

경량화 소재의 반용융 및 주조/단조기술

강충길*, 최재찬*, 배원병*

Semi-Solid Forming, Casting and Forging Technologies of Lightweight Materials

Chung Gil Kang*, Jae Chan Choi*, and Won Byung Bae*

ABSTRACT

This paper describes an overview of the thixoforming and thixomolding processes. Semi-solid metalworking (SSM), which is called the thixoforming process of aluminium materials, incorporates the elements of both casting and forging for the manufacture of near net shape parts. The SSM has some advantages such as net shape or near net shape manufacturing, the ability to form thin walls, excellent surface finish, tight tolerance, and excellent dimensional precision. The thixomolding process of Mg alloy (AZ91) is a combination of two technologies both conventional die casting and plastic injection molding. The feed material used is a machined chip with a geometry of approximately 1 mm square and a length of 2~3 mm. The semi-solid forming (SSF) of high quality aluminium and magnesium parts will be established in the automotive and electronic industry, in the future.

The hybrid method of casting/forging has been caused attention. This process uses a preformed material made by casting instead of the wrought material and finishes it by a single forging process. This process is expected to lower costs without sacrificing the mechanical properties.

The authors, intending that the casting/forging process contributes to a reduction in production cost of aluminum automotive parts in Korea, describes the feature of the casting/forging process, aluminum alloys suitable for the cast preform, microstructure and mechanical properties of the cast preform, application examples of cast/forging, and further study.

Key Words : Thixoforming (반용융 성형), Thixomolding (반용융 사출성형), Net shape manufacturing (정밀 정형 부품 제조), Aluminium and magnesium parts (알루미늄 및 마그네슘 부품), Automotive and electronic industry (자동차 및 전자산업), Casting/forging technology (주조/단조 기술)

1. 서론

자동차와 항공기 산업의 급속한 발전 과정에서 제품의 제조 비용과 중량 감소 그리고 환경적

* 부산대학교 기계공학부

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 센터 (ERC/NSDM)

인 문제에 많은 관심을 갖게 되었으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 반응용 상태에서 부품을 성형하기 위한 제조 기술은 1970년대 이후부터 매우 빠른 속도로 발전하고 있다. 반응용 성형 공정은 일관성 있게 높은 품질을 유지하면서 전체 제조 공정을 상당히 줄일 수 있는 방법으로 복잡한 형상의 제품도 성형 가능하게 한다.^{(1)~(3)} 이러한 반응용 단조 기술을 국내에 도입하여 산업화하기 위해서는 기초연구 및 응용연구가 필요하다.

IMF 이후 제품의 생산성 향상은 생존의 밑바탕이 되므로 기계가공을 최소화하고, 부품의 경량화와 고밀도화가 절실한 과제로 대두되고 있다. 기존의 압축기 습동부품은 회주철이나 철계 소결 합금을 절삭가공하고 표면 처리하여 사용하고 있으나, 환경변화에 대한 새로운 경계영역 성형기술의 필요성이 대두되고 있다.

고상과 액상이 공존하는 반응용 상태에서 성형하는 반응용 다이캐스팅 (Semi-solid die casting)법과 단조법 (Thixoforging or Semi-solid forging)은 복잡한 형상을 가진 부품을 생산하고자 할 때 반응고 상태에서 소재를 금형에 완전히 충전 (두께 2 mm 정도까지 충전가능) 시키는 것이 가능하다. 반응용 소재의 충전 시 고상과 액상이 공존하기 때문에 순수 액상만 존재하는 경우에 비해서 응고 시간이 짧아지므로 수축공 결함을 줄이는 데 있어서 보다 유리한 성형법이다. 또한 반응용 성형은 도에서 소재의 점성이 액상상태 보다 더 높으므로 충전시 유동형태가 난류로 발달하지 않기 때문에 속도장이 균일한 상태에서 순탄한 충전을 시킬 수 있다.^{(1)~(3)} 따라서 충전 시 용탕의 흐름에 기인하는 가스 결함이 적어지는 등 여러 가지 장점들을 가지고 있기 때문에 최근 Al, Mg 재료 등을 이용하여 각종 수송기계 및 가전제품의 압축기 부품 등에 응용하고 있다.

반응용 소재 제품의 개발에 있어서 중요한 요소는 반응용 소재의 재가열 방법, 기계의 사양, 공정조건의 결정, 금형설계 등이다. 일반적으로 반응용 단조 및 다이캐스팅에 있어서 적절한 공정변수들을 설정하게 되면, 복잡한 형상의 제품일지라도 기공 등과 같은 결함들이 거의 없는 Net Shape 부품을 생산할 수 있다고 알려져 있다.^{(3)~(6)}

주조/단조기술은 일찍이 GM의 Oldsmobile 공장 에서 강제품인 자동차 디스크 브레이크용 스티어링 너클 (steering knuckle)을 주조/단조기술에 의하여

생산한 예를 Truxell이 1968년에 소개하였다. 그 후 Hodbell과 Thomas는 트럭용 로드엔드 (rod end)와 컨넥팅로드 (connecting rod)의 피로강도를 개선하기 위하여 주조하여 만든 단조 프리폼을 이용하여 기존 열간단조품에 필적할 만한 강도를 얻었다. 그러나, 1969년 영국의 주조업계에서는 주조시 발생하는 수축공이 단조에 의하여 완전히 압착되지 않았기 때문에 개발을 중지하였다. 그런데 1990년에 들어서 영국의 Bulldog Tools Ltd.에서 주조된 프리폼으로 열간단조하여 농기계나 산업기계에 쓰이는 삽날, 포크 등을 제조한 기술을 Dean이 석탄 파쇄용 날 (coal cutter pick)을 주조/단조에 의하여 생산하는 데 활용하였다.

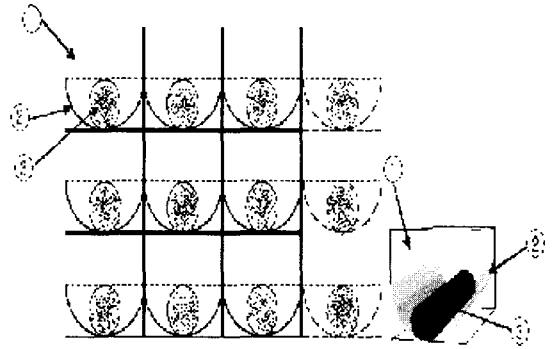
알루미늄합금에 주조/단조기술을 적용한 연구는 1970년대에 영국의 TI Sturmev-Archer Ltd.에서 Hyperforge라는 명칭으로 경주용 자동차의 휠 (wheel), 서스펜션 (suspension) 부품, 휠 허브 (wheel hub), 스티어링 암 (steering arm), 자전거용 스티어링 스템 (steering stem) 등의 생산에서 찾아 볼 수 있다. 이 적용에 관한 연구결과로부터 주조/단조에 적합한 알루미늄합금을 제안하고 있다. 그런데 최근에는 이 기술의 적용례는 영국에서 발표된 것은 별로 없고, 주로 일본의 Nissan 등의 자동차 회사나 Matsuo 공업, Showa전공과 같은 자동차 부품 공급 업체에서 스티어링 너클, 로커 암, 로드 로드 휠 등의 제조에 적용한 사례가 많이 발표되고 있다. 또한 주조된 프리폼 조직이 단조된 최종제품의 기계적성질에 큰 영향을 미치므로 주조프리폼조직의 미세화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{(7)~(9)} 국내에서는 일부 단조업체가 주조/단조기술을 농기계 부품의 컨넥팅 로드, 자전거 페달의 크랭크 등의 생산에 적용하고 있지만, 주조/단조에 적합한 주조 프리폼을 얻는 방안에 대한 체계적인 연구는 아주 최근에 필자 등에 의하여 시도되고 있는 실정이다.⁽¹⁰⁾

국내에서도 자동차 부품의 경량화를 촉진시키고, 제조원가를 낮추기 위한 방안으로 주조/단조기술의 적극적인 활용이 요청되므로 여기서는 주조/단조기술의 특징, 주조프리폼 조직과 기계적성질, 최근 적용례, 향후과제 등을 살펴보고자 한다.

