

가상 절점을 이용한 적층 구조물의 페리다이나믹 층간 결합 모델링 검토

안 태 식¹ · 하 윤 도^{1*}

¹군산대학교 조선해양공학과

Study on Peridynamic Interlayer Modeling for Multilayered Structures

Tae Sik Ahn¹ and Youn Doh Ha^{1*}

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National Univ., Gunsan, 54151, Korea

Abstract

Peridynamics has been widely used in the dynamic fracture analysis of brittle materials. Recently, various crack patterns(compact region, floret, Hertz-type crack, etc.) of multilayered glass structures in experiments(Bless *et al.* 2010) were implemented with a bond-based peridynamic simulation(Bobaru *et al.* 2012). The actual glass layers are bound with thin elastic interlayer material while the interlayer is missing from the peridynamic model used in the previous numerical study. In this study, the peridynamic interlayer modeling for the multilayered structures is proposed. It requires enormous computational time and memory to explicitly model very thin interlayer materials. Instead of explicit modeling, fictitious peridynamic particles are introduced for modeling interlayer materials. The computational efficiency and accuracy of the proposed peridynamic interlayer model are verified through numerical tests. Furthermore, preventing penetration scheme based on short-range interaction force is employed for the multilayered structure under compression and verified through parametric tests.

Keywords : bond-based peridynamics, interlayer modeling, multilayered structures, fictitious particle, preventing penetration

1. 서 론

현대사회에서 다양한 용도로 사용되는 대표적인 취성 재료인 유리는 파괴강도는 높으나, 탄성강도가 낮아 깨지기 쉬운 재료이다. 유리는 파손되는 경우 복잡한 파괴 패턴과 파편 발생을 동반한다. 유리의 파편은 다른 유리 혹은 재료에 접촉/충돌함으로써 추가적인 파괴를 발생시킬 수 있으며, 심지어 인명피해로도 연결될 수 있다. 이러한 문제점들을 보완하기 위해 유연성과 내충격성, 부착성이 좋은 폴리우레탄이나 폴리비닐부티랄(PVB)과 같은 재료를 각 유리판 사이에 필름의 형태로 부착해 구조물의 강도를 높이고 파편의 거동을 제한하는 적층 유리구조물들이 많이 사용되고 있다. 특히 자동차의 전면유리,

강화유리문 그리고 다양한 용도의 건축자재로는 주로 PVB 필름을 이용한다.

결합 기반 페리다이나믹(bond-based peridynamics) 모델은 유한요소 모델과 같은 기존 해석 모델의 운동방정식에서 나타나는 응력미분을 유한한 범위 내에 흩어져 있는 절점들의 상호 작용력을 적분하여 대체한다(Silling, 2000). 따라서 페리다이나믹 모델은 응력함수의 불연속성을 수학적 모순이 없이 묘사할 수 있기 때문에 재료 및 거동의 불연속성을 해석하기에 유용하며, 섬유 강화 복합재, 단일평판유리 및 적층 유리 구조물 등에 대해서 다양한 동적파괴 현상이 조사되었다(Ha and Bobaru, 2011; Ha and Cho, 2011; 2012).

페리다이나믹 모델은 유리적층 구조물의 동적파괴 해석

* Corresponding author:

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

Received June 27 2017; Revised August 16 2017;

Accepted August 28 2017

©2017 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.

(Bobaru *et al.*, 2012)에서도 사용되었으며, Hu 등(2013)의 연구에서는 한 개의 유리판과 폴리카보네이트(polycarbonate)를 적층한 모델을 사용하여 발사체의 속도에 따라서 유리판에 나타나는 방사형 균열의 크기, 크레이터 주변에 발생하는 잔물결 형태의 균열(ripple crack)과 중앙부까지의 거리 그리고 발사체의 리바운드(rebound) 속도 등을 비교하였으며, 유리판에 충격이 가해졌을 때 시간에 따라 유리판에 손상이 발생하는 단계 등을 실험과 비교, 분석하였다.

Bobaru 등(2012)은 7개의 적층 유리판과 폴리카보네이트 백킹(polycarbonate backing)이 되어있는 구조물에 충격을 가하는 실험을 페리다이나믹 해석 결과와 비교, 분석하였다. 분석 결과 크레이터(crater) 주변의 바늘 형태의 균열, 에너지 전파로 인해 나타나는 방사형 균열 등 전체적으로 헤르츠 타입(Hertz-type)의 손상이 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 그러나 실험에서는 각 유리판 사이에 층간 재료가 있었으나 페리다이나믹 해석 모델에서는 생략되었다. 이로 인해 첫 번째 유리판이 충격 이후 구조물로부터 박리되는 현상이 나타나고 과도한 파괴 패턴이 나타나는 등 실험 결과와 다소 상이한 결과를 보이기도 하였다. 또한 실험에서는 과도한 압축에 의해 나타나는 조밀한 원반(compact disk) 형태의 손상을 확인할 수 있었지만, 페리다이나믹 결과에서는 과도한 압축에 의한 것인지 아니면 층간 재료가 반영되지 않아 유리판 사이에서 충격으로 인해 발생하는 것인지 불분명하였다.

