

주철 용탕 중 접종제의 페이딩

권해욱[†]

영남대학교 공과대학 신소재공학부

Fading of Inoculants in Cast Iron Melt

Hae-Wook Kwon[†]

School of Mat. Sci. & Eng., Yeungnam Univ., Gyeongsan, 712-749, Korea

1. 서 언

회주철과 구상흑연주철의 주조시, 비록 회주철의 경우 또한 인장 강도를 증가시키고 흑연조직의 균일성을 향상시키기 위하여 접종한다 하더라도, 기본적으로 탄화물이 없는 주조품을 생산하기 위하여 접종처리를 한다. 접종 효과는 접종제를 첨가하여 나타나는 주철의 화학 조성의 변화로 나타나는 것보다 훨씬 더 크며 공정의 성장이 일어날 수 있는 새로운 또는 부가 핵을 제공한다. 이와 같은 부가 핵은 응고가 일어나는 동안 과냉을 감소시킨다. 접종 효과는 보통 접종제를 첨가한 직후에 가장 크며 오래 가지 않는다. 주철 용탕의 화학 조성에 있어서 현저한 변화 없이 일어나는 접종 효과의 손실을 페이딩이라 한다.

비록 접종 공정은 주물 공장마다 다르고 페이딩 효과를 피하기 위하여 후접종을 하는 경향이 증가하고 있지만, 용탕을 노에서 출탕하는 동안 또는 출탕한 직후에 또는 마그네슘으로 처리한 후에 레들에 첨가하는 방법을 널리 쓰고 있다. 접종제의 조성법과 접종 방법에 따라 접종제의 초기 접종 잠재력과 페이딩 거동이 달라진다[1-5]. 또한 접종한 후 처음 5~10 분 내에는 페이딩이 거의 일어나지 않는다고 믿는 것과 몇 가지 접종제는 첨가한 몇 분 뒤에 최대 효과가 나타난다고 믿는 것과 같은 잘못된 개념도 있다.

접종제를 사용하는 조건 하에서, 접종제로 사용된 물질의 잠재력과 그 효과가 페이딩되는 속도에 관한 신뢰할 수 있는 정보를 얻을 수 있어야 한다는 것이 중요하다. 그와 같은 정보로부터 알맞은 접종제를 선택하기 위한 안내를 받을 수 있기 때문에 주물 기술자는 그런 정보를 활용할 수 있을 뿐만 아니라 활용하여야 한다. 레들 접종을 한 직후나 후 접종 방법을 적용하여 매우 빠르게 용탕을 주입할 수 있는 경우에는 비록 접종제의 효과가 빠르게 페이딩 될 수 있다 하더라도 가장 강력한 접종 효과를 얻을 필요가 있다. 다른 경우에는 용탕의 질 발생 특성에 있어서 나쁜 변화 없이 용탕을 주조하는데 시간 범위를 어느 정도 허용할 수 있을 정도로 천천히 페이딩이

일어나는, 비교적 잠재력이 작은 접종제를 사용하는 것이 더 바람직할 수도 있다.

이 자료에서는 접종제의 페이딩 효과에 관한 현재의 지식과 회주철 및 구상 흑연 주철의 접종제로 사용되는 몇 가지 물질의 페이딩 특성에 관한 지식을 고찰하였다.

2. 페이딩의 효과

Morroh가 철이 형성하는 경향에 관련하여 주철의 응고에 관하여 서술한 바 있다[6]. 이 자료에서는 페이딩으로부터 영향을 받을 수 있는 응고 특성만을 고려하였다.

흑연과 오스테나이트로 구성되는 안정한 회주철 공정이나 탄화철과 오스테나이트로 구성되는 준안정 백주철 공정의 두 가지 서로 다른 주철의 응고 형태는 Fig. 1에서 보이는 바와 같은 2중 상태로 나타낼 수 있다. 합금 원소를 첨가하지 않은 회주철의 경우 비록 백주철 공정 온도와 회주철 공정 온도 차이는 주철의 화학 조성 변화에 달라지기는 하지만 전자가 후자보다 항상 낮다. 두 가지 가장 중요한 효과는 규소 및 크롬

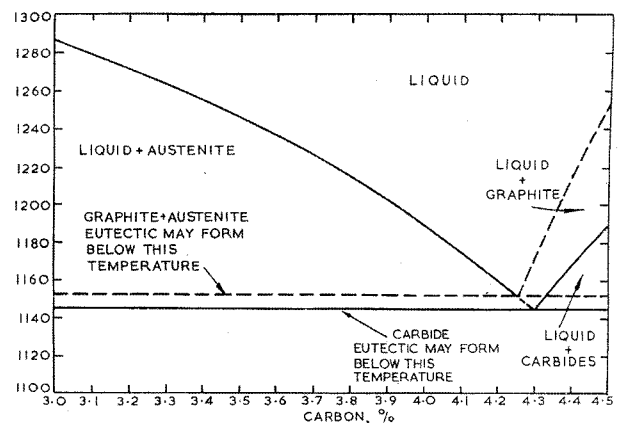


Fig. 1. Iron-carbon "double diagram" for cast iron.

[†]E-mail : hwkwon@yu.ac.kr

"본 기술자료는 2005년도 한국주조공학회 춘계 학술발표 및 기술강연대회에서 발표된 내용임."

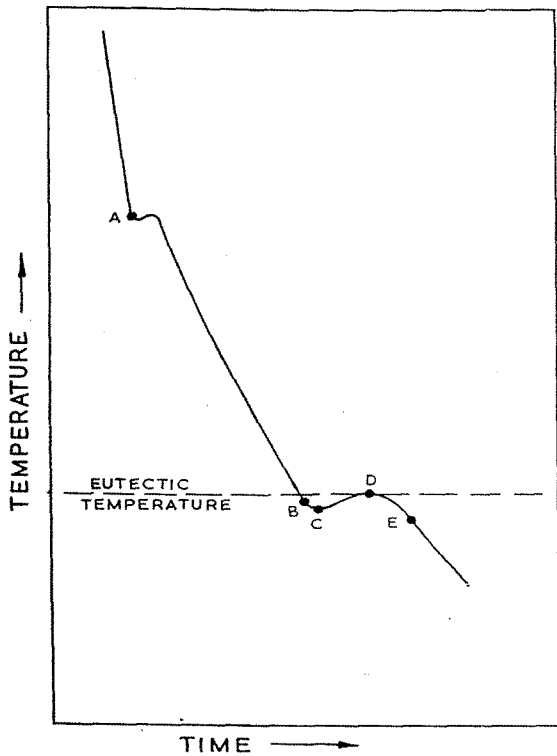


Fig. 2. Cooling curve for a grey iron.

함량에 의한 것이다. 규소 함량이 증가하면 두 가지 공정 온도의 차이는 커지고 따라서 탄화물이 형성하는 경향이 작아진다. 그러나 크롬 함량이 증가하면 이 온도 차이는 작아지고 따라서 탄화물 형성이 촉진된다. 주철 용탕이 냉각됨에 따라, 열분석 곡선(Fig. 2)에서 아공정 주철에서는 오스테나이트 덴드라이트의 형성 그리고 과공정 주철에서는 키쉬 흑연의 형성을 나타내는 액상선 온도에서 열적 정지선(thermal arrest, A)이 나타난다. 액상이 회주철 공정 온도로 또는 바로 그 아래의 온도로 냉각되는 동안 오스테나이트 덴드라이트는 계속 성장한다. 회주철 공정 온도 또는 바로 그 아래의 온도에서 흑연/오스테나이트 공정이 핵생성하여 성장할 수 있다. 그러나 공정의 응고 잠열만큼 방출되는 열이 주형으로의 열방출 속도를 바로 증가하는, 공정의 성장이 일어나는, 중심(핵)의 수와 성장 속도가 될 때까지 액상의 온도는 계속하여 떨어진다. 이 점(C)에서 과냉은 정지되고 응고가 일어남에 따라 온도가 약간 상승하는 재취(recalescence)가 일어난 다음 대체로 일정한 온도(D)에서 응고가 일어난다. 공정 셀이 서로 만나서 성장이 제한됨에 따라 응고가 끝나기(D) 전에 온도는 다시 떨어진다.

공정 응고가 일어나는 동안 백주철이 형성하기 위해서는 액상의 온도가 백주철 공정 온도 아래로 떨어질 수 있도록 충분히 과냉되어야 한다. 회주철 공정이 백주철 공정 온도 아래에서조차 핵생성하여 성장할 수 있기 때문에, 또한 백주철 공정의 핵생성과 성장을 선호하는 조건이 되어야 한다.

공정 응고가 일어나는 동안 과냉의 크기를 결정하는 두 가지 중요한 인자는 회주철 공정이 성장할 수 있는 핵의 수와 냉각 속도이다. 접중제의 페이딩은 성장할 수 있는 핵의 수

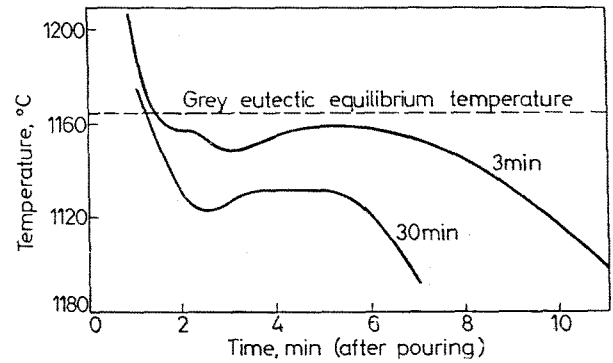


Fig. 3. Cooling curves 3 and 30 minutes after the inoculation of a ductile iron with 0.57% of a foundry grade ferro-silicon.

