

세라믹/금속판재의 고속충돌 파괴 유한요소 병렬 해석기법

Parallel Computing Strategies for High-Speed Impact into Ceramic/Metal Plates

문 지 중* 김 승 조** 이 민 형†

Moon, Ji-Joong Kim, Seung-Jo Lee, Minhyung

(논문접수일 : 2009년 9월 17일 ; 심사종료일 : 2009년 12월 15일)

요 지

고속충돌 파괴현상에 대한 병렬계산기법을 다루었다. 특히 세라믹 재료는 다른 연성 금속 재료와 달리 강성이 크고 가볍기 때문에 충돌 방호 구조물로 활용이 되고 있다. 재료의 고속 관통 문제의 경우 매우 짧은 시간에 대변형이 일어나며, 세라믹 재료의 깨지는 특성 때문에 실험적으로 이를 분석하기 매우 어렵다. 본 연구에서는 세라믹 파괴현상을 수치적으로 모사하기 위해 절점분리기법을(node separation scheme) 적용하였다. 절점분리기법의 제약으로는 재료의 파괴가 발생함에 따라 새로운 절점이 생기게 되고, 이로 인해 지속적으로 계산 시간이 늘어난다는 사실이다. 해석 시간을 단축하기 위해 MPI(Message Passing Interface)를 이용한 병렬화를 수행하였다. 고속충돌 문제의 특이사항으로 시간에 따라 각각의 프로세서에 할당된 영역의 계산량이 비균일 해지며, 이로 인한 병렬 성능의 저하가 발생한다. 본 연구에서는 이를 방지하기 위해 동적영역할당기법을 적용하였다. 고속충돌 문제 해석을 통하여 적용된 기법의 정확성 및 병렬 성능에 대해 기술하였다.

핵심용어 : 고속충돌, 세라믹파괴, 대변형, 절점분리기법, 병렬계산, 동적영역할당

Abstract

In this paper simulations for the impact into ceramics and/or metal materials have been discussed. To model discrete nature for fracture and damage of brittle materials, we implemented cohesive-law fracture model with a node separation algorithm for the tensile failure and Mohr-Coulomb model for the compressive loading. The drawback of this scheme is that it requires a heavy computational time. This is because new nodes are generated continuously whenever a new crack surface is created. In order to reduce the amount of calculation, parallelization with MPI library has been implemented. For the high-speed impact problems, the mesh configuration and contact calculation changes continuously as time step advances and it causes unbalance of computational load of each processor. Dynamic load balancing technique which re-allocates the loading dynamically is used to achieve good parallel performance. Some impact problems have been simulated and the parallel performance and accuracy of the solutions are discussed.

Keywords : ceramic material, high speed impact, parallel, contact-impact, dynamic load balancing

1. 서 론

컴퓨터의 성능이 발전하면서 컴퓨터를 이용한 해석은 제품 개발의 필수적인 과정중의 하나가 되었다. 특히 고속충돌 문제의 컴퓨터를 이용한 모사는 과거 군사 산업에 주로 이용되던 것과 달리 충돌 안전성 해석, 새의 충돌, 박판성형 등 많은 부분에서 사용되고 있다. 하지만 고속충돌 문제에서 발생하는

재료의 파괴현상 모사는 재료의 비선형성 뿐만 아니라 복잡한 접촉 처리 과정을 효과적으로 다루어야 하기 때문에 매우 어려우며 많은 계산량을 필요로 한다(Yoo 등, 2003). 특히 최근 방위 산업 등에서 크게 주목을 받고 있는 세라믹 재료는 파괴 현상이 다른 연성 물질과는 달리 두드러지는 한 개의 균열에 의해서도 전체 재료가 파괴되기 때문에 연성 재료에 많이 쓰이는 파괴 모델로는 해석할 수 없는 단점이 있다.

