한국정밀공학회지 제 20 권 제 2 호 (2003 년 2 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20, No. 2, February 2003.

Thixoforging Process 에 의하여 제조한 금속복합재료 실린더라이너 부품의 기계적 특성 평가

허재찬*, 이승후*, 강충길**

Mechanical Characteristics Evaluation of Metal Matrix Composites Cylinder Linear Fabricated by Thixoforging Process

Jae-Chan Heo*, Seung-Hoo Lee* and Chung-Gil Kang**

ABSTRACT

The conventional forming process such as squeeze casting or die casting for fabricating metal matrix composites products have a disadvantage such as non homogenous distribution of reinforcement, weak bonding between matrix and reinforcement and cost increase in parts fabrication. Thixoforming process has been accepted as a new method for fabricating the net shaped metal matrix composites with lightweight and wear resistance. In this paper, the effect of volume fraction and reinforcement sizes on mechanical properties in cylinder liner part of metal matrix composites has been investigated with processes parameters such as pressure and velocity.

Moreover, the methods to obtain the thixoforged composites cylinder liner with high quality has been proposed. To evaluate the composites cylinder linear fabricated at the conditions proposed in this study, mechanical properties of fabricated composites cylinder linear were compared with those of commercial composites cylinder linear.

Key Words : Thixoforging Process(반용융 성형공정), Metal Matrix Composites(금속복합재료), Cylinder liner(실린더라이너), Wear resistance(내마모성)

1. 서론

입자 강화형 금속복합재료는 비강도, 피로강도, 탄성률, 내마모성 및 저 열팽창계수 등 자동차 소재산업에 있어 우수한 기계적 특성을 가지고 있다. 금속복합재료의 경우는 Al, Mg 계 합금 등이 기지재료로 사용하고 있기 때문에 주철 또는 철강 부품을 대체 할 수 있는 내마모성 경량재료로써 각광을 받고 있다[1,2].

금속복합재료의 응용연구는 스퀴즈케스팅공법을 이용하여 강화재의 예비성형체 내부에 기지재를 함침시키는 연구가 주류를 이루고 있다[3~5]. 기지재를 예비성형체 내부에 함침시켜 부품을 성형하기 위하여 진공가압법으로 예비성형체를 제조하여야 한다. 그러나 임의형상의 예비성형체를 제조하기가 어렵고, 가격면에서 경쟁력을 확보할 수가 없다. 따라서 최근에는 임의형상의 금속복합재료 부품을 성형하기 위하여 반용융성형공법을 이용하고 있다[6,7]. 반용융성형공정에서는 연속주조법으로 제조한 금속복합재료 빌렛을 재가열하여 단조 및

2002 년 7 월 19 일 접수
* 부산대 대학원 기계공학부
** 부산대 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소 (ERC/NSDM)

다이케스팅 공법으로 임의형상의 부품을 성형하므로 예비성형체를 제조할 필요가 없다. 반용융 성형공정에 의하여 금속복합재료의 부품을 성형하기 위해서는 재가열 공정이 필수적이다. 복합재료의 재가열시 빌렛단면에 있어서 온도편차를 최소화하기 위한 고주파코일을 제작하여 재가열 실험조건을 제시하였다[8]. 재가열시 복합재료 빌렛표면에 생성된 산화층이 성형중 제품내부에 포함되면 결함의 원인이 된다. 성형중 고체상태인 강화재와 고상과 액상이 동시에 공존한 기지재가 각각 혼합된 복합재료의 슬러리가 금형의 케비티 내부에 유입될 때 고상과 액상의 분리현상을 유발하여 강화재의 응집현상과 미세기공의 원인이 된다. Heo 등은 이러한 문제점에 착안하여 중공형 부품을 제조하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 금형설계 및 조업조건을 제시하였다[9].

Lee 등은 자동차엔진블록에 삽입하여 사용하기 위한 실린더라이너를 반용융성형에 의하여 제조할 때 각종문제점과 해결방안을 제시하였으며, 실린더라이너 제품으로서 이용할 수 있는 부품에 대하여 강화재의 분산성을 조사하였으며, 성형성과 강화재의 분산측면에서 실린더라이너로서의 응용 가능성을 제시하였다[10]. 그러나 반용융 성형의 중요한 공정변수 중 가압력과 성형속도가 중공형부품의 기계적 성질에 미치는 영향에 관한 데이터를 제공하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 금속복합재료를 반용융성형공정에 의하여 라이너를 제조할 때 미충전, 미성형 및 기공 등이 나타나지 않는 성형조건을 이용하여 라이너를 제조하였다. 기지재는 A380, A390 을 이용하였으며, SiC 입자 강화형 금속복합재료 빌렛의 재가열실험을 통하여 원하는 고상율을 가진 소재를 반용융 성형공정에 의하여 자동차용 실린더라이너를 성형하는 방법을 제시하였다. 반용융 성형공정에서 가압력과 가압속도가 라이너의 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하였으며, 또한, 제조한 실린더 라이너의 기계적 성질을 외국사(독일의 PEAK 社)에서 제조한 제품과 비교· 검토함으로써 향후 실린더라이너의 응용가능성을 제안하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 재가열 온도설정 및 재가열 실험

