

페리다이나믹스 해석법을 통한 동적취성 파괴거동해석: 분기 균열각도와 균열 전파속도

Dynamic Brittle Fracture Captured with Peridynamics: Crack Branching Angle & Crack Propagation Speed

하 윤 도† 조 선 호*
Ha, Youn Doh Cho, Seonho

요 지

본 논문에서는 결합 기반 페리다이나믹스 해석법을 사용하여 동적취성 파괴시뮬레이션을 수행하였다. 페리다이나믹스 모델은 분기 균열, 균열 불안정성, 균열 경로의 비대칭성, 연쇄 분기 균열, 2차 균열 전파 등 다양한 동적취성 파괴현상을 잘 해석해 낼 수 있다. 본 논문에서는 분기 균열의 분기 각도와 균열 전파속도에 대한 응력파의 영향에 대해 연구하였다. 극한 시점에 도달한 균열은 둘 이상으로 분기되어 전파되고 그 전파속도는 기존 균열의 전파속도와 크게 달라지지 않는다는 사실이 여러 실험을 통해서 입증되었다. 페리다이나믹스로 해석된 분기 균열은 실험을 통해 제안된 균열 전파현상들과 잘 부합되는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 페리다이나믹스, 동적취성 파괴, 분기 균열, 균열 전파속도

Abstract

The bond-based peridynamic model is able to capture many of the essential characteristics of dynamic brittle fracture observed in experiments: crack branching, crack-path instability, asymmetries of crack paths, successive branching, secondary cracking at right angles from existing crack surfaces, etc. In this paper we investigate the influence of the stress waves on the crack branching angle and the velocity profile. We observe that crack branching in peridynamics evolves as the phenomenology proposed by the experimental evidence: when a crack reaches a critical stage(macroscopically identified by its stress intensity factor) it splits into two or more branches, each propagating with the same speed as the parent crack, but with a much reduced process zone.

Keywords : peridynamics, dynamic brittle fracture, crack branching, crack propagation speed

1. 서 론

동적취성 파괴에 대한 많은 실험들을 통해(Bowden 등, 1967; Ramulu 등, 1983; 1985; Ravi-Chandar 등, 1984(a); (b); Ravi-Chandar, 2004) 분기 균열, 균열 불안정성, 균열 경로의 비대칭성, 연쇄 분기 균열, 2차 균열 전파 등 다양하고 복잡한 동적취성 파괴현상들이 관찰되어 왔다. 취성 재료에서 균열은 초기에는 일직선 형태로 전파하다가 휘어지거나 둘 이상의 가지로 분기하게 된다. 매우 높은 응력 상태에서는 전파되던 균열이 연속적인 다중 분기의 형태로 전파

되면서 때때로 삼각주 패턴으로 파쇄가 일어나기도 한다. 또한 동적취성 파괴실험은 응력파가 균열 전파 경로에 지대한 영향을 미치는 것을 보였고, 이러한 응력파의 간섭으로 이미 존재하는 균열 경로에 수직으로 새로운 2차 균열이 발생될 수 있음을 관찰하였다.

본 논문에서는 이러한 다양한 동적취성 파괴현상을 엄밀하게 해석해 낼 수 있고, 실험적으로 검증된 동적취성 파괴거동을 설명할 수 있는 페리다이나믹스 모델(Silling, 2000; Ha 등, 2010; 2011)을 사용한다. 페리다이나믹스 동적취성 파괴 시뮬레이션을 통해 최근에 도출된 분기 균열이 발생하는 시점

† 책임저자, 정회원 · 군산대학교 조선공학과 전임강사

* 교신저자, 정회원 · 서울대학교 조선해양공학과 교수

Tel: 02-880-7322 ; Fax: 02-880-9298

E-mail: secho@snu.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 2월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

에 대한 실험적 결론(Ravi-Chandar, 2004)을 지지하는 수치 결과를 또한 얻을 수 있었다. 이는 실험적으로 도출된 다양한 동적 균열 전파의 거시적 거동과 손상 발생의 미시적 거동에 대해 엄밀하게 설명할 수 있는 최초의 수치해석 모델이다.

