

# 반응용 가공법에 의한 $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Aluminum 복합재료의 강도 특성

## Characteristic Strength of $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Aluminum Composite by Rheo-compocasting

이상필\*, 김만수\*, 김석호\*\*, 윤한기\*\*

\* 동의 대학교 대학원

\*\* 동의 대학교

**ABSTRACT** Al6061 alloy reinforced with 10 vol%  $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> short fiber have been fabricated by Rheo-compocasting and squeeze casting and extruded at high temperature using conical shape die and curved shape die with various extrusion ratios.. Tensile and hardness tests were carried out to examine mechanical properties of extruded materials and SEM observation of fractured surface was capable of accounting for fracture mechanism and bonding state of fiber and matrix.

### 1. 서론

금속복합재료는 비강성, 비탄성, 내열성, 내마모성 및 열적 안정성이 우수한 재료로서 자동차의 엔진 피스톤 링, 실린더 블록, 구동축, 브레이크 로터 디스크 및 자전거의 프레임과 항공기의 구성품에 사용되고 있다. 반응용 가공법(Rheo-compocasting)과 같은 1차 가공법으로 제조된 금속복합재료는 강화제가 균일하게 분산되어 있더라도 계면 접합 강도가 좋지 못하고 기공이나 편석이 존재하게 되어 기계적 특성이 떨어지게 되며, 또한 형상이 복잡하고 고정밀도가 요구하는 기계 부품의 제조시에는 강화제의 경도가 높기 때문에 절삭 가공이 곤란하다. 따라서 압출, 압연 및 단조등과 같은 2차 가공으로 최종 형상에 가까운 정형(near net shape)으로 제조하는 것이 다품종 대량 생산의 측면에서 경제적이다. 최근 금속복합재료의 압출 가공에 대한 연구는 압출비가 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하고 있으나 다이의 형상이 섬유 배향성과 기계적 성질에 미치는 영향에 대한 결과는 아직 발표되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 금속복합재료에 대한 신뢰성 향상과 압출 가공에 의한 섬유 배향성 개선을 위해 반응용 가공법과 용탕 단조 공정으로 압출용 빌렛을 제조하여 섬유의 분산 상태를 관찰한 후 곡면 다이(Curved shape die)와 원추형 다이(conical shape die)를 사용하여 열간 압출 가공하여 압출시 다이 형태와 압출비에 따른 압출력을 조사하였고 다이 내에서의 단섬유 분산 상태, 파단 정도 및 배향성을 관찰하였다. 그리고 압출재의 섬유 파단과 배향성이 기계적 성질에 미치는 영향을 검사하기 위하여 인장 시험과 경도 시험을 하였으며 또한 섬유와 기지재간의 계면 접합 상태가 인장 강도에 미치는 영향을 조사하기 위해 인장 시험편의 파단면을 SEM으로 관찰하였다.

### 2. 시험편 및 실험 방법

#### 2.1 금속복합재료의 제조

반응용 가공법은 적절한 고상율을 가진 반응용 상태의 기지재에 강화제를 투입하여 복합 재료를 제조하는 방법으로서 고상율을 2차원 분포로 가정한 다음 식을 적용하였다.

$$S_r = \left[ \frac{T_L - T}{T_L - T_s} \right]^{1/2} \times 100 \% \quad \text{-----(1)}$$

여기서  $S_r$ ,  $T$ ,  $T_L$  및  $T_s$ 는 각각 고상율(%), 고상율에 따른 기지재의 온도 (°C), 액상선 온

도(652℃), 고상선 온도(582℃)를 나타낸다. 실험에서는 Al 6061 합금과 길이가 50 μm이고 직경이 3 μm인 SAFFIL RF grade δ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단섬유를 사용하였다. 제조 공정은 고상율이 15%인 반응용 기지재를 600 rpm으로 교반하면서 단섬유를 투입하였으며 이때 부상하거나 침전되는 단섬유를 분산시키기 위해서 교반을 하면서 교반기를 상하로 왕복 운동시켰다. 단섬유의 투입후 반응용 상태의 슬러리를 액상선 이상의 온도로 재가열하여 400℃로 예열된 금형에 주입한 후 가압력 50 MPa, 16 mm/sec의 속도로 30초간 가압하여 제조하였다.

