방호·방폭 콘크리트 구조물 설계규정 및 해석방법

Design Criteria and Analysis Methods for Protective and Blast Resistant Concrete Structures

김 장 호* 이 나 현**

*연세대학교 사회환경시스템공학부 교수
**연세대학교 사회환경시스템공학부 박사수료

1. 서 론

폭발하중에 의한 구조물의 거동 및 설계와 관련된 연구는 국방산업 혹은 석유화학산업 등과 같은 분야에서 한정적으로 연구가 진행되어 왔다. 그러나 2001년 911테러를 비롯하여 국내에서 발생된 연평도 포격사건 등을 통해 군사시설 뿐만 아니라 사회기반시설물 및 민간시설물에도 방호설계 개념의 도입이 필요한 상태이다.

한편, 해외 선진외국에서는 폭발하중에 대한 방호설계에 대하여 TM5-855-1, AFPAM 32-1147, NAVFAC P-1080, DAHSCWEMAN-97, UFC 03-340-01, UFC 4-010-01, OSHA 1910, ISC security criteria 등과 같은 기준 정립을 통해 정부청사건물, 산업구조물, 민간구조물 등에 대하여 방호설계 규정을 체계화하였으며, 이들은 방호 구조물의 설계 및 해석의 기준과 함께 폭발하중에 의한 구조물의 응답을 간단하고 신속히 평가할 수 있도록 다양하고 방대한 실험 자료들을 포함하고 있다. 그러나 이와 같은 폭발하중은 국가안보 및 군사보안과 밀접한 관련이 있기 때문에 국내를 비롯하여 해외의 기술 및 자료에 대한 정보 공유가 상당히 제한적으로 이뤄지고 있는 실정이다(Byun *et al*., 2006; 김장호 등, 2009; Nam *et al*., 2010).

한편, 국내의 경우 방호구조물에 대하여 국방부의 '방호구조물 설계기준' 등을 중심으로 국방관련 시설에서 산발적으로 연구가 되어 있으나, 실질적인 주요내용은 폭발 위험요소에 대한 구조물의 안전성 평가부분이 주를 이루고 있으며, 방호구조물에 대한 기반시설 구축은 크게 고려되지 않고 있는 실정이다(박병희, 2007). 더불어, 최근 국내의 토목 · 건축 구조물의 초고층화, 대형화, 다양화 되어감에 따라 국내의 경우에도 50층 이상, 200m 이상의 초고층 건축물에 대하여 2009년 8월부터 '서울시 초고층 건축물 가이드라인'의 「테러예방 및 안전 관리계획 기준」을 제정하여 현재 건립을 추진 중인 상암동 DMC(디지털 미디어시티) 랜드마크 빌딩(133층, 첨탑포함 640m)와 용산 국제업무지구 내 랜드마크타워(최고 620m), 잠실 제2롯데월드(555m) 등에 적용되고 있다. 뿐만 아니라, 2010년 1월 국토해양부에서는 테러에 취약한 다중이 이용하는 건축물에 대한 테러예방 활동을 강화하기 위해 '건축물 테러예방 설계가이드라인'을 마련하여 테러방지책이 도입되었다. 그러나 이와 같은 설계 가이드라인은 계획단계에서의 가이드라인에 국한되어 있어 신뢰성있는 체계화된 구조적 방폭 및 방호설계지침 개발이 절실히 필요한 실정이다. 최근 미국 뉴욕시의 지하철에 방호설계가 적용된 것처럼 국내에서도 군사시설뿐만 아니라 민간시설물에 방호설계 개념을 도입하기 위한 기술력 확보가 필요하다.

그러나 실제 폭발하중을 받는 구조물의 거동 및 성능은 폭발실험을 통해 얻어야 하나, 폭발하중이라는 특이성으로 인해 실험장소 및 계측 등의 실험적 제약이 따르게 된다. 그러므로 폭발하중에 대한 구조물의 거동분석과 설계는 해석적 연구를 통해 이뤄져야 할 것이다(남진원 등, 2007; 김장호 등, 2009).

그러나 폭발하중은 기존의 정적해석 및 동적해석과 달리 매우 짧은 시간($10^0 \sim 10^4 s^{-1}$)에 아주 큰 압력하중으로 작용하기 때문에 그 응답은 충격영역에 속하게 된다. 그러므로 기존의 해석적 기법과는 다른 방식의 접근이 필요하다(김장호 등, 2009; 남진원 등, 2007).

폭발하중에 대한 구조물의 설계는 단자유도계와 다자유도계의 집중질량 모델을 이용하여 근사적으로 설계하는 단순기법이 현재까지도 방호 구조물의 설계 및 해석분야의 보편적인 이론으로 통용되고 있다. 그러나 이러한 단순기법 이외에도 폭발하중에 의한 구조물 설계 및 평가기법에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 최근에는 정밀 유한요소해석 및 최신 전산유체역학적인 해석기법들이 소개되고 있다.

