

|||||||  
論 文  
|||||||

# 알루미늄 합금 소실모형주조 시의 주형충전재에 따른 특성변화

김기영<sup>†</sup> · 이경환<sup>\*</sup> · 임경화

## Investigation on Characteristics of Various Mold Packing Materials in Lost Foam Casting of Aluminum Alloy

Ki-Young Kim<sup>†</sup>, Kyung-Whoan Lee<sup>\*</sup> and Kyung-Hwa Rim

### Abstract

Silica sand, zircon sand, and steel shots were used as mold packing materials in lost foam casting of the aluminum alloy bar. Vibration acceleration in three directions and temperatures in the casting and mold were measured, and packing and cooling characteristics of these materials were investigated. Packing densities increased with increase in vibration magnitude and time, and were 1.41~1.49 g/cm<sup>3</sup> for silica sand, 2.54~2.86g/cm<sup>3</sup> for zircon sand, and 3.92~4.52 g/cm<sup>3</sup> for steel shots. Sound castings were obtained only without evacuation of the flask during pouring. Solidification time became faster in order of silica sand, zircon sand and steel shot packing because steel shot has the highest cooling capacity of them. Solidification time of steel shot packing was shortened to about 1/2 of silica sand packing. Cooling capacity of sand mold was generally evaluated by heat diffusivity of the mold, however could be simply evaluated with specific heat per unit volume of the packing material in lost foam casting. (Received May 9, 2002)

**Key words:** packing material, packing density, cooling capacity

### 1. 서 론

소실모형주조법은 사처리 문제를 해결할 수 있어서 주물 생산 시의 환경부하 저감 뿐만아니라, 기존 사형 주조공법의 후처리 문제를 해결할 대안으로써 각광을 받고 있는데[1,2], 이미 자동차 부품에의 양산이 실현되고 있으며, 미국의 21세기 주조산업 발전보고서에서도 소실모형주조법은 향후 발전 가능성이 큰 기술로 주목하고 있다[3].

지구 대기오염의 주원인으로 지목되고 있는 자동차의 배기가스 저감을 위한 자동차의 경량화를 위해서는 경량화에 대응하는 고강도의 부품이 요구되므로 알루미늄합금이 사용되고 있는데, 기존의 주철의 소실모형 주조방법과 약간 다른 방법이 요구된다. 예를 들면 소실모형 주조 시의 충전재를 다양하게 사용할 수 있으

며, 또한 냉각능이 큰 충전재를 사용하면 냉각속도를 빨리 할 수 있어서 조직을 미세화하여 강도를 높일 수도 있다[4].

이 연구에서는 알루미늄합금의 소실모형주조 시에 주형충전재를 달리하여 각 충전재의 충전특성과 그 냉각능을 비교하고자 하였다.

### 2. 실험방법

소실모형주조에서는 모형 주위에 충전재의 충전이 잘 되어야 하며, 또한 모형재의 변형이 없어야 하는데, 이는 진동시스템 및 진동강도 등에 의하여 영향 받게 된다. 주조시험을 위하여 스텐레스강제의 직경 250 mm, 높이 350 mm의 원통형으로 제작한 소실모형주조 플래스크 및 시편의 크기는 그림 1과 같은데, 주입 후의

한국기술교육대학교(Korea University of Technology and Education)  
<sup>\*</sup>한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)  
<sup>†</sup>E-mail : simha@kut.ac.kr

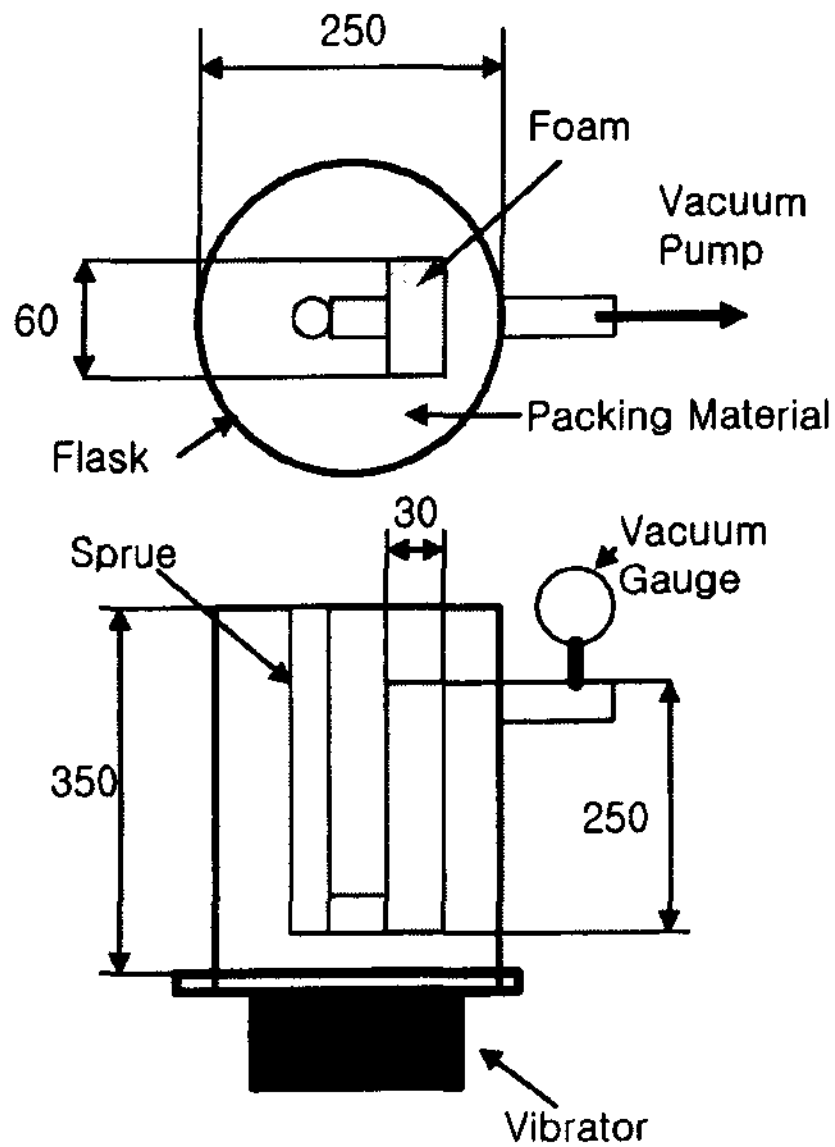


Fig. 1. Casting Apparatus

동측정 시스템의 개요를 나타낸다.

주형충전재로는 인조규사(6호사), 지르콘사 및 스틸 쇼트볼(직경 0.3, 0.5, 1.0, 2.4 mm)을 사용하였고, 일정크기, 일정시간 플라스크를 진동시키면서 충전재로 채운 후 플라스크 상부면에서부터 내려간 높이를 측정하여 충전밀도로 하였다.

