

논문

연속주조한 구상흑연주철의 미세조직과 기계적 성질

최경환<sup>†</sup> · 조규섭 · 이경환 · 김기영<sup>\*</sup>

Microstructure and Mechanical Properties of Continuous Cast Ductile Iron

Kyeong-Hwan Choe<sup>†</sup>, Gue-Serb Cho, Kyong-Whoan Lee and Ki-Young Kim<sup>\*</sup>

Abstract

Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron were investigated in terms of diameter change of samples that gives rise to modify the microstructure due to different cooling rate in the continuous casting process. The chemical composition used in this study was GCD 400 grade. From the microstructural observation, we have found a large number of graphite with small size in diameter which is comparable to the microstructure of the sample produced by conventional sand casting. The major reason of this would be due to high cooling rate. In the sample with 26 mm in diameter, the microstructure was composed of pearlite, iron carbide, and graphite. In the samples with 60 and 100 mm in diameter, however, we have observed a dissimilar microstructure that consisting of ferrite and graphite. Concerning the mechanical property, the sample with 26 mm in diameter showed higher hardness and strength compared to those samples with 60 and 100 mm in diameter. The result obtained for ductility appeared a reversal. Much more works such as inoculation, process design and chemical composition would be required in order to have a sound product even in a small diameter of samples.

Key word : continuous casting, ductile cast iron, graphite, cooling rate

(Received January 26, 2004 ; Accepted February 14, 2003)

1. 서 론

연속주조에 관해서 처음 관심을 가진 것은 H. Bessemer로 보여지며, 용탕에서 판을 직접 연속주조할 생각으로 twin roll방식의 연속주조기를 제작하고 실험했으나 성공을 거두지 못했다. 연속주조기술은 1913년에 독일의 A.H.Pehrson에 의해 연속주조기가 고안되고 1950년대 후반부터 설비 및 안전 측면에서 유리한 횡형 연속주조기가 주로 사용되었고 다이스재로 흑연 몰드가 사용될 수 있다는 것을 발견한 이래 급속히 발달하게 되었다. 주철의 연속주조기술을 최초로 개발한 것은 구 소련이며, 1952년 A. N. Mjassojedov 등에 의해 수직형 연속주조기를 사용해서 붕재가 제조되고, 이보다 늦게 서독에서도 A. Niedenthal 등에 의해 주철관의 연주가 행하여졌다.[1] 주철연속주조법은 형상에

는 제한이 있으나, 절삭성이 우수하고 가격이 저렴하며 신뢰성이 있는 제품으로 알려져 있다. 또한 수축공 등의 내부결함이 없고, 비철과는 달리 흑연의 팽창으로 인하여 crystallizer와의 접촉이 우수하여 냉각이 균일하게 이루어져 내부까지 균일하고 치밀한 조직을 나타내 내압성이 우수하고 피로특성 또한 좋다.

한편, 구상흑연주철은 주방상태에서 구상흑연을 정출하는 주철로 주조성이 우수하며, 기계적 성질에 있어서 주강과 유사하여 오늘날 기계구조재료로 많이 사용되고 있는 재료이지만[2], 회주철에 비해 Chill화 경향이 크고 연속주조를 하는 경우에는 냉각속도가 빠르기 때문에 조직 제어에 문제점이 많다. 따라서, 본 연구에서는 연속주조법의 직경에 따른 미세조직과 기계적 성질의 변화를 사형주조의 그것과 비교 검토하여 구상흑연주철 연속주조법의 고유특성을 파악하고 상용화 연

한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan, 330-825 Korea)

\*한국기술교육대학교(Korea University of Technology and Education, Cheonan, 330-708 Korea)

<sup>†</sup>E-mail : tankchoi@kitech.re.kr

속주조시의 기초적인 공정변수 및 변수 선정기준으로 활용하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 연속주조

자체 제작한 연속주조기를 이용하여 연속주조주편을 제작하였으며, 그 개략도를 Fig. 1에 보였다. 주형으로는 흑연제 몰드를 사용하였고 이를 수냉 자켓에 결합시킨 crystallizer를 이용하여 연주를 하였다. 이 때의 수냉자켓 내부의 냉각수 압력과 유량은 2 kg/cm<sup>2</sup>과 3 m<sup>3</sup>/h이었다. 원탕의 조성은 고탄소 및 고규소의 과공정 조성으로 GCD 400 grade를 기준으로 용해하였으며, 각 주편에 대해 ICP-ES 분석한 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 출탕온도는 1530~1550°C로 하였고, 래들에서 Mg 5%의 Fe-Si-Mg-RE 합금 약 1.7%로 구상화처리를 하였으며 Ca/Si계 접종제 0.7%로 후접종을 하였다. 구상화처리를 마친 용탕은 1350~1450°C에서 보온로로 급탕되고 제품의 크기에 따라 용탕의 온도를 약 1250~1400°C로 관리한 상태에서 연주를 실시하였다. 직경에 따른 연속주조 주편의 특

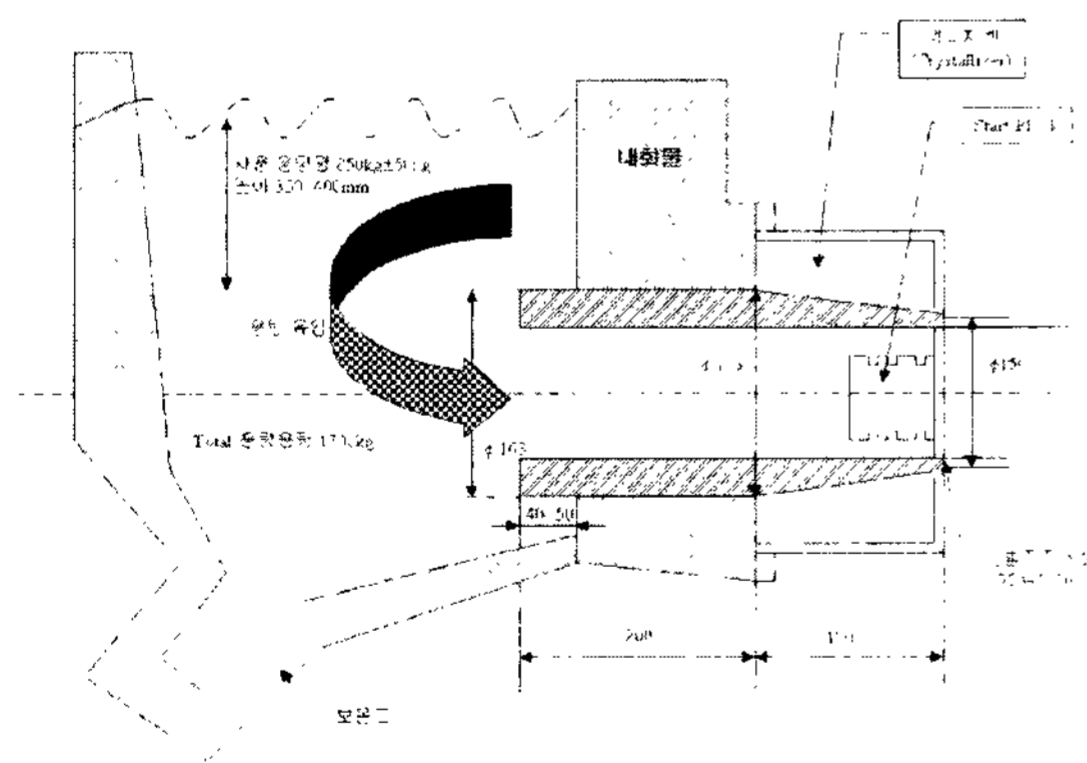


Fig. 1. Schematic diagram of continuous casting unit.