따라서 본 고에서는 폭발하중에 대한 콘크리트 구조물의 방호설계에 관한 기술을 소개하며, 구조물의 거동 및 설계를 위한 방폭 구조물에 대한 해석기법의 특성을 단자유도 모델을 사용한 단순해석기법과 비선형 재료모델을 적용한 정밀해석기법으로 나눠 설명하고자 한다. 또한 정밀해석기법에서 고려한 콘크리트 재료모델의 소개와 더불어 향후 필요한 해석적 연구방향에 대하여 제시하고자 한다.

2. 방호·방폭 구조물 설계 및 규정

일반적으로 폭발하중을 받는 구조물의 설계기준 및 규정은 부재의 변형이나 변위를 제한하는 방식이며, 허용되는 변형이나 변위는 구조물이나 구조부재의 손상 정도에 따라 달라진다. 또한 구조물의 손상 정도는 구조물 자체의 보호, 구조물 내의 인명 보호, 혹은 구조물 내의 기자재 보호 등과 같은 방호목적에 따라 허용되는 손상이 다르게 된다.

만일 보수 및 보강없이 구조물을 재사용이 가능하도록 설계하기 위한 구조물의 설계는 과다설계가 되기 쉬우며 결국 과도한 건설비용으로 연결된다. 따라서 폭발하중을 받는 구조물의 효율적인 설계를 위해서는 건설재료의 동적 응답 특성 및 구조부재의 기준값을 제공하는 방호설계기준 및 지침을 이용하는 것이 바람직하다. 이러한 설계기준 및 지침을 이용하면 목표하는 구조물의 근사적인 방호성능을 즉각적으로 평가할 수 있는 장점이 있다. 또한 현재의 방호설계기준 및 지침들은 수많은 실험 및 해석결과를 바탕으로 보다 합리적인 최적의 기준을 제시하기 위해 지속적으로 개정되고 있다.

그러나 설계자들이 이러한 방호설계기준 및 지침들을 이용하기 이전에 주지해야 할 점은 이러한 방호설계기준 및 지침들은 지점 변형이나 최대 변위량 등으로 구조물의 전체 거동을 고려하기 때문에 방호 구조물의 설계나 구조물의 근사해석에 제한되어 사용되어야 한다는 것이다. 다시 말하면 폭발하중을 받는 구조물의 정밀해석에는 사용될 수 없다는 것이다. 다음에는 방호구조설계에 주로 사용되는 설계기준 및 지침을 요약하였다.

2.1 TM5 Design Criteria

TM5-1300(Structures to Resist the Effect of Accidental Explosions)은 미국국방성(Department of Defense)의 Technical Manual로써, 폭발하중에 대한 구조설계를 위해 가장 광범위한 내용을 담고 있는 설계지침이다. 이 설계지침의 목적은 폭발 및 폭발물에 관련된 모든 구조물이나 구조시설의 전반적인 방호설계 방법을 제안하는 것으로 폭발, 파편하중, 충격파 하중, 동적구조해석의 원리, 철근콘크리트 설계, 강재구조 설계, 폭발관련 시설 설계 등의 내용을 포함하고 있다. TM5-1300에서는 Fig. 1 및 Table 1의 예시와 같이 탄성한계를 넘어서는 변형을 유발하는 높은 속도하중에서는 구조물의 국부적 파괴는 주로 휨 변형이나 지점의 변형각 및 전단 변형률에 의해 결정되며, 그에 따른 구조부재의 변형한계 및 허용 설계값은 지점회전 θ와 연성비 μ으로 제시되고 있다.

또한, 기존 TM5-855-1(Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons)은 철근콘크리트 부재에 대하여 최대변위에 대한 항복변위의 비인 설계 연성비를 5 ~ 10 범위로 적용하여 보 및 슬래브의 휨설계 기준을 제안하고 있으며, 지점 변형에 대한 설계 한계값은 제안하지 않았었다. 그러나 최근에 개정된 TM5-855-1에서는 지점 변형에 대한 설계 한계값을 적용하도록 수정 제안되었다. 하지만 TM5-855-1의 최신 개정판은 일반에게 공개되지 않고 있다. 이와 같은 TM5-855-1은 폭발하중 계산 프로그램인 ConWEP의 기본 매뉴얼로 구성되어 있다.

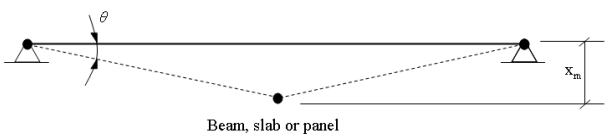


Fig. 1 Member support rotations (TM5-1300, 1990)

Table 1 Deformation limits of structural members under blast loading

구조부재	방호단계			
	1		2	
	θ	μ	θ	μ
철근콘크리트 보와 슬래브	2° 1)	-	4° 2)	-
강재보와 강판3)	2°	10	12°	20

1) 개방 또는 폐쇄된 공간에서의 폭발하중을 받는 전단철근은 반드시 슬래브의 경우에는 $\Theta > 1°$ 인 경우 해당된다. 폐쇄된 공간은 모든 보에 적용된다.
2) 8° 이상의 지점회전은 부재가 충분한 인장박막거동의 횡구속력이 있을 경우에만 가능하다. 더불어, 철근콘크리트 슬래브의 인장박막거동은 TM5-1300(1990)에서 확인할 수 있다.
3) 브레이싱은 연성거동에 따라 적절히 제공된다.

