

페리다이나믹 소성 모델을 통한 화강암의 고속 충돌 파괴 해석

하 윤 도^{1*}

¹군산대학교 조선해양공학과

Dynamic Fracture Analysis of High-speed Impact on Granite with Peridynamic Plasticity

Youn Doh Ha^{1*}

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

Abstract

A bond-based peridynamic model has been reported dynamic fracture characteristic of brittle materials through a simple constitutive model. In the model, each bond is assumed to be a simple spring operating independently. As a result, this simple bond interaction modeling restricts the material behavior having a fixed Poisson's ratio of 1/4 and not being capable of expressing shear deformation. We consider a state-based peridynamics as a generalized peridynamic model. Constitutive models in the state-based peridynamics are corresponding to those in continuum theory. In state-based peridynamics, thus, the response of a material particle depends collectively on deformation of all bonds connected to other particles. So, a state-based peridynamic theory can represent the volume and shear changes of the material. In this paper, the perfect plasticity is considered to express plastic deformation of material by the state-based peridynamic constitutive model with perfect plastic flow rule. The elastic-plastic behavior of the material is verified through the stress-strain curves of the flat plate example. Furthermore, we simulate the high-speed impact on 3D granite model with a nonlocal contact modeling. It is observed that the damage patterns obtained by peridynamics are similar to experimental observations.

Keywords : state-based peridynamics, perfect plasticity, dynamic fracture analysis, high-speed impact, non-local contact model

1. 서 론

유리와 세라믹과 같은 취성(brittle) 재료는 탄성 거동이 지배적이며, 재료가 파단되기 전까지 항복 현상이 거의 발생하지 않는다. 반면에 강철과 같은 연성(ductile) 재료는 일정 이상의 힘을 받으면 취성 재료와 달리 균열이나 파괴 없이 큰 변형으로 하중에 의한 많은 에너지를 흡수할 수 있다. 취성 재료는 접촉이나 충돌로 인한 에너지를 재료의 손상을 통해 소산하지만, 연성 재료는 변형으로 변환되기 때문에 균열 및 파괴 패턴은 각각의 재료 특성에 따라 달라질 수 있다.

페리다이나믹 모델(peridynamics)은 유한요소법 등과 달리 응력 함수의 미분을 대신하여 유한한 범위(horizon) 내에 분

포된 절점 간에 상호 작용력들을 적분하여 운동방정식을 구성하는 연속체 기반의 비국부(nonlocal) 해석법으로서 재료의 균열과 같은 불연속적인 거동을 효과적으로 해석할 수 있다(Silling, 2000). 초기 모델인 결합 기반 페리다이나믹 모델(bond-based peridynamics)은 pair-wise 분자동역학 모델과 유사하게 각 결합 간 미소포텐셜(micropotential) 함수를 정의하여 비교적 간단한 모델링으로 다양한 취성 재료 및 복합 적층 재료 등의 복잡한 동적 파괴 특성을 엄밀하게 모사할 수 있었다(Ha and Cho, 2011; Ha and Bobaru, 2011; Hu et al., 2011; Bobaru et al., 2012; Ha and Cho, 2012). 그러나 결합 기반 페리다이나믹 모델은 비국부 영역 내에서 각각의 결합들의 상호 관계를 일반적으로 사용되는 구성 모델

* Corresponding author:

Tel: +82-63-469-1856; E-mail: ydha@kunsan.ac.kr
Received October 24 2018; Revised November 19 2018;
Accepted November 20 2018

©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.

(constitutive model)을 사용하지 않기 때문에 다양한 재료 모델 구성이 어렵다. 특히 탄성 재료에서 포아송 비(poisson's ratio)가 1/4(3차원)로 고정되고, 전단 변형을 구성 모델 상에서 표현하지 못하는 문제가 있었다. 이를 보완하기 위해 연속체 기반 구성모델을 적용하여 다양한 모델을 구성하고 해석할 수 있는 상태 기반 페리다이나믹 모델(state-based peridynamics)이 개발되었다(Silling *et al.*, 2007). Ha(2015)의 연구에서는 상태 기반 페리다이나믹 모델을 사용하여 포아송 비에 따른 재료 변형이 표현됨을 확인하고 압축 변형과 균열 패턴의 상관관계를 분석하기도 하였다.

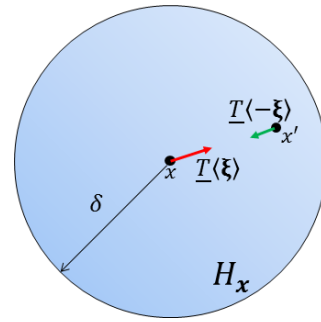
Mitchell(2011)는 상태 기반 페리다이나믹 탄성체 모델을 통해 소성 흐름 법칙(plastic flow rule)을 따르는 완전 소성(perfect plasticity)이 고려된 재료 구성 모델을 소개하였으며, 재료의 항복 응력(yield stress)을 이용해 비국부 항복 기준(nonlocal yield criterion)을 제시하고 검증한 바 있다. 그리고 Madenci와 Oterkus(2016)의 연구에서는 상태 기반 페리다이나믹 모델을 통해 폰 미세스 응력을 기반으로 재료의 소성 거동 및 경화를 구성 모델에 포함하였으며, 2차원 평판과 유공판 테스트 등의 수치예제를 통해 페리다이나믹 소성 모델을 검증한 바 있다. 본 연구에서는 보다 다양한 재료에 대한 구성모델을 사용할 수 있는 상태 기반 페리다이나믹 모델을 3차원으로 구성하여 동적 파괴 해석을 수행하며, 재료의 항복 강도를 넘어서는 경우 기초적인 소성을 고려할 수 있도록 재료 모델을 구성한다. 또한 2차원 평판 수치예제를 통해 재료 거동을 검증하고, 3차원 화강암 충돌 파괴 테스트를 수행한다.

