

Thixoforging을 이용한 중공형 금속복합재료 부품의 성형공정에 있어서 결함에측

윤성원* · 김병민** · 강충길**

(2002년 7월 24일 접수)

Defect Prediction in Part Fabrication Process of Metal Matrix Composites by Thixoforging Process

S. W. Youn, B. M. Kim and C. G. Kang

Abstract

In the manufacturing process of metal matrix composites parts, thixoforging is one of the most effective forming processes. The major purpose of the current study is to provide the proper conditions such as the die shape, the forging velocity, the forging time, the forging pressure and reinforcement content in the thixoforging process for fabricating hollow shape parts. To investigate the effect of proper injection velocity and pressure on various defects in thixoforged cylinder liner, filling tests were performed by MAGMA S/W. In order to evaluate the effectiveness of the calculated conditions which is given by computer aided engineering, A357, A380 and SiC_p/A380 cylinder liner were fabricated under the calculated conditions. SiC_p/A380 composite billets were fabricated by both the mechanical stirring and electrical magnetic stirring process. In case of SiC_p/A380 composite cylinder liner, reinforcement distribution and effect of reinforcement(SiC_p) content(10~20 vol. %) and size (5.5~14 μ m) on the mechanical properties were investigated.

Key Words : Metal Matrix Composites, Thixoforging Process, Homogeneous distribution, Die Design, Wear resistance

1. 서론

자동차의 경량화추세로 실린더블록이 알루미늄화 되면서 현재 주철재로 이용되고 있는 라이너 소재를 알루미늄화도 시도되고 있다. 엔진에 사용되는 라이너는 내마

모성을 요구하고 있기 때문에 기존 소재로써는 라이너의 요구조건을 만족할 수 없다. 따라서 주철재료와 유사한 기계적 성질을 가지며, 또한 알루미늄 블록과 열팽창계수가 거의 동일한 소재의 성형방법에 관한 연구개발이 필요하다. 이와 같은 이유 때문에 금속복합재료의 경우

* 부산대 기계공학부 성밀기계공학과

** 부산대 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구소 (ERC/NSDM)

는 높은 비강도, 피로강도, 탄성률, 내마모성 및 낮은 열팽창계수 등 자동차 산업에 있어서 우수한 기계적 특성을 가지고 있기 때문에 주철제 실린더 라이너 부품을 대체 할 수 있는 경량재료로서 각광을 받고 있다.⁽¹¹⁻²⁾

특히, 반응용 성형공정을 복합재료의 2차 가공에 이용하면 계면결합강도가 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있기 때문에 금속복합재료의 경량화 부품의 개발을 위하여 반응용성형에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽³⁻⁶⁾ 입자강화형 금속복합재료는 용융상태가 되면 기지재와 강화재와의 밀도 차이에 의해 부상하거나 침전되기 쉬워 성형 후 강화재의 균일 분산과 후가공이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 반응용 성형공정을 이용하여 실린더라이너를 제조할때 문제점과 해결방안을 제안하고자 한다.

본 논문은 전자식 교반법과 기계식 교반법을 동시에 이용하여 제조한 입자강화형 금속복합재료 빌렛⁽⁷⁻⁸⁾을 이용해 실린더 라이너의 제품을 제조할 때 고상율, 가압 시간, 압력, 가압속도 등의 공정인자가 성형성에 미치는 영향 등을 조사하였다. SiC_p 금속복합재료 빌렛을 원하는 고상율까지 재가열하여 반응용 성형공정에 의하여 자동차용 실린더 라이너를 성형하는 방법을 제안하고자 한다.

반응용 성형공정을 이용하여 금속복합재료의 실린더라이너를 제조할 때 나타나는 각종 문제점과 해결방안을 제시하였으며, 또한 내마모성에 영향을 미치는 강화재의 분산성을 파악하여 실린더 라이너를 성형 할 수 있는 제조조건과 응용가능성을 검토하였다.

2. 실린더라이너 성형실험

MAGMA S/W의 thixo모듈을 이용하여 충전해석과 응고해석을 통해 복합재료 라이너제품의 충전지동 및 결합을 예측한 결과를 이용하여 금형을 설계 및 제작하였다.⁽⁹⁾ 재가열중 소재손실을 고려하여 제품의 체적을 계산한 후 빌렛의 길이를 60mm로 절단한 후 유도 가열로에 의하여 재가열하여 반응용상태로 가열하였다. CAE기법을 응용하여 설계한 금형에 200Ton 고속유압프레스를 이용하여 성형실험을 하였다.

