

Arbitrary Lagrangian-Eulerian기법을 적용한 콘크리트 구조물의 폭발해석

Blast Analysis of Concrete Structure using Arbitrary Lagrangian-Eulerian Technique

이 나 현* 김 성 배** 남 진 원** 이 성 태*** 김 장 호****
Yi, Na Hyun Kim, Sung Bae Nam, Jin Won Lee, Sung Tae Kim, Jang Ho

ABSTRACT

Blast load, an impulsive load with extremely short time duration with very high pressure, is effected by ground and air condition, weight of charge, shape and location of structure. In this study, a blast dynamic analysis for the air-structural integrated model considering dynamic properties of materials and simulation of complex blast wave propagation by Arbitrary Lagrangian-Eulerian technique is suggested to perform an accurate blast analysis of concrete structures. For the verification of the proposed blast analysis method, which is the air-structure integrated model using ALE technique, the comparison of analysis and experimental results is performed. The verification confirms that the simulation of realistic behavior of RC wall structures is possible using ALE method. Also, the example cases which have been analyzed using this method show that the estimation to the structural failure criterion for blast load failure can be represented by energy absorption procedure.

요 약

매우 짧은 시간동안 큰 압력을 유발하는 폭발하중은 지형적인 조건 및 대기조건, 장약량과 구조물의 위치 및 형상에 따라 상이하게 발생된다. 그러므로 본 연구에서는 콘크리트 구조물에 작용하는 정밀한 폭발하중의 전파해석을 위해, Arbitrary Lagrangian-Eulerian기법을 적용한 대기 및 폭발물의 모델을 통해 복잡한 폭발과를 구현하고 구조물의 동적재료 특성을 고려하여 대기-구조물의 통합모델 해석기법을 제안하였다. 또한 대기-구조물의 통합모델 해석기법의 검증은 위하여 폭발하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 폭발실험결과와 비교함으로써 제안된 해석기법의 타당성을 검증하였다.

- * 정회원, 연세대학교, 토목공학과 대학원, 박사과정
- ** 정회원, 연세대학교, 토목공학과 대학원, 박사과정
- *** 정회원, 연세대학교, 건설공학연구소 연구원(공학박사)
- **** 정회원, 충청대학, 토목공학과 교수
- ***** 정회원, 연세대학교, 사회환경시스템공학부 교수

1. 서 론

최근 전 세계적으로 테러, 충돌, 지진 등의 폭발사고의 빈번도가 높아지면서, 폭발하중에 대한 기존 구조물의 성능평가 및 폭발과에 의한 초과압력하중을 고려한 설계가 시도되고 있으나, 실험장소 및 계측 등의 실험적 제약과 폭발해석에 대한 국내의 부족한 연구로 인하여 정밀한 유한요소해석에 대한 연구가 절실하다. 특히 폭발압력하중은 시간변수와 공간에 의해 복잡하고 불균등한 하중이 발생하므로, 실제 폭발하중 전과과정과 유사하게 모사하여 폭발에 의한 구조적 효과를 특성화 하는 것이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 라그랑지안(Lagrangian)기법과 오일러리안(Eulerian)기법의 관점을 포괄하는 Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE)기법을 적용하여 대기 및 폭발물을 직접 모델링하여 콘크리트 구조물에 작용하는 폭발하중 및 구조물 동적재료 특성을 고려한 대기-구조물의 통합모델 해석 기법을 구축하였다. 또한 불균등한 폭발압력하중에 대한 해석방법을 정립하며 기존 폭발하중을 묘사한 방법들과 비교분석 하도록 한다.

2. ALE기법을 적용한 폭발압력하중의 특성

2.1 폭발압력하중의 특성

폭발과의 전과과정을 해석하기 위해 본 연구에서는 식(1)과 같은 Jones-Wilkins-Lee(JWL)의 상태방정식을 사용하여 고폭발물(high explosive bomb: HE폭탄)을 묘사하였으며, 여기서 p 는 유체정역학 압력이며, $v = 1/\rho$ 는 비체적, ρ 는 밀도이며, C_1, r_1, C_2, r_2 및 ω 와 같은 상수들은 Dobatz(1981)의 연구결과를 적용하였다. 한편 대기는 측정하는 장소의 위치와 습윤 등의 상태에 따라 대기밀도가 달라지나 여기서는 표준대기압 상태에서의 대기밀도를 사용하였으며 식(2)와 같은 상태방정식의 특성을 반영하였다. 즉, 폭발하중이 발생하는 공간의 상태와 주변 공기 등과 같은 환경적인 조건을 묘사하여 반사파 및 간섭효과 등이 구현되도록 폭발압력하중을 고려하였다.

$$p = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v}\right) e^{-r_1 v} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{r_2 v}\right) e^{-r_2 v} + \frac{\omega E}{v} \quad (1)$$

