

중력침강에 의한 세라믹 섬유 길이분류

김제균 · 최광훈 · 오승진 · 정윤중 · 강대갑* · 이재춘

명지대학교 무기재료공학과

*한국원자력연구소 정밀요업재료 개발팀

(1993년 11월 20일 접수)

Classification of the Length of Ceramic Fibers by Settling Process

J. G. Kim, K. H. Choi, S. J. Oh, Y. J. Chung, D. G. Kang* and J. C. Lee

Dept. of Inorg. Mat. Eng., Myong Ji University

*Fine Ceramic Materials Development Group,

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received November 20, 1993)

요 약

체눈크기와, 예로 150 μm 혹은 300 μm , 유사한 평균길이를 갖는 세라믹 단섬유를 bulk 섬유로부터 획득하기 위한 목적으로, bulk 섬유를 체망위에서 분쇄시키므로써, 섬유의 분쇄와 체망통과를 동시에 수행하였다. Bulk 섬유 분쇄시 발생되어 분쇄된 섬유들 속에 들어있는 분진섬유를 제거시키기 위해 체망을 통과한 섬유는 수차례의 중력침강 분류공정을 거쳤다. 이렇게 분류된 섬유의 길이를 전자주사현미경 사진을 통해 측정하고 길이분포와 평균길이를 조사하여, 체망의 체눈크기와 분류된 섬유의 평균길이 값과의 상관관계를 조사하였다. 입자와 섬유의 자유침강이론에 의한 침강속도 분석결과, 자유침강에 의한 섬유의 길이분류는 자유침강에 의한 구형입자의 크기 분류에 비해 상대적으로 비효율적인 것으로 나타났다. 섬유의 충전부피로부터 계산된 평균 섬유길이와 전자주사현미경 사진에 의한 각 섬유의 길이측정으로부터 얻어진 섬유의 산술평균길이 값은 거의 일치하였다. 따라서 섬유의 충전부피로부터 해당섬유의 평균길이를 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

For the preparation of short ceramic fibers of which average length might be in accordance with the opening size of sieve, e.g., 150 μm or 300 μm , bulk fibers were grounded on sieve screen by applying both compressing and shearing force, and passed through the sieve screen. The grounded fibers were subjected to gravitational settling processes. The classified fibers were observed by scanning electron microscopy and the length of each fiber was measured to correlate the average length with the opening size of the sieve used for grinding bulk fibers. Theoretical analysis show that a free settling technique is ineffective for the classification of fibers by length compared with that of particles. The average lengths of classified fibers estimated by scanning electron microscopy were in good agreement with those obtained by relative packing volume of the fibers. Accordingly, it is confirmed that average fiber lengths can be determined from bulk volume data without photographing, counting and averaging results for hundreds of fibers.

1. 서 론

입자와 섬유의 복합체 제조에서, 균질한 미세구조를 획득하기 위해서는 사용되는 입자의 크기와 섬유의 길이 모두가 균일할 필요가 있다. 균일한 크기의 입자는 체망에 의한 입도분류, 중력침강, 수비조작 등에 의해 얻

어진다¹⁾. 한편, 분사 혹은 회전공법에 의해 제조된 섬유의 장단경비(aspect ratio)는 1에서 무한대까지 매우 광범위하다. 이런 섬유원료를 절단기에 의한 절단 혹은 ball mill에 의한 분쇄에 의해 얻어진 불균일한 길이분포의 섬유로부터 일정한 평균길이를 갖는 섬유들을 단순한 체망분류 혹은 중력침강 방법으로 길이분류하기는 어렵

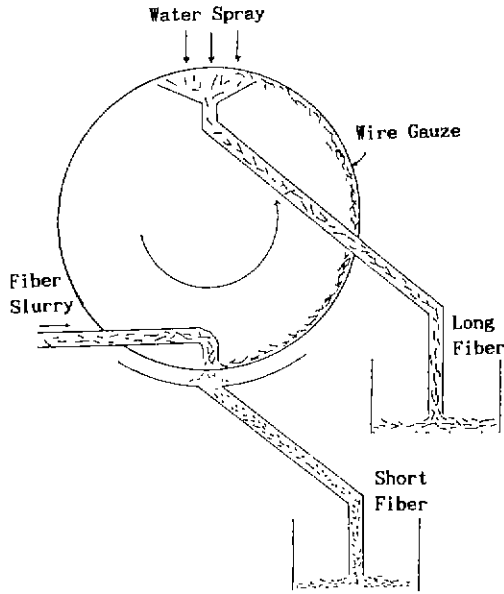


Fig. 1. Schematic drawing of a single wheel rotary fiber classifier which sorted fibers into long and short. (From Ref. (2))

다. 섬유 길이 분류 작업을 하기 위해서는 Fig. 1과 같은 회전분류기를 사용하여, 연속적으로 일정한 길이를 갖는 섬유를 효율적으로 분류할 수 있다고 알려져 있다²⁾.

본 연구에서는, 회전분류기를 갖추지 못한 실험실에서 평균 섬유 길이가 1 mm 이하이면서 균일한 길이분포를 갖는 소량의 섬유를 획득할 수 있는 방안을 조사하였다. 체망을 이용한 bulk 섬유의 분쇄와 중력침강을 이용한 섬유의 길이분류 실험을 통해 얻어진 섬유의 길이분포와 분류실험과 관련된 재반문제를 분석하므로써, 본 연구에서 시도한 분류방법의 효율성과 타당성을 평가하였다.

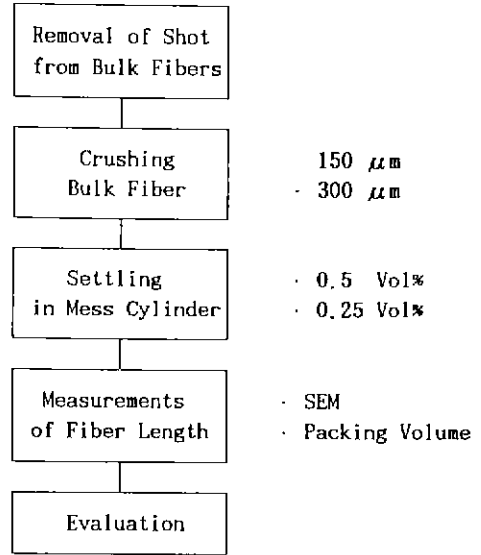


Fig. 2. Experimental Procedures.

