

〈論 文〉

반응고법에 의한 금속복합재료의 제조 및 성형 시스템의 개발

강충길* · 김현우** · 김영도***

(1990년 1월 12일 접수)

Fabrication of Metal Matrix Composites and Development of Forming System in Mashy State

C. G. Kang, H. W. Gim and Y. D. Kim

Key Words: Metal Matrix Composites(금속복합재료), Direct Rolling(직접압연) Semi-Solid Processing(반응고공정), Homogeneous Dispersion(균일분산), Secondary Working(2차 가공)

Abstract

A semi-solid alloy in which solid and liquid phase are co-existing is obtained by stirring of Al7075 molten metal. A semi-solid alloy is dependent on the corresponding temperature within the solid-liquid range, and the process parameters should be controlled accurately to obtain the homogeneous semi-solid alloy. The possibility of homogeneous fiber-reinforce aluminum alloy by addition of Al₂O₃ short fibers with vigorous agitation was investigated. The billet of composite materials was fabricated by squeeze casting, and homogeneous dispersion state of fibers in billet of fabricated metal matrix composites was observed. A slurry of semi-solid short fiber metal matrix composites is used in the direct rolling process, and this process showed the fabrication possibility of metal matrix composite sheets. The fabricated sheet was tested regarding vickers hardness, elongation and micro-structure. It has become clear that mashy state processing and working are very useful to obtain parts of composites material closed to near net shape.

기 호 설 명

A_f : 섬유의 단면적
 E_c : 복합재료의 탄성률
 E_f : 섬유의 탄성률
 E_m : 기지재의 탄성률
 F : 압하력
 G_m : 기지재의 강성률
 $2H_o$: 로울간의 간격

N : 로울의 회전수
 P : 가압력
 $2R$: 섬유 중심간의 평균거리
 r_o : 섬유의 반경
 S_f : 고상률
 t : 교반시간
 T : 용탕의 온도
 T_L : 액상선 온도
 T_s : 고상선 온도
 V_{B-s} : 단섬유의 부상 및 침전량
 V_f : 섬유함유율
 V_T : 섬유과 기지재의 양

*정회원, 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과

**대우중공업(주) 중앙연구소

***부산대학교 대학원

1. 서 론

최근 항공기부품, 자동차부품, 및 레이저용품 등의 산업분야에서 경량화, 고성능화가 요구되고 있으며, 재료의 구비조건도 까다로워 지고 있다. 이에 대한 새로운 재료로서 섬유강화형 금속복합재료의 개발이 시도되고 있다. 그 중에서도 단섬유 및 입자분산 강화형 복합재료는 비강도, 비탄성 이외에 내열성, 내마멸성, 열적안정성이 우수한 동시에 압연, 압출, 단조등 2차 가공이 가능한 복합재료로써 주목되고 있다.

단섬유 및 입자분산 강화형 복합재료는 강화재 가격이 장섬유에 비해 저렴하고, 기지재와의 혼합 과정이 장섬유에 비하여 용이하기 때문에 다품종 소량생산의 측면에서 공업적으로 유리한 점이 많다.

이상과 같은 이유에서 장섬유강화형 복합재료가 우주항공분야를 중심으로 연구개발을 시도하고 있으나, 단섬유 및 입자강화형 복합재료는 자동차부품, 공작기계 및 전기부품에 적용할 가능성이 크며, 또 그 실용화의 범위를 확대하기 위해서 현재 미국, 일본등에서는 연구가 활발히 진행되고 있다.

금속복합재료의 제조기술의 초기 단계는 과거에 금속재료가 가질 수 없는 특성을 부여하는 것이 목적이었다. 최근 내마멸성, 내열특성등을 만족하는 재료개발에 있어서 기지재에 가격이 SiC whisker보다 염가인 산화물 및 세라믹등의 분말, 세라믹 및 금속의 단, 장섬유의 혼합에 의하여 기계적 특성을 부여하고 있다. 현재 금속복합재료의 제조 방법인 분말야금법^(1~7), Hot press^(8,9), 용탕단조법^(10~14), 반응고법^(15~18), 연속주조 및 응고법^(19~21), 접합법^(22~26)등을 이용하여 복합재료를 제조하고 있다.

위의 방법에서 제조하고 있는 금속복합재료의 연구 내용은 기지재의 종류에 미치는 whisker의 배향상태, 인장강도가 시험 온도 및 whisker체적 함유율에 미치는 영향, whisker와 기지재의 계면조직관찰, 섬유와 기지재의 혼합방법 및 이종재료의 접합등을 주 내용으로 하고 있다. 특히 최근에는 복합재료의 열간 가공성, 강화기구^(27~29)등에 대한 보고가 있으며, 압연, 압출등의 방법에서 금속복합재료에 소성변형을 가해 불연속 섬유의 배향을 한 방향으로 시도하는 연구가 발표되어 있다⁽³⁰⁾.

이상 연구동향에 의하면 SiC whisker를 강화재로 한 금속복합재료의 제조법에 대한 연구가 거의

대부분이고, 알루미늄을 강화재로 한 금속복합재료의 제조 및 2차 가공에 관한 연구는 극소수에 불과하다. 금속복합재료는 재료라는 이름이 붙어 있지만, 실제사용가치는 부품으로 사용되어지기 때문에 2차 가공법의 개발이 금속복합재료의 제조만큼이나 중요하다. 본 연구에서 이용되어진 반응고 가공법은 결정립의 미세화, 내부결함 및 편석의 감소, 공정단축, 금형의 수명연장 및 우수한 접합성등의 장점때문에 금속복합재료의 제조 및 가공등을 동시에 할 수 있다고 생각한다. 특히 압연가공시의 문제점으로서 제품의 표면 및 내부에 생기는 결함외의 강화섬유의 손상 및 계면불량으로 인한 강도저하를 생각할 수 있다. 이와같이 압연가공에 있어서 강도저하요인을 최소화 하기 위한 실험적 연구가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 교반기술에 의하여 얻어진 반응고상태의 금속에 단섬유를 첨가하여 복합재료를 제조하였다. 그리고 제조되어진 복합재료에 있어서 섬유의 분산상태 및 기지재와의 접합관계를 조사하여 압연가공에 필요한 반응고상태인 금속복합재료의 제조방법을 확립하였다. 균일하게 분산되어진 반응용상태의 단섬유강화형 금속복합재료를 직접 압연하여 박판을 제조할 수 있는 가능성을 검토하였으며, 또한 제조되어진 박판의 인장시험에 의하여 기계적 성질을 조사하였다.

2. 단섬유과 기지재의 분산실험

2.1 실험재료

단섬유강화형 금속복합재료의 제조시 섬유의 균일분산성 및 2차가공에 필요한 압출용 빌렛트 및 박판의 제조기술을 확립하기 위한 성형시스템의 공정순서를 Fig. 1에 표시한다. 본 실험에서 사용한 기지재의 금속조성은 Al-Zn-Mg-Cu에 Si가 0.4 wt%첨가되어 있고, 액상선 온도 T_L 및 고상선온도 T_S 가 각각 635°C, 477°C인 Al7075를 사용하였다. Al7075은 응고온도 범위 $\Delta T = T_L - T_S$ 가 높기 때문에 액체상태의 재료를 고액공존상태로 제조하기가 쉽다.

단섬유로서는 평균입경이 약 3 μ m의 RF Grade로서 SAFFIL제의 δ -Al₂O₃을 사용하였으며, 그 물성치를 Table 1에 표시한다.

