

|||||||  
論 文  
|||||||

# 스트립캐스팅한 구상흑연주철박판의 합금원소 및 열처리에 따른 미세조직과 기계적 성질의 변화

이기락 · 나형용

## Effects of Alloying Elements and Heat Treatments on the Microstructures and Mechanical Properties of Ductile Cast Iron by Strip Casting

Gi-Rak Lee and Hyung-Yong Ra

### Abstract

Strip casting process is a new technology that makes a near net shape thin strip directly from molten metal. With this process, a large amount of energy and casting cost could be decreased from the abbreviation of reheating and/or hot rolling process. Ductile cast iron which has spheroidal graphite in the matrix is the most commercial and industrial material, because of its supreme strength, toughness, and wear resistance etc. But it cannot be produced to the thin strip owing to difficulty in rolling of ductile cast iron. In this study, ductile cast iron strips are produced by the twin roll strip caster, with different chemical compositions of C, Si, and Mn contents. And then heat-treated, microstructures and mechanical properties are examined. The microstructures of as-cast strip are that of white cast iron which consists of the mixture of cementite and pearlite, but the equiaxed crystal zone of the pearlite or segregation zone of cementite exists in the center region of the strip thickness, which cannot be observed in the rapidly solidified metallic mold cast specimens. This structure is supposed to be formed from the thermal distribution of strip and the rolling force. Comparing with the structures of each strips after heat treatment, increasing Si content makes smaller spheroidal graphite and more compact in the matrix, furthermore the less of Mn content makes the ferrite matrix be obtained clearer and easier. As a result of the tensile test of graphitization heat-treated strips, the yield strengths are about 250 MPa, the tensile strengths are about 430~500 MPa, and the elongations are about 10~13%. In the case of the strip which has the smaller and more compact spheroidal graphite in the ferrite matrix, the higher tensile strength and better drawability could be obtained. (Received April 12, 2000)

### 1. 서 론

일반적으로 금속재료는 잉고트 또는 슬라브 형태로 주조한 후, 열간 압연 또는 냉간 압연 등의 소성가공 공정을 거쳐 판재나 선재 등의 최종 제품으로 제조한다. 그러나 최근 철강업계에서는 재래식 공정을 개선하여 인건비를 절감하고 에너지 비용을 절감하기 위하여 Near Net Shape Casting기술의 하나인 스트립캐스팅(Strip Casting)법을 연구하고 있으며[1~4], 그 결과 스테인레스 강종에서는 일부 실용화를 목전에 두고 있는 실정이다.

한편 구상흑연주철은 용탕처리에 의하여 기지조직에 구상흑연을 정출시킨 재료로서 강도와 인성 및 내마모성이 우수하여 오늘날 기계구조재료로 많이 사용되고 있는 재료이나, 기존의 제조 방법으로는 박판으로 제

조하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 박판형태의 구상흑연주철을 제조하기 위하여 스트립캐스팅법을 적용하였다. 그러나 0.5~5 mm의 박판을 주조할 경우에는 급속응고 효과에 의하여 주방조직이 백주철 조직으로 응고하게 되므로[5] 흑연화 열처리 공정을 거치게 되는데, 본 연구에서는 열처리 조건과 C, Si 및 Mn 함량의 변화에 따른 주조조직 그리고 열처리 조직의 변화를 검토하고 기계적 성질과 성형성을 고찰하여 구상흑연주철박판을 제조하기 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 구상흑연주철의 금형주조

먼저 금형주조 시편의 조직과 스트립캐스팅한 시편

Table 1. The chemical compositions of Y-mold cast specimens (wt%)

| specimen No. \ element | C    | Si   | C.E  | Mn   |
|------------------------|------|------|------|------|
| case 1-1               | 3.43 | 2.61 | 4.30 | 0.10 |
| case 1-2               | 3.63 | 2.60 | 4.50 | 0.10 |
| case 2-1               | 3.45 | 2.59 | 4.31 | 0.20 |
| case 2-2               | 3.30 | 3.02 | 4.31 | 0.19 |
| case 3                 | 3.45 | 2.60 | 4.32 | 0.40 |

Table 2. Strip casting condition

|                      |                                |
|----------------------|--------------------------------|
| Melt Weight          | 3.9 kg                         |
| Tundish Nozzle       | carbon, 1-hole type<br>5.5 mmΦ |
| Roll Gap             | 1.1 mm                         |
| Roll Size            | 200 mmΦ × 100 mm               |
| Roll velocity        | 14.5 rpm                       |
| Plunging Temperature | 1450°C                         |
| Pouring Temperature  | 1210°C                         |

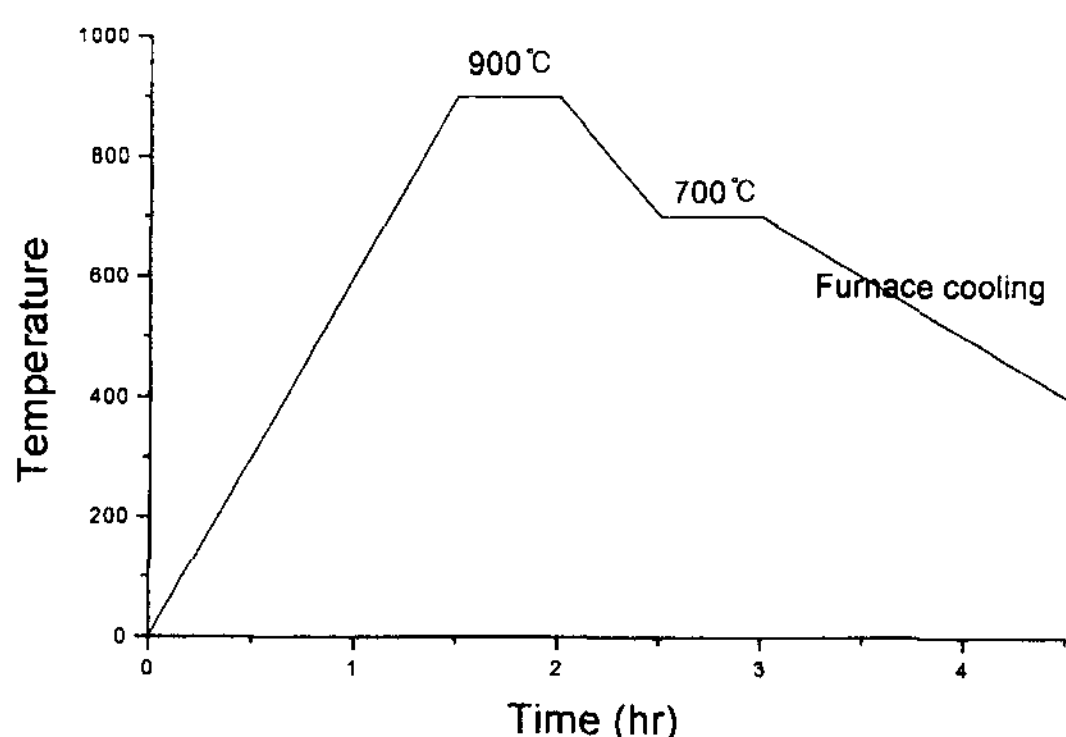


Fig. 1. Graphitization heat treating cycle

의 조직을 비교하기 위하여, 선철, Sorel metal, 전해철 및 Fe-Si을 마그네시아(MgO) 도가니를 설치한 50 kWh 유도로에 장입하여 용해한 후, 용탕온도 1450°C에서 흑연구상화제(TDCR4) 2% 및 접종제(Fe-78.5%Si) 0.3%를 플러저법으로 첨가하여 용탕을 처리하고, 두께 1.5 mm의 Y형 금형에 주입하였다. 이 때 화학 성분을 Table 1과 같이 조정하였으며, Fig. 1과 같은 흑연화 열처리를 통하여 구상흑연주철 박판을 제조하였다.

