

Cluster Parallel Algorithm을 이용한 RC 구조물 폭발해석

Blast Analysis for RC Structures using Cluster Parallel Algorithm

박재원* · 윤성환** · 탁문호*** · 박대효****
Jae-Won Park · Sung-Hwan Yun · Moonho Tak · Taehyo Park

요약

폭발하중은 매우 짧은 시간 내에 순간적인 높은 압력으로 발생된다. 따라서 폭발하중을 받는 구조물은 매우 복잡한 순간 동역학적 손상 거동을 나타낸다. 이러한 외부 하중에 대한 실험적 연구는 큰 비용, 시설, 그리고 군사적 보안 문제가 요구되기 때문에, 고성능 컴퓨팅 기술을 이용한 수치적 기법을 통해 구조물의 동적 비선형 해석을 수행하였다. 수치해석의 정확성을 높이기 위해 폭풍파와 같은 대기전파의 경우 Euler 기법, 콘크리트 재료의 경우 Lagrange 기법을 적용한 복합적 수치해석 (multi-solver coupling) 기법이 적용되었다. 제안된 수치해석 기법은 explicit 유한요소해석 프로그램인 AUTODYN을 이용하여 수행되었다. 그리고 클러스터 (cluster) 내 병렬 알고리즘 (parallel algorithm)을 이용하여 수치해석의 효율성을 높였다. RC 구조물의 수치해석 결과, 기존 실험 결과와 비교하여 잘 일치되었다. 또한 영역분할 개수가 증가할수록 수행시간은 감소되었고 Speed-up과 효율성은 높아졌다.

keywords : 폭발하중, 콘크리트 패널, 병렬해석, 복합적 수치해석, Cluster

1. 서론

폭발 하중을 받는 구조물의 순간 동역학적 손상 거동은 매우 복잡하며 이에 대한 실험적 연구 또한 막대한 비용과 시설이 요구되기 때문에 수치모사를 이용한 연구가 활발히 수행되고 있다 (Ngo et al., 2007). 그러나 단일 수치해석기법을 적용하여 폭풍파 (blast wave)에 의한 손상거동을 모사할 경우 정확성이 저하된다. 또한 요소의 개수가 많고 복잡한 형상이 존재하게 되면 수치적으로 상당한 수행시간이 요구되므로 수치해석의 효율성이 낮아진다. 따라서 본 연구에서 explicit 유한요소해석 프로그램인 AUTODYN (Century Dynamics, 2007)을 이용하여 수치해석의 정확성을 높이기 위해 복합적 수치해석 (multi-solver coupling) 기법 (윤성환, 박대효, 2010)이 적용되고 효율성을 높이기 위해 병렬해석 (parallel analysis)기법이 적용된다.

2. 해석 모델

폭발로 인한 구조물의 동적응답 수치모사에서 폭발 가스와 폭풍파와 같은 유체 전파현상은 Euler 방식을 적용하고 폭풍파를 받는 구조물의 거동은 Lagrange 방식을 이용할 경우 가장 효과적으로 모사된다. 따라서

* 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 p79795@hanyang.ac.kr

** 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 sunghawn@hanyang.ac.kr

*** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사 후 연구원 pivotman@hanyang.ac.kr

**** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수 cepark@hanyang.ac.kr

Euler 기법과 Lagrange 기법을 커플링하는 복합적 수치해석 기법이 적용된 비선형 동적 해석이 수행된다.

콘크리트 재료는 정수압 상태의 콘크리트 거동을 기술하기 위하여 다공질 형태의 EOS가 적용되었다. 그리고 다공질 재료의 모델링에 이용되며 불연속 선형 함수로 항복응력의 압력경화를 기술하는 Drucker-Prager 모델이 강도모델로 적용되었다 (Century Dynamics, 2007). 철근은 Johnson-Cook 모델 (Johnson and Cook, 1983)이 적용되었고, 각각의 소성변형률에서 항복응력을 정의한 데이터를 통해 변형경화 특성이 반영되었다.