2.2 균일분산 실험장치

단섬유강화형 금속복합재료를 제조하는데는 기지

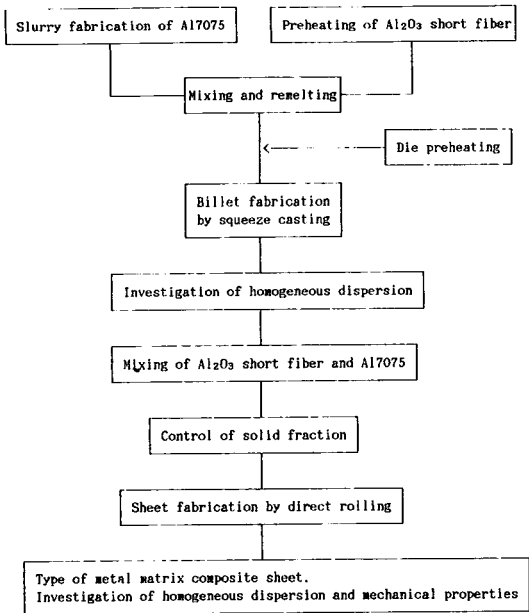


Fig. 1 Processes for billet fabrication for short fiber metal matrix composites and rolling workings

Table 1 Physical properties of alumina short fiber

Young's modulus	30~33×1000kgf/mm ²
Fiber length	70μm
Diameter	3μm
Density	3.3~3.5g/cm ³
Type	δ-Al ₂ O ₃ fiber

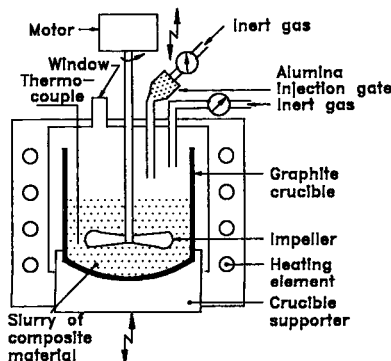


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus for dispersion of short fiber and mixing

재료내에 섬유를 균일하게 분산시키는 것이 제일 중요하다. 따라서 본 연구에서는 기지재료내에 입자를 균일하게 분산시켜 금속복합재료를 제조하는 실험장치를 Fig. 2과 같이 설계 제작하였다. 이 실험장치는 전기로 내에서 도가니로를 가열함과 동시에 교반시킬 수 있도록 되어 있다.

교반기의 위치가 섬유의 균일분산에 미치는 영향을 고려하여 교반기가 상하운동을 하도록 하였다. 그리고 질소가스의 주입구(inert gas)와 관찰구(window)를 각각 설치하여 산화방지 및 교반시 내부를 관찰할 수 있도록 하였다. SUS304로 경사진 깔대기형의 주입구를 통하여 섬유를 주입하였으며 흑연도가니로의 중심에 주입될 수 있도록 하였다. 그리고 교반용 임펠라의 직경은 50mm의 SUS316으로 제작했으며, 날개각은 30°로 하였다.

균일하게 분산되어진 반응고상태의 금속복합재료를 이용하여 압출용 빌렛 제조 및 압연가공에 의한 박판의 제조를 위하여 도가니로를 전기로 하부로부터 분리시킬 수 있도록 하였다.

2.3 실험방법 및 결과

직경이 35mm, 높이가 110mm인 Al7075의 기지재료를 전기로 내에 설치한 도가니로에서 용해한 후, 도가니로에서 고속으로 회전하는 임펠라를 도가니로에 삽입함과 동시에 질소가스를 주입하면서 교반기를 400rpm으로 회전시켰다.

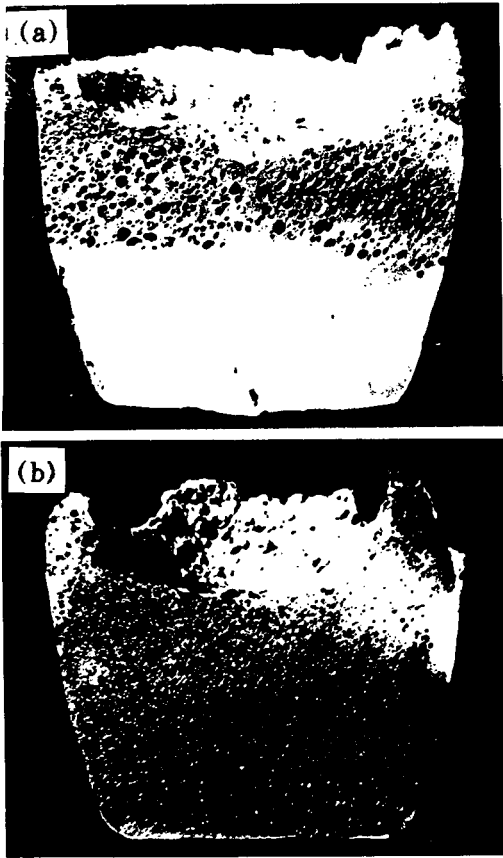
교반을 시키면서 용탕의 온도를 액상선온도 이하로 하여 반응고 상태의 금속을 제조하였다. 이때 고상률 S_r의 예측을 다음과 같이 가정하였다⁽³¹⁾.

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

교반중 도가니내의 반응고상태의 재료온도 T는 CA열전대를 사용하여 측정된 온도를 이용하였다. 일정한 온도하에서 고상률이 유지되도록 온도를 조절하면서 500°C ± 5로 예열한 알루미늄을 Fig. 2에 표시한 알루미늄 주입구(alumina injection gate)에 넣은 다음 질소가스의 압력으로 기지재료의 내부에 균일 분산시킨다. 첨가 종료 후 약 8~13분간 교반 시킨 후 전기로에서 서냉시켜 단 섬유의 균일분산성을 조사하였다.

Fig. 3(a)(b)는 섬유의 함유율, 교반회전수 및 고상률이 각각 V_r=5%, S_r=20%, n=400rpm인 경우 교반 조건에 따른 섬유의 분포사함을 조사하기 위하여 도가니로에서 서냉시켜 응고시킨 단면의 사진이다.

Fig. 3(a)는 교반봉을 상하운동 시키지 않을 경우



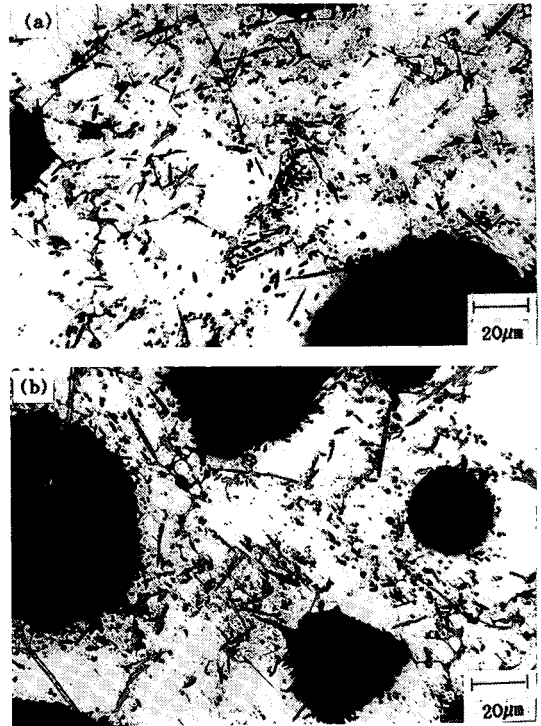
(a) Rotating of impeller
(b) Rotating, vertical movement of impeller

Fig. 3 Dispersion of short fiber and void formation with vertical movement of impeller
 $S_f=20\%$, $V_f=5\%$, $n=400\text{rpm}$, $t=8\text{min}$

섬유가 단면의 상하에 걸쳐서 균일분산되지 않음을 보여주고 있다.