2. 상태 기반 페리다이나믹 탄소성 모델링

페리다이나믹 모델은 비국부 영역 내에 있는 두 절점 간 상호 관계를 사용하는 개념은 동일하다. 그러나 결합 기반 모델은 결합의 길이 변화만으로 절점 간 상호관계가 구성되는 반면, 상태 기반 모델은 각 절점에 연결된 모든 결합에 대한 정보를 반영하여 변형 및 재료 거동이 표현되기 때문에 일반적인 재료 거동 표현이 가능하다. 상태(state) 개념은 연속체 역학의 텐서(tensor)와 유사하나 비선형 및 불연속 함수를 매개할 수 있는 다소 일반적인 개념이다. 상태 기반 모델링과 관련된 자세한 설명은 Silling 등(2007)을 참조하기 바란다.

2.1 상태 기반 페리다이나믹 모델

상태 기반 페리다이나믹 모델은 Fig. 1과 같이 반경 δ 의 유한한 범위(H_x)로 이산화되며, 각 절점의 비국부 영역 H_x 는 서로 교차되어 정보를 공유한다. 시간 t 에서 절점 x 에 대한 상태



$$H_x = \{x' \in R^3 \mid |\xi| < \delta, \xi = x' - x\}$$

Fig. 1 Force vector state in an ordinary state-based peridynamics

기반 페리다이나믹 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\rho \ddot{u}(x, t) = \int_{H_x} (\underline{T}[x, t] \langle \xi \rangle - \underline{T}[x', t] \langle -\xi \rangle) dV_{x'} + \underline{b}(x, t) \quad (1)$$

여기서, $(\underline{T}[x, t] \langle \xi \rangle - \underline{T}[x', t] \langle -\xi \rangle)$ 는 절점 x' 에 의해 x 에 가해지는 힘 성분으로서 단위는 힘/체적²이 되며, 힘 벡터 $\underline{T}[x, t] \langle \xi \rangle$ 는 절점 x 의 비국부 영역 내에 있는 모든 결합 벡터 $\xi = x' - x$ 에 대해 힘 벡터 상태(force vector state)인 $\underline{T}[x, t]$ 으로 구성된다. 결합 기반 페리다이나믹 모델에서 두 절점 간 상호 작용력은 같은 힘이 평행하게 방향만 반대로 작용하지만 상태 기반 모델은 두 힘의 크기가 같지 않을 수 있다. 또한, 상태 기반 페리다이나믹 모델에서 결합의 방향과 평행하게 $\underline{T} \langle \xi \rangle$ 과 $\underline{T} \langle -\xi \rangle$ 이 작용하는 모델을 Ordinary 모델이라 하며, 두 힘 벡터가 평행하지 않는 모델을 Non-ordinary 모델이라고 한다. $\underline{T}[x, t]$ 와 대응해 구성방정식을 구현하는 것은 변형 벡터 상태(deformation vector state) $\underline{Y}[x, t]$ 이며 변형된 절점 y 와 y' 으로부터 $\underline{Y}[x, t] \langle \xi \rangle = y(x', t) - y(x, t)$ 으로 정의된다. 두 절점의 위치 벡터 상태(reference position vector state)는 $\underline{X} \langle \xi \rangle = \xi$ 이다. 벡터 상태와 변형 벡터 상태를 변형 기울기 텐서(deformation gradient tensor)로 구성되는 탄성체의 구성방정식과 연관지어 페리다이나믹 탄성체 모델을 구성할 수 있다.

3차원 ordinary 상태 기반 모델의 힘 벡터 상태 유도과정은 선형 탄성체 모델의 변형에너지 밀도와 페리다이나믹 변형 에너지 밀도의 대응으로부터 시작된다. 이론적 변형에너지 밀도는 다음과 같다.

$$\Omega = \frac{k\theta^2}{2} + \mu \sum_{i,j=1,2}^d \epsilon_{ij}^d \epsilon_{ij}^d \quad (2)$$

여기서, θ 는 체적 팽창율(volume dilatation)이며, $k = E/3(1-2\nu)$ 는 체적 탄성 계수, $\mu = E/2(1+\nu)$ 는 전단 탄성계수, ϵ_{ij}^d 는 편향 변형율 텐서(deviatoric strain tensor)를 의미한다. 식 (2)와 대응되는 페리다이나믹 변형에너지 밀도는 다음과 같다.