2. 실험방법

Fig. 2에 본 연구에서 수행한 실험 및 분석단계를 도식화하여 나타내었으며 각 단계에 대한 세부사항은 아래와 같다.

2.1. 출발원료

본 연구의 수행초기에는 길이분류 실험에 사용할 출발 섬유원료로써 용융공정으로 국내 K사에서 제조된 aluminosilicate 섬유(이하 AS섬유라 칭함)와 외국에서 제조된 alumina 섬유(이하 A섬유라 칭함), 두 종류를 택하였다. 섬유형태는 일반적으로 널리 사용되고 있는 bulk 형태였다. Table 1은 두 종류의 섬유에 대한 주요 물성을

Table 1. Major Properties of Aluminosilicate and Alumina Fiber Provided by Manufacturer

Properties	Fiber	Aluminosilicate Fiber	Alumina Fiber
1. Density (g/cm ³)		2.7	3.4
2. Diameter (μm)		3±1	3±1
3. Length (mm)		Max. 300	—
4. Shot Content (%)		10 (-70 mesh)	Negligible
5. Max. Use Temperature (°C)		1260	1400
6. Main Components (%)			
	Al ₂ O ₃	50	96~97
	SiO ₂	50	3~4

나타내고 있는데 A와 AS 섬유 모두 평균지름은 3 μ m으로 나타나 있으며 밀도차는 대략 1g/cm³로 나타나 있다. 실험초기에 이와같은 두 종류의 섬유를 선택한 이유는, 각 bulk 섬유를 분쇄한 후, 침강분류시켜 길이분류를 수행하는 경우, 섬유의 밀도차에 의해 발생할 것으로 예상되는 침강분류의 효과에 대해 조사하기 위함이었다. 그러나 국내에서 제조된 AS 섬유는 다음 절에서 설명될 이유로 인해 본 연구에서 수행되는 분류방법에 적합하지 않을 것으로 판단되어 길이분류 실험의 대상에서 제외시키고, 회전공정에 의해 제조된 alumina 섬유만으로 본 실험을 수행하였다.

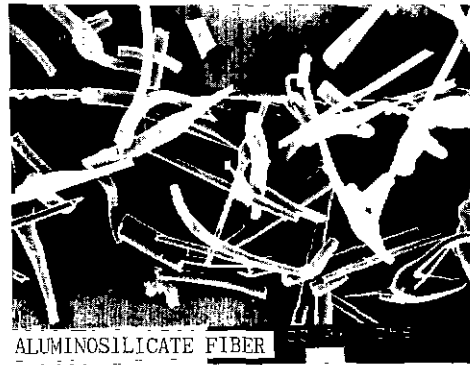
2.2. 섬유의 분쇄

분사 혹은 회전공법에 의해 제조된 세라믹 섬유의 경우, 제조 공정상, bulk 섬유에는 섬유 뿐만 아니라 섬유화되지 않은 알갱이(shot)를 많이 포함하고 있다(Fig. 3(A)). 이러한 알갱이는 특히 분사공정에 의해 제조된 섬유제품에 최고 50 wt%까지 포함되어 있다고 알려져 있다. 본 실험에서는 체망위에서 bulk 섬유 AS와 A를 각각 분쇄하기 전에, 각 bulk 섬유를 물과 혼합한 후 juice mixer기로 영겨있는 bulk 섬유를 어느 정도 절단, 풀어헤친 후 이것을 beaker에 부어, 가라앉은 알갱이와 부유된 섬유를 일차적으로 분리시켜서, 섬유만을 획득한 다음 이 섬유들을 체눈크기가 150 μ m 혹은 300 μ m인 체망 위에서 각각 분쇄시켜 체망을 통과시켰다. Fig. 3(A)는 bulk 섬유 AS에 포함되어 있는 구, 혹은 울챙이 모양을 가진 알갱이의 전자주사현미경 사진으로, 섬유의 지름보다 훨씬 큰 수십에서 수백 μ m의 크기를 가진 것을 알 수 있다. 300 μ m 크기의 체눈을 가진 체망위에서 분쇄되어 통과된 섬유 AS와 A의 모양이 Fig. 3(B)와 3(C)에 각각 나타나 있는데, 국내에서 제조된 섬유 AS는 휘어 있는 섬유가 많고 또한 섬유의 지름굵기가 불균질한 반면, 이와는 대조적으로 알루미늄 섬유 A는 매우 균질한 지름을 갖는 섬유인 것을 알 수 있다.

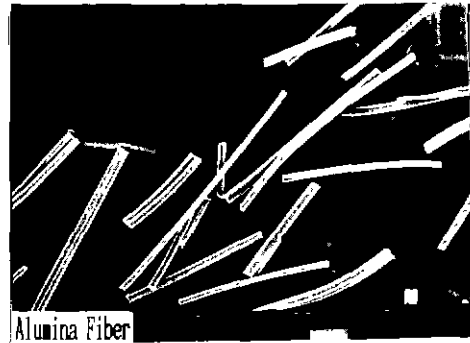
이와같은 각 섬유의 morphology 관찰결과에 따라서 침강에 의한 섬유길이의 분류실험에서 섬유 AS는 제외시켰다. 그 이유로는 체망위에서 분쇄된 섬유를 중력 침강시켜, 침강속도에 따른 길이분류 실험에서 불균질한 지름크기를 가진 섬유의 침강속도는 단순히 섬유의 길이에 의존하지 않고, 섬유의 굵기 혹은 섬유의 morphology 등에도 의존할 것이므로 중력침강에 대한 효과적인 섬유 길이분류를 도모할 수 없을 것으로 예상되었기 때문이다.



