

|||||||
論 文
|||||||

경동식 중력주조법에 의한 주조결함 제어

염기동 · 홍준표

Control of the Casting Defects in the Gravity Tilt Pour Casting Process

Ki-Dong Yeom and Chun-Pyo Hong

Abstract

Gravity tilt pour casting can effectively guarantee the reduction of various casting defects by controlling the rotation speed and the tilting angle of the mold during tilt pouring. The relationship between casting process parameters and the soundness of castings has been investigated in order to determine the optimum process variables in the gravity tilt pour casting process. In order to evaluate the effect of rotation speed on mold filling patterns, a video camera was employed to visualize the in-situ fluid flow behavior of the molten metal, and the relevant fluid velocity was also estimated. X-ray and mechanical tests were also performed to evaluate the effect of fluid velocity on casting quality. With the rotation speed lower than 0.5 r.p.m., which is nearly corresponding to the critical velocity of stability in the fluid flow, sound castings were obtained without having any casting defects. It can be concluded that the gravity tilt pour casting process is an effective process for manufacturing sound casting products with enhanced physical and mechanical properties. (Received February 5, 1998)

1. 서 론

주물 제조에서 응고 과정중에 발생하는 응고수축과 잔류응력 등에 기인하는 결함과, 용탕의 충전 단계에서 탕류에 기인되는 각종 주조 결함의 제어는 매우 중요하다[1-2]. 용탕이 주입되는 동안의 불안정한 탕류에 의한 표면 산화막의 혼입과 공기의 혼입[3] 등은 주물 성능에 심각한 문제를 유발시킬 수 있는데, 특히 알루미늄 합금과 같이 산화막을 형성하는 경금속 합금인 경우 가벼운 비중 때문에 탕류내부에서 난류발생에 의한 공기 포집 현상이 증가하며, 주물내부로 표면난류의 발생에 의해 산화막이 혼입되는 것을 제어하는 것도 어렵다[4]. 따라서 경금속 합금의 경우 용탕을 안정적으로 주입시키는 것이 특히 중요하다. 그러나 중력주조법에서 용탕을 안정적으로 주입시키기 위해서는 주형의 형태와 크기에 따라 복잡하고 다양한 형태의 탕구계를 채택해야 되며, 많은 부가적인 노력을 필요로 한다[5].

경동식 중력주조법은 용탕이 지면과 수평을 유지한

채, 주형내부로 안정적이면서 연속적으로 주입되기 때문에 복잡한 탕구계의 설계 없이 간단한 탕구계만으로 경동속도와 경동각도를 조절하여 용탕주입속도를 제어 할 수 있기 때문에 탕류에서 난류가 발생하는 것을 최대한 억제 할 수 있다. 또한 용탕이 주형의 바닥면으로 부터 점진적으로 충전되므로 주형의 바닥면으로 부터 주입구 쪽으로의 지향성 응고를[5] 유도 할 수 있고, 따라서 주입구쪽에 최종응고가 일어나도록 하여, 주물 내부에 수축공이 발생하는 것을 방지 할 수도 있다. 이와 같은 장점들로 인해 경동식 중력주조법의 활용 범위가 점차 넓어지고 있으나, 현재까지 경동식 중력 주조법에 대해서는 동합금을 위주로 한 미성형 실험[6]과 유동관찰을 위한 수모델 실험[7-9]등 극히 제한적인 연구만이 진행되어 왔을 뿐, 실제 주조 조건에 대한 체계적인 연구는 진행되어 오지 않았다.

그러나 최근에는 컴퓨터 시뮬레이션을[10-14] 통한 용탕의 유동해석등 실제 주조 조건에 대한 연구등이 진행되고 있으며, 본 실험에서는 경동식 중력주조법에 있어서 실제 주조변수가 결함발생에 미치는 영향

을 평가하여, 최적의 주조조건을 수립하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 경동주조 장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 경동주조 장치의 개략도이다. 회전속도 조절이 가능한 전기모터를 구동력으로 하여 주형을 고정하고 있는 회전판을 회전시킴으로써 적절한 경동속도를 유지하도록 제작되었다. 또한 본 실험에서는 금형의 회전각도를 지면과 평행한 위치로부터 90° 회전되도록, 일정하게 경동각도를 유지하였다.

2.2 용해 및 주조방법

본 실험에서는 AC4C 합금을 경동속도(0.25, 0.5, 1.0, 3.0, 6.0 r.p.m.)와 주형온도(200°C, 300°C, 400°C) 및 용탕온도(620°C, 720°C, 900°C)를 주조변수로 하여, 이들 주조조건에 따른 영향을 관찰하였다. 또한 용점이 낮은 주석을 사용하여 경동주조시 용탕의 충전거동을 직접 관찰하였다. AC4C합금의 경동주조와 충전거동 관찰 실험에는 각각의 특성을 고려하여 크기가 다른 금형을 사용하였으며, 각각의 금형의 치수와 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

용탕충진과정중의 영향을 평가하기 위해, 장입된 재료를 완전히 용해시킨 후 800°C에서 탈 가스제(알루가스290:대호산업)로 탈 가스 처리한 후 안정화시켜 용탕내부에 존재하는 불순물과 가스를 최대한 제거하였으며, 주입컵 내부를 단열제로 단열 시킴으로써 용탕이 충전되는 동안에 주입컵내의 용탕이 냉각되는 것을 억제하였다. 또한 주형의 표면은 boronitride로 도포하였다.

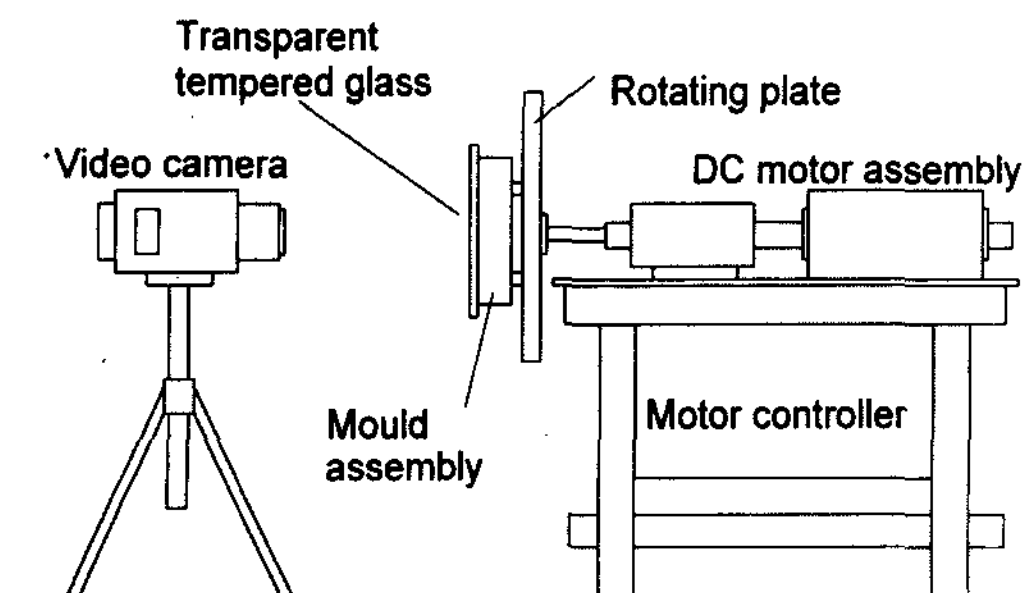


Fig. 1. The schematic illustration of the experimental apparatus for gravity tilt pour casting.

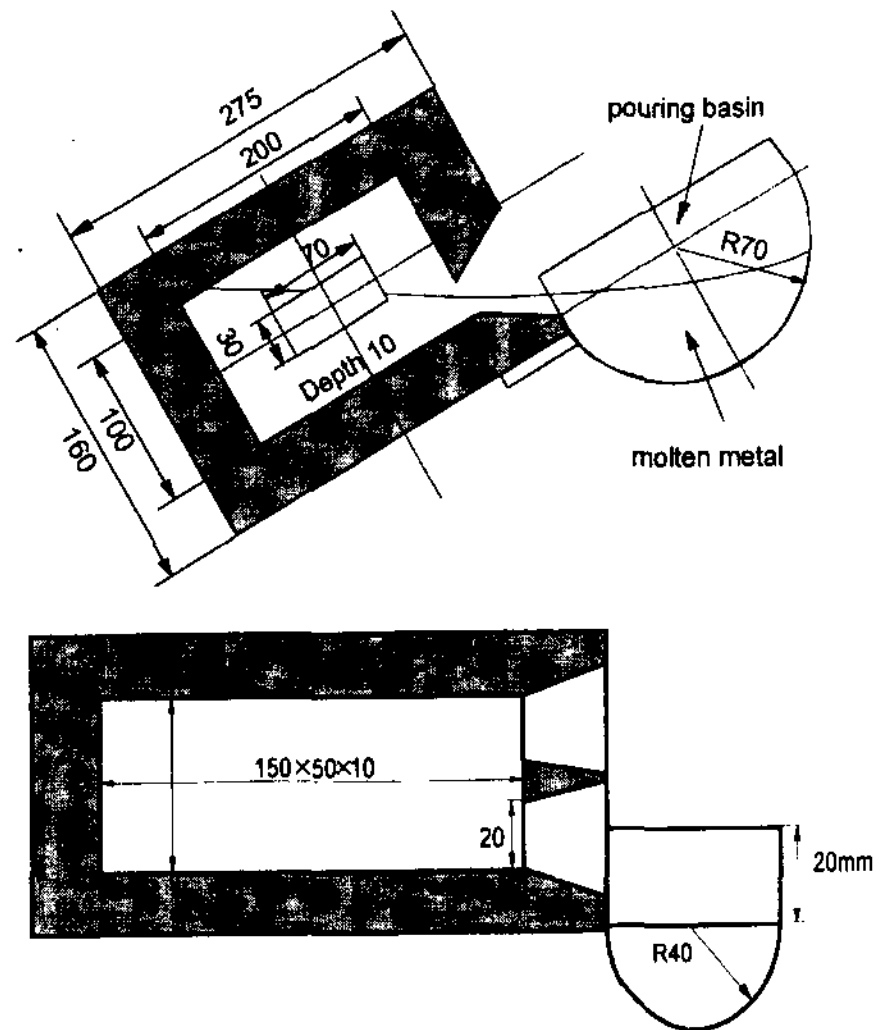


Fig. 2. The schematic illustration of the mold assembly.