2.2 ASCE Design Criteria

ASCE(American Society of Civil Engineering)에서는 폭발하중에 대한 구조물의 설계를 위해 핵무기 설계기준에 대하여 핵무기에 대한 구조물의 설계(ASCE manual 42; 1985), 석유화학 산업에서 사용되는 시설물에 대한 방호설계(ASCE Design of Blasts Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, 1997), 일반구조물 등에 대한 설계지침(ASCE Structural Design for Physical Security, 1997)등 크게 3가지로 분류하여 설계지침을 제시하고 있다.

ASCE manual 42 (1985)라고 불리는 이 설계지침은 핵무기의 공격에 대비한 구조물의 설계를 위해 정립되었다. 이 지침은 비공개 자료들로부터 공개 가능한 범위의 정보들을 추출하여 작성된 것으로 좀 더 보편적이고 일반적인 설계방법을 제시하고 있다. 따라서 설계자들에게 방폭설계의 개념을 효과적으로 제공할 수 있지만 구조상세나 세부설계를 위한 지침으로서는 다소 부족하다고 할 수 있다. ASCE manual 42에서 제안하는 설계 한계값들은 Table 2에 나타내었으며, 휨 설계에 대한 설계 연성비는 다소 보수적인 값으로 제안하고 있다.

Design of Blasts Resistant Buildings in Petrochemical Facilities-ASCE(1997) 설계지침은 주로 석유화학 산업에서 사용되는 시설물에 대한 방호설계 및 시공방법을 위해 제안된 것으로 구조물의 손상 정도를 낮은 손상도, 중간 손상도 그리고 높은 손상도 3가지로 구분하여 각각에 대한 설계 한계값을 제안하고 있다. 여기서 낮은 손상도는 구조물이나 구조부재에 제한적인 국부손상이 발생되어 단순 보수를 통해 구조물을 재사용할 수 있는 경우로 정의된다. 중간 손상도는 구조물이나 구조부재에 전반적인 손상이 발생하여 구조물의 재사용을 위해서는 심각한 수준의 보수 및 보강이 필요한 경우를 의미한다. 마지막으로 높은 손상도는

Table 2 Response limits of ductility ratios

기본 구조물의 재료, 형태, 파괴모드	최대 연성비, μ
철근콘크리트	
보1)와 일방향 슬래브	
전단파괴 (사인장)	1.3
전단파괴 (전단-압축)	1.5
인장철근의의 최소 1/4의 압축력을 받는 휨파괴	7.0
좌굴 또는 압축에 의한 보-기둥2)파괴	1.5
이방향 슬래브와 플랫슬래브	
전단파괴	2.0
휨파괴	10.0
철근	
보3)와 플레이트거더	
복부판의 파괴 또는 플랜지의 좌굴로 인한 파괴	1.5
휨파괴	12.0
압축력을 받는 보-기둥4)의 파괴	
전반적 항복	2.0
좌굴	1.3
지붕, 벽면	1.0[5]

1) 아치형태와 실린더 형태의 파괴모드를 포함함
2) 아치형태, 실린더형태, 돔형태의 파괴모드를 포함함
3) 아치형태와 실린더 형태의 휨파괴 모드를 포함함
4) 아치형태, 실린더형태, 돔형태의 파괴모드를 포함함
5) 프레임으로 전달되는 충격량을 적용함

구조물이나 구조부재가 구조적 기능을 상실하거나 붕괴에 이르는 상태를 나타낸다. Table 3은 이 지침에서 제안하는 철근 콘크리트 부재의 설계 한계 값들을 나타낸 것이다.

Structural Design for Physical Security- ASCE(1997) 지침은 공식적인 설계도서는 아니지만 폭발하중, 구조거동, 각종 방호설계 및 보강방법에 대한 상세한 내용들을 담고 있으며, 건물의 창문이나 문 및 시설통로의 설계 그리고 기존 건물에 대해 폭발하중에 대한 보강 방법을 포함하고 있다. 이 지침에서는 각각의 철근 콘크리트 구조부재에 대해 지점 회전 및 단면 전단 변형률을 고려하여 손상도를 정의할 수 있는 한계값들을 Table 4와 같이 제안하고 있다.