(A)



(B)



(C)

Fig. 3. Morphology of ceramic fibers.

- (A) shot contained in bulk aluminosilicate fiber AS
- (B) aluminosilicate fiber AS
- (C) alumina fiber A

2.3. 침강실험

체망 위에서 bulk 섬유의 분쇄과정 중에 발생한 분진 섬유를 제거하기 위해서 섬유의 부피비율이 0.5 vol%

혹은 0.25 vol% 퇴계검 물과 섬유 혼합용액 250 cc를 만들어 250 cc 메스실린더에 채운 후 막대기로 한동안 교반시킨 다음, 섬유가 자연 침강되도록 하였다. 이때 침강시간은 5분 혹은 10분을 각각 유지하였으며 5분 혹은 10분 경과후에도 부유되어 있는 섬유들은 물과 함께 제거하였다. 한편, 섬유가 가라앉아 있는 메스실린더에 다시 물을 보충한 후 막대기로 교반시켜 섬유가 충분히 분산되게 한 다음, 섬유가 다시 자연 침강되도록 한 후 5분 혹은 10분 경과후에도 부유되어 있는 섬유들은 물과 함께 제거하였다. 이러한 조작을 각각 모두 5회 반복하므로써, 분진섬유입자를 분쇄된 섬유속에서 제거하였다.

2.4. 섬유의 길이분포 및 평균길이 측정

침강실험을 거쳐 얻어진 섬유의 길이분포 및 평균길이와 분쇄시 사용된 체망의 체눈크기(여기서는 150 μm 과 300 μm)와의 관계를 분석하기 위해서, 침강분류된 섬유의 전자주사현미경 사진을 통해 약 300개의 섬유에 대한 길이를 측정하였다. 또한 침강분류된 섬유의 충전부피(packing volume) 측정을 통해서 상대겉보기(충진)부피(relative bulk(packing) volume, ≡ 이론밀도/충진밀도 혹은 충전부피/순수섬유부피)값을 계산하여, Milewski²⁾가 제안한 상대충진부피와 섬유의 장단경비와의 그래프(Fig. 4)에서 본 실험에서 얻은 섬유의 상대충진부피 값에 해당되는 섬유의 장단경 비를 구한 다음 섬유의 평균 길이를 계산하였다. 이렇게 계산된 섬유의 평균길이와 앞에서 전자주사현미경 사진을 통해 측정, 계산된 섬유의 산술평균 길이를 비교하였다. 충전부피 측정실험과 섬유의 평균길이 계산은 다음과 같이 수행하였다. 체눈크기가 150 μm 과 300 μm 인 체망을 통과시켜 침강분류된 섬유를 공기중에서 깔때기를 이용하여 10 cc 메스실린더 안으로 각각 낙하시킨다. 그리고 낙하된 섬유의 표면이 평평하게 유지될 정도로 10 cc 메스실린더를 가볍게 두드림(tapping)으로써 섬유를 충전시킨다. 이때의 충전부피를 기록하고, 충전된 섬유의 무게와 밀도를 통해 순수섬유부피(충진된 섬유무게/섬유이론밀도)를 계산한다. 앞에서 언급한 것처럼 상대겉보기(충진)부피(relative bulk(packing) volume)는 충전부피/순수섬유부피 혹은 이론밀도/충진밀도로서 알 수 있으며, 분류된 각 섬유군의 상대충진부피 값(예로, 100% 치밀체=1.0)에 의해 섬유의 장단경비(aspect ratio)를 Fig. 4로부터 구하여 각 섬유의 평균길이를 계산한다. 즉 섬유의 평균지름(average diameter)을 알면 충전부피 측정에 의하여 섬유의 평균길이를 계산할 수가 있다.

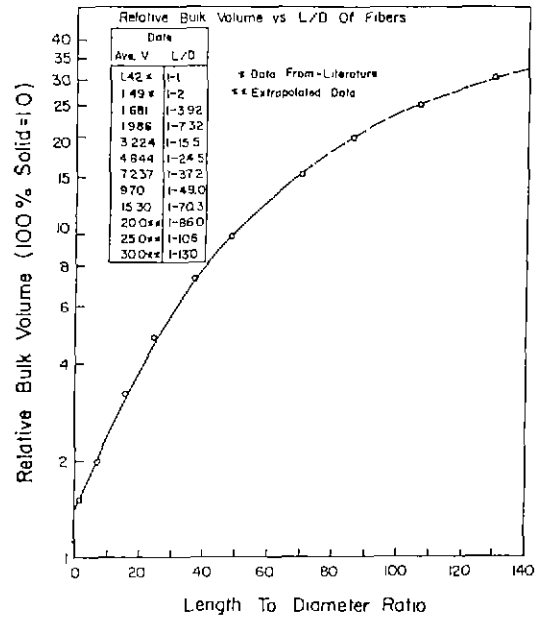


Fig. 4. Packing curve for fibers with varied L/D ratios.

3. 결과 및 고찰

3.1. 섬유 부피백분율이 침강과 길이분류에 미치는 영향

Fig. 5는 체눈크기가 300 μm 인 체망위에서 분쇄되어 통과된 섬유를 가지고 5분간씩 5회 침강분류된 섬유의 전형적인 SEM 사진으로, 침강분류하기 위해 섬유와 물과의 혼합용액에서 섬유부피백분율(vol% fiber)에 따른 분류효과를 보여주고 있다. 즉 Fig. 5(A)와 (B)는 각각 섬유부피백분율이 0.5 vol%와 0.25 vol%로써, 섬유부피백분율이 0.5 vol%인 경우, 침강분류 후에도 섬유의 길이가 10 μm 이하인 분진섬유들이 많이 존재하고 있다. 이와는 대조적으로, 0.25 vol%인 경우에는 상대적으로 분진섬유들이 없는 것을 알 수 있다. 이러한 관찰결과로부터, 체눈크기가 300 μm 인 체망을 통과한 섬유중에 포함되어 있는 분진섬유를 중력침강(gravitational settling)방법에 의해 제거하기 위해서는 중력침강기에 섬유부피백분율을 0.5 vol%보다 훨씬 작은 0.25 vol%로 할 필요가 있다. 한편, 150 μm 체눈을 통과한 섬유의 부피백분율을 0.5 vol%로 하여 5분간 5회 반복중력침강 실험 후에 얻어진 섬유의 SEM 관찰결과, Fig. 5(B)와 유사하게 분진섬유가 존재하지 않았다. 따라서 150 μm 체눈을 통과한 섬유를 중력침강시켜 분진섬유를 제거하는 경우 섬유부피백분

