

# 가압함침공정 중 기공 형성에 대한 제조 변수의 영향

서영호\* · 이형국\*\*

## The Influence of Fabrication Parameters on the Porosity Formation during Squeeze Infiltration Process

Young-Ho Seo, Hyoung-Kook Lee

**Key Words:** 가압함침(Squeeze Infiltration), 금속복합재료(Metal Matrix Composite), 기공(Pore)

### Abstract

The squeeze infiltration process is potentially of considerable industrial importance. The performance enhancements resulting from incorporation of short alumina fiber into aluminum are well documented. These are particularly significant for certain automobile components. But the solidification process gets complicated with manufacturing parameters and factors for porosity formation do not fully understand yet. In this study porosity defects were observed under several infiltrating conditions; a kind of matrix, an initial temperature of melt, and a volume fraction of reinforcement. The desimetry and the microscopic image analysis were done to measure the amount of porosity. A correlation between manufacturing parameters and defects was investigated through these.

### 기호설명

$W(a)$	Weight of the specimen in air
$W(fl)$	Weight of the specimen in distilled water
$H_0$	Initial height of preform
$H_i$	Final height of preform( $i=1, 2, 3$ )
$V_f$	Volume fraction of fiber by image analysis
$V_f'$	Volume fraction of fiber by geometrical shape
$V_{P1}$	Amount of porosity from $\rho_1$ and $\rho_{c1}$
$V_{P2}$	Amount of porosity by image analysis
$\rho_1$	Density of composite by a specific gravity balance
$\rho_2$	Density of composite from $V_{P2}$ and $\rho_{c2}$
$\rho_{c1}$	Density of composite by geometrical shape
$\rho_{c2}$	Density of composite by $V_f$
$\rho(fl)$	Density of the liquid

### 1. 서론

가압 함침 공정에는 두 분류가 있다: 피스톤을 사용해서 용탕을 예비성형체 속으로 밀어넣는 방법과 기압이 정상으로 유지된 가스 및 접촉해서 예비성형체 속으로 유도되는 방법이다(1~5). 디젤 엔진 피스톤이나 엔진 블록과 같은 알루미늄 기지 복합재료 자동차 부품들은 스퀴즈캐스팅이나 압력 다이캐스팅 장치들을 이용해서 만들어진 다. 현재 가압함침공정에 의해서 피스톤의 크라운과 링 랜드부에 세라믹 섬유를 혼입하는 것은 성공적으로 적용된 기술이다(6,7). 이 기술에 대해서 자동차 업계에서 관심을 가지게 된 것은 1980년대 초반부터이지만 아직까지 제조과정에서 기공이나 조대한 편석과 같은 결함이 발생하는 것에 대해서는 제대로 파악되지 않고 있다.

본 연구의 목적은 가압함침공정중에 발생하는 내부의 결함을 파악하기 위한 것으로서, 특히, 기공 및 편석의 발생을 관찰하고 적절한 제조조건을 찾는 것이다. 먼저 가압함침법에 의해서 실

\* 동의공업대학 기계시스템계열

\*\* 동의공업대학 기계시스템계열

린더 형상의 금속복합재료를 만들었으며, 제조 변수에 따른 시편 내부의 기공을 관찰하기 위해서 복합재료에 대한 밀도 및 기하학적 길이 측정, 광학현미경 관찰 및 이미지 분석 등이 이루어졌다. 샘플의 부위별로 파악된 정량적인 데이터를 통해서 기지재의 종류, 강화재의 체적함유율 및 용탕의 초기 온도 등과 결합생성 사이의 상관관계를 고찰하였다. 이러한 기초 데이터를 바탕으로 향후 가압함침법의 성형공정 및 결합예측 기법의 개발에 활용하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 함침실험

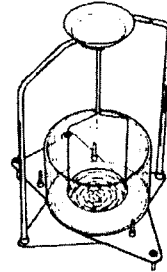
금속복합재료의 성형에 영향을 미치는 변수로는 금형 및 예비성형체의 예열온도, 용탕의 온도, 가압력, 가압속도, 예비성형체의 섬유체적함유율, 기지재의 종류 등이 있다. 예비성형체 (preform)의 제조에 사용된 단섬유(short fiber)는 SAFFIL  $\delta$ - $Al_2O_3$  를 이용하였다. 가압력은 14 ton(약 30 MPa), 금형의 예열온도는 350 °C로 고정하였다. 기지재의 초기 온도를 900 °C와 1000 °C의 2가지로 변화시켜서 실험하였다. 기지재를 초기에 용융할 때는 고주파유도가열장치를 이용하였다. 예비성형체의 크기는  $\Phi$  73 mm(D)× 10 mm(H), 시편의 크기는  $\Phi$  77 mm(D)× 27~33 mm(H)였다. 본 연구에서 가압함침법에 사용된 실험변수는 Table 1 과 같다.