3. 폭발하중의 해석적 평가

폭발하중에 대한 구조물의 거동은 설계 및 해석상의 편의를 위해 Biggs(1964)에 의해 제시된 단자유도계(Single-Degree-of-Freedom System, SDOF)와 다자유도계(Multi-Degree-of-Freedom System, MDOF)의 집중질량(lumped mass)모델을 이용한 단순기법과 유한요소해석에 의한 정밀해석기법으로 나눠 검토할 수 있다. 그러나 본고에서는 단자유도계에

Table 3 Response criteria for reinforced concrete

부재형태	응력형태	μ	지점회전, Θ[2]		
			하	중	상
보	휨	N/A	1	2	4
	전단[1]				
	콘크리트	1.3			
	콘크리트+스터럽	1.6			
	스터럽	3.0			
	압축	1.3			
슬래브	휨	N/A	2	4	8
	전단[1]				
	콘크리트	1.3			
	콘크리트+스터럽	1.6			
	스터럽	3.0			
	압축	1.3			
보-기둥	휨		1	2	4
	압축 (C)	1.3[3]			
	인장 (T)	10.0			
	압축과 인장사이의 전단[1]	1.3			
전단벽, 다이아프레임	휨	3.0	1	1.5	2
	전단[1]	1.5			

1) 전단저항은 휨저항의 120%보다 적음
2) 스터럽은 지점회전이 2° 이상 큰 경우 필요함
3) 연성비 = 0.05(ρ-ρ') 〈 10

Table 4 Typical failure criteria for components of reinforced concrete structure

부재형태	재료물성	파괴형태	기준	경미한 손상	보통 손상	극심한 손상
보	철근 콘크리트 (ρ〉0.5%/ 전면)	휨/박막거동	경간대비 중앙처짐비, δ/L	4%	8%	15%
전단		단면의 평균전단 변형률, γ_v	1%	2%	3%	-
슬래브		휨/박막	δ/L	4%	8%	15%
전단		γ_v	1%	2%	3%	-
기둥		압축	감소길이/높이	1%	2%	4%

의한 단순기법에 대해 언급하며, 정밀해석기법에서는 변형률 속도를 고려한 콘크리트 재료모델에 대해 언급하고자 한다.

3.1 단자유도 모델을 이용한 콘크리트 구조물의 폭발해석

복잡하고 연속적인 실제 구조물은 무한한 자유도를 가지지만, 동적 해석의 신속 및 편이를 위하여 폭발하중에 대한 구조물의 주요 응답을 산정함에 있어 허용 가능한 오차범위 내에서 구조물을 단자유도계(SDOF)로 가정하여 동적해석을 실시하기도 한다(TM5-1300, 1990, ASCE, 1999). 단자유도계는 거동이 한 방향으로만 일어나는 구조물의 동적거동을 의미한다. 즉, 실제 구조물을 단자유도를 이상화한 집중질량(lumped mass)과 스프링 상수(또는 강성)을 갖는 스프링구조(단자유도 시스템)로 변환하여 해석하는 것이다. 이에 추가적으로 시간 의존적 하중이 작용하는 감쇠작용이 고려된 전형적인 단자유도 시스템은 Fig. 2와 같으며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다(Biggs, 1964).

$$F(t) - ky - c\dot{y} - M\ddot{y} = 0 \quad (1)$$

$$F(t) - ky - M\ddot{y} = 0 \quad (2)$$

여기서, $F(t)$는 재하함수, k는 스프링상수, c는 감쇠상수, M은 집중질량(lumped mass), y는 변위, $\dot{y}$는 속도, $\ddot{y}$는 가속도를 의미한다.

매우 짧은 시간에 가해지는 폭발하중에 대해서는 감쇠효과가 크지 않기 때문에, 폭발하중을 받는 단자유도계의 운동방정식은 식 (2)와 같이 감쇠력을 제외할 수 있으며, 단자유도 시스템을 이용하여 구조물의 동적거동을 해석함에 있어 실제 발생되는 구조계의 전체 질량, 저항력 및 하중에 변환계수를 곱해줌으로써 등가 질량, 등가 강성 및 등가 하중으로 변환하여 사용한다. 변환계수는 외부에서 가해진 일은 내부의 변형에너지와 운동에너지의 합과 같다는 조건을 이용하여 특정하중에 의한 실제 구조계의 변형 형상으로부터 유도되며, TM5-1300(1997)에서 특정한 집중하중 혹은 등분포하중을 받는 구조물에 대하여 변환계수를 제시하