Fig. 3(b)는 교반시 교반봉을 상하운동했을 때 섬유의 분포사항이다. 따라서 균일한 섬유의 분산을 위해서는 교반시 교반봉의 상하운동이 극히 중요하다.

Fig. 4(a) (b)는 Fig. 3(b)의 조건하에서 교반 했을 경우 섬유의 분포사항을 조사하기 위하여 각 단면의 중앙부분 (a)와 끝부분 (b)에 있어서 섬유의 분포사항을 표시한 것이다. 겹게 나타난 기공부분을 제외하고는 대체로 균일하게 분산되어 있다고 생각되나 끝부분 (b)에서는 중앙부분 (a)보다 분산성이 좋지 않다. Fig. 5는 Fig. 4(a)의 일부분을 확대한 것이다. 알루미늄이 섬유가 기공속에 응집한 상태로 관



(a) Central portion
(b) Edge portion

Fig. 4 Optical micrographs of solidified cross section in graphite crucible
 $S_f=20\%$, $V_f=5\%$, $t=8\text{min}$

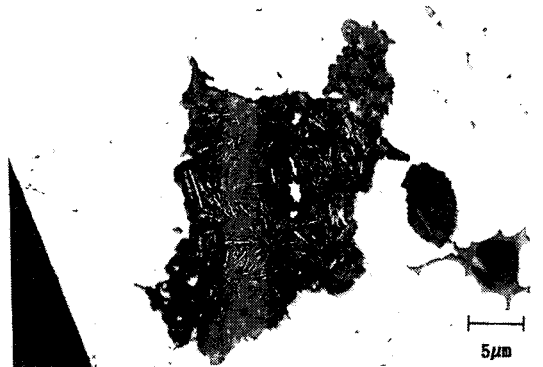


Fig. 5 Optical micrographs of alumina short fiber clustering in void portion
 $S_f=20\%$, $V_f=5\%$, $t=8\text{min}$

찰되었다.

이상에서 알 수 있듯이 고상물이 $S_f=20\%$ 인 반응고 상태의 금속에 단섬유를 주입하여 약 8분간 교반 한후 서냉에 의하여 응고 시킨 경우 복합화가

단면 전체에 걸쳐서 충분히 이루어지지 않았으며 또한 단섬유가 기공부분에 응집한 상태로 나타나 있다.

알루미나 단섬유를 용탕에 주입시킬 때 기지재와 단섬유 사이에 접합성이 좋지 않을 경우 첨가한 섬유가 용탕 표면에 부상 및 침전하기도 하고, 또한 용탕중에 분산되어 있는 것도 그 일부는 응집체를 형성하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고상률이 분산성 및 접합성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 기지재와 강화재가 혼합되어진 재료를 재 용해하여 용탕의 상부에 부상한 섬유를 제거한 후 분산성 평가 및 섬유의 부상정도를 조사하였다.

응집체를 형성하지 않고 용탕속에 분산한 섬유만이 기지재를 강화하였다고 하면 최초에 첨가한 섬유와 기지재의 양 V_T 를 기준으로 하여 알루미나 단섬유의 부상 및 침전의 양을 $V_{B.S}$ 이라 할때 $\gamma = (V_{B.S}/V_T) \times 100(\%)$ 을 섬유의 손실률이라고 하면 고상률의 변화에 따라 측정된 γ 의 값을 Fig. 6에 표시하였다.

고상률이 0인 경우 즉, 완전 액체상태의 금속에 단섬유를 주입시켰을 경우 부상 및 침전의 양은 28% 정도이다. 고상률이 클수록 단섬유의 손실률이 적다는 사실을 알았다.

이것은 고상률이 클수록 기지재의 점성이 높아져 섬유의 부상 및 침전을 저해하며 또한 고상과의 충돌에 의하여 응집체의 분쇄 및 응집체내에 포함되어 있는 가스를 분산시켜주기 때문이다.

고상률이 50%이상이면 기지재와 섬유와의 접합성이 좋을것으로 예상되나, 단섬유의 첨가시 점성이 높아 교반이 어려우며, 교반시 임펠러의 손상

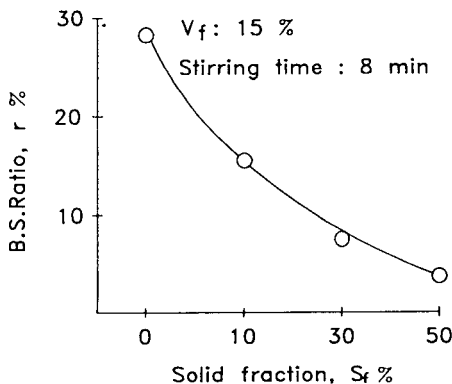


Fig. 6 Buoyancy and settlement ratio of short fiber with variable of solid fraction

및 섬유의 파단이 관찰 되어졌다. 따라서 적절한 고상률의 선정과 임펠러 재료의 선정이 극히 중요하다는 사실을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 4(a) (b)의 분산상태, Fig. 5의 응집상태, 섬유의 파단 및 임펠러의 손상등을 최소로 하기위한 제조조건으로 고상률 $S_f = 10\%$, 교반시간 t 를 약 13분정도로 하여 섬유의 분산상태를 조사하기 위한 빌렛을 제조하였다. 이때 교반한 후 액상성 온도 이상으로 재용해하여 Fig. 7과 같은 400~500°C로 예열된 금형속에 주입하여 $P = 700\text{kgf/cm}^2$ 의 압력을 가하여 단섬유강화형 금

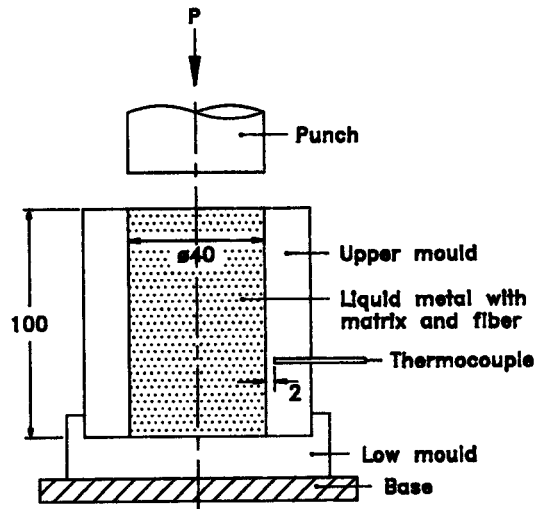


Fig. 7 Billet fabrication mould to investigate dispersion of short fiber

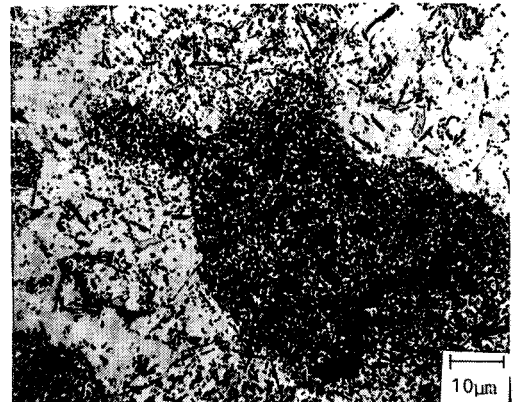


Fig. 8 Optical micrograph of alumina short fiber clustering for short of stirring time $S_f = 20\%$, $V_f = 15\%$, $t = 8\text{min}$

속복합 재료를 제조하여 각 단면에서 섬유 분산 상태를 조사하였다.