오랜 기간동안 동적취성 파괴현상을 시뮬레이션하기 위한 많은 노력이 이루어져 왔다(Belytschko 등, 2003). 대표적인 해석법들로는 원자 모델(Abraham 등, 1997), 래티스 모델(Marder 등, 1995), FEM/XFEM 모델(Belytschko 등, 2003) 등이 있다. 몇몇 모델들은 동적취성 파괴특성의 일부를 모사해 내기도 했지만 실험적으로 관측된 많은 동적취성 파괴특성들은 인위적인 특수한 조건없이는 수치시뮬레이션으로 예측이 되지 못하였다. 새로운 연속체 기반 모델인 페리다이나믹스는 Silling(Silling, 2000)에 의해 파괴해석 등을 위해 고안되었다. 페리다이나믹스는 적분방정식으로 운동방정식을 표현(Silling, 2000) 함으로써 재료 불연속성에 대해 기존 방법론들이 가지는 수학적 모순(공간 미분)으로부터 자유롭게 된다. 유한요소와 같은 국부 모델들은 요소 연결성에 의해 바로 인접한 절점들끼리만 상호 작용을 고려한다. 그러나 비국부 모델인 페리다이나믹스는 유한한 길이 차원인 horizon에 의해 구성되는 유한한 범위 내에 흩어져 있는 모든 절점들이 상호 작용하도록 모델을 구성한다.

페리다이나믹스 방법론은 짧은 기간동안 많은 발전이 있어 왔지만 그동안 동적취성 파괴문제에 대해 적절한 파괴조건을 도입하여 적용하고 실험결과와 비교하는 연구는 없었다. 그러나 페리다이나믹스를 이용한 최근의 연구(Ha 등, 2010; Ha 등, 2011)는 페리다이나믹스가 균열 형상, 균열 전파속도와 그 경향, 연쇄 분기 균열, 그리고 균열 면에 제공되는 변형 에너지와 균열 진전과의 관계 등을 페리다이나믹스가 매우 엄밀하게 묘사해 낼 수 있음을 보였다. 특히 페리다이나믹스를 통해 수치적으로 얻어낸 균열 전파속도와 균열 형상이 페리다이나믹스의 비국부 파라미터인 horizon를 축소시킴에 따라 수렴성을 보이는 것을 확인할 수 있었다(Ha 등, 2010). 또한 다른 최근 연구(Ha 등, 2011)에서는 기하학적으로 대칭인 모델에 대해서도 절점력 계산 시 계산순서에 따른 절단오차의 근소한 차이에 의해 비대칭적인 분기 균열이 얻어질 수 있음을 보였다. 이러한 차이는 절점력 계산을 위해 인접 절점들의 데이터를 찾아내는 과정에서 기인한다. 또한 파괴 에너지(fracture energy)를 국부 손상에 대해 변동하도록 설정함에 따라 이러한 비대칭성이 급격히 증대될 수 있음을 보였다. 페리다이나믹스 모델은 또한 실험적으로 관찰된 연쇄 분기 균열과 2차 균열을 잘 묘사할 수 있었다. 2차 균열을 기존 균열에 수직으로 발생하는 균열로써, 응력파와 반사파의 간섭에 의해 형성되는 것이며(Ha 등, 2011) 또한 실험적으로 증명된 바

있다(Ravi-Chandar 등, 1984b).

본 연구 논문에서는 결합 기반 페리다이나믹스 모델에 대해 간략히 소개하고 페리다이나믹스를 통한 동적파괴해석 시뮬레이션을 통해 응력파가 분기 균열각도와 균열 전파속도에 미치는 영향에 대해 분석한다. 극한 시점에 도달한 균열은 둘 이상으로 분기되어 전파되고, 그 전파속도는 기존 균열의 전파속도와 크게 달라지지 않는다는 사실이 여러 실험을 통해서 입증되었다(Ravi-Chandar, 2004; Scheibert, 2010). 페리다이나믹스 동적취성 파괴시뮬레이션으로부터 수치적으로 해석된 분기 균열은 실험을 통해 제안된 균열 전파현상들과 잘 부합되는 것을 확인할 수 있었다.

2. 페리다이나믹스 정식화

페리다이나믹스는 운동방정식에서 응력의 공간 미분 대신 절점력들의 적분을 사용한다(Silling, 2000). 이를 통해 페리다이나믹스는 재료 불연속성에 대해 기존 방법론들이 가지는 수학적 모순으로부터 자유롭게 된다. 또한 페리다이나믹스는 비국부 모델로서 유한한 범위 내에 흩어져 있는 모든 절점들이 상호 작용하도록 모델을 구성한다. 절점 \mathbf{x} 와 시간 t 에서 페리다이나믹스 운동방정식은 다음과 같다.

