단섬유 예비성형체의 섬유배향에 대한 2차원 수치모사

정성욱*· 남현욱*· 정창규*· 한경섭**

2-D Simulation of Fiber Orientation in Short Fiber Preform

S.W. Jung, H.W. Nam, C.G. Jung and K.S. Han

Key Words: 단섬유예비성형체, 진공압추출법, 섬유의 배향, 2차원 수치모사

Abstract

본 연구에서는 진공압추출법에 의해 제조되는 알루미나(Al_2O_3) 단섬유예비성형체의 제조공정시 발생하는 섬유들의 배향분포의 특징을 2차원 수치모사를 통해 밝혔다. 수치해석은 섬유의 배향분포를 2차원으로 가정한 후 제조공정시 섬유들이 적층되는 현상을 섬유의 낙하, 회전, 미끄러짐, 이동의 단계의 나누어 모델링하였다. 해석결과 섬유의 배향과 부피분율은 섬유의 종횡비(길이/지름)에 의해 크게 영향을 받으며, 배향 분포는 정규분포와 유사한 것으로 밝혀졌다.

1. 서론

단섬유 보강 복합재료의 제조에는 보강섬유 예비성형체를 사용하는 방법과 이를 사용하지 않는 방법으로 나뉘어진다. 전자의 방법에는 예비성형체에 모재를 침투시키는 가압주조법, 모재침투법(RTM) 등이 있으며, 후자의 방법에는 사출성형, 컴포캐스팅 등이 있다.

이러한 단섬유 보강 복합재료에서 보강섬유의 배향, 길이, 부피분율 등은 복합재료의 특성을 결정하는 주요 인자들이므로 최근 해석기술의 발달과 더불어 섬유의 배향의 측정과 이에 따른 물성해석에 대한 연구가 증가되고 있다[1,2].

보강 섬유의 배향과 길이가 특히 중요하게 연구되는 분야는 사출성형 등의 예비성형체 없이 제조되는 방법인데 이러한 제조공정 시 보강섬유들은 많은 파손을 당하며 배향은 비균일한 분포(nonrandom)로 배열되기 때문이다[3]. 이 경우 해석방법은 섬유/모재 용탕이 몰드에 충전되는 유동의 방향과 섬유의 방향이 같다는 가정 하에 수치해석적인 방법으로 배향을 예측하기도 한다[4-5].

예비성형체를 사용해서 제조되는 복합재료에서는 이러한 섬유배향이나 미세구조에 대한 연구가 상대적으로 활발하지 않다[6]. 이는 본 제조법에 의해 만들어진 예비성형체는 모재의 침투 이후에도 그 형상을 유지하고 있으므로 섬유들의 파손이 적고 섬유들의 배향에 있어서 랜덤 혹은 가로등방성으로 배향으로 간주할 수 있기 때문이다.

그러나 예비성형체로 제조되는 단섬유 복합재료의 수요증가를 감안할 때[7] 예비성형체 제조공정 자체의 연구의 필요성이 증대되고 있으며, 본 공정을 수치모사를 통해 단섬유 복합재료의 강도, 파괴인성, 제조 특성 등에 대한 보다 정확한 이해가 가능하다.

본 연구는 대부분의 단섬유 보강 예비성형체 제조공정에서 일어나는 섬유의 배향 및 적층 특성을 해석하는 2차원 수치해석 방법을 제안하고 특성을 분석한다. 실제의 경우 3차원에서 제조공정이 진행되므로 3차원 해석이 필요하나 이를 위한 기초 단계로 본 연구에서는 2차원 해석을 수행하였으며, 이를 통해서 보강섬유의 배향과 부피분율의 특성을 살펴보았다.

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원
** 포항공과대학교 기계공학과

2. 예비성형체의 제조공정

본 연구의 대상인 예비성형체는 진공압 추출법에 의해 제조된다. Fig.1은 진공압 추출법의 간략도로서 단섬유들이 물에 골고루 섞이게 혼합한 후에 추출기에 넣고 진공펌프를 이용하여 아랫쪽 방향으로 물을 뽑아낸다. 물 속에서 골고루 분산된 섬유들은 바닥의 망에 걸러진다. 걸러진 섬유들은 펀치에 의해 -z축 방향으로 진공압을 받게 되며, 펀치에 추가의 압력을 가하여 예비성형체의 부피분율을 조절한다.

