

# 3차원 모델을 이용한 폭발하중에 대한 구조물 위험평가 해석

## Risk Analysis of Structures Subjected to Blast Loads

### Using 3D Information Models

심 창 수\* · 윤 누 리\*\* · 송 현 혜\*\*\*

Shim, Chang-Su · Yun, Nu-Ri · Song, Hyun-Hye

#### 요 약

폭파하중에 대한 구조물 위험평가 해석을 위해 3차원 모델링 기법 중 하나인 변수모델링과 이를 활용한 3차원 유한요소해석 모델을 구축하여 외연적 유한요소해석을 수행하였다. 폭발하중은 ConWep을 이용하였고, 폭발압력 저감을 위해 알루미늄 폼의 밀도와 두께, 그리고 덮개 여부를 해석 변수로 설정하였다. 해석 결과, 알루미늄 폼의 밀도가 낮고 두께가 두꺼울수록 항복강도 수준으로 제어할 수 있었고, 폭발압력을 분산시키기 위해 사용한 강재 덮개는 두께에 대한 그 영향이 뚜렷이 나타났다. 적절한 설계변수 설정을 통해 폭발하중에 대한 구조물의 위험을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

**keywords** : 알루미늄 폼, 폭발하중, 강재 덮개, 압력저감, 외연적 유한요소해석

## 1. 서 론

전 세계적으로 테러 엔지니어링(Anti-terror engineering)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 폭발과 충돌에 대한 주요 구조물의 안전성 확보 및 피해저감 방향이 다양한 방향으로 진행되고 있는데, 이 논문에서는 희생부재로 알루미늄 폼을 이용하여 구조물 자체를 보강한 구조물의 위험도 저감 효과를 외연적 유한요소해석을 통해 평가하였다.

희생부재로 사용한 알루미늄 폼은 원재료를 낮은 밀도의 형태로 가공한 것으로 패널, 셸, 튜브 등의 내부충전재로 유용하게 사용되는데, 가장 큰 장점으로 높은 에너지 흡수 능력을 들 수 있다. 이 밖에도 낮은 열전도율, 높은 전기전도성, 내화성 등의 특징을 가지고 있다. 알루미늄 폼의 재료의 모델 개발을 위한 다양한 실험적 연구가 수행되었다(Deshpande and Fleck 2000, Dannemann and Lackford Jr. 2000). 이 과정에서 변형률 속도에 대한 평가도 진행되었는데, 이들 연구에 의하면 초기 탄성계수는 원재료인 알루미늄에 비해서 낮고 하중을 받는 알루미늄 폼의 변형이 공간적으로 균일하지는 않아서 약한 영역에서 변형이 먼저 발생하고 완전히 압착되면 원재료에 근접한 거동을 보이게 된다. 변형률 속도 영향은 변형률 속도가  $5000s^{-1}$  까지는 영향이 없는 것으로 평가되었다(Deshpande and Fleck, 2000).

해석을 위한 모델 구축은 3차원 정보 모델링 기법의 요구사항 중의 하나인 변수모델링(Parametric modeling)과 이와 연동되는 3차원 유한요소해석 모델을 활용했다. 캐드모델에서 유한요소해석의 변환은 인터페이스를 통해 변환하였다. 이때 3차원 캐드 모델이 가져야 하는 형상 체계와 속성정보는 추후 유한요소해석 모델 변환 과정에서 지정해주었다.

