

논문

용탕 단조 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도에 미치는 합금 원소 및 열처리 조건의 영향

이학주 · 황재형* · 권해욱**†

부산시 남구 용당동 535 동명대학교 조선공학과

*경북 고령군 다산면 송곡리 1434 대한특수금속(주)

**경북 경산시 대동 214-1 영남대학교 신소재공학부

Effects of Alloying Element and Heat-Treatment Condition on the Strength of Squeeze-Casted Al-3.0 wt%Si Alloy

Hagju Lee, Jae-Hyoung Hwang* and Hae-Wook Kwon**†

Dept. of Naval Architecture, Tongmyoung University, 535 Yougdang-Dong, Nam-Gu, Busan, 608-711

*Daehan Special Metal Co. LTD., 1434 Songgok-Ri, Dasan-Myun, Goryong-Gun, Gyeongbuk, 717-872

**School of Mat. Sci. & Eng., Yeungnam University, 214-1 Dae-Dong, Gyeongsan, Gyeongbuk, 712-749

Abstract

The effects of alloying element and the condition of heat-treatment on the strength of squeeze-cast Al-3.0 wt%Si alloy were investigated. The strength of the alloy without grain refinement was increased with increase Cu content upto 3.0 wt% and rather decreased beyond that. The tensile strength of the alloy with grain refinement increased with Cu content upto 3.0 wt% and not changed beyond that. The strength of the alloy without grain refinement increased with the Mg content. The tensile strength with grain refinement increased with the Mg content upto 0.50 wt% and then decreased beyond that. The strength of the grain refined alloy increased by individual and simultaneous additions of Cu and Mg and the maximum strength was obtained with Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.50 wt%Mg alloy. The optimum heat-treatment condition for this alloy was obtained.

Key words : Squeeze casting, Strength, Mechanical property, Al-casting alloy, Al-Si alloy.

(Received November 3, 2006 ; Accepted December 10, 2006)

1. 서 론

알루미늄 합금은 비중이 낮고 비강도가 크므로 자동차, 항공기 및 선박 등의 운송 장비와 산업 기계 부품 등의 재료로 널리 사용되고 있다. 알루미늄 합금 주조품은 중력 주조법, 저압 주조법 및 다이캐스팅 등 다양한 방법으로 제조하고 있으며 제품의 형상, 크기, 품질 및 경제성 등을 고려하여 주조법이 선택된다. 이와 같은 주조법으로 다양한 제품을 생산하고 있으나 만족스러운 기계적 성질이나 품질의 요구 조건을 달성할 수 없는 경우도 많다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 특수 주조법으로는 급속응고, 반용융 그리고 용탕 단조법 등이 있다. 용탕 단조법은 주조법과 단조법의 장점을 동시에 얻을 수 있는 공정이며 가압 용고법이라고 부르기도 한다. 용탕을 하부 금형에 주입하고 유압 프레스를 이용하여 플伦저(plunger)를 하강시켜 금형 속의 용탕에 압력을 가한 상태에서 용고가 일어나게 하는 방법이다[1,2].

주조용 알루미늄-규소 합금을 용해한 후 주조품의 미세 조직

과 기계적 성질을 개선하기 위하여 용탕 처리를 한다[3]. 경질 양극 산화 처리할 수 있는 용탕 단조용 알루미늄 합금을 개발하기 위한 기초 연구를 하였다. 아공정 알루미늄 합금의 용탕 단조시 유동도는 용고 범위가 클수록 감소하였으나 결정립 미세화 처리로 크게 개선되었다[4,5]. 용탕 단조한 알루미늄-규소 합금의 경질 양극 산화 피막 특성에 미치는 규소 함량과 용탕 처리의 영향을 시험하였으며 규소 함량이 낮을수록 피막의 두께가 증가하고 치밀하였다. 아공정 합금의 경우 결정립 미세화 처리도 피막의 특성이 크게 개선되었다[6]. Al-3.0 wt%Si 합금은 용탕 단조시 유동도는 나쁘나 결정립 미세화 처리로 크게 개선되었고 용탕 단조 합금의 경질 양극 산화 피막 특성이 매우 우수하였다[4-6]. 따라서 경질 양극 산화 피막 특성이 우수한 용탕 단조용 알루미늄 합금을 개발하기 위한 알루미늄-규소 2원계 합금의 최적 조성으로 Al-3.0 wt%Si 합금을 선택하였다.

시효 경화 열처리에 의하여 알루미늄-규소 합금의 강도와 경도를 증가시키기 위하여 구리와 마그네슘과 같은 합금 원소를 첨가한다. 알루미늄-규소 합금의 경우 구리와 마그네슘을 첨가

[†]E-mail : hkwon@yu.ac.kr

하면 고용 경화 효과와 함께 시효 경화 효과가 있다. 주조용 알루미늄 합금에 구리를 합금 원소로 첨가하면 초정 α 텐드라이트 내에 고용된다. 시효 경화 처리를 하면 초정 α 텐드라이트 내에서 GP존(zone)을 거쳐 θ' 상이 형성하는 과정에서 강도와 경도가 증가한다[7]. 주조용 알루미늄-규소 합금에 마그네슘을 첨가하면 이 원소도 초정 α 텐드라이트 내에 고용된다. 시효 경화 처리하는 동안 Mg_2Si 미세 입자가 석출하여 강도 및 경도가 증가한다[8]. 경질 양극 산화 처리할 수 있는 용탕 단조용 알루미늄 합금을 개발하기 위해서는 용탕 단조 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도에 미치는 구리 및 마그네슘의 영향과 열처리 조건의 영향을 연구할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 용탕 단조한 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도에 미치는 구리와 마그네슘의 단독 및 동시 첨가의 영향을 연구하였다. 이 결과를 근거로 최적 화학 조성을 선택한 다음 용체화 처리 및 시효 처리의 온도와 시간의 영향을 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 용탕 단조 장치 및 시편

알루미늄 합금을 용탕 단조하여 시편을 제작하였다. 시편을 제작하기 위한 40 ton 용량의 용탕 단조 장치는 Fig. 1에서 보이는 바와 같다. 플런저의 하강 속도는 260~2,250 mm/min의 범위이며 단면의 가로와 세로가 각각 80 및 75 mm인 플런저를 이용하여 90 MPa까지 압력을 가할 수 있다. 용탕 단조 시편을 제조하기 위한 금형은 상부 및 하부 금형으로 구성되며 상부 금형 윗면에 노출된 입구로 용탕을 주입할 수 있다. 플런저를 가동하여 아래 및 위에 가로 방향으로 각각 폭 15 mm 부분의 두께가 19 mm, 가운데 나머지 부분의 두께가 9 mm 그리고 가로 및 세로가 각각 80 및 75 mm인 시편을 제조하였으며 시편의 모양과 크기는 Fig. 2에서 보이는 바와 같다.

