

희생부재를 이용한 근거리 폭파압력 저감 효과

Evaluation of Close-Range Blast Pressure Mitigation using a Sacrificial Member

심창수¹⁾ · 윤누리²⁾

Shim, Chang Su · Yun, Nu Ri

국문 요약 >> 주요 구조물의 방호를 위해 에너지 흡수 능력이 뛰어난 알루미늄 폼을 갖는 희생부재를 제안하였다. 근거리 폭발에 의한 집중된 폭파하중의 압력 저감에 대한 외연적 유한요소해석을 통한 변수 연구를 수행하였다. 폭발하중의 규모는 $Z=0.48\sim 0.95$ 수준으로 설정하였고 경험적 폭발하중을 이용하였다. 알루미늄 폼의 해석 변수는 밀도와 두께로 설정하였고 덮개 여부를 고려하였다. 해석 결과로부터 밀도가 낮고 두께가 두꺼울수록 전달압력의 수준을 알루미늄 폼의 항복강도 수준으로 제어할 수 있고 폭발의 규모가 증가하면 높은 밀도의 두꺼운 희생부재가 필요함을 보였다. 덮개는 두께의 영향이 뚜렷하고 폭발압력을 분산시키는 효과를 나타내었다. 폭발의 수준에 따라 희생부재의 에너지 소산의 정도가 달라지기 때문에 이를 고려한 희생부재의 설계변수 설정이 필요하다.

주요어 알루미늄 폼, 희생부재, 근거리 폭발, 압력저감, 외연적 유한요소해석, 폭발의규모, 전달압력

ABSTRACT >> A sacrificial member with aluminum foam of excellent energy absorption capacity was proposed for the protection of significant structures. Parametric studies of explicit finite element analyses were performed to investigate the pressure mitigation of close-range air-blasts. The scaled distance of the blast had a range of $Z=0.48\sim 0.95$ and an empirical blast load function was utilized. The analytical parameters of the aluminum foam were density, thickness and the existence of a cover sheet. Analytical results showed that the transmitted pressure can be controlled to have a similar level of yield values of the foam by using a foam with low density and higher thickness. As the blast load increased, the sacrificial member needed to have higher density and thickness. A cover sheet of the foam clearly showed its effect on the wider distribution of blast pressure. It is necessary to determine the design parameters of sacrificial foams considering different energy dissipation capacities according to the scaled distance.

Key words Aluminum foam, Sacrificial member, Close-range blast, Pressure mitigation, Explicit finite element analysis, Scaled Distance, Transmitted pressure

1. 서론

주요 구조물에 대한 방호체계는 구조물 자체의 강도 및 강성의 증대를 통한 방법과 별도의 방호구조물을 통한 방법으로 나눌 수 있다. 구조물 자체를 보강하는 방법으로는 FRP 보강, 초고성능 콘크리트의 사용 등이 있다. FRP를 보강한 구조물에 대한 폭파압력 저항에 대한 다수의 실험⁽¹⁻³⁾이 있고 최근에 초고성능 콘크리트를 이용한 폭파 실험이

수행되었다.⁽⁴⁾ 이러한 보강 방법들은 폭파에 의한 구조물의 손상을 저감시킬 수는 있지만 이미 건설이 완료되어 가동중에 있고 기능수행이 중요한 발전소 등의 구조물에 대한 방호에는 적절하지 못하다.

폭발에 의한 압력의 수준에 따라서 구조물의 응답을 그림 1과 같이 세 가지로 구분될 수 있다.⁽⁵⁾ A 곡선은 폭파 압력이 매우 높은 경우로 구조물의 최대 응답이 발생하는 시간이 압력 작용 시간에 비해 매우 긴 경우를 나타낸다. B는 낮은 압력에 대한 응답으로 구조물의 응답시간이 하중작용 시간과 유사한 수준일 때를 나타내고 곡선 C는 작용 압력이 매우 낮아서 요구되는 구조물의 강도가 작용 압력과 같은 수준이어야 할 때를 나타낸다. 근거리에서 폭발이 발생하거나 발사체에 의해 직접적인 충돌과 함께 폭발이 발생하는 경우에는 작용 압력이 매우 높고 짧은 시간동안에 발생하게

¹⁾ 정회원·중앙대학교 건설환경공학과, 부교수
(교신저자: csshim@cau.ac.kr)

²⁾ 중앙대학교 토목환경공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 9. 28 / 수정일 : 2009. 11. 18 / 게재확정일 : 2009. 11. 18)

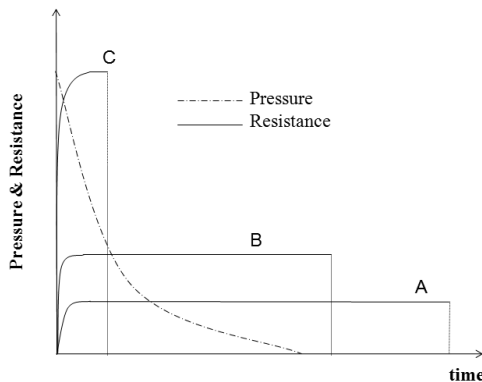
된다. 최근에 세계적으로 빈번히 발생하는 차량 폭탄 테러 등이 이에 속하는 폭파하중이라고 할 수 있다.

폭탄이 폭발하면 저장된 에너지의 급속한 방출로 인해 두 가지 현상이 발생하는데 하나는 열 방출이고 다른 하나는 공기 혹은 지반을 통한 충격파의 전달이다. 폭발물의 폭발로 인해 주변 공기에 충격파를 형성하고 이것이 폭발파(Blast Wave)라고 알려져있다.⁽⁶⁾ 그림 1(b)에 전형적인 폭발파의 압력 시간이력을 나타내었다. t_s 는 파의 도달 시간, P_s 는 폭발파의 최대압력, 그리고 P_a 는 주변공기압을 나타낸다. 공기중의 폭발은 매우 짧은 시간에 발생하는 현상이고 폭발에 의한 하중의 정의는 폭탄의 규모(W), 거리(R)에 의해 정의되는 scaled distance ($Z=R/W^{1/3}$)에 의해 주로 규정된다. 폭탄의 무게는 다양한 폭탄의 종류가 있기 때문에 등가의 TNT (Trinitrotoluene) 무게로 환산하여 사용하고 가장 일반적인 방법은 Hopkinson-Cranz 혹은 cube-root scaling⁽⁷⁾이다.

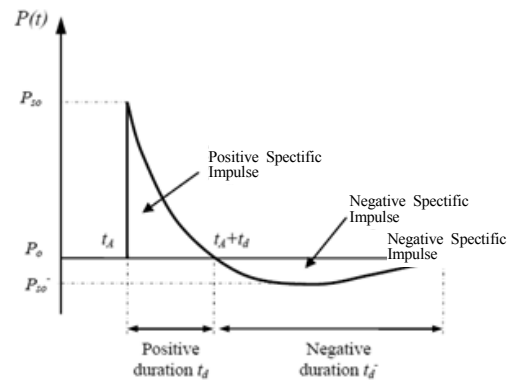
Kingery와 Bulmash⁽⁸⁾는 구 형태의 공기중 폭발로 인한 변수를 정의하는 식을 제안하였고 이 식이 공기중 폭발에 의해 구조물에 작용하는 압력(Free-Field Pressure)을 계산하는 공학적인 예측에 가장 널리 사용되고 있다. 이 식이 컴퓨터 프로그램화되어 압력이력을 자동으로 생성하게 하는 것이 ConWep⁽⁹⁾이다. Bogosian 등⁽¹⁰⁾은 300개 정도의 폭발 시험에 따른 측정결과를 바탕으로 BlastX, ConWep, SHOCK 등의 단순화된 예측 모델들을 비교했고 이 중에서 ConWep이 가장 잘 일치하는 결과를 보였다. 통계적인 분석에서 이 예측값이 20%의 차이를 넘지 않았음을 보였다. Blanc 등⁽¹¹⁾이 수행한 연구에 따르면 LS-DYNA의 LOAD-BLAST는 air-blast와 surface blast의 경우에 적절한 결과를 보였고 작용 각도가 40°를 넘는 경우에는 반사압력을 과소평가하는 것으로 보고하였다.