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

여기서, H_x 는 비국부 파라미터인 horizon에 의해 구성되는 유한한 범위로써 horizon의 크기와 모양에 따라 그 형태가 다를 수 있다. \mathbf{f} 는 범위 H_x 에 속한 두 절점 \mathbf{x}' 과 \mathbf{x} 으로 구성되는 페리다이나믹스 결합(bond)에 대한 짝힘(pairwise force) 함수이며, \mathbf{u} 는 변위 벡터이다. \mathbf{b} 는 체적력, ρ 는 밀도이다. 미소탄성(micro-elastic) 재료(Silling, 2000)는 다음과 같이 짝힘과 선형 미소탄성 포텐셜 ω 의 관계로부터 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{x}' - \mathbf{x}$, $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{u}' - \mathbf{u}$ 이고 상대 신장(relative elongation)은 $s = \frac{\|\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\xi}\| - \|\boldsymbol{\xi}\|}{\|\boldsymbol{\xi}\|}$ 이다. 미소재료상수 c 는 균일 변형 상태에서의 탄성재료의 이론적 변형에너지를 동일 변형 조건에서 페리다이나믹스 변형에너지와 일치시켜서 계산된다. 이 과정을 통해 페리다이나믹스 운동방정식은 실제 탄성 재료와 동일한 거동을 하는 구성방정식의 토대 위에 성립

한다. 본 논문에서는 상수 미소재료상수 $c = \frac{6E}{\pi \delta^3 (1-\nu)}$ 를 사용한다. 자세한 설명은 Silling(2000)과 Ha 등(2011)을 참고 한다. 따라서 짝힘은 식 (2)에 의해

$$f(\eta, \xi) = \begin{cases} \frac{\eta + \xi}{\|\eta + \xi\|} cs, & \|\xi\| \leq \delta \\ 0, & \|\xi\| > \delta \end{cases} \quad (3)$$

이다. 페리다이나믹스에서는 파괴와 관련된 재료물성치인 파괴 에너지 G_0 와 관련하여 임계 상대 신장(critical relative elongation)을 계산하고 각 결합의 상대 신장값이 임계값을 넘어가는 경우에 그 결합을 분리하고 재결합을 허용하지 않는(비가역) 방식으로 간단하게 파괴 모델을 구성할 수 있다 (Silling 등, 2005). 상수 미소재료상수에 대한 상대 신장의 임계값(critical relative elongation)은 $s_0 = \sqrt{4\pi G_0 / 9E\delta}$ 이다.

3. 동적취성 파괴시뮬레이션

3.1 문제 구성

그림 1에서 보이는 바와 같이 길이 0.1m, 폭 0.04m인 얇은 직사각형 판을 고려한다. 판은 0.05m의 선행 수평 균열을 가지고 있고 균열 방향에 대칭이 되는 개방 하중 조건에 놓여 있다. 모든 시뮬레이션 결과는 2차원 동적 외연적 과도 동역학 해석(Explicit Transient Dynamic Analysis)을 통해 계산된다. 그림 1과 같이 상, 하면에 하중을 갑자기 가하고 동적 시뮬레이션 동안 일정하게 유지한다. 이러한 하중 조건은 하중 경계 주변에서 충격파를 생성하게 되고 충격파들은 선행 수평 균열에서 서로 만나고 간섭하게 된다. 그 결과로 발생하는 인장 응력은 선행 균열이 전파되게 하고, 이는 충분한 응력 확대 계수(stress intensity factor)에 도달하게 되면 분기 균열로 진행된다. 많은 실험들(Bowden 등, 1967)은 유리 재료에 정적 하중으로 동적 균열 전파를 관측한다. 이러한 하중 조건을

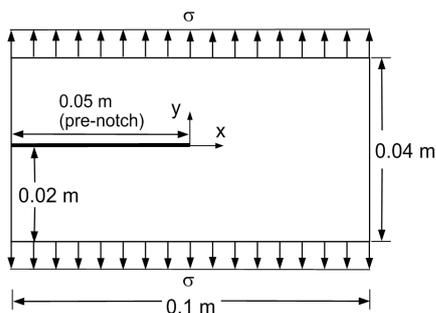


그림 1 개방 하중 조건에 놓인 pre-notch가 있는 직사각판

외연적 동적 해석에 적용하는 것은 비효율적이고 비현실적이다. 대신에 동적하중에 의한 충격파를 제거하기 위해 하중 대신 일정한 인장 속도장을 하중 경계에 부과하며 초기 조건으로 판의 상부로부터 하부까지 선형적으로 속도장을 변화시킨다. 이러한 하중 조건을 통해 실험 조건에 보다 근접한 해석결과를 얻을 수 있었다.