2.2 용해 및 용탕 단조

용탕 단조시 결정립 미세화 처리하거나 그렇지 않은 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도에 미치는 0.0~0.6 wt% 범위에서

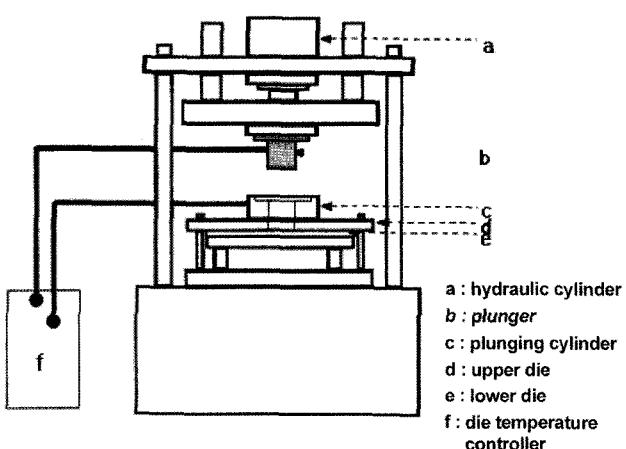


Fig. 1. Squeeze casting apparatus.

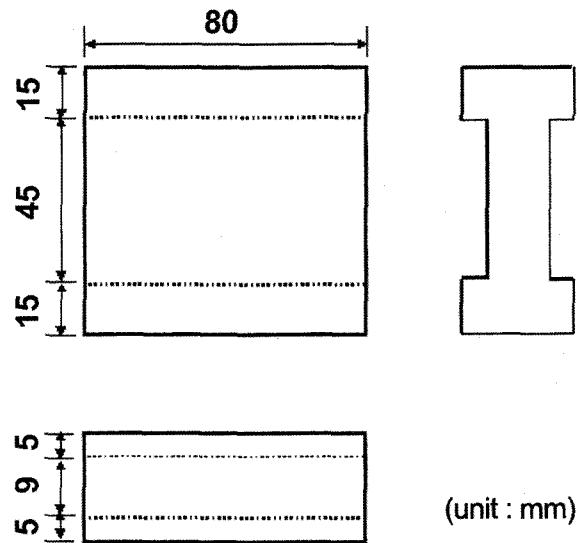


Fig. 2. Squeeze-casted specimen to be machined to that for tensile test.

1.5 wt% 간격으로 변화시킨 구리와 0.00~1.50 wt% 범위에서 0.25 wt% 간격으로 변화시킨 마그네슘의 영향을 시험하기 위한 시편을 제조하였다. Al-5 wt%Ti-1 wt%B 합금을 사용하여 0.15 wt%의 티타늄을 첨가하는 방법으로 결정립 미세화 처리한 경우 3.0 및 4.5 wt%의 구리와 0.50 및 0.75 wt%의 마그네슘을 동시에 첨가하여 용탕 단조한 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도에 미치는 영향을 시험하기 위한 시편을 제조하였다. 또한 강도에 미치는 열처리의 영향을 시험하기 위하여 인장 시험 결과 강도가 가장 우수한 것으로 나타난 Al-3.0 wt%Si-4.50 wt% Cu-0.50 wt%Mg 조성의 4원계 합금을 선택하여 결정립 미세화 처리한 후 용탕 단조하여 시편을 제조하였다.

3.5 kW 용량의 박스로와 지름과 깊이가 각각 85 및 105 mm인 흑연 도가니를 이용하여 Al-Si 합금을 용해하였다. 흑연 도가니에 240 g의 장입물을 장입하고, 열분석 실험을 통하여 각 조성별로 얻은 액상선 온도보다 100°C 높은 온도에서 주입하였다. 용탕의 온도는 K 형태의 열전대를 부착시킨 침직식 온도계를 이용하여 측정하였다. 장입물로는 공업적으로 순수한 알루미늄 및 Al-10 wt%Si 조성의 인고트를 사용하였으며 합금 원소 첨가를 위해서는 순도 99.90 wt%의 동판과 순도 99.93 wt%의 마그네슘 인고트를 사용하였다. 결정립 미세화 처리를 하는 경우 용탕 중량의 0.15 wt%의 티타늄을 첨가하였으며 Al-5 wt%Ti-1 wt%B 모합금 봉을 사용하였다. 장입물, 합금원소 첨가 및 결정립 미세화제의 화학 조성은 Table 1에서 보이는 바와 같다.

먼저 금형 온도 조절기를 가동하여 플런저와 하부 금형에 열매체유를 순환시켜 금형 온도를 250°C로 유지시켰다. 용탕 처리를 하지 않은 2원계 합금의 경우에는 장입물이 용해된 도가니를 박스로로부터 방출시켜 용탕의 온도를 측정한 후 금형에 바로 주입하였다. 그리고 결정립 미세화 처리를 하는 경우에는 장입물이 용해된 도가니를 박스로로부터 방출시키고 결정립 미세화 처리제를 첨가한 후 용탕을 스터링(stirring)하고 용

Table 1. Chemical analyses of materials for charging, adding alloying element and grain refinement.

element	Al	Si	Fe	Ni	Cu	Mg	Ti	B	remark
pure Al	99.70	0.06	0.13	-	-	-	-	-	
Al-10 wt%Si	89.47	10.16	0.14	0.01	-	-	-	-	
Pure Cu	-	-	-	-	99.90	-	-	-	
Pure Mg	-	-	-	-	-	99.93	-	-	
Al-5%Ti-1%B	bal.	0.06	0.17	-	-	-	4.90	0.96	

탕의 온도를 측정하고 주입하였다. 이때 결정립 미세화제는 모 합금 인고트를 필요한 중량만큼 절단하여 첨가하였으며 2원계 합금의 액상선 온도인 639°C보다 100°C 높은 온도에서 주입하였다[4-6]. 용탕을 금형에 주입한 후 즉시 용탕 단조 장치를 가동하여 플런저를 하강시켜 용탕에 압력을 가하였다. 플런저는 3,000 mm/min의 속도로 하강하여 용탕과 접촉하는 순간부터 260 mm/min의 속도로 하강하여 60 MPa의 압력을 가하고 30초동안 유지시켜 용탕 단조하였다. 플런저를 상승시킨 후 금형을 분리하여 방출핀을 가동하여 시편을 얻었다.

2.3 인장 시험

용탕 단조하여 얻은 Fig. 2에서 보이는 바와 같은 시편을 절단 및 절삭 가공하여 표점 거리와 직경이 각각 25.0 및 6.25 mm인 ASTM E8 규격의 서브사이즈 인장 시편을 제조하였다. 인장 시편의 모양과 크기는 Fig. 3에서 보이는 바와 같다.