2. 반응용 성형공정 개발

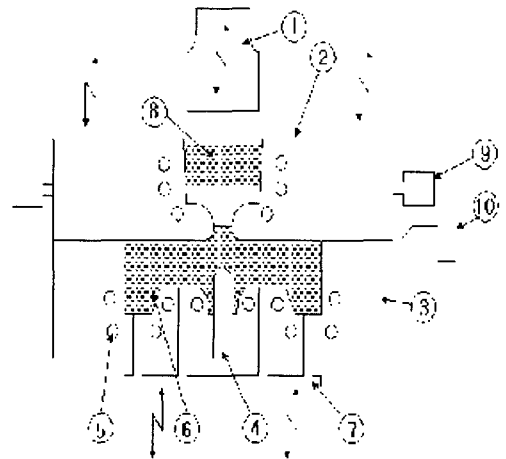
2.1 소재의 Reheating 구조 및 금형설계

반용용 빌렛을 이용하여 부품을 개발하기 위해서는 빌렛을 Fig. 1의 재가열 시스템 장치를 이용하여 가열한다. 다만 고주파 시스템으로써 짧은 시간동안에 빌렛을 원하는 온도로 가열하기 위해서는 고주파 코일 cell①을 여러 개 부착할 수 있다. Heating cell①의 부착 개수는 생산속도와 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 빌렛의 크기가 3인치 이내인 경우는 수직으로 가열하기도 하나 5인치 이상인 경우는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 소재용기② 속에 빌렛을 주입하여 수평으로 가열한 후 급형에 이송하여 성형을 한다. 위의 이유는 가열시 소재의 중력으로 인하여 빌렛이 원소재의 형상을 유지할 수 없을 때는 자동이송이 어렵기 때문이다. 이때 재가열 방법에 필요한 입력 data는 시간-온도, 시간-출력으로 제어할 수 있다.



① Heating cell ② Vessel ③ Material
Fig. 1 Schematic diagram for reheating of the billet.

Fig. 2는 재가열 빌렛을 이용하여 반용용 단조 작업을 하여 부품을 개발하는 예이다. 상부 급형②과 하부 급형③을 조립한 상태에서 가열 빌렛⑧을 급형의 캐비티 내에 주입한다. 속도 및 압력의 제어가 가능한 펀치①에 의하여 가압 지연 작업을 수행한다. 가압 완료 후 펀치①을 상부로 이송시키고 상부 급형②을 상부로 이송시킨 후 추출 펀치⑦을 이용하여 제품을 추출한다. 이때 급형 설계 및 게이트의 형상은 소재의 종류, 제품의 기계적 성질에 미치는 영향에 아주 중요하다.^{(11)~(13)}



① Punch ② Upper die ③ Lower die ④ Core pin
⑤ Cooling and heating holes ⑥ Product ⑦ Ejecting plate
⑧ Billet ⑨ Hydraulic cylinder ⑩ Gate cutter
Fig. 2 Die system to fabricate parts by semi-solid forging.

Fig. 3은 반용용 재료를 이용하여 실린더 block의 제품을 개발하기 위한 급형설계의 예를 보여주고 있다.

소재가 급형의 캐비티 내에 충전될 때에 자유면이 순차적으로 채워짐을 알 수 있다. 이때 재가열시 재료의 표면에 형성된 산화층이 캐비티 내에 유입되지 않도록 하여야 하며 성형시 고상과 액상 영역이 분리되지 않도록 속도 제어를 하여야 한다.^{(3), (12)~(13)}

Fig. 4는 반용용 다이캐스팅의 개요도이다. 가열한 빌렛을 Fig. 4의 ⑤위치에 주입한 후 유압 실린더를 작동시켜 사출작업을 수행한다. 용융 상태의 재료를 sleeve내에 주입한 후 속도, 압력 등이 서로 제어되면서 반용용 다이캐스팅 방법에 의하여 부품을 개발할 수 있다. 성형 후 유압 실린더로써 이동다이를 상하, 또는 좌우로 분리하여 제품을 추출하도록 설계되어있다. 성형시 빌렛의 산화막이 급형의 캐비티 내에 유입되지 않도록 하

기 위한 것으로 일반적인 다이캐스트 방법과 가장 중요한 차이점을 보여주고 있다.

2.2 유도코일 설계 및 Reheating 공정

유도 가열을 이용하여 소재를 가열할 경우 시간과 온도의 관계를 정확히 제어하여야 시편 단면에

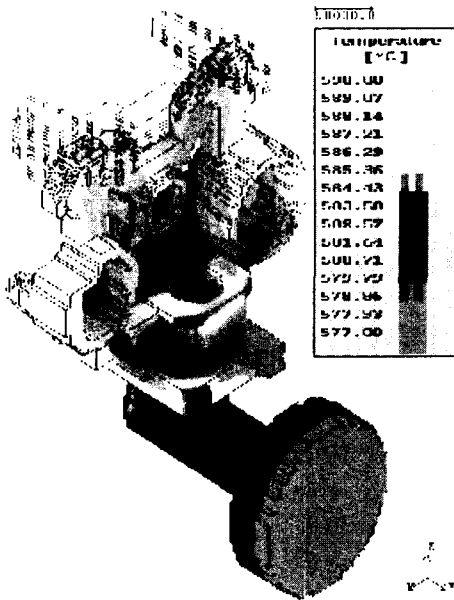


Fig. 3 Die design for the development of cylinder block product using semi-solid material.

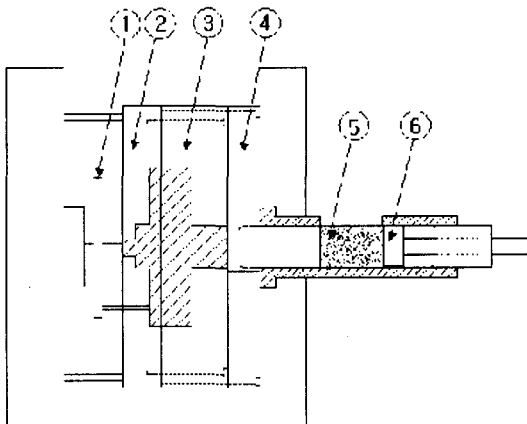


Fig. 4 Die apparatus for semi-solid die casting

서 균일한 온도를 얻을 수 있다. 반응용 성형을 위해서는 초기 공정온도 즉, 초기 고상율이 반응용 가공 공정의 성패를 좌우하는 만큼 온도제어가 용이한 유도가열 방법이 필수적이다.

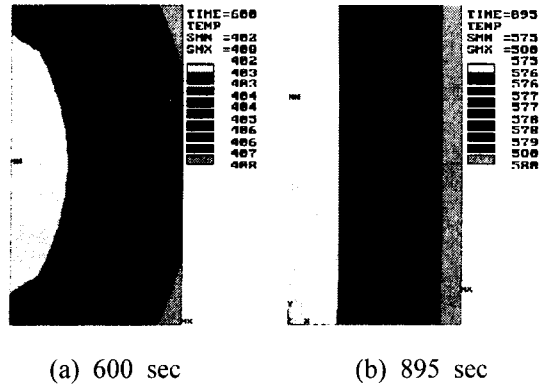


Fig. 5 In the case of H=180 mm, temperature distribution after induction heating.

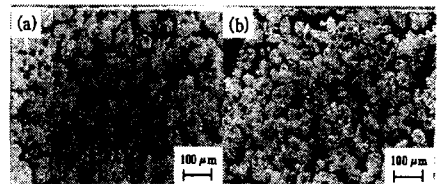


Fig. 6 Globular microstructure obtained in three step reheating process.