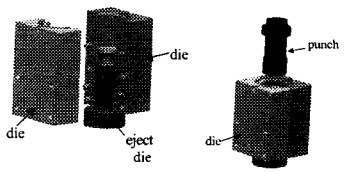
입자 강화형 금속 복합 재료는 이종의 소재가 혼합되어 있는 상태이므로 기존의 알루미늄 합금의 재가열에 관한 데이터를 직접 적용할 수가 없다. 그러므로 Thixoforming 공정을 위한 소재의 재가열시 고상율 예측에 필요한 온도와 강화재의 체적 함유율 사이의 관계가 정확히 규명되어야 한다. 본 연구에서는 입자 강화형 금속 복합 재료의 재가열에 관한 온도설정은 기지재의 온도와 고상율 사이의 실험 데이터를 이용하여 복합재료의 재가열 온도로 이용하였다[11]. 소재의 재가열을 3 단계로 나누어 각 단계마다 가열 시간 및 유지 시간을 제어함으로써 소재의 균일한 가열을 얻을 수 있으므로 본 연구에서는 재가열 온도를 3 단으로 설정하였다[12].

금속 복합 재료의 성형용 빌렛에 적합한 코일을 설계 및 제작하였으며, 재가열 코일을 20kW 유도 가열로에 설치하고 재가열 한 후 퀜칭하여 조직을 관찰하였다. 재가열중 빌렛의 온도를 조사하기 위해서 빌렛의 Center, Surface 및 Main 으로 나누어 ϕ 2mm 로 가공한 후 열전대를 삽입하여 설정온도와 실제 가열 온도와의 차이를 측정하여 실험조건으로 설정하였다[13].

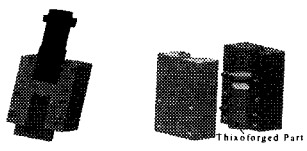
2.2 성형실험

반용융 성형에 사용된 빌렛은 A380, A390 합금과 10% SiC_p/A380, 20% SiC_p/A380 이며, 복합재료의 빌렛은 수평연속주조법에 의하여 제조한 소재를 이용하였다[13].

실린더 라이너를 Thixoforging 으로 성형하기 위한 금형의 형상과 작동원리는 Fig. 1 과 같다. Fig. 1 ①, ②은 금형을 각각 분리 및 합체하였을 때

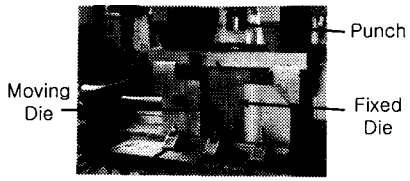


① die open & spray ② die close & billet



③ punch stroke ④ die open & eject

(a) Process layout



(b) Die set for thixofoging

Fig. 1 Schematic diagram for thixoforging of cylinder liner

금형의 외형을 나타낸 것이다. Fig. 1 ③, ④는 반용융 성형후 펀치의 가압상태와 이젝트를 이용하여 제품을 금형으로부터 취출하는 상태를 나타낸 것이다. 금형을 예열하기 위해 1KW Φ 16mm 카트리지 히터를 슬리브에 10 개 사용하였고 슬리브 아래쪽의 제품부에 Φ 1.8mm 의 홀을 가공하여 K-type 열전대를 삽입하여 금형 온도를 측정하고 제어하였다. 소재가 금형에 소착되는 것을 방지하기 위하여 슬리브와 제품부 그리고 코어부분에 열간 단조용 그라파이트계 윤활재를 도포하였으며, 실험온도로 금형을 예열한 후 재가열된 MMC 빌렛을 슬리브 부분에 넣고 200 Ton 고속 유압프레스의 펀치로 가압하여 성형을 하였다. 성형을 한 후 제품을 취출함과 동시에 급냉을 하였고 충진이 완전히 이루어진 이후 가압력의 변화와 가압속도를 변수로 하여 실험을 하였다.