투영기를 이용하여 인장 시편의 직경을 측정한 후 50 ton 용량의 만능 재료 시험기를 이용하여 인장 시험하였다. 두 개의 직경과 길이가 각각 40 및 300 mm인 STS 316 스테인레스 강 치구에 인장 시편을 끼운 조립체를 만능 재료 시험기에 장착하여 인장 하중을 가하였으며 이때 크로스 헤드 속도는 0.5 mm/min였다. 항복 및 인장 강도를 측정하였으며 각 조건에서 3개의 인장 시편을 사용하여 시험한 후 평균값을 얻었다.

2.4 열처리 시험

2.4.1 열처리로

용체화 처리용으로는 5.4 kW 용량의 관상로를 그리고 시효 처리용으로는 14 kW 용량의 관상로를 이용하여 T₆ 열처리를 하였다. 발열체가 칸탈인 전자의 로에는 내경, 두께 및 길이가 각각 46, 3 및 1,000 mm인 한쪽 끝이 막힌 석영관을 장착하

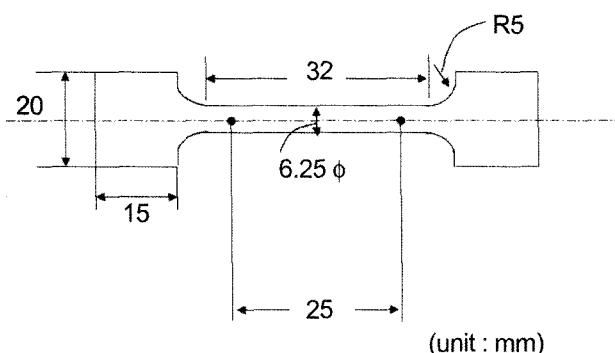


Fig. 3. Tensile test specimen.

었다. 두께와 직경이 각각 5 및 65 mm인 스테인레스 강 원판을 이용하여 석영관의 뚫린 쪽을 막고 고무호스로 아르곤 기체 용기에 연결시킨 내경과 길이가 각각 3 및 1,320 mm인 스테인레스 강 관을 삽입하고 아르곤 기체를 공급하여 용체화 처리하는 동안 아르곤 기체 분위기를 유지시킬 수 있게 하였다. 닉롬선이 빌열체인 후자의 로에는 내경, 두께 및 길이가 각각 75, 8 및 1,000 mm인 양쪽 끝이 모두 뚫려있는 알루미나 관을 장착하였다. 두께와 직경이 각각 13 및 138 mm인 스테인레스 강 원판으로 알루미나 관의 양쪽을 막고 전자의 로와 마찬가지 방법으로 시효 처리하는 동안 아르곤 기체 분위기를 유지시킬 수 있게 하였다.

2.4.2 용체화 처리 조건의 영향

결정립 미세화 처리한 후 용탕 단조한 상태에서 강도가 제일 큰 것으로 나타난 Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.5 wt%Mg 조성의 4 원계 합금을 선택하여 이 합금의 강도에 미치는 용체화 처리 온도와 시간의 영향을 시험하였다. 열분석 시험을 한 결과 공정 온도는 512°C로 나타났다. 따라서 이 온도보다 낮은 485~505°C의 온도 범위에서 10°C 간격으로 용체화 처리 온도를 변화시켰다. 또한 8분 동안 그리고 15~90분의 범위에서 15분 간격으로 용체화 처리 시간을 변화시켜 용체화 처리한 후 상온의 물에 퀸칭하였다. 그리고 모든 경우에 160°C의 온도에서 16 시간 동안 시효 처리한 후 공냉하였다. 이와 같은 방법으로 시효 경화 처리한 인장 시편을 시험하여 항복 및 인장 강도를 측정하였다.

2.4.3 시효 처리 조건의 영향

결정립 미세화 처리한 후 용탕 단조한 Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.5 wt%Mg 합금 시편을 절단 및 절삭 가공하여 제조한 인장 시편을 485°C의 온도에서 60분동안 용체화 처리한 후 상온의 물에 퀸칭하였다. 그리고 130~190°C의 범위에서 30°C 간격으로 온도를 그리고 4~24 시간의 범위에서 4시간 간격으로 시간을 변화시켜 시효 처리하였다. 각 조건별로 시효 경화 처리한 인장 시편을 시험하여 시효 처리 조건의 강도에 미치는 영향을 시험하였다.

2.5 화학 조성 분석, 조직 관찰 및 전자 프로브 미세 분석

용탕 단조하여 얻은 Fig. 2에서 보이는 바와 같은, 시편의 두꺼운 부분을 절단하여 단면의 가로와 세로가 각각 19 및 15 mm이고 길이가 40 mm인 화학 성분 분석용 봉형 시편을 얻었다. 용탕 단조 시편의 가운데, 두께가 9 mm인, 부분에 연결된 부분을 절단한 면을 200 번 연마자로 연마한 후 방출 스펙트럼 분석 장치(emission spectrometer)를 이용하여 화학 조성을 분석하였다.

결정립 미세화 처리한 시편의 용탕 처리 결과를 확인하기 위하여 거시 조직을 관찰하였다. 용탕 단조하여 얻은, Fig. 2에서 보이는 바와 같은, 시편을 절단하여 가운데 부분으로부터 가로와 세로가 각각 40 그리고 두께가 9 mm 크기의 거시 조직 관찰용 시편을 얻었다. 각 조건별로 시편을 얻어 2000 번 까지의 연마지로 연마 및 수세한 후 에틸 알코올로 세척 및 건조시키고 Tucker 부식 용액으로 부식시켜 거시 조직을 관찰하였다[9]. 강도에 미치는 용체화 처리 온도 및 시간의 영향에 관한 원인을 알아보기 위하여 열처리한 시편의 미세 조직을 관찰하였다. 인장 시험 후 인장 시편의 헤드 부분을 절단 및 보통의 방법으로 조연마하고 1 μm 등급까지 다이아몬드 페이스트로 세연마하였다. 에틸 알코올로 세척한 후 0.5% 불산 용액으로 부식시켜 광학현미경으로 관찰하였다.

용탕 단조한 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도에 미치는 구리와 마그네슘 단독 첨가의 영향의 원인을 규명하기 위하여 전자프로브 미세 분석을 하여 구리 또는 마그네슘의 상대적 편석 정도를 비교하기 위하여 특성 X-선의 상 지도(image map)를 얻었다. 3.0 및 6.0 wt%의 구리를 첨가하고 결정립 미세화 처리하지 않는 합금의 경우 구리의 상대적인 편석 경향을 그리고 0.50 및 1.50 wt%의 마그네슘을 첨가하고 결정립 미세화 처리한 합금의 경우 마그네슘의 편석 상대적인 경향을 각각 비교하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 화학적 조성 분석 및 거시 조직 관찰

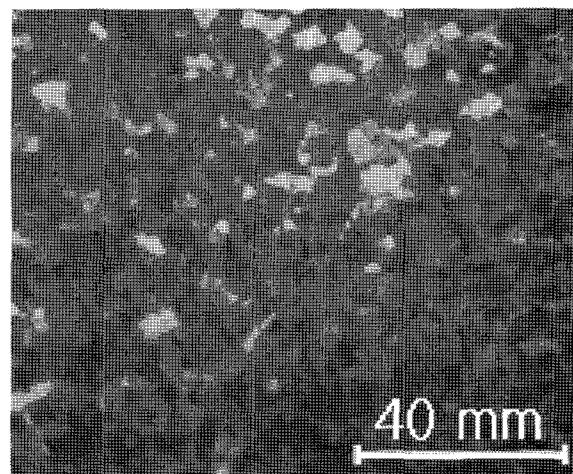
각 시험 조건별로 용탕 단조 시편의 화학 조성을 분석하였으며 모든 경우에 규소, 구리 및 마그네슘의 함량은 허용 범위를 벗어나지 않은 것으로 나타났다. 결정립 미세화 처리를 하기 위하여 0.15%의 티타늄을 첨가한 경우 잔류 티타늄의 함량은 오차 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 불순물 원소인 철을 0.13~0.14 wt%로 매우 낮았다.

