

그림 1. 진공가압에 의한 예비성형체 제조장치.  
 (1) Velocity, (2) Load cell, (3) Punch, (4) Mould, (5) Preform, (6) Vacuum gage, (7) Drain box, (8) Vacuum pump

2.2 Vacuum Suction 법

Vacuum Suction법을 이용하여 예비성형체를 제조하는 순서는 그림 2와 같다[11].

그림 3에 Vacuum Suction 장치를 나타내었다.

예비성형체 제조 장치는 크게 slurry를 장입할 mold부분, pumping 속도 5 l/min의 진공펌프, pumping 속도 조절을 위한 vacuum pressure control valve, drain box와 drain valve로 구성되어 있다. 또한 제작하고자 하는 preform의 체적률을 조절하기 위하여 mold를 투명 아크릴로 제작하여 탈수과정과 제작높이를 조절할 수 있게 하였다.

3. 예비성형체 제조인자

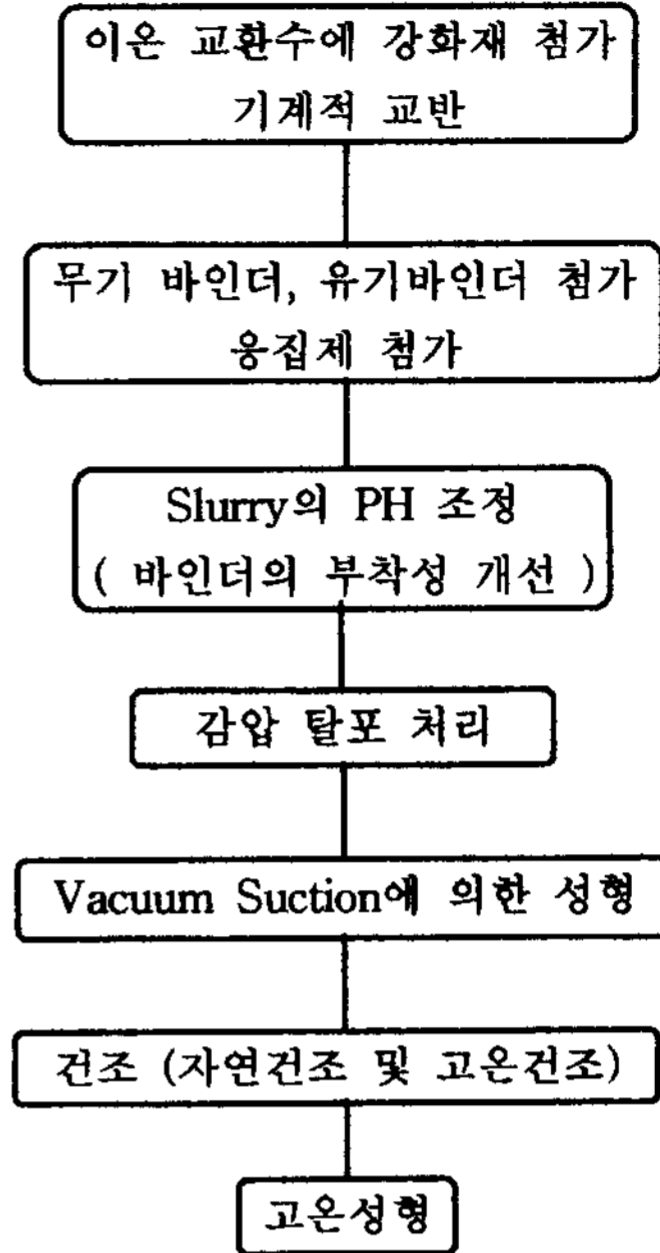


그림 2. 예비성형체 제조과정.

예비성형체의 제조시 고려해야될 점들로는

- (1) 강화재로 사용되는 섬유인 aspect ratio
  - (2) 첨가하는 바인더의 종류
  - (3) 예비성형체의 성형방법
  - (4) 제조된 예비성형체의 건조방법 등을 들 수 있다.
- 강화재로 쓰이는 fiber인 Fiberfrax, Kaowool, Saffil 등은 상용으로 판매되어지는 상품들로, 그대로 사용하기에는 aspect ratio가 크다. 복합재료 제조시 첨가되는 강화재의 aspect ratio는 복합재료의 탄성률, 강도, 파괴

