

쾌속 조형 공정을 이용한 다이캐스팅 제품의 시작 공정 개발

김기돈* · 양동열**

Development of the Simulated Die Casting Process by using Rapid Prototyping

K.D. Kim* and D.Y. Yang**

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 as the 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. 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 runner system, are made using these patterns. Imparted pressurized vibration to 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 can not be filled in the conventional plaster casting process.

Key Words : Rapid Prototyping, Plaster Casting, Die Casting, Pressurized Vibration, Grain Structure

1. 서 론

금형이 없이 3D CAD 데이터로부터 2차원 평면의 적층으로 3차원의 형상을 만드는 쾌속조형 공정(RP)이 많은 발전을 거듭하여 산업 전반에 확산되어 쓰이고 있다. 여기에는 주조 분야도 예외가 아니어서 일반

적인 인베스트먼트(investment) 캐스팅(casting)에서는 쾌속조형공정으로 제작된 원형(pattern)을 사용하여 제품을 생산하고 있다. 최근에 들어서는 다이 캐스팅(die-casting) 공정의 시작품(prototype) 개발에 쾌속조형법과 일반적인 중력 주조 기술이 결합되어 제품을 양산하기 이전에 시작품을 제작·평가하여 많은비

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

용과 시간이 소요되는 금형 설계의 수정 등을 미연에 방지하는 효과를 거두고 있다.^[1-4] 특히 중력 주조 기술중에서도 좋은 표면 거칠기와 정확한 치수의 제품을 얻을 수 있는 석고 몰드 주조(plaster mold casting)가 다이캐스팅 공정의 시작품 제작 방법으로 많이 쓰이고 있다.

하지만 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.

2. 주조 공정에 부가된 진동의 효과

2.1 진동에 의한 조직 미세화와 유동성 향상

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 과냉된 상태의 온도에서의 변태이므로 ΔF_v 값은 음의 값이다. γ 는 고상 핵이 생김으로써 액상과 고상의 계면이 존재하게 되기 때문에 발생하는 자유에너지 변화량이며 단순히 계면 에너지라고 한다. 계면이 증가하면 γ 값도 증가하므로 이 값은 양의 값이다.

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

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. 용점 T_m 에서 $\Delta F_v = 0$ 이며 과냉도가 커지는데 따라 ΔF_v 의 절대값은 커진다. 그리고 계면 에너지 γ 는 온도에 의한 변화가 작으므로 온도에 관계없이 일정

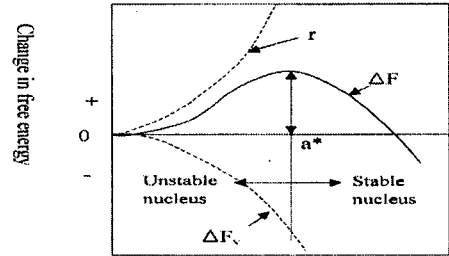


Fig. 1 Change in free energy during formation of cubical nucleus in a melt

하다고 할 수 있다. 따라서 ΔF^* 는 용점에서 무한대가 되므로 실제로 핵 생성은 일어날 수 없고 과냉도가 커지는데 따라서 a^* 및 ΔF^* 의 값이 작아지므로 생성되는 핵의 크기가 작아진다.

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

유동성에 영향을 미치는 인자로서 용탕의 주입 온도와 정압, 점성, 표면장력 등을 말할 수 있다. 주입 온도를 높게 하면 유동성은 자연히 좋아지며 합금 원소의 첨가에 따라 액상 온도가 내려가면 주입 온도가 같더라도 실질적으로 과열 온도를 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 수도의 높이가 높을수록 유동을 촉진하는 압력은 커진다.

2.2 진동의 효과 [실험]

Fig. 2와 같은 몰드 캐비티에 Al(99.5%)의 용탕을 주입하고 진동을 부가하여 내부 조직을 살펴본다.

석고 몰드의 초기 온도가 300℃로 유지된 상태에서 초기 용탕 주입 온도 800℃인 순수 Al을 주입하였다. 주입된 용탕에 전자기력에 의한 진동 장치를 이용해 수직 방향으로 15Hz의 주파수로 0.5mm의 진폭의 진동을 10분간 부가하였다. Fig. 3에서 얻은 내부 조직으로 진동을 부가하지 않은 경우(a)와 진동을 부가했을 경우 (b)이다.

