비국부 층간 결합 모델을 고려한 다중적층 유리의 페리다이나믹 충돌 파괴 해석

하 윤 도^{1*} · 안 태 식¹

¹군산대학교 조선해양공학과

Peridynamic Impact Fracture Analysis of Multilayered Glass with Nonlocal Ghost Interlayer Model

Youn Doh Ha^{1*} and Tae Sick An¹

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

Abstract

We present the peridynamic dynamic fracture analysis to solve impact fracturing of multilayered glass impacted by a high-velocity object. In the most practical multilayered glass structures, main layers are glued by thin elastic masking films. Thus, it is difficult and expensive to construct the numerical model for such a multilayered structure. In this paper, we employ efficient numerical modeling of multilayered structures with a nonlocal ghost interlayer model in which ghost particles are distributed between main layers and they are interacting with each other in peridynamic way. We also consider a simple nonlocal contact condition in peridynamic frameworks to solve impact and penetration of the high-velocity impactor to the multilayered structure. Finally we can confirm the fracture capabilities of the method using a multilayered glass model in which 7 glass layers and a single elastic backing layer are affixed by polyvinyl butyral films.

Keywords : peridynamics, multilayered glass, nonlocal ghost interlayer model, impact fracturing

1. 서 론

유리와 같은 취성 재료는 충격 등에 의해 매우 복잡한 손상 패턴과 파편 발생이 동반된다. 분기 균열, 균열 불안정성, 연쇄 균열, 2차 균열 등 다양한 취성 파괴 현상들은 여러 실험 연구를 통해 관측된 바 있다(Bowden *et al.*, 1967; Ramulu *et al.*, 1983; 1985; Ravi-Chandar and Knauss, 1984a; b; Ravi-Chandar, 2004). 특히 동적 취성 균열은 충격 및 변형에 의한 응력파의 간섭에 영향을 받아 직선으로 전파하던 균열이 휘어지거나 둘 이상의 가지로 분기하고 이미 존재하는 균열면에 수직 방향으로 2차 균열이 발생하기도 한다. 다중적층 유리는 유리 재료의 복잡하고 파괴적인 손상을 완화시키고 유연성을 보완하기 위해 개발된 복합적층재료로서 내충격성 및 부착성이 좋은 폴리우레탄(polyurethane)이나 폴리비닐부티랄(polyvinyl

butyral) 등으로 제작된 필름을 여러 장의 유리판 사이에 적층하여 구성한다. 다중적층 유리는 자동차의 전면유리, 강화유리문 및 건축자재 등 다양한 분야에 폭넓게 사용되고 있다.

본 연구에서는 재료의 불연속 현상을 해석하기에 적합하게 구성 및 개발된 페리다이나믹 해석법(peridynamics; Silling, 2000)을 통해 다중적층 유리의 동적 취성 파괴 현상을 시뮬레이션한다. 선행연구(Ha and Bobaru, 2010; 2011; Ha and Cho, 2011)에서는 페리다이나믹 해석법을 사용하여 단층 유리의 다양한 동적 취성 파괴 현상을 모사할 수 있음을 확인하였다. 특히 손상 경향이 수치적으로 수렴함을 확인하였다(Ha and Bobaru, 2010). 또한 Hu 등(2013)은 층간 재료가 없이 단순 적층된 단일 유리판과 폴리카보네이트 백킹(polycarbonate backing)에 충격을 가하여 발사체 속도에 따른 유리판 방사형 균열(radial cracks)의 크기, 크레이터

* Corresponding author:

Tel: +82-63-469-1856; E-mail: ydha@kunsan.ac.kr
Received October 23 2018; Revised October 29 2018;
Accepted October 30 2018

©2018 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.

