

|||||||
論 文
|||||||

Cr-Mo 강 of 수직 원심 정밀 주조시의 조직 및 기계적 성질에 미치는 회전 속도의 영향

허용혁 · 권해욱

Effects of the Revolution Speed on the Mechanical Properties & Microstructure of Cr-Mo Steel during Vertical Centrifugal Investment Casting

Yong-Hyuk Hur and Hae-Wook Kwon

Abstract

The effects of the revolution speed on the mechanical properties and microstructure of Cr-Mo steel during vertical centrifugal casting using investment mold were investigated. The casting yield, tensile strength, hardness and absorbed energy during impact test were increased with increasing revolution speed. The effect of mass variation caused by the change in the revolution speed on the grain size was the most significant

(Received November 10, 2001)

Key words : Cr-Mo steel, Investment casting, Centrifugal casting, Steel casting

1. 서 론

주조기술은 제조기술 중 오랜 역사를 가진 기술로서 다양한 부품의 제조에 응용되고 있다. 기술 발전으로 인하여 다양한 주조법으로 제품을 생산하고 있다. 로스트 왁스법으로 불리는 정밀 주조법에서는 원형(master pattern)을 제작하여 이를 근거로 금형을 제작한다. 이 금형에 왁스를 사출하여 왁스 모형(wax pattern)을 얻는다. 이 왁스 모형을 같은 왁스로 만든 탕구계에 조립하여 트리(tree)라고 하는 전체 모형의 조립체를 만든다. 이트리를 성분과 점도 등의 특성을 잘 조절하여 얻은 슬러리에 침적시켜 도포한다. 대체로 7~8회 도포와 건조를 반복하여 두껍고 강도가 충분한 내화물 층을 형성시킨다. 이 왁스가 들어있는 세라믹 셸 주형을 오븐에 장입하여 왁스를 녹여내면 주형 공간이 생긴다. 이 주형을 가열하거나 소성하면 잔류왁스가 연소되어 제거되고 점결제의 고온 강도가 증가한다. 소성이 끝난 고온의 주형에 보통 용탕을 주입한다.

이와 같은 정밀 주조법으로는 소형의 매우 복잡한 부품을 제조할 수 있는 장점이 있으나 탕구계를 차지하고 있는 부분의 부피가 너무 커서 제품 회수율이 낮은 단점이 있다[1].

특수 주조법의 한 가지 방법인 원심 주조법은 용융 금속을 주형 내에 고속으로 원심력에 의하여 분산시켜 유동성을 향상시키고 용융 금속에 높은 압력을 가하여 조직을 치밀하게 하고 기공의 형성을 억제하며 모든 주물에서 문제가 되는 편석의 영향을 최소화시키는 장점이 있다[2]. 또한 코어와 압탕이 필요하지 않아 회수율이 뛰어나며 작업시간이 짧아 자동화와 대량생산을 할 수 있는 주조법이다. 주형축의 방향에 따라 수평식 원심 주조법과 수직식 주조법이 있다. 원심주조과정은 용탕이 주입되고 주물이 응고하는 시간동안 주형자체가 회전을 하는 것이 정적주조와 다르다. 원심주조는 일반적으로 주형이 회전하고 있는 동안 용탕이 주입된다. 그러나 수직주조의 경우와 같이 특별한 경우는 주입이 시작될 때, 주형이 정지하는 것이 유리할 때도

영남대학교 공과대학(College of Eng., Yeungnam Univ.)
†E-mail : hwkwon@yu.ac.kr

있다. 수직 원심 주조법의 경우 주형의 중심 축에 주입구가 있으며 주형공간이 주입구를 축으로하여 대칭을 이룬다[1-3].

수직형 원심주조에서 대부분의 열은 몰드를 통해서 방출되므로 고상은 몰드 벽으로부터 성장하기 시작한다. 회전 속도의 변화에 따라 용융 금속에 미치는 압력 및 탕도의 두께가 변화한다. 회전 속도가 증가함에 따라서 원심력에 의한 압력의 증가로 인한 단열 압축과 액상선 온도 상승에 따른 과냉의 증가 또는 주형의 회전시 hydrodynamic condition에서 성장하고 있는 주상정의 2차 가지가 파괴 및 분리되어 고상의 핵생성이 촉진되어 결정립 크기가 미세해질 수 있다[4].

본 연구에서는 인장 시편 및 충격 시편을 제조하기 위한 봉형 시편을 주조하기 위한 정밀 주조 주형을 수직 원심 주조법에 맞게 제조하여 수직 원심 주조 장치에 장착시켜 정밀 주조법에 수직 원심 주조법을 가미한 방법으로 Cr-Mo강을 주조하였다. 이때 원심 주조시 회전 속도의 미세 조직 및 기계적 성질에 미치는 영향을 조사 연구하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 용해 및 수직 원심 주조

2.1.1 모형 제조 및 조형

먼저 ASTM E-8 규격의 인장 시편중 표점 거리 25 및 직경 6.25 mm 크기의 button head 형태의 인장 시편, 단면의 가로와 세로가 각각 10 그리고 길이가 120 mm인 봉재 시편 및 시제품을 얻기 위한 왁스 사출용 금형을 설계하여 주문 제작하였다. 이때 왁스의 수축율을 1% 그리고 합금의 응고 후 냉각 수축율을 2%로 가정하였다. 금형을 이용하여 왁스 모형을 얻고 각각 5개의 인장 시편 모형, 봉재 시편 모형 그리

