 규소의 함량은 온도가 공정 응고가 일어날 때까지 증가한다. 그러나, 일반적으로 금속은 사용한 장입물의 종류, 용해 및 용탕 처리 과정, 용탕의 화학적 조성, 주입온도, 응고시 냉각 속도 그리고 주물의 벽 두께 등에 따라서 달라지는 양만큼 공정 온도 아래로 냉각된다. 과냉이 작을 때에는, 그림 2에서 보이는 바와 같이, A 형태의 흑연(균일한 분포를 하며 무작위의 방향성을 가짐)이 형성한다. 과냉이 증가하면 B 형태의 흑연(중심부에 미세한 흑연이 존재하는 장미상), 과냉이 더 커지면 초정 오스테나이트의 양이 증가하고 D 형태의 공정 흑연이 형성한다(덴드라이트 형태의 편석). 과냉이 훨씬 더 커지면 흑연이 없어지거나 오스테나이트와 철 탄화물 형태의 공정이 형성한다.

이와 같은 효과는 그림 3에서 보이는 바와 같은 썸기형 시험편(wedge test piece)의 응고를 시험해 보면 가장 분명하게 알 수 있다. 여기에서 철의 화학적인 조성은 균일하다. 그러나 응고시 냉각 속도는 시험편의 기하학적인 모양에 의하여 영향을 받으며 썸기형 시험편의 끝 부분 근처에서는 냉각 속도가 더 빠를 것이고 이 부분에서 멀어질수록 냉각 속도가 더 늦어진다. 주어진 주철과 썸기의 적당한 기하학적인 모양에 대하여, 썸기의 몸체 내에 A 형태의 흑연이 형성한다. 그러나, 썸기의 끝 부분에 가까와짐에 따라 맨 먼저

