

論文

복합재료 파손 시 발생하는 음향방출의 3차원 유한요소 해석

백승훈*, 박시형*, 김승조***

Three Dimensional FE Analysis of Acoustic Emission of Composite Plate

Seung-Hoon Paik*, Si-Hyong Park*, Seung Jo Kim***

ABSTRACT

In this paper, damage induced acoustic emission in the composite plate is numerically simulated by using the three dimensional finite element method and explicit time integration. Acoustic source is modeled by equivalent volume source. To verify the proposed method, dynamic displacements due to the elastic wave are compared with the experiment when the fiber is broken in the single fiber embedded isotropic plate. For the laminated composite plates, the results are compared between homogenized model and DNS approach which models fibers and matrix separately. To capture high frequencies in the elastic wave, small time step size and a large number of meshes are required. The parallel computing technology is introduced to solve a large scale problem efficiently.

초 록

본 논문에서는 복합재 파손에 의한 음향방출해석을 3차원 유한요소법과 외연시간적분법을 이용하여 구현하였다. 음원모델은 등가체적력 모델을 사용하였다. 계산기법의 타당성을 검증하기 위해 단일 섬유가 내재된 등방성 평판에서 섬유파손 시 발생하는 탄성파에 의한 동적변위를 시험과 비교하였다. 적층 복합재의 경우, 섬유와 기지를 각기 모델링한 방법과 균질화한 모델을 비교하여 차이점을 비교하였다. 음향방출에서 발생하는 고주파 성분을 검출하기 위해 계산시간 스텝이 매우 작아야 하며, 매우 많은 자유도의 모델이 동반되어야 한다. 이러한 대규모 문제를 효과적으로 해결하기 위해 병렬 계산 기법을 도입하였다.

Key Words : 음향방출(Acoustic Emission), 외연적 유한요소법 (Explicit FEM), 병렬계산(Parallel Computing)

1. 서론

센서 기술의 발달로 인해, 복합재 파손 시 발생하는 음향 방출 시그널을 복합재에 부착된 센서를 이용하여 측정 한 후, 주파수 영역으로 변환하여 손상 위치 및 손상 모드를 실시간 모니터링하는 방법이 최근 연구되고 있다[1-3]. 음향 방출 모니터링에 의한 손상 검사방법은 지금까지 주로 실험에 의해 많이 연구 되고 있으며, 수치해석을 이용한 연구 또한 병행하여 진행되고 있다. 특히 복합재료는

충격에 약한 것으로 알려져 있어, 충격 손상에 의한 음향 방출은 매우 중요한 분야로 인식되고 있다. 충격에 의한 손상 및 음향 방출 수치 해석은 일반적으로, 1)충격 및 충격 하중 전달 2) 손상여부판단 3) 파손 음원 발생 4) 응력 파 전달의 4 단계로 분류될 수 있을 것이다.

이 중, 재료의 손상 시 발생하는 음원의 모델(source model) 로는 크랙에 의한 불연속 변위의 방향과 크기로부터 유도된 등가체적력 모델[4]을 많이 사용하고 있고, 본 연구에서도 이 모델을 사용하였다. 등가체적력은 하중의

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원 항공기구조연구실

*** 서울대학교 기계항공공학부 교수, 비행체 특화센터 소장, 교신전자(E-mail:sjkim@snu.ac.kr)

다이폴(dipole) 형태인 모멘트텐서(moment tensor)로 불연속 혹은 크랙의 크기가 파장(wave length) 보다 훨씬 작다는 가정 하에서 유효한 모델이다[5]. 복합재 파손에 의한 음향 방출해석 수치모사는 주로 그린 함수(Green function) 또는 푸리에(Fourier) 변환 기법을 사용하여 왔다[6]. 그러나 향후 충격 및 그에 따른 복합재 파손 및 음향방출을 모두 연동해서 풀기 위해서, 또한 시편형태가 아닌 복잡한 실제 구조물에 적용하기 위해서는 문헌 [8]과 같이 유한 요소법을 이용하는 방안과 더불어 접촉 처리, 파손 판정 등을 효과적으로 처리할 수 있는 방법을 이용해야 한다.

