Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 30, No. 2, PP. 157~163, 1993.

알루미나 분말 기지혼합체의 상온 반복압축 후 가압소결
-상온 반복압축 효과-

손건석 · 서 정 · 박병학* · 김기태
포항공과대학 기계공학과
*산업과학기술연구소
(1993년 1월 12일 접수)

Hot Pressing after Cold Cyclic Compaction of Alumina Powder Matrix Mixtures
-Effects of Cold Cyclic Compaction-

G. S. Son, J. Suh, B. H. Park* and K. T. Kim
Department of Mechanical Engineering,
Pohang Institute of Science and Technology
*Research Institute of Industrial Science and Technology
(Received January 12, 1993)

요 약

SiC 휘스커 또는 Al_2O_3 단섬유를 첨가한 Al_2O_3 분말 기지 혼합체들의 상온 반복압축 후 가압소결에서 상온 반복압축의 효과를 조사하였다. 반복 압축력이 높을수록 반복횟수가 증가할수록 혼합체의 성형밀도가 증가하였다. 또한, 높은 압력으로 1회 압축하기 보다는 낮은 압력으로 반복압축함으로 더 높은 성형밀도를 얻을 수 있었다. 가압소결시에 더 높은 치밀화를 얻기 위해서도 가압소결전에 상온 반복압축함이 반복 압축과정이 없는 기존의 가압소결법보다 효과적이었다. 또한, 낮은 반복 압축력이 휘스커 보강에 따른 인성기구에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Hot pressing after cold cyclic compaction of Al_2O_3 powder mixtures containing SiC whiskers or Al_2O_3 short fibers is studied with emphasis on the effects of cold cyclic compaction. The green density of the mixtures increases as the cycle number increases and the cyclic pressure becomes higher. The higher green density is also obtained by cold cyclic compaction with the lower pressure than a single stroke cold compaction. To achieve a higher densification during hot pressing, cold cyclic compaction before hot pressing is more efficient compared to the conventional hot pressing process (without cold cyclic compaction). Moreover, a low cyclic pressure did not affect on toughening mechanism by whisker reinforcement.

1. 서 론

Al_2O_3 기지 복합재료(Al_2O_3 matrix composites)에 관한 최근의 연구결과들은 SiC 휘스커를 첨가함으로서 Al_2O_3 복합재료의 파괴인성이 상당히 보였다[1-4]. 또한, SiC 휘스커 보강 Al_2O_3 복합재료의 제조공정에 관한 연구도 수행되었다[2,4-6].

Porter 등[5]은 1550℃ 의 상압소결에서는 15 vol% SiC 휘스커-Al_2O_3 복합재료의 치밀화가 전혀 일어나지 않음을 보였다. Tiges와 Becher[7]는 1700~1800℃ 와 아르곤 가스분위기의 상압소결에서 제조한 10 vol% SiC 휘스커-Al_2O_3 복합재료는 0.83 정도의 낮은 상대밀도(소결체 밀도/이론밀도)를 갖는다고 하였다. 따라서, 높은 밀도를 갖는 Al_2O_3 복합재료의 제조를 위해서는 가압소결법이 사용

되어 왔다[1,2,5,6].

가압소결법은 혼합체를 금형내부에 부어 넣은 상태에서 실험온도까지 가열한 후 가압하여 온도와 압력을 일정하게 유지하는 단순한 공정이다. 그러나, SiC 휘스커의 큰 장경비(aspect ratio)에 따른 맞물림(interlocking) 때문에 가압소결전의 혼합체의 충진밀도가 낮으며 이는 가압소결조건에 영향을 미칠 수 있다. 완전 치밀화된 SiC 휘스커-Al_2O_3 복합재료를 얻기 위해서는 20~70 MPa의 압력과 1750℃ 이상의 높은 온도의 가압소결 조건이 요구된다[2,6].