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (2)$$

2.2 ALE기법에 의한 대기-구조물 통합해석의 특성

주로 구조물은 라그랑지안 요소로 이뤄지고 대기 및 폭발물은 ALE 기법으로 모델링이 이뤄지기 때문에 대기-구조물의 상호문제에서 대기와 구조물의 경계면(interface)의 거동이 중요해진다. 본 연구에서는 penalty formulation을 기반으로 한 coupling 알고리즘을 사용하였다. 여기서 ALE기법을 사용하여 고정 혹은 이동 요소망에 라그랑지안 요소인 구조물을 상치(overlap)시켜 뉴턴의 힘 평형과 에너지 보존을 기본으로 하고 있으며, 이 coupling 알고리즘은 Advection을 통하여 에너지의 손실과 분산효과를 최소화 하도록 하였다. 이 coupling 알고리즘을 그림1과 같이 대기-구조물의 통합해석을 하면 그림2와 같은 폭발압력이 발생하며 지형적인 조건 등에 의해 반사압력이 발생한 것을 확인할 수 있다.

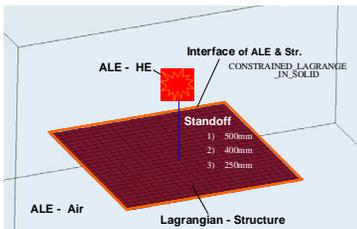


그림 1. 대기-구조물 통합해석 예제

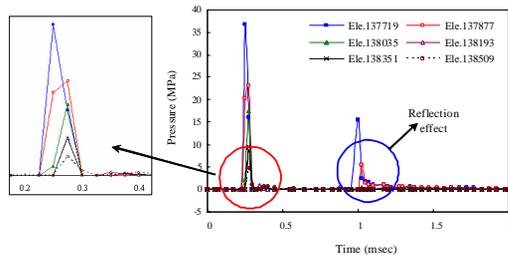


그림 2. 구조물에 가해지는 폭발압력 분포

3. 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 동적 유한요소해석

3.1 해석개요 및 방법

본 연구에서는 제안된 해석기법을 적용하여 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 동적 유한요소해석을 실시하였다. 해석대상 구조는 그림 3과 같은 2.48m × 2.7m × 0.2m의 철근콘크리트 벽체로서 폭발하중을 받는 한 쪽 벽체는 탄소섬유복합재(CFRP)를 0.5mm의 두께로 한 겹 보강을 하였으며, 다른 벽체는 무보강하여 보강효과를 보고자 하였다. 해석대상 구조는 기존의 Muszynski 와 purcell(2003)에 의한 폭발실험 결과를 참고하였으며, 폭발하중은 14.6m 떨어진 곳에서 TNT 830kg의 장약량을 원형 플라스틱 용기에 넣어 발파하였다. 실험상의 제약으로 인해 시간에 따른 변위는 측정되지 못하였다. 그 대신 폭발하중이 발생 된 후의 잔류변위(residual displacement)로 각 벽체의 처짐이 측정되었다.

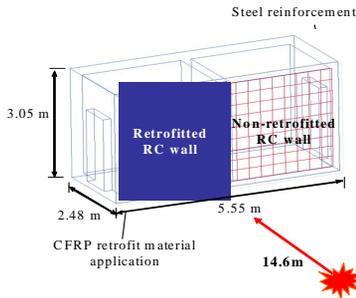


그림 3. 구조물의 유한요소해석모델

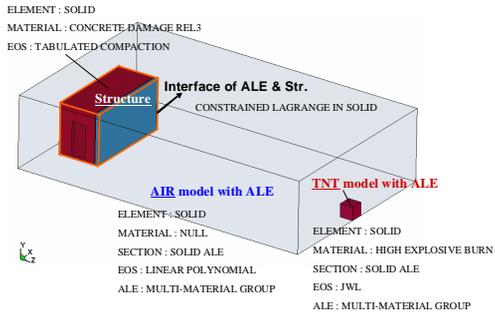
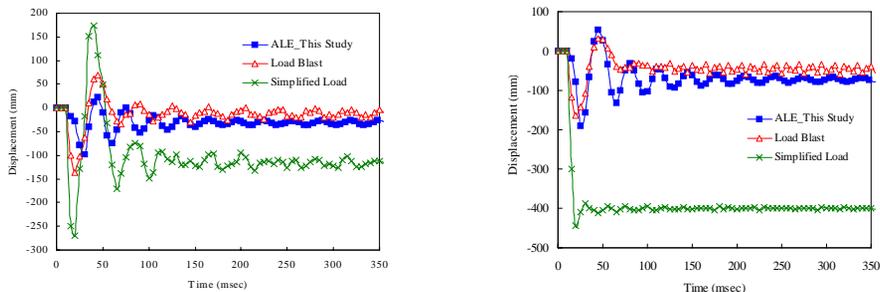


그림 4. 폭발물 및 대기의 모델

한편, 동적 유한요소해석에는 명시적(explicit) 해석프로그램인 LS-DYNA v.971을 사용하였다. 폭발하중에 대한 거동 분석을 위한 유한요소모델은 그림 4와 같으며, 콘크리트 재료모델은 폭발하중에 대해서도 효과적으로 거동 예측이 가능한 Concrete Damage Model를 사용하였으며 철근은 변형률 속도효과를 효율적으로 고려할 수 있는 Piecewise Linear Plasticity Model를 사용하였다. 탄소섬유보강재는 전단변형을 고려한 직교이방성의 재료특성을 적용시킨 Belytschko Lin Tsay 쉘요소를 사용하였다. 또한 대기-구조물의 경계면은 Constrained_Lagrange_in_Solid를 사용하여 대변형으로 인한 경계면에서의 변형오차를 줄여 대기-구조물의 정확한 모델을 구현하도록 하였다.