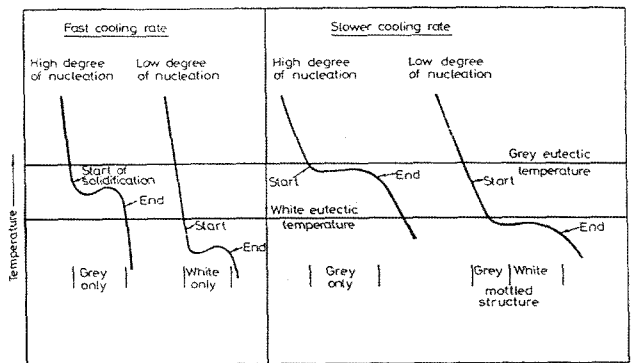


Fig. 4. Influence of cooling rate and degree of inoculation on structure.

감소와 과냉의 증가(Fig. 3)로 나타난다. 냉각 속도를 증가시키는 것 또한 과냉을 증가시킨다. 이와 같은 것들이 복합적으로 작용하여 페이딩의 주된 효과로 특히 두께가 얇은 부분과 모서리에 철이 형성하는 것을 촉진시킨다. 냉각 속도가 더 늦은 두꺼운 단면에서는 과냉을 증가시키는 페이딩의 영향은 감소할 것이다. 그러나 일부 회주철과 일부 백주철 응고가 일어나는 모틀(mottle)이 나타날 것이다. 주철의 응고가 일어나는 동안 형성하는 조직에 미치는 냉각 속도와 핵생성 정도의 영향은 Fig. 4에서 보이는 바와 같다.

회주철 공정 셀 내의 편상 흑연의 형태는 셀의 성장 속도에 의하여 결정된다. 잘 접중된 주철 용탕에서 처럼 많은 수의 핵이 생성하면, 과냉이 비교적 적고 각 셀 내에서의 성장 속도가 상대적으로 느리다. 이 경우에는 A 형태의 흑연이 형성한다. 페이딩의 결과로 공정 셀의 수가 감소하고 과냉이 증가하면 각 공정 셀의 성장 속도는 증가한다. 성장 속도가 증가하면 편상 흑연이 더 미세하고 가지가 더 빈번하게 형성하며 과냉이 과도하게 증가하면 때때로 페라이트와 함께 D 형태의 흑연이 형성한다.

구상 흑연 주철에서 접중제의 페이딩은 또한 공정이 성장하는 중심의 수가 감소하게 한다. 핵생성의 정도가 낮을수록, 공정 응고가 일어나는 동안 구상 흑연의 수가 감소하고 과냉이 증가하여 철이 발생할 수도 있다. 구상 흑연의 수가 감소와 함께 마그네슘의 손실이 있다 하더라도, 마그네슘 함량이 너무

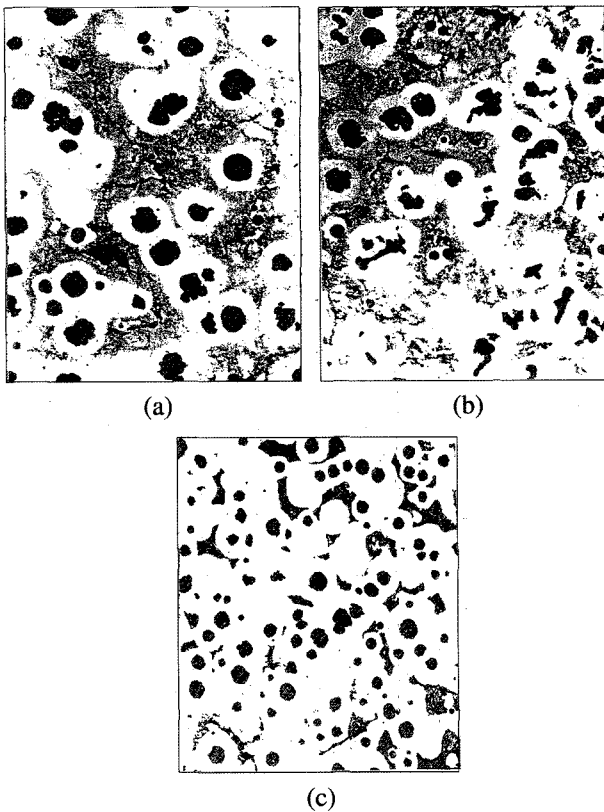


Fig. 5. Structure of 1.75 in square bars of ductile irons showing the effect of fading of inoculants upon nodule number and shape. Etched 4% picral, 67X. (a) cast 2.75 minutes after inoculation (b) cast 20 minutes after inoculation (c) re-inoculation shortly before casting but 20 minutes after initial inoculation

낮지 않은 조건에서, 재접종하면 구상 흑연의 수가 증가하고 구상 흑연을 원래의 모양을 회복할 것이다.

따라서 페이딩의 주된 효과는 다음과 같다 :

1. 공정 용도가 일어나는 동안 더 크게 과냉되게 하고 회주철 및 구상 흑연 주철 특히 단 면이 얇은 부분에서 철이 형성하는 경향을 증가시킨다.
2. 구상 흑연 주철에서 구상 흑연의 수를 감소시키고 구상 흑연의 모양을 퇴화되게 한다. 만약 모양의 퇴화 현상이 충분히 심하면 주조품의 기계적 성질에 영향을 미칠 수 있다.
3. 회주철에서 성장하는 공결 셀의 수가 감소하는 것은 주조품 내의 흑연의 크기 분포를 균일하지 않게 하고, 형성하는 흑연이 더 미세하고 가지의 빈도가 증가하는 경향이 있게 하여 초기 접종 처리된 용탕으로부터 얻을 수 있는 기계적 성질에 비하여 기계적 성질이 약간 감소하게 하는 결과로 나타난다.

3. 페이딩의 평가

접종제의 잠재력과 페이딩 효과를 평가하기 위한 방법으로는 3가지가 있다 ;

- 여러 가지 냉각 속도에서의 과냉 측정,
- 철 시험 및 경도 측정,

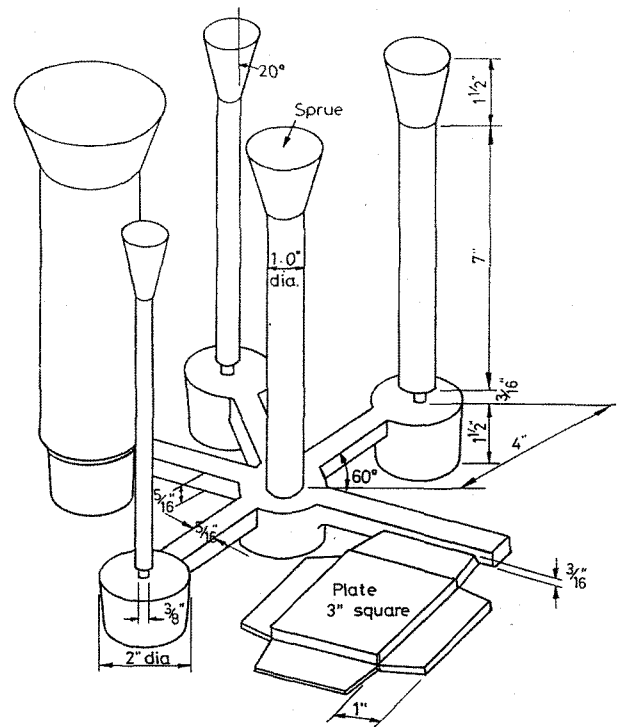


Fig. 6. BCIRA inoculation test casting bar diameters: (0.6, 0.875, 1.2 and 2.1 in)

	flange thickness on plate grey irons and well	plate thickness
inoculated ductile	0.08, 0.12 and 0.16 in (2.0), (3.0) (4.1 mm)	0.25 in (6.4 mm)
irons Other ductile irons	0.25, 0.30 and 0.40 in (6.4) (7.6) (10.2 mm)	0.25 in (6.4 mm)

용도가 일어나는 동안 형성한 공결 셀이나 구상 흑연의 수 측정,

이와 같은 방법들은 서로 보완적이다. 첫 번째 방법은 다른 두 가지와 결합될 때 장점이 있다. 그 방법은 접종제가 효과를 나타내는 것을 잘 이해하게 한다. 생산 현장에서 열분석하는 방법은 이와 같은 범주의 방법으로서 널리 채택되고 있다.