Kim과 Son[8]은 상온 반복압축이 알루미나 분말의 재배열을 촉진하며, 알루미나 성형체의 충진밀도가 증가함을 보였다. 최근에 손건석 등[9]은 알루미나 분말의 상온 반복압축 후 가압소결은 반복압축과정이 없는 기존의 가압소결법에 비해 가압소결시의 더 높은 치밀화와 가압소결 시간을 줄일 수 있음을 보였다. 따라서, 상온 반복압축은 Al_2O_3 분말 기지 혼합체의 충진밀도를 증가시키기 위해서 사용될 수 있을 것이다. 또한, 혼합체의 상온 반복압축 후 가압소결에 대한 연구는 기존의 가압소결조건보다 낮은 압력과 온도에서 높은 밀도를 갖는 Al_2O_3 복합재료의 제조공정의 개발을 위해서도 중요하다.

본 논문에서는 Al_2O_3 분말에 SiC 휘스커 또는 Al_2O_3 단섬유를 첨가한 분말 기지 혼합체들의 상온 반복압축 후 가압소결하여 상온 반복압축하여 반복횟수와 반복압축력이 혼합체의 성형밀도에 미치는 영향을 조사하였으며, 혼합체의 가압소결중의 치밀화 거동을 반복압축 과정이 없는 기존의 가압소결법의 결과와 비교하였다. 또한, 가압소결체의 파괴인성치, 파단면과 균열의 전파거동의 실험결과를 이용하여 상온 반복압축이 가압소결체의 파괴특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실 험

2.1. 실험 재료

본 실험에서 사용한 기지(matrix material) 분말로는 상업용 Al_2O_3 분말(*AL-150SG-1, Showakeikinzoku Co.*)이며, 제 2상으로는 SiC 휘스커(Tokai Co.)와 코팅되지 않은 Al_2O_3 단섬유(Saffil RF grade, ICI Co.)를 사용하였다. Fig. 1(a), (b)와 (c)는 각각 주사전자현미경으로 관찰한 Al_2O_3 분말과 SiC 휘스커 및 Al_2O_3 단섬유를 나타낸다. 또한, Table 1(a), (b)와 (c)은 각각 Al_2O_3 분말과 SiC 휘스커 및 Al_2O_3 단섬유의 물리적 화학적 성분을 나타낸다.

2.2. 혼합 실험

Al_2O_3 분말/10 vol% SiC 휘스커(이하 Al_2O_3/10 vol% SiC_W) 및 Al_2O_3 분말/10 vol% Al_2O_3 단섬유(이하 Al_2O_3/10 vol% Al_2O_{3SF})의 균일한 혼합을 위해 ultrasonic probe를 사용한 ultrasonic dispersion법을 이용하였으며, 분산매로는 에틸 알코올을 사용하였다. 분산이 끝난 혼합물은 항온기에서 24시간 건조한 후 폴리 에틸렌 용기를 사용하여 약 3시간 동안 볼 밀링(ball milling)을 하였다. 볼 밀링이 끝난 혼합체를 금형내부에 부어 넣은 후의 Al_2O_3/10 vol% SiC_W와 Al_2O_3/10 vol% Al_2O_{3SF}의 혼합체들의 초기 충진밀도는 각각 1.60 g/cm^{3}와 1.64 g/cm^{3}로 항상 일정하게 실험하였다.

2.3. 상온 반복압축-가압소결 실험

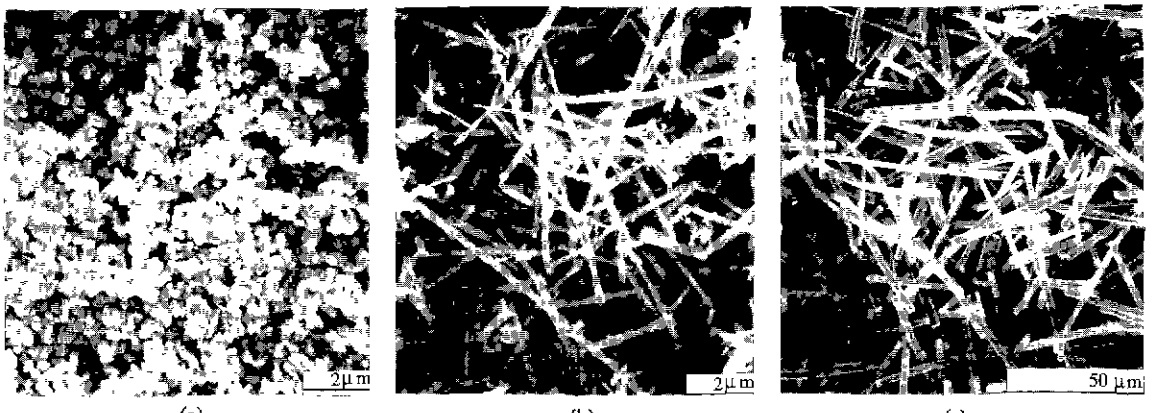

Fig. 1. Scanning electron micrographs: (a) Al_2O_3 powder, (b) SiC whisker, and (c) Al_2O_3 short fiber.