보다 엄밀한 수치해석을 위해 수치해석적으로 보다 안정적인 중앙차분 시간 적분법인 Velocity-Verlet 방법을 적용한다. n 시간 위치에서 $n+1$ 시간 위치의 가속도와 위치 벡터를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$\ddot{u}_{n+1/2} = \dot{u}_n + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_n \quad (4)$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \dot{u}_{n+1/2}$$

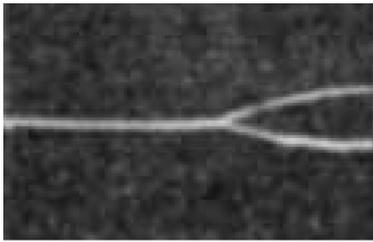
$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_{n+1}$$

시뮬레이션동안 동일한 시간 간격을 사용하며 이 시간 간격은 절점 간격과 물성치를 고려해서 계산된 안정된 시간 간격이다(Silling 등, 2005). 공간 적분을 위해 중점 법칙을 사용하였다. 모든 수치해석 결과는 일정한 절점 간격을 가지는 균일 격자에 대해 수행되었다. 모든 해석에서 horizon 크기와 절점 간격의 비[파라미터 m (Ha 등, 2010; 2011)]는 대략 4이다. 이 값 $m=4$ 는 분기 균열 시뮬레이션의 수렴성 연구를 통해 계산된 값이다(Ha 등, 2010).

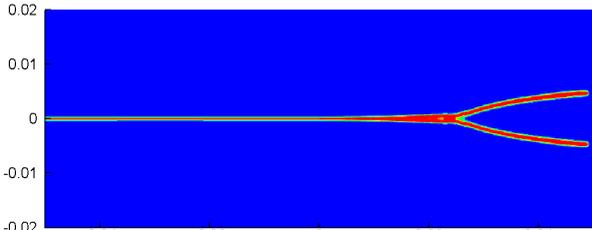
수치해석을 위해 사용된 취성 재료는 Duran 50 유리로서 실험적으로 주어진 물성치(Doll, 1975)는 다음과 같다. 밀도 2235kg/m^3 , 영률 65 GPa, 포아송비 0.2, 분기 균열시 파괴 에너지, G_0 204J/m^2 이다.

3.2 분기 균열각도와 균열 전파속도

그림 2(a)는 실험적으로 도출된 분기 균열 형상(Bowden, 1967)을 보여준다. 실험은 정적 하중 상태에서 수행되었다. 충격파 하중을 사용했을 때의 페리다이나믹스 해석결과는 그림 3과 같다. 그림은 손상 지수(horizon 내에서 끊어진 결합의 수/초기 결합의 수)를 나타낸 것으로 청색은 손상비가 0, 즉 손상이 없는 상태, 적색은 손상비가 0.4이상, 즉 해당 절점 기준으로 horizon 내에서 40%이상의 결합이 끊어진 상태, 인부분을 나타낸다. 예를 들어 선행 수평 균열 위에 있는 절점은 50% 정도의 손상을 가지고 있다. 분기 균열각도가 실험보다 넓은 것을 확인할 수 있다. 원인을 규명하기 위해 동일한 수치 모델에 대해 충격파를 배제하는 속도장 경계 조건/초기 조건을 가지고 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 속도장 초기 조건과 경



(a) 실험결과(Bowden 등, 1967)



(b) 페리다이나믹스 해석 결과

그림 2 균열 형상: 실험결과와 페리다이나믹스 결과 비교

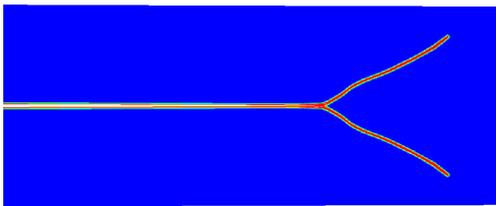
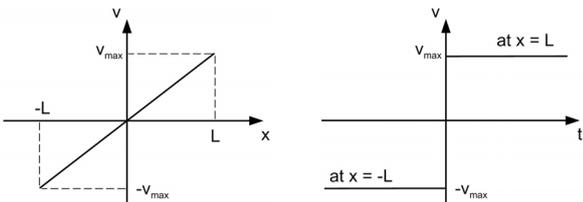