적층 구조물에서의 층간 재료는 각각의 적층 재료를 집합을 위한 재료로서 탄성이 강한 재료가 사용된다. 따라서 층간 재료를 통해 에너지가 전달될 경우 에너지 흡수가 발생할 수 있다. 또한 구조물에 외부 충격이 가해지는 경우 각각의 적층 재료가 층간 재료의 결합으로 인해 박리되지 않고 지속적인 상호작용이 발생할 수 있으며, 이는 구조물의 전체적인 거동에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 복수의 유리판이 층간 재료를 통해 적층된 구조물의 층간 재료의 효과를 효율적으로 반영하기 위한 가상절점을 이용한 페리다이나믹 층간 재료 모델을 제안하고 수치 테스트를 통해 검증한다.

2. 본 론

2.1 결합 기반 페리다이나믹 모델

해석영역 내 임의의 절점 \mathbf{x} 와 시간 t 에서 결합 기반 페리다이나믹 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

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

$$H_x = \{\mathbf{x}' \in R^n : |\xi| < \delta, \xi = \mathbf{x}' - \mathbf{x}\} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{f}(\mathbf{u}(\mathbf{x}', t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t), \mathbf{x}' - \mathbf{x})$ 는 비국부 영역 H_x 에 속한 두 절점 \mathbf{x} 와 \mathbf{x}' 사이의 결합에 의한 상호 작용력 함수이며, \mathbf{u} 는 변위벡터, \mathbf{b} 는 체적력, ρ 는 재료의 밀도이다. 본 연구에서는 미소탄성 재료(Silling, 2000)를 가정하였으며, 상호 작용력 함수 \mathbf{f} 는 선형의 미소탄성 포텐셜 ω 의 관계로부터 다음과 같이 정의 된다.

$$\mathbf{f}(\eta, \xi) = \frac{\partial \omega(\eta, \xi)}{\partial \eta}, \quad \omega(\eta, \xi) = \frac{c(\xi) s^2 \|\xi\|}{2} \quad (2)$$

여기서, $\xi = \mathbf{x}' - \mathbf{x}$, $\eta = \mathbf{u}(\mathbf{x}', t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ 이다. s 는 두 절점간 결합의 상대 신장 값이며, $s = (\|\xi + \eta\| - \|\xi\|) / \|\xi\|$ 으로 정의 된다. $c(\xi)$ 는 마이크로모듈러스(micromodulus)를 의미하며, 균질 변형(homogeneous deformation) 상태에서의 탄성재료의 이론적 변형에너지를 동일한 변형 조건에서 페리다이나믹 변형에너지와 일치시켜서 계산되며 다음과 같이 정의된다(Silling, 2000; Ha *et al.*, 2011).

$$c(\xi) = \begin{cases} \frac{6E}{\pi \delta^3 t (1-\nu)}, & \|\xi\| \leq \delta(2d) \\ \frac{18k}{\pi \delta^4}, & \|\xi\| \leq \delta(3d) \end{cases} \quad (3)$$

2.2 층간 결합 모델링

적층 구조물에 사용되는 층간 재료는 일반적으로 적층 재료 두께보다 매우 얇다. Fig. 1(a)의 case 1과 같이 균일 격자를 사용하여 적층 구조물을 모델링하는 경우에는 동일한 격자 크기로 얇은 층간재료를 엄밀하게 모델링 및 해석하는데 어려움이 있다. 또한 Fig. 1(b)의 case 2와 같이 1/10 두께의 층간 재료를 격자 정밀도를 고려하여 적층 재료와 함께 모델링 하게 되면, 적층 재료만을 모델링하는 경우에 비해 100배의 격자를 사용하게 되어 해석 시간 및 메모리 사용량을 증가시킨다. 적응적 격자 구조를 사용하여 격자 증가를 다소 완화시킬 수 있겠지만, 반복된 적층 구조의 효율적인 모델링 및 해석을 위해 본 연구에서는 Fig. 1(c)의 case 3와 같이 적층 재료의 절점 분포도는 유지하되 층간 재료를 가상 절점으로 대체한다.

Fig. 2는 층간 재료를 포함하는 적층 구조물 해석 모델을 도식적으로 나타낸 것이다. Ω_A 와 Ω_B 는 적층 재료의 해석 도메인을 나타내고 있으며, Ω_I 는 층간 재료의 해석 도메인을 의미한다. δ 는 적층 재료 절점 \mathbf{x} 가 갖는 비국부 영역의 반경이다. 적층 재료 도메인 내의 절점 \mathbf{x} 가 검은색 화살표와 같이