시편은 30 t×60 w×250 hmm 크기의 봉상으로 발포 스티로폼 모형(발포배율 약 50배)을 사용하여 주조하였고, 주조합금은 A356.2(Al-7%Si-0.3%Mg)를 사용하였으며, 주입온도는 700°C로 하였다. 탕구봉은 주입용도관을 사용하였으며, 도형재는 사용하지 않았다.

충전재의 냉각능을 평가하기 위하여 주형 및 주물 내부의 정해진 부위(주물-주형 계면에서 주물 내부 쪽으로 1, 5, 15 및 주형 쪽으로 2, 7, 22 mm의 6곳)에 직경 0.2 mm의 K열전대를 삽입하여 주입 시의 각 부위의 온도변화를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 진동강도

그림 2(a)의 위치에서 플라스크의 x, y, z 방향의 진동 강도를 측정한 결과는 그림 3과 같다. 바이브레이터의 진동을 크게 할수록(바이브레이터의 크기 조절 노브로 조절, 눈금: 0~10) 진동가속도는 증가하였는데, 가속도계로 측정한 진동가속도는 x방향이 +2.76G~4G, y방향이 +0.96G~-1.13G, z방향이 3.18G~3.86G 이었다. x방향과 y방향이 차이가 나는 것은 플라스크를 고정시키는 축이 x방향의 진동 측정점과 가깝기 때문에 그만큼 플라스크의 진동이 잘 전달되었기 때문이다. 플라스크의 진동진폭은 진동가속도와 주파수를 알면  $a = A/2 \times (2\pi f)^2$ 의 관계식으로 구할 수 있다[5]. 여기서 a는 진동가속도, A는 진동진폭, f는 주파수이다. 이 식에서 진동가속도가 클수록 진폭은 커짐을 알 수 있는데, 본 실험에서의 바이브레이터의 운전주파수는 60 Hz이었으므로 위 식으로 구한 플라스크의 진폭은 각 방향으로 0.14~0.55 mm의 범위에 있었다.

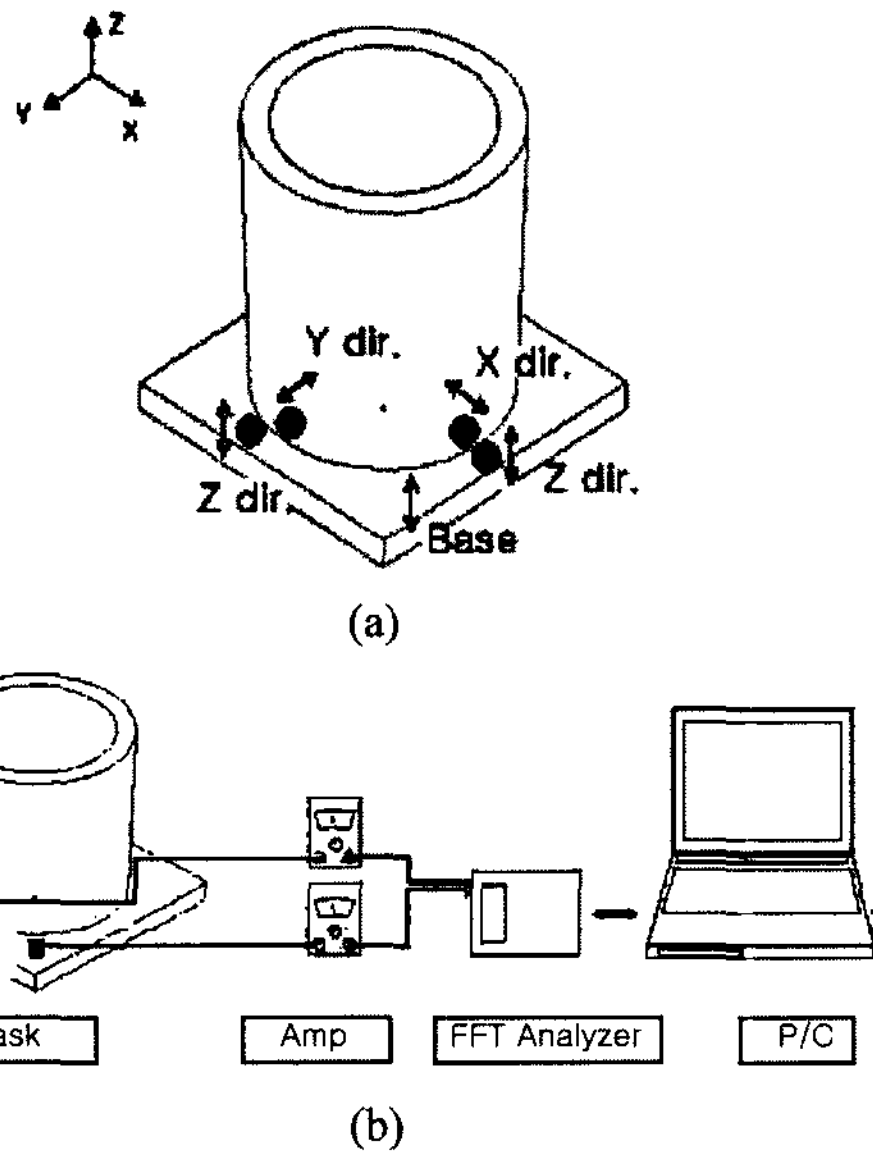


Fig. 2. (a) Measured points of vibration (b) Schematic diagram of vibration measurement system

배기를 위하여 일정한 압력으로 플라스크 내부를 감압할 수 있도록 하였다. 이 플라스크의 하부에 진동력 60 kgf의 마그네틱 바이브레이터를 장착한 후, 주형재의 충전 시에 진동정도를 알기 위하여 그림 2(a)와 같이 플라스크의 각 부위에 가속도 센서를 부착하여 x, y, z 방향으로 진동특성을 측정하였다. 그림 2(b)는 진

#### 3.2 겉보기 충전밀도

진동크기에 따른 각 충전재의 하강높이 및 겉보기 충전밀도는 그림 4와 같다. 그림에서 5분, 10분은 플라스크 하단에 부착한 바이브레이터의 일정 진동크기에서 5분, 10분 유지한 결과이다. 유지시간이 길수록

