

알루미늄소재의 재가열 공정에서 구상화의 크기가 기계적 성질에 미치는 영향

박상문* · 강충길**

(2002년 1월 19일 접수)

The Effect of Globule size on the Mechanical Properties in Reheating Process of Aluminium Alloys

S. M. Park and C. G. Kang

Abstract

One of the important steps on semi-solid forming is the reheating process of raw materials to the semi-solid state. This process is not only necessary to achieve the required SSM billet state, but also to control the microstructure of the billet. In reheating process, the globule size is determined by the holding time of last heating stage. Therefore, Some experiments to investigate the relationship between the mechanical properties and the holding time in the last heating stage was performed. The alloys used in this experiment were 357, 319 and A390 alloys. The experiments of reheating were performed by using an induction heating system with the capacity of 50kW. This paper shows the evolution of the microstructure according to the holding time of last reheating stage. Furthermore, to evaluate the effect of globule size controlled by holding time in last heating stage uniaxial tension test was performed. The strain-stress curves were plotted according to the holding time.

Key Words : Semi-Solid Forming, Reheating, Globule Size, Holding Time, Mechanical Property

1. 서론

반용융성형은 액체상태에서 성형하는 다이캐스팅이나 스퀴즈캐스팅 등 에 비해서 점도가 높은 상태에서 성형하므로 가스함류량이 적고, 산화층 발생량이 적으므로 가공성도 좋다. 또한 고체상태에서 성형하는 단조에 비

해서 낮은 하중에서 성형이 가능하므로, 복잡한 형상을 가진 제품의 제조가 용이하다.⁽¹⁻⁴⁾ 반용융성형공정 중 재가열공정은 빌렛을 성형할 수 있는 고액공존 온도영역으로 가열하는 것이 1차적인 목적이지만, 재가열 공정동안 가열온도, 가열시간, 가열유지시간 등의 재가열 공정변수들에 의하여 소재의 미세조직을 제어할 수 있으므로 적

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

절한 재가열 조건을 찾는 것이 중요하다. 이러한 재가열 공정의 중요성 때문에 각 소재에 대하여 적절한 재가열 조건을 찾기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다.⁽⁵⁻⁷⁾

반응용성형품의 기계적 성질에 영향을 미치는 요소 중 재가열단계에서 제어할 수 있는 것으로는 고상률, 구상화 정도, 구상화의 크기와 조밀도, 공정조직내의 Si입자분포도, 소재 부위별 온도편차 등을 들 수 있다. 이러한 관점에서 Loué⁽⁸⁾ 등은 A356과 357합금의 가열유지시간에 따른 구상의 형상비와 크기변화 양상을 조사하였고, Sannes⁽⁹⁾ 등은 Mg합금의 구상화 크기 분포도와 구상화의 크기의 가열유지시간에 따른 변화에 대하여 연구하였다. Nan⁽¹⁰⁾ 등은 Al-80%Zn 합금의 고상율에 따른 고상의 크기변화를 조사하였다. Ferrante⁽¹¹⁾ 등은 Al-4wt%Cu 합금의 가열유지시간에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였으며, Jung⁽¹²⁾ 등은 A356합금의 재가열시간과 온도에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다.

지금까지 발표된 연구들은 가열유지시간에 따른 미세조직의 변화양상에 관한 연구들이 대부분이다. 또한 미세조직의 변화에 따른 기계적성질의 변화에 대한 연구는 발표되지 않고 있다. 357합금과 A356합금에 관한 연구가 대부분이었다. 또한 반응용 성형부품의 강도해석에 이용할 수 있는 미세조직과 기계적 성질의 관계를 정량적으로 고찰한 연구 결과는 거의 발표되지 않고 있다.

본 연구에서는 반응용 소재의 재가열공정에서 가열유지시간에 따라 변화하는 구상화의 크기를 관찰하였고, 구상화의 크기에 따른 기계적 성질을 파악하기 위해 인장시험을 수행하였다. 또한, 반응용 부품설계에 적용될 수 있도록 가열유지시간이 각각 1, 2, 3, 4분일 때 구상화 크기의 변화를 상분석기를 이용하여 정량화하였다. 반응용소재로 많이 사용되고 있는 357합금뿐만 아니라 강도가 우수한 319합금과 내마모성이 우수한 A390합금에 대해서도 미세조직과 기계적 성질의 관계를 조사하였다.

2. 실험

2.1 재가열 실험

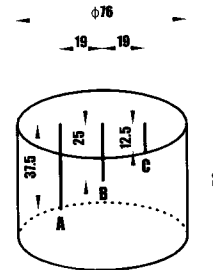
본 연구에서 사용한 소재는 프랑스 PECHINEY社에서 전자기교반을 이용해 제조한 ALTHIX[®] 소재로 아공정합금인 357, 319와 과공정합금인 A390이다. 각 소재의 화학 조성은 Table 1에 나타나있다.⁽¹³⁾

반응용성형공정 중 재가열공정은 온도제어가 용이하며 빠른 시간 내에 소재를 가열할 수 있는 유도가열법을 이용한다. 본 실험에서는 50kW용량의 유도가열기를 사용하였으며, 가열 시 소재부위별 온도편차를 알아보기 위하여

Table 1 Chemical compositions of aluminum alloys

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Pb
357	Min(%)	6.5	-	-	0.50	-	-	-	-
	Max(%)	7.5	0.15	0.03	0.03	0.60	0.03	0.05	0.20
319	Min(%)	5.5	-	2.5	0.3	-	-	-	-
	Max(%)	6.5	0.15	3.5	0.03	0.4	0.03	0.05	0.20
A390	Min(%)	16.0	-	4.0	-	0.5	-	-	-
	Max(%)	17.0	0.4	5.0	0.1	0.65	0.01	0.05	0.20

소재 중심부, 상·하 표면부 3곳의 온도를 K-type CA열전대로 측정하였다. 실험에 사용된 소재의 치수와 온도 측정 위치는 Fig. 1에 도시하였다. 소재의 중심부인 Fig. 1의 B지점에 설치된 열전대를 유도가열기에 연결하여 소재의 온도를 제어하였다.