본 연구에서 사용한 금형설계와 성형조건은 MAGMA S/W 를 이용하여 도출한 계산결과를 이용하였으며[9], 성형시 각종 결함 현상의 예방과 건전한 제품을 제조하기 위하여 저자가 연구한 실험결과를 이용하여 실린더라이너를 제조하였다[10].

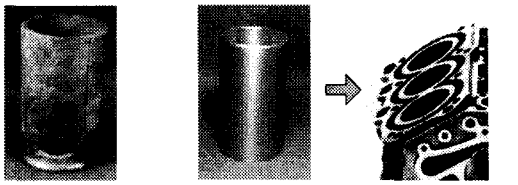
3. 기계적성질

3.1 기계적 성질

Fig. 2 (a)는 결함이 없는 건전한 중공형 복합재료의 부품을 제조하기 위하여 저자가 연구한 성형조건에서 제조된 실린더라이너이다.

성형조건은 가압력 80Mpa, 펀치의 가압속도 V_p=250mm/sec, 금형온도 T_d=250℃, 가압지연시간 t=2min 였다[10]. Fig. 2 (b)는 후가공이 완료된 실린더라이너이고, Fig. 2 (c)는 본 연구에서 제조한 실린더라이너를 실린더 블록에 삽입하여 엔진블록으로 사용하기 위한 한 예를 나타낸 것이다.

성형조건에 따른 기계적 특성을 조사하기 위



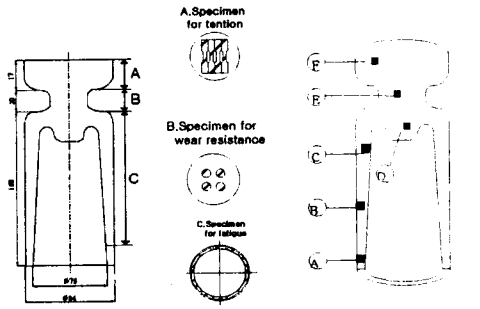
(a) thixoforged cylinder linear (b) machined cylinder linear (c) cylinder block

Fig. 2 Cylinder liner & cylinder block for automobile parts

하여 본 연구에서는 반용융 소재가 금형의 캐비티 내부에 충전이 완료된 후 가압력을 Table 1 에서 보여주는 바와 같이 각각 60, 80, 100MPa 으로 설정하였다. 이때 가압속도는 성형중 소재의 온도저감을 방지하기 위하여 고속유압프레스의 가압속도를 200mm/sec, 250mm/sec, 300mm/sec 로 실험을 수행하였다.

Table 1 Thixoforging conditions for particulate reinforced metal matrix composites

CASE	Pressure(Mpa)	Punch velocity(mm/sec)
A	60	250
B	80	250
C	100	250
D	80	200
E	80	300



(a) positions to obtain the test specimen (b) positions for hardness test

Fig. 3 Schematic diagram of cylinder liner

본 연구에서 제조한 실린더라이너의 사용가능성을 검토하기 위하여 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 지정된 위치에서 인장, 마모, 피로시편을 각각 가

공하였다. 인장시험편을 채취한 위치는 Fig. 3 에서 보여주는 바와 같이 게이트 부근(Fig. 3 (a)의 A 영역)으로써 평행부가 원형인 인장시험편을 가공하였다. 마모시험편은 재가열중 생성된 산화층이 마모량에 크게 영향을 미치므로 산화층이 완전히 제거된 부분(Fig. 3 (a)의 B 영역)에서 채취하였다. 피로시험편은 판재로 가공하였으며, 실린더라이너 부분(Fig. 3 (a)의 C 영역)에서 채취한 시험편을 이용하였다. 인장시험은 Instron 社의 10Ton MTS 를 이용하여 10mm/min 의 속도로 실험을 하였다.

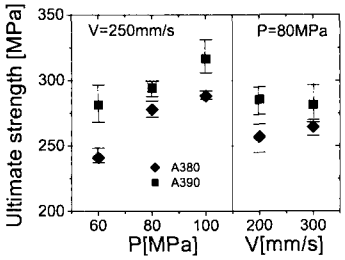
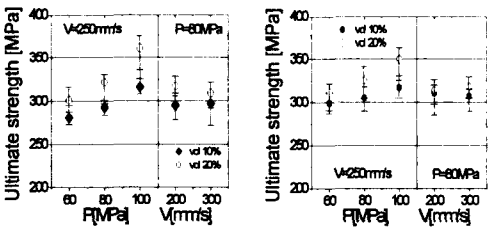


Fig. 4 Ultimate strength of matrix alloys (A380 and A390 alloy) after thixoforging

Fig. 4 는 일정한 속도(250mm/s)하에서 100Mpa 에서 성형한 부품의 인장강도 값이 60, 80Mpa 에서 성형한 시험편의 강도 값보다 높음을 보여주고 있다. 그러나 일정한 압력(80MPa)하에서 속도변화에 따른 인장강도의 변화는 일정한 경향을 보이지 않고 있다. 기지재의 조성 측면에서 관찰해 보면 Si 함유량이 많은 소재일 수록 인장강도 값이 향상된다는 것을 알 수 있었다.