본 연구에서는 음원에서 발생하는 응력과 전달의 해석을 위해, 외연적 시간적분법을 기반으로 하는 3차원 유한 요소법을 사용하여 충격하중 시 파손에 의한 음향방출 수치모사에 대해 적용가능성 및 타당성을 검토해 보고자 한다. 이러한 해석 방법은, 실제 복합재 구조물의 파손위치 탐색 및 주파수 분석에 의한 손상모드 등의 분석에 연계, 응용될 수 있다. 섬유파단 시 매우 높은 주파수의 음향이 방출된다. 짧은 파장(wave length)의 높은 주파수가 음파 전달 속도로 전달되는 과정을 효과적으로 모사하기 위해서는 유한요소의 크기와 적분 시간스텝이 충분히 작아야 한다. 이것은 곧 많은 유한요소 개수 즉, 많은 메모리 요구량과 많은 시간스텝으로 인한 긴 계산시간을 의미한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 해석 코드를 병렬화하여, 방대한 계산량을 효과적으로 처리하였다.

2. 음향방출해석

2.1 음원모델 (Source Modeling)

재료의 파손 시에 발생하는 응력파를 모사할 수 있는 등가의 체적력은 다음과 같다[7].

$$f_i = - \int_V n_l \{ [u_{kl}] c_{klj} \delta_{,j} + [u_{k,j}] c_{ijk} \delta \} dV \quad (1)$$

여기서, n_l 는 불연속면의 노말 벡터, $[u_{kl}]$ 는 변위 불연속, c_{klj} 는 탄성계수, δ 는 dirac delta 이다. 위의 체적력은 한 점에 작용하는 모멘트의 성질을 가지게 되고 텐서 형태로 표현할 수 있다. 모멘트 텐서 M_{ij} 는 다음과 같다.

$$M_{ij} = \int_V n_l [u_k] c_{klj} dV \quad (2)$$

크랙의 크기가 응력파의 최소 파장보다 충분히 작다고 가정하면 위 식은 다음과 같이 형태로 나타낼 수 있다.

$$M_{ij} = c_{ijk} [u_k] A_l \quad (3)$$

여기서 A_l 는 크랙면의 면적이다.

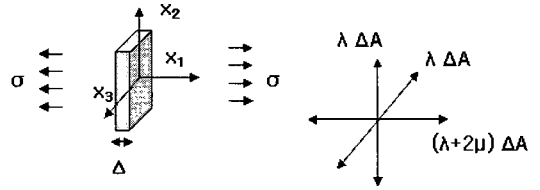


Fig. 1 crack opening and its moment tensor.

예를 들어 fig. 1 과 같은 모드 I 크랙의 경우, 모멘트 텐서는 다음과 같이 표현된다.

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} \lambda+2\mu & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \Delta A \quad (4)$$

여기서, Δ 는 크랙으로 인해 벌어진 크기(crack opening), ΔA 는 크랙의 체적을 의미한다. 음원 체적 ΔA 는 갑자기 발생하지 않으므로, 크랙이 발생하여 진전되는 과정을 고려해야 한다. 특히 음향 방출 해석에 있어서 중요한 성분인 크랙의 진전 속도를 고려하여, M_{ij} 에 $S(t)$ 를 곱하여 시간에 따른 함수로 표현한다.

$$\begin{aligned} S(t) &= \alpha t^\beta & (0 \leq t \leq \tau/2) \\ S(t) &= 1 - \alpha(\tau - t)^\beta & (\tau/2 \leq t \leq \tau) \\ S(t) &= 1 & (\tau \leq t) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $S(t)$ 는 음원함수(Source function), β 는 형상상수(shape constant), τ 는 rise time이다. α 는 β 와 τ 로부터 다음과 같이 정해진다.

$$\alpha = \frac{1}{2(\tau/2)^\beta} \quad (\beta \geq 2) \quad (6)$$

2.2 유한요소 정식화 (FE Formulation)

운동량 보존법칙과, 표면력 경계조건, 내력 연속조건에 테스트 함수를 도입하고, 현재 형상(current configuration)에 대해 적분하면,

$$\begin{aligned} \int_\Omega \delta v_i (\rho \dot{v}_i - \sigma_{ji,j} - \rho b_i) d\Omega + \int_{\Gamma_t} \delta v_i (\sigma_{ij} n_j - \bar{t}_i) d\Gamma \\ + \int_{\Gamma_{\dot{v}}} \delta v_i (\sigma_{ij}^+ - \sigma_{ij}^-) n_j d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, v_i 는 테스트 함수, ρ 는 밀도, \dot{v} 는 가속도, σ_{ij} 는 응력, b_i 는 체적력, t_i 는 트래션, σ_{ij}^+ , σ_{ij}^- 는 접촉점에서의 응력이다. 발산 정리를 적용하고, 약형을 유도하면 다음과 같은 가상 일률의 원리가 유도된다.