알루미늄 폼은 밀도가 낮고 패널, 셸, 튜브 등의 내부 재료로 활용되어 높은 에너지 흡수 능력이 필요한 포장, 충돌 방지 등에 이용되고 있다. 이 재료는 열 전도율이 낮고 전기 전도성이 좋고 높은 음파 감쇠 및 화재 저지 능력을 갖고 있다. 알루미늄 폼에 대한 재료 모델을 개발하기 위한 연구들이 진행되어 왔고 변형률 속도(Strain-rate)에 대한 영향에 대한 평가가 수행되었다.^{(12),(13)} 이들의 연구에 의하면 폼의 초기 강성은 완전 밀착된 상태보다 낮고 변형이 약한 지역에서 발생하여 전파되는 형태로 이루어지고 최종적으로 완전 밀착된 상태가 된다. 변형률 속도의 영향은 Deshpande와 Fleck⁽¹²⁾의 연구에서는 없다고 결론지었고 Dannemann과 Lankford⁽¹³⁾, Mukai 등⁽¹⁴⁾은 매우 작은 연관성이 있음을 밝혔다. Deshpande와 Fleck은 두 가지 알루미늄 폼에 대해서 변형률 속도가 5000 s^{-1} 까지의 실험에서 응력-변형률 곡선이 영향이 없음을 보이고 Ruan 등⁽¹⁵⁾은 CYMAT 알루미늄 폼의 응력 곡선이 변형률 속도 범위 $10^{-3} \sim 10^{+1} s^{-1}$ 에서 변형률 속도의 영향이 없음을 밝혔다. Sadot 등⁽¹⁶⁾은 응력-변형률 곡선이 높은 변형률 속도에서 정적인 실험결과보다 높음을 보였다. 최근에 Li⁽¹⁷⁾ 등이 원거리 폭발하중에 대한 연구를 제시했지만 원거리 폭발의 경우 균등 압력 분포를 나타내고 이를 단자유도계 등으로 단순화시킨 연구결과들이 존재하는데 이는 근거리 폭발하중을 모사하기에는 부적절하다.

이 논문에서는 알루미늄 폼을 가진 방호구조물을 제시하고 희생부재의 설계를 위한 기본적인 변수연구로서 알루미늄 폼의 밀도, 두께에 따른 폭파 압력 저감 효과를 외연적 유한요소해석(Explicit Finite Element Analysis)을 통해 밝혔다. 그림 2(a)에 주요 구조물의 방호를 위해 제시된 조립식 구조물을 나타내었고 높은 폭파 압력을 단면의 압축력으로 저항할 수 있도록 하였다. 평상시에는 적재된 상태로 있

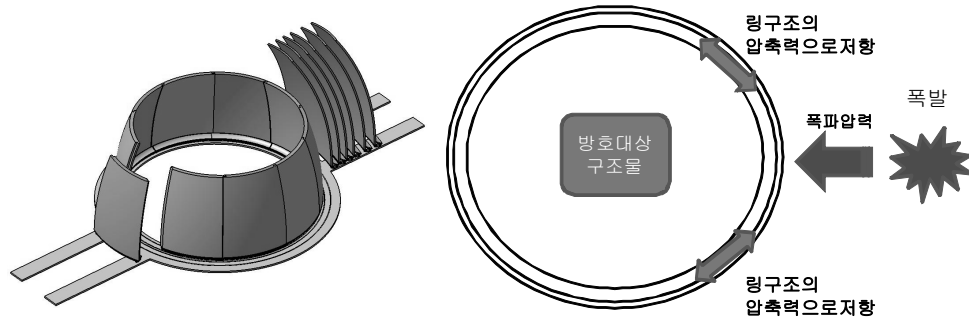


(a) 폭파 하중별 응답

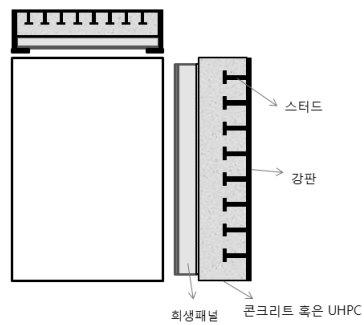


(b) 폭파에 의한 압력이력

〈그림 1〉 폭파하중에 대한 구조물 응답(TM 5-1300)⁽⁵⁾

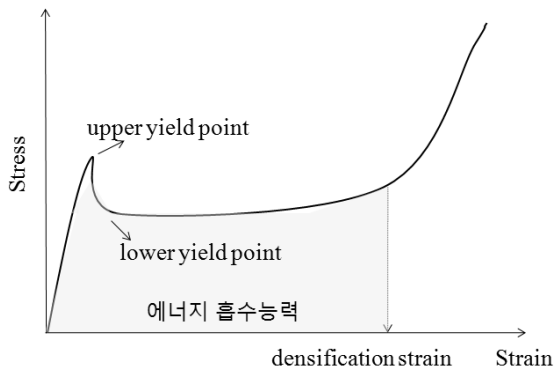


(a) 방호구조물

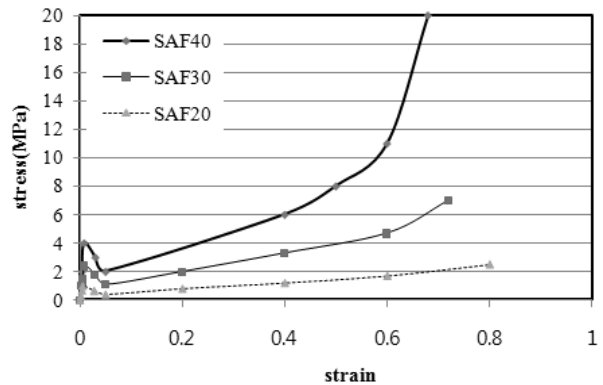


(b) 희생부재 및 압력 저감

〈그림 2〉 방호구조물 및 희생부재



(a) 재료거동 정의



(b) 응력-변형률 곡선

〈그림 3〉 알루미늄 폼의 재료 거동

을 수 있고 유사시에 단계별로 여러 층의 방호패널을 레일을 통해 이동시켜 적층시켜 예상 폭파의 수준별 대응이 가능하도록 하였다. 필요에 따라서 완전 폐합형 돔 구조를 형성할 수 있도록 하였다. 이 패널의 구성 단면은 그림 2(b)에 나타낸 바와 같이 압력 저감을 위한 알루미늄 폼을 전면에 끼울 수 있는 슬롯 형태로 제시하고 미사일 등의 충격 및 폭발을 동반하는 경우에 대비하여 고성능 콘크리트와 강판을 합성시킨 합성패널을 갖도록 하였다.

폭발의 수준 및 위치에 따라 적절한 수준의 알루미늄 폼을 설계하여야 하는데 이를 위한 변수 연구로 근거리 폭파에 의한 압력 저감 및 에너지 소산의 효율성을 평가하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 해석을 위한 재료모델을 실험

결과로부터 도출하여 검증하였다. 이 재료 모델을 활용하여 균등한 압력 작용시와 비균등 압력 작용시를 구분하고 희생부재의 설계 변수별 전달 압력과 저감 효과를 해석을 통해 평가하였다.

2. 알루미늄 폼의 재료 모델 및 검증

알루미늄 폼은 방향성을 가지고 있기 때문에 각 방향별 재료 성질을 달리한다. 이 논문에서는 알루미늄 폼 중에서 CYMAT의 제품을 대상으로 하였고 대표적으로 생산되는 밀도인 5%, 10%, 15%의 상대밀도를 갖는 것을 선택하였다.⁽¹⁸⁾ 그림 3(a)에서 정의하는 것처럼 응력-변형률 곡선의

면적이 에너지 흡수능력을 나타내는 것으로 상향복점과 하향복점을 갖는 것으로 나타나고 완전 밀착후에는 일반적인 알루미늄의 거동과 동일하게 된다. 그림 3(b)는 재료를 추출하여 100mm x 100mm의 크기를 갖는 시편에 대한 두께방향 일축 압축 시험(ASTM D 1621-00)에 의한 결과이다. 부재 시편의 크기에 대한 정확한 요구사항은 없으나 알루미늄 폼 내부의 공극의 크기를 고려하여 10개 이상의 공극이 포함되도록 요구하고 있다. 따라서, 선택된 재료의 경우에 100mm 크기는 적절한 것으로 판단된다. 압축시험 이외의 재료상수값은 제작업체의 실험결과를 이용하였다. 재료실험 시 알루미늄 덮개가 있는 상태에서 수행한 것인데 일축 압축시험에서는 덮개의 영향이 없는 것으로 나타난다. 표 1에 선택된 세 가지 밀도를 갖는 알루미늄 폼에 대한 재료 성질을 정리하였다.

응력-변형률 곡선의 면적이 단위 부피당 에너지를 나타내기 때문에 실험에서 나온 결과로부터 산정하면 SAF20,

SAF30, SAF40이 단위 부피당 각각 1.03MPa, 2.37MPa, 4.62MPa의 에너지 흡수능력을 갖는 것으로 평가된다. 기존 연구들의 결과를 참고하여 이 해석에서는 알루미늄 폼의 변형률 속도에 따른 영향은 없는 것으로 가정하였다. 또한, 압력에 대한 저항을 평가할 때 두께방향 이외의 방향에 대한 재료성질은 제품 제작사의 데이터를 이용하였다.