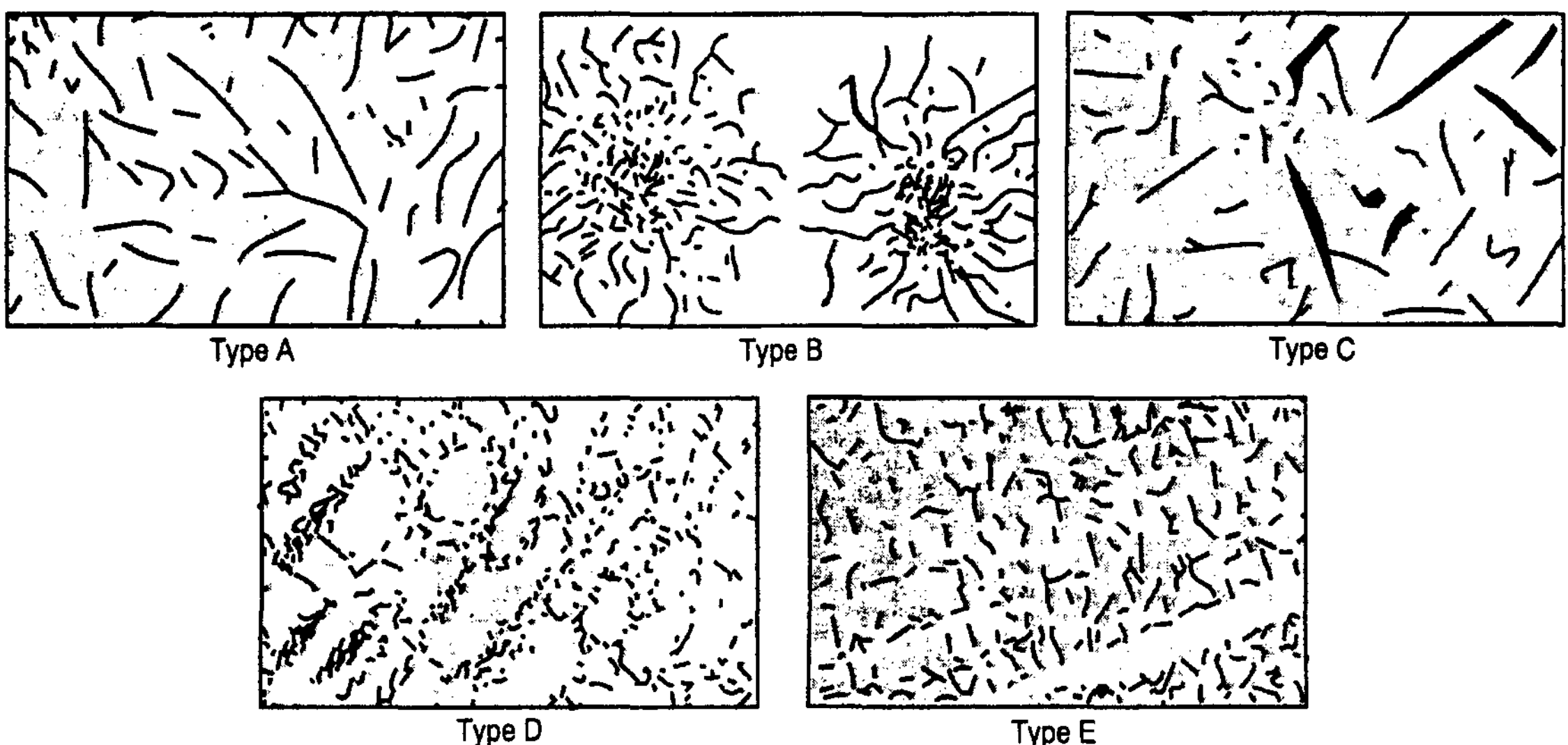


그림 2. 회주철 내의 다섯 가지 형태의 편상 흑연.

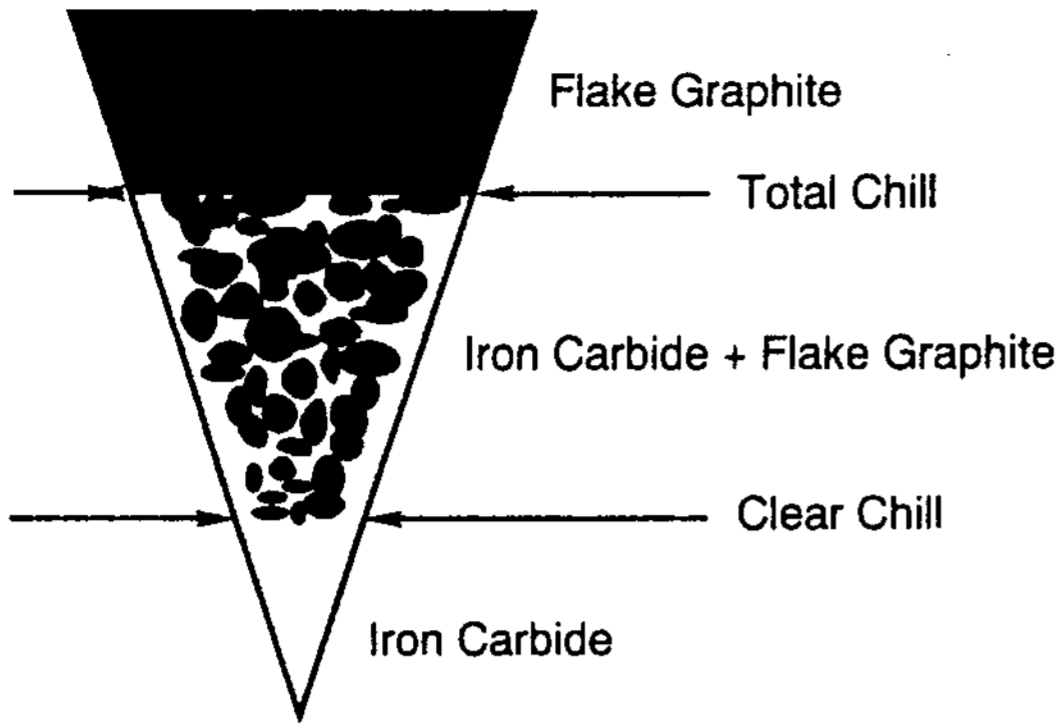


그림 3. 응고 중 냉각 속도 차이의 결과로 나타나는 편상 흑연의 모양의 변화와 탄화물 형성을 보여주는 파괴한 썰기형 칠 시험편의 개략도.