$$\int_{\Omega} \frac{\partial(\delta v_i)}{\partial x_j} \sigma_{ji} d\Omega - \int_{\Omega} \delta v_i \rho b_i d\Omega - \sum_{i=1}^3 \int_{\Gamma_i} \delta v_i \bar{t}_i d\Gamma + \int_{\Omega} \delta v_i \rho \dot{v}_i d\Omega = 0 \quad (8)$$

형상함수 N_j 를 도입하여, 각 변수들을 이산화한 후 위 식 (8)에 적용하면,

$$\int_{\Omega} \frac{\partial N_j}{\partial x_j} \sigma_{ji} d\Omega - \int_{\Omega} N_j \rho b_i d\Omega - \sum_{i=1}^3 \int_{\Gamma_i} N_j \bar{t}_i d\Gamma + \int_{\Omega} N_j \rho \dot{v}_i d\Omega = 0 \quad (9)$$

첫 번째 항은 내력벡터(internal force vector), 두 번째와 세 번째 항은 외력벡터 그리고 마지막 항은 관성력벡터(inertial force vector)이다. 이중 내력 벡터는 Fig. 2와 같은 과정을 거쳐 구하게 된다.

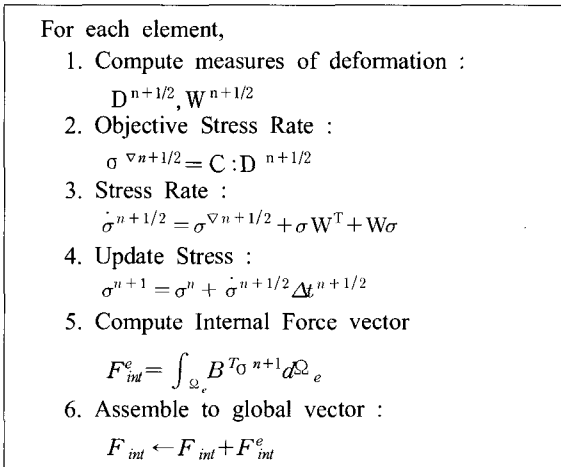


Fig. 2 Flow chart for internal force vector.

이중, 파손이 발생한 요소에 대해서는 위 (3),(4) 단계에서 응력상태를 지정해 줌으로써 응력상태가 결정된다.

2.3 외연적 시간적분법(Explicit Time Integration)

시간 t_n 에서 이산화(semi-discrete)된 운동 방정식은 다

음과 같다.

$$M \ddot{u} = F_{ext}^n - F_{int}^n \quad (10)$$

여기서 M 은 대각화된 질량 행렬이고, F_{ext}^n 은 외력 벡터, F_{int}^n 은 내력 벡터이다. 시간 스텝 $n+1$ 번째에서의 값을 구하기 위해 중앙차분법을 적용하면 다음과 같다.

$$a^n = M^{-1}(F_{ext}^n - F_{int}^n) \quad (11)$$

$$v^{n+1/2} = v^{n-1/2} + a^n \Delta t^n \quad (12)$$

$$u^{n+1} = u^n + v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (13)$$

$$\Delta t^{n+1/2} = \frac{(\Delta t^n + \Delta t^{n+1})}{2} \quad (14)$$

이고, a, v, u 는 각각 노드의 가속도, 속도, 변위 이다. 해의 안정성을 보장하기 위해 시간스텝 크기는 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건을 만족하도록 제한하였다. CFL 조건에서는 음속의 속도로 하나의 메쉬를 지나가는 시간보다 작도록 계산 시간스텝의 크기를 제한하며, 임계 시간 스텝 Δt_e 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta t_e = \left[\frac{L_e}{C} \right] \quad (15)$$

여기서 L_e 는 특성길이(characteristic length)로 보통 메쉬의 가장 작은 한 변의 길이이고, C 는 음속(sound speed)이다. 모든 요소에 대해 (15) 식을 계산한 뒤, 그중 가장 작은 값이 현재 시간에서의 시간 스텝이다.