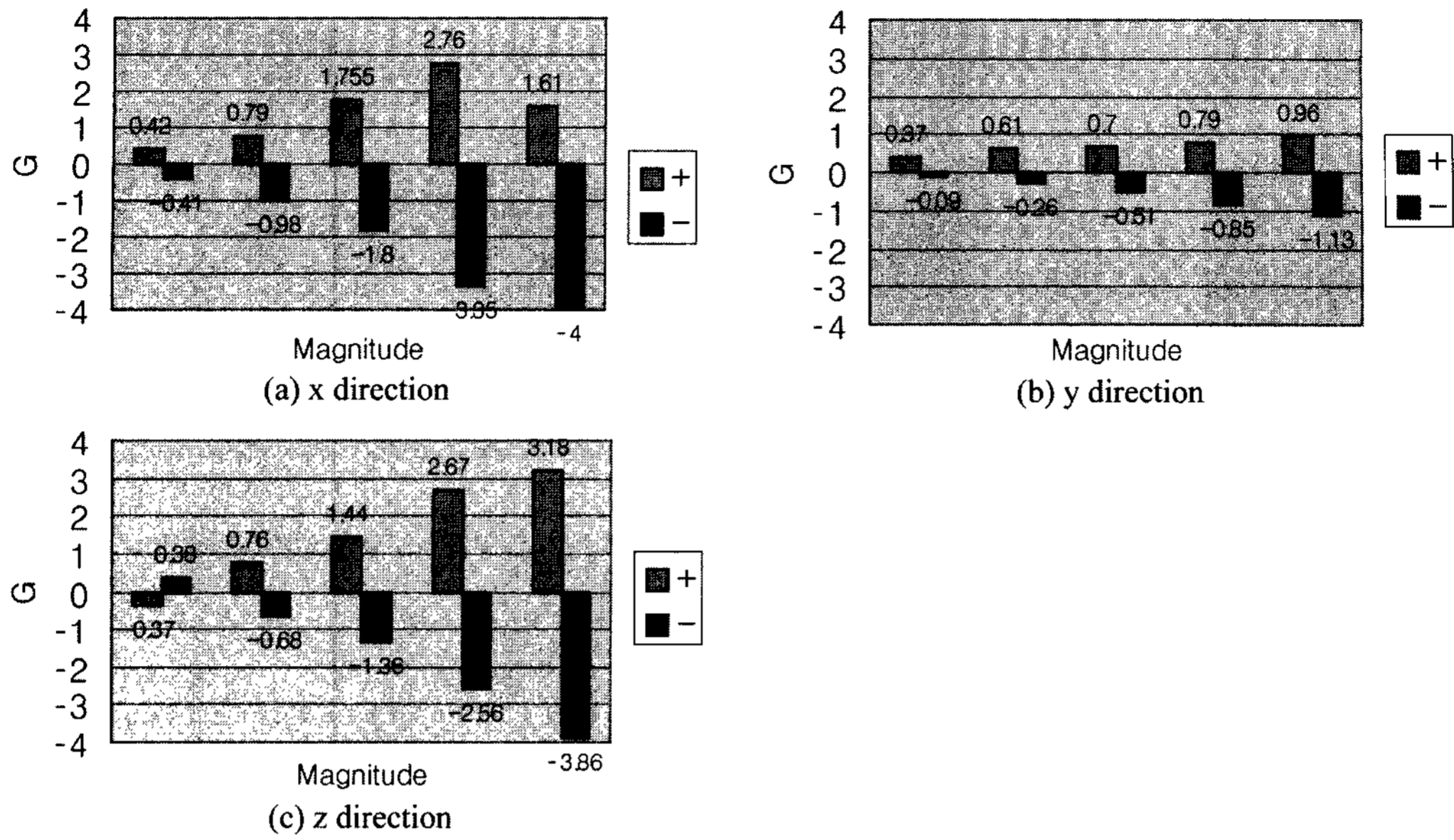


Fig. 3. Variation of vibration acceleration with vibration magnitude

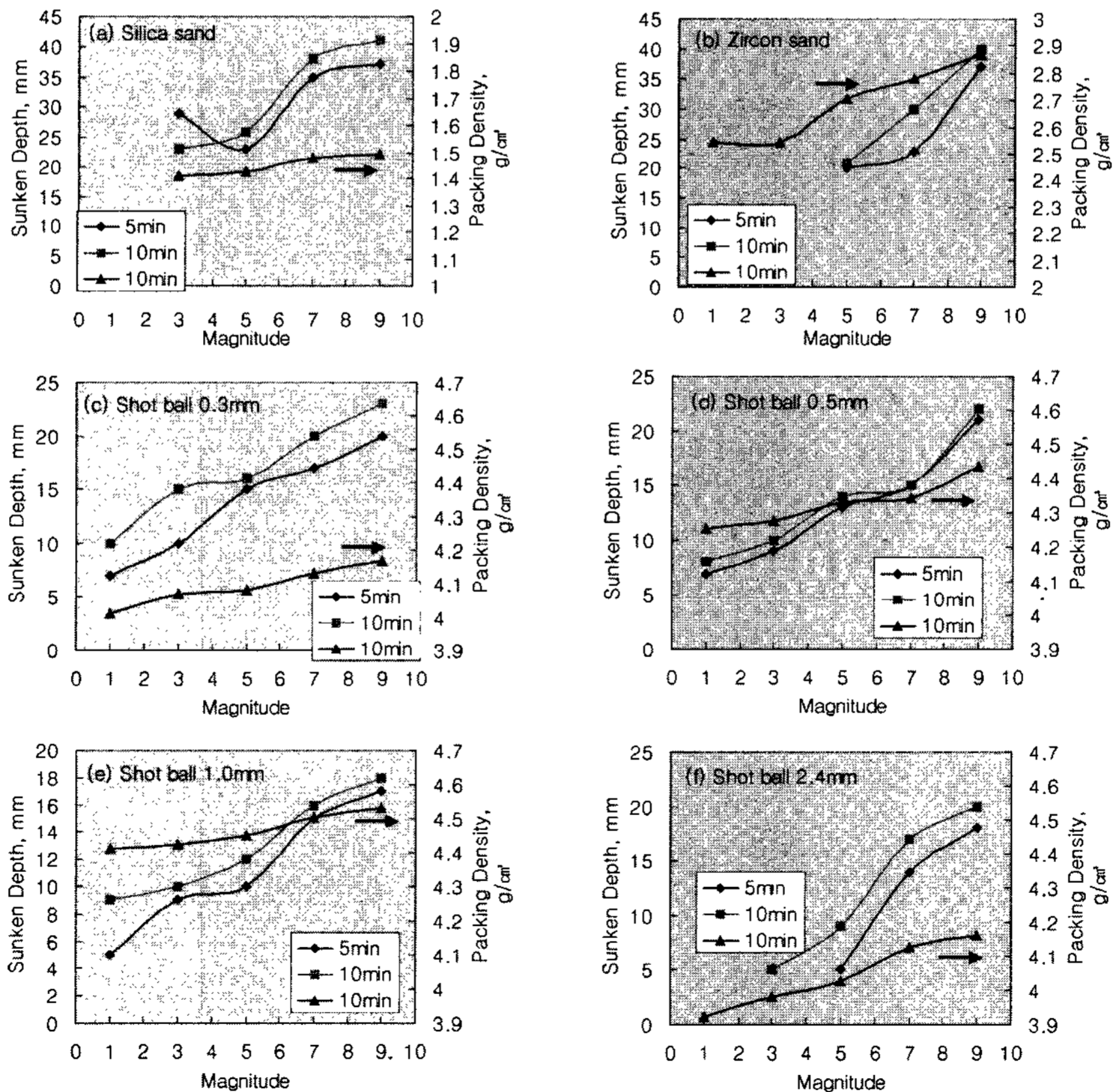


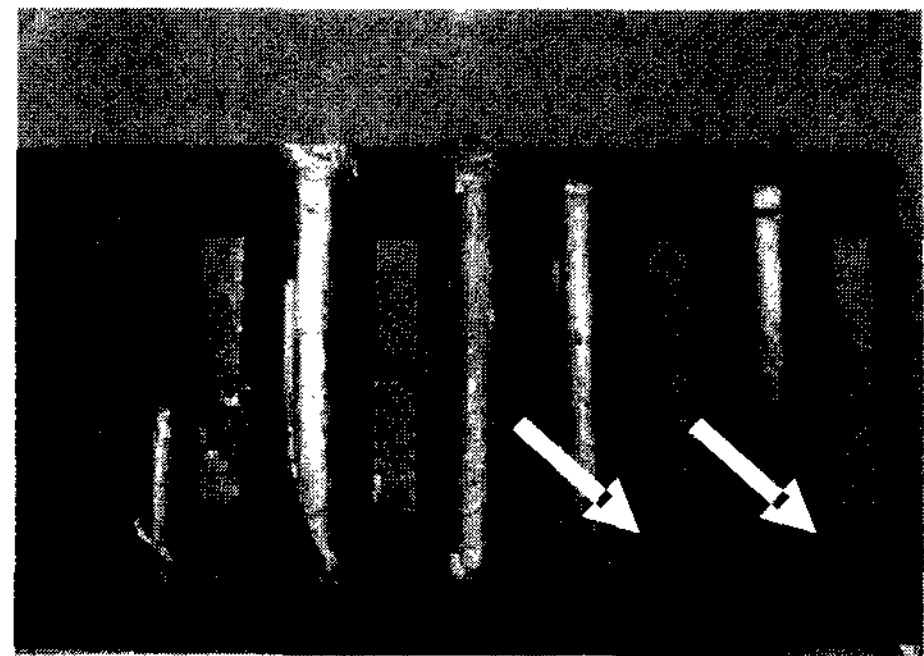
Fig. 4. Sunken depth and packing densities of various packing materials with vibration magnitude

하강높이는 증가하고 있으며(충전밀도도 증가), 진동크기가 클수록 10분 유지 후의 충전밀도는 증가하고 있다. 그러나 10분 이상 유지하여도 그 이상의 변화는 거의 없었다.

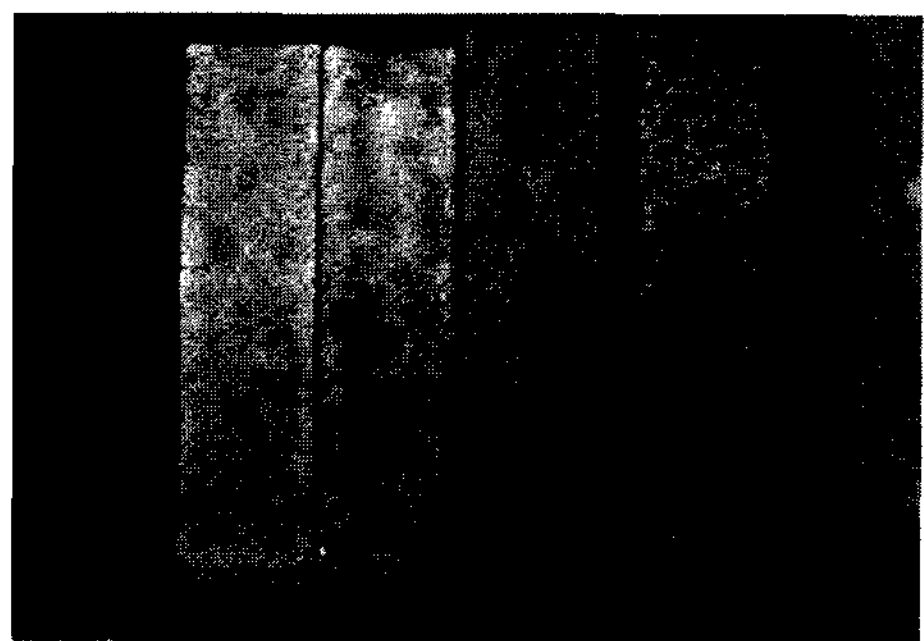
규사의 경우 진동크기 및 유지시간에 따라서 충전밀도는 1.41~1.49 g/cm<sup>3</sup>, 지르콘사는 2.54~2.86 g/cm<sup>3</sup>, 직경 0.3 mm의 스틸쇼트볼은 4.01~4.17 g/cm<sup>3</sup>, 직경 0.5 mm의 스틸쇼트볼은 4.25~4.43 g/cm<sup>3</sup>, 직경 1.0 mm의 스틸쇼트볼은 4.41~4.52 g/cm<sup>3</sup>, 직경 2.4 mm의 스틸쇼트볼은 3.92~4.16 g/cm<sup>3</sup>의 범위에 있었다. 