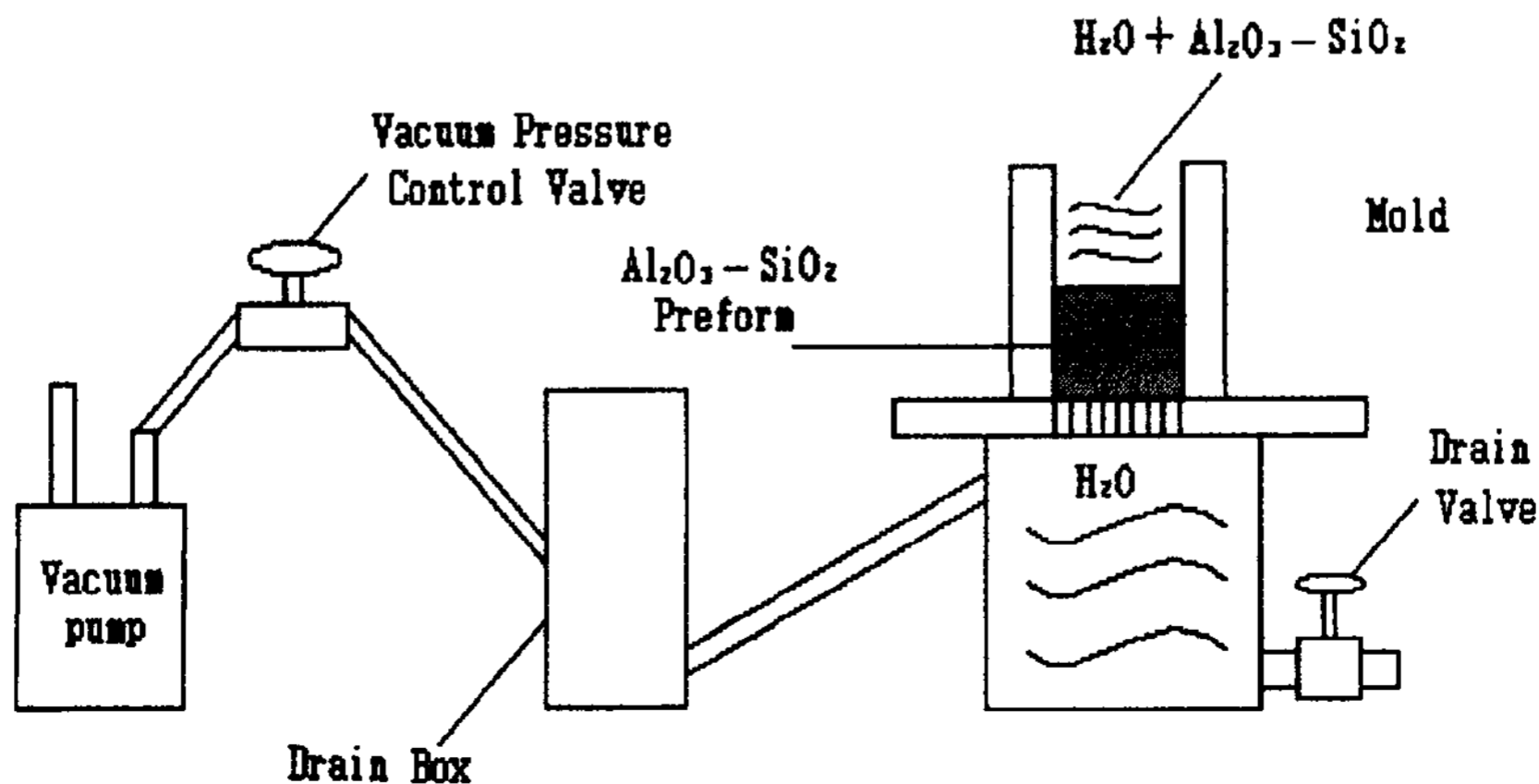


그림 3. 예비성형체제조장치.

표 1. Effects of the additives in the slurry

(◎: excellent, △: good, ▽: bad)

Additives	분포	강도	여수성	배향성 억제	반응성	고온열처리 후 잔류여부
Cation starch	◎	△	-	△	-	×
KSC361 latex	-	◎	▽	△	-	×
Silca colloid	-	◎	-	-	severe	○
Polyvinylalcohol	-	△	-	△	-	×
Cationic polyacrylamide	△	-	△	◎	-	×
Deionized water	-	-	-	-	-	×
Doecylbenzene sulfonate	-	-	▽	-	-	×

인성, 연성, 파괴 메카니즘에 영향을 주게 된다[12]. 따라서 aspect ratio가 적절한 크기를 갖도록 fiber를 cutting해 주는 것이 중요하다. 본 실험실에서는 fiber의 aspect ratio를 100정도로 낮추어 사용하고 있다.

예비성형체 제조시 첨가하는 바인더로는 유기, 무기 바인더가 사용되어지고 있으며, 강화재의 종류 및 분율에 따라 바인더와 응집제의 혼합조건이 틀려지며, 또한 첨가된 바인더에 따라 예비성형체 제조시 예비성형체의 성질이 변화하므로 각각의 목적에 따라 적절한 바인더를 첨가하여야 한다. 표 1에 강화재에 첨가되는 각종 바인더들이 예비성형체의 제조특성에 미치는 영향을 나타내었다. 과도한 무기바인더의 첨가는 구조결합 및 계면 취약성을 유발시키므로 그 양을 최소화하면서 예비성형체가 적정강도를 유지하도록 혼합비를 조절하는 것이 좋다. 그림 4에 강화재의 적정 바인더 혼합조건을 설정하는데 유용한 기초자료가 될 수 있도록, 각기 다른 유기, 무기 바인더의 혼합비로 제조된 Saffil단섬유 예비성형체의 표면경도변화

를 비교하여 나타내었다[11].