Table 1. Characterizations of Alumina Powder and SiC Whisker and Alumina Short Fiber

(a) Alumina Powder	Value
Fired density (fired at 1550℃ at 2 hr, g/cm³)	3.90
Mean particle size (μm)	0.4
Specific surface area (m²/g)	7.0
Impurities (wt, %)	
Loss of ignition	0.60
Fe_2O_3	0.01
SiO_2	0.03
Na_2O	0.06
MgO	0.05
(b) SiC Whisker	**Value**
Diameter range (μm)	0.3~0.6
Length range (μm)	5~15
Aspect ratio	10~50
True density (g/cm³)	3.20
Specific surface area (m²/g)	2~4
Impurities (wt, %)	
Fe	−0.05
SiO_2	−0.5
Ca	−0.05
Co	−0.05
Cr	−0.05
Al	−0.08
Mg	−0.02
(c) Alumina Short Fiber	**Value**
Diameter range (μm)	1.5~6.6
Length range (μm)	3~110
Aspect ratio	4~38
True density (g/cm³)	3.30
Stability Temp. to use (℃)	1600
Impurities (wt, %)	
SiO_2	3~4

상온 반복압축-가압소결 실험을 위하여 MTS 재료시험기에 진공소결로를 부착한 실험장치를 사용하였다. 정하중과 반복하중 및 반복속도는 재료시험기의 console에 부착된 microprofiler로 제어하였다. 금형과 상부 펀치 및 하부기저는 고온에서 하중을 잘 견디는 흑연으로 제작하였으며, 상부 및 하부 램(ram)은 고온 반복압축에 견딜 수 있는 몰리브덴으로 제작하였다. 금형의 외경과 내경은 각각 95.0± 0.01 mm와 55.0± 0.01 mm이며, 높이는 60.0± 0.01 mm이다.

Fig. 2는 본 논문에서 이용한 상온 반복압축-가압소결

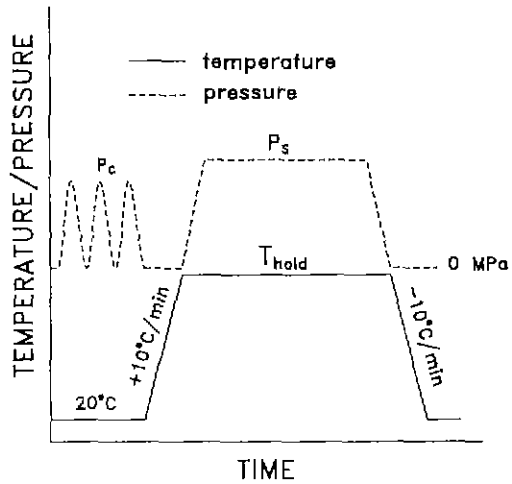

Fig. 2. Pressure and temperature conditions used for cold cyclic compaction and continuous hot pressing process.

의 실험조건이며, 실선과 점선은 각각 온도와 가압조건을 나타낸다. 혼합체는 상온에서 최대 반복압력 P_C로 사인파형의 반복압축을 하였다. 반복속도는 1/3 Hz, 제하(unloading)는 0 MPa까지 하였다. 상온 반복압축 후, 진공(vacuum)상태에서 ±10℃/min로 승온하였다. 온도가 T_{hold}=1600℃에 도달하면 정압축력 P_S를 가하여 온도와 압축력을 가압소결시간 동안 일정하게 유지하였다. 가압소결 후, 압력을 제하하고 금형내의 가압소결체를 −10℃/min로 냉각하였다. 냉각된 시편의 밀도는 체적과 질량을 측정하여 구하였다. 상온 반복압축이 혼합체의 충진밀도에 미치는 영향을 조사하기 위해 $P_C \leq 100$ MPa에서 반복횟수 $N=1\sim10^3$에 대해서 실험하였다. Al_2O_3/10 vol% SiC_W 혼합체의 상온 반복압축-가압소결 실험에서는 P_C=10 MPa, N=100 및 P_S=20 MPa이며, Al_2O_3/10 vol% Al_2O_{3SF} 혼합체의 상온 반복압축-가압소결 실험에서는 P_C=2.5 MPa, N=100 및 P_S=5 MPa이다.

