

본 연구는 1995년도 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

난가공성 경량소재의 반응용 단조에 관한 기초 연구

최재찬*, 조해용**, 민규식***, 박형진****, 최종웅****

A Fundamental Study on Semi-Solid Forging with Light and Hardly Formable Materials

J.C.Choi*, H.Y.Cho**, G.S.Min***, H.J.Park**** and J.U.Choi****

ABSTRACT

For semi-solid forging with aluminium alloys, it is required to develop the globular grain structure. It was studied that cold upsetting ratio in SIMA process has effect on the globularization of grain structure. Globular microstructure was generated without cold upsettings for commercial aluminium alloys. In the case of Al2024, the range of grain size was 40~50µm. The grain growth in globular microstructure depend on heating time. Spur gear was forged in semi-solid state to investigate the forging condition for Al2024 with hydraulic press.

Key Words: Semi-Solid Forging(반용용 단조), Globularization(구상화), Microstructure(미세조직), Solid Fraction(고상률), SIMA process(시마 공정)

1. 서 론

자동차 산업의 비약적인 발전에 따른 부품 수요의 급증과 에너지 절감에 대응하기 위하여 경량 소재의 새로운 가공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다. 그러나 대부분의 경량의 소재는 난가공성이므로 부품의 제작이 어렵고 제조 비용이 증가한다. 이러한 난가공재의 부품 성형과 부품의 경량화 등을 위한 성형 공정에 있어서 원소재로부터 직접 최종 형상에 가장 가까운 부품(near-net shape)을 성형하기 위한 방법으로 반응용 상태(semi-solid state)에서의 가공법에 대한 연구가 진행

중에 있다. 반응용 상태의 가공이란 구상화된 입자를 갖는 소재를 고상 및 액상 성분이 공존하는 상태로 가열한 후 이를 직접 성형하여 최종 제품에 가깝게 제조하는 공정으로, 이 가공법은 에너지 절약, 응용 범위의 확대 및 공정 단축 등의 여러가지 측면에서 많은 관심이 집중되고 있으며^(1,2), 최근 선진 외국에서는 다음과 같은 잇점 때문에 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽³⁻⁶⁾

- 결정립이 미세한 조직을 얻을 수 있고, 다이캐스트나 주조법에 비하여 기계적 성질이 향상된다. 따라서 가벼운 부품 및 두께가 얇은 제품의 제조가 가능하다.
- 흠집이나 이물질의 개재가 없고, 단조시 편석이 없는

* 부산대학교 기계설계공학과
 ** 충북대학교 정밀기계공학과
 *** 마산전문대학 자동차과
 **** 부산대학교 대학원 기계설계공학과

제품을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 다이 내에서 층류 유동을 하므로 결함과 기공이 없는 성형품을 얻을 수 있다.

- 복잡한 형상이라도 균질의 입상 조직을 얻을 수 있고 편석이 저감되므로 기계가공의 공정이 대폭적으로 감소되어 에너지절약 및 재료의 손실방지에 기여한다.
- 반응용 금속의 온도는 금속용탕에 비해 낮기 때문에 생산주기가 단축되고 금형 및 공구에 가해지는 열적 부하가 적어서 금형 및 공구의 수명이 길어진다.
- 피가공재의 변형 저항이 작기 때문에 작은 하중으로도 작업이 가능하므로 가공 기계 설비의 소형화가 가능하다.
- 반응용 상태에서 제품이 단공정으로 생산되므로 기존의 소성 가공 공정수보다 가공공정을 단축시킬 수 있다.
- 정밀제어 및 자동화로 재현성이 좋다.
- 금속용탕을 취급하지 않으므로 작업환경의 안정성 및 청결성을 확보할 수 있다.