다공질의 알루미늄 폼의 특성상 역학적 거동을 외연적 유한요소해석으로 모사할 때 크기 효과를 고려해야 하는데 두 가지 접근 방법이 있다. 하나는 폼 자체의 구성형상을 그대로 모사하는 방법이고 다른 하나는 항복면을 생성하는 연속체 개념에서 접근하는 것이다. 공학적인 측면에서 이 논문에서는 구조물 단위에서 유효한 연속체 개념의 해석법을 따른다. 범용 해석 프로그램에서 다양한 재료모델을 제시하고 있는데 대표적인 것들을 표 2에 정리하였다. Hassen 등⁽¹⁹⁾이 이러한 구성모델의 적합성에 대한 검토를 수행했는데 모든 하중조건하에서 정확한 결과를 주는 재료모델은 없다는

〈표 1〉 알루미늄 폼의 재료성질

재료 성질	SAF20(A356SiC020)	SAF30(A356SiC030)	SAF40(A356SiC040)
Density	200 kg/m ³	300 kg/m ³	400 kg/m ³
Compressive strength (upper/ lower yield)	1.0/0.3 MPa	2.4/1.1 MPa	4.0/2.0 MPa
Compressive modulus	185 MPa	300 MPa	500 MPa
Densification strain	80 %	72 %	68 %
Tensile strength	0.7 MPa	2.0 MPa	3.2 MPa
Elongation to Failure	0.2 %	0.2 %	0.15 %
Shear strength	0.5 MPa	1.0 MPa	2.1 MPa
Shear modulus	200 MPa	1000 MPa	920 MPa
Shear failure strain	0.2 %	0.3 %	0.3 %
Average cell size	7 mm	4 mm	3 mm

〈표 2〉 알루미늄 폼의 재료모델 비교

재료모델	항복면 $f=0$	flow of plastic strain $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$
LS-DYNA #26 (honey-comb)	$f_{ij} = \sigma_{ij} - Y_{ij} = 0$	$F_{ij} = f_{ij} = \sigma_{ij} - Y_{ij}$
LS-DYNA #126 (modified honeycomb)	$f_{ij} = \sigma_{ij} - Y_{ij} = 0$	$F_{ij} = f_{ij} = \sigma_{ij} - Y_{ij}$
LS-DYNA #63 (crushable foam)	$f_i = \sigma_i - Y = 0$	$F_i = f_i = \sigma_i - Y$
LS-DYNA #75 (bulku/dubois foam)	$f = \left(\frac{p-1/2(p_c-p_t)}{a} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_e}{b} \right)^2 - 1 = 0$	$F = \sqrt{3/2\sigma} : \sigma = \sqrt{\sigma_e^2 + 9/2p^2}$
LS-DYNA #154 (Deshpande-Fleck)	$f = \sqrt{\frac{1}{1+(\alpha/3)^2} (\sigma_e^2 + \alpha^2 p^2)} - Y = 0$	$F = f$
ABAQUS	$f = \sqrt{\left(p - \frac{1}{2}(p_c - p_t) \right)^2 + \left(\frac{\sigma_e}{M_0} \right)^2} - a = 0$	$F = \sqrt{3/2\sigma} : \sigma = \sqrt{\sigma_e^2 + 9/2p^2}$
Miller(22)	$f = \sigma_e - \gamma p + \frac{\alpha}{d} p^2 - d = 0, d = d_0 Y$	$F = f$

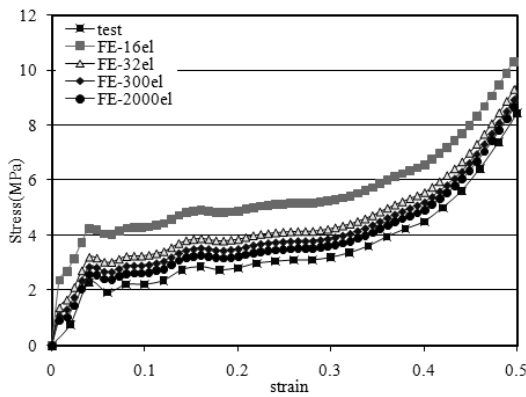
결론을 내렸고 항복면, 경화법칙, 소성류 법칙 등에서 차이를 보이는 모델들이 압축에 대한 거동에서는 적절함을 보였다.

재료 실험에서 사용된 시편 사이즈와 동일한 해석 모델을 LS-DYNA^{(20),(21)}의 8절점 솔리드 요소를 이용하여 구성하여 재료 모델의 적절성과 수렴성을 검토하였다. 표 2의 재료 모델 중에서 modified honeycomb 모델과 Deshpande-Fleck foam 모델(D-F 모델)을 비교하였는데 D-F 모델은 탄성구간의 모사없이 소성구간만을 표현하기 때문에 에너지 소산 등의 거동 차이는 크지 않지만 변형이나 요소의 소멸 등의 세부적인 영향과 근거리 폭파로 인한 국부적인 손상의 차이를 나타내어 응력-변형률 곡선을 그대로 사용하는 modified honeycomb 모델을 변수해석을 위한 재료모델로 선택하였다.

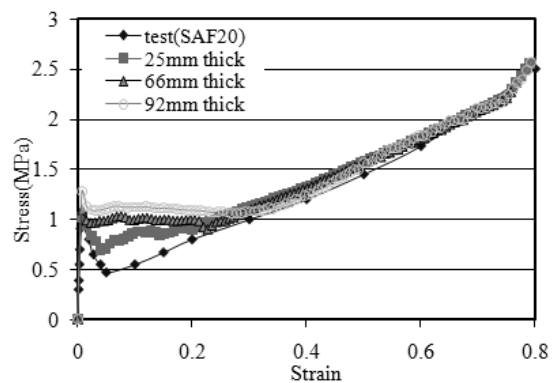
외연적 유한요소해석에서 일축압축하의 단순한 모델이라 하더라도 요소의 수, 즉 자유도의 수에 따른 수렴성 검토가 반드시 요구된다. 그림 4 (a)에서 보는 바와 같이 요소의 수가 2000개 이상일 때 100x100x두께 시편의 해석 결과가 압축시험의 결과를 잘 모사하는 정도의 수렴성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 그림 3(b)의 응력-변형률 곡선과 표 1의 재료성질을 그대로 재료모델의 입력값으로 사용했을 경우의 해석 결과를 그림 4(b)~(d)에 나타내었다. 앞서 언급

한 바와 같이 변형률 속도의 영향을 무시한다면 정적하중 재하시의 재료모델 검증 결과를 폭발하중에 대한 재료모델로 사용할 수 있다. 하항복점 근처의 거동에서 차이를 보이고 있지만 재료의 에너지 측면에서 5% 이내의 차이를 보이고 있고 항복점 이후의 거동을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. D-F 모델이 이러한 하항복점으로 가는 거동을 무시한 모델로 제시된 것인데 탄성구간이 없는 상태에서 모사하기 때문에 탄성구간의 거동이 무시되기 때문에 이 변수연구에서는 제외되었다.

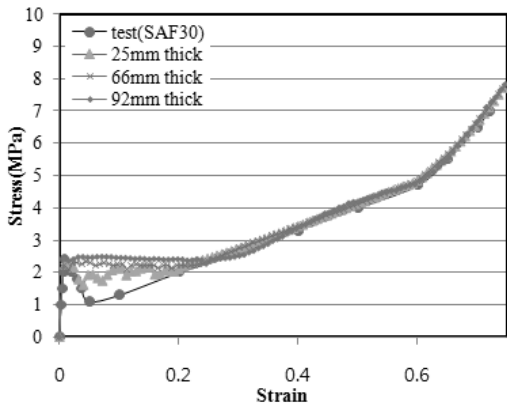
알루미늄 폼의 세 가지 밀도에 해당하는 SAF20, SAF30, SAF40의 재료 모델은 여기서 검증된 입력변수를 그대로 사용하고 두께를 제품 표준 규격으로 제시된 25mm, 66mm, 92mm 세 가지에 대한 희생부재를 대상으로 이후의 변수연구를 수행하였다. 필요한 경우에는 이러한 폼을 적층하거나 다른 두께를 활용할 수 있지만 희생부재의 기본적인 설계 개념을 도출하기 위한 해석으로 이 논문에서는 각 변수 연구별로 9개의 폼 모델과 폭발의 규모에 따른 조합을 고려한 8개의 하중 경우에 대해서 총 72개의 모델을 균등 압력의 경우와 비균등 압력으로 구분하여 압력저감 효과를 평가하였다. 비균등 압력의 경우에는 폼에 부착되는 덮개 유무 및



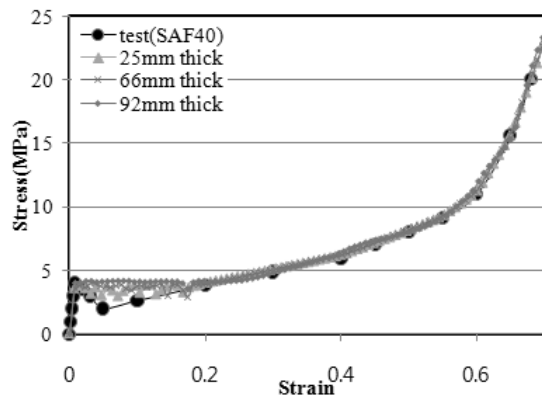
(a) M126 재료모델의 수렴성 검토



(b) SAF20 재료 모델 검증



(c) SAF30 재료모델의 검증



(d) SAF40 재료 모델 검증

〈그림 4〉 알루미늄 폼의 재료 모델 검증

변수변화에 따른 영향을 별도로 평가하였다.