2 원계 및 3 원계 합금의 경우 화학 조성별로 그리고 4 원계 합금은 모든 경우에 결정립 미세화 처리를 하였으며 그 결과를 확인하기 위하여 거시 조직을 관찰하였다. 대표적인 Al-3.0 wt%Si-0.25 wt%Mg 조성의 용탕 단조 합금의 결정립 미세화 처리에 따른 거시 조직의 변화는 Fig. 4에서 보이는 바와 같다. Al-5.0 wt%Ti-1.00 wt%B 모합금을 첨가하여 결정립 미세화 처리한 모든 경우에 초정 α 결정립이 미세화된 것으로 나타났다.

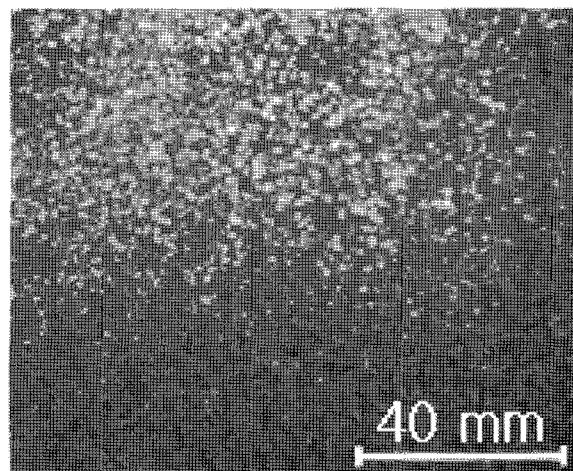
3.2 용탕 단조한 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도에 미치는 합금 원소의 영향

3.2.1 구리 첨가의 영향

결정립 미세화 처리하였거나 그렇지 않은 용탕 단조 Al-3.0 wt% 합금의 강도에 미치는 구리의 영향을 시험하기 위하여 0.0~6.0 wt%의 범위에서 1.5 wt% 간격으로 구리의 함량을 변화시켰다. 구리 첨가량의 변화에 따른 결정립 미세화 처리하지 않은 용탕 단조 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도 변화는 Fig. 5에서 보이는 바와 같다. 구리의 첨가량이 0.0에서 3.0 wt%까지



(a) no treatment



(b) grain refinement

Fig. 4. Influences of grain refinement on the macrostructure of squeeze-casted Al-3.0%Si-0.25%Mg alloy specimen.

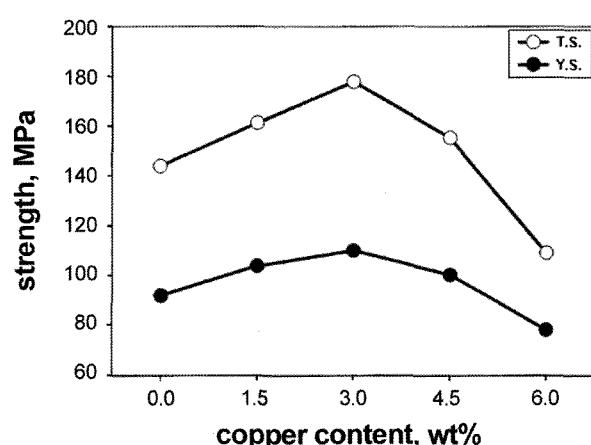


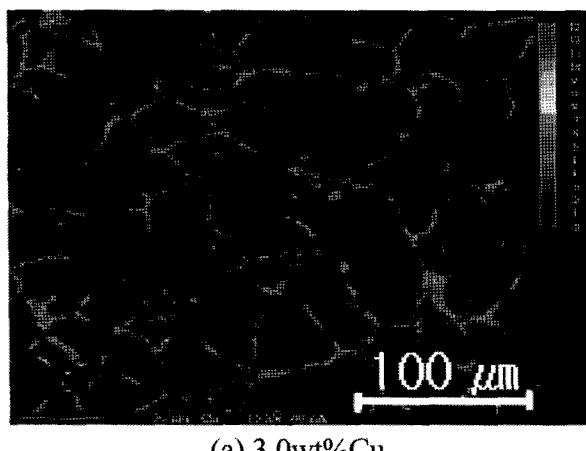
Fig. 5. Effect of copper on the strength of the squeeze-casted Al-3.0 wt%Si alloy without grain refinement.

증가함에 따라 항복 및 인장 강도는 각각 91.9 및 144.0에서 110.1 및 177.9 MPa로 증가하였으나 3.0~6.0 wt% 범위에서

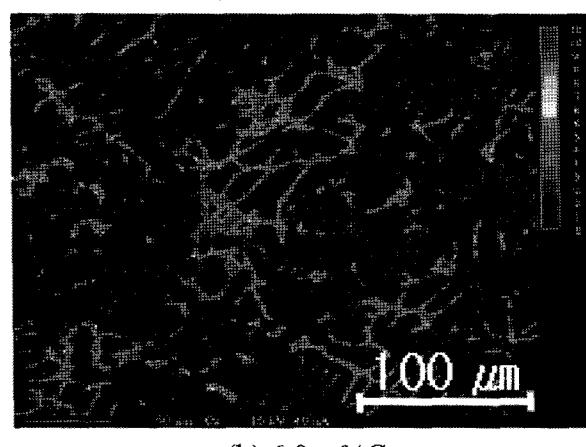
증가함에 따라서는 78.1 및 109.1 MPa로 오히려 감소하였다.