Table 1. Chemical compositions of test specimens(wt%)

Process		C	Si	Mn	P	S	Mg
Continuous casting	26	3.64	3.11	0.29	0.045	0.010	0.050
	60	3.37	2.95	0.27	0.047	0.058	0.037
	100	3.51	3.10	0.23	0.029	0.011	0.029
Sand casting	26	3.40	2.55	0.24	0.042	0.014	0.036
	60	3.35	2.60	0.24	0.039	0.022	0.036
	100	3.20	2.57	0.24	0.042	0.014	0.039

성을 조사하기 위하여 직경이 각각 26, 60, 100 mm인 환봉으로 연속주조를 하였으며, 직경에 따른 주조속도는 600, 400, 300 mm/min이었다. 냉각속도의 차이로 인한 미세조직과 기계적 성질의 차이를 연주재와 비교하기 위하여 각각의 직경에 대하여 Furan주형에서 사형주조를 하였다.

### 2.2 미세조직 관찰

연속주조한 환봉을 주조 방향에 대해 수직으로 절단한 단면에서 위치에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다. 흑연조직에 대해서는 시편을 부식하지 않은 상태에서 Image analyzer를 이용하여 흑연립의 수와 입도를 분석하였고 단면을 표면에서 중심까지 3~4구간으로 구분하고 각 구간에서 20회 이상 측정하여 평균값을 구하였다. 사형주조 시편에 대해서도 동일한 분석을 하였다.

### 2.3 기계적 성질 평가

환봉의 직경에 따른 기계적 성질과 경도값(Brinell 경도 측정 조건: 3000 kg load, 10 mm indenter diameter, 30 sec load time)을 측정하였다. 환봉의 직경에 따라 시편 내의 위치를 3~6단계로 나누고 각각 3회 이상 측정였다. 연속주조품과 사형주조품에 대해 인장시험을 행하여 인장 강도, 항복 강도, 연신율을 측정하였다. 시편은 주조방향에 평행하게 채취하였으며, 상온에서 인장시험을 행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 직경에 따른 연속주조시편의 조직

#### 3.1.1 기지조직

Fig. 2, 3 및 4는 직경에 따라 연속주조한 시편을 표면에서부터 중심부까지 4구간으로 나누어 관찰한 광학현미경 미세조직 사진이고 Fig. 5는 직경에 따라 사형주조한 시편의 미세조직이다.

연속주조한 직경 26 mm 시편에서는 표면에서부터 중심부까지 많은 수의 미세한 흑연과 수지상 형태의 펄라이트, 그리고 세멘타이트가 관찰된다. Fig. 6은 직경 26 mm 시편을 육안으로 관찰한 조직으로서, 시편 표면으로부터 중심을 향한 흰색 선이 뚜렷하게 관찰되며, Loper 등은 이러한 조직을 일러 'spiking(釘狀)' 조직이라고 하였다. Spiking 조직은 일반적으로 백주철에

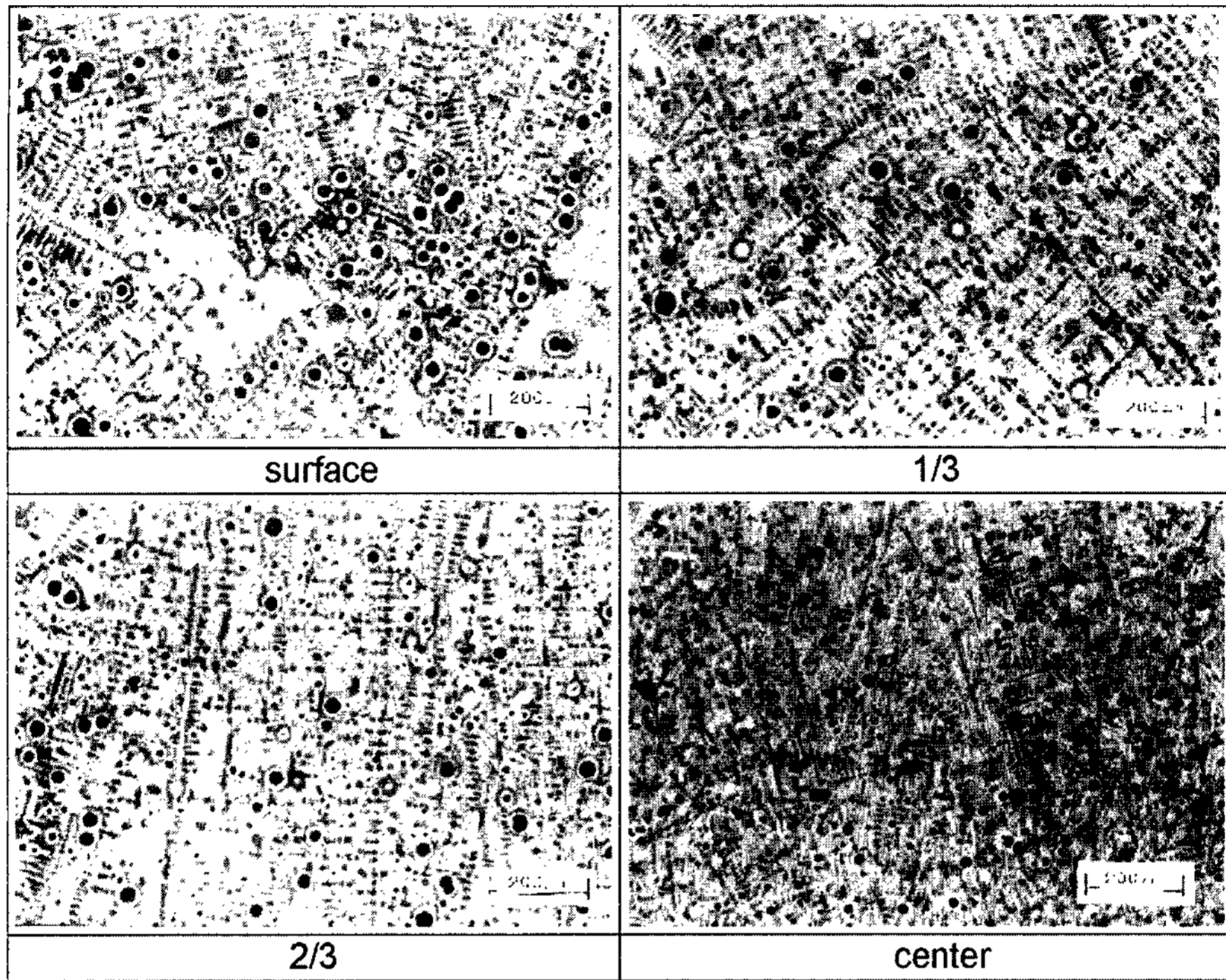


Fig. 2. Optical microstructures of continuous cast specimen with 26 mm in diameter from surface to center region.