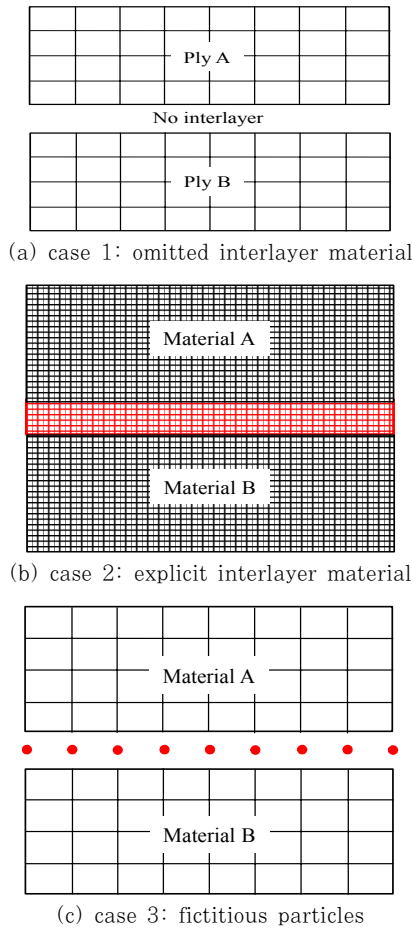


Fig. 1 Resolution matching for laminated structure

비국부 영역 내의 다른 적층 재료 절점과 갖는 결합의 경우 기존의 운동방정식 (1)을 따르지만, 적층 재료 절점 \mathbf{x} 의 비국부 영역 H_x 내부에 층간 재료의 가상절점 \mathbf{x}_I 가 존재하여 빨간색 화살표와 같은 결합을 갖는 경우, 가상절점 \mathbf{x}_I 와 갖는 상호작용을 포함하도록 운동방정식을 다음과 같이 수정한다.

$$\begin{aligned} \rho \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = & \int_{H_x} \mathbf{f}(\mathbf{u}(\mathbf{x}', t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t), \mathbf{x}' - \mathbf{x}) d\mathbf{x}' + \mathbf{b}(\mathbf{x}, t) \\ & + \int_{H_x} \mathbf{f}_I(\mathbf{u}(\mathbf{x}_I, t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t), \mathbf{x}_I - \mathbf{x}) d\mathbf{x} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 우변 세 번째 항의 하첨자 I 는 층간 재료의 가상절점을 의미하며, 층간 재료의 가상 절점 \mathbf{x}_I 는 $\mathbf{x}_I \in (H_x \cap \Omega)$ 이다. $\mathbf{f}_I(\mathbf{u}(\mathbf{x}_I, t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t), \mathbf{x}_I - \mathbf{x})$ 는 층간 재료의 물성을 사용한 적층 재료 절점 \mathbf{x} 와 가상절점 \mathbf{x}_I 의 상호 작용력을 나타낸다. \mathbf{f}_I 는 식 (1)의 $\mathbf{f}(\mathbf{u}(\mathbf{x}', t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t), \mathbf{x}' - \mathbf{x})$ 와 같이 식 (2,3)의 과정을 통해 얻을 수 있다.

Fig. 3은 가상 절점의 위치 및 변위 정보를 나타내는 그림이다. \mathbf{x}_A 와 \mathbf{x}_B 는 적층 재료와 층간 재료가 맞닿는 표면상의

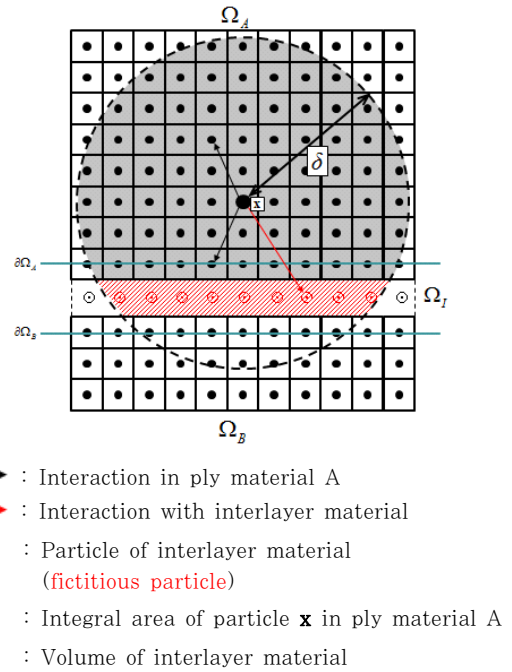


Fig. 2 Concept of interlayer model

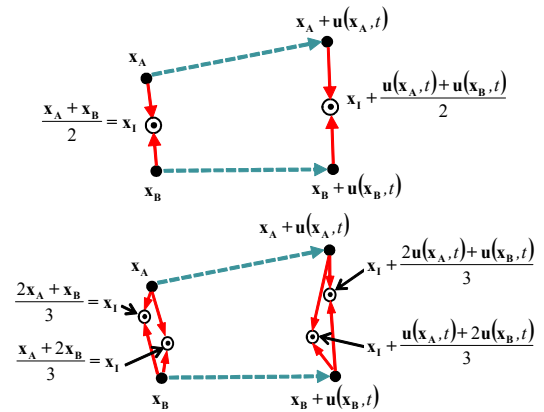


Fig. 3 Reference and current position of fictitious particles

적층 재료 절점을 의미한다. 가상 절점은 식 (1)과 같은 운동방정식으로 직접 계산되지 않기 때문에 층간 재료의 거동을 직접적으로 표현하지 않는다. 하지만 가상 절점은 적층 재료 A, B 모두와 동시에 상호작용하므로, 가상 절점의 위치 및 변위 정보는 각 적층 재료와 층간 재료가 맞닿는 표면상 절점의 평균값을 이용한다.