[Unit : mm]

Fig. 1 Billet size and temperature measuring point

유도가열시 소재의 온도를 제어하는 방법으로는 열전대를 이용하여 직접 빌렛의 온도를 측정하여 제어하는 방법과, 소재의 종류와 크기에 따라 각 단계별로 적절한 열량을 입력하여 온도를 제어하는 두 가지 방법이 있다. 전자는 직접적 측정된 온도를 바탕으로 소재 가열에 필요한 열량을 실시간으로 계산해 유도가열기의 출력을 제어하므로 정확성이 높은 반면, 소재마다 열전대를 설치해주어야 하므로 대량생산에는 부적합하다. 후자는 가열시작시 코일 내부의 온도가 매번 달라지기 때문에 온도를 정확히 제어하기 어려운 면이 있지만, 열전대를 설치하지 않아도 되므로 대량생산에 보다 적합하다. 본 실험에서는 정확한 온도 제어를 위하여 열전대로 직접 빌렛의 온도를 측정하여 제어하는 방식을 사용하였다. 또한 빌렛의 각 부위별 온도편차를 줄이기 위하여 최종온도 부근에서 열유량을 적게하여 오랜 시간동안 가열하는 3단 재가열방법으로 수행하였다.⁽¹⁴⁻¹⁵⁾ 재가열공정에서 구상화 크기에 직접적인 영향을 미치는 변수인 3단계 가열유지시간을 변화시켜가며 이에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다.

Table 2는 각 소재별 재가열조건을 나타낸 것이다. 재가열시 각 소재의 공정온도 부근에서 일정한 열량으로 계속 가열을 하여도 온도가 거의 상승하지 않기 때문에, 각 소

재의 공정온도부근에서 2단계 가열구간을 설정하여 오랜 시간 동안 가열하였으며, 3단계에서의 온도는 각 소재의 고상율이 약 50%인 구간으로 반응용성형에 적합한 온도영역이다.

Table 2 Reheating condition of aluminum alloys

Step	Temperature (°C)			Elevating time (min)			Holding time (min)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
357	375	576	583	3	2	2	1	1	Var.
319	450	560	578	4	2	2	1	1	Var.
A390	450	560	570	4	2	2	1	1	Var.

2.2 미세조직 분석

미세조직사진에서의 구상의 크기를 정량화하기 위해서, 컴퓨터 정량 상분석기(image anlysis)를 이용하여, 구상의 평균 등가지름(mean equivalent diameter)과 구상화정도(roundness)를 알아보았다.

등가지름이란 구상의 면적과 같은 면적의 원의 지름을 말하는 것으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{eq} = \sqrt{4A / \pi} \quad (1)$$

Deq : 등가지름(equivalent diameter)
A : 구상의 단면적(area of globule)

구상화정도를 나타내는 R(roundness)은 구상조직의 둘레와 구상조직과 같은 면적을 가지는 원둘레의 비이며, 식 (2)와 같이 정의된다.

$$R = p^2 / 4\pi A \quad (2)$$

R : 구상화정도(roundness)
p : 구상의 둘레(perimeter)
A : 구상의 단면적(area of globule)

R=1이면 완전한 원형이며, 구상화되지 않은 상일수록 같은 면적의 원보다 둘레의 길이가 길어지므로 R값이 더 커지게 된다.

2.3 인장시험

인장시험편은 ASTM E 8M 규격대로 제작하였으며, Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 표점거리(gage length)가 20mm, 직경이 4mm인 봉형시험편이다. 인장시험시 변형률 속도는 $0.5 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ 로 하였으며, 정확한 연신율 측정을 위하

여 시편 접촉방식인 extensometer를 사용하여 연신율을 측정하였다. 측정된 값은 모두 진응력-진변형률 선도로 나타내었으며, 항복응력은 0.2% offset으로 구하였다.

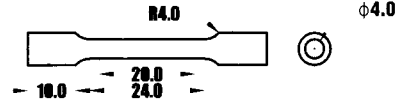


Fig. 2 Tensile test specimen [Unit : mm]

3. 결과 및 고찰

3.1 재가열실험

3.1.1 재가열시 단면전체의 온도편차

Fig. 3은 357합금의 재가열 과정 동안 빌렛의 온도를 측정하는 것이다. 설정한 3단 재가열 조건을 따라 빌렛이 최종 온도까지 가열되었음을 확인할 수 있다.

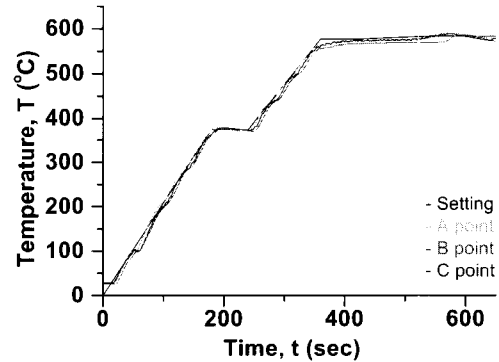
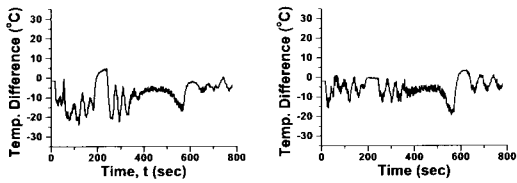