2.3 용탕의 충전거동 관찰 및 주입속도 측정

본 실험에서는 Fig. 1에 나타내었듯이 200°C로 예열된 금형의 한쪽 면을 투명한 내열유리(tempered glass)로 대체한 후 400°C로 용해된 주석을 경동식 중력 주조법으로 주입시키면서, 초당 30 프레임의 속도로 충전과정 동안의 용탕의 충전거동을 고속비디오 카메라를 이용해서 기록 관찰하였다.

Fig. 3은 AC4C 알루미늄 합금의 경동주조시, 초기 용탕선단이 주형 벽면을 따라 이동하는 속도를 측정하기 위한 실험장치로, 주형의 벽면을 따라 주입구로부터 바닥 면까지를 구간 I (Division I), 구간 II (Division II)로 구분한 후 각 측정점 T1, T2, T3에서

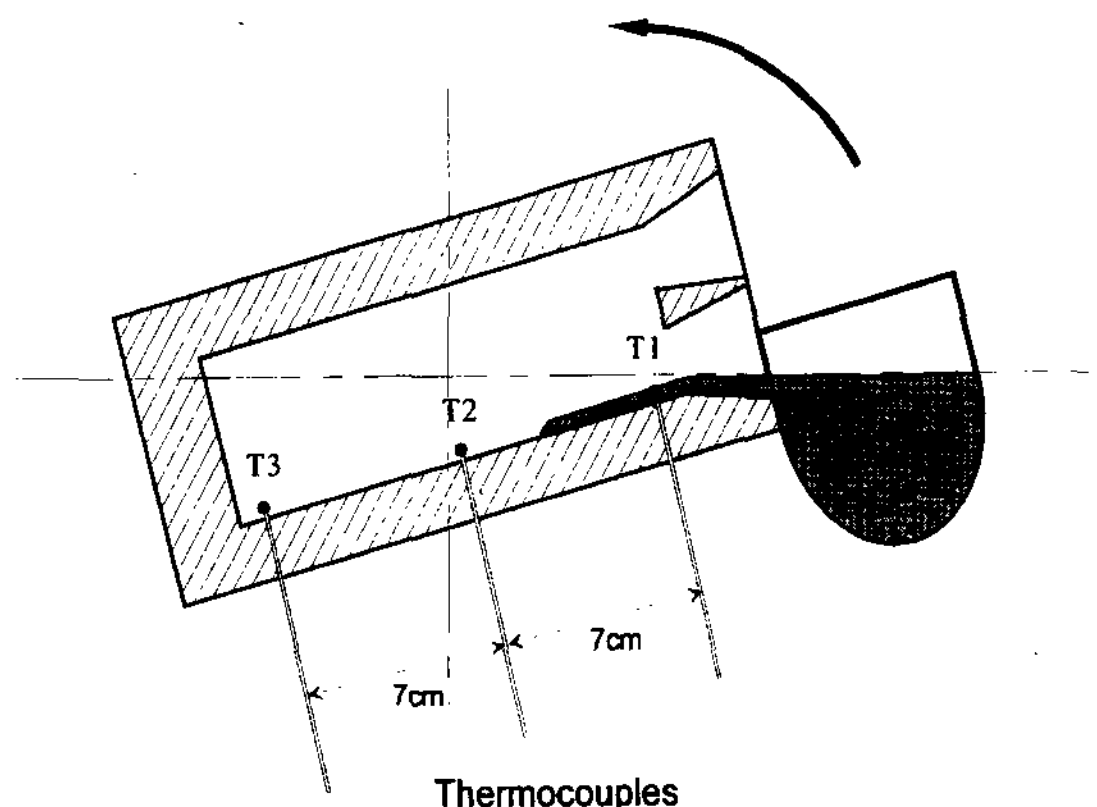


Fig. 3. The mold assembly embedded with 3 thermocouples for the measurement of the fluid tip velocity.

시간에 따른 온도 변화를 측정하고, 각 구간 내에서 용탕 선단의 이동 속도를 측정하였다.

2.4 기계적 성질 시험

본 실험에서는 주조조건에 따른 주물내부의 결함을 관찰하기 위해 X선 투과 시험을 하였으며, 또한 경동조건에 따른 주물의 기계적 성질을 평가하기 위해 인장시험과 3-Point bending 시험을 실시하였다. 사용된 인장시험편은 ASTM B557M에 있는 판재형상의 subsize 시편을 채택하여 시험에 사용했다. 시험에 사용된 인장시험기는 Instron사의 인장시험기(Model NO. 4505, Road Cell:10 t)를 사용하였으며 cross head speed는 2 mm/min으로 하였다. bending시험은 Instron사의 만능시험기를 이용하였으며, 시편에 가해진 하중과 cross head speed는 각각 6.67 pts/sec와 0.5 mm/sec로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경동속도에 따른 용탕의 충전거동

각종 기공(porosity) 및 산화 개재물 등과 같은 주물결함은 주로 용탕이 주입되는 동안에 용탕 흐름에서의 난류발생과 함께 용탕 흐름이 연속적이지 못하고 단절되어 용탕내부로 공기의 혼입과 깨어진 표면 산화막의 혼입이 증가하기 때문에 발생하게 된다.

Fig. 4와 Fig. 5에 99.9%의 주석을 각각 경동속도를 0.25 r.p.m.과 6.00 r.p.m.으로 경동주조 했을 때, 용탕의 충전거동을 나타내었다. 경동속도가 느린 0.25 r.p.m.의 경우 용탕의 초기 주입속도가 작아 용탕선단과 주형 바닥면과의 충돌에 의한 용탕의 되튀김 현상이 상대적으로 적은 것을 관찰 할 수 있었으며, 충전이 계속되는 동안에도 충전되는 용탕의 흐름이 안정적인 것을 관찰 할 수 있었다. 반면에 경동속도가 상대적으로 큰 6.00 r.p.m.의 경우에는 주형 바닥면에서의 충돌에 의한 되튀김이 크고, 주입되는 용탕내부에 공기가 고립되어 포집되는 것을 관찰 할 수 있었다. 따라서 경동속도가 커질 수록 용탕선단에 미치는 압력이 커져 용탕의 안정성이 깨어지고, 용탕 내부로 공기의 포집과 표면산화막의 혼입이 상대적으로 매우