서로 다른 크기의 단면에서 공정 셀이나 구상 흑연의 수를 측정함과 동시에 생산 현장에서 철 시험을 하거나 경도를 측정하는 방법이 널리 쓰이고 있다. BCIRA에서 개발된 시험 주조품은 Fig. 6에서 보이는 바와 같으며, 이와 같은 목적을 위하여 편리하다. 철 발생 경향과 공정 셀 또는 구상 흑연의 수를 측정하여 접종제의 거동을 비교하기 위해서는 반드시 동일한 속도로 냉각되는 비슷한 단면에 대하여 시험하여야 한다. 공정 셀이나 구상 흑연의 수를 측정하기 위한 단면은 시험 주조품의 비슷한 위치에서 절단하여 얻어야 한다. 이와 같은 목적으로 사용되는 모든 시험 주조품은 비슷한 형태의 주형을 사용하여 동일한 온도에서 주입하여야 한다. 공정 셀이나 구상 흑연의 수를 측정하기 위한 단면은 시험 주조품의 비슷한 위치를 절단하여 얻어야 한다. Fig. 6에서 보이는 바와 같은 시험 주조품에서 봉재 길이의 중간 부분은 절단하여 가장 자리와 봉재의 중심 사이의 가운데 부분에서 공정 셀이나 구상 흑연의

수를 측정하여야 한다. 정사각형 판재에 부착되어 있는 플랜지를 판재에서 분리시켜 길이 방향의 가운데를 파괴하여 회주철의 경우 칩을 관찰한다. 구상 흑연 주철의 경우 파단면의 색깔이 밝기 때문에, 칩을 쉽게 관찰하고 측정할 수 없다. 구상 흑연 주철의 경우 판재 길이 방향의 가운데 부분의 횡단면을 준비하여 칩 형성 범위를 현미경 관찰을 통하여 결정한다.

회주철에서 형성하는, 적당하게 부식시키고 저 배율에서 관찰한 공정 셀의 수는(Fig. 7) 성장이 일어나기 시작한 자리의 수를 나타내며 접종 효율과 접종효과의 페이딩 속도를 측정하는데 활용할 수 있다. 구상 흑연 주철에서 각 핵은 하나의 구상 흑연이 형성하게 하며 그 수는 여러 가지의 미세 조직 관찰법으로 쉽게 결정할 수 있다.

접종제를 공정 셀이나 구상 흑연의 수에 미치는 영향만을 근거로 평가해서는 안된다. 모든 접종제에 대하여 공정 셀 및 구상 흑연수와 칩이 발생하는 경향사이에 공통적인 관계가 있

는 것은 아니다. 몇 가지의 접종제는 다른 접종제에 비하여 공정 셀의 수를 약간 증가시키고 칩이 적게 발생하게 한다(Fig. 8). 예를 들면, 칩 시험 주조품에서 측정된 칩 깊이가 2.4 mm 인 경우, 주물 공장용 페로실리콘으로 접종한 주철에서 측정된 공정 셀의 수는 40.3/mm²이었으나, 스트론튬 함유 페로실리콘을 사용하였을 경우에는 동일한 칩 깊이에 대하여 공정 셀의 수는 24.8/mm²이었다. 칩이 형성하는 경향이 같은 경우에 공정 셀의 수를 더 작게 증가시키는 접종제를 사용하는 것이 좋다. 이것은 회주철의 경우 핵 생성이 많이 일어나서 야기되는 불량에 발생하는 위험성을 감소시키기 때문이다.

접종제를 첨가한 직후 페이딩이 가장 빠르게 일어나고 페이딩 속도는 시간이 경과함에 따라 감소할 것이기 때문에 접종제의 효과를 평가하기 위하여 신중하게 계획할 필요가 있다. 접종제의 페이딩에 관하여 포괄적으로 평가하려면, 시험하는 적당한 시간 간격은 접종제를 첨가한 후 0, 1, 3, 6, 10 및 20 분이 적당하다는 것이, 경험적으로, 나타났다.

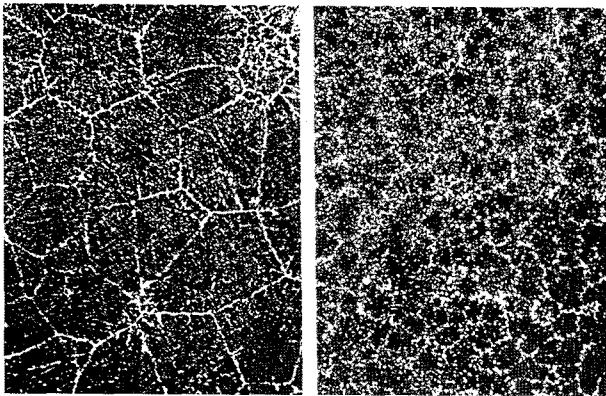


Fig. 7. Eutectic cells in grey irons of low (left) and high (right) degrees of nucleation. Etched with Steads reagent, 4.5X.

4. 접종제의 페이딩 특성

모든 접종제가 동일한 범위로 페이딩이 일어나지 않는다는 것은 잘 알려져 있다. 비록 특정 접종제가 다른 접종제에 비하여 페이딩 저항이 더 크다는 주장이 주기적으로 있기는 하지만, 비슷한 조건에서 서로 다른 접종의 페이딩 특성을 비교한 결과를 발표한 정보의 양은 그리 많지 않다. 비록 그와 같은 주장이 특별한 조건 하에서는 맞다하더라도 항상 일반적으로 적용할 수 있는 것은 아니다. 모든 조업 조건 하에서 다른 것보다 현저하게 우수한 접종제는 아직 없다. 그럼에도 불구하고 여러 가지 접종제의 성능과 페이딩의 몇 가지 특성은 잘 확립되고 입증되었다. 본 자료에서는 응고가 일어나는 동안 과냉의 측정, 공정 셀 또는 구상 흑연의 수의 평가 및 칩 발생 경향 또는 경도 시험 결과로부터 분석한 BCIRA의 연구 결과를 인용하였다. 큰 레들에 접종 처리한 용탕이 30 분까지 유지되는 동안 일어나는 것을 모사하는 조건하에서 연구한 결과이다.

보고된 대부분의 시험 결과는 주물 공장의 특정한 세트의 조건하에서 각각의 배치(batch)의 접종제로 시험한 결과이다. 동일한 접종제의 다른 배치는, 비록 화학 조성이 제조 공장에서의 사양 범위 내에 있다 하더라도, 미량 원소 함량의 작은 변화로 인하여 접종 효과에 있어서 변화가 나타날 수 있다. 결과적으로 접종제사이의 상세한 비교는 신중하게 하여야 하며 접종제의 일반적인 거동을 가리키는 사항만으로 결론을 내려야 한다.

5. 회주철 중 페이딩

회주철의 경우 일반적으로 사용되는 접종제는 흑연 또는 페로실리콘이나 규화 칼슘과 같은 고규소 물질이다. 활용할 수 있는 대부분의 특허 접종제는 이와 같은 물질이거나 이들의 혼합물이다. 흑연 접종제는 순도와 결정화도가 높아야 한다[5]. 순수한 규소를 첨가하는 것은 주형을 채우기 위한 탕구계를

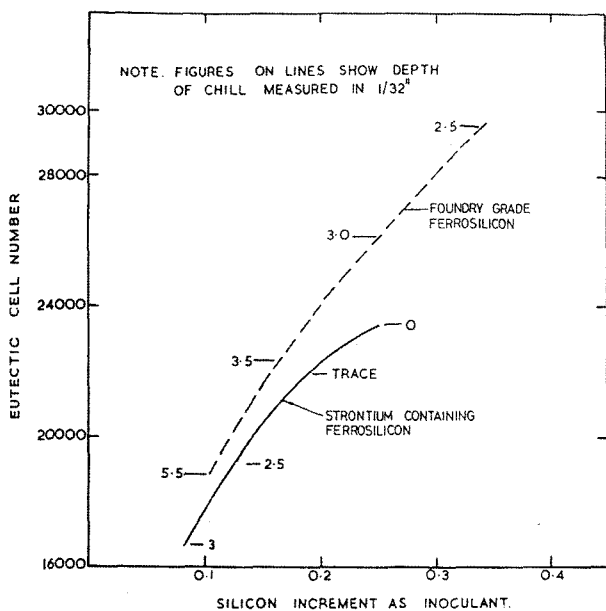


Fig. 8. Relationships between chill depth and eutectic cell numbers in irons inoculated with a foundry grade or a strontium containing ferrosilicon.

따라서 흘러 들어감에 따라서 또는 가능한 다른 후접종의 방법으로 첨가되지 않으면 주철 용탕에서 접종 효과가 거의 없는 것으로 나타난다. 최대의 효과를 얻기 위해서는 규소기 접종제 내에 단독 또는 복합 첨가한 알루미늄[12], 칼슘[12], 바륨[13], 스트론튬[14], 망간[15], 지르코늄[15], 또는 세륨[12]과 같은 작은 량의 미량 원소가 존재하여야 한다.

몇 가지 접종제를, 접종 후의 화학조성이 다음과 같은, 회주철에 첨가하였을 때 20분동안 유지하는 동안 접종제의 페이딩을 시험하였다:

사용한 접종제와 화학 조성은 Table 1 및 2에서 보이는 바와 같다. 모든 접종제의 경우 공정 셀의 수는 첨가한 직후 가장 컸으며 그 효과는 페이딩 되었다(Fig. 9). 접종에 의한 공정 셀 수의 증가는 첨가한 물질에 따라 달랐다. 접종 초기에 가장 공정 셀의 수가 많은 접종제의 효과는 처음 몇 분 유지하는 동안 빠르게 페이딩된 반면에, 접종 초기에 공정 셀의 수가 더 적은 접종제의 효과는 페이딩이 더 느리게 일어났다. 바륨을 함유하고 있는 접종제를 제외하고 페이딩 속도는 처음 10 분 유지하는 동안 감소하였다. 바륨을 함유하고 있는 접종제의 페이딩은 전체 유지 시간에 걸쳐서 비교적 일정한 속도로 일어났다. 그리고 이 기간의 대부분에 걸쳐서 이 주철의 공정 셀의 수는 다른 물질로 접종 처리한 주철보다 더 많았다.