이러한 장점을 지닌 가공 방법을 활용하기 위해서는 구상화 조직을 갖는 빌렛을 제조하여야 한다. 구상화 조직의 빌렛 제조 방법⁽³⁾으로는 소재를 반응용 상태의 온도로 가열하여 수지상(dendrite) 조직으로 만든 후 교반하여 구상화 조직을 갖도록 하는 리오캐스팅(rheocasting)에 의한 방법과, 합금 소재를 냉간변형을 행한 후 반응용 상태의 온도로 가열 시킴으로써 구상화 조직을 얻는 SIMA 공정(strain induced melt activated process)⁽⁷⁾이 있다. 현재 대부분의 경우 전자의 방법에 의하지만, 이 방법은 특수한 장비를 필요로 하므로 제품의 제조비용이 증대된다. 반면에 후자는 입자의 크기가 다소 크지만, 교반을 시키기 위한 특별한 장치가 필요 없으므로 제조 비용이 저렴해 진다는 장점이 있다. 또한 반응용 단조에서 고상률, 가압력, 가압속도, 가압시간, 다이온도 등은 제조된 제품의 기계적 성질에 영향을 미친다. 따라서 실험을 통하여 이들 공정변수들을 변화시켜서 제조되는 제품의 조직 및 기계적 성질을 조사하여 가장 양호한 제품을 제조할 수 있는 공정변수를 설정하여야 하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 리오캐스팅에 의한 방법을 사용하지 않고 SIMA 공정을 이용하여 시판되고 있는 고력 알루미늄 합금계로 성형성이 가장 불리한 Al-20계열의 합금과 다른 알루미늄 합금들의 구상화 조직을 얻는 방법을 확립하고자 하였다.

구상화 조직을 만들기 위해서는 냉간상태에서 적절한

변형을 가한 후 적당한 온도로 가열하여 일정시간동안 유지시켜야 한다. 따라서 냉간변형률, 가열온도, 유지시간 등을 공정변수로 하여 열처리한 후 현미경 조직을 검사하여 최적의 구상화 조건을 찾고자 하였다.

2. 실험 방법

소재가 반응용 상태로 되기 위해서는 균일한 온도로 가열하여야 한다. 따라서 소재의 가열시간에 따른 온도의 변화를 측정 한 후 고상률에 따른 설정 온도의 도달시간을 측정하였다. SIMA 공정에서 구상화에 필요한 변형률의 효과를 조사하기 위하여 높이 변형률을 0%(무변형), 5%, 10%, 15%, 20%까지 냉간 압축하였다. 변형된 소재를 반응용 상태의 온도로 가열한 후 급냉하여 조직을 검사한다. 이 때 가열 온도 및 유지시간을 변경시키면서 적절한 조직을 얻을 수 있는 가장 유리한 조건을 찾고자 하였다.

가열온도를 결정하기 위하여 소재의 고상률을 Scheil의 방정식을 이용해서^(8,9) 계산하고, 평형상태도로부터 각 알루미늄 합금의 온도에 따른 고상률의 관계를 구하였다⁽¹⁰⁾.

구상화시킨 소재의 냉간가공의 가능성을 확인하기 위하여, 구상화를 위한 최적의 조건으로 가열한 후 급냉한 소재를 이용하여 인장 및 압축 실험을 통하여 응력-변형률 선도를 구하는 기초실험을 행하였다.

본 실험에서 사용한 소재는 알루미늄 합금으로 Al2024, Al2218, Al6061 및 Al7075 등과, 수입한 구상화 소재인 A356 및 A357 MHD(magneto-hydro dynamic) 빌렛을 사용하였으며, 그 화학적 성분은 Table 1과 같다. 반응용 상태로 가열하기 위한 가열로는 220V, 15kW의 용량을 갖는 전기로(Siliconit muffle furnace)를 사용하였으며, 반응용 상태의 일정온도 제어시 전류는 20A로 일정하였다.