### 2.2 밀도 및 기공 측정

밀도측정장비로는 10  $\mu$ g의 민감도를 가지는 비중계 Kit YDK 01을 이용하였다. 시편을 증류수에 잠입시켜서 측정한 후 시편의 밀도를 다음 식으로 계산하였다.

$$\rho_1 = \frac{W(a)}{0.99983[W(a) - W(f)]} \rho(f) + 0.0012 \quad [g/cm^3]$$

(a)



(b)

$$V'_i = V_f \frac{H_0}{H_i} = V_f \frac{10}{H_i} \quad (i=1, 2, 3)$$

$$\Rightarrow V'_i \rho_f + (1 - V'_i) \rho_m = \rho_{c1}$$

$$\Rightarrow \rho_{c1}(1 - V_p) + 0 \times V_p = \rho_1$$

$$\Rightarrow V_{P1}$$

(c)

$$\Rightarrow V_f \Rightarrow V_f \rho_f + (1 - V_f) \rho_m = \rho_{c2}$$

$$\Rightarrow V_{P2} \Rightarrow (1 - V_{P2}) \rho_{c2} + 0 \times V_{P2} = \rho_2$$

Fig. 1 Measurement and calculation to get the amount of porosity. (a) Densimetry, (b) Density calculated from the geometrical shape of a specimen, (c) Density by the image analysis

Table 1 Experimental parameters

Parameters	Conditions
Matrix	LM6, 6061Al
Initial melt temperature $T_M$ , [°C]	900, 1000
Volume fractions of fiber $V_f$ , [%]	10, 15, 20, 25

Fig. 1은 제조된 시편의 기공량을 측정하고 계산하여 서로 비교하는 과정을 개략적으로 나타내고 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

기공은 용탕의 냉각과 응고 과정에서 발생할 수 있다. 다양한 형태의 기공들은 둥근 형태의 기공, 길게 늘어진 기공과 수축 기공 등으로 분류될 수 있다. 둥근 형태와 길게 늘어진 형태의 기공은 주로 전에 용탕의 가스 함량과 관계가 있다. 임계 온도에서, 용탕내의 수소 압력이 핵생성에 필요한 압력과 같아지는 곳에서, 기포가 생성되어 시간에 따라 성장한다. 용탕이 응고 온도에 도달할 때, 온도는 일정하게 유지되면서 고상율이 증가한다. 수축 기공의 형상은 수지상 조직에 의해 영향을 받는데 그것들의 형성은 응고수축에 기인한 압력저하 때문이다(8~10).

Fig. 2는 약 350 °C로 예열된 예비성형체를 가지고 제조된 6061 Al/10 vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료의 단면을 나타낸 것이다. 여기서 초기 용탕 온도 ( $T_M$ )는 900 °C로 하였다. 단면 사진은 1/4 절단면에 대해서 촬영한 것이기 때문에 왼쪽 가장자리가 원통형 시편의 중앙부에 해당한다. 반경 방향으로 1, 2, 3, 높이방향으로 A, B, C 등 복합재료를 9개의 세부 영역으로 분할하였다.

가스 용해도는 응고 온도에 따라 급격히 불연속적으로 감소한다. 용탕 내부에 있는 가스가 외부로 빠져나가지 않는다면, 가스 기공으로써 남는다. 가스 용해도는 가압력의 제곱에 비례해서 증가한다. 1 kgf/cm<sup>2</sup>의 대기압과 비교해 보면 본 연구에서 사용된 가압력 305.8 kgf/cm<sup>2</sup>(약 30 MPa) 하에서 가스 용해도는 약 17.5배 증가한다.