Fig. 3 Temperature profile during reheating of 357

유도가열시 전류의 표피현상(소재의 표면에서만 전류가 흐르는 현상)과 근접효과(코일에 흐르는 1차전류가 피가열물에 유도되어 코일에 가까운 표면층에 흐르는 현상)에 의해 소재의 표면부에 자속 및 와전류가 집중발생하므로 빌렛의 중심부보다 표면부가 훨씬 온도가 높아지게 된다.⁽¹⁶⁾ 열전대를 소재에 직접 설치하여 온도를 제어하는 방식에서는 소재 중심부위의 온도로 유도가열기를 제어하므로 빌렛의 표면부와 중심부의 온도차이가 크면 빌렛 전체에 걸쳐 균일한 온도분포의 제어가 불가능하다. 따라서 빌렛 전체에 걸쳐 온도가 일정하도록 하기 위하여 가열유지 시간이 필요하다. 가열유지구간에서는 유도가열기의 출력이 가열구간에 비해 매우 적으므로 유도가열기의 출력보다는 소재내부의 열전도에 의해서 빌렛의 표면과 중심부의 온도차가 줄어들게 된다. Fig. 4(a)는 Fig.1에 나타나 있는 빌렛의 표면부인 A 지점과 중심부인 B 지점의 온도편차를 측정하는 것이며, Fig. 4(b)는 빌렛의 중심부인 B지점과 표면부인 C지점의 온도편차를 측정하는 것이다. 1단계 가

열구간에서는 온도편차가 최대 25℃까지 나지만 가열유지 시간에는 온도편차가 줄어들며 최종온도 편차는 0에 가까워짐을 알 수 있다. Fig. 5~8은 319합금과 A390합금의 재가열 공정시 온도 곡선과 온도편차를 나타낸 것이다. 357합금과 같이 최종적으로 온도편차는 0에 가까워짐을 알 수 있다.



(a) Between A and B point (b) Between B and C point

Fig. 4 Temperature difference during reheating of 357

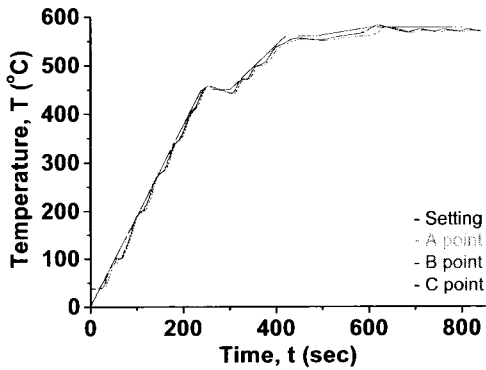
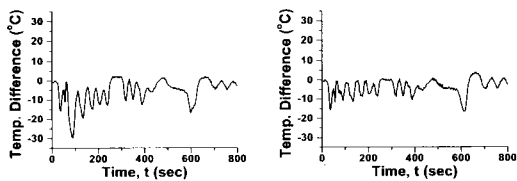


Fig. 5 Temperature profile during reheating of 319



(a) Between A and B point (b) Between B and C point

Fig. 6 Temperature difference during reheating of 319

3.1.2 가열유지시간변화에 따른 미세조직

재가열 공정에서 3단계에서의 가열유지시간을 각각 1, 2, 3, 4분으로 하여 미세조직을 관찰하였다.

Fig. 9는 가열유지시간 변화에 따른 357합금의 미세조직이다. 가열유지시간이 증가함에 따라 덴드라이트 조직이

점차적으로 구상화되고, 가열유지시간이 4분이상 되면 구상이 조대화되는 것을 관찰할 수 있었다.

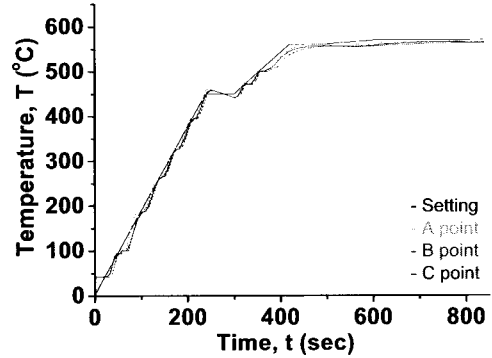
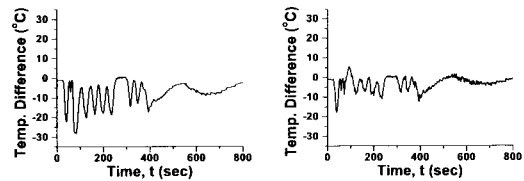


Fig. 7 Temperature profile during reheating of A390



(a) Between A and B point (b) Between B and C point

Fig. 8 Temperature difference during reheating of A390

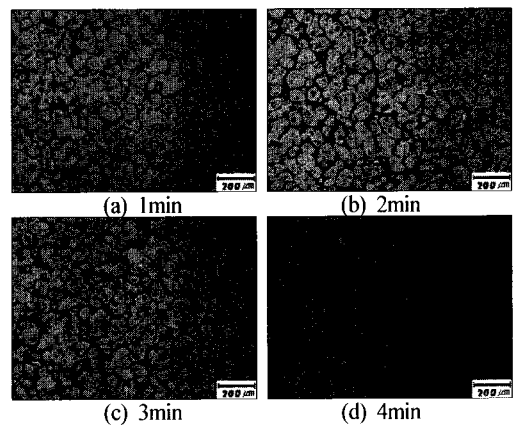


Fig. 9 Microstructure evolution of 357 for variation of 3rd step holding time

구상화 입자의 크기를 정량화하기 위하여 Fig. 9의 조직 사진으로 상 분석기(image analysis)를 이용하여 구상의 평균 등가지름(mean equivalent diameter)를 구하였다.