예비성형체의 성형방법에 따라서도 예비성형체의 물성이 결정되므로 성형방법의 선택도 이러한 것을 고려하여 선택되어야 한다. 예비 성형체 제작의 실례로 본 연구실에서는 그림 3과 같은 Vacuum suction 방법을 사용하여 예비성형체를 제작하고 있다[13].

또한 예비성형체의 건조 방법도 중요한 인자가 된다. 현재 예비성형체의 건조는 대기중에서 실시하는 방법과 오븐을 사용하여 건조하는 두가지 방법이 많이 사용되어지고 있다.

본 연구실에서 제작한 예비성형체를 대기중에서 건조시킨 것의 경우에는 그림 5에서 보는 것과 같이 예비성형체를 주의 하여 다루지 않을 경우 예비성형체의 훼손이 일어나게 된다. 이러한 예비성형체의 훼손을 방지하기 위해 오븐을 사용하여 건조 시킨 결과 양호한 물성을 갖는 예비성형체를 얻을 수가 있었다.

일반적으로 건조는 예비성형체의 바인더가 내·외부에 걸쳐 균일하게 분포하도록 오븐 내에서 실시하는 것이 보통이며 고온소성을 통해 성형체의 강도향

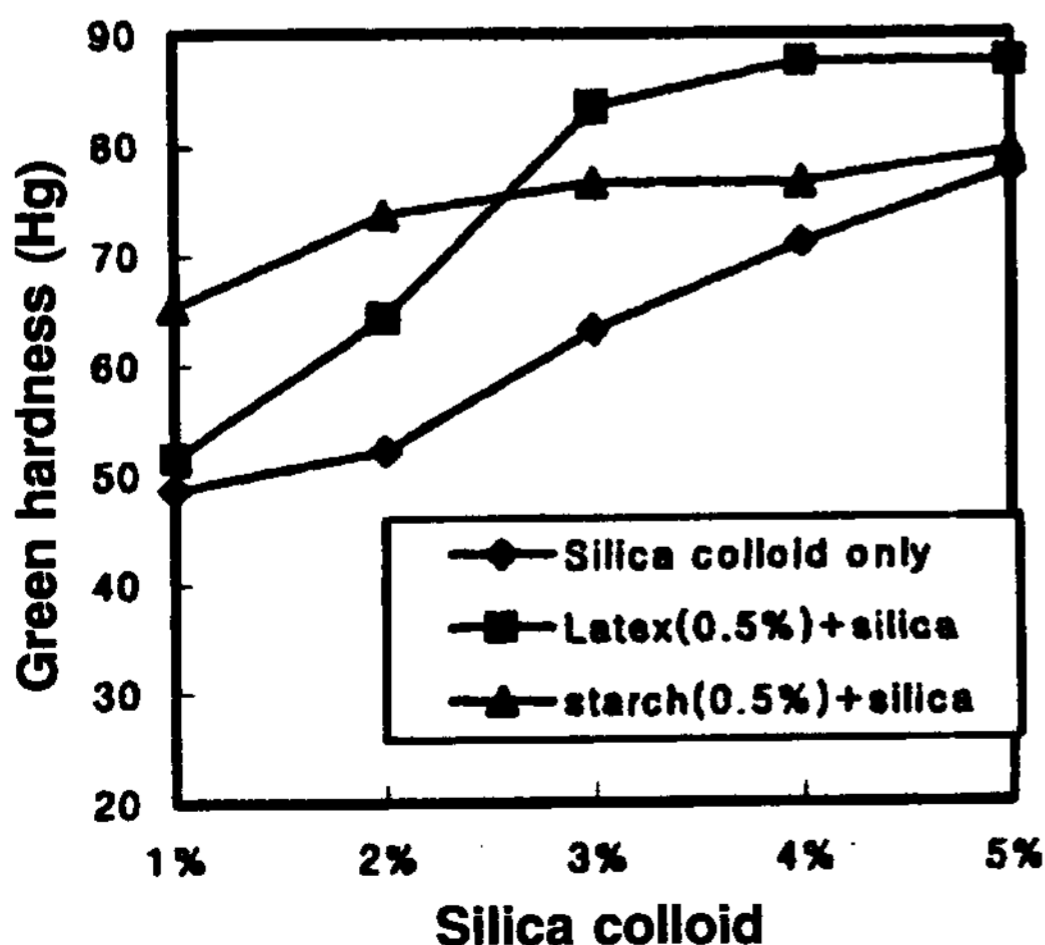


그림 4. 바인더의 종류 및 첨가량에 따른 예비성형체의 경도.