2.4. 파괴인성 측정

파괴인성치는 소결체를 SENB(single edge notched beam) 시편으로 제작하여 4점 굽힘실험으로 구하였다. Fig. 3은 SENB 시편의 개략도를 나타낸다. 여기서 L은 시편의 길이, b는 시편의 폭, h는 시편의 높이, a와 w는 각각 노치(notch)의 깊이와 폭을 나타낸다. 시편은 소결체를 다이아몬드 휠을 사용하여 #400, #800과 #1000의 순으로 연마한 후 L=45 mm, b=5 mm, h=12 mm의 굽힘시편으로 절삭한 후 초음파 절삭기로 가압방향과

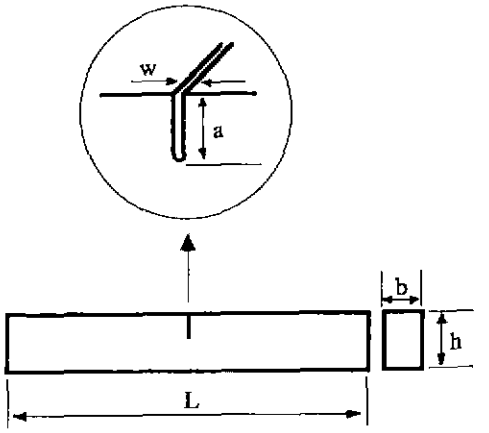

Fig. 3. Specimen geometry of the single edge notched beam.

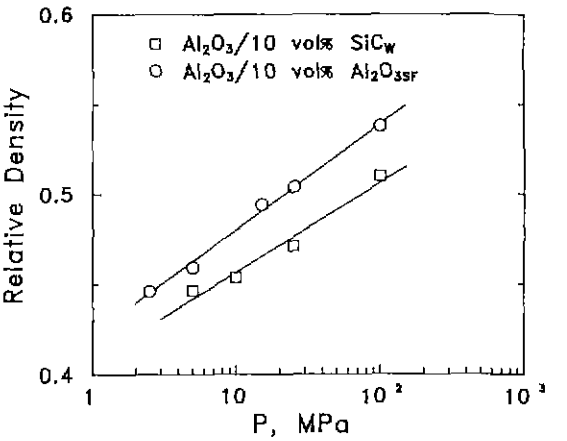

Fig. 4. Pressure vs. relative density relations for Al_2O_3 powder mixtures containing 10 vol% SiC whisker (□) and 10 vol% Al_2O_3 short fiber (○) under a single stroke cold compaction.

평행한 균열면을 갖는 노치를 가공하였다. 노치의 폭은 w≈500 μm, 노치의 깊이는 a=0.34~0.39 h이다. 파괴실험은 MTS 재료 시험기에 외부스팬(outer span)과 내부스팬(inner span)이 각각 40 mm와 20 mm인 MTS 4점 굽힘장치를 부착하여 행하였다. 축방향 변위속도는 MTS 재료시험기의 console에 부착된 microprofiler을 사용하여 0.1 mm/min로 제어하였다.

제조된 복합재료의 SENB 시편의 4점 굽힘실험에서 파괴인성치 K_{IC}는 Brown과 Srawley[10]가 제안한 다음 식으로부터 구하였다.

$$K_{IC}=\frac{3Fe\sqrt{\pi a}}{bh^2}Y \qquad (1)$$

$$Y=1.12-1.39(a/h)+7.32(a/h)^2$$
$$-13.1(a/h)^3+14.0(a/h)^4$$

여기서 F는 시편에 작용한 하중, e는 4점 굽힘장치의 외부스팬과 내부스팬 길이 차의 1/2을 나타내며, 본 실험에서는 10 mm이다.