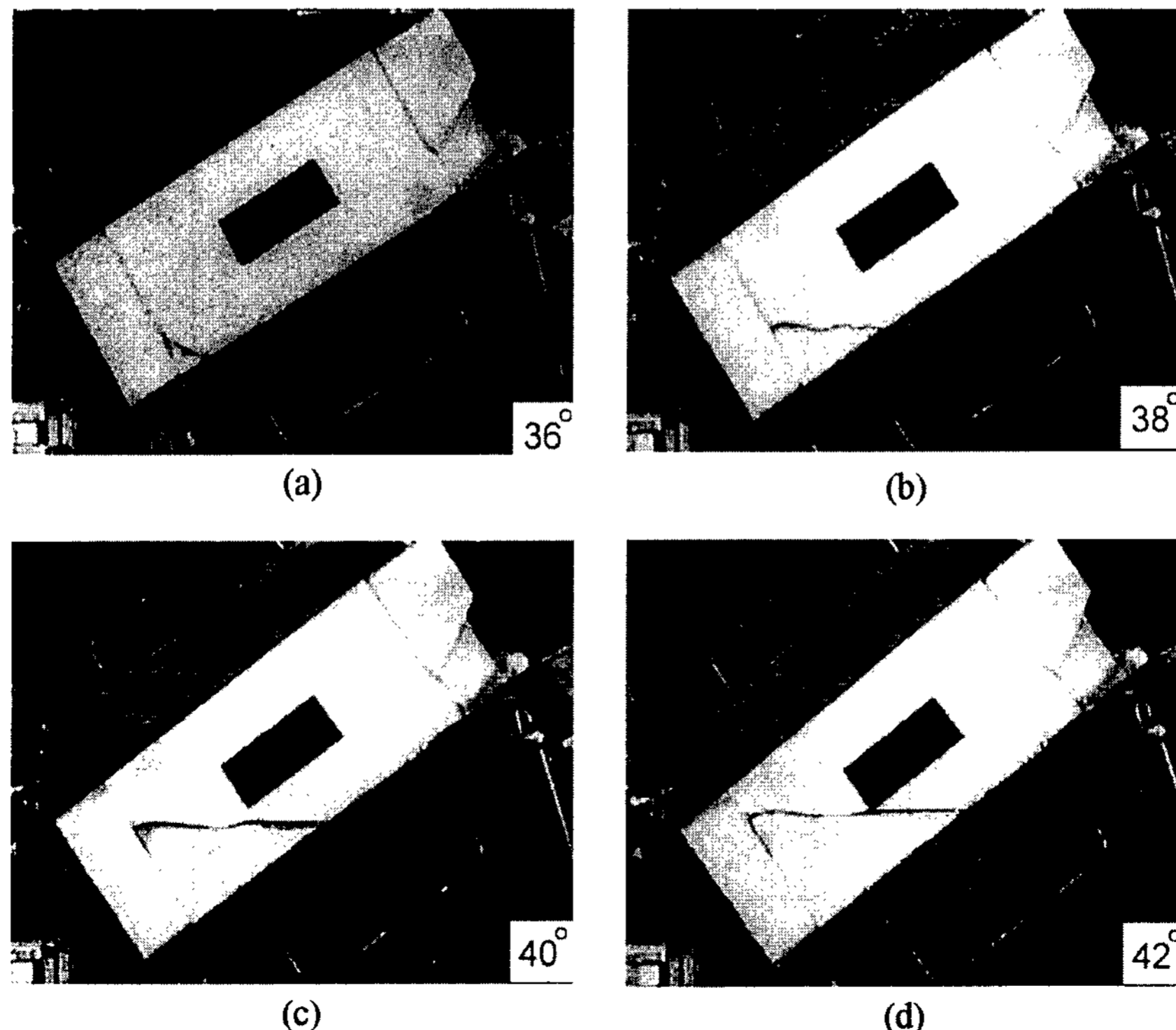


Fig. 4. Four stages of filling pattern in the gravity tilt pour casting of a pure liquid Sn with a rotation speed of 0.25 r.p.m.; (a) 20.21 sec, (b) 22.06 sec, (c) 24.00 sec, and (d) 25.12 sec.

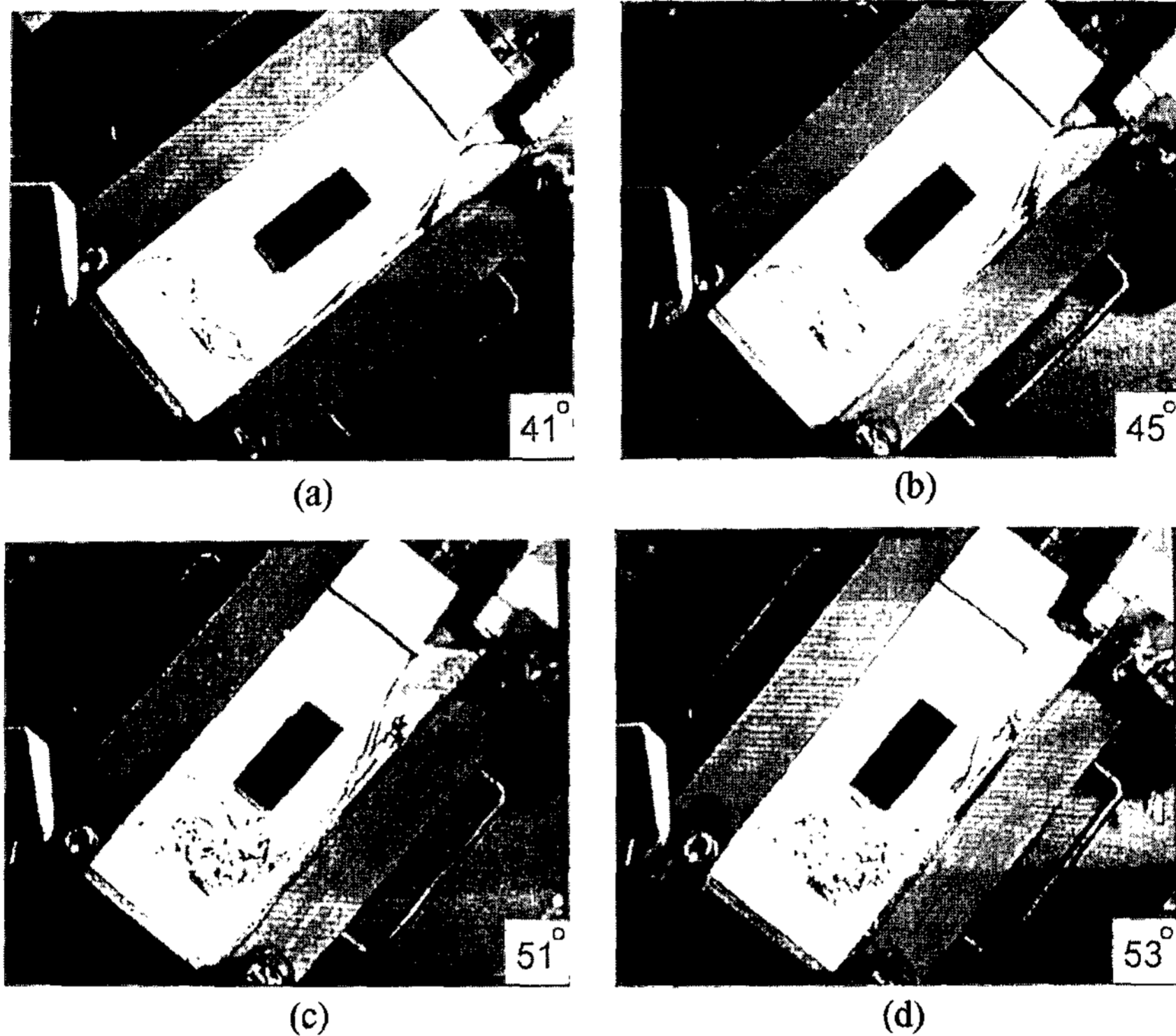


Fig. 5. Four stages of filling pattern in the gravity tilt pour casting of a pure liquid Sn with a rotation speed of 6.00 r.p.m.; (a) 1.03 sec, (b) 1.10 sec, (c) 2.00 sec, and (d) 2.10 sec.

증가 하는 것으로 생각된다.

3.2 경동속도에 따른 용탕의 주입속도

경동주조에 있어서 주입되는 용탕의 속도는 경동속도와 경동각도, 주형의 크기와 형태, 용탕의 충전정도, 그리고 주물 내에서의 용탕의 위치 등에 따라 매우 다르다[10, 13]. 따라서 주형의 온도와 용탕온도 그리고 경동속도를 같게 하더라도 경동주조 과정에서 주입되는 용탕의 주입속도는 시간과 위치에 따라 변화한다.

Fig. 6은 용탕온도 720°C, 주형의 온도 400°C에서 AC4C 합금을 경동주조 하였을 때, T1, T2, T3의 온도 측정점의 시간에 대한 온도 변화를 나타낸다. 주입된 용탕이 각 온도 측정 점과 접촉할 때 온도는 급격히 상승하게 되고, 따라서 각 측정점간의 급격한 온도 변화가 발생하는 시간 간격을 구하면, 각 구간 내에서 용탕선단의 이동속도를 측정 할 수 있다. 즉 Fig. 6에서 급격한 온도의 상승이 나타나는 측정점간의 시간이 짧을 수록 해당 구간 내에서의 용탕선단의 이동속도가 빠른 것을 의미한다. 경동속도에 따라 구간 I (Division I), 구간 II (Division II)에서의 용탕선단의 이

동 속도를 Fig. 7에 나타내었다. 용탕이 최초로 주형내부로 유입되는 구간 I에서 용탕선단의 이동속도는 경동속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었고, 3.0 r.p.m.이상의 큰 경동속도에서도 용탕 표면산화막의 안정성이 깨어지는 것으로 알려진 임계 주입속도 0.5m/sec 이하를[3] 유지하였다. 따라서 구간 I의 경동 초기구간에서는 경동속도에 상관없이 용탕이 안정성을 유지한 채 주형내부로 유입되는 것으로 생각 할 수 있다. 그러나 구간 II에서의 용탕선단의 이동속도는 구간I 과 비교해서 크게 증가하였으며, 경동속도가 3.0 r.p.m. 이상인 경우에는 임계값인 0.5m/sec 이상으로 커지는 것으로 관찰되었다. 따라서 이 구간 내에서는 용탕표면이 불안정하게 되어 표면 산화막의 혼입과 공기의 포집등이 증가 할 것으로 예측 할 수 있다.

