한국정밀공학회지 제 18 권 제 7 호 (2001 년 7 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 7, July 2001.

쾌속조형을 이용한 다이 캐스팅 제품의 시작 공정 설계 및 제작

김기돈*, 양동열*, 정준호**, 박태권***

Design and Development of the Simulated Die Casting Process by using Rapid Prototyping

Ki-Don Kim*, Dong-Yol Yang*, Jun-Ho Jeong **and Tae-Kwon Park***

ABSTRACT

The simulated die-casting process in which the traditional plaster casting process is combined with Rapid Prototyping technology is being used to produce Al, Mg, and Zn die-casting prototypes. Unlike in the die-casting process, molten metal in the conventional plaster casting process is fed via a gravity pour into a mold and the mold does not cool as quickly as a die-casting mold. The plaster castings have much larger and grosser grain structure as compared with the normal die-castings and the thin walls of the plaster mold cavity may not be completely filled. Because of lower mechanical properties induced by the large grain structure and incomplete filling, the conventional plaster casting process is not suitable for the trial die-casting process to obtain quality prototypes. In this work, an enhanced trial die-casting process has been developed in which molten metal in the plaster mold cavity is vibrated and pressurized simultaneously. Patterns for the casting are made by Rapid Prototyping technologies and then plaster molds, which have a runner system, are made using these patterns. Pressurized vibration to imparted molten metal has made grain structure of castings much finer and improved fluidity of the molten metal enough to obtain complete filling at thin walls which may not be filled in the conventional plaster casting process.

Key Words : rapid prototyping(쾌속조형공정), plaster casing(석고주조), die casing(압력 주조), pressurized vibration(가압진동), grain structure(결정 조직)

기호설명

α = kinetic energy coefficient
γ = free energy at solid-liquid interface
ρ = density
a^* = critical nucleus size
ΔF = free energy change
h_l = major loss
h_{ml} = minor loss
h_{lt} = total head loss
$\dot{m}$ = mass flow rate
$\dot{Q}$ = heat transfer rate
R_a = arithmetic mean value roughness

☞ 2001 년 2 월 15 일 접수
* 한국과학기술원 기계공학과
** Dept. of Mech. Eng., UIUC
*** ㈜R.P. Korea

R_y = maximum roughness height
T_m = melting temperature
$\dot{W}_s$ = rate of work transferred by shaft work
$\dot{W}_{shear}$ = rate of work done by shear stresses
$\dot{W}_{vib.}$ = rate of work transferred by vibrator

1. 서론

금형이 없이 3D CAD 데이터로부터 2 차원 평면의 적층으로 3 차원의 형상을 만드는 쾌속조형공정(RP)이 많은 발전을 거듭하여 산업 전반에 확산되어 사용되고있다. 여기에는 주조 분야도 예외가 아니어서 일반적인 인베스트먼트(investment) 캐스팅(casting)에서는 쾌속조형공정으로 제작된 원형(pattern)을 사용하여 제품을 생산하고있다. 최근에는 다이 캐스팅(die-casting) 공정의 시작품(prototype) 개발에 쾌속조형법과 일반적인 중력 주조 기술이 결합되어 제품을 양산하기 이전에 시작품을 제작· 평가하여 많은 비용과 시간이 소요되는 금형 설계의 수정 등을 미연에 방지하는 효과를 거두고 있다[1-4]. 특히 중력 주조 기술 중에서도 좋은 표면 거칠기와 정확한 치수의 제품을 얻을 수 있는 석고 몰드 주조(plaster mold casting)가 다이 캐스팅 공정의 시작품 제작 방법으로 많이 쓰이고 있다. 그러나 다이 캐스팅 공정과 석고 몰드 주조 공정에서 몰드의 열전도차이와 주입 압력의 차이로 인해 제작한 시작품이 실제의 제품에 비해 강도가 낮고 특히 박벽(thin wall)이 많은 제품에 대해서는 중력 주조로 인한 충전도의 저하로 좋은 시작품이 제작되지 못하고 있다.