그림 3 충격과 하중에서의 페리다이나믹스 균열 형상 ($\sigma=12\text{MPa}$)

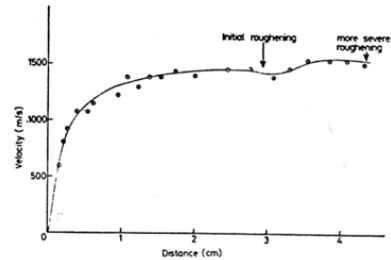


(a) 초기 조건 (b) 경계 조건

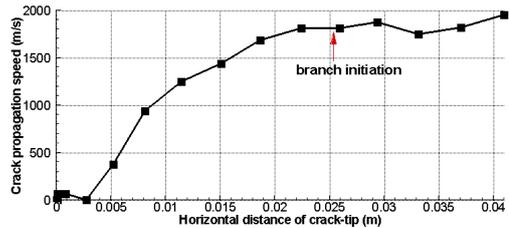
그림 4 속도장 초기 조건과 경계 조건

계 조건은 그림 4와 같다. 일정한 속도 4m/s를 판의 상/하부 경계에 인장 방향으로 수직으로 가하였다. 이러한 하중 조건에 대한 페리다이나믹스 해석결과는 그림 2(b)와 같다. 하중으로부터 생성된 응력파의 간섭이 없는 실험조건과 유사한 환경을 조성하였기 때문에 페리다이나믹스 시뮬레이션 결과로부터 얻어진 분기 균열각도가 실험결과와 매우 흡사함을 알 수 있다.

분기된 균열의 균열 전파속도를 또한 비교하였다. 그림 5에서 확인할 수 있듯이 실험결과와 페리다이나믹스 결과로 얻어진 균열 전파속도 프로파일이 서로 매우 유사하다. 특히 전파속도가 분기 직후 약간 떨어지는 것을 실험과 수치시뮬레이션에서 공통으로 확인할 수 있다. 동일한 현상이 여러 실험들로부터 공통적으로 확인된 바 있다(Field, 1971;



(a) 실험적 균열 전파속도(Field 등, 1971)



(b) 페리다이나믹스 균열 전파속도

그림 5 균열 전파속도: 실험 결과와 페리다이나믹스 결과 비교

Ramulu 등, 1985; 1983; Ravi-Chandar, 2004). 페리다이나믹스는 이러한 분기 균열을 발생시키기 위해 어떠한 인위적인 조건도 사용하지 않는다. 페리다이나믹스 해석에서 균열 현상은 페리다이나믹스 수치해의 일부일 뿐이다. 페리다이나믹에서는 하나의 손상파라미터(상대 신장값)를 사용하며 변형에 의해 상대 신장값이 특정 극값을 넘어서게 되면 국부적으로 각 결합에 대해 손상이 발생한다. 이 극값 역시 인위적으로 계산되지 않고 각 결합에 대해 파괴 에너지로부터 유도된 실제 물성치이다.

3.3 분기 균열

오랜 세월 동안 많은 실험을 거듭해 오면서 취성 재료의 분기 균열 과정에 대해서 특정한 현상이 지속적으로 관찰되고 정의되었다: 극한 시점에 도달한 균열은 둘 이상으로 분기되어 전파되고 그 전파속도는 기존 균열의 전파속도와 크게 달라지지 않는다(Ravi-Chandar, 2004).