규사, 지르콘사 및 스틸 쇼트볼의 괴상의 진밀도는 각각 2.63, 4.66, 7.46 g/cm<sup>3</sup>이므로[6], 밀도의 비로 평가한 규사의 충전율은 53.6~56.6%, 지르콘사의 충전율은 54.5~61.3%, 0.3 mm 스틸쇼트볼의 충전율은 53.8~55.9%, 0.5 mm 스틸쇼트볼의 충전율은 56.9~59.4%, 1.0 mm 스틸쇼트볼의 충전율은 59.1~60.6%, 2.4 mm 스틸쇼트볼의 충전율은 52.5~55.8%이었다. 충전재의 입도가 미세할수록 충전율이 향상될 것으로 기대할 수 있는데, 본 실험에 사용한 규사의 AFS입도지수는 66.6(평균직경 0.25 mm 부근), 지르콘사는 111.1(평균 직경 0.1 mm 부근), 0.3 mm 스틸쇼트볼은 53.6으로, 지르콘사가 가장 미세하였고 규사, 0.3 mm 스틸쇼트볼의 순으로 나타났다. 또한 스틸쇼트볼의 경우는 직경 1 mm인 경우가 충전율이 가장 높게 나타났다. 사용한 규사의 입형은 불규칙한 다각형, 지르콘사는 각진 장방형, 쇼트볼은 구형으로 충전율은 입도 뿐만 아니라 입형에도 좌우되는 것으로 보인다. 즉 규사나 지르콘사의 경우 형태의 이방성이 있는데 길이방향으로의 충전이 잘 된다면 등방성의 충전재보다도 충전율이 높은 것을 기대할 수 있다. 따라서 실제 소실모형주조 시 플래스크에 충전재를 채울 경우, 충전되는 방식에 따라서 즉 x, y, z 각 방향으로 진동이 전달되는 방식에 따라서 충전 양상이 달라질 수 있다는 것을 의미한다.