(a) d_p(SiC$_p$ size) =5.5 ㎛ (b) d_p(SiC$_p$ size) =5.5 ㎛

Fig. 5 Ultimate strength of composites cylinder linear after thixoforging

Fig. 5 는 강화재의 크기가 14 ㎛ 와 5.5 ㎛일 때 인장강도를 비교한 것이다. 강화재 크기가 5.5 ㎛ 인 복합재료의 인장강도가 14 ㎛인 복합재료의 인장강도보다 약간 높게 나타나는 것을 Fig. 5 (a), (b) 에서 알 수 있다. 또한, SiCp 의 함유량이 많은 20% vol.% A380 이 10% vol.% A380 보다 인장강도 값이 높음을 알 수 있었다.

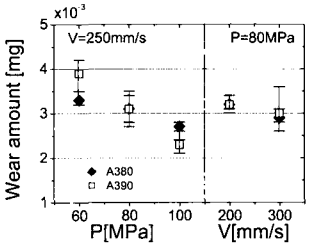
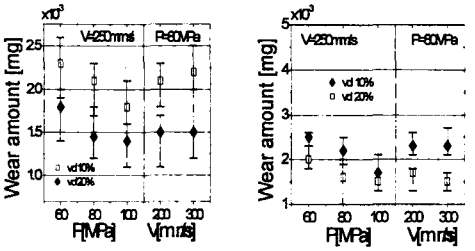


Fig. 6 Wear amount of matrix alloys(A380 and A390 alloy) after thixoforging



(a) d_p(SiC$_p$ size) = 5.5 ㎛ (b) d_p =14 ㎛

Fig. 7 Wear amount of composites cylinder linear after thixoforging

Fig. 6~7 은 PLINT 社의 TE 92 마모시험기를 이용하여 60RPM 100N 의 하중으로 실험한 pin-on-disk type 의 마모실험 결과를 나타내고 있다. Fig. 6~7 의 값들은 Table 1 의 각 조건에서 성형한 시험편의 값을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 마모계수를 구하지 않고 상대적인 마모량만을 나타내었다. Fig. 6~7 을 보면 100Mpa 에서 성형한 시편의 마모량이 60, 80MPa 에서 성형한 시편보다 적다는 것을 알 수 있다. 일정한 압력 하에서 속도 변화에 따른 마모량은 Fig. 4~5 에서 보여주는 인장강도의 경우와 같이 일정한 경향을 보이지 않는 것을 알 수 있고, A380 합금과 A390 합금의 마모량이 거의 비슷함을 알 수 있다.

이 결과로부터 마모량은 펀치 속도에 의한 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig.7 에서 보면 SiC$_p$ 입자의 체적 함유율이 많은 20

vol.% SiC_p/A380 가 10 vol.% SiC_p/A380 보다 마모량이 적다는 것을 알 수 있다. 이것은 SiC_p 함유량이 증가할 수록 내마모성이 개선되고 있음을 정량적으로 보여주고 있다.

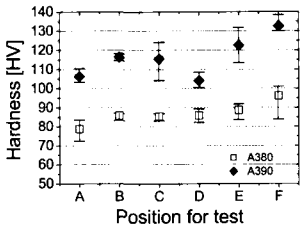
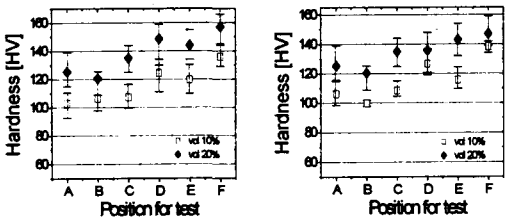


Fig. 8 Hardness values of matrix alloys (A380 and A390 alloy) after thixoforging to each position



(a) $d_p(SiC_p$ size) = 5.5 ㎛ (b) $d_p(SiC_p$ size) =14 ㎛

Fig. 9 Hardness of composites cylinder linear for each position (in Fig. 3 (b)) after thixoforging

