 논문

Al-Zn-Mg 계 알루미늄 합금의 유동성에 미치는 합금원소의 영향

조재섭[†] · 김지훈 · 심우정 · 임항준

한국산업기술대학교 신소재공학과

The Influence of Alloying Elements on the Fluidity of Al-Zn-Mg Alloys

Jea-sup Cho[†], Jee-hun Kim, Woo-jeong Sim, and Hang-joon Im

Dept. of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung 429-793, Korea

Abstract

Al-Zn-Mg alloys, being high strength aluminum alloys, have attracted attention as a material of automobile parts that require higher mechanical properties and lightness. Automobile parts with complex shapes are manufactured by low-priced casting method, but Al-Zn-Mg alloys are difficult to cast because of its poor hot cracking, feeding, and fluidity. Thus fluidity experiments on Al-Zn-Mg alloys were conducted for the castability evaluation. The effects of Mg and Zn, representative elements of Al-Zn-Mg alloys, on fluidity were observed. Spiral mold was used for fluidity experiments and the lengths of solidified specimens were measured after melting and gravity casting. Correlation between microstructures and fluidity length based on the alloy composition was considered. According to the experimental results, as the amount of Mg and Zn increased, fluidity decreased. Also, it was confirmed that fluidity change by the variation of Mg composition was greater than that of Zn.

Key words: Fluidity, Al-Zn-Mg alloy, Spiral test, Gravity casting.

(Received March 30, 2012 ; Accepted May 9, 2012)

1. 서 론

최근 환경규제와 연비향상의 목적으로 자동차 부품 경량화에 대한 관심이 높아지면서 비강도 및 성형성이 우수한 알루미늄 합금의 사용량이 증가되고 있다. 이중 Al-Zn-Mg계 합금은 400 MPa 이상의 높은 기계적 성질을 가짐으로써, 현재 자동차 부품으로 널리 사용되고 있는 Al-Si계 및 Al-Mg계 합금 등에 비하여 고강도를 요구하는 자동차 부품에 적용이 가능하다. 하지만 Al-Zn-Mg계 합금은 단조 공정 등의 소성가공용 합금으로 높은 기계적 물성의 이점을 가지고 있지만, 성형한계로 인한 설계형상의 제한이라는 단점을 가지고 있어 일부 복잡한 형상을 가지는 자동차 부품의 적용에 어려움이 있다 [1,2]. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 Al-Zn-Mg계 합금을 주조용 합금으로 전환하는 연구가 필요하며, 주조용 합금으로 전환을 위해서는 주조성이 확보되어야 한다. 주조성은 열간균열, 급탕성, 유동성 등의 인자를 고려해야 하는데 이중 유동성은 액상금속이 응고로 인하여 유동을 정지하기까지의 금형 충전성을 나타내는 척도로써 주조성에서 가장 중요한 인자이며, 유동

성이 원활하지 않으면 성형주조를 할 때 미 충전과 미 성형현상이 발생하여 원활한 제품의 생산이 어렵다.

이러한 유동성을 평가함에 있어서는 금형에 의한 변수, 공정 조건 의한 변수, 합금원소에 의한 변수가 따르게 되는데 이러한 변수는 다음의 식으로 표시할 수 있다 [3].

$$L_f \cong \frac{\rho_s a v}{2h(T_M - T_0)}(H + c' \Delta T) \quad (1)$$

여기서 L_f 는 유동길이, h 는 열 전달계수, T_M 은 합금의 용융 온도, T_0 는 금형온도, ρ_s 는 밀도, a 는 금형 채널의 직경, v 는 유동속도, H 는 잠열, c' 는 비열, ΔT 는 과열을 의미한다. 이 식에서 합금원소에 의한 인자로는 열 전달계수, 소재의 용융온도, 밀도, 비열, 잠열, 유동속도 등이 있는데 유동길이는 밀도, 비열, 잠열, 유동속도와 비례하여 증가하며 열 전달계수, 소재의 용해온도에 반비례하여 감소한다.