Fig. 10은 357의 가열유지시간별 구상화의 크기를 평균

등가지름으로 나타난 것이다. 3단계에서의 가열유지시간이 3분일 때 구상의 평균크기가 $94\mu\text{m}$ 로 가장 적음을 알 수 있다. 이것은 3분 가량의 가열유지시간까지 텐드라이트 조직이 구상에 가까워지면서 조밀해지며, 가열유지시간을 3분 이상으로 하면 구상이 조대화되기 시작한다는 것을 의미한다.⁽¹⁰⁾

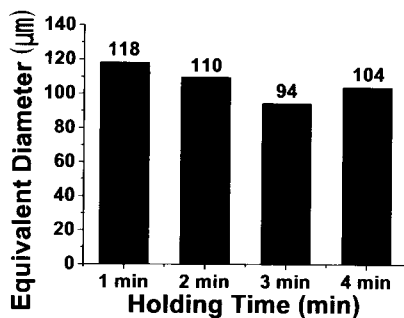


Fig. 10 Globule size of 357 for variation of 3rd step holding time

Fig. 11은 357의 가열유지시간이 각각 1, 2, 3, 4분인 경우 구상화 정도를 R(roundness)의 분포도로 나타낸 것이다. 3단계에서 가열유지시간이 1분인 경우에 $1 \leq R < 1.2$ 인 구상은 11.7%이며, $1 \leq R \leq 2$ 인 구상은 58.3%이다. 가열유지시간이 2분인 경우에 $1 \leq R < 1.2$ 인 구상은 19.0%이며, $1 \leq R \leq 2$ 인 구상은 68.3%이다. 따라서 가열유지시간이 1분에서 2분 사이에서 구상화율이 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 가열유지시간이 3분인 경우는 $1 \leq R < 1.2$ 인 구상은 14.1%로 2분일 때보다 다소 적지만, 72.8%의 구상이 $1 \leq R \leq 2$ 구간에 있어 가장 구상화가 잘 되었음을 알 수 있다. 가열유지시간이 4분인 경우는 $1 \leq R < 1.2$ 인 구상이 29.2%로 1/3의 구상이 거의 원형이지만 $1 \leq R \leq 2$ 인 구상이 63.1%로 다른 경우보다 다소 적게 나타났다. 이는 가열유지시간이 4분인 경우 아직 완전히 구상화되지 않았던 구상들이 거의 구형에 가깝게 변해가지만, 구상의 조대화가 진행되면서 인근의 구상화 조직과 접합되어가기 때문인 것으로 볼 수 있다.

Fig. 12는 가열유지시간 변화에 따른 319합금의 미세조직이다. 가열유지시간이 1분인 경우에는 아직 구상화 조직이 많이 관찰되지 않고, 가열유지시간이 3분인 경우에 구상의 크기가 작고 균일하며 구상화가 많이 되었음을 관찰할 수 있다. 가열유지시간이 4분인 경우 거의 완전한 구상이 제일 많이 관찰되지만 구상의 크기가 다소 불균일함을 알 수 있었다.

Fig. 13은 319의 가열유지시간별 구상화의 크기를 평균 등가지름으로 나타낸 것이다. 가열유지시간 1분인 경우에

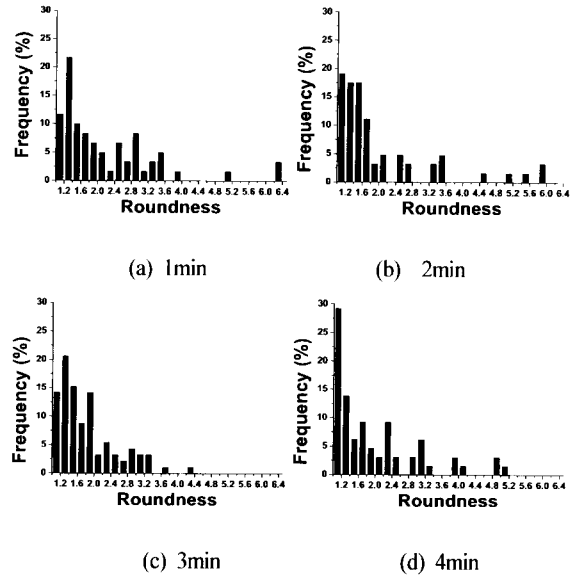


Fig. 11 Roundness of 357 for variation of 3rd step holding time

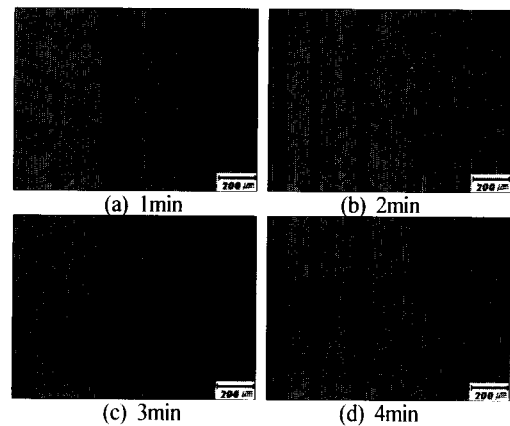


Fig. 12 Microstructure evolution of 319 for variation of 3rd step holding time

등가지름이 $130\mu\text{m}$ 로 가장 크며, 가열유지시간이 증가함에 따라 등가지름이 점차 감소하다가 4분인 경우 $92\mu\text{m}$ 로 가장 작다. 육안으로 관찰했을 때 가열유지시간이 3분인 경우 구상의 크기가 가장 작고 균일해 보였지만, 가열유지시간이 4분인 경우 크기가 작은 구상이 많이 존재하기 때문에 평균등가지름이 3분인 경우보다 작았다. 전체적으로 357의 경우와 아주 흡사한 양상을 보이고 있으며, 평균 등가지름의 변화추이를 살펴볼 때, 조직의 구상화와 조대화되는 속도가 319가 357보다 조금 느리다는 것을 알 수 있다. 이의 원인을 319와 357의 열적 성질측면에서 파악해

보면, 357의 열전도율은 151 W/m·K 이며, 319의 열전도율은 109 W/m·K로 319의 열전도율이 357보다 작기 때문인 것으로 추측해 볼 수 있다.⁽¹⁷⁾ 유도가열에서 온도상승요인은 소재의 전기 저항력에 의한 히스테리시스손실과 와전류손실에 의한 것이지만, 가열유지시간동안의 유도가열기의 출력은 미미하므로, 비교적 온도가 높은 표면부에서 온도가 낮은 중심부로의 열전도에 의해 온도제어가 된다고 볼 수 있다. 따라서 열전도율이 높은 357이 319에 비해서 조직의 변화속도가 빠른 것으로 판단된다.