Fig. 8 은 기지재인 A380, A390 의 경우에 대한 경도실험 결과를 나타낸 것이다. Buehler-Matsuzawa 2103 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 500gf (약 5N)의 하중을 가하며 실험을 하였다. 그러나 강화재가 포함된 복합소재에 대해서는 로크웰 경도기를 이용하여 측정한 후 경도 값을 상대적으로 비교하기 위하여 비커스 경도로 나타내었다. Fig. 8~9 는 Fig. 3 (b)의 위치에 대한 각 시편의 경도값을 나타내었다. Fig. 8~9 에서 보면 공통적으로 최초 충진 부분 (Fig. 3(b), position F)에서 경도 값이 최고치가 나타나는 것을 알 수 있다. 위의 원인은 최초 충진 부위는 게이트의 위치와 인접하기 때문에 성형 중 압력전달이 잘 되어 기지재의 응고조직이 미세화 되었기 때문이다. MMC 의 경우 강화재 함유량이 많을수록 경도 값이 더 높은 것을 알 수 있었다.

Fig. 4~9 에서 보여주는 바와 같이 기지재의 경우 Si 함량이 16%인 A390 과 강화재 입자의 크기가 5.5 ㎛인 20 vol.% SiC_p 복합재료가 인장강도, 마모량 및 경도 면에서 우수한 기계적 성질을 보여주고 있다.

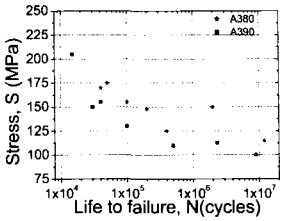
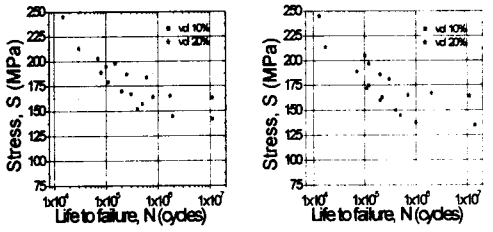


Fig. 10 Fatigue strength of matrix alloys (A380 and A390 alloy) after thixoforging



(a) $d_p(SiC_p$ size) = 5.5 ㎛ (b) $d_p(SiC_p$ size) =14 ㎛

Fig. 11 Fatigue strength of composites cylinder after thixoforging

Fig. 10~11 은 각 소재에 대한 피로시험 결과를 나타낸 것이다. 피로시험은 25Ton MTS 를 이용하여 20Hz 의 주파수로 파단 할 때까지 인장· 압축 응력을 반복적으로 가하며 실험을 하였다. Fig. 10 은 기지재인 A380, A390 에 대한 피로강도를 각각 나타낸 것이며 Fig. 11 는 강화재의 크기에 따른 피로시험 데이타이다. A380 의 피로강도가 A390 의 피로강도보다 높게 나타난다는 것을 Fig. 10 으로부터 알 수 있다. Fig. 11 은 강화재의 크기가 각각 14 ㎛ 와 5.5 ㎛일 때 10 vol.% SiC_p/A380 과 20 vol.% SiC_p/A380 에 대한 피로시험 결과를 비교한 것이다. 5.5 ㎛의 파단강도가 14 ㎛의 파단강도 보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. A380 합금의 피로강도는 약 1.2×10^7 부근에서 약 115MPa 이고, A390 합금의 피로강도는 약 9×10^6 부근에서 110MPa 이다. 10 vol.% SiC_p/A380 의 피로강도는 약 1.5×10^7 부근에서 135MPa 의 값을 나타내고 있다. 20 vol.% SiC_p/A380 의 피로강도는 1.5×10^7 부근에서 160MPa 의 값을 나타내고 있다. Fig. 11 의 데이터를 살펴보면 20 vol.% SiC_p/A380 의 피로강도가

10 vol.% SiC_p/A380 보다 우수하다는 것을 알 수 있었다. Fig. 12 는 A380, A390 및 복합소재의 피로강도를 비교한 것이다. 복합재료인 10 vol.% SiC_p /A380 과 20 vol.% SiC_p/A380 의 피로강도가 기지재인 A380, A390 의 값보다 높게 나타난다는 것을 Fig. 12 로부터 알 수 있다. 일반적으로 복합재료의 피로강도는 기지재에 비하여 크게 증가하지 않는다고 알려져 있지만[14], 본 실험에서는 기지재에 비해 복합재료의 피로강도가 크게 개선되고 있음을 보여주고 있다. 위의 원인은 반용융성형에서는 기지재와 강화재사이의 계면결합이 주조법에 비하여 향상되기 때문으로 사료된다.