반응용 성형공정에서 가열시간의 단축 및 빌렛을 균일 재가열하기 위해서는 유도 코일의 설계가 중요하다. 코일과 빌렛을 구성하는 시스템에서, 빌렛의 전체 길이에 걸쳐서 유도 열량이 균일하지 않기 때문에 온도 분포가 균일하지 않다. 따라서 코일 설계의 최적화 과정에서 고려되어야 할 점은 코일 길이와 빌렛 길이 사이의 정확한 관계를 규정하는 것이다.⁽¹⁾

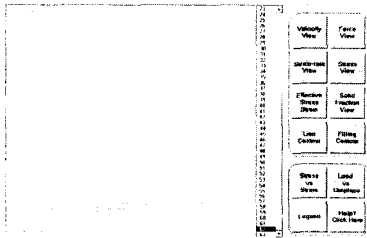
Fig. 5와 Fig. 6과 같이 본 저자는 반응용 소재(SSM)의 구상화된 조직을 얻을 수 있는 상용 유도 가열 시스템 (반응용 성형용: 60 Hz~3 kHz까지 주파수 가변 가능)의 코일의 크기를 이론적으로 제안하여 설계한 후 유도 가열 CAE 및 실험을 통하여 코일 설계의 타당성 및 반응용 성형공정에 적합한 유도가열 D/B를 구축하였다.

2.3 SSM Simulation

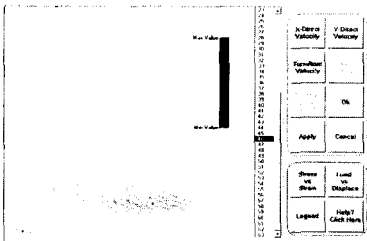
반응용 성형공정 설계 자동화를 위해서 SSM의 특성을 고려한 새로운 유한요소 알고리즘의 개발

이 요구되며 임의의 형상을 가진 부품의 반응용 성형공정을 컴퓨터 시뮬레이션하기 위한 전처리기 (Pre-processor)의 기능과 후처리기 (Postprocessor)의 기능을 갖춘 S/W의 필요성이 대두되고 있다.

Fig. 7은 SSM의 고상입자의 변형과 더불어 충전 결함 및 액상 편식을 예측하기 위한 새로운 유한요소 프로그램인 SEMI-FORM S/W의 후처리기를 나타낸 것이다. 각자 재구성 (Remeshing) 기능 및 분리계수의 함수로 표시한 유동 응력식을 이용하여 반응용 성형공정에 있어서 성형하중 및 고상율의 분포 등을 정확히 예측할 수 있을 것으로 기대된다.^{(13) (14)}



(a) Visualization of deformed shape



(b) Visualization of velocity field

Fig. 7 Post-Processor of SEMI-FORM S/W.

2.4 반응용 성형

2.4.1 Brake Master Cylinder 제조

여러 가지 자동차 부품 중에서 형상이 복잡하여 단조작업은 곤란하고 주조시에는 제품의 기계적 성질이 떨어지게 되며 가볍게 만들기 곤란한 브레이크 마스터 실린더 (Brake Master Cylinder)를 구상화 조직을 갖는 A356 소재를 사용하여 반응용 단조공정으로 성형 실험을 한 후, 제품의 성형성을 성형 변수인 램속도의 변화에 따른 충전정도로 확인하고, 성형품의 중량과 미세조직을 주조 제품과 비교한 결과를 소개한다.

브레이크 마스터 실린더를 성형하기 위하여 수입한 구상화 소재인 A356을 이용하였는데, 소재의 치수는 $\phi \times h=76.2 \times 100$ (mm) 이다. 급형의 재질은 SKD 61종으로 하였으며, 다이 예열을 위하여 막대형 히터를 이용하여 250 °C로 급형을 예열하였다. 성형에 사용한 프레스는 200톤 고속유압프레스인데, 성형시의 램속도는 25 mm/sec, 50 mm/sec 그리고 200 mm/sec이며 편지의 성형하중은 30톤이고 클램핑 하중 (clamping force)은 100톤으로 설정하였다.

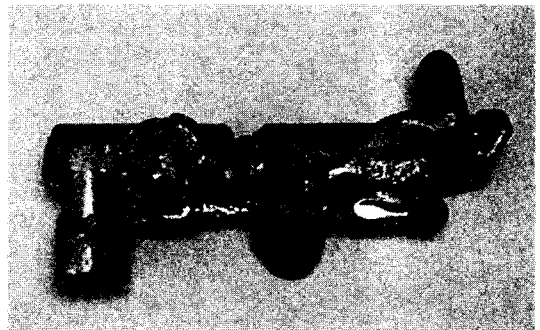
소재를 구상화시키기 위하여 유도가열로를 이용하였으며 A356의 고상률 55 %에 해당하는 576 °C까지 3단계 계단식 가열을 하였다.^{(15)~(16)}

성형 공정의 순서는 상·하 급형을 밀폐시킨 상태에서 유도가열에 의하여 적절한 고상률로 가열된 소재를 슬리브 (sleeve)에 삽입한 후에 편지로 가압하여 성형한다. 그리고 나서 일정시간 가압한 후에 편지를 상승시키고, 상 급형을 올린 후에 코어 (core) 실린더를 빼다. 마지막으로 하부 램으로 이젝터 핀을 사용하여 제품을 취출하여 급냉시킨다.

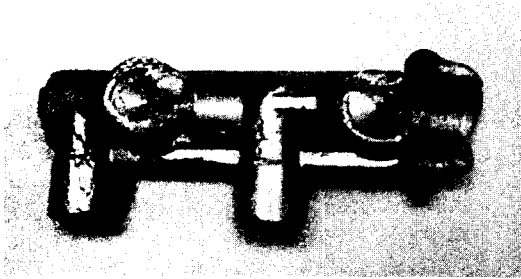
2.4.2 미세조직

A356 소재를 이용한 Brake Master Cylinder 제품을 성형하였는데, 성형 변수인 램속도를 25 mm/sec, 50 mm/sec 그리고 200 mm/sec로 변화시키면서 제품의 충전 정도를 확인하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

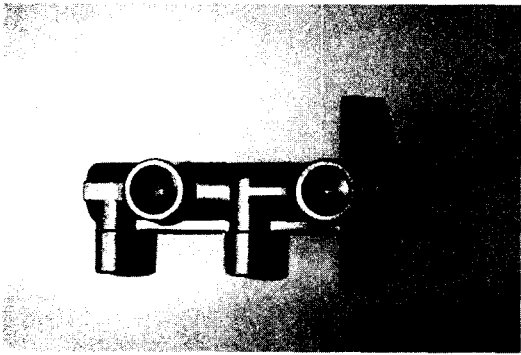
제품의 충전 정도는 램속도가 200mm/sec일 때 가장 양호한 제품이 성형되었는데, 램속도가 낮은 경우에는 소재의 액상이 먼저 유출되어 급형의 Gate 부에서 응고되므로 더 이상의 충전이 이루어지지



(a) 25 mm/sec in ram speed



(b) 50 mm/sec in ram speed



(c) 200 mm/sec in ram speed

Fig. 8 Photograph of brake master cylinder according to variance of ram speed.

힘들고, 빠른 램 속도로 성형하여야만 원하는 제품을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

또한 금형의 예열 온도를 250 °C로 설정하여 제품을 성형하므로써 금형 예열 시간을 단축 시키고 에너지를 절감할 수 있다.

성형한 제품의 중량은 360 g으로서 기존의 주조품 무게인 510 g보다 150 g 중량감소를 하여 경량화를 꾀하였으며, 자동차의 연비 향상에도 기여할 수 있으리라고 생각된다.

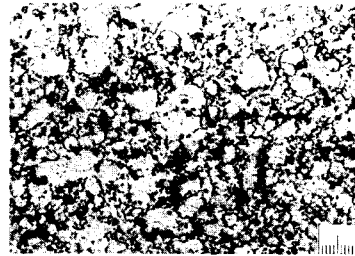
이 제품의 성형 실험 결과로부터 소재의 가열을 균일하게 하고 램속도를 증가 시키는 것이 제품의 성형을 원활히 할 수 있는 방법임을 확인할 수 있었다.

Fig. 9에는 반응용 단조 공정에 의해서 성형된 Brake Master Cylinder 제품의 미세 조직과 주조에 의한 제품의 미세조직을 비교하여 나타내었다.

이 그림으로부터 주조에 의한 성형품은 수지상(dendrite)의 미세조직을 나타내는 반면에 반응용 단



(a) by casting



(b) by semi-solid forging

Fig. 9 Microstructure of brake master cylinder produced by casting and semi-solid forging.