Table 1 Chemical compositions of various Al-alloys(wt%)

Comp. AA No.	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe	Ni	Others
2024	rem	0.30	4.40	0.72	1.51	0.02	0.14	0.02	0.09Cr
2218	rem	0.30	3.54	0.05	1.30	0.03	0.10	1.73	0.01Cr
6061	rem	0.6	0.28	-	1.0	-	-	-	0.20Cr
7075	rem	-	1.6	-	2.5	5.6	-	-	0.23Cr
A356	rem	6.59	0.12	0.005	0.39	0.005	0.01	0.02	0.005Ti
A357	rem	7.17	0.15	0.005	0.58	0.005	0.01	0.02	0.005Ti

그리고, 본 실험으로 얻은 Al2024 합금의 구상화 소재를 이용하여, 성형성이 양호한 제품을 얻을 수 있는지의 여부를 찾기 위하여 용량 10톤, 램 속도 30mm/sec인 유압 프레스를 사용하여 스퍼어 기어의 단조실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소재의 가열

알루미늄 합금을 반응용 상태의 목표온도로 가열하기 위하여 Al2024 시편의 중심 부분과 표면 부분에 열전대를 이용하여 온도변화를 측정 한 결과, 전기로의 온도가 고상률 70%의 온도(622℃)로 유지되었을 때 20°×20° 시편을 넣어 그 온도에 도달하는 데 걸리는 시간은 20분이 소요되었고 이 때 구상화 된 조직이 잘 나타났으며, 20분 가열 후의 시편 온도는 거의 일정하였다.

구상화 실험 및 온도 측정 결과에 의하면 적절한 구상화 조직을 얻기 위하여서는 중심부의 온도가 목표 온도에 도달하여야 함을 알 수 있다. 따라서 중심부의 온도가 목표치에 도달하기 위한 가열 시간을 먼저 측정 하여야 한다. 같은 크기의 시편에 대하여서는 같은 시간 만큼 가열하면 원하는 구상화 조직을 얻을 수 있다.

3.2 고상률과 온도

평형상태로부터 구한 고상률 선도를 Fig.1에 나타내었다. 특정 고상률에 따른 온도 값은 20-계열의 알루미늄 합금의 경우 기존의 실험 논문^(9,11)에서의 온도와 잘 일치하고 있다. 또한 평형상태로부터 구한 A356 그래프의 온도는 G. Hirt 등⁽¹⁰⁾이 인용한 A356E의 온도와 약 4℃의 차이로 거의 유사함을 알 수 있다. 그리고 A356의 고상률에 있어서는 평형상태에서의 공정온도(eutectic temperature)가 577℃로 그 이하에서는 고상-액상 공존영역이 존재하지 않으므로 제어 가능한 최대 고상률은 52%로 계산되었다. G. Hirt 등에 의하면 실험으로 제어 가능한 고상률의 최대값은 60% 이었다.

그림에서 보면 Al6061 및 Al7075의 경우 고상률 50%~80% 구간에서 그래프의 구배가 크게 나타났으며, 이는 고상-액상의 공존 영역(freezing zone)이 협소하여 생기는 결과로 생각된다. 본 실험에서도 이러한 재료는 특정 온도의 제어가 곤란하여 구상화 조직을 얻기가 어려웠다. 이것은 고상-액상의 공존 영역이 40℃ 이상 되어야 제어가 용이하다는 기존 결과⁽¹²⁾에 일치함을 알 수 있다.

이들 Al6061 및 Al7075의 고상-액상 공존 영역은 평형상태도로부터 각각 12℃ 및 14℃ 이었다.