(crater) 주변의 물결 균열(ripple cracks) 등을 페리다이나믹 해석법으로 시뮬레이션하여 실험과 비교, 분석하였다. Bobaru 등(2012)은 7개의 유리판과 1개의 PC backing이 단순 적층된 다중적층 유리에 대한 동적 취성 파괴 현상을 페리다이나믹 해석을 통해 분석하였다. 실험(Bless and Chen, 2010)으로 검토된 다중적층 유리의 다양한 동적 취성 파괴현상이 Bobaru 등(2012)에서 시뮬레이션을 통해 확인되었지만, 실험 모델에서 각 적층 사이를 마스킹(masking)하는 중간 재료가 시뮬레이션 모델에서는 모델링 제약으로 인위적으로 생략되었다. 이로 인해 실험 결과와 달리 상부 유리판들이 심각한 박리 현상을 겪고 충격과 전달로 인한 과도한 손상이 전체적으로 나타났다. 본 연구에서는 다중적층 유리에 Ahn과 Ha(2017)에서 제안된 비국부 가상절점 중간 재료 모델링 기법을 적용하여 중간 재료를 효율적으로 모델링한다. 또한 Bless와 Chen(2010)에서 사용된 고속 충돌/침투하는 탄체의 작용을 보다 엄밀하게 고려하기 위해 비국부 페리다이나믹 접촉 모델을 고려하여 다중 접촉/충돌 해석을 수행하였다. 페리다이나믹 동적 취성 파괴 시뮬레이션을 통해 중간 재료가 고려된 다중적층 유리의 다양한 손상 거동을 분석하고 PC backing의 변형에 따른 분석을 통해 고속 충돌 탄체의 충격에 의한 손상과 구조 변형에 의한 연쇄적인 손상을 구분할 수 있었다.

2. 페리다이나믹 해석 모델

2.1 페리다이나믹 해석법(peridynamics)

페리다이나믹 해석 모델(Silling, 2000)은 공간 미분항을 포함하지 않는 적분식을 사용하는 연속체 기반 해석 기술이다. 절점 $\mathbf{x}$ 와 시간 t 에서 페리다이나믹 운동방정식은 다음과 같다.

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \int_{H_{\mathbf{x}}} \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}) dV_{\boldsymbol{\xi}} + \mathbf{b}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

여기서, $H_{\mathbf{x}} = \{\mathbf{x}' \in R^n : |\mathbf{x}' - \mathbf{x}| < \delta\}$ 는 기준 절점 $\mathbf{x}$ 와 상호작용하는 $\mathbf{x}'$ 들의 집합인 비국부 해석 영역이다. $\mathbf{b}$ 는 체적력, ρ 는 재료의 밀도이다. 두 절점 간 상호작용력 $\mathbf{f}$ 는 두 절점의 초기 결합 거리 $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{x}' - \mathbf{x}$ 와 상대 변위 $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{u}(\mathbf{x}', t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ 에 대한 관계식으로 표현되며, 미소탄성 재료(micro-elastic material)에 대해 다음과 같이 정의된다(Silling, 2000).

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

여기서, ω 는 미소탄성 포텐셜(micro-elastic potential)이

며, $s = (\|\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\eta}\| - \|\boldsymbol{\xi}\|) / \|\boldsymbol{\xi}\|$ 는 두 절점 간 상대 신장(relative elongation)이다. 이와 같은 상호작용력 $\mathbf{f}$ 는 두 절점에 대한 결합 $\boldsymbol{\xi}$ 의 방향으로 상호 작용하는 짝힘(pairwise force density)이며 반대칭(antisymmetric) 관계($\mathbf{f}(\mathbf{x}', \mathbf{x}, t) = -\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{x}', t)$)를 가진다. 미소재료상수 $c(\boldsymbol{\xi})$ 는 균질 변형을 가정한 등방성 탄성재료의 변형에너지를 미소탄성 페리다이나믹 변형에너지와 등가시켜서 계산되며 3차원 모델에 대해서 $18 k / \pi \delta^4$ 가 된다(Silling, 2000).