3. 희생부재의 압력저감 효과

3.1 균등 압력시 압력저감

알루미늄 폼을 부착한 콘크리트 구조물의 거동을 평가하고 이를 설계에 반영하기 위해서는 폭발의 규모에 따른 알루미늄 폼의 에너지 소산 능력을 압력 저감의 정도와 전달 압력의 크기로 평가하여야 한다. 재료모델의 검증에서 사용한 해석 모델을 이용하여 세 가지 밀도의 알루미늄 폼에 대해서 25mm, 66mm, 92mm 두께에 대해서 각각 해석을 수행한다. 해석에서 하중 조건은 표 3의 구 형태의 TNT를 기준으로 거리와 질량을 변수로 설정하였다. t_A 는 폭발 압력의 도달시간이고 P_{max} 는 폭발로 인해 발생하는 최대 압력인데 이는 구조물에 따라서 반사압력이 달라지기 때문에 최종압력은 압력이 작용되는 구조물에 따라 달라진다. 알루미늄 폼의 바닥면을 모두 고정단으로 경계조건을 설정하였다. 하중은 LS-DYNA⁽²⁰⁾의 ConWep 하중을 알루미늄 폼의 상면에 작용하도록 하였다.

폭발에 의한 작용압력(Incident Pressure)은 구조물의 강성, 지지조건, 형상 및 위치에 따라서 다른 반사압력(Reflected Pressure)를 나타낸다. 작용 압력의 수준은 그림 1 (a)에 따르면 높은 수준에 속한다. 작은 면적에 작용하기 때문에 위치별 작용압력과 반사압력은 거의 일정하기 때문에 재료적인 측면에서의 압력 저감효과를 평가할 수 있다. 작용 압력이 높을 경우에는 압력이 작용하는 시점에 알루미늄 폼이 파괴에 도달해서 작용 압력을 해석적으로 평가하기 힘들기 때문에 알루미늄 폼의 하면에서의 압력으로 저감 효과를 평가할 수 있다.

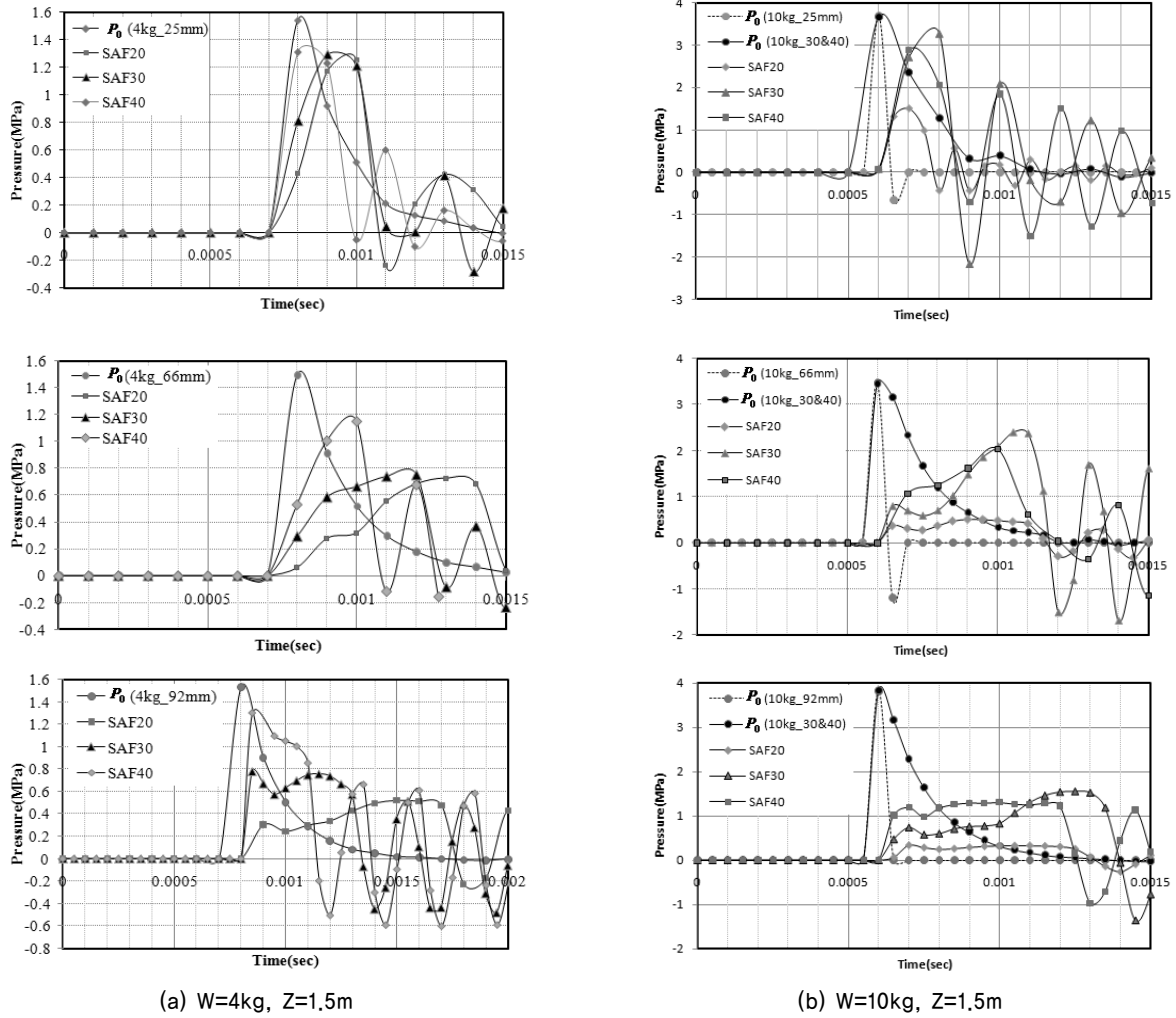
밀도가 낮고 폼의 두께가 두꺼우면 전달되는 압력의 수준을 좀 더 낮출 수 있을 것이라는 것이 예상되지만 압력의 수준이 높은 경우에는 밀도가 높은 알루미늄 폼이 좀 더 큰 응

력을 부담하면서 에너지를 소산시킬 수 있을 것이다. 폭파에 의해 공기중에 발생하는 압력은 구조물의 특성에 따라서 반사압력이 달라지게 된다. 그림 5에 대표적인 해석 결과로 TNT 4kg, 10kg이 폭발할 때 알루미늄 폼의 상면에서의 반사압력과 제일 하단에서의 발생 압력을 시간이력으로 표시하였다. P_0 는 알루미늄 폼 상단에 발생하는 압력으로 폭파의 수준이 높을 경우 알루미늄의 항복 강도를 상회하는 압력이 갑자기 작용하여 요소가 바로 파괴되어 작용 압력을 제대로 평가할 수 없게 된다. 그림 5(b)에서 P_0 의 값에 대한 이력이 두 가지인 경우는 이에 해당한다. SAF20, SAF30, SAF40으로 표시된 그래프는 폼이 제일 하단 요소에서의 반사압력으로 각 알루미늄 재료모델별 거동을 나타낸 것이다. 평가된 압력 이력으로부터 설계를 위한 중요한 개념의 정립이 가능하다. 밀도가 낮고 두께가 두꺼울수록 폼의 상부에서의 소성변형을 통한 에너지 소산으로 인해 전달되는 하면에서의 압력의 수준이 낮아지고 압력의 작용 시간을 늦추고 압력 작용 기간을 길게 한다. 알루미늄 두께가 작을 경우에는 폼의 소성변형을 통한 에너지 소산을 하기 힘들기 때문에 압력의 저감 효과가 적음을 알 수 있다. 원거리 폭발시 균등 압력 작용을 가정하면 이 압력이력을 구조물에 작용하는 압력의 시간이력으로 활용할 수 있다.

