

## 반응용 단조품의 제조

박형진\*, 강충길\*\*, 김병민\*\*, 최재찬\*\*

## Manufacturing of Product by Semi-Solid Forging

Hyung-Jin Park\*, Chung-Gil Kang\*\*, Byung-Min Kim\*\*, and Jae-Chan Choi\*\*

## ABSTRACT

The semi-solid forging is a new forging technology in which the billet is heated to the semi-solid state coexisting liquid and solid phase for making globular microstructure and subsequently formed. As the semi-solid forging is compared with conventional casting such as die casting and squeeze casting for the characteristics of its process, the product without inner defects such as gas porosity and segregation can be obtained and its microstructure is globular grain. Simultaneously, its mechanical properties are improved by globular microstructure and the lower temperature of the slug causes the cycle time of manufacturing to be shortened and the die life to be lengthened. As it is compared with conventional cold and hot forging, it is possible to minimize the equipment of production owing to a lower forming load and reduce the number of process by a followed treatment for complex shaped product. Therefore it is needed to confirm the quality of a semi-solid forged product by defining its characteristics quantitatively under these advantages. This paper investigates the formability of a master cylinder by its forming variables. And the microstructural characteristics and mechanical property of it is also studied.

**Key Words** : Semi-Solid Forging(반응용 단조), Microstructure(미세조직)

## 1. 서론

자동차와 항공기 분야의 비약적인 발전 과정에서 부품의 증량 감소를 통한 제조 비용의 절감과 작업 공정의 개선을 통한 환경 문제를 해결하기 위해서는 난가공성 경량 금속의 새로운 가공법을 이용하여 부품을 최종 형상에 가장 가까운 정형 제품(net shape product)으로 제조하는 것이 가능해야 한다.

기존의 자동차 부품 제조 기술 중에서 다이캐스팅(die casting)은 거의 100년 전에 고안된 제조

공정으로 표면과 치수 정밀도가 좋고 복잡한 형상의 부품을 값싸고 대량으로 생산할 수 있는 반면에 액체 상태의 소재가 높은 속도로 캐비티 내에 분사될 때 많은 양의 공기가 부품의 내부로 들어갈 수 있기 때문에 기계적 성질이 제한적이어서 강도가 요구되는 부품에는 적용되지 않는다. 또한 기존의 주조 공정으로는 복잡한 형상의 부품을 성형할 수는 있지만 기공과 같은 미세조직의 결함으로 인하여 부품의 기계적 성질을 보장할 수 없고, 단조 공정은 부품의 기계적 성질 면에서는 장점이 있지만 복잡한 형상의 부품을 성형할 때는 성형

\* 동의공업대학 컴퓨터응용설계과

\*\* 부산대학교 기계공학부

압력이 높아지고 절삭 등과 같은 후가공으로 인하여 경쟁력 있는 가격에 부품을 생산할 수 없다.

이와 같은 문제점을 해결하면서 기존의 부품 성형 공정의 장점을 이용하고 단점을 보완할 수 있는 새로운 성형 공정으로서 액상(liquid phase)과 고상(solid phase)이 공존하는 반용융 상태(semi-solid state)의 소재를 사용하여 부품을 성형하는 기술은 1970년대 초반에 MIT에서 개발되어 현재까지 매우 빠른 속도로 발전하였고, 특히 등을 통하여 기술에 대한 지적소유권을 확보하려는 노력이 가속화되고 있는 실정이며, 특히 자동차 부품 분야에서 지난 5년 동안에 유럽, 북미 그리고 아시아를 중심으로 하여 상업적으로도 가시적이고 급속한 진전을 이루었다<sup>(1-5)</sup>. 이러한 환경에서 반용융 제품의 성형 변수에 따른 제품의 성형성 및 미세조직과 기계적 특성을 정량적으로 확인하여 제품의 신뢰도를 향상시킬 필요가 대두되고 있다.