페리다이나믹 이론은 식 (1)에 의해 불연속적인 힘의 관계를 모순없이 적용할 수 있기 때문에, 손상 해석을 위해 별도의 모델링을 적용하지 않고 다음과 같이 구성방정식에 비가역적 재료 손상 조건을 도입하여 PMB(prototype microelastic brittle) 재료를 구성할 수 있다(Silling and Askari, 2005).

$$\mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}) = \mu(t, \boldsymbol{\xi}) c(\boldsymbol{\xi}) s(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}) \quad (3)$$

여기서, μ 는 경로 의존적인 상수 함수(history-dependent scalar function)로 상대 신장량 s 가 임계 신장량 s_0 을 넘지 않으면 1이 되어 결합 간 상호작용이 유효하지만 $s \geq s_0$ 이면 $\mu = 0$ 으로 결합 간 상호작용이 무효화되며 손상된 결합은 다시 복구되지 않는다. 또한 절점 $\mathbf{x}$ 에 대한 손상 정도를 다음과 같이 계산한다.

$$D(\mathbf{x}, t) = 1 - \frac{\int_{H_{\mathbf{x}}} \mu(t, \boldsymbol{\xi}) dV_{\boldsymbol{\xi}}}{\int_{H_{\mathbf{x}}} dV_{\boldsymbol{\xi}}} \quad (4)$$

이와 같이 PMB 재료에서 결합은 임계 신장량 s_0 에 도달하면 영구 손상되며, 결합이 손상되는 시점의 미소탄성 포텐셜은 식 (2)에 의해 $\omega_0(\boldsymbol{\xi}) = c(\boldsymbol{\xi}) s_0^2 \|\boldsymbol{\xi}\| / 2$ 가 된다. 비국부 해석 영역 내에서 복수의 결합이 손상되는 시점의 에너지를 모두 적분한 값을 재료 손상으로 인한 에너지 해방률(energy release rate) G_0 와 등가시키고 s_0 에 대해 정리하면 임계 신장량은 다음과 같다(Silling and Askari, 2005).

$$s_0 = \sqrt{\frac{10 G_0}{\pi c \delta^5}} = \sqrt{\frac{5 G_0}{9 k \delta}} \quad (5)$$

2.2 비국부 중간 결합 모델

다중적층 유리는 취성 재료인 유리판들을 탄성이 높은 중간 재료로 적층하여 파괴 안정성을 보완한 재료이다. 이때 층간

구조는 일반적으로 유리 두께보다 매우 얇기 때문에 두 적층 구조에 대한 격자 정밀도를 모두 만족시키는 수치모델을 구성하기가 어렵다. 본 연구에서는 선행 연구(Ahn and Ha, 2017)에서 제안된 비국부 층간 재료 모델을 통해 효율적으로 다중 적층 구조물을 모델링한다. 적층 구조 사이에 구성되는 비국부 층간 재료 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 이 때 각 영역 Ω_A 와 Ω_B 는 서로 다른 적층 재료 영역이다. Ω_I 는 층간 재료 영역으로 인접한 두 적층 재료 영역 사이에서 가상 절점들로 구성된다. 한 적층 재료 영역의 절점 $\mathbf{x}$ 가 동일 영역 내의 다른 절점과 결합하는 경우(흑색 화살표)에는 식 (1)을 통해 모델링된다. 그러나 절점 $\mathbf{x}$ 가 층간 재료를 구성하는 가상 절점 $\mathbf{x}_I \in (H_x \cap \Omega_I)$ 와 결합하는 경우(적색 화살표)에는 다음과 같이 추가적인 비국부 상호작용을 고려한다.

$$\rho \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{x}, t) = \int_{H_x} \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}) dV_{\boldsymbol{\xi}} + \int_{H_x} \mathbf{f}_I(\boldsymbol{\eta}_I, \boldsymbol{\xi}_I) dV_{\boldsymbol{\xi}} + \mathbf{b}(\mathbf{x}, t) \quad (6)$$

여기서, $\boldsymbol{\xi}_I = \mathbf{x}_I - \mathbf{x}$ 와 $\boldsymbol{\eta}_I = \mathbf{u}(\mathbf{x}_I, t) - \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ 이다. 층간 재료를 미소탄성 재료로 가정하면 상호작용력 $\mathbf{f}_I(\boldsymbol{\eta}_I, \boldsymbol{\xi}_I)$ 는 식 (2)와 동일한 과정으로 구성된다. 가상 절점의 위치와 변위는 최소 거리에 인접한 각 적층 재료 절점 $\mathbf{x}_A$ 와 $\mathbf{x}_B$ 의 위치와 변위에 대해 다음과 같이 의존적으로 구성할 수 있다.