† 책임저자, 정희원 · 세종대학교 기계항공우주공학부 교수
Tel: 011-479-0135 ; Fax: 02-3408-4333
E-mail: mlee@sejong.ac.kr

* 서울대학교 기계항공공학부 박사과정

** 서울대학교 기계항공공학부 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 이러한 문제를 극복하기 위해 절점분리기법을 적용하였다(Hwang, 2002). 그러나 절점분리기법은 세라믹 재료의 파괴 현상을 신뢰성 있게 모사 할 수 있으나 새로운 절점을 생성하기 때문에 접촉 처리 계산량을 더욱 증가 시켜 실제적인 문제에 적용하기 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 MPI(Message Passing Interface)를 이용한 병렬화 기법이 고려되었으며, 특히 시간에 따라 비균일하게 변하는 각 프로세서의 계산량을 자동으로 인지하고 계산량을 재 할당하는 동적영역할당기법이 적용되었다. 대표적인 MPI를 이용한 고속충돌 문제 해석 연구로 PRONTO3D(Hwang, 2002)와 CTH(McGlaun 등, 1990)를 들 수 있다.

2장에서 고속충돌 기법에 대해 간략히 기술하고 특히 세라믹 재료의 파괴현상 모사기법을 다루었다. 3장에서는 병렬화를 위해 사용된 기법들에 대해 논의하였다. 4장에서는 계산예제를 다루었는데 유리 막대의 충돌, 세라믹/금속 다중판재의 충돌 문제에 대해 적용, 해석 결과를 실험과 비교하여 검증하고 얻어진 병렬 성능에 대해 기술하였다.

2. 고속충돌 계산기법

2.1 유한요소 정식화 및 접촉처리

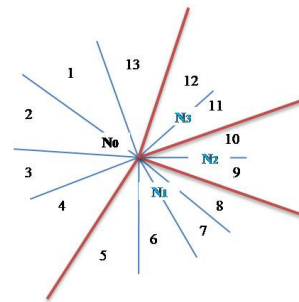
본 연구에서는 라그랑지(Lagrangian)기반의 Modified central difference 시간 스텝 제어기법을 이용하여 유한 요소 정식화를 하였으며, 일반적으로 고속충돌 문제 해석에 주로 사용되는 육면체 요소 대신 사면체(tetrahedral) 요소를 사용하였다. 사면체요소의 경우 세 개의 절점이 접촉면을 결정하기 때문에 접촉면 정의에 있어 간단하고, 복잡한 구조 또한 쉽게 격자를 나눌 수 있는 장점이 있다. 적용된 재료 모델은 탄성, 탄소성 재료 모델 뿐만 아니라 재료의 열적 연화를 고려한 Johnson-Cook 재료 모델과 세라믹 재료 해석을 위한 Mohr-Coulomb, Rajendran-Groove 재료 모델까지 적용되어 있다. Lagrangian기반의 고속충돌 문제 해석 코드에 있어 대변형 문제의 경우 발생하는 시간 스텝 크기의 감소 문제를 해결하기 위해 요소 소진 기법(element erosion) 또한 적용되었다.

접촉 처리는 전체 계산에서 가장 많은 시간이 소요되는 과정으로 효율적인 접촉 영역 검색을 위해 전역 검색과 지역 검색으로 실행된다. 본 연구에서는 전역 검색 방법으로 position code algorithm과 bucket sorting algorithm을 사용하였으며, self-contact이 고려되었다. 접촉력 부가를 위해 Lagrangian multiplier 기법 보다 정확한 값을 줄 수 있는 Defense node algorithm이 적용되었으며, master-slave 접촉만 고려했을

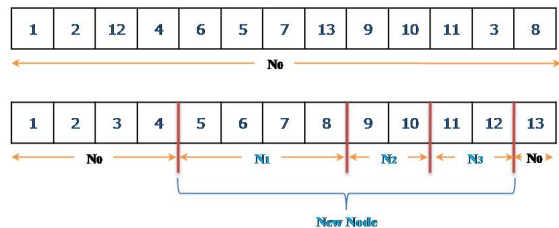
경우 나타날 수 있는 모서리 관통 현상을 방지하고 좀 더 정확한 계산을 위해 모서리 접촉이 적용되었다. 효율적인 모서리 접촉 계산을 위하여 모서리를 생성하는 두 접촉면의 법선 벡터가 이루는 각이 예각인 경우에만 접촉 검색을 수행하였으며, master-slave접촉에서와 같이 Defense node algorithm을 사용하였다. 자세한 내용은 참고문헌(Hwang, 2002; Yoo 등, 2003)을 참조한다.