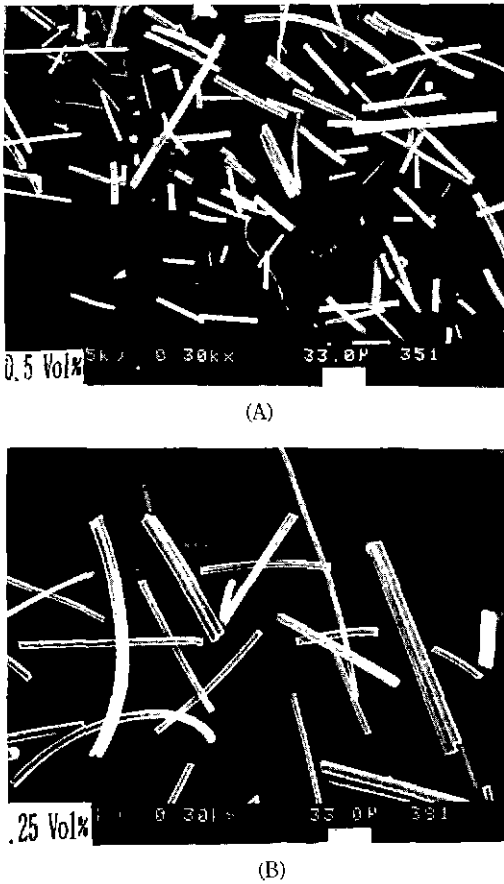


Fig. 5. Effects of volumetric fiber contents on settling of fiber.
 (A) 0.5 vol% fiber (B) 0.25 vol% fiber

울을 0.5 vol%로 유지할 수 있다. 이와같은 섬유 부피 백분율에 따른 중력침강의 실험결과는 다음과 같이 설명될 수 있다.

300 μm 체눈크기를 통과한 섬유는 150 μm 체눈크기를 통과한 섬유보다 평균적으로 더 길것으로 예상된다. 이 경우, 300 μm 체눈을 통과한 섬유는 덩어리(clustering) 상태로 서로 엉킬 수 있을 정도로 길며, 이러한 섬유를 0.5 vol% 부피백분율로 하여 중력침강시키는 경우에는 분진섬유들이 이러한 덩어리내에 갇혀져 낙하한다든가 혹은 간섭침강(hindered settling)으로 분진섬유도 빨리 침강하게 되어 반복 침강분류된 섬유들 속에서 계속 분진섬유가 존재하는 것으로 추정된다.

섬유의 충전(packing)에 관한 Milewski의 연구에 따르면⁹⁾, 섬유의 장단경비(aspect ratio)가 25~40보다 큰 경우 섬유의 덩어리(clustering)와 현상이 나타나기 시

작한다고 하였다. 본 연구에서 300 μm의 체눈을 통과하고 10분간 5회 반복 침강분류한 섬유의 장단경 비는 전자주사현미경에 의한 섬유의 평균길이 측정결과 98/3 ≃ 33으로 나타났으며, 실제로 0.5 vol%로 희석된 경우에는 섬유가 덩어리져 침강되는 것을 발견할 수 있었다. 한편 0.25 vol%로 희석시킨 경우에는 섬유의 농도가 상대적으로 낮으므로 섬유의 엉킴이 덜하며 장섬유와 분진섬유가 서로 엉키지 않고 자유로이 존재함으로써 자유침강(free settling)이 될 수 있는 조건과 가까운 희석 농도가 되어 반복침강에 의해 분진섬유가 효과적으로 제거될 수 있는 것으로 추정된다. 이와 유사하게 150 μm 체눈크기를 가진 체망을 통과된 섬유를 0.5 vol%의 부피백분율로 5분 혹은 10분간 5회 침강분류시켜 관찰한 결과 미분섬유가 발견되지 않은 것은 자유침강 될 수 있는 섬유의 희석조건을 만족시켰기 때문으로 생각된다.

한편, 구형입자(spherical particle)가 자유침강되기 위해서 분산매중의 입자 농도는 부피백분율로 대략 0.1 vol%인 것을 다음과 같은 구형입자의 충전모델(packing model)로부터 예측될 수 있다. 즉 입자가 자유침강되기 위한 필요조건은 하나는 각 입자가 입자 크기의 10배 이상의 거리를 서로 유지한 채 침강하는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 이 경우에 구형입자의 반지름을 R이라 하면, 자유침강이 이루어질 수 있는 입자의 분산상태는 반지름이 대략 11R인 가상적인 구(sphere)가 조밀충진(close packing)을 이루고있는 상태로 그려질 수 있다. 이때 가상적인 구에 의해 형성된 단위정육면체(unit cubic)에서 가상적인 구가 차지하는 고체충진부피(solid packing volume)는, $V_s = 4 \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot (11R)^3$ 로 표현된다. 또한 조밀충진상태에서 기공이 차지하고 있는 부피 V_p 와 고체충진부피 V_s 의 합인 전체부피, V_T 는 가상적인 구에 의해 형성된 단위정육면체의 부피와 같으므로 $V_T = V_s / 0.74$ 가 됨을 구의 충전모델로부터 쉽게 증명할 수 있다. 즉, 반지름이 R인 실제의 구형입자가 단위 정육면체에서 차지하는 부피, $V_m = 4 \cdot (4/3) \cdot \pi \cdot R^3$ 이므로, 자유침강조건을 만족하는 구형입자의 부피백분율, $\text{vol}\% = (V_m / V_T) \times 100\% \approx 0.1\%$ 가 된다. 중력침강을 이용하여 입자의 크기 분류를 수행하기 위해, Sacks와 그의 동료들은 크기가 0.1~0.4 μm인 알루미늄 입자를 중력침강 방법에 의해 입도 분류하였으며, 이때 입자의 vol%는 2.5%로 하였다¹¹⁾. 위에서 언급한 자유침강조건에 필요한 입자의 부피백분율은 0.1 vol%로 계산되나, 일반적으로 침강실험에 사용되는 입자의 부피백분율은 앞에서 예를 든 것처럼 2.5 vol%로 계산값보다도 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 부피백분율 값을 좀 더 크게 함으로서, 자유침강조건을