Fig. 1 Concept of interlayer model(Ahn and Ha, 2017)

$$\mathbf{x}_I = \frac{\mathbf{x}_A + \mathbf{x}_B}{2}, \mathbf{u}(\mathbf{x}_I, t) = \frac{\mathbf{u}(\mathbf{x}_A, t) + \mathbf{u}(\mathbf{x}_B, t)}{2} \quad (7)$$

2.3 비국부 접촉(nonlocal contact) 모델

서로 다른 물체 사이의 충돌 파괴 해석을 위해서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 비국부 접촉(nonlocal contact) 모델을 구성한다. 인접한 두 물체 A와 B 사이에 비국부 접촉 영역을 설정하고 각 물체의 접촉 영역 내 절점들에서 상대 물체 절점들과의 거리를 산정하여 접촉 여부를 결정한다. 서로 다른 물체의 절점이 일정 거리(r_s) 이하로 가까워지면 다음 식과 같은 penalty force를 계산하여 각 절점의 상호작용력에 추가한다.

$$\mathbf{f}_s(\mathbf{y}_A, \mathbf{y}_B) = \frac{\mathbf{y}_A - \mathbf{y}_B}{\|\mathbf{y}_A - \mathbf{y}_B\|} \min \left\{ 0, \frac{c_s (\|\mathbf{y}_A - \mathbf{y}_B\| - 2r_s)}{2r_s} \right\} \quad (8)$$

여기서, $\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{u}$ 이고 $c_s = kc$, (k : constant)이다. 유한요소법 등에서도 거리를 통해 접촉 여부를 판별하고 강성 수정 혹은 penalty term를 고려하는 유사한 접촉 모델이 사용된다. 그러나 페리다이나믹 해석 모델은 개별 물체 내에서도 비국부 해석 영역을 통해 개별 절점에 대한 계산이 이루어지고 있기 때문에 비국부 접촉 영역 구성이 자연스럽게 이루어진다. 또한 기존 국부 해석법에 대한 접촉 해석에서 요구되는 별도의 내부 반복계산 등을 통한 안정화 과정이 없이도 접촉 해석이 안정적으로 이루어진다.

Fig. 2 Nonlocal contact model

3. 다중적층 유리 충돌 파괴 해석

3.1 다중적층 유리 및 충돌체 모델링

Fig. 3과 같이 7개의 소다라임(soda-lime) 유리판과 1개의 폴리카보네이트 백킹으로 구성된 다중적층 유리 구조를 고려한다. 각 유리판은 한 변의 길이가 0.2m인 정사각형이며 PC

backing은 한 번의 길이가 0.24m인 정사각형 탄성판으로 구성된다. 최상단(#1)과 최하단(#7) 유리판의 두께는 6.4mm이지만 나머지(#2~#6) 유리판의 두께는 12.7mm이다. PC backing의 두께는 13.3mm이다. 유리판 및 PC backing은 0.6mm 두께의 PVB(polyvinyl butyral) 층간 재료로 masking이 된다. 각 재료들의 물성치는 Table 1에 정리하였다. 소다라임 유리의 에너지 해방률(energy release rate)은 135J/m^2 로 유리의 취성 손상 기준이 된다. 충돌체는 Fig. 4와 같은 구조를 가지는 50구경(caliber) 탄체로서 머리 부분의 곡률 반경이 몸체 직경의 3배인 3CRH(3 calibre radius head) 구조이다. 탄체는 최상단 유리판(#1)의 중앙에 초기 속도 $1,120\text{m/s}$ 로 충돌하여 충돌 및 침투 파괴를 일으킨다. 탄체의 물성은 $\rho=7,800\text{kg/m}^3$, $E=210\text{GPa}$, $\nu=0.27$ 이다.

유리판 및 PC backing의 페리다이나믹 모델링에 사용된 절점은 총 2,096,716개이며, 균일 절점 간격 약 1.24mm로 구성되었다. 미국부 계산 영역은 반경 약 4.96mm의 구형으로 설정하였다. 탄체는 절점 간격 약 0.8mm로 총 5,829개의 절점이 사용되었다. 안정적인 Explicit transient dynamics 해석을 위해 균일 시간 간격 10ns 가 사용되었다.