위와 같은 문제점의 해결 방안으로 본 연구에서는 석고 몰드 주조 공정에 진동을 부가하여 다이 캐스팅 공정 시작품의 강도를 개선하고 저압으로 용탕(molten metal)을 주입하여 충전도를 향상시키는 공정을 개발하고자 한다.

2. 주조 공정에 부가된 진동의 효과

2.1 핵 생성과 진동에 의한 조직 미세화

액상에서 한 변의 크기가 a 인 입방체의 고상 핵 한 개가 생성되었다고 할 때의 자유에너지 변화량 ΔF 는 다음과 같다.

$$\Delta F = a^3 \Delta F_v + 6a^2\gamma$$

ΔF_v 는 단위 체적의 액상이 이에 대응하는 고상으로 될 때의 자유에너지 변화량이며 용융점 보다 낮은 과냉 된 상태의 온도에서의 변태이므로 ΔF_v 값은 음의 값이다. γ는 고상 핵이 생김으로써 액상과 고상의 계면이 존재하게 되기 때문에 발생하는 자유에너지 변화량이며 단순히 계면 에너지라고 한다. 계면이 증가하면 γ값도 증가하므로 이 값은 양의 값이다.

고상의 크기가 커질수록 양의 값인 γ항은 a^2에 비례하고 음의 값인 ΔF_v 항은 a^3 에 비례하므로 생성되는 고상 핵의 크기에 대한 ΔF 값의 곡선은 Fig. 1 과 같이 극대 값을 갖게 된다. 즉, 고상 핵이 생성됨으로써 계면 에너지가 증가하므로 어떠한 크기 이상이 되지 않은 핵은 안정하게 존재할 수 없다는 결과를 얻는다. 다시 말하여 어떤 한계이상으로 큰 핵만이 성장할 수 있으며 그 이하의 핵은 불안정하고 반드시 성장한다고 할 수 없다.

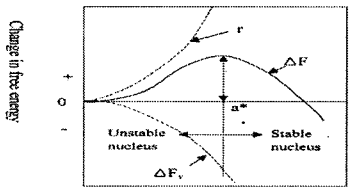


Fig. 1 Change in free energy during formation of cubical nucleus in a melt

이 임계 핵 크기(critical nucleus size) a*는 ΔF 의 미분으로부터 $a^* = -4\gamma/\Delta F_v$ 이다. 이 값을 ΔF 의 식에 대입하면 $\Delta F^* = 32\gamma^3/\Delta F_v$ 을 얻을 수 있다. 융점 T_m 에서는 $\Delta F_v = 0$ 이며 과냉도가 커지는데 따라 ΔF_v 의 절대값은 커진다. 그리고 계면 에너지 γ는 온도에 의한 변화가 작으므로 온도에 관계없이 일정하다고 할 수 있다. 따라서 ΔF^* 는 융점에서 무한대가 되므로 실제로 핵 생성은 일어날 수 없고 과냉도가 커지는데 따라서 a^* 및 ΔF^* 의 값이 작아지므로 생성되는 핵의 크기가 작아진다.

금속의 응고 중에 진동이 부가되면 위에서 언급한 안정한 핵 생성을 위한 임계 핵의 크기 a*가 진동에 의한 압력 파의 전달로 인하여 줄어든다. 따라서 과냉이 크지 않아도 안정한 핵이 생성되어 많은 핵 생성을 유도해 조직이 미세화 된다[5,6].

2.2 유동성 향상에 의한 충전도의 향상

유동성에 영향을 미치는 인자로서 용탕의 주입 온도와 정압, 점성, 표면장력 등을 말할 수 있다. 주입온도를 높게 하면 유동성은 자연히 좋아지며 합금원소의 첨가에 따라 액상온도가 내려가면 주입온도가 같더라도 실질적으로 과열온도를 크게 한 것이 되므로 유동성은 좋아진다. 용탕의 유동에 있어서 정압은 유동 길이에 큰 영향을 미친다. 정압이 크면 유동 속도가 커지고 따라서 유동량이 커진다. 이런 용탕의 정압은 용탕의 비중과 용탕이 유동하는 주형으로부터의 높이에 따라 정해진다. 즉, 비중이 큰 용탕에서는 수두의 높이가 높을수록 유동을 촉진하는 압력은 커진다.