관련된 실험들(Ravi-Chandar, 2004; Scheibert, 2010)로부터 도출된 결론은 동적취성 파괴는 일련의 미소-손상과 미소-균열들의 진화로부터 발생한다는 것이다. 이것은 동적취성 파괴가 기존의 파괴역학들이 설명하는 “외적인 문제”에 의해 발생한다기 보다는 “내적인 문제”에 의해 조절된다는 것을 시사한다. 이는 또한 기존의 선형 파괴역학 이론과 실험에 기초한 결론 사이의 모순을 설명한다. 본 연구 논문에서는 분기 균열에 대한 페리다이나믹스 결과를 분석하고 실험적으로 도출된 결과들과 비교하여 검증한다. 실제로 그림 6에서 관찰되듯이 균열이 분기되기 전에 단일 전파 균열에 의한 손상 지역이

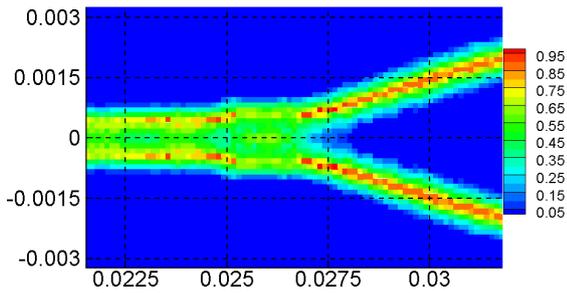


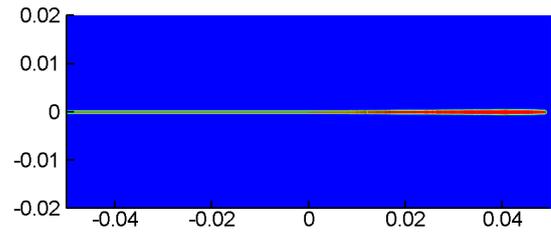
그림 6 분기 균열 시점 근처(그림 2(b))에서 확대된 손상 지역 (페리다이나믹스 결과)

두꺼워지고 일단 분기가 발생하면 그러한 “process zone”이 급격히 감소해 버린다. 이러한 현상은 균열 전파속도에 큰 변화를 초래하지 않고 발생한다. 분기 전후의 이러한 균열 현상을 명확히 관찰하기 위해서 손상 지수를 0과 1사이로 확대하였다. 본 연구 논문의 다른 페리다이나믹스 균열 결과는 손상 지수를 0과 0.4 사이로 사용한다.

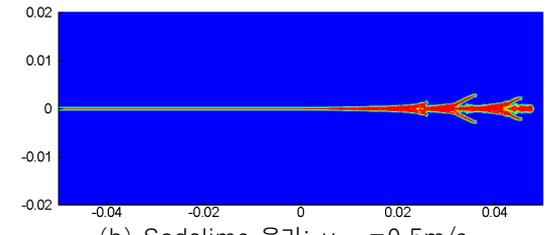
3.4 연쇄 분기 균열과 재료물성치의 영향

페리다이나믹스 시뮬레이션에서는 균열의 분기뿐만 아니라 균열이 구속(crack arrest)되기 위해서도 어떠한 인위적인 조건이 필요하지 않다. 다양한 크기의 속도장 경계 조건으로부터 그림 7과 같은 다양한 페리다이나믹스 균열 패턴을 얻을 수 있다. 그림 7의 (a, c)는 Duran 50 유리에 대한 결과이고 (b, d)는 Sodalime 유리에 대한 결과이다. Sodalime 유리는 Duran 50 유리와 밀도는 비슷하나 강성(영률)이 더 강하고 파괴에너지는 약한 취성 재료이다. Duran 50 유리의 경우 매우 낮은 속도장에서는 분기 균열이 발생하지 못하고(그림 7(a)) 높은 속도장에서는 여러 차례의 분기 균열 시도가 관측된다(그림 7(c)). Sodalime 유리는 Duran 50 유리를 사용할 때보다 조금더 낮은 속도에서 다중 분기 균열 시도가 관측되고(그림 7(b)) 매우 높은 속도장에서는 복잡한 다중 분기 균열도 관측된다(그림 7(d)). 이와 같은 거동은 속도장의 크기에 의해 조절된다.