### 2.2 스트립의 주조

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 수직형 쌍롤 박판주조기(Vertical type Twin-roll Strip Caster)의 개략도이며, 주요공정변수는 Table 2에 나타내었다.

금형주조 실험한 경우와 마찬가지로 1450°C에서 흑

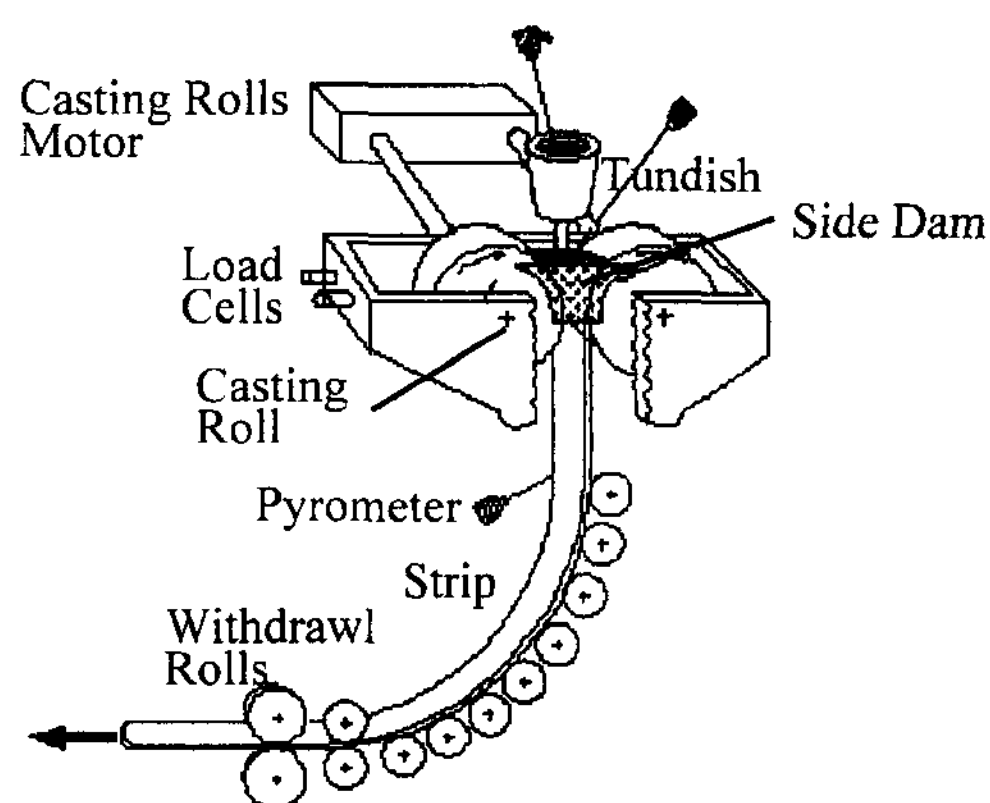


Fig. 2. Schematic diagram of lab. scale vertical type twin-roll strip caster

연구상화제(TDCR4 2%)와 접종제(Fe-Si 0.3%)를 플러저법으로 첨가하여 용탕을 처리한 후, 용해로에서 래들과 턴디쉬를 거쳐 롤로 용탕이 주입될 때까지의 온도 강하를 고려하여 액상선 온도보다 약 50°C 높은 1210°C에서 출탕하였다.

턴디쉬 중앙에는 내경 5.5 mm인 1-hole type의 흑연노즐을 설치하고, 주조시 용탕의 온도저하를 방지하기 위하여 턴디쉬를 계속 적열상태로 가열하였으며 롤이 회전하는 상태에서 용탕을 주입하였다. 그리고 스트립캐스팅법으로 주조한 각 시편의 화학조성을 Table 3에 나타내었다. 즉 strip 1은 C과 Si의 함량이 상대적으로 많은 경우이며, strip 2에는 Mn의 함량을 0.3wt%로 증가시킨 경우이다.

Table 3. The chemical compositions of strips (wt%)

| specimen No. \ element | C    | Si   | C. E. | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   | Mg    |
|------------------------|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|
| strip 1                | 3.46 | 3.0  | 4.46  | 0.09 | 0.049 | 0.01  | 0.04 | 0.01 | 0.027 |
| strip 2                | 3.24 | 2.54 | 4.09  | 0.31 | 0.047 | 0.013 | 0.03 | 0.03 | 0.004 |

### 2.3 인장시험과 드로잉 시험

흑연화 열처리를 시행한 후, 주조방향으로 시편을 절취하고, 같은 방향으로 인장 시험을 행하여, 항복강도, 인장강도, 연신율을 측정하였다. 인장시편은 ASTM 규격에 맞추어 제조하였으며, Cross Head Speed 2 mm/min에서 인장특성을 측정하였다.

그리고 열처리 시편을 Erichson 판재 성형기를 이용하여 딥드로잉(Dep Drawing) 시험하고 성형성을 측정하였다. Drawing Speed 0.3 mm/sec, 블랭크 홀딩력 50 kN 하에서 각 성분의 스트립 시편의 블랭크 크기 (D)는 동일한 100 mm 지름이었고 펀치의 지름(d)은 50 mm로서 드로잉비(D/d)는 2로 일정한 상태로 유지하여, 파단이 일어날 때까지의 최대 드로잉 변형율( $h/d$ )을 계산하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 화학조성에 따른 금형주조시편의 조직

Table 1에 표시한 금형주조시편의 현미경 조직 사진을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 이 조직사진에서

알 수 있는 바와 같이 금형주조시편은 화학조성의 변화에도 불구하고 모두 비슷한 크기의  $\mu$ 와 세멘타이트 조직의 백주철 조직을 나타내었다.

그러나 흑연화 열처리를 시행한 후에는 화학조성에 따라서 큰 차이를 나타내었다. 즉 Fig. 3의 열처리 조직에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 C함량과 동일한 Si함량(case 1-1, case 2-1, case 3)에는 Mn 함유량에 따라 기지조직의 페라이트화 정도에 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 0.1wt%Mn일 경우(case 1-1)에는 모든 기지조직이 완전 페라이트임에 비하여, 0.2wt% Mn인 경우(case 2-1)에는 미세한 펄라이트 조직이 잔류하였으며, 0.4wt%Mn인 경우(case 3)에는 펄라이트와 함께 미분해된 세멘타이트도 잔류하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 동일한 Mn량(0.2wt%) 일 때 Si 함유량의 증가에 따른 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 탄소당량이 동일한 경우(case 2-1, 2-2)라 할지라도 Si 함유량이 많은 경우(case 2-2)에는 구상흑연의 크기가 미세하고 구상흑연립 수가 훨씬 많은 것을 알 수 있다. 그러나 Si 함량은 동일하나 탄소함량을 증가시켜 탄소당량을 높인 경