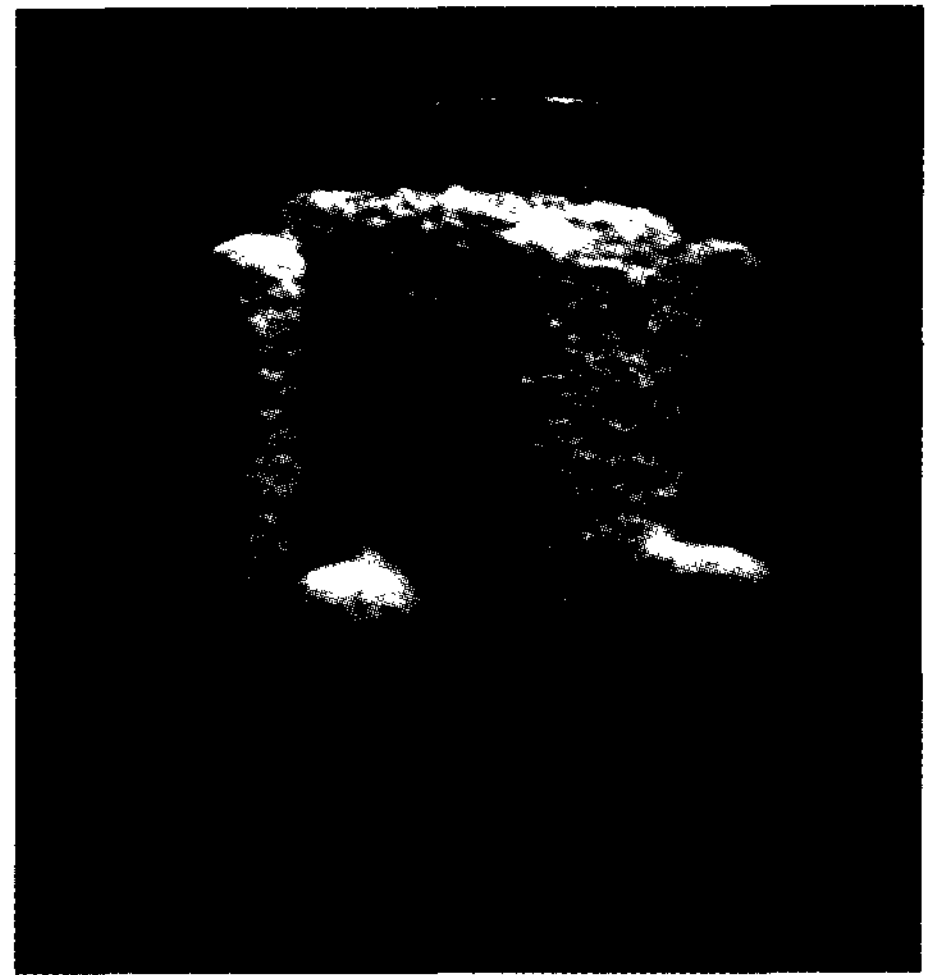


Fig. 1. Ceramic shell mold for vertical centrifugal casting.

고 시제품 모형을 조립하여 수직 원심 주조용 정밀 주조 주형을 제조하였다. 수직 원심 주조용 정밀 주조 주형은 Figure 1에서 보이는 바와 같으며 중심부의 탕구계가 되는 공간의 단면 직경과 깊이는 각각 150 및 240 mm 이다. 그리고 주입구의 직경은 65 mm이다.

2.1.2 용해

75 kw 용량의 대신 고주파사 제조 유도 용해로 전원 장치에 50 kg 용량의 유도 코일을 연결시킨 고주파 유도 용해로를 이용하여 용해하였으며 마그네시아 내화물을 사용하여 유도 코일을 라이닝하였다. 목표 조성 과 각 합금 원소의 첨가량은 Table 1에서 보이는 바

Table 1. Aim composition and the amount of addition (wt%)

| element | C | Si | Mn | Cr | Mo | remark |
|-----------------------|------|------|------|-----|------|--------|
| aim composition (wt%) | 0.40 | 0.35 | 0.75 | 1.0 | 0.23 | |
| addition (wt%) | 0.41 | 1.00 | 1.50 | 1.1 | 0.24 | |

Table 2. Chemical compositions of charge and materials added

| addition material | element (%) | | | | | | | | remark |
|-------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|
| | C | Mo | Mn | Si | Cr | P | S | Fe | |
| steel scrap | 0.045 | 0.005 | 0.25 | 0.017 | 0.063 | 0.006 | 0.001 | bal. | |
| return scrap | 0.042 | 0.23 | 0.69 | 0.32 | 1.00 | 0.016 | - | bal. | |
| Fe-62Mo | | | 62.7 | 0.72 | | 0.034 | 0.10 | bal. | |
| Fe-75Mn | 6.72 | | 74.00 | 0.50 | | 0.35 | 0.005 | bal. | |
| Fe-65Cr | 0.081 | | | 0.68 | 65.38 | 0.03 | 0.003 | bal. | |
| Fe-75Si | 0.085 | | | 76.37 | | 0.03 | 0.003 | bal. | |
| C | 99.80 | | | | | | | | |

와 같다.

사용한 기본 장입물을 구성하는 강 고철과 회수 고철 그리고 합금 원소 첨가제의 화학적 조성은 Table 2에서 보이는 바와 같다. 먼저 회수 고철과 강 고철을 각각 10 및 20 kg을 장입하여 용해하였다. 장입물이 용해된 후 1600~1630°C의 온도로 승온시킨 다음 목표 조성을 얻기 위하여 Fe-65%Cr, Fe-62%Mo, Fe-75%Mn, Fe-75%Si 및 가탄제의 형태로 크롬, 몰리브덴, 규소, 망간 및 탄소를 첨가하였다. 첨가제가 완전히 녹은 후 화학적 조성을 분석하기 위한 철 시편을 얻었다. 화학적 성분 분석 결과를 근거로 여러 차례 반복하여 용해 실험하여 최적의 첨가량을 결정하였다.

2.1.3 수직 원심 주조

한편 고온의 용탕을 주입할 때에 주형의 파괴가 일어나는 것을 방지하고 주조품에 응고 후 발생하는 잔류 응력을 최소화하기 위하여 주형을 980°C의 온도로 유지되고 있는 박스로에 장입하여 예열하였다. 목표 조성의 용탕을 얻은 후 예열시킨 정밀 주조 주형을 박스로에서 방출시켜 수직 원심 주조 장치에 장착시켰다. 수직 원심 주조 장치의 개략적인 모양과 구성은 Figure 2에서 보이는 바와 같다.

수직 원심 주조 장치는 1.5 kw 용량의 교류 전동기

로 가동되는 직경 및 높이가 각각 280 및 80 mm인 회전 테이블 위에 외경, 높이 및 두께가 각각 320, 330 및 10 mm인 원통형 주형 용기가 부착되도록 구성되어 있다. 세 개의 척으로 이 주형 용기를 회전 테이블 위에 고정시키고 전체 수직 원심 주조 장치는 직경, 높이 및 두께가 각각 750, 600 및 3 mm인 원통형의 안전 커버로 덮었다.