유도가열을 이용하여 빌렛을 가열할 경우 일반적인 전기로보다 가열시간이 줄어들고 완전 용탕 상태가 아니기 때문에 금형의 열피로를 줄일 수 있어 금형의 수명을 향상시킬 수 있고 비교적 정확한 온도제어가 가능하기 때문에 반응용 성형공정에 있어 유도가열에 의한 빌렛의 재가열은 필수적이다.⁽¹⁰⁾ 본 실험에서는 소재 각 부의 온도 편차를 최대한 줄이기 위하여 저자가 지금까지 연구

한 3단 재가열 조건을 이용하였다.⁽¹¹⁻¹²⁾

복합재료에 있어서 고상율에 대응하는 온도는 강화재의 함유율을 고려하여 계산한 온도를 이용하여야 한다.⁽¹²⁾ 결합이 없는 건전한 제품을 얻을 수 있는 성형조건을 도출하기 위해서 A357재료에 대하여 실험을 수행하였다. 도출된 성형조건을 이용하여 A380 및 SiC_p/A380 복합재료 실린더 라이너를 제조하였으며, SiC_p/A380복합재료에 대해서는 강화재의 분산성을 조사하였다. 또한, 강화재의 크기가 14 μ m, 5.5 μ m일 때의 복합재료의 성형성과 기계적 성질을 비교하였다

2.1 전산 해석에 의한 성형조건 도출

CAE를 이용해 설계한 제품 및 금형을 상용 CAD 소프트웨어인 CATIA를 이용하여 3차원 솔리드 모델링을 수행하였으며 MAGMA S/W를 이용하여 Table 1의 각 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과로부터 편지속도, 가압력등 최적성형조건을 도출하여 실험에 응용하였다.

속도의 변화에 따른 충전양상의 차이가 거의 없음을 충전해석의 결과로부터 알 수 있었고 또한 응고현상에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. 수축공 발생 부위는 대부분 게이트부에 집중되었기 때문에 기계가공 후 제품에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.⁽¹³⁾

Table 1 Thixoforging conditions for PMMC fabrication

CASE	Pressure(Mpa)	Punch velocity(mm/sec)
A	80	200
B	80	250
C	80	300

2.2 성형 실험

실린더 라이너를 Thixoforging으로 성형하기 위한 금형의 형상과 작동원리는 Fig. 1과 같다. Fig. 1 (a), (b)은 금형을 각각 분리 및 합체하였을 때 금형의 외형을 나타낸 것이다. Fig. 1 (c), (d)은 반응용성형후 펀치의 가압상태와 이젝터를 이용하여 제품을 금형으로부터 취출하는 상태를 나타낸 것이다. 금형을 예열하기 위해 1kW ϕ 16mm 카트리지 히터를 슬리브에 10개 사용하였고 슬리브 아래쪽의 제품부에 ϕ 1.8mm의 홀을 가공하여 K-type 열전대를 삽입하여 금형 온도를 측정하고 제어하였다. 소재가 금형에 소착되는 것을 방지하기 위하여 슬리브와 제품부 그리고 코어부분에 열간 단조용 그라파

이트계 윤활제를 도포하였고 적당한 온도로 급형을 예열한 후 재가열된 MMC 빌렛을 슬리브 부분에 넣고 200 Ton 고속 유압프레스의 펀치를 가압하여 성형을 하였다. 성형을 한 후 제품을 취출함과 동시에 급냉을 하였고 급형온도, 충진이 이루어진 후 가압할 때의 가압시간과 가압력, 펀치속도 등을 변수로 두어 각 조건에 대하여 성형실험을 하였다.