철이 형성하는 경향도 또한 접종제를 첨가한 직후에 가장 낮았으며 그 효과는 유지 시간이 경과함에 따라 페이딩이 일어났다. 철의 감소는 접종 직후 얻은 공정 셀 수의 증가나 유지하는 동안 일어난 공정 셀 수의 변화와 잘 일치하는 것은 아니다. 항상 공정 셀의 수가 가장 낮은, 스트론튬 함유 페로실리코스로 접종한 주철은 또한 철이 형성하는 경향도 가장 낮았다. 한편 규화 칼슘으로 접종 처리하면 초기의 공정 셀의 수는 가장 많으나 이 접종제는 접종 처리 직후에조차 3.2 mm 두께의 단면에 모든 철을 제거하지는 못한다. 또한 규화 칼슘의 철 감소 효과는 흑연 가탄제로 접종 처리한 경우를 제외하고 다른 접종제로 처리한 경우보다 더 큰 범위로 페이딩이 일어난다. 그러나 이것은 접종제로 사용한 흑연의 순도가 낮은 특성 때문일 수 있다. 바륨 함유 합금으로 접종 처리한 주철은 용탕을 유지하는 전체 기간에 걸쳐서 공정 셀의 수는 높았다. 그러나 이 사실에도 불구하고 바륨 함유 Si-Mn-Zr 접종제의 철 감소 효과는 유지 기간동안 놀랍게도 나뉘었다.

모든 규소 함유 접종제로 접종한 직후 인장 강도는 증가하였다. 규화 칼슘이 가장 효과가 좋았다. 20분간 유지한 후에 인장 강도는 모든 경우에 접종 직후에 얻은 값보다 낮았으며 몇 가지 경우에는 접종 처리하기 전에 얻은 값보다 낮았다 (Table 3).

접종제 효과의 복잡성으로 인하여 어떤 물질의 조성과 성질

Table 1. Inoculants used with grey iron

Melt	Inoculation	Addition, kg	Addition, %Si	Addition, %C	Addition, %Ce
1	Foundry grade ferrosilicon	1.700	0.5	-	-
2	Foundry grade ferrosilicon + mischmetal	1.700	0.5	-	0.02
3	Foundry grade ferrosilicon + mischmetal	1.700	0.5	-	0.06
4	proprietary inoculant (Ce-FeSi)	1.500	0.2	-	0.05
5	Strontium containing ferro- silicon	1.700	0.5	-	-
6	Silicon-manganese-zirconium alloy	2.000	0.5	-	-
7	Barium-containing-silicon- manganese-zirconium alloy	2.000	0.5	-	-
8	Calcium silicide	1.000	0.25	-	-
9	Calcium silicide	2.000	0.5	-	-
10	Barium ferrosilicon	2.000	0.5	-	-
11	Proprietary mixture of FeSi and graphite	1.400	-	0.2	-
12	Graphite recarburizer	0.500	-	0.2	-

Table 2. Composition of inoculants used in tests with irons

Inoculant	Chemical composition %									
	Si	Al	Ca	Sr	Mn	Ba	Zr	C	Ce	other rare earths
Foundry grade ferrosilicon	77.4	1.15	0.34							
Strontium containing ferro-silicon	77.4	0.27	0.19	0.72						
Silicon-manganese-zirconium alloy	61.3	1.65	2.72		6.29		5.06			
Barium-containing-silicon-manganese-zirconium alloy	58.4	1.16	3.03		5.80	3.90	4.89			
Barium ferrosilicon	62.5	1.20	2.10		9.30	6.00				
Calcium silicide	60.5	1.69	29.0							
Proprietary inoculant (Ce-FeSi)	39.9	0.50	0.45						10.2	5.6
Proprietary mixture of FeSi and graphite	35.9	1.07	1.50					44.5		
Graphite recarburiser										

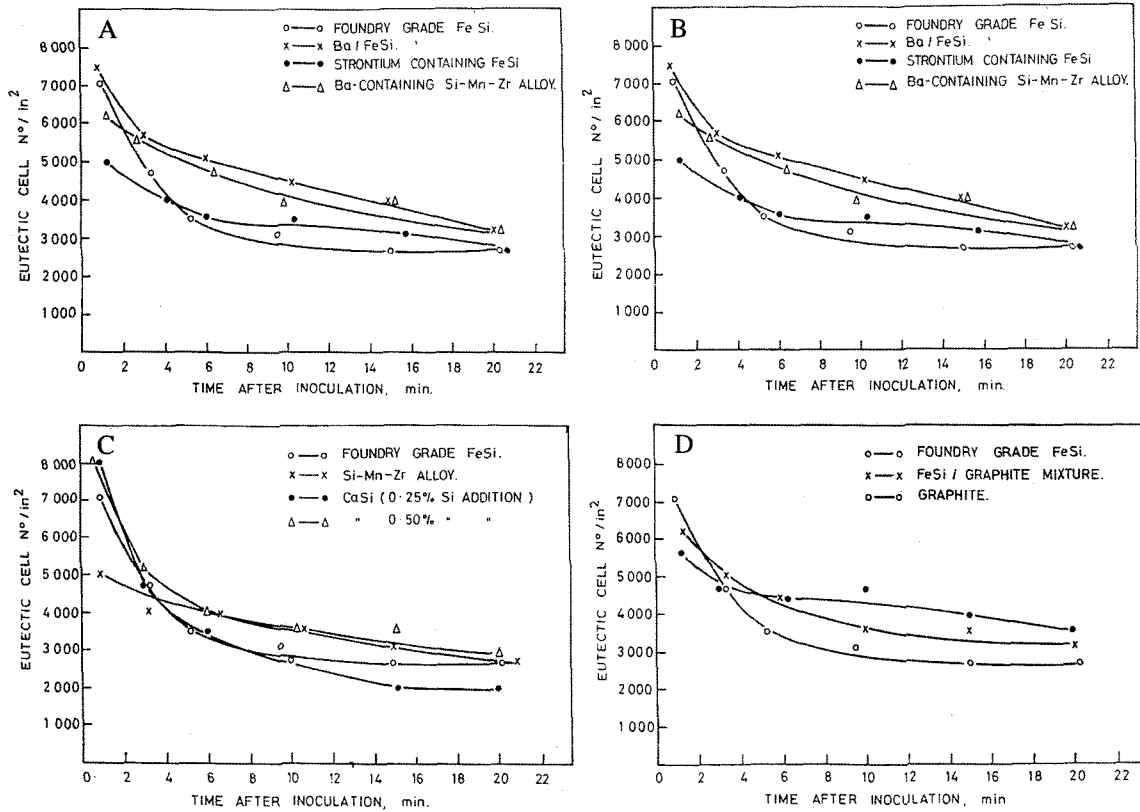


Fig. 9. Variation in eutectic cell number in grey irons with time in 3/4 in section bars. The curve for foundry grade ferrosilicon has been repeated on each set of curves to facilitate comparison.

이 활용할 수 있는 다른 집중제보다 그 성능이 더 좋거나 나쁘게 하는 이유와 집중제가 공정 셀 수와 철에 다른 효과를 가지는 이유에 관한 이해가 일반적으로 부족하다.

냉각 속도, 과냉 및 핵생성도 사이의 관계를 시험하여, 비록 기대된 조성적 효과를 근거로 미리 예측할 수는 없었으나, 스트론튬을 함유하고 있는 페로실리몬에 대비한 주조 등급의 페로실리몬의 거동의 차이는 이 두 물질에 의하여 촉진되는 핵의 종류가 다르다는 사실에 기인한다는 것을 입증하였다. 핵의 특성이 알려지지 않았기 때문에, 집중제의 조성이나 주철의 조성에 따라서, 페이딩이 잘 일어나거나 그렇지 않은 서로 다른 형태의 핵이 형성한다는 결론을 내릴 수 있을 것이다. 그렇지 않으면 다른 휴면 핵이 집중제의 형태에 따라서 성장 중심으로 작용하게 할 수 있다. 페이딩 특성의 차이는 핵의 상대적인 안정성의 차이로부터 나타난다는 것이 제안되었다.

작은 량의 세립만을 첨가하여[12] 또한 회주철을 집중하는 강력한 효과를 얻을 수 있다. 고용된 세립을 함유하고 있는 집중제 중 시험한 유일한 집중제(세립 페로실리몬 합금)은 스트론튬 함유 페로실리몬과 비슷한 효과가 있었다. 이 집중제는 공정 셀의 수는 약간만 증가하였으나 철을 감소시키는 효과는 매우 컸다. 공정 셀 수와 철 발생 경향은 20분 유지하는 동안 약간의 페이딩만 일어났으며 전체적인 철 감소 효과는 스트론튬 함유 페로실리몬 다음이었다. 세립의 이와 같은 효과는 Patterson이 관찰한 결과(16)와 일치한다. 비록 공정 셀의 수는 높은 상태로 유지되었으나 유지 시간동안 철 감소 효과가 현

저하게 페이딩된, 시험한 바륨 함유 집중제의 비교적 나쁜 성능은 페이딩에 대하여 최대 저항을 얻는 최소 7~15%(2.4)보다 바륨 함량이 낮았다는 사실에 의하여 영향을 받았을 수 있다.