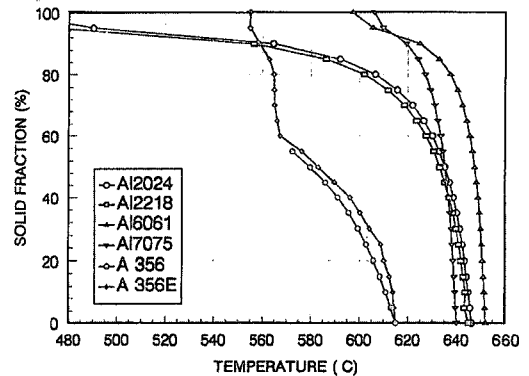


Fig. 1 Solid fraction as a function of temperature for various alloys

3.3 빌렛의 제조

냉간 변형이 입자가 구상화에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 시판되고 있는 열간 압출된 알루미늄 합금 환봉(30°)을 직경이 20°이고 높이를 20mm로 가공하여 냉간 압축 하였다. 이들 시편을 반응용 상태의 온도로 가열한 후 급냉하여 광학 현미경으로 조직을 관찰하였다.

Fig.2는 Al2024의 0%와 10%의 높이변형을 가한 소재를 고상률 70%의 온도로 가열한 후 급냉하여 구상화 조직의 변화를 관찰하기 위한 사진으로, 냉간 업셋팅은 구상화 여부와 무관함을 알 수 있다. 또한 냉간 업셋팅량이 10%일 때의 평균 입자의 크기는 0%일 때의 45μm에서 35μm의 크기로 약간 작아졌다.

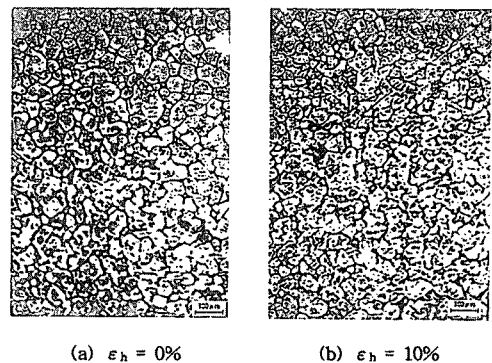


Fig. 2 Microstructures of Al2024 alloy with relation to the cold upsettings at 70% solid fraction

Fig.3은 Al2218의 냉간 업셋팅의 높이 변형률을 0%, 5%, 10%, 15% 및 20%로 가한 소재를 동일한 가열 시간 동안 유지시켰을 때 구상화 조직의 변화를 나타낸 것으로 앞의 결과와 마찬가지로 냉간 변형과 구상화 여부와는 관계가 없으며, 평균 입자의 크기는 높이 변형률이 0% 및 5%일 때는 150 μ m 정도이고, 10% 및 15%일 때는 100 μ m, 20%일 때는 80 μ m의 크기로 감소하였다. 따라서, 시판되고 있는 알루미늄 합금 봉재를 구입하여 그 상태대로 반응용 상태의 온도로 가열하면 구상화 조직을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 이 사진에서는 유지시간이 1시간으로 과다하여 조직내에 검게 보이는 entrapped liquid 양이 많아 보이며, 이는 입자의 성장 또는 입자간의 결합에 의한 것으로 짧은 유지시간의 경우에는 entrapped liquid 양이 감소하였다.

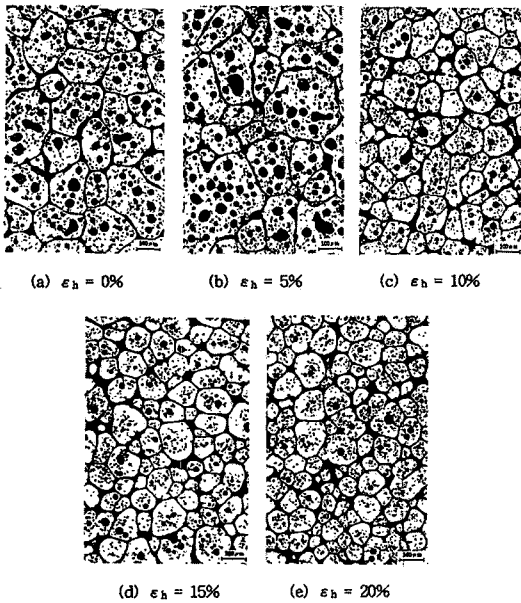


Fig. 3 Microstructures of Al2218 alloy with relation to the several cold upsettings