예열한 주형을 가능한한 주형의 중심축이 회전 테이블의 회전축에 일치하도록 맞추어 원통형 주형 용기에 넣은 후 주형을 고정시키고 수직 원심 주조 장치를 가동시키는 동안 주형의 요동을 방지하고 냉각 속도를 감소시키기 위하여 건조된 모래를 원통형 주형 용기와 주형 사이의 빈 공간에 채웠다. 그리고 용탕을 주입하기 위한 내화물 깔때기를 장착하고 수직 원심 주조 장치를 가동시켰다. 용탕의 주입 온도를 1700°C로 일정하게 하였으며 수직 원심 주조 장치의 회전 속도를 200~800 rpm의 범위에서 200 rpm 간격으로 변화시켰다. 주형의 회전 속도가 원하는 속도에 도달하였을 때 용탕을 주입하였으며 응고가 끝났을 것이라고 생각되는 시간인 주입 후 20분이 경과하였을 때 수직 원심 주조 장치의 가동을 정지시켰다. 여러 차례 반복하여 용해 및 수직 원심 주조 실험을 하여 주입 용탕의 양

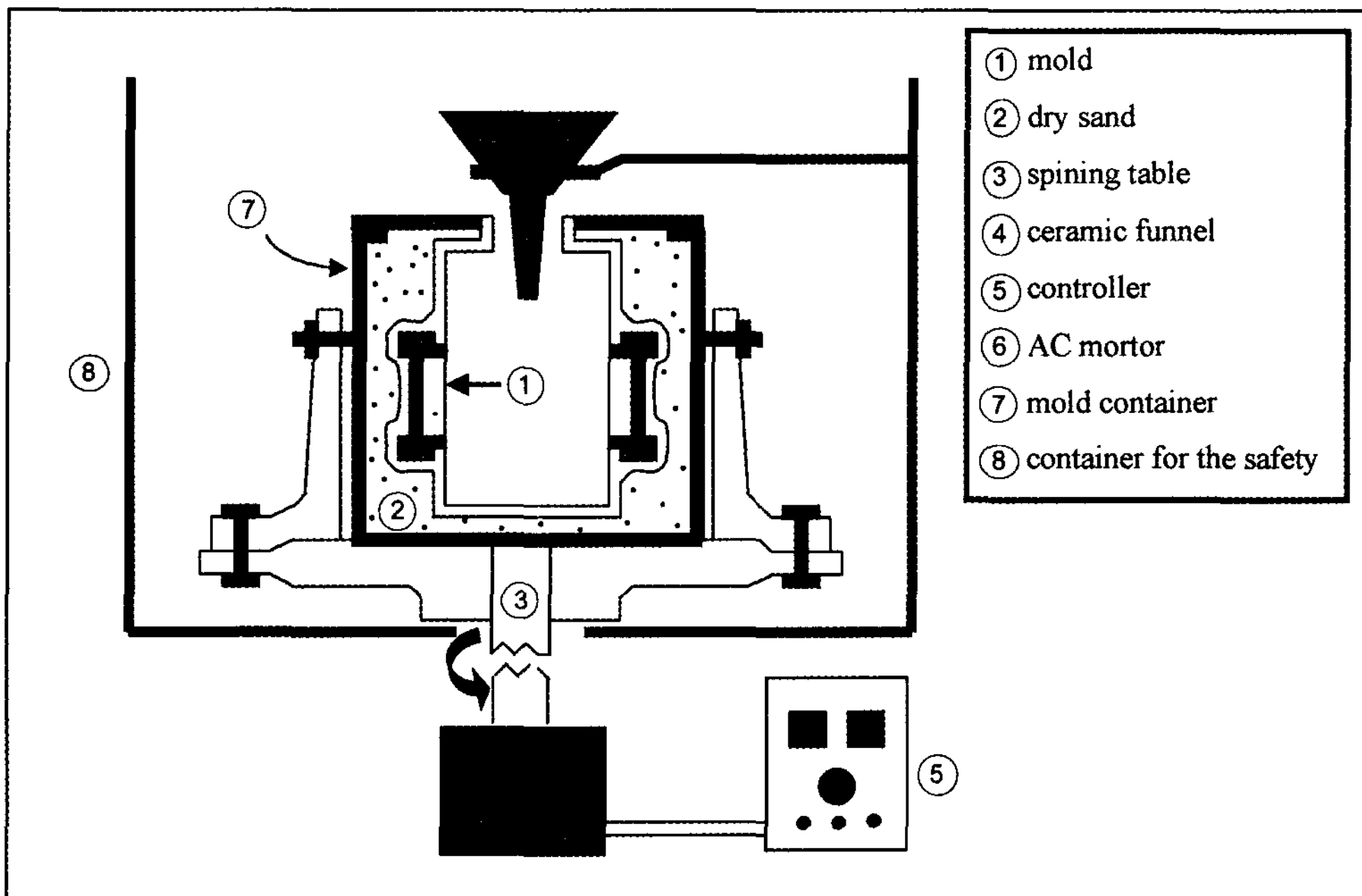


Fig. 2. Centrifugal casting apparatus.

을 결정하였으며 회전 속도가 200 및 400 rpm으로 낮을 때에는 8 kg 용탕을 주입하였다. 그리고 회전 속도가 600 및 800 rpm으로 높을 경우에는 용탕이 넘치는 현상을 감안하여 4 kg의 용탕을 주입하였다. 수직 원심 주조 장치에 주형이 장착된 상태에서 상온까지 냉각이 일어난 후 주형을 원통형 주형 용기에서 방출시켰다. 또한 주형을 회전시키지 않은 상태에서 정밀 주조하여 얻은 주조품과 수직 원심 주조하여 얻은 주조품의 회수율, 조직 및 기계적 성질을 비교하기 위하여 수직 원심 주조한 경우와 동일한 주형에 용탕을 주입하였다. 이때 주입한 용탕의 주량은 14 kg이었다. 얻은 모든 주조품을 탈사, 절단 및 샌드 블라스팅하였다.