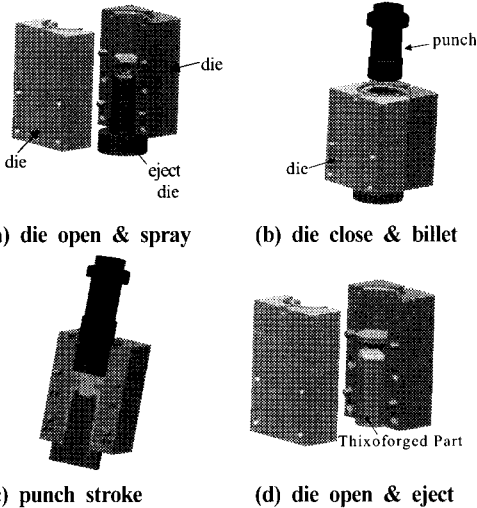


Fig. 1 Schematic diagram for thixoforging of cylinder liner

Fig. 2 (a)는 제품이 성형되어지는 급형을 좌우로 분리하여 제품을 취출하므로 좌우급형을 체결하는 전체구성도를 나타낸 것이다. Fig. 2 (b)는 성형이 완성된 제품의 외관크기를 나타낸 것이다. 성형후 제품의 외경과 내경은 84mm와 76mm이며, 게이트부분을 제외한 제품의 길이는 160mm이다.

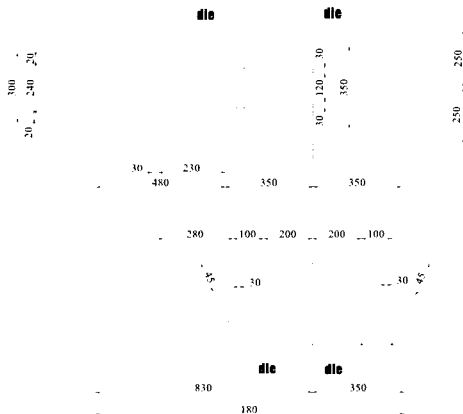


Fig. 2(a) Dimension of thixoforging die set for cylinder liner fabrication

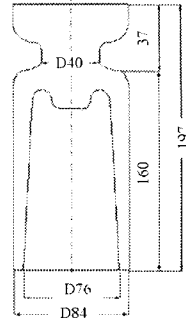


Fig. 2(b) Dimension of the thixoforged cylinder liner

3. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 A357에 대하여 가압력이 80MPa, 펀치도가 250mm/s, 강화제의 함유율 10% 일때 급형온도에 따른 성형 결과를 나타내었다. Fig. 3 (a), (b), (c)를 보면 제품부가 매끄럽지 않고 급형과의 접촉흔적이 남아 있거나 게이트부분에서 분리되는 것을 알 수 있다. 이것은 충진 완료 후 코어가 급형으로부터 분리되고, 급형이 좌우 분할 될 때 제품과의 소착으로 인해 발생한다는 것을 알 수 있다. Fig. 3 (e)는 급형의 온도가 200℃일 때 성형한 제품을 나타낸 것으로 완전히 충진이 되지 않음을 알 수 있다.

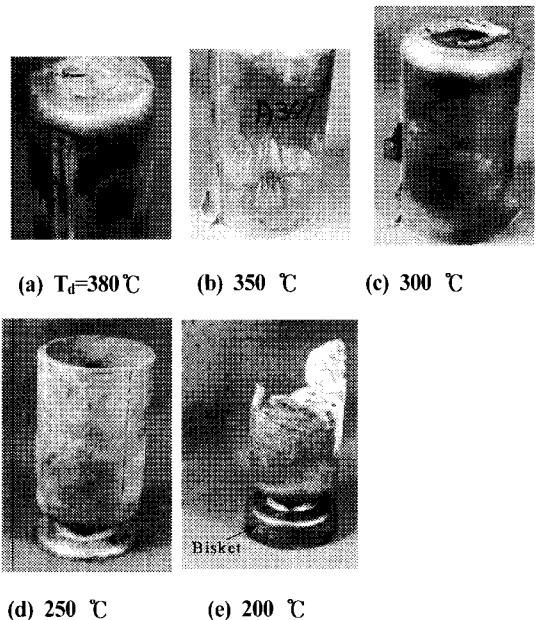


Fig. 3 Composites cylinder liner fabricated for variation of die temperature (P=80MPa, t=2min, Vp=250mm/sec, fs=0.55)

Fig. 3 (d), (e)는 Fig. 3 (a), (b), (c)에서 나타난 소착현상은 보이지 않으나 충전 중 낮은 금형온도에 의해 소재가 응고되어 완전 충전 되지 못하고 잔량이 비스킷부분에 그대로 남아 있음을 알 수 있었다. 그러나 금형 온도가 250℃인 Fig. 3 (d)를 보면 Fig. 3 (a), (b), (c), (e)와 같은 현상은 나타나지 않고 대체로 양호한 성형품을 얻을 수 있었다. 즉 적정금형온도(약250℃)에서는 소착과 미충진과 같은 충전불량은 나타나지 않고 양호한 표면을 가진 제품을 성형할 수 있었다. 따라서 반응용 가압 성형공정에서 금형온도가 성형에 미치는 영향이 크다는 것을 Fig. 3으로부터 알 수 있다.