## 2.2 열간 압출 실험

반응용 가공법으로 제조한 금속복합재료를 φ35 mm×L 60 mm로 절삭 가공하여 압출용 빌렛으로 제작하였다. 압출 다이는 압출비가 3.06, 5.44 및 8.51인 곡면 다이와 압출비가 3.06이고 다이 반각이 30°인 원추형 다이를 사용하였으며 곡면 다이는 하중이 가해짐에 따라 변형 영역 내에서 변형률이 일정하다고 보고된 형상을 아래 식을 적용하여 제작하였다.

$$R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{A_0}{(\lambda_s - 1) Z/L + 1}} \quad \text{-----}(2)$$

여기서 A<sub>0</sub>, λ, L 및 Z는 각각 빌렛의 초기 단면적(mm<sup>2</sup>), 압출비(D<sub>1</sub><sup>2</sup>/D<sub>2</sub><sup>2</sup>), 다이의 길이(mm) 및 압출 방향의 좌표값을 나타낸다. 먼저 압출용 빌렛, 압출 다이 및 터미 블럭에 흑연과 그리스를 부피비 1 : 1로 혼합한 윤활제를 바른 후 실험 온도 T<sub>e</sub>=500℃로 가열하여 2mm/min의 속도로 압출하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 반응용 가공법에 의한 금속복합재료의 제조

Fig.1(a)(b)는 반응용 가공법으로 제조한 복합재료의 분산 상태를 나타낸 것이다. (a)와 (b)는 각각 가압력에 수직인 부분의 상단부와 하단부의 분산 상태로서 단섬유가 균일하게 분산되어 있음을 알 수 있다. 이것은 교반시 교반기를 상하로 운동시킴으로써 기지재와 단섬유간의 밀도 차이에 의해 침전된 단섬유가 균일하게 분산되었기 때문이라고 생각된다.

### 3.2 압출시 섬유 배향성 및 파단

Fig.2(a)~(d)는 압출비 λ<sub>c</sub>가 3.06인 원추형 다이와 λ<sub>c</sub>가 3.06, 5.44, 8.91인 곡면 다이의 압출시 다이 출구 중앙 부분에서의 섬유 배향성을 나타낸 것으로서 Fig.1의 무작위한 섬유의 분산 상태는 압출시에 압출 방향으로 제어된다는 것을 알 수 있다. (a)에 나타난 것처럼 취성인 섬유는 다이 벽면으로부터 받는 기지재의 소성 유동 응력이 작아 압출 방향으로 회전하지 못하여 압출력에 의한 굽힘 응력을 받아 배향성이 좋지 못하고 파단이 심하게 일어난 것을 알 수 있다. 그러나 곡면 다이의 압출비가 3.06, 5.44, 8.51인 (b)(c)(d)에 나타난 것처럼 압출비가 클수록 다이 벽면으로부터 받게 되는 기지재의 소성 유동 응력에 의해 섬유는 압출 방향으로 회전하게 되어 배향성이 더욱 향상되고 길이가 길어진다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 압출재의 인장 강도

인장 시험편은 압출된 압출재를 절삭 가공하여 Al 6061합금의 T6 열처리 조건(530℃, 2hr : 용체화 처리, 175℃, 8hr : 시효 처리)을 사용하여 열처리하였다. 인장 시험은 상온에서 유압 피로 시험기(MTS model 810)를 사용하여 25mm의 신장계를 부착하여 인장 속도 V<sub>t</sub>를 1mm/min로 하여 실시하였다. Fig.3와 Fig.4은 압출비가 3.06인 원추형 다이와 압출비가

3.06, 5.44, 8.51인 곡면 다이의 압출재에 대한 인장 강도와 0.2% 율셋 항복 강도를 나타낸 것으로 비슷한 경향을 나타내고 있다. Fig.3에서 압출재의 평균 인장 강도는 압출비가 3.06인 원추형 다이가 391 MPa, 곡면 다이의 압출비가 3.06, 5.44, 8.51인 각각 447 MPa, 465 MPa, 491 MPa로 측정되었으며 기지재에 비해 각각 26%, 44%, 50%, 58% 개선되었다. 이러한 개선 효과는 Fig.2의 섬유 배향성 및 파단 정도와 관계가 있는 것으로 사료된다.

