

# 능동 섬유 복합재의 직접적 수치 모사

백승훈\* · 김승조\*\*

## Direct Numerical Simulation of Active Fiber Composite

Seung Hoon Paik, Seung Jo Kim

**Key Words:** Active Fiber Composite, Direct Numerical Simulation, Parallel Computing

### Abstract

Stress and deflection of Active Fiber Composite(AFC) embedded and/or attached composite structures are numerically investigated at the constituent level by the Direct Numerical Simulation(DNS). The DNS approach which models and simulates the fiber and matrix directly using 3D finite elements need to be solved by efficient way. To handle this large scale problem, parallel program for solving piezoelectric behavior was developed and run on the parallel computing environment. Also, the stress result from DNS approach is compared with that from uniform field model.

### 1. 서론

능동 섬유 복합재료는 일반적인 유리 섬유 강화 복합재료와 마찬가지로, PZT(Lead zirconate titanate)와 같은 압전 재료를 섬유 모양으로 만든 후 폴리머 기지(matrix)에 함침 시킨 복합재료(Fig.1)로, 일반적인 압전 재료에 비해 기계-전기 연성 효과가 좋으며 강도가 우수하다. 또한 곡률형상의 구조물에 부착이 용이하고, 이방성 구동이 가능하며, 회전 모멘트를 발생시킬 수 있는 장점이 있다.[1,2]

본 논문에서는 능동 섬유와 기지를 3차원 유한요소로 직접 모델링 하고 해석하는 직접적 수치 모사기법(Direct Numerical Simulation)을 통하여 섬유 강화 복합재료에 삽입 혹은 부착된 능동 섬유

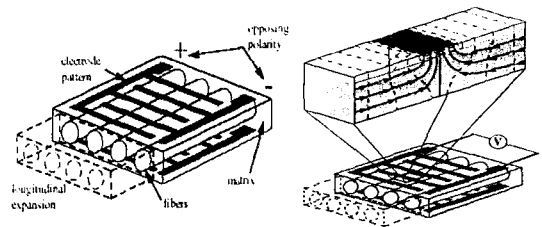


Fig. 1. Active fiber composite

유 복합재 구조물에 대해 응력 및 비틀림 거동을 모사 하였다. 미시적 관점에서 수치모사를 위해 많은 방법들이 제안[4,5] 되었으나, 주로 경계 및 하중조건 등이 대칭적이거나 단위 모델이 반복적으로 배치되는 경우에만 적용 가능한 경우이다. 이에 비해 직접적 수치 모사 기법은 반복적이지 않고, 균일하지 않는 조건에도 일반적으로 적용할 수 있는 장점이 있다.[6,7] 반면, 직접적 수치 모사 기법을 이용하면, 많은 수의 유한요소와 자유도를 갖는 문제를 효과적으로 해결해야 하는데, 이를 위해 해석 코드를 병렬화 하고, 병렬 컴퓨팅 환경에서 계산을 수행하였다. 또한 uniform

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

field 모델을 이용한 방법과 직접적 수치모사를 이용한 방법에서의 응력분포를 비교하였다.

## 2. 유한요소 정식화

### 2.1 유한요소 정식화

선형 탄성 문제에 대해 가상일에 대한 원리를 적용하고, 유한요소 정식화 과정을 수행한 후, 작동기로서의 압전 재료의 구성방정식을 도입하면 다음의 식 (1), (2)와 같다.

$$\left( \int B^T C B dV \right) U = \int N^T p dS + \int N^T f dV \quad (1)$$

$$\sigma = C(\epsilon - dE) \quad (2)$$

여기서,  $E$ 는 전기장 벡터이고,  $d$ 는 압전 변형률 텐서이다.