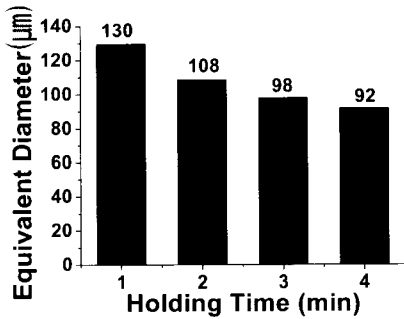


Fig. 13 Globule size of 319 for variation of 3rd step holding time

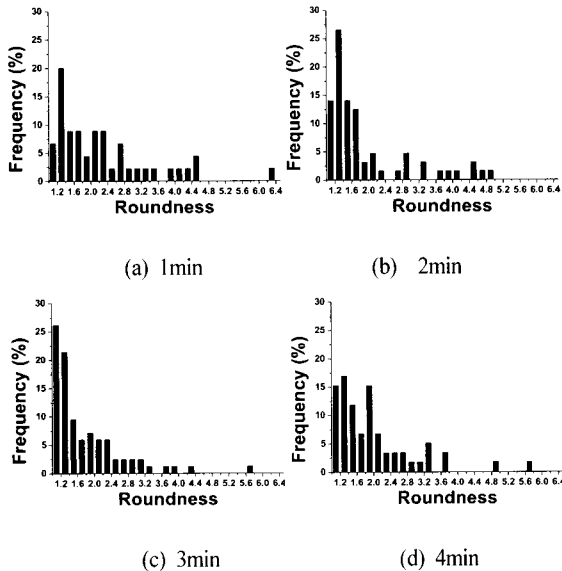


Fig. 14 Roundness of 319 for variation of 3rd step holding time

Fig. 14는 319의 가열유지시간에 따른 R(roundness)의 분포도를 나타낸 것이다. 가열유지시간이 1분인 경우에 $1 \leq R \leq 1.2$ 구간에 6.7%, $1 \leq R \leq 2$ 구간에 48.9%의 분포도를

보이며, 가열유지시간이 2분인 경우에 $1 \leq R \leq 1.2$ 구간에 14.1%, $1 \leq R \leq 2$ 구간에 70.3%의 분포도를 보이고 있다. 가열유지시간이 3분인 경우에 $1 \leq R \leq 1.2$ 구간에 26.2%, $1 \leq R \leq 2$ 구간에 70.2%의 분포도를 보이며, 가열유지시간이 4분인 경우에 $1 \leq R \leq 1.2$ 구간에 15.25%, $1 \leq R \leq 2$ 구간에 66.1%의 분포도를 보이고 있다. 가열유지시간이 1분인 경우에 비해 2분, 3분, 4분인 경우 양호한 구상화 정도를 보이고 있다.

Fig. 15는 가열유지시간 변화에 따른 A390합금의 미세조직이다. A390은 과공정합금으로서, 아공정합금인 357이나 319 구상의 크기가 작다. 이의 이유는 공정조정 이상의 Si성분들이 공정조직 속에 석출되어 있으므로 구상의 조대화 방해를 받기 때문이다. 따라서, 가열유지시간의 증가에 따른 미세조직의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

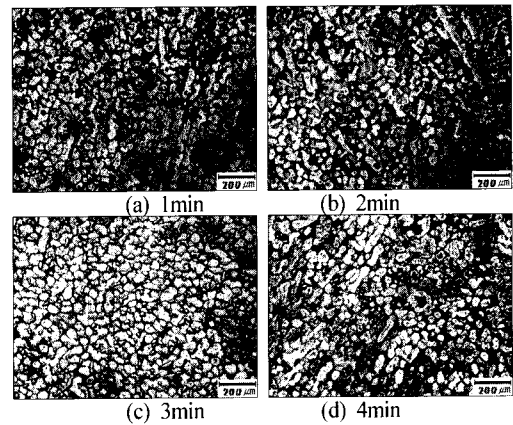


Fig. 15 Microstructure evolution of A390 for variation of 3rd step holding time

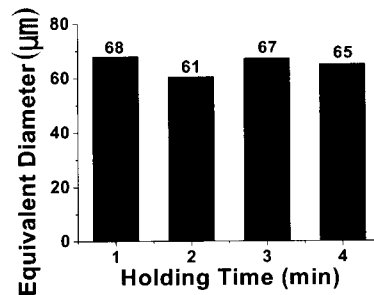


Fig. 16 Globule size of A390 for variation of 3rd step holding time

Fig. 16은 가열유지시간의 변화에 따른 A390의 평균 등가지름의 변화를 나타낸 것이다. 가열유지시간이 2분인 경

우 등가지름이 61 μ m로 가장 작지만 319나 357에 비해 뚜렷한 변화 양상이 나타나지 않으며, 가열유지시간에 따른 등가지름의 차이도 다소 적음을 알 수 있었다.

Fig. 17은 A390의 가열유지시간에 따른 R(roundness)의 분포도를 나타낸 것이다. 가열유지시간이 1분인 경우, $1 \leq R \leq 1.2$ 구간에 5.6%, $1 \leq R \leq 2$ 구간에 60.6%의 분포도를 보이고 있으며, 가열유지시간이 2분인 경우, $1 \leq R \leq 1.2$ 구간에 11.2%, $1 \leq R \leq 2$ 구간에 75.0%의 분포도를 보이고 있다. 가열유지시간이 3분인 경우, $1 \leq R \leq 1.2$ 구간에 15.0%, $1 \leq R \leq 2$ 구간에 75.0%이며, 가열유지시간이 4분인 경우, $1 \leq R \leq 1.2$ 구간에 14.3%, $1 \leq R \leq 2$ 구간에 77.1%의 분포도를 보이고 있다. 가열시간이 2분을 넘어서면서 구상의 3/4 정도가 R이 2미만으로 양호한 구상화 정도를 보이고 있으며, Si 입자들의 영향으로 인해 구상화 정도가 시간에 따라 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

