

주조된 AI 합금의 기계적 성질에 미치는 HIP 의 영향

양훈철* · 최재윤* · 김기태†

(2001년 5월 17일 접수, 2001년 12월 31일 심사완료)

The Effect of Hot Isostatic Pressing on Mechanical Properties of Cast Aluminum Alloy

Hoon Chul Yang, Jae Yoon Choi and Ki Tae Kim

Key Words : Aluminum Alloy(알루미늄 합금), Sand Casting(사형주조), Die Casting(다이캐스팅), Hot Isostatic Pressing(열간 등가압 소결), Micropores(미세기공)

Abstract

The present paper investigates the effect of hot isostatic pressing (HIPing) on mechanical properties, e.g., tensile strength, ductility and impact absorption energy of sand and die casted aluminum alloys. After HIPing at various temperatures and pressure conditions, uniaxial tensile test and Izod impact test of the samples were carried out. The experimental results showed improvements in uniaxial tensile strength, elongation and Izod impact toughness of sand casted aluminum alloy, while deterioration of a tensile strength for die casted aluminum alloy. The effect of HIPing for microstructure of the cast aluminum alloy was also investigated.

1. 서론

주조에 의한 금속 기계부품에는 용융된 금속의 응고시 내부 수축에 의한 기공 등의 결함을 발생 시킨다.^(1,2) 이러한 주조결함은 제품의 기계적 성질을 크게 악화시키며 이를 제거하기 위한 고가의 후처리 공정이 요구된다. 특히, 사형주조에 의한 방식은 가압 하에서 응고되는 다이캐스팅보다 미세기공(Micropores) 등의 주조결함을 다량 함유하기 때문에⁽³⁾ 이러한 부품의 결함을 보완할 수 있는 새로운 공정개발이 연구되어야 한다.

열간 등가압 소결은 주물에서 결함으로 작용하는 기공을 불활성 가스의 등가압에 의해 형상의 변화를 최소화 하면서 기공의 치밀화가 가능한 공정이다.⁽⁴⁾ 현재 일부 항공 및 해양용 주조 부품의 내부결함 제거를 위한 후처리 공정으로 사용되고 있으며 이러한 공정에 의한 제품은 열간 등가압

소결을 하지 않는 것보다 기계적 성질이 우수하다고 알려져 있다.^(4,5) 특히, 열간 등가압 소결은 주조 제품의 연성 및 강도를 동시에 증가시킬 수 있어 높은 파괴인성을 요구하는 경우에는 꼭 필요한 공정이라고 할 수 있다.⁽⁶⁾

1950년대 중반에 분말 야금에 의한 열간 등가압 소결 공정이 개발된 이후로 지난 수십년 동안 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.⁽⁷⁾ 그러나 대부분의 연구는 분말의 치밀화에 의한 부품 개발 및 공정 연구⁽⁸⁻¹⁰⁾에 치중되고 있어서 주조 제품의 열간 등가압 소결에 대한 연구는 그 경우를 쉽게 찾을 수 없다. 또한 국내의 경우는 이러한 연구 결과가 거의 없는 상태이기에 앞으로 국내 주조 제품이 품질 향상을 위해서는 열간 등가압 소결에 의한 주조 제품의 성능 향상 연구는 시급한 사항이라 하겠다. 특히 제품의 기계적 성질은 제품의 성능을 좌우하는 가장 기본적이고 중요한 부분이기 때문에 이에 대한 연구가 선행되어야 한다.

Chamma^(11,12)는 열간 등가압 소결에 의한 Al-Si 주물의 미세기공의 제거 방법에 대해 연구하였다. 그는 열간 등가압 소결 전후의 밀도, 기공의 크기

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : korean@postech.edu
TEL : (054)279-2164 FAX : (054)279-5899

및 기계적 강도 등의 변화를 간단하게 조사하였으며 열간 등가압 소결 후 AI 주물의 밀도, 강도증가 등의 결과를 나타냈다. 또한, Fletcher 등⁽¹³⁾과 Panasyuk 등⁽¹⁴⁾은 각각 70%Cu-30% Ni 주조 합금과 KKhN25 합금의 열간 등가압 소결에 대한 기계적 특성 및 미세조직의 변화를 조사하였다. 그러나 이들 연구에서는 열간 등가압 소결시 다양한 온도 및 압력에 대한 영향 등의 조사에는 미흡한 점이 있다.

본 연구에서는 현재 많이 사용되고 있는 내식용 재료인 주조된 6061 AI 합금의 기계적 강도에 미치는 열간 등가압 소결에 대한 영향을 조사하였다. 미세기공의 양과 주조 방식에 대한 영향을 고려하기 위해 사형주조 및 다이캐스팅에 의해 시편을 제조하였다. 제조된 시편은 다양한 온도와 압력 하에서 열간 등가압 소결을 하고 상온 인장 및 충격시험을 수행하여 열간 등가압 소결전의 인장강도 및 충격흡수에너지와 비교 검토하였다. 또한 재료내의 미세조직과 파단면을 광학 및 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하여 미세조직 및 파괴 변형기구 등을 조사하였다.