2.5. 미세구조 분석

인성 기구를 조사하기 위해 균열 전파거동의 관찰이 용이한 압자압입법(indentation method)을 이용하여 인위적으로 균열을 발생시킨 시편과 SENB 시편의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰하였다. 균열은 연마된 시편 표면에 면각이 160°인 Vickers 미소경도기를 사용하여 10 Kg의 하중을 30초간 가하여 인위적으로 발생시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 상온 반복압축시의 치밀화 거동

Fig. 4는 상온 1회 압축에서 구한 혼합체들의 압력 P와 상대밀도 D의 관계를 나타낸다. 압축한 후 혼합체의 상대밀도는 금형에서 꺼낸 성형체의 밀도와 이론밀도의 비로 나타내었다. 여기서, 이론밀도는 혼합 성분들의 부피분율을 감안한 혼합법칙(rule of mixture)으로부터 구하였다. D와 log P의 관계는 선형적이며, 압력의 증가량에 비해 치밀화 경향은 매우 둔화됨을 알 수 있다. 또한, Al_2O_3/10 vol% SiC_W(□)와 Al_2O_3/10 vol% Al_2O_{3SF}(○)의 혼합체들은 P=100 MPa의 높은 성형압에서도 각각 D=0.51과 D=0.54 정도밖에 치밀화가 일어나지 않음을 보인다.

Fig. 5는 상온 반복압축이 혼합체의 치밀화에 미치는 영향을 나타낸다. 실험치(□, ○)는 반복압축력 P_C≤10 MPa에서 반복속도 1/3 Hz로 반복횟수 N=1~10^3에 대해서 구하였다. 상온 반복압축력이 높을수록 반복횟수가 증가할수록 혼합체들의 성형밀도가 증가함을 보이나, 반복횟수 N>100회에서는 치밀화가 둔화됨을 알 수 있다. P_C=10 MPa로 100회 반복했을 때의 Al_2O_3/10 vol% SiC_W 혼합체(□)의 상대밀도는 Fig. 4에서 P=100 MPa로 1회 압축한 경우보다 높음을 알 수 있다. 또한, P_C=5 MPa로 100회 반복했을 때의 Al_2O_3/10 vol% Al_2O_{3SF} 혼합체(○)의 상대밀도는 Fig. 4에서 P=25 MPa로 1회 압축한 경우보다 높음을 알 수 있다. 따라서, 높은 압력으로

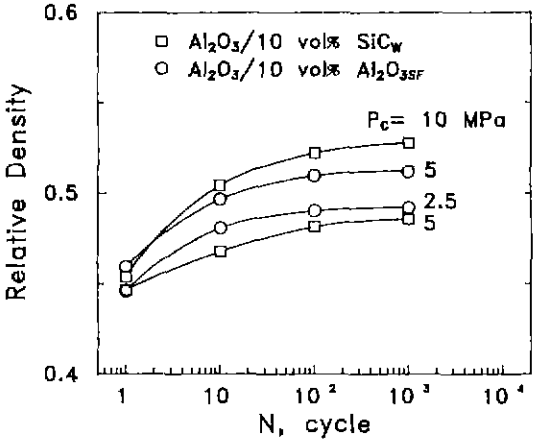

Fig. 5. Effect of cold cyclic compaction on densification of Al_2O_3 powder mixtures containing 10 vol% SiC whisker (□) and 10 vol% Al_2O_3 short fiber (○).

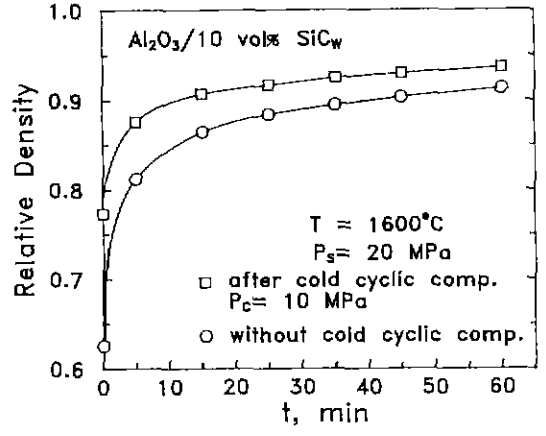

Fig. 6. Relative density vs. time relations for Al_2O_3 powder mixture containing 10 vol% SiC whisker under hot pressing after/without cold cyclic compaction.