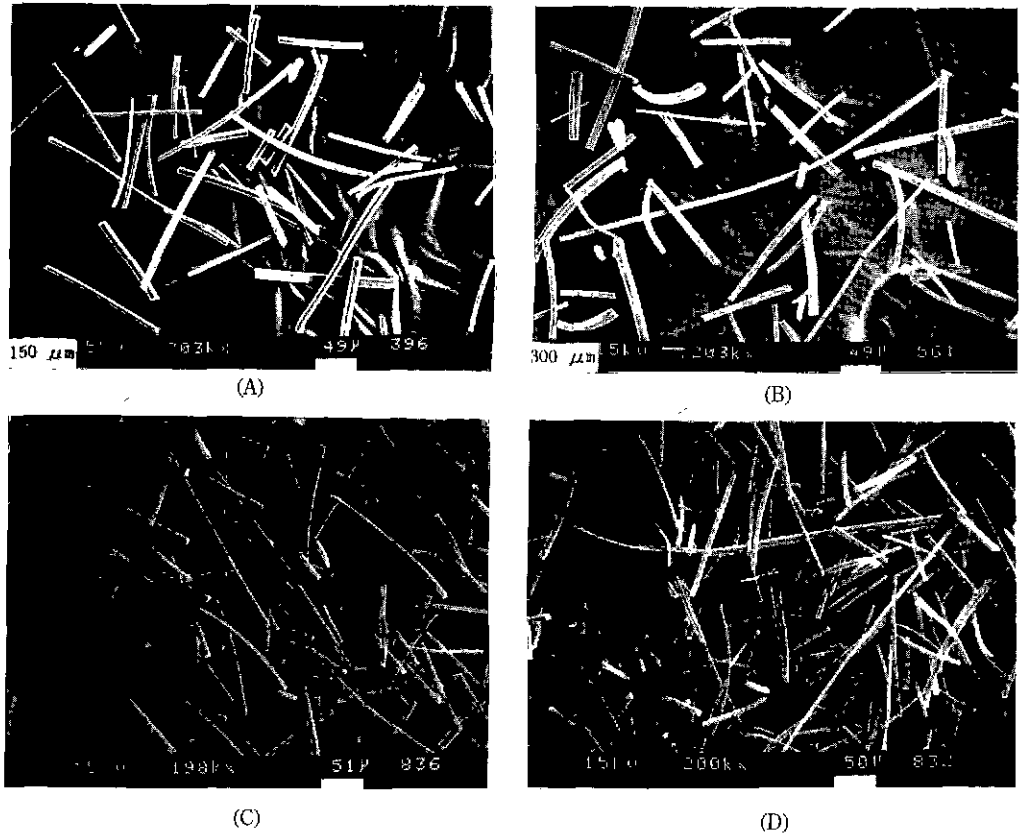


Fig. 6. Micrographs of classified fibers.

- (A) settling time 5 min. and sieve opening size 150 μm
- (B) settling time 5 min. and sieve opening size 300 μm
- (C) settling time 10 min. and sieve opening size 150 μm
- (D) settling time 10 min. and sieve opening size 300 μm

대체적으로 만족시키면서 크기 분류되는 입자의 수율(yield)를 좀 더 많게하여 중력침강에 의한 분류작업을 좀 더 빠르게 하기 위한 목적이라 사료된다.

이상 요약하면, 입자는 중력침강에 의해 입도분류하는 예는 많이 있으나, 섬유는 경우에는 그 예를 찾아 보기가 어렵다. 입자의 중력침강을 위해 입자의 부피 백분율이 0.1~2.5 vol%로 사용되는 반면, 섬유를 자유침강하기 위한 섬유부피 백분율을 제한할 수 있는 적합한 수리적 모델이 현재로는 없는 것으로 사료된다. 본 실험에서 수행한 섬유침강 실험에 따르면, 중력침강에 의한 섬유 길이분류를 위한 적절한 섬유부피백분율 값은 대상섬유가 덩어리화 되느냐, 안되느냐에 크게 의존되는 것으로 생각된다.

3.2. 침강분류된 섬유의 길이분포

3.2.1. 체눈크기의 영향

체눈크기가 150 혹은 300 μm 인 체망을 각각 통과시킨 후 5분 혹은 10분 동안 5회 반복침강시켜 길이 분류한 섬유시료 4종류에 대한 전자주사현미경 관찰결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 각 시편에 대해 이와같은 SEM 사진을 6~9장씩 촬영하여 300여개의 섬유에 대한 길이를 측정, 분석한 결과가 Fig. 7과 Fig. 8에 그려져 있다. 각 섬유시료의 섬유길이 관찰결과, Table 2에 나타난 대로, 분류된 섬유의 평균길이는 체망의 체눈크기에 비례적으로 변화하지 않았다. 즉 체눈 크기가 150 μm 에서 300 μm 로 2배 커지는 경우에, Table 2에 나타나 있듯이, 섬유의 산술평균길이는 86 μm 에서 98 μm 혹은 108 μm 에서 120 μm 로 단지 12 μm 정도 길어지는 것으로 나타났다. 또한, 본 실험에서 사용한 체망의 체눈크기 변화에 의해서 섬유길이분포가 거의 변화되지 않는것은 Fig. 7에 나타난