2. 실험

본 논문에서 사용된 재료는 6061 AI 합금으로서 주조공정 및 열간 등가압 소결 조건에 따른 합금 성분의 변화를 조사하기 위해 사형주조와 다이캐스팅으로 제조된 시편을 따로 구분하여 성분 분석을 수행하였다. Table 1 은 실험에 사용된 사형주조 및 다이캐스팅된 시편의 화학적 조성을 나타낸

다. Table 1 의 결과로부터 주조된 AI 합금의 열간 등가압 소결은 시편의 합금 성분에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

2.1 시편의 제조

2.1.1 사형주조 및 다이캐스팅

열간 등가압 소결 및 인장시험에 사용하기 위한 시편은 태광금속(주)에서 사형주조 및 다이캐스팅 방법으로 제조하여 사용하였다. 시편의 초기 크기는 높이 160 mm, 직경 24 mm 이며 사형 및 금형에 용융금속을 주입한 후 공냉에 의해 응고시켜 시편을 제조하였다.

2.1.2 열간 등가압 소결

사형주조 및 다이캐스팅으로 제조한 AI 합금을 유지온도 450℃에서 60 MPa, 520℃에서 60 MPa 및 100 MPa 로 각각 압력과 온도를 달리 하면서 열간 등가압 소결을 수행하였다. 실험에 사용된 열간 등가압 성형기(System 30T, Kobelco, Japan)는 온도 및 압력을 프로그램하여 자동으로 제어할 수 있다. 실험 스케줄은 HIP 챔버의 내부압력이 7.9 MPa 가 된 이후부터 10℃/min 의 승온속도로 가열하였으며, 내부 압력은 온도의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 온도와 압력이 실험조건에 도달한 후에는 최소 1 시간에서 최대 4 시간까지 유지하였다. Fig. 1 은 열간 등가압 소결을 위한 실험 스케줄을 나타낸다. 열간 등가압 소결 실험이 끝난 시편은 기계가공을 통하여 ASTM E8 규격의 인장 시편과 E23 의 충격시편으로 가공한 후 230℃의 온도와 아르곤 분위기에서 2 시간 동안 어닐링(Recovery Annealing) 하였다.^(15,16) Fig. 2 는 사용된

Table 1 Chemical composition of sand and die casted aluminum alloys

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V
Range, wt%	0.4 ~ 0.8	≤ 0.7	0.15 ~ 0.4	≤ 0.15	0.8 ~ 1.2	0.04 ~ 0.35	≤ 0.25	≤ 0.15	0.001~0.01
As-received (Sand Casting)	0.58	0.19	0.26	0.0056	1.07	0.0033	0.013	0.013	0.0022
As-received (Die Casting)	0.50	0.14	0.24	0.015	0.90	0.13	0.034	0.015	0.0075
HIPed at 520℃, 100 MPa with 4h holding (Sand Casting)	0.60	0.19	0.26	0.0056	1.09	0.0029	0.013	0.013	0.0022
HIPed at 520℃, 100 MPa with 4h holding (Die Casting)	0.54	0.14	0.24	0.015	0.90	0.013	0.034	0.016	0.0077

인장시편 및 충격시편의 치수를 나타낸다.

2.1.3 상압에서의 열처리

열간 등가압 소결과 상압 열처리에 의한 강도변화의 차이를 조사하기 위하여 열간 등가압 소결 조건과 동일한 온도 및 시간으로 사형주조 및 다이캐스팅 시편을 승온, 온도 유지 및 냉각 하였다. 또한, 열간 등가압 소결의 경우와 마찬가지로 인장시편을 가공한 후 어닐링하여 실험하였다.

2.2 인장 및 충격시험

Al 합금의 인장시험은 재료 시험기(MTS Servohydraulic Tester)를 사용하여 수행하였다. 상온에서 100 N/s 의 일정한 크기의 하중 속도를 가하는 방식으로 인장하였으며, 이때 하중의 크기와 초기의 하중속도는 재료 시험기로 제어하였다.

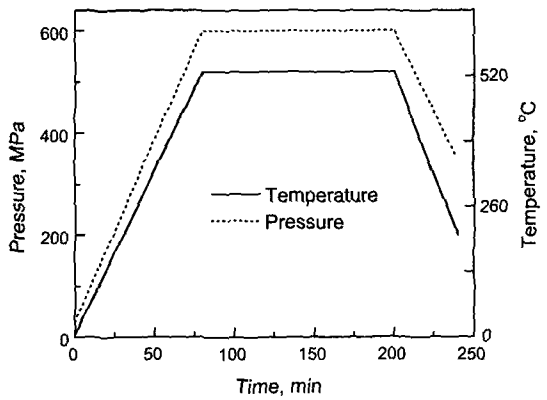


Fig. 1 Schedule for temperature and pressure during hot isostatic pressing

재료의 변형량은 신장계(Extensometer)를 이용하여 자동으로 데이터를 측정 및 저장하였으며 같은 실험조건에서 2~3 번의 실험을 반복하여 평균치를 사용하였다.

충격시험은 Izod 충격시험기를 이용하여 실험하였으며 펀치의 초기높이와 충격후의 높이 차를 계산하여 충격흡수에너지를 계산하였다.

2.3 미세조직의 관찰

열간 등가압 소결후 시편의 미세조직의 변화를 조사하기 위하여 다양한 조건에서 열간 등가압 소결을 한 후에 시편을 Diamond Paste 로 단시간 연마하였다. 그 후에 연마된 시편을 Modified Keller 용액(2ml HF+3ml HCl +20ml HNO₃+175ml H₂O)으로 에칭한 후 광학 및 주사전자현미경으로 관찰하였다. 또한 인장시편의 파괴기구를 조사하기 위해 시편의 파단면도 같이 주사전자현미경으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장 및 충격시험

3.1.1 사형주조

사형주조된 Al 합금을 열간 등가압 소결을 수행한 후 일정한 하중 속도 100 N/s 로 인장하여 응력과 변형률의 관계를 구하였다. 열간 등가압 소결에 의한 응력-변형률의 변화를 비교하기 위해 열간 등가압 소결전의 Al 합금 시편도 함께 인장시험을 수행하였다.