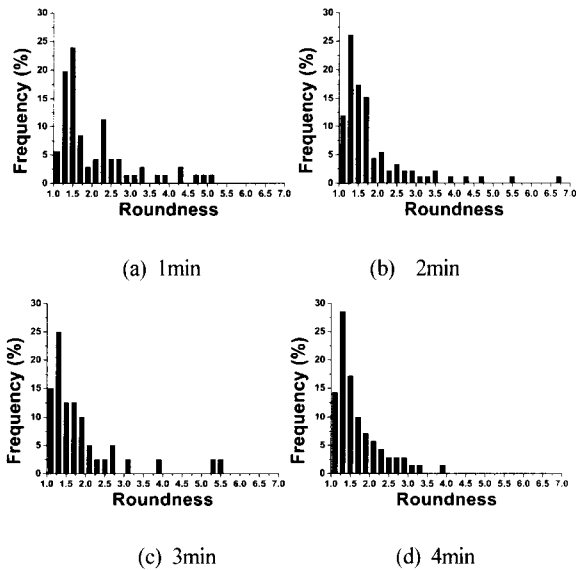


Fig. 17 Roundness of A390 for variation of 3rd step holding time

3.1.3 가열유지시간 변화에 따른 인장시험

재가열시 가열유지시간의 변화에 따라 달라지는 구상의 크기가 기계적성질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 인장시험을 수행하였다. Table 2에 나타나 있는 조건으로 빌렛을 재가열한 후 급냉한 빌렛으로부터 인장시편을 제작하였다. 3단계 가열유지시간이 1분, 2분, 3분, 4분인 각각의 경우에 대해 인장시험을 수행하여 그 결과를 비교해 보았다.

Fig. 18은 재가열 후의 357의 응력-변형률 선도를 나타

낸 것이다. 3단계 가열유지시간이 3분일 때 최대 인장강도를 얻을 수 있었으며, 가열유지시간이 2분일 때 최대의 연신율을 가진다. 가열유지시간이 증가함에 따라 인장강도와 연신율이 증가하다가 다시 감소하는 양상을 보이고 있다. 이의 원인은 가열유지시간이 1분인 경우에는 Fig. 10에 나타난바와 같이 아직 구상화가 완전히 이루어지지 않아 미세조직내에 다량의 덴드라이트 조직이 존재하기 때문으로 생각된다. 2분에서 3분사이에서 덴드라이트 조직이 완전히 구상화가 되었기 때문에 강도와 연신율이 증가한 것으로 사료된다. 가열유지시간이 4분을 지나면서 구상의 조대화가 진행되면서 다시 인장강도가 감소함을 알 수 있다.

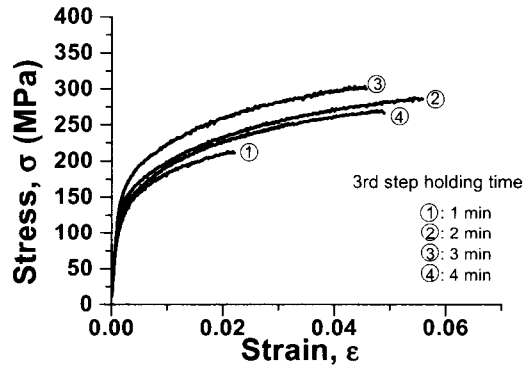


Fig. 18 Stress-strain curve of reheated 357 alloy

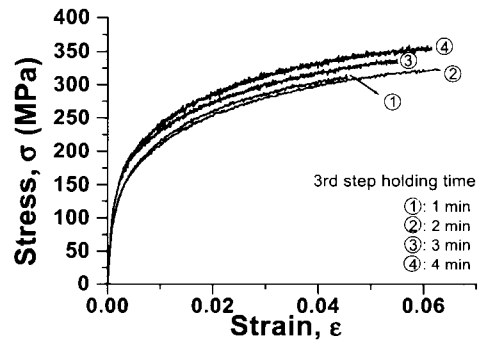


Fig. 19 Stress-strain curve of reheated 319 alloy

Fig. 19는 재가열 후의 319의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 가열유지시간이 증가함에 따라 인장강도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 가열유지시간이 4분일 때 최대의 인장강도를 가지며, 357의 경우처럼 가열유지시간이 1분일 때 최소의 연신율을 가짐을 알 수 있다. 357에 비해 구상화 진행속도가 조금 느리지만, 비슷한 양상을 보이는

것으로 볼 때, 가열유지시간을 4분 이상으로 한다면 인장강도가 다시 감소할 것으로 추측된다.

Fig. 20은 재가열 후의 A390의 응력-변형률 선도가 나타낸 것이다. A390의 경우는 가열유지시간이 2분인 경우에 가장 높은 인장강도와 연신율을 가지고 있으나, 319나 357에 비해 가열유지시간에 따른 인장강도나 연신율의 변화가 매우 적음을 알 수가 있었다. 이는 A390의 미세조직관찰에서 알 수 있었듯이, 공정상에 존재하는 다량의 Si입자들에 의해 구상들의 조대화가 방지되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 Al-Si 이원합금계에서 Si 함유량이 공정점을 지나면서 연신율은 급격히 줄어들게 되므로⁽¹⁸⁾, 과공정합금인 A390은 357과 319에 비하여 매우 낮은 연신율을 나타내었다.