폭발 하중의 가장 주요한 변수로 활용되는 scaled distance Z 에 따른 폼 하단에서의 압력값 P_0 를 72개의 해석 결과로부터 그림 6과 같이 정리하였다. 두께가 66mm 이상이고 밀도가 가장 낮은 SAF20의 경우에는 Z 의 크기에 따라 거의 일정한 압력을 나타내고 있고 재료 자체의 하향복 및 상향복 응력 사이의 압력을 발생시키고 있다. SAF40의 경우에는 $Z=0.6$ 수준까지 상향복점 이하의 발생 압력을 나타내고 있다. 폭발에 의한 압력의 수준에 대한 목표가 설정되면 이를 구조물의 성능 목표에 적합한 압력만을 전달받도록 희생부재의 밀도와 두께를 설정할 수 있음을 보여주는 결과이다. 그러나, 이러한 결과는 근거리 폭발시의 압력 집중 효과를

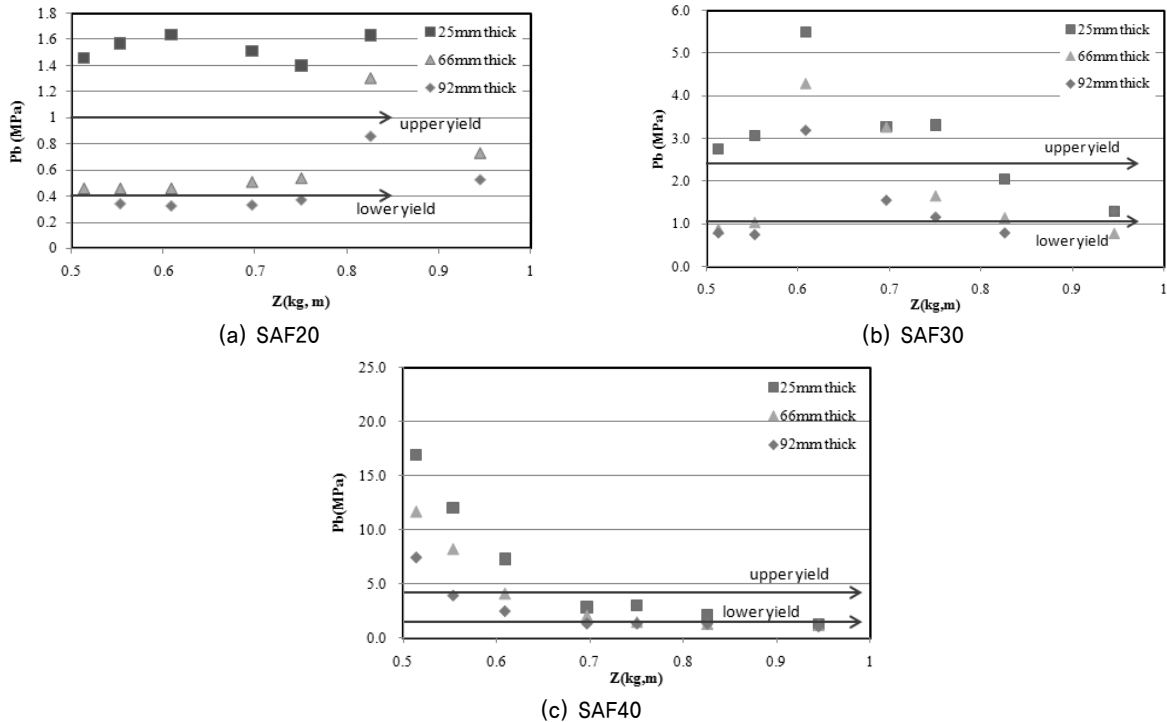
〈표 3〉 해석을 위한 폭파하중 조건

W	R	Z	t_A	P_{max} (MPa)
4 kg	1.5 m	0.945	0.00076	5.9
6 kg	1.5 m	0.825	0.000678	8.6
8 kg	1.5 m	0.750	0.000626	11.2
10 kg	1.5 m	0.696	0.00059	13.6
15kg	1.5 m	0.608	0.00053	19.1
20kg	1.5 m	0.553	0.000496	24.1
25kg	1.5 m	0.513	0.00047	28.6
30kg	1.5 m	0.483	0.00045	32.8



(a) W=4kg, Z=1.5m (b) W=10kg, Z=1.5m

〈그림 5〉 알루미늄 품의 상단과 하단의 압력



(a) SAF20

(b) SAF30

(c) SAF40

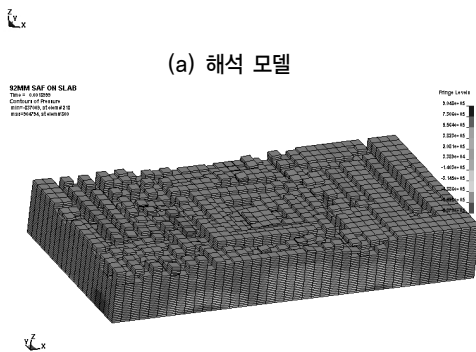
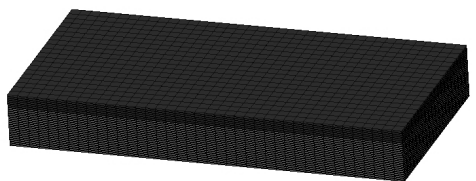
〈그림 6〉 Scaled distance에 따른 품의 하단 압력

고려할 수 없기 때문에 비균등 압력 작용을 고려한 평가가 요구된다.

3.2 비균등 압력시 압력저감

이 논문에서 제안된 방호구조물에 근접한 위치에서 폭발이 발생하면 앞 절에서 논의한 균등한 압력이 작용하지 않고 폭탄에 가장 가까운 위치에 큰 압력이 발생하는 비균등 압력 하중이 작용하게 된다. 이 경우에는 구조물이 가지는 특성이 미치는 영향이 크고 알루미늄 폼에 사용되는 덮개의 영향이 나타나게 되어 설계시 이를 고려할 필요가 있다. 해석의 대상 구조물은 Chong 등⁽²³⁾이 수행한 콘크리트 슬래브위에 알루미늄 폼이 있는 경우를 선택하였고 폭탄의 이격거리를 1.5m와 3.0m로 설정하였다. Chong 등은 단순지지 슬래브위에 알루미늄폼을 부착하여 폭발실험을 수행하여 전체 부재의 거동을 평가하였는데 폭발압력의 수준이 낮아 슬래브의 파괴로 이어지지 못했고 알루미늄 폼의 변형 형상과 압력을 측정하여 제시하였다. 이 논문은 실험의 결과로부터 희생 부재 설계의 개념을 정립하기 위한 해석적 접근을 대상으로 하였다.

비균등 압력에 대한 대상 해석모델은 그림 7과 같이 1.0m × 2.0m × 0.2m의 콘크리트 슬래브위에 앞 절에서 고려한 세 가지 두께의 알루미늄 폼이 완전부착되어 있는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 부착에 대한 고려는 예 폭탄의 부착특성을 고려할 수도 있지만 알루미늄 폼이 콘크리트 슬래브에 비해서 강성 및 강도가 상당히 낮기 때문에 이에 대한 고려가 큰 영향을 없을 것으로 판단하였다. 근거



(a) 해석 모델

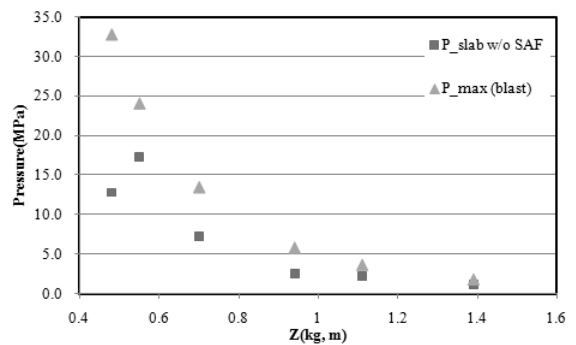
(b) 알루미늄 폼의 손상

〈그림 7〉 해석 모델 및 손상 예

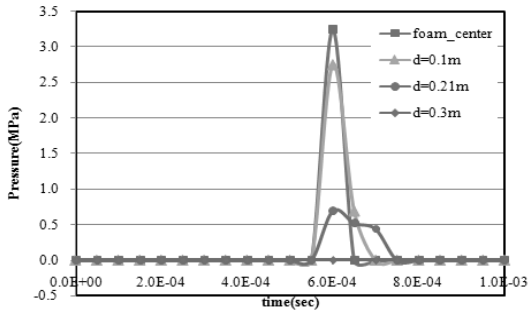
리 폭발이기 때문에 압력작용 시간이 1/1000초 수준이고 얇은 알루미늄 폼의 경우에 압력을 직접적으로 콘크리트 슬래브에 전달하고 이를 지연시키거나 저감시키는 효과가 거의 없게 된다. 알루미늄 폼이 없는 경우에 동일 조건에서 콘크리트 슬래브에 발생하는 압력(P_slab)을 그림 8과 같이 scaled distance에 따라 구하였다. 이 값을 기준으로 알루미늄의 압력저감 효과를 평가하였다. 경험적 하중값을 제시하는 ConWep이 실제 폭발에 따른 압력 이력을 정확하게 묘사하지 못하는 경우도 있지만 설계를 위한 공학적인 측면에서는 충분한 정확도를 나타내는 것으로 볼 수 있다.⁽¹⁰⁾