$$W(\theta, \underline{e}^d) = \frac{k\theta^2}{2} + \frac{\alpha}{2} (\underline{\omega} \underline{e}^d) \cdot \underline{e}^d \quad (3)$$

여기서, θ 는 다음과 같다.

$$\theta = \frac{3}{m} (\underline{\omega} \underline{x}) \cdot \underline{e} \quad (4)$$

\underline{x} 과 \underline{e} 는 각각 결합의 변형 전 크기 $|\xi|$ 와 결합의 길이 변화와 결합의 길이 변화 $|\xi + \eta| - |\xi|$ 를 나타내는 스칼라 상태이다. $m = (\underline{\omega} \underline{x}) \cdot \underline{x}$ 은 weighted volume이다. $\underline{\omega}$ 는 비국부 영역 적분 시 사용되는 영향함수(influence function)이다. 미소 변형을 가정하는 선형 탄성체에 대해서 편향 길이 변화(deviatoric extension scalar state) \underline{e}^d 는 다음과 같다.

$$\underline{e}^d \langle \xi \rangle = \epsilon_{ij}^d \xi_i \xi_j / |\xi| \quad (5)$$

따라서 편향 길이 변화에 대한 페리다이나믹 에너지 밀도는 다음과 같이 계산된다.

$$W(\underline{e}^d) = \frac{\alpha}{2} \int_{H_z} \underline{\omega} (\underline{e}^d)^2 dV_\xi = \frac{\alpha}{2} \epsilon_{ij}^d \epsilon_{kl}^d \int_{H_z} \frac{\omega}{|\xi|^2} \xi_i \xi_j \xi_k \xi_l dV_\xi \quad (6)$$

구형의 영향 함수에 대해 페리다이나믹 에너지 밀도는 $W(\epsilon_{ij}^d) = (\alpha m/15) \epsilon_{ij}^d \epsilon_{ij}^d$ 이며, 이를 이론적 에너지 밀도와 비교하여 $\alpha = 15\mu/m$ 를 유도한다. 또한 탄성체의 힘 벡터 상태는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\underline{T} = t \frac{\underline{y}' - \underline{y}}{\|\underline{y}' - \underline{y}\|} \quad (7)$$

여기서, 힘 스칼라 상태(force scalar state)는 다음과 같다.

$$t = \frac{3k\theta}{m} \underline{\omega} \underline{x} + \alpha \underline{\omega} \underline{e}^d \quad (8)$$

페리다이나믹 해석에서 손상 단면(fracture surface)은 여러

결합들이 응집되어 연속적으로 끊어지며 생성된다. 이때, 새로운 단위 손상 단면을 생성하는데 필요한 에너지 해방율(energy release rate) G_0 는 Fig. 2와 같이 절점 A가 $0 < z < \delta$ 인 면을 따라 존재하는 모든 절점 B와의 결합이 수용할 수 있는 최대 에너지 포텐셜 ω_0 를 빗금친 영역에 대해 적분하여 계산한다.

$$G_0 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\delta \int_0^\delta \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{z}{\xi}\right)} \omega_0 \xi^2 \sin\phi d\phi d\xi dz d\theta = \frac{\pi \omega_0 \delta^4}{2} \quad (9)$$

각 결합의 변형에너지 포텐셜 ω_ξ 가 $\omega_0 = 2G_0/\pi\delta^4$ 보다 커지면 해당 결합을 끊어서 손상 모델을 구성할 수 있다. 이때, 탄성체 상태 기반 페리다이나믹 모델에서 각 결합의 에너지 포텐셜은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\omega_\xi = \int_0^{\eta(t)} (\underline{T}[\underline{x}, t] \langle \xi \rangle - \underline{T}[\underline{x}', t] \langle -\xi \rangle) \cdot d\eta \quad (10)$$

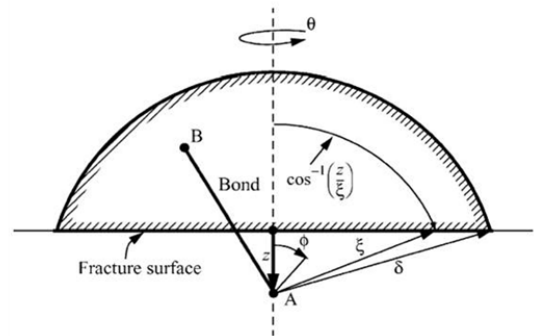


Fig. 2 Fracture surface in peridynamics (Silling and Askari, 2005)

2.2 페리다이나믹 완전 소성모델 (perfect plasticity)

상태 기반 페리다이나믹 모델은 연속체 모델의 구성방정식을 거의 유사하게 구현하기 때문에 기존 소성 모델과 유사한 과정을 통해 소성 모델을 구성할 수 있다(Mitchell, 2011). 페리다이나믹 소성 모델의 핵심은 페리다이나믹 편향 길이 변화 \underline{e}^d 의 구분과 관련되어 있다. 페리다이나믹 구성 모델의 소성에 대한 핵심은 스칼라 길이 변화 상태가 체적 팽창 및 편향 길이 변화로 이루어져 있다는 것과 편향 길이 변화 상태가 탄성 부분과 소성 부분으로 구분할 수 있다는 것이다. 기존 소성 이론과 유사하게 편향 길이 변화의 총 합을 탄성 부분 \underline{e}^{dc} 와 소성 부분 \underline{e}^{dp} 로 다음과 같이 분리한다.