1회 압축하기 보다는 낮은 압력으로 반복압축하는 것이 혼합체의 더 높은 성형밀도를 얻을 수 있다. 이러한 효과는 반복압축하에서 혼합체의 재배열이 촉진되어 충진밀도를 증가되는 결과이다. 이러한 경향은 알루미나 분말의 상온 반복압축시의 실험결과[8]와 동일하다.

3.2. 가압소결시의 치밀화 거동

Fig. 6은 Al_2O_3/10 vol% SiC_W 혼합체의 가압소결시간에 따른 치밀화 거동들을 나타낸다. □는 상온에서 P_C=10 MPa과 1/3 Hz로 100회 반복압축한 후 1600℃ 에서 정

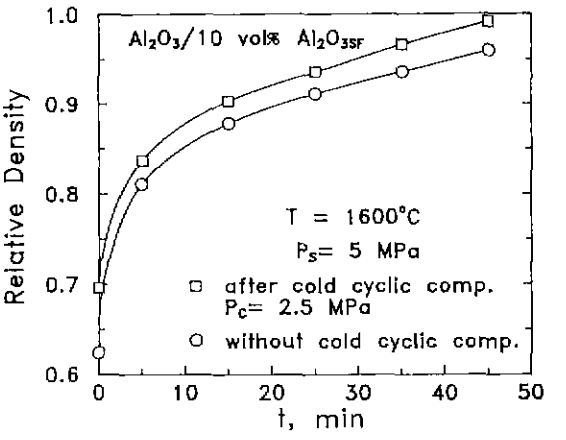

Fig. 7. Relative density vs. time relations for Al_2O_3 powder mixture containing 10 vol% Al_2O_3 short fiber under hot pressing after/without cold cyclic compaction.

압축력 P_S=20 MPa로 가압소결한 혼합체의 실험치이며, ○는 상온 반복압축 과정없이 1600℃ 에서 정압축력 P_S= 20 MPa로 가압소결한 기존의 가압소결법에 의한 실험치를 나타낸다. 동일한 온도와 압축력의 가압조건에서 혼합체의 더 높은 치밀화를 얻기 위해서는 가압소결전에 상온 반복압축함이 기존의 가압소결법에 비해 효과적임을 알 수 있다. 이러한 결과는 Al_2O_3/10 vol% Al_2O_{3SF} 혼합체에서도 나타남을 알 수 있다(Fig. 7 참조). Fig. 7에서 □는 상온에서 P_C=2.5 MPa과 1/3 Hz로 100회 반복압축한 후 1600℃ 에서 정압축력 P_S=5 MPa로 가압소결한 실험치이며, ○는 상온 반복압축 과정없이 1600℃ 에서 정압축력 P_S=5 MPa로 가압소결한 기존의 가압소결에 의한 실험치를 나타낸다.

가압소결의 초기단계에서 치밀화는 입자들의 파쇄와 미끄러짐에 기인하는 재배열에 의해 일어난다[10-12]. Fig. 6과 7에서 상온 반복압축 후 가압소결에서의 더 높은 치밀화는 상온 반복압축하의 혼합체의 재배열의 촉진에 기인된다. 이러한 과정은 혼합체들의 접촉면적을 증가시키게 되어 치밀화를 향상시키게 된다.