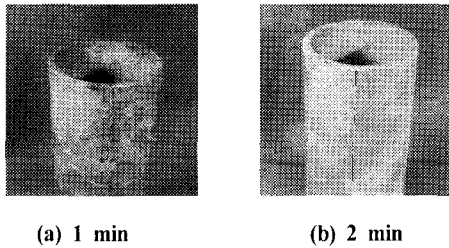


Fig. 4 Composites cylinder linear fabricated at press holding time 1 min. and 2 min (P=80MPa, $T_d=250^\circ\text{C}$, $V_p=250\text{mm/sec}$)

Fig. 4는 A357에 대하여 가압력이 80MPa, 금형온도가 250℃, 펀치속도가 250mm/s일때 가압시간에 따른 성형 결과를 나타내었다. Fig. 4 (a), (b)는 가압시간이 각각 1min과 2min 일때 취출과 동시에 냉랭을 한 후의 성형품을 나타낸 것이다. 가압시간이 1min인 Fig. 4 (a)을 보면 성형품의 금형 분할면에 crack이 관찰 되었다. 이는 응고가 완전히 이루어지기 전에 인위적으로 금형을 좌우로 분리하였기 때문에 금형 분할면에서 힘이 집중되어 나타난 것으로 예측할 수 있다. 가압시간을 2min이상으로 했을 때 성형품을 나타낸 Fig. 4 (b)는 Fig. 4 (a)와 같이 금형 분할면에서 crack이 발생하지 않았다. 이는 제품의 형태와 관련이 있는 것으로 사료된다. 즉 cylinder liner와 같이 Fig. 2 (b)에서 보여주는 바와 같이 두께가 4mm인 얇은 제품은 완전히 응고가 이루어진 다음에 금형을 열어 취출하는 것이 성형품의 결합을 최소화할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 A357에 대하여 가압력이 80MPa, 가압시간이 2min, 금형 온도가 250℃, punch속도가 250mm/s 일 때 재가열 조건에 대한 성형 결과를 나타낸 것이다. Fig.5 (a), (b), (c)에서 보여주는 고상율(f_s)가 0.6, 0.55 및 0.5에 대응하는 빌렛의 성형온도는 각각 566℃, 575℃, 583℃이다. Fig. 5 (a)는 재가열이 완전히 되지 못한 상태

에서 성형이 이루어졌기 때문에 충전 끝단부를 보면 고상영역이 그대로 남아있음을 알 수 있다. Fig. 5 (c)는 재가열시 액상유출로 인해 재가열중 재료손실량이 많아 CATIA로 계산한 체적보다 훨씬 적은 양이 성형에 이용되었다. 따라서 충전 끝단부를 보면 알 수 있듯이 액상과 고상이 충전도중 계속적인 소재공급이 이루어지지 못하고 결국 미충진 현상이 발생되었다. 비스킷의 두께를 보면 펀치는 최대 스트로크를 이동하여 성형이 이루어졌지만 충전 되어야 할 소재가 재료손실로 인하여 성형품 부분보다 적어서 제품부에 다 충전이 되지 못했다는 것을 알 수 있다. 재가열시 재료손실의 최소와 미성형부분이 나타나지 않도록 하기 위한 고상율의 설정이 중요함을 알 수 있었다. Fig. 5 (b)를 보면 적당한 고상율을 가진 소재가 모두 충전에 이용되어 양호한 제품을 성형할 수 있었다.