제안된 복합적 수치해석기법과 재료모델을 이용하여 TNT 폭발에 의한 폭풍과는 Euler 기법으로 모델링되었고 폭발하중을 받는 콘크리트 패널(1,000×1,000×150 mm)은 Lagrange 기법으로 모델링되었다. 콘크리트 패널 중심으로부터 1,500 mm에 13.02 kg TNT가 위치되었고 이는 그림 1에 나타나있다. 콘크리트 패널의 손상거동이 수치 모의실험을 통해 분석되었고 이는 기존 실험적 연구결과 (이나현 등 2009)와 비교되었다. TNT 13.02 kg이 폭발 된지 0.1초가 경과했을 때 구조물 후면 손상정도는 그림 2에 나타나있고 콘크리트 후면 중앙 부분의 잔류변형이 표 1에 나타나있다.

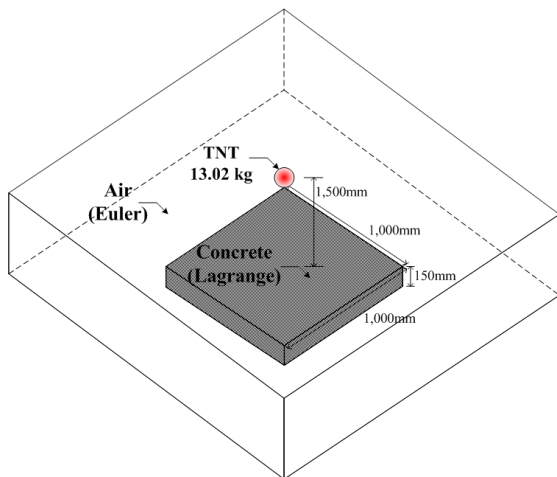


그림 1 수치해석 모델링

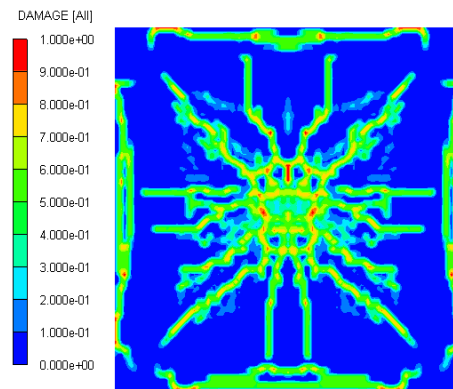


그림 2 콘크리트 후면 손상정도

표 1 콘크리트 패널의 잔류변형

Values (mm)	Simulation	Experiment
Residual. displ.	5.71	5.79

정확한 해석이 수행되기 위해 반복된 수치해석이 요구되지만 TNT가 폭발 된지 100 ms까지 수행되는데 상당한 수행시간이 요구된다. 따라서 message-passing MIMD 병렬알고리즘 (Century Dynamics, 2007)을 이용한 병렬해석을 통하여 수치해석의 효율성을 향상시켰다.

3. Parallel Analysis

해석 시스템 환경은 33노드의 Neahlem CPU (2.4GHz, 8Core)와 QDR급 전송속도의 네트워크 장비를 구성하고 있는 리눅스 클러스터 시스템이 사용되었다. 병렬해석의 효율성을 검토하기 위해 철근을 제외한 폭풍과 콘크리트만 모델링되어 병렬해석이 수행되었다. 콘크리트의 요소 개수를 20,250, 40,500, 81,000, 그리고 162,000으로 나누어 요소개수별 CPU 수행시간이 비교되었다. 영역 1개에 CPU 1개씩 할당되었고 CPU 개수

별 영역 분할 방법은 표 2에 나타나있다. 콘크리트가 동일한 요소개수를 갖는 영역들로 분할되기 위해, 요소 개수는 분할될 영역 수의 배수가 되어야 한다. 그러나 콘크리트가 7개, 11개, 그리고 14개 영역으로 분할될 경우, 콘크리트 요소개수는 7, 11, 그리고 14의 배수가 아니기 때문에 동일한 요소개수로 분할되지 않는다. 본 연구에서는 정확한 분석을 위해 동일한 요소개수로 영역분할 된 경우만 병렬 해석이 수행되었다.