3.3. 파괴인성치

Table 2는 상온 반복압축 후 가압소결하여 제조한 SENB 시편의 노치 깊이와 시편의 높이의 비 a/h가 0.34~0.39인 순수 알루미나와 복합재료의 상대밀도 D 및 식 (1)로부터 계산된 파괴인성치 K_{IC}를 나타낸다. 여기서, 순수 알루미나의 실험치는 본 논문의 알루미나 분말과 동일한 재료를 사용하여 상온에서 P_C=5 MPa과 1/3

Table 2. Fracture Toughness from SENB Specimens of Alumina and Composites by Hot Pressing after Cold Cyclic Compaction

Materials	notch depth /specimen height a/h, mm	relative density D**	K_{IC} MPa $m^{1/2}$
Alumina*	0.36	0.98	5.60
	0.36	0.99	4.87
SF10	0.35	0.99	5.42
	0.38	0.99	6.13
	0.39	0.99	5.65
SF20	0.39	0.99	5.27
	0.39	0.99	5.46
WS10	0.36	0.97	7.14
	0.34	0.96	6.24
	0.37	0.97	6.63

*ref. 9
*calculated with the volume and weight of SENB specimen
SF10: 10 vol% alumina short fiber-alumina composite
SF20: 10 vol% alumina short fiber-alumina composite
WS10: 10 vol% SiC whisker-alumina composite

Hz로 100회 반복압축한 후 1550℃ 에서 정하중 P_S=10 MPa로 가압소결한 알루미나 SENB 시편의 결과[9]를 인용한 것이다. Al_2O_3 단섬유-복합재료는 순수 알루미나의 파괴인성치와 비슷한 값을 가지나, SiC 휘스커-복합재료는 밀도가 낮음에도 불구하고 파괴인성치(6.67± 0.32)가 순수 알루미나(5.75± 0.66)에 비해 약 20% 증가함을 알 수 있다.

2.4. 미세구조 분석

Fig. 8은 Al_2O_3 단섬유-복합재료의 압자압입법에 의해 발생된 균열을 나타낸다. 여기서, 코팅되지 않은 Al_2O_3 단섬유는 가압소결시 화학조성이 동일한 Al_2O_3 분말과 소결이 이루어져 형태상으로 구분할 수 없으며, 균열은 입계를 따라 전파하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 코팅되지 않은 Al_2O_3 단섬유-복합재료의 파괴거동은 순수 Al_2O_3의 경우와 동일하며, 3.3절의 파괴인성치의 실험결과와 일치한다.

Fig. 9는 SiC 휘스커-복합재료의 압자압입법에 의한 균열(a, b)과 SENB 시편의 파단면(c)을 나타낸다. (a)와 (b)에서 균열이 SiC 휘스커에 의해 굴절됨을 알 수 있다. SiC 휘스커-복합재료에서의 균열길이는 119.5 μm이며, 순수 알루미나(161.65 μm)와 Al_2O_3 단섬유-복합재료(145.

Fig. 8. Scanning electron micrograph of crack propagation of 10 vol% Al_2O_3 short fiber-alumina composite.

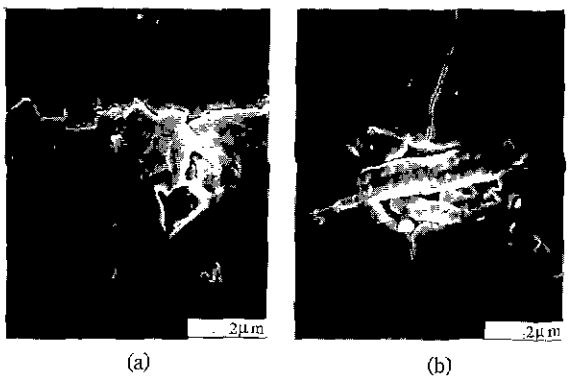

Fig. 9. Scanning electron micrographs of 10 vol% SiC whisker-alumina composite: (a) and (b) denote crack propagations by Vickers-indentation, and (c) denotes fractured surface of SENB specimen.

0 μm)에 비해 짧음이 관찰되었으며, 이는 균열의 굴절 현상에 기인됨을 알 수 있다. (c)는 SENB 시편의 파단면을 나타내며, pull-out되어 있는 SiC 휘스커와 휘스커가 빠져나간 자국들이 관찰된다. 따라서, 3.3절의 SiC 휘스커-복합재료의 파괴인성치가 순수 알루미나에 비해 증가하는 인성기구는 휘스커 보강에 따른 균열의 굴절과 휘스커의 *pullout*에 기인됨을 알 수 있다.