2.2 세라믹 파괴 절점분리기법

세라믹 재료는 가볍고 강도가 크다는 장점이 있다. 이러한 세라믹 재료의 강도는 재료에 가해지는 압력과 밀접한 관련이 있기 때문에 압력에 따라 세라믹 재료의 취성 특성을 잘 모사하고 파괴 후의 재료의 탄성을 어떻게 감소시키는지 매우 중요하다. 본 연구에서는 이러한 어려움을 극복하기 위해 절점분리기법을 사용하였다. 절점분리기법은 모든 요소의 면이 잠재적인 균열 가능성이 있다고 보고 압력을 많이 받은 요소의 요소면에 절점을 생성시켜 균열을 모사하게 된다(Camacho 등, 1996). 따라서 전체 모델의 요소 연결 정보와 요소의 외곽변 정보가 변화하기 때문에 격자 정보의 데이터 구조에 많은 주의가 필요하다. 특히 재료가 파괴될 때 일관성을 유지하는 것이 중요하며, 이를 위해 본 연구에서는 그림 1과 같은 데이터 구조를 사용하였다. 그림 1의 (a)는 격자 구조의 균열을 나타내며, 그림 1의 (b)는 격자구조의 저장 데이터 형태이다.



(a) 파괴된 취성 재료의 격자 구조



(b) 절점 생성을 위한 데이터 구조

그림 1 절점분리를 위한 데이터 구조

3. 고속충돌 계산 병렬화기법

본 논문의 가장 핵심적인 내용에 해당된다. 기존 코드를 C언어로 재 기술하였으며 최근에 병렬화 구현한 연구내용을 아래에 기술한다.

3.1 계산 영역의 분할

병렬 계산을 하기에 앞서 우선적으로 각각의 프로세스에 계산영역을 균등하게 할당하여야 하는데, 대표적으로 요소 또는 절점의 연관 관계를 이용하여 전체 모델의 그래프를 생성하고, 이를 이용하여 도메인과 도메인간의 접하는 절점 또는 요소가 최소가 되게 분할하는 그래프 분할기법과 절점의 좌표를 이용하여 전체 모델을 인접한 절점끼리 분할하도록 하는 방법을 들 수 있다.

고속충돌 문제는 정적 해석과는 달리 절점의 위치가 접촉력을 부가해야 하는지에 대한 기준이 되기 때문에 도메인을 분할 할 때, 이를 고려하여 가능한 인접 절점끼리 영역을 분할하는 것이 효율적이다. PRONTO3D의 경우, 접촉 영역을 할당하기 위해서만 좌표를 기준으로 이진 트리 형태로 영역을 분할하는 이진 분할기법을 이용하였으나, 본 연구에서는 접촉 계산 영역과 유한요소 계산 영역을 동일하게 가져가기 때문에 이 방법을 유한요소 분할에 적용하였다. 그림 2에 동일한 모델에 대해 그래프 분할기법(metis)과 좌표를 이용하여 8개로 분할한 영역을 비교해 놓았다. 충돌계산에서는 (b)의 분할이 적절함을 보여준다.