Fig. 3 은 사형주조된 Al 합금의 열간 등가압 소결 조건에 따른 일축 인장 하에서의 응력과 변형

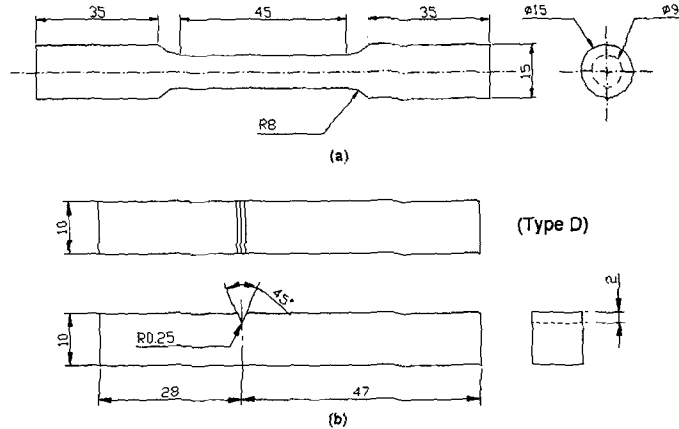
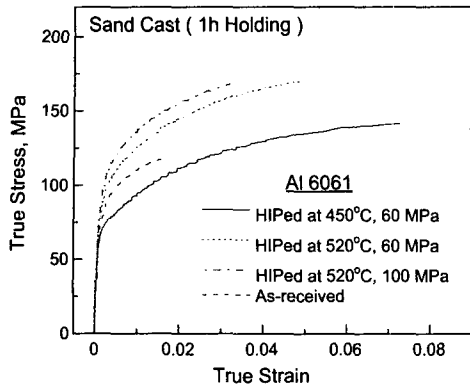
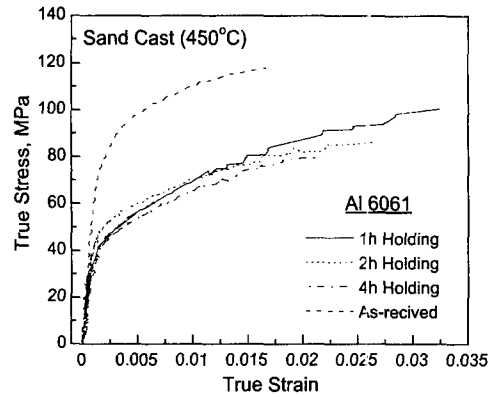


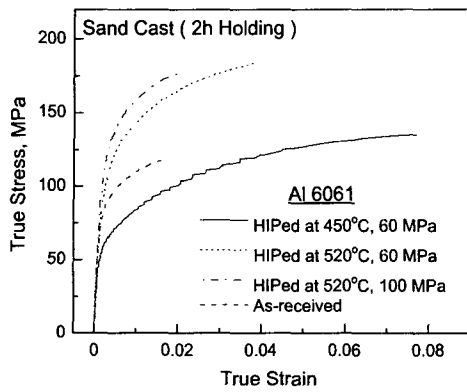
Fig. 2 The shape and dimensions of the specimens used in (a) tensile test and (b) Izod impact test



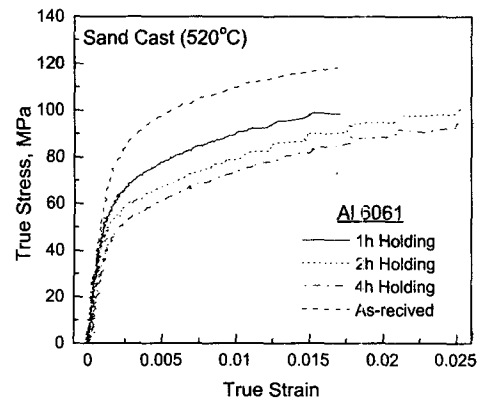
(a)



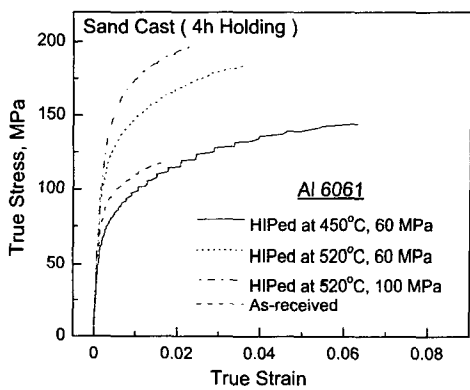
(a)



(b)



(b)



(c)

Fig. 3 Stress-strain curves of sand casted aluminum alloys obtained from the uniaxial tensile test after hot isostatic pressing.