Fig.4는 냉간가공 하지 않은 Al2024 소재의 가열 유지 시간의 영향을 파악하기 위한 것으로 앞서의 설명과 같이 소재 중심부의 온도가 반응용 상태의 온도로 도달해야 구상화 조직을 얻을 수 있다. 즉, 고상률 70%의 온도(622 $^{\circ}$ C)로 가열 할 때 15분 경과시의 사진에서는 구상화 조직이 보이지 않으며, 20분이 경과해야 소재 중심부의 온도가 반응용 상태의 온도로 도달하면서 구상화 조직으로 됨

을 알 수 있다. 이 때 평균 입자의 크기는 40 μ m이고, 25분 경과시에는 65 μ m, 30분이 경과하면 80 μ m로 증가하였다. 이렇게 입자 크기가 증가한 것은 가열 시간의 증가로 인한 입자 성장의 효과 때문으로 생각된다.

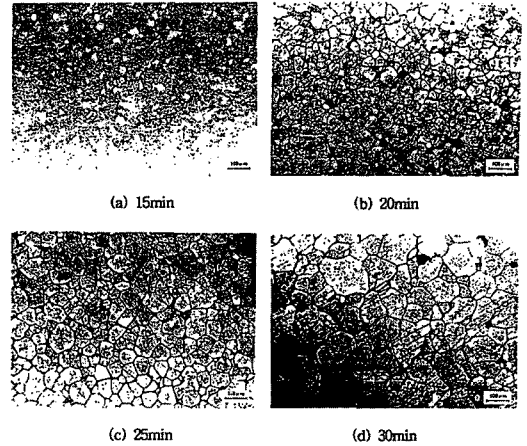


Fig. 4 Microstructures of Al2024 alloy with relation to the heating times at 70% solid fraction

Fig.5는 냉간가공 하지 않은 알루미늄 합금 Al2024, Al2218, Al6061, Al7075 등을 최적으로 구상화 시킨 조직 사진을 나열한 것이다. 이 사진에서 Al6061 및 Al7075 소재의 경우 고상-액상 공존 영역이 각각 12 $^{\circ}$ C 및 14 $^{\circ}$ C로 너무 좁아서 온도제어가 곤란하였으며 구상화 조직 또한 얻기가 어려웠다.