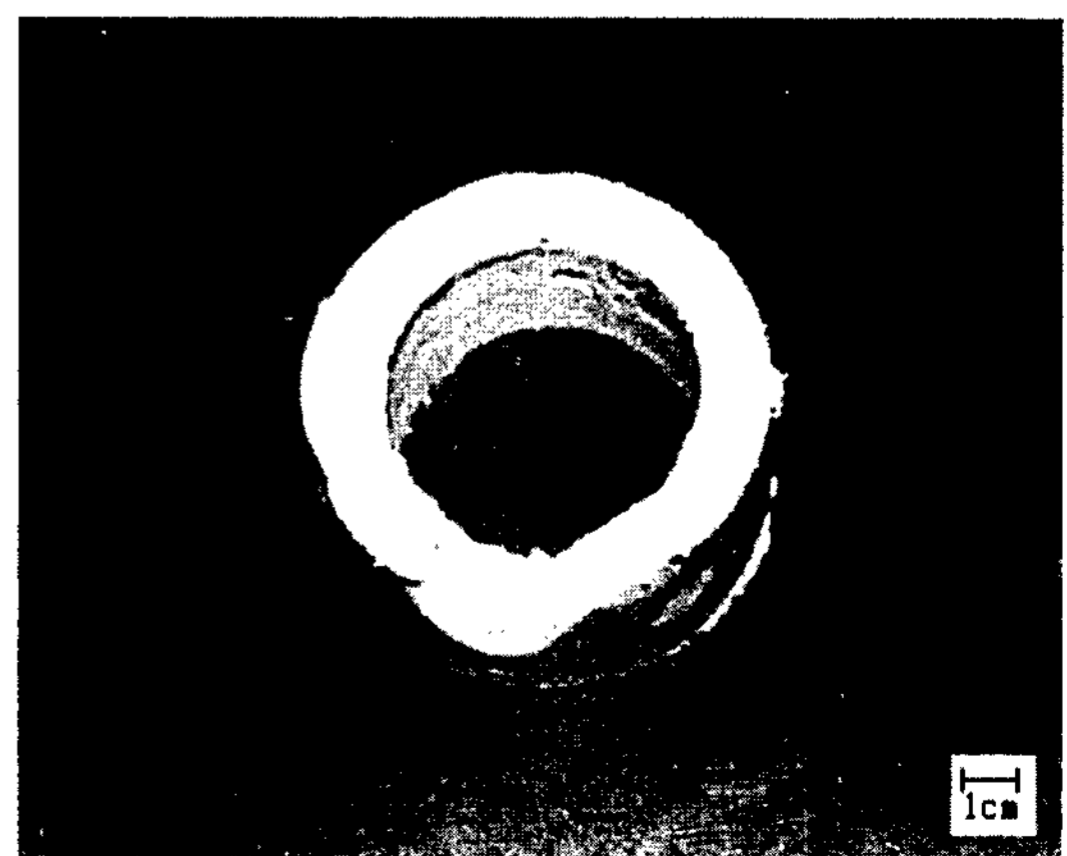


그림 5. 예비성형체의 변형.

상 및 불순물 제거, 그리고 비정질 단섬유의 경우 결정화를 통한 기계적 특성향상을 꾀하는 방법도 적용되고 있다[11].

#### 4. 가압력에 의한 예비성형체의 변형 평가

용탕단조법에 의해 복합재료를 제조시 가압력에 의한 예비성형체의 변형이 발생하며 변형이 심할 경우에는 복합재료의 기계적성질에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 가압력에 의한 예비성형체의 변형을 일반보이론을 도입하여 해석한 내용을 아래에 소개하였다[14].

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 금속기 복합재료의 용탕단조 제조시의 가압력 변화에 따른 예비성형체의 변형을 그림 6에 나타내었다. 표 2에는 예비성형체의 변형량을 나타내었는데, 변형량은 각 가압력 별로 5회 이상 복합재료를 제조하여 측정한 평균값으로 되어있다.

가압력에 따른 예비성형체의 변형량은 가압력이 증가할수록 증가하고 50, 75 MPa의 경우 높이방향으로의 수축변형( $\Delta H$ )만 발생하나 100 MPa의 경우에는 높이 방향으로의 수축변형외에 넓이 방향으로의 팽창변형( $\Delta D$ )이 동시에 일어나는 것으로 나타난다. 가압력

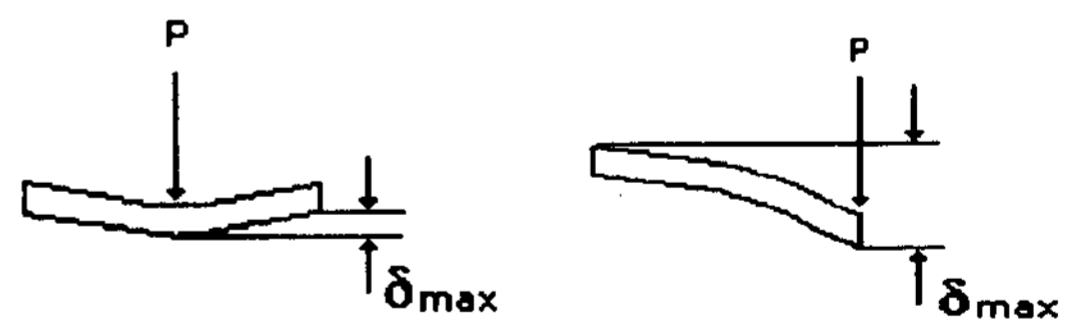
표 2. 예비성형체의 변형 (unit : mm)