2.2 기계적 성질 시험

2.2.1 인장 시험

주형의 회전 속도 200 및 800 rpm의 경우를 제외한 나머지 조건에서 수직 원심 주조한 경우와 주형을 회전시키지 않은 조건에서 주조한 경우에 인장 시편을 얻었다. 회전 속도 200 rpm의 경우에는 응고 수축에 의한 인장 잔류 응력이 너무 커서 인장 시편이 파괴되어 건전한 인장 시편을 얻을 수 없었으며 800 rpm의 경우에는 주입할 때에 용탕이 넘쳐흘러서 미쓰런(misrun) 주조 결함이 발생하여 인장 시편을 얻을 수 없었다. 주조하여 얻은 시편은 ASTM E-8 규격의 인장 시편 중 표점 거리 및 직경이 각각 25 및 6.25 mm인 button head의 형태의 sub-size 시편이다. 주조한 인장 시편을 쇼트 블라스팅한 후 850°C의 온도에서 30분간 표준화 처리하였다. Shimadzu사의 50 ton 용량의 만능 재료 시험기로 크로스 헤드 속도를 분당 2 mm로 하여 인장 시험을 하였다. 각 조건별로 3회 시험하여 그 평균 값을 얻어 0.2% 항복 강도와 인장 강도를 측정하였다.

2.2.2 경도 시험

수직으로 부착된 봉재 시편의 윗 부분으로부터 절단하여 10×10×30 mm 크기의 경도 시험용 시편을 얻었다. 850°C에서 1시간 동안 표준화 처리한 후 2000 번까지의 연마지로 연마한 후 Mitutoyo사의 AR-10

로크웰 경도 시험기로 경도를 측정하였다. 7번 측정하여 최대 최소값을 제외한 나머지의 평균값을 얻었으며 브리넬 경도값으로 환산하였다.

2.2.3 충격 시험

주방 상태의 봉재 시편을 850°C에서 1시간 표준화 처리한 후 와이어 커트(wire cutter)로 방전 가공하여 샤르피 충격 시험용 시편을 얻었으며 30 kg-m 용량의 샤르피 충격 시험기를 이용하여 시험하였다. 각각의 경우 5회 시험하여 최소 및 최대치를 제외한 나머지 값의 평균값을 얻었다.

2.3 미세 조직 관찰

수직 원심 주조하여 얻은 봉재 시편을 표준화 처리한 후 절단하여 미세 조직 관찰용 시편을 얻었다. 마운팅하여 봉재 시편의 위쪽으로부터 10 mm 위치의 면을 보통의 방법으로 조연마한 후 1 μm 등급까지의 다이아몬드 페이스트로 세연마하였다. 초음파 세척기로 세척한 후 4% nital 용액으로 부식시켰으며 100배의 배율에서 광학 현미경으로 관찰하였다. 화상 분석 장치(image analyzer)를 이용하여 회전 속도의 변화에 따른 결정립 크기의 변화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화학적 성분 분석

각 용해시 마다 얻은 화학적 성분 분석용 칩 시편의 밑면을 50번 연마지로 연마한 후 Shimadzu사 제작 방출 스펙트럼 분석 장치로 분석하였다. 그 결과는 Table 4에서 보이는 바와 같다. 모든 경우에 각 원소의 함량은 허용 범위를 벗어나지 않았다. 탄소의 경우는 회수율이 97.5%로 높게 나타났으나 규소, 크롬 및 몰리브덴은 산화 손실로 인하여 그리고 망간의 경우에는 증발 손실 및 산화 손실로 인하여 회수율이 낮아졌다.

3.2 주형의 회전 속도에 따른 회수율의 변화

먼저 응고한 주조품을 탈사한 후 무게를 측정하였다.

Table 3. Result of the analysis of chemical composition and recovery

| element | C | Si | Mn | Cr | Mo | P | S | Fe | remark |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| average | 0.40 | 0.32 | 0.78 | 1.00 | 0.21 | 0.01 | 0.01 | bal. | |
| addition | 0.41 | 1.00 | 1.50 | 1.10 | 0.24 | - | - | bal. | |
| recovery (%) | 97.5 | 32.0 | 52.0 | 91.0 | 87.5 | - | - | bal | |

Table 4. The effect of revolution speed on the yield.

| revolution speed | melt weight (kg) | specimen weight (kg) | recovery (%) | remark |
|------------------|------------------|----------------------|--------------|-----------|
| 0 rpm | 14.0 | 1.00 | 7.1 | |
| 200 rpm | 8.0 | 0.94 | 11.75 | |
| 400 rpm | 8.0 | 1.00 | 12.5 | |
| 600 rpm | 4.0 | 1.00 | 25 | |
| 800 rpm | - | - | - | overflown |

이때 절단하여 얻은 시편과 시제품 전체의 무게는 미쓰런이 발생한 200 rpm의 경우를 제외하고는 1 kg이었다. 따라서 주조품의 무게와 시편 및 시제품 전체의 무게의 비로부터 회수율을 계산하였다. 그 결과는 Table 3에서 보이는 바와 같다. 주형의 회전 속도 200 및 400 rpm인 경우에 주입 용탕 중량이 8 kg으로 동일하였으나 200 rpm의 경우 주입 불량 발생하여 시편과 시제품 전체의 무게는 0.94 kg이었다. 주형의 회전 속도가 800 rpm으로 너무 큰 경우에는 용탕이 주형 밖으로 넘쳐흘러서 매우 위험하였다. 시편을 얻을 수는 있었으나 공정의 제어가 불가능하였다.