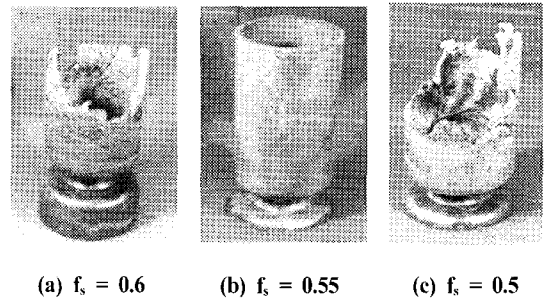


Fig. 5 Composites cylinder linear with un-filling phenomena fabricated for variation of solid-fraction (P=80MPa, t=2min, $T_d=250^\circ\text{C}$, $V_p=250\text{mm/sec}$)

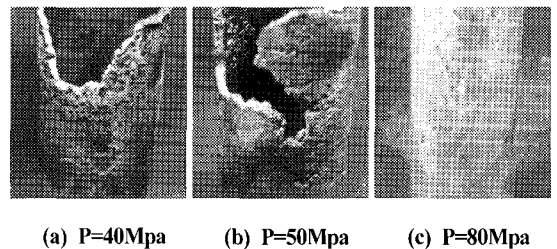
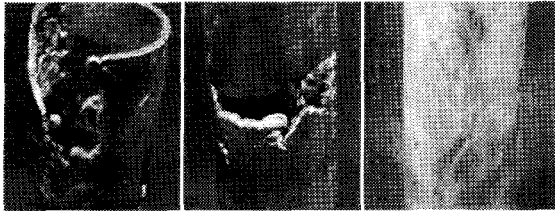


Fig. 6 Partial un-filling phenomena of composites cylinder linear fabricated for variation of forging pressure (t=2min, $T_d=250^\circ\text{C}$, $V_p=250\text{mm/sec}$, $f_s=0.55$)

Fig. 6은 성형압력 변화에 따라서 성형품에 나타난 결합을 나타낸 것이다. 성형압력 이 각각 40Mpa(Fig. 6 (a))와 50Mpa(Fig. 6 (b))일때는 가압력의 부족현상 때문에 미충진 부분이 나타나면서 충전 끝단부에서 응고가 빨리 일어나 완만하게 충전이 되지 못하는 현상을 관찰할 수 있다. 80Mpa의 성형압력에서는 결합이 없는 양호



(a) $V_p=90\text{mm/s}$ (b) $V_p=120\text{mm/s}$ (c) $V_p=250\text{mm/s}$

Fig. 7 The defects phenomenon in composites cylinder linear fabricated for variation of punch velocity during thixoforging ($P=80\text{MPa}$, $t=2\text{min}$, $T_d=250^\circ\text{C}$, $f_s=0.55$)

한 성형품을 얻을 수 있었다

Fig. 7은 속도변화에 따라서 성형품에 나타난 결함을 나타낸 것이다. 성형속도가 저속일 때는 ($V_p=90\text{mm/s}$, $V_p=120\text{mm/s}$) 충전과정 도중에 응고가 일어나거나 한쪽으로 치우쳐 충전 됨을 알 수 있었다. 성형속도가 $V_p=250\text{mm/s}$ 일 때의 성형품이 가장 양호함을 Fig. 7로부터 알 수 있었다.

Fig. 8은 조직사진을 조사하기 위한 각 부위를 나타낸 것이다. Fig. 9는 A380 합금 소재를 유도가열로에서 가열하여 제조한 빌렛을 성형한 제품의 각 부위별 조직사진이다. Fig. 9의 F지점을 보면 내부에 기공이 많이 함유된 것을 알 수 있다. 성형 중 기공발생을 예측하여 오버플로어를 고려하였으나 원소재 자체에 기공을 함유하고 있으므로⁽¹⁴⁾ Fig. 9의 F지점처럼 오버플로어의 역할이 감소하였다고 볼 수 있다.

실린더라이너 부품으로서의 요구조건 중 강화재의 균일 분산성은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 결함이 없는 제품을 제조 할 수 있는 성형조건인 $P=80\text{MPa}$, $t=2\text{min}$, $T_d=250^\circ\text{C}$, $V_p=250\text{mm/sec}$, $f_s=0.55$ 에서 제조한 A380 복합재료 실린더 라이너에 대해 강화재의 분산성을 조사하였다.