Specimen No.	Applied Pressure	H	D	L	$\Delta H$	$\Delta D$	$\Delta L$
1	50 MPa	12.8	6.0	57	7.0	0	0
2	75 MPa	7.5	6.0	57	12.30	0	0
3	100 MPa	4.15	6.2	57	15.65	+0.2	0

50 MPa의 경우에는 주조결함을 육안으로도 관찰할 수 있어 양호한 복합재료의 제조를 위하여서는 충분한 가압력에 도달하지 못했음을 알 수 있다.

용탕단조시 가압력에 의한 예비성형체의 변형을 다음과 같은 모델링을 통하여 해석하고자 하였다. 보강섬유로 사용된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단섬유를 일정한 직경과 길이를 가진 하나의 보(beam)의 형태로 생각하면 예비성형체는 이러한 보의 집합으로 가정할 수 있고, 예비성형체의 변형은 주어진 압력에 대한 보의 최대변형의 합으로 계산할 수 있다[15]. 예비성형체 내의 단섬유의 배열이 그림 7과 같이 직경이 d이고 길이가 l인 보의 적층으로 가정하였다. 용탕단조시 가압력에 의한 예비성형체의 변형은 그림 8와 같이 단순보(simple beam) 혹은 내다지보(cantilever beam) 두 가지 경우에서 주어진 압력 (P)에 대한 최대변형( $\delta_{max}$ )으로 생각하여 다음과 같이 제한하였다.

i) 단순보의 경우



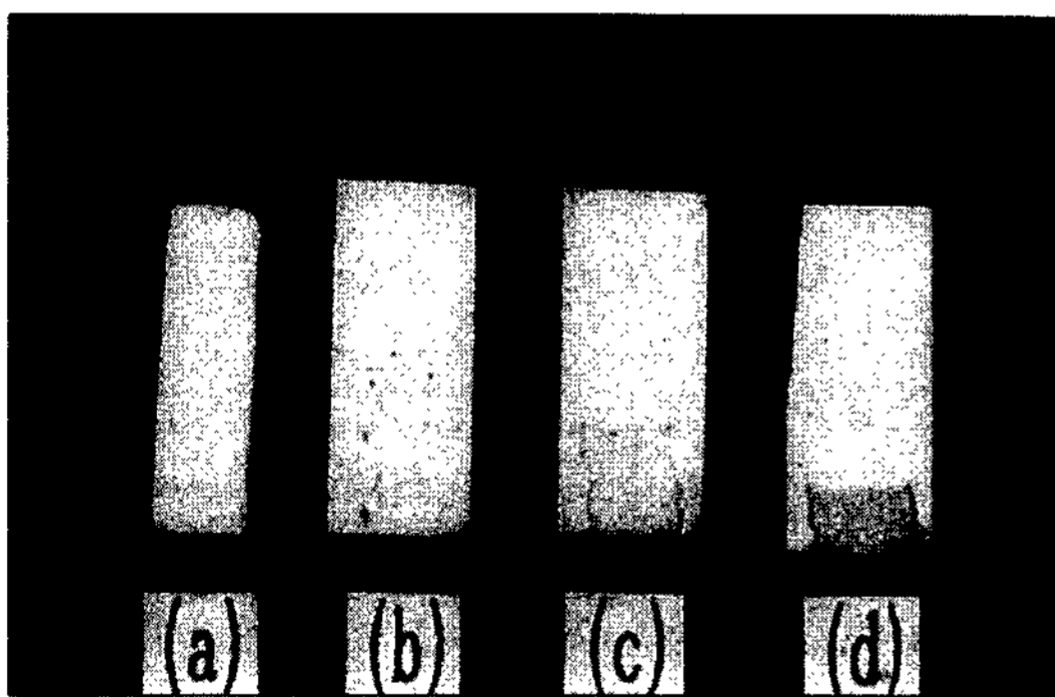
(a) simple beam

(b) cantilever beam

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}$$

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{3EI}$$

그림 8. 보의 변형.



(a) preform (b) 50MPa (c) 75MPa (d) 100MPa

그림 6. 가압에 따른 용탕단조 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Saffil) 복합재료내의 예비성형체의 변형.