주형의 회전수가 증가할수록 회수율은 증가하였으며 그 결과는 Figure 3에서 보이는 바와 같다. 정밀 주조 주형이 회전하고 있는 상태에서 용탕을 주입할 경우 수직 탕도(vertical runner)내의 용탕의 윤곽이 달라진다. 이를 비교하기 위하여 주조품에서 시편 및 시제품을 절단한 후 탕도를 먼저 표준화 처리를 하였다. 그리고 절단하여 종단면을 얻었으며 Figure 4에서 보이

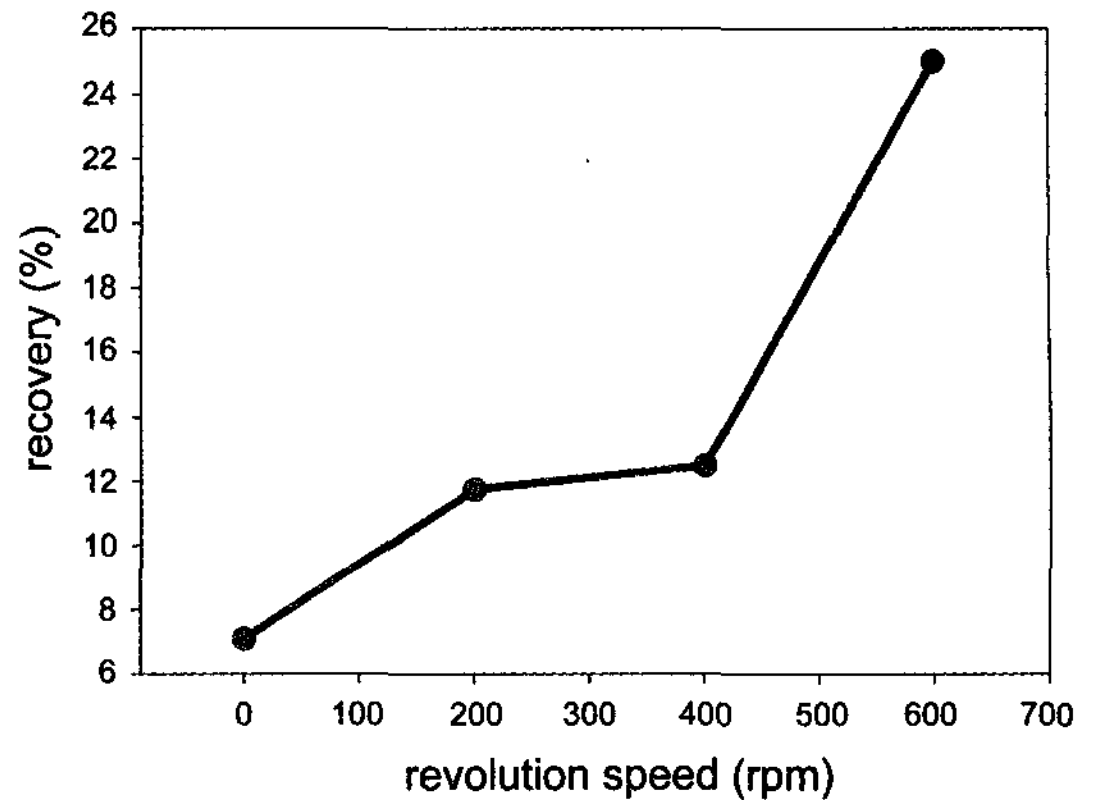


Fig. 3. The effect of revolution speed on the yield.

는 바와 같다. 회전 속도가 증가할수록 가운데의 파이프형의 공간이 더 커지고 600 rpm일 때 완전히 관통하는 파이프가 형성되었다.

3.3 기계적 성질

0~800 rpm의 범위에서 200 rpm 간격으로 회전 속도를 변화시키면서 수직 원심 주조한 크롬-몰리 강의 항복 강도와 인장 강도, 충격 흡수 에너지 및 브리넬 경도의 변화는 각각 Figure 5, 6 및 7에서 보이는 바와 같다. 회전 속도가 증가할수록 이들 기계적 성질 값은 증가하였다. 이것은 미세 조직 관찰 결과로 알 수 있는 바와 같이 회전 속도가 증가할수록 결정립 크기가 감소하였기 때문인 것으로 생각된다.



Fig. 4. The effect of revolution speed on the solidification profile of runner. *overflown for 800 rpm

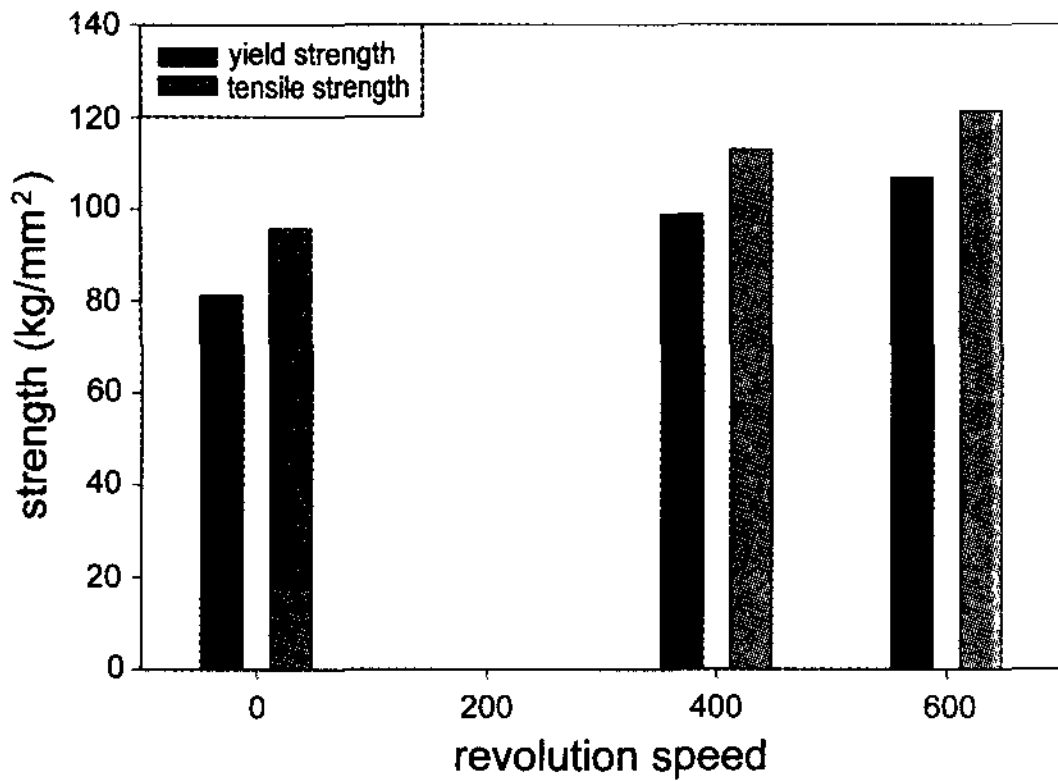


Fig. 5. The effect of revolution speed on the yield strength & tensile strength. *Specimen was fractured due to tensile stress caused by solidification contraction for 200 rpm