상온 반복압축에서 높은 반복 압축력이 작용될 때에는 휘스커의 파손(breakage)이 발생될 수 있다. 결과적으로 심한 파손 현상은 휘스커 보강에 의한 인성강화 효과를 저하시킬 수 있다. 그러나, 상온 반복압축 후 가압소결하여 제조된 복합재료를 파괴인성, 파단면 및 균열의 전파거동을 조사하여 낮은 반복 압축력이 휘스커 보강에 따른 인성기구에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 Al_2O_3 분말에 10 vol% SiC 휘스커 또는 10 vol% Al_2O_3 단섬유를 첨가한 분말 기지 혼합체들의 상온 반복압축 후 가압소결에 관하여 조사하였다. 상온 반복압축에서 반복횟수와 반복 압축력이 혼합체의 성형밀도에 미치는 영향이 관찰되었다. 또한, 높은 밀도를 갖는 복합재료를 얻기 위해서는 반복 압축과정이 없는 기존의 가압소결법보다는 가압소결전에 상온 반복압축함이 효과적이었다. 끝으로, 낮은 반복 압축력이 휘스커 보강에 따른 인성기구에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있었다. 그러나, 반복 압축력이 휘스커의 파손과 복합재료의 인성기구에 미치는 영향을 좀더 정확히 해석하기 위해서는 상온 압축력의 크기와 휘스커와 분말의 입자비 등에 따른 실험이 추가되어져야 할 것이다.

REFERENCES

1. P.F. Becher and G.C. Wei, "Toughening Behavior in SiC-Whisker-Reinforced Alumina," *J. Am. Ceram Soc.*, **67**, C-267-C-269 (1984).
2. G C. Wei and P.F. Becher, "Development of SiC-Whisker-Reinforced Ceramics," *Am Ceram. Soc. Bull.*, **64**, 298-304 (1985).
3. P.F. Becher, T.N. Tiges, J.C. Ogle, and W.H. Warwick, "Toughening of Ceramics by Whisker Reinforcement"; pp. 61-73 in Fracture Mechanics of Ceramics, Vol. 7, Composites, Impact Statistics, and High-Temperature Phenomena, Edited by R.C. Bradt, D.P.H. Hasselman, A.G. Evans, and F.F. Lange, Plenum Press, New York, 1986.
4. J. Homeny, W.L. Vaughn, and M.K. Ferber, "Processing and Mechanical Properties of SiC-Whisker-Al_2O_3-Matrix Composites," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **66**, 333-338 (1987).
5. J.R. Porter, F.F. Lange and A.H. Chokshi, "Processing and Creep Performance of SiC-Whisker-Reinforced Al_2O_3," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **66**, 343-347 (1987).
6. M. Yang and R. Stevens, "Fabrication of SiC Whisker Reinforced Al_2O_3 Composites," *J. Mater. Sci.*, **25**, 4658-4666 (1990).
7. T.N. Tiges and P.F. Becher, "Sintered Al_2O_3-SiC-Whisker Composites," *Am. Ceram. Soc. Bull*, **66**, 339-342 (1987).
8. K.T. Kim and G. Son, "Cyclic Compaction of Ceramic Powders," *J. Am. Ceram. Soc*, **75**, 3157-3159 (1992).
9. 손건석, 서 정, 백성기, 김기태, "상온 반복압축 후 가압소결에 의한 알루미나 분말의 소결특성-치밀화와 결정립 성장 및 파괴인성," 한국요업학회지, **30**, 62-68 (1993).
10. W.F. Brown, Jr. and J.E. Srawley, "Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials," ASTM, STP 410, Philadelphia (1966).
11. R.C. Rossi and R.M. Fulrath, "Final Stage Densification in Vacuum Hot-Pressing of Alumina." *J. Am. Ceram Soc.*, **48**, 558-564 (1965).
12. R.L. Coble, "Diffusion Models for Hot Pressing with Surface Energy and Pressure Effects as Driving Force," *J. Appl. Phys.*, **41**, 4798-4807 (1970).
13. L. Bower, R.J. Weston, T.G. Carruthers and R.J. Brook, "Hot-Pressing and the α-β Phase Transformation in Silicon Nitride," *J. Mat. Sci*, **13**, 341-350 (1978).