2.3 층간 결합 모델링의 효율성

Fig. 4는 층간 결합 모델링의 효율성을 확인하기 위한 2D 수치 예제 모델로서 300mm × 12.8mm 크기의 소다-라임 (soda-lime) 유리판 두 개가 0.6mm의 PVB 층간 재료를 이용하여 적층된 구조물이다. 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

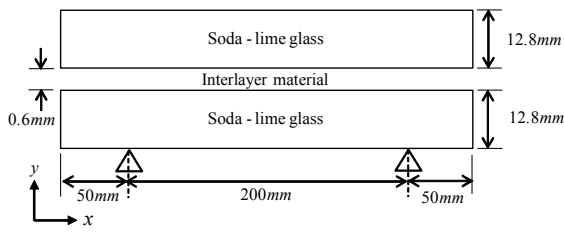


Fig. 4 2D model for efficiency check

Table 1 Material properties of soda-lime glass and polyvinyl butyral(PVB)

	soda-lime glass	PVB
Density(kg/m ³)	2,440	1,100
Young's modulus(GPa)	72	0.1
Energy release rate(J/m ²)	135	-

Fig. 1(a)의 case 1과 같이 층간 재료를 생략한 모델, Fig. 1(b)의 case 2와 같이 적층 재료를 층간 재료와 동일한 격자 밀도로 명시적으로 표현한 모델 그리고 Fig. 1(c)의 case 3과 같이 가상 절점을 이용한 층간 결합 모델링의 계산 시간과 메모리 사용량을 확인한다. Case 1과 3의 적층 재료로 사용된 소다-라임 유리의 절점 간격은 0.2mm로 분포되었으며, 각 유리판 당 절점 개수는 97,565개이다. Case 3에서 층간 재료를 대체하는 가상 절점은 1,501개가 사용될 수 있다. 층간 재료와 적층 재료를 동일한 격자로 모델링하는 case 2의 경우에는 층간 재료 두께 방향으로 적절한 수의 절점이 분포되도록 절점 간격을 0.05mm로 설정한다. 이 때 적층 재료는 각 유리판 당 1,542,257개, 층간 재료는 78,013개의 절점이 사용된다. 페리다이나믹 해석을 위한 비국부 영역의 크기는 세 모델에 공통적으로 $\delta=0.1\text{mm}$ 이다.

페리다이나믹 동적 해석에 대해 1회 반복 계산에 소요되는 계산 시간을 Table 2에서 비교하였다. 보다 일반적인 적층 구조물에 적용되는 경우에 대해 비교하기 위해 Fig. 4와 같이 2개의 유리판이 1개의 층간재료를 결합되어 적층되는 경우와 5개의 유리판이 총 4개의 층간재료로 반복하여 적층되는 경우를 함께 비교한다. 2개와 5개의 적층 수를 가지는 모델에 대해서, 층간 재료가 생략된 case 1 모델에 비해 층간 결합 모델링을 사용한 case 3 모델은 약 26.4~27.9%의 시간 증가만이 나타났지만, 적층 수 2개에 대해서 층간 재료가 명시적으로 표현된 case 3 모델은 case 1 모델에 비해 약 12,734.7%, 가상절점을 사용한 case 2 모델에 비해 약 10,055.3%의 시간 증가를 보이고 있다. 이는 적층 수 5개의 case 1 모델보다도 3,720.6% 많은 시간이며, 또한 적층 수 5개의 case 3 모델보다도 2,887.6% 많은 시간이다.

Table 3은 동적 해석에서 사용된 메모리를 나타내었다. 2개와 5개의 적층 수를 가지는 경우에 대해 case 1 모델에

Table 2 Time of each iteration(seconds)

# of layers	Case 1	Case 3	Case 2
2	154.68	195.49	19,852.66
5	519.62	664.50	-

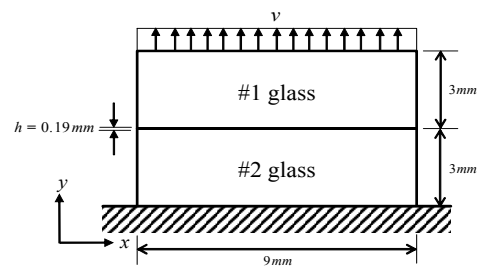
Table 3 Using memory size(Giga byte)

# of layers	Case 1	Case 3	Case 2
2	2.98	4.06	44.72
5	7.44	10.15	-

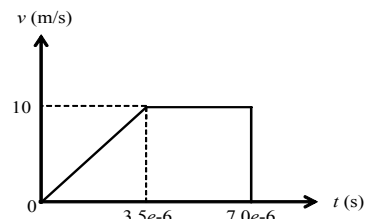
비해서 case 2 모델은 약 36.2~36.4%의 메모리 증가가 나타났으나, 적층 수 2개에 대해서 층간 재료가 명시적으로 표현된 case 3 모델은 case 1 모델에 비해 약 1,400.6%, case 2 모델에 비해 약 1,001.5%의 메모리 사용량의 증가를 보이고 있다. 이는 적층 수 5개의 case 1 모델보다도 약 501.1% 메모리 사용량이 증가하였으며, 마찬가지로 적층 수 5개의 case 2 모델보다도 약 340.6% 많은 메모리를 사용한다.