구리의 첨가량이 3.0 wt%까지 증가함에 따라 자유 덴드라이트 형트의 등축정인 초정 α 결정립 내에 고용된 구리의 함량이 증가하여 고용 강화 효과가 증가하였기 때문에 강도가 증가한 것으로 생각된다. 그러나 구리의 첨가량이 3.0 wt%를 초과하여 증가함에 따라 초정 α 결정립의 고용 한도를 초과하게 되고 응고가 일어날 때 결정립계와 자유 덴드라이트의 이차 아암사이의 영역에서 미세 편석이 일어나 구리 함량이 높으면 단단하고 취성이 큰 2차상(θ)이 형성하고 그 부피 분률이 증가하여 강도는 감소하였을 것이다[11]. 이를 확인하기 위한 구리 원자의 전자 프로브 미세 분석(Electron Probe Micro-Analysis, EPMA) X-선 상지도(image map)는 Fig. 6에서 보이는 바와 같다. 구리의 첨가량이 3.0%에서 6.0%로 증가함에 따라 결정립계와 자유 덴드라이트의 2차 아암사이 영역에서 구리 원자의 미세 편석이 매우 크게 증가하였음을 알 수 있다.

용탕 단조 Al-3.0 wt% 합금의 인장 강도에 미치는 구리 첨가량의 영향과 함께 결정립 미세화 처리의 영향은 Fig. 7에서 보이는 바와 같다. 결정립 미세화 처리로 인장 강도는 증가하였으며 그 효과는 구리의 첨가량이 3.0 wt%를 초과하여 증가함에 따라 더 커졌다. 이것은 용탕 처리로 결정립이 미세해짐과



(a) 3.0wt%Cu



(b) 6.0wt%Cu

Fig. 6. Result of EPMA showing the variation of the degree of microsegregation of Cu with its content in the squeeze-casted Al-3.0 wt%Si alloy.

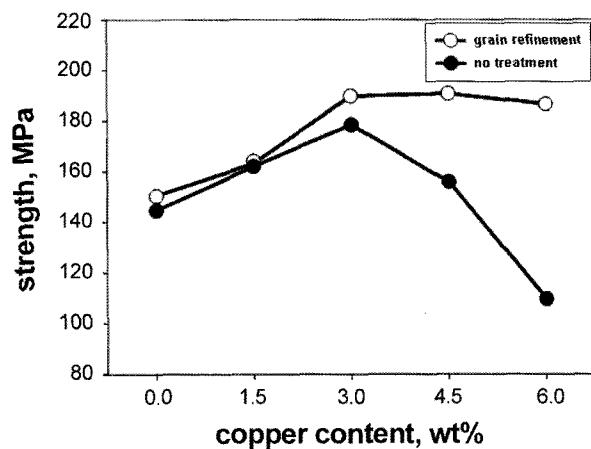


Fig. 7. Effects of Cu content and grain refinement on the tensile strength of the squeeze-casted Al-3.0 wt%Si alloy.

동시에 초정 α 자유 덴드라이트도 미세화되어 2차 아암간 거리도 감소하여 미세 편석이 감소하여 강도는 증가하였을 것이다. 결정립 미세화 처리를 한 경우 구리의 첨가량이 3.0 wt% 까지 증가함에 따라 결정립 미세화 처리를 하지 않은 경우와 마찬가지로 인장 강도는 증가하였으나 그 이상으로 첨가량이 증가함에 따라서는 크게 변화하지 않았다. 그러나 구리의 첨가량은 고용한도를 초과할 것으로 생각되는 6.0 wt%까지는 첨가할 필요가 없을 것으로 판단되어 구리의 최적 첨가량은 3.0~4.5 wt% 범위인 것으로 생각되었다.

3.2.2 마그네슘 첨가의 영향

결정립 미세화 처리하였거나 그렇지 않은 용탕 단조 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도에 미치는 마그네슘의 영향을 조사하기 위하여 0.00~1.50 wt%의 범위에서 0.25 wt% 간격으로 마그네슘의 첨가량을 변화시켰다. 마그네슘 첨가량의 변화에 따른 결정립 미세화 처리하지 않은 용탕 단조 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도 변화는 Fig. 8에서 보이는 바와 같다. 마그네슘 첨가량이 증가함에 따라 항복 강도는 91.9~130.7 MPa 범위에서 그리고 인장 강도는 144.0~189.8 MPa 범위에서 대체로 증가하였다. 이것은 마그네슘의 첨가량이 증가함에 따라 초정 α 결정립의

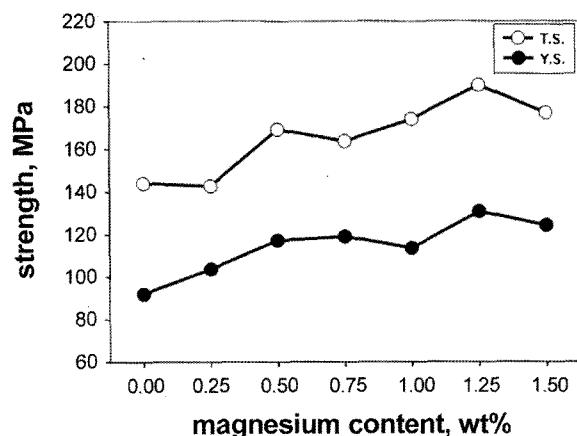


Fig. 8. Effect of magnesium on the strength of the squeeze-casted Al-3.0 wt%Si alloy without grain refinement.

마그네슘 함량 증가에 따른 고용 강화 효과의 증가와 함께 미세한 Mg₂Si 석출상 입자의 수와 부피 분률이 증가하여 석출 경화 효과가 증가하였기 때문으로 생각된다.

용탕 단조 Al-3.0 wt%Si 합금의 인장 강도에 미치는 마그네슘 첨가량의 영향과 함께 결정립 미세화 처리의 영향은 Fig. 9에서 보이는 바와 같다. 결정립 미세화 처리로 인장 강도는 증가하였으며 그 효과는 0.50 wt%의 마그네슘을 첨가한 경우가 가장 컸다. 이것은 구리를 첨가한 경우와 마찬가지로 결정립이 미세화되고 초정 α 텐드라이트의 2차 아암간 거리가 동시에 미세화되어 미세 편석은 감소하여 강도가 증가하였을 것이다. 결정립 미세화 처리를 한 경우 마그네슘 첨가량이 0.50 wt%까지 증가함에 따라 인장 강도가 149.7에서 218.2 MPa로 증가하였다가 그 이상으로 마그네슘 첨가량이 증가하면 오히려 감소하였다. 마그네슘 첨가량이 0.75 wt% 이상으로 증가하면 마그네슘의 함량이 초정 α 결정립의 고용한도를 초과하여 응고가 일어나는 동안 결정립계와 자유 텐드라이트의 2차 아암사이의 영역에 마그네슘의 미세 편석이 일어나 2차상 (Al₃Mg₂)이 형성하여 강도가 감소한 것으로 생각된다[11]. 이를 확인하기 위하여 0.50 및 1.50 wt%의 마그네슘을 첨가하고 결정립 미세화 처리한 합금에 대하여 마그네슘 원자의 전자 프로브 미세 분석(EPMA)을 하였으며 그 결과는 Fig. 10에서 보이는 바와 같다. 마그네슘의 첨가량이 1.50 wt%로 큰 경우가 0.50 wt%로 작은 경우에 비하여 결정립계와 자유 텐드라이트의 2차 아암사이 영역에의 마그네슘 원자의 미세 편석이 더 크게 일어났음을 알 수 있다. 그리고 결정립 미세화 처리 후 용탕 단조한 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도를 증가시키기 위한 최적 마그네슘 첨가량은 0.50~0.75 wt%인 것으로 생각되었다.