Fig. 8은 주석의 경동주조시, 구간I, 구간II에서의 용탕 선단의 이동속도를 측정한 결과이며, Fig. 9는 동일한 주조 조건하에서 경동각도에 따른 용탕의 최대속도 변화에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 나타낸다 [10]. Fig. 9에서 경동각도가 30~35° 정도일 때 용탕의 주입 속도가 가장 커지는 것으로 나타났으며, 경동각

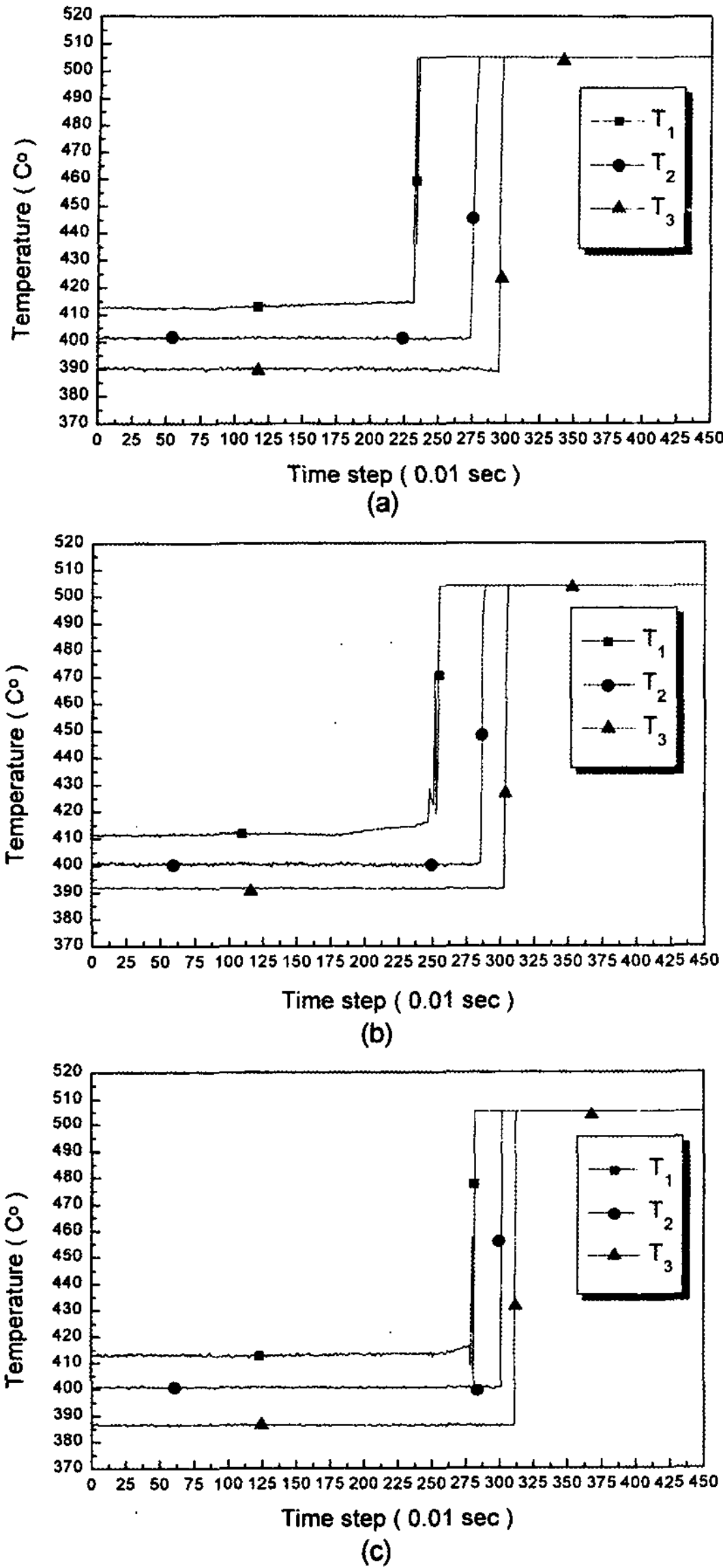


Fig. 6. The measured temperature profiles in the mold at T1, T2 and T3 positions in the gravity tilt pour casting of an AC4C Al alloy with various rotation speeds; (a) 0.25 r.p.m., (b) 0.50 r.p.m., and (c) 6.00 r.p.m.

도가 점차 증가함에 따라 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 4와 Fig. 5에서의 충전단계와 경동 각도를 고려 할 때 용탕선단이 구간 I, 구간 II를 통과 할 때 용탕의 주입속도가 가장 커지는 것으로 생각 할 수 있다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9를 고려 할 때 구간 II에서 측정된 용탕선단의 이동속도와 계산되어진 용탕의 최대주입속도가 유사한 양상을 보이는 것을 알 수 있

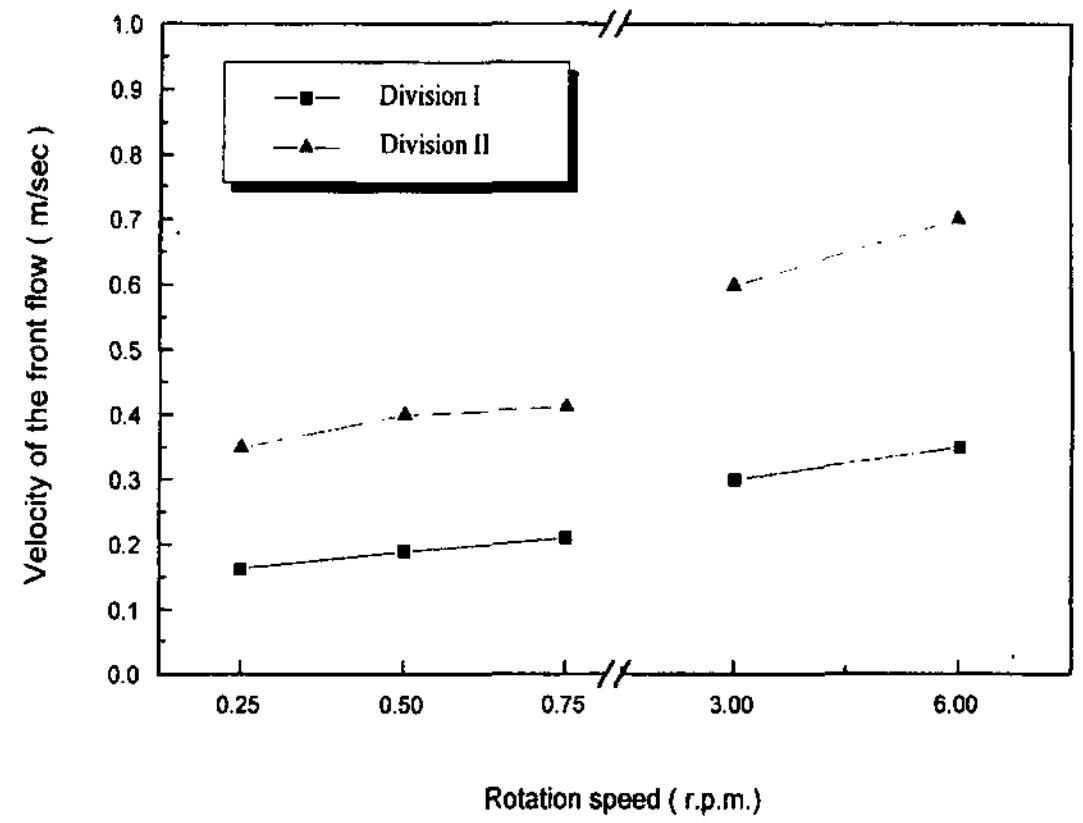


Fig. 7. The effect of rotation speed on the velocity of the front flow of an AC4C Al alloy at the initial stage of pouring.

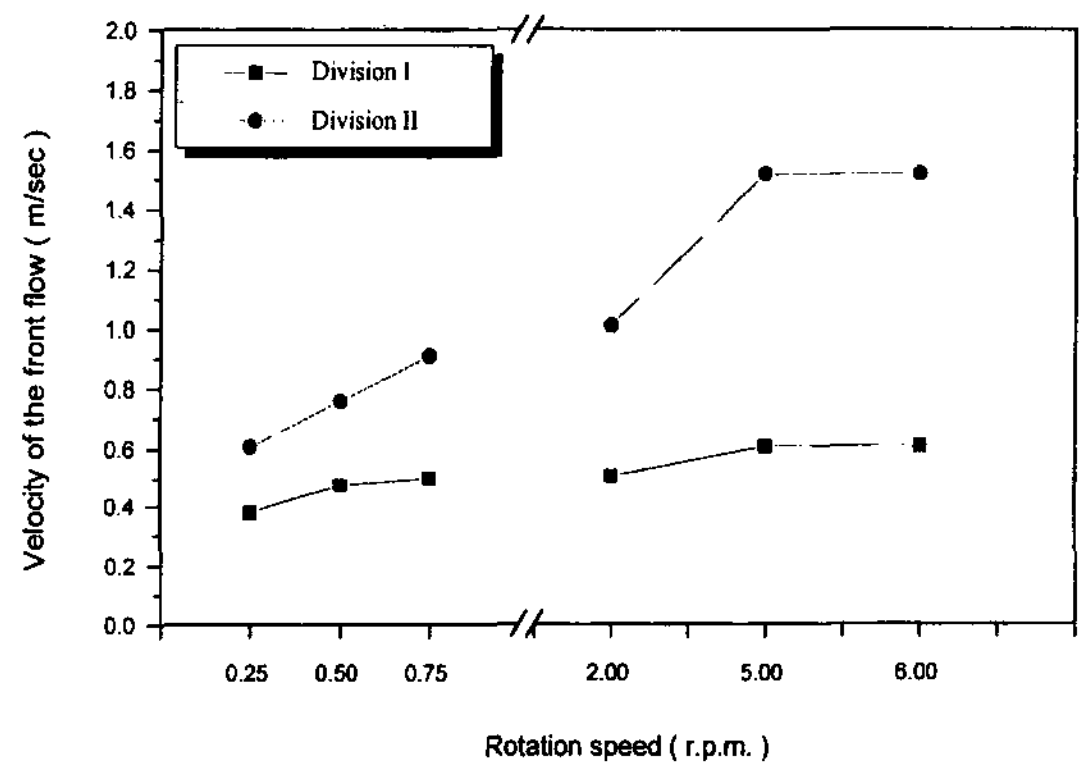


Fig. 8. The effect of rotation speed on the velocity of the front flow of a pure Sn at the initial stage of pouring.