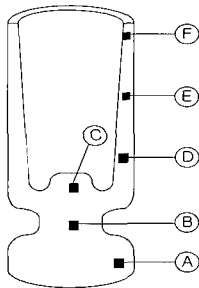


Fig. 8 Schematic diagram of observation point for microstructure

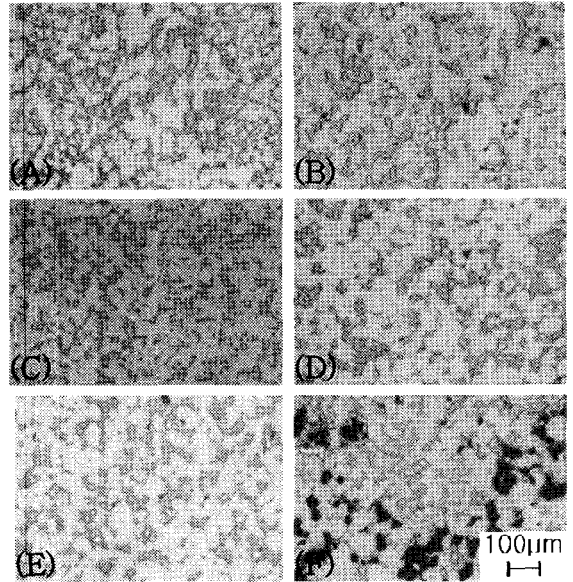


Fig. 9 The micrographs of A380 raw material after thixoforging ($\times 100$)

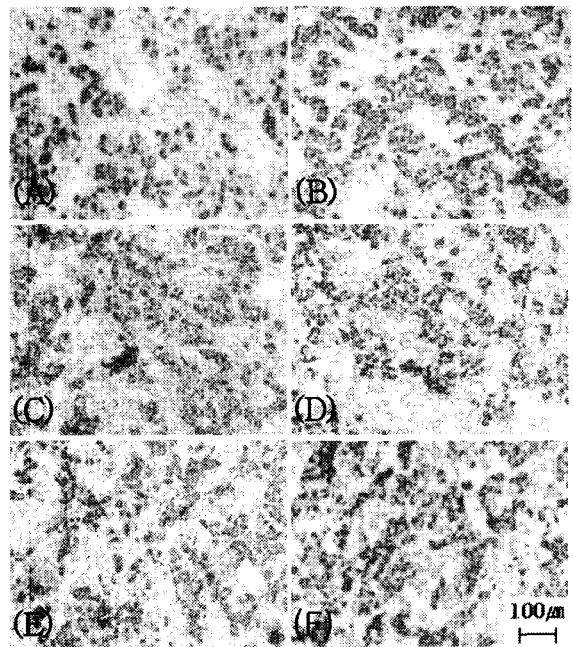


Fig. 10 The micrographs of metal matrix composite (particle size $14\mu\text{m}$, $10\text{vol}\%$, $\times 100$)

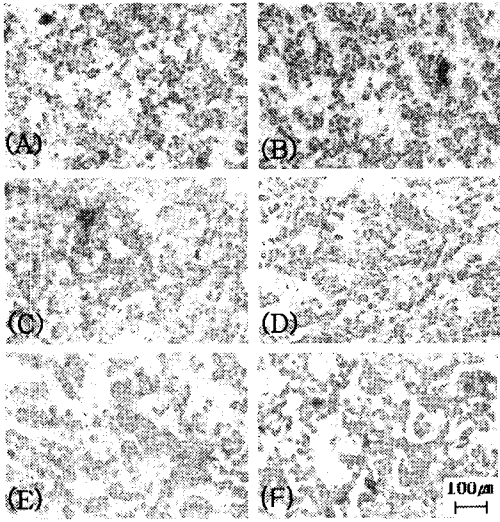


Fig. 11 The micrographs of metal matrix composite (particle size 14 μ m, 20vol%, $\times 100$)

Fig. 10과 Fig. 11은 강화재의 크기가 14 μ m인 경우 강화재의 함유율이 각각 10%, 20%일때 조직사진을 나타낸 것이다. 대체로 부위별로 균일한 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 12와 Fig. 13은 강화재의 크기가 5.5 μ m인 경우 강화재의 함유율이 각각 10%, 20%일 때의 조직사진이다. 전체적으로 균일한 분산을 이루고 있지만 Fig. 12의 5.5 μ m가 Fig. 10의 14 μ m에 비하여 강화재가 응집되어 있는 것을 알 수 있다.