펀치의 압력에 따른 섬유의 부피분율은 제한된 범위에서 조절이 가능한데 이는 압력이 지나치게 클 경우 섬유의 부피분율은 증가되나 섬유들이 파손되기 때문이다[8]. 펀치에 압력을 일정하게 가하거나 또는 가하지 않을 경우는, 경험적으로 섬유의 길이/지름의 비(aspect ratio)가 클 경우에 부피분율이 낮고 작을 경우 높은 것으로 나타난다.

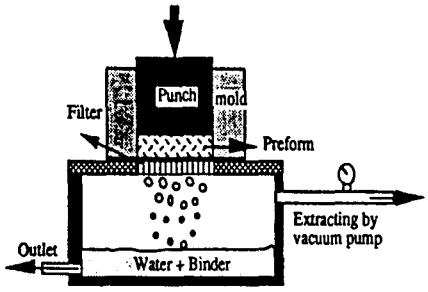

Fig.1. Schematic diagram of preform fabriaction

섬유의 종횡비가 1에 가까운 입자형 복합재료는 50%정도의 부피분율에서, 본 연구실에서 제조해 온 Al_2O_3(L=150 μm, D=3 μm)는 15%정도의 부피분율에서 제조된다. 펀치의 압력이 가하지 않은 상태에서도 이러한 경향들이 반영되므로 본 연구는 2차원에서 이러한 분포의 특성을 모의 해석하는 전산 프로그램을 개발한다.

3. 해석 방법

해석 알고리듬은 섬유의 생성에 이는 낙하, 회전, 미끄러짐, 이동의 단계로 이루어져 있으며 그림과 같다.

섬유의 생성; 보강섬유가 x축상의 랜덤의 위치에서 -90도와 90 사이의 랜덤의 배향을 가지고 바닥에서 충분히 떨어진 y지점에서 생성한다. 이 때 생성변수는 섬유의 종횡비, x 위치, 배향이며, 이러한 정보는 사각형 보강섬유 요소의 네 꼭지점의 위치를 결정한다. 섬유의 종횡비는 실제에 있어서 평균적인 값이나 본 연구에서는 종횡비를 5, 10, 15, 20, 25와 같이 일정하게 하고 해석한다.

낙하; 생성된 보강섬유는 이웃한 섬유와 만날 때까지 초기의 배향을 유지하면서 바닥 방향으로 떨어진다. 이 과정은 섬유가 물속에서 침전하는 과정을 모사한 것으로 섬유가 이웃한 섬유와 한 점 이상에서 만날 때까지 진행된다. 섬유들의 교차 유무는 생성된 섬유 요소의 네 꼭지점을 잇는 직선의 연장선과 침전된 요소들에서 꼭지점을 있는 연장선들의 교차점의 위치를 통해 파악한다.

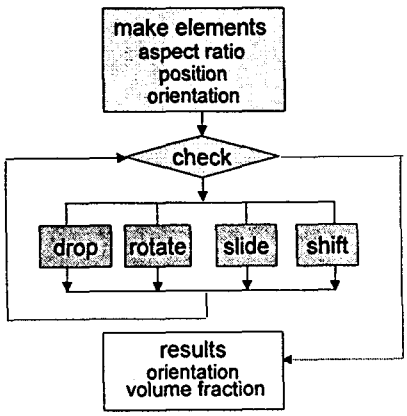

Fig.2. Algorithm of 2D simulation

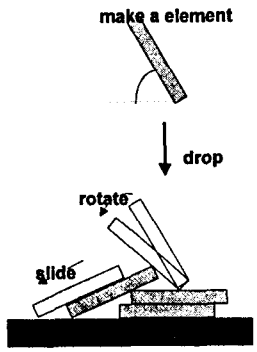

Fig.3. Schematic diagram fiber packing procedure

회전, 미끄러짐; 교차된 섬유는 회전 또는 미끄러진다. 교차점이 한 지점일 때는 회전하며, 한 지점 이상일 경우는 조건에 따라 회전, 미끄러짐, 또는 이동을 한다. 섬유가 회전하는 조건은 섬유의 x축 무게중심이 교차점들의 밖에 있을 때이며, 미끄러지는 무게중심이 교차점 안에 있고 섬유의 기울기가 20도 이상일 경우이다.