본 연구의 목적은 A356과 A357 재료를 이용하여 반용융 단조 공정을 적용하여 제조한 마스터 실린더 제품의 성형 변수 중에서 가압속도의 변화에 따른 제품의 성형성을 살펴보고, 성형된 상태에서 제품의 미세조직 특성과 기계적 성질을 조사하고자 한다.

## 2. 반용융 정형 단조품의 제조 실험

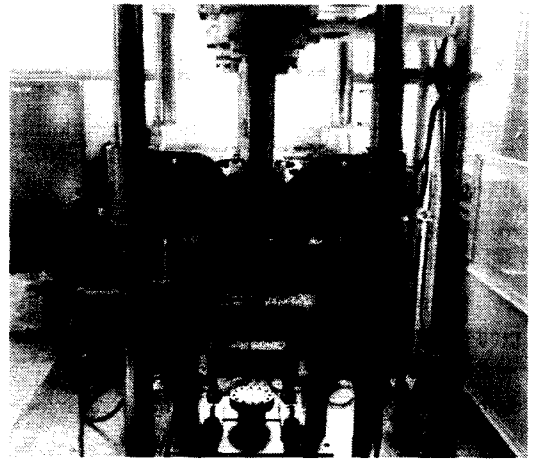
마스터 실린더 제조를 위하여 사용한 소재는 프랑스 Pechiney사에서 전자기 교반법으로 만든 A356과 A357이다. 소재의 화학 성분은 Table 1과 같다. 초기의 소재는 직경이 3 inch (76.2 mm)이고 길이가 3 m인데, 마스터 실린더의 체적과 비스킷(biscuit)의 체적을 고려하여 직경은 3 inch 그대로 별도의 가공을 하지 않고 사용하였으며, 길이는 80 mm로 절단하여 실린더형의 소재로 준비하였다.

Table 1 Chemical compositions of A356 and A357

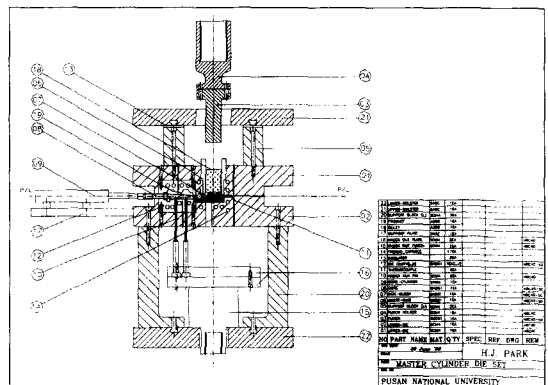
Element	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe	Ni	Ti
AA No.									
A356	rem	6.59	0.12	0.005	0.39	0.005	0.01	0.02	0.005
A357	rem	7.17	0.15	0.005	0.58	0.005	0.01	0.02	0.005

반용융 단조 공정으로 마스터 실린더를 제조하기 위하여 사용한 프레스는 복동식 고속 유압식 프레스이다. 프레스의 최대 개방 높이(open height)는 1500 mm 이고, 상부 볼스타(bolster)의 면적은 1200 mm × 800 mm 이며 하부 볼스타의 면적은 1080 mm × 800 mm 이다. 유압 탱크의 용량은 1000 리터이다. 그리고 프레스의 작동은 수동 제어와 컴퓨터 제어가 가능하고 작업 상태에 대한 데이터는 컴퓨터를 이용하여 분석이 가능하다.

마스터 실린더를 제조하기 위한 금형을 Fig. 1에 나타내었는데, 1개의 캐비티를 가진 1개 제조 금형(single impression die)이다.



(a) photograph of master cylinder die set



(b) assembly drawing of master cylinder die set

Fig. 1 Die set of master cylinder for semi-solid forging

금형의 재료로서 STD61을 사용하였고, 사용 경도는 HRC45-50 이 적당하다.