2.4 층간 결합 모델링의 탄성 거동

일반적인 적층 재료에서는 탄성이 높은 PVB, 폴리우레탄과 같은 재료의 층간 재료가 사용된다. 본 장에서는 가상 절점 층간 결합 모델링을 적용한 적층 구조물의 탄성 거동을 확인한다. Fig. 5(a)는 가로 9mm, 두께 3mm의 소다-라임 유리 두 개를 층간 결합 모델링을 통해 적층 및 결합한 모델이다. 또한 첫 번째 유리판 상면에 Fig. 5(b)와 같은 속도장을 부여하였다. 속도장은 $t=0.0(s)$ 에서 $t=3.5e-6(s)$ 까지 선형으로 증가하며, $t=7.0e-6(s)$ 에서 제거된다. 두 번째 유리판의 하면은 고정하였으며, 두 유리판은 0.19mm 두께의 PVB 층간 재료를 통해

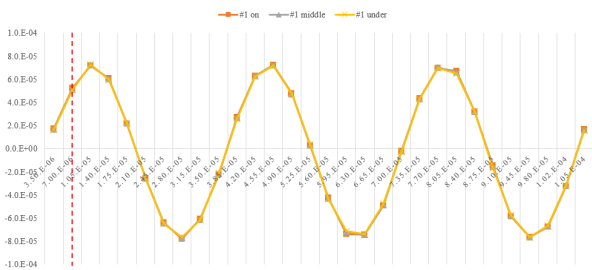


(a) model dimension and boundary condition

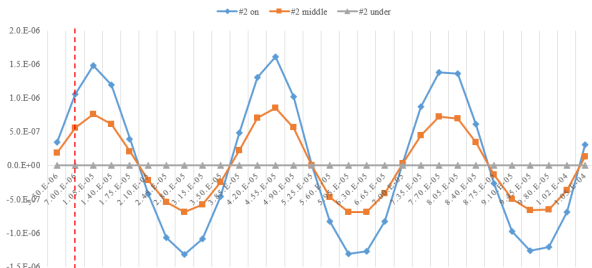


(b) displacement loading

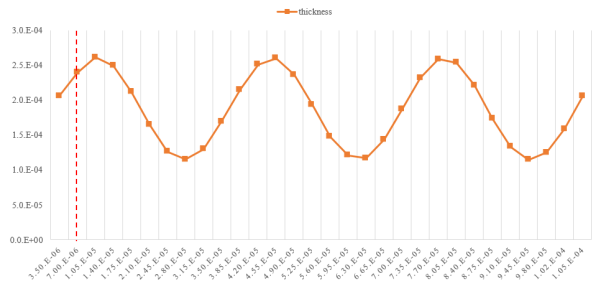
Fig. 5 Numerical example problem(2D)



(a) #1 soda-lime glass



(b) #2 soda-lime glass



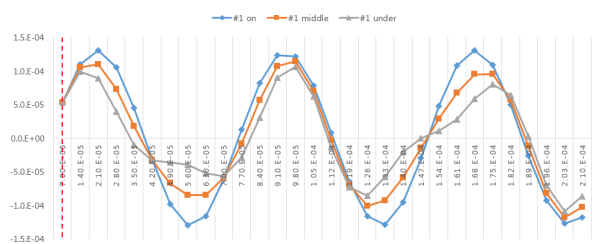
(c) thickness of interlayer

Fig. 6 Y-displacement of tension test

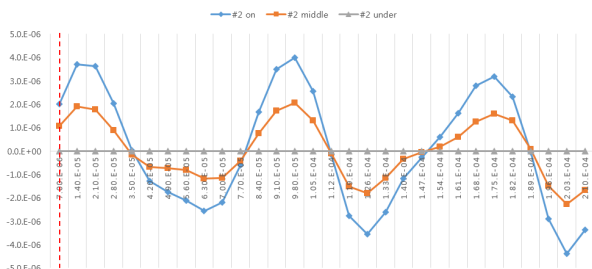
결합하였다. 적층 구조물의 탄성 거동을 검토하기 위해서 재료의 손상은 고려하지 않았다. 재료의 각 물성 값은 Table 1과 같다. Table 1에서 적층 재료와 층간 재료의 실제 포아송 비는 각각 0.22와 0.49로 차이를 보이나, 결합 기반 페리다이나믹에서는 포아송 비가 1/3(in 2D)로 고정된다(Silling, 2000). 각 재료의 절점 간격은 $\Delta x = 0.075\text{mm}$ 이며, 비국부 영역 H_x 의 반경은 $\delta = 0.375\text{mm}$ 이다. 시간 간격은 $\Delta t = 17.5e-9(s)$ 이다.

Fig. 6(a)와 (b)는 각각 첫 번째와 두 번째 유리판 y 축 변위의 시간 이력을 나타낸다. 변위 측정 지점은 x 축 방향 중앙에 대해서 각각 첫 번째와 두 번째 유리판의 y 축 방향 상, 하면 및 중앙 지점이다. Fig. 6(c)는 층간 결합을 이루는 두 유리판의 인접 표면 사이의 거리를 이용해 층간 재료의 두께를 시간에 따라 관측한 것이다. 모든 결과는 탄성 거동을 분석하기 위해 속도장이 제거된 시점(적색 점선) 이후 시간 간격 $3.5e-6(s)$ 으로 측정되었다.