### 2.2 코드 병렬화 및 컴퓨팅 환경

압전 현상 문제를 수치 모사하는 프로그램을 병렬 다중 프론트 기법을 이용하여 병렬화 하였다. 사용된 컴퓨팅 환경은 본 연구실에서 보유하고 있는 360개의 인텔 제온 (2.2, 2.4, 2.8Ghz) 프로세서로 구성된 시스템이다. 본 연구에서는 64개의 프로세서를 사용하였다.

병렬화된 프로그램의 검증은 위해 단위 모델에 대해 일정한 전기장을 가했을 때, 변위를 상용코드인 HKS/ABAQUS와 비교하였다. 각 노드에서 변위 차는 약 0.05%로 나타났다. 4장에서도 다른 모델에 대해 비틀림 및 인장 변위를 비교하였는데, 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.

## 3. 능동 섬유 복합재의 응력해석

### 3.1 유한요소 모델링

능동섬유 복합재의 가장 대표적인 적용사례는 Fig.2, 3에서 보는 바와 같이 블레이드 표면에 능동섬유 복합재와 에폭시-글래스 복합재 등을 함께 적용하여, 헬리콥터 로우터 블레이드의 비틀림 각도를 제어하기 위해 사용한 경우[3]인데 이러한 복합재 구조물에서 전기장이 가해졌을 때의 응력 분포를 살펴보았다. Fig.4~6은 전체 및 확대된 형상이다.



Fig. 2. AFC application

Fig.3. magnified sec.

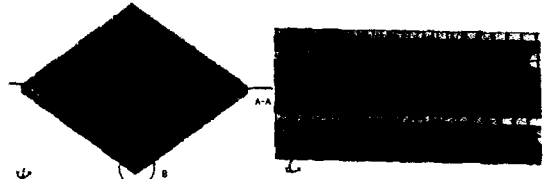


Fig. 4. overall shape

Fig. 5. magnified sec.



Fig. 6. magnified view of FE model

능동섬유 복합재는 전기장을 인가하는 방법으로 IDE (Inter digitated electrode) 방식을 사용한다. IDE 패턴을 모사하기 위해, Fig. 7과 같이 능동섬유에서 전기장이 작용하는 부위와 섬유방향으로 변형을 일으키지 않는 전극(electrode) 아래 부분을 분리하여 모델링 하였다. 8절점 3차원 유한요소를 사용하였고, 전체 자유도는 개수는 약 100만개 이다.

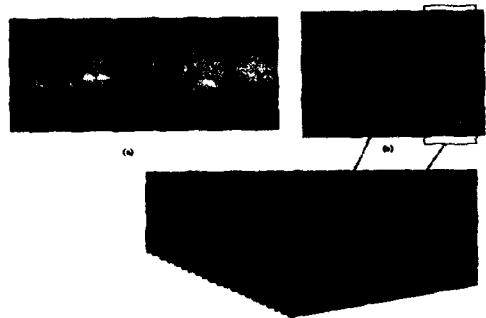


Fig. 7. IDE (Inter Digitated Electrode)

### 3.2. 해석결과

2kV/mm의 전기장을 가했을 때, 각 층별 응력분포를 Fig.9에서 Fig. 16에 나타내었다. 능동 섬유 배향과 IDE의 영향으로 응력이 주기적으로 패턴으로 발생하였으며, 단면 C-C와 E-E 부분에는, 국부적으로 응력이 크게 나타나는 부위가 관찰되었다. Fig. 16에서 알 수 있듯이 능동 섬유를 제외하면 복합재료가 0°/90°로 적층된 단면 E-E에서의 응력분포가 다른 층에 비해 크게 나타나고 있다. Fig. 17에는 프로세서 증가에 따른 병렬 효율을 보이고 있는데, 병렬 효율은 시스템 구성 방식에 따라 더 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

단면	배향
G-G	GFC 45°/-45°
F-F	AFC x방향(0°)
E-E	GFC 0°/90°
D-D	AFC y방향(90°)
C-C	GFC 45°/-45°
B-B	AFC x방향(0°)
A-A	GFC 45°/-45°