$$\underline{e}^d = \underline{e}^{dc} + \underline{e}^{dp} \quad (11)$$

식 (11)을 식 (8)의 힘 스칼라 상태에 대입하면

$$\underline{t} = \frac{3k\theta}{m} \underline{\omega x} + \alpha \underline{\omega} (\underline{e}^d - \underline{e}^{dp}) = \underline{t}^i + \underline{t}^d \quad (12)$$

이다. 이를 변형에너지에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$\underline{t}^i = \left(\frac{3e\omega\xi}{m} \right) \frac{\partial W}{\partial \theta}, \quad \underline{t}^d = \frac{\partial W}{\partial \underline{e}^d} \quad (13)$$

탄성체의 재료 구성 모델로부터 소성을 계산하기 위해 스칼라 편향 힘 상태(scalar deviatoric force state)를 다음과 같이 정의한다.

$$E_{\underline{t}^d} = \left\{ \underline{t}^d \in S^d \mid f_y(\underline{t}^d) = \psi(\underline{t}^d) - \frac{25\sigma_Y^2}{8\pi\delta^5} \leq 0 \right\} \quad (14)$$

여기서, σ_Y 는 재료의 항복 응력이며, f_y 는 항복 함수(yield function)라고 불리는 스칼라 함수이다. 또한 $\psi(\underline{t}^d) = \|\underline{t}^d\|^2/2$ 이다. S^d 는 스칼라 상태 공간(space of scalar state) S 의 부분 공간(subspace)으로 다음과 같이 정의된다.

$$S^d = \{ \underline{t}^d \in S \mid \underline{t}^d \cdot \underline{x} = 0 \} \quad (15)$$

이때, f_y 는 재료가 항복점($\psi_0 = 25\sigma_Y^2/8\pi\delta^5$)에 도달하게 되면 $f_y = 0$ 의 값을 갖게 되어 경화(hardening)를 포함하지 않는 국부 모델의 완전 소성과 유사하다. 그리고 소성 흐름 법칙은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\underline{e}}^{dp} = \lambda \nabla^d \psi \quad (16)$$

$\nabla^d \psi$ 는 S^d 에서의 프레셰 도함수(fréchet derivative)이고, λ 는 consistency parameter이다. 재료의 거동이 탄성일 경우에는 $\lambda = 0$ 이고, 소성일 경우에는 $\lambda > 0$ 이다. 항복 함수와 λ 의 관계는 Kuhn-Tucker loading/unloading 조건에 의해 다음과 같다.

$$\lambda > 0, f_y(\underline{t}^d) \leq 0, \lambda f_y(\underline{t}^d) = 0 \quad (17)$$

$$\lambda \dot{f}_y(\underline{t}^d) = 0 \quad (18)$$

n 번째 반복 계산(at $t = t_n$)에서 \underline{e}_n^d 및 \underline{e}_n^{dp} 는 다음과 같다.

$$\underline{e}_n^d = \underline{e}_n^d(t_n), \quad \underline{e}_n^{dp} = \underline{e}_n^{dp}(t_n) \quad (19)$$

또한, 식 (13)의 \underline{t}^d 와 식 (16)의 소성 흐름 법칙을 통해 시험적인 스칼라 편향 힘 상태 \underline{t}_{trial}^d 을 계산한다.

$$\begin{aligned} \underline{t}_{n+1}^d &= \alpha \underline{\omega} (\underline{e}_{n+1}^d - \underline{e}_{n+1}^{dp}) \\ &= \alpha \underline{\omega} (\underline{e}_{n+1}^d - \underline{e}_n^{dp}) - \alpha \underline{\omega} (\underline{e}_{n+1}^{dp} - \underline{e}_n^{dp}) \\ &= \underline{t}_{trial}^d - \alpha \underline{\omega} \Delta \lambda \nabla^d \psi \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, $\Delta \lambda = \lambda \Delta t$ 이다. 계산된 \underline{t}_{trial}^d 과 항복 함수 $f_y(\underline{t}_{trial}^d)$ 를 통해 탄성 혹은 소성을 판단한다. 만약, $f_y(\underline{t}_{trial}^d) \leq 0$ 일 경우 식 (15)에 의해서 $\Delta \lambda = 0$ 이며 $n+1$ 번째 \underline{t}^d 및 \underline{e}^{dp} 는 다음과 같다.

$$\underline{t}_{n+1}^d = \underline{t}_{trial}^d, \quad \underline{e}_{n+1}^{dp} = \underline{e}_n^{dp} \quad (21)$$