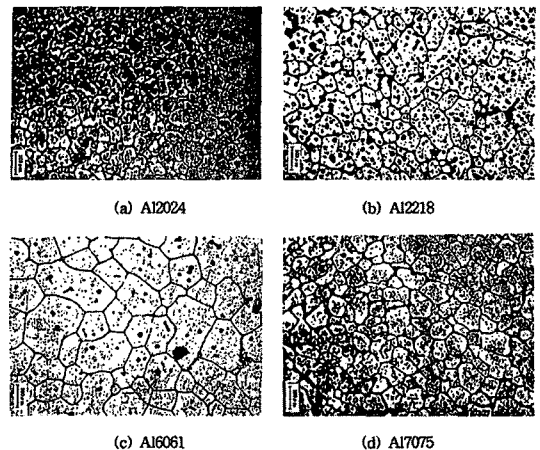


Fig. 5 Globular microstructures of various aluminium alloys

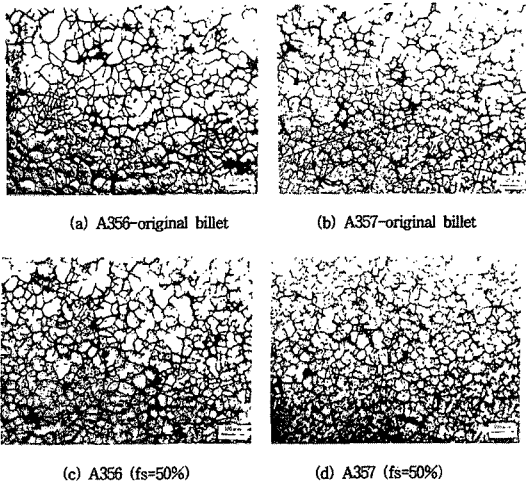


Fig. 6 Globular microstructures of A356 and A357 MHD billet

Fig. 6은 A356 및 A357 소재의 MHD 빌렛의 조직과, 이 소재를 고상률 50%의 온도로 가열하였다가 급냉한 조직을 나타내고 있다. 가열 후 급냉한 것은 입자의 경계가 약간 불분명하고 입자의 크기에는 변함이 없었다. 이들 A356 및 A357의 두가지 소재의 경우 평균 입자크기는 35 μ m로 동일하였다.

3.4 냉간에서의 기계적 성질

Fig. 7은 구상화 한 시편과 원소재 시편을 냉간 압축시험한 결과로, 구상화시킨 Al2218이 가장 작은 유동응력값을 나타내었으며, Al2024의 경우 구상화시킨 소재의 유동응력 값은 원소재보다 약 60% 작게 나타났다. 또한

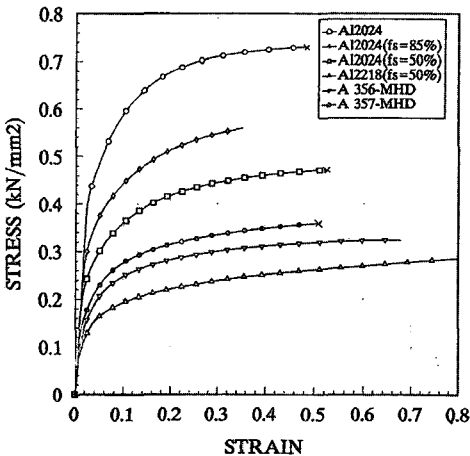


Fig. 7 Stress-strain curves for aluminium alloys with compression test

구상화 소재인 A356의 경우 67.8%까지 압축 변형이 가능하며 냉간 성형성이 우수할 것으로 생각된다. 따라서 이들 합금들은 반응용 단조 후 치수의 정밀도를 기계가공이 아닌 냉간 코이닝에 의해서도 높일 수 있음을 알 수 있다.

3.5 기어 단조의 성형성

Fig. 8은 스피어 기어를 성형한 제품 사진으로, 단조시의 공정변수인 다이 예열의 유무, 성형가압 후 유지시간, 윤활제의 영향 등을 변화시켜 단조한 것이다. 이 그림에서 (1)은 다이 예열을 하지않고 가압 유지시간도 없는 상태로써 매우 불량한 제품이 성형되었다. (2)는 다이 예열을 하지 않고 가압하여 10초 유지한 것으로 역시 제품의 성형이 불량하였다. (3)은 다이를 400 $^{\circ}$ C로 예열하고 가압 유지시간이 없는 상태로써 모서리 부분이 완전히 채워지지 않았으며, (4)는 다이를 400 $^{\circ}$ C로 예열하고 가압하여 10초 유지한 것으로 가장 양호한 제품이 성형되었다. 그리고 (5)는 (4)와 같은 조건으로 성형하면서 그래파이트(graphite) 윤활제를 도포한 것으로, 성형 제품의 표면에 윤활제가 침투하여 표면에 흠이 생겼을 뿐만 아니라 이 때의 조직을 관찰해 보면 치면의 끝부분에 윤활제가 남아 있음을 확인할 수 있었다.