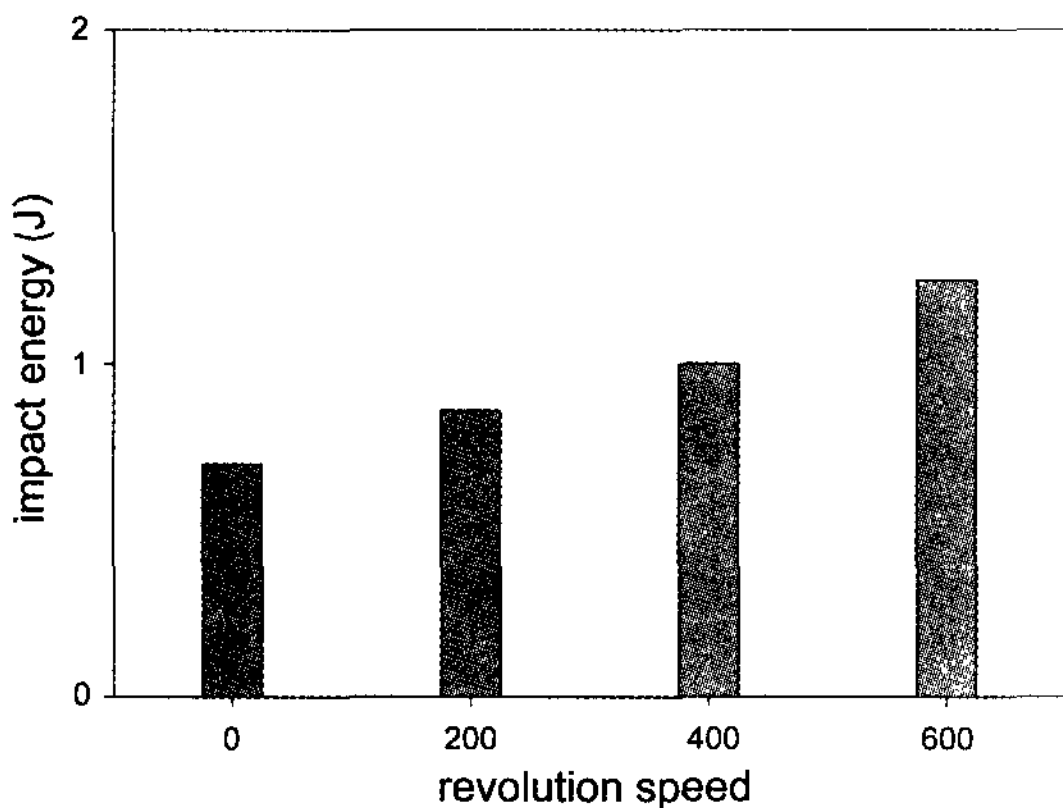


Fig. 6. The effect of revolution speed on the impact energy.

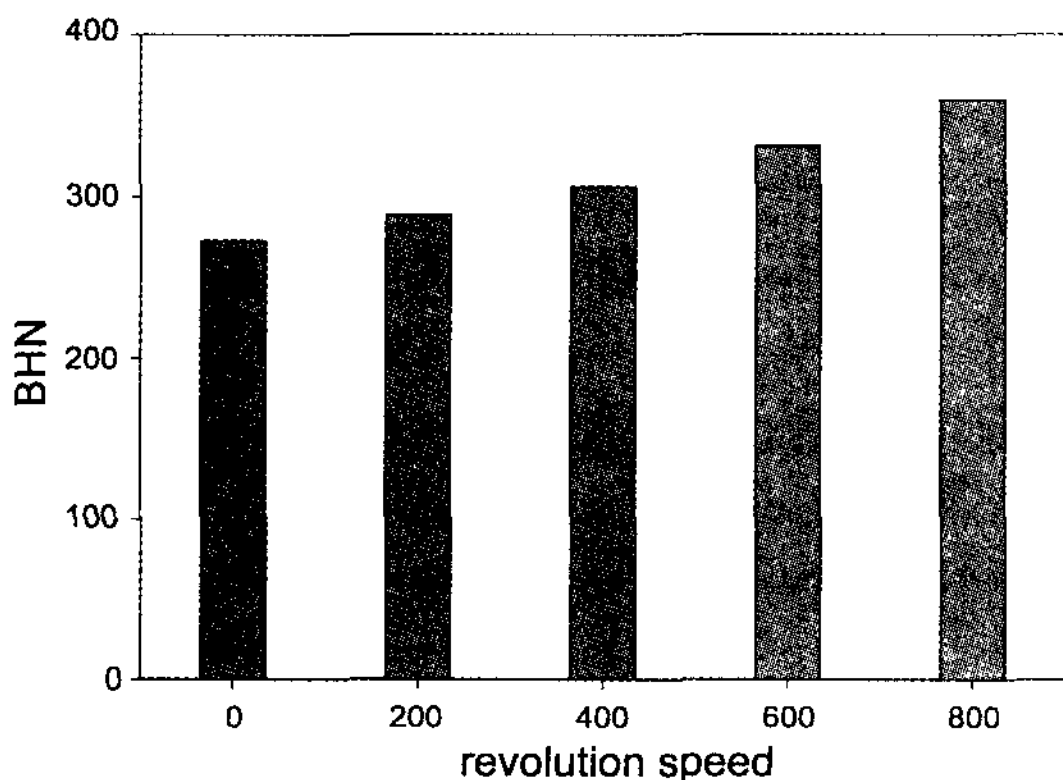


Fig. 7. The effect of revolution speed on the hardness of specimens.

3.4 미세 조직의 변화

Figure 8에서 보이는 바와 같이 회전 속도가 증가함에 따라 결정립이 미세하여진다. 회전 속도의 변화에 따른 탕도 두께와 결정립 크기의 변화는 Figure 9에서 보이는 바와 같다.