물의 관계를 나타낸다. 열간 등가압 소결의 유지 시간에 대한 영향도 조사하기 위하여 유지시간을 1~4 시간까지 달리하여 Fig. 3의 (a), (b) 및 (c)에 나타내었다. Fig. 3의 결과로부터 열간 등가압 소결 온도, 압력 및 유지시간을 증가시킬수록 사

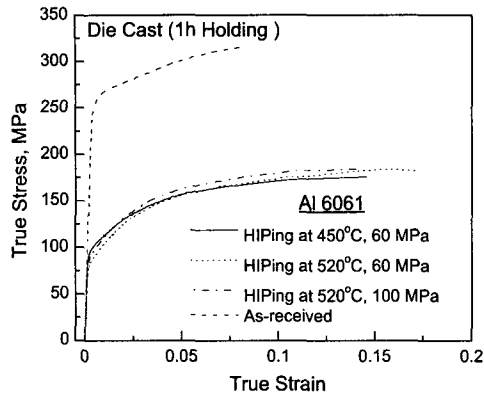
Fig. 4 Stress-strain curves of sand casted aluminum alloys obtained from the uniaxial tensile test after heat treatments at atmospheric pressure

형주조 Al 합금의 강도가 크게 증가함을 알 수 있다. 450°C, 60 MPa에서 열간 등가압 소결을 수행한 결과는 열간 등가압 소결을 거치지 않은 시편보다 인장강도가 낮게 나타났으나 연신률은 3~4배 정도 증가하였다. 따라서, 열간 등가압 소결은 사형주조된 Al 합금의 연성을 크게 향상시킴을 알 수 있으며 시편의 강도와 연신률은 열간 등가압 소결시 압력, 온도 및 유지시간 등에 큰 영향을 받기 때문에 주조 제품의 사용목적에 적절한 조건을 선택하여 사용할 필요가 있다.

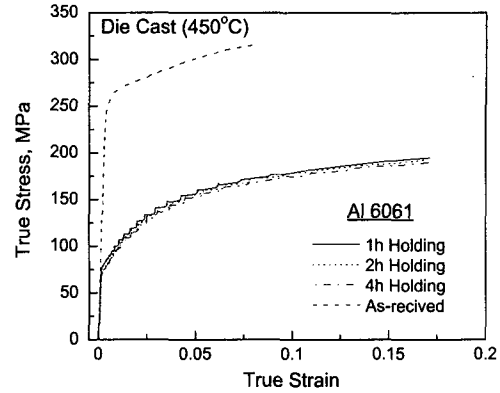
Fig. 4는 사형주조된 Al 합금의 상압 열처리 조건에 따른 일축 인장 하에서의 응력과 변형률의 관계를 나타낸다. Fig. 3의 경우와는 상이하게 온도의 유지시간의 증가 할수록 인장강도가 점점 감소하는 경향을 나타내고 있다.

3.1.2 다이캐스팅

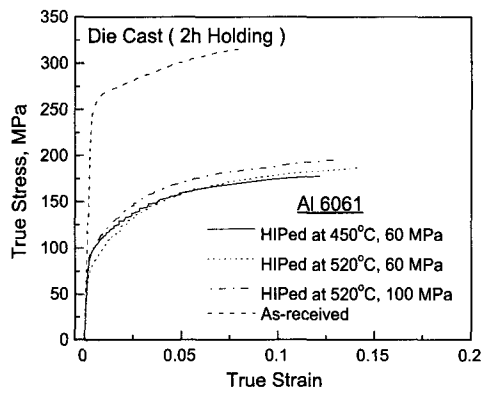
Fig. 5는 다이캐스팅으로 제조된 Al 합금의 열간 등가압 소결 조건에 따른 일축 인장 하에서의 응



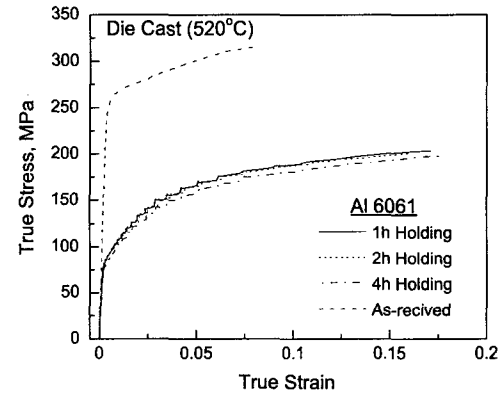
(a)



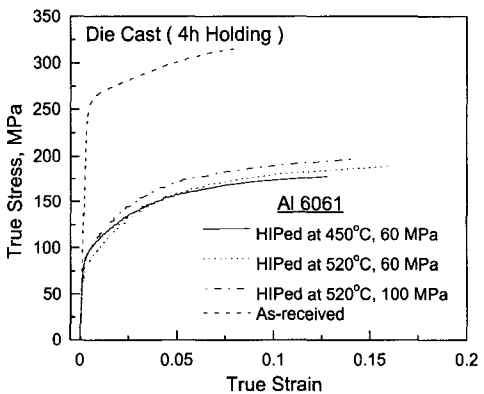
(a)



(b)



(b)



(c)

Fig. 5 Stress-strain curves of die casted aluminum alloys obtained from the uniaxial tensile test

력과 변형률의 관계를 나타낸다. Fig. 3의 사형주조의 결과와는 다르게 오히려 열간 등가압 소결을 행한 시편의 인장강도가 크게 감소하였다. 또한, 열간 등가압 소결 온도, 압력 및 유지시간을 증가시킬수록 다이캐스팅된 Al 합금의 강도 및 연신율이 약간 증가되었으나 대체적으로 열간 등가압 소

Fig. 6 Stress-strain curves of sand casted aluminum alloys obtained from the uniaxial tensile test after heat treatments at atmospheric pressure

결전의 알루미늄 시편의 강도보다 크게 감소하는 경향에는 변함이 없었다.