\* 정희원 · 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 csshim@cau.ac.kr

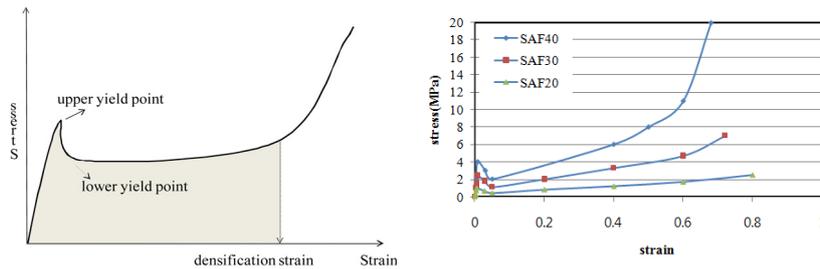
\*\* 중앙대학교 토목환경공학과 석사과정 nuri58@nate.com

\*\*\* 중앙대학교 토목환경공학과 석사과정 glay-hyune@hanmail.net

## 2. 알루미늄 폼과 강재의 재료모델 구성

### 2.1. 알루미늄 폼 재료모델

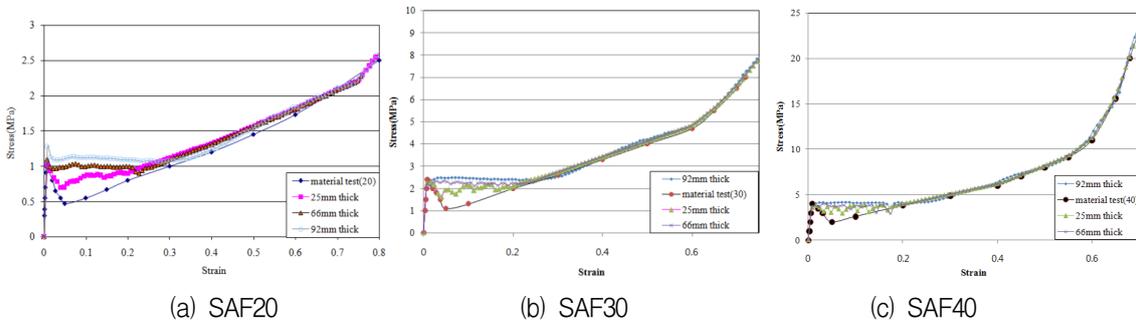
폭과하중에 대한 구조물 위험평가를 평가하기 위한 해석은 외연적 유한요소 해석 프로그램인 LS-DAYNA를 사용하였다. 알루미늄 폼은 재료의 방향성 때문에 모델의 각 방향별 성질이 달라지도록 설정해야 한다. 이 논문에서는 대표적으로 생산되는 밀도인 5%, 10%, 15%의 상대밀도를 갖는 것을 선택하였다. 그림1은 알루미늄 폼의 대표적인 응력-변형률 관계 곡선을 나타낸다. 완전히 압축되기 전까지의 곡선 아래 면적은 단위 체적당 에너지 소산능력을 의미한다. 그림1(b)는 알루미늄 폼에 덮개 판이 있는 상태에서 일축압축 시험에 의해 구한 그래프이다.



(a) 응력-변형률 곡선 형태 (b) 밀도에 따른 응력-변형률 곡선

그림 1. 알루미늄 폼의 응력-변형률 곡선

정적상태에서의 재료모델의 타당성 검증 및 수정을 위해 재료실험 및 재료에 대한 공급업체의 자료를 사용하여 해석한 결과를 그림2와 같이 검토하여 최종모델을 구성했다. 에너지 소산능력 측면에서 5% 이내의 오차를 보이고 있다.



(a) SAF20

(b) SAF30

(c) SAF40

그림 2 재료모델의 검증

### 2.2. 강재 재료 모델

강재의 재료물성은 밀도  $7850 \text{ kg/m}^3$ , 탄성계수  $2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$  사용하여 재료모델을 가정하였다. 비선형의 응력-변형률 관계에서 동적 항복 강도를 고려하였는데, 높은 변형률 속도 효과를 계산하기 위해 식(1)의 동적증가계수와 식(2)의 Cowper-Symonds의 변형률 속도 경화식을 사용하였다.

$$DIF = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{10^{-4}} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_y^d}{\sigma_y} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{c} \right)^{1/p} \quad (2)$$

식(1)의  $\dot{\epsilon}$  은 변형률 속도이고,  $\alpha$ 는 동적증가계수를 위한 상수이다. 식(2)의  $c$ 와  $p$ 는 동하중 시험에서 얻을 수 있는 상수이다. 그림 3은 강판의 동적증가계수를 나타낸 것이다. 변형률 속도가 증가할수록 동적증가계수는 증가한다.