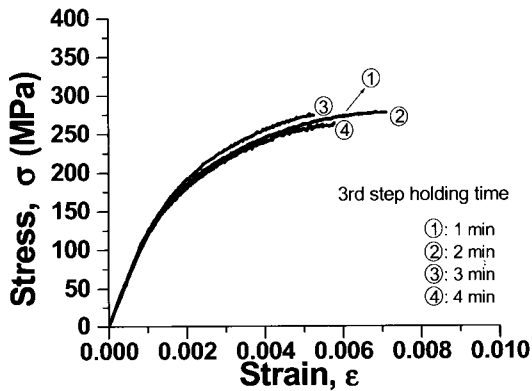


Fig. 20 Stress-strain curve of reheated A390 alloy

Table 3은 357, 319, A390의 3단계 가열유지시간의 변화에 따른 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 3 Mechanical properties of 357, 319 and A390 for variation of holding time

Material	Holding time (min)	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield stress (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Elongation (%)
357	1	213	143	98	2.2
	2	288	158	107	5.7
	3	303	180	101	4.7
	4	270	148	101	5.0
319	1	309	154	106	4.7
	2	324	153	98	6.5
	3	335	179	106	5.7
	4	353	185	110	6.3
A390	1	277	277	107	0.7
	2	278	278	115	0.8
	3	275	275	114	0.5
	4	263	263	115	0.6

3.4 반응용성형공정에서 구상화의 크기와 응력-변형률 관계의 수식화

부품설계에 있어서 소재의 응력-변형률 사이의 관계식이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 부품설계에 필요한 data를 제공하기 위하여 구상의 크기를 고려한 응력과 변형률 사이의 관계식을 도출하고자 하였다.

탄성영역에서 응력-변형률관계는 후크의 법칙($\sigma = E\epsilon$)으로 표현할 수 있으며, 소성영역에서는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (3)$$

σ : stress

ϵ : strain

K : strength coefficient

n : strain-hardening exponent

Table 4 Strength coefficient and strain-hardening exponent for variation of equivalent diameter

357			319			A390		
D_{eq} (μm)	K (MPa)	n	D_{eq} (μm)	K (MPa)	n	D_{eq} (μm)	K (MPa)	n
118	554	0.24	130	796	0.29	68	2328	0.41
110	559	0.23	108	719	0.27	61	2141	0.38
104	572	0.24	98	715	0.25	67	3194	0.46
94	598	0.22	92	754	0.25	65	2630	0.43

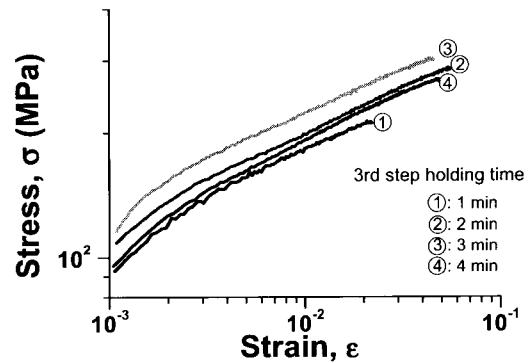


Fig. 21 Strain-stress curve of reheated 357 alloy in logarithmic coordinates

응력과 변형률을 로그-로그좌표계에 표시하면, 응력-변형률은 선형적인 관계를 나타내므로 K, n값을 쉽게 구할 수 있다. Fig. 21~23은 각각 357, 319, A390합금의 가열유지시간 변화에 따른 응력-변형률 선도를 탄성변형영역은 제외하고 소성변형영역에 한하여 로그-로그좌표계에 나타낸 것이다.

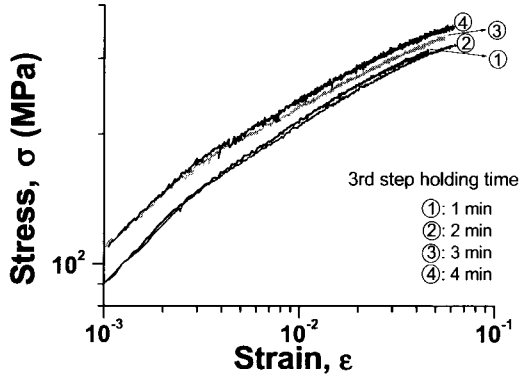


Fig. 22 Strain-stress curve of reheated 319 alloy in logarithmic coordinates

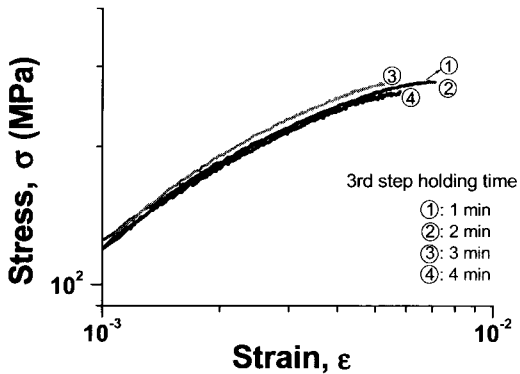


Fig. 23 Strain-stress curve of reheated A390 alloy in logarithmic coordinates

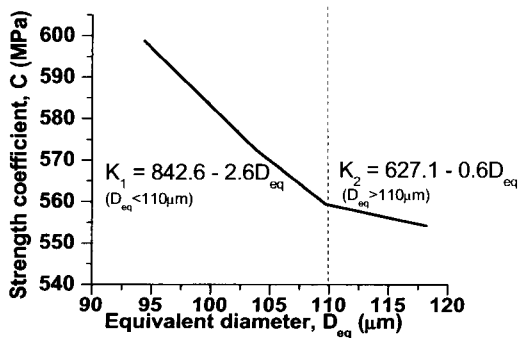


Fig 24. Strength coefficient for variation of equivalent diameter (357)

위의 방식으로 구한 등가지름의 변화에 따른 K와 n 값을 Table 4에 나타내었다. Fig. 24와 같이 K값을 D_{eq} 의 함수로 나타낼 수 있으며, 반응용재료의 구상화의 크기를 고려한 응력식을 구할 수 있다. D_{eq} 가 $110\mu\text{m}$ 일 때를 기점으로 K 값이 크게 변화하므로 D_{eq} 를 두 구간으로 나누어서 각 구간별로 D_{eq} 와 K의 관계식을 구하였다.