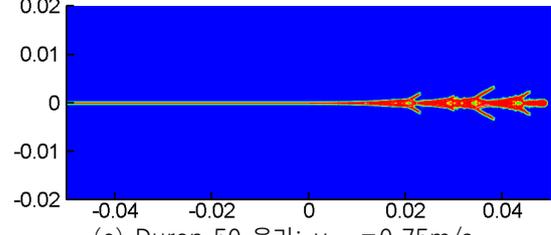
두 취성 재료가 비슷한 분기 균열 패턴을 보이는 경우에도 속도장의 크기는 다소 차이를 보인다(그림 8). 속도장 하중 조건으로는 다수의 구속된 분기 균열 시도로 이루어지는 “fish-bone” 타입의 균열 패턴이 주로 관측되는 반면, 충격과 하중을 사용할 경우에는 그림 9(b)와 같이 다수의 연쇄 분기 균열을 얻어내기 쉽다. 충격과 하중의 경우에도 하중의 크기가 매우 큰 경우 연쇄 분기 균열이 발생하고(그림 9(b): $\sigma = 32\text{MPa}$) 하중이 약하면 하나의 분기 균열만이 관측된다(그림 3: $\sigma = 12\text{MPa}$). 이와 같은 연쇄 분기 균열은 또한 실험적으로 높은 응력 확대 계수에 대해 관측된다(그림 9(a)). 실



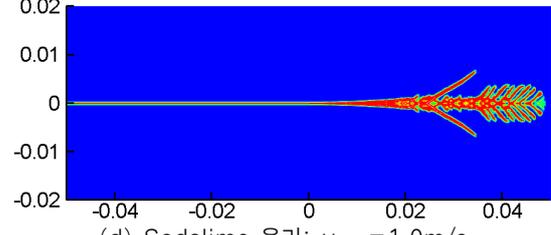
(a) Duran 50 유리: $v_{\text{max}} = 0.25\text{m/s}$



(b) Sodalime 유리: $v_{\text{max}} = 0.5\text{m/s}$

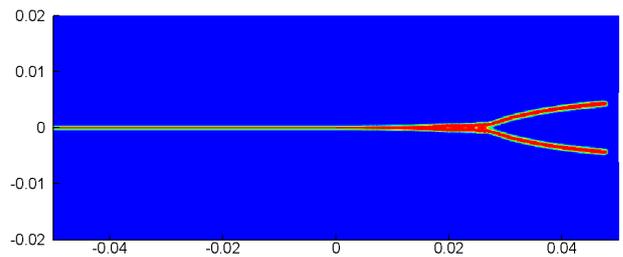


(c) Duran 50 유리: $v_{\text{max}} = 0.75\text{m/s}$

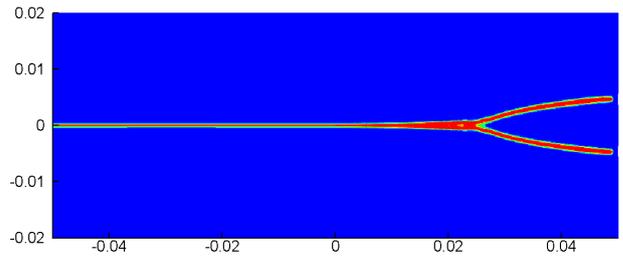


(d) Sodalime 유리: $v_{\text{max}} = 1.0\text{m/s}$

그림 7 서로 다른 취성 재료에 대한 다양한 동적취성 파괴패턴

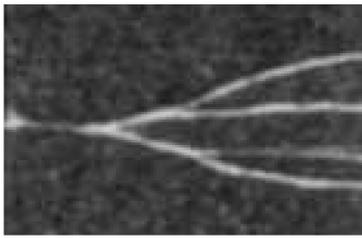


(a) Duran 50 유리: $v_{\text{max}} = 0.5\text{m/s}$

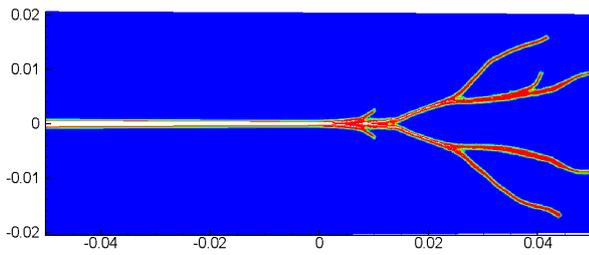


(b) Sodalime 유리: $v_{\text{max}} = 0.4\text{m/s}$

그림 8 서로 다른 취성 재료에 대한 유사한 동적취성 파괴패턴



(a) 실험적 균열 경로(Ramulu 등, 1983)



(b) 페리다이나믹스 균열 경로($\sigma=32\text{MPa}$)

그림 9 연쇄 분기 균열: 실험과 페리다이나믹스 결과 비교

험에서는 높은 응력 확대 계수를 얻기 위해서는 비교적 뾰족한 형태의 선형 균열을 사용하였다(Ramulu 등, 1983). 매우 뾰족한 선형 균열에서는 그림 7(a)와 비슷한 직선 균열 전파도 관측된다.