B 형태의 흑연이 형성하고 그 다음에 D 형태 그리고 썰기형 시험편의 끝 부분에서는 철 탄화물이 형성한다.

접종제는 더 높은 온도에서 공정 응고를 일어나게 한다. 따라서 A 형태의 흑연 형성을 촉진하고 탄화물 형성을 억제한다. 또는 주어진 썰기형 시험편에 대하여 접종제는 철 탄화물(칠)의 양, 철 탄화물과 D 형태의 흑연의 혼합물(mottled)의 양을 감소시키고 A 형태의 흑연의 양을 증가시킨다. 접종 이외의 다른 인자들도 편상 흑연의 형성과 또는 칠 형성에 영향을 미친다. 용탕의 화학적 조성과 더불어 다음과 같은 인자들이 있다: 온도, 레이드 조건, 주입 방법, 주입 속도, 사용한 주형 재료, 채택한 게이팅 계, 주물의 벽 두께 등. 효과적인 접종 처리는 일반적인 주조 조건에서 이와 같은 변수의 영향을 최소화하는 방법이다. 그러나 이와 같이 나열한 변수를 조절할 필요성을 부정하는 것이 아니다.

### 3.2 과공정 구상 흑연 주철

비록 대부분의 회주철은 아공정 조성이라는 하지만, 대부분의 구상 흑연 주철은 약간 과공정 조성이다. 황의 함량이 낮은 주철 용탕을 마그네슘으로 처리하면 구의 모양으로 흑연이 형성한다. 용탕이 냉각함에 따라 액상 내에서 구상 흑연이 형성한다. 그리고 온도가 오스테나이트-흑연 공정이 형성하는 온도에 도달하면 오스테나이트가 구상 흑연을 둘러싸는 형태로 공정 응고가 일어난다. 구상 흑연은 공정 응고가 일어나는 동안 가장 높은 온도에서 형성한다. 반면에 비구상 형태의 흑연(그리고 탄화물)은 더 낮은 온도에서

형성한다. 적당한 수의 구상 흑연이 형성한 상태에서, 구상 흑연들 사이의 공간에서 철 탄화물이 형성하거나 또는 비구상 흑연이 형성하는 경향이 있다. 오스테나이트로 둘러싸인 구상 흑연의 셀이 커짐에 따라, 응고 성장 속도는 주위의 오스테나이트 내에서의 탄소의 확산이 어렵기 때문에 감소한다. 잔류 액상 내의 마그네슘 함량이 비구상 흑연의 핵생성과 성장을 억제하는 데 불충분하면, 그와 같은 모양의 흑연이 셀 사이의 영역에서 생길 수 있다. 그리고, 만약 마그네슘이 충분히 존재하면, 이와 같은 셀 사이의 공간 영역에서 탄화물 공정(셀간 탄화물)의 형태로 응고가 일어난다.

충분한 마그네슘으로 처리한 용탕에 접종제를 첨가하면 구상 흑연의 수(nodule count)와 구상화율(nodularity)이 증가하고, 따라서 철 탄화물이나 비구상 흑연이 형성하는 경향이 줄어든다. 이와 같은 접종제는 마그네슘 처리를 하기 전에, 마그네슘 처리와 동시에 혹은 마그네슘 처리를 한 후(post inoculation)에 첨가할 때에 효과적이다.

### 3.3 공정 셀

회주철 뿐만 아니라 구상 흑연 주철에서 공정은 오스테나이트와 흑연이 형성하는 형태로 응고가 일어나며, 이 상들은 주위의 액상 속으로 그 직경이 증가하여 성장하는 오스테나이트와 흑연의 셀 형태로 형성한다.