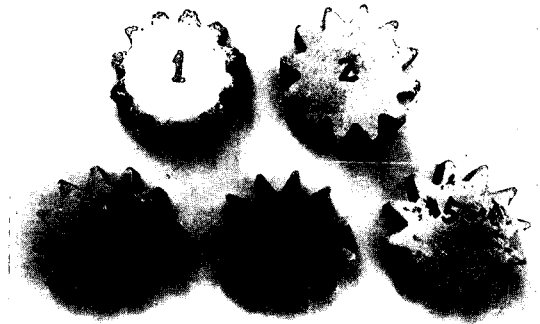


Fig. 8 The products of semi-solid forging with Al2024 alloy
 (1) no-preheat die, no-holding time
 (2) no-preheat die, 10 sec-holding time
 (3) 400 $^{\circ}$ C-preheat die, no-holding time
 (4) 400 $^{\circ}$ C-preheat die, 10 sec-holding time
 (5) 400 $^{\circ}$ C-preheat die, 10 sec-holding time, graphite coating

Fig. 9는 반응용단조한 스피어 기어 제품의 각 위치별 조직사진으로, 성형 제품의 내부에는 구상화 조직이 그대로 유지되어 있으나, 치면 경계 부분의 입자는 소재의 유동방향으로 늘어져 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

알루미늄 합금 재료를 이용한 반응용 단조를 행하기 위하여 구상화 조직을 갖는 빌렛의 제조 방법에 대한 연구와 이 빌렛을 이용한 반응용 단조실험한 결론은 다음과 같다.

- (1) 알루미늄 합금의 평형상태로부터 구한 고상률에 대한 온도는, 주로 사용하는 고상률 영역 50~80%의 구간에서, M. Kiuchi 등의 실험 결과와 잘 일치하였다. 그리고 Al6061 및 Al7075의 경우 고상-액상 공존영역(freezing zone)이 40℃ 이하의 범위로 이 경우 반응용 상태의 온도제어가 곤란하다는 기존의 이론을 확인하였다.
- (2) 시판되고 있는 알루미늄 합금의 조직을 구상화 시키는 데 있어서, 교반 또는 냉간변형을 가하지 않고도 반응용 상태로 가열 후 급냉하여 구상화 조직을 얻을 수 있었으며, Al2024의 경우 평균 입자의 크기는 40~50μm로 A356의 MHD 빌렛의 35μm와 거의 비슷하였다.
- (3) 구상화 조직을 만들기 위한 설정온도 도달 후 유지시간이 길수록 입자가 커지는 경향이 있었다. 따라서 적절한 구상화 조직을 얻기 위해서는 온도제어 및 유지시간의 정밀한 제어를 필요로 하였다.
- (4) 구상화 된 시편과 원소재 시편을 냉간 압축시험한 결과, 구상화 된 Al2218이 유동응력값이 가장 낮고 80%까지 압축변형이 가능하였으며, 구상화 소재인 A356도 67.8%까지 압축변형이 가능하여 냉간 성형성이 우수하였다. 따라서 이들 합금들은 반응용 단조 후 치수의 정밀도를 기계가공이 아닌 냉간 코이닝에 의하여서도 높일 수 있음을 알 수 있다.
- (5) 구상화 소재를 사용한 스퍼어 기어 단조시에는 다이를 예열해야 유동성이 좋아지며, 또한 성형후 가압하여 일정시간 유지시켜야 양호한 제품으로 성형할 수 있다.

참 고 문 헌

1. K.P.Young, "Semi-solid Metal Forming Alloys and Composites", Nature and Properties of Semi-Solid Materials, Proceedings of a Symposium by the TMS Solidification Committee of the Material Design and Manufacturing