탕도 두께에 따른 응고 시간의 차이를 추정하기 위하여 탕도 내부는 단열 조건으로 열은 주형을 통해서만 방출되는 1차원 열전달 문제로 해석할 수 있다. 원심력의 영향은 없는 것으로 가정하면 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기에서 α_m 은 주형의 열 확산 계수, K_m 은 주형의 열전도도, ρ_m 은 주형의 밀도, t 는 시간 그리고 x 는 주형벽에서의 거리이다. 이 열전달 방정식의 해로부터 주형-금속 계면을 통과하는 열전달 속도는 다음과 같다.

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{x=0} = -\sqrt{\frac{K_m \rho_m C_m}{\pi t}} (T_M - T_0) \quad (2)$$

여기에서 q 는 열전달 속도, A 는 주형-금속 계면의 단면적, T_M 은 용융 온도, T_0 는 상온 그리고 C_m 은 주형 재료의 비열이다. 주형으로 들어오는 열은 응고하는 금속의 응고 잠열 밖에 없다. 따라서

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{x=0} = -\rho_s H \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3)$$

여기에서 S 는 응고하는 금속의 두께이다. 따라서 경계 조건을 고려하면 다음과 같은 결과 식이 얻어진다.

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{T_M - T_0}{\rho_s H}\right) \sqrt{K_m \rho_m C_m} \sqrt{t} \quad (4)$$

여기에서 ρ_s 는 응고하는 고체의 밀도 그리고 H 는 용융열이다. 이 결과로부터 탕도 벽의 두께가 두꺼울수록 응고 시간이 더 길어짐을 알 수 있다. 여기에서 S 를 V/A 로 대체하여 얻은 다음과 같은 Chvorinov 식으로부터 상대 응고시간을 비교할 수 있다[5-6].

$$t = C \left(\frac{V}{A}\right)^2, \quad (5)$$

$$C = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho_s H}{T_M - T_0}\right)^2 \left(\frac{1}{k_m \rho_m C_m}\right)$$

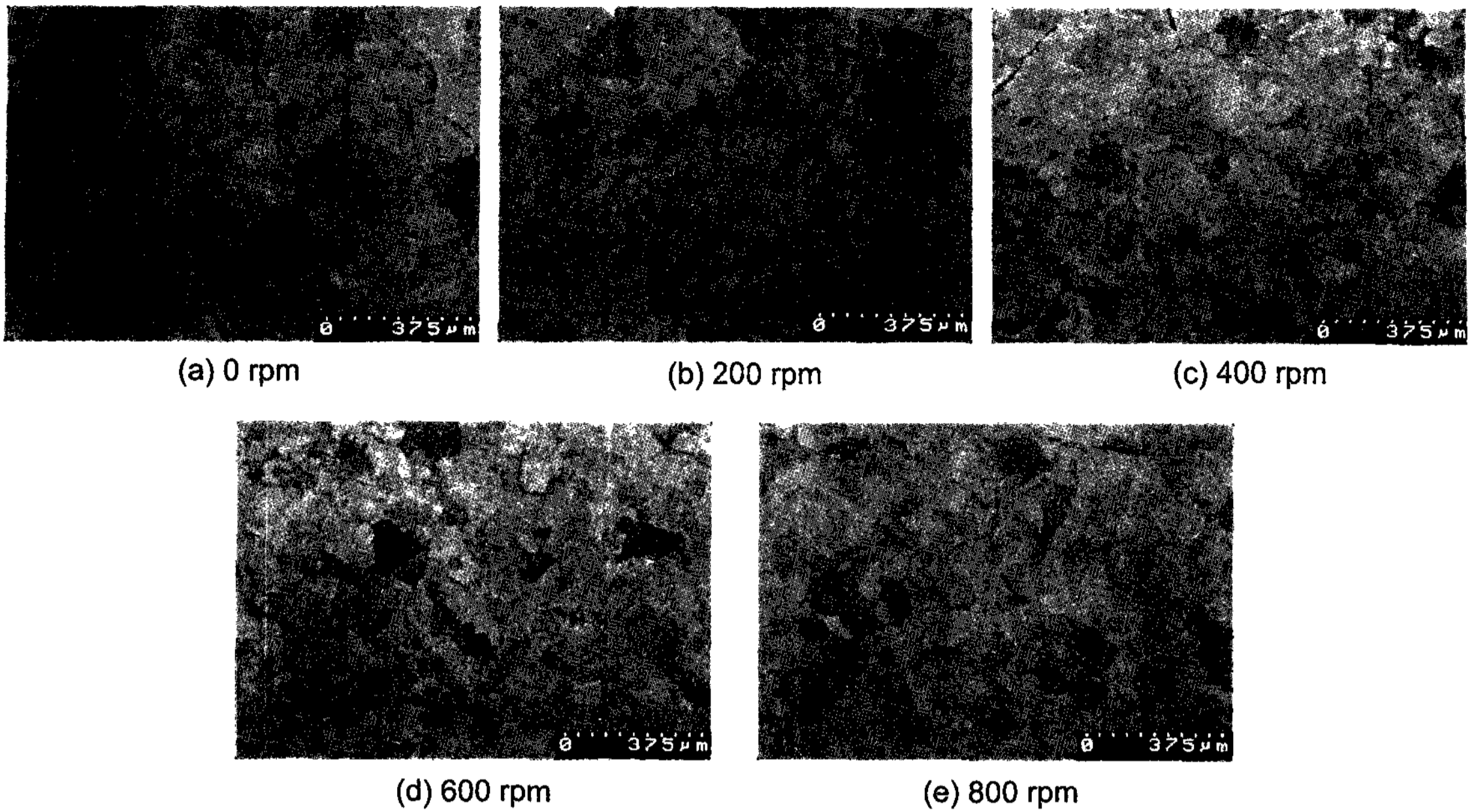


Fig. 8. Effect of the revolution speed on microstructure.