### 3.3 감압의 영향

소실모형주조에서는 충전재의 충전밀도 향상, 용탕 주입 중의 가스배출 등을 위하여 주입 시에 통상 플래스크 내를 감압하고 있다. 그림 5(a)는 충전재로 규사를 사용하여 30 t×60 w×250 hmm 크기의 A356.2합금 봉상 시편에 주입한 결과로, 용탕의 충전이 원활하지 않고 부분적으로 표면이 꺼지거나 절단된 경우이며, (b)는 쇼트볼을 충전재로 사용한 경우로, 0.3 mm



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Surface sink due to the pressure reduction during pouring (b) Attached steel shot balls to the surface of castings after solidification

직경의 쇼트볼의 경우에는 표면에 부착되지 않았으나, 0.5 mm 이상의 쇼트볼을 충전재로 사용한 경우에는 쇼트볼이 표면에 달라붙은 것을 알 수 있다. 주입 후 탕구봉 쪽의 주물 표면이 꺼지는 현상(그림 5(a)의 화살표 부분)은 스틸쇼트볼을 충전재로 사용한 경우에 심하게 나타나는 경향이 있었다. 한편 충전재로 규사와 지르콘사를 사용한 경우는 충전재의 표면부착이 발생하지 않았다.

감압을 하면 그림 5(a)와 같이 시료의 절단 또는 시료 하부의 표면이 꺼지는 현상이 나타났는데, 그림 6은 주입 시 감압의 영향을 보기 위하여 감압도에 따라서 시료 하부의 표면이 꺼진 정도를 나타낸 것으로, 충전재는 규사를 사용한 경우이다. 그림에서 감압이 증가할수록 표면의 꺼진 정도가 심해지는 것을 알 수 있는데, 알루미늄 합금의 소실모형 주조에 있어서 반드시 감압이 긍정적이지 않을 수 있다는 것을 보여준다. 여기서 표면의 꺼진 정도는 주물 밖으로 흘러나온 부분을 절단 한 후 이의 중량을 측정하여 체적으로 환산한 후 주물 체적과의 비로 표시한 것이다. 본 실험의

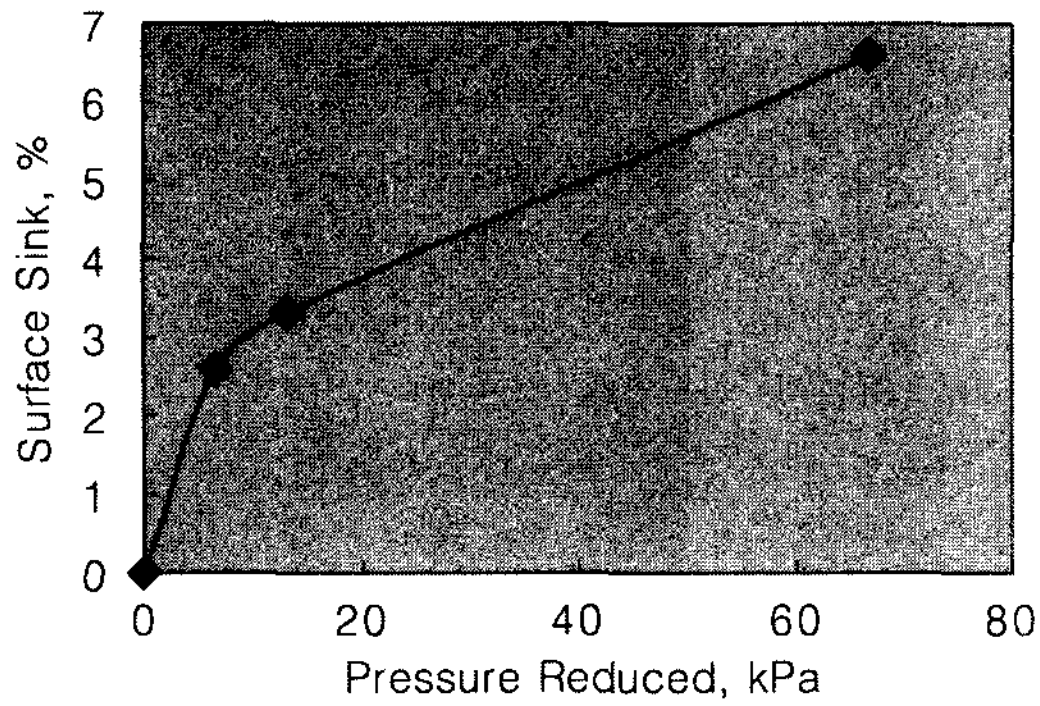


Fig. 6. Relation between surface sink and pressure reduced during pouring (silica sand packed)

경우에는 감압을 하지 않은 경우에 전전한 시료가 얻어졌다. 따라서 이후 실험은 주입 시 감압하지 않고, 충전재가 주물에 부착하지 않는 규사, 지르콘사 및 0.3 mm 스틸쇼트볼을 사용하였다.

본 연구에서는 주형충전재의 냉각능을 민감하게 평가하기 위하여 도형재를 사용하지 않았지만, 상기한 표면의 꺼짐이나 충전재의 표면 부착은 도형재를 사용하면 개선될 것으로 보이는데, 추후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

### 3.4 응고시간

충전재로 0.3 mm 쇼트볼을 사용하고, 정해진 부위 (주물-주형 계면에서 주물 내부 쪽으로 1, 5, 15 및 주형 쪽으로 2, 7, 22 mm의 6곳)에 직경 0.2 mm의 K열전대를 삽입하여 주입 시의 각 부위의 온도변화를 측정하여 결과의 일례를 그림 7에 나타낸다.