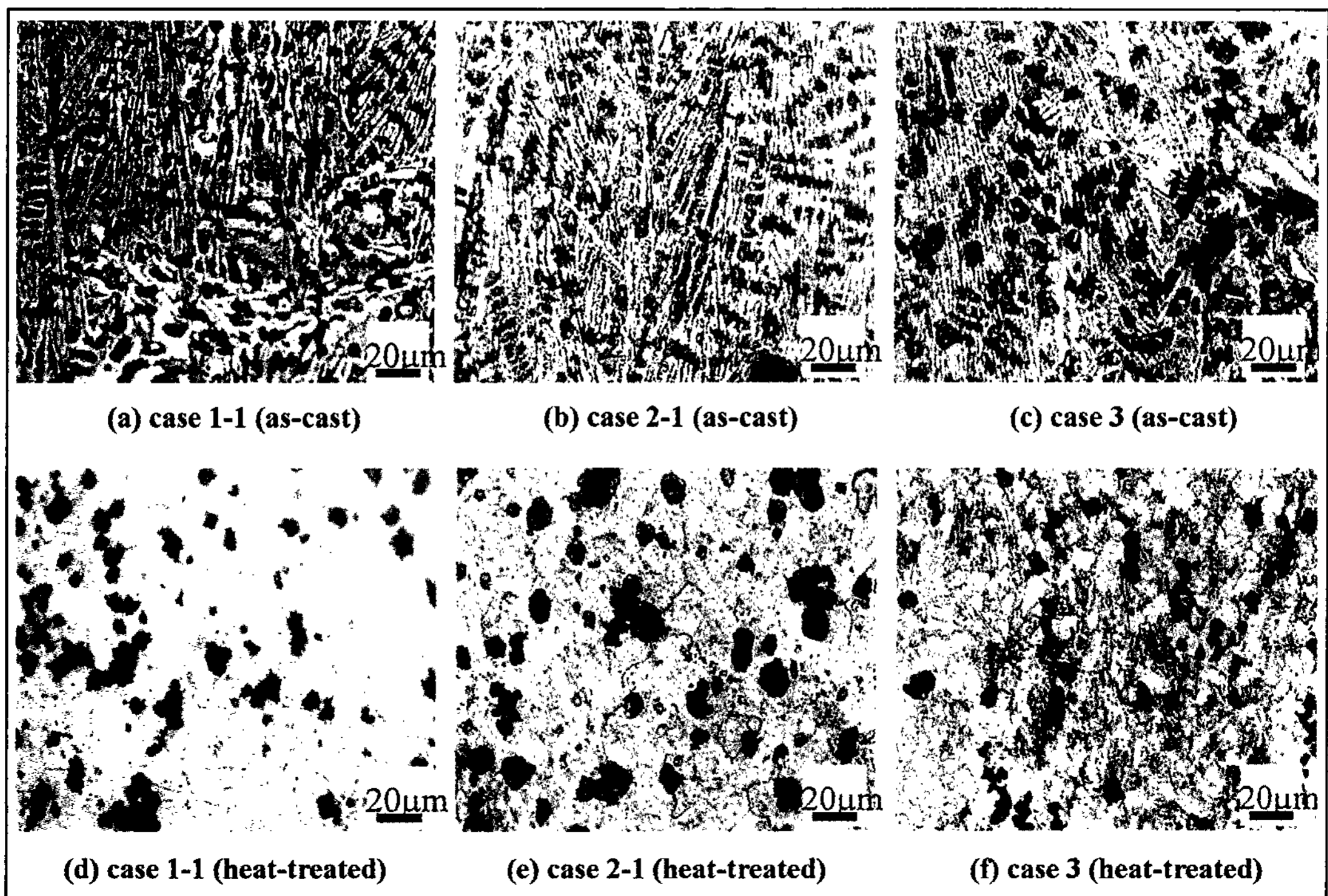


Fig. 3. The variations of microstructure in metallic mold-cast specimens 1.5mm thickness with increasing Mn-content in 3.45C, 2.6Si, 4.3 C.E iron



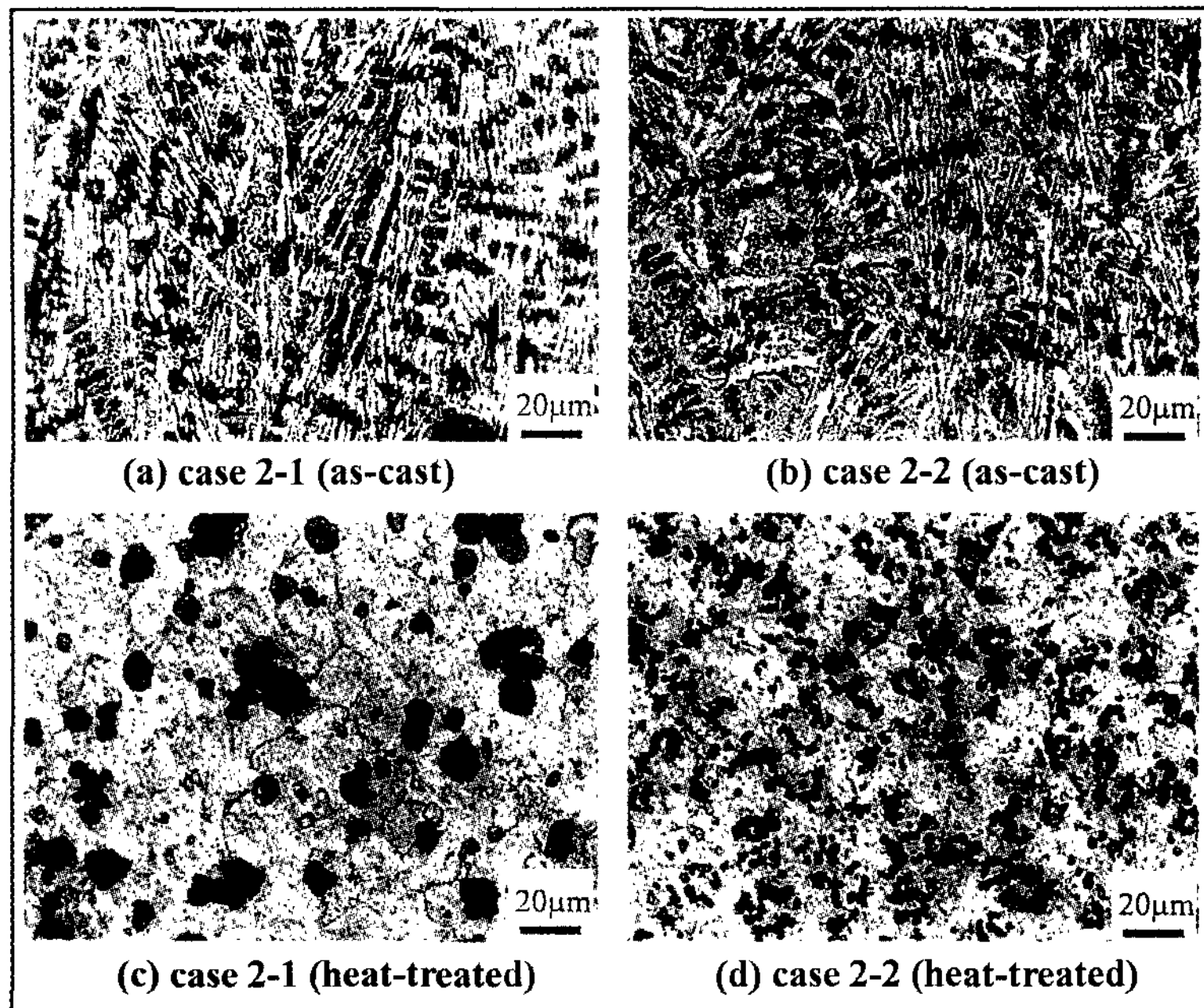


Fig. 4. The variations of microstructure in metallic mold-cast specimens 1.5 mm thickness with increasing Si-content in same 4.3 C.E iron (0.2wt% Mn)