이때, 사용한 금형은 원통형이며 $\phi 40 \times 100\text{mm}$ 의 SUS304로 제작했으며 내면 2mm의 위치에서 1.6mm의 CA열전대의 의하여 온도를 측정했다. 이때 금형온도 T_M 가 $400 \pm 10^\circ\text{C}$ 인 경우는 중앙부분에 수축현상이 나타났다. 이현상은 금형온도가 낮을 경우 압축방향과 직각방향으로 작용하는 압력의 불균일 현상으로 기인되며, 또한 다공질 재료의 열탄소성 유한요소 해석결과⁽³²⁾ 하형모ULD(lower mould)에 접촉하는 반응고상의 금속이 압축방향과 반대방향으로 유동하여 빌렛 길이 방향이 중심부 근처에서 속도의 정체점이 나타나기 때문이다. 따라서 건전한 복합재료를 제조하기 위해서는 금형태

에서의 유동현상 및 점도의 제어가 필수적이다.

Fig. 8는 섬유의 함유율 $V_f=15\%$, 고상률 $S_f=20\%$, 교반시간 $t=8\text{min}$ 인 경우 빌렛의 중앙 종단면의 단부분에 대한 섬유의 분산상태이다. 이것은 교반시간이 부족하여 응집체가 분산되지 않은 것으로 생각된다. 따라서 고상률이 10%인 상태에서 교반시간을 13분으로한 반응용상태의 금속복합재료를 5~6분간 700°C 까지 재용해한 후 $550^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 로 예열된 금형속에 주입하여 $P=700\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력으로 약 5~6초간 가압하여 직경이 40mm인 빌렛을 제조하였다.

Fig. 9(a) (b)는 직경이 40mm인 빌렛의 중간부분의 각 단면에 대한 섬유의 분산상태를 표시한 것이다. 빌렛의 끝부분 (b)를 제외하고는 전체적으로 비

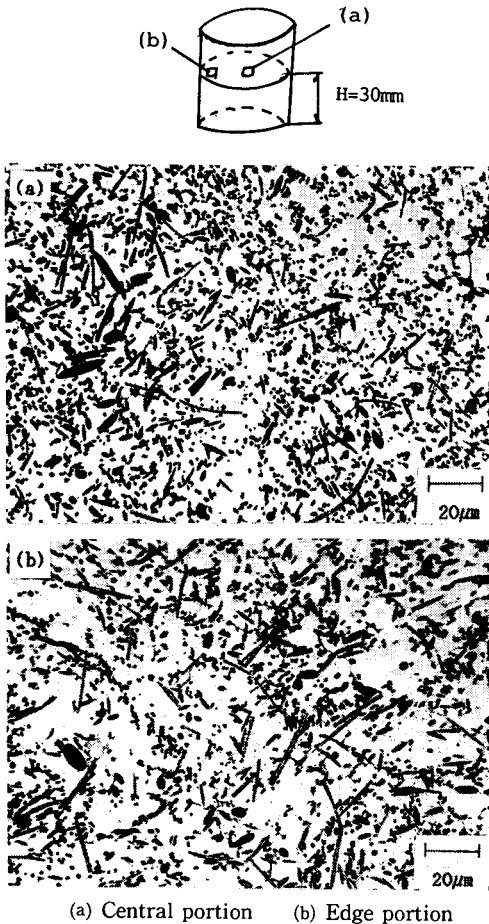


Fig. 9 Optical micrographs for dispersion of short fiber in cross section $H = 30\text{mm}$, $S_f = 10\%$, $V_f = 15\%$

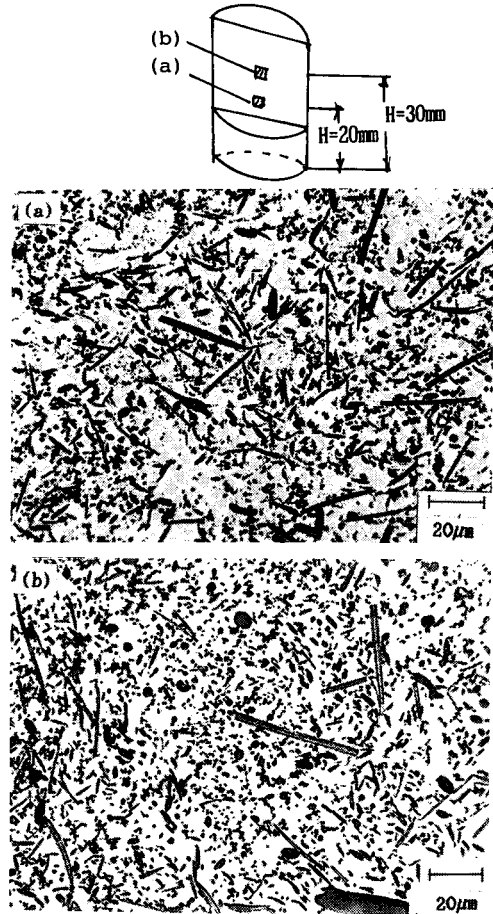


Fig. 10 Optical micrographs for dispersion of short fiber in longitudinal section

교적 균일하게 혼합되어, 단섬유가 적정하게 분산되어 있었다. 교반시킨후 도가니로에서 서냉시킨 Fig. 4(a), (b)에서 관찰되었던 단섬유의 응집현상을 포함한 큰 기공이 관찰되지 않았는데, 이것은 재용해후의 가압에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 10(a), (b)는 Fig. 9(a), (b)의 조건에서 제조한 빌렛의 횡단면에 대한 단섬유의 분포사항을 나타낸 것이다. 교반시 임펠러의 상하이동에 의하여 단섬유가 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있으나 $H=20\text{mm}$ 에서보다 빌렛 중간부분인 $H=30\text{mm}$ 에서 조밀하게 분포되어 있다. 그 원인은 압축시 모울드내에서의 유동이 압축방향과 반대방향으로 되어 섬유가 지지재와 같이 이동하기 때문인 것으로 생각된다.

단섬유를 지지재내에 균일분산시킬 수 있는 제조방법에 의하여 단섬유강화형 금속복합재료의 2차 가공에 필요한 빌렛 및 박판을 제조할 수 있는 기초적 지식을 확립하였다.

3. 반응고 금속복합재료의 압연실험

3.1 실험장치

Fig. 11은 지지재에 균일분산되어진 금속복합재

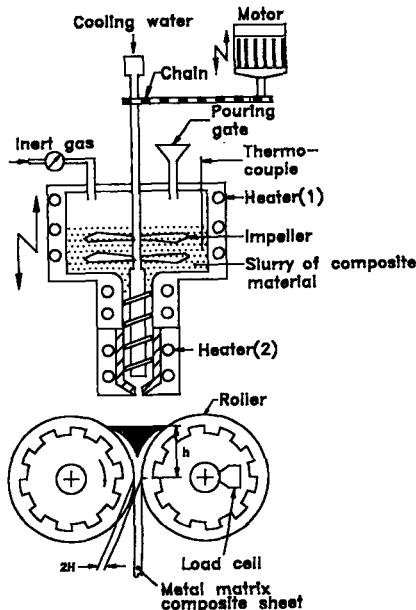


Fig. 11 Schematic diagram of rolling experimental apparatus for fabrication of metal matrix composites sheet

Table 2 Specification of experimental equipment

Item	Symbol	Unit	Specification
Roll diameter	$2R$	mm	170
Roll width	L	mm	200
Load cell	F	kgf	5000
Drive motor	N	rpm	10~50
Mixing motor	n	rpm	100~600
Furance	T_f	℃	1000

료의 박판을 제조하기 위한 압연장치로서 회전하는 로울사이에 반응용상태의 복합재료를 연속적으로 주입하면서 박판을 직접 제조하는 실험장치이다.