집중제 첨가의 결과로 형성된 핵이 일시적이라는 특성은 흑연 및 스트론튬과 바륨 함유 페로실리몬을 포함하는 페로실리몬이 효과가 없다는, 황 함량이 낮은 회주철의 레들 집중과 관련된 많은 어려운 점을 설명한다. 흑연은 또한 구상흑연주철을 위한 레들 집중제로 효과적이지 않기 때문에, 집중 효과는 용탕의 황 함량에 따라 달라질 수 있다는 것이 제안되었다. 이 견해는 회주철 용탕 레들에 흑연을 첨가한 경우 철 감소 효과는 용탕 중 황 함량이 낮은 수준으로 감소함에 따라 감소한 결과를 얻은 BCIRA의 연구결과에 의하여 확인되었다. 그러나 황 함량이 낮은 용탕이 주형으로 들어오는 탕류에 동일한 흑연을 첨가하였을 때, 레들에 첨가한 경우보다 매우 더 큰 철 감소 효과를 얻었다. 이것은 흑연은 황 함량이 낮은 회주철을 집중할 것이나 그 효과는 매우 빨라서 레들에 첨가하면 집중의 잇점은 용탕을 주조할 수 있기 전에 손실 된다는 것을 제안한다.

비록 주철 용탕 중 핵의 특성이 확립되지 않았다 하더라도 Eash[17]는 한 가지 형태는 집중제로 첨가되거나 또는 규소기 집중제로 집중 후 규소 함량이 높은 영역에서 탄소가 안정성을 잃어 형성한 흑연 입자일 수 있다는 것을 제안하였다. Kitchener[18]는 주철 용탕 중 흑연의 용해 속도는 합금의 함량

Table 3. Effect of inoculation and fade upon the mechanical properties of grey irons

Inoculant	Tap No.	Tensile strength, lbs/in ² × 10 ³	Strength increase after inoculation, lbs/in ² × 10 ³	Brinell hardness HB10/3000
Foundry grade FeSi	1	37.8	-	207
	2	41.7	+3.1	203
	7	36.7	-1.1	192
Foundry grade FeSi +0.02% mischmetal	1	36.5	-	198
	2	41.0	+4.5	204
	7	36.3	-0.2	198
Foundry grade FeSi +0.06% mischmetal	1	36.3	-	202
	2	40.1	+3.8	198
	7	36.7	+0.4	199
Proprietary inoculant (Ce-FeSi)	1	34.7	-	193
	2	38.3	+3.6	205
	7	34.9	+0.2	194
Strontium containing ferrosilicon	1	36.7	-	210
	2	37.9	+1.2	193
	7	Bars flawed	Bars flawed	188
silicon-manganese-zirconium alloy	1	37.0	-	175
	2	39.0	+2.0	207
	7	35.9	-1.1	190
Barium-containing-silicon-manganese-zirconium alloy	1	37.4	-	213
	2	39.0	+1.6	190
	7	35.4	-2.0	186
Calcium silicide (0.25% Si addition)	1	35.2	-	200
	2	40.5	+5.3	195
	7	35.6	+0.4	195
Calcium silicide (0.5% Si addition)	1	39.4	-	224
	2	45.7	+6.3	196
	7	39.0	-0.4	197
Barium ferrosilicon	1	36.5	-	210
	2	41.4	+4.9	198
	7	38.1	+1.6	177
Proprietary mixture of FeSi and graphite	1	35.4	-	198
	2	35.4	0	181
	7	33.4	-2.0	183
Graphite recarburiser	1	39.2	-	218
	2	32.3	-7.0	214
	7	28.9	-10.3	187

Tap 1 was cast before inoculation
Tap 2 1 minute after inoculation
Tap 7 20 minutes after inoculation

이 낮은 용탕에서 최대이고 황의 함량이 증가함에 따라 감소한다는 것을 보였다. 따라서 회주철 중 흑연의 점종 효과, 특히 페이딩 특성에 있어서의 차이는 용탕 중 흑연의 용해 기구에 있어서의 변화로 설명할 수 있다.

그러나 스트론튬 및 바륨 함유 페로실리콘을 포함한 주조 등급의 페로실리콘과 길보기로(공업적으로) 순수한 규소는 황 함량이 낮은 용탕이 주형으로 들어가는 동안에 첨가하였을 때 뚜렷한 점종 효과가 있다. 황의 함량이 낮은 주철 용탕에 이와 같은 물질을 레들에 첨가하여 점종할 때의 어려움을 매우 빠른 페이딩 속도에 기인한다. 만약 이와 같은 규소 함유 물질의 점종 효과가 Eash가 제안한 바와 같다면 용탕의 황 함량과 일치한 페이딩 속도의 변화 또한 용탕 중 흑연의 용해 기구에 있어서의 변화 때문일 것이다.

황의 함량이 낮은 주철 용탕에 레들 점종을 하였을 때 효과를 얻을 수 있는 물질은 상당한 량의 세립 또는 칼슘을 함유하고 있는 것들이다. 그와 같은 원소가 존재하면 흑연의 용해 기구를 변화시키거나 페이딩 저항이 매우 큰 다른 형태의 핵을 형성시킬 것이라고 제안되었다.

그러나 세립 첨가량이 너무 많으면 점종 효과는 손실되고 존재하는 세립은 탄화물 안정화제로 작용하기 때문에, 세립 함유 점종제를 사용하는 것은 신중할 필요가 있다.

회주철 중 점종 및 페이딩 기구에 대한 상세한 이해가 부족함에도 불구하고 실제로 의미심장한 페이딩과 관련된 몇 가지 잘 확립된 다음과 같은 사실이 있다.

1. 모든 점종제는 페이딩이 일어난다.
2. 점종 후 페이딩이 일어나지 않는 기간은 없다. 최대 효과

를 얻기 위하여 접종제를 첨가 한 후 가능한 한 빨리 용탕을 주입하여야 한다.

3. 몇 가지 접종제의 효과는 다른 것들보다 더 느리게 페이딩이 일어난다.

4. 공정 셀의 수를 증가시키는 접종제가 칠 감소 효과가 필연적으로 큰 것은 아니다.

5. 특히 황의 함량이 낮으면 접종제의 효과는 용탕의 조성에 따라서 변화한다.

6. 칠 감소 효과의 잠재력이 크고 안정된 접종제를 제공하기 위한 제조업자들의 노력의 결과로 다양한 특히 접종제가 제조되었다. 접종제의 조성에 관한 지식으로부터 어떤 효과가 나타날 것인가를 예측할 수는 없다. 주조 공장에서는 목적에 가장 적당한 접종제를 스스로 평가하여 결정하여야 한다.

6. 구상 흑연 주철

구상 흑연 주철의 레들 접종에서, 접종제는 규소 함량이 많은 합금을 기본으로 한다. 회주철에서 효과가 있는 대부분의 이와 같은 형태의 접종제는 구상 흑연 주철에도 또한 효과가 있다. 세륨 뿐만 아니라 마그네슘이 존재할 때에는 스트론튬 함유 페로실리콘을 사용하는 것을 추천한다. 흑연은 구상 흑연 주철의 레들 접종용으로 사용할 수 없다.

구상 흑연 주철의 철이 형성하는 경향은 비슷한 조성의 회주철보다 더 크다. 이것은 주방 상태에서 탄화물이 없는 얇은 단면의 구상 흑연 주철 주물을 얻는 것은 매우 어렵다는 것을 반영한다. 구상 흑연 주철 용탕에의 접종제 첨가량은 회주철의 경우보다 더 많으며 구상 흑연의 수는 회주철의 공정 셀 수보다 매우 더 많다.

세륨이 없는 구상 흑연 주철에서, Table 4에서 보이는 바와 같은 접종제를 사용하여 BCIRA에서 비교 실험을 하였다. 시험한 몇 가지 물질은 구상 흑연 주철의 접종을 위하여 보통 사용하지 않는다. 구상 흑연의 수(Fig. 10)는 접종 직후 최대였으며 모든 접종제의 효과는 페이딩되었으나 모두가 같은 속도는 아니었다.

6%의 바륨을 함유하고 있는 규소 망간 접종제를 제외하면, 초기 구상 흑연의 수가 가장 많은 접종제가 가장 빠르게 페이딩되나 10~15분 유지 시간 후에는 대부분의 접종제는 비슷한

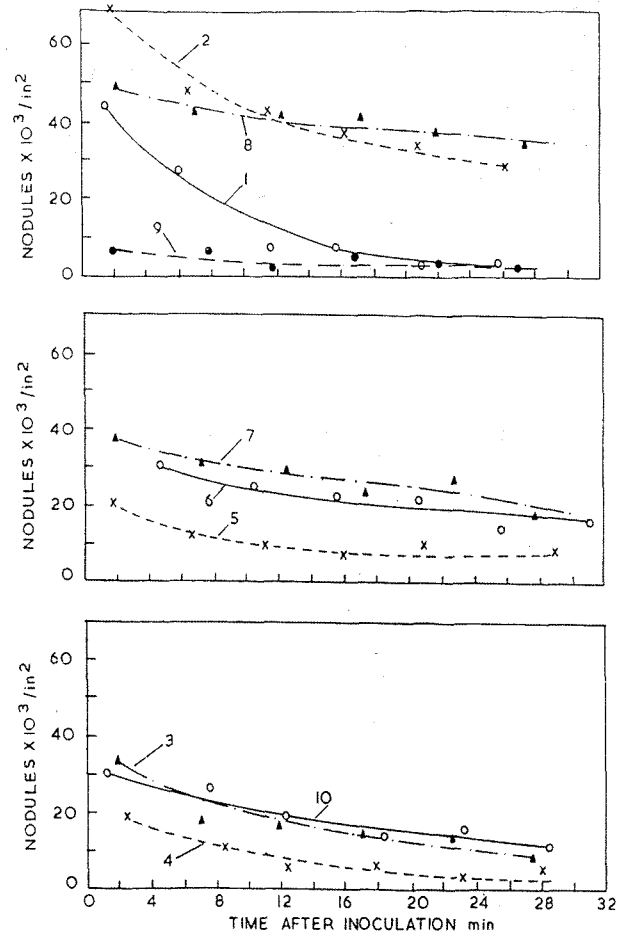


Fig. 10. Variations in nodule number with time in 0.875 in diameter bars of cerium free ductile irons. The numbers on the curves refer to the inoculants tested which are shown in Table 4.