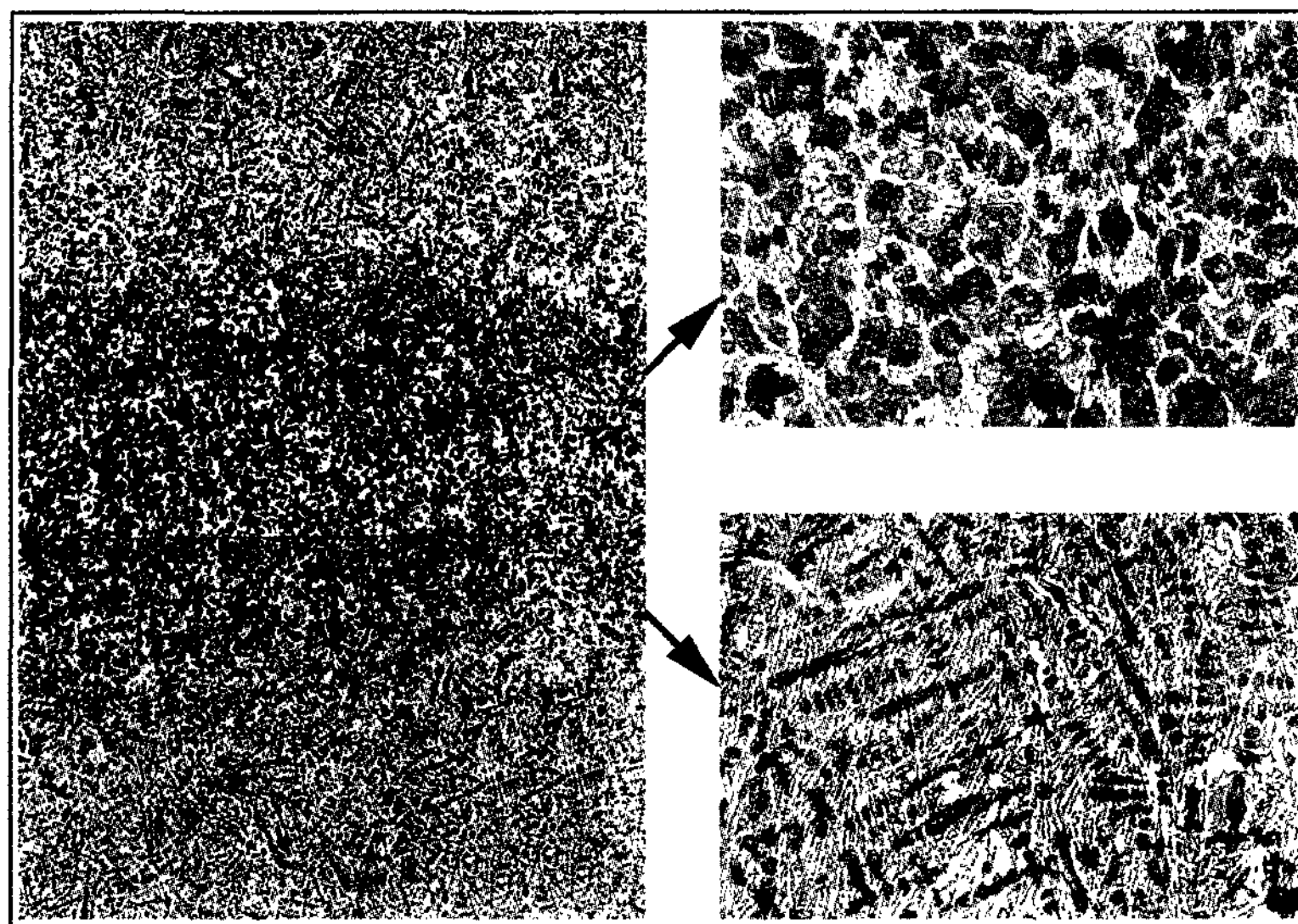


Fig. 5. Microstructure of as-cast strip specimen No. 1 (at w=0.7)

우(case 1-1, case 1-2)에는 주조조직이나 열처리 조직에 큰 차이가 없었다. 그리고 Mn 함량이 0.2% 이하인 금형주조시편에서는 제 1단 및 제 2단 흑연화 열처리 온도에서 30분간의 매우 짧은 시간동안 가열하더라도 완전 흑연화가 이루어진다는 사실을 알 수 있다.

### 3.2 스트립캐스팅 시편의 조직

#### 3.2.1 주방상태의 조직

스트립캐스팅한 구상흑연주철박판의 주방조직을 Fig. 5에 나타내었는데 이는 금형주조한 시편의 주방조직과 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 6에서 볼 수 있