주물표면부는 응고는 중심부보다 낮은 온도에서 빠르게 진행되고 있으며, 주물에 가까운 주형의 온도도 가파르게 상승하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 충전재에 따른 응고시간, 측정위치별 주형 중의 최고온도를 나타낸 것이다. 주형의 최고온도는 주물-주형 계면에서 2 mm 및 7 mm의 위치에서 규사를 충전재로 사용한 경우가 각각 420°C, 350°C로 가장 높았으며, 지르콘사, 스틸쇼트볼의 순으로 낮아졌다. 응고시간이 빠른 충전재일수록 측정위치별 주형 중의 최고온도는 낮아졌는데, 이는 주형충전재의 열확산율의 차이 때문으로 보인다. 충전재별 응고시간은 주물 중심부(표면에서 15 mm)를 기준으로 규사는 7분 30초, 지르콘사는 5분, 스틸쇼트볼은 3분 45초 정도로, 스틸

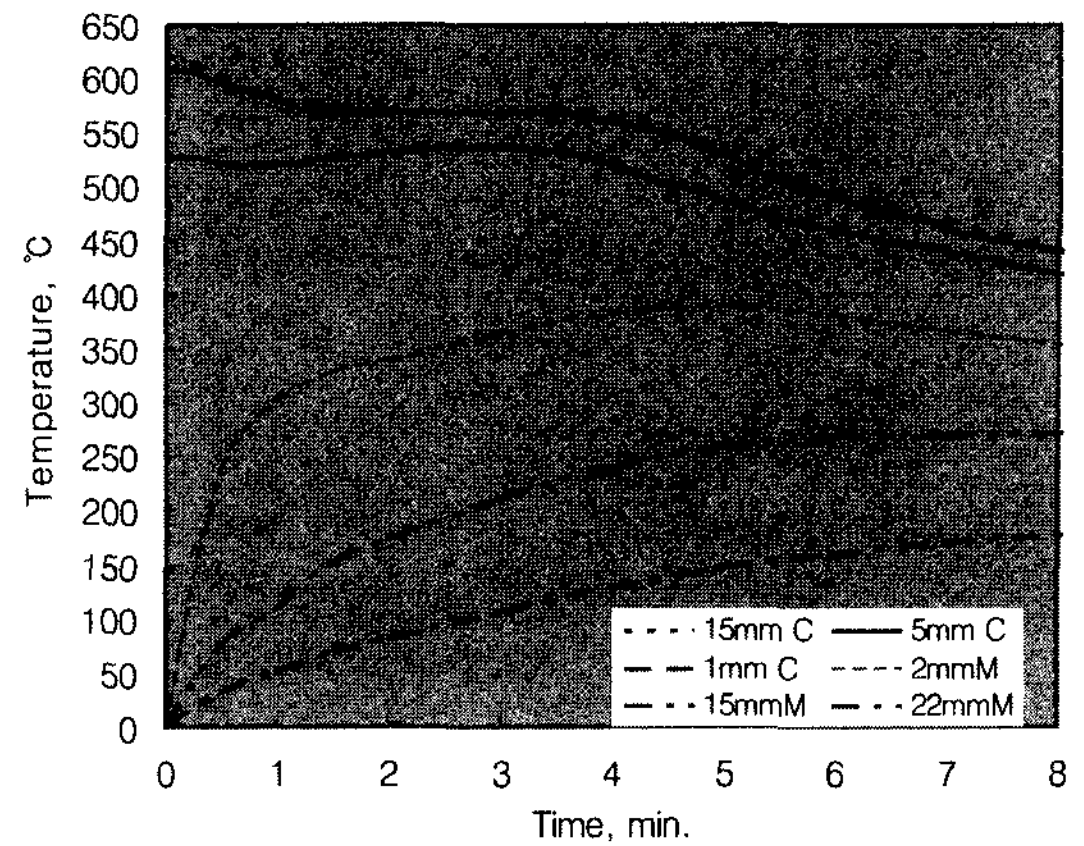


Fig. 7. An example of cooling curves at various locations. (packing material: 0.3mm steel shot ball)

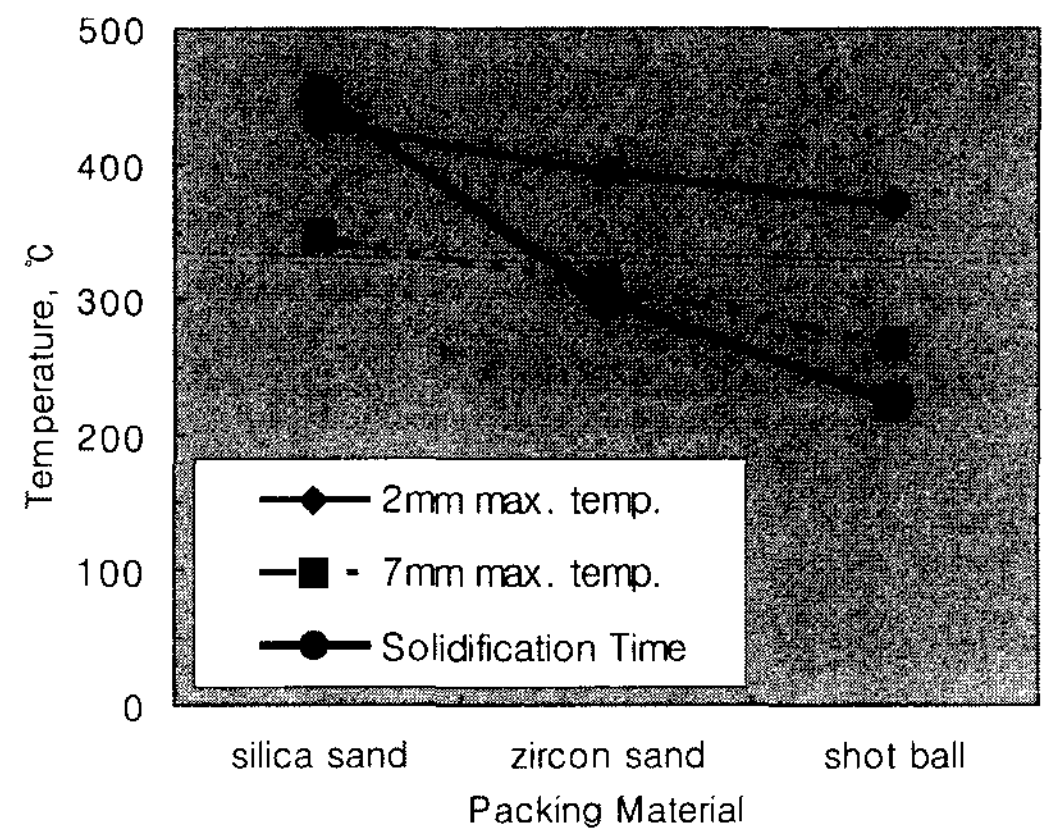


Fig. 8. Solidification time of the casting, peak temperature of the mold with packing materials.

쇼트볼을 사용한 경우가 규사를 사용한 경우의 1/2로 응고시간이 단축되었다.