금형의 가열은 최대 용량이 15 kW인 콘트롤러를 사용하여 다이의 중심부의 열전대 리드선을 카트리지 히터 콘트롤러에 연결하여 250 ℃로 최대한 균일하게 가열하였다.

카트리지 히터의 사양은 직경이 19.2mm이고 길이가 270mm인 용량이 200 W인 것을 제작하여 사용하였는데, 설정온도인 250 ℃에 도달하는 시간은 약 1시간이다.

금형의 예열 온도를 측정하기 위하여 고온용 INCONEL  $\phi$  1.6 K 타입 열전대와 Anritsu사의 Am-7002 데이터 레코드를 사용하였다.

소재의 고상률은 55%로 설정하였는데 이것에 해당하는 온도는 578 ℃ 이다. 그리고 가압하중은 30 톤, 가압속도는 25 mm/sec, 50 mm/sec 그리고 200 mm/sec로 설정하여 실험하였다. 또한, 클램핑(clamping) 하중은 100 톤으로 설정하였고, 가압 유지 시간은 15초로 설정하였다.

자동차 브레이크 시스템의 마스터 실린더를 성형하기 위하여 상·하 금형을 닫고 코어실린더를 삽입한 상태에서 가열한 소재를 금형에 삽입한 후에 펀치를 하강시켜서 충전시킨다. 그리고 나서 일정시간 가압유지 시킨 후에, 펀치를 상승시키고 상부 금형을 상승시킨 후에, 코어실린더를 빼고 이젝터 핀을 작동시켜서 제품을 취출한다. 취출한 소재는 급랭시킨다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 가압속도의 변화에 따른 마스터 실린더의 성형성

반용융 단조를 이용한 마스터 실린더 제조 과정에서 가압속도를 25 mm/sec, 50 mm/sec 그리고 200 mm/sec로 변화시키면서 제품의 성형성을 관찰하였는데, 25 mm/sec와 50 mm/sec와 같은 낮은 속도에서는 제품의 충전이 제대로 이루어지지 않았고, 200 mm/sec에서는 완전히 충전됨을 알 수 있었다.

이와 같은 속도 변화에 따른 제품의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

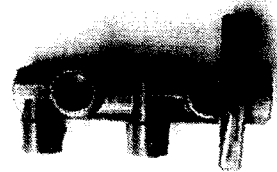
그리고 200 mm/sec에서 성형된 제품의 형상을 Fig. 3에 자세히 나타내었다.



(a) 25mm/sec in ram speed



(b) 50mm/sec in ram speed



(c) 200mm/sec in ram speed

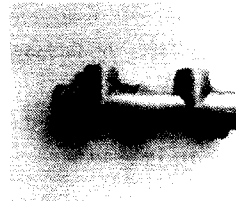
Fig. 2 Photograph of master cylinder's filling status according to variation of forging speed



(a) top view



(b) front view



(c) rear view



(d) side view

Fig. 3 Master cylinder product made by semi-solid forging

### 3.2 성형 하중 분석

금형의 예열 온도를 250 °C, 소재의 고상률을 55 %, 가압속도 200 mm/sec로 설정하고 마스터 실린더를 성형할 때의 시간에 대한 하중-변위 선도를 Fig. 4에 나타내었다.

시간이 약 25초 일 때까지는 하중이 걸리지 않고 있는데, 이 시간은 인서트 링에 펀치가 약 325 mm 정도 하강하여 삽입되어 있는 단계로서 펀치를 예열하기 위해서이다. 그리고 나서 소재를 삽입하기 위하여 펀치를 최상단까지 상승하게 되는데, 약 2.5초 정도가 걸리며 하중은 순간적으로 약 43 톤 정도 걸렸다. 그 후의 27초부터 33초까지의 시간은 소재를 유도가열로에서 인서트 링으로 삽입하기 위하여 이송하는 시간이다. 이때도 하중은 걸리지 않고, 펀치는 최상단에 그대로 유지된다. 33초에서 펀치가 하강하기 시작하여 약 1.5초만에 소재의 상단에 접촉해서 약 15초 동안 가압하여 성형을 한다. 이때의 성형 하중은 약 27 톤 정도이고, 가압 단계 동안에 계속 상승하여 약 48 톤까지 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

한편, 성형 하중은 반드시 클램핑 하중보다 작아야 상·하 분할 금형이 열리지 않은 상태에서 안전하게 성형할 수 있다.