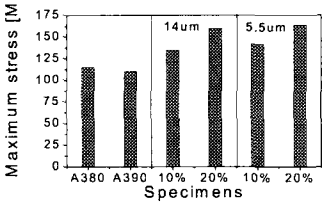


Fig. 12 Comparison with fatigue of matrix alloys and composites after thixoforging

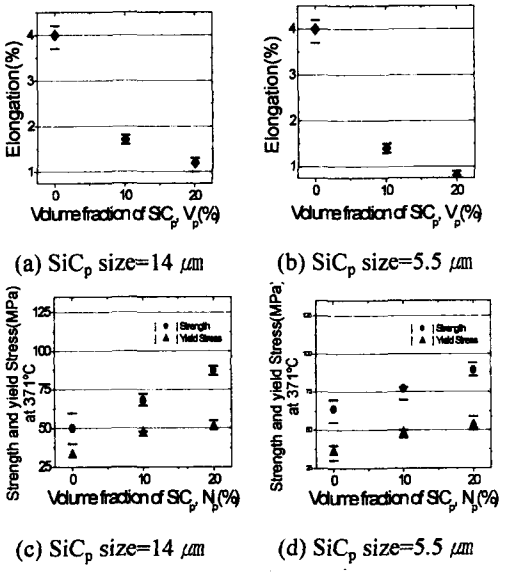


Fig. 13 Elongation and strength, yields stress at 371℃ of composites materials

Fig. 13 은 강화재의 크기가 각각 14 ㎛와 5.5 ㎛ 일 때의 연신율 및 371℃에서 고온강도와 항복응력 값을 나타낸 것이다. Fig. 13 (c), (d)에서 보면 SiC_p 함유량이 증가할수록 고온강도는 급격히 감소하다가 서서히 증가함을 알 수 있다. 이상의 실험결과에 의하면 강화입자의 함유량이 많을수록, 또한 강화입자의 크기가 작을수록 기계적 성질이 개선되고 있음을 알 수 있다.

Table 2 는 본 연구에서 얻어진 항복응력, 탄성계수, 연신율, 고온강도 및 고온항복응력의 최대 및 최소값을 정리한 것이다. Table 2 에 의하면 연신율을 제외한 대부분의 기계적 성질이 기지재에 비하여 개선되고 있음을 알 수 있다.

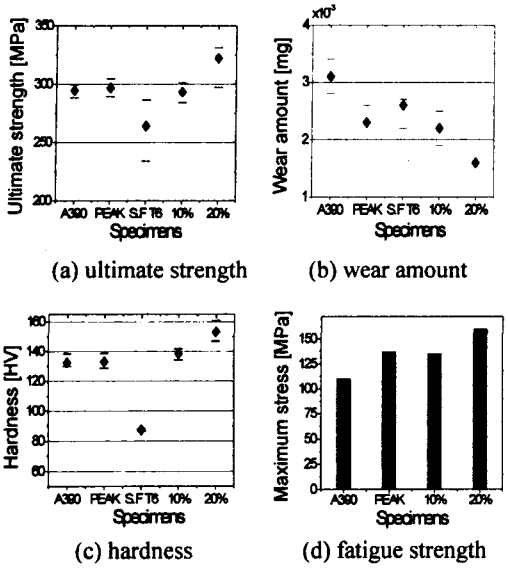
Table 2 Mechanical properties of cylinder linar fabricated for variation of V_f and size of SiC_p

V_f(%)	0%		10%		20%	
	14 ㎛ SiC_p	5.5 ㎛ SiC_p	14 ㎛ SiC_p	5.5 ㎛ SiC_p	14 ㎛ SiC_p	5.5 ㎛ SiC_p
Yield stress	138 ~159	138 ~159	290 ~310	300 ~320	300 ~325	310 ~330
Elastic modulus	50 ~72	50 ~72	80 ~95	105 ~118	100 ~115	110 ~120
Elongation	3.7 ~4.2	3.7 ~4.2	1.6 ~1.8	1.3 ~1.5	1.0 ~1.3	0.7 ~0.9
Strength at 371℃	40 ~60	55 ~70	65 ~72	70 ~78	84 ~90	85 ~94
Yield stress at 371℃	30 ~40	30 ~40	45 ~48	45 ~50	50 ~55	52 ~59