### 3.5 충전재의 냉각능

주물의 응고 양상은 응고 시의 주형과 주물의 열저항에 의하여 지배 받게 되는데, 열저항을 지배하는 것은 (a) 주형(주형 전열 율속), (b) 주형-응고층 계면(주형-응고층 계면 율속), (c) 고체(응고층)의 열전달(응고층 전열 율속), (d) 주형과 응고층(주형-응고층 혼합 전열 율속)의 경우의 4가지로 분류된다. 소실모형구조는 건조사를 충전재로 사용하므로 이 중 (a) 주형 전열 율속에 가까운 온도분포를 가정할 수가 있다. 주형전열 율속인 경우 시간에 따른 주물의 응고두께(X)는 다

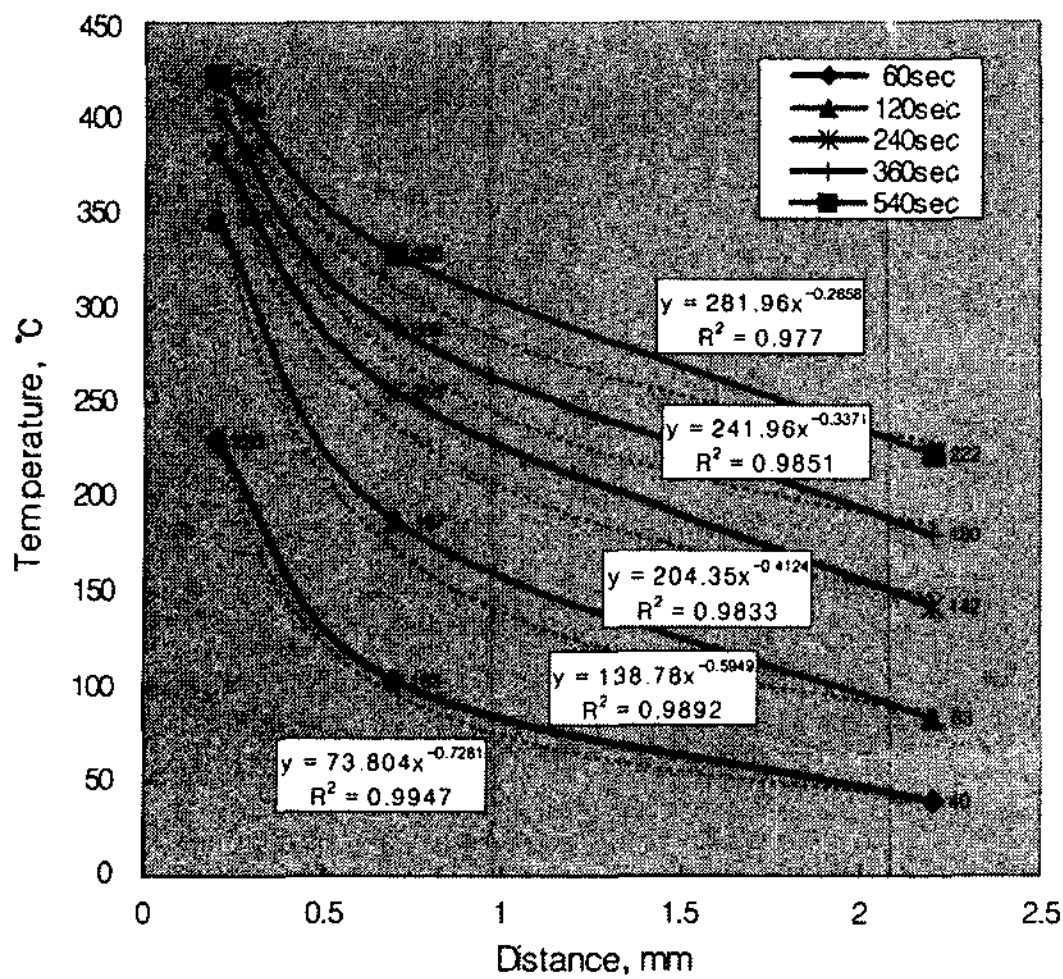


Fig. 9. Temperature distribution in the mold with time (Dotted lines are fitted curves).

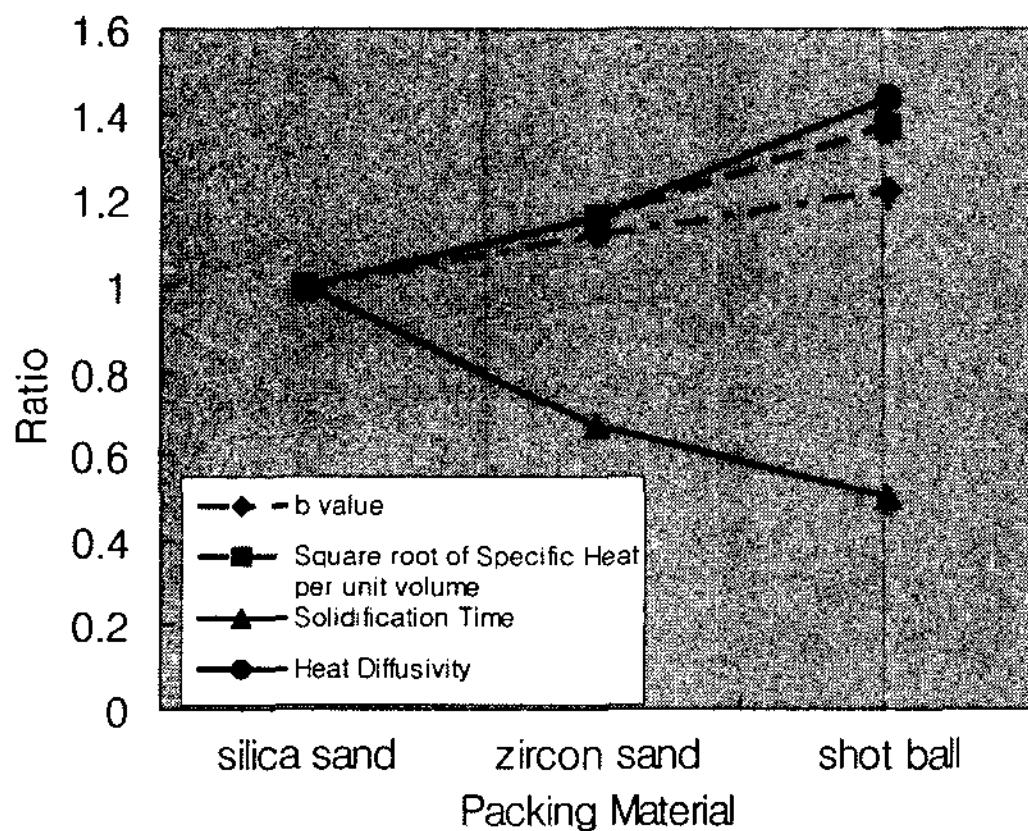


Fig. 10. Comparison of cooling capacity with packing materials.