3.2.3 구리와 마그네슘 동시 첨가의 영향

결정립 미세화 처리한 후 용탕 단조한 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도를 증가시키기 위한 구리 및 마그네슘의 단독 첨가시 최적 첨가량의 범위는 각각 3.0~4.5 및 0.50~0.75 wt%인 것으로 판단되었다. 따라서 이 합금의 강도에 미치는 구리와 마그네슘 동시 첨가의 영향을 시험하였으며 그 결과는 Fig. 11에서 보이는 바와 같다.

Al-3.0 wt%Si의 2원계 합금에 3.0 및 4.5 wt%의 구리를 첨

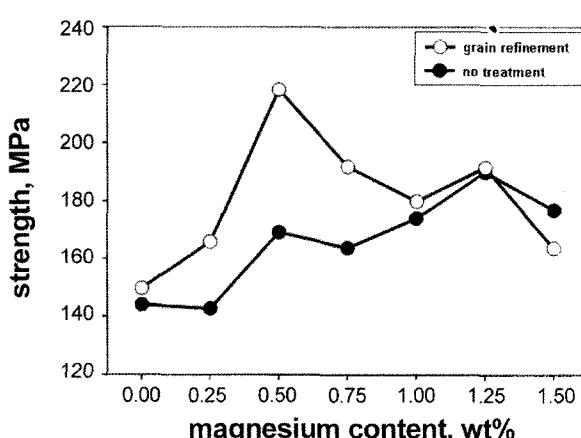


Fig. 9. Effects of Mg content and grain refinement on the tensile strength of the squeeze-casted Al-3.0 wt%Si alloy.

가함에 따라 강도는 증가하였다. Al-3.0 wt%Si-3.0 wt%Cu의 3원계 합금에 0.50 및 0.75 wt%의 마그네슘을 각각 첨가한 경우에는 강도가 크게 달라지지 않거나 오히려 감소하였다. 그러나 Al-3.0 wt%-4.5 wt%Cu-0.5 wt%Mg 합금의 경우에 최대 강도를 얻었으며 항복 및 인장 강도가 각각 149.2 및 211.7

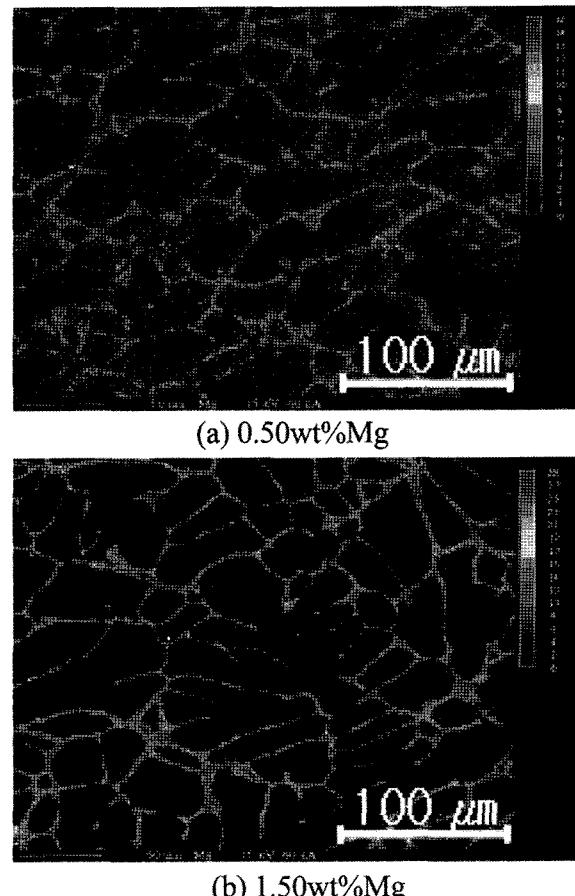


Fig. 10. Result of EPMA showing the variation of the degree of microsegregation of Mg with its content in the squeeze-casted Al-3.0 wt%Si alloy after grain refinement.

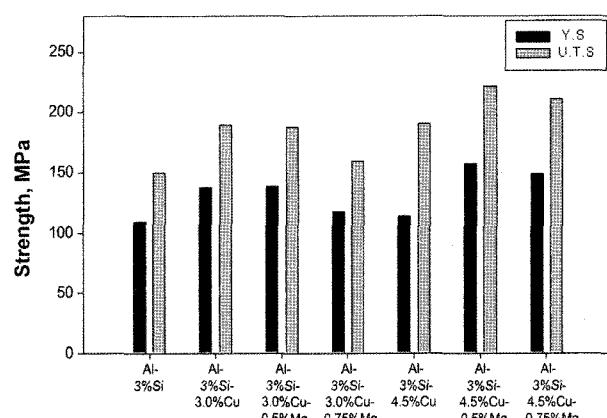


Fig. 11. Effect of simultaneous addition of Cu and Mg on the strength of the squeeze-casted Al-3.0 wt%Si alloy after grain refinement.

MPa인 것으로 나타났다. 따라서 이 합금의 조성이 4원계 합금의 최적 조성인 것으로 판단되었다.

3.3 열처리 조건의 영향

3.3.1 용체화 처리

결정립 미세화 처리한 후 용탕 단조한 상태에서 강도가 가장 큰 것으로 나타난 Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.50 wt%Mg 합금을 선택하여 열처리 조건의 영향을 시험하였다. 용탕 단조 시편을 절단 및 가공하여 제조한 인장 시편을 열처리하였다. 먼저 용체화 처리 온도와 시간의 영향을 시험하였다. 용체화 처리 온도를 485~505°C 범위에서 10°C 간격으로 변화시키고 시간을 8 분과 15~60 분 범위에서 15 분 간격으로 변화시켰다. 모든 경우에 160°C의 온도에서 16 시간동안 시효 처리 하였으며 그 결과는 Fig. 12에서 보이는 바와 같다.