부가된 진동에 의한 유동성의 향상을 Fig. 2 와 같은 모델로부터 수식으로 유도하면 다음과 같다.

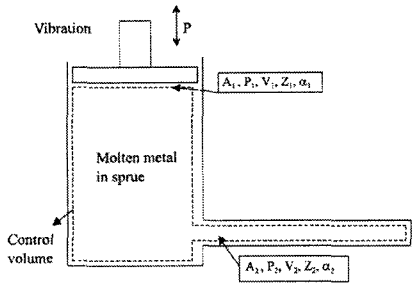


Fig. 2 Schematic diagram for molten metal flow from the gate

많은 부분이 단순화된 모델로서 점선 안의 검사 체적(control volume)에 대한 에너지 방정식을 세워보면

$$Q - W_s - W_{shear} + W_{vib.} = \frac{\partial}{\partial t}\int_{CV} e\rho dV + \int_{CS}(e+pv)\rho\vec{V}\cdot d\vec{A} \quad (1)$$

여기서 $e = u + \frac{V^2}{2} + gz$ 이다.

다음과 같은 가정으로

1) $W_s = 0$, $W_{shear} = 0$ (벽면에서의 속도= 0)
2) 정상 유동 유체
3) 비압축성 유체

위의 (2.1)식은 다음과 같이 정리된다.

$$Q + W_{vib.} = m(u_2 - u_1) + m(\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho}) + m\,g(z_2 - z_1) + \int_{A2}\frac{V_2^2}{2}\rho V_2 dA_2 - \int_{A1}\frac{V_1^2}{2}\rho V_1 dA_1 \quad (2)$$

식 (2)에 동적 에너지 계수(kinetic energy coefficient) α 를 도입하여 다시 정리 하면

$$Q + W_{vib.} = m(u_2 - u_1) + m(\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho}) + m\,g(z_2 - z_1) + m\left(\frac{\alpha_2\overline{V}_2^2}{2} - \frac{\alpha_1\overline{V}_1^2}{2}\right) \quad (3)$$

여기서 $\alpha = \int_A \rho V^3 dA / \dot{m}\overline{V}^2$ 이다.

식 (2.3)을 m 으로 양변을 나누면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{q}{m} + \frac{w}{m} = u_2 - u_1 + \frac{p_2}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} + gz_2 - gz_1 + \frac{\alpha_2\overline{V}_2^2}{2} - \frac{\alpha_1\overline{V}_1^2}{2} \quad (4)$$

위 식을 다시 정리하면

$$\left(\frac{p_1}{\rho} - \alpha_1\frac{\overline{V}_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho} - \alpha_1\frac{\overline{V}_2^2}{2} + gz_2\right) + \frac{w}{m} = (u_2 - u_1) - \frac{q}{m} \quad (5)$$

이고 식 (5)의 우변은 전체 수두 손실(total head loss), h_{lt} 로 표현될 수 있다. 이 값은 주손실(major loss) $h_l = f\frac{L\overline{V}^2}{2D}$ 와 부손실(minor loss) $h_{ml} = f\frac{L_e\overline{V}^2}{2D}$ 의 합으로 나타내어진다.

식 (5)에서 w 는 진동에 의해서 외부에서 해준 일로서 Fig. 4 에서와 같이 진동에 의한 힘 P 에 의해서 판(plate)이 x 만큼 아래로 움직였을 때 튜브 형상의 캐비티에 전해지는 운동에너지를 의미한다.