### 3.4 압출재의 연신율과 경도치

Fig.5은 압출비가 3.06인 원추형 다이와 압출비가 3.06, 5.44, 8.51인 곡면 다이의 압출재에 대한 연신율을 나타낸 것이다. 기지재의 연신율 17%에 비해 평균 연신율은 원추형 다이가 0.82%, 곡면 다이는 압출비에 따라 각각 0.57%, 1.45%, 2.1%를 나타내었다. 압출비가 3.06일 때 연신율은 곡면 다이의 경우가 원추형 다이에 비해 다소 적으며 곡면 다이의 압출비가 증가할수록 연신율이 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig.6은 압출재를 T6 열처리하여 로크웰(Rockwell) 경도 시험기로 측정한 경도치를 나타낸 것이다. 기지재의 경도치 58.53에 비해 원추형 다이의 압출재는 66.78, 곡면 다이의 압출재는 압출비에 따라 각각 67.75, 68.33, 70.58을 나타내었다. 즉 기지재의 경도치에 비해 원추형 다이는 13.4%, 곡면 다이는 압출비에 따라 각각 15.2%, 16%, 20% 정도로 개선되었다.

### 3.5 파면 조직 관찰

Fig.7(a)~(d)는 인장 시험편의 파단면을 SEM으로 관찰한 것으로써 (a)는 압출비가 3.06인 원추형 다이, (b)(c)(d)는 각각 압출비가 3.06, 5.44, 8.51인 곡면 다이의 파단면을 나타내는 것이다. (a)(b)에 나타난 것처럼 압출비가 3.06인 경우에는 다이 형상에 상관없이 모두 압출력에 의한 굽힘 응력을 받아 섬유의 손상(A 부분)이 발생하였으며, 또한 기지재의 불균일한 소성 유동에 의해 인장 시험시 섬유가 기지재에서 뿔쳐 나가는 현상(pullout : B 부분)이 일어나 그다지 큰 인장 강도의 개선 효과를 나타내지 못했다고 생각된다. 그러나 (c)(d)의 경우에는 기지재의 소성 유동이 섬유들 사이에 균일하게 분포되어 딩플(dimple : C 부분)을 형성함으로써 섬유는 파단 및 손상이 발생하지만 섬유의 배향성은 우수해지고 섬유와 기지재간 계면 접합 강도가 향상되어 높은 인장 강도를 나타내었다고 사료된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 기지재로 Al 6061, 강화재로  $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단섬유를 사용하여 반응음 가공법으로 금속복합재료를 제조하고 원추형 다이와 곡면 다이의 압출비를 변화시켜 500 °C에서 열간 압출 실험을 행하여 다이 내에서의 섬유의 배향성과 파단 정도 및 압출재의 기계적 특성을 검사한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 체적 분율 10%, 고상율 15% 및 회전수 600 rpm의 조건으로 교반기를 상하 운동 시킴으로써 균일한 분산 상태를 가진 단섬유 강화 금속복합재료를 제조할 수 있었다.
- 2) 압출비가 3.06으로 동일한 경우에 다이 출구 중앙 부분에서는 곡면 다이가 원추형 다이에 비해 배향성이 우수하고 섬유의 파단도 감소되었다. 또한 곡면 다이의 압출비가 증가할수록 다이의 출구 중앙 부분에서 섬유의 배향성이 개선되었다.
- 3) 인장 강도와 경도는 압출비가 3.06인 경우에 곡면 다이가 원추형 다이보다 크지만 연신율은 감소되었고 곡면 다이의 압출비가 클수록 인장 강도, 경도, 연신율이 증가하였다.

## 5. 참고 문헌 생략

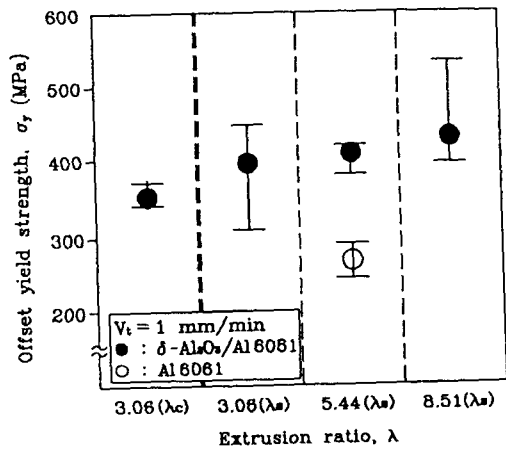


Fig.4 Comparison of offset yield strength values according to die shapes and extrusion ratios