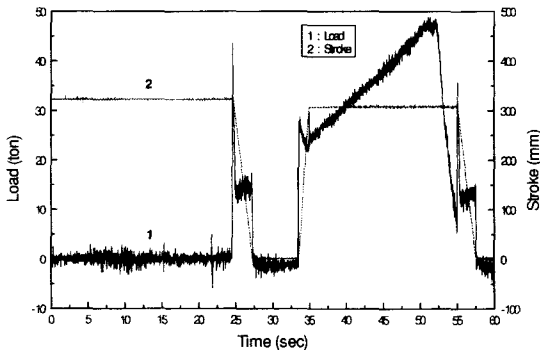


Fig. 4 Load and stroke as a function of time for forging master cylinder at 250°C preheating temperature of die

### 3.3 마스터 실린더 성형품의 미세조직

A356과 A357재료를 이용하여 만든 마스터 실린더를 각각 3축 방향으로 절단하여 미세조직과 경도를 확인하였다.

미세조직을 관찰하기 위해 광학 현미경을 사용하여 100배 확대해서 관찰하였고, 입자 크기

(grain size)는 Jeffries planimetric method<sup>(6)</sup>를 사용하여 구하였다. 그리고 경도 시험은 Buehler -Matsuzawa사의 MICROMET 2100 비이커스 경도기를 사용하였다.

#### 3.3.1 A356 소재의 마스터 실린더

길이 방향으로 수직인 단면을 Fig. 5의 (a)에 나타내었다. ① 영역에 대한 미세조직은 Fig. 5의 (b)와 같고 ② 영역은 Fig. 5의 (c), ③ 영역은 Fig. 5의 (d), ④ 영역은 Fig. 5의 (e) 그리고 ⑤ 영역은 Fig. 5의 (f)와 같다.

길이 방향으로 수평인 단면을 Fig. 6의 (a)에 나타내었다. ⑥ 영역에 대한 미세조직은 Fig. 6의 (b), ⑦ 영역은 Fig. 6의 (c) 그리고 ⑧ 영역은 Fig. 6의 (d)에 나타내었다.

수직인 단면을 Fig. 7의 (a)에 나타내었다. ⑨ 영역에 대한 미세조직은 Fig. 7의 (b), ⑩ 영역은 Fig. 7의 (c) 그리고 ⑪ 영역은 Fig. 7의 (d)에 나타내었다.

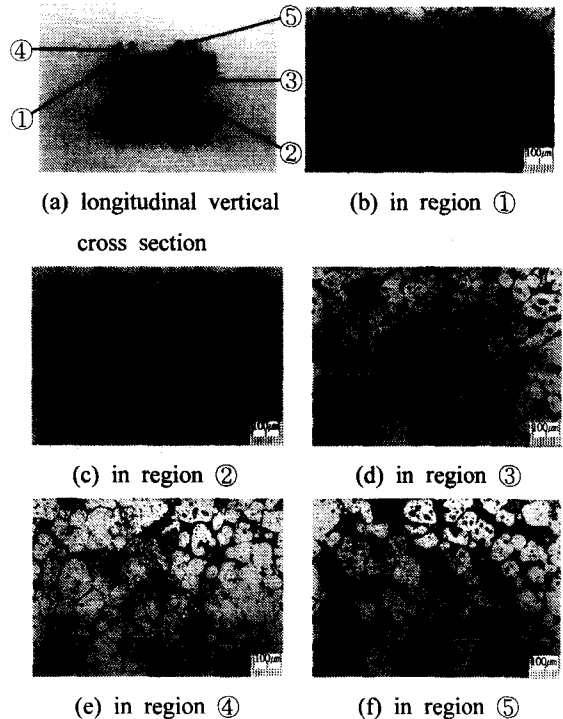


Fig. 5 Microstructure of longitudinal vertical cross section for master cylinder with A356 at indicated positions