반면에, 만약 $f_y(\underline{t}_{trial}^d) > 0$ 인 경우에는 $\Delta \lambda > 0$ 이므로, $f_y(\underline{t}_{trial}^d, \Delta \lambda) = 0$ 를 통해 $\Delta \lambda$ 를 얻는다. 또한 새로이 계산된 $\Delta \lambda$ 를 통해 $n+1$ 번째 \underline{t}^d 와 \underline{e}^{dp} 를 업데이트 한다.

$$\Delta \lambda = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\|\underline{t}_{trial}^d\|^2}{\sqrt{2\psi_0}} - 1 \right] > 0, \quad \left(\psi_0 = \frac{25\sigma_Y^2}{8\pi\delta^5} \right) \quad (22)$$

$$\underline{t}_{n+1}^d = \sqrt{2\psi_0} \frac{\underline{t}_{trial}^d}{\|\underline{t}_{trial}^d\|}, \quad \underline{e}_{n+1}^{dp} = \underline{e}_n^{dp} + \Delta \lambda \underline{t}_{n+1}^d \quad (23)$$

2.3 비국부 접촉(nonlocal contact) 모델

각각의 페리다이나믹 절점들은 비국부 영역을 통해 주변 절점들을 인식하고 있기 때문에, 다른 물체가 접근하는 것을 자연스럽게 인식할 수 있다. 서로 다른 물체가 접근하는 것을 인지하기 위해 각 물체의 표면으로부터 비국부 영역 반경만큼을 비국부 접촉 영역(nonlocal contact region)을 설정하고, 각 물체의 접촉 영역 내 절점으로부터 다른 물체의 접촉 영역 내 절점 사이의 거리를 측정한다(Fig. 3). 만약 각 물체의 접촉 영역 내 절점 거리가 일정 거리(r_s) 이하로 근접할 경우, 두 물체가 접촉한 것으로 판단하며 다음 식과 같이 추가적인 힘을 계산하여 각 절점의 힘 벡터 상태에 합산한다.

$$\underline{T}_s(\underline{Y} \langle \xi \rangle) = \frac{\underline{Y} \langle \xi \rangle}{\|\underline{Y} \langle \xi \rangle\|} \min \left\{ 0, \frac{c_s (\|\underline{Y} \langle \xi \rangle\| - 2r_s)}{2r_s} \right\} \quad (24)$$

여기서, $c_s = kc$, (k : constant)이고, c 는 micromodulus이다. 페리다이나믹 비국부 접촉 모델에서는 master/slave 관계를 별도로 설정하지 않으며, 단순히 경계 주변에 존재하는 절점들이 소유한 비국부 영역 내에 다른 물체의 절점이 포함되는지 여부를 판별한다. 이와 같은 방식은 유한요소법의 접촉 모델과 유사하지만, 인위적인 접촉 강성의 구성이나 접촉 상태를 정확하게 판단하기 위한 미세 조정이 필요하지 않기 때문에 엄밀하고 빠르게 접촉 조건을 구성할 수 있다.

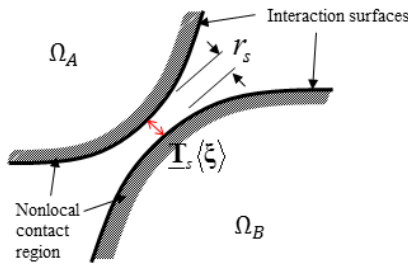


Fig. 3 Nonlocal contact model

3. 수치예제

3.1 페리다이나믹 소성 모델 검증

적용된 페리다이나믹 소성 모델을 검증하기 위해 Fig. 4와 같은 가로 1m, 세로 1m의 2차원 평판을 고려한다. 평판의 원편은 물러 지지가 되어있고, 평판의 x축 방향에 대해 선형적으로 하중이 부과된다(Fig. 5-a). 1차적으로 $0 \rightarrow \epsilon_1$ 하중이 가해진 후 제거($\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2$)되고 다시 2차 하중($\epsilon_2 \rightarrow \epsilon_i$)이 부과된다(Fig. 5-b). 검증 모델의 재료 물성치는 Table 1과 같다. 평판에 사용된 절점 간격은 $\Delta x = 0.01m$ 으로 총 10,201개가 사용

Table 1 Material properties of the verification model

Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	density (kg/m ³)	yield stress (GPa)
113	0.342	4.428	1.017

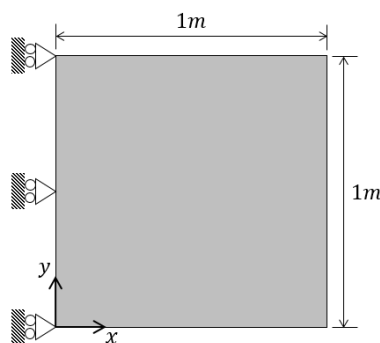
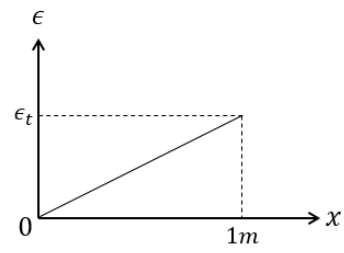
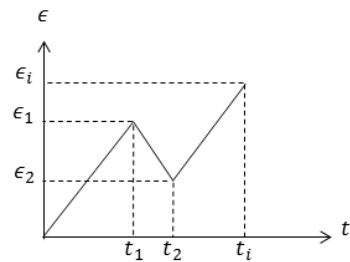