속도로 페이딩이 일어났다. 25.4 mm 두께의 판재의 경도를 측정하여 평가 한 접종제의 칠 감소 효과의 최대 효과도 또한 접종 직후에 얻었다. 이 효과의 페이딩도 역시 사용한 접종제에 따라서 다른 속도로 일어났다. 접종 직후의 구상 흑연의 수가 가장 많이 생기게 하는 접종제가 그 시간에 철을 제거하는 데 가장 효과적이었다. 페이딩이 대부분 일어난 접종제는 유지 시간동안 철이 형성하는 경향을 가장 크게 증가시키는

Table 4. Inoculants used in tests with ductile irons

No.	Inoculant	Si, %	Al, %	Ca, %	Mn, %	other elements
1	Foundry grade FeSi	76.7	1.82	0.66	-	-
2	Strontium containing FeSi	72.0	0.19	0.12	-	0.94% Sr
3	High Al (low Ca) FeSi	78.0	2.50	0.10	-	-
4	Low Al (high Ca) FeSi	76.0	0.10	1.10	-	-
5	Low Al FeSi	79.0	0.64	0.04	-	-
6	Si-Mn-Zr-containing FeSi	61.3	1.65	2.72	6.3	5.06% Zr
7	Si-Mn-Zr-Ba containing FeSi	58.4	1.16	3.03	5.8	4.89% Zr, 3.9% Ba
8	Si-Mn-Ba-containing FeSi	62.5	1.2	2.1	9.3	6.0% Ba
9	Calcium silicide	60.0	1.60	28.0	-	-
10	Graphite + FeSi mixture	46.0	-	-	-	37.0% C

원인이 되었다. 6%의 바륨을 함유하고 있는 접종제(8번)으로 초기에 구상 흑연의 수를 크게하고 칠 감소 효과를 좋게 하였으며 이들 효과는 30분간 유지하는 동안 아주 약간만 페이딩이 일어났다. 3.5%의 바륨만을 함유하고 있는 접종제(7번)은 그 효과가 떨어졌으며, 이것은 바륨의 함량이 접종 효과뿐만 아니라 페이딩 저항에 미칠 수 있는 효과를 보여주고 있다. 비록 접종 직후에 구상 흑연의 수를 가장 많이 하고 칠 발생 경향이 낮게 하는 주조 등급의 페로실리콘(접종제 1)은 매우 빠르게 페이딩되었다. 전체 결과를 근거로 스트론튬을 함유하고 있는 페로실리콘(접종제 2)이 세륨이 없는 구상 흑연 주철에서 초기에 구상 흑연의 수를 매우 많이 하고 칠 발생 저항이 좋게 하는 가장 좋은 접종제였다. 비록 페이딩은 일어났지만, 30분간 유지한 후 구상 흑연의 수는 여전히 많았으며 이 접종제의 칠 감소 효과는 상당히 유지되었다.

접종제의 접종 효과와 페이딩은 세륨이 존재하는 마그네슘으로 처리한 주철에서는 크게 달라진다. 그 효과는 접종 후의 구상 흑연의 수를 증가시키고 페이딩이 일어나는 범위를 크게 감소시킨다. Table 4에서 보이는 바와 같은 동일한 물질을 사용하여 세륨을 첨가 한 그리고 그렇지 않은 직경 15.2 mm 봉재 내의 구상 흑연의 수에 미치는 마그네슘 처리하는 동안 미쉬메탈(mischmetal)로 첨가한 세륨의 영향은 Table 5에서 보이는 바와 같다. 세륨 함유 구상 흑연 주철에는 사용할 것을 추천하지 않는, 구상 흑연 주철용 접종제로 인식되지 않는 규화 칼슘 및 알루미늄 함량이 낮은 페로실리콘 그리고 스트론튬 함유 페로실리콘의, 세 가지는 예외로 하고, 접종 처리 2~3 분 후 그리고 30분 후에 구상 흑연의 수를 증가시키는 세륨의 효과는 확실하게 나타난다. 주철 중 세륨이 존재하고 그렇지 않은 경우에 유지 기간에 걸쳐서의 구상 흑연의 수의 변화는 Fig. 10과 비교하여 Fig. 17에서 보이는 바와 같으며 역시 개선된 페이딩 저항이 결과를 입증한다. 더 많은 구상 흑연의 수 그리고 더 큰 페이딩 저항과 더불어, 25.4 mm 두께 단면의 경도를 측정하여 평가한 칠 형성경향은 주철 내에 세륨이 존재할 때에 접종 직후에 역시 감소하였으며 칠 감소 효과는 또한 더 느리게 페이딩이 일어난 결과는 Fig. 11과 비

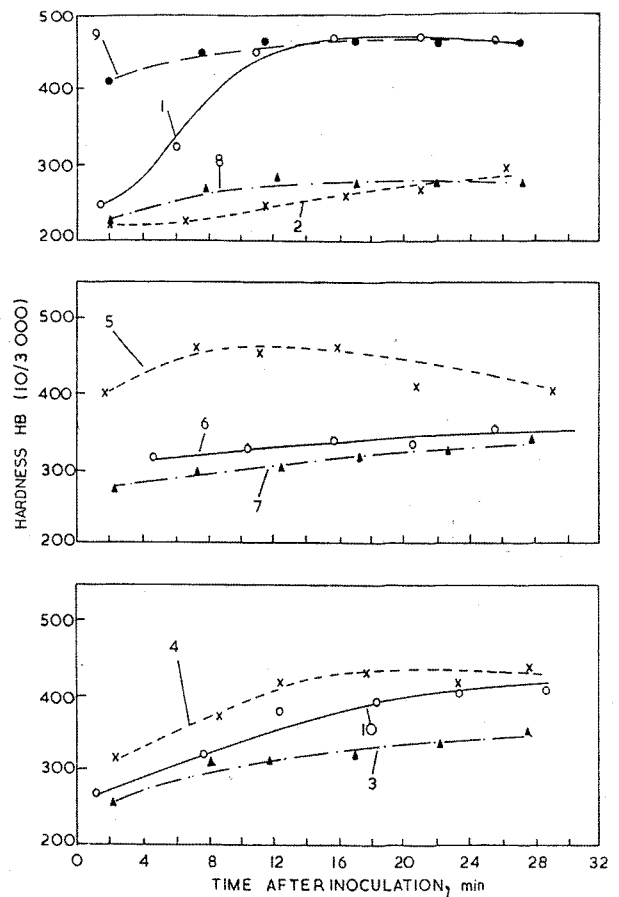


Fig. 11. Variation in hardness with time in 1 in thick sections of cerium free ductile irons. The numbers on the curves refer to the inoculants tested shown in Table 4.

교한 Fig. 13에서 보이는 바와 같다.

구상 흑연 주철에서 접종제의 효과에 미치는 세륨의 영향을 평가한 BCIRA에서의 연구 결과에서는 마그네슘 처리 전에 또는 접종제와 함께 미쉬메탈로 첨가한, 세륨이 존재할 경우에, 주철은 주어진 냉각 속도에서 과냉이 더 작고(Fig. 14) 주어진

Table 5. Effect of cerium on nodule number in 0.6 in diameter bars of ductile irons shortly after inoculation and after a holding time of 30 minutes.