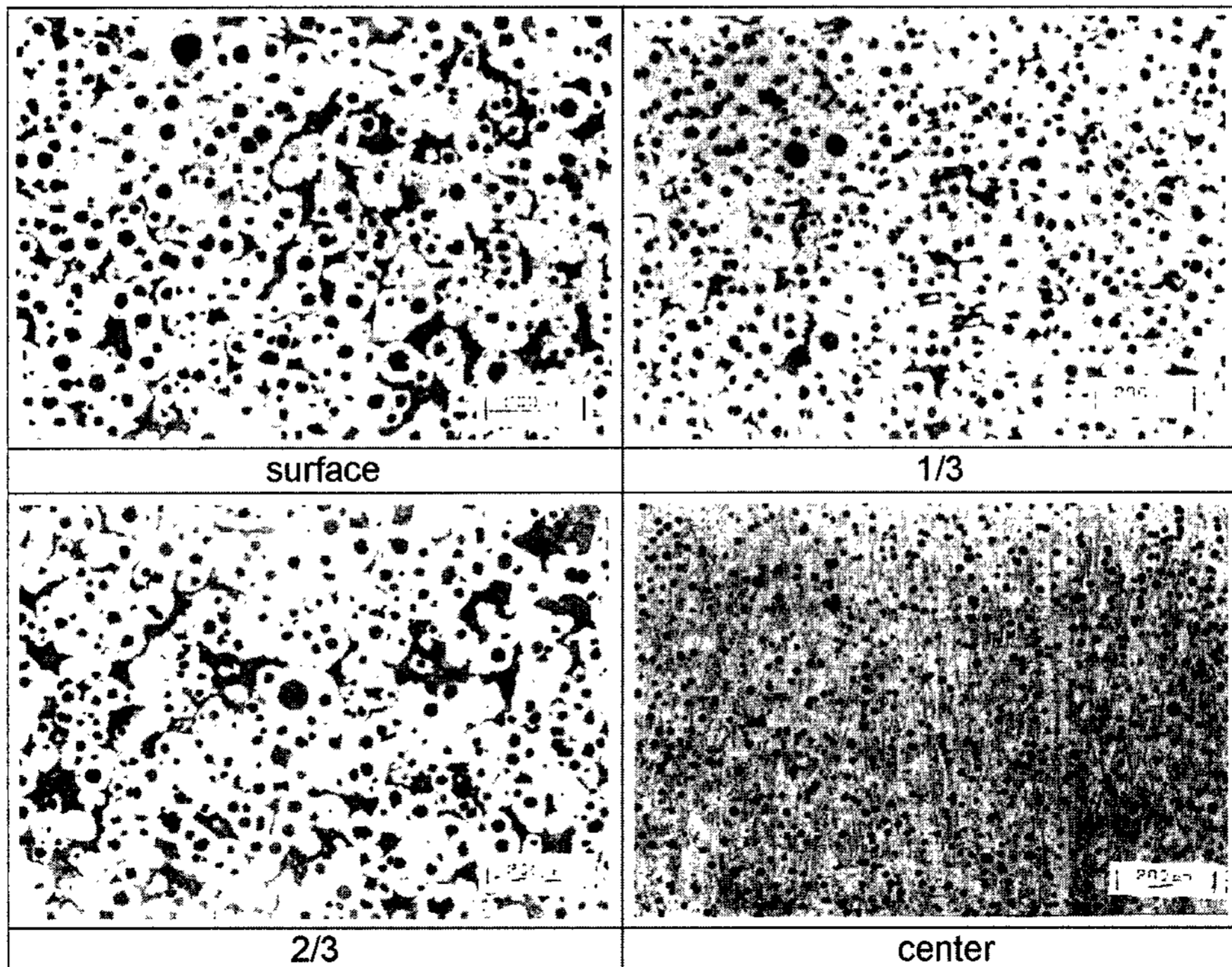


Fig. 3. Optical microstructures of continuous cast specimen with 60 mm in diameter from surface to center region.