4. 라이너부품의 적합성 검토모델

Fig. 14 는 Si 를 16% 포함하는 원소재인 A390 합금과 PEAK 社에서 생산하고 있는 상용 실린더 라이너, 그리고 분무성형으로 만든 빌렛을 압출에 의하여 제조한 후 T6 열처리를 통해 제조된 S.F T6, 그리고 본 연구에서 제조된 MMC 실린더 라이너의 기계적 성질을 각각 비교한 것이다. 극한인장강도의 경우 체적함유율이 10%인 금속복합소재의 실린더라이너와 PEAK 소재를 비교해 보면 큰 차이가 없으나, 20 vol.% SiC_p/A380 소재의 경우에는 A390, PEAK, S.F T6 소재의 강도보다 개선된 것을 알 수 있다. Fig. 14 (b)~(c)에 나타난 마모량과 경도값을 살펴보면 극한인장강도 값을 나타낸 Fig. 14 (a)와 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 15 는 Duralcan 社에서 생산되고 있는 MMC 실린더 라이너소재 2 가지와 본 연구에서 개발한 실린더 라이너의 물성치를 비교한 것이다. Fig. 15 (a)는 극한인장 강도를 비교한 것인데, 강화재의 크기가 14 ㎛일 때의 인장강도보다 5.5 ㎛일 때의



* S.F T6 : T6 heat-treatment after spray forming
PEAK : fabricated cylinder liner produced by PEAK inc.
10% : A380 with 10 vol.% SiCp(14 ㎛)
20% : A380 with 20 vol. % SiCp(14 ㎛)

Fig. 14 Comparison of mechanical property for fabricated composites, A390, S.F T6 and commercial cylinder linear (PEAK)

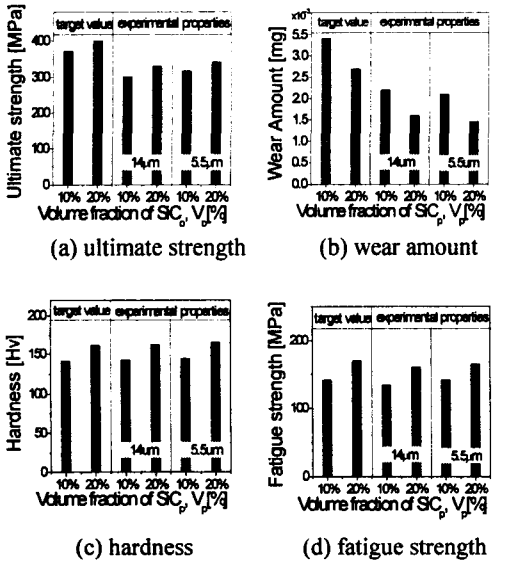


Fig. 15 Comparison of mechanical properties for composites cylinder linear and target values

인장강도가 향상된 것을 알 수 있었고, Duralcan 社에서 제조한 실린더 라이너의 인장강도가 본 연구에서 개발한 MMC 실린더 라이너의 인장강도보다 높다는 것을 알 수 있었다. 그러나 실린더 라이너의 요구강도는 300MPa 로 설계하고 있기 때문에 본 연구에서 성형한 복합재료 부품이 라이너의 요구조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15 (b), (c)는 마모량과 경도 값을 각각 비교한 것이다. Fig. 15 (a)와 마찬가지로 강화입자의 크기가 5.5 ㎛일 때의 마모량과 경도 값이 강화재의 크기가 14 ㎛일 때 보다 우수하고, 본 연구에서 반용융 성형으로 제조한 실린더 라이너의 기계적 성질이 Duralcan 社에서 생산된 실린더 라이너의 기계적 성질에 약간 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

Fig. 16 은 인장시험 후 복합재료의 파단 면의 조직사진을 나타낸 것인데(10 vol.% 14 ㎛ SiC_p/A380 SiCp, 20 vol.% 14 ㎛ SiC_p/A380), 강화재와 기지재 사이의 계면결합이 2 차 가공에 의해 개선되어 계면 분리현상은 관찰되지 않았으며, 또한 기지재의 파단은 연성파괴를 보여주고 있다.

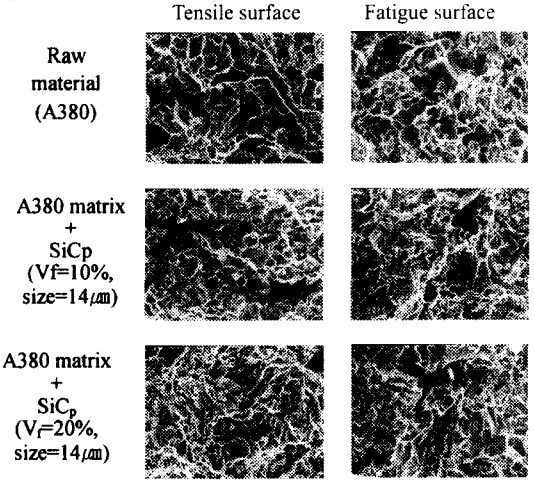


Fig. 16 Micrographs(× 500) of fracture surface after tensile and fatigue tests

본 연구에서 제조한 MMC 실리더 라이너의 기계적 성질을 Duralcan 社의 제품과 비교했을 때 인장강도를 제외하고는 기계적 성질이 증가됨을 알 수 있었다.