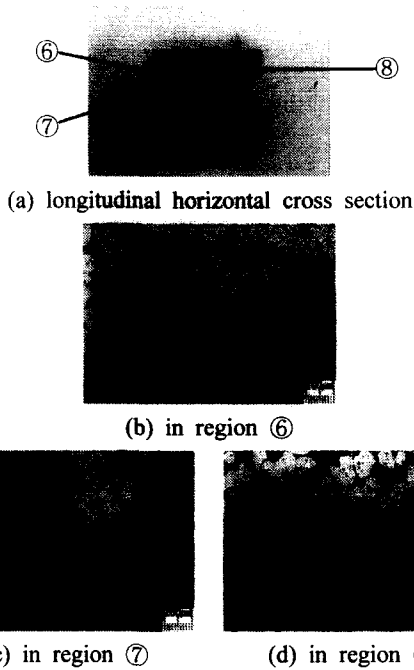


Fig. 6 Microstructure of longitudinal horizontal cross section for master cylinder with A356 at indicated positions

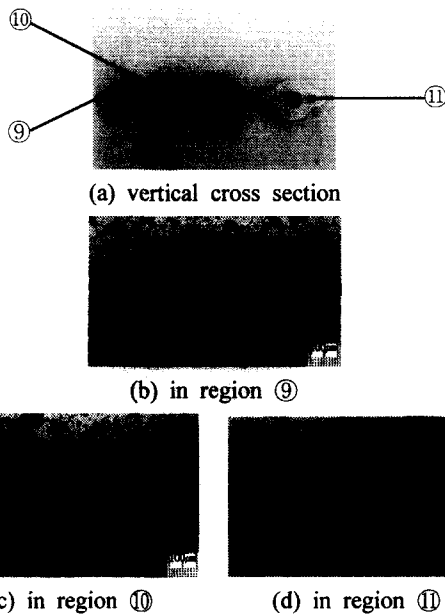


Fig. 7 Microstructure of vertical cross section for master cylinder with A356 at indicated positions

### 3.3.2 A357 소재의 마스터 실린더

길이 방향으로 수직인 단면을 Fig. 8의 (a)에 나타내었다. ① 영역에 대한 미세조직은 Fig. 8의 (b)와 같고 ② 영역은 Fig. 8의 (c), ③ 영역은 Fig. 8의 (d), ④ 영역은 Fig. 8의 (e) 그리고 ⑤ 영역은 Fig. 8의 (f)와 같다.

길이 방향으로 수평인 단면을 Fig. 9의 (a)에 나타내었다. ⑥ 영역에 대한 미세조직은 Fig. 9의 (b), ⑦ 영역은 Fig. 9의 (c) 그리고 ⑧ 영역은 Fig. 9의 (d)에 나타내었다.

수직인 단면을 Fig. 10의 (a)에 나타내었다. ⑨ 영역에 대한 미세조직은 Fig. 10의 (b), ⑩ 영역은 Fig. 10의 (c) 그리고 ⑪ 영역은 Fig. 10의 (d)에 나타내었다.

이상의 영역에 대한 입자 크기를 Table 2에 나타내었다. 그 결과, 게이트 부위에서부터 끝단까지의 조직이 비교적 균일하였으며, 입자도 초기 소재의 구상화 조직을 유지하면서 성형됨을 알 수 있다. 입자의 평균적인 크기는 대략 A356 소재를 사용한 경우에  $70.36 \mu\text{m}$  정도이고, A357 소재를 사용한 경우에  $64.01 \mu\text{m}$  정도로 성형되었다.