Fig. 4 2D plate model dimension



(a) linear loading



(b) loading path

Fig. 5 Applied displacement gradient loading condition ($\epsilon_i = 0.101$, $\epsilon_1 = 0.069$, $\epsilon_2 = 0.049$)

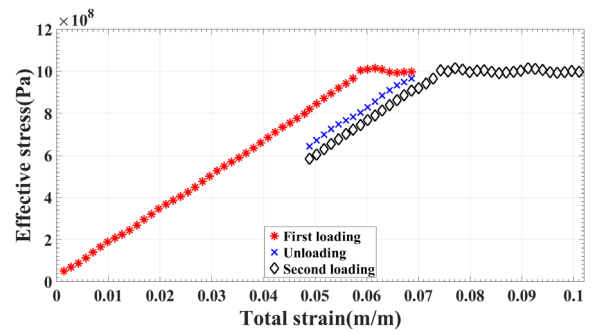


Fig. 6 Variation of effective stress as total stretch increases at the center of plate

되었으며, 비국부 영역 반경은 $\delta = 0.0301m$, 해석 시간 간격은 $\Delta t = 1.0\mu s$ 이다.

Fig. 6은 평판의 중앙부에 있는 절점에 대해서 유효 응력 (effective stress)을 총 신장량(total stretch)에 대해 표현한 것이다. 1차 하중이 부과됨에 따라서 응력이 선형적으로 증가하다가 재료의 항복점에 도달하게 되면 응력은 더 이상 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다(first loading). 이어서 하중이 제거됨에 따라서 재료의 탄성 거동에 의해 동일한 기울기로 응력이 감소하는 것을 확인할 수 있으며(unloading), 다시 2차 하중이 가해지면서 재차 완전 소성 재료의 특성을 보이고 있다(second loading). Fig. 6의 결과를 통해 본 연구에 사용된 완전 소성 모델을 검증하였다.

3.2 화강암반의 고속충돌 파괴 해석

Fig. 7과 같은 화강암반 모델을 고려한다. 테스트 모델은

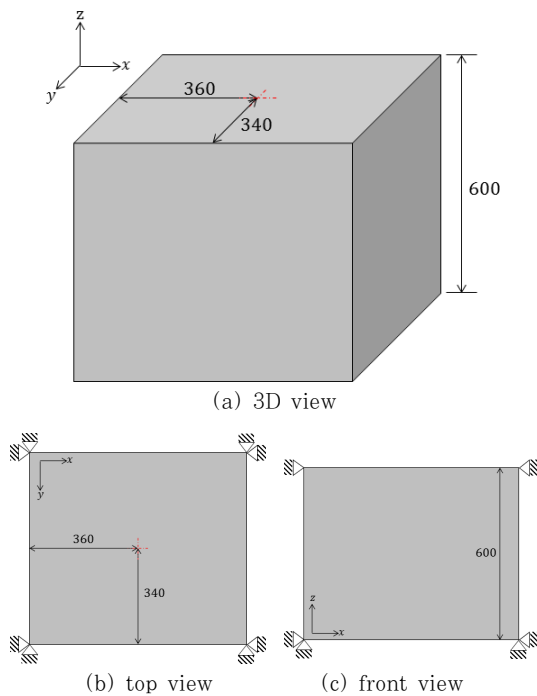


Fig. 7 Dimension & boundary condition of 3D target model(mm)

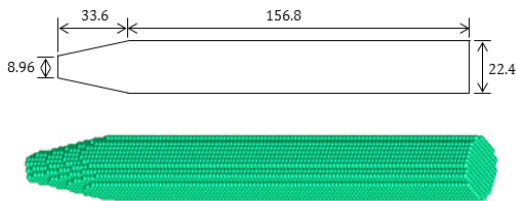
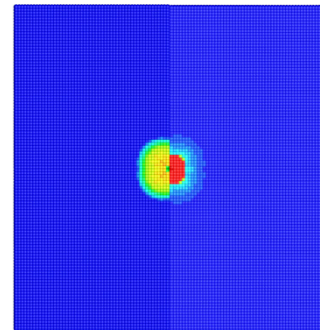
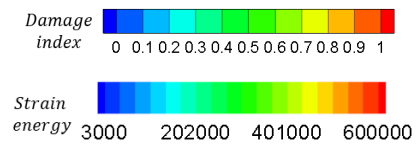


Fig. 8 Dimension & simulation model of impactor(mm), (540.5g)

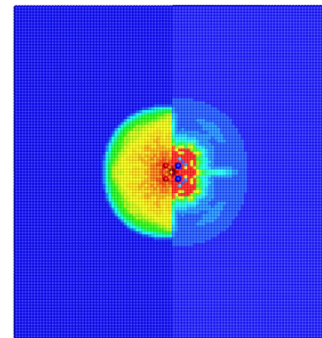
Table 2 Material properties of target and impactor