기존의 합금원소에 따른 유동성 연구결과로는 순금속 또는 공정합금의 경우 고액 공존구간을 갖는 합금에 비하여 유동성이 더 좋으며, 고액 공존구간이 넓어질수록 유동성은 감소된다

[†]Corresponding author: Jea-sup Cho

[Tel: +82-32-8041-1260, E-mail : whwoekd@kpu.ac.kr]

는 연구결과가 있다 [4,5]. 또한 응고시간이 길수록 유동성을 향상시킨다는 연구결과가 있으며, 결정립 미세화제 첨가로 인한 유동성의 변화를 측정한 연구가 있다 [6-9]. 하지만 위의 연구 사례들은 대부분 주조용 합금의 유동성 변화가 그 주를 이루고 있고, 소성가공용 합금인 Al-Zn-Mg계 합금의 유동성 변화에 대한 연구는 미미한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 Al-Zn-Mg계 합금의 유동성을 연구하고자 순 알루미늄에 합금원소로서 마그네슘과 아연의 조성변화를 주면서 단일 원소 첨가에 따른 유동성 변화와 Al-Zn-Mg 3원계 상태에서 조성변화에 따른 유동성 변화를 측정하였고, 시편 선단부의 미세조직을 관찰하여 마그네슘과 아연의 조성인 Al-Zn-Mg계 합금의 유동성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

상용 Al-Zn-Mg계 합금에 첨가되는 마그네슘과 아연의 조성은 각각 4 wt%와 8 wt%이내의 범위에 있으므로, 마그네슘을 1~4 wt%, 아연을 1~8 wt%까지 첨가하여 각각의 조성 변화에 따른 유동길이를 측정하였고, 마그네슘을 1, 2, 3, 4 wt%첨가시킨 상태에서 아연을 각각 1~8 wt%의 조성변화를 주어 Al-Zn-Mg 3원계 상태에서의 유동 길이를 측정하였다.

용해 방법으로는 알루미늄 재질의 도가니에 순 알루미늄을 장입하여 전기 저항로에서 용해를 하고, 합금원소를 첨가하였다. 첨가한 합금원소가 완전히 용해되면 700°C로 유지된 상태에서 아르곤을 5분간 취입하여 탈 가스 처리를 하고 용탕 표면의 산화물을 제거 한 후 금형에 주입하였다.

유동성 평가에 사용된 금형은 Fig. 1(a, b)와 같이 상하 체

Fig. 1. Fluidity test mold; (a) bottom plate of mold, (b) upper plate of mold (c) schematic of spiral, (d) schematic of inlet mold.

결 형으로 제작한 Spiral 금형으로써 재질은 SKD61이다. 금형 주입구의 직경은 약 9 mm 이고, Fig. 1(c)와 같이 Spiral 모양의 홈 단면적은 약 50 mm²이며 길이는 1220 mm 이다.

Fig. 1(d)는 용탕의 주입속도를 일정하게 유지 하기 위하여 금형의 주입구와 연결된 금형으로써 용탕의 주입부분은 직경이 40 mm 이고 spiral금형과 연결된 주입구 부위의 직경은 8 mm 이다. Fig. 1(b)와 같이 열선이 내장된 금형의 상부를 이용하여 금형온도를 300°C로 일정하게 유지 하였다.

용탕의 주입온도는 각 합금마다 100°C의 과열을 가지게 한 후 약 150 mm의 높이에서 중력주조를 실행하였다. 주입이 완료된 후 곧바로 금형으로부터 응고된 시편을 분리하여 유동길이를 측정하였으며, 실험의 재현성을 위하여 각 합금마다 3번의 중력주조를 실행하여 그 평균값을 측정 하였다.