위의 실험장치는 크게 주입부와 압연부로 되어있다. 반응용상태 금속의 주입부는 가열로와 노즐부분으로 되어있다. 가열로와 노즐부분의 온도를 정확히 제어하기 위하여 각각 분리하여 온도를 측정 및 제어하였다. 가열로내의 교반에 의하여 용탕의 온도를 균일하게 하였으며, 압연로울은 두께가 30mm인 주강으로 만든 원통에 Ni 도금하여 사용하였다. 금속복합재료의 박판은 로울표면에 형성되어진 응고 프로파일의 압착에 의하여 제조된다. 따라서 로울내부는 냉각능력을 증대시키기 위하여 분사냉각이 되도록 설계되어 있다. 로터리 엔코더를 사용하여 로울의 회전수를 8비트 퍼스널 컴퓨터로 제어하였다. 수평방향으로 작용하는 압하력은 로울의 양단에 설치한 두개의 로드셀에 의하여 측정하고, 미동장치에 의하여 로울간의 간격을 조정하였다. 이상의 실험장치에 대한 사양을 Table 2에 표시하였다.

3.2 실험방법 및 결과

Fig. 2의 균일분산 실험장치에 의하여 압연가공에 필요한 반응고상태의 금속복합재료를 제조하였다. 이때 단섬유를 지지재에 균일분산시킬 수 있는 제조조건은 Fig. 9(a)와 (b), Fig. 10(a)와 (b)에서 보여준 바와 같이 고상률, 교반시간 및 회전수를 각각 $S_f=10\%$, $t=13\text{min}$, $n=400\text{rpm}$ 으로 하였으며, 섬유함유율 V_f 는 0, 10, 15%의 3종류로 하였다.

이상의 조건에서 제조되어진 반응고상태의 금속복합재료를 두개의 회전하는 로울사이에 주입하여 압연하였다. 이때 로울 출구로부터 탕면까지의 높이 h 가 일정하게 유지되도록 교반봉을 회전하면서 압연할 수 있는 반응용 금속복합재료의 양을 조절

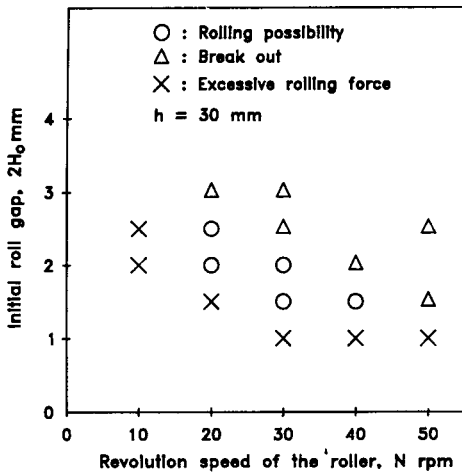


Fig. 12 Possible region for rolling with variable the roller gap and revolution, $S_f=10\%$, $V_f=15\%$

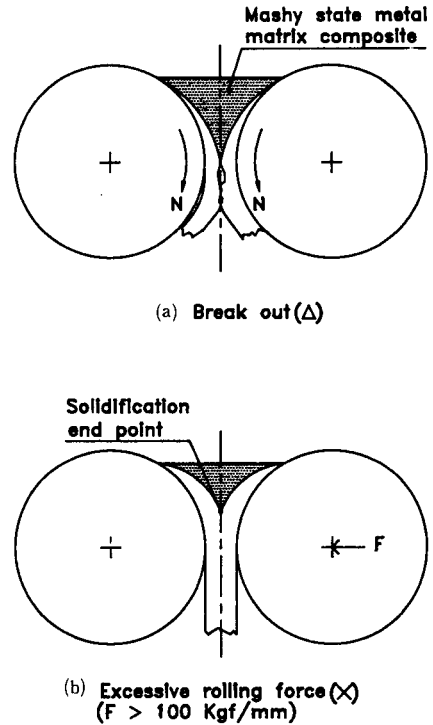


Fig. 13 Type of metal matrix composite sheet in direct rolling

하였다.

Fig. 12는 로울 출구로부터 탕면까지의 높이 $h=30\text{mm}$, 고상률 $S_f=10\%$ 및 섬유함유율 $V_f=15\%$ 를 고정한 후 로울회전수 N 과 로울간격 $2H$ 의 변화에 따른 압연가능 조건을 나타낸 것이다.

압연가능한 경우는 로울 설정 간격이 일정한 경우 회전수가 증가하는 방향으로 이동하였다. 즉 일정한 로울 설정 간격에서 로울 회전수가 증가하게 되면 로울러 표면에 형성되어진 응고프로파일이 압착되지 않기 때문에 Fig. 13(a)와 같은 브레이크아웃(breakout)현상이 관찰되었다. 로울의 간격 및 회전수가 적은 경우는 Fig. 13(b)에서 표시한 것처럼 과대 압하력 때문에 실험이 불가능하다. 본 연구에서는 실험장치의 안전도 문제 때문에 100kgf/mm 이상의 하중을 과대압하력으로 생각하여 압연이 불가능하게 되도록 하였다. 로울 회전수를 $N=30\text{rpm}$ 으로 일정하게 하였을 경우 로울간격 $2H_0=1.5\sim 2.0\text{mm}$ 의 범위에서 실험이 가능하였다. 이와같이 응고완료점은 압연가능조건을 결정하며, 금속복합재료의 박판을 제조하기 위해서는 적절한 회전수 및 로울 간격이 극히 중요하다는 사실을 알 수 있었다.

본 연구에서는 V_f 가 0, 10%인 경우 직접압연의 실험을 하였으나 압연가능조건은 Fig. 12의 $V_f=15\%$ 인 경우와 같았다. 그 이유는 섬유의 균일분산을 위하여 고상률 S_f 를 항상 10%가 되도록하여 압연실험을 하였기 때문으로 생각된다. 브레이크아웃

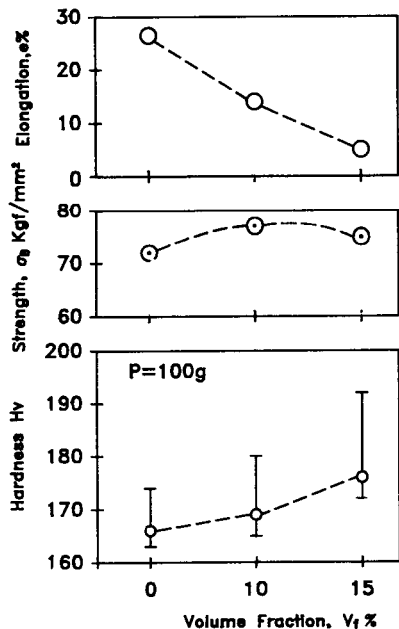


Fig. 14 Mechanical proerties of short fiber metal matrix composites, $2H_0=1.5\text{mm}$, $N=30\text{rpm}$

웃 현상은 섬유 함유율이 변화함에도 불구하고 같은 조건에서 발생하였다. 그리고 압하력의 경우는 섬유함유율이 각각 0, 10, 15%일 때 $F=75.2\sim 82.6\text{kgf/mm}^2$, $81.5\sim 85.2\text{kgf/mm}^2$, $84.5\sim 87.6\text{kgf/mm}^2$ 로 측정되었다. 이것은 섬유함유율이 증가하면 반응고 상태의 금속복합재료에 대한 열전도 계수가 증가되며 응고완료점이 로울 출구로 부터 멀어져 압하율이 커지기 때문이다.