	Target model (granite)	Impactor (steel 4340)
Young's modulus(GPa)	45.26	210
Poisson's ratio	0.22	0.27
Density(kg/m ³)	2,690	8,832.22
Yield stress(MPa)	201	1,562

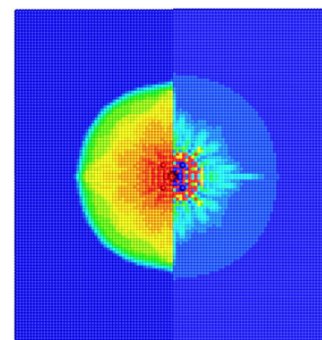
양의 z축 면(상면)을 제외한 모든 면에 대해 구속 조건이 부과되어 있으며, 구속 조건이 부과된 절점에 대해서는 손상을 고려하지 않았다. 화강암반 모델 상면의 정중앙에 Fig. 8과 같은 탄체가 초기 속도 639m/s로 수직 충돌한다. 고속충돌 파괴 해석 모델은 국방과학연구소에서 제공받은 실험 모델 및 환경과 유사하게 구성되었다. 각 모델의 재료 물성치는 Table 2에 나타내었다. 참고로 탄체의 밀도는 충돌체의 질량을 맞추기 위해서 조정되었다. 화강암반 표적 모델의 에너지 해방율은 $G_0 = 300 J/m^2$ 이며, 절점 간격은 $\Delta x \approx 6.5mm$ 으로 총 1,071,616개의 절점이 사용되었다. 또한 탄체 모델은 $\Delta x \approx 1.7mm$ 으로



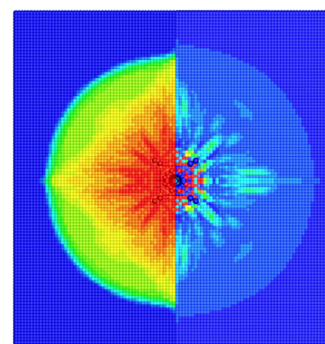
(a) at $t = 3.0ms$



(b) at $t = 6.25ms$



(c) at $t = 9.0ms$



(d) at $t = 12.5ms$

Fig. 9 Damage(left) and strain energy density(right) profiles on impact surface

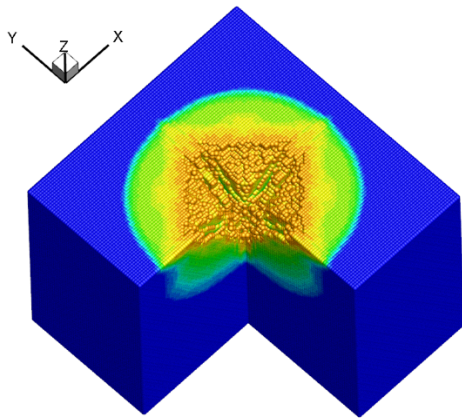


Fig. 10 Final state of peridynamic simulation

총 13,672개의 절점이 사용되었다. 비국부 영역의 크기는 반경 방향으로 3개의 절점이 포함될 수 있도록 설정되었다. 안정적인 해석을 위해서 균일한 시간 간격 $0.5\mu s$ 가 사용되었다.

Fig. 9에서 화강암 표적 모델의 손상 지수와 변형에너지를 충돌 면에서 시간의 흐름에 따라 표현하였다. 이때, Fig. 9(d)는 탄체가 더 이상 침투하지 못하여 손상이 진행되지 않는 상태이다. 손상 지수는 각 비국부 영역 내의 초기 결합의 수에 대한 끊어진 결합의 수의 비율을 사용한다. 즉, 손상 지수가 0인 경우는 초기 결합 대비 끊어진 결합이 없는 비손상 상태를 의미하고, 손상 지수가 1인 경우는 모든 결합이 끊어진 완전 손상 상태를 의미한다. Fig. 9(a)는 탄체와 표적이 충돌하기 시작하는 단계에서 나타나는 손상으로 탄체가 부딪히는 중앙부에서는 상대적으로 주변에 비해 손상이 적게 나타나고 있으며, 이후 완전히 손상 되는 것을 확인할 수 있었다. 이로 미루어 보아 충돌 직후, 접촉 지점에서는 충돌로 인해 소성 거동이 거의 즉각적으로 나타나 압착의 형태로 변형이 나타나는 것으로 추정된다. 이후에는 충격에 의한 에너지가 전파되며 손상 영역이 넓어지는 것을 확인할 수 있다(Fig. 9). 특이점으로 화강암반의 손상은 소성 구간에서 진입한 뒤에 발생하기 때문에 취성 재료의 고속 충돌로 인한 동적 파괴 특성이 알려진 방사형 균열(radial crack) 등은 확인되지 않는다. 화강암 표적의 손상은 탄체 충돌 초기에는 충돌면을 기준으로 원형에 가까운 모습을 보이지만, 변형 에너지 파동이 표적 경계로부터 반사 및 간섭이 반복되면서 전반적으로 마름모꼴로 변형되어 간다. 균열로 인해 전파되는 파동이 경계에서 반사된 파동과 간섭하는 지점에서 전파되던 균열이 회절(crack curving) 또는 구속(crack arrest)되는 현상은 Ha와 Bobaru(2010)에서도 조사된 바 있다. Fig. 10은 화강암반 표적 모델의 손상을 보다 구체적으로 확인하기 위해 Fig. 9(d)와 동일한 시간에 대해서 모델의 3/4만큼을 표현하고 각도를 조정하여 결과를 표시하였다. 해석 결과에서 모델의 내부 손상을 육안으로 확인하기 위해 손상 지수가 지나치게 높은 절점