본 연구에서 측정된 구상의 크기와 응력-변형률 선도의 자료가 각 소재당 4개씩 정확한 식을 도출하기엔 다소 부족하였다. 향후 연구에서 등가지름에 따른 응력-변형률 선도를 충분히 확보한다면, 반응용성형품의 부품설계에 응용될 수 있는 보다 적절한 응력식을 구할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

반응용 성형공정에서 가열유지시간의 변화에 따른 기계적 성질 및 미세조직을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 357합금의 경우 3단계 가열유지시간 변화에 따라 인장강도와 연신율이 많은 차이를 보였으며, 가열유지시간이 약 3분일 때 구상화 조직의 평균등가지름이 $94\mu\text{m}$ 로 가장 작았으며, 인장강도가 303MPa 로 가장 큼을 알 수 있었다.

(2) 319합금의 경우 가열유지시간이 1~4분인 구간에 한해서 가열유지시간이 증가할수록 구상화 조직의 크기가 작아졌으며 인장강도는 증가하였다. 가열유지시간이 4분인 경우 평균등가지름이 $92\mu\text{m}$ 로 가장 작으며, 인장강도는 353MPa 로 가장 높았다.

(3) A390합금의 경우 가열유지시간이 2분일 때 구상화 조직의 평균등가지름이 $61\mu\text{m}$ 로 가장 작으며, 인장 강도가 278MPa 연신율 0.8%로 가장 높았으나, 아공정합금에 비해 구상의 크기변화가 미소하며, 인장강도와 연신율의 변화도 적음을 알 수 있었다.

(4) 반응용 성형공정에서 구상화의 크기를 고려한 응력식을 구하는 방안을 제안하였으며, 반응용 부품설계에 필요한 D/B를 구축하였다.

참고 문헌

- (1) K. P. Young, R. Fitze, 1994, "Semi-Solid Metal Cast Aluminum Automotive Components", Proc. of 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tokyo, June 1994, M. Kiuchi, eds., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Tokyo Japan, pp.155~176.

- (2) Kitamura K, Ando Y., Hironaka K., Yahata S., Yoshida C., 1994, "Die Casting of Aluminum Alloy in Semi-Solid State", Proc. of 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tyoko, June 1994, M. Kiuchi. eds., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Tokyo Japan, pp.181~189.
- (3) T. Witulski, A. Winkelman, G. Hirt, 1996, "Thixoforming of Aluminum Components for Lightweight Structure", Proc. of 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, June 1996, D. H. Kirkwood, P. Kapranos, eds., Univ. of Sheffield, Sheffield, UK, pp.242~247.
- (4) W. L. Winterbottom, 2000, "Semi-Solid Forming Applications : High Volume Automotive Products", Proc. of 6th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Turin(Italy), Sep. 2000, edited by G. L. Chiaretta and M. Rosso, pp.73~78.
- (5) C. G. Kang H. K. Jung, Y. J. Jung, 1999, "Coil design of induction heating and reheating process of aluminum alloys for thixoforming", Advanced Technology of Plasticity, vol.3, Springer, Ed. by M.Geiger, pp.1689~1694.
- (6) H. K. Jung, C. G. Kang, 2000, "Reheating Process of cast and wrought aluminum alloys for thixoforming and their globularization mechanism", J. of Materials Processing Tech, vol. 104, pp.244~253.
- (7) S. Midson, V. Rudnev, R. Gallik, 1998, "The Induction Heating of Semi-Solid Aluminium Alloys", Proc. of 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Golden, CO, June 1998, A. K. Bhasin, J. J. Moore, K. P. Young, S. Midson eds., Colorado School of Mines, Golden, CO, pp.497~504.
- (8) W. R. Loué, M. Brimont, C. Pluchon, P. Y. Menet, M. Garat, 1995, "Metallurgical Aspects of Thixoforming of A356.0 and 357.0 Alloys", NADCA Transactions, Indianapolis, Oct. pp.389~396.
- (9) S. Sannes, H. Gjestland, L. Arnberg and J. K. Solberg, 1994, "Microstructure coarsening of semi-solid Mg alloys", Proc. of 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tyoko, June 1994, M. Kiuchi. eds., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Tokyo Japan, pp.75~84.
- (10) Nan Wang, Jiang Wu and Guangji Shu, 1994, "Tensile and compression properties of stircast Al-5%Cu and Al-80%Zn", Proc. of 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Tyoko, June 1994, M. Kiuchi. eds., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Tokyo Japan, pp.127~134.
- (11) M. Ferrante, E. de Freitas, 1999, "Rheology and Microstructural Development of a Al-4wt%Cu Alloy in the Semi-Solid State", Materials Science & Engineering, Vol. A271, pp.172~180.
- (12) H. K. Jung, 2000, "The Induction Heating Process of Semi-Solid Aluminium Alloys for Thixoforming and their Microstructure Evaluation", J. of Materials Processing Tech., Vol. 105, pp.176~190.
- (13) ALTHIX[®] Billets, 1996, Aluminium Pechiney
- (14) H. K. Jung, C. G. Kang, 1999, "A Study on Induction Heating Process of Al-6%Si-3%Cu-0.3Mg Alloy for Thixoforming", Journal of the Korean Foundrymen's Society, Vol. 19, No. 3, pp.25~35.
- (15) H. K. Jung, C. G. Kang, 1999, "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6 Pct Si-3 Pct Cu-0.3 Pct Mg Alloy for Thixoforming", Metallurgical Transactions A, Vol. 30A, pp.2967~2977.
- (16) Jonathan A. Danzig and Stephen P. Midson, 1992, "Billet Heating for Semi-Solid Forming", Proc. of 2nd Int. Conf. on the Semi-Solid processing of Alloys and Composites, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, June 10-12, 1992, edited by Stuart B. Brown and Metron C. Flemings, pp. 105~118.
- (17) Metals Hand Book, 1984, American Society for Metals.
- (18) 알루미늄의 조직과性質, 1991, 輕金屬學會.