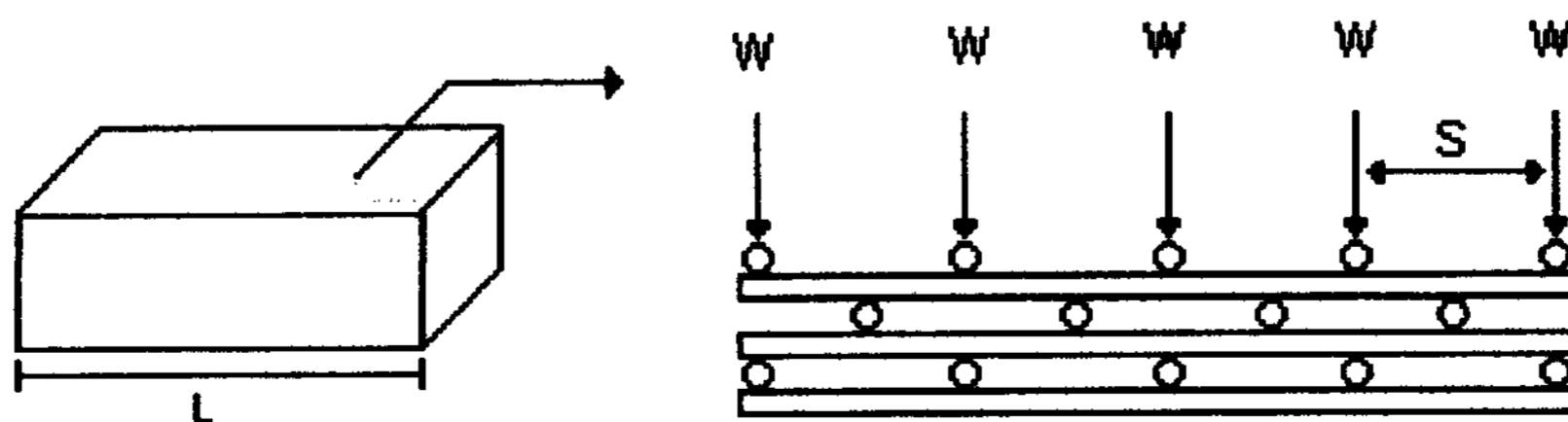


그림 7. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> preform안에 있는 단섬유 배열의 이상적 모식도.

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (1)$$

ii) 내다지보의 경우

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{3EI} \quad (2)$$

여기서

- P : pressure
- L : fiber length
- E : Young's modulus
- I : moment of inertia

이다.

예비성형체의 길이를 L, 두께를 D, 높이를 H라고 하면 fiber 간격(interfiber spacing) S는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$S = \frac{L}{(1 - V_f)n} \quad (3)$$

- $V_f$  : fiber volume fraction
- n : fiber number in upper area

여기서, 각 fiber에 걸치는 하중 W를 P/n으로 하고 N을 예비성형체내의 fiber 총 개수라면 두면

i) 단순보의 변형량은

$$\delta_s = \frac{W \times (S + 3 \mu m)^3}{48EL} \quad (4)$$

ii) 내다지보의 변형량은

$$\delta_c = \frac{W \times (S + 3 \mu m)^3 / 2}{3EL} \quad (5)$$

와 같으므로 예비성형체의 변형량은 보의 변형량의 총합인  $\delta_c \times N$ 으로 된다. Saffil 단섬유 강화 AC8A Al 복합재료에서 식 (4), (5)를 이용하여 이론적으로 계산한 예비성형체의 변형량과 실제로 측정된 예비성형체의 변형량을 그림 9에 나타내었다.

예비성형체의 수축량은 내다지보로서 계산한 결과와 단순보로서 계산한 결과의 사이에 있으나, 단순보로서 계산한 결과에 더 접근하고 있다. 이는 예비성형체에서 단섬유들이 양쪽 끝에서 모두 다른 단섬유에 걸쳐져 있지 못하여 예비성형체 변형은 내다지보의 변형에 가깝고, 변형이 진행됨에 따라 단섬유간의 접촉이 증가하여 예비성형체 변형의 후반에는 단순보

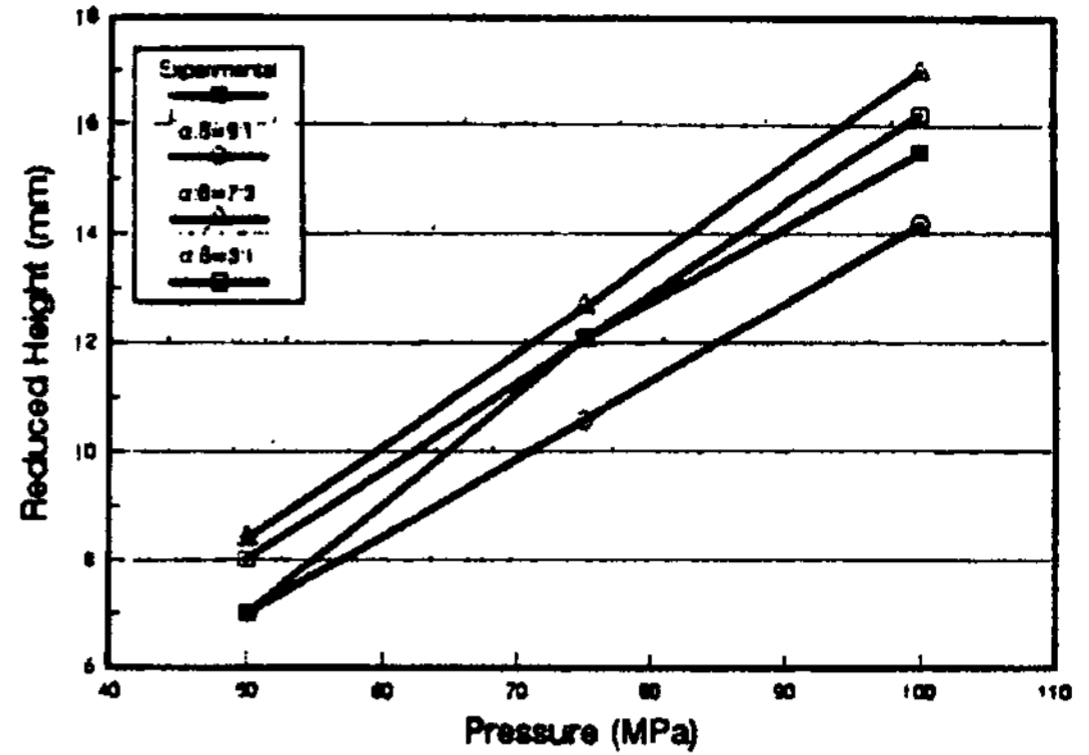


그림 9. 용탕단조 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료내의 예비성형체의 변형에 대한 이론치와 실험치 비교.