이 에너지를 식으로 나타내기 위해 plate 의 움직임에 의해서 탕구 내부 용탕의 부피변화를 나타내어 보면

$$dV = \frac{\pi d_p^2 dx}{4} \tag{6}$$

이고 식 (6)을 시간에 대해 미분을 하면

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi d_p^2}{4}\frac{dx}{dt} \tag{7}$$

이고 튜브에서의 평균 속도 v_{av} 를 도입하여 식(7)을 다시 정리 하면

$$\frac{\pi}{4} d_t^2 v_{av} = \frac{\pi d_p^2}{4}\frac{dx}{dt} \tag{8}$$

이고 식 (8)을 정리하면 v_{av} 를 얻을 수 있다.

$$v_{av} = \left(\frac{d_p}{d_t}\right)^2 \frac{dx}{dt} \tag{9}$$

식 (9)로부터 진동에 의한 운동에너지 KE 는 다음과 같이 구해진다.

$$KE = \frac{A_2 L \rho v_{av}^2}{2} \tag{10}$$

식 (5)에 수두 손실과 진동에 의한 운동에너지를 대입하여 정리하면

$$\left(\frac{p_1}{\rho} - \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + g z_1\right) + \left(\frac{p_2}{\rho} - \alpha_1 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + g z_2\right) + \frac{A_2 L \rho v_{av}^2}{2m} = f\frac{L\bar{V}^2}{2D} + f\frac{L_e \bar{V}^2}{2D} \tag{11}$$

이며 진동에 의한 외부에너지의 유입으로 $A_2 L \rho v_{av}^2 / 2m$ 의 항이 식(11)의 좌변에 생겼다. 이 항은 용탕에 마찰에 의한 손실을 극복할 수 있는 에너지를 부여함으로써 몰드 캐비티의 충전을 향상시킨다.

실험 1, 2 를 통하여 진동에 의한 내부 조직의 미세화와 충전도 향상에 대한 다음과 같은 결과를 얻었다.

2.3 진동의 효과 [실험 1]

Fig. 3 과 같은 몰드 캐비티에 Al(99.5%)의 용탕을 주입하고 진동을 부가하여 내부 조직을 살펴본다.

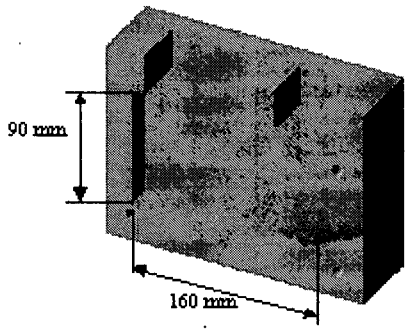
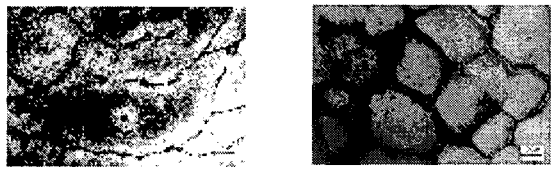


Fig. 3 Dimensions of cavity

석고 몰드의 초기 온도가 300 ℃로 유지된 상태에서 초기 용탕 주입 온도 800 ℃인 순수 Al 을 주입하였다. 주입된 용탕에 전자기력에 의한 진동장치를 이용해 수직 방향으로 15 Hz 의 주파수로 0.5 mm 의 진폭의 진동을 10 분간 부가하였다. Fig. 4 는 [실험 1]에서 얻은 내부 조직으로 진동을 부가하지 않은 경우(a)와 진동을 부가했을 경우 (b) 이다.



(a) without vibration (b) with vibration

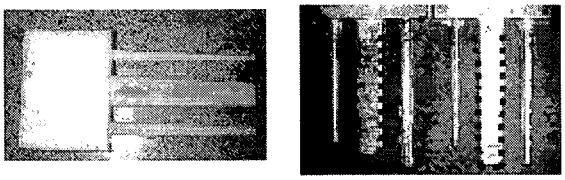
Fig. 4 Microstructures of specimens

Fig. 4 에서와 같이 진동을 부가하였을 경우 (a)에서 볼 수 있었던 수지상(dendrite)조직이 완전히 소멸되어 (b)와 같이 균질의 조직으로 변하였음을 알 수 있다.