조에 의한 성형품은 고상입자의 조밀화가 잘 이루어져 있음을 알 수 있다.

2.5 반응용 복합 압출품의 성형

반응용 복합압출 공정에 관한 유한요소해석의 실험적 검증에 의해 탄두형상의 반응용 복합 압출품을 성형하였다. 실험에 사용된 금형 세트의 개략도를 Fig. 10에 나타내었다.

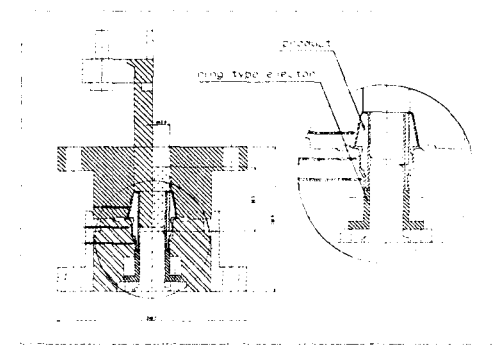


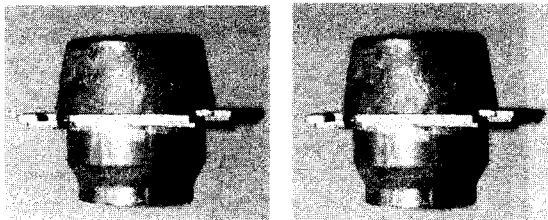
Fig. 10 Detailed drawing of die set for combined thixoextrusion.

상·하 금형과 펀치 그리고 맨드렐은 고온 공구강인 SKD 61을 HRC 55로 열처리 하였고, 금형과 펀치, 맨드렐을 가열하기 위해 카트리지 히터(cartridge heater)를 사용하였다. 금형의 온도가 상승하는 것을 비교적 정확하게 측정하기 위해 고온용 INCONEL $\phi 1.6$ K-Type 열전대를 사용하여 상·하부 금형의 온도를 측정하였다. 금형의 예열온도는 성형시 금형의 예열온도에 대한 영향을 파악하기 위해 200 °C와 400 °C로 하여 각각 실험을 수행하였다. 반응용 복합 압출품을 제조하기 위해 사용된 프레스는 200톤 고속 유압 프레스이며, 해석과 동일하게 펀치속도는 200 mm/sec로 설정하였다.

소재는 초기 직경 및 높이가 각각 $d \times h = 43 \times 80$ (mm)인 프랑스 Pechiney사에서 전자기 교반법으로 제작한 A356합금을 사용하였다. 소재의 가열은 50 kW 유도 가열로를 사용하였고, 가열온도는 고상률이 55 %인 578 °C로 가열하였으며 중심부와 표면의 온도차를 줄이기 위해 계단식 가열(step heating)을 하였다.

제품 하단 부의 두께가 약 5 mm의 링형상으로 일반적인 방식으로는 제품 취출에 부적합하여 맨드렐을 감싸는 링형상의 이젝터 핀으로 제품을 취출하게 된다.

반응용 복합 압출품의 성형 공정은 (1) 절단된 A356 시편을 준비한다. (2) 상·하 금형과 펀치를 단온 후, 금형을 예열한다. (3) 소재를 원하는 온도까지 유도가열한다. (4) 소재 이송전, 펀치와 상금형을 상승시킨다. (5) 소재를 맨드렐 위에 위치시킨다. (6) 펀치를 하강시켜 성형한다. (7) 가압유지를 한다. (8) 펀치와 상금형을 상승시킨다. (9) 링형상이젝터로 제품을 취출한다. 이와 같은 공정으로 반응용 복합 압출품을 성형하였고 제품의 형상은 Fig. 11과 같다.

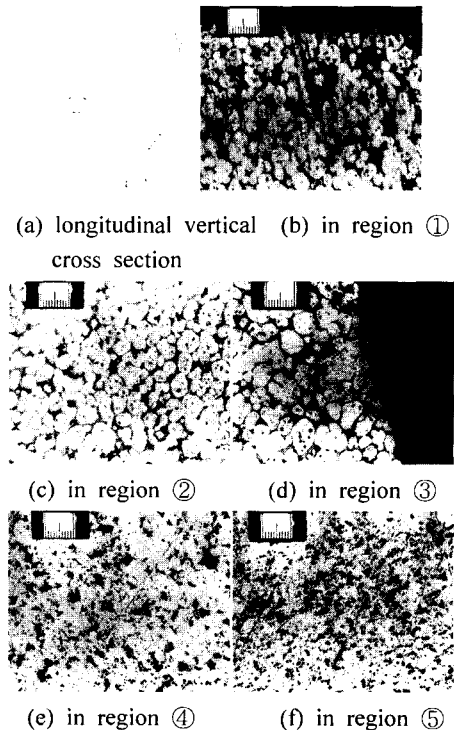


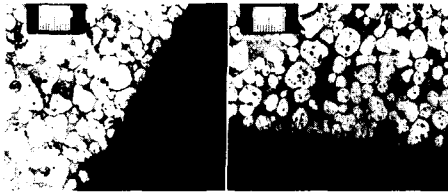
(a) product of 200 °C (b) product of 400 °C
Fig. 11 Photograph of combined thixoextrusion product.

또한 제품의 길이방향으로 절단하여 미세조직을 확인하였는데, Fig. 12와 같다.

본 연구의 실험에서는 금형 예열온도가 제품의 성형에 미치는 영향을 파악하기 위해 금형 예열온도를 200 °C, 400 °C로 하여 실험을 수행하였다. 금형의 예열온도가 200 °C일 때는 금형과 소재사이의 큰 온도차로 인해 급냉에 의한 미충진과 표면의 거침정도가 큼을 알 수 있다. 이와는 반대로 금형온도가 400 °C일 경우에는 소재가 금형 내부로 완전히 충전되어 양호한 형상과 제품 표면을 나타내고 있다.

금형 예열온도가 400 °C일 때의 제품의 미세조직은 전반적으로 구상화된 입자를 나타냄을 알 수 있고, Fig. 12의 ⑤에서는 성형시 펀치와 맨드렐에 의해 소재가 압축되어 아주 치밀하고 높은 고상률을 나타냄을 알 수 있고, 제품의 상·하 끝 부분인 Fig. 12의 ①, ⑦에서는 내부로부터 액상이 유출되어 낮은 고상율을 나타냄을 알 수 있다. 또한 제품의 측면부인 Fig. 12의 ③, ⑥에서는 제품의 상·하부보다는 고상이 많음을 알 수 있고 구상화된 입자를 나타내고 있다.





(g) in region ⑥ (h) in region ⑦

Fig. 12 Microstructures of longitudinal vertical cross section for final product.

본 연구의 실험에서는 금형 예열온도가 제품의 성형에 미치는 영향을 파악하기 위해 금형 예열온도를 200 °C, 400 °C로 하여 실험을 수행하였다. 금형의 예열온도가 200 °C일 때는 금형과 소재사이의 큰 온도차로 인해 급냉에 의한 미충진과 표면의 거칠 정도가 큼을 알 수 있다. 이와는 반대로 금형온도가 400 °C일 경우에는 소재가 금형 내부로 완전히 충전되어 양호한 형상과 제품 표면을 나타내고 있다.

금형 예열온도가 400 °C일 때의 제품의 미세조직은 전반적으로 구상화된 입자를 나타냄을 알 수 있고, Fig. 12의 ⑤에서는 성형시 펀치와 맨드렐에 의해 소재가 압축되어 아주 치밀하고 높은 고상률을 나타냄을 알 수 있고, 제품의 상·하 끝 부분인 Fig. 12의 ①, ⑦에서는 내부로부터 액상이 유출되어 낮은 고상률을 나타냄을 알 수 있다. 또한 제품의 측면부인 Fig. 12의 ③, ⑥에서는 제품의 상·하 부분보다는 고상이 많음을 알 수 있고 구상화된 입자를 나타내고 있다.

2.6 반응용 성형에 의한 자동차용 엔진 피스톤 제조

반응용 단조 공정에 의하여 자동차용 엔진 피스톤을 제조하였으며 실험에 사용된 금형 세트의 개략도를 Fig. 13에 나타내었다.