측정된 시편 선단부로부터 약 2 cm길이를 절단한 후 양분하여 양분된 시편의 단면을 1 μm까지 연마 하였으며, 연마된 시편을 광학현미경을 이용하여 선단부의 수축공을 관찰하였다. 또한 주입 중 응고발생이 가장 적은 주입구 부위에서 시편을 채취 한 후 1 μm까지 연마 하였으며, 연마된 시편은 Keller 부식액을 사용하여 에칭하였다. 에칭된 시편을 광학현미경을 이용하여 일차 수지상 및 이차 수지상 간격을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 단일 조성 변화에 따른 유동성 변화

Fig. 2는 순 알루미늄에 각각 마그네슘 1~4 wt%와 아연 1~8 wt%의 조성변화에 따른 유동길이를 나타낸 그래프이다. 아연이 1 wt%씩 증가할 때마다 유동길이는 평균 3.96%의 감소율을 보였고, 마그네슘이 1 wt%씩 증가할 때마다 유동길이는 평균 7.78%의 감소율을 보여 마그네슘이 아연에 비하여 더 큰 유동성 감소율을 보였다. 이와 같은 경향은 Fig. 3에 나타난 마그네슘과 아연의 조성변화에 따른 고액 공존구간과 관련이

Fig. 2. Change of fluidity length in binary composition.

Fig. 3. Change of solidification range in binary composition [10].

있다. 합금의 경우 고액 공존구간이 넓어짐에 따라 유동성이 감소하다가 고액 공존구간이 좁아지는 공정점에 가까워져 갈수록 유동성이 증가하게 된다 [4]. 따라서 마그네슘의 첨가는 아연의 첨가에 비하여 넓은 고액 공존구간을 갖기 때문에 유동 길이는 더 짧아진다.

또한 합금의 유동성은 응고시간에 비례하게 되는데, 식 (1)은 Campbell에 의하여 응고시간에 대한 인자로 다음과 같이 표시할 수 있다 [5].

$$t_f = \rho_s HV / \{h(T_m - T_0)A\} \quad (2)$$

여기서 t_f 는 응고시간, ρ_s 는 밀도, H 는 잠열, V 는 유동속도, h 는 열 전달계수, T_m 은 합금의 용융온도, T_0 는 금형온도, A 는 금형 채널의 표면적을 의미한다. 이 중 합금원소에 의한 변수

로는 밀도, 잠열, 열 전달계수, 용해온도 등이 있으며 응고시간은 밀도, 잠열과 비례하여 증가하고 열 전달계수, 용해온도에 반비례하여 감소하게 된다. 식 (2)를 통하여 마그네슘과 아연의 잠열차이는 크지 않지만, 아연에 비하여 마그네슘은 낮은 밀도와 높은 용해온도를 갖기 때문에 응고시간이 더 짧을 것으로 사료된다.

일반적으로 짧은 응고시간을 갖는 합금은 긴 응고시간을 갖는 합금에 비하여 이차 수지상 간격이 짧게 형성된다 [11,12]. 따라서 마그네슘과 아연이 각각 1, 2, 4 wt%첨가된 시편의 이차 수지상 간격을 Fig. 4에 나타내었다. 아연의 조성이 1, 2, 4 wt%로 증가하게 되면 이차수지상 간격은 41.55 μm , 36.15 μm , 25.21 μm 로 감소하고, 마그네슘의 조성이 1, 2, 4 wt%로 증가하게 되면 이차수지상 간격은 30.33 μm , 24.38 μm , 17.22 μm 로 감소하였다. 이는 아연에 비하여 짧은 이차 수지상 간격을 가진 마그네슘은 응고시간 또한 아연에 비하여 짧은 것을 의미하며, 짧은 응고시간은 액상 금속이 금형 내에서 충분히 유동을 할 시간이 적기 때문에 유동성 또한 감소하게 된다.