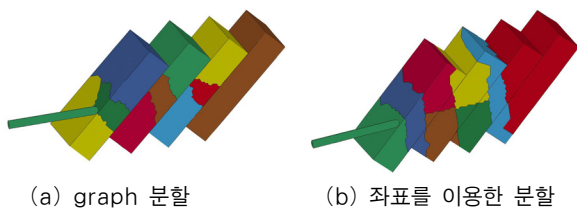


그림 2 영역 분할

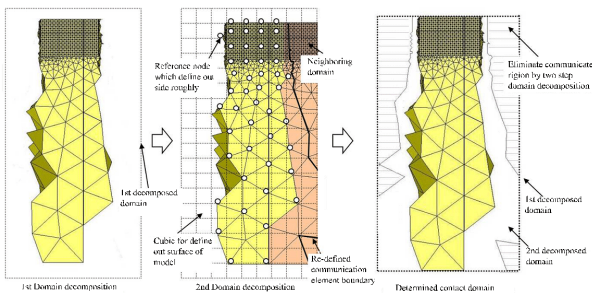


그림 3 접촉 검색영역의 결정

3.2 접촉 검색 영역의 결정

각각의 프로세서에 영역이 할당되고 나면 접촉 검색 영역을 결정해야 한다. 본 연구에서는 접촉 검색 영역을 두 단계로 나누어 결정한다. 첫 단계에서 할당된 도메인의 크기의 10% 확대된 영역을 접촉 검색 영역으로 잡고, 그 접촉 검색 영역의 크기를 각각의 프로세스에 reducing통신을 한다. 이를 이용하여 자신의 도메인과 인접하고 있는 도메인을 결정할 수 있도록 하였다. 두 번째 단계에서 내 도메인의 외곽면의 정보를 인접하고 있는 도메인과 통신을 수행하고, 그 정보를 이용하여 접촉력 계산을 위해 통신해야 할 요소를 선별하여 최종 접촉 검색 영역을 결정한다. 이 때 인접한 도메인의 외곽면의 정보를 효과적으로 알아내기 위해 내 도메인을 여러 개의 육면체로 나눈 다음, 그 육면체마다 외곽면에 해당되는 절점이 있을 경우만 대표되는 절점 좌표를 저장하고 이를 인접 도메인과 통신하도록 하는 방법을 사용하여 통신량을 최소화할 수 있도록 하였다. 그림 3에서 보는 것과 같이 인접 도메인에서 접촉력 계산 시 불필요한 영역이 줄어들었음을 볼 수 있는데, 이러한 영역은 전체 모델의 격자의 크기가 균일할 경우 불필요한 영역의 크기가 큰 영향을 주지 않지만 균질하지 않을 경우 해당 영역의 계산량은 더욱 커지게 된다.

3.3 동적영역할당기법

고속충돌 문제는 시간에 따라 프로세스에 할당된 영역의 격자의 모양, 절점의 개수 등이 변하기 때문에 계산량의 불균형이 생기게 된다. 이러한 불균형은 특정 프로세스에서 해석이 오래 걸리게 되고 전체 병렬효율을 저하시키는 요인이 된다. 대표적인 동적영역할당기법으로 Parallel Recursive Coordinate Bisection을 들 수 있다. 이 방법은 참고 문헌(Yoo 등, 2003)에서 보고 된 바와 같이 좋은 병렬 성능을 달성하였다. Parallel RCB방법은 내력 벡터 계산 영역과 접촉 영역을 분리하여 접촉 영역에 대해서 이러한 기법을 적용하였지만 본 연구에서는 이와는 달리 영역을 따로 구분하여 고려하지 않기 때문에 이 기법을 영역 분할에 적용하여 동적영역할당을 하도록 하였다.