이동; 회전중심이 무게중심보다 위쪽에 있으면서 90도 정도로 매달린 섬유는 회전 방향이 +와 -가 반복되면서 매달려 있다. 이러한 상황을 피하기 위해 이런 경우 무게중심의 x 방향으로 섬유를 이동시켜 준다. 이 과정 후에는 섬유가 다시 조건에 따라 낙하, 회전, 미끄러짐을 진행시킨다.

4. 결과 및 고찰

2차원 수치해석 결과의 예는 Fig.4와 같다. 그림은 종횡비 5인 섬유에서 섬유요소 80개에 대한 해석으로 섬유들이 서로 포개지지 않고 있으므로 해석 알로리듬을 무리없이 수행했다고 할 수 있다.

그러나 알고리듬에는 섬유배치의 구조적 안정성에 대한 정적 평형해석을 수행하지 않았으므로 이전에 한 번 쌓인 섬유들은 이후에 쌓이는 섬유에 의해 재비치가 되지 않는다. 이러한 평형 해석이 추가될 경우 섬유의 패킹밀도는 더욱 높아지며 아울러 제조시 외부에서 가해지는 압력을 고려할 수 있으나 이를 위해서는 힘과 변위를 모두 고려해야 하므로 본 연구와 같이 충분히 많은 개수의 섬유들로 수행되는 통계적 해석에는 부적합하다.

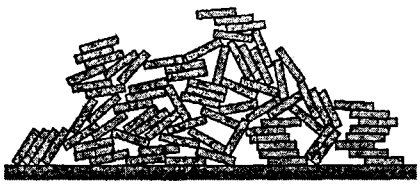

Fig.4. An example of 2D packing structure after a simulation (the number of fibers = 80, L/D = 5)

Fig.5는 섬유의 분포를 나타낸다. 해석에 사용된 섬유들은 바닥부분과 좌·우 가장자리 부위를 제외한 4000개에서 5000개 사이의 섬유들로 해석을 수행하였다. 섬유의 초기 생성위치는 -10L<x<10L, y=100L에서, -90< angle<90 배향으로 생성되어 y=0지점으로 낙하하면서 적층되었다. 이러한 분포곡선은 대체로 정규분포곡선을 따르고 있음을 확인할 수 있다.

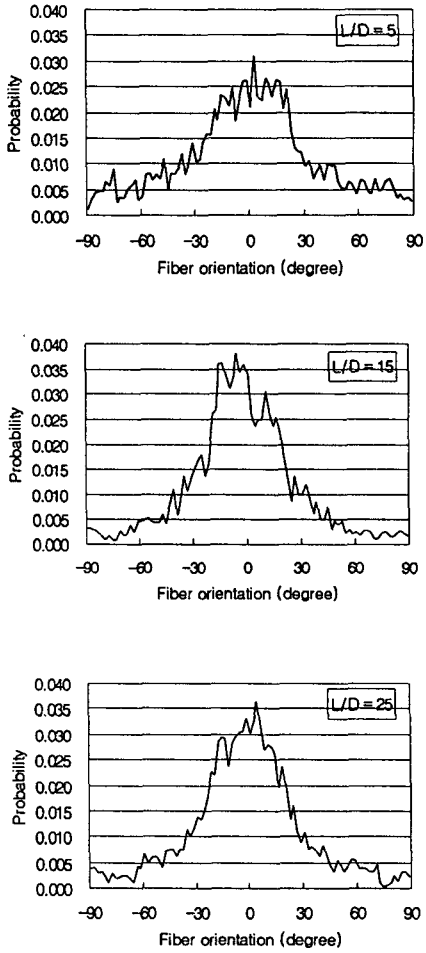

Fig.5. Fiber orientation distribution (a) L/D=5, (b) L/D=15, (c) L/D=25

이러한 정규분포의 특징은 참고문헌[9]의 가정을 뒷받침한다. 참고문헌은 섬유들의 배향이 3차원 공간에서 z축 방향으로 랜덤이며 xy 평면방향으로 대칭인 정규분포를 가정하고 분포에 따른 탄성계수 해석을 수행한 것으로 이 방법을 적용하면 본 연구에서 얻어지는 섬유의 배향 분포함수에 따른 탄성계수해석이 가능하다.