Fig. 3에서와 같이 진동을 부가하였을 경우 (a)에서 볼 수 있었던 수지상(dendrite)조직이 완전히 소멸되어 (b)

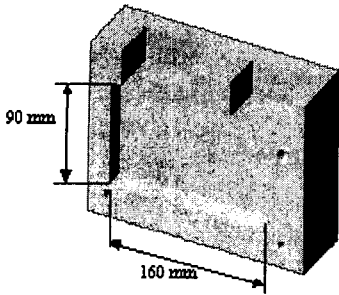
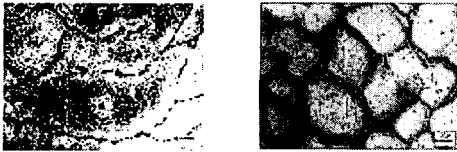


Fig. 2 Dimensions of cavity

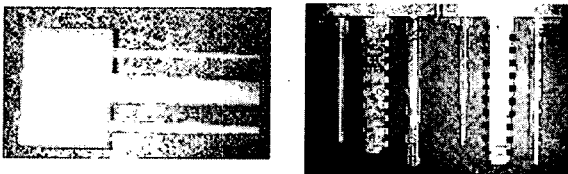


(a) without vibration (b) with vibration

Fig. 3 Microstructures of specimens

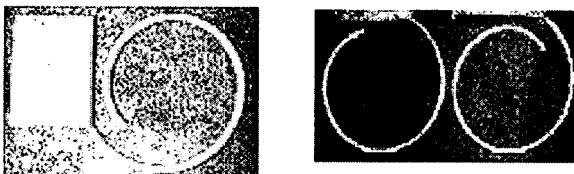
와 같이 균질의 조직으로 변화하였음을 알 수 있다.

2.3 진동의 효과 [실험2]



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

Fig. 4 Result of the filling test: wedge shape



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

Fig. 5 Result of the filling test: coil shape

주조공정에서 진동에 의한 충전도 향상에 관한 실험으로 Fig. 4, 5의 (a) 형상으로부터 석고 몰드를 제작하여 Fig. 4, 5의 (b)와 같은 결과를 얻었다. 사용된 켜기 형태

의 캐비티는 폭 4mm, 최소 두께 1mm이며 코일 형상의 캐비티의 경우 캐비티 단면 반원의 지름이 3mm였다. 실험 조건은 [실험1]과 동일하며 3분간 진동을 부가하였다. Fig. 4, 5에서와 같이 주조 공정에 진동을 부가함으로써 몰드 캐비티의 충전도가 향상되었음을 알 수 있다.

3. 다이캐스팅 공정의 시작품 제작

3.1 'End Clutch Cover' 시작공정

다음은 다이 캐스팅 제품인 'End Clutch Cover'의 시작품 제작 공정도이다. 본 부품은 다이캐스팅 공정으로 생산되는 대표적 제품이다.

공정은 Fig. 6에서와 같이 먼저 'End Clutch Cover'를 솔리드 모델링한 후 그 파트로부터 실제 쾌속 조형법을 이용해 제작할 파트와 일치하는 즉, 석고 몰드와 같은 형상의 솔리드 모델을 프로그램에서 제공하는 Boolean Operation을 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% 고려하였다.

이와 같은 공정으로 제작된 쾌속 조형 파트로부터 석고 몰드를 얻기 위해서 왁스 파트를 제작하였다. LOM 1015를 이용해 파트가 제작되었으므로 수분 흡수로 인한 변형을 막기 위해 방수제 등을 사용하였다. 방습이 된 파트에 80℃로 용융된 왁스를 부어 2~3시간 후 왁스가 완전히 굳은 후에 왁스와 LOM파트를 분리시켜 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 1:1로 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 위해