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

	Soda-lime	PC	PVB
Density(kg/m^3)	2,440	1,200	1,100
Young's modulus(GPa)	72	2	0.1
Poisson's ratio	0.22	0.37	0.42

Fig. 3 Multilayered glass model

Fig. 4 50 caliber(3CRH) impactor

3.2 페리다이나믹 충돌 파괴 해석

페리다이나믹 손상 해석 결과 검토를 위해 비슷한 구성의 다중적층 유리에 대한 충돌 파괴 실험 결과(Bless and Chen, 2010)를 Fig. 5에 개념적으로 나타내었다. 탄체와 PC backing은 손상을 입지 않고 유리판들만 손상을 입었으며, 탄체는 최상부로부터 2번째 유리판(#2)까지 침투하였으나 완전히 관통하지는 못하였다. #2 유리판까지는 충돌/관통에 의한 압축성 손상 특성이 주를 이루었으나 #3~#6까지는 충격파 및 변형이 전달되면서 아래로 갈수록 넓어지는 Hertz type의 손상 패턴이 확인되었다.

Fig. 6은 해석 시간 $35\mu\text{s}$ 에서 #1~#3 유리층의 손상 정도를 두께 방향 좌표계인 (z)축의 상(+ z)면과 하(- z)면에 대해 각각 표현하였다. 예를 들어, 최상단 #1 유리층의 상(+ z)면은 탄체와 첫 번째로 충돌하는 면이고 하(- z)면은 두께 6.4mm 만큼 아래쪽을 (- z)축 방향에서 바라본 것을 의미한다. 참고로 #2 유리층의 상(+ z)면은 #1 유리층 하(- z)면에서 PVB 층간면 두께만큼 아래에 존재한다. 유리층의 손상 정도는 식

Fig. 5 Schematic damage pattern in cross-sectional view(experimental results, Bless and Chen, 2010)

(a) Damage on(+ z) face(#1, #2, #3 from left)

(b) Damage on(- z) face(#1, #2, #3 from left)

(c) Damage index

Fig. 6 Peridynamic damage patterns on (+ z) and (- z) faces in #1~#3 glass layers at $35\mu\text{s}$

Fig. 7 Experimental damage patterns in #1 and #3 glass layers(Bless and Chen, 2010)

(4)와 같은 각 절점의 손상 지수를 통해 표현하였다. 손상 지수는 Fig. 6(c)와 같으며 타겟 절점과 인접 절점들 간의 결합이 모두 손상된 경우는 적색($D=1.0$), 손상이 전혀 없는 경우는 청색($D=0.0$)으로 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 #1 유리층은 탄체가 관통하여 중앙에 직경 약 0.044m의 구멍이 발생하였다. 또한 #1 상하면에 비슷한 손상 패턴이 관측되며 관통구에 인접한 4개의 뭉친 방사형 균열(bundled radial cracks) 이후에 원형의 물결층 균열(circumferential ripple cracks)이 잠시 나타나며, 전방위로 방사형 균열(radial cracks)이 분명하게 나타나고 있다. Fig. 7(a)에서 나타났듯이 실험(Bless and Chen, 2010)을 통해서도 유사한 손상 경향이 확인된다. Fig. 6(a)에서 #2 상면은 관통되어 크레이터(crater)가 발생하며 주변으로 바늘 균열(niddle cracks)으로 추정되는 촘촘한 방사형 균열층이 보이고, 이후는 전방위로 방사형 균열이 관측된다. Fig. 6(b)에서 #2 하면은 관통되지 않고 중앙에 과밀 압착된 손상면이 발생한다. #3 유리층의 손상은 이전과 상당히 다른 양상을 나타내는데, 중앙부는 탄체 충돌에 의한 압착 특성(compressed region)이 나타나며 주변으로 물결 무늬 손상(ripple cracks)이 지배적으로 나타난다. 이와 같은 손상 특성은 Fig. 7(b)와 같이 실험을 통해서도 확인된다.

