

가상 층간 구조 페리다이나믹 해석의 파동 전파 특성 검토

하 윤 도^{1*}

¹군산대학교 조선해양공학과

Characteristics of Dynamic Wave Propagation in Peridynamic Analysis with Nonlocal Ghost Interlayer

Youn Doh Ha^{1*}

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University, Gunsan, 54150, Korea

Abstract

Multilayered structures include lamination by relatively thick plies and thin interlayers. For efficient peridynamic analysis of dynamic fracturing multilayered structures, the interlayer is modeled using ghost peridynamic particles while the ply is formulated via real peridynamics. With the nonlocal ghost interlayer, one may keep the discretization resolution low for the ply. In this study, the characteristics of dynamic wave propagation through the nonlocal ghost interlayer in peridynamic analysis are investigated. It is observed that the interlayer not only binds adjacent plies, but also significantly influences energy transfer between plies, and thereby their deformation and motion. In addition, near a surface or boundary, peridynamic particles do not have a full nonlocal neighborhoods. This causes the effective material properties near the surface to be different from those in the bulk. Surface correction based on neighborhood volumes is employed. The impact of surface correction on wave propagation in multilayered structures is investigated.

Keywords : peridynamics, nonlocal ghost interlayer, wave propagation, surface effect correction

1. 서 론

페리다이나믹 해석법(peridynamics)은 비국부 연속체 기반 해석 기술이다(Silling, 2000). 일반적인 연속체 해석 이론들은 지배방정식에서 응력의 미분을 사용하기 때문에 변위장 혹은 응력장의 불연속 현상(discontinuity) 혹은 국부화 현상(localization)이 있는 경우는 지배방정식을 수정하거나 별도의 이론적 혹은 수치적인 보완이 요구된다. 페리다이나믹 이론은 응력의 미분을 대신하여 유한한 비국부 영역 내의 절점 간 상호작용력을 적분하여 사용한다. 이를 통해 페리다이나믹 모델은 균열과 재료 손상 등의 불연속 현상을 해석하기에 적합하도록 개발되었다. 선행연구를 통해 페리다이나믹 해석 모델이 다양한 파괴 거동 분석에 적용될 수 있는 것을 확인하였다(Ha and Bobaru, 2010; 2011; Ha and Cho, 2011; 2012;

Agwai *et al.*, 2011; Bobaru *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2011; 2012; 2013; 2015; Ha and Ahn, 2018; Ha, 2019).

Bobaru 등(2012)은 페리다이나믹 해석법을 통해 다중적층 유리구조물의 동적충격파괴 해석을 수행하고 실험 결과(Bless and Chen, 2010)와 비교하였다. 실험에서 사용된 다중적층 유리구조물은 한 변이 30cm인 정사각형 유리판 7개와 폴리카보네이트 백킹으로 구성되어 있으며, 모든 개별 적층재료들은 상대적으로 매우 얇은 폴리우레탄 층간재료로 접합되어 있다. 최상단 유리판의 중앙에 FSP(fragment simulating projectile)을 1,200m/s이상의 고속으로 충돌시켜서 다층 구조물에서 나타나는 다양한 충돌파괴 패턴을 실험적으로 확인하였다. Bobaru 등(2012)은 페리다이나믹 해석을 통해 다중적층 유리판의 손상 패턴을 분석하였다. 다만 적층판들 사이에

* Corresponding author:

Tel: +82-63-469-1856; E-mail: ydha@kunsan.ac.kr

Received July 8 2019; Revised August 1 2019;

Accepted August 2 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상대적으로 매우 얇은 층간구조가 반복되는 다중적층구조물을 모두 수치모델링하려면 막대한 계산 용량과 해석 시간이 요구되기 때문에 Bobaru 등(2012)에서는 모델링 편의를 위해 층간재료를 모두 생략하고 개별 적층구조들이 서로 직접 접촉하도록 간략화하였다. 또한 FSP를 직접 모델링해서 다중 물체 접촉/충돌해석을 수행하지 않고 간략화된 첨두(尖頭) 아치(Ogive) 형태의 강체가 특정 속도로 침투해 들어가는 현상을 수치적으로 구현했다. 결과적으로 Bobaru 등(2012)의 해석 결과에서는 실험과 다른 동적 파괴 패턴이 다수 관측되었다. 특히 층간 재료가 없기 때문에 최상단 유리판과 두 번째 유리판이 과도한 변형으로 인해 박리(delamination)되는 현상이 발생하였다. Ahn과 Ha(2017)에서는 다중적층 구조물의 효율적인 페리다이나믹 동적 파괴 해석을 위해 가상 절점을 이용한 비국부 층간 결합 모델링을 제안하였고, Ha와 Ahn(2018)에서는 실험 모델보다 다소 작고 한정적인 형태의 다중적층 구조에 대해 비국부 가상 층간 구조를 도입하고 충돌체에 의한 다중 접촉/동적 파괴 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 Bless와 Chen(2010)의 실제 모델에 대응하는 페리다이나믹 동적 파괴 해석 연구를 수행하기 위한 선행 연구로서 비국부 가상절점 층간 구조 모델링 기법을 보다 개선하고 검증한다. Ahn과 Ha(2017)에서는 층간 결합 모델의 탄성 거동만을 검토하였지만, 본 연구에서는 층간재료 물성에 따른 가우스 파동 전파 시뮬레이션을 수행하여 제안된 가상 층간 구조 페리다이나믹 모델을 검증하고 층간재료가 동적 거동에 미치는 영향을 분석한다. 또한 페리다이나믹 해석에서 문제가 되는 표면 효과를 보정하는 기법(Le and Bobaru, 2018)을 다중적층 페리다이나믹 해석 모델에 적용하여 파동 전파 특성을 분석한다.