3.2 3원계 상태에서의 유동성 변화

Fig. 5는 Al-Zn-Mg계 합금에서 아연과 마그네슘의 조성변화에 따른 유동 길이를 나타낸 것이다. 3원계 상태에서도 아연과 마그네슘이 각각 첨가된 2원계 상태에서의 마찬가지로 유동 길이와 Fig. 6에 나타낸 Al-Zn-Mg 3원계 상태의 고액공존 구간의 넓이와 반비례함을 보였다. 마그네슘의 첨가량이 1 wt%에서 4 wt%까지 증가 할 때 모든 합금조성에서 유동 길이가 감소하였는데, 각각의 조성에서 마그네슘 첨가량이 증가함에 따라 유동 길이의 감소율은 줄어드는 것이 관찰되었다. 또한 마그네슘의 첨가량이 고정된 상태에서 아연의 첨가량이 증가 할 때의 유동 길이의 감소율 보다 아연의 첨가량이 고정된 상태에서 마그네슘의 첨가량이 증가할 때의 유동 길이의 감소율이 더 큰

Fig. 4. Optical microstructure of secondary dendrite arm spacing; (a) Al-1 wt%Zn, (b) Al-2 wt%Zn, (c) Al-4 wt%Zn, (d) Al-1 wt%Mg, (e) Al-2 wt%Mg, (f) Al-4 wt%Mg.

Fig. 5. Change of fluidity length in ternary composition.

것이 관찰되었다. 이러한 결과로 3원계 상태에서도 마그네슘 조성의 변화가 유동성에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 사료된다. 이에 따라 Al-Zn-Mg 계 합금에서 아연과 마그네슘의 조성이 유동성에 미치는 영향을 알아보기로 유동시험의 응고조직을 관찰하였다.

3.2.1 응고조직 관찰

Fig. 7의 (a), (b), (c)는 마그네슘 1 wt%를 첨가한 상태에서 아연을 1, 4, 8 wt%첨가시킨 시편의 응고조직이고 (d), (e), (f)는 아연 1 wt%를 첨가한 상태에서 마그네슘을 2, 3, 4 wt% 첨가시킨 시편의 응고조직이다. 마그네슘의 조성이 증가할수록 아연의 조성증가에 비하여 화살표로 표시된 수지상 네트워크가 더 많이 분포하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 고액 공존구간을 갖는 합금의 경우 수지상이 서로 네트워크를 형성하게 되면 액상 충전을 막기 때문에 유동흐름이 정지하게 된다. 이러한 액상의 충전은 응고 시 생성되는 수지상 사이로 이루어지기 때문에

Fig. 6. Change of solidification range in ternary composition [10].

수지상 간격이 넓을수록 더 높은 충전성을 가지게 된다. 이와 같은 액상의 충전성은 다음의 식으로 표시할 수 있다 [13,14].

$$K_p = (f^2 \cdot \lambda_1^2) / 8 \cdot \pi \cdot \tau^3 \quad (3)$$

여기서 K_p 는 액상의 충전성이고 f 는 응고 중 액상의 부피분율, λ_1 는 일차 수지상 간격, τ 는 수지상간에 액상의 이동 경로가 일차수지상 및 이차 수지상으로 인하여 불규칙해짐을 뜻하는 인자로서, τ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau = 1 + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^f + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f^2} + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f^3} \quad (4)$$

여기서 λ_2 는 이차 수지상 간격을 의미한다. 따라서 위의 식을 적용하기 위하여 시편의 일차 수지상 간격과 이차 수지상 간격을 측정하여 그 값을 Table 1에 나타내었다. Al-Zn-Mg계 합금에서 아연과 마그네슘의 첨가량 증가는 일차 수지상 및

Fig. 7. Optical Microstructure of etched specimen; (a) Al-1 wt%Mg-1 wt%Zn, (b) Al-1 wt%Mg-4 wt%Zn, (c) Al-1 wt%Mg-8 wt%Zn, (d) Al-2 wt%Mg-1 wt%Zn, (e) Al-3 wt%Mg-1 wt%Zn, (f) Al-4 wt%Mg-1 wt%Zn.

Table 1. Measured values of DAS and SDAS.

wt%	DAS (μm)	SDAS (μm)
Al-Mg 1%-Zn 1%	155.25	34.25
Al-Mg 1%-Zn 4%	134.25	31.81
Al-Mg 1%-Zn 8%	117.70	31.15
Al-Mg 2%-Zn 1%	127.90	29.69
Al-Mg 3%-Zn 1%	97.00	24.00
Al-Mg 4%-Zn 1%	86.50	21.49

Fig. 8. Change of permeability as function of liquid fraction at different composition.