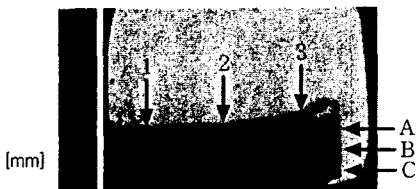


Fig. 2 A section of 6061Al/10 vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> which was fabricated by squeeze infiltration ( $T_M = 900\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{PH} = 350\text{ }^\circ\text{C}$ )

가스가 과포화된 용탕이 대기압하에서 응고할 때, 가스가 빠져나가지 않는다 하더라도, 높은 가압력 하의 응고에서는 용해 한도 이내에 있기 때문에 가스 기공이 생성되지 않을 것이다.

단섬유 강화 금속복합재료에 대한 응고 과정이 Fig. 3에 나타낸 것 처럼 분류될 수 있다. 좁은 응고 영역( $\Delta T$ )을 갖는 LM6 Al 합금이 급속히 냉각될 때, 원주형 수지상 조직이 급형의 벽으로부터 성장해서 응고 과정중에 응고 셸을 형성한다(Fig. 3(a)). 넓은 응고영역( $\Delta T$ )을 갖는 6061Al 합금의 급속응고 유형이 Fig. 3(b)에 나타나 있다. 응고 셸이 등축정 조직으로 이루어진다.

Fig. 4는 용탕의 초기온도( $T_M$ )가 1000 °C, 예비성형체의 예열온도( $T_{PH}$ )가 350 °C 일 때 6061Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10%)에서 생성된 편석의 조직사진이다. 가압력이 응고 과정 중에 주조결함인 수축기공과 가스기공을 제거할 수 있다 하더라도, 낮은 용융점을 가지는 Mg<sub>2</sub>Si와 Si 성분들이 넓은 응고 영역을 가지는 6061Al 합금에서 최종 응고 부위에 편석을 발생시킬 수 있다는 것을 의미한다.

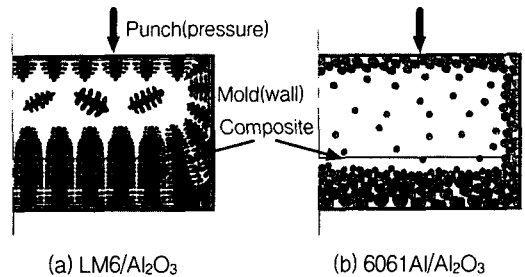


Fig. 3 Schematic representation of the solidification process during squeeze infiltration

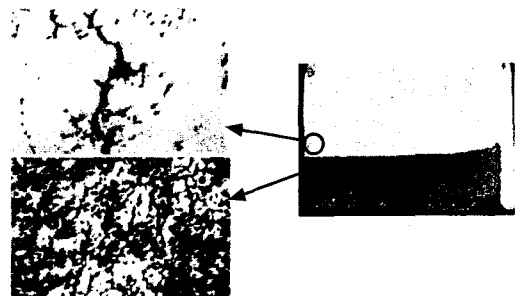


Fig. 4 Segregation created at the "Center" of Specimen under 6061Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10%),  $T_M = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{PH} = 350\text{ }^\circ\text{C}$

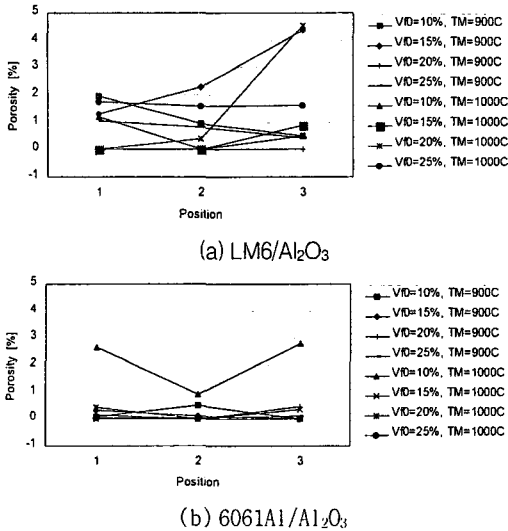


Fig. 5 Amount of Porosity calculated by the density and the geometrical shape

Fig. 5는 밀도측정과 기하학적 형상의 변화에 따른 복합재료의 기공량 ( $V_{P1}$ )을 평가한 것이다. Fig. 5의 결과로 미루어볼 때, 본 실험에서 LM6/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료의 최적의 제조 조건은  $V_{f0} = 20\%$ ,  $T_M = 900^\circ\text{C}$ ,  $T_{PH} = 350^\circ\text{C}$  라는 것을 알 수 있으며, 6061Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료에 대해서 살펴보면,  $V_{f0} = 10\%$ ,  $T_M = 1000^\circ\text{C}$ ,  $T_{PH} = 350^\circ\text{C}$  를 제외하고는 기공이 미량으로 파악되었다.