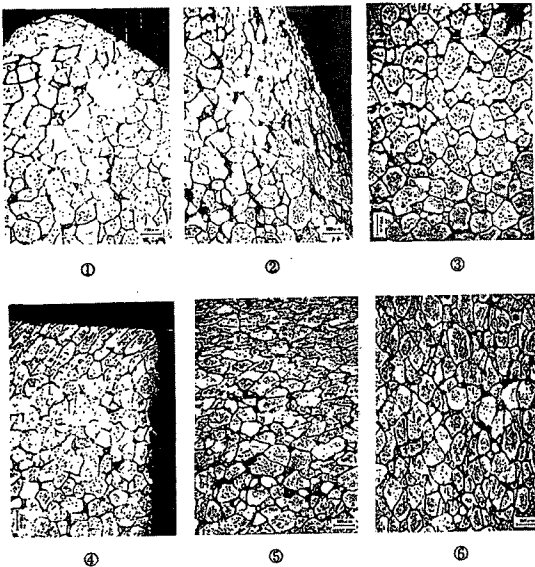
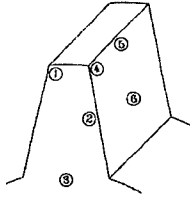


Fig. 9 The position of photo and microstructures for semi-solid forged spur gear with Al2024 alloy

Fig.10은 구상화된 A356 소재(MHD billet)를 냉간 업셋팅 하였을 때 반경방향과 길이방향의 조직으로, 반경 방향의 입자는 거의 변화가 없었으나, 길이방향의 입자구조는 미세하게 되어 늘어서 있음을 알 수 있다. 이와 같은 변형 양상을 이용하면 냉간 성형에 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 즉, 반응용 단조 후 치수의 정밀도를 냉간 코이닝에 의해서 높일 수 있음을 이것으로도 확인할 수 있다.

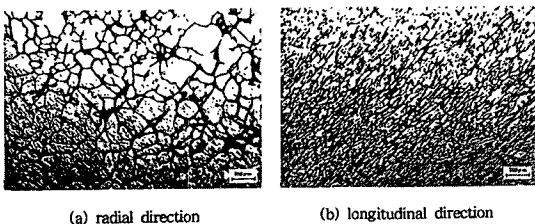


Fig. 10 Microstructures of A356 MHD billet after 68%-cold upsetted

- Division, pp.245-266, 1992.
2. M.C.Flemings, "Behavior of Metal Alloy in the Semisolid State", Metallurgical Transaction, 27A, pp.957-981, 1991.
 3. M.P.Kenny, J.A.Courtois, R.D.Evans, G.M.Farrior, C.P.Kyonka, A.A.Couch, K.P.Young, "Semisolid Metal Casting and Forming", Metal Handbook, 9th Ed., Vol. 15, pp.327-338, 1988.
 4. P.O.Charaeyron, M.C.Flemings, "Rheology of Semi- solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates", Application to Forming Process, International Journal of Mechanical Science, Vol. 27, pp.781-791, 1985
 5. 吉田千里, "金屬の半凝固加工プロセスとその最近の進歩", 素形材, pp7-13, 1994.
 6. T.Z.Kattamis, T.J.Piccone, "Rheological Behavior of a Semi-Solid Al-Cu-Mg Alloy", Nature and Properties of Semi-Solid Materials, Publication of TMS, pp. 69-89, 1992
 7. K.P.Young, C.P.Kyonka, J.A.Courtois, U.S.Patent 4,415,374, 1983 .
 8. M.C.Flemings, "Solidification Processing". McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 31-36, 1974.
 9. 木内學, 杉山澄雄, "半熔融・半凝固金屬の固相率の測定法-1", 第42回 塑性加工聯合講演會, 日本塑性加工學會, pp.647-650, 1991.
 10. G.Hirt, R.Cremer, A.Winkelmann, T.Witulski, M.Zillgen, "Semi-Solid Forming of Aluminum Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion", Journal of Materials Processing Technology 45, pp359-364, 1994.
 11. C.Yoshida, M.Moritaka, S.Shinya, S.Yahata, K.Takebayashi, A.Nanba, "Semi-Solid Forging Aluminum Alloy", 2nd Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, MIT, pp.95-102, 1992.
 12. P.Kapranos, D.H. Kirwood, C.M. Sellars, "Semi-Solid Processing of Aluminium and High Melting Point Alloys", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol.207, Part B : Journal of Engineering Manufacture, 1993.