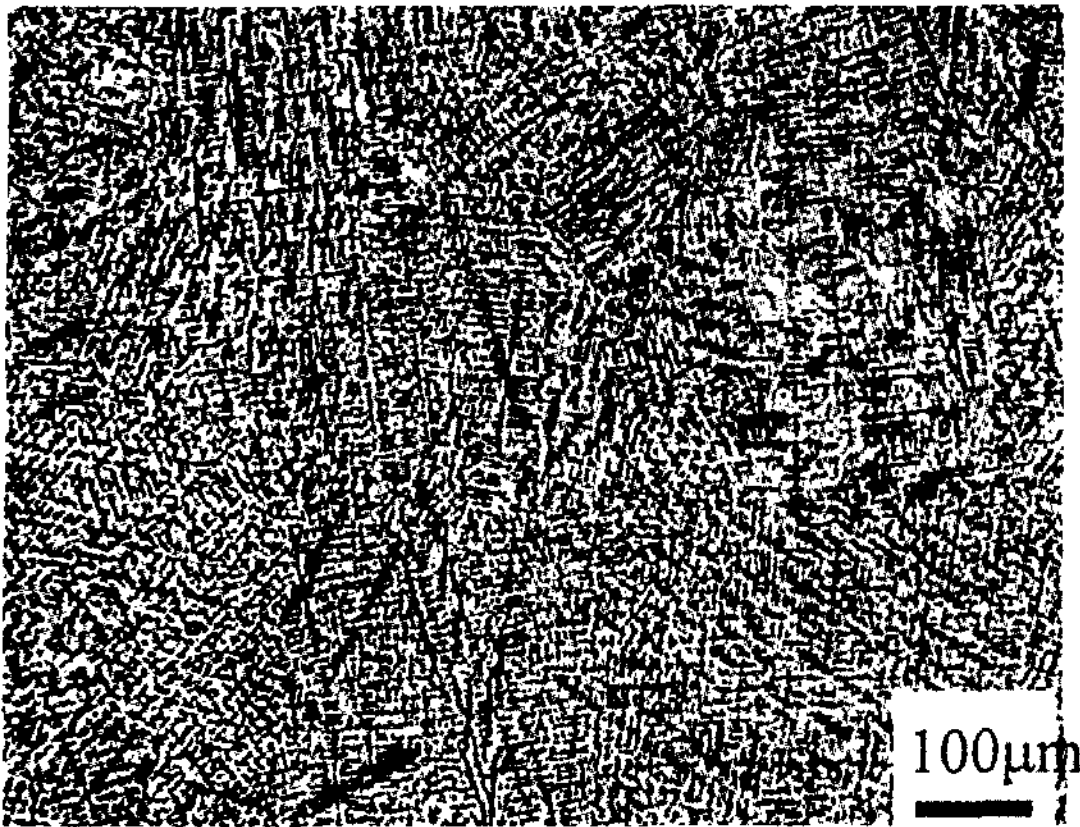


Fig. 6. Microstructure of center part in metallic mold-cast specimen

는 바와 같이 금형주조시편의 주방조직은 표면부로부터 두께 중심부에 이르기까지 초정  $\gamma$ 의 수지상정이 미세하게 성장하였으나, Fig. 5에 나타낸 스트립캐스팅 시편의 주방조직은 표면부에는 주상정 영역이 존재하고 두께 중심부에는 등축정영역이 생성된 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 스트립 캐스팅 재료의 특징[5]으로써, 회전하고 있는 롤 사이에 용탕이 주입되면 롤에 접촉된 용탕 표면에서는 초정  $\gamma$ 가 생성되어 수지상으로 성장할 것이나, 턴디쉬 노즐로부터 멀리 떨어진 위치( $w=0.7$ : 폭 방향의 중심부를  $w=0$ 로 놓고, 폭 방향의 가장자리를  $w=1$ 이라고 할 때)에서는 용탕의 응고 완료 위치가 RNP(roll nip point)보다 높게 되어 이미 생성된 응고층이 압축 응력을 받게 될 것이다[6]. 따라서 양쪽 롤면으로부터 성장하던 수지상정 선단부(dendrite)가 파쇄되어 부유정(free crystal)을 형성하고 미응고 용탕중으로 부상하게 되며, 이들 부유정이 미응고 액상 내에서 개별적으로 성장하여 등축정을 형성한다. 그러나 금형주조시편의 경우에는 응고과정 중 압축응력을 받지 않기 때문에 수지상정 사이에 부유정이 생성되지 않고 급속응고 되었으므로 표면에서 두께 중심부에 이르기까지 모두 수지상으로 응고되었다고 생각한다.

한 편, 용탕이 주입된 위치, 즉  $w=0$  단면의 주방조직(strip 2)을 Fig. 7에 나타낸다. 즉 이 경우에는 strip 1의 경우와 같이 두께 중심부에 등축정대가 형성되지 않고 세멘타이트가 형성되었음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 탄화물 안정화 원소인 Mn이 비교적 많이 함유된 경우에 잘 나타나는 현상으로서, 두께 중심부

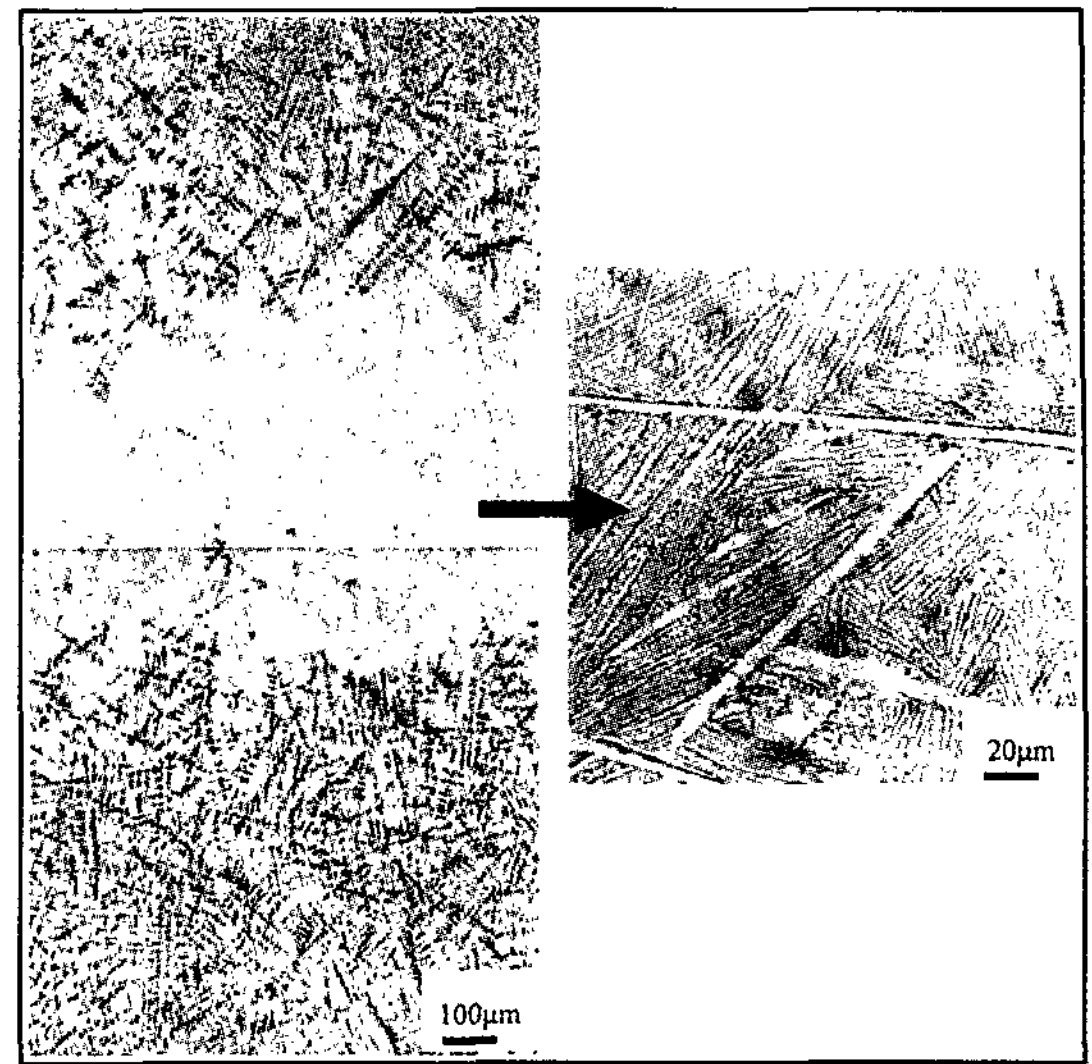


Fig. 7. Microstructure of as-cast strip specimen No. 2 (at  $w=0$ )

에 잔류한 액상이 과냉되어 세멘타이트 조직으로 응고한 경우이다. 즉, 턴디쉬 노즐 직하( $w=0$ )에서는 용탕의 온도가  $w=0.7$ 의 위치보다 높을 것이다. 따라서 만일 용탕의 응고완료 위치가 RNP보다 낮아질 경우에는 이미 생성된 응고층은 압축응력을 거의 받지 않고 RNP를 통과할 것이며, 또 스트립의 두께 중심부에 잔류한 액상은 RNP를 통과한 후에 과냉되어 세멘타이트로 응고한 것으로 생각한다.