T 1. stacking sequence

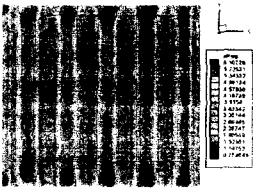


Fig. 9. section A-A

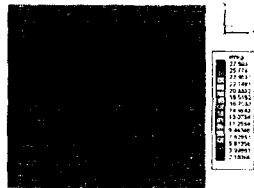


Fig. 10. section B-B

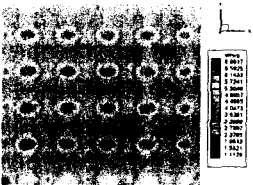


Fig. 11. section C-C

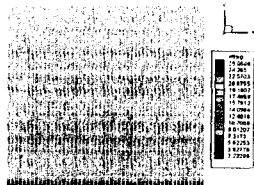


Fig. 12. section D-D

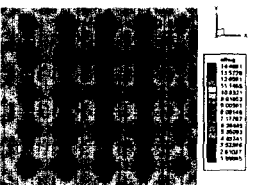


Fig. 13. section E-E



Fig. 14. section F-F

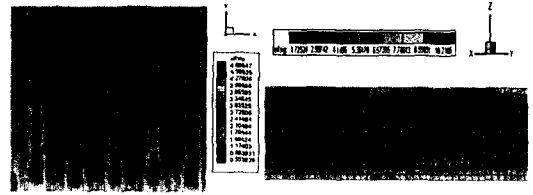


Fig. 15. section G-G Fig.16. stress in sec.

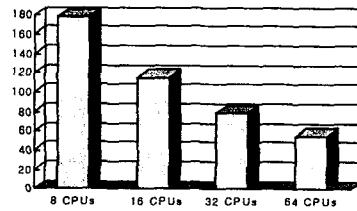


Fig. 17. parallel efficiency

## 4. 비틀림 변형 및 균일장 모델과의 비교

### 4.1 적층각 변화에 따른 비틀림 량

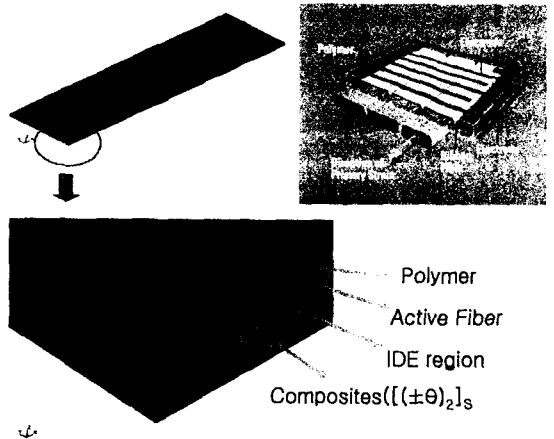


Fig. 19. AFC with square section

사각 단면의 능동 섬유 복합재의 경우에 비틀림 현상을 모사할 수 있는 모델을 Fig. 19, 20과 같이 구성하고, 에폭시-글래스 복합재의 적층각  $[(\pm\theta)_2]_s$  을 0°에서 90°까지 변화시켜 가며, 비틀림 량과 길이방향 인장 량을 계산하였다. 모델의 크기는 10cm x 2.5 cm 이다. 비틀림 량은 30°에서 가장 크게 나왔고, HKS/ABAQUS와 비

교한 결과도 잘 일치하였다.(Fig. 21)