2. 가상 층간 구조 페리다이나믹 해석

2.1 페리다이나믹 모델

페리다이나믹 이론은 재료의 한 절점과 그의 유한한 영역에 속하는 모든 절점 간의 상호작용력을 고려하는 연속체 기반 비국부 해석 이론이다(Silling, 2000). 전통적인 연속체 이론들과 달리 페리다이나믹 이론은 응력의 미분을 대신하여 상호작용력들의 적분을 사용한다. 따라서 페리다이나믹 운동방정식은 불연속 존재여부에 무관하게 모든 계산 영역에서 유효하다. 페리다이나믹 운동방정식은 다음과 같다.

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x},t) = \int_{H_x} \mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{x}',t)dV_{\mathbf{x}'} + \mathbf{b}(\mathbf{x},t) \quad (1)$$

여기서, \mathbf{b} 는 체적력이며 \mathbf{f} 는 두 절점 \mathbf{x} 와 \mathbf{x}' 로 이루어진 결합의 상호작용력이다. ρ 는 절점 \mathbf{x} 에서 재료 밀도를 의미한다. H_x 는 절점 \mathbf{x} 와 상호작용하는 \mathbf{x}' 들로 이루어진 결합들의 집합으로 비국부 해석 영역이며 식 (2)와 같이 정의된다.

$$H_x = \{\mathbf{x}' \in \Omega : \|\mathbf{x}' - \mathbf{x}\| < \delta\} \quad (2)$$

PMB(prototype micro-brittle) 모델(Silling and Askari, 2005)에서 \mathbf{f} 는 변형된 결합 벡터 방향으로 정렬되며 그 크기는 결합의 상대 신장량(relative elongation)과 비례한다.

$$f = cs \quad (3)$$

따라서 양의 f 는 인장 결합력, 음의 f 는 압축력을 의미한다. 또한 s 는 결합의 상대 신장량 혹은 결합 변형률로서 다음과 같이 정의된다.

$$s = \frac{\|\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\eta}\| - \|\boldsymbol{\xi}\|}{\|\boldsymbol{\xi}\|} \quad (4)$$

여기서, $\boldsymbol{\xi}$ 는 변형 전 결합 벡터, $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{x}' - \mathbf{x}$ 이고 $\boldsymbol{\eta}$ 는 결합의 상대 변형 벡터, $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{u}' - \mathbf{u}$ 가 된다. 따라서 $\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\eta}$ 는 변형된 결합 벡터가 된다. 또한 c 는 결합의 강성 혹은 미소재료상수(micro-modulus)라고 한다. 한 결합에 대한 변형 에너지 밀도는 $\frac{1}{2} f (\|\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\eta}\| - \|\boldsymbol{\xi}\|)$ 이므로 절점 \mathbf{x} 에서 변형 에너지 밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \int_{H_x} \frac{1}{2} cs^2 \|\boldsymbol{\xi}\| dV_{\mathbf{x}'} \quad (5)$$

균질 변형(homogeneous deformation)을 가정한 등방성 탄성재료의 변형 에너지를 동일한 변형 조건에서 페리다이나믹 변형 에너지 (5)와 대응시켜서 미소재료상수를 다음과 같이 결정할 수 있다(Ha and Bobaru, 2010; Silling and Askari, 2005).

$$c = \begin{cases} \frac{18k}{\pi\delta^4} & (3D) \\ \frac{6E}{\pi\delta^3(1-\nu)} & (2D) \end{cases} \quad (6)$$

여기서, k 는 재료의 체적계수이며 E 는 강성계수, ν 는 푸와송 비가 된다. 본 연구에서 사용하는 결합 기반 페리다이나믹 모델에서 푸와송 비는 2차원 평면 응력 모델에서는 1/3, 3차원

혹은 2차원 평면 변형 모델에서는 1/4으로 고정된다. 상대 기반 페리다이나믹 모델(Silling *et al.*, 2007)에서는 이와 같은 재료 물성치 제약 문제를 해결하였다.