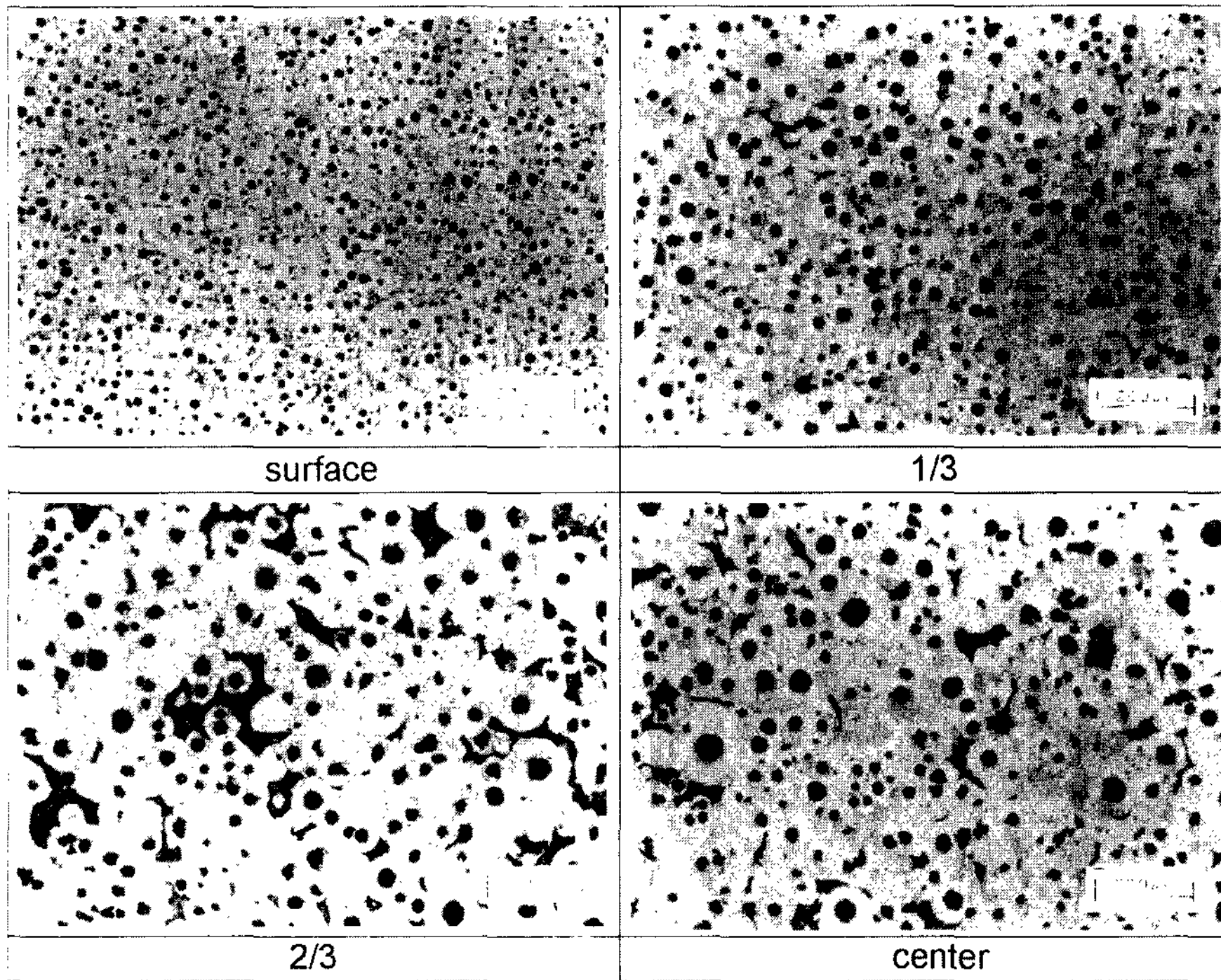


Fig. 4. Optical microstructures of continuous cast specimen with 100 mm in diameter from surface to center region.

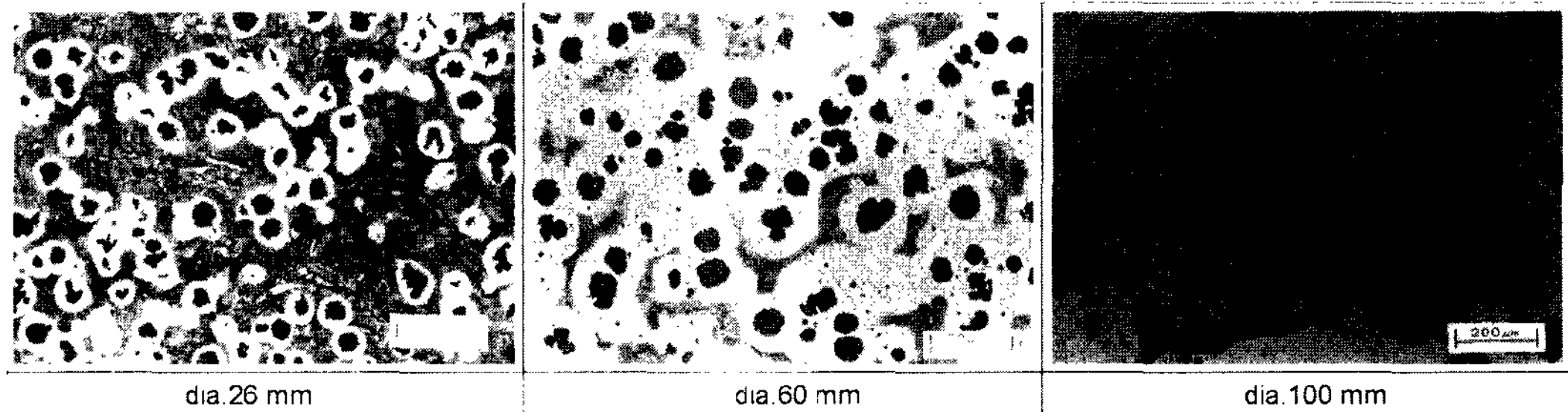


Fig. 5. Optical microstructures of sand casting specimens.

서 나타나는 수지상의 성장 조직을 가리키며, 응고 중에 발달한 하나 또는 여러 개의 조대한 수지상 결정으로 이루어진 백주철 조직을 말한다.[3-5] 구상흑연주철에서 나타나는 수지상 조직은 크게 high temperature dendrite와 chill dendrite로 나눌 수 있다. High temperature dendrite는 냉각이 느리고 온도구배가 최소 값인 곳에서 나타나고 chill dendrite는 급격한 온도구배로 chill 부근의 급랭된 구역에서 나타난다.[4] 즉, 직경 26 mm 시편의 응고양상은 다음과 같다고 사료된다. 용액이 냉각됨에 따라 초정도로 흑연이 정출하는데, 큰 냉각속도로 인하여 많은 수의 흑연이 핵생성된

다. 온도가 공정온도가 이르게 되면, 오스테나이트/흑연 공정에 비해 오스테나이트/세멘타이트 공정반응이 우선적으로 일어나기 시작한다. 먼저 세멘타이트 플레이트가 생성된 후 여기에서부터 오스테나이트 수지상이 핵생성되어 성장하게 된다. 이것은 다시 세멘타이트를 불안정화하여 성장하게 만든다. 오스테나이트 수지상은 온도구배의 방향을 따라 성장하므로 시편의 중심을 향하여 형성되고 그 사이를 메우는 세멘타이트로 인하여 spiking 조직이 나타나게 된 것이다. 따라서, 여기에서 보이는 수지상은 chill dendrite로 판단된다. 냉각이 진행됨에 따라 오스테나이트 수지상은 이후 공

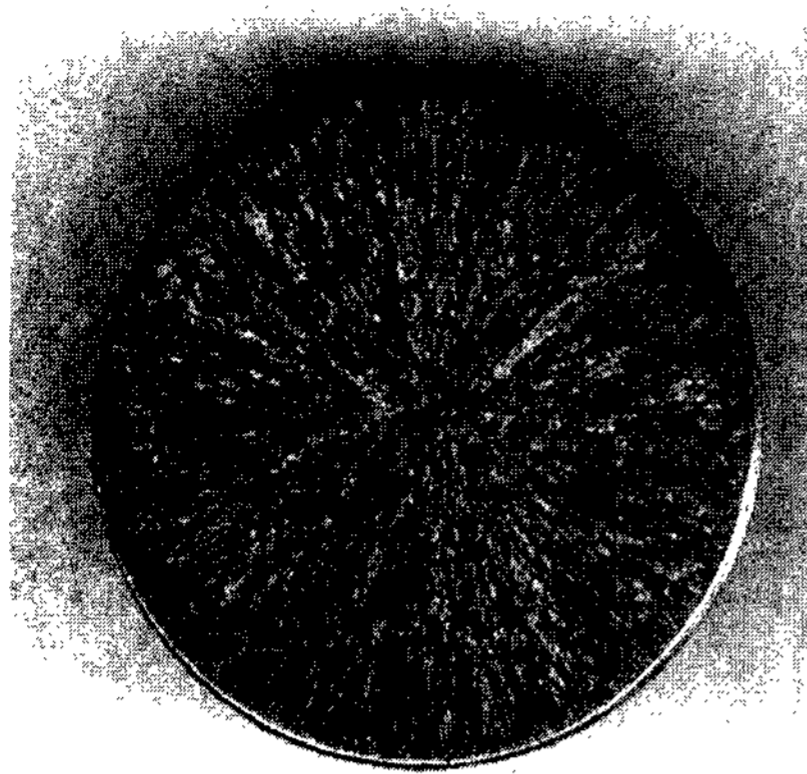


Fig. 6. Macrostructure of continuous cast specimen with 26 mm in diameter.