5. 결론

반용융성형에 의해 제조한 중공형 금속복합재료 부품의 기계적 특성평가에 있어서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 반용융 성형공정에 의하여 입자강화형 금속복합재료의 중공형 부품을 성형 할 수 있었으며, 성형공정 중 (200~300)mm/sec 의 성형속도 범위 내에서는 성형속도의 변화가 중공형 부품의 강도, 내마모성에 무관함을 알 수 있었다.

(2) 반용융 성형공정에서 가압력이 60MPa 에서 100MPa 로 증가할수록 인장강도는 증가되었으며 마모량은 감소함을 알 수 있었다.

(3) 본 연구에서 성형한 10% SiC_p/A380 라이너의 마모량이 현재 상용 실린더라이너로 사용하는 부품의 마모량(2.3× 10^{-3}mg)과 유사함을 알 수 있으며, 20% SiC_p/A380 의 마모량은 상용 라이너 부품의 마모량보다 37.5%정도 향상됨을 알 수 있었다.

(4) 본 연구에서 성형한 중공형 부품의 기계적 성질이 상용제품의 마모량, 경도, 피로강도 및 강도보다 증가되어 향후 자동차엔진의 실린더라이너로서의 응용가능성을 확보할 수 있는 금형설계 및 성형조건이 제시되었으며 재료에 따른 경량화로서 가격면에서의 경쟁력도 확보될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Kiuchi, M., Sugiyama, S., "Mushy-State Rolling of Sheet Metals Laminated with Composite Layers," J. of the JSTP, Vol. 42, No. 482, pp. 173-178, 2001.
2. Rohati, P. K., Guo, R. Q. and Weiss, D., "Aluminum Matrix Composites Castings," Proc. from Materials Solutions Conf. '98 on Aluminum Casting Technology, 12-15, pp. 101-107, Oct. 1998.
3. Clyne, T. W., Mason, J. F., "The Squeeze Infiltration Process for Fabrication of Metal Matrix Composites," Met. Trans. A, Vol. 18A, pp. 1519-1530, 1987.
4. Kang, C. G.., Ku, G.. S., "An Experimental Investigation on Infiltration Limit and the Mechanical Properties of Al_2O_3 Short Fiber Reinforced Metal Matrix Composites Fabrication by Squeeze Casting," J. of Composites Materials, 29-4, pp. 444-462, 1995.
5. Kang, C. G.., Kim, K. S. and Ku, G. S., "Fabrication of Metal Matrix Composites by Die Casting Techniques and Evaluation of their Mechanical Properties," J. of Material Processing Technology, 62, pp. 116-123, 1996.
6. Andeson, P. R. G., McLelland, A. R. A. and Ward, P. J., "Thixoforming of Aluminium-Based Metal Matrix Composites Systems," SAE Transaction, pp. 605-620, 1994.
7. Kim, M. G., Kim, S. K., Hong, T. W. and Kim, Y. J., "A Study on Thixoforming of SiCp/AZ91HP Magnesium Composites," J. of Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 38, No. 11, pp. 1498-1502, 2000.
8. Kang, C.G.., Youn, S.W, Seo, P.K., "Reheating Process of Metal Matrix Composites for Thixoforming and Their Inductive Coil Design," J. of Materials Engineering and Performance 2002; 11(2):152.
9. Heo, J. C., Kang, C. G., "Digital Manufacturing Technology for Thixoforging of Particulate Reinforced Metal Matrix Composites with Pipe Shape," J. of the Korean Foundrymen's Society to be accepted for pub, 2002.
10. Lee, S. H., Heo, J. C. and Kang, C. G.., "Thixoforging Process and the Ploblems of Hollow Type Metal Matrix Composites Part," Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Fall Annual Meeting, KyungHee university, Suwon, pp. 808-811, 2001.
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, 8-20, pp. 309-314, Aug. 2000.
12. Jung, H. K., Kang. C. G.., "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 and Materials Transaction A, Vol. 30A, No. 12, pp. 2967-2977, 1999.
13. Kang, C. G.., "Continuous Casting for Al Metal Matrix Composites & Development of Parts by Thixoforming," Technical Report, Eng. Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan National University, Korea, 2001.