형상의 변형이 생길 수 있기 때문으로 사료된다. 따라서 예비성형체의 실질 수축이 단순보와 내다지보의 혼합된 변형으로 가정하여 다음과 같은 실험식을 이용하여 예비성형체의 변형량을 예측하여 보았다.

$$\delta_{max} = \alpha\delta_c + \beta\delta_s \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 상수이다.

그림 10에는 식 (6)을 이용하여 예비성형체의 수축량을 계산한 결과를 나타내었다. 가압력 50MPa에서는 그림 10에서 나타난 바와 같이 가압력이 충분하지 못하여 예비성형체의 수축량이 적고 단순보의 변형량에 가까운 결과를 나타내고 있으나, 적정가압력으로 생각되어지는 75 MPa에서는 단순보의 변형량과 내다지보 변형량의 비가 3:1( $\alpha=3/4, \beta=1/4$ )일 때가 예비성형체의 실질 수축량과 상당히 일치하는 것으로 나타났다. 예비성형체의 실질 수축량은 가압력이 증가함에 따라 수축률이 감소함을 알 수 있는데(즉 가압력 50 MPa과 75 MPa사이에서보다는 75 MPa과 100

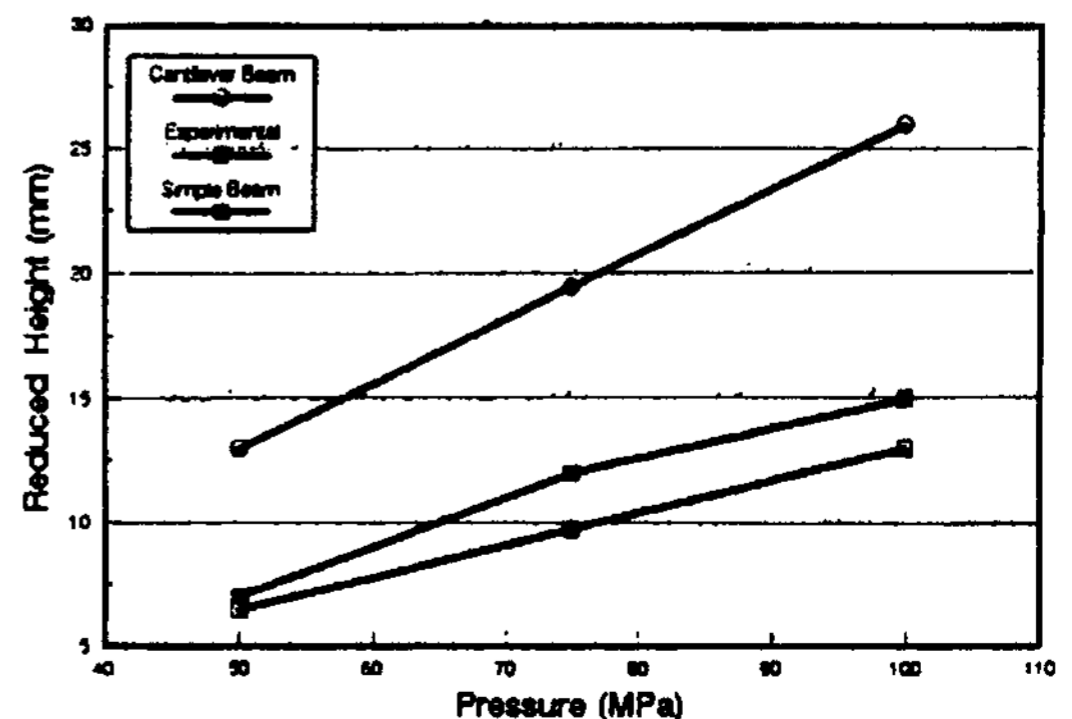
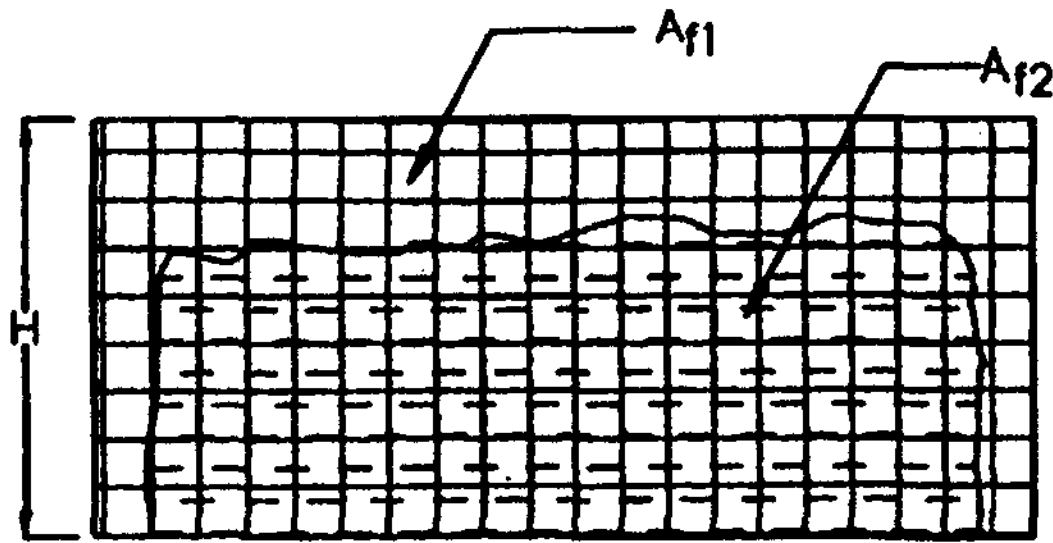