Table 2 Grain size of master cylinder ( $\mu\text{m}$ )

material	A356	A357
①	67.72	73.02
②	60.25	61.39
③	72.36	57.98
④	72.48	63.38
⑤	70.73	62.16
⑥	76.92	65.72
⑦	73.67	60.81
⑧	72.36	64.78
⑨	75.07	59.70
⑩	66.70	65.24
⑪	65.72	69.93

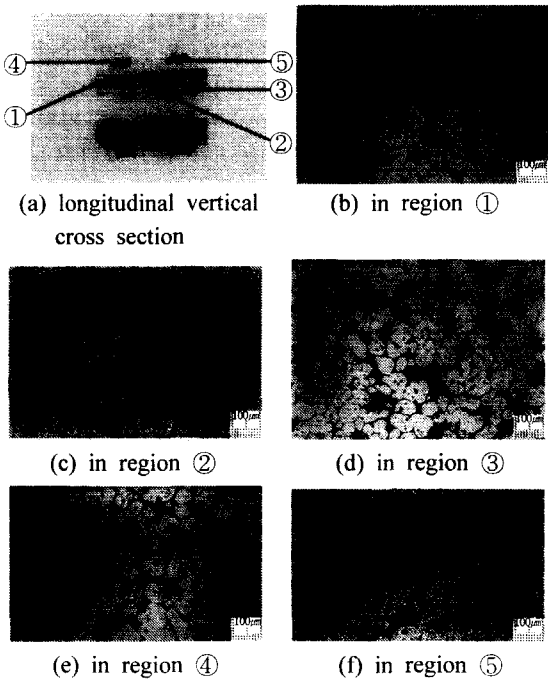


Fig. 8 Microstructure of longitudinal vertical cross section for master cylinder with A357 at indicated positions

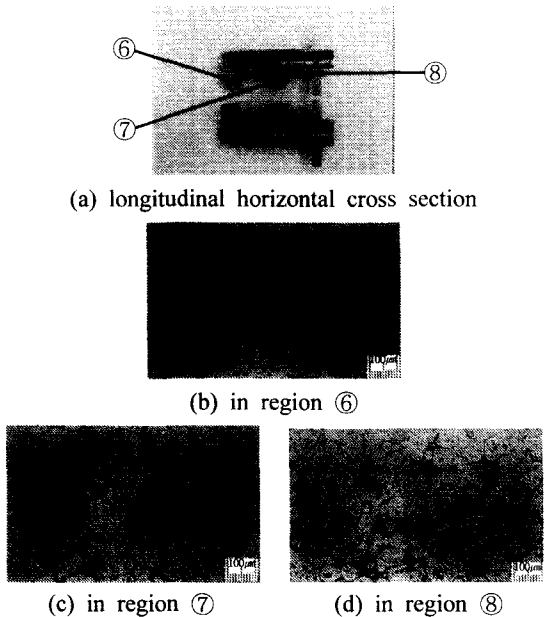


Fig. 9 Microstructure of longitudinal horizontal cross section for master cylinder with A357 at indicated positions

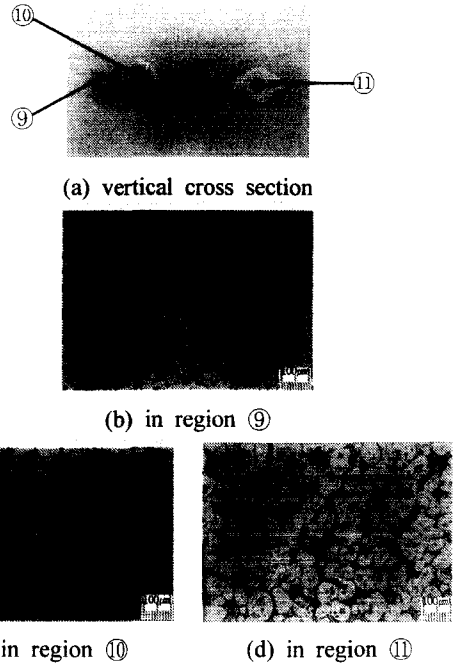


Fig. 10 Microstructure of vertical cross section for master cylinder with A357 at indicated positions

### 3.4 마스터 실린더 성형품의 기계적 성질

반응용 단조로 성형한 제품의 기계적 성질을 확인하기 위하여 경도 시험을 하였고, Table 3에 그 결과를 나타내었다.