주어진 용체화 처리 온도에서 용체화 처리 시간이 증가함에 따라 강도가 최고 값으로 증가하였다가 감소하였다. 용체화 처리 온도가 485°C로 낮을 때에는 용체화 처리 시간이 60 분까지 증가함에 따라 강도가 증가하였다가 그 이상으로 시간이 증가하면 오히려 감소하였다. 이와 같은 변화의 원인을 규명하기 위하여 미세 조직을 관찰하였으며 485°C의 용체화 처리 온도에서 시간이 증가함에 따른 미세 조직의 변화는 Fig. 13에서 보이는 바와 같다. 용체화 처리 시간이 60 분까지 증가함에 따라 미세 조직은 크게 달라지지 않는다. 그러나 그 이상으로 용체화 처리 시간이 증가하면 결정립계와 자유 텐드라이-

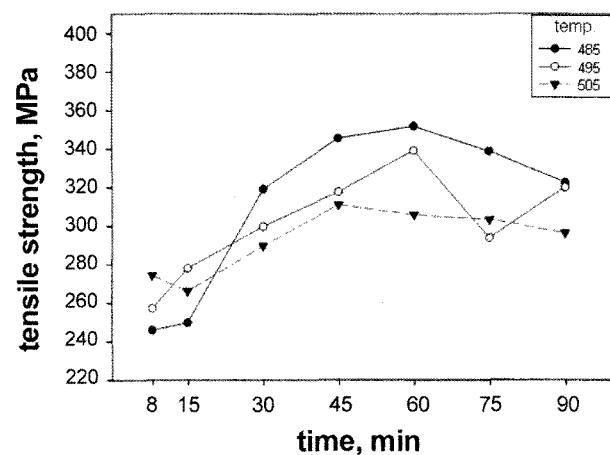


Fig. 12. Effects of solution treatment condition on the tensile strength of the squeeze-casted Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.50 wt% Mg alloy after grain refinement, aged 16 hrs at 160°C.

트의 2차 아암사이의 영역에서 공정 규모와 용질 원자의 2차 성이 조대해지고 결정립 성장이 일어났다. 따라서 주어진 용체화 처리 온도에서 시간이 증가함에 따라 강도가 최고 값으로 증가하였다가 그 이후에는 감소하였을 것이다.

용체화 처리 온도가 495 및 505°C로 증가하면 용체화 처리 시간이 8 및 15 분으로 짧을 경우에는 인장 강도가 485°C로 낮을 때보다 더 커졌으나 그 이상으로 시간이 증가하면 오히-

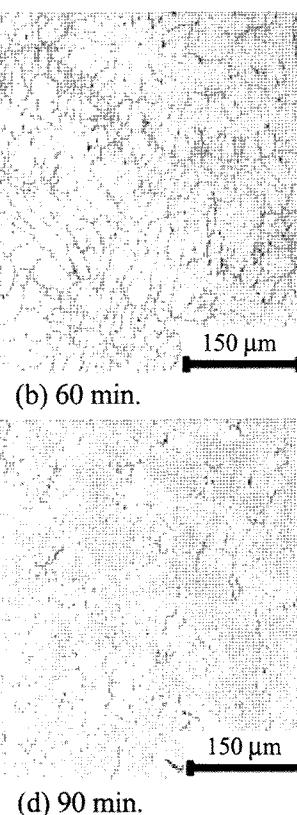
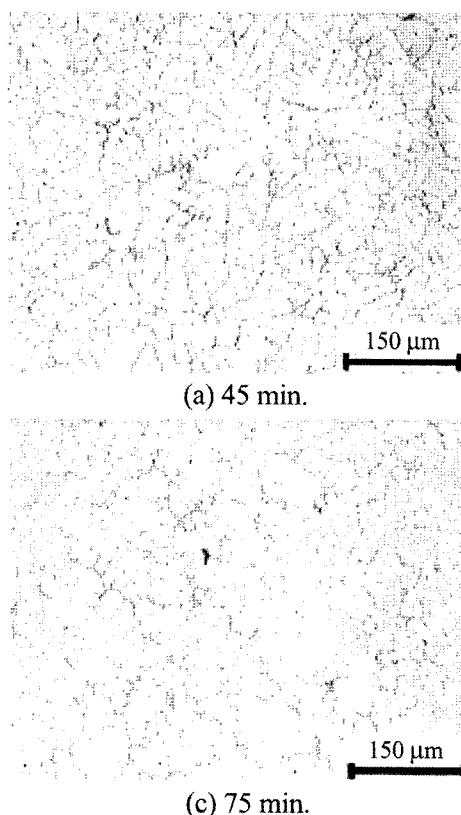


Fig. 13. Variation of microstructure of squeeze-casted Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.50 wt%Mg alloy after grain refinement with solution-treatment time at 485°C and aged for 16 hrs at 160°C.

려 더 낮아졌다. 그리고 용체화 처리 온도가 증가할수록 강도가 감소하였다. 용체화 처리 시간이 60 분으로 일정할 때 용체화 처리 온도가 증가함에 따른 미세 조직의 변화는 Fig. 14에서 보이는 바와 같다. 용체화 처리 온도가 485°C로 낮을 때

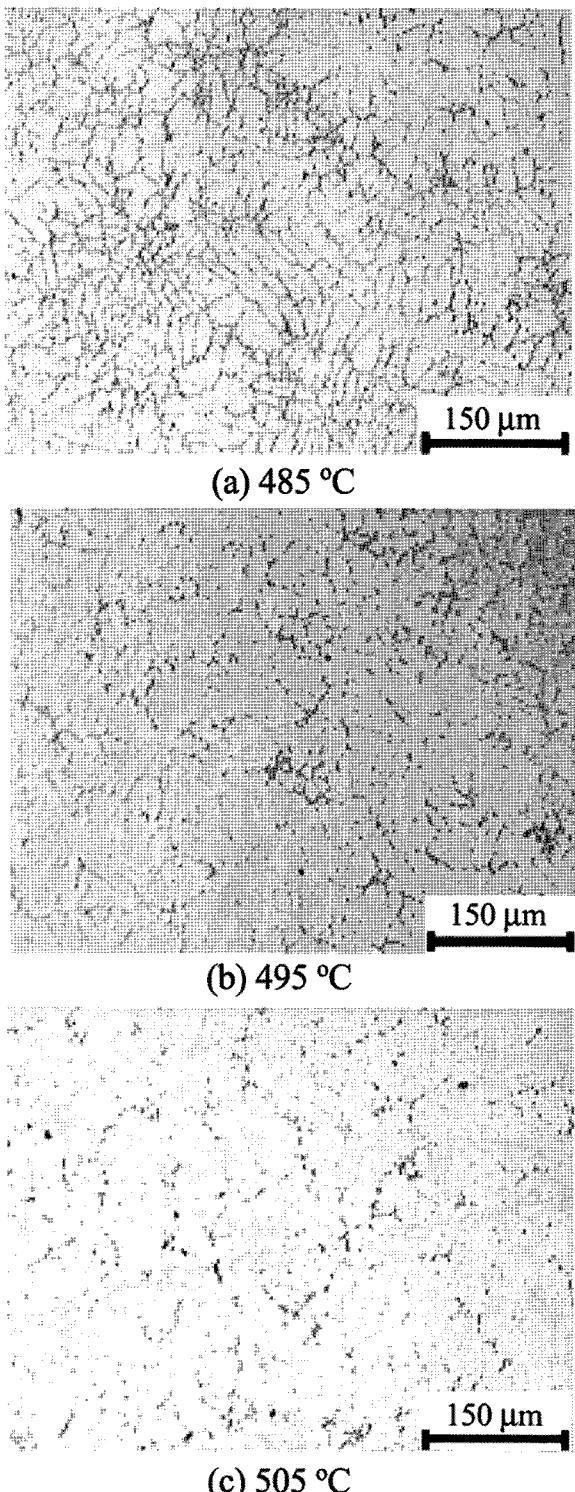


Fig. 14. Variation of the microstructure of squeeze-casted Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.5 wt%Mg alloy after grain refinement with solution treatment temperature for 60 min. and aged for 16 hrs at 160°C.