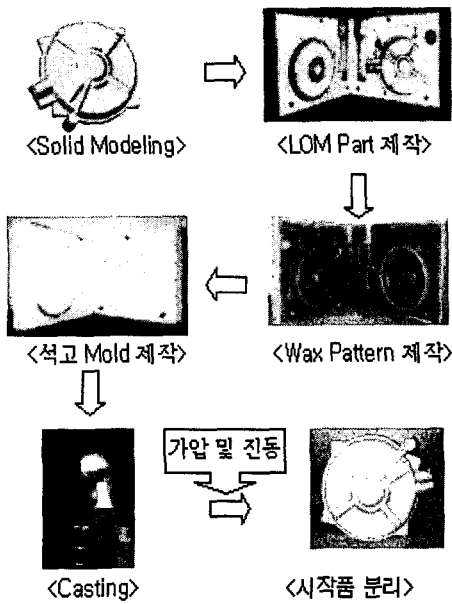


Fig. 6 The flow chart of the trial die casting process

서 시편을 제작하였으며 표면 거칠기도 측정하였다.

3.2 실험장치

다이 캐스팅 공정 시작품 제작에 사용된 장치들로는 폐속조형장비로 LOM 1015를 사용하였고 가열장치로 저항로와 박스형 가열로를 사용하였다. 또 Fig. 7과 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 공압실린더는 전체 스트로크가 100 mm인 양방향 작동(double acting cylinder) 실린더를 사용하였고 속도제어기는 throttle relief valve가 장착되어 ON/OFF 전기 신호에 의해서 속도가 제어되도록 하였다. 외부에서 실험 장치로 들어오는 고압의 공기를 적정 압력으로 낮춰주기 위해서 공압 제어기를 사용하였다. 진동부는 솔레노이드 가진부와 전원 그리고 신호 발생부분으로 나누어진다. 진동부에는 솔레노이드 안에 자화된 철심이 위치하여 입력된 전류에 의해 철심을 위로 밀어내도록 되어있고 전원부는 110 volt와 220 volt의 전원을 20 volt로 전환하여 진동부의 솔레노이드에 공급해준다. 신호 발생부에서는 ON/OFF 신호를 주파수에 따라 발생하도록 하여 이 신호로 전류를 조절하게 되어있다. 가압부와 진동부는 일체형으로

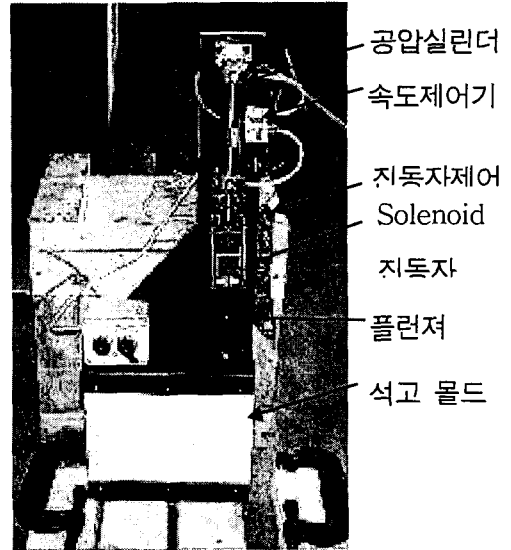


Fig. 7 Apparatus for casting with pressurized vibration

되어있어 가압을 하면서 진동을 몰드 안의 용탕에 전달할 수 있게 되어있다. 공압 실린더가 진동부 전체를 밀어 진동부 하단에 부착된 플런저(plunger)를 몰드 안으로 밀어 용탕을 가압하면서 진동을 부가하도록 제작되었다.

3.3 시작품 비교 및 평가

Fig. 7의 장치를 이용하여 주파수 15 Hz, 진폭 0.5 mm 진동을 부가하면서 플러저의 스트로크(stroke)를 40 mm해 가압을 하여 Fig. 8의 시작품을 제작하였다.

Fig. 8에서와 같이 '가압 및 진동 부가' 주조 공정으로 완전한 형상의 제품을 얻을 수 있었으며 가압의 영향으로 표면 거칠기 Ra의 측정값에서 (a)의 경우 5.9 μm , (b)에서는 3.3 μm 향상되었다. 내부 조직에서도 Fig. 9과 같이 본 공정에 제작된 시작품의 경우 수지상 조직의 성