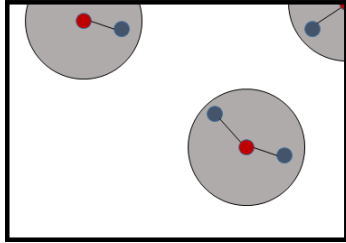


Fig. 1 Neighborhood of PD points inside the body and near the surface

앞서 정식화한 모델은 비국부 해석 영역 H_x 가 해석 도메인에 완전히 포함되어 있을 때 정확한 계산이 된다. 그러나 경계 근처에서는 H_x 가 일부분만 해석 영역에 포함될 수 있다(Fig. 1 참조). 이는 연속체 기반 모델링에서는 의도된 바가 아니지만 수치해석적인 관점에서 이산화하는 과정에서 발생하는 것으로, 경계 근처에서 재료강성이 약해지는 등 재료 특성이 달라지는 현상이 나타난다. Le와 Bobaru(2018)는 경계 효과를 보정하는 여러 방법론들을 비교·검토하여 체적 보정법(volume correction)이 비교적 범용적이면서 보정 효과가 좋은 것을 확인하였다. 체적 보정법은 경계 주변의 결합들의 미소재료상수를 증대시켜서 균질 변형 상태에서의 내부의 절점들과 동일한 변형에너지 밀도를 가질 수 있도록 보정해 준다. 두 절점 \mathbf{x} 와 \mathbf{x}' 로 이루어진 결합에서 절점 \mathbf{x} 에 대한 비국부 영역 H_x 의 체적은 $V(\mathbf{x})$ 으로 절점 \mathbf{x}' 에 대한 비국부 영역 체적은 $V(\mathbf{x}')$ 으로 표현하자. 이 때 해당 결합이 경계 근처에 위치하면 $V(\mathbf{x})$ 와 $V(\mathbf{x}')$ 은 도메인 내부에서 완전한 구체/원형체인 비국부 영역 체적 V_0 보다 작다. 이를 보정하기 위해 다음과 같은 보정 계수를 고려한다.

$$\lambda = \frac{2V_0}{V(\mathbf{x}) + V(\mathbf{x}')} \quad (7)$$

3차원 모델에서 $V_0 = 4\pi\delta^3/3$ 이고 2차원 모델에서는 $V_0 = \pi\delta^2$ 이 된다. 따라서 해당 결합의 미소재료상수는 다음과 같이 보정된다.

$$c_{corrected} = \lambda c \quad (8)$$

페리다이나믹 모델에서 재료손상은 다음과 같은 비가역적 상수 함수를 통해 구현될 수 있다(Silling and Askari, 2005).

$$\mu(t, \boldsymbol{\xi}) = \begin{cases} 1, & \text{if } s(t', \boldsymbol{\xi}) < s_0 \text{ for all } 0 < t' < t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

여기서, s_0 는 결합 손상을 위한 최대 상대 신장량이 되며, 이를 통해 최대 상대 신장량을 넘어서 변형된 결합은 끊어지게 된다. 이와 같은 과정을 통해 기존의 연속체 기반 방법론들보다 실제적인 형태로 재료 손상을 표현할 수 있게 된다. PMB 모델에서는 s_0 를 최대 변형 에너지 해방률 G_0 과 연결하여 다음과 같이 구한다.

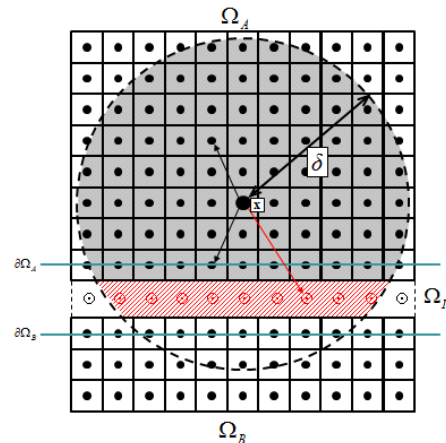
$$s_0 = \begin{cases} \sqrt{\frac{5G_0}{9k\delta}} & (3D) \\ \sqrt{\frac{4\pi G_0}{9E\delta}} & (2D) \end{cases} \quad (10)$$

또한 다음과 같은 식을 통해 국부적으로 결합 단위에서 나타나는 손상을 개별 절점에서의 손상량으로 환원하여 표현한다.