TNT 10kg이 1.5 이격거리에서 폭발할 때 슬래브에서 발생하는 압력은 그림 8에서 나타난 것처럼 7.24MPa이다. 동일 조건에서 알루미늄 폼 SAF20을 두께별로 콘크리트 슬래브위에 부착하였을 경우에는 그림 9와 같은 압력 시퀀스를 얻게 된다. 그래프에서 d=0.1은 중심점에서의 거리를 나타낸다. 알루미늄 폼의 상면에 발생하는 압력은 거의 유사하게 3.0MPa 정도 나타났다. 위치에 따른 발생 압력 및 전달 압력의 크기의 차이는 뚜렷하게 나타나고 있기 때문에 이를 고려해야 한다. 두께가 두꺼워질수록 이러한 집중효과는 완화되고 있음을 알 수 있다. 희생부재의 소성변형을 통해 저감된 슬래브에 전달되는 압력은 25mm 두께의 경우에는 얇아서 오히려 반사압력으로 인해 증가된 압력이 발생하지만 66mm와 92mm 두께의 경우에는 86% 이상 압력이 저감된 0.6~0.8MPa 수준의 압력이 전달되게 된다. 이는 그림 5와 그림 6에서 균등압력이 작용할 경우와 비교하여 유사한 수준의 압력저감 및 전달 압력을 보이고 있다.

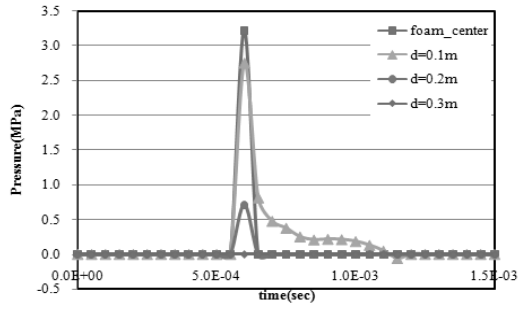
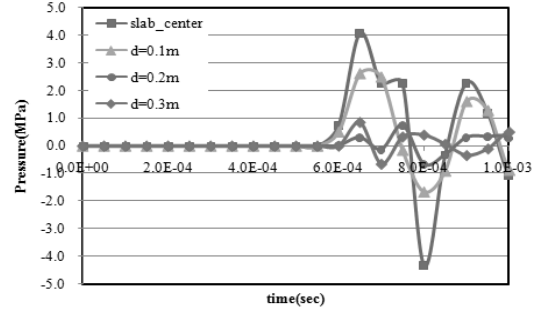
희생부재의 설계 변수 결정을 위해서는 알루미늄 폼의 밀도에 따라 충분한 소성변형을 통해 에너지 소산을 시킬 수 있도록 목표가 되는 폭발하중의 수준에 맞게 가이드라인의 제시가 요구된다. 비균등 압력이 작용하는 근거리 폭발하중에 대한 72가지의 해석 결과를 scaled distance에 따라 정리하면 그림 10과 같다. 항복하중이 높은 밀도가 큰 알루미늄



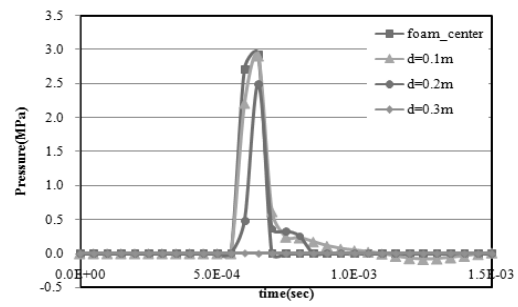
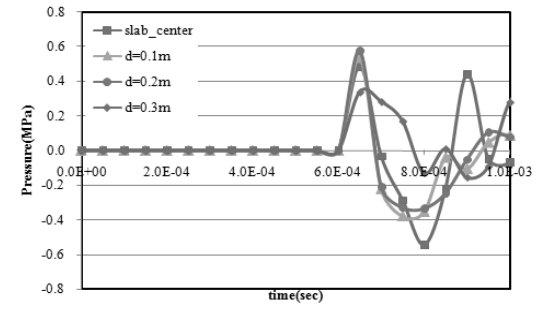
〈그림 8〉 scaled distance에 따른 슬래브 발생 압력



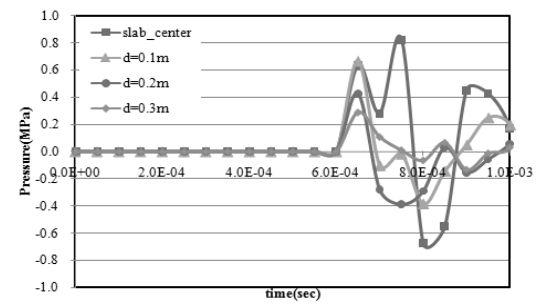
(a) 25mm 두께 폼(SAF20)



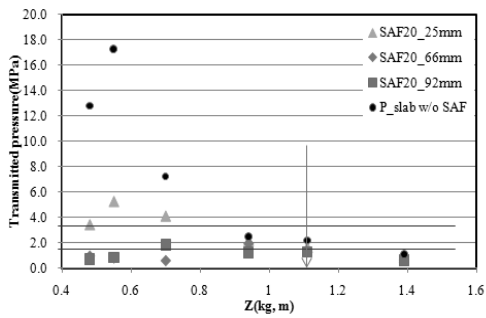
(b) 66mm 두께 폼(SAF20)



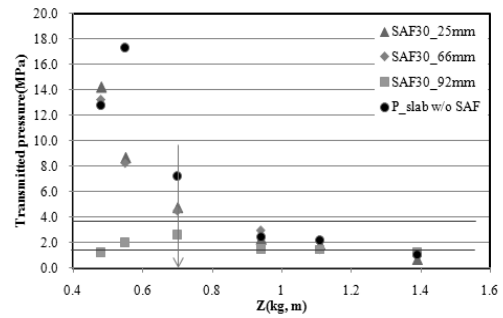
(c) 92mm 두께 폼(SAF20)



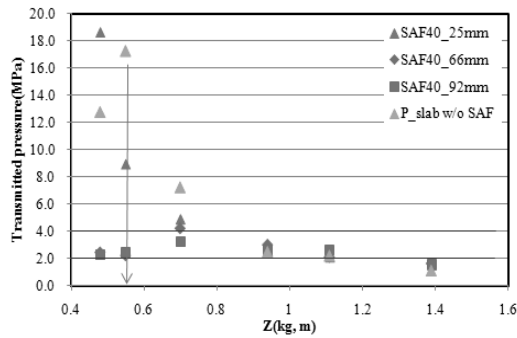
〈그림 9〉 근거리 폭파(W=10kg, R=1.5m)시 압력이력



(a) SAF20



(b) SAF30



(c) SAF40

〈그림 10〉 Scaled distance에 따른 전달 압력

폼을 이용할 경우에는 좀 더 높은 수준의 폭발하중에 대해 유효하게 압력저감을 일정 수준으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 두께를 키울수록 압력저감의 효과가 커지는데 SAF40의 경우에 $Z=0.5$ 수준 이상 규모의 폭발하중에 대해서는 두께를 더 키워야 할 것으로 판단된다. 이는 알루미늄 폼을 적층시켜 희생부재를 제작할 수 있기 때문에 목표 폭발하중이 증가되면 두께 증가를 통해서 대응할 수 있다. 그림 10에서 화살표로 표시한 부분을 초과하는 폭발하중에 대해서는 두께를 추가로 증가시키는 등의 좀 더 효과적인 희생부재의 설계가 요구된다.