3. 외연 유한요소해석의 병렬처리

외연유한요소법의 병렬화를 위해, 각 프로세서는 자신에게 할당된 영역에서 내력벡터를 계산한 후, 영역간의 경계면에 위치한 절점들의 내력에 대해서는 경계면을 공유한 프로세서간의 통신을 통해서 서로 값을 주고받아야 한다. 이를 위해서, 각 프로세서들은 (1)자신과 영역을 공유한 프로세서(혹은 도메인) 개수, (2) 자신과 영역을 공유한 각 도메인과의 공유 노드 개수, (3) 그 노드 리스트들을 미리 작성해서 배열에 저장하고 있어야 한다. 메쉬의 연결 상태(connectivity)는 변하지 않으므로, 각 프로세서는 처음에 한 번만 이러한 작업 수행하면 된다. 이렇게 되면, 매 시간스텝

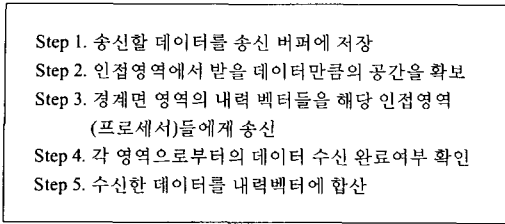


Fig. 3 Flow chart for internal force vector.

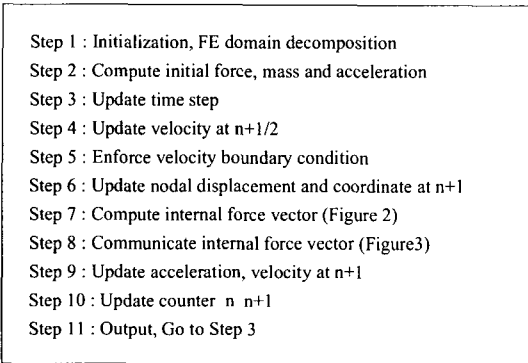


Fig. 4 Flowchart for parallel explicit time integration procedure.

마다, 자신은 누구에게 어느 데이터를 주고, 누구로부터 어떤 데이터가 오는지 결정되게 된다. 인접영역과 데이터를 주고받는 통신패턴은 Fig. 3 과 같다.

전체 영역을 부 영역(sub domain)으로 나누는 영역분할 기법과 관련하여 여러 알고리즘이 나와 있다. 그러나, 본 연구에서 다루는 3차원 복합재료의 경우, 직육면체 형상이고, 메시의 크기 및 형상이 전체적으로 일정하여, 동일한 개수로 영역을 분할하기가 용이하므로, 복합재 모델의 한쪽 길이 방향을 따라 사용프로세서 개수만큼 영역을 분할하였다. 이렇게 하면, 경계면의 노드개수는 프로세서 개수와 관계없이 일정하고, 각 프로세서가 처리해야할 유한요소개수는 사용프로세서가 증가하는 것에 반비례하여 감소하게 된다. 병렬의연유한요소해석 과정은 Fig. 4와 같다.

계산환경은 본연구실에서는 구축하고 있는 리눅스/윈도우 클러스터기반의 병렬 슈퍼 컴퓨팅 시스템(메가수스)이다. 총260 노드 520 CPU (2cpu/node) 이며, Intel Xeon 2.2, 2.4, 2.8, 3.0 Ghz 로 구성되어 있다. 계산을 위한 네트워크는 Giga Bit 스위치를 이용하여 연결되어 있다. 병렬성능 벤치마크 테스트 결과, 약 1000만 자유도 모델에서 256CPU 까지 거의 이상적인 스피드업(Speed Up) 을 보이며, 대규모 문제에 효과적으로 활용할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Xeon 2.2 Ghz 64 CPU로 계산을 수행하였다.

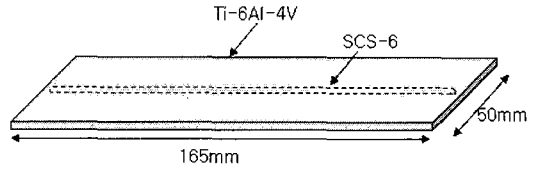


Fig. 5 Test sample geometry.