$$\Psi(\mathbf{x}, t) = 1 - \frac{\int_{H_x} \mu(\mathbf{x}, t, \boldsymbol{\xi}) dV_{x'}}{\int_{H_x} dV_{x'}} \quad (11)$$

2.2 비국부 층간 결합 모델

일반적으로 적층 구조물은 구조물의 주 적층구조(ply)들을 상대적으로 매우 얇은 두께의 층간구조(interlayer)로 접합하여



- : Interaction in ply material A
- (red) : Interaction with interlayer material
- ⊙ (black) : Particle of interlayer material (fictitious particle)
- (grey) : Integral area of particle \mathbf{x} in ply material A
- ▨ (red hatched) : Volume of interlayer material

Fig. 2 Ghost interlayer model(Ahn and Ha, 2017)

만들어진다. 이와 같은 구조가 반복적으로 구성되어 있기 때문에 층간구조의 격자 정밀도를 주 적층구조와 동일하게 모델링하면, 해석 시간과 메모리 사용량 측면에서 매우 비효율적이다. 본 연구에서는 층간 재료 특성을 가상 절점을 통한 결합으로 대체하는 비국부 층간 재료 모델(Ahn and Ha, 2017)을 통해 적층 구조물을 표현한다(Fig. 2 참고). 비국부 층간 재료 모델에서 Ω_A 의 페리다이나믹 절점은 Ω_B 에 속하는 절점을 직접 볼 수는 없고, 다만 개별 절점의 비국부 영역 내에 속하는 가상 층간 절점을 통해 상호작용을 한다. 이 때 가상 절점들은 인접한 두 층 경계의 중간점으로 가정하여 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$\mathbf{x}_I = \frac{\mathbf{x}_A + \mathbf{x}_B}{2}, \mathbf{u}(\mathbf{x}_I, t) = \frac{\mathbf{u}(\mathbf{x}_A, t) + \mathbf{u}(\mathbf{x}_B, t)}{2} \quad (12)$$

가상 층간 절점과 실제 적층 절점 간의 상관 관계는 식 (3)~(6)을 층간 재료 물성에 대해 적용하여 계산되며, 다음 식과 같이 페리다이나믹 방정식 (1)에 간단히 더해진다.

$$\rho(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \int_{H_x} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{x}', t) dV_{\mathbf{x}'} + \int_{H_x \cap \Omega_I} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_I, t) dV_{\mathbf{x}_I} + \mathbf{b}(\mathbf{x}, t) \quad (13)$$

3. 적층구조의 파동 전파 해석

본 장에서는 가우스 파동 전파(gaussian wave propagation) 시뮬레이션을 통해 가상 층간 구조 페리다이나믹 해석을 검증하고 층간 재료가 파동 전파에 미치는 영향 및 표면 효과 보정에 의한 영향을 분석한다.

3.1 층간 구조를 통한 가우스 파동 전파

층간 구조를 특성을 면밀히 분석하기 위해 가상 층간 구조를 통한 파동 전파 거동을 검토한다. Fig. 3과 같이 x 축에 비해

y 축이 매우 긴 평판 모델(0.4m by 70m)에 대해 y 축 방향으로 전파하는 다음과 같은 가우스 파동을 초기 조건으로 고려한다.

$$u(y) = 0.02e^{-0.01y^2} \quad (13)$$

y 축 방향의 순수한 파동 전파 특성만을 분석하기 위해 별도의 경계조건은 부과하지 않았기 때문에 푸와송 효과에 의해 x 축 방향의 변형이 추가적으로 발생한다. 해석 모델의 절점 간격은 0.02m이며 비국부 영역의 크기를 표현하는 $\delta=0.08m$ (구체의 반지름)이다. 가상 층간 구조는 y 축 길이방향의 중간 지점($y=35m$)에서 x 축에 평행하게 구성되며 층간재료 두께는 0.04m이다(Fig. 3 참고). Explicit 시간 적분을 위한 시간 간격은 Silling과 Askari(2005)의 수치안정성 계산식을 사용해 얻어진 0.00357s 보다 작은 0.001s로 보수적으로 정하였다.