Fig. 8은 해석 시간 $35\mu s$ 에서 #4~#7 유리층의 손상 정도를 상하면에 대해 각각 표현하였다. #4~#6 유리면의 손상을

Fig. 8 Peridynamic damage patterns on (+z) and (-z) faces in #4~#7 glass layers at $35\mu s$

상하면에 대해 비교해 보면, 상면 중앙의 손상에 비해 하면으로 갈수록 중앙부 손상이 확실히 감소한 것을 확인할 수 있다. 실험적으로도 이 부분은 compact disk라고 하여 균열 진전보다는 압착에 의한 손상 형태가 나타난다. 반면에 #7 유리면의 하면 Fig. 8(d)에는 대부분의 손상이 중앙에 집중되어 꽃모양(floret) 형상이 나타나며 이 또한 실험적으로 관측된 바 있다(Fig. 8 in Bless and Chen, 2010). 이상과 같이 층별로 다양한 손상 양상을 관찰할 수 있었으며, 실험으로 관측된 손상과 유사한 경향의 페리다이나믹 손상이 계산됨을 확인하였다.

(a) Damage on (+z) face (#4, #5 from left)

(b) Damage on (-z) face (#4, #5 from left)

(c) Damage on (+z) face (#6, #7 from left)

(d) Damage on (-z) face (#6, #7 from left)

Fig. 9 Peridynamic damage patterns on (+z) and (-z) faces in #4~#7 glass layers at 27.8 μ s

Figs. 9~11에서는 각각 PC backing이 변형되기 전(the 1st neutral state)인 27.8 μ s, 아래로 최대한 변형된 시점(the convex state)인 29.5 μ s, 그리고 탄성 복원에 의해 다시 평면이 되는 지점(the 2nd neutral state)인 31.8 μ s에 대해 #4~#7 유리 상하면의 손상 경향을 나타내었다. 참고로 Fig. 7은 PC backing이 the 2nd neutral state를 지나서 계속 탄성 복원하여 위로 볼록한 상태(the concave state)에서의 손상을 표현하였다. Figs. 9~10(a, b)와 Figs. 11, 8(a, b)를 비교하면, #4와 #5 유리층의 외곽에 극명하게 나타

(a) Damage on (+z) face (#4, #5 from left)

(b) Damage on (-z) face (#4, #5 from left)

(c) Damage on (+z) face (#6, #7 from left)

(d) Damage on (-z) face (#6, #7 from left)

Fig. 10 Peridynamic damage patterns on (+z) and (-z) faces in #4~#7 glass layers at 29.5 μ s

나는 방사형 균열이 탄체 충돌 충격에 의한 결과가 아니고 탄성 복원에 의한 손상임을 짐작할 수 있다. 특히 #4 유리층 상면 중앙에 탄성 복원에 의한 손상이 집중되고 있다. 또한 PC backing에 의한 탄성 복원이 발생하기 전에는 #4, #5, #6 유리층의 중앙으로부터 물결이 번지듯 원형 손상(ripple cracks)이 전파되어 가다가, 탄성 복원에 의해서는 십자 모형의 뚜렷한 균열 양상(extensive quadrants)이 나타난다. #7 유리층 하면은 다른 층과는 달리 모든 과정을 통해 중앙에 손상이 집중되면서 독특한 꽃모양(floret) 균열이 나타난다.

Fig. 11 Peridynamic damage patterns on (+z) and (-z) faces in #4~#7 glass layers at 31.8 μ s

3. 결 론

본 연구에서는 탄체와 고속 충돌을 한 다중적층 유리 구조물의 충돌/침투 파괴 현상을 페리다이나믹 동적 파괴 해석을 통해 구현하였다. 탄체와 다중적층 유리의 충돌/침투 현상을 표현하기 위해 단거리 상호작용력에 의한 비국부 접촉 모델을 적용하였다. 또한 다중적층 구조를 효율적으로 모사 및 해석하기 위해 가상 절점을 이용한 비국부 층간 결합 모델을 적용하였다. 비국부 층간 결합 모델에서는 적층 유리에 비해 상대적으로 두께가 얇은