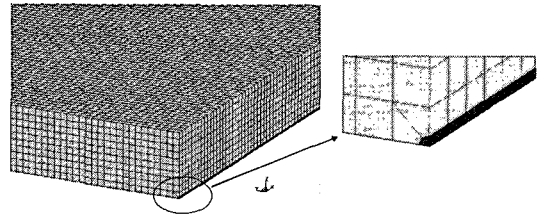


Fig. 6 FE Model of single fiber composite(1/8 symmetric).

4. 단일 섬유 복합재의 섬유 파단 시 음향방출

유한요소법 및 외연시간적분법을 이용한 음향방출해석의 신뢰성 및 타당성을 검증하기 위해, 티타늄 기지에 단일 실리콘 섬유가 내재된 복합재판에 대해 정적하중에 의한 섬유파단 시 발생하는 변위를 피에조 센서를 이용하여 측정한 실험[7]과 동일한 조건으로 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다.

4.1 해석 모델 및 조건

해석 모델은 Ti-6Al-4V 기지에 140 μm 직경의 단일 SCC-6 실리콘 카바이드 섬유가 내재된 복합재이다(Fig. 5). 8노드 육면체 요소를 사용하여 기지와 섬유를 각각 모델링하였으며, 등방성, 선형 탄성 가정 하에 해석 하였다. 음원의 위치는 시편의 중앙이고, 동적변위는 섬유길이방향으로 60mm 떨어진 위치에서 측정하였다. 해석은 1/8 모델에 대해 수행하였다(Fig. 6).

섬유길이방향으로의 인장 시, 섬유파단은 788 Mpa 의 인장하중, 2,790 Mpa의 섬유 인장응력에 도달했을 때 발생한다고 보면 모멘트텐서는 다음과 같다.[7]

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} 23.1 & 0 & 0 \\ 0 & 3.8 & 0 \\ 0 & 0 & 3.8 \end{bmatrix} Nm \tag{16}$$

식(5)의 음원함수(source function)의 형상에서 τ와 β는 일반적으로 0.30 μs 와 2 를 사용하며, 본 예제에서도 같은 값을 사용하였다.

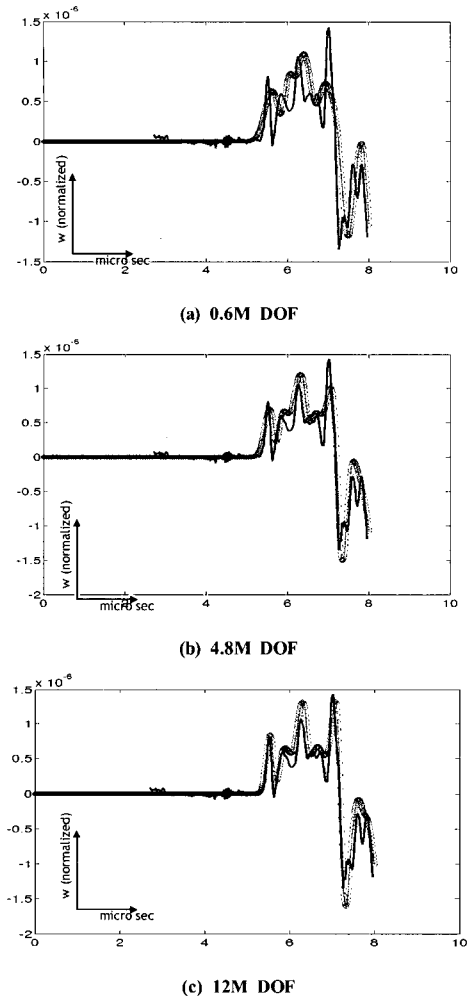


Fig. 7 Time history of displacement induced by fiber breakage(solid line : experiment [7], * : simulation - present).

4.2 해석 결과

해석으로부터 구해진 시간에 따른 변위를 보면, 요소크기와 시간 스텝이 작아질수록 실험에서 측정된 변위와 더 잘 일치하는 것으로 나타난다(Fig. 7). 1,200만 자유도 정도에서 변위의 형태 및 최대치 등이 매우 잘 일치하는 것으로 나타나며, 이때의 요소크기(육면체 한 변의 길이)는 약 0.1 mm, 시간스텝은 약 6 nano second 이고, 계산시간은 Xeon 2.2 Ghz 64 CPU에서 3시간정도 소요되었다. 동적변위는 탄성파가 검출위치에 처음 도착한 시간인 약 5 μsec 로부터 발생하기 시작하였다. 결과는 반사파의 영향이 미치기 전인 8 μsec 까지 비교하였는데, 이 시간 이후로는 시편의 모서리로부터 반사되는 edge reflection의 영향 등으로 결과의 차이가 발생할 수 있을 것으로 보인다.