석변태를 거치면서 탄소확산시간의 부족으로 인하여 미세한 펄라이트로 변태한 것이다. 이와 같은 조직은 수지상 조직의 파단에 대한 저항성, 미세한 흑연과 세멘타이트 조직으로 인하여 매우 높은 경도와 인장강도, 낮은 연신율을 가질 것으로 예측된다. 반면, 같은 직경의 사형주조 시편에서는 상대적으로 느린 냉각속도로 인하여 조대한 흑연과 많은 양의 펄라이트 조직이 관찰되었다.

Fig. 3과 4는 각각 직경 60, 100 mm 시편의 미세조직이다. 전체적으로 펄라이트가 약간 섞인 페라이트 기지임을 알 수 있다. 60 mm 시편을 육안으로 관찰하면, 26 mm 시편과 마찬가지로 하얀 실선이 표면으로부터 중심을 향하여 뻗어있는 것을 관찰할 수 있으며, 26 mm 시편과는 달리 표면으로부터 약 15% 정도에서 그치고 그 안쪽은 이러한 조직이 나타나지 않는다. 이러한 하얀 실선이 나타나는 부분에서는 직경 26 mm 시편에서와 같은 탄화물이 관찰되었다. 이것은 26 mm 시편과 마찬가지로 표면부에 부분적으로 오스테나이트 세멘타이트 공정반응이 일어났음을 말해준다. 100 mm 시편의 경우에는 탄화물이 전혀 보이지 않고 시편 전체에 걸쳐 페라이트 기지를 가지고 있다. 연속주조의 특성상 시편은 표면부가 응고되면서 crystallizer를 빠져나오게 된다. 이 때 응고된 표면부는 급냉으로 인하여 spiking 조직이 형성되고 중심부는 응고되지 않은 상태가 된다. 인발이 진행되면서 중심부는 응고하게 되고 이 때 응고잠열을 방출하게 된다. 이러한 응고잠열을 이미 응고된 표면부가 흡수하면서 조직에 변화를 가져오는데, 이러한 현상을 자기소둔(self annealing)효

과라 한다. 자기소둔효과란, 구상흑연주철의 금형주조에 있어서 이형시간의 제어에 따라 일단 chill화한 부분을 주물 자신이 보유한 잠열로 흑연화시키는 것을 말한다.[6] 백선화된 조직에 자기소둔이 일어나면, 탄화물은 소멸되고 대신 temper carbon이 형성된다. 60 mm 시편의 경우에는 표면부에 형성되었던 세멘타이트가 자기소둔효과로 인하여 어느 정도 소멸하였으나 잠열 및 시간 등이 충분치 않아 탄화물로 잔류하였고 오스테나이트 조직은 모두 페라이트화 되었다. 100 mm 시편에서는 표면부에 이러한 세멘타이트가 보이지 않는 것으로 미루어보아 현재의 작업조건에서는 60~100 mm 구간에 표면부에 탄화물이 존재하지 않는 임계직경이 있을 것이라 판단되었다. 구상흑연주철에서 존재하는 탄화물은 주조품의 성질에 직·간접적인 영향을 미치는데, 기계적 성질을 악화시켜 가공성 등을 저하시킬 뿐만 아니라 흑연 성장을 저해하여 내부 기공의 원인이 되기도 한다.[7] 따라서, 건전한 연속주조품을 주조하기 위해서는 crystallizer의 설계 및 공정인자 관리, Fading 효과 방지를 위한 용탕의 정련 및 접종기술 등에 대한 보다 많은 연구가 필요할 것이다.

일반적으로 오스테나이트의 공석변태에는 탄소의 확산이 수반되기 때문에 빠른 냉각에서는 오스테나이트가 pearlite로 변태하고 더 느린 냉각에서는 ferrite가 생성된다.[8] 사형주조의 결과는 이것을 잘 보여주고 있다. 즉, 냉각이 가장 빠른 26 mm 시편에서는 시편 전체에 걸쳐 pearlite의 분율이 높은 반면, 이보다 냉각이 느린 60, 100 mm 시편에서는 상대적으로 ferrite의 분율이 높다. 하지만, 연속주조 시편의 경우 같은 제품에서 단면 내 위치에 따라 냉각속도가 달라지는데, 냉각속도에 따른 pearlite 분율의 변화는 사형주조와는 다른 경향을 나타낸다. 60 mm와 100 mm 시편 모두 냉각속도가 빠른 표면부에는 거의 100% ferrite이지만, 중심부에 가까워질수록 pearlite 분율이 증가한다. 이는 냉각속도보다는 흑연립수의 영향으로 생각된다. 즉, 표면부에서와 같이 흑연립수가 증가하면, 탄소의 확산 거리가 상대적으로 짧아지게 되어 공석 온도구간에서 ferrite로의 완전한 변태를 조장하게 된다. 이는 흑연립수 관찰결과와 잘 일치한다.

3.1.2 흑연조직

Fig. 7의 (a)는 1 mm<sup>2</sup>당 흑연립의 수를 조사한 결과이다. 전체적으로 연속주조품의 흑연립수가 높게 나타난 것을 알 수 있다. 연속주조품의 흑연립 분포의 특징

은 표면부에 상대적으로 많은 수의 흑연이 분포하고 중심에 가까워짐에 따라 감소하여 그 수가 안정화된다는 것이다. 표면에서는 주편의 직경에 따라 500~700/mm<sup>2</sup>의 흑연립 수를 보이다가 반경의 50% 이상 중심으로 들어가면, 직경 60 mm의 경우 ~300/mm<sup>2</sup>, 직경 100 mm의 경우 ~200/mm<sup>2</sup>의 흑연립 수로 안정화된다. 표면부에 많은 흑연이 나타나는 것은 표면부의 냉각속도가 중심부에 비해 상대적으로 크기 때문에 공정 cell의 수가 증가하기 때문이다. 그러나 직경 26 mm의 경우에는 전 단면에서 거의 일정한 값을 보이고 있다. 사형주조의 경우 직경이 작은 경우 상대적으로 작은 값이지만 유사한 경향을 보이고, 직경이 100 mm 이상에서는 전체적으로 거의 일정한 흑연립 수를 보이고 있다. 사형주조의 경우 26 mm를 제외하면 모두 100/mm<sup>2</sup> 이하의 값을 가진다.