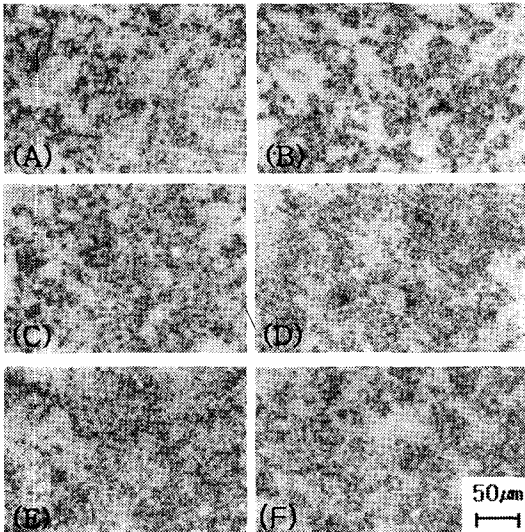


Fig. 12 The micrographs of metal matrix composite (particle size 5.5 μ m, 10vol%, $\times 100$)

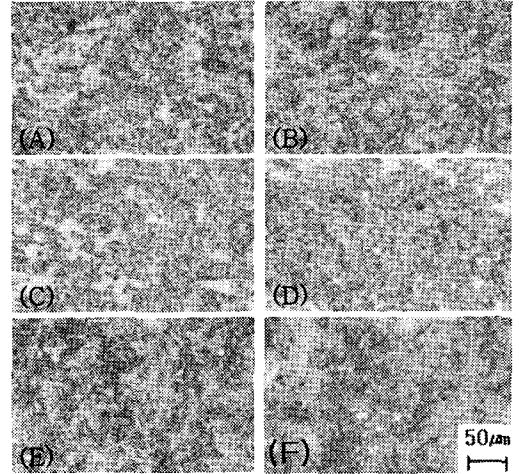


Fig. 13 The micrographs of metal matrix composite (particle size 5.5 μ m, 20vol%, $\times 100$)

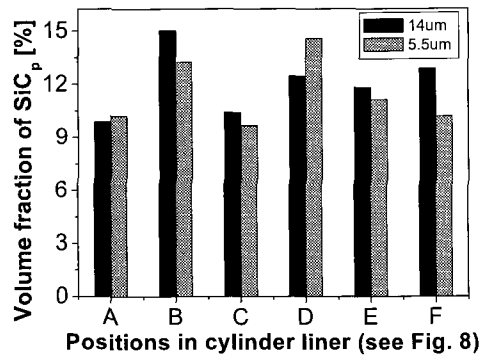


Fig. 14 Volume fraction of reinforcements in composites cylinder liner after thixoforging (which calculated by quantitative image analysis and initial volume fraction of reinforcements in composites billet is 10%)

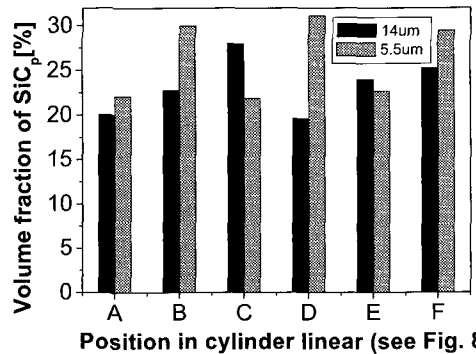


Fig. 15 Volume fraction of reinforcements in composites cylinder liner after thixoforging (which calculated by quantitative image analysis and initial volume fraction of reinforcements in composites billet is 20%)

Fig. 14와 Fig. 15는 초기 강화재를 각각 10%와 20%로 하여 제조한 복합재료를 성형한 결과 시편 각 부위의 조직을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 초기 강화재의 함유량이 10%인 경우는 Fig. 10에서 보여주는 B지점에서 최대 15%까지 강화재가 증가함을 Fig. 14로부터 알 수 있다. 또한 초기 강화재의 함유량이 20%인 경우는 최대 31%까지 강화재가 응집되어 있음을 Fig. 15로부터 알 수 있다. Fig. 14와 Fig. 15에서 보여주는 결과로부터 알 수 있듯이 강화재의 균일분산이 이루어지지 않은 이유는 원소재 빌렛에서 강화재가 균일하게 분산되어 있지 않기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

반응용 성형 공정에서 공정변수에 따라서 발생하는 제품의 결함관찰과 이를 토대로 한 중공형 부품에 대한 적용결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두께가 얇고 단순한 중공형 제품의 경우는 가압 지연시간 및 금형의 예열 온도보다 성형시 재가열온도(고상율), 가압력 및 가압속도가 제품결함에 미치는 중요한 원인으로 판명되었다.

(2) 중공형 모양의 부품을 thixoforging으로 성형한 후 강화재의 분산정도를 각 부위별로 분석한 결과, 성형전의 복합재료 빌렛 보다 강화재가 균일하게 분산되었음을 알 수 있었다.