3.3 덮개의 효과

근거리 폭파에 의한 압력분포는 그림 9에서 보는 바와 같이 중심점에 집중적으로 작용하게 된다. 일반적으로 알루미늄 폼에 대한 해석에서 덮개를 별도로 모델링하지 않는 것은 폭발에 의한 압력이 어느 정도 일정하다고 가정하기 때문이다. 이 논문에서는 알루미늄 폼이 실제 희생부재로 사용되기 위해서 덮개를 가지는 것이 일반적이기 때문에 압력 분포 및 저감에 미치는 영향을 평가하였다. 덮개의 재료로는 일반강재, 알루미늄, FRP가 사용될 수 있는데 여기서는 일반강재를 가정하여 그 효과를 평가하였다. 폭발 압력이 작용하는 알루미늄 폼(SAF20)의 상면에 1.15mm 두께의 항복강도 235MPa의 강재 덮개를 기준 모델로 설정하고 두께 변화와 강도 변화의 영향을 해석적으로 평가하였다.

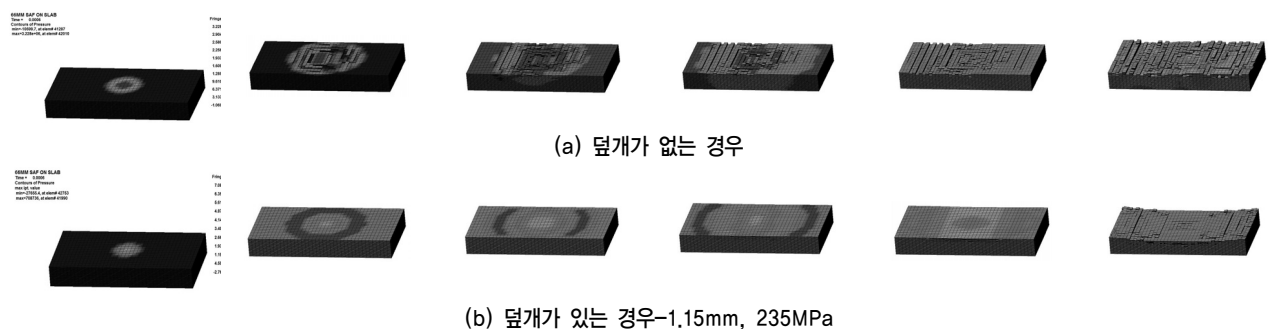
강재 덮개를 갖는 희생부재에 대한 해석 결과와 덮개가 없는 경우의 파괴거동을 그림 11에 비교하였다. 덮개가 모델링 되지 않은 경우에는 근거리 폭발에 의한 압력 집중이 분산되지 못하고 중심점 근처에서 바로 요소가 파괴에 도달하는 것을 볼 수 있고 이로 인해 그림 9(b)에서 보인 바와 같은 집중된 압력 분포를 보이게 된다. 덮개가 있는 경우에는 상대적으로 집중된 압력을 분산시켜서 그림 11(b)와 같이 넓은 면적의 폼이 변형하면서 에너지를 소산하는 것으로

나타난다. 알루미늄 폼과 슬래브에서의 압력 시간이력을 그림 12에 비교하였는데 그림 9(b)를 참고하면 덮개가 있는 경우에 알루미늄 폼에 작용하는 압력은 절반 이하 수준으로 감소하고 압력의 집중효과도 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 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.

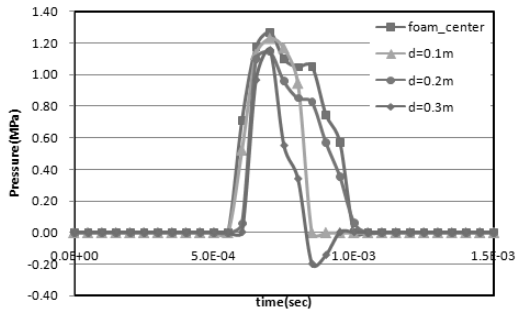
폭발의 규모가 증가하여 작용 압력의 수준이 증가할 경우에 대한 영향을 해석한 결과 $W=20\text{kg}$, $R=1.5\text{m}$ 인 경우에 두께를 2.0mm로 증가시키면 알루미늄 폼 상단의 발생압력은 1.53MPa이고 콘크리트 슬래브에 전달되는 압력은 1.47MPa이다. 항복강도를 400MPa로 증가시킨 경우는 알루미늄 폼 상단의 발생 압력은 2.13MPa이고 콘크리트 슬래브로 전달된 압력은 1.23MPa이다. 이는 폭발 규모가 증가했음에도 불구하고 전달압력은 2.42MPa에서 1.23MPa로 감소하였다는 것이고 희생부재의 설계 변수에 따라 압력저감의 효율성이 달라진다는 것을 의미한다.

4. 희생부재의 설계

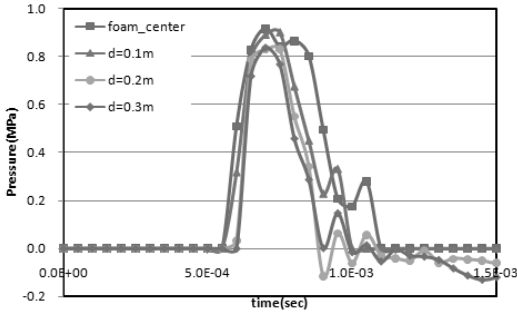
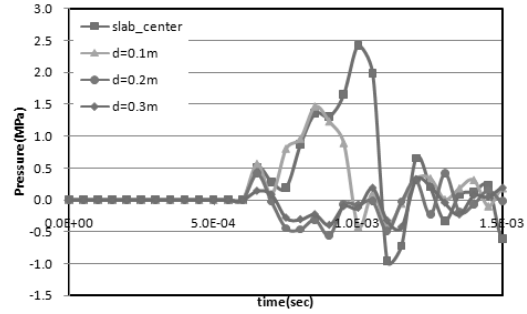
압력저감을 위한 희생부재의 설계는 목표가 되는 폭발의 수준에 따라 달라질 수 있고 효율성에 차이가 있음을 앞서 밝혔다. 특히, 근거리 폭발의 경우에는 가장 가까운 지점 근처영역에 집중되는 압력으로 인해서 방호구조물에 전달되는 전체 압력을 균등하게 볼 수 없게 된다. 단자유도 시스템으로 단순화한 접근이 정확한 결과를 제공하기 힘들게 된다는 의미가 된다. 희생부재를 갖는 방호구조물의 설계를 위해서는 목표 폭발 수준에 적합한 희생부재의 설계변수의 범위를 설정하는 단계와 희생부재의 소성변형을 통해 흡수되는 에너지의 수준과 전달 압력을 이용해서 방호구조물 자체의 거동을 평가하는 것이 필요하다.



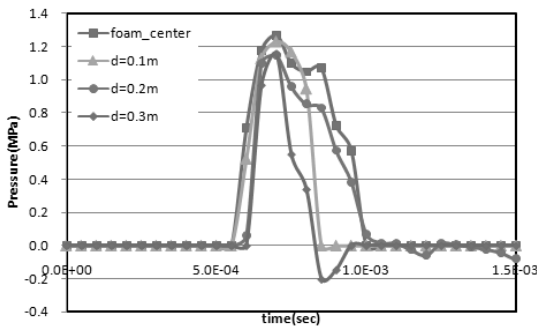
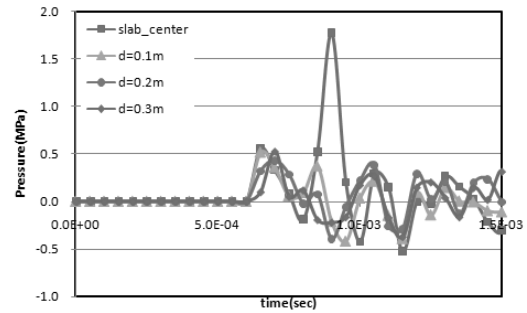
〈그림 11〉 덮개 유무에 따른 거동비교 ($W=10\text{kg}$, $R=1.5\text{m}$)



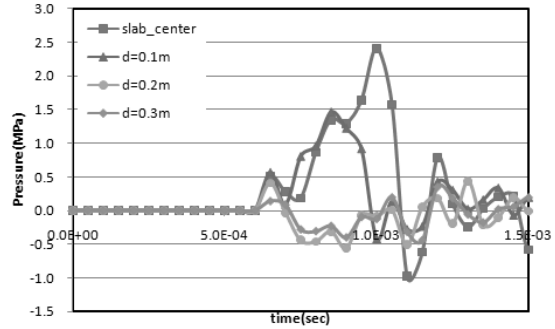
(a) 1.15mm, $f_y=235\text{MPa}$ 덮개있는 경우



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



(c) 1.15mm, $f_y=400\text{MPa}$ 덮개있는 경우



〈그림 12〉 덮개가 있는 경우의 압력 시간이력 ($W=10\text{kg}$, $R=1.5\text{m}$)

이 논문에서는 폭발의 수준을 대표하는 인자인 scaled distance에 따른 재료에 의한 전체 에너지의 수준으로부터 유효한 설계인자를 결정하는 방법을 제시하였다. 폭발의 거리를 1.5m로 고정하고 TNT의 질량을 변화시키면서 변수해석을 수행하고 이로부터 알루미늄 폼과 덮개가 소성변형으로부터 소산시키는 에너지를 평가하였다. 그림 13에 보는 바와 같이 SAF20 알루미늄 폼 66mm 두께에 대한 에너지 소산 이력을 통해서 어느 수준까지는 재료의 소성변형으로 인한 에너지 소산이 증가하지만 폭발의 규모가 더 증가하면 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 앞서 밝힌 바와 같이 주어진 알루미늄 폼의 응력-변형률 곡선에서 주어진 부피의 재료가 모두 소성변형을 한다고 가정하면 소산능력의 최대 값이 $136\text{kN}\cdot\text{m}$ 인데 근거리 폭발로 인해 유효하게 높은 압력을 받는 영역이 좁고 완전 압착이 이루어지기 전에 압력이 슬래브로 전달되기 때문에 실제로 $Z=0.75$ 수준에서

순간 최대 에너지 소산이 $31\text{kN}\cdot\text{m}$ 발생하였다.