회주철에서는 편상 흑연과 오스테나이트가 모두 액상과 접촉한 상태에서 공정 셀이 성장한다. 응고가 진

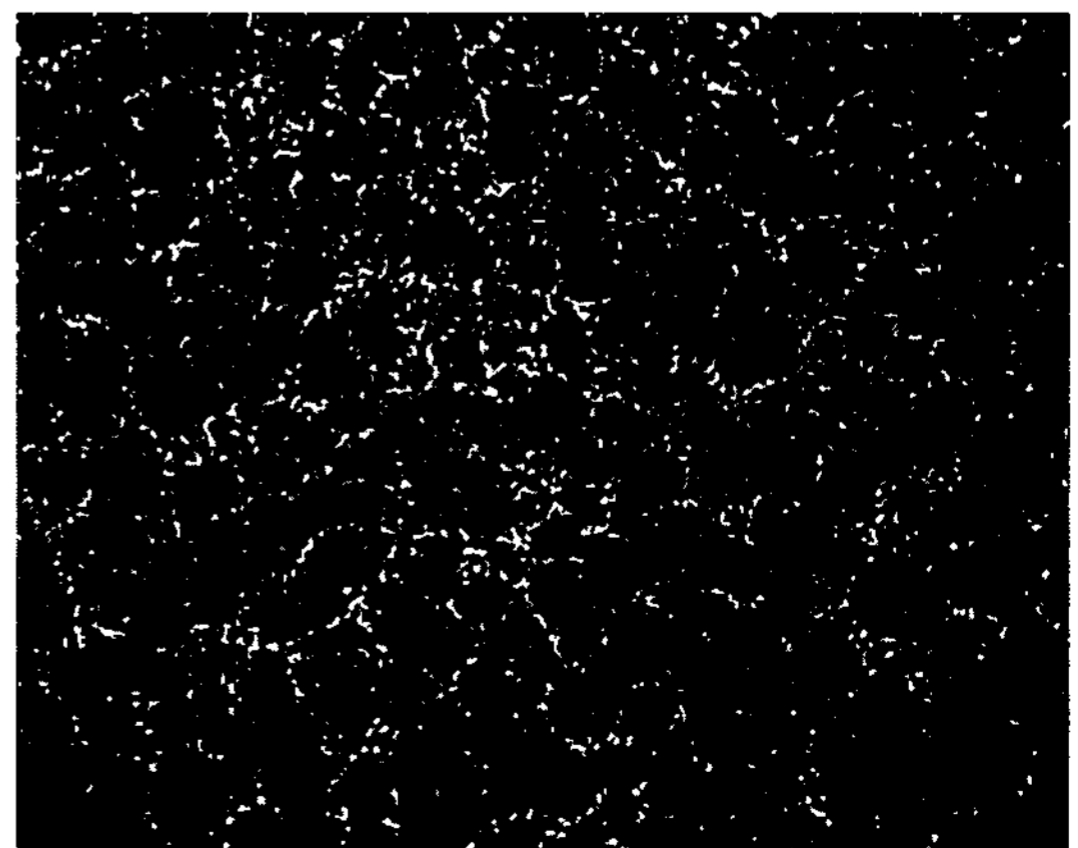


그림 4. 스테드 시약으로 부식시킨 시험 봉의 공정 셀 조직, 20X.