이차 수지상 간격을 감소시킨다. 이 때 마그네슘 첨가는 아연 첨가에 비하여 수지상 간격이 더욱 크게 감소하였다. 이러한 결과를 식 (3)과 (4)를 이용하여 마그네슘과 아연의 조성에 따른 액상 충전성을 Fig. 8에 나타내었다. 액상의 충전성은 응고 중 액상의 부피분율이 감소함에 따라 급격히 감소하였고, 마그네슘과 아연의 조성이 증가하게 되면 감소하는 경향을 보였는데, 마

Fig. 9. Optical microstructure of shrinkage porosity (a) as-polished specimen of Al-1 wt%Mg-4 wt%Zn, (b) as-etched specimen of Al-1 wt%Mg-4 wt%Zn, (c) as-polished specimen of Al-4 wt%Mg-1 wt%Zn, (d) as-etched specimen of Al-4 wt%Mg-1 wt%Zn.

그네슘의 첨가는 아연의 첨가에 비하여 더 큰 액상 충전성 감소를 보였다. 즉, 마그네슘의 첨가로 인해 좁아진 수지상 간격으로 인하여 복잡한 network를 형성하게 되고, 이 network는 액상의 원활한 충진을 방해하는 것으로 사료된다.

3.2.2 선단부 수축공 관찰

Fig. 9은 Al-1 wt%Mg-4 wt%Zn시편과 Al-4 wt%Mg-1 wt%Zn시편의 선단부 수축공을 나타내었다. 선단부 수축공이 interdendritic에서 생성되는 것을 보아 이는 air trap에 의한 기공이 아닌 수축으로 인한 porosity로 간주된다. 따라서 각 시편 선단부의 수축공을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10의 (a), (b), (c)는 마그네슘 1 wt%를 첨가한 상태에서 아연을 1, 4, 8 wt% 첨가시킨 시편의 선단부 수축공을 나타낸 것이고 (d), (e), (f)는 아연 1 wt%를 첨가한 상태에서 마그네슘을 2, 3, 4 wt%

Fig. 10. Optical microstructure of specimen tip; (a) Al-1 wt%Mg-1 wt%Zn, (b) Al-1 wt%Mg-4 wt%Zn, (c) Al-1 wt%Mg-8 wt%Zn, (d) Al-2 wt%Mg-1 wt%Zn, (e) Al-3 wt%Mg-1 wt%Zn, (f) Al-4 wt%Mg-1 wt%Zn.

첨가시킨 시편의 선단부 수축공을 나타낸 것이다. 이 수축공을 Image analyzer를 통하여 비교해 보면 마그네슘 1 wt%가 첨가된 상태에서, 아연을 1, 4, 8 wt% 첨가함에 따라 수축공의 부피 분율은 0.63%, 0.85%, 1.67%로 증가하였고, 아연 1 wt%가 첨가된 상태에서 마그네슘을 2, 3, 4 wt%첨가하면 수축공의 부피 분율은 1.09%, 1.93%, 3.19%로 증가하였다. 이와 같은 수축공은 수지상간의 액상 충전이 원활하지 못하면 형성되는데, 앞서 언급한 바와 같이 마그네슘의 첨가는 아연의 첨가에 비하여 액상의 충전이 원활하지 못하여 더 많은 수축공 형성을 야기한 것으로 사료된다.