Fig. 4(a)에서는 주 적층구조(ply)와 층간구조(interlayer)에 동일한 재료 물성치($E=1.0Pa, \rho=1.0kg/m^3$)를 적용하고 파동 전파 이력을 세 가지 시간대 0, 35, 70s에서 비교하였다. 이는 층간구조를 통한 파동 왜곡이 없는지 확인하기 위한 수치 실험으로, 탄성과 전파 거동을 명확히 관측하기 위해 그래프의 수평축은 모델의 y 축 좌표를 표현하고 수직축은 y 축 방향 변위를 과도하게 스케일링하여 나타내었다. 초기($t=0$)에 0.02m의 파고를 가지는 반쪽 가우스 파동이 전파되면서 모델의 중간 지점($t=35s$)에서 절반인 0.01m의 파고를 가지는 완전한 파동으로 전개하다가 모델의 반대쪽 끝단($t=70s$)에서 다시 반쪽 파동으로 반사하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 동일한 재료물성을 가지는 가상 층간 구조를 통해 두 적층판이 단단하게 맞붙어 있어서 파동 왜곡이 없음을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)에서는 층간재료의 재료강성만 1/100배($E=0.01Pa$)로 줄여서 파동 전파 이력을 비교하였다. 보다 상세한 시간 이력을 Fig. 5에서 또한 나타내었다. y 축 양의 방향으로 진행하던 탄성파가 층간재료를 통해 일부 반사가 되어 $t=23\sim46s$ 에서 대략 0.004~0.006m의 파고 차가 확인된다. $t=46\sim58s$ 에서 확인할 수 있듯이 층간재료를 통해 전파된

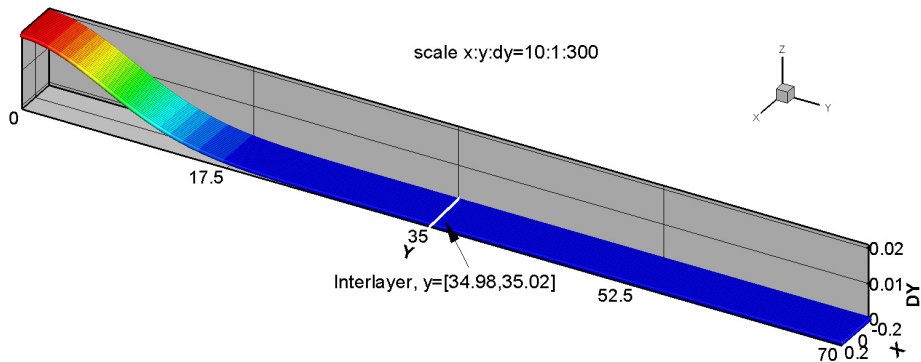


Fig. 3 Gaussian wave propagation model ($x:y:thickness=0.4:70:1$)

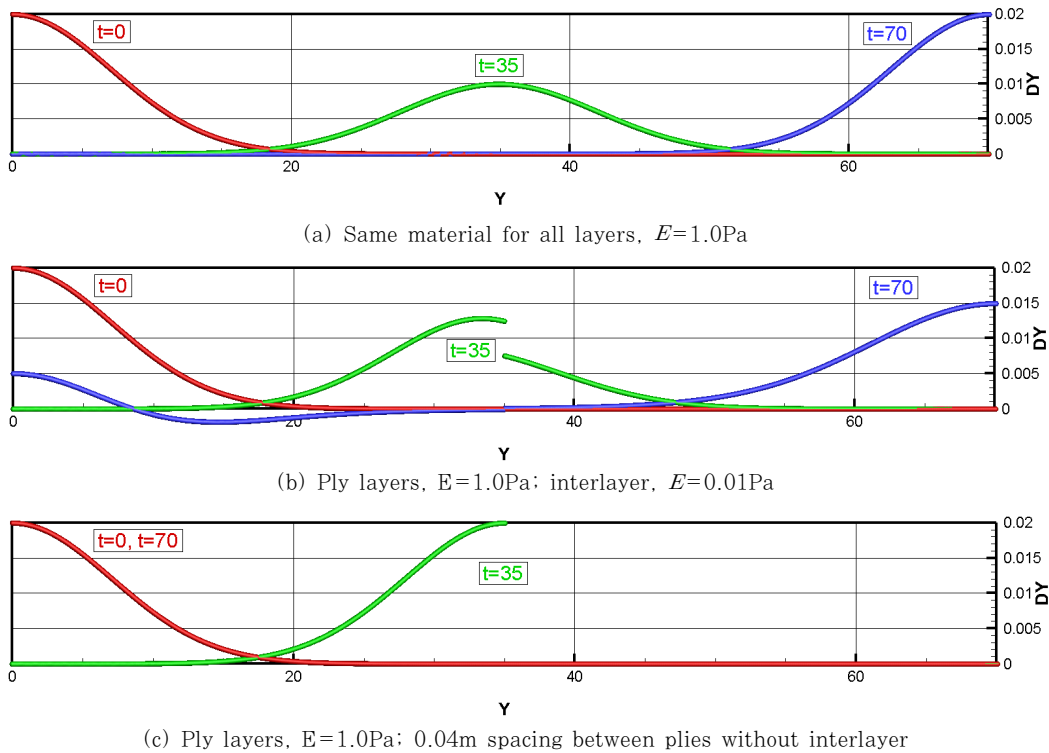


Fig. 4 Gaussian wave propagation through ply-interlayer($y=35$)-ply: three wave profiles at $t=0, 35,$ and 70s