충간 재료를 가상 절점으로 대체한다. 7개의 소다라임 유리층과 PC backing이 얇은 충간 재료로 masking된 다중적층 유리의 페리다이나믹 충돌/침투 파괴 해석을 통해 탄체 침투에 의한 crater 및 침투 깊이, Hertz type 균열, 방사형 균열 및 물결 무늬 균열과 꽃모양균열 등 실험적으로 확인된 다양한 충돌/침투 손상 경향이 모사됨을 확인하였다. 또한 PC backing의 탄성 거동에 준한 각 유리층의 손상 경향을 살펴봄으로써 충돌 및 압착에 의한 손상과 탄성 복원에 의한 손상 특성을 구분하여 검토할 수 있었다. 본 연구 내용을 바탕으로 향후 연구에서는 탄체의 형상 또는 초기 속도에 따른 다중 적층 유리 구조물의 충돌/침투에 의한 손상 패턴 경향 등을 조사할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 개별기초연구 자유공모 사업으로 수행되었습니다(UD160044BD). 또한 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단이 주관하는 기본연구지원사업(No.2018R1D1A1B07049124)의 지원과 한국에너지기술평가원(KETEP) 주관의 네트워크 기반 유체기기 고효율화 고급트랙 인력양성 사업(No.20174010 201350)의 지원에 감사드립니다.

References

- 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, pp.151~158.
- 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.
- Bowden, F., Brunton, J., Field, J., Heyes, A. (1967) Controlled Fracture of Brittle Solids and Interruption of Electrical Current, *Nature*, 216, pp.38~42.
- 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.
- 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.
- Ravi-Chandar, K.** (2004) *Dynamic Fracture*, Elsevier, Netherlands, p.246.
- Ramulu, M., Kobayashi, A.S.** (1985) Mechanics of Crack Curving and Branching a Dynamic Fracture Analysis. *Int. J. Fract.*, 27(3), pp.187~201.
- Ramulu, M., Kobayashi, A., Kang, B., Barker, D.** (1983) Further studies on dynamic crack branching. *Exp. Mech.*, 23(4), pp.431~437.
- Ravi-Chandar, K., Knauss, W.** (1984a) An Experimental Investigation into Dynamic Fracture: III. on Steadystate Crack Propagation and Crack Branching, *Int. J. Fract.*, 26(2), pp.141~154.
- Ravi-Chandar, K., Knauss, W.** (1984b) An Experimental Investigation into Dynamic Fracture: IV. on the Interaction of Stress Waves with Propagating Cracks, *Int. J. Fract.*, 26(3), pp.189~200.
- Silling, S.A.** (2000) Reformulation of Elasticity Theory for Discontinuities and Long-Range Forces, *J. Mech. & Phys. Solids*, 48, pp.175~209.
- Silling, S.A., Askari, E.** (2005) A Meshfree Method based on the Peridynamic Model of Solid Mechanics, *Comput. & Struct.*, 83(17-18), pp.1526~1535.

요 지

본 논문에서는 다중적층 유리의 고속 충돌체에 의한 충돌/침투 파괴 현상을 해석하기 위해 페리다이나믹 동적 해석 기법을 적용한다. 대부분의 다중적층 유리 구조물들은 다수의 주요 유리층들이 상대적으로 매우 얇은 탄성 필름으로 접착되어서 만들어진다. 따라서 다중적층 구조물의 수치해석 모델을 구성하는 것은 까다롭고 비용이 많이 든다. 본 연구에서는 실제 절점을 대신하여 가상의 절점들을 주요층들 사이에 위치시키고 상호작용시키는 비국부 가상 층간구조 모델링을 도입하여 보다 효율적으로 다중적층 구조를 모델링하였다. 또한 고속 충돌체와의 충돌 및 침투 현상을 해석하기 위해 페리다이나믹 비국부 접촉 모델이 고려되었다. 7개의 유리층과 하나의 탄성 백킹층이 폴리비닐부티랄 필름으로 부착된 다중적층 유리의 충돌 파괴 해석을 통해 제안된 해석 모델의 손상 파괴 적용 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 페리다이나믹 해석법, 다중적층 유리, 비국부 가상 층간 결합 모델, 충돌 파괴