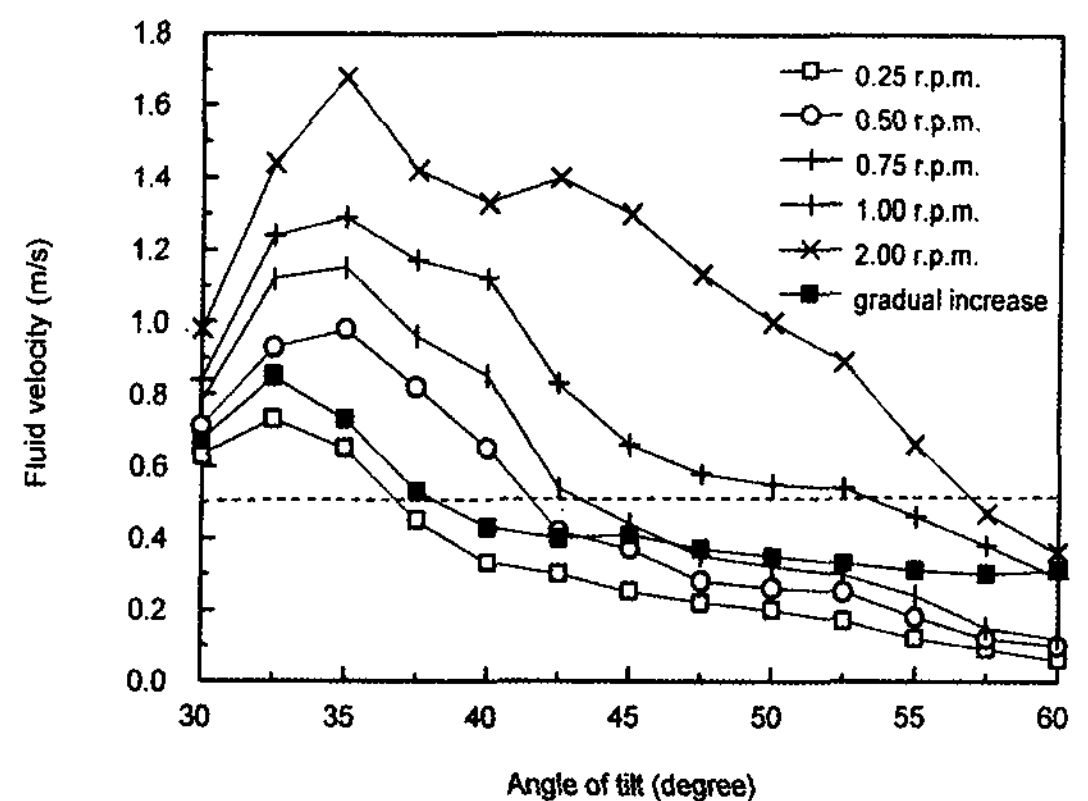


Fig. 9. The effect of rotation speed on the maximum fluid velocity of the free surface [10].

다. 따라서 AC4C의 경동주조에 있어서도 이와 유사한 경향을 보이는 것으로 생각 할 수 있으며, 구간 II에서 용탕 선단의 이동속도가 임계속도보다 작게 유지되는 0.75r.p.m.이하의 경동속도에서 용탕의 안정성이 유지될 것으로 예측 할 수 있다.

3.3 X선 투과 시험

Fig. 10은 AC4C합금을 용탕온도 720°C, 주형온도 400°C에서 경동주조한 시편과 함께 Fig. 9의 결과를 토대로 하여 초기 경동각도가 45° 이하까지는 경동속도를

0.25 r.p.m.으로 유지시킨 후, 점진적으로 1.5 r.p.m. 까지 증가시켜 주조한 시편의 X선 투과시험 결과를 나타낸다. 경동속도가 증가함에 따라 내부 결함의 양이 많아지는 것으로 관찰되었으며, 결함의 분포범위도 넓어졌다. 이것은 경동속도가 커질수록 충전과정 동안 용탕 흐름에서의 난류발생 정도와 발생하는 범위가 커지기 때문이라고 생각된다[10, 13]. 경동속도가 가장 작은 (a)의 경우 용탕 주입속도는 충분히 작아 탕류에 의한 주물결함이 발생하지 않았으나, 주입에 걸리는 시간이 길어 주형을 미처 채우지 못하는 용탕불완전충진(misrun)

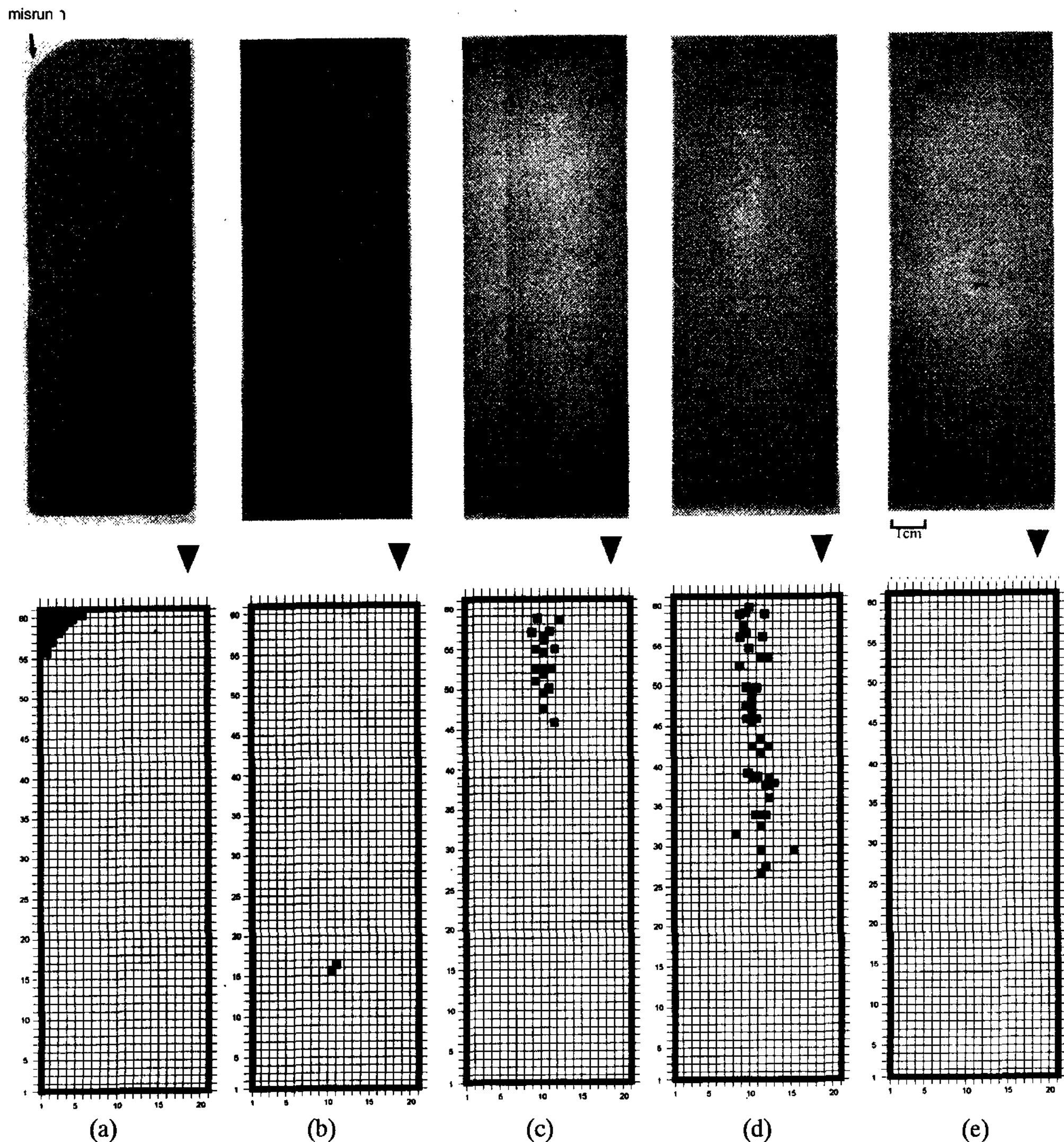


Fig. 10. Radiographs of the gravity tilt pour castings with various rotation speeds; (a) 0.25 r.p.m., (b) 0.75 r.p.m., (c) 6.00 r.p.m., (d) gravity pour without tilting, and (e) gradual increase of rotation speed from 0.25 to 1.50 r.p.m.

이 발생하였으며, (e)의 경우처럼 경동속도를 연속적으로 증가시킨 경우 탕류의 영향이 큰 경동 초기엔 충분히 낮은 용탕 유동속도를 유지할 수 있으며, 어느 정도의 충전이 이루어진 다음 경동속도를 증가시킴으로써 원활한 충전과 함께 충전시간을 줄일 수 있었기 때문에 내부결함과 충전불량 없이 건전한 주물을 얻을 수 있었던 것으로 생각된다.