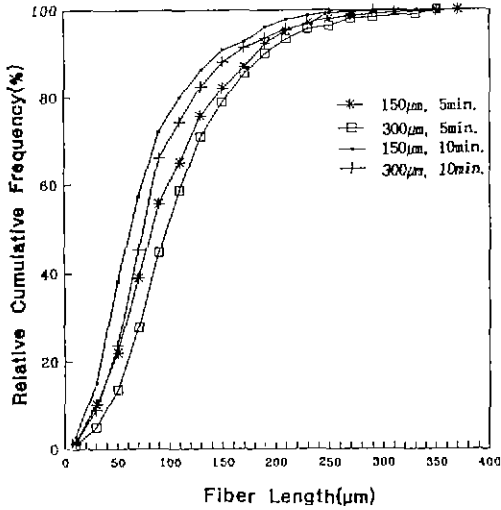


Fig. 7. Relative cumulative frequency versus fiber length.

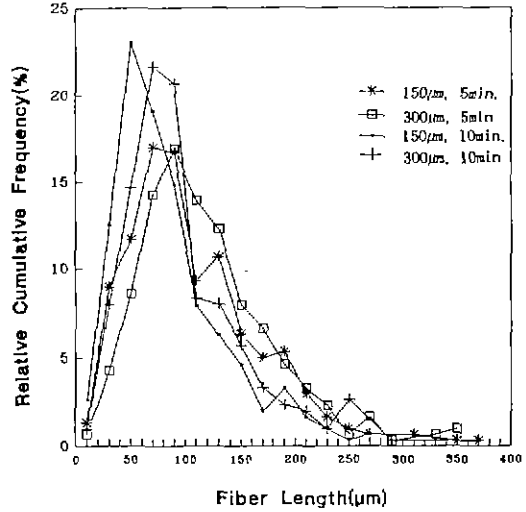


Fig. 8. Relative frequency versus fiber length.

곡선의 기울기 혹은 Fig. 8의 섬유길이에 대한 적은선그라프로부터 쉽게 알 수 있다. 침강분류된 섬유의 길이 분석으로부터 체눈크기에 대한 섬유길이의 영향을 요약 하면, 체망의 체눈크기가 150 µm에서 300 µm로 100% 커지는 경우에 단지 평균섬유길이가 10~14% 정도 길어질 뿐 전체적인 길이 분포 곡선의 형태는 변하지 않는다. 이와같은 실험결과는 다음과 같이 설명될 수 있다.

bulk섬유를 체망위에서 갈아 분쇄하는 경우에 딱딱한 (rigid) 알루미늄산화물의 절단은 섬유와 체망을 구성하는 금속망과의 교차점에서, 혹은 체망위에 쌓인 섬유끼리의 교차점에서 일어날 것으로 예상된다. 본 실험에서 얻어진 길이분석결과에 의하면 금속망과 섬유와의 교차에 의한 절단보다는 섬유끼리에 의한 절단이 일어나는 경우가 더 커서, 침강분류된 섬유길이의 평균값이 체망의 체눈크기에 단순히 비례하지 않는 것으로 생각된다. 한편, 평균섬유길이가 체눈크기가 커짐에 따라 10% 길어진 것은 체눈을 이루는 금속망의 체눈크기가 클수록 섬유가 절단되는 bending 길이가 길어지기 때문으로 사료된다.

3.2.2. 침강시간의 영향

시료섬유의 SEM 사진에 의한 길이분포 분석결과인 Fig. 7, Fig. 8 그리고 Table 2에 나타나 있다. 침강 시간이 5분에서 10분으로 길어짐에 따라, 150 혹은 300 µm 체눈을 가진 체망에서 분쇄되어 통과된 섬유 모두 평균 섬유길이는 약간 짧아지고, 길이분포는 좁아지며 섬유 길이에 대한 상대빈도의 최대값은 커지는 경향을 보인다. 5분씩 5회 반복 침강시켜 최종적으로 침강분류된 섬유의 양은 출발섬유의 20~25 wt%인 반면 10분씩 5회 반복 침강한 경우에는 40~45 wt%의 수율을 나타내었다. 체눈크기가 150 µm인 체망을 통과한 섬유의 평균길이는 Table 2(SEM 사진에 의한 평균길이 측정결과)에 나타내 었듯이 침강시간을 5분에서 10분으로 증가시킨 결과, 108 µm에서 86 µm로, 300 µm 체눈크기를 갖는 체망을 통과한 섬유는 120 µm에서 98 µm로 감소하여, 각 체망을 통과한 섬유의 평균길이는 각각 20%, 18% 감소한 것으로 나타났다. 이것은 침강시간이 5분에서 10분으로 길어지므로써 5분 침강에서 얻어진 섬유의 평균길이보다 길이가 짧은 섬유가 10분 침강실험에서 더 많이 침강된 것

Table 2. Experimental Results Obtained by Different Settling Conditions (Length of Fibers was Measured by Means of SEM)

Sieve opening size (µm)	Condition	5 Minutes (5 times)		10 Minutes (5 times)	
		Average length	Standard deviation	Average length	Standard deviation
150		108	± 60	86	± 52
300		120	± 61	98	± 55

으로 해석된다.