음 식으로 나타내어진다[7].

$$X = (2/\sqrt{\pi}) \left\{ (T_m - T_s) / (\rho_s \Delta H) \right\} \sqrt{\lambda_m \rho_m C_m} \sqrt{t}$$

(주물 측)                      (주형 측)

여기서 T는 온도, C는 비열, ρ는 밀도, λ는 열전도도, ΔH는 잠열이며, 하첨자 m은 주형, s는 응고층을 나타낸다. 위 식을 보면 주물 측은 동일하므로, 응고층 두께는 주형 측의 열확산율( $\sqrt{\lambda_m \rho_m C_m}$ )에 의하여 지배됨을 알 수 있다.

응고전열 모델에서 주형 측의 전열율속 모델을 이용

하면, 어느 시간에서 주형의 온도 측정 결과를  $y = ax^{-b}$ 의 식으로 근사할 수 있는데, 규사를 충전재로 사용한 경우의 그 결과는 그림 9와 같다. 그림을 보면 측정 결과는 비교적  $y = ax^{-b}$ 의 식에 잘 맞는 것을 알 수 있는데, 충전재로 지르콘사 및 스틸쇼트볼을 사용한 경우에도 비교적 잘 맞는 것으로 나타났다. 이 식에서 주형 중 위치에 따른 온도기울기는 b값에 의하여 영향을 받게 되는데, 각각 충전재의 경우에 b값을 구하여 규사를 충전재로 한 경우를 1로 하여 정리한 것이 그림 10이다. 그림 10에는 b값 외에 응고시간, 주형의 열확산율 및 단위체적 당의 비열도 함께 표시하였다. 그림을 보면 규사, 지르콘사, 쇼트볼의 순으로 b값이 커지는데, 즉 주형 내의 온도기울기가 가파르게 되며, 이를 주형의 열확산율( $\sqrt{\lambda_m \rho_m C_m}$ )과 비교하면 그 경향이 일치하는 것을 알 수 있다. 응고시간은 b값이 커질수록 빨라지는데, 주형의 열확산율은 주형이 용탕으로부터 열을 빼앗는 능력이므로 이 값이 클수록 응고시간은 빨라지게 된다. 그림을 보면 또한 주형의 열확산율과 단위체적 당의 비열과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

열확산율에서 비열은 단위질량 당의 값이므로 분체이던지 괴상이던지 같은 값을 가진다. 그러나 밀도 및 열전도도는 분체일 경우는 괴상과는 다른 값을 가지게 된다. 즉 분체일 경우는 괴상일 경우보다 밀도도 낮아지고 열전도도도 낮아지게 된다.

규사, 지르콘사 및 스틸쇼트볼 충전재의 겉보기 충전밀도가 각각 1.64 g/cm<sup>3</sup>, 2.96 g/cm<sup>3</sup>, 4.60 g/cm<sup>3</sup>인 경우에 규사, 지르콘사 및 스틸쇼트볼 충전재의 열전도도는[5] 각각 0.51, 0.53, 0.56 W/(m·K)로 괴상인 경우에는 충전재에 따라서 열전도도의 차이가 크나, 분체인 경우에는 차이가 별로 없다. 그리고 비열은 통상 단위질량 당의 열량으로 표시하나 분체인 경우에는 여기에 겉보기 충전밀도를 곱하면 단위체적 당의 값으로 환산할 수 있다. 열확산율의 식에서 열전도도의 차이는 거의 없기 때문에, 밀도에 비열을 곱한 단위체적 당의 비열과 열확산율과는 거의 차이가 없게 된다. 따라서 소실모형주조에서 충전재의 냉각능은 충전재의 단위체적 당의 비열로 간단하게 평가할 수 있다.

#### 4. 결 론

알루미늄합금의 소실모형주조 시에 주형 충전재를 규

사, 지르콘사, 스틸쇼트볼로 달리하여 각 충전재의 충전특성과 그 냉각능을 비교한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 진동가속도가 클수록 플래스크의 진폭은 커짐을 확인할 수 있는데, 본 실험의 플래스크의 진폭은 주파수가 60 Hz인 경우 0.14~0.55 mm의 범위에 있었다.

2) 진동크기가 클수록 10분 진동 유지 후의 충전밀도는 증가하였는데, 규사의 경우 충전밀도는 1.41~1.49 g/cm<sup>3</sup>, 지르콘사는 2.54~2.86g/cm<sup>3</sup>, 스틸쇼트볼은 3.92~4.52g/cm<sup>3</sup>의 범위에 있었다.

3) 충전재별 응고시간은 주물 중심부를 기준으로 규사는 7분 30초, 지르콘사는 5분, 스틸쇼트볼은 3분 45초 정도로, 스틸쇼트볼을 사용한 경우가 규사를 사용한 경우의 1/2로 응고시간이 단축되었다.

4) 응고전열 모델에서 주형 측의 전열율속 모델을 이용하면, 소실모형 주조 시의 주형의 온도 분포는  $y = ax^{-b}$ 의 식으로 근사할 수 있는데, 규사, 지르콘사, 쇼트볼의 순으로 b값이 커지고, 이 b값이 클수록 응고시간은 짧아진다.

5) 소실모형주조에서 충전재의 냉각능은 기존의 열확산율 이외에 충전재의 단위체적 당 비열로 간단하게 평가할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2001년도 국가청정기술과제의 일부로 수행되었으며, 연구비지원과 연구수행에 도움을 주신 부성덕, 이기우, 이은경 세 사람에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] AFS: Expendable Pattern Casting (1994), 1-4.
- [2] J. Pletka and J. Drelich: Minerals & Metallurgical Processing, "Recovery of expanded polystyrene from coated patterns rejected from lost foam casting", 19(2002), 25 .
- [3] OIT: Metalcasting Industry of the Future(2001), DOE/GO-1-2-1-1156, 4.
- [4] S. Koroyasu and M. Matsuda: J. of JFS, "Effects of Coat on Cooling Capacity of Mold in Evaporative Pattern Casting Process Using Steel Shot as Packing", 68(1996), 307 .
- [5] S. Koroyasu, M. Matsuda and K. Koike: J. of JFS, "Compactibilities and Fluidities of Various Packings in Vibration Flask for Evaporative Pattern Casting Process", 74(2002), 24.
- [6] M. Matsuda and S. Koroyasu: J. of JFS, "Effects of Shot Packing on Mechanical Properties of Aluminum Casting in Evaporative Pattern Casting Process", 67(1995), 447-450 .
- [7] G.H. Geiger and D. R. Poirier: Transport phenomena in metallurgy(1973), 329-331 .