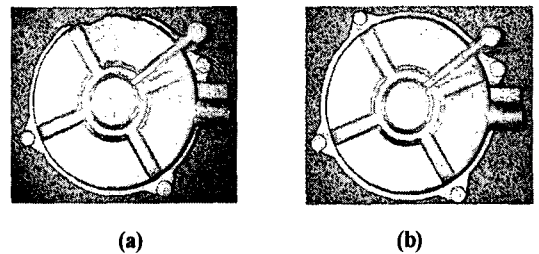


Fig. 8 (a) Prototyping produced by conventional plaster casting process

Fig. 8 (b) Prototype produced by plaster casting process with pressurized vibration

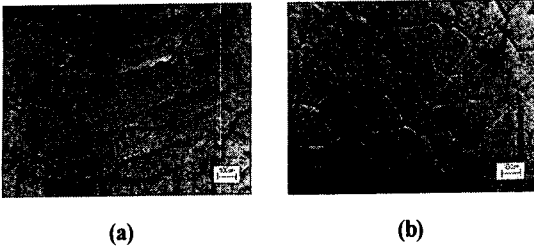


Fig. 9 (a) Microstructure of specimens made by conventional plaster casting process

Fig. 9 (b) microstructure of specimen made by plaster casting process with pressurized vibration

장이 억제되어 등축의 결정 조직이 형성되었으나 기존의 공정으로 제작된 시작품은 불균질한 조직을 나타내었다. Grain 크기에 있어서도 직경이 (a)는 300~500 μm , (B)는 150~300 μm 로 감소여 기계적 성질이 향상됨을 알 수 있었다.

4. 다이캐스팅 공정의 시작품 제작II

4.1 진동·가압 석고 주조 장치

기존의 기초 실험 장치에서는 다음과 같은 문제점들이 있어 개선되었다. 플런저(Plunger) 부분의 예열 장치가 없어 용탕이 플런저 부분에서부터 응고가 되는 현상이 발생하여 본 장치에서는 몰드를 예열하면서 플런저를 함께 예열할 수 있도록 하였다. 몰드의 자동 합형 장치가 없어 두개의 상하형 몰드를 다루는데 어려움이 있었는데 Air Cylinder에 의해서 몰드가 합형되고 분리될 수 있도록 하였다. 진동 부가 장치에서도 많은 변수들을 함께 제어할 수 없어 결과를 수집하고 분석하기 어려웠는데 가진 시간과 진동수 등을 쉽게 조절할 수 있도록 하였다. 기존의 장치의 가장 큰 문제점으로 제품을 쉽게 취출할 수 없다는 것인데, 일반적으로 제품이 완전히 냉각된 후 제품을 취출할 경우 석고 몰드 안에서 제품이 천천히 냉각되어 제품의 기계적 성질이 저하된다. 또 늦은 제품의 취출은 응고시 많은 수축과 후변형을 유발하여 제품의 질을 떨어뜨렸다. 제품 취출을 용이하게 하기 위하여 제품 취출을 위한 별개의 Air Cylinder를 설치하여 설정시간에 몰드가 분리되고 제품이 취출될 수 있도록 하였다. 이와 같은 문제점들을 개선하여 Fig. 10의 '진동·가압 석고 주조 장치' 를 개발하였다.

본 장치의 구체적 사양은 다음과 같다. 전체의 구동 방식은 Air Cylinder를 사용하며 최대의 몰드 크기는

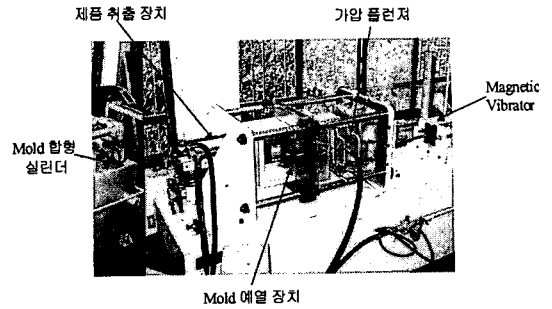


Fig. 10 Pressurized vibration casting machine

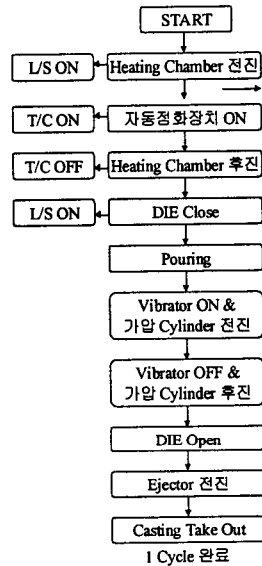


Fig. 11 The procedure of pressurized vibration casting process

300W X 300L X (100 + 100)T이다. Air Cylinder에 의한 몰드의 합형력은 주입되는 공기의 압력이 5 Kg/cm^2 일때 최대 770Kgf이며 용탕을 주입하는 플런저의 최대 가압력은 390Kgf이고 최대 주입 속도는 500mm/sec이다.