표 1. 주철 중 조직에 미치는 원소의 영향

원 소	응고 중 영향	공석 변태 중 영향
알루미늄	강력한 흑연화제	페라이트와 흑연의 형성을 조장함
안티몬	일반적으로 사용하는 양으로는 영향이 적음	강력한 펄라이트 안정화제
비스머스	탄화물 촉진제, 탄화물 형성제는 아님	매우 온전한 펄라이트 안정화제
0.15 % 이상의 보론	강력한 흑연화제	흑연 형성을 조장함
0.15 % 미만의 보론	탄화물 안정화제	강력한 펄라이트 형성제
크롬	강력한 탄화물 형성제 매우 안정하고 복잡한 탄화물 형성	강력한 펄라이트 형성제
구리	온전한 흑연화제	펄라이트 형성을 촉진함
망간	온전한 탄화물 형성제	펄라이트 형성제
몰리브덴	온전한 탄화물 형성제	강력한 펄라이트 형성제
니켈	흑연화제	온전한 펄라이트 형성제
규소	강력한 흑연화제	페라이트와 흑연 형성을 조장함
테루륨	강력한 탄화물 촉진제 탄화물 형성제는 아님.	아주 온전한 펄라이트 안정화제
주석	보통 사용량의 범위에서는 효과가 적음.	강력한 펄라이트 유지제(retainer)
0.25 %미만의 티타늄	흑연화제	흑연 형성을 촉진함
바나듐	강력한 탄화물 형성제	강력한 펄라이트 형성제

행함에 따라서, 어떤 원소들(예를 들면, 인)은 액상 내에 농축되어서 맨 나중에 응고하는 액상 내에서 이와 같은 원소의 농도가 높다. 적당한 부식 방법으로 이와 같은 원소의 편석을 드러나게 할 수 있다. 회주철 내의 공정 셀이 존재하는 예는 그림 4에서 보이는 바와 같다.

접종 처리를 하였을 때에 형성하는 셀의 수가 증가하는 결과가 나타날 때에는 이와 같은 효과는 공정 셀 수(eutectic cell count)를 결정하여서 쉽게 관찰할 수 있다. 각 공정 셀은 오스테나이트-흑연 공정의 형성이 일어나게 하는 각 공정의 핵생성 현상의 결과로 형성한다. 결과적으로, 주어진 공정 셀 내에 존재하는 모든 흑연은 서로 연결되어 있다. 회주철의 인장 특성은 공정의 셀 크기에 관계가 있다는 사실은 놀라운 일이 아니다. 즉 공정 셀 크기가 작을수록 인장 강도가 더 높다.

구상 흑연 주철에서는 공정 셀은 오스테나이트로 둘러싸인 각각의 구상 흑연으로 되어 있다. 각 구상 흑연은 독립적으로 핵생성하여야 하며 효과적인 접종제는 구상 흑연의 중심에서 관찰할 수 있다. 접종제의 효과가 클수록 구상 흑연의 수가 증가한다.

회주철의 경우와 마찬가지로, 구상 흑연 주철의 응고 시에도 어떤 원소들의 편석이 일어나서 맨 나중에 응고하는 공정 조성의 액상 내에 그와 같은 원소들의

농도가 높다. 앞에서 지적한 바와 같이, 이와 같은 셀 사이의 공간 영역에서는 그와 같은 편석의 결과로 탄화물이나 비구상 흑연이 형성하는 경향이 더 크다.

#### 4. 화학적 조성의 영향

상업적으로 사용하는 주철 내에는 철, 탄소 및 규소와 더불어 여러 가지의 합금 원소가 존재한다. 이와 같은 원소는 합금 원소로 의도적으로 첨가한 것도 있고 우연히 잔류 원소로 존재하는 경우도 있다. 그러나, 이와 같은 모든 원소는 응고가 일어나는 동안뿐만 아니라 고체 상태의 변태가 일어나서 기지 조직이 형성하는 동안에도 형성하는 미세 조직에 어느 정도 영향을 미칠 것이다. 철과 탄소의 결합을 촉진하는 원소는 탄화물 형성을 촉진할 것이며 이와 같은 원소를 탄화물 안정화 원소라 한다. 그리고 탄소와 탄소 사이의 결합을 촉진하는 원소는 흑연의 형성을 조장한다(흑연화제). 이와 같은 효과의 잠재적 능력은 미세 조직 내의 특정한 영역에서의 이와 같은 원소의 농도 뿐만 아니라 특정한 원소의 종류에 따라서 달라진다. 주철 내에서 흑연화 조장 원소 및 탄화물 안정화 원소는 표 1에서 보이는 바와 같다. 이와 같은 원소들의 응고 조직에 미치는 영향은 기지 조직에 미치는 영향과는 다르다는 것은 명백하다.