펀치와 상금형, 하금형, 이젝터는 고온 공구강인 SKD 61을 사용하였으며 HRC 55로 열처리 하였다. 펀치 플레이트와 이젝터 플레이트 그리고 금형의 배킹 플레이트 (backing plate)는 SCM 4를 사용하였으며, 열처리는 하지 않았다. 상금형과 하금형 그리고 펀치를 가열하기 위하여 막대형 카트리지 히터 (cartridge heater)를 사용하여 실험하였다. 카트리지 히터의 설치에서 펀치와 상금형에는 수직으로 설치하였으며, 하금형에는 금형의 배킹플

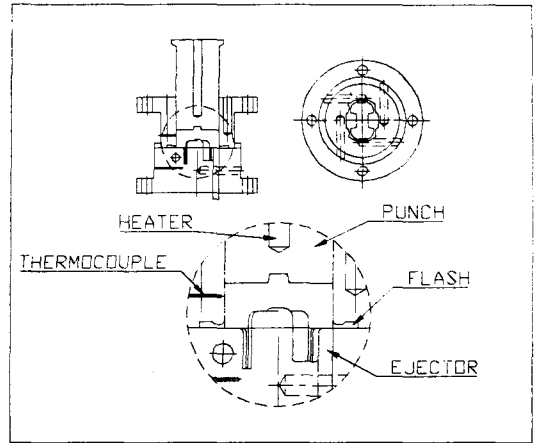


Fig. 13 Schematic drawing of die set for engine piston of semi-solid forging.

레이트와 카트리지 히터의 전기 단락 (short)을 방지하기 위해 수평으로 히터를 설치하였다. 이때 제품 캐비티 (cavity)에 근접하여 히터를 설치하기 위하여 하금형 히터의 위치를 다른 높이로 설치하였다. 상금형, 하금형의 온도 상승을 정확히 측정하기 위하여 고온용 INCONEL $\phi 1.6$ K-Type 열전대 (thermocouple)를 사용하여 금형의 온도를 측정하였다. 금형의 예열 온도가 제품 제조에 미치는 영향을 파악하기 위해 200 °C, 300 °C로 각각 가열하여 실험하였다.

또한 제품의 충전 정도 향상과 가압 유지를 위하여 상금형에 플래쉬 (flash)부를 추가하여 결합 없이 복잡한 캐비티를 채울 수 있도록 하였다.

소재는 프랑스 Pechiney사에서 전자기 교반법으로 제조한 구상화 조직의 A356합금을 사용하였으며, 초기 직경 및 높이가 각각 $\phi \times H = 76 \times 38$ (mm)인 소재를 사용하였다.

소재의 가열은 중심부와 표면의 온도차를 줄이기 위해 50 kW 유도 가열로를 사용하여 계단식 가열 (step heating)을 하였으며, 소재의 고상율이 각각 40 %, 60 %인 596 °C, 567 °C로 가열하였다.^{(15)~(16)}

자동차용 엔진 피스톤을 사용하기 위해 사용된 프레스는 200톤 고속 유압프레스이며, 펀치 속도는 20 mm/sec로 설정하여 비교적 낮은 속도에서 성형하였다.

Fig. 14는 자동차용 엔진 피스톤 제조를 위한

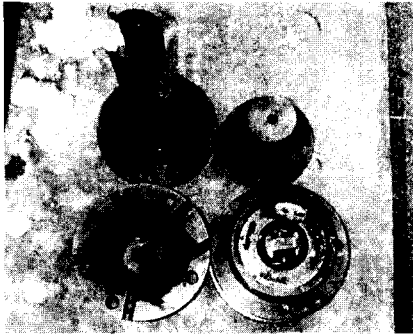
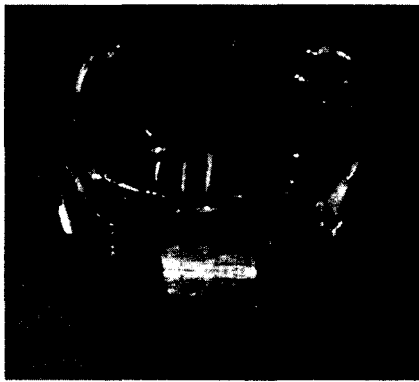
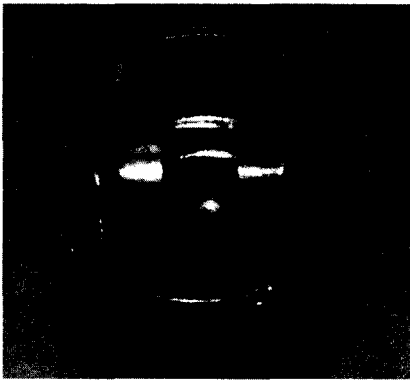


Fig. 14 Photograph of die set for automotive engine piston of semi-solid forging.



(a) in case of 200 °C in die temperature



(b) in case of 400 °C in die temperature

Fig. 15 Photograph for engine piston according to die temperature.

반용융 단조 금형을 보여 주고 있으며 이젝터 핀은 제품의 측면부의 형상과 같이 설계되었다. 반용융 단조에 의해서 A356 소재를 사용하여 자동차용 엔진 피스톤을 제조하였으며, 금형 예열온도 200 °C, 300 °C, 초기 고상율 40 %, 60 %에 대하여 각각 제품을 성형하였다. Fig. 15에서는 초기 고상율이 55 %일 때 금형 예열온도를 변화시킨 제품의 사진을 나타내고 있다. Fig. 16에서는 금형 온도가 300 °C일 때 초기 고상율을 변화시킨 제품의 사진을 나타내고 있다.

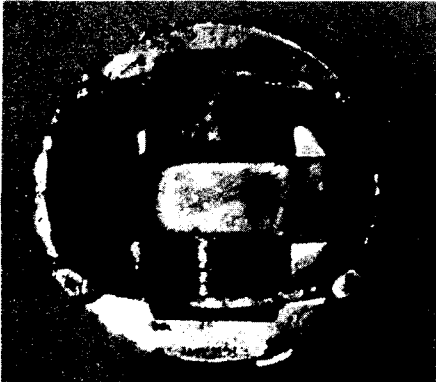
기존의 다이캐스팅을 이용하여 제조된 제품은 내부에 편석, 기공 등의 결함을 가지며, 용탕 단조법은 용탕을 과열하기 때문에 금형의 수명이 단축되며 에너지 소비적인 측면에서 단점을 가지는 반면에, 고액 공존 영역에서 성형하는 반용융 성형공정은 액상과 고상이 공존하기 때문에 순수 액체상태의 점성이 비교적 높아 금형 캐비티에 충전시 난류의 발달이 적어 결함을 줄이고, 응고시 발생하는 편석, 균열 등의 발생을 억제할 수 있으므로 균일한 기계적 성질을 얻을 수 있다.

Fig. 17은 반용융 성형공정에 의해 개발된 Air Compress의 Scroll 제품을 나타낸 것이다. 미세조직의 측면에서는 원소재를 구상화된 소재로 재가열한 후 성형하므로 수지상 조직의 소재보다 고상이 액상에 비교적 균일하게 분포하여 고강도의 성량 부품을 생산할 수 있으며, 적은 공정수로 정밀정형품을 제조할 수 있기 때문에 다이 수명 연장 및 생산비용 절감 효과 등을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.^{(1) (3), (11) (16)}

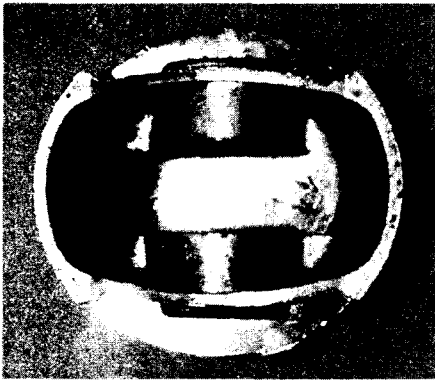
3. Mg 재료의 Thixomolding

Mg 재료의 Thixomolding기술은 Fig. 18에서 보여주는 바와 같이 Mg의 chip을 Hopper에 투입한 후 실린더 내에 있는 screw를 이용하여 이동한다. 이 때 소재가 이동되면서 가열과 회전에 의한 마찰력으로 Mg의 소재가 반용융 상태로 되면서 사출되어진다. Mg 다이캐스팅보다는 산화성 및 반응성이 적고, 용탕온도가 낮기 때문에 금형의 수명을 증가시킬 수 있다.