5. 적층 복합재료 파손 시 음향방출

5.1 적층복합재료 모델링 기법의 비교

적층 복합재료의 경우, 3장에서 모델링했던 방식과 같이 섬유와 기지를 독립적으로 모델링하여(Fig. 8) 각각 물성을 개별적으로 지정하여 할 수도 있고, 기존의 전통적인 방식과 같이 섬유와 기지의 물성을 균질화(homogenization)하여 모델링할 수도 있다. 전자의 경우는 단위 셀(unit cell) 개념이나 반복적인 경계/하중조건 가정 없이 계산하기 때문에 직접수치해석법 (DNS : Direct Numerical Simulation) 이라고도 불린다.

DNS 기법에서 파손 조건은 등방성으로 가정된 각 구성 성분별로 정의하면 된다.

본 절에서는 DNS 방식과 균질화 방식으로 음향방출 해석을 했을 때 결과의 차이를 비교해 보고자 한다. 해석 모델은 Figure 9에서 보는 바와 같이 길이 80mm, 폭 20mm의 유리섬유/에폭시 [90_z/0_z]_s 복합재이다. 음향방출원은 재료의 중심이고 약 60mm 정도 떨어진 곳에서 동적변위를 측정하였다. 유한요소 모델은 두 방식에서 동일하게 사용하였다. 정확한 치수에 의한 유한 요소 격자를 만들기에는 대부분 사용하는 유리섬유의 반지름은 너무 작기 때문에 동일 체적비를 유지하면서 반지름이 큰 섬유로 모델링하였다.

두 개의 모델링 방법에 대한 주파수의 스펙트럼 밀도의 반응을 Figure 10에 나타내었다. 그림에서 보면, 균질화된 모델이 1 Mhz 에서 1.5Mhz 사이에서 더 높은 밀도를 보이고 있다. 이것은 고 주파수 영역의 응력파가 물성을 평균화하여 전체 매질에 동일하게 적용한 균질화 모델에서는 사라지지 않고 전달되고 있으나, 각기 다른 물성으로 분리된 DNS 모델에서는 어느 정도 감소 및 분산되어 약화되는 효과가 나타나기 때문인 것으로 사료된다. 그러나, 주파수가 1MHz 이하인 경우는 스펙트럼 밀도는 개략적으로 서로 유사한 경향을 보인다.

5.2 음원증가 시간변화의 영향

음원모델의 파라미터 중의 하나인 rise time τ 의 변화에 따른 결과 차이를 비교하여 보았다. 많은 관련문헌에서는 통상적으로 0.3 μsec 을 사용하고 있다. Fig. 11에서는 균질화된 물성을 사용한 적층 복합재 모델에 대해 이 값을 0.006, 0.003, 0.3 으로 변화시킨 후 센서 위치에서 변위의 차이를 살펴보았다. 가로축은 시간 (μsec) 이고 세로축은 동적 변위이다. 그림에서 보는 바와 같이 τ 값이 0.3 μsec 보다 작은 경우, 이 값의 감소가 결과에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 음원증가 시간이 증가하여 fig. 11에서 나타나는 고주파 성분의 주기보다 커지면, 결과에 차이가 발생하기 시작한다.

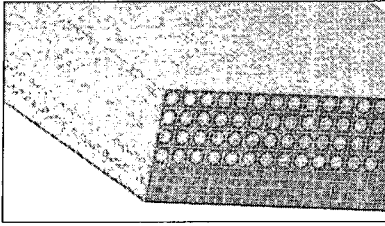


Fig. 8 Direct modeling of composite with uniform fiber distribution.

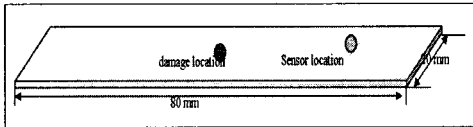


Fig. 9 Glassfiber/Epoxy [90/0]_s plate with damage source at center.