Fig. 6은 다이캐스팅으로 제조된 Al 합금의 상압 열처리 조건에 따른 일축 인장 하에서의 응력과 변형률의 관계를 나타낸다. Fig. 4의 경우와는 마찬가지로 온도의 유지시간의 증가 할수록 인장강도가 점점 감소하는 경향을 나타내고 있으며 Fig. 5의 열간 등가압 소결후의 인장강도 및 연신률과 비슷한 크기를 보였다. 따라서, 다이캐스팅으로 제조된 Al 합금의 경우에는 열간 등가압 소결 조건에 따른 인장 강도 및 연신률의 증가를 얻을 수 없음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 다이캐스팅된 Al 합금의 경우에는 열간 등가압 소결에 의해 인장강도는 크게 감소하며 사형주조된 시편의 경우와 같은 강도 증가효과를 얻을 수 없기 때문에 열간 등가압 소결의 적용에 따른 세심한 주의가 필요하다.

3.1.3 충격시험

사형주조된 Al 합금의 열간 등가압 소결에 의한 파괴인성의 변화를 조사하기 위해 Izod 충격시험을 수행하였다.⁽¹⁵⁾ Table 2 와 3 은 각각 사형주조된 Al 합금과 다이캐스팅된 Al 합금의 인장 및 충격시

험에서 얻은 결과를 종합하여 나타난 결과이다. 전체적으로 열간 등가압 소결을 수행한 경우는 사형주조된 Al 합금의 충격흡수에너지가 크게 증가시켰다. 따라서, 열간 등가압 소결은 Al 합금의 파괴인성과 인장강도의 향상을 위해서는 꼭 필요

Table 2 Mechanical test results of sand casted aluminum alloys

	Holding Time (h)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Impact Absorption Energy per Unit Area (J/cm ²)
As-received	-	91.22	118.1	1.69	0.8292
	1	77.2	141.26	7.29	2.4290
HIPed at 450°C, 60 MPa	2	64.5	134.99	7.69	4.0447
	4	74.95	143.9	6.30	3.4372
HIPed at 520°C, 60 MPa	1	103.85	169.61	4.96	3.4967
	2	107.5	183.77	3.87	3.8914
HIPed at 520°C, 100 MPa	4	116.1	184.14	3.64	3.7099
	1	114.0	167.69	3.23	2.1565
HIPed at 520°C, 100 MPa	2	123.0	176.55	2.0	2.8509
	4	138.9	196.39	2.28	2.7084

Table 3 Mechanical test results of die casted aluminum alloys

	Holding Time (h)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
As-received	-	257.3	315.09	8.03
	1	98.02	175.75	14.57
HIPed at 450°C, 60 MPa	2	93.5	177.89	12.17
	4	92.4	177.72	12.8
HIPed at 520°C, 60 MPa	1	86.1	182.77	17.2
	2	77.7	186.89	14.23
HIPed at 520°C, 100 MPa	4	79.4	188.82	15.92
	1	92.5	184.19	14.01
HIPed at 520°C, 100 MPa	2	96.0	195.07	12.85
	4	91.4	197.01	14.06

한 공정이라고 할 수 있다.⁽¹⁷⁾

사형주조된 Al 합금의 인장시험에서는 520℃, 100 MPa 로 4 시간 열간 등가압 소결을 한 경우가 가장 높은 인장강도를 보이며 450℃, 60 MPa 로 2 시간 유지한 경우에서 가장 큰 충격흡수에너지를 보였다. 다이캐스팅된 경우에는 열간 등가압 소결한 경우가 인장강도는 감소하였으나 연신률은 대체적으로 증가하여 520℃, 60 MPa 에서 가장 크게 나타났다.

3.2 미세조직의 관찰

열간 등가압 소결에 의한 미세조직의 영향을 조사하기 위해 사형주조 및 다이캐스팅으로 제조된 시편을 구분하여 광학 및 주사전자현미경으로 내부 조직을 관찰하였다.

3.2.1 사형주조

Fig. 7은 열간 등가압 소결전과 520℃, 100 MPa에서 열간 등가압 소결후의 시편 내부의 미세조직의 변화를 나타낸다. Fig. 7(a)는 열간 등가압 소결전의 사형주조로 제조된 Al 합금의 광학현미경 사진을 나타내며 (b)와 (c)는 각각 520℃, 100 MPa

로 1 시간 및 4 시간동안 유지하여 열간 등가압 소결을 수행한 시편 내부의 조직을 나타낸다. Fig. 7(a)로 부터 열간 등가압 소결전의 사형 주조된 시편의 내부에는 미세기공에 의한 결함과 용융금속의 응고시 발생하는 수지상정(Dendrite)에 의해 결정립계(Grain Boundary)에 취약한 구조가 발생함을 알 수 있다.⁽¹⁸⁾ 이러한 사형주조된 시편을 열간 등가압 소결을 하게 되면 시간이 지남에 따라 점차 내부 미세기공이 없어지고 결정립계가 서로 밀착되면서 경계의 구분이 사라지는 현상이 발생한다. 또한 Fig. 7(c)에 나타난 바와 같이 결정립 크기(Grain Size)도 감소하여 사형주조된 Al 합금의 내부 결함의 제거와 상호 보완하여 시편의 인장강도를 증가 시키는데 중요한 역할을 수행할 것이다. 이는 Fig. 3 과 4 의 인장시험 결과를 통하여서도 확인할 수 있다.