마그네틱 진동자(magnetic vibrator)에 의한 진동력은 최대 100Kgf이며 PLC제어에 의해서 예열 장치의 점화에서 제품의 취출까지 자동화가 이뤄졌다.^[8] 이와 같은 자동화로 인해서 응고시간, 가진 진동수 및 진폭 등을 제어할 수 있어 다양한 실험을 수행 할 수 있으며 정확한 실험 결과를 얻을 수 있다. 또한 제품의 생산 시간도 단축하여 좋은 품질의 시작품을 빠르게 제작할 수 있다.

Fig. 11은 위 장치의 공정 순서를 나타내고 있다. 장치의 주전원이 켜지고 몰드의 예열이 시작된다. 몰드의 온도가 설정한 온도에 이르면 예열 장치가 원위치로 돌아가고 몰드가 합형된다. 이때 작업자에 의해서 용융 금

속이 플런저 앞부분의 gate에 주입이 되면 진동 장치가 작동을 하면서 플런저가 용융 금속을 몰드의 캐비티 안으로 주입하게 된다. 미리 설정해놓은 진동 부가 시간과 취출 시간에 따라 몰드가 분리되고 제품이 취출되어 시작품을 얻는다.

4.2 시작품 비교 및 평가

본 절에서는 기존의 기초 실험에서 제작된 시작품과 새로 개발된 장치에서 제작된 시제품을 비교 평가한다.

Table 1에서는 기초 실험과 새 장치에서 제작된 시작품의 공정 조건을 나타내고 있다. 위의 실험 조건 외에 같은 제품(End Clutch Cover)에 대한 몰드 설계가 변경되었다. 기존의 기초 실험에서는 몰드 캐비티에 용융 금속이 주입된 후 진동과 가압이 이뤄졌지만, 새로운 장치에서는 진동이 부가되면서 용융 금속이 가압 되어 몰드의 캐비티를 채워가므로 진동의 효과가 더욱 극대화되었다. 플런저의 주입 속도 증가로 몰드의 온도가 300℃에서 200℃로 낮은 상태에서 시작품을 제작하였다.

Table 1 Comparison of experimental condition

Process Condition	Preliminary Experiment	Developed Casting
Frequency(Hz)	15	30
Max. Amplitude(mm)	0.5	0.3
Injection speed (mm/s)	50	300
Ejection Time(min)	5	1
Mold Temp.(℃)	300	200

Table 2 Comparison of surface roughness

Location	Precess Die Casting	Preliminary Experiment	Developed Casting
	Ra(μm)	Ra(μm)	Ra(μm)
①	1.63	3.89	1.09
②	3.23	4.92	1.57
③	0.07	4.90	0.94
④	2.66	3.27	1.43

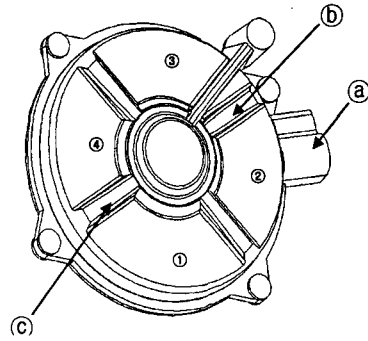


Fig. 12 Location of specimens for micro-examination (a-c); Location of area for surface roughness measurement (1-4)

Table 2에서와 같이 새로운 장치에서 제작된 시작품의 표면 거칠기가 기존의 장치에 의한 시작품에 비해 향상되어 양산 다이캐스팅 제품의 거칠기에 근접함을 보이고 있다. 이와 같은 거칠기의 향상은 낮은 몰드의 온도에 의해서 제품이 표면에서부터 빠르게 응고가 되었고 아래에서부터 용융 금속이 차츰 채워져 나가면서 발생하는 기포가 석고 몰드의 표면을 통하여 배출되기 보다는 몰드의 틈으로 빠져나가 표면 거칠기가 향상되었다.