Fig. 12의 압연가능 조건중 로울간격 및 로울회전수가 각각 $2H_0=1.5\text{mm}$, $N=30\text{rpm}$ 일때 압하력 F 가 $84.5\sim 87.6\text{kgf/mm}^2$ 로 가장 높게 측정되어 계면에서의 결합 및 로울표면에서 형성되어진 응고프로파일의 접합이 양호하게 이루어진 가공조건으로

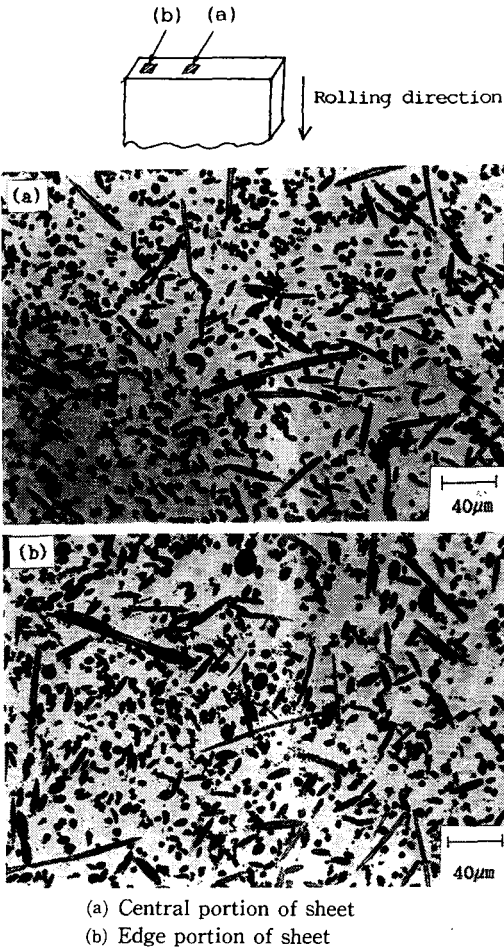


Fig. 15 Optical micrographs for dispersion of the short fiber, $N=30\text{rpm}$, $2H_0=1.5\text{mm}$, $S_f=10\%$, $V_f=15\%$

생각된다. 따라서 $2H_0=1.5\text{mm}$, $N=30\text{rpm}$ 의 성형 조건에서 제조되어진 박판의 인장시험 결과로부터 연신률 $e\%$ 와 인장강도 $\sigma_B\text{kg/mm}^2$ 및 마이크로비커스에서 측정된 제품 횡단면의 중앙부분의 경도 H_v 를 Fig. 14에 나타내었다. e 에 관해서는 $V_p=0$ 인 경우 약 26%의 값을 나타내고 있으나 V_p 의 증가에 따라 감소하며 σ_B 는 V_p 의 증가에 따라 크게 변화하지 않으나 $V_f=15\%$ 의 경우는 오히려 강도가 감소한다. 또한 H_v 는 V_p 의 증가에 따라 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 이상의 기계적 성질은 박

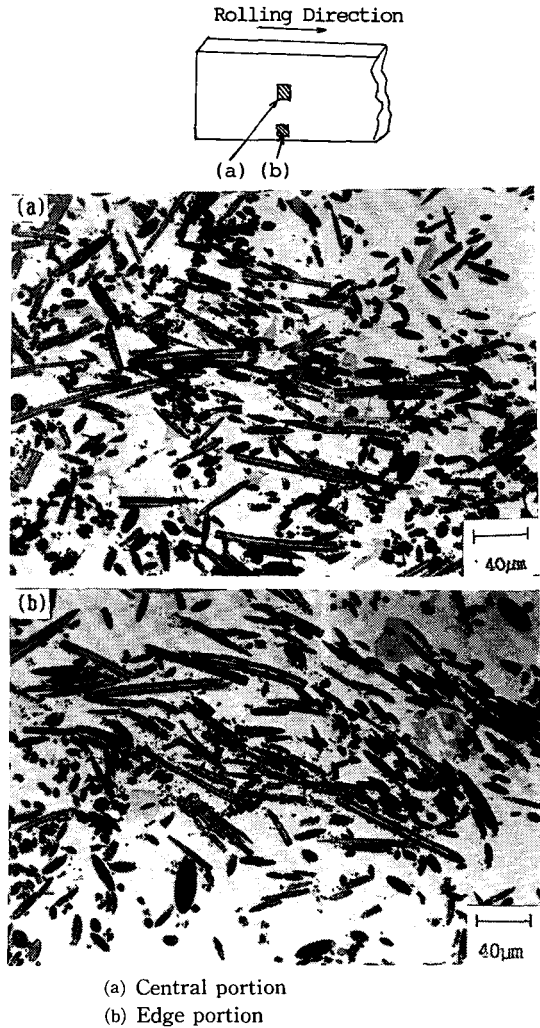


Fig. 16 Optical micrographs for dispersion of the short fiber in central and edge portion of sheet surface, $N=30\text{rpm}$, $2H_0=1.5\text{mm}$, $V_f=15\%$

판에 냉간가공 및 특별한 열처리를 하지 않은 것이다.

Fig. 15(a)와 (b)는 압연조건이 $N=30\text{rpm}$, $2H_0=1.5\text{mm}$ 이고, 섬유함유율과 고상률이 각각 $V_f=15\%$, $S_f=10\%$ 인 경우 단면에 대한 섬유의 분산상태를 나타내고 있다. 단면의 중앙부분 (a)에서의 분산상태는 끝부분 (b)와 비슷하나, 끝부분 (b)에서는 중앙부분 (a)에 비하여 기공이 많이 존재한다. 위의 원인은 압연시 로울접촉압이 단면의 중앙부분에서 제일 큰 힘을 받아 포물선 모양의 하중분포를 받고있기 때문이라고 생각된다. 또한 반응고상태의 금속복합재료를 압연할때 단면중앙부분의 액상성분이 끝부분으로 이동하여 결정립의 변형에 대한 결정립간의 구속을 완화시키기 때문에 끝부분에 기공이 많이 존재한다고 생각한다. Fig. 16(a)와 (b)는 Fig. 15(a)와 (b)의 조건에서 제조되어진 박판표면의 섬유분포사황을 표시한 것이다. 섬유는 압연방향과 같은 방향으로 배열되어 조직적 이방성이 관찰되었다.

4. 고 찰

일반적으로 금속재료를 압연하는 경우 재료에 대하여 수직축 응력과 압연방향에 수평인 응력이 각각 작용하는 동시에 로울면과 마찰에 의하여 폭방향으로 압축응력이 작용한다. 특히 금속복합재료의 압연가공에 있어서 지지재료의 압연방향의 팽창은 취성적인 성질을 가진 강화섬유에 응력을 부가시켜 섬유의 파괴 및 계면 박리현상을 일으킬 가능성이 있다.

특히, 압연시 폭방향으로 퍼짐은 지지재의 조밀화를 방해하는 요인이 되기때문에 타 가공물과 로울간의 마찰력의 효과를 고려하기 위한 로울표면의 조도도 중요한 문제점으로 된다.

Fig. 17은 로울회전수 및 간격이 각각 N , $2H_0$ 인 경우 반응고상태의 금속복합재료를 압연할 때 압연방향에 따라 전단력과 로울표면에서의 압연력이 지지재와 섬유의 조밀화 및 섬유의 파단에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 압연중에 전단응력 τ_{xy} 과 로울접촉면상의 접선력 F_t 와 법선력 F_n 의 비 F_t/F_n 가 로울의 회전속도와 재료의 회전속도가 일치하는 중립점 N_p 를 경계로하여 반대방향으로 되어 있다.