Fig. 8은 온도와 압력을 달리하여 2 시간의 유지시간으로 열간 등가압 소결하였을 때 사형주조된 시편 내부의 미세조직의 변화를 나타낸다. Fig. 8(a), (b) 및 (c)는 각각 450℃에서 60 MPa,

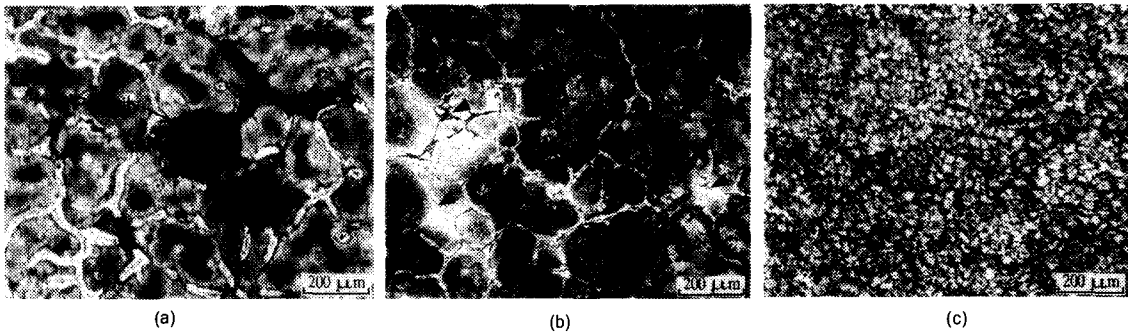


Fig. 7 Optical micrographs of a sand casted sample (a) before HIPing and after HIPing at 520℃, 100 MPa for holding time of (b) 1h and (c) 4h, showing micropores and discontinuous defects along the grain boundaries

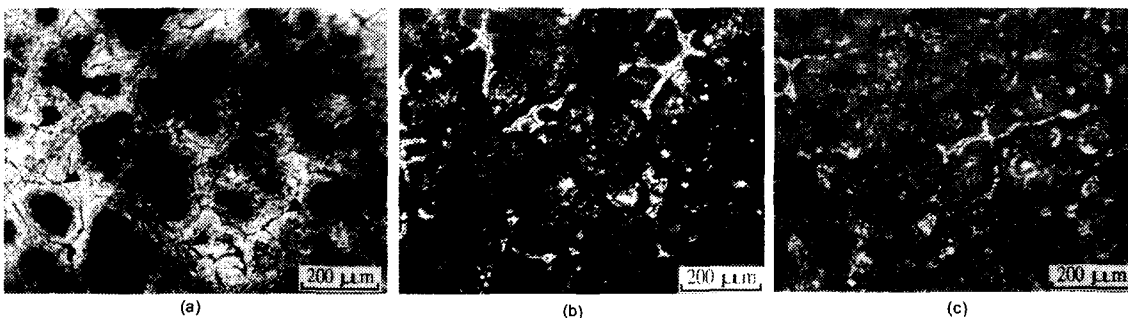


Fig. 8 Optical micrographs of a sand casted sample after HIPing (a) at 450℃, 60 MPa, (b) 520℃, 60 MPa and (c) 100 MPa for holding time of 2h, showing the reduction of micropores and discontinuous defects

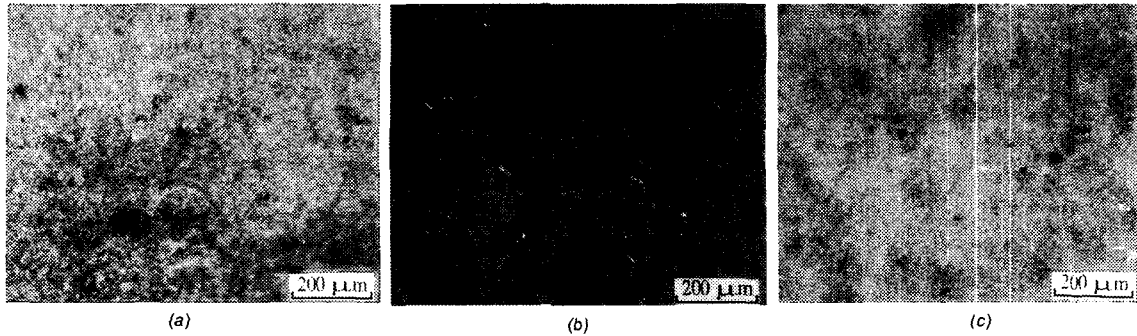


Fig. 9 Optical micrographs of a die casted sample (a) before HIPing and after HIPing at 520°C, 100 MPa for holding time of (b) 1h and (c) 4h

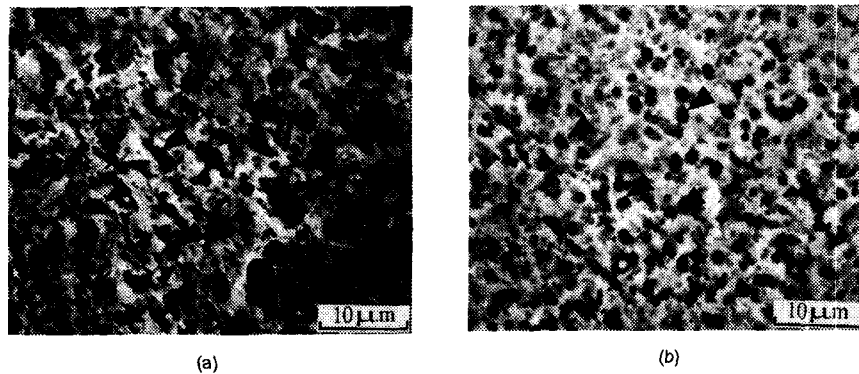


Fig. 10 SEM micrographs of the die casted sample (a) before HIPing and (b) after HIPing at 520°C, 100 MPa for holding time of 4h

520°C에서 60 MPa 및 100 MPa로 열간 등가압 소결한 시편 내부의 조직을 나타낸다. 온도와 압력이 높을수록 내부 기공의 치밀화가 잘되고 계면의 경계가 점차 없어지는 경향이 증가함을 알 수 있다.