TNT가 폭발한지 0.01초가 경과되었을 때 수행시간이 영역 개수별로 비교되어 그림 3에 나타나있다. 수행 시간은 영역 개수가 증가될수록 감소되었다. 그러나 Lagrange와 Euler영역이 각각 분할되지 않고 한 영역으로 CPU 1개를 이용하여 해석이 수행되었을 때와 Lagrange와 Euler영역이 각각 분할되어 CPU 2개로 해석되었을 경우를 비교하면 전자의 경우에 수치해석이 더 빠르게 처리 되었다.

표 2 CPU 개수별 영역 분할 방법

CPU	decomposition method
1	Euler + Lagrange domain 1
2	Euler domain 1, Lagrange domain 1
3	Euler domain 1, Lagrange domain 2
4	Euler domain 1, Lagrange domain 3
5	Euler domain 1, Lagrange domain 4
6	Euler domain 1, Lagrange domain 5
7	Euler domain 1, Lagrange domain 6
9	Euler domain 1, Lagrange domain 8
10	Euler domain 1, Lagrange domain 9
11	Euler domain 1, Lagrange domain 10
13	Euler domain 1, Lagrange domain 12
16	Euler domain 1, Lagrange domain 15

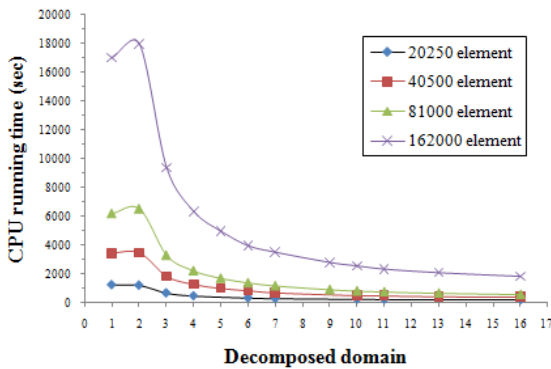


그림 3 영역 개수별 수행시간

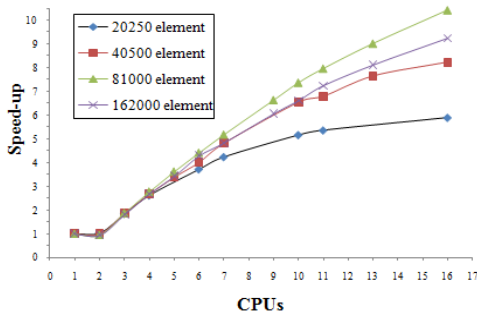


그림 4 CPU 개수별 Speed-up

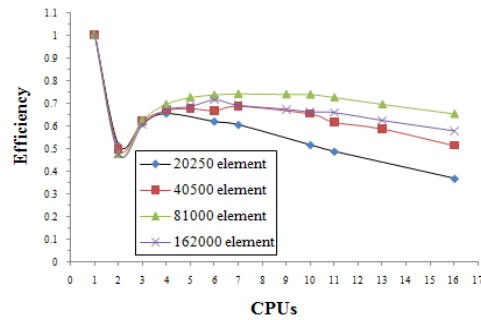


그림 5 CPU 개수별 Efficiency

병렬해석의 효율성을 평가하기 위하여 CPU 개수별 Speed-up(S_p)과 Efficiency(E_p) 값이 비교되었으며, Speed-up과 Efficiency 은 식(1)과 (2)로 각각 정의된다.