결국 로울 입구측부터 중립점 N_p 까지는 인장응력이 발생하여 섬유를 파단시킬 높은 응력이 작용한다⁽³³⁾. 따라서 반응고상태의 금속복합재료를 이

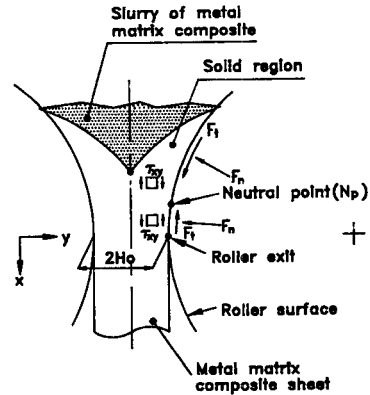


Fig. 17 Effect of tension force and tangential/nominal force on the short fiber fracture

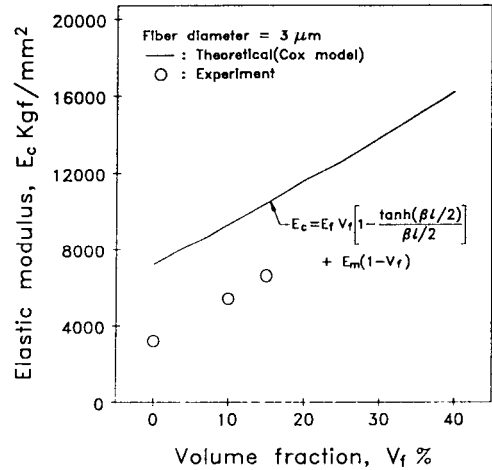


Fig. 18 Theoretical and experimental elastic modulus of short fiber metal matrix composite sheet

용하여 판재를 제조 할때 로울과 재료의 접촉면 AN 의 길이를 될수 있는 한 적게 되도록 하는 성형조건에 의하여 섬유의 손상을 최소화 하여야 한다.

Fig. 18은 단섬유 복합재료에 있어서 Cox⁽³⁴⁾의 이론치와 실험치의 탄성률을 나타낸 것이다. V_f 의 증가에 따라 현저하게 증가하고 있다. Cox는 한 방향으로 배열되어진 불연속 섬유에 강화되어진 복합재료의 탄성률을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$E_c = E_f V_f \left[1 - \frac{\tan(h\beta L/2)}{\beta L/2} \right] + E_m (1 - V_f) \quad (2)$$

여기서

$$\beta = \sqrt{\left[\frac{G_m}{E_f} \right] \left[\frac{2\pi}{A_f \ln(R/r_o)} \right]} \quad (3)$$

복합체의 횡단면에 있어서 섬유가 육방배열 형태로 배열되어 있다고 가정하면 다음과 같다.

$$2R = \sqrt{\pi} d_f \left[(2\sqrt{3} V_f) \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기서 $E_f = 31500 \text{ kgf/mm}^2$, $E_m = 7237.5 \text{ kgf/mm}^2$, $G_m = 2742 \text{ kgf/mm}^2$, $l = 70 \mu\text{m}$, $2r_o = 3 \mu\text{m}$ 의 값을 사용해서 탄성을 E_c 를 계산한 값으로 이론치는 실험치보다 상당히 크게 되어있다.

위의 원인은 식 (2)에서 사용되어진 Cox식의 유도과정에서 균일한 섬유가 무질서하게 분포되어 있고, 섬유간의 상호작용 및 섬유의 끝부분에서 하중 전달이 없다고 가정하고 있기 때문이다. 그리고 식 (2)에서 사용되어진 E_f 값에 대한 타당성 문제로도 생각되어진다. 본 연구에서 구한 실험치 E_c 의 값은 인장속도 V 를 4 mm/min 로 하였을 때 얻어진 응력-변형률의 관계로부터 다음식을 이용하여 각 점에서의 탄성을 E_m 의 값을 구하였다.

$$E_m = \frac{\sigma_{n+1} - \sigma_n}{\epsilon_{n+1} - \epsilon_n} \quad (n=1 \sim 10, m=1 \sim 9) \quad (5)$$

여기서 n 는 0.2%의 율셋응력 범위내에서 응력-변형의 곡선으로부터 10점을 잡아 m 을 9등분한 평균값을 E_c 값으로 하였다.

$$E_c = (E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_{n-1}) / m \quad (6)$$

Fig. 19은 $V_f = 15\%$, $S_f = 10\%$ 인 반응고상태의 금속복합재료를 $2H_o = 1.5 \text{ mm}$, $h = 30 \text{ mm}$, $N = 30 \text{ rpm}$ 의 조건에서 제조하였을 때 폭방향의 중앙부

분에서 SEM 관찰 결과이다. 단섬유가 결정경계를 연결지어주고 있으며, 그 결정경계 부분에서는 결정립내 부분보다 섬유가 많이 분포되어 있다. SEM관찰에 의하면 계면에서의 접합성은 양호하지 않지만 기지재내에 있는 단섬유는 핵 생성을 촉진시켜 결정립을 미세화하므로 강화효과가 증대됨을 알수 있다. Fig. 14에서 섬유의 함유율 V_f 를 증가하면 결정립의 미세화와 동시에 섬유의 강화효과에 의하여 인장강도의 증대가 기대되나, V_f 가 15%인 경우 오히려 강도가 감소되었다. 위의 원인은 Fig. 19에서 보여주는 바와같이 결정경계에 존재하는 기공에 기인된다고 생각된다. 따라서 박판제조시 냉각속도의 증대에 의한 결정립의 미세화에 의하여 기지재내에의 섬유를 균일하게 분산시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이로 인하여 결정경계에서의 접합성개선 및 기공현상을 최소화할 수 있을 것으로 생각된다.

압연시 폭방향으로 퍼짐 방지, 섬유과 기지재료의 조밀화 및 섬유의 손상을 방지하는 로울 성형기술을 개발하는 것에 의하여 기기재가 가지는 기계적 성질 그 이상의 역학적 특성을 가질 수 있는 금속복합재료의 제조가 가능할 것으로 예상된다.

이상과 같이 1차가공에서 제한되어진 박판의 기계적 성질의 개선을 위하여 압출, 냉간 및 열간압연과 같은 2차가공을 앞으로의 연구과제로 남겨두고, 단섬유강화형 금속복합재료의 제조공정 및 가공의 분야에서 본 기술의 응용을 앞으로 더욱 더 발전시켜 나갈 계획이다.

5. 결 론

반응고법에 의하여 제조되어진 알루미늄 단섬유과 알루미늄 복합재료의 제조 및 압연가공에서 고상률이 단섬유의 접합성, 균일분산성 및 압연 특성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 섬유의 균일분산을 위해서는 교반기의 상하이동이 필요하여, 교반시간 $t = 13 \text{ mm}$, 교반회전수 $N = 400 \text{ rpm}$ 및 고상률 $S_f = 10\%$ 의 조건에서 균일분산이 가능한 반응용 금속복합재료의 제조가 가능하였다.

(2) 반응용상태의 금속복합재료를 약 550°C 로 예열한 금형속에 주입하여 5~6초간 가열하여 빌렛을 제조한 결과 섬유의 분산상태를 비교적 균일하게 할 수 있었다.