3.2.2 다이캐스팅

Fig. 9는 열간 등가압 소결전과 520°C, 100 MPa에서 열간 등가압 소결후의 시편 내부의 미세조직의 변화를 나타낸다. Fig. 9(a)는 열간 등가압 소결전의 다이캐스팅된 Al 합금의 광학현미경 사진을 나타내며 (b)와 (c)는 각각 520°C, 100 MPa로 1시간 및 4시간 동안 유지하여 열간 등가압 소결을 수행한 시편의 내부조직을 나타낸다. 다이캐스팅된 경우에는 제조시 가압 조건 하에서 수행되기 때문에 사형주조의 경우와는 다르게 미세기공이 양이 매우 적으며 내부조직도 열간 등가압 소결후의 조직과 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 10(a) 및 (b)는 각각 열간 등가압 소결전과 520°C, 100 MPa로 4시간동안 유지하여 열간 등가

압 소결한 후의 시편의 미세조직을 나타낸다. 다이캐스팅으로 제조된 Al 합금의 조직은 사형주조된 경우와는 다르게 크기가 매우 작은 미세기공의 형태를 띠며 전체적으로 시편 내부에 균일하게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 또한, 다이캐스팅된 시편의 미세기공은 열간 등가압 소결후에 구상화되는 경향이 있으나 그 크기는 열간 등가압 소결전과 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서, 다이캐스팅된 경우에는 열간 등가압 소결에 의한 미세기공의 치밀화가 거의 발생되지 않기 때문에 시편의 인장강도가 증가하지 못하는 원인이 되며 열간 등가압 소결은 단지 고온으로 가열하는 열처리로 작용하는 것이다. 그러나 이러한 열간 등가압 소결에 의한 열처리는 다이캐스팅된 직후의 Al 합금의 열처리 조건보다 취약하여 합금의 인장강도가 오히려 감소하는 결과를 초래한다.⁽¹⁶⁾ Fig. 5와 6의 실험결과는 이를 뒷받침하는 결과이며 다이캐스팅된 Al 합금의 열간 등가압 소결은 인장강도의 증가에는 효과가 없음을 알 수 있다.

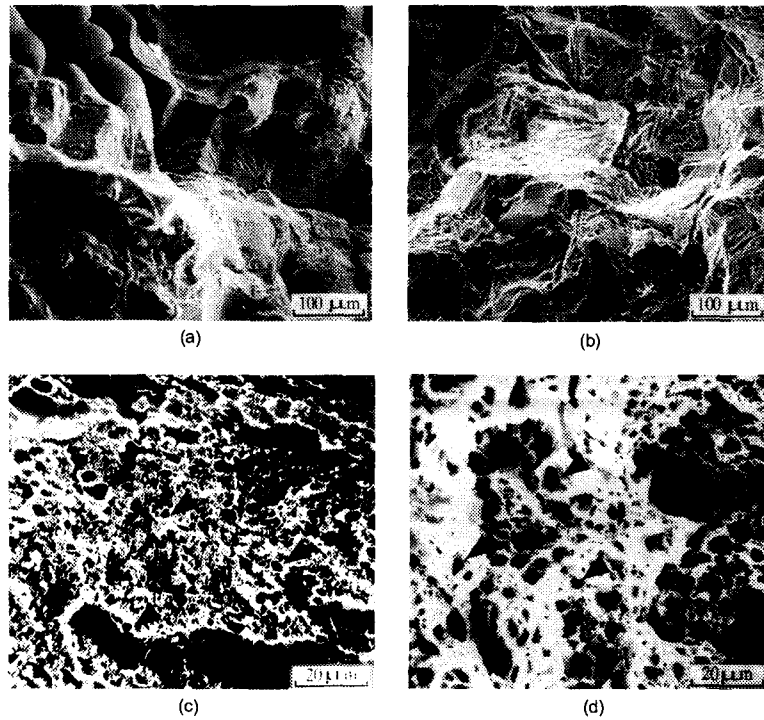


Fig. 11 SEM fractographs for tensile specimens of sand casted aluminum alloys (a) before HIPing and (b) after HIPing at 520°C, 100 MPa and for die casted aluminum alloys (c) before HIPing and (d) after HIPing at 520°C, 100 MPa for holding time of 4h

Fig. 11 은 열간 등가압 소결전과 520°C, 100 MPa 로 4 시간동안 유지하여 열간 등가압 소결한 시편의 인장시험 직후의 파단면을 나타낸다. Fig. 11 (a)와 (b)는 사형주조된 Al 합금의 파단면을 나타내며 (c)와 (d)는 다이캐스팅된 Al 합금의 파단면을 나타낸다. 열간 등가압 소결의 여부와 관계없이 사형주조된 시편은 벽개(Cleavage)에 의한 취성파괴의 경향을 보이며 다이캐스팅된 경우는 Dimple에 의한 연성파괴를 보인다.⁽¹⁶⁾ 따라서, 열간 등가압 소결은 주조 Al 합금의 파괴기구에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 사형주조 및 다이캐스팅으로 제조된 Al 합금을 다양한 온도와 압력조건에서 열간 등가압 소결을 수행하여 강도, 연신률, 충격흡수에너지 및 내부조직의 변화를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 사형주조된 Al 합금은 열간 등가압 소결후에 강도, 연신률 및 충격흡수에너지가 증가되었으며 온도와 압력 및 유지시간을 증가시킬수록 그 효과

가 점차 증대되었다.