Fig. 7의 (b)는 구상화된 흑연의 평균 직경을 조사한 결과이다. 직경 26 mm의 연주 시편은 표면에서부터 중심까지 평균 직경 10 μm 내외의 아주 미세한 흑연을 가지고 있다. 직경 60 mm의 경우 표면부의 흑연은 12 μm 정도의 입경을 가지고, 그보다 안쪽에서는

18~19 μm 내외의 값을 가진다. 직경 100 mm 이상에서는 표면부 흑연의 입도는 작은 직경의 그것과 큰 차이를 보이지 않으나 중심에 가까워짐에 따라 그 증가도가 커져서 20 μm 이상의 값을 가지게 된다. 사형주조에 있어서는 느린 냉각속도로 인하여 흑연이 충분한 성장조건을 가지게 되어 매우 조대화하였다. 흑연립 수와 입도는 흑연핵의 형성과 성장속도에 좌우되는데, 연속주조에 있어서의 빠른 냉각속도는 과냉도를 크게 하고, 공정 cell의 수를 증가시킨다. 이것으로 인하여 사형주조에 비해서 연속주조에서는 다량의 미세한 흑연이 관찰되는 것이다.

### 3.2 기계적 성질

#### 3.2.1 경도 시험 결과

주방상태의 연속주조 시편과 사형주조 시편의 단면에서 Brinell 경도를 측정된 결과를 Fig. 8에 보였다. 전체적으로 사형주조에 비해 연속주조 시편이 높은 경도값을 나타낸다. 이는 빠른 냉각속도로 인한 결정립 미세화, 미세한 흑연의 정출 등으로 인한 것으로 사료된다. 직경 26 mm의 경우 연속주조와 사형주조 모두 큰 직경에 비해 높은 경도값을 보이고 있다. 특히 연속주조 시편의 경우 표면부에서 HB 400 이상의 높은 경도를 보이고 있다. 직경 26 mm의 미세조직 관찰결과 시편 전체에 분포한 펄라이트와 공정세멘타이트 조직으로 인하여 높은 경도를 나타낸 것이다. 직경 60 mm와 100 mm의 경우 연속주조 시편은 HB 177~186으로 시편 전체에 있어서 균일한 경도값을 나타내고 있다. 사형주조의 경우 직경이 증가함에 따라 시편 전체의 경도값이 감소하는 모습을 보이고 직경

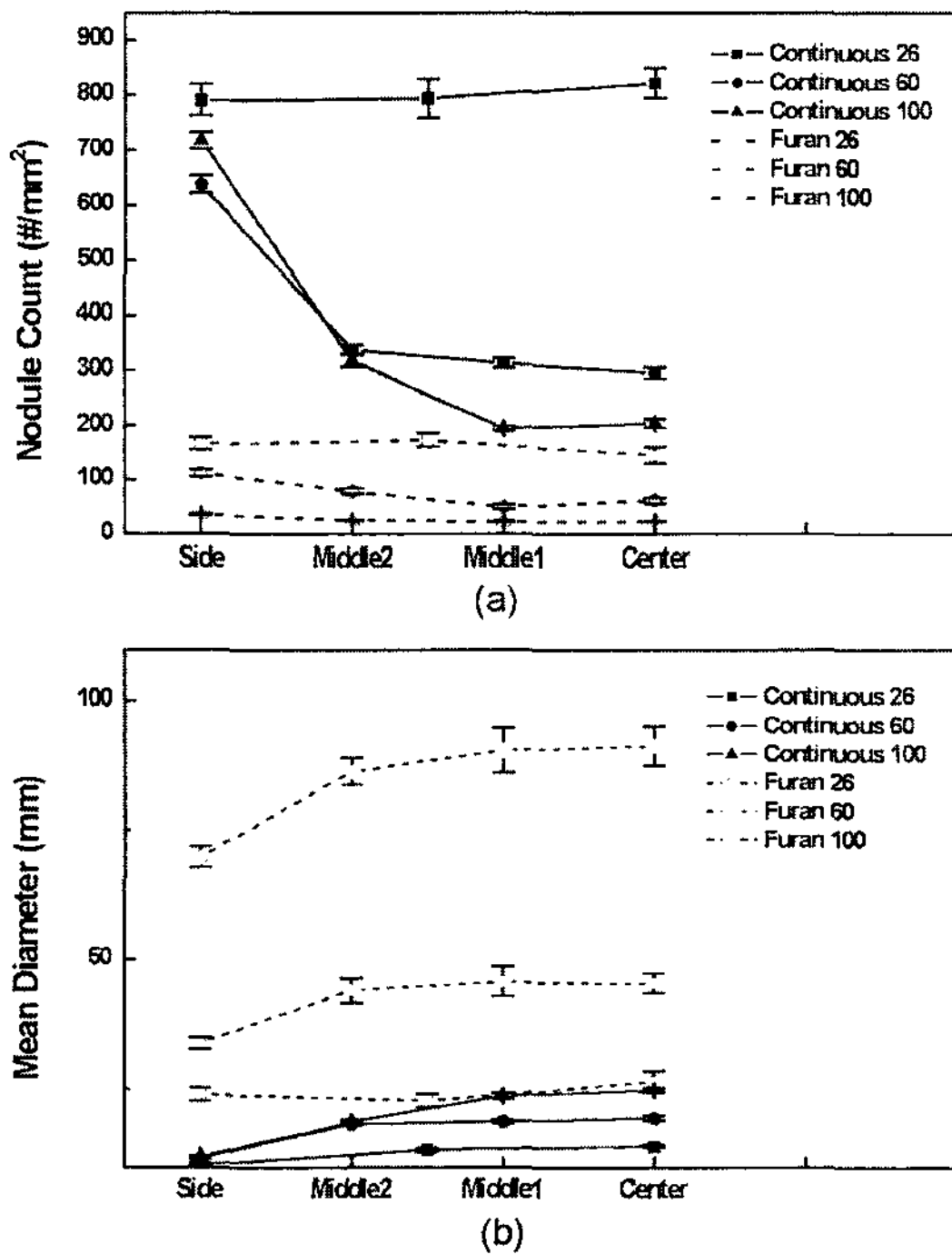


Fig. 7. Variations of graphite nodule morphology in as-cast specimens. (a) Nodule count (#/mm<sup>2</sup>) (b) Mean diameter of graphite nodule (μm)