3.2 해석결과 및 검증

이상의 해석결과를 도시하면 그림 5와 같다. 본 연구에서 제안한 폭발해석기법을 사용한 해석결과를 기존의 폭발해석기법인 해석기법인 Conwep을 기반으로 하는 Load blast와 전면에 동일한 하중이 가해지는 Simplified load를 비교하여 보면 ALE기법을 적용한 대기-구조물 통합해석기법이 최대처짐과 잔류변형이 실험결과를 가장 예측할 수 있는 것으로 판단할 수 있다.



(a) 무보강한 벽체

(b) CFRP로 보강한 벽체

그림 5. 철근 콘크리트 벽체의 시간이력 변위곡선

특히, 무보강한 콘크리트 벽체는 단순화된 하중이 최대처짐이 발생한 후 바로 소성거동을 하는 등 방호설계에 있어서 과다설계가 이뤄질 수 있음을 알 수 있다. 또한 Load Blast를 사용한 경우에는 최대처짐에 비해 잔류변형이 비교적 작게 표현되는 것을 볼 수 있다. 이는 폭발압력하중이 전과되면서 발생하는 반사효과 및 회절효과가 고려되지 않았기에 이와 같은 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 한편, 그림6과 같이 기존의 폭발해석기법에 비해 제안된 폭발해석기법이 실험결과의 거동을 비교적 효과적으로 예측가능하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제안된 ALE기법을 적용한 대기-구조물 통합해석은 지면에 의한 반사효과 등의 폭발효과를 묘사하는데 있어서 타당함을 볼 수 있으며 본 연구에서 제안된 대기-구조물 통합 폭발해석기법은 그림7과 같다.

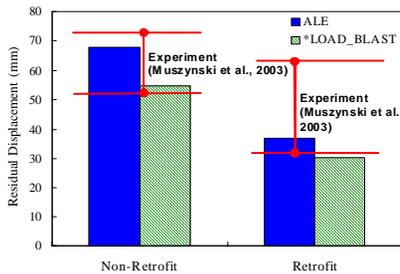


그림 6. 잔류변위의 실험결과 및 해석결과

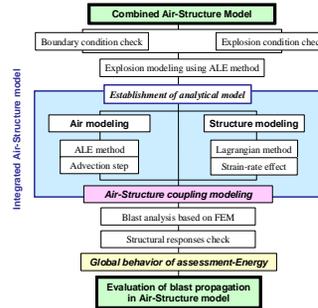


그림 7. 제안된 대기-구조물 폭발해석기법

4. 결론

본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 콘크리트 구조물에 작용하는 정밀한 폭발하중의 전과해석을 위하여 ALE (Arbitrary Lagrangian Euleria)기법을 적용한 대기-구조물의 통합모델 해석기법을 제안하였으며, 제안된 해석기법을 적용하여 폭발하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 동적구조해석 결과와 기존의 폭발실험결과 및 폭발하중묘사방법과 비교함으로써 본 연구에서 제안한 콘크리트 구조물의 폭발거동 해석기법의 타당성을 검증하였다.
- (2) 폭발하중을 특성을 표현하기 위해 폭발물과 대기, 즉 유체를 ALE 기법을 사용하여 모델링함으로써 폭발물의 폭발과 폭발에 의해 발생하는 폭발 압력과의 전과과정을 묘사하여 대변형이 발생하더라도 구조물과의 통합해석이 가능한 대기-구조물의 경계면을 모델링하여 가장 적합한 폭발압력을 전달할 수 있는 폭발하중 유한요소모델을 구축하였다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 학술진흥재단이 지원하는 충격하중을 받는 콘크리트 압축부재의 손상평가 및 성능기반형설계기법의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Boyd, S. D. (2000), "Acceleration of a Plate Explosive Blast Loading-Trial Results," Defence Science and Technology Organization, *DSTO-TN-0270*, Department of Defence, Technical note, pp. 1-13
2. Muszynski, L. C. and Purcell, M. R. (2003), "Use of Composite Reinforcement to Strengthen Concrete and Air-Entered Concrete Masonry Walls against Air Blast," *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol.7, No.2, pp.98-108.
3. 김호진, 남진원, 김성배, 김장호, 변근주 (2007), "폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조물의 보강 성능에 대한 해석적 분석," *한국콘크리트학회 논문집*, Vol.19, No.2, pp.241-250