Table 3 Hardness of master cylinder (VHS)

material	A356	A357
location ①	72.25	75.70
②	74.00	76.05
③	72.80	73.50
④	70.10	71.58
⑤	72.00	72.50
⑥	70.20	74.15
⑦	73.75	75.75
⑧	68.75	71.75
⑨	69.86	71.60
⑩	72.30	73.80
⑪	72.00	73.40

A357로 성형한 제품의 경도가 A356으로 성형한 제품보다 약 5% 정도 증가하였는데, 이것은 A357 재료의 마그네슘 성분이 A356 재료 보다 약 0.3% 더 많기 때문으로 생각된다.

그리고 열처리 효과에 의한 기계적 성질의 변화를 파악하기 위하여 A356의 경우에는 T6 열처리를 하였고, A357의 경우에는 T5 열처리를 하였다. A356제품은 열처리 후에 경도가 약 17.15% 정도 증가하였고, A357 제품은 약 30.75% 정도 증가하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 A356과 A357 재료를 이용하여 반응용 단조 공정을 적용한 마스터 실린더 성형품의 성형 변수에 따른 성형성 및 미세조직의 특성과 기계적 성질을 조사하였고, 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 가압속도가 느릴수록 액상의 유출에 의한 응고 현상이 심화되어 성형성은 저하되고, 빠르게 성형할 경우에는 충전이 잘 됨을 알 수 있고, 본 연구에서는 200 mm/sec의 속도일 때 제품이 성형되었다.
- (2) 반응용 단조에 의해서 성형된 마스터 실린더의 미세조직은 균일하고 입자도 구상화되어 있으며, 그 평균 크기는 A356 재료의 경우에는 70.36  $\mu\text{m}$ 이고 A357 재료의 경우에는 64.01  $\mu\text{m}$ 이다.
- (3) 반응용 단조에 의해서 성형된 마스터 실린더의 기계적 성질 중에서 경도는 비교적 균일하고 A357로 성형한 제품의 경도 값이 A356으로 성형한 제품보다 약 5% 정도 증가하였다.
- (4) A356 재료를 사용한 제품의 경우에 T6 열처리를 한 후의 경도가 열처리하기 전에 비하여 약 17.15% 정도 증가하였고, A357 재료를 사용한 제품의 경우에 T5 열처리를 한 후의 경도가 열처리하기 전에 비하여 약 30.75% 정도 증가하였다.

#### 후기

본 연구는 (주)경남금속과 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

1. Kyonka, C., "Status of Semi Solid Metalworking at Alumax," Proceedings of the 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 256-259, 1996.
2. Nicholas, N., Haws, W., Lane, L., Marder, J., "Semi-Solid Metal(SSM) formed small components of aluminum and aluminum-beryllium alloys," Proceedings of the 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 215-224, 1996.
3. Clauser, GL., Ravaoli, A., Ciselli, F., Vassallo, M., "Advancing the Frontier of Aluminium Technology: The Multilink Project," Proceedings of the 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 234-238, 1996.
4. Moschini, R., "Mass Production of Fuel Rails by Pressure Die Casting in the Semi-Liquid State," Proceedings of the 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 248-250, 1996.
5. Ward, PJ., Atkinson, HV., Kirkwood, DH., Starr, G., "Semi-Solid Processing of Copper Alloys for Electric Motor Components," Proceedings of the 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 269-273, 1996.
6. Vander. Veort., "Metallography Principle and Practice," McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 410-508, 1984.