Fig.5(a)-(c)는 종횡비 5, 15, 25에 대한 해석결과

로써 이들 분포를 서로 비교하면 종횡비가 5인 섬유는 분포가 15, 25보다 균일하며 15, 25는 대체로 유사한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 물리적으로 섬유의 종횡비=1인 입자형에 가까워질수록 섬유들이 분포가 균일함을 생각할 때 타당한 결과임을 알 수 있다. 섬유의 종횡비가 15이상의 섬유에서는 배향 분포 곡선들이 유사하다. 이 결과는 섬유의 배향이 일정한 종횡비 이상에서는 자연상태로 즉 외부에 압력없이 적층되었을 때 종횡비에 관계없이 서로 비슷한 배향을 가지는 것을 의미한다.

Fib.6에서와 같이 섬유의 종횡비가 증가할수록 보강섬유의 부피분율은 감소한다. 섬유의 부피분율의 감소와 Fig.5(b), (C)와 같이배향분포곡선이 종횡비 15이상에서 서로 유사해 지는 것은 종횡비가 커질수록 섬유들의 적층구조가 정적으로 불안한 상태로 배열됨을 의미한다. 따라서 종횡비가 큰 섬유는 평형상태로 되기 위해서 제조시 적은 펀치의 압력으로도 부피분율이 큰 폭으로 증가되는 이유을 설명한다.

이상의 해석결과는 실제 상황에서 발생하는 축대칭 3차원적 배향분포를 대칭축과 대칭축과 수직인 축이 이루는 2차원적 공간으로 가정하고 이를 모사하는 알고리즘을 제시하였다. 2차원 해석은 사각형 섬유요소의 네 꼭지점과 점을 위치를 기억시키고 이를 기초로 한 요소내의 점을 잇는 직선들과 다른 요소의 직선의 연장선을 기준으로 해석을 진행시켰다. 이러한 2차원 해석과 유사하게 3차원 해석에 있어서도 육면체의 점들을 기초로 하여, 모서리를 잇는 면을 생성하면 해석이 가능하다.

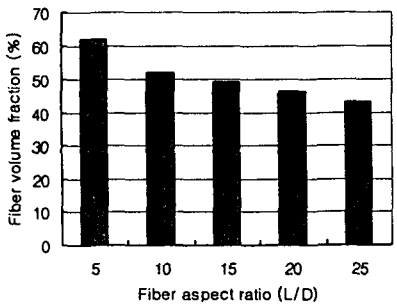

Fig.6. Fiber volume fraction for various aspect ratio

향후 3차원 미세구조 모델링이 수행되면 섬유와 입자의 보강비에 따른 부피분율, 섬유의 종횡비에 따른 부피분률, 배향특성, 또한 이와 관련한 탄성계수 및 강도해석에 큰 도움이 되리라 생각된다.

5. 결론

이상의 단섬유 보강 예비성형체의 2차원 모델링을 통해서 얻어지는 결론은 다음과 같다.

1. 섬유의 길이/지름의 비는 보강섬유의 부피분율과 배향을 결정하는 인자이며, 길이/지름의 비가 작아질수록 보강섬유의 부피분율은 증가하며 섬유의 배향은 균일해져 간다.
2. 섬유의 배향 분포는 평균이 0도 방향인 정규분포와 유사하다.

6. 참고문헌

[1]Y.T.Zhu, W.R.Blumenthal and T.C.Lowe, J. of Composite Materials., Vol.31, No.13, pp. 1287-1301, 1997

[2]L.M.Gonzales, F.L.Cumbera, Acta metal- lugica et materialia, Vol.42, No.3, pp.689-694, 1994

[3]J.S.Sirkids, A.Cheng and A.Dasgupta, J. of Composite Materials., Vol.28, No.9, pp. 784-799, 1994.

[4] M.Gupta and K.K.Wang, Polymer Composite., Vol.14, pp.367-382, 1993

[5]H.Henry De Frahan, V.Verleye, F.Dupret and M.J.Crochet, Polymer Engineering and Science, Vol.32, pp.254-256, 1992.

[6]Jiang Xiaoyu, Gao Qing and Kang Guozheng, Composites Science and Techno- logy, Vol.58, 1998, PP.1685-1695

[7]Y.T.Zhu, G.Zong, A.Manthiram and Z. Eliezer, J.Materials Science, 29:6281, 1994

[8]G.Durrant & V.D.Scott, Composite Science and Technology, Vol.49, pp.153-164, 1993.

[9]정성욱, 김상엽, 한경섭, 한국복합재료학회지, Vol.11, No.4, pp.21-31, 1998