Table 2는 이미지분석을 통해서 평가된 부위별 기공량 ( $V_{P2}$ )을 나타낸 것이다. LM6/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료의 전반적인 경향을 살펴보면, 강화제의 체적함유율 ( $V_f$ )이 낮을수록 A1 부위에 기공의 발생이 두드러졌으며, 반대로 높을수록 바닥부(C1, C2, C3)와 가장자리부(A3, B3)에서 기공형성이 두드러졌다. 그리고 용탕의 초기온도 ( $T_M$ )가 낮을수록 기공발생비율이 감소하였다. 용탕의 초기온도가  $900^\circ\text{C}$  일 때가  $1000^\circ\text{C}$  에 비해서 기공 생성량이 감소한다는 것을 관찰 할 수 있다.

6061Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 에서는  $V_{f0} = 10\%$  일 때, 기공이 가장 많이 발생하였다. 실험조건이  $V_f = 10\%$ ,  $T_M = 900^\circ\text{C}$ ,  $T_{PH} = 350^\circ\text{C}$  일 때, 중앙부의 상단(A1)과 바닥부(C1)에서 기공이 높게 평가되었다.

Table 2. Amount of porosity measured by the image analysis

Mat. ( $V_{f0} / T_M$ )	Porosity, $V_{P2}$ [%]			
	Posit.	1	2	3
LM6/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (10 % / 900 °C)	A	2.79	0	0
	B	1.63	0	0
	C	0	0	0
LM6/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (15 % / 900 °C)	A	0	0	4.25
	B	0	0	0
	C	0	6.23	4.72
LM6/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20 % / 900 °C)	A	0.81	0	0
	B	0	0	0
	C	0	0	0
LM6/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (25 % / 900 °C)	A	0	0	0
	B	0	0	0
	C	7.25	0	2.02
LM6/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (10 % / 1000 °C)	A	12.64	0	0
	B	0	0	0
	C	0	0	0
LM6/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (15 % / 1000 °C)	A	0	0	6.98
	B	0	0	0
	C	3.36	10.26	8.01
LM6/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20 % / 1000 °C)	A	0	0	0
	B	0	0	0.17
	C	6.08	6.51	
LM6/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (25 % / 1000 °C)	A	0	0	4.53
	B	0	0	0.74
	C	0	0	2.13
6061Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (10 % / 900 °C)	A	10.91	0	0
	B	0	0	0
	C	5.01	0	0
6061Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (15 % / 900 °C)	A	0	0	0
	B	0	0	0
	C	1.92	2.07	0
6061Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20 % / 900 °C)	A	0	0	0
	B	0	0	0
	C	0	0	0
6061Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (25 % / 900 °C)	A	0	0	0
	B	0	0	0
	C	0	0	0
6061Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (10 % / 1000 °C)	A	4.68	0	0
	B	4.46	4.25	0
	C			10.22
6061Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (15 % / 1000 °C)	A	0	0	0
	B	0	0	0
	C	0	0	0
6061Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20 % / 1000 °C)	A	0	0	0
	B	0	0	0
	C	0.44	0	1.06
6061Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (25 % / 1000 °C)	A	0	0	0
	B	0	0	0
	C	3.77	2.35	0

하지만 Fig. 5의 밀도측정에서 기공량이 낮게 평가된 이유는 예비성형체의 중앙부가 압축을 심하게 받았기 때문이다.  $T_M = 1000^\circ\text{C}$  인 경우, 복

합재료의 기하학적 형상은 양호하지만 전체적으로 많은 양의 기공이 관찰되었다. 강화재의 체적함유율이 낮아질수록 시편 중앙부의 상단부 근처에서 기공 혹은 편석이 생성되기 쉬우며, 반대로 체적함유율이 높아질수록 시편의 바닥부 근처에서 발생된다는 것을 알 수 있다.  $T_M = 900^\circ\text{C}$  일 때, 강화재의 초기 체적함유율이  $V_{f0} = 20\%$  와  $V_{f0} = 25\%$  일 경우를 살펴보면, 기공이 거의 없는 양호한 상태라는 것을 알 수 있다. 그러나  $T_M = 1000^\circ\text{C}$  에서는 바닥부(C1, C2)에서 기공이 다소 관찰되었다.