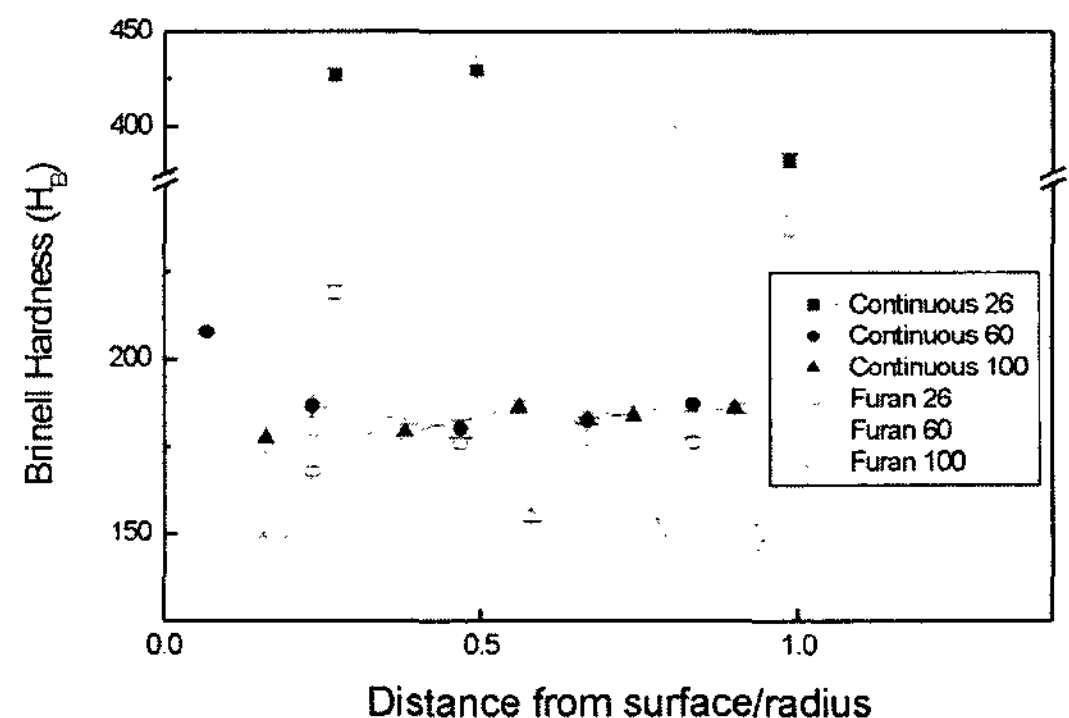


Fig. 8. Variations of Brinell hardness as a function of distance from specimen surface.



100 mm의 경우 HB 146~156으로 안정화된다. 다만, 직경 60 mm 연속주조시편의 표면부에서는 약간의 탄화물이 존재하기 때문에 HB 207 정도의 값을 보이는데, 26 mm에서와 비교하여 경도값이 높지 않은 것은 탄화물의 분율이 크지 않기 때문이다.

3.2.2 인장 시험 결과

Fig. 9는 연속주조 시편과 사형주조 시편의 인장시험

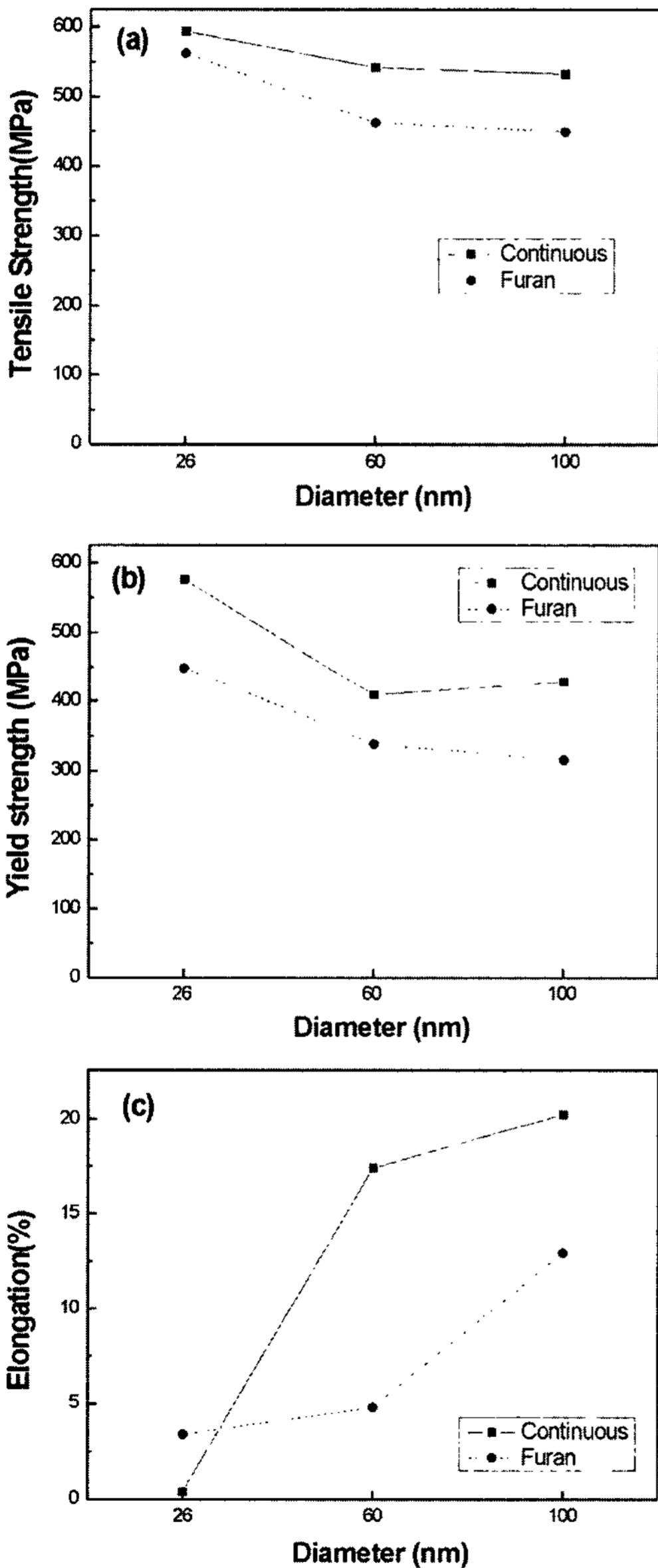


Fig. 9. Variations of mechanical properties as a function of specimen diameter. (a) Tensile strength (b) Yield strength (c) Elongation

결과이다. 모든 시편이 인장강도 400 MPa를 상회하였으며, 연속주조품의 경우는 모두 500 MPa 이상의 우수한 인장강도를 나타내었다. 일반적으로 구상흑연주철에서 인장강도 500 MPa 이상을 얻기 위해서는 용탕에 펄라이트화 조장원소인 Cu 등을 첨가하여 기지조직의 펄라이트 분율을 높여야 한다. 이러한 경우 인장강도는 증가하지만, 펄라이트는 연성이 떨어지기 때문에 연신율의 감소가 불가피하게 된다. 본 실험에서는 사형주조시편에서 이러한 현상이 관찰되었다. 하지만, 연속주조시편의 경우에는 높은 인장강도와 우수한 연신율을 동시에 보여주고 있다. Osafune 등에 의하면, 흑연의 입경과 페라이트의 입경 사이에는 상관계수 R=0.91의 강한 의존관계가 존재한다.[9] 이러한 관계는 주조조건이나 화학성분, 열처리조건 등에 관계없이 존재한다. 연속주조에서는 초기의 급랭으로 형성된 많은 수의 미세한 흑연이 공석변태시 기지조직의 페라이트화를 조장하였고, 동시에 결정립 미세화 효과를 가져오기 때문에 우수한 인장강도와 연신율을 동시에 나타낸 것이다. Fig. 10