2.4 진동의 효과 [실험 2]

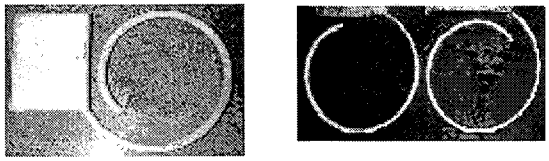
주조공정에서 진동에 의한 충전도 향상에 관한 실험으로 Fig. 5, 6 의 (a) 형상으로부터 석고 몰드를 제작하여 Fig. 5, 6 의 (b)와 같은 결과를 얻었다. 사용된 쐐기 형태의 캐비티는 폭 4mm, 최소 두께 1mm 이며 코일 형상의 캐비티의 경우 캐비

티 단면 반원의 지름이 3mm 였다. 실험 조건은 [실험 1]과 동일하며 3 분간 진동을 부가하였다.



(a) Wedge shape of a cavity (b) w/o vib. w/ vib.

Fig. 5 Result of the filling test: wedge shape



(a) Coil shape of a cavity (b) w/o vib. w/ vib.

Fig. 6 Result of the filling test: coil shape

Fig. 5, 6 에서와 같이 주조 공정에 진동을 부가함으로써 몰드 캐비티의 충전도가 향상되었음을 알 수 있다.

3. 다이캐스팅 공정의 시작품 제작

3.1 'End Clutch Cover'시작 공정

다이 캐스팅 제품인 'End Clutch Cover'의 시작 공정은 Fig. 7 에서와 같이 먼저 'End Clutch Cover'를 솔리드 모델링한 후 그 파트로부터 실제 쾌속조형법을 이용해 제작할 파트와 일치하는 즉, 석고 몰드와 같은 형상의 솔리드 모델을 프로그램에서 제공하는 Boolean Operation 을 이용하여 얻었다. 이 3D CAD 파일을 .stl 형태의 데이터 포맷으로 전환하여 쾌속조형장치(LOM 1015)에 입력하여 쾌속조형 파트를 제작하였으며, 시작품을 설계할 때 캐스팅 제품 제작에서 발생하는 수축률을 2 %로 고려하였다.

이와 같은 공정으로 제작된 쾌속 조형 파트로부터 석고 몰드를 얻기 위해서 왁스 파트를 제작하였다. LOM 1015 를 이용해 파트가 제작되었으므로 수분 흡수로 인한 변형을 막기위해 방수제 등을 사용하였다. 방수가 된 파트에 80 ℃로 용융된 왁스를 부어 2 ~ 3 시간 후 왁스가 완전히 굳은 후에 왁스와 LOM 파트를 분리 시켜 왁스 파트를 얻었다. 이 LOM 파트로부터는 많은 수의 왁스 파트를 복제해 낼 수 있었다.

석고 몰드를 제작하기 전에 왁스 파트에 대한 설계 검증을 하여 수정 할 부분이 있는 경우 수정을 하였고 LOM 파트에서 생긴 거친 표면들도 사포를 이용하여 제거하였다. 이렇게 제작된 왁스 파트에 질량비 물과 석고 분말이 1:1 로 섞인 석고 용액을 부어서 석고 몰드를 제작하였다. 석고 몰드가 굳은 뒤 왁스 파트와 석고 몰드를 분리해 석고 몰드를 300 ℃이상의 온도로 유지되는 가열로에서 수분을 완전히 제거 하였다.

이 석고 몰드를 250 ℃로 가열시킨 뒤 가압·진동 장치에 결합 하고 800 ℃의 순수 Al(99.5%)를 주입 후 가압· 진동 장치를 작동 시켜서 몰드 안의 용탕을 공압실린더(pneumatic cylinder)로 밀면서 진동을 부가하여 시작품을 제작하였다. 몰드 안의 용탕이 완전히 응고 된 뒤 몰드와 시작품을 분리시켰고 내부 조직 평가를 위해서 시편을 제작하였으며 표면 거칠기도 측정하였다.