Thixomolding은 Mg를 높은 압력에서 성형하기 때문에 정밀한 박육제품을 생산할 수 있다. 그러나 사용하는 소재가 chip형태이기 때문에 소재의



(a) in case of 60 % in initial solid fraction



(b) in case of 40 % in initial solid fraction

Fig. 16 Photograph for engine piston according to initial solid fraction.

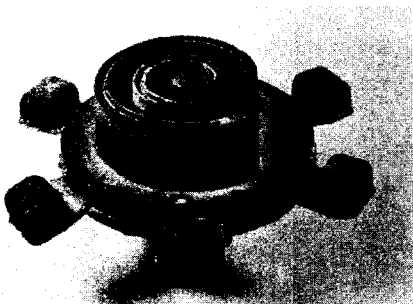


Fig. 17 Automotive scroll product fabricated by semi-solid forging process using ALTHIX 86S aluminum alloy.

공급이 원활하지 않을 경우와 분활성 가스 투입의 미숙, screw의 마모 및 수명저하, 금형설계 기술의 미비, 장비의 고가 등의 이유 때문에 국내에서는 아직까지 실용화가 되지 않고 있는 것 같다. 금형설계 방법은 nozzle을 통하여 (560~630) °C 정도의 반응용 상태의 재료가 충전되는 것을 제외하고는 플라스틱 재료의 사출 성형방법과 유사하나 작업시 보통(800~1100) kg/cm²의 고압이 작용하기 때문에 금형설계에 많은 지식이 필요하다.

4. 주조/단조기술

4.1 주조/단조기술의 특징

주조/단조기술은 Fig. 19에서 보는 바와 같이 원재료나 단조 스크랩을 재용해하여, 최종 제품의 형상에 가까운 프리폼을 주조로 만들고 이것을 단 한 번의 마무리 단조를 행하여 제품을 제조하는 기술로서 주요한 특징은 다음과 같다.

- 1) 소재로 주조용 합금을 사용하기 때문에 재료비용이 압출재의 사용에 비해 적게 된다.
- 2) 열간단조한 후에 트리밍 공정에서 발생한 스크랩은 공장 내에서 재용해해서 이용할 수 있으므로 재료비용을 감소시킬 수 있다.
- 3) 단조후의 최종제품형상에 적합한 주조 프리폼을 자유롭게 설계할 수 있기 때문에 형상의 자유도가 높고 단조재료의 활용율이 높다.
- 4) 복잡한 형상의 제품을 압출재로부터 열간단조하여 생산할 경우는 Fig. 20에서 보는 것과 같이 여러 번의 단조공정을 거쳐 최종형상으로 성형하여야 하나, 주조/단조공정은 복잡한 형상의 경우에서도 주조프리폼을 사용하여 마무리 단조 금형만으로 단조가 가능하기 때문에 단조비용 및 금형 제조 비용을 절감할 수 있다.
- 5) 주조 프리폼재를 적당한 소성가공도를 가지도록 설계할 수 있기 때문에 단조시 변형제어가 쉽고 플래시의 양을 감소시킬 수 있어서 단조금형의 수명을 연장할 수 있다.
- 6) 단조 프레스의 가압능력과 비교해서 소형 제품의 경우는 주조 프리폼의 탕구부를 연결하여 여러 개로 단조할 수 있기 때문에 단조비용을 절감할 수 있다.

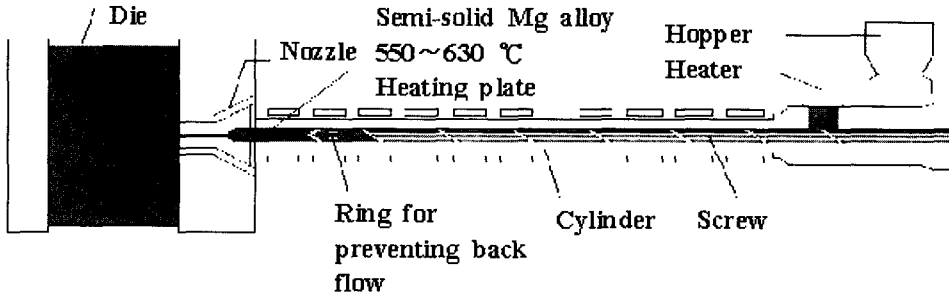


Fig. 18 Schematic illustration of Thixomolding machine.

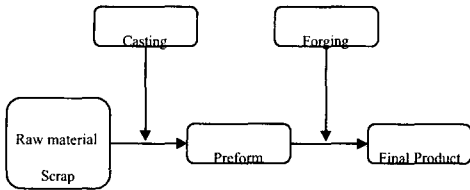


Fig. 19 Casting/forging.

4.2 주조/단조용 알루미늄 합금

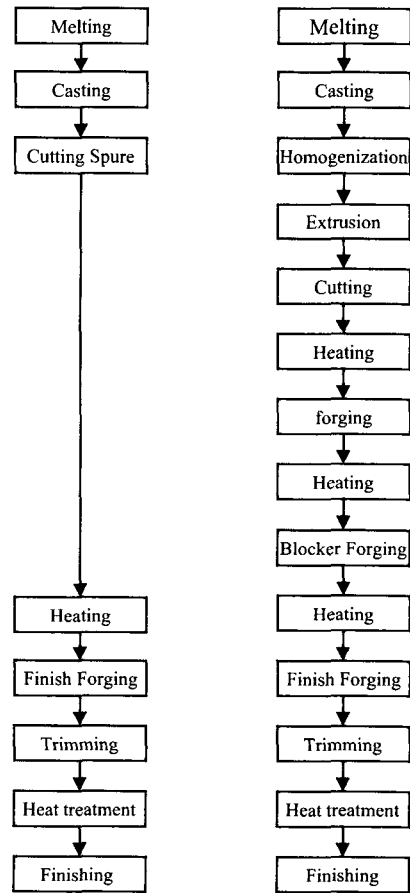
주조/단조는 각종 주조법에 의해서 프리폼이 제조되므로 사용금속은 주물재가 주를 이루고 있다. 주물용 알루미늄합금의 계통도는 Fig. 21과 같다. Fig. 21의 계통도에서 알 수 있듯이 알루미늄 주물용 합금은 Cu, Si, Mg의 3성분을 기본계로 하여 이들에게서 파생된 합금이 있다. Fig. 21에서 사각형으로 표시한 합금은 다이캐스팅용 합금이다.

최근에는 주조기술의 진보와 사용자의 요청에 따라 단조용 합금이나 이제까지 없던 새로운 기능을 발휘할 수 있는 신합금이 채용되고 있는 추세이다. 이러한 각종 합금의 특징을 살리면서 자유로이 사용할 수 있는 합금개발이 이루어져야 한다.

4.3 주조 프리폼의 조직 및 기계적 성질

주조/단조에 사용되는 주조 프리폼의 내부품질에 따라 단조된 제품의 기계적 성질과 단조성이 크게 변화한다. 즉, 다음과 같은 인자에 의하여 영향을 받는다.

- 1) 주조결합 (수축공, 기공, 제재물)
- 2) 주조조직 크기(결정립, DAS, 제2상의 크기)
- 3) 편석 유무



(a) Casting/forging

(b) Hot forging

Fig. 20 Comparison of process between casting/forging and Hot forging.