3.4 용탕 및 주형온도에 따른 응고조직의 변화

본 실험에서는 용탕의 주입온도와 주형온도의 영향을 평가하기 위해 시편의 종단면을 절단한 후 부식액 (증류수 59 ml, HCl 30 ml, HNO₃ 10 ml, HF 1 ml)으로 부식시켜 중심부의 거시응고조직을 관찰하였다. Fig. 11은 금형의 온도와 경동속도가 각각 400°C와 0.75 r.p.m. 일때 용탕주입온도 변화에 따른 응고조직을 나타낸다. Fig. 12에 나타내었듯이 0.75 r.p.m.과 6.0 r.p.m.의 모든 경우에 용탕의 온도가 증가할수록 결정립 크기는 증가하였다. 같은 용탕온도에 대해서

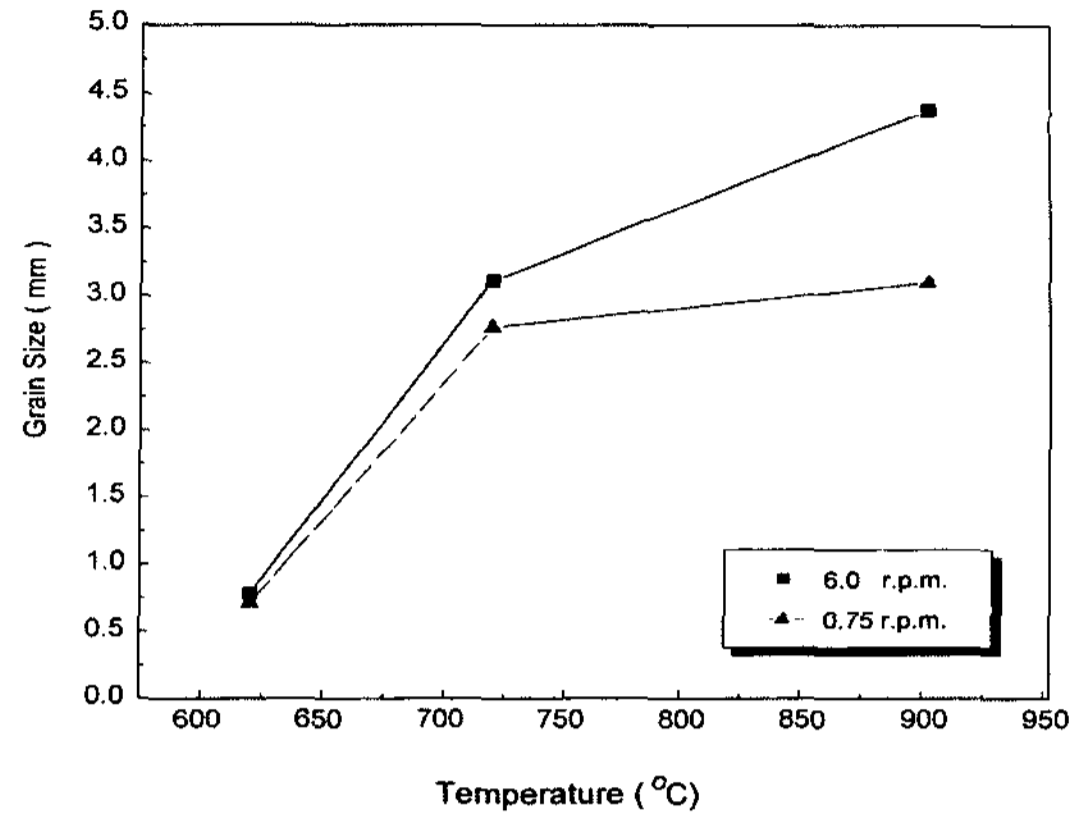


Fig. 12. The effect of pouring temperature on the grain size of the gravity tilt pour cast AC4C Al alloy.

도 경동속도가 느릴수록 결정립 크기가 감소하였다. 이것은 경동속도가 작을 경우 경동이 시작된 후 용탕이 주입 컵에서부터 주형내부로 완전히 충전되는 데 까지 소모되는 시간이 상대적으로 길기 때문에 용탕

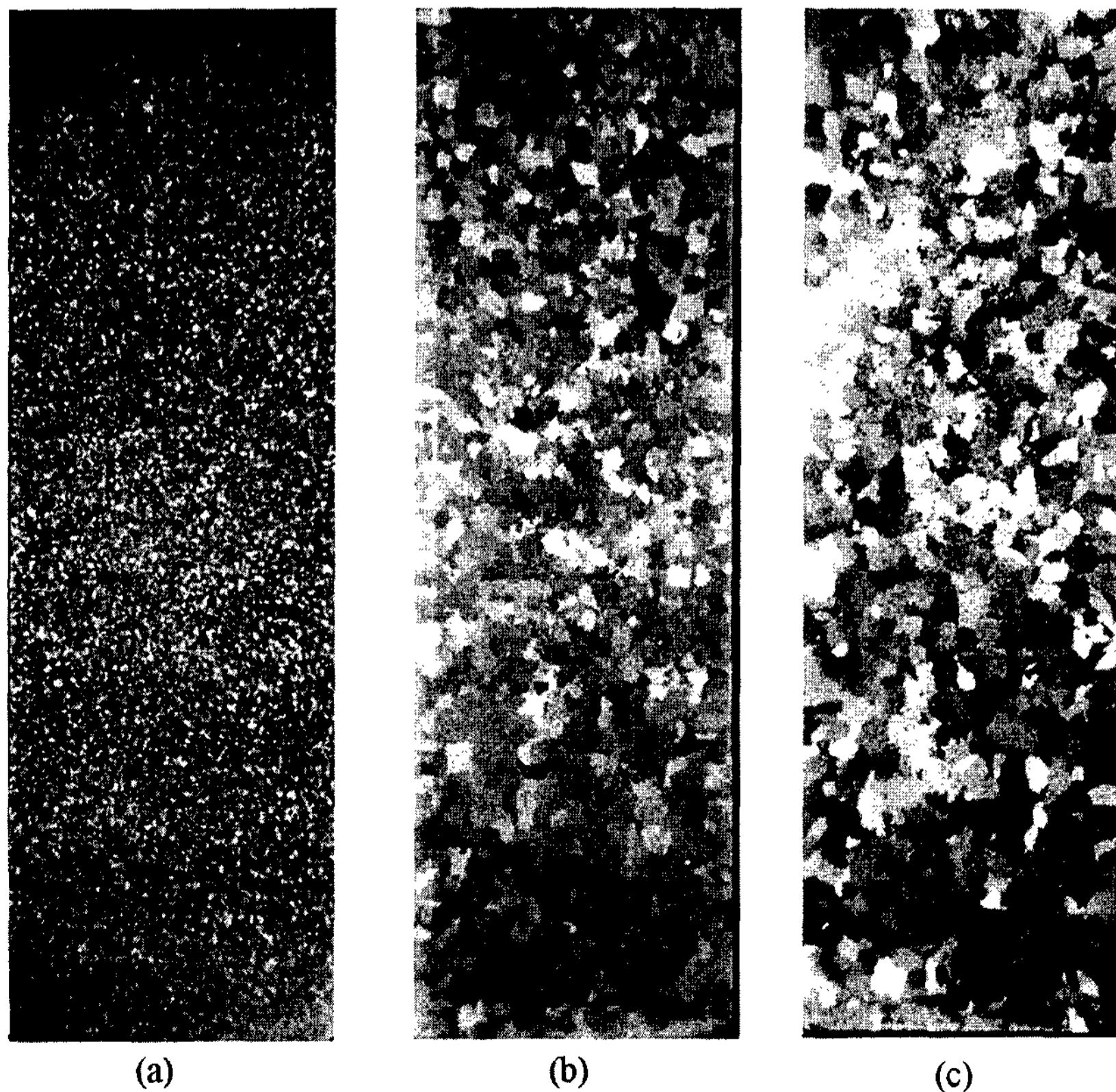


Fig. 11. The effect of pouring temperature on the macrostructures of the gravity tilt pour cast AC4C Al alloy with a rotation speed of 0.75 r.p.m. and a mold temperature of 400°C; (a) 620°C, (b) 720°C, and (c) 900°C.