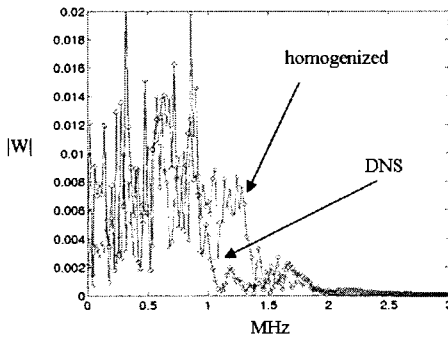


Fig. 10 Spectral density of response induced by point source of acoustic emission(DNS vs. homogenized).

4. 결론

외연적 시간적분법과 3차원 유한요소법을 사용하여 음향 방출 모사에 적용하면, 복잡한 형태의 구조물이나, 충격에 의한 파손, 반사파에 의한 영향 등을 연구할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 이러한 방법을 사용하여 섬유파단 시 음향방출 해석을 수행하였고 그 적용가능성을 검토하였다. 그 결과, 본 연구에서 적용한 방법으로 음향방출 해석을 효과적으로 모사할 수 있음을 보였다. 요소크기와 시간 스텝이 작아질수록 시험 결과와 더 근접한 결과가 나왔고, 음향방출의 고주파성분을 정확히 모사를 위해서는 요소크기와 시간스텝의 크기가 충분히 작아야 함을 알았다. 이 과정에서 대규모 해석 모델을 효과적으로 다루기 위해, 병렬 컴퓨팅 기법을 도입하였다. 적층복합재의 경우, 섬유와 기지를 각각 모델링하는 방법과 균질화 모델에 따른 차이를 비교하였다. 1MHz 이상에서는 차이를 보이나, 1MHz 정도 이하에서는 주파수 스펙트럼 분포가 유사하게 분포하였다. 또한

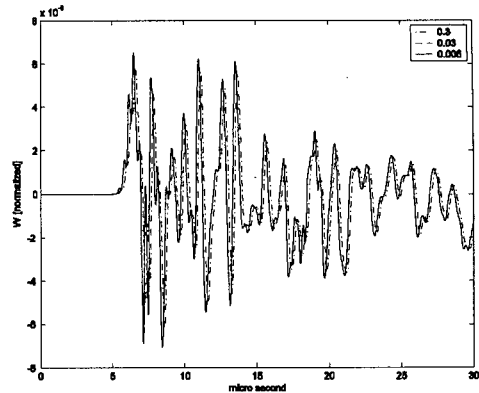


Fig. 11 Normalized displacement at sensor location for the rise time of 0.006, 0.003 and 0.3 respectively.

단일섬유 복합재의 경우, 음원 증가시간이 일정 값보다 작으면, 그 값의 변화가 측정된 음향 시그널에 거의 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제시된 방법을 기반으로 향후 충격 및 충격손상 과정을 포함하는 음향방출 해석에 관한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- 1) D. Sung, C. Kim and C. Hong, "Monitoring of impact damages in composite laminates using wavelet transform," *Composites Part B*, Vol. 33, 2002, pp. 35-43.
- 2) 김진원, 김인걸, "압전필름센서신호를 이용한 Gr/Ep 복합재 적용판의 고속충격 손상탐지," 2005 춘계 한국복합재료학회 학술대회논문집.
- 3) J.H. Shih and A.K. Mal, "Acoustic emission from impact damage in cross-ply composites," *Proc. Struct. Health Monit.*, 2000, pp. 209-217.
- 4) R. Burridge and L. Knopoff, "Body force equivalents for seismic dislocations," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 64, 1964, pp. 1875-1888.
- 5) J.R. Rice, "Elastic wave emission from damage processes," *J. Nondestr. Eval.* Vol. 1, 1980, pp. 215-223.
- 6) M. Aberg, "Numerical modeling of acoustic emission in laminated tensile test specimens," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, 2001, pp. 6643-6663.
- 7) D. Sypeck, Damage evolution in titanium matrix composites, Ph.D. Thesis, *University of Virginia*, 1996.
- 8) M.A. Hamstad, A. O'Gallacher and J. Gary, "Effect of lateral plate dimensionas on acoustic emission signals from dipole sources," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 19, 2001, pp. 258-274.