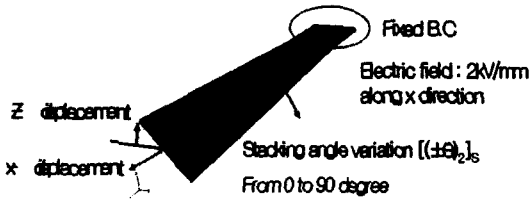


Fig. 20. conditions for twisting behavior

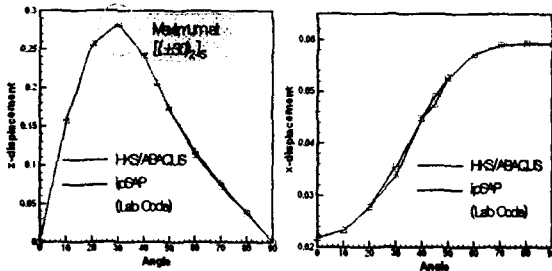


Fig.21. twisting & extension w.r.t angle

#### 4.2 균질화한 모델과의 비교

능동섬유 복합재료에 대한 직접적 수치모사 기법과 균일 장(uniform field) 모델과의 용력차이를 비교하여 보았다. 균일 장 모델에서 등가의 파라미터를 구하는 방법들이 있지만[8], 본 논문에서는 능동섬유 복합재의 기계적 등가 물성치는 혼합법칙을 이용하여 구하였고, 등가 압전 변형을 텐서는 같은 전기장이 인가되었을 때, 직접적 수치 모사 모델과 동일 변형을 발생하는 값을 취하였다. 직접적 수치 모사 모델에서는 능동섬유의 전기장이 걸리는 부분에는 큰 용력이, 폴리머와 IDE 부분에서는 상대적으로 작은 용력이 발생하였으나, 균일 장 모델에서는 능동 섬유 복합재에 평균화된 용력 값이 균일하게 나타나고 있다. 또한, 능동 섬유 복합재와 유리섬유강화 복합재 사이에서는 전단효과에 의한 용력이 동일하게 크게 나타나고 있다.



Fig. 22. uniform field model

Fig. 23. DNS model

#### 4. 결론

직접적 수치 모사 기법을 사용하면 구조물의 거동 및 균질화 (homogenization) 모델에서는 예측할 수 없는 국부적인 용력분포를 관찰할 수 있다. 더욱이, unit cell 모델 등에서는 다룰 수 없는 비 균일 (non-homogeneous) 경계/하중 조건이나 재료의 반복적 패턴으로 배치되지 않는 조건에서도 미시적 관점에서 거동을 수치모사 할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 BK21 사업과 과기부의 국가지정연구사업(00-N-NL-01-C-026)에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Dieter Sporn and Andreas Schoenecker, "composites with piezoelectric thin fibers-first evidence of piezoelectric behavior", Innovations in Materials Conference, Washington, D.C., July 19-22., 1998
- (2) Dieter Sporn, Winfried Watzka, Andreas Schonecker and Kord Pannkoke, "Smart composites with integrated tiny piezoelectric fibers", ICCM, Vol 10.
- (3) John P. Rodgers and Nesbitt W. Hagood, "Hover Testing of a 1/6th Mach-scale CH-47D Blade with Integral Twist Actuation", 9th ICAST, Cambridge, MA, 1998
- (4) Sun, C.T.and Vaidya, R.S.(1996). Prediction of Composite Properties from a Representative Volume Element, Composite Science and

Technology, 56: 171-170

- (5) Pagano, N.J. and Yuan, F.G.(2000). The Significance of Effective Modulus Theory (Homogenization) in Composite Laminate Mechanics, Composite Science and Technology, 60: 2471-2488
- (6) Seung Jo Kim, Chang Sung Lee and Hea Jin Yeo,"Direct Numerical Simulation of Composite Structures",Journal of Composite Materials, Vol. 36, No. 24, 2002, pp2765-2785
- (7) Seung Jo Kim, Kuk Hyun Ji,"Maerial and Low-Velocity Impact Characterizations of Textile Composite Plates", proceedings of the American Society for Composites 17th Technical Conference.
- (8) Aaron Alton Bent, "Active Fiber Composites for Structureal Actuation", PH.D thesis (MIT),1997