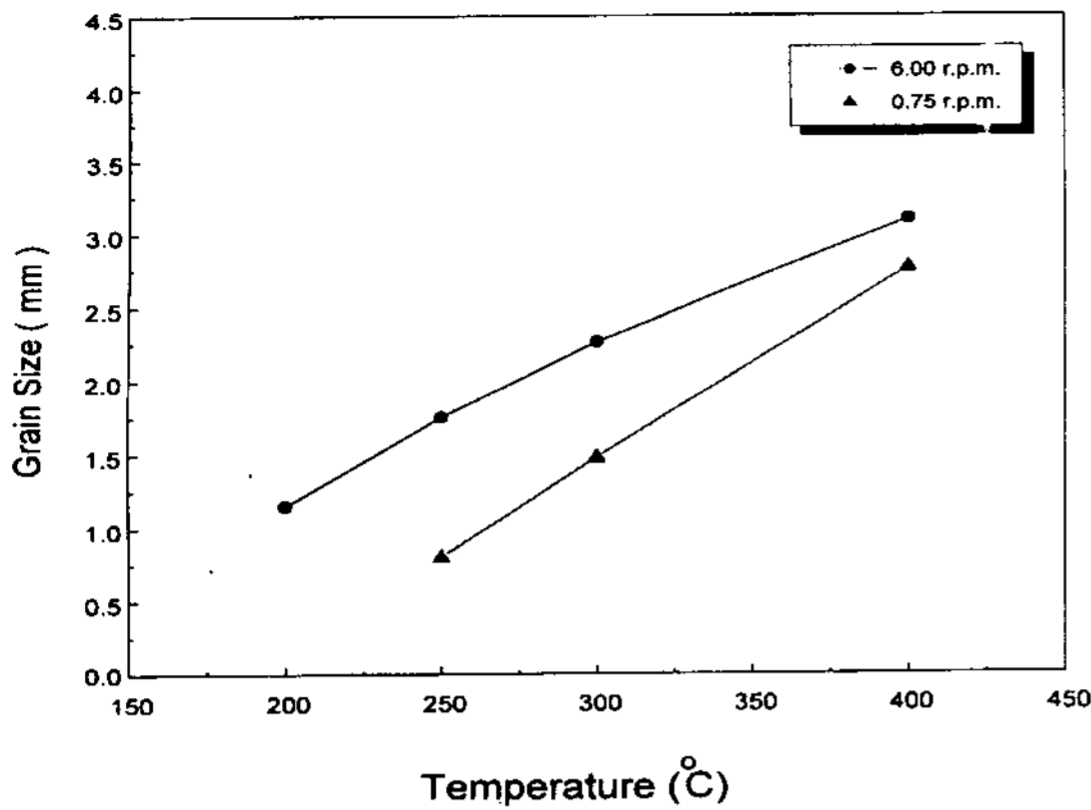


Fig. 13. The effect of mold temperature on the grain size of the gravity tilt pour cast AC4C Al alloy.

이 주입컵내에서 냉각되어 주입되는 온도가 상대적으로 낮아졌기 때문이라고 생각된다.

Fig. 13은 주형온도에 따른 응고조직의 크기변화를 나타낸다. 주형의 온도변화에 따른 영향은 용탕온도 변화의 영향과 같이 주형의 온도가 증가할수록 결정립 크기가 증가하는 경향을 나타내었다.

3.5 기계적 특성 평가

Fig. 14와 Fig. 15는 각각 용탕온도 720°C, 주형의 온도 400°C로 일정할때 경동속도에 따른 굽힘 저항강도와 인장강도 변화를 나타내었다. 일반적으로 경동주조한 시편의 경우 일반 중력주조한 시편에 비해 우수한 성질을 나타내었으며, 특히 경동속도가 낮을수

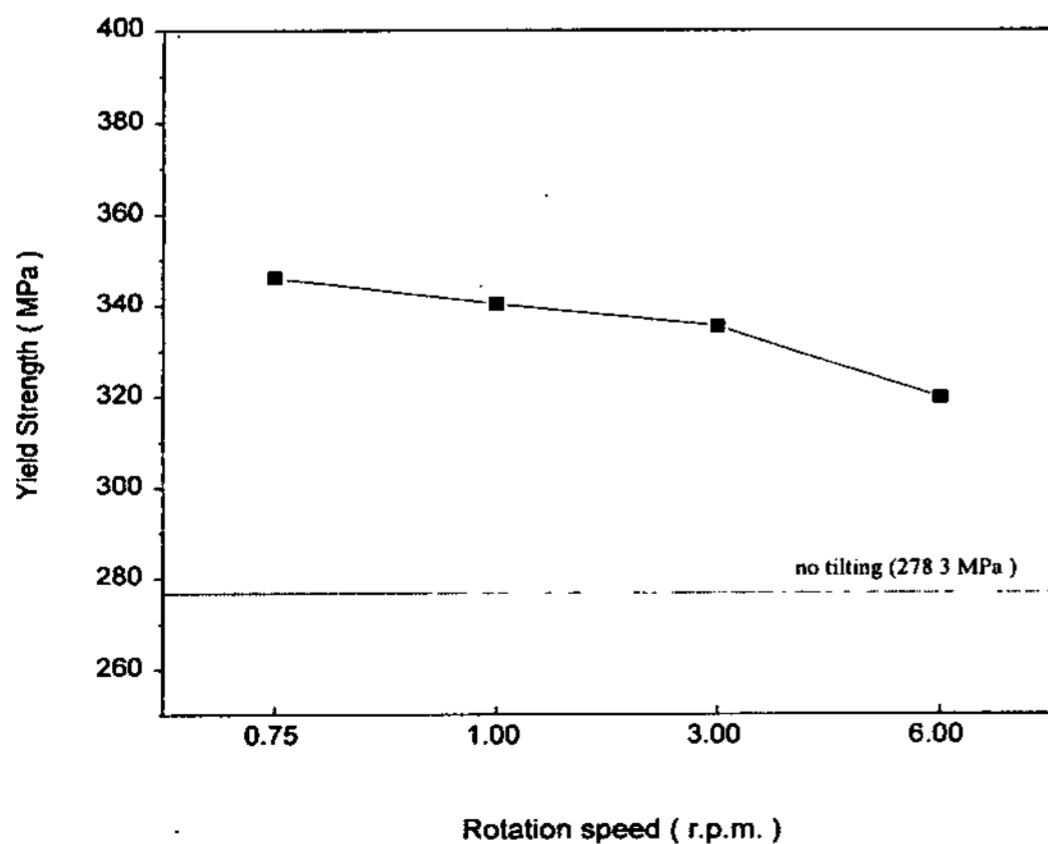


Fig. 14. The effect of rotation speed on the 3-point bending strength of the gravity tilt pour cast AC4C Al alloy.

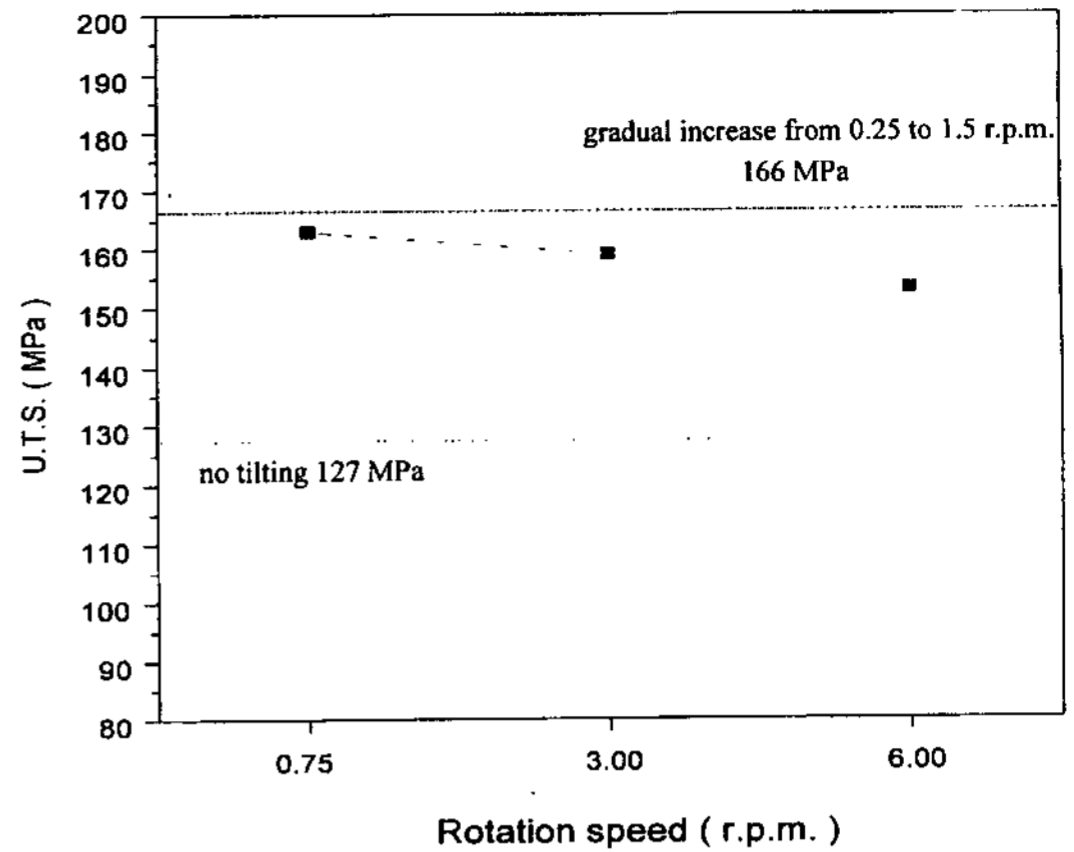
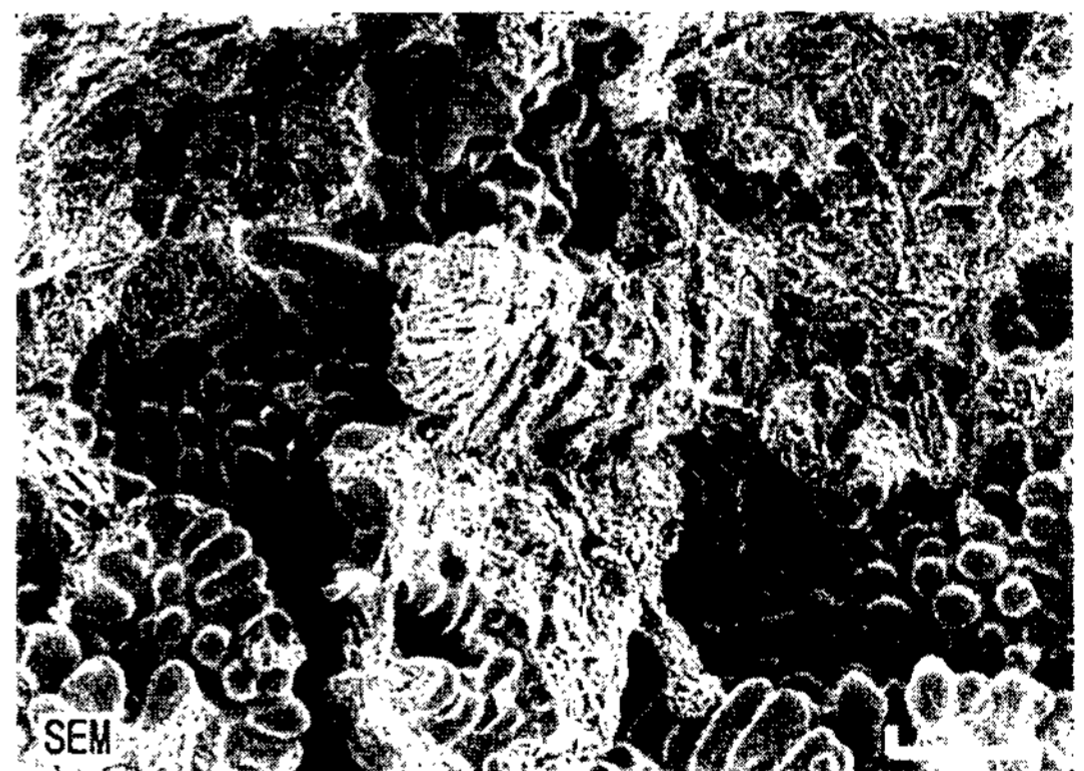