첫 번째 유리판은 측정된 세 지점에서 유사한 변위 및 탄성 거동을 보였다(Fig. 6(a)). 두 번째 유리판은 첫 번째 유리판과 유사한 탄성 거동을 보이면서 변위의 크기는 고정된 하면으로



(a) #1 soda-lime glass



(b) #2 soda-lime glass

Fig. 7 X-displacement of shear test

내려갈수록 감소하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6(b)). 이는 층간 결합을 통해 두 유리판으로 탄성에너지 전달이 잘 이루어지고 있음을 보여준다. 또한 Fig. 6(c)에서 층간 재료는 결합된 두 유리판의 탄성 거동 패턴에 맞추어서 초기 두께인 0.19mm를 기준으로 인장 시 증가, 압축 시 감소하는 반복적인 패턴을 보임으로서 탄성 거동을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5(a)의 모델에서 y 축 방향 대신 양의 x 축 방향 속도장을 첫 번째 유리판 후측면에 부여해 전단 테스트를 수행한 결과이다. 속도장의 크기 및 시간 이력은 Fig. 5(b)와 같다. Fig. 7(a)와 (b)는 각각 첫 번째와 두 번째 유리판의 x 축 변위 시간 이력을 $7.0e-6(s)$ 의 시간간격으로 나타낸 것이다. 변위 측정 지점은 Fig. 6의 경우와 같다. 속도장이 제거되는 시점(적색 점선)인 $t = 7.0e-6(s)$ 까지는 첫 번째 유리판의 상, 중, 하면 지점의 변위가 동일하게 나타나며, 이후에는 값 다소 차이를 보이지만 반복적인 패턴이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 6 테스트와 같이 두 유리판 사이의 층간 결합이 탄성 거동을 하기 때문에 두 번째 유리판에서 고정단인 하면을 제외한 상면 및 중앙 지점에서의 변위가 첫 번째 유리판과 유사한 탄성 거동을 하는 것을 확인할 수 있다. 이상과 같은 인장, 전단 테스트를 통해 층간 결합 모델을 통한 상, 하 유리판 간 탄성에너지 전달이 잘 이루어지고 전체적으로 반복적인 탄성 거동이 나타나는 것을 확인하였다.

2.5 단거리 상호작용력을 통한 투과현상 방지

층간 결합 모델이 과도한 압축 하중을 받는 경우 Fig. 8과 같이 서로 다른 적층 재료 절점이 투과하는 현상이 발생할 수

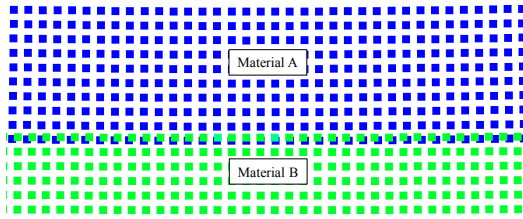


Fig. 8 Penetration of material A and B

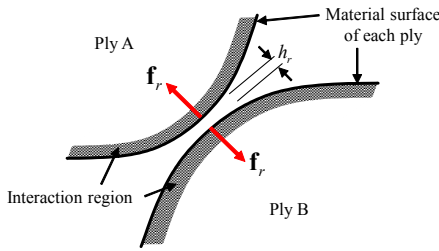


Fig. 9 Interaction regions

있다. 투과 문제를 방지하기 위해서 식 (5)의 수치적인 힘을 도입한다. 식 (5)는 단거리 상호작용력으로서 Fig. 9와 같이 각 적층 재료 도메인 내부에 재료 표면으로부터 일정 영역을 상호작용 영역으로 지정하고 적층 재료 A와 B의 상호작용영역 내에 있는 절점 사이의 거리가 일정 이하로 가까워질 경우 해당 절점에 부여된다.

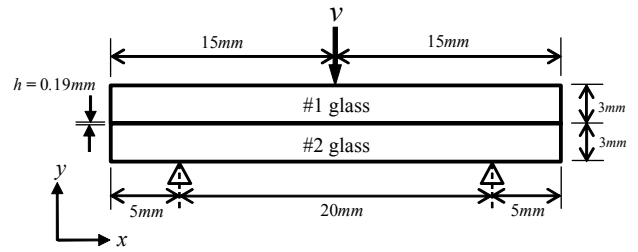
$$f_r(\mathbf{y}_A, \mathbf{y}_B) = \frac{\mathbf{y}_A - \mathbf{y}_B}{\|\mathbf{y}_A - \mathbf{y}_B\|} \min \left\{ 0, c_r \left(\frac{\|\mathbf{y}_A - \mathbf{y}_B\| - (r_A + r_B + h_r)}{r_A + r_B + h_r} \right) \right\} \quad (5)$$

$$(\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{u}) \quad (6)$$

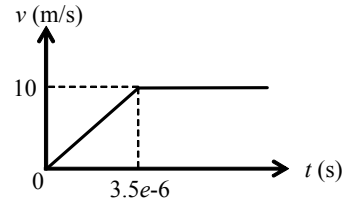
$$c_r = kc, (k: \text{constant}) \quad (7)$$

여기서, $f_r(\mathbf{y}_A, \mathbf{y}_B)$ 는 일정 이하로 가까워진 적층 재료 A, B의 절점에 의해 가해지는 척력을 의미하며, r_A 와 r_B 는 각각 적층 재료 A와 B의 절점 반경을 의미한다. 식 (6)의 c_r 은 척력의 크기를 나타내는 것으로 마이크로몰리우스의 상수 배이며, 식 (7)의 h_r 은 층간 재료 두께 h 의 압축한계를 의미한다. 식 (7)에서 α 가 1인 경우 층간 재료는 원래 두께 h 를 유지해야 하며 (비압축), 0인 경우는 층간 재료의 두께가 0이 될 때까지 압축될 수 있다.