한편 매 시간 스텝마다 영역을 재 분할하고, 영역이 재 할당된 요소에 대해 통신을 수행하는 것은 재 할당된 요소의 개수가 클 경우 병렬성능의 저하가 생길 수 있다. 따라서 각각의 프로세스가 초기의 자신의 전체 외곽면의 개수를 확인하고, 이 외곽면의 개수가 초기 설정된 개수보다 특정 비율만큼 증가하게 되면 전체 프로세스에게 동적영역할당기법의

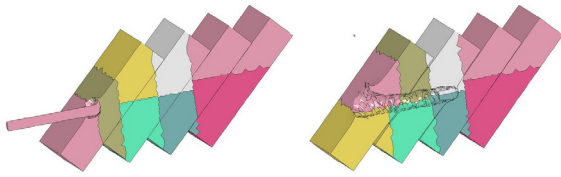


그림 4 시간에 따른 동적영역할당

사용을 triggering하는 방법을 사용하였다. 그림 4에 초기 도메인 할당과 동적으로 영역을 할당되었을 경우를 비교하여 나타내었다. 나중 시간대에서 충돌체의 영역이 처음과 달라져 영역분할이 적절히 이루어짐을 보여준다.

3.4 절점분리기법의 병렬화

병렬 절점분리기법은 단일 프로세서 계산과는 달리 그림 5에서 보는 것과 같이 각각의 프로세서에서 동일한 경계면의 절점에 대해 중복되어 생성하게 되기 때문에 병렬화시에 많은 어려움이 따른다. 이와 같이 중복되어 절점이 생길 경우 생성된 동일한 절점에 대해 다른 절점 번호가 부과되게 되며, 프로세서 간의 통신에 있어 문제가 생기게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 본 연구에서는 그림 6과 같은 데이터 구조를 사용하였다.

먼저 각각의 절점에 대해 새로 생성되는 절점의 개수를 확인하고 이를 인접한 영역 끼리 공유한다. 그런 후 각각의 영역의 경계면에 있는 절점의 개수는 중복으로 생성되기 때문에 이를 중복된 개수만큼 나누어 주면 각각의 프로세서에서 생성되는 절점의 개수를 알 수 있게 된다. 그 후 각각의 프로세서에 대해

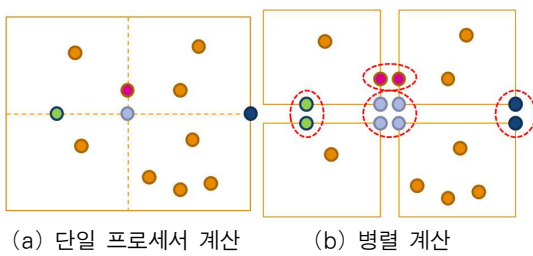


그림 5 병렬 계산시의 중복 절점의 생성

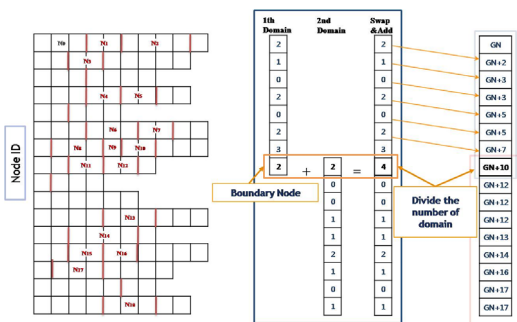


그림 6 병렬 절점분리기법을 위한 데이터 구조

새로 생성된 절점에 대해 순차적으로 부여하게 되면 중복되는 절점 번호없이 절점을 생성할 수 있게 된다. 또한 새로 생성되는 요소면에 대해서도 일관성 있게 번호를 부여하여야 하는데, 한 개의 면이 두 개 이상의 면을 생성할 수 없기 때문에 초기 요소면 정보를 구성할 때, 새로 생성될 요소면의 번호를 미리 부여하여 요소면 번호의 중복을 방지하였다.

4. 계산 예

4.1 유리막대의 고속충돌

적용된 기법들을 검증하기 위해 170mm의 길이와 12.7mm의 반지름을 갖는 유리 막대와 금속 막대의 충돌 문제를 150,000개의 요소를 이용하여 해석하고, 실험결과(Repetto 등, 2000)와 비교하였다. 초기 금속 막대의 속도는 0.21km/s이며, 유리 막대에 대해서는 Rajendran-Groove재료 모델을, 금속 막대에 대해서는 Johnson-Cook재료 모델을 사용하였다. 재료 상수를 표 1에 나타내었다.