### 3.2.2 열처리된 스트립의 조직

스트립캐스팅한 구상흑연주철 박판의 열처리 조직에서 완전 페라이트 조직을 얻을 수 있는 최적의 열처리 조건을 얻고자 열처리 시간을 여러 가지로 변경하여 실험한 결과, Fig. 1과 같은 열처리 조건을 얻을 수 있었다. 즉,  $900^{\circ}\text{C}$ 까지의 가열시간을 1.5시간으로 단축한 경우 각각의 열처리 온도에서 30분간의 유지시간과 냉각으로도 구상흑연과 페라이트 조직으로 변태하였다.

그리고 스트립 캐스팅한 구상흑연주철 박판을 Fig. 1과 같은 조건에서 열처리 한 경우 Fig. 8와 같은 미세조직을 얻었다. 즉 Fig. 8의 (a)는 strip 1의 열처리 조직으로서 매우 미세한 구상흑연립이 많이 석출하였으며 기지조직도 깨끗한 페라이트 조직을 나타내었다. 이는 이미 3.1절에서 설명한 바와 같이 Si 함량이 많은 경우로서 Si에 의하여 흑연화가 촉진된 결과라고 생각한다. 그러나 Fig. 8의 (b)는 Mn 함량이 많은 strip 2의 열처리 조직으로서 구상흑연립이 비교적 크



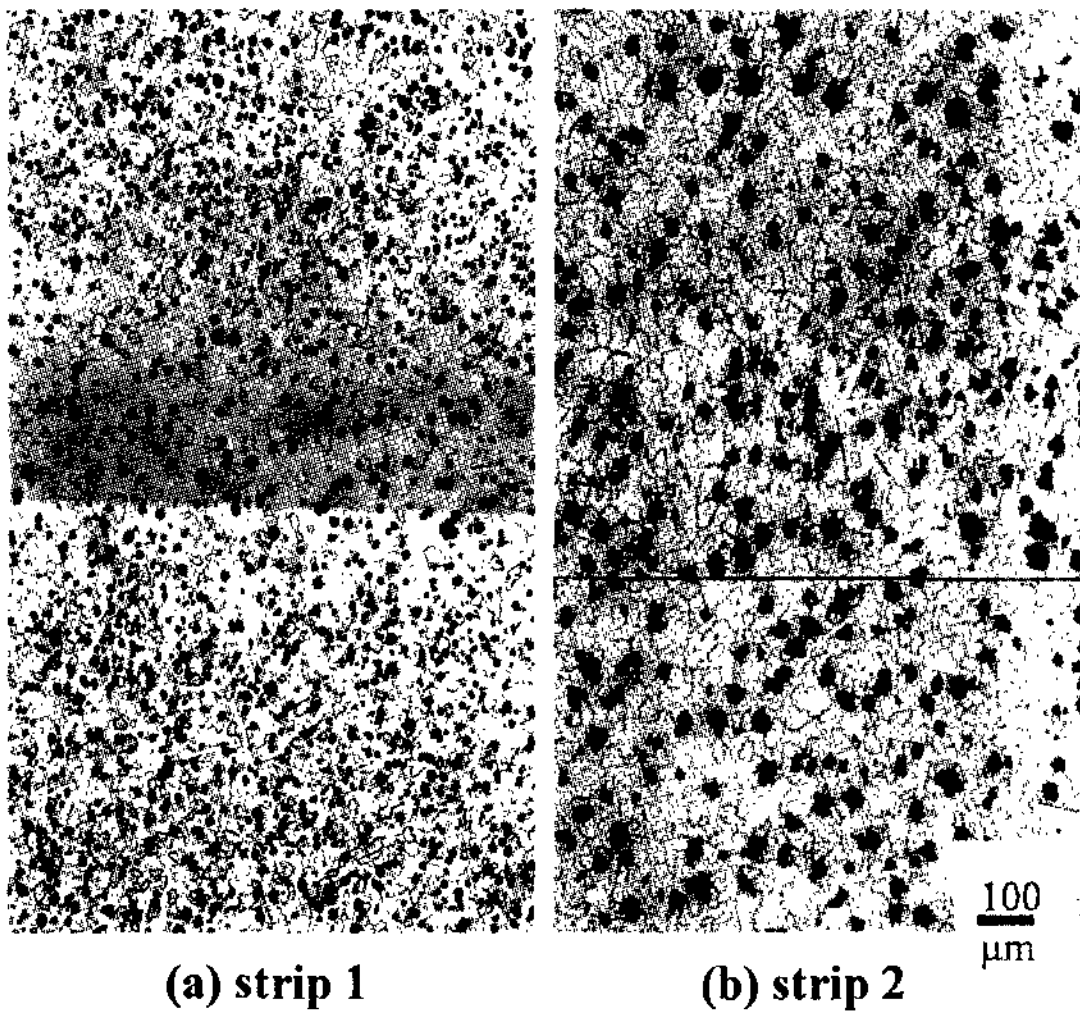


Fig. 8. Microstructures of heat-treated strips

게, 그리고 흑연립 수도 비교적 적게 석출하였고 Mg의 fading 현상으로 인하여 약간 괴상 흑연의 형태를 띤 흑연립도 나타났으나, 기지조직은 완전 페라이트조직을 나타내었다. 따라서 Mn 함량이 높은 경우에는 흑연화 저해작용으로 인하여 흑연의 핵생성이 더디게 일어나고 있음을 알 수 있다.

3.3 흑연화 열처리 시편의 기계적 성질

스트립캐스팅한 후 흑연화 열처리를 행한 구상흑연주철 박판의 인장시험 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 strip 1의 인장강도는 약 500 MPa로서 strip 2 또는 저자들의 이미 발표한 결과[5]보다 더 높은 값이다. 즉, strip 1은 Si 함