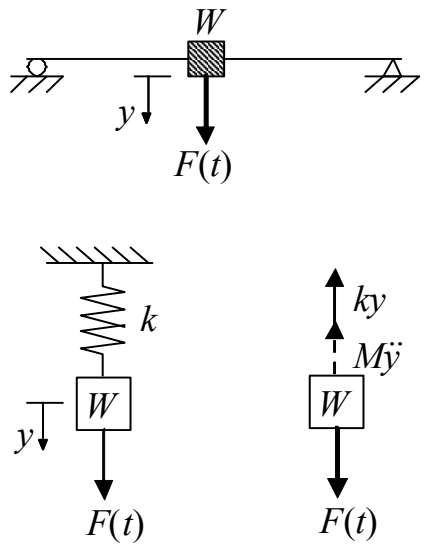


Fig. 2 SDOF system

고 있다. 이때 TM5-1300에서는 단자유도계를 탄소, 소성, 탄소성에 대하여 제시하고 있으며, 각각에 대한 단자유도계의 하중을 사각형 형태와 삼각형 형태로 이상화하여 변환계수, 즉 동적증가계수(Dynamic Load Factor, DLF)을 제시하고 있다. 작용하중에 식 (3)과 같이 동적증가계수를 곱하여 등가정적하중으로 변환한 후 적용하며, 이때의 최대 처짐은 식 (4)와 같이 산정할 수 있다.

$$P_{static} = DLF \cdot P \tag{3}$$

$$y_{\max} = DLF \cdot \left(\frac{P}{K}\right) \tag{4}$$

여기서, P_{static}는 등가정적하중, P는 작용하중, $y_{\max}$는 최대 처짐, $K = P/y$이다.

단자유도 모델을 이용하여 간편하게 해석할 수 있도록 개발된 프로그램은 크게 Wbiggs와 SBEDS로 크게 나눠볼 수 있다.

Wbiggs는 탄소성 단자유도계의 응답을 계산하기 위하여 Biggs의 동적이론에 기초하여 개발된 프로그램이다. Wbiggs에는 TM5-1300 혹은 ConWep 등에 의해 산정된 폭발하중을 사용자가 직접 입력해야 되지만, 실제 폭발시험 등으로 획득한 임의의 폭발하중을 시간이력의 함수로 입력이 가능하다는 특징이 있다. 한편, 적용된 하중에 대한 처짐과 구조물의 저항력만을 간단하게 계산하는 경우 유용하게 사용되며, 실제 구조 부재에 대한 단자유도 변수는 사용자가 직접 계산하여 입력해야 한다. 또한 Wbiggs는 폭발하중에 대한 구조물의 정방향 및 부방향 변위계산을 위한 서로 다른 단자유도 변수를 각각 고려할 수 있다.

SBEDS(SDOF Blast Effect Design Spreadsheets)는 Wbiggs와 마찬가지로 단자유도계의 탄소성 응답을 해석하기 위하여 미육군 공병단(U.S. Army COE) 내의 방호설계센터(Protective Design Center; PDC)에서 군사시설의 설계편이를 위하여 개발한 프로그램으로 스프레드시트(spreadsheet) 형식으로 구성되어 있다. SBEDS도 임의의 시간이력의 폭발하중을 함수로 입력할 수 있다. 또한 구조물의 처짐이력, 저항력, 하중, 속도, 가속도 등을 출력할 수 있으며, 현재 제한적으로 공개되어 있는 프로그램이다.

3.2 정밀해석기법을 이용한 콘크리트 구조물의 폭발해석

폭발하중에 대한 구조물의 거동을 정밀하게 해석하기 위해서는 기본 역학 및 물리학 보존법칙에 기초한 모든 지배방정식에 관성력을 포함하고, 시간과 거리에 따라 급격히 감쇠되는 충격파에 의한 구조물의 국부적인 변형을 고려할 수 있는 해석기법이 요구된다. 특히, 변형에 소요되는 시간이 1/1,000초 이하인 폭발해석의 경우 explicit 시간적분에 기초한 유한요소해석을 적용해야 한다. 폭발해석 결과의 정확성 및 신뢰성의 향상을 위해 폭발하중 특성을 강도증진효과 및 변형률 속도가 고려된 적절한 재료모델과 유한요소 모델링을 적용한 정밀해석기법을 통해 콘크리트 구조물의 폭발해석을 수행해야 한다(Choi *et al*., 2003; Nam *et al*., 2009, 김호진 등, 2007; 남진원 등, 2007; 연세대학교, 2006). 이와 같이 짧은 시간에 큰 하중이 가해지는 구조물의 변형을 검토하기 위해서는 explicit 해석법에 의한 재료의 대변형, 대회전, 대변형률, 상태변화의 현상을 해석하는 Hydrocode를 이용하여 정밀해석을 수행할 수 있다. 상용화된 Hydrocode로는 LS-DYNA, ANSYS/AUTODYN, PARM-CRASH, MSC/DYTRAN 등이 있으며, 이들은 물체 간 상호충돌해석을 위해서 접촉면 탐색기법을 보유하고 있으며, 재료의 상태방정식을 사용하고 있는 점이 일반적인 유한요소해석 프로그램과 구별된다고 할 수 있다.