(2) 다이캐스팅된 Al 합금은 열간 등가압 소결후에 강도가 감소하고 연신률은 다소 증가하였으나 열간 등가압 소결시의 온도와 유지시간을 사용하여 상압 열처리한 결과와 큰 차이가 없었다.

(3) 사형주조된 Al 합금의 경우에는 열간 등가압 소결후 시편의 내부 기공이 제거되고 미세조직의 치밀화가 발생하였으나 다이캐스팅된 경우에는 그 효과가 거의 없었다.

(4) 사형주조된 Al 합금의 인장강도는 520°C, 100 MPa 로 4 시간동안 유지하여 열간 등가압 소결한 경우가 가장 크게 나타났다.

후 기

본 논문은 부산대학교 ERC(정밀정형 및 금형가공 연구소)에서 지원된 연구비로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Whittenberg, E. J. and Rhines F. N., 1952, "Origin

- of Porosity in Casting of Magnesium-Aluminum and Other Alloys," *JOM*, Vol. 4, pp. 409-420.
- (2) Kubo, K., and Pehlke, R. D., 1985, "Mathematical Modeling of Porosity Formation in Solidification," *Metall. Trans. B*, Vol. 16, pp. 359-366.
- (3) Singh, S. N., and Flemings, M. C., 1969, "Solution Kinetics of a Cast and Wrought High Strength Aluminum Alloy," *Trans. Metall. Soc. AIME*, Vol. 245, pp. 1803-1809.
- (4) Hanes, H. D., and McFadden, J. M., 1983, "HIP'ing of Casting: an Update," *Met. Prog.*, Vol. 123, No. 5, pp. 23, 26-28, 31.
- (5) Andrews, S., 1992, "HIPing Offers Enhanced Casting Integrity," *Metallurgia*, Vol. 59, No. 6, pp. 215-216.
- (6) Rich, T. P., Orbison, J. G., Duncan, R. S., Olivero, P. G., and Peterec, R. H., 1999, "The Effect of Hot Isostatic Pressing on Crack Initiation, Fatigue, and Mechanical Properties of Two Cast Aluminum Alloys," *J. Mat. Eng. Perform.*, Vol. 8, No. 3, pp. 315-324.
- (7) Raes, H. D. B., 1983, "Hot Isostatic Pressing Technology," *Powder Metallurgy*, Vol. 26, No. 4, pp. 193-199.
- (8) 양훈철, 김기태, 2000, "열간 등가압 소결에 의한 Ti-6Al-4V 분말의 치밀화 거동," 대한기계학회논문집 A 권, 제 24 권, 제 2 호, pp. 394-402.
- (9) Jinka, A. G. K., Lewis, R. W., "Finite Element Simulation of Hot Isostatic Pressing Metal Powders," 1994, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 114, pp. 249-272.
- (10) Kim. H. G., and Kim. K. T., 2000, "Densification Behavior of Tungsten-Fiber-Reinforced Copper Powder Compacts under Hot Isostatic Pressing," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 42, pp. 1339-1356.
- (11) Chamma, C. C., 1992, "Elimination of Porosity from Aluminum-Silicon Castings by Hot Isostatic Pressing," *J. Mat. Eng. Perform.*, Vol. 1, No. 5, pp. 773-780.
- (12) Chamma, C. C., 1992, "Mechanical Properties of Hot Isostatically Pressed Aluminum-Silicon Castings," *Scripta Metall. Mat.*, Vol. 26, No. 8, pp. 1153-1156.
- (13) Fletcher, A. J., King, S., Rickinson, B., and Atkinson, H., 1993, "Effect of Hot Isostatic Pressing on Mechanical Properties and Microstructure of 70-30 Cupronickel Castings," *Mat. Sci. Tech.*, Vol. 9, No. 7, pp. 555-561.
- (14) Panasyuk, A. D., Maslennikova, V. R., Kayuk, V. G., Belkina, A. A., and Belykh, A. B., 1996, "Use of Hot Isostatic Pressing to Improve the Properties of Hard Alloy KKhN25," *Powder Mat. & Metal Ceramics*, Vol. 35, No. 11-12, pp. 644-646.
- (15) ASTM, 1991, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, Pa.
- (16) Hatch, J. E., 1984, *Aluminum; Properties and Physical Metallurgy*, ASM Metals Parks, Ohio, pp. 25-397.
- (17) Lei, C. S., Lee, E. W., and Frazier, W. E., 1998, "The Role of HIP on the Cast A356 Aluminum," *Proc. from Materials Solutions Conference '98 on Aluminum Casting Technology*, pp. 113-115.
- (18) D. R. Askeland, 1994, *The Science and Engineering of Materials*, PWS Publish., Boston, pp. 203-330.