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} \quad (1)$$

$$E_p = \frac{T_1}{pT_p} \quad (2)$$

여기서, p 는 CPU의 수, T_1 은 한 개의 CPU가 사용되었을 때의 수행시간, T_p 는 p 개의 CPU가 사용되었을 때의 수행시간을 나타낸다. Speed-up과 효율성에 대해 비교되어 그림 4와 그림 5에 나타나있다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 영역 분할이 많아질수록 CPU p 개 수행시간에 대한 CPU 1개 수행시간의 비율이 높았고

요소개수가 81,000개 일 때 수행시간 비율이 가장 높게 나타났다. 그리고 그림 5에서 보이는 바와 같이 CPU p 개가 사용된 병렬해석보다 CPU 1개가 사용된 수치해석이 효율적으로 나타났고 요소개수가 81,000개 일 때 효율성이 높게 나타났다.

병렬해석 결과, CPU 2개보다 1개로 사용될 경우 수치해석이 더 빠르게 처리되고 CPU p 개가 사용된 병렬 해석보다 CPU 1개가 사용된 수치해석이 효율적으로 나타난 이유는 수치해석이 진행이 되는 동안 서로 다른 영역에 배치된 Euler 요소와 Lagrange 요소들이 접촉 상호작용 하게 될 대상 요소 탐색에 수행시간을 소요 하기 때문이다. 따라서 Euler 요소와 Lagrange 요소를 각각 분할한 경우보다 서로 접촉 상호작용하게 될 Euler 요소와 Lagrange 요소가 한 영역으로 분할될 경우에 수치적 효율성이 높게 나타난다.

4. 결론

폭발하중을 받는 RC 구조물의 동적 비선형 해석이 수행되었다. 수치해석의 정확성을 높이기 위해 폭풍파와 같은 대기전파의 경우 Euler 기법, 콘크리트의 경우 Lagrange 기법을 적용한 복합적 수치해석 기법이 적용되었다. 그리고 클러스터 내 병렬 알고리즘을 이용하여 수치해석의 효율성을 높였다. RC 구조물의 수치해석에서 잔류변형 결과는 기존 실험 잔류변형 결과와 비교하여 98.6 %의 정확도를 보였다. 병렬 해석의 경우, 영역 분할 개수가 많아질수록 수행시간이 감소되었고 CPU p 개 수행시간에 대한 CPU 1개 수행시간의 비율과 수치적 효율성이 높아졌다. 특히, 콘크리트를 81,000개 요소로 나누었을 때 Speed-up과 효율성이 높게 나타났다. 그러나 CPU 2개보다 1개로 사용되었을 때 수치해석이 더 빠르게 처리되었고 CPU p 개가 사용된 병렬해석보다 CPU 1개가 사용된 수치해석이 효율성이 높게 나타났다. 그 원인은 수치해석이 진행이 되는 동안 서로 다른 영역에 배치된 Euler 요소와 Lagrange 요소들이 접촉 상호작용 하게 될 대상 요소 탐색에 해석시간을 소요하기 때문이다. 따라서 Euler 요소와 Lagrange 요소를 각각 분할한 경우보다 서로 접촉 상호작용하게 될 Euler 요소와 Lagrange 요소가 한 영역으로 분할될 경우에 효율성이 높게 나타난다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학 육성사업 (WCU)으로부터 지원받아 수행 되었습니다 (R32-2008-000-20042-0). 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 이나현, 김성배, 김장호, 조윤구 (2009) 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동분석 : (II) 초고강도 콘크리트 및 RPC 슬래브의 실험결과, 대한토목학회 논문집, 29(5A), pp. 565~575.
- 윤성환, 박대효 (2010) 폭풍파 및 파편 충돌에 대한 강관보강 콘크리트 패널의 복합적 수치해석, 대한토목학회 논문집, 31(1A), pp. 25~33.
- Johnson G.R. and Cook W.H. (1983) A Constitutive modeling and data for metals subjected to large strain rates and high temperatures, *Proceedings of 7th international symposium on ballistics*, pp. 541~577.
- Century Dynamics (2007) *AUTODYN User Manual*, Version 11.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., and Ramsay, J. (2007) Blast loading and blast effects on structures—An overview, *EJSE Special Issue: Loading on structures*, pp. 76~91.
- ANSYS, Inc. (2008) *AUTODYN Parallel Processing Tutorial*, Version 12.1.