$f_r(\mathbf{y}_A, \mathbf{y}_B)$ 는 절점 간 거리 외에 외부 인자인 c_r 에 따라 크기가 변화하며, h_r 에 의해 적용되는 시점이 바뀐다. Fig. 10은 f_r 과 c_r 및 h_r 의 상관관계를 확인하기 위한 테스트 모델이다. 두 유리판은 소다-라임 유리이며, 층간 재료는 PVB이다. 첫 번째 유리판의 상면 중앙부에 속도장을 부여하였다(Fig. 10(b)). 속도장은 $t=3.5e-6(s)$ 까지 선형으로 증가하다가



(a) model dimension and boundary condition

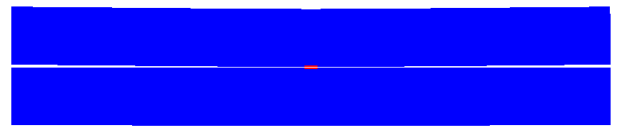


(b) displacement loading

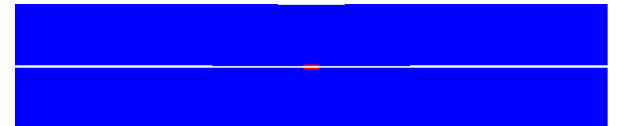
Fig. 10 Test model for find reasonable condition

이후에는 10m/s로 일정하게 부여된다. 그리고 적층 구조물의 각 측면으로부터 5mm지점에 지지단을 구성하였다. 층간 재료의 두께는 $h=0.19mm$ 으로 설정하였다. 두 유리판의 절점 간격은 $\Delta x=0.075mm$, 비국부 영역의 반경은 $\delta=0.375mm$, 시간간격은 $\Delta t=17.5e-9(s)$ 이다. 본 테스트는 서로 다른 적층 재료 절점의 투과 방지 기술을 튜닝하기 위한 파라미터 테스트로서 재료의 손상은 고려되지 않는다.

Fig. 11은 $c_r=10e$ 로 고정하고, h_r 을 각각 $0.25h$, $0.5h$, $0.75h$ 으로 바꾸어 가며 해석을 수행해 척력이 발생한 부분을 나타낸 결과이다. $h_r=0.25h$ 일 경우, $t=3.45e-6(s)$ 일 때 층간 재료로 결합된 두 유리판의 인접 표면 중앙에서 척력이 발생하였다. $h_r=0.5h$ 일 경우에는 $t=4.725e-6(s)$ 일 때



(a) $h_r=0.25h$, at $t=3.45e-6(s)$



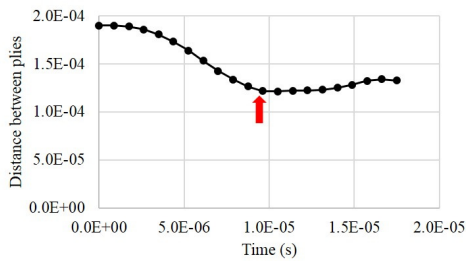
(b) $h_r=0.5h$, at $t=4.725e-6(s)$



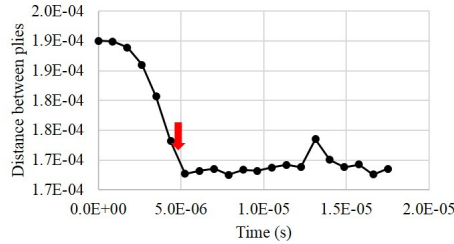
(c) $h_r=0.75h$, at $t=17.5e-9(s)$

■ : repulsive force operating region

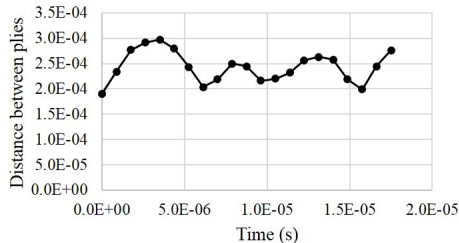
Fig. 11 Repulsive force operate time



(a) $h_r = 0.25h$



(b) $h_r = 0.5h$



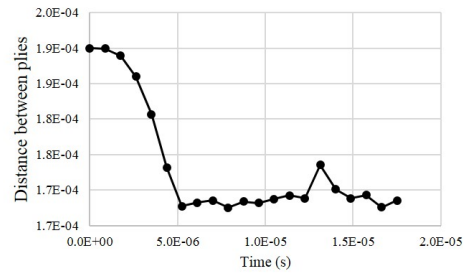
(c) $h_r = 0.75h$

Fig. 12 Distance between glass surface at the center ($c_r = 10c$)