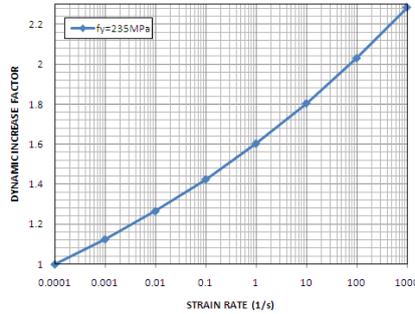
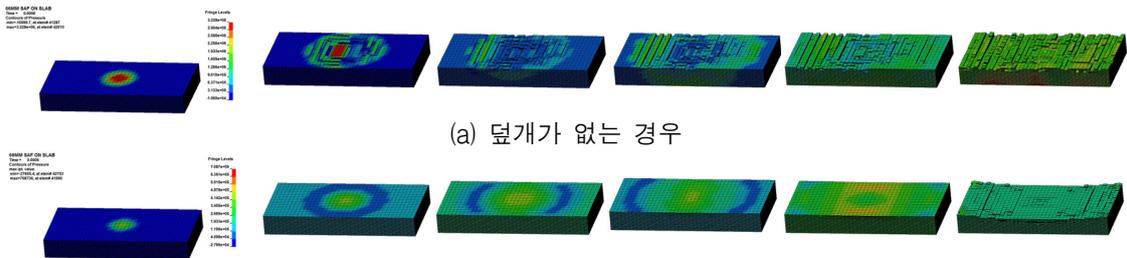


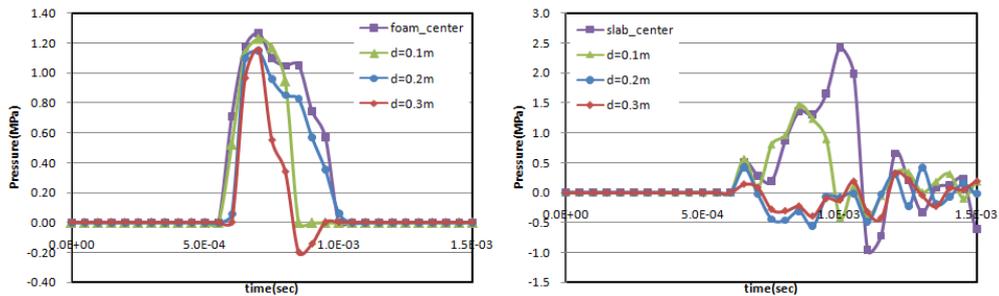
그림 3 강판 변형률속도에 따른 동적증가계수

### 3. 폭파하중이 구조물에 미치는 위험 평가

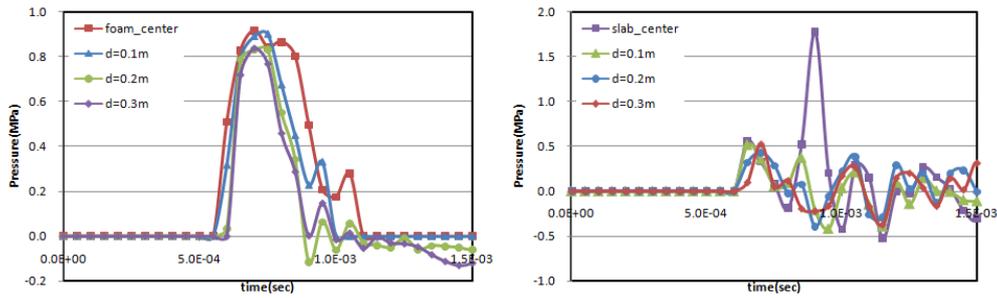
덮개의 유무에 따른 희생부재에 대한 해석결과를 그림 4에 비교하였다. 덮개가 모델링 되지 않은 경우에는 근거리 폭발에 의한 압력 집중이 분산되지 못하고 중심점 근처에서 바로 요소가 파괴에 도달한다. 덮개가 있는 경우에는 상대적으로 집중된 압력을 분산시켜서 그림 4(b)와 같이 넓은 면적의 폼이 변형하면서 에너지를 소산한다. 알루미늄 폼과 슬래브에서의 압력 시간이력을 그림 5에 비교하였는데 덮개가 있는 경우에 알루미늄 폼에 작용하는 압력은 절반 이하 수준으로 감소하고 압력의 집중효과도 상당히 감소하고, 슬래브에 작용하는 전달압력은 덮개가 있는 경우에 반사압력으로 인해 발생압력이 증가하는 것을 알 수 있다. 두께와 항복강도의 영향을 평가하면 두께를 키우게 되면 압력의 분산효과와 전달압력의 감소를 가져오고 항복강도의 증가는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.