(손상지수 0.83 초과)은 표시하지 않았다. 손상 지수가 대략 0.75~1.0 범위에 있는 절점은 주변 절점과의 연결성이 거의 손실되어서 일종의 파편으로 볼 수 있다. 페리다이나믹 해석 결과의 손상면 반지름은 약 250mm로 국방과학연구소 실험에서 관측된 최종 손상면 반지름 약 255mm과 유사하게 모사되었다. 또한 실험에서 크레이터(crater)의 깊이는 약 120mm로 측정되었으며, 페리다이나믹 해석 결과에서는 약 111mm로 관측되었다. 참고로 화강암반을 탄성 재료로만 모델링하여 취성 파괴 해석을 하게 되면, Figs. 9, 10과 같이 깊고 넓은 크레이터 손상이 발생하지 않고 충돌 초반에 탄체 주변의 좁은 영역에서 국부적인 손상만 일부 발생하게 되어 실험결과와 매우 상이한 손상 해석결과를 얻게 된다.

3. 결 론

본 연구에서는 상태 기반 페리다이나믹 동적 파괴 해석 모델을 소개하고 일반적인 재료 구성 모델에 기초한 완전 소성재료 모델(perfect plasticity)을 고려하였다. 평면 모델에 대해서 1차 하중, 하중 제거 및 2차 하중 상태를 부과하고 응력-변형 곡선을 표현하여 페리다이나믹 소성 모델에서 재료의 탄성 및 소성 거동을 검증하였다. 또한 비국부 접촉 모델을 고려하여 화강암반 표적에 대한 고속 탄체의 충돌/침투 파괴 현상을 해석하였다. 본 연구는 화강암의 충돌 손상 파괴 연구의 기초적인 연구 결과로서, 비교적 간단한 완전 소성 모델이 적용된 상태 기반 페리다이나믹 동적 파괴 해석으로도 실험적으로 확인된 크레이터의 면적 및 깊이와 유사한 손상 특성을 모사할 수 있음을 확인하였다. 화강암의 소성 및 손상 특성을 엄밀하게 표현하기 위한 연구들과 접목하여 보다 정밀한 동적 파괴 해석 기술로 개발될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 개별기초연구 자유 공모 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

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.
- 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.279~285.
- Ha, Y.D.** (2015) Dynamic Fracture Analysis with State-based Peridynamic Model: Crack Patterns on Stress Waves for Plane Stress Elastic Solid, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(3), pp.309~316.
- 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.
- Madenci, E., Oterkus, S.** (2016) Ordinary State-based Peridynamics for Plastic Deformation According to Von Mises Yield Criteria with Isotropic Hardening, *J. Mech. & Phys. Solids*, 86, pp.192~219.
- Mitchell, J.A.** (2011) A Nonlocal, Ordinary, State-based Plasticity Model for Peridynamics, SAND2011-3166, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 32.
- 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, *Computers and Structures*, 83(17-18), pp.1526~1535.
- Silling, S.A., Epton, M., Weckner, O., Xu, J., Askari, E.** (2007) Peridynamic States and Constitutive Modeling, *J. Elasticity*, 88, pp.151~184.

요 지

결합 기반 페리다이내믹 모델은 간단한 재료 모델을 통해 취성 재료의 다양한 동적 파괴 특성을 확인할 수 있었지만, 다양한 재료 구성 모델을 표현하는데 많은 한계점이 나타났다. 특히, 절점 간 결합이 서로 독립적으로 작용하여 포아송 비가 고정되고 전단 변형이 표현되는 않는 문제점이 있다. 상태 기반 페리다이내믹 모델은 보다 일반화되고 엄밀한 재료 모델링이 가능하며, 모든 결합의 변형 정보를 통해 각 절점의 거동이 계산되기 때문에 결합 기반 모델에서 표현하지 못한 전단 변형까지도 표현 가능하다. 본 연구에서는 상태 기반 페리다이내믹 모델을 통해 재료 모델을 구성하고, 소성 흐름 법칙으로부터 재료의 완전 소성 거동을 표현할 수 있도록 간단한 재료 모델을 구성한다. 평판 수치 예제를 통해 구성된 완전 소성 재료 모델을 검증하고 응력 변형 곡선을 확인한다. 또한 비국부 접촉 모델링을 통해 서로 다른 두 물체가 충돌하는 현상을 모사하여, 화강암반 모델의 고속 충돌 파괴 해석을 수행하고 결과분석 및 실험현상과 비교한다.

핵심용어 : 상태 기반 페리다이내믹 모델, 완전 소성, 동적 파괴 해석, 고속 충돌, 비국부 접촉 모델