3.3. 충전부피(Packing Volume) 측정에 의한 섬유들의 평균길이 계산

본 실험에서 체눈크기가 150 μm 과 300 μm 인 체망을 통과시켜 5분 간격으로 5회 침강분류한 섬유를 공기중에서 충전시켰을 경우 충전부피는 각각 2.7 cm^3 와 3.7 cm^3 였으며, 각각의 섬유무게는 1.22 g과 1.70 g이었다. 그리고 이에따른 상대겉보기(충진)부피 값은 각각 7.5와 7.4로 계산되었다. 이때 Fig. 4의 충전곡선에 의해 섬유들의 장단경비(aspect ratio, L/D)를 구할 수 있는데, 본 실험에서 사용된 섬유의 평균직름이 3 μm 이므로, 체눈크기가 150 μm 인 체망을 통과시킨 섬유의 경우 장단경비(L/D)는 대략 38로 평균길이(L)가 114 μm 임을 알 수 있으며, 체눈크기가 300 μm 인 체망을 통과한 섬유의 경우에도 장단경비(L/D)가 대략 38로 평균길이(L)가 114 μm 임을 알 수 있다. 본 실험에서는 충전부피 측정시의 오차를 생각하여, 섬유를 충전시킬 때 낙하된 섬유의 표면이 최초로 평평해질 때부터 섬유가 더이상 충전되지 않을 때까지의 충전부피를 각각 기록하고 충전부피가 달라질 때마다의 상대겉보기(충진)부피를 계산하여 그때마다의 분류된 섬유의 평균길이를 Fig. 4로부터 구한 다음, 이를 다시 산술평균에 의해 최종적인 섬유의 평균길이를 계산하였다. 10분간격으로 5회 침강분류한 섬유 역시 위와 같은 방법으로써 섬유의 평균길이를 구하였으며, 4회의 충전부피 측정에 의해 계산된 섬유의 평균길이를 Table 3에 나타내었다.

충진부피 측정결과에 의하면 체눈크기가 150 μm 인 체망을 통과시켜 5분 5회 침강분류된 섬유의 평균길이는 10분 5회 침강분류된 섬유의 평균길이와 동일한 것으로 나타났다. 체눈크기가 300 μm 인 체망을 통과시킨 섬유의 경우에는 10분 5회 침강분류된 섬유의 평균길이보다 5분 5회 침강분류된 섬유의 평균길이보다 약 10% 정도 길게 나타났으며 그 차이는 실험오차 범위에 근접하고 있음을 알 수 있다.

3.4. 평균길이 측정방법에 따른 고찰

Table 2의 전자주사현미경 관찰결과와 Table 3의 충전부피 측정에 의한 평균길이 계산결과를 비교해보면, 5분 5회 침강분류된 섬유의 평균길이는 전자주사현미경 관찰결과와 충전부피 측정결과가 서로 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 10분 5회 침강분류된 섬유의 경우에는 전자주사현미경 관찰에 의한 섬유의 평균길이와 충전부피 측정결과에 비해 짧게 나타났다. 이것은 침강시간이 5분에서 10분으로 길어짐에 따라 상대적으로 평균길이보다 짧은 섬유가 더 많이 침강되는 것을 의미하며, 또한 평균길이보다 짧은 섬유보다는 긴 섬유가 충전부피를 좌우하는 것으로도 해석할 수 있다. 즉 섬유의 평균길이와 길수록 섬유의 덩어리화가 심화되며, 이러한 덩어리가 충전부피값을 결정시켜, 평균길이보다도 매우 짧은 섬유는 덩어리가 이루는 기공사이에 자리잡아 전체적인 섬유의 충전부피 값에는 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다. 즉, 충전부피 측정결과는 평균섬유 길이보다 긴 섬유의 길이를 대표한다고 생각할 수 있다. 한편, 침강시간이 5분에서 10분으로 길어짐에 따라 5분 5회 침강분류된 섬유의 평균길이보다도 짧은 섬유가 더 많이 포함된 섬유의 평균길이를 전자주사현미경 관찰결과는 나타내는 것으로 사료된다. 이런 경향은 전자주사현미경 관찰결과인 Fig. 8의 섬유길이와 빈도곡선에서 볼 수 있듯이 최대빈도 값이 왼쪽으로 치우쳐져 있는데, 이것은 평균섬유 길이보다도 짧은 섬유의 빈도수가 평균길이보다 긴 섬유의 빈도보다 크다는 것을 의미한다.

3.5. 구형입자와 섬유의 자유침강속도 비교

Stoke의 침강이론에 의한 구형입자의 침강속도식(v)을 Fig. 9에 나타내었다. 여기에서, ρ' 는 입자의 밀도, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, η 는 유체의 점도, 그리고 r 은 입자의 반지름을 의미한다. 이 식을 통해 구형입자의 침강속도(v)는 입자의 크기에 제곱으로 비례함을 알 수 있다. 예로, 구형입자의 크기비율이 1 : 10인 경우 이때의 속도는 1 : 100으로 크게 변화한다.

Table 3. Experimental Results Obtained by Different Settling Conditions (Length of Fibers was Calculated from Packing Volume of Fibers)

Condition	5 Minutes (5 times)		10 Minutes (5 times)	
	Average length	Standard deviation	Average length	Standard deviation
Sieve opening size				
150	107	± 8	107	± 8
300	110	± 5	125	± 11

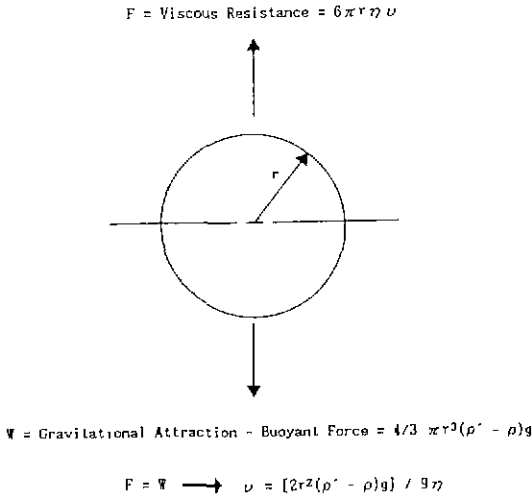
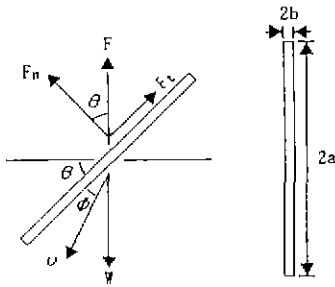


Fig. 9. Forces on a spherical body in free settling condition.