희생부재의 설계는 방호구조물의 설계와 연계되어야 하기 때문에 각각의 역할에 대한 가이드라인이 요구된다. 방호구조물이 완전파괴에 도달하기 위해 필요한 하중 수준을 우선 결정하면 이에 적합한 희생부재의 설치를 통해 전달압력의 수준을 결정할 수 있다. 그림 14에 알루미늄 폼에 덮개가 없는 경우(Foam w/o Skin)와 덮개가 있는 경우(Foam w Skin)에 대한 폭발의 규모별 재료의 총에너지를 평가하였다. 폼 자체의 에너지 소산은 폭발규모가 적은 $Z=0.8$ 이상에서는 덮개가 없는 것이 좀 더 많은 에너지를 소산시키지만 폭발의 규모가 커지면 덮개가 있는 경우가 좀 더 넓은 영역의 알루미늄 재료의 소성변형을 유발하여 큰 에너지를 소산시키는 것을 알 수 있다. 또한, 폭발의 규모가 커짐에 따라 폼 자체의 소성변형량도 증가해서 이로 인한 에너지 증가량이 뚜렷하게 나타난다. $Z=0.5$ 이하의 높은 폭발 규모의

경우에는 순간적인 작용압력이 매우 높아서 희생부재의 두께를 증가시켜야 효과적으로 압력 저감과 에너지 소산을 시킬 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

주요 시설물의 방호를 위한 설계 개념중에 방호구조물을 별도로 설치하거나 기존 구조물에 부착하여 폭발에 의한 높은 압력을 저감시키는 형태의 희생부재를 제시하였다. 낮은 밀도를 갖는 알루미늄 폼과 덮개로 이루어진 희생부재를 콘크리트 구조물에 부착하여 재료의 소성변형을 통한 에너지 소산을 통해 구조물에 전달되는 압력을 저감하는 개념을 제시하였다. 이에 대한 기본적인 설계 개념과 방안을 제안하기 위해서 외연적 유한요소해석을 통해 폭발의 규모와 희생부재의 설계 변수에 따른 거동을 평가하였다. 이로부터 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1. 알루미늄 폼 자체의 재료성질을 모사하기 위한 재료모델은 modified honeycomb 모델로 적정하게 응력-변형률 거동을 모사할 수 있었고 수렴성 검토를 통해 해석 모델의 적정성을 검증하였다.
2. 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.
3. 근거리 폭발로 인한 집중된 압력 분포를 고려하기 위한 비균등 압력 발생시의 해석 모델에서는 폭발 압력의 분포를 평가하여 근거리 폭발에 대한 희생부재의 거동 평가시에 덮개를 반드시 고려해야 하고 두께 증가의 영향이 재료 강도 증가보다 효과가 뚜렷함을 밝혔다.
4. 폼 자체의 에너지 소산은 폭발규모가 작은 $Z=0.8$ 이상에서는 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 소성변형량도 증가해서 이로 인한 에너지 증가량이 뚜렷하게 나타난다.

이 논문에서는 일정 규모의 콘크리트 슬래브위에 설치된 희생부재에 대한 변수해석을 수행하였는데 실제 방호구조물의 형상 및 폭발의 위치 등에 따라 제시된 전달압력 및 에

너지 소산의 정도가 달라질 수 있다. 또한, 폭발의 폭발위치가 공중이 아닌 지반에서 혹은 충돌을 동반한 경우에는 지반진동 및 충격에 대한 영향을 동시에 고려한 해석이 요구된다. 좀 더 정밀한 해석을 위해서는 유체-구조물 상호작용을 고려한 해석이 필요한데 아직은 이러한 부분에 대한 실험적 검증 데이터가 부재하여 추후 실험적 검증을 통한 변수 연구가 가능할 것이다.

감사의 글

이 연구는 2009학년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사드리고 연구 참여를 허용해준 아델레이드 대학의 Oehlers교수와 Wu 박사에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. Wu, C., Oehlers, D.J., Wacht J., Glynn C., Spencer, A., Matthew, M., and Day, I., "Blast testing of RC slabs retrofitted with NSM CFRP plates," *Adv. Struct. Eng.* 10(4): 397-414, 2007.
2. Lu, B., Silva, P., Nanni, A., and Baird, J., *Retrofit for blast-resistant RC slabs with composite materials*, Missouri: University of Missouri-Rolla; 2006.
3. Muzsynski, L., and Purcell, M., "Composite reinforcement to strengthen existing structures against airblast," *J. Comp. Constr.*, 7; 93-97, 2003.
4. Wu, C., Oehlers, D.J., Rebstrost, M., Leach, J., and Whittaker, A.S., "Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs," *Engineering Structures*, 31: 2060-2069, 2009.
5. U.S. Department of the Army, *Structures to resist the effects of accidental explosions*, Technical Manual 5-1300, Nov. 1990.
6. Bangash, M.Y.H., and Bangash, T., *Explosion-Resistant Buildings*, Springer, 2006.
7. Baker, W., Cox, P., Westine, P., Kulesz, J., and Strehlow, R., *Explosion hazards and evaluation*, Elsevier, New York, 1983.
8. Kingery, C.N., and Bulmash, G., *Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*, Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984.
9. CONWEP, *Conventional Weapons Effects program*, Version 2.00: US Army Engineer Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS, USA, 1991.
10. Bogosian, D., Ferritto, J., and Shi, Y., "Measuring uncertainty and conservatism in simplified blast models," *30th Explosive safety seminar*, August, Atlanta, Georgia, 2002.
11. Blanc, G. Le, Adoum, M., and Lapoujade, V., "External blast load on structures-empirical approach," *5th European*

- LS-DYNA Users Conference*, 5c-39, 2005.
12. Deshpande, V.S., and Fleck, N.A., "Isotropic constitutive models for metallic foams," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48, 1253-1283, 2000.
 13. Dannemann, K. A., and J. Lankford, Jr., "High strain rate compression of closed-cell aluminum foams," *J. Materials Science*, Vol. A293, 157-164, 2000.
 14. Mukai, T., Kanahashi, H., Miyoshi, T., Mabuchi, M., Nieh T. G., and Higashi, K., "Experimental Study of Energy Absorption in Closed-Cell Aluminum Foam Under Dynamic Loading," *Scripta Met.* Vol. 40, 921, 1999.
 15. Ruan, D., Lu, G., Chen, F.L., and Siores, E., "Compressive behaviour of aluminum foams at low and medium strain rates," *Composite Structures*, 57, 331-336, 2002.
 16. Sadot, O., Anteby, I., Harush, S., Levintant, O., Nizri, E., Ostraich, B., Schenker, A., Gal, E., Kivity, Y., and Ben-Dor, G., "Experimental Investigation of Dynamic Properties of Aluminum Foams," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, August, 1226-1232, 2005.
 17. Li, B., Pan, T.-C., and Nair, A., "A case study of the effect of cladding panels on the response of reinforced concrete frames subjected to distant blast loadings," *Nuclear engineering and design*, Vol. 239, Issue 3, 455-469, March 2009.
 18. CYMAT Corp., Technical Manual for CYMAT SmartMetal™, 2006.
 19. Hanssen, A.G., Hopperstad, O.S., Langseth, M., and Ilstad, H., "Validation of constitutive models applicable to aluminum foams," *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 359-406, 2002.
 20. Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA keyword user's manual, 2006.
 21. Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA Theory manual, 2006.
 22. Miller RE., "A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behavior of foamed metals," *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(4), 729-754, 2000.
 23. Chong, K.P., Du, R., Cao, J., Koh, and Y.H., Aluminium Foam Panel Protection Against Close Range Blast Loading, *Summer Research Report*, Adelaide University, 2009.