(3) 중공형 금속복합재료부품의 thixoforging 공정에서 끝단부의 미충전, 표면결합 및 불균일 미충전 결합등이 관찰되었다.

(4) 가압력 $P=80\text{MPa}$, 초기편치속도 $V_p=200\sim 300\text{mm/sec}$, 가압지연시간 $t=2\text{min}$, 고상율 $f_s=0.55$ 및 다이온도 $T_d=250^\circ\text{C}$ 의 조건에서 결함이 없는 건전한 중공형 복합재료의 부품을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Cox, P. C., McGrath, G. G. and Savage, G. M., "Designing with Reinforced Composites to Provide Energy Absorption Mechanisma in Damage Formula 1 Cars", Proc. of the 9th Int. Conf. on Composite Materials Vol. 6, Madrid, Antonio Miravete, 12-16 July, 1993, pp. 241~251.
 (2) Manso, J. J., "Continous Process of Structural Frames for Automotive Applications", Proc. of the 9th Int. Conf. on Composite Materials Vol. 6,

Madrid, Antonio Miravete, 12-16 July, 1993, pp. 276~282.
 (3) Cornie, J. A., Moon, H. K., Flemings, M. C., "A Review of Semi-Solid Slurry Processing of Al-Matrix Composites", Proc. of the 8th Int. Conf. on Composite Materials Vol 4, Montreal Quebec, Canada, 17-29 Sep, pp. 63~78.
 (4) Girot, F. A., Albingre, L., Quenisset, J. M. and Naslain, R., "Rheocasting Al Matrix Composties", J. of Materials Proc. Technology, Nov., 1987, pp. 18~21.
 (5) Caron, S. and Masounave, J., "A Literature Review on Fabrication Techniques of Particulates Reinforced Metal Composites", Proc. of the 8th Int. Conf. on Composite Materials Vol 3, Montreal Quebec, 17-29 Sep, 1990, pp. 79~86.
 (6) Morita, Y., Ozawa, K., Ando, Y., Yahata, S., and Nanba, A., "Compocasting Conditions and Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composite Reinforced by SiC Particles", Proc. 3rd Intl. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloy and Composite, Institute of Industrial Science University of Tokyo, Japan, Manabu Kiuchi, 13-15 June, 1994, pp. 39-1~39-11.
 (7) Lee, D. G. and Kang, C. G., "Investigation of Reinforced Distribution in Fabrication Process of Metal Matrix Composites by Combined Stirring Process", J. of the Korean Society for Composite materials, vol. 14, 2001, No.15, pp. 1~11.
 (8) 이동건, 강충길, "복합교반법으로 제조한 금속복합재료의 Thixoforging-용 재가열공정", 한국소성공학회지, Vol. 11, No. 1, 2002, pp. 45~53.
 (9) Heo, J. C., Lee, S. H. and Kang, C. G., "Thixoforging Die Design and Process Analysis of Hollow Shape Part with Metal Matrix Composites", Proc. of the Korean Society for Technology of Plasticity Fall Annual Meeting, 2001, pp. 268~270.
 (10) Valencia, J. J., Friedhoff, T. G., Creeden T. P. and Cardarella, J. J., "Microstructural Evaluation of Rapidly Heated Aluminium A356 Alloy Billets", Proc. 5th. Intl. Conf. On Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines, Colorado, 23-25 June, 1998, pp. 397~404.

- (11) Ahn, S. S., Kang, C. G., and Jo, H. H., "Induction heating of metal matrix composites for thixoforming", 2nd Asia Australians Conf. on Composites Materials (ACCM 2000), Kyongju, Korea, 18-20 Aug, 2000, pp. 309~314.
- (12) Kang, C. G. and Youn, S. W., and Seo, P. K., "Reheating process of metal matrix composites for Thixoforming and their Inductive coil design", J. of Mater. Eng. and Perform., Vol. 11(2) April, 2002.
- (13) Kim, N. S. and Kang, C. G., "An investigation of flow characteristics considering the effect of viscosity variation in the thixoforming process", J. of Materials Processing Technology, Vol. 103, 2000, pp. 12~23.
- (14) Kang, C. G., "Continuous casting for Al metal matrix composit & development of parts by thixoforming", Technical Report, Engineering Research Center for Net, Shape and Die Manufacturin (ERC/NSDM), Pusan National University, Korea, 2001.