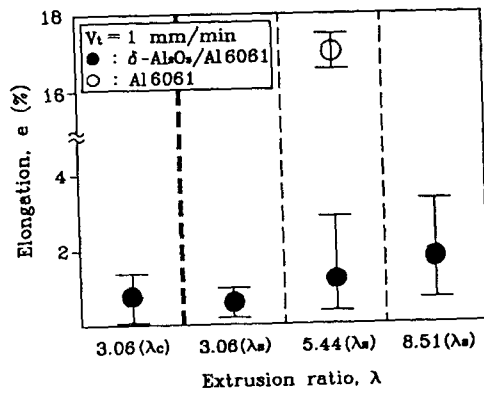


Fig.5 Comparison of elongation according to die shapes and extrusion ratios

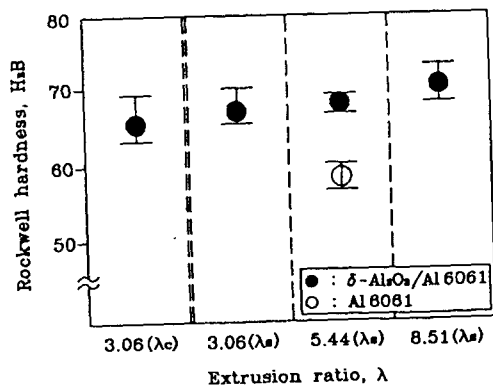


Fig.6 Comparison of Rockwell hardness values according to die shapes and extrusion ratios

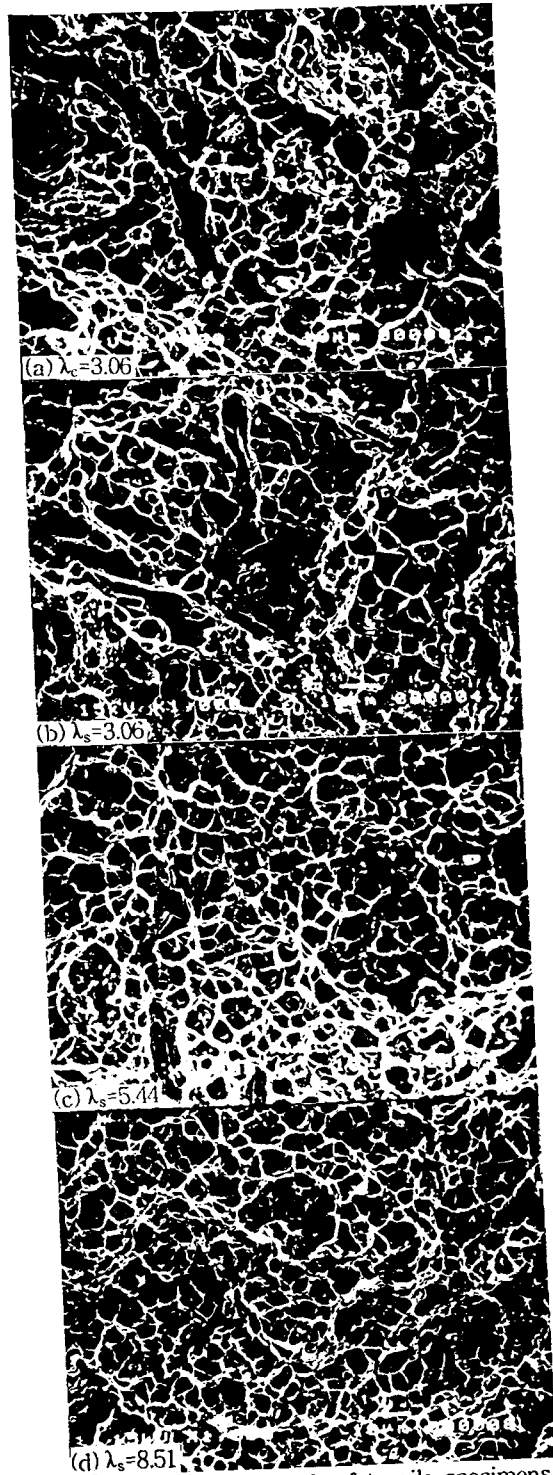
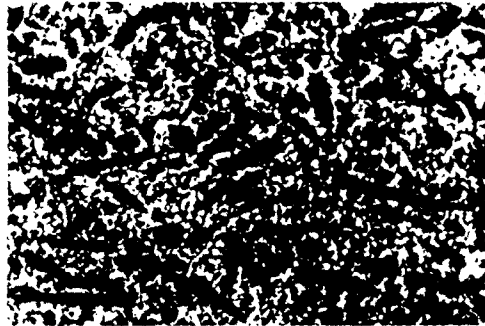
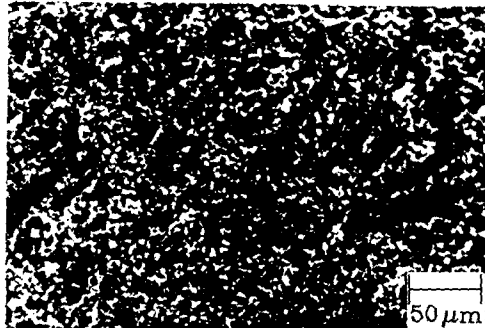