(a) 덮개가 없는 경우  
(b) 덮개가 있는 경우-1.15mm, 235MPa  
그림 4. 덮개 유무에 따른 거동비교 (W=10kg, R=1.5m)



(a) 1.15mm,  $f_y=235\text{MPa}$  덮개 있는 경우



(b) 2.0mm,  $f_y=235\text{MPa}$  덮개가 있는 경우

그림 5. 덮개가 있는 경우의 압력 시간이력 ( $W=10\text{kg}$ ,  $R=1.5\text{m}$ )

### 3. 결론

알루미늄 폼 자체의 재료성질을 모사하기 위한 재료모델은 modified honeycomb 모델로 적정하게 응력-변형률 거동을 모사할 수 있었고 수렴성 검토를 통해 해석 모델의 적정성을 검증하였다. 검증된 모델을 이용한 원거리 폭발시의 균등 압력 가정을 검토하기 위한 해석에서는 밀도가 낮고 두께가 두꺼울수록 전달압력의 수준을 알루미늄 폼의 항복강도 수준으로 제어할 수 있음을 보였다. 폭발의 규모가 증가할 경우에는 높은 밀도의 두꺼운 희생부재의 설계가 요구된다.

근거리 폭발에 대한 희생부재의 거동 평가 시에 덮개를 반드시 고려해야 하고 두께 증가의 영향이 재료 강도 증가보다 효과가 뚜렷함을 밝혔다. 작은 폭발규모에서는 덮개가 없는 것이 좀 더 많은 에너지를 소산시키지만, 폭발의 규모가 커지면 덮개가 있는 경우가 좀 더 넓은 영역의 알루미늄 재료의 소성변형을 유발하여 큰 에너지를 소산시키고 폭발의 규모가 커짐에 따라 폼 자체의 소성 변형량도 증가해서 이로 인한 에너지 증가량이 뚜렷하게 나타난다.

이 논문에서는 일정 규모의 콘크리트 슬래브 위에 설치된 희생부재에 대한 변수해석을 수행하였는데 실제 방호구조물의 형상 및 폭발의 위치 등에 따라 제시된 전달압력 및 에너지 소산의 정도가 달라질 수 있다. 또한, 폭탄의 폭발위치가 공중이 아닌 지반에서 혹은 충돌을 동반한 경우에는 지반진동 및 충격에 대한 영향을 동시에 고려한 해석이 요구된다. 더 정밀한 해석을 위해서는 유체-구조물 상호작용을 고려한 해석이 필요한데 아직 이러한 부분에 대한 실험적 검증 데이터가 없어서 추후 실험적 검증을 통한 연구가 가능할 것이다.

### 감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 첨단융합건설기술개발사업 (과제 번호: 06첨단융합E01)의 지원으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능케 한 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원에 감사드립니다.

### 참고문헌

심창수, 윤누리 (2010) 희생부재를 이용한 근거리 폭발압력 저감효과, **한국지진공학회 논문집**, 14(1), pp.11~23.

Deshpande, V.S. and Fleck, N.A.,(2000) Isotropic constitutive models for metallic foams *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48, pp.1253-1283

Malvar, L. Javier and Crawford, John E. (1998) Dynamic increase factors for steel reinforcing bars, *Twenty eighth DDESB Seminar*, Orlando, FL, August.