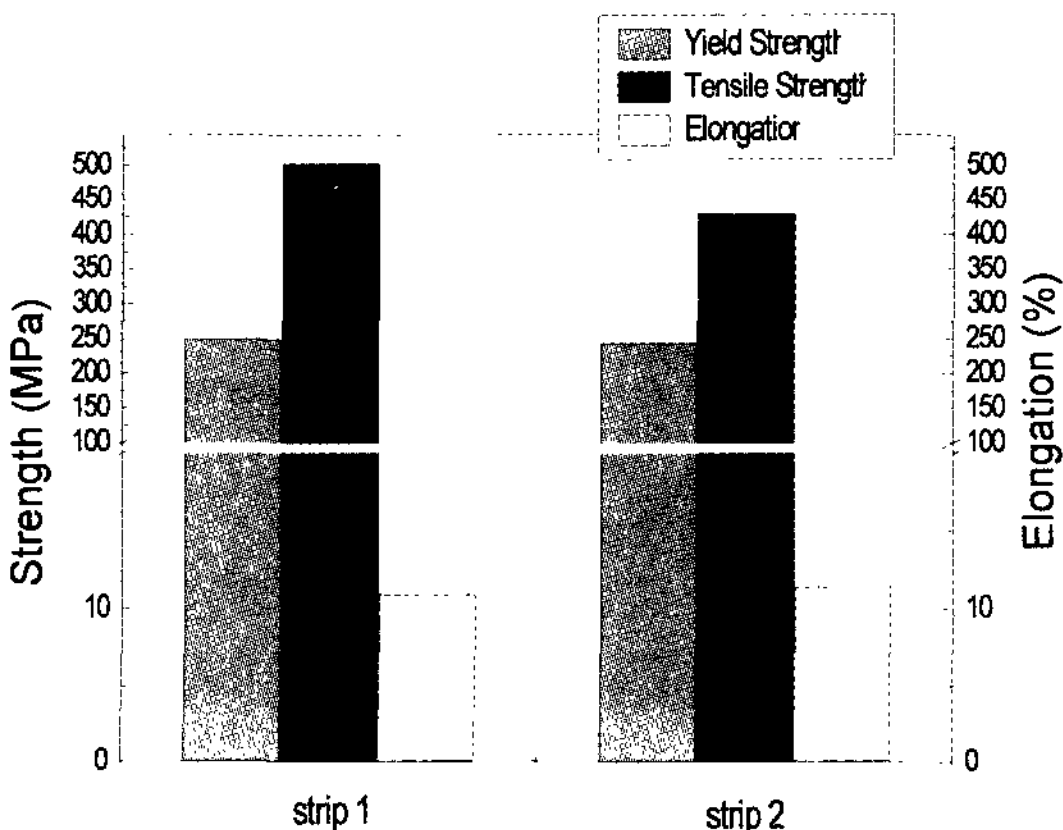


Fig. 9. Mechanical Properties of DCI strips

량이 많은 경우로써, 흑연화 열처리에 따라 흑연이 미세하게 석출하였고 또 Si 증가로 기지의 경도가 증가된 결과, 인장강도가 증가되었다고 생각한다.

그리고 흑연화 열처리를 행한 구상흑연주철 박판을 딥드로잉 실험한 결과, strip 1의 경우는 드로잉 변형율이 0.26이었고, strip 2의 경우는 0.18을 나타내었다.

즉, Mn의 함유량이 적고 Si의 함유량이 많아서 구상흑연이 미세하게 석출한 strip 1의 경우 연신율이 약간 적더라도 더 높은 드로잉 변형율을 나타내었으며, Mn의 함유량이 많고 Si의 함유량이 적었던 strip 2의 시편에서는 상대적으로 작은 드로잉 변형율을 나타내었다.

드로잉 실험하여 파단이 일어난 면의 조직을 Fig. 10에서 살펴 본 결과 파단은 흑연립들을 연결하며 일어났다. 또한 Fig. 11에서 보듯이 strip 1과 strip 2의 파단면을 SEM으로 관찰한 결과 보다 미세한 구상흑연이 생성되었던 strip 1의 경우가 파단면에서 더 미세하고 촘촘한 딥플링을 볼 수 있었다.

재료의 내부에서 crack propagation이 진행될 때, 동일한 상을 움직이는 동안의 파단은 큰 저항 없이 쉽게 진행되어 갈 수 있으나, grain boundary나 다른 phase를 만나면 파단의 진행이 매우 더디어 진다. 이에 비추어 strip 1과 strip 2의 드로잉 실험결과를 분석해 볼 때, 파단이 일어나면서 더 많은 수의 구상흑연을 지날수록 그 파단의 진행에 저항력이 높아지며, 반대로 구상흑연립의 수가 적으면 흑연을 통과하는 저항없이 파단이 쉽게 진행하므로, strip 1의 드로잉 변형율이 strip 2의 드로잉 변형율보다 우수하다고 생각한다. 따라서 페라이트 기지의 구상흑연주철박판의 드로잉 변형율은 미세한 크기의 구상흑연립의 수가 증가할수록