No.	Inoculant	2-3 min after inoculation			30 min after inoculation		
		With Ce	Without Ce	Change due to presence of Ce	With Ce	Without Ce	Change due to presence of Ce
1	Foundry grade FeSi	80	40	+40	65	2	+63
2	Strontium containing FeSi	67	75	-8	23	30	-7
3	High Al(low Ca) FeSi	58	25	+33	23	5	+18
4	Low Al (high Ca) FeSi	37	5	+32	8	2	+6
5	Low Al FeSi	3	3	0	3	2	+1
6	Si-Mn-Zr-containing FeSi	52	21	+31	27	15	+12
7	Si-Mn-Zr-Ba containing FeSi	75	45	+30	42	15	+27
8	Si-Mn-Ba-containing FeSi	53	49	+4	20	29	-9
9	Calcium silicide	4	4	0	2	2	0
10	Graphite+ FeSi mixture	70	30	+40	20	5	+15

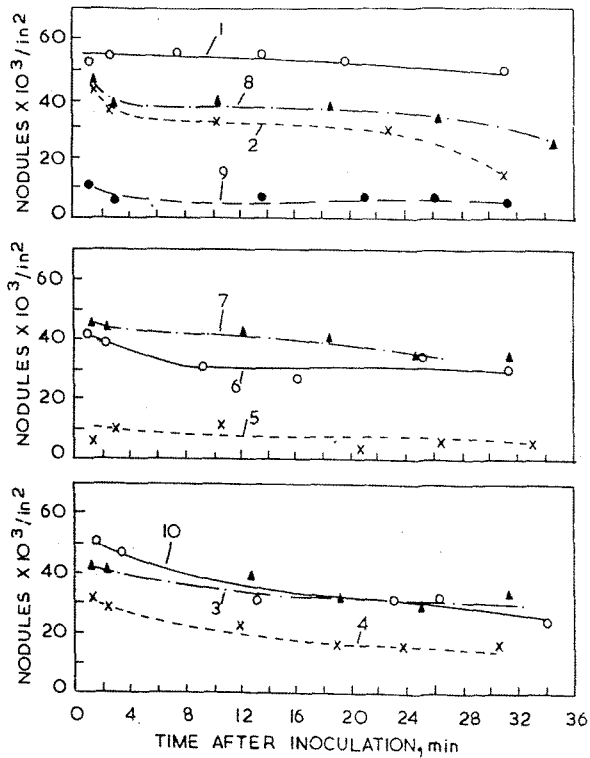


Fig. 12. Variations in nodule number with time in 0.875 in diameter bars of cerium containing ductile irons. The numbers in the curves refer to the inoculants tested shown in Table 4.

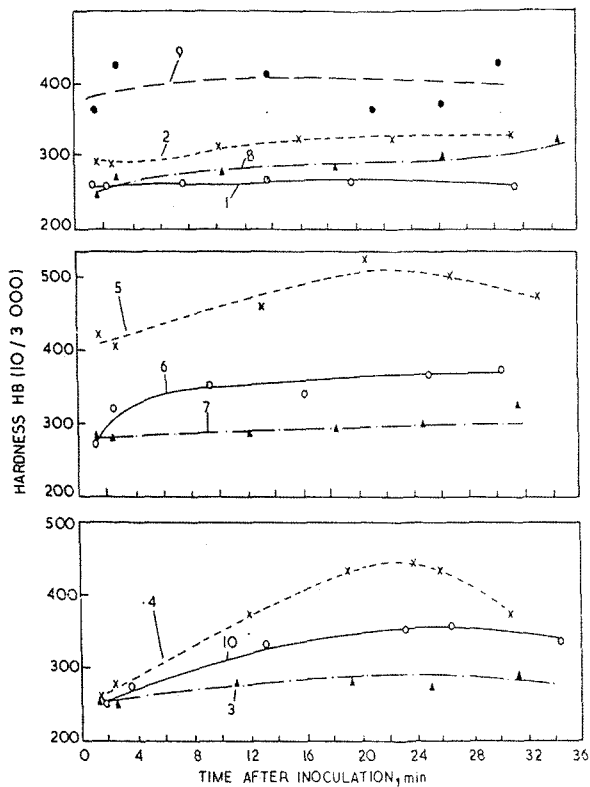


Fig. 13. Variations in hardness with time in 1 in thick sections of cerium containing ductile irons. The numbers in the curves refer to the inoculants tested which are shown in Table 4.

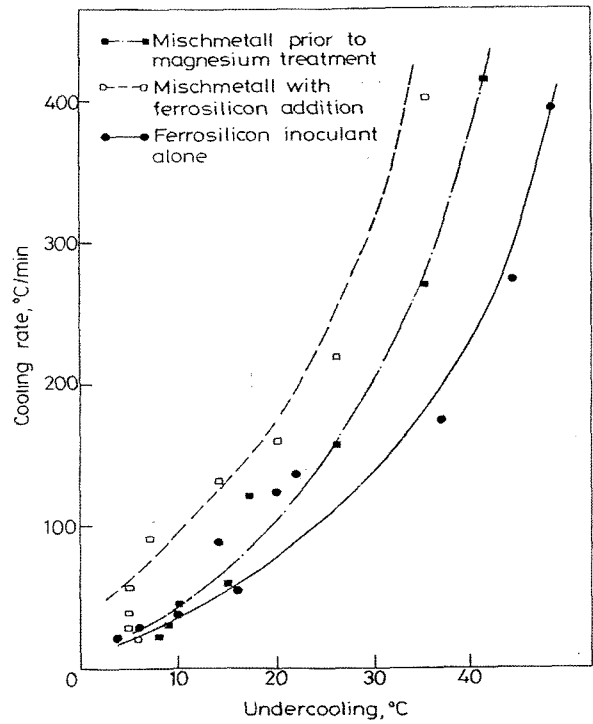


Fig. 14. Relationship between cooling rate and undercooling for irons with and without mischmetall additions.

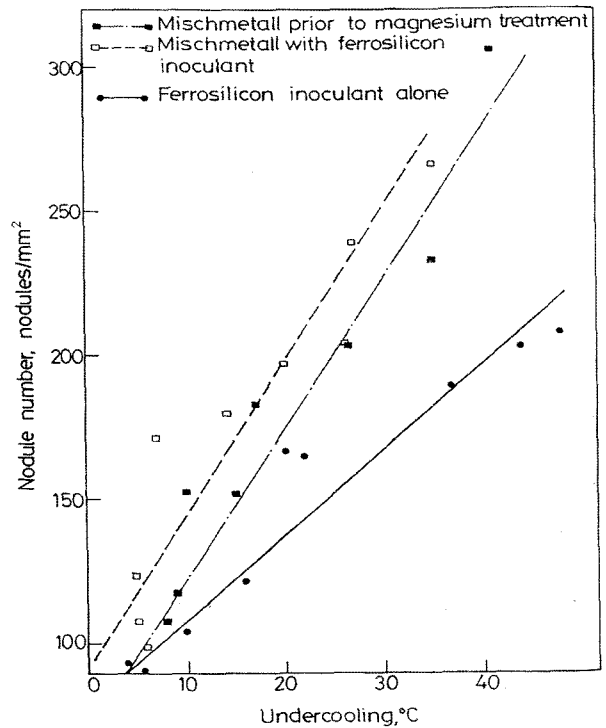


Fig. 15. Relationship between nodule number and undercooling for irons with and without mischmetall addition.

과냉에서 구상 흑연의 수가 더 많았다(Fig. 15)는 것을 보여 주었다. 이와 같은 결과는 다음과 같은 두 가지 중의 한 가지 방법으로 설명할 수 있다.

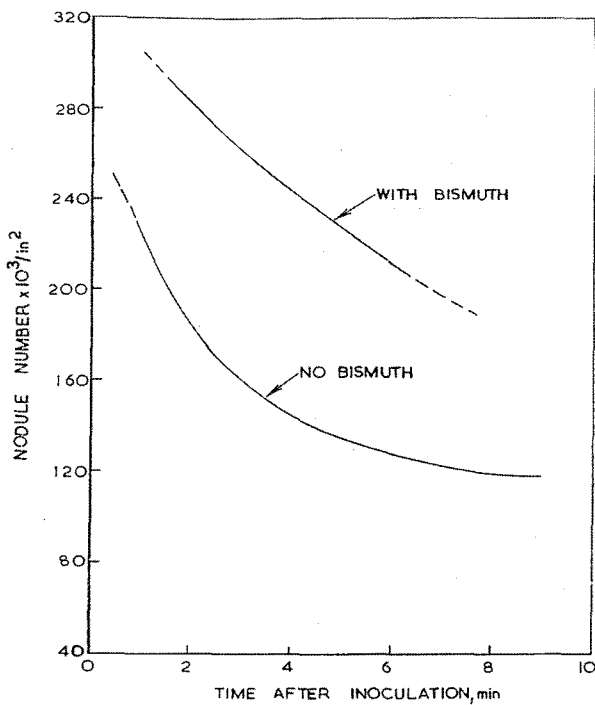


Fig. 16. Effect of bismuth upon nodule number and fading in ductile irons inoculated with ferrosilicon.

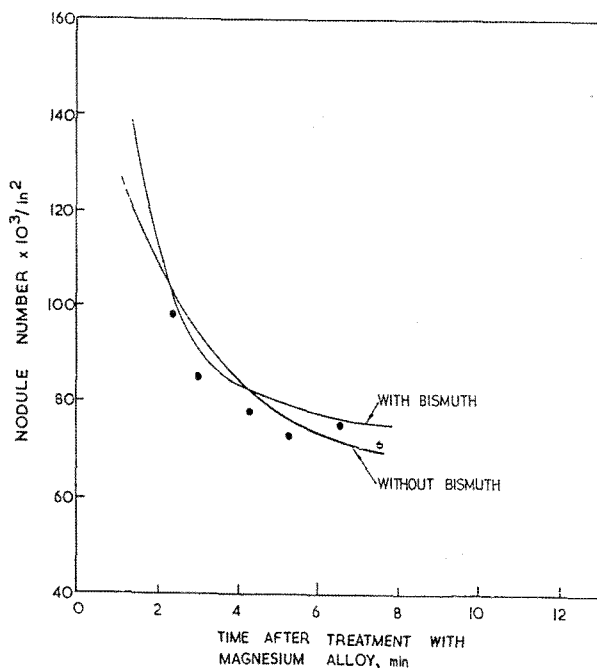


Fig. 17. Fading of nodule number in ductile irons with without bismuth additions.