해석 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 최초 파괴가 유리 막대의 안쪽에서부터 발생하게 되며, 세라믹 재료의 파괴 특성 중의 하나인 Radial Crack이 잘 묘사되고 있음을 알 수 있다. 그림 8에 32 프로세서를 사용하였을 경우에 대한 고정 크기 Speed Up결과를 나타내었다. 32 프로세서에 대해 18.74(이론 성능 대비 58.54%)의

표 1 재료 상수

	금속막대	유리막대
Young's Modulus (GPa)	210	87
Poisson Ratio	0.3	0.3
Density(g/cm ³)	7.8	2.5

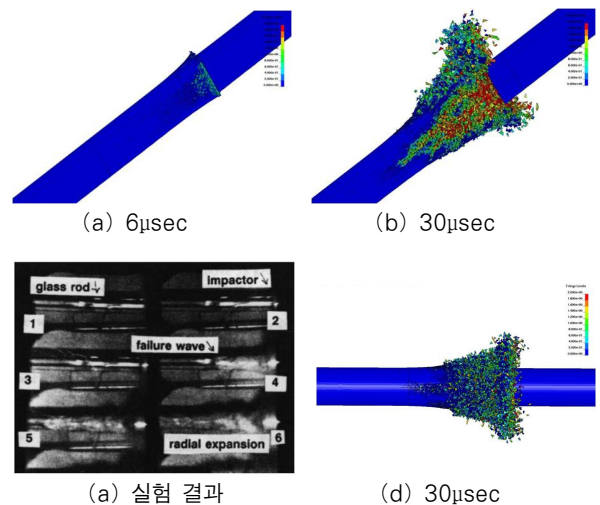


그림 7 해석 결과

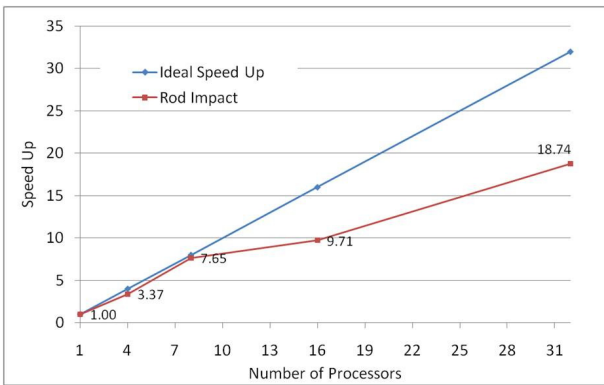


그림 8 고정 크기 Speed Up 성능

성능을 얻을 수 있었다. 16개 프로세서 이상의 경우부터 성능의 저하가 큰데, 이는 절점의 개수가 많아져 전체 계산시간에 대해 통신량의 비중이 많아져 생기는 문제로 파악된다. 이를 위해 좀더 효율적인 통신 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 세라믹/금속 적층의 고속충돌

적용된 기법을 실제적인 세라믹/금속 다중 판재의 충돌 문제에 대해 적용하였다. 해석을 위한 문제 정의를 그림 10에 나타내었다. 충돌체는 지름대비 길이가 10.7인 텅스텐 로드