(3) 섬유함유율이 각각 0, 10, 15%일때 고상률이 10%가 되도록 반응고상태의 금속복합재료를 제조

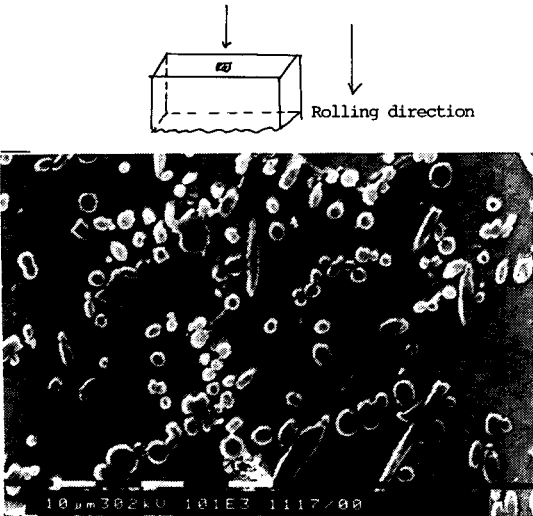


Fig. 19 SEM micrograph of short fiber metal matrix composite sheet with grain structure with $V_f = 15\%$

하여 직접압연한 결과 압연가능, 브레이크아웃, 과대압하력등 3종류로 구분하였다.

(4) 섬유함유율이 0, 10, 15%의 경우 로울의 회전수가 20, 30, 40rpm일 때 로울간의 간격이 각각 2.0~2.5mm, 1.5~2.0mm, 1.5mm의 압연조건에서 박판을 연속적으로 제조할 수 있었다.

후 기

본 연구는 1988년도 문교부신소재분야 연구지원에 의하여 수행된 연구의 일부로, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Long, T.T. and Aisaka, T., 1987, "Mechanical Properties and Wear Resistance of SiC Whisker Reinforced Aluminum Alloy 4032 Composites Containing B N Powders", J.of Jap. Metals, 51~9, p. 864.
- (2) Mcdanels, D.L., 1985, "Analysis of Stress-Strain, Fracture and Ductility Behavior of Aluminum Matrix Composites Containing Discontinuous Silicon Carbide Reinforcement", Metall. Trans. 16A, p.1105.
- (3) Monimoto, H., 1989, "Effects of Hip Consolidating Temperature on the Mechanical Properties", CAMP-ISIT, 2, 348.
- (4) 淺沼博, 1986, "金屬基複合材料の壓出時加工", 第37日本塑性加工講演會, 267.
- (5) 橋川降至, 1988, SiC纖維強化Alの壓出加工, the Pro. Jap.Cont. Technology of Plasticity, 207.
- (6) Folm, Y. and Arsenault, R.J., 1986, "Deformation of SiC/Al Composites", J.of Metals July, p.31.
- (7) Hirohashi, M., Asanuma, H. and Hayama, O., 1988, "Combined Extrusion of SiC/Al Powder Composites", J.of Jap. Inst. of Light Metals, 38-10, p.640.
- (8) Hasson, D.F., Hoover, S.M. and Crowe, C.R., 1985, "Effect of Thermal Treatment on the Mechanical and Toughness Properties of Extruded SiC/Al6061 Metal Matrix Composite", J.of Metal. Sci. 20, p.4147.
- (9) Goda, K., Fukunaga, H. and Itonaga, M., 1987, "The Effect of Hot-Pressing Temperature on the Tensile Strength of B₄C Coated Boron Fiber Reinforced Al Composites", Trans. of Jap. Soc. Mech. Eng. 53-486, p.180.
- (10) Mortensen, A. and Cornie, J.A., 1987, "On the Infiltration of Metal Matrix Composites", Metall. Trans., 18A p.1160.
- (11) Nishida, Y., Imai, T., Yagada, M., Matsubara, H. and Shirayangi, I., 1988, "Fabrication of Potassium Titanate Whisker/Al Composites and some their Properties", J. of Japan Inst. of Light Metals, 38-9, p. 515.
- (12) 福永秀春, 1987, "FRMの Squeeze Castによる製造と特性", 機械の研究, 39-6, 25.
- (13) Clyne, T.W. and Mason, J.F., 1987, "The Squeeze Infiltration Process for Fabrication of Metal Matrix Composites", 18A, p.1519.
- (14) Nakata, E., 1981, "Production of Composites by Squeeze Casting", ISTP, 22-247, p.799.
- (15) Kiuchi, M., 1985, "Development of New Materials by Mushy-state Forming Processes", J. of, Jap. Soc. Mech. Eng. 88-804, p.12.
- (16) Girot, F.A., Albingre, L., Quenisset, J.N. and Naslain, R., 1987, Rheocasting Al Matrix Composites, J. of Metals, November, p.18.
- (17) Ghosh, P.K. and Ray, S., 1987, "Effect of Porosity and Alumina Content on the High Temperature Mechanical Properties of Compocasting Aluminum alloy-Alumina Particulate Composite", J.of Met. Science, p.4077.
- (18) Watanabe, A., Ohori, K. and Yakeuchi, Y., 1988, "Fabrication of Particle Dispersed Aluminum Alloy Composites by Compocasting Process and their Properties", J.of Jap. Inst, Light Metal, 38-10, p.626.
- (19) 이학주, 이상목, 홍준표, 1988, "연속주조법에 의한 Al기 복합재료의 제조에 관한 연구", 대한금속학회, 춘계학술강연대회, No.18.
- (20) Mortensen, A., Cornie, J.A. and Flemings, M.C., 1988, "Columnar Dendritic Solidification in a Metal Matrix Composite", Metall. Trans., 19A, p.709.
- (21) Mortensen, A., Gungor, M.N., Cornie, J.A. and Flemings, M.C., 1986, "Alloy Microstructures in Cast Metal Matrix Composites", J. of Metals, March, p.30.
- (22) Kiuchi, M., 1987, "Application of Mushy-state Working Processes to Production of Metal Ceramics Composites", Annals of the CIRP, Vol.36-1, p.173.
- (23) 參木貞彦, 參宅保彦, 1985, "Clad製造法と性能", 第97回 塑性加工 Sympo. p.41.
- (24) Matsuura, Y. and Takase, K., 1974, "An Experimental Study and the Solution of Energy Method on Plastic Deformation of Two-Phase", ISIP., 15-157, p. 156.
- (25) Avitzur, B., Wu, R., Talbert, S. and Chou, Y.T., 1982, "Criterion for the Prevention of Core Fracture During Extrusion of Bimetal Rods", ASME, J. of Eng. Industry, 104, p.293.

- (26) Semiatin, S. L., Piehler, H.R., 1979, "Formability of Sandwich Sheet Materials in Plane Strain Compression and Rolling", Metall. Trans. 10A, p.97.
- (27) 大内學, 1987, "SiC Whisker 強化Al合金基複合材料の諸特性", 神鋼技報 37-3, p.31.
- (28) Watanabe, H., Ohori, K. and Takeuchi, Y., 1988, "Effect of Hot Extrusion and Rolling on the Tensile Strength of SiC Whisker Reinforced Al Alloy Composites", J. of Jap. Inst. Light Metals, 38-10, p.633.
- (29) Kagawa, Y., Oishi, Y., Yoshida, S. and Nakata, E., 1981, "Workability of Helical Fiber Reinforced Composite Metal", J.of Jap. Comp. Metals, 7-4, p.140.
- (30) Salkind, M., George, F.G. and Tice, W., 1969, "Some Effects of Cold Rolling on the Microstructure and Properties of Al Ni Whisker Reinforced Al", Trans. Metall. Soc. AIME, Vol. 245, p.2339.
- (31) 大中逸雄, 1985, コンピュータ傳熱凝固解析入門, 九善, p.200.
- (32) 최진석, 1990, "유한요소법에 의한 반응고상태의 압축변형해석", 부산대학교 석사학위논문.
- (33) 金武直幸, 大平浩史, 1989, "粒子分散型アルミニウム基複合材料の應力-ひずみ舉動に及ぼす強化粒子の影響", 第40回 塑性加工講演會, No. 230.
- (34) Kelly, A., 1966, Strong Solids, Oxford Unive. Press.