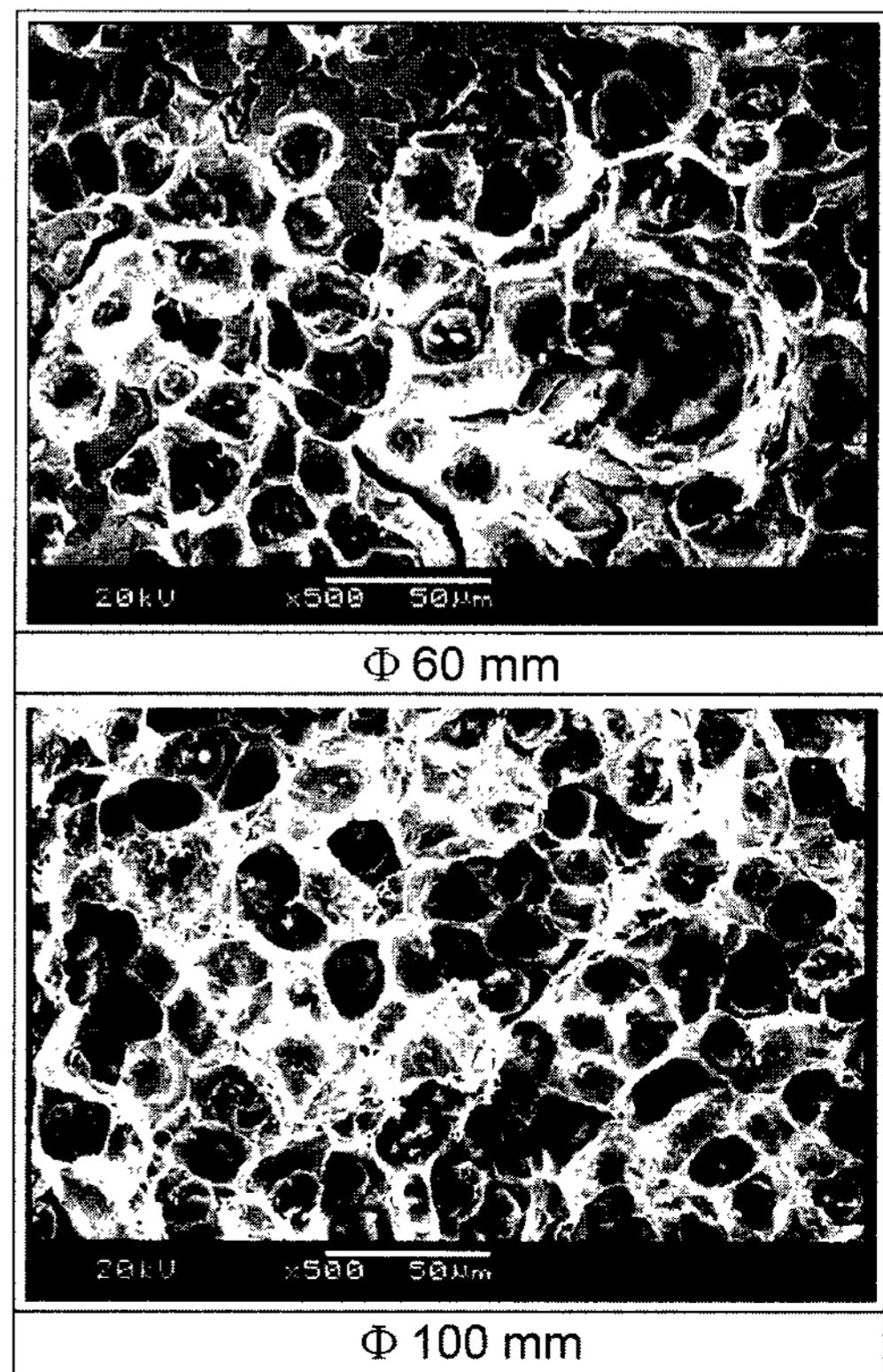


Fig. 10. SEM morphology of fractured surface of continuous cast tensile specimen.

은 연속주조 시편의 인장 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진으로서 미세 흑연립을 둘러싸고 있는 기지 조직이 전형적인 연성과괴 형태를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

GCD 400 grade의 구상흑연주철을 직경 26, 60, 100 mm의 환봉으로 주조속도를 각각 약 600, 400, 300 mm/min으로 하여 연속주조하고, 그 미세조직과 기계적 성질을 사형주조한 것과 비교관찰한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 직경 26 mm 연제품에서는 초정흑연 정출 후에 오스테나이트세멘타이트 공정반응이 일어나 흑연+페라이트+세멘타이트의 혼합조직이 나타났다. 이로 인하여 매우 높은 인장강도와 낮은 연신율을 나타냈다.

2. 직경 60 mm 연제품에서는 전체적으로 대부분 ferrite 조직이었으며, 약간의 탄화물이 표면층에 존재하였다. 직경 100 mm 연제품에서는 탄화물이 전혀 존재하지 않는 완전한 ferrite 조직을 나타내었다. 현재의 작업조건에서는 60~100 mm 구간 내에 탄화물이 형성되지 않는 임계직경이 존재할 것으로 판단된다.

3. 탄화물이 존재하지 않는 조직에서는 구상흑연의 다량 정출과 미세화, 기지조직의 페라이트화, 페라이트 결정립의 미세화 등으로 인하여 매우 우수한 인장강도와 연신율을 동시에 얻을 수 있었다.

4. 탄화물이 형성되지 않고 전체적으로 균일한 조직을 제조하기 위해서는 crystallizer의 설계 및 공정변수 제어, Fading 효과 방지를 위한 용탕의 정련 및 점중 등에 대한 보다 많은 연구가 필요할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Japan Foundrymen's Society : "Case Iron Handbook", (1999), 1571-1587.
- [2] S. Y. Kim, J. H. Hong, C. S. Kang and H. Y. Ra: "Case Iron Engineering", (1996) 257.
- [3] C. R. Loper, Jr., R. W. Heine, R. W. Reesman and B. H. Shah: AFS Trans., "Thermal analysis of ductile iron", 75 (1967), 541-547.
- [4] C. R. Loper, Jr. and R. W. Heine: AFS Trans., "Dendritic structure and spiking in ductile iron", 76 (1968), 547-554.
- [5] T. W. Parks and C. R. Loper, Jr.: AFS Trans., "A study of the conditions promoting dendritic growth in ductile iron", 77 (1969), 90-96.
- [6] Japan Foundrymen's Society: "Permanent mold Casting of Cast Iron", (1976), 109-110.
- [7] ASM International: "ASM Specialty Handbook: Cast irons", (1996), 66.
- [8] G. S. Cole: AFS Trans., "Solidification of Ductile Iron", 80 (1972), 335-348.
- [9] Y. Osafune and Y. Tanaka: Journal of JFS, "Grain Refinement and Tensile Properties of Ferritic Spheroidal Graphite Cast Iron", 69(4) (1997), 309-315.