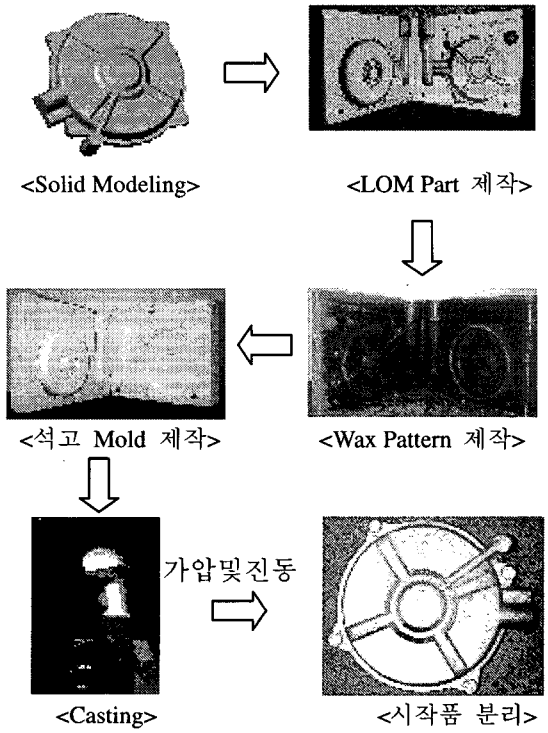


Fig. 7 The flow chart of the trial die casting process

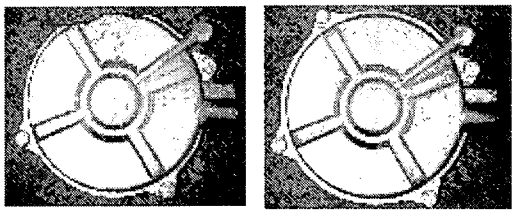
3.2 실험 장치

다이 캐스팅 공정 시작품 제작에 사용된 장치들로는 쾌속조형장비로 LOM 1015 를 사용하였고 가열장치로 저항로와 박스형 가열로를 사용하였다. 또 Fig. 8 과 같은 가압과 진동 부가가 동시에 가능한 장치를 제작 사용하였다. '가압· 진동 부가 장치'는 크게 가압부와 진동부로 나눌 수 있다. 가압부는 공압 실린더, 속도 제어기, 공압 제어기 등으로 구성되어 있으며 공압 실린더는 전체 스트로크가 100 mm 인 양방향 작동(double acting cylinder) 실리더를 사용하였고 속도제어기는 교축 릴리프 밸브(relief valve)가 장착되어 ON/OFF 전기 신호에 의해서 속도가 제어되도록 하였다[7]. 외부에서 실험 장치로 들어오는 고압의 공기를 적정 압력으로 낮춰주기 위해서 공압 제어기를 사용하였다. 진동부는 솔로노이드 가진부와 전원 그리고 신호 발생부분으로 나누어진다. 진동부에는 솔레노이드 안에 자화된 철심이 위치하여 입력된 전류에 의해 철심을 위로 밀어내도록 되어있다. 전원부는 0.5 mm 의 진폭으로 15 Hz 로 진동을 주며 작동 전압은 110 volt 전원을 20 volt 로 전환하여 공급해준다. 신호 발생부에서는 ON/OFF 신호를 주파수에 따라 발생하도록 하여 이 신호로 전류를 조절하게 되어있다. 가압부와 진동부는 일체형으로 되어있어 가압을 하면서 진동을 몰드 안의 용탕에 전달 할 수 있게 되어있다. 공압 실린더가 진동부 전체를 밀어 진동부 하단에 부착된 플런저(plunger)를 몰드 안으로 밀어 용탕을 가압하면서 진동을 부가하도록 제작되었다.