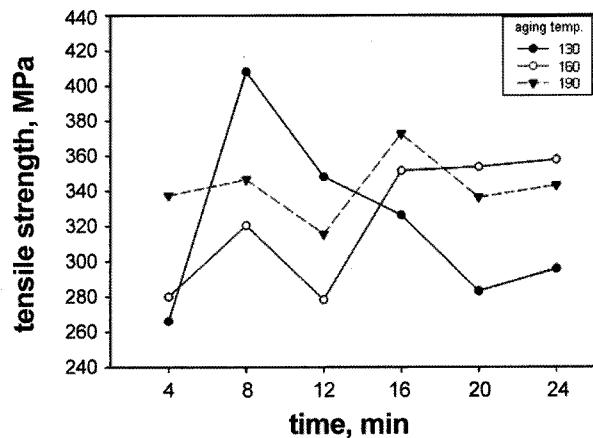


Fig. 15. Effects of aging condition on the tensile strength of the squeeze-casted Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.5 wt%Mg alloy after grain refinement, solution treated at 485°C for 60 min.

에는 큰 변화가 없으나 온도가 증가함에 따라 결정립계와 자유 덴드라이트의 2차 이암사이의 영역에서의 공정 규소와 용질 원자들의 2차 상이 조대해지고 결정립이 성장하였다. 따라서 용체화 처리 온도가 증가할수록 인장 강도는 감소할 것이다. 485°C의 온도에서 60분동안 용체화 처리한 경우에 시효 경화 효과가 제일 컸다.

3.3.2 시효 처리

결정립 미세화 처리한 후 용탕 단조한 Al-3.0 wt%Si-4.5 wt% Cu-0.5 wt%Mg 합금의 최적 시효 처리 조건을 결정하기 위하여, 최적 용체화 처리 조건인, 485°C의 온도에서 60 분동안 용체화 처리한 후 블렌칭하고 온도를 130~160°C의 범위에서 30°C 간격으로 시간을 4~24 시간 범위에서 4 시간 간격으로 변화시켜 시효 처리하였다. 그 결과 기계적 성질 및 인장 강도의 변화는 각각 Table 3 및 Fig. 16에서 보이는 바와 같다.

시효 처리 시간이 12 시간 이하로 짧을 경우에는 시효 처리 시간이 130°C로 가장 낮을 때 강화 효과가 제일 큰 것으로 나타났다. 그러나 16 시간 이상으로 시효 시간이 증가하면 이 온도에서 시효함에 따라 강도는 오히려 감소하였다. 이것은 이 온도에서 시효 처리함에 따라 시효 경화가 일어나 8 시간동안 시효 처리하였을 때 인장 강도가 제일 컸다가 8 시간을 초과하면 시효 처리하면 과시효가 일어났기 때문이다. 시효 처리 온도 160 및 190°C에서는 시효 처리 시간에 따른 인장 강도의 편차가 크고 뚜렷한 시효 경화 거동을 보이는 것 같지 않았다. 130°C의 시효 온도에서 8시간동안 처리한 경우가 인장 강도가 제일 컸다.

4. 결 론

용탕 단조 Al-3.0 wt%Si 합금의 강도에 미치는 합금 원소의 영향과 열처리 조건의 영향에 관한 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 결정립 미세화 처리 하지 않은 합금의 경우 구리의 첨가량이 3.0 wt%까지 증가함에 따라 강도가 증가하였다가 그 이

상으로 증가하면 강도는 오히려 감소하였다.

2) 결정립 미세화 처리한 합금의 경우에는 구리의 첨가량이 3.0 wt%까지 증가함에 따라 인장 강도가 증가하였다가 그 이상으로 증가하면 인장 강도는 거의 변화하지 않았다.

3) 결정립 미세화 처리하지 않은 합금의 경우 마그네슘 첨가량이 증가함에 따라 강도는 증가하였다.

4) 결정립 미세화 처리한 합금의 경우 마그네슘 첨가량이 0.50 wt%까지 증가함에 따라 인장 강도는 증가하였으나 그 이상을 첨가량이 증가하면 인장 강도는 감소하였다.

5) 결정립 미세화 처리한 합금의 경우 2 원계 합금에 구리와 마그네슘을 단독 또는 동시에 첨가함에 따라 강도는 증가하였으며 Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.50 wt%Mg 조성의 합금이 최대 강도를 보였다.

6) 결정립 미세화 처리하고 용탕 단조한 Al-3.0 wt%Si-4.5 wt%Cu-0.50 wt%Mg 합금의 강도는 용체화 처리 시간이 증가함에 따라 최고 값으로 증가하였다가 감소하였으며 용체화 처리 온도가 증가함에 따라 강도는 감소하였다.

7) 이 합금에 대한 시효 경화 효과가 가장 큰 측적 시효 처리 조건을 얻을 수 있다.

감사의 글

본 연구의 일부는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Nishida and M. Matsubara : Z. Metallk. 71 (1989) 189.
- [2] E. L. Kotzin : "Metalcasting & Molding Processes", AFS, (1981) 214-217.
- [3] B. Chalmers : "Principles of Solidification", R. E. Krieger Pub. Co., (1977) 234-235.
- [4] S. Kwon : "Effect of Melt Treatment and Element Added on the Fluidity during Squeeze Casting of Al-Si Alloy.", M. S. Thesis, Yeungnam Univ., (2004).
- [5] M. Kim, J. Hwang and H. Kwon : "Effect of Squeeze Casting Process Parameters on Fluidity of Al-Si Alloy.", Trans. AFS, 114 (2006) 59-70.
- [6] B. Kang : "The Effects of the Silicon Content and Melt Treatment on the Characteristics of Hard-Anodized surface Layer of Squeeze-Casted Al-Si Alloy.", M. S. Thesis, Yeungnam Univ., (2004)
- [7] G. E. Dieter : "Mechanical Metallurgy", 3rd ed., McGraw-Hill, (1986) 212-214.
- [8] W. F. Smith : "Structure and Properties of Engineering Alloys", McGraw-Hill, (1981) 206-209.
- [9] H. Schumann : "Metallographie", 2nd ed., Translated by S. Kim et. al., Hak Mun Pub. Co., (1993) 567-588.
- [10] T. B. Massalski et. al. ed. : "Binary Alloy Phase Diagrams", vol 1. ASM, (1986) 164-167.
- [11] ibid, 129-131.