Fig.7 SEM fractograph of tensile specimens according to die shapes and extrusion ratios



(a) Upper portion



(b) Lower portion

Fig.1 Optical micrographs for dispersion of  $\delta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  fiber on transverse sections

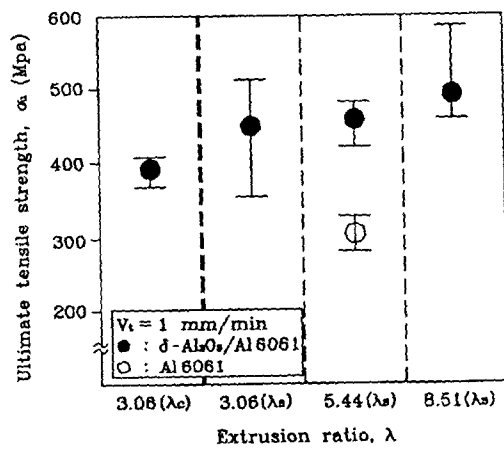
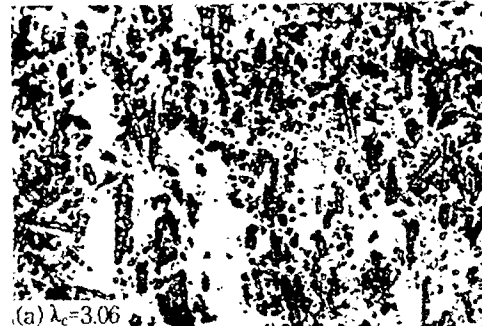
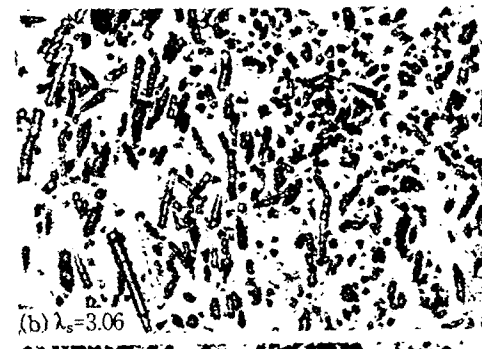


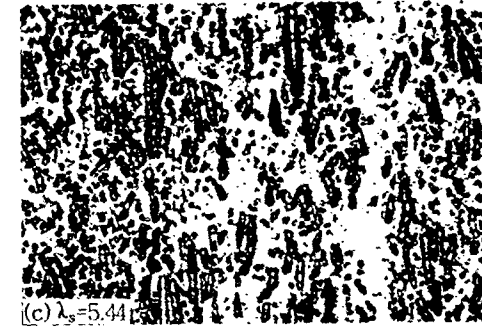
Fig.3 Comparison of ultimate tensile strength according to die shapes and extrusion ratios



(a)  $\lambda_s=3.06$



(b)  $\lambda_s=3.06$



(c)  $\lambda_s=5.44$



(d)  $\lambda_s=8.51$

Fig.2 Microstructure of fiber orientation on die exit according to extrusion ratios and die shapes