결과적으로 유동성에는 고액 공존구간, 응고시간, 액상의 충전성 등 여러 가지 변수가 복합적으로 작용하게 되는데, Al-Zn 및 Al-Mg 2원계 합금에서 마그네슘의 첨가는 아연의 첨가에 비하여 고액 공존구간이 넓고, 빠른 응고시간을 가지게 되어 유동성 감소에 더 큰 영향을 미친다. 또한 Al-Zn-Mg 3원계 합금에서 마그네슘의 첨가량 증가는 아연의 첨가량이 증가할 때보다 더 짧은 일차 수지상 및 이차 수지상 간격을 관찰되었다. 수지상간의 간격이 좁아짐은 응고 시에 더 복잡한 network를 형성함을 의미하며 원활한 액상의 충진을 방해하게 된다. 이는 유동성의 감소로 이어지기 때문에 Al-Zn-Mg계 합금에서 아연보다 마그네슘의 조성증가에 따른 유동성 감소가 더 큰 것으로 판단된다.

4. 결 론

Al-Zn-Mg계 합금에 아연과 마그네슘의 조성변화를 주면서 유동성을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 순 알루미늄에 마그네슘을 1~4 wt% 첨가함에 따른 유동길이의 평균 감소율은 7.78%이고, 순 알루미늄에 아연을 1~8 wt%첨가함에 따른 유동 길이의 평균 감소율은 3.96%이다.

2) 마그네슘이 1, 2, 3, 4 wt% 첨가된 상태에서 아연을 각각 1~8 wt%의 조성변화를 주면 유동길이의 평균 감소율은 3.25%, 2.48%, 1.1%, 0.94% 이다.

3) 마그네슘 1 wt%가 첨가된 상태에서, 아연을 1, 4, 8 wt% 첨가함에 따른 수축공의 부피 분율은 0.63%, 0.85%, 1.67%로 증가하였고, 아연 1 wt%가 첨가된 상태에서 마그네슘을 2,

3, 4 wt%첨가에 따른 수축공의 부피 분율은 1.09%, 1.93%, 3.19%로 증가하였다.

참고문헌

- [1] G. Y. Ha and H. G. Jo : KSAE, "Tensile Properties and Microstructures in Al-Mg Alloys for Automobile Body Panels", (1993) 5-3
- [2] K. T. Kim and J. M. Kim : Mater. Sci. Eng, "Effect of alloying elements on the Strength and Casting Characteristics of High Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloys", (2005) 475-479
- [3] M. C. Flemings : McGraw-Hill, "Solidification Processing", 219-224 (1974)
- [4] M. Di. Sabatino : NTNU, "Fluidity of Aluminium foundry alloys", 76 (2005)
- [5] J. Campbell: Castings, 2nd Ed., Oxford, (2003) 75-87
- [6] J. K. Back and H. W. Kwon : J. Mater. Sci Technol, "Effect of Squeeze Cast Process Parameters on Fluidity of Hypereutectic Al-Si Alloy", 48 (2008) 1
- [7] J. M. Kim and K. D. Seong : J. KFS, "Effects of Mn and Si Contents on the Castabilities and Mechanical Properties of Al-5%Mg Base Alloys, (2005.10)
- [8] Y. D. Kwon and Z. H. Lee : Mater. Sic. Eng. A, "The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al-4.5Cu-0.6Mn and A356 alloys", 360 (2003) 372-376
- [9] K. R. Ravi and R. M. Pillai : J. Alloys and Compounds, "Fluidity of aluminum alloys and composites", (2008) 201-210
- [10] William W. Scott : The Materials Information Soc, "Aluminum and Aluminum Alloys", 570-571
- [11] D. Y. Lee and B. W. Cheon : J. KFS, "The effect of the Metallic Mold Cooling System on the Solidification Structures and the Mechanical Properties for Al-10%Si Alloy Castings", 13 (1993) 2
- [12] S. D. Son and C. Y. Jo : J. KFS, "Dendrite Arm Spacing and Carbide Morphology with Thermal Gradient and Solidification Rate in Directionally Solidified Ni-base Superalloy", 27 (2007) 2
- [13] J. R. Pereira and M. De Lourdes : J. Amme, "Analysis of permeability of interdendritic channels during solidification of aluminum magnesium alloys", 31 (2008) 1
- [14] K. Nogita and A. K. Dahle : Scr. Mater, "Effects of boron on eutectic modification of hypoeutectic Al-Si alloys", 48 (2003) 307-313