기지재의 종류가 기공의 형성에 미치는 영향을 살펴본다면, LM6가 6061Al 보다 더 많은 결함을 나타낸 것을 알 수 있다. 고액공존 영역의 온도 범위가 LM6의 경우 약  $10^\circ\text{C}$  이고, 6061Al의 경우 약  $70^\circ\text{C}$  라는 사실로는 응고영역이 짧은 LM6가 내부 조직이 양호할 것으로 생각할 수 있으나, 액상선 온도가 LM6의 경우  $575^\circ\text{C}$  이고 6061Al의 경우  $652^\circ\text{C}$  인 점으로 미루어 볼 때, 용탕의 초기 온도로부터 냉각 범위는 6061Al의 경우가 훨씬 짧아진다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

알루미늄 금속 복합재료가 용탕단조법에 의해서 제조되었으며, 각 시편들에 의해 얻어진 샘플들로부터 기공과 편석을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻어내었다.

1. 좁은 응고 영역을 가지는 LM6 Al 합금은 수지상 구조로써 응고되었으며 수축 기공이 최종 응고 부위에서 관찰되었다. 그러나 넓은 응고 범위를 가지는 6061 Al 합금은 등축정 조직의 응고 형태를 나타내었으며, 기공과 함께 편석이 발생되었다.
2. 강화재의 체적함유율이 낮아질수록 시편 중앙부의 상단부 근처에서 기공과 편석이 생성되었으며, 반면에 체적함유율이 높아질수록 시편의 바닥부 근처에서 나타났다.
3. 용탕의 초기 온도가  $900^\circ\text{C}$  일 때가  $1000^\circ\text{C}$  에 비해서 기공 생성량이 감소하였다.
4. 과냉도가 클수록 기공 결함이 발생되기 쉽다. 따라서 액상선 온도가 낮은 LM6가 6061Al 보다 전반적으로 많은 양의 기공을 나타내었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 「1998년 전반기 해외 Post-Doc. 연수과정」에서 한국과학기술평가원의 「'99한/영 과학기술협력기금사업」의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) T. W. Clyne and J. F. Mason, The Squeeze Infiltration Process for fabrication of Metal Matrix Composites, Metall. Trans., Vol.18A (1987) pp.1519~1530.
- (2) C. G. Kang and Y. H. Seo, The influence of fabrication parameters on the deformation behaviour of the preform of metal-matrix composites during the squeeze-casting processes. J. of Mat. Proc. Tech., Vol.61 (1996) 241~249.
- (3) K. Landry and N. Eustathopoulos, Dynamics of Wetting in Reactive Metal/Ceramic Systems: Linear Spreading, Acta mater. Vol.44, No.10 (1996) pp.3923~3932.
- (4) N. Eustathopoulos, Dynamics of Wetting in Reactive Metal/Ceramic Systems, Acta mater., Vol.46, No.7 (1998) pp.2319~2327.
- (5) E. Carreno-Morelli, T. Curard, R. Schaller and C. Bonjour, Processing and characterization of aluminium-based MMCs produced by gas pressure infiltration. Mat. Sci. and Eng., Vol.251A (1998) pp.48~57.
- (6) P. Rohatgi, Advances in Cast MMCs, Adv. Mats & Procs., Vol.137 (1990) pp.39~44.
- (7) M. W. Toaz, P. R. Bowles and D. L. Mancini, Squeeze Casting Composite Components for Diesel Engines, Ind. Heat., Vol.54 (1987) pp.17~19.
- (8) F. Weinberg & D. A. Hirschfeld, Metal Science, Vol.13 (1979) pp.355.
- (9) I. Svensson & H. Fredriksson, Metallurgical Trans. B, Vol.7 (1976) pp.599.
- (10) H. Shahani & H. Fredriksson, On the Mechanism of Precipitation of Pores in Melts, Scandinavian J. of Metallurgy, Vol.14 (1985) pp.316~320.