- when $a \gg b$
- 1) $F_v = C_v \eta v \cdot b$
 - 2) $F_n = C_n \eta v \cdot ab$
 - 3) $C_v = [4\pi a^2/b] / \{\ln(2a/b) - 0.5\}$
 - 4) $C_n = 2C_v$
 - 5) $F_n/F_v = \cot \theta = 2 \tan \phi$
 - 6) $F_n \cos \theta + F_v \sin \theta = W = \pi b^2 a (\rho' - \rho) g$
 - 7) $v_v = v \cos \phi$ $v_n = v \sin \phi$
 - 8) $v = [\pi b^2 a (\rho' - \rho) g] / [C_v \eta b (2 \sin \phi \sin \theta + \cos \phi \sin \theta)]$

Fig. 10. Forces on a cylindrical body in creeping flow.

한편 Fig. 10은 섬유의 침강속도식(v)을 나타낸 것이다. 여기에서, 2a는 섬유의 길이, 2b는 섬유의 지름, F는 유체의 점성저항, W는 중력에서 부력을 뺀 값, F_v는 섬유의 길이방향과 평행방향으로 작용하는 힘, 그리고 F_n은 섬유의 길이방향과 수직으로 작용하는 힘을 의미한다. 주어진 θ값에 따라 φ가 결정되며, 이에 따라 섬유는 v방향으로 침강하며 이식은 a≫b인 경우에 사용된다⁵⁾.

Fig. 11은 Fig. 9와 Fig. 10을 근거로 자유침강에 의한 구형입자와 섬유의 침강속도 비교를 나타낸 그래프이다. 구형입자의 경우 입자의 크기비율이 1:10일 때 침강

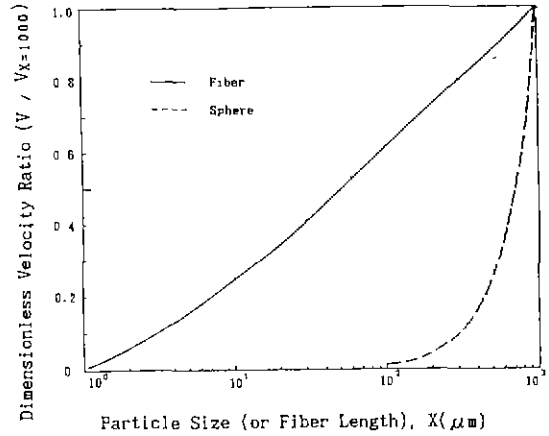


Fig. 11. Comparison of the settling velocity ratio of fiber with the one of sphere.

속도비율은 대략 1:100으로 급격하게 변화하지만, 섬유의 경우에는 섬유의 길이가 각각 10³ μm과 10 μm인 경우에 침강속도비율은 5배 이내로 매우 완만하게 변화한다. 따라서 침강에 의한 섬유의 길이분류는 구형의 입자에 비해서 비효율적인 것을 알 수 있다.

4. 결 론

1. 전자주사현미경에 의한 섬유의 길이 관찰결과, 침강시간이 길어짐에 따라서 섬유의 평균길이보다 긴 섬유가 침강되는 양 보다는 짧은 섬유가 침강되는 양이 더 많다. 섬유의 충전부피 측정으로 계산된 섬유의 평균길이는 섬유의 평균길이보다 짧은 섬유보다는 긴 섬유를 대표하고 있는 것으로 사료되며, 따라서 섬유의 충전부피 값으로부터 예측된 섬유의 평균길이는 전자주사현미경 관찰에 의해 계산된 값보다 길게 나타나는 경향이 있다.

2. 체망의 체눈크기가 150 μm에서 300 μm으로 2배 증가할 때 상대충진부피 측정에 의한 세라믹 섬유의 평균길이 증가는 10% 미만으로서 이 결과는 섬유의 굽힘(bending)에 의한 섬유의 분쇄기구로 설명될 수 있다. 즉 체망과 교차된 섬유가 굽힘에 의해 섬유절단이 일어날 확률보다는 서로 교차된 섬유간에 일어나는 섬유의 굽힘에 의한 섬유절단 효과가 더 지배적이기 때문에 본 실험조건에서 침강분류된 섬유의 평균길이는 체눈크기에 비례하지 않는 것으로 나타났다.

3. 침강에 의한 세라믹 섬유의 길이분류는 자유침강 이론에 의하면 구형의 입자에 비해서 비효율적이나, 채

망을 통한 섬유유 분쇄와 침강을 이용한 단섬유유 제거를 통해 일정한 평균길이를 갖는 세라믹 섬유유 획득이 가능하였다. 따라서 실험실에서 일정한 평균길이를 갖는 소량의 세라믹 섬유유를 획득하기 위해서는 침강에 의한 섬유분류 방법을 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 섬유유 충전부피로부터 계산된 평균 섬유유 길이와 전자주사현미경 사진에 의한 각 섬유유 길이측정으로 부터 얻어진 섬유유 산술평균길이 값을 비교한 결과, 섬유유 충전부피로부터 해당섬유유 평균길이를 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 '92년도 한국과학재단 연구비 지원으로 수

행되었습니다.

REFERENCES

1. W.L. Bakger and J.T. Bancher, Introduction to Chemical Engineering, pp. 637-638, McGraw-Hill, Tokyo (1955).
2. "The Rotary Fiber Classifier," Composites Vol. 1-2, 114-117 (1969).
3. J.V. Milewski, "Efficient Use Of Whiskers in the Reinforcement of Ceramics," *Ad. Ceram. Mater.*, **1**(1), 36-41 (1986).
4. M.D. Sacks et al., "Suspension Processing of Al_2O_3/SiO_2 Whisker Composite," *J. Am. Ceram. Soc.*, **71**(5), 370-379 (1988).
5. F.M. White, "Viscous Fluid Flow," 2nd Ed. 178-181, McGraw Hill, New York (1991).