1. 미쉬메탈을 첨가하면 페로실리콘에 의하여 촉진된 것들과는 다른 형태의 별도의 핵을 제공할 수 있다. 이것은 세립이 없는 주철과 세립을 함유하고 있는 주철의 구상 흑연의 수와 과냉사이의 관계에 있어서의 차이를 근거로 제안되었다. 만약 미쉬메탈을 첨가하여 만들어진 핵이 세립이 없는 주철에서의

핵과 같은 형태라면, 비슷한 관계가 예측될 것이다.

2. 미쉬메탈을 첨가하면 주철 중 이미 존재하는 다른 휴먼 핵의 성장을 촉진한다. 그 효과는 핵은 동일한 형태로 유지되는 한편 존재하는 핵의 수를 증가시킨다는 것이다. 이것은 또한 Fig. 14에서 보이는 바와 같은 관계를 설명한다.

이와 같은 관찰은 또한 주철 중 핵의 성질과 접종제의 성능에 미치는 미량 원소의 소량 첨가의 영향에 관한 이해 부족을 설명한다. 또한 새로운 접종제를 개발하는 것이 성패의 여부에 운에 맡기는 형태의 일인가를 설명하는 역할도 한다.

위에서 언급한 세립의 효과는 또한, 적어도 부분적으로, 마그네슘 페로실리콘 합금으로 처리한 주철에서 높은 핵생성도를 얻을 수 있는 이유를 설명한다. 이것은 대부분의 상업적으로 구할 수 있는 합금은 작은 량의 세립을 함유하고 있기 때문이다. 비록 세립이 존재하는 것이 페이딩을 감소시키는데 이롭다 하더라도 주의 깊게 첨가하기 위하여 신중하게 접근하여야 한다. 대부분의 접종제의 경우, 첨가량이 증가함에 따라 그 효과는 증가하는 반면에, 핵생성도를 증가시키는데 필요한 양보다 더 많이 첨가하지는 말아야 한다. BCIRA 연구 결과는 비록 유용한 효과가 0.004~0.008% 범위에서 얻었지만 0.005%의 잔류 세립 함량이 가장 만족스러운 것으로 나타났다. 별도의 접종제 첨가없이 마그네슘 페로실리콘 합금을 사용하여 접종하였을 때 최대의 접종 효과를 얻기 위한 임계 세립 함량이 있다는 것은 또한 보인 바 있다[19]. 세립은 최대 접종 효과를 얻는데 필요한 양보다 더 많이 존재할 때 강력한 탄화물 안정화제이다. 만약 미쉬메탈과 같은 첨가제나 상당한 량의 세립이나 희토류 원소를 함유하고 있는 접종제에 의하여 너무 많이 첨가되면, 두꺼운 단면에 조차 상당한 량의 백주철 조직이 형성할 수 있다. 고순도 원료를 사용하여 생산한 주철의 경우 과잉의 세립은 구상 흑연 수의 감소와 흑연 형상의 퇴화를 야기시킬 수 있다.

비스머스는, Fig. 16에서 보이는 바와 같이, 구상 흑연 주철을 생산하기 위하여 용탕을 처리하는 동안 작은 량 첨가되어 구상 흑연의 수를 상당히 증가시키는 원소이다[20]. 비스머스 첨가의 결과로 얻은 많은 구상 흑연의 수는 유지 기간동안 유지된다. 그러나 비스머스가 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우의 구상 흑연의 수가 비슷할 때에는, 비스머스의 존재는 페이딩이 일어나는 속도에 영향을 미치지 않는 것은 Fig. 17에서 보이는 바와 같다. 따라서 비스머스의 잇점은 비스머스를 사용하여 얻을 수 있는 구상 흑연 주철의 수의 증가의 결과로 과냉을 감소시킬 수 있는 범위로 제한된다.

구상 흑연 주철의 레들 접종의 기대하지 못한 효과는 회주철을 접종하기 위하여 사용할 수 있는 흑연계 물질로부터는 그 효과를 얻을 수 없었다는 것이다. 이 자료의 앞 절에서 황 함량이 낮은 회주철에서 접종제로서의 흑연의 효과는 너무 빨리 페이딩이 일어나 레들 접종제로 사용할 수 없다는 것을 보였다. 어떤 경우에 주조시 탕도계 내에 흑연을 놓아 좋은 접종 효과를 얻을 수 있는 것을 발견한 한편, 그 결과는 일관성이 없으며 다른 인자가 또한 구상 흑연 주철에서 흑연의 접종 효과에 영향을 미칠 수 있다는 것을 제안한다.

보고된 연구 결과로부터 구상 흑연 주철의 레들 접종의 페

이딩에 영향을 미치는 주된 인자는 다음과 같다.

1. 구상 흑연 주철은 칠 형성이 더 높은 특성으로 인하여 주방 상태에서 얇은 단면에 탄화물이 없는 주조품을 얻으려면 최대의 접종 효과가 요구된다.
2. 모든 접종제는 페이딩이 일어난다. 그러나 페이딩 속도는 용탕 내에 세륨이 존재할 때 크게 감소할 것이다.
3. 최대 효과를 얻기 위하여 용탕을 주형에 주입하는 시간에 가능한 한 가까울 때 접종 처리를 하여야 한다. 많은 량의 용탕을 마그네슘 처리할 경우에는, 주조하기 바로 직전에 수작업용 생크(hand shank)로 접종하여야 한다.
4. 접종 효과는 접종제의 조성에 따라 달라진다. 주조 공장에서 목적에 가장 알맞은 것을 결정하기 위하여 하는 것이 바람직하다.

7. 결 언

접종에 영향을 미치는 인자를 완전히 이해하지 못하고 있기 때문에, 접종제의 개발은 시행착오를 근거로 하였다. 접종과 뒤이은 페이딩 기구를 설명하는 일반적으로 받아들여지는 하나의 이론은 없다. 아마 한 가지 이상의 기구가 관련되었으며 이와 같은 기구들이 접종 효과의 잠재력과 페이딩 저항을 결정할 것이라고 제안하는 증거가 있다. 이와 같은 사실이 접종 거동을 더욱 개선하는 것을 비교적 어려운 일이 되게 한다.

주조품은 공업적 부품으로 설계하였으며 주조품의 사용자는 모든 공급된 주조품은 기계적 성질, 기계가공성 및 외부 또는 외부 수축 결함이 없는 적어도 최소한의 사양상 특성을 가지고 공급될 것을 기대한다. 주조 공장에서 제어의 여지가 비교적 적은, 레들 접종법의 페이딩으로부터 나타나는 가변성으로 인하여 내부 스크랩비가 낮은 상태에서 고품질의 표준을 고객에게 유지하는 것을 어렵다.

회주철의 주된 뚜렷한 문제는 접종 처리 후 20분까지 접종

효과의 손실이 적거나 없는 상태에서 주입할 수 있는 페이딩이 일어나지 않는 접종제를 개발하는 것이다. 접종제에 바륨, 세륨 및 스트론튬을 첨가하면 모두 어느 정도 잇점을 얻는다. 그러나 완전히 성공하지는 못했다.

구상 흑연 주철을 생산하는 데에 있어서 주방 상태에서 얇은 단면에 탄화물이 형성하지 않게 하기 위해서는 매우 높은 수준의 접종이 요구된다. 따라서 레들 접종에 사용할 더 강력한 접종제가 필요하고, 비록 세륨이 존재하여 페이딩이 감소하지만, 이와 같은 접종제는 페이딩 효과가 없는 것이 바람직하다. 접종제가 페이딩 효과를 가지는 이유에 대한 이해 부족이 역시 그와 같은 개발을 어렵게 한다.

따라서 가까운 장래에 회주철과 구상 흑연 주철의 레들 접종에 필요한 개선된 접종제를 얻을 전망을 평가하는 것은 불가능하다. 그러나 그와 같은 접종제의 필요성은 용탕이 주형으로 주입되는 탕류에 접종하거나 주형 내에서 용탕이 통과하는 탕도계에서 접종하는 방법을 많이 사용하게 됨에 따라서 빠르게 감소하였다. 이와 같은 방법들은 접종제를 첨가한 직후에 얻는 매우 큰 질 발생 경향 감소 효과의 잇점을 가지고 있으며 이와 같은 목적에 특별히 합당하게 고안되고 등급화된 합금의 활용 가능성에 의하여 그 잇점은 더욱 강화된다. 개발 초기 단계에서는 주형내 또는 스트림(탕류) 접종이 주로 레들 접종의 보조로 이용된 한편 기술의 개선으로 레들 접종을 대체하기에 이르렀으며 동시에 개선된 접종 효과를 얻는데 더 적은 량의 접종제가 필요하였다.

레들 접종을 위하여 개선된 접종제 개발을 계속하는 한편 더욱 발전된 개발로 후접종에 더욱더 집중되는 것이 개대된다. 궁극적인 후접종법의 성공은 활용할 수 있는 물질뿐만 아니라 가능한한 접종효과의 변화가 적은 필요한 접종을 얻기 위한 자동화된, 일관성이 있는, 신뢰성이 있는 그리고 안전한 접종법을 제공하기 위한 이와 같은 공정들의 엔지니어링에 따라 달라질 것이다.