주조/단조에 사용되는 알루미늄 합금을 선정할 때, 합금의 조성에 의한 금속조직의 변화에 관심을 기울여야 한다. 왜냐하면 금속조직의 변화에 따라 소재의 기계적 성질과 단조성이 많이 달라지기 때문이다.⁽¹⁷⁾

주조 프리폼의 미세조직의 크기를 정량적으로 표현하기 위해서 DAS (Dendrite Arm Spacing)로 정리하고, DAS와 기계적 성질의 관계를 조사한 연구들이 있다.^{(7)~(10)} Fig. 22는 AC4C의 주조 프리폼의 냉각속도에 따른 DAS의 변화를 나타낸다.⁽¹⁰⁾

Fig. 22에서 주조시의 냉각속도가 증가함에 따라 조직이 미세화되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 조직의 변화에 따라 기계적 성질이 변화하는데, 조직이 미세할수록 강도 및 단조성이 좋아지고 있다. 구체적으로는 DAS가 20 μm 이하로 되면 강도와 단조성이 좋다고 알려져 있다.⁽¹⁷⁾ 그런데, 냉각속도를 제어하여 기계적 성질이 안 좋은 수지상정을 없앨 수 없으므로 Zr, Ti+B 등과 같은 합금원소를 첨가하여 수지상정을 구상화해야 한다.^{(7)~(8)}

Fig. 23과 Fig. 24는 AC4C 주조 프리폼의 경우에 첨가제 (Zr, Ti+B)가 미세조직에 미치는 영향을 나타낸다.⁽¹⁰⁾ 구상화의 정도는 타원형상으로 입상화된 입자의 형상비 (단반경과 장반경비)로 나타내었다.

Fig. 23과 Fig. 24에서 보는 바와 같이 Zr과 Ti+B를 각각 첨가하는 것보다 함께 첨가하는 것이 더 효과적임을 알 수 있다. Table 1은 첨가제가 제품의 기계적 성질에 미치는 영향을 나타내는데, 첨가제를 넣음으로써 경도, 인장강도, 연신율이 모두 증가되는 것을 볼 수 있다.

Table 1 Effects of Zr and Ti+B contents on mechanical properties.
(0.5 % Zr, 0.24 % Ti+B)

	Hardness (Hv)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)
No addition	81	260	13.1
Addition	108	284	15.9

또한 주조시에 발생한 가스함유량, 개재물이 많으면 인장강도, 연신율, 충격치, 피로한도 등이 저

하되므로 이에 대한 대책도 요구된다.

5. 주조/단조 기술의 적용례

5.1 국외의 적용례

5.1.1 너클 암의 제조

일본 닛산자동차에서 주조/단조 기술의 첫 적용례로서 너클 암을 사형주조로 예비 성형체를 만들고 단조하여 제조하였다.⁽¹⁸⁾ 너클 암의 종래 단조공정에 비해 주조공정이 있기 때문에 비용이 증가하는 요인이 있지만, 단조공정에서 사용되는 압출봉의 원가가 주조로 제조되는 주조 프리폼의 원가를 상회했다. 또한 주조/단조공정은 마무리 단조만으로 성형하기 때문에 단조 공정수가 줄어들므로 생산원가가 약30 % 감소했다.

5.1.2 이륜차 핸들의 제조

일본 혼다 자동차에서는 주조/단조기술의 초기 적용사례로서 이륜차 핸들을 제조하였다.⁽¹⁹⁾ 종래3회의 단조와 3회의 트리밍으로 제조되던 공정을 주조/단조공정으로 바꾸어 생산수에 따라 약25 %에서 약41 %의 원가절감 효과를 기대된다.

5.1.3 로드 휠의 제조

일본 닛산 자동차에서 저압주조로 예비 성형체를 만들고 단조하여 개발한 알루미늄 로드 휠은 기계적 성질이 요구됨과 동시에 외관품질이 중요시되는 부품으로서 단조 로드 휠과 비슷한 기계적 성질은 얻고, 저가로 제품을 제조하기 위하여 주조/단조공정을 적용했다.⁽²⁰⁾

5.2 국내의 적용례

5.2.1 이륜차 커넥팅로드의 제조

최근 수행된 주조/단조기술의 기초연구를 바탕으로 현재 100 cc 이륜차에서 사용되고 있는 AC4C 재료로 Fig. 25와 같은 커넥팅 로드를 제조하고자 하였다.⁽¹⁰⁾ 커넥팅 로드 제조과정에서 단조 후 제품의 기계적 성질에 주로 영향을 미치는 프리폼의 주조조직의 미세화방안에 중점을 두고 연구하였다.

5.2.2 자동차용 에어컨 컴프레서 피스톤의 제조

자동차 에어컨 컴프레서용 피스톤 (Fig. 26)을 Al4032를 바탕으로 개량한 합금을 이용하여 주조. 단조공정으로 개발하고자 하였다. 이 제품의 개발

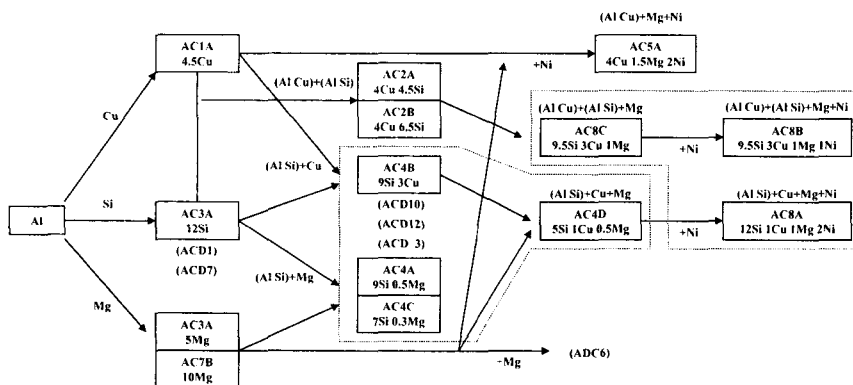


Fig. 21 Systematic diagram of aluminum alloys.

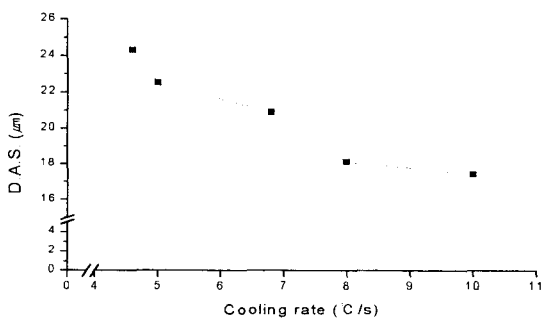


Fig. 22 Effect of cooling rate on DAS of AC4C cast preforms.

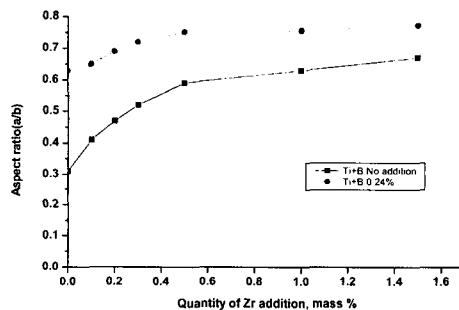


Fig. 24 Effects of Zr and Ti+B contents on aspect ratio of AC4C cast preforms.

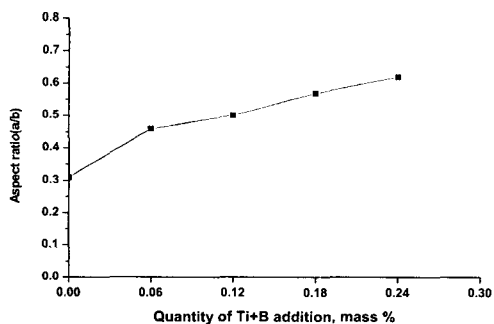


Fig. 23 Effect of Ti+B content on aspect ratio of AC4C cast preforms.

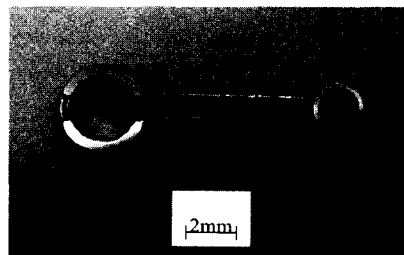


Fig. 25 Connecting rod for a motor cycle.

방안과 단조시 충분하고 균일한 변형을 받을 수 있는 프리폼의 형상설계에 중점을 두고 연구하였다.