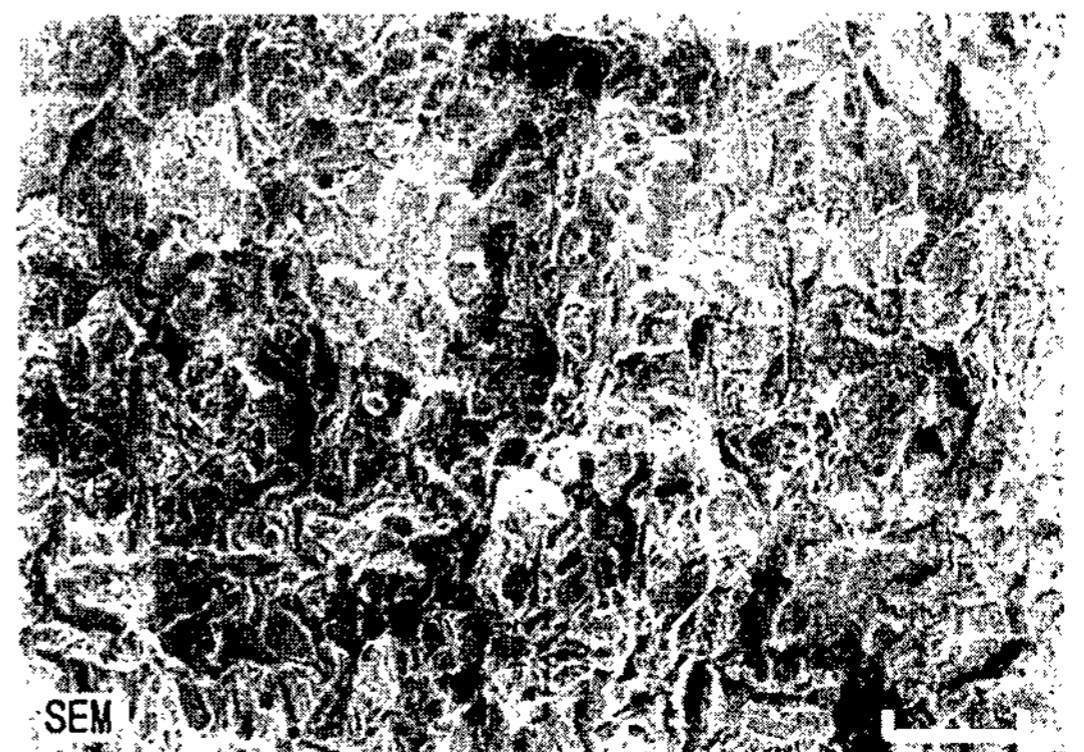
Fig. 15. The effect of rotation speed on the tensile strength of the gravity tilt pour cast AC4C Al alloy.

록 상대적으로 다소 우수한 기계적 성질을 보이는 것으로 관찰되었다. 이것으로 보아 저속의 경동주조의 경우 용탕의 주입속도가 상대적으로 느렸기 때문에



(a)

100 μm



(b)

100 μm

Fig. 16. Fracture surface of the tensile-test specimen.

난류에 의한 주물 내부로의 공기의 혼입과 산화막의 혼입에 의한 내부결함 발생이 적었고, 주입구쪽에서의 지향성응고를 보다 안정적으로 유도할 수 있게 되어 내부에 수축공 발생을 최대한 억제 할 수 있었기 때문에 상대적으로 우수한 기계적 성질을 나타내었던 것으로 생각된다. Fig. 16은 인장시편 파단면에서 결함이 존재하였던 부위와 그렇지 않은 부위에 대한 SEM 사진이다. 응고조직이 그대로 나타나는 (a)의 경우처럼 기포 및 수축공에 의한 내부결함이 많이 존재한 경우 주물은 치밀한 조직을 형성하지 못하고, 따라서 양호하지 못한 기계적 성질을 나타내게 된다. 한편 본 실험에서는 초기 주입속도를 0.25 r.p.m.으로 낮게 유지한 후 경동각도가 45° 이상 되었을 때부터 1.5 r.p.m. 까지 연속적으로 증가시킨 경우에 있어서 비교적 가장 우수한 인장 강도 값을 나타내었는데 이는 용탕의 주입속도가 가장 크게되는 초기에는 경동속도를 낮게 유지하여 용탕을 안정적으로 주입시키면서 어느 정도의 충전이 이루어진 후 경동속도를 증가 시킴으로써 주형 상층부에서의 용탕의 충전이 원활하게 이루어졌기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

주석 및 AC4C 합금의 경동식 중력주조에 있어서 경동속도, 주입온도 및 주형온도등의 주조변수가 주물결함 및 건전성에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) AC4C 합금의 경동주조시, 경동속도가 낮을수록 상대적으로 우수한 기계적 성질을 나타냈으며, 따라서 경동속도가 낮을 경우, 탕류에서의 난류 발생에 의한 공기 혼입과 산화막 혼입등이 감소하여 주물결함이 줄었음을 간접적으로 확인 할 수 있었다.

2) 경동속도를 0.50 r.p.m. 이하로 유지함으로써 내부주물결함이 가장 적은 양호한 주물을 얻을 수 있었으며, 용탕선단의 이동속도가 용탕표면의 안정성에 대한 임계주입속도 0.5m/sec 보다 작게 유지되었음을 확인 할 수 있었다.

3) 경동속도를 주형의 경동각도 45° 이내에서 0.25 r.p.m.으로 유지시킨 후 1.5 r.p.m.으로 연속적으로 증가시킨 경우, 주물결함이 적고, 기계적 성질이 우수한

주물을 얻을 수 있었다. 따라서 용탕의 주입속도를 임계속도 이내로 유지하며, 경동속도를 변화시키는 방법이 충전시간 단축과 주형 상단부에서의 용탕의 원활한 충진을 유도 할 수 있는 효율적인 방안임을 확인 할 수 있었다.

4) 경동식 중력주조시 용탕과 주형의 온도가 높고 경동속도가 클수록 결정립이 조대해지는 경향을 나타내었다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. C. Flemings : Solidification Processing, McGraw-Hill, (1974).
- [2] J. Campbell : Casting, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, (1991).
- [3] J. Campbell : Journal de Physique IV, Colloque C7, supplement au Journal de Physique III, Vol.3, pp. 861-872, (1993).
- [4] G. W. Stahl : Proc. of AFS International Conference, Permanent Mold Casting of Aluminum, Miami, (1989).
- [5] G. W. Stahl : AFS Trans. vol. 69, (1963), pp. 476-478.
- [6] T. T. Nguyen and J.F. Carrig : Final Report INCRA Project No. 390, (1986).
- [7] 이민수, 김기영, 김성우 : 한국주조공학회지 14권 4호, pp. 353-362, (1994).
- [8] H. Nieswaag and H. J. J. Deen : Paper No. 10, 57th World Foundry Congress, Osaka, (1990), Oct.
- [9] P. Gilotte and R. Hamar : Proc. of Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes V, TMS-AIME (1991) pp. 57-64.
- [10] S. B. Kim, K. D. Yeom, C. P. Hong : Int. J. Cast Metals Res., (1997), 10, pp. 49-56.
- [11] S. B. Kim, E. S. Kweon, C. P. Hong : Proc. of the 3rd Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Processes, (1995).
- [12] S. B. Kim, C. P. Hong : Proc. of the 3rd Asian Foundry Congress, The Korean Foundrymen's Society, (1995).
- [13] 김성빈 : "수치해석에 의한 주조공정의 3차원 열, 유동 및 응고해석", 연세대학교 박사학위논문, (1997).
- [14] 권응수 : "경동식 중력주조시 경동속도에 따른 3차원 열 및 유동해석", 연세대학교 석사학위논문, (1995).