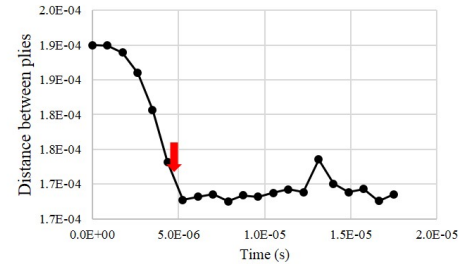
비슷한 지점에서 척력이 발생하였다. $h_r = 0.75h$ 의 경우는 해석 초기 단계부터 모든 면에서 접촉 조건이 발생하기 때문에 압축 한계 조건이 적절하지 않은 것으로 판단된다. 시간에 따른 압축 거동을 구체적으로 확인하기 위해 Fig. 11의 각 경우에 대해 중앙부에서 층간 재료 두께(두 유리판의 인접 표면거리)를 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12의 모든 경우에 대해서 두 유리판 표면 사이의 초기 거리는 층간 재료의 두께와 같은 0.19mm로 동일하다. h_r 이 0.5h 이하인 Fig. 12(a)와 (b)의 경우 식 (5)의 상호작용력으로 인해서 두 유리판 사이의 거리가 일정 이하로 압축되지 않아 합리적인 거리 변화를 확인할 수 있다. 그러나 $h_r = 0.75h$ 인 Fig. 12(c)에서는 압축 거동이 아닌 전체 거동이 진동하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13에서는 상호작용력이 적절하게 작동하는 $h_r = 0.5h$ 의 경우에 대해서 상호작용력의 크기에 영향을 미치는 파라미터인 c_r 을 5c에서 15c로 변화시키며 두 유리판 인접 표면 사이의 거리를 나타내었다. c_r 의 크기와 관계없이 상호작용력이 발생하는 시점(적색 화살표) 및 두 유리판 사이의 거리 변화는



(a) $c_r = 5c$



(b) $c_r = 15c$

Fig. 13 Distance between glass surface at the center ($h_r = 0.5h$)

유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 $h_r = 0.25h$ 에 대해서도 동일한 테스트를 통해 Fig. 13과 유사한 결과를 확인하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 적층 구조물에서 층간 재료를 직접적으로 표현하지 않고 가상 절점과 결합 기반 페리다이나믹 이론의 운동방정식을 이용하여 효율적인 층간 결합 모델링을 제안하였다. 층간 결합 모델링의 검토를 위해 인장 및 전단 테스트를 수행하여 적층 구조물 및 층간 결합의 탄성 거동이 적절하게 나타남을 확인하였다. 또한 층간 재료를 가상의 절점으로 대체함으로써 발생할 수 있는 서로 다른 적층 재료 절점 간 투과 현상을 방지하도록 상호작용력을 적용하였고, 파라미터 테스트를 통해 적절한 투과 방지 모델을 구성하였다. 본 연구를 통해 효율적인 해석시간과 메모리 사용량으로 적층 구조물의 층간 결합 모델을 구성하였다. 본 연구는 가상절점을 이용한 새로운 형태의 층간 결합 모델링에 대해 검토하였다. 본 연구는 가상절점이 사용된 층간 재료의 페리다이나믹 해석 시 수치적분의 정확도를 개선하는 연구가 추가적으로 요구되며, 2차원과 3차원 다중 적층 구조물의 동적 파괴 해석으로 확장될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구

재단이 주관하는 기본연구지원사업(No.2015R1D1A1A0105 8649)의 지원과 2016년도 군산대학교 교수장기국외연수경비의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한 방위사업청과 국방과학연구소의 개별기초연구 자유공모 사업으로 수행되었습니다(UD160044BD).

References

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

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

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.279~285.

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.

Silling, S.A. (2000) Reformulation of Elasticity Theory for Discontinuities and Long-Range Forces, *J. Mech. & Phys. Solids*, 48, pp.175~209.

Parks, M.L., Seleson, P., Plimpton, S.J. Silling, S.A., Lehoucq, R.B. (2011) *Peridynamics with LAMMPS: A User Guide v0.3 Beta*, Sandia National Laboratories.

요 지

결합 기반 페리다이나믹 모델은 취성재료의 동적파괴 해석에 많이 이용되고 있으며, 최근의 연구(Bobaru *et al.*, 2012)를 통해 적층유리 구조물의 동적 파괴 패턴 분석에도 활용되었다. 특히 실험(Bless *et al.*, 2010)에서 나타난 적층유리 구조물의 다양한 손상 형태(압축 영역, Floret, Hertz-type 균열 등)를 결합 기반 페리다이나믹 시뮬레이션을 이용하여 구현하였다. 그러나 실제 적층 구조물은 각 유리판 사이를 탄성이 있는 층간 재료로 결합하는 반면, 기존의 페리다이나믹 수치 시뮬레이션에서는 층간 재료 결합을 무시하고 각 유리판이 직접 결속되도록 가정하여 층간 재료 효과가 무시되었다. 본 연구에서는 페리다이나믹 층간 재료 모델링을 통해 실제 적층 구조물에 보다 근접한 페리다이나믹 수치 해석 모델을 제안한다. 일반적으로 층간 재료는 매우 얇기 때문에 층간 재료를 명시적으로 모델링할 경우 많은 해석시간과 메모리가 소모되어 비효율적이다. 따라서 본 연구에서는 명시적 모델링을 대신하여 가상 절점을 통해 층간 재료를 모델링한다. 수치 예제를 통해 제안된 층간 재료 모델링의 효율성 및 정확성을 검토한다. 또한 압축 상태의 적층 구조물 해석을 위해 단거리 상호작용력에 기반한 투과 방지 기법을 도입하고 파라미터 테스트를 통해 검증한다.

핵심용어 : 결합 기반 페리다이나믹, 층간 결합 모델링, 적층 구조물, 가상 절점, 투과 방지