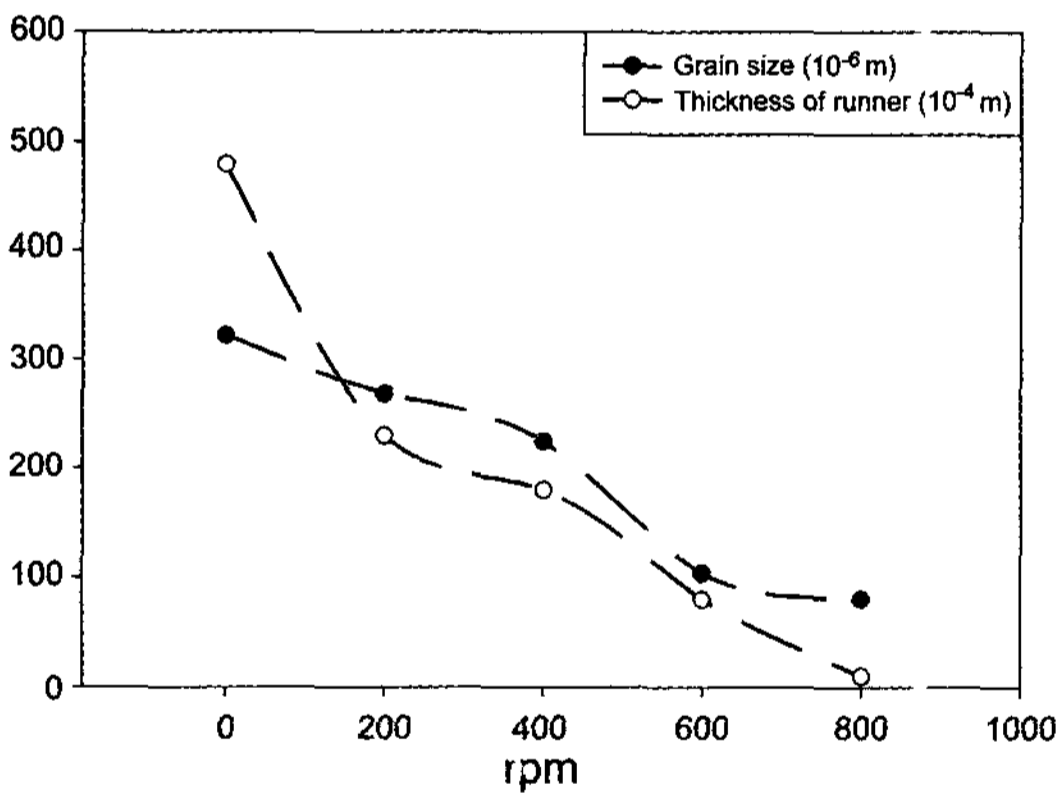


Fig. 9. Grain size & Thickness of runner with the variation of re-revolution speed.

여기에서, C는 동일한 금속, 주형 재료 및 주형 온도에 대하여 일정한 상수이다. 200, 400, 600 및 800 rpm의 조건에서 얻은 탕도의 두께에 따른 상대 응고 시간은 각각 정지 상태에서의 탕도의 응고 시간의 75, 50, 29 및 13%로 나타났다. 즉 탕도의 두께가 감소함에 따라 응고 잠열의 양도 감소하고 열전달 속도는 증가할 것이기 때문에 응고 시간은 급격히 감소하였다. 응고 시간에 미치는 원심력의 영향을 알기 위하여 미세 조직 관찰용 시편을 얻은 부위에서 회전 속도의 변

화에 따른 단위 면적당 가해지는 압력을 산출하였다. 먼저 유체가 다른 유동현상이 없이 회전하고 있는 강체 회전(rigid body rotation)이라 가정하면 원심력에 의한 압력은 다음과 같다[7].

$$\Delta P = \rho \left(gy - \frac{1}{2} \omega^2 x^2 \right) \quad (6)$$

여기에서, ω 은 각속도, g 는 중력 가속도 그리고 ρ 는 금속의 밀도이다. 회전 속도가 200, 400, 600 및 800 rpm일때의 압력은 각각 19.7, 146, 420.8 및 805.8 atm으로 나타났다. 그리고 Clapeyron 식을 이용하여 압력의 변화에 따른 용융 온도의 변화 정도를 계산하였다[4].

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{T_M(V_L - V_S)}{H} \quad (7)$$

여기에서 V_L 및 V_S 는 각각 액상과 고상의 비부피이다. 용융 온도는 압력 1 atm당 약 6.74×10^{-4} K만큼 상승하며 Chvorinov 식 (1)에 대입한 결과 응고 시간에 미치는 원심력의 영향은 극히 적음을 알 수 있었다 [5-6]. 따라서 회전 속도의 변화에 따른 탕도의 두께 변화에 의한 질량 변화의 영향이 압력 변화에 의한 액상선 온도의 변화에 의하여 또는 hydrodynamic

condition에서 성장하는 수지상의 2차 가지가 파괴 및 분리하여 고상을 핵생성 시키는 효과와 같은 다른 인자에 비하여 훨씬 더 큰 것을 알 수 있다.

4. 결 론

크롬-몰리브덴의 정밀 주조 주형을 사용한 수직 원심 주조시 회전 속도의 회수율, 기계적 성질 및 미세 조직에 미치는 영향을 조사 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주형의 회전 속도가 증가함에 따라 1.0%Cr-0.2%Mo강의 주조품 회수율이 증가하였다.
- 2) 주형의 회전 속도가 증가함에 따라 인장 강도, 경도 및 충격 흡수 에너지가 증가하였다.
- 3) 주형의 회전 속도가 증가함에 따라 결정립 크기가 감소하였다.
- 4) 회전 속도의 변화에 따른 탕도 두께에 변화에 의한 질량 변화의 결정립 크기에 미치는 영향이 가장 컸다.

5) 탕도의 두께 변화에 의한 질량의 변화가 응고 잠열, 열전달 속도 및 응고 시간에 영향으로 인하여 결정립 크기의 변화에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] Metals Hand Book, 10th ed., vol.15, ASM International (1988), 296
- [2] Ebisu, Y., Trans. AFS. vol 85 (1977), 643
- [3] 강춘식 : "주조공학", 개문사, (1995)
- [4] B. Chalmers : "Principles of Solidification", John Wiley & Sons, Inc., (1964), 2
- [5] G. H. Geiger, D. R. Poirier : "Transport Phenomena in Metallurgy", Addison-Wesley Publishing Company, (1982), 362
- [6] Frank M. White : "Heat and Mass Transfer", Addison-Wesley Publishing Company, (1988)
- [7] S. R. Chang, S. H. Huh and C. P. Hong : J. Korean Foundryman's Society, vol 20, (2000)
- [8] W. A. Tiller and S. Ohara : "The Solidification of Metals", Iron and Steel Inst. (1967)