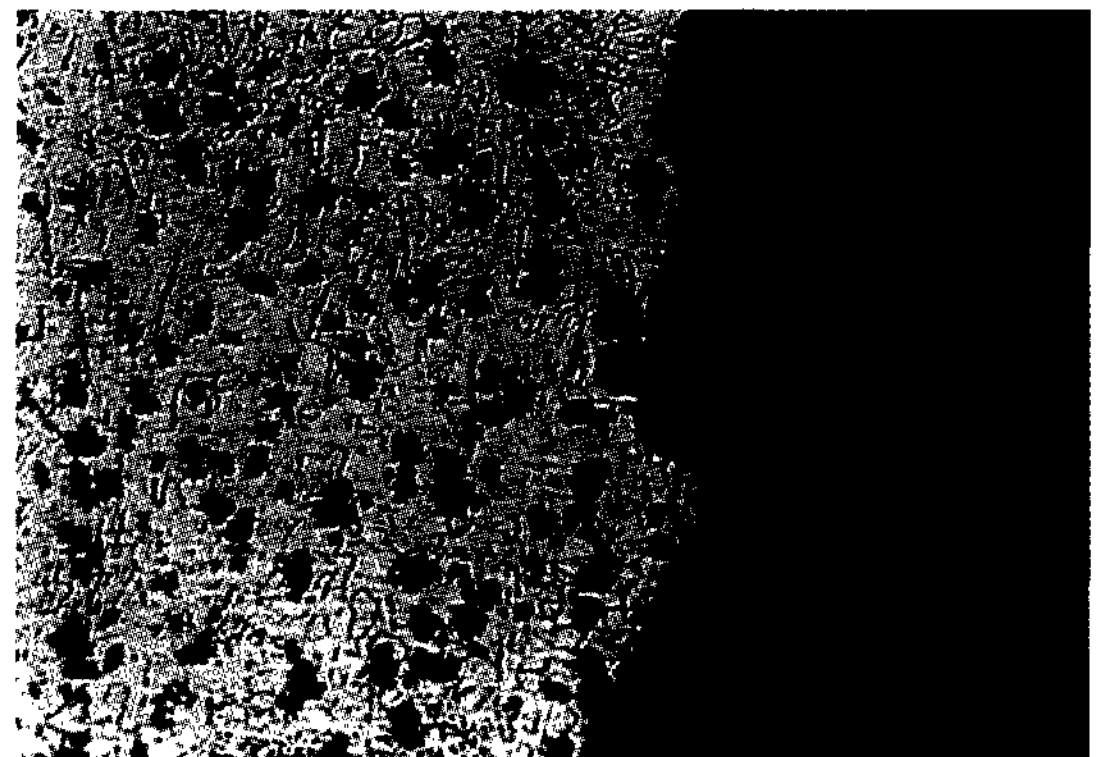
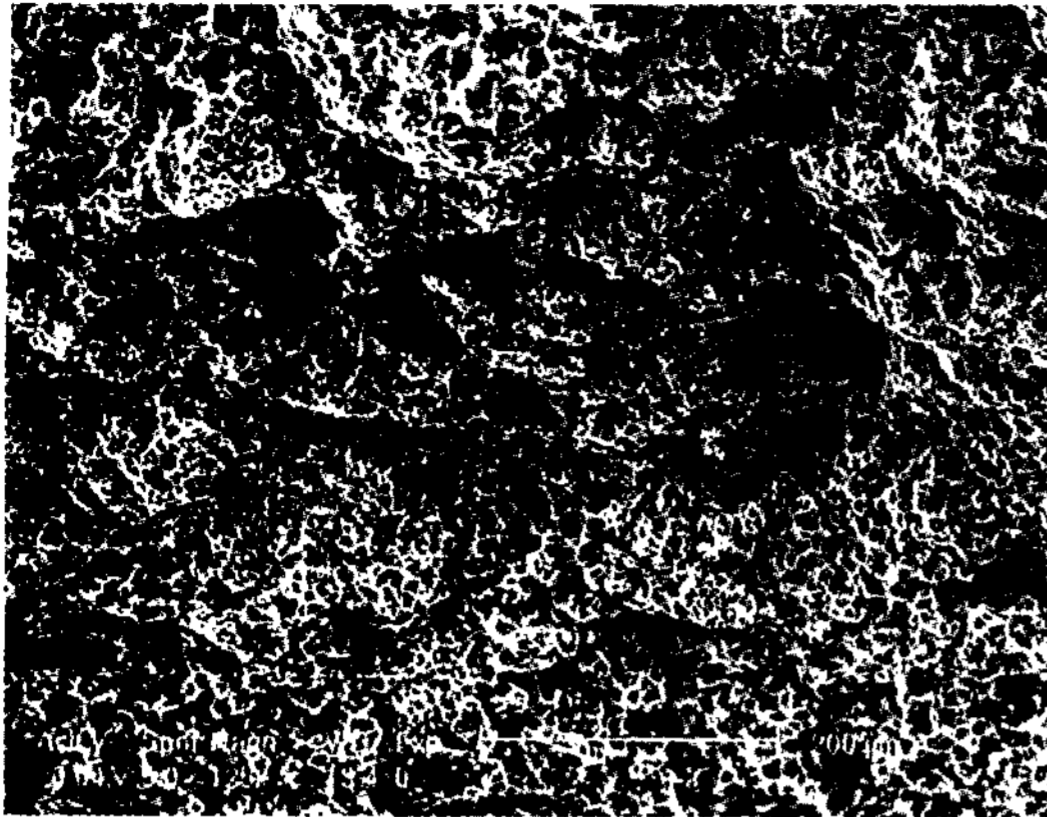
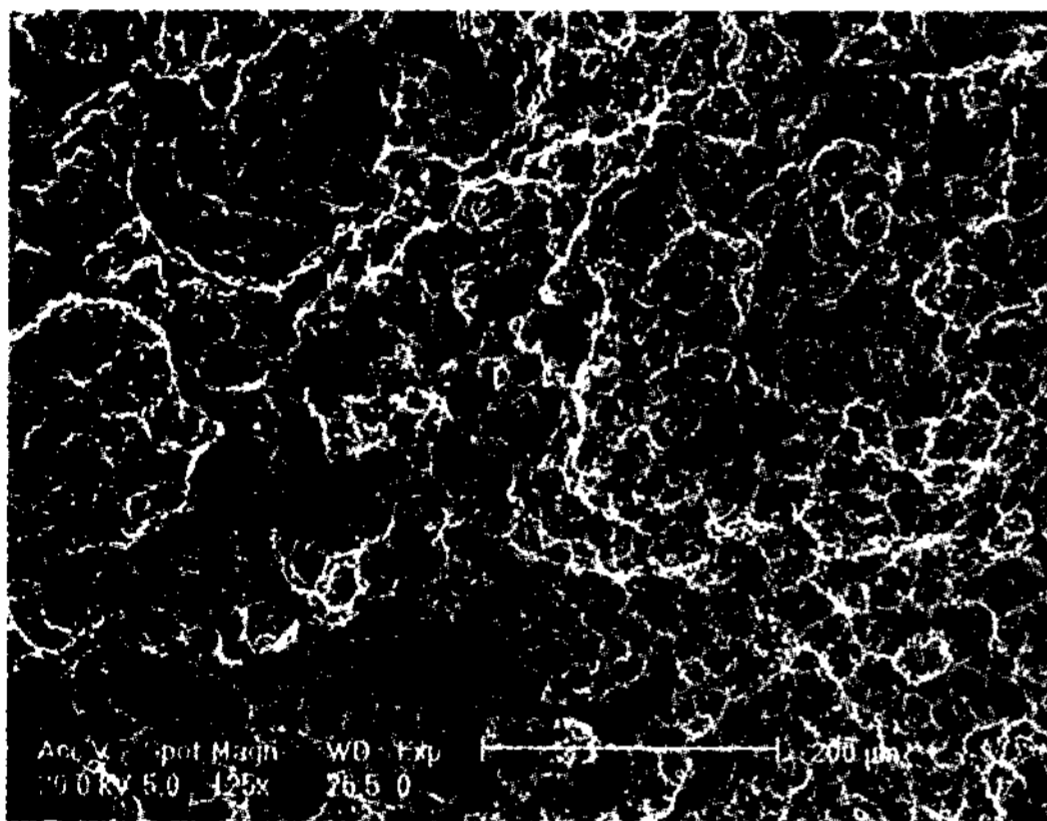


Fig. 10. Microstructure of the fracture



(a) strip 1



(b) strip 2

Fig. 11. Scanning electron micrographs of the fracture surface (×125)

향상될 것이라는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

화학 조성이 다른 구상흑연주철 용탕을 금형주조법과 스트립캐스팅법으로 주조한 후 흑연구상화 열처리를 시행하여 페라이트기지의 구상흑연주철 박판을 제조하고 그 미세조직과 기계적 성질을 시험한 결과, 다음과 같은 결론은 얻었다.

(1) 금형주조한 경우, 주방상태의 조직은 화학조성에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나, 흑연화 열처리한 경

우에는 동일한 탄소당량이라도 Si의 함량이 증가할수록 흑연립의 수가 증가하고 구상흑연이 미세화되었으며, Mn의 양이 증가할수록 세멘타이트의 분해가 늦어짐을 알 수 있었다.

(2) 스트립 캐스팅한 구상흑연주철의 주방조직은 두께 중심부에 등축정 또는 세멘타이트의 편석영역이 생성되었다. 이는 1-hole type nozzle를 설치한 스트립 캐스팅의 특징이라고 생각한다.

(3) 페라이트 기지의 구상흑연주철 박판을 인장시험한 결과, 항복강도는 약 250 MPa, 연신율은 약 10~13%, 인장강도는 2.5%Si의 경우 약 430 MPa, 3.0%Si의 경우 약 500 MPa를 나타내었다. 이는 구상흑연의 크기가 작고 수가 많아질수록 인장강도가 우수한 재료임을 보여준다.

(4) 페라이트 기지의 구상흑연주철박판의 드로잉 변형율은 0.18~0.26 정도이며, 미세한 흑연립이 많이 석출할수록 드로잉 변형율이 향상된다.

#### 후 기

본 연구는 1998년도 교육부 신소재분야 학술연구조성비의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다

#### 참 고 문 헌

- [1] T. Kusakawa : Trans. ISIJ, 26 (1986) 123
- [2] K. Shibuya and M. Ozawa : ISIJ International, 31 (1991) 661
- [3] S. Nishioka, Y. Tsuchida, T. Kitagawa, Y. Fujita, H. Sato, M. Ohtsuki : Trans. ISIJ, 26 (1986) 147
- [4] T. Kusakawa, T. Okamura : Proc. of SRNC-90, vol.2 Near Net Shape Castings, Pohang (1990) 560
- [5] K. T. Choi, J. Y. Park and H. Y. Ra : J. Kor. Foundryme's Soc., Vol. 19, No. 1 (1999) 77
- [6] J. T. Choi, Y. H. Kim, K. H. Oh, H. Y. Ra, S. H. Kim and H. K. Moon : J. Kor. Inst. Met. & Mater. 34 (1996) 1171
- [7] Y. H. Kim, J. E. Lee, J. T. Choi, K. H. Oh, J. K. Yoon and H. Y. Ra : J. Kor. Inst. Met. & Mater. 34 (1996) 1353