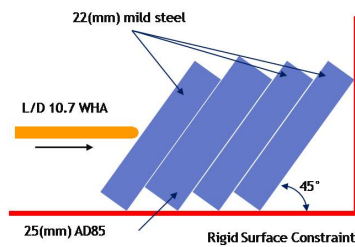


그림 9 해석 모델 정의

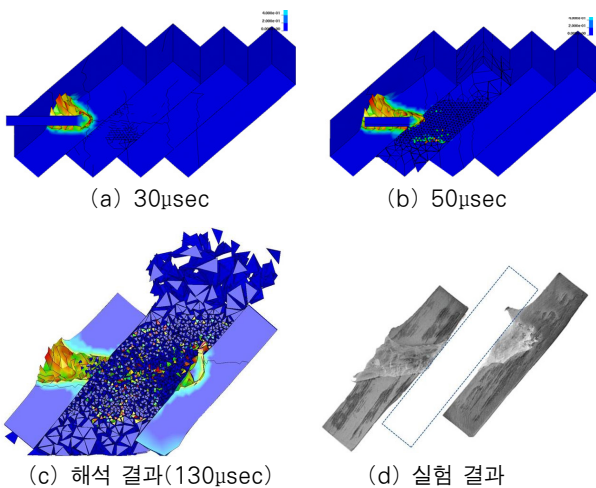


그림 10 해석 결과

이다. 판재는 각도가 45도 기울어져 있다.

해석 결과를 그림 9에서 실험 결과와 비교하였다. 판통 깊이가 실험 결과보다 작기는 하나 전체적인 판통 양상이 잘 묘사됨을 볼 수 있으며, 판재의 기울어짐으로 인한 판통자의 회전도 잘 묘사되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 연성재료 및 특히 취성재료의 고속충돌 문제를 효과적으로 해석하기 위해 병렬화 연구를 수행하였다. 취성재료의 파괴거동을 묘사하기 위해 절점분리기법을 구현하였고, 연성재료는 이 부분이 계산에서 생략된다. 병렬화 기법에서는 각각의 프로세서에 균등하게 계산량을 분할하기 위해 좌표를 기준 이진 분할기법을 사용하였으며, 유한요소 계산 영역과 접촉 계산영역 간의 통신량을 줄이기 위하여 유한요소 계산 영역을 기준으로 접촉 계산 영역을 두 단계로 정의하였으며, 모서리 접촉 및 요소 소진기법들에 대해 기술하였다.

또한 시간에 따른 계산량의 불균등화를 해결하기 위해 계산량이 많아진 영역에서 동적영역할당을 trigger하는 동적영역할당기법이 적용되었다. 세라믹 재료의 파괴 특성을 묘사하기 위해 절점분리기법이 적용되었으며, 절점분리기법의 효과적인 병렬화를 수행하였다. 적용된 병렬 기법을 이용하여 유리 막대의 충돌 문제와 세라믹/금속 다중 판재의 충돌문제를 해석하여 실험결과와 비교·검증하였으며, 유리 막대의 충돌 문제에 대해 32개 프로세서에 대해 18.74의 고정크기 Speed Up 성능을 달성하였다. 앞으로 다양한 예제에 대한 병렬화 성능 향상 연구가 진행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(계약번호UD070024AD).

참 고 문 헌

Attaway S.W., Hendrickson B.A, Plimpton S.J, Gardner D.R, Vaughan C.T. (1988) A Parallel Contact Detection Algorithm for Transient Solid Dynamics Simulation Using PRONTO3D. *Computational Mechanics*, 22, pp.143~159.

Camacho, G.T., Ortiz, M. (1996) Computational Modeling of Impact Damage in Brittle Materials, *Int. J. Solids. Struc.* 33, pp.2899~2938.

- Hwang, C.** (2002) Three Dimensional Analysis of Dynamic Failure in High Velocity Impact Using Explicit Finite Element Method, Ph.D. thesis, Seoul National University.
- McGlaun J.M, Thompson S.L., Kmetyk L.N., Elrick M.G.** (1990) A Brief Description of the Three-Dimensional Shock Wave Physics Code CTH, Sandia National Laboratories report; SAND89-0607.
- Repetto, E..A., Radovitzky, R., Otriz, M.** (2000) Finite Element Simulation of Dynamic Fracture and Fragmentation of Glass Rods, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.* 183, pp.3~14.
- Yoo, Y.H., Lee, M.** (2003) A Three-Dimensional FE Analysis Of Large Deformations in Contact-Impacts Using Tetrahedral Elements, *Computational Mechanics*, 30(2), pp.96~105.