3.2.1 콘크리트 구성모델

일반적으로 동적하중으로 인한 강도증가는 변형률을 기본으로 한 파괴면(failure surface)을 향상시킴으로써 고려되고 있으며, 동적하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동 해석을 위해 Fig. 3과 같이 hyperelastic-plastic 모델을 적용한 콘크리트 손상모델을 적용할 수 있다(Malvar, *et al*., 1997). 이는 콘크리트 재료의 변형률 효과와 누적 손상의 특징을 고려할 수 있도록 개발된 재료모델로, 이 콘크리트 재료모델은 표준 1축, 2축 및 3축 콘크리트 압축과 인장거동을 신뢰성 있게 예측할 수 있다는 것이 실험적으로 입증된 바 있다(Nam *et al*., 2010; Malvar *et al*., 1997). 한편, 콘크리트 요소는 일축 응력-변형률 특성을 사용한 모델로 거동을 정확히 예측할 수 없는 것이 일반적이기 때문에 삼축 응력상태를 고려할 필요가 있다. 콘크리트의 파괴 한계는 3차원 주응력 공간에서의 면(surface)으로 표현될 수 있다. 본 고에서 다루고자 하는 콘크리트 손상모델은 식 (5)~식 (7)와 같은 3개의 독립된 파괴면과 함께 빠른 동적 폭발하중에 대한 콘크리트 재료 강도 증진이 추가적인 파괴면(식 (8))과 변형률 속도를 고려하였다(Malvar *et al*., 1997). 한편, 변형률 속도에 따른 증가된 콘크리트 강도는 Fig. 4와 같이 보통 콘크리트 강도에 강도증진계수 r_f(enhancement factor)를 곱하여 산정하며, CEB-FIP 및 실험결과에 기초하여 고폭발의 경우 $3E+02s^{-1}$ 이상의 변형률 속도까지 나타낼 수 있도록 강도증진계수를 연장시켰다(Nam *et al*., 2010; 이나

현, 2008; 남진원 등, 2007; 김호진 등 2007).

$$\Delta\sigma_m = a_o + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad \text{(maximum failure surface)} \tag{5}$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f} p} \quad \text{(residual failure surface)} \tag{6}$$

$$\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y} p} \quad \text{(yield failure surface)} \tag{7}$$

$$\Delta\sigma_e = r_f \Delta\sigma(p/r_f) \quad \text{(enhanced failure surface)} \tag{8}$$

여기서, $\Delta\sigma$는 편차응력(deviatoric stress)에 대한 파괴면, p는 폭발하중에 대한 콘크리트 응력에 대한 환산압력, a_0, a_1, a_2 등은 비구속 압축실험결과와 구속압력상태에서의 삼축압축 실험결과를 통해 획득되는 파괴면의 변수이고, r_f는 강도증진계수(enhancement factor)이다.