8. 결 론

취성 물질에 대한 동적파괴 시뮬레이션에는 해결되어야 할 많은 난제들이 있다. 본 연구 논문에서는 페리다이나믹스 모델을 통해 다양한 중요한 동적파괴 특성들을 해석해 낼 수 있음을 보였다. 또한 분기 균열각도와 균열 전파속도에 응력 파가 미치는 영향에 대해서도 분석하였다. 더하여 최근의 실험적 연구로 입증된 분기 균열에 대한 논의로 균열은 극한 시점에 도달했을 때(거시적으로는 분기를 위한 응력 확대 계수에 이르렀을 때) 둘 이상으로 분기되어 전파되고 그 전파 속도는 기존 균열의 전파속도와 크게 달라지지 않는다는 것이 있다. 페리다이나믹스 시뮬레이션을 통해 이러한 논의를 또한 수치적으로 증명할 수 있었다. 다양한 재료와 하중 조건에 대해서 연쇄 분기 균열 등의 현상도 페리다이나믹스 시뮬레이션으로 모사 가능함을 보였다. 특정 재료들에 대해서 미소-균열 생성 및 전파와 거시적 관점에서의 균열 거동과의 연결성을 찾는 것은 완전한 동적취성 파괴거동예측모델을 개발하기 위한 연구의 다음 단계가 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 지원에 의한 창의적연구사업

단(과제관리번호 400-20110012)과의 공동연구로 진행되었습니다. 저자들은 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다. Florin Bobaru 교수의 도움에 또한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- Belytschko, T., Chen, H., Xu, J., Zi, G. (2003) Dynamic Crack Propagation Based on Loss of Hyperbolicity and a New Discontinuous Enrichment, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 58(12), pp.1873~1905.
- Bowden, F., Brunton, J., Field, J., Heyes, A. (1967) Controlled Fracture of Brittle Solids and Interruption of Electrical Current, *Nature*, 216, pp.38~42.
- Doll, W. (1975) Investigations of the Crack Branching Energy, *International Journal of Fracture*, 11(1), pp.184~186.
- Field, J. (1971) Brittle Fracture: Its Study and Application, *Contemporary Physics*, 12(1), pp.1~31.
- Gerstle, W., Sau, N., Silling, S. (2007) Peridynamic Modeling of Concrete Structures, *Nuclear Engineering and Design*, 237(12-13), pp.1250~1258.
- Ha, YD., Bobaru, F. (2010) Studies of Dynamic Crack Propagation and Crack Branching with Peridynamics, *International Journal of Fracture*, 162(1), pp.229~244.
- Ha, YD., Bobaru, F. (2011) Characteristics of Dynamic Brittle Fracture Captured with Peridynamics, *Engineering Fracture Mechanics*, 78(6), pp.1156~1168.
- Livne, A., Ben-David, O., Fineberg, J. (2007) Oscillations in Rapid Fracture, *Physical Review Letters*, 98(12), p.124301.
- Ravi-Chandar, K. (2004) *Dynamic Fracture*, Elsevier.
- Ramulu, M., Kobayashi, A.S. (1985) Mechanics of Crack Curving and Branching a Dynamic Fracture Analysis, *International Journal of Fracture*, 27(3), pp.187~201.
- Ramulu, M., Kobayashi, A., Kang, B., Barker, D. (1983) Further Studies on Dynamic Crack Branching, *Experimental Mechanics*, 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, *International Journal of Fracture*, 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, *International Journal of Fracture*, 26(3), pp.189~200.

Silling, S. (2000) Reformulation of Elasticity Theory for Discontinuities and Long-Range Forces, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(1), pp.175~209.

Silling, S., 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., Epton, M., Weckner, O., Xu, J.,

Askari, E. (2007) Peridynamic States and Constitutive Modeling, *Journal of Elasticity*, 88(2), pp.151~184.

Scheibert, J., Guerra, C., C'elari'e, F., Dalmas, D., Bonamy, D. (2010) Brittle-quasibrittle Transition in Dynamic Fracture: An Energetic Signature, *Physical Review Letters*, 104(4), Jan, p.045501.

- 논문접수일 2011년 10월 28일
- 논문심사일 2011년 11월 8일
- 게재확정일 2011년 11월 21일