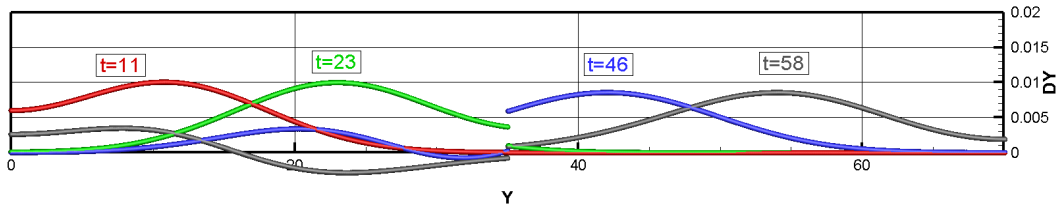


Fig. 5 More wave profiles for Fig. 4(b) at $t=11, 23, 46,$ and 58s

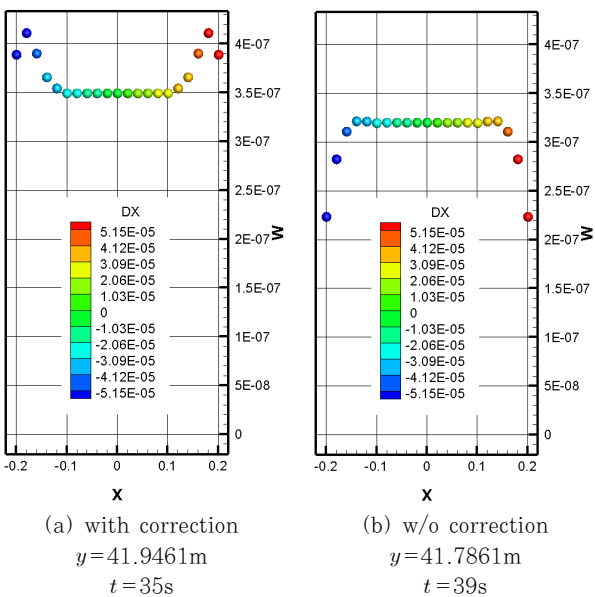


Fig. 6 Strain energy density with (a) or without (b) surface effect correction, when the maximum wave height reaching $y=35\text{m}$

탄성파는 같은 시간대 Fig. 4(a) 모델에서 관측된 파고 0.01m보다 다소 낮은 0.008~0.009m의 파고로 y 축 양의 방향으로 계속 진행하며, 반사된 탄성파는 y 축 음의 방향으로 되돌아간다. $t=58\sim70\text{s}$ 에서는 양쪽 끝단에서 탄성파 반사가 일어나고 있음을 또한 확인할 수 있다. 일반적으로 층간재료는 적층재료에 비해 1/100~1/1000배 정도의 재료강성을 가지는 부드러운 탄성재료(polyurethane, PVB 등)로 구성되기 때문에, 층간구조를 모델링하는 것이 적층구조물 동적해석에서 매우 중요함을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 Fig. 3의 모델에서 층간재료를 사용하지 않고 가우스 파동을 전파시킨 결과이다. 두 ply 사이의 유격이 0.04m로 최대 변위 0.02m보다 크기 때문에 한쪽 ply 끝단에서 탄성파가 다른 쪽 ply로 넘어가지 않고 전부 반사되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 표면 효과 보정