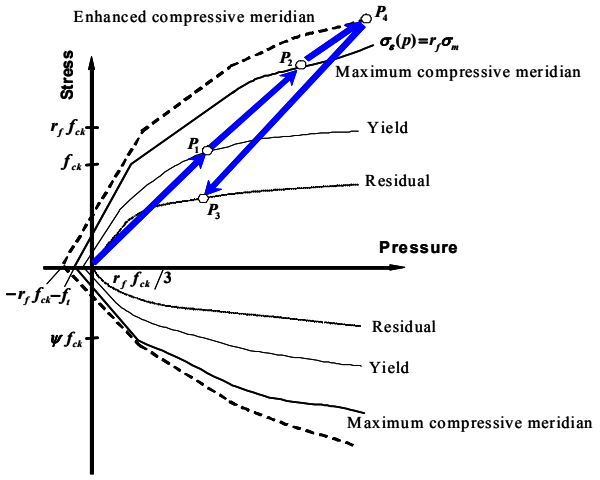


Fig. 3 Concrete material model

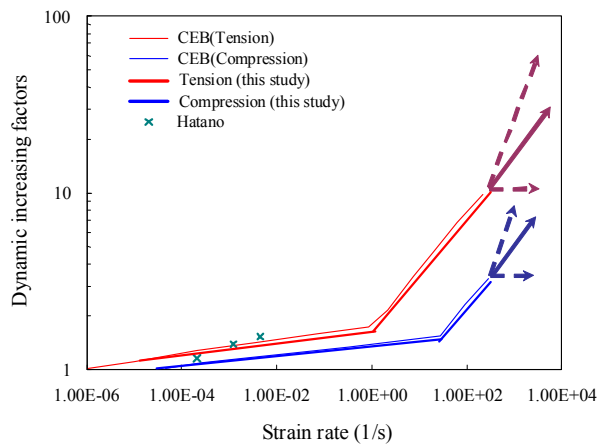


Fig. 4 Strength increase due to high strain rate

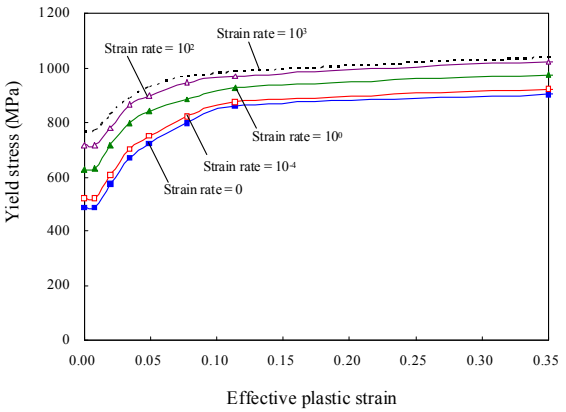


Fig. 5 Effective plastic strain versus yield stress

3.2.2 철근의 구성모델

콘크리트 내의 철근 역시 폭발하중에 대한 변형률속도 효과를 고려할 수 있는 재료모델로는 구간선형소성모델(Piecewise - linear plasticity)을 주로 사용한다. 여기서, 철근의 항복함수를 만족하는 철근의 편차응력(deviatoric stress)와 항복응력 함수는 식 (9), 식 (10)과 같다(LSTC, 2003).

$$\phi = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \le 0 \tag{9}$$

$$\sigma_y = \beta[\sigma_o + f_h(\epsilon_{eff}^p)] \tag{10}$$

경화함수(hardening function) $f_h(\epsilon_{eff}^p)$는 선형 경화형태로 식 (11)과 같이 표현할 수 있으며, 소성 탄성계수 E_p와 유효 소성변형률 ϵ_{eff}^p는 식 (12)와 식 (13)를 이용하여 각각 계산된다.

$$f_h(\epsilon_{eff}^p) = E_p(\epsilon_{eff}^p) \tag{11}$$

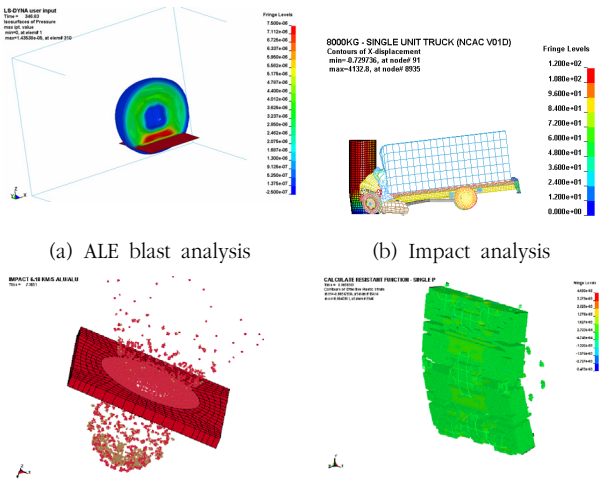
$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}}\right](\sigma_o + \beta E_p \epsilon_{eff}^p) \tag{12}$$

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}} \tag{13}$$

$$\beta = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{(1/p)} \tag{14}$$

여기서, β는 변형률속도 효과에 대한 변수로서 Cowper와 Symonds의 모델을 적용하여 식 (14)로부터 계산하였으며, 적용한 철근의 실험 자료에 근거하여 변형률 속도에 따른 철근의 유효소성 변형률과 항복강도와의 관계를 Fig. 5와 같이 정의하였다(연세대학교, 2006).

이와 같은 콘크리트와 철근 구성모델을 이용하여 Fig. 6



(a) ALE blast analysis (b) Impact analysis

(c) SPH blast analysis (d) Erosion blast analysis

Fig. 6 Blast and impact analysis using Hydrocode

과 같이 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian), SPH(Smoothed-Particle Hydrodynamics) 등의 해석기법으로 충돌 및 폭발해석을 수행할 수 있다. 이와 같은 해석기법 사용 시, solid element와 SPH의 hybrid 및 Lagrangian과 Eulerian의 Fluid-structure interaction과 같이 contact 및 interface 부분에서의 에너지 손실 등의 고려가 필요하다. 이와 같은 지속적인 정밀해석에 대한 연구를 통해 폭발 및 충돌하중에 대한 구조물의 정확한 거동분석이 이뤄져야 할 것이다.