Table 3 Comparison of grain size

Location	Precess Casting w/o vib. Diameter (μm)	Preliminary Experiment Diameter (μm)	Developed Casting Diameter (μm)
	a	400	200
b	300	100	50
c	300	130	70

Table 4 Comparison of surface hardness

Location	Precess Casting w/o vib. Rc	Preliminary Experiment Rc	Developed Casting Rc
	a	28	30
b	29.5	31.5	37
c	27	30.5	36

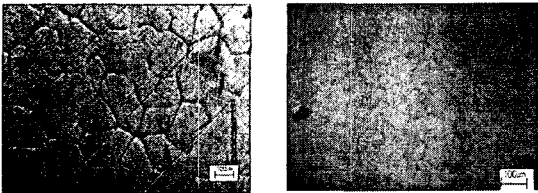
Table 3는 각 공정의 Fig. 12 위치에서 제작된 시편의 평균 Grain 크기를 나타내고 있다.

Grain 크기가 현저히 줄어들었으며 이와 같은 결과는 낮은 몰드 온도의 영향과 몰드 설계의 변경으로 인해서 용융금속이 주입이 되면서 계속적으로 진동이 부가되어 보다 진동의 영향이 잘 전달되어서 얻어진 결과라 할 수 있다.

Table 4는 각 공정의 Fig. 12 위치에서 제작된 시편으로 록웰 경도(Rockwell hardness)를 C scale로 측정한 결과이다. 각 시편마다 5번의 측정값의 평균을 경도로 정하였다.

Grain 크기가 미세한 새로운 공정에 의해서 제작된 시편이 더 높은 경도를 나타냈으며 이 결과 역시 낮은 몰드의 온도, 설계 변경에 따른 진동의 효과적인 전달을 원인으로 할 수 있겠다. 효과적인 진동으로 시편 전체의 밀도가 증가한 영향도 있다.

Fig. 13는 각 공정에 의한 시작품의 내부 조직을 보여주는 그림이다. 두 조직 모두 진동에 의해서 수직상 조직은 완전히 제거되었으며 새로운 공정에 의한 시작품이 좀더 미세한 조직의 분포를 나타내고 있다.



(a)

(b)

Fig. 13 (a) Microstructure of prototype made by preliminary experiment

Fig. 13 (b) Microstructure of prototype made by developed casting

5. 결 론

고압을 이용하여 정밀한 금속 부품을 제작하는 다이 캐스팅 공정에서는 제품 생산을 위한 양산 금형을 제작 하기에 앞서 일반적인 석고 주조 공정을 이용하여 시작품을 제작하게 된다. 그러나 기존의 석고 주조 공정에 더욱 유사한 시작품을 제작하였다.

이용하는 경우에는 시작 주조품의 강도가 다이 캐스팅 주조품에 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 연구를 수행하였다.

(1) 기초 실험을 바탕으로 새로운 ‘진동·가압 석고 주조 장치’를 개발하였다.

(2) 개발된 장치를 이용하여 양산의 다이 캐스팅 제품에 더욱 유사한 시작품을 제작하였다.

참 고 문 헌

- (1) M. C. Warner and J. Renaud, 1995, "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.
- (2) M. C. Warner and J. Renaud, 1997, "Rapid prototype simulated die casting," Rapid Prototyping & Manufacturing '96, Dearborn, U.S.A., April, 1996.
- (3) A. Kochan, 1997, "Rapid prototyping trends," Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, No. 4, pp. 150~152.
- (4) N. P. Karapatis, J. P. S. van Griethuysen and R. Glardon, 1997, "Direct rapid tooling: a review of current research," Rapid Prototyping Journal, Vol. 4, No. 2, pp. 77~89.
- (5) A. H. Freedman and J. F. Wallace, 1957, "The influence of vibration on solidifying metals," AFS Transactions, Vol. 65, pp. 578~589.
- (6) R. G. Garlick and J. F. Wallace, 1959, "Grain refinement of solidifying metals by vibration," AFS Transactions, Vol. 67, pp. 366~374.