페리다이나믹 모델은 경계 주변에서 재료강성 효과가 낮아

지는 표면 효과가 발생하기 때문에 체적 기반의 보정 계수 (7)를 고려하여 식 (8)과 같이 재료강성 효과를 보정해 준다. 본 장에서는 적층구조물 해석에서 체적 기반의 표면 효과 보정을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 비교하였다. 해석 모델은 Fig. 3과 동일하며 가상 층간재료는 주 적층재료와 동일한 재료물성치를 사용하였다. Fig. 4(a)은 표면 효과를 보정한 해석 결과이다. Fig. 6은 표면 효과 보정 여부에 따른 해석의 차이를 비교한 것으로, 모델의 중간 지점($y=35$)에 최대 파고가 도달하는 시점에서 변형 에너지 밀도(w) 및 x 방향 변위(DX)의 x 방향 분포를 나타내었다. w 는 수직축에서 비교하였고, DX는 각 절점에 컨투어로 표현하였다. x 방향 분포를 측정할 y 위치는 변형 에너지 밀도의 최대값이 나타나는 지점으로, 표면 효과를 보정한 해석(a)은 $y=41.9461\text{m}$, 표면 효과를 보정하지 않은 해석(b)는 $y=41.7861\text{m}$ 로 유사하다. Fig. 6(a)에서 변형 에너지 밀도가 평탄한 구간의 값은 대략 $3.49636e^{-7}\text{J}$ 이고 최대값은 $x=\pm 0.18\text{m}$ 지점에서 $4.11448e^{-7}\text{J}$ 로 약 17.6% 크게 나타난다. 이와 같은 차이는 대부분 푸와송 효과로 인해 추가된 x 축 방향 변형 에너지가 주요 원인이 된다. 다만, 최외곽의 변형 에너지 밀도가 최대값보다 약간 낮은 것은 체적 비율을 활용한 표면 효과 보정이 불완전(Le and Bobaru 2018 참고)하기 때문이다. 변형 에너지 밀도가 평탄한 구간의 값은 표면 효과를 보정하지 않은 Fig. 6(b)에서는 $3.49636e^{-7}\text{J}$ 의 약 91.6%인 $3.20270e^{-7}\text{J}$ 로 다소 낮게 나타난다. 외곽으로 갈수록 푸와송 효과로 인해 추가되는 변형에너지 밀도가 증가함에도 불구하고 표면 효과로 인해 변형 에너지 밀도가 급격히 떨어지며, 최외곽 지점($x=\pm 0.2\text{m}$)에서 최소값은 $2.23789e^{-7}\text{J}$ 로 약 70%에 불과하다. 이와 같이 표면 효과를 보정해 주지 않으면 경계 주변에서 재료강성 효과가 낮아지기 때문에 동일한 초기 변형에 대해서 발생하는(변형) 에너지가 줄어들게 된다. 또한 낮은 에너지 발생으로 파동 전파속도도 늦어지기 때문에, 표면 효과를 보정해 준 해석(a)의 경우 최대 파고가 y 방향으로 35m 만큼 진행하기 위해 시간 35s가 소요된 반면, 표면 효과를 보정하지 않은 해석(b)의 경우는 시간 39s가 소요되었다.

일반적으로 세밀한 해석 모델에서는 특별한 보정이 없어도 표면 효과에 의한 영향이 크지 않다고 알려져 있다(Le and Bobaru, 2018). 본 시뮬레이션에서 사용된 페리다이나믹 해석 모델은 작은 파고를 가지는 파동 전파 특성을 모사하기 위해 충분히 세밀화되어 있기 때문에 전반적인 파동 전파 거동은 표면 효과 보정 유무에 크게 영향을 받지 않았다. 그러나 표면 효과 보정을 하지 않은 모델에서는 경계 근처에서 변형 에너지 밀도가 크게 변화하여 파동 전파 속도에도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. Bless와 Chen(2010)에서 실험한 다중적층 유리 구조는 다수의 얇은 유리판들이 반복하여 적층이 되어 있기 때

문에 비록 가상 층간 구조를 적용하여도 두께 방향 세밀화에 계산 용량과 해석 시간에 의한 한계가 존재한다. 또한 고속 충돌로 인한 충격파가 다수의 얇은 유리판들을 통해 진행하기 때문에 표면 효과를 보정하지 않으면 파동의 왜곡으로 인해 동적 파괴 해석에 영향을 주게 될 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 비국부 가상 층간 구조 페리다이나믹 해석 모델을 개선하고 검증하였다. 가우스 파동 전파 시뮬레이션을 통해 가상 층간 구조를 통해 파동 전파가 엄밀하게 이루어지는 것을 확인하고, 층간재료에 따른 파동 전파 특성을 분석하였다. 또한 페리다이나믹 모델은 경계 근처에서 상호 작용하는 절점수의 부족으로 인해 재료강성 효과가 약화되는 표면 효과를 보정하기 위해 체적 기반 보정 기법을 도입하였다. 수치해석을 통해 표면 효과가 파동 전파 속도 및 변형 에너지 발전에 무시하지 못할 영향을 미치는 것을 확인하였다. 본 연구는 Bless와 Chen(2010)의 다중 적층 유리구조의 고속 충돌 동적 파괴 해석을 위한 선행연구로서 가상 층간 구조 페리다이나믹 해석 기법을 검증하고 개선하였다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육부) 재원으로 한국연구재단이 주관하는 기본연구지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다(No.2018R1D1A1B07049124).

References

Agwai, A., Guven, I., Madenci, E. (2011) Predicting Crack Propagation with Peridynamics: A Comparative Study, *Int. J. Fract.*, 171(1), pp.65~78.

Ahn, T.S., Ha, Y.D. (2017) Study on Peridynamic Interlayer Modeling for Multilayered Structures, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(5), pp.389~396.

Bless, S., Chen, T. (2010) Impact Damage in Layered Glass, *Int. J. Fract.*, 162(1-2), pp.151~158.