Fig. 8 Apparatus for casting with pressurized vibration

3.3 시작품 비교 및 평가

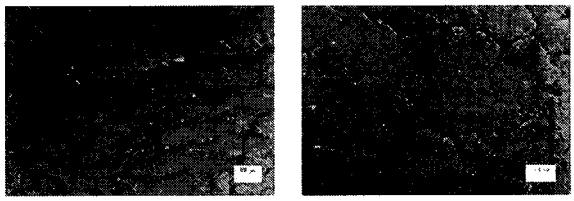
Fig. 8 의 장치를 이용하여 주파수 15 Hz, 진폭 0.5 mm 진동을 부가하면서 플런저 스트로크(stroke)를 40 mm 가압하여 Fig. 9 의 시작품을 제작하였다.



(a) (b)

Fig. 9 (a) Prototype produced by conventional plaster casting process, (b) Prototype produced by plaster casting process with pressurized vibration

Fig. 9 에서와 같이 '가압 및 진동 부가'주조 공정으로 완전한 형상의 제품을 얻을 수 있었으며 가압의 영향으로 표면 거칠기 Ra 의 측정값에서 (a)의 경우 5.9 ㎛, (b)에서는 3.3 ㎛로 향상되었다. 내부 조직에서도 Fig. 10 과 같이 본 공정에 제작된 시작품의 경우 수지상 조직의 성장이 억제되어 등축의 결정 조직이 형성되었으나 기존의 공정으로 제작된 시작품은 불균질한 조직을 나타내었다. 내부조직(Grain) 크기에 있어서도 직경이 (a)는 300~500 ㎛, (B)는 150~300 ㎛로 감소하여 기계적 성질이 향상됨을 알 수 있었다.



(a) (b)

Fig. 10 (a) Microstructure of specimen made by conventional plaster casting process, (b) Microstructure of specimen made by plaster casting process with pressurized vibration

4. 결 론

고압을 이용하여 정밀한 금속 부품을 제작하는

다이 캐스팅 공정에서는 제품 생산을 위한 양산 금형을 제작하기에 앞서 일반적인 석고 주조 공정을 이용하여 시작품을 제작하게 된다. 기존의 석고 주조 공정을 이용하는 경우에는 시작 주조품들의 강도가 다이 캐스팅 주물품에 비해 크게 낮으며 대부분 다이 캐스팅 제품은 박벽 부분을 많이 포함하고 있어서 몰드의 불완전한 충전이 발생할 수 있다. 이런 문제점의 해결을 위해 본 논문에서는 다음과 같은 주요 연구결과를 얻었다.

(1) 석고 주조 공정에 전자기력을 이용한 솔레노이드 진동 장치를 사용하여 용탕에 진동을 부가함으로써 주조 제품의 내부 조직에서 수지상 조직을 제거하고 균일하고 미세화된 조직을 얻었다.

(2) 가압과 진동을 동시에 부가할 수 있는 장치를 제작해 용탕에 진동을 부가하면서 가압을 하여 내부 조직의 향상과 박벽이 많은 다이캐스팅 제품의 시작품을 효과적으로 제작하였다.

참고문헌

1. M. C. Warner and J. Renaud, "Rapid prototyping simulated die casting, lower prototype tooling costs and faster product development are benefits that outweigh limitations," NADCA 18th international die casting congress and exposition, Indianapolis, U.S.A., Oct., 1995.
2. M. C. Warner and J. Renaud, "Rapid prototype simulated die casting," Rapid Prototyping & Manufacturing '96, Dearborn, U.S.A., April, 1996.
3. A. Kochan, "Rapid prototyping trends," Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, No. 4, pp. 150-152, 1997.
4. 양동열, 손현기, "쾌속제품개발(RPD)을 위한 쾌속조형기술의 최근동향," 한국정밀공학회지 제 17 권 제 10 호, pp. 5-10, 2000.
5. A. H. Freedman and J. F. Wallace, "The influence of vibration on solidifying metals," AFS Transactions, Vol. 65, pp. 578-589, 1957.
6. R. G. Garlick and J. F. Wallace, " Grain refinement of solidifying metals by vibration," AFS Transactions, Vol. 67, pp. 366-374, 1959.
7. Y. H. Kim, D. G. Lee, S. H. Kim and Y. K. Kwak, Fundamentals of Pneumatics for Automation, 청문각, pp. 22-48, 1989.