최종제품의 요구되는 경도는 76 H_RB이고, T6 열처리 후 주조/단조제품의 경도는 80 H_RB으로 기존 제품의 규격을 충분히 만족할 수 있었다. 초기 소재에 주조괴를 사용함으로써 기존의 압출소재를 이

에서는 주조조직의 미세화방안, 공정 Si의 개량화

용한 열간단조시의 초기 소재비용에 비해 25 %의 재료비 절감효과를 기대할 수 있었다.

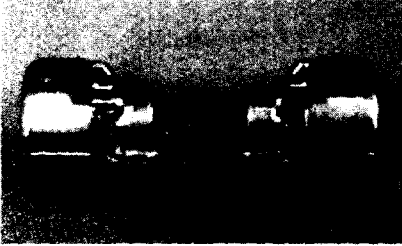


Fig. 26 Compressor piston for an automotive air conditioner.

6. 파급 효과 및 활용 방안

내마모계 가전용 Compressor 및 자동차 부품들에 있어서 소재를 Al 합금으로 대체하려는 연구가 적극적으로 이루어지고 있다. 그 이유는 1) 경량화, 2) 가공성, 3) 친환경의 3가지 측면으로 설명이 가능하다.

6.1 경량화

회전체의 중량감소는 급속한 방향전환 시 가져오는 관성의 영향을 상당히 줄일 수 있고, 그에 따라 Compressor의 효율을 보다 향상시킬 수 있다. 또한 제품성능에 있어서 급속 냉동 성능이 보다 향상될 수 있고, 무게 감소로 인한 회전력 요구의 감소로 인하여 전력 소비량을 적절히 감소시킬 수 있다.

자동차 Brake Master Cylinder 및 Air Compressor 용 Scroll 제품을 양산하기 위한 반응용 단조 공정 기술을 개발하였으며, 성형제품은 주조품보다 중량을 약 150 g 정도 감소시켰다.

6.2 가공성 향상

기존의 주철계 Scroll 제품을 반응용 단조공정을 이용하여 Al 합금으로 대체함으로써 공구수명이 평균 5배정도 향상시킬 수 있다. 또한 가공속도의 증가로 인하여 생산성 향상을 가져올 수 있다. (고속가공 가능)

6.3 향후 발전 추세

미국, 유럽 등에서는 국가적인 차원에서 집중적으로 연구를 진행중이며, 일부회사에서는 이미 양산단계에 있기 때문에 국내에서도 Al 및 Mg를 이용한 반응용 성형공정에 대한 많은 관심과 연구가 필요하다. 자동차, 항공기, 전자, 가전제품의 질적 수준의 향상을 위하여 국내에서도 이 분야에 관한 응용 및 사업화가 필요한 분야로 사료된다.

최종제품에 가까운 형상으로 주조된 프리폼을 단조하는 주조/단조기술은 주조결함을 개량하는 방법으로서 등장하였으며, 최근에는 주조재와 단조가공의 이점을 살리고, 독자적인 가공분야를 개척하고 있다. 그러나 주조/단조기술에 의해 생산된 부품이 단조품에 대응할 만한 신뢰성을 얻기 위해서는 다음과 같은 과제를 해결해야 한다고 생각한다.

- 1) 주조와 단조에 적합하고 부품기능에 적합한 합금개발
- 2) 미세조직을 가진 주조프리폼을 제조하는 최적 주조조건
- 3) 주조와 단조에 적합한 주조프리폼의 형상설계
- 4) 주조프리폼의 최적의 단조공정
- 5) 주조·단조 제품의 최적 열처리방안

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터 (ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단 우수 연구센터의 지원에 의한 연구의 내용을 발췌한 일부입니다.

참고문헌

1. Jung, H. K., and Kang, C. G., "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6 Pct Si-3 Pct Cu-0.3 Pct Mg Alloys for Thixoforming," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30A, No. 11, pp. 2967-2977, 1999.
2. Tzimas, E., and Zavaliangos, A., "Mechanical Behavior of Alloys with Equiaxed Microstructure in the Semi-Solid State at High Solid Content," Acta Materialia, Vol. 47, No. 2, pp. 517-528, 1999.
3. Jung, H. K., and Kang, C. G., "A Study on

- Solutions Avoiding Liquid Segregation Phenomena in Thixoforming Process of Scroll Component," Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, to be accepted.
4. Garat, M., Blais, S., Pluchon, C., and Loué, W. R., "Aluminium Semi-Solid Processing : from the Billet to the Finished Part," Proceedings of the 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, Colorado, USA, pp. xvii-xxxi, 1998.
 5. Hirt, G., Cremer, R., Winkelmann, A., Witulski, T., and Zillgen, M., "Semi-Solid Forming of Aluminum Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion," J. of Materials Processing Technology, Vol. 45, pp. 359-364, 1994.
 6. Kang, C. G., Kang, S. S., and Jung, H. K., "Influence of Process Parameters on the Defects in Thixoforming of Cast and Wrought Aluminum Alloys," Advanced Technology of Plasticity, Vol. 3, pp. 1701-1706, 1999.
 7. 大野 猛外 5人, "6061 알루미늄合金의 마이크로 조직および機械的性質に及ぼす Mn, Zr の影響," 輕金屬, 第 48卷, 第 2號, pp. 67-72, 1998.
 8. 姜 孝京外 2人, "Al-Si-Cu系鑄造合金の凝固組織に及ぼすストロンチウム及びTi-B添加冷却速度の影響," 鑄造工學, 第 69卷, 第 5號, pp. 383-390, 1997.
 9. 才川清二外 3人, "Al-Li系鑄物合金の鑄造性に及ぼすジルコニウムおよびチタン添加の影響," 鑄造工學, 第 69卷, 第 6號, pp. 469-476, 1997.
 10. 배원병, 강정윤, 이영석, 이성모, 홍창호, "알루미늄 주조/단조 공정에서 주조조직 제어에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 9, pp. 41-47, 1999.
 11. Kang, C. G., Jung, H. K., Jung, K. D., and Lee, D. H., "Thixoforming Process of Aluminum Materials with Globular Microstructure," Proceedings of the Korea-French Int. Joint Workshop on Metal Forming, KAIST, Daejeon, Korea, pp. 51-56, 1999.
 2. Jung, H. K., and Kang, C. G., "Effect of Alloying Element on the Mechanical Behavior and Superficial Defects in Thixoforged Components of Al-Si Alloys," Key Engineering Materials, 2000, in Press.
 13. Kang, C. G., and Jung, H. K., "Finite Element Analysis with Deformation Behavior Modelling of Globular Microstructure in Forming Process of Semi-Solid Materials," Int. J. of Mechanical Sciences, Vol. 41, No. 12, pp. 1423-1445, 1999.
 14. Jung, H. K., Kim, N. S., and Kang, C. G., "Development of an Automatic Mesh Generation (AMG) with Quadrilateral Elements and Remeshing Scheme for Thixoforming Process Design," J. of Materials Engineering and Performance, 2000, in Press.
 15. Jung, H. K., Kang, C. G., and Moon, Y. H., "Induction Heating of Semi-Solid Billet and Control of Globular Microstructure to Prevent Coarsening Phenomena," J. of Materials Engineering and Performance, Vol. 9, No. 1, pp. 1-12, 2000.
 16. Jung, H. K., and Kang, C. G., "Reheating Process of Cast and Wrought Aluminum Alloys for Thixoforging and Their Globularization Mechanism," J. of Materials Processing Technology, 2000, in Press.
 17. 山本 秀雄, 關口 常久, "各種 Al合金の鑄造. 鍛造," 第 12 回 アルミニウム鍛造技術講座, pp. 1-8, 1992.
 18. Fujikawa, S., Kitamura, Y., and Shimamura, S., "Application of Numerical Methods for the Aluminum Casting/Forging Process," J. of Materials Processing Technology, Vol. 27, pp. 93-110, 1991.
 19. 櫻天久之, "コンフォミックス法の以後の展開," 第 19 回 アルミニウム鍛造委員会, pp. 1-33, 1994.
 20. 神戸 洋史, 和夫 吉岡, 英夫 三部, 隆宏, 北岡 山治, 藤井 拓己, "鑄造鍛造プロセスによるアルミニウムロードホイールの實用化," 輕金屬, 第 48 卷, 第 2 號, pp. 103-108, 1998.