Bobaru, F., Ha, Y.D., Hu, W. (2012) Damage Progression from Impact in Multilayered Glass Modeled with Peridynamics, *Cent. Eur. J. Eng.*, 2(4), pp.551~561.

Ha, Y.D. (2019) Dynamic Fracture Analysis of High-Speed Impact on Granite with Peridynamic Plasticity,

- J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 31(6), pp.373~380.
- Ha, Y.D., Ahn, T.S.** (2018) Peridynamic Impact Fracture Analysis of Multilayered Glass with Nonlocal Ghost Interlayer Model, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 31(6), pp.373~380.
- Ha, Y.D., Bobaru, F.** (2010) Studies of Dynamic Crack Propagation and Crack Branching with Peridynamics, *Int. J. Fract.*, 162(1-2), pp.229~244.
- Ha, Y.D., Bobaru, F.** (2011) Characteristics of Dynamic Brittle Fracture Captured with Peridynamics, *Eng. Fract. Mech.*, 78(6), pp.1156~1168.
- Ha, Y.D., Cho, S.** (2011) Dynamic Brittle Fracture Captured with Peridynamics: Crack Branching Angle & Crack Propagation Speed, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(6), pp.637~643.
- Ha, Y.D., Cho, S.** (2012) Nonlocal Peridynamic Models for Dynamic Brittle Fracture in Fiber-Reinforced Composites: Study on Asymmetrically Loading State, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25(4), pp.279~292.
- Ha, Y.D., Lee, J., Hong, J.W.** (2015) Fracturing Patterns of Rock-like Materials in Compression Captured with Peridynamics, *Eng. Fract. Mech.*, 144, pp.176~193.
- Hu, W., Ha, Y.D., Bobaru, F.** (2011) Modeling Dynamic Fracture and Damage in Fiber-Reinforced Composites with Peridynamics, *Int. J. Multiscale Comp. Eng.*, 9(6), pp.707~726.
- Hu, W., Ha, Y.D., Bobaru, F.** (2012) Peridynamic Model for Dynamic Fracture in Unidirectional Fiber-Reinforced Composites, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 217, pp.247~261.
- Hu, W., Wang, Y., Yu, J., Yen, C., Bobaru, F.** (2013) Impact Damage on a Thin Glass Plate with a Thin Polycarbonate Backing, *Int. J. Imp. Eng.*, 62, pp.152~165.
- Le, Q.V., Bobaru, F.** (2018), Surface Corrections for Peridynamic Models in Elasticity and Fracture, *Comput. Mech.*, 61(40), pp.499~518.
- Silling, S.A.** (2000) Reformulation of Elasticity Theory for Discontinuities and Long-Range Forces, *J. Mech. & Phys. Solids*, 48, pp.175~209.
- Silling, S., Askari, E.** (2005), A Meshfree Method based on the Peridynamic Model of Solid Mechanics. *Comput. Struct.*, 83(17-18), pp.1526~1535.
- Silling, S.A., Epton, M., Weckner, O., Xu, J., Askari, E.** (2007) Peridynamics States and Constitutive Modeling, *J. Elasticity.*, 88, pp.151~184.

요 지

다중적층구조는 상대적으로 두꺼운 주 적층구조(ply)와 얇은 층간구조(interlayer)를 반복하여 붙여서 만들어진다. 적층구조의 동적 파괴 페리다이나믹 해석을 효율적으로 수행하기 위해 주 적층구조만 실제 페리다이나믹 절점으로 모델링하고 층간구조는 가상의 절점으로 간략히 모델링하는 비국부 가상 층간구조 모델링 기법을 도입한다. 이를 통해 얇은 층간구조의 수치적 이산화 정도는 무시하고 상대적으로 두꺼운 주 적층구조를 해석하기에 적절한 수준의 수치적 이산화만으로 효율적인 페리다이나믹 모델링 및 해석을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 가상 층간 구조 페리다이나믹 해석의 파동 전파 특성을 분석한다. 층간 구조는 인접한 적층판들을 접합하는 역할뿐만 아니라 적층판 사이의 에너지 전달 특성에도 영향을 주기 때문에 적층구조물의 변형 및 운동에도 중요한 역할을 하는 것을 확인하였다. 또한 경계 근처에서 페리다이나믹 절점은 불완전한 형태의 비국부 영역을 구성하는데, 이를 통해 완전한 비국부 영역을 구성하는 내부 절점과 경계 근처의 절점에서 재료 물성치 효과가 달라지게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 표면 효과를 보정하기 위해 비국부 체적 기반의 보정법을 도입하고, 표면 효과 보정이 다중적층 구조물의 파동 전파에 미치는 영향을 조사한다.

핵심용어 : 페리다이나믹 해석법, 비국부 가상 층간구조 모델, 파동 전파, 표면 효과 보정