그림 10. 일반보이론에 의해 측정된 예비성형체의 변형량.



$$V_{f2} = (A_{f1}/A_{f2}) * V_f$$

그림 11. 성형후의 예비성형체의 변형.

MPa사이에서 수축량의 변화가 작다) 이는 표 2에 나타나듯이 가압력 100 MPa의 경우 높이 방향으로의 수축 외에 넓이 방향으로의 팽창이 동시에 일어남에 의한 것으로 사료된다. 따라서 가압력 100 MPa의 경우에 식 (6)으로 계산된 예비성형체의 수축량( $\alpha = 3/4$ ,  $\beta = 1/4$ )이 실질 수축량보다 다소 큰 것도 이에 연유한 것으로 사료된다.

예비성형체를 사용하여 제작한 복합재료의 성형후 복합재료내의 예비성형체의 변형 정도는 다음과 같은 간단한 고찰을 통해 생각할 수 있다[16].

그림 11는 성형후 예비성형체의 변형을 개략적으로 보여 주고 있다. 용탕단조후 예비성형체의 체적함유율  $V_{12}$ 는, 폭방향으로의 예비성형체의 높이차이가 길이방향에 비하여 그 차이가 작기 때문에 폭 방향의 높이는 일정한 것으로 생각하여 성형 전후 예비성형체의 단면적을 계산하여 다음과 같이 정의한다.

$$V_{12} = \left( \frac{A_{f1}}{A_{f2}} \right) \times V_f \times 100$$

#### 4. 결 언

금속기 복합재료 제조시 고려해야할 인자로는 강화

재인 예비성형체와 주조공정에서의 금형 예열온도, 가압력, 용탕 온도 등이 있다. 이러한 인자들중 주조공정인자들에 대해서는 그 동안 많은 연구가 행하여져 왔으며 나름대로의 know-how가 축적되어 왔다. 그러나 예비성형체의 제조와 평가에 대해서는 폭넓은 연구가 부족하다.

따라서, 본글에서는 지금까지 여러지면으로 소개되었던 예비성형체의 제조법 및 평가법을 정리 소개함으로써 금속기 복합재료의 연구에 도움이 되고자 하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 윤중열, 최정철, 홍성길 : 주조, 16 (1996) 1, 4.
- [2] J. N. Fridlyander : Metal Matrix Composites, Chapman & Hall, (1995).
- [3] Mel M. Schwartz: Composite Material, Prentice-Hall, (1996).
- [4] 윤여창, 최정철, 홍성길 : 주조, 15 (1995) 4, 368.
- [5] T. W. Clyne and J. F. Mason : Metal. Trans. A, 18A (1987) 1519.
- [6] A. Mortensen and J. A. Cornic: Metal Trans A, 18A (1987) 1160.
- [7] 오혁진, 방명성, 이의길, 남승의 : 주조, 12 (1992) 6, 464.
- [8] 김석원, 우기도, 한상원 : 주조, 15 (1995) 6, 566.
- [9] 박익민, 최정철 : 복합재료, 반도출판사, 개정 1판 (1994).
- [10] 강충길, 구광서 : 대한금속학회지, 17 (1993) 7, 1751.
- [11] 박익민, 신광선, 이명호 : 주조, 17 (1997) 5, 427.
- [12] International Encyclopedia a Composites, 3, (1990) 193.
- [13] 윤중열 : "고압주조 SiCw 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 단섬유강화 Al 합금기 복합재료의 조직과 기계적 성질", 아주대학교 석사학위논문 (1996).
- [14] 지동철, 정성실, 조경목, 박익민, 김 진 : 주조, 13 (1993) 1, 62.
- [15] S. H. Gandall, N. C. dahl and T. J. Lardner : An Introduction to Mechanics of Solids, 2nd ed, McGraw-Hill, (1978).
- [16] 강충길, 구광서, 박봉수 : 주조, 14 (1994) 4, 331.