4. 결론 및 향후 필요연구

일반적인 정적하중과 달리 폭발하중은 매우 높은 압력과 빠른 속도로 구조물에 작용하므로, 폭발의 영향이 예상되는 구조물의 설계시에는 폭발하중의 특성을 고려한 설계가 반드시 이뤄져야 할 것이다. 국내에서도 콘크리트 구조물의 방호설계·해석 및 보강 기술에 대한 연구가 증가되고 있으나, 방호개념에 기초한 폭발하중을 고려한 구조물의 설계기법은 뚜렷하게 제시되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 폭발하중이라는 특수성과 국내연구의 여건으로 인해 해석적 기법을 통한 방호 구조물의 설계 기법 및 매뉴얼이 작성되어야 할 것이다. 이와 같은 방폭 해석기법은 단자유도계를 이용한 단순해석기법과 강도증진효과 및 변형률 속도를 고려한 재료모델 및 유한요소를 적용한 정밀해석기법으로 나눠 고려할 수 있다. 단자유도계를 이용하여 구조물의 방폭성능을 검토하는 단순해석방법은 비교적 간단하고, 손쉽게 결과를 확인할 수 있는 반면 복잡한 구조물에 대한 정밀한 해석이 불가능하며 미세한 결과를 나타낼 수 없다. 그에 비해 구조물의 물리적 거동에 충실한 모델링을 통한 유한요소해석을 통하여 구조물의 동적거동을 판단하는 방법은 복잡한 구조물에 대한 정밀한 해석이 가능하고 국부적인 미세한 결과를 나타낼 수 있는 반면, 해석기법과 결과가 복잡하고 해석시간이 상당히 오래 걸린다는 단점이 있다. 즉, 방폭 콘크리트 구조물의 해석 및 설계는 사용자의 판단에 의해 신뢰성과 용이함으로 나눠 선택되어야 할 것이다. 더불어, 최근 구조물이 초고층 · 초대형화되어 감에 따라 강합성 콘크리트 또는 초고강도 콘크리트, 원전구조물 등의 특수구조물 등으로 건설됨에 따라 더욱 폭발·충돌 후 화재의 복합 시나리오에 대한 필요성이 증가할 것이라고 판단되며, 이에 대한 정확한 해석기법이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 김장호, 이나현, 김성배, 최종권 (2009), 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동분석 : (Ⅰ) 실험수행절차, 대한토목학회논문집, 제29권, 제5A호, pp.557-564.
2. 김장호, 이나현, 김성배, 조윤구 (2009), 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동분석 : (Ⅱ) 초고강도 콘크리트 및 RPC 구조물의 실험결과 대한토목학회논문집, 제29권, 제5A호, pp.565-575.
3. 김장호, 이나현, 판덕형, 김성배, 이강원 (2010), 차량 충돌하중을 받는 RC압축부재의 성능기반형 저항성능 평가방법 개발, 한국콘크리트학회 논문집, 제22권, 제4호, pp. 535-546.
4. 김호진, 남진원, 김성배, 이우철, 변근주 (2007), 폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조물의 보강성능에 대한 해석적 분석, 한국콘크리트학회 논문집, 제19권, 제2호, pp. 241-250.
5. 남진원, 김호진, 김성배, 변근주 (2007), 폭발하중을 받는 콘크리트 벽체구조의 해석기법, 대한토목학회논문집, 제27권, 제3호, pp. 433-442.
6. 박병희 (2007), 외부폭발에 대한 엄체호의 폭발 안전성 평가 및 방호설계기준 연구, 금오공과대학교, 토목공학과, 공학박사학위논문.
7. 연세대학교 방호기술연구센터 (2006), 고성능 섬유복합재로 보강된 철근콘크리트 벽체의 방폭성능 평가, pp.45-49.
8. 이나현 (2008), Arbitrary Lagrangian-Eulerian기법을 적용한 콘크리트 구조물의 폭발해석기법 구축, 연세대학교 석사학위 논문.

9. ASCE Committee on Dynamic effect of the Structural Division (1985), Design of Structures to Resist Nuclear Weapons effect, American Society of Civil Engineers, Manuals and Reports on Engineering Practice-No.42.
10. ASCE Task Committee on Blast Resistant Design (1997), Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, Task Committee Report on Blast Resistant Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers.
11. ASCE/SEI Task Committee (1997), EJ Conrath, TK Krauthammer, KA Marchand, and PF Mlakar, Report of Structural Design for Physical Security, Tack Committee on State of the Practice, Structural Engineering Institute of ASCE.
12. Biggs, J.M. (1964), Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, New York.
13. Byun, K.J., Nam, J.W., Kim, H.J., and Kim, S.B. (2006), Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Wall under Blast Loading, Proceeding of 2nd ACF International Conference, Asian Concrete Federation, Bali, Indonesia, 20-21 November.
14. Choi, H.J. and Krauthammer, T. (2003), Investigation of Progressive Collapse Phenomena in a Multi Story Building, 11th International Symposium on Interaction of Effects of Munitions with Structures, Mannheim, Germany, May.
15. Livermore Software Technology Corporation(LSTC) (2003), LS-DYNA keyword Users Manual Version 970, Livermore, California.
16. Malvar, L.J., Crawford, J.E., Wesevich, J.W., and Simons, D., A (1997), Plasticity Concrete Material Model for DYNA3D, International Journal of Impact Engineering, Vol. 19, No. 9/10, pp.847-873.
17. Nam, J.W., Kim, H.J., Kim, S.B., Kim, J.H.J., and Byun, K.J. (2009), Analytical Study of Finite Element Models for FRP Retrofitted Concrete Structure under Blast Loads, International Journal of Damage Mechanics, Vol. 18, No. 5, pp.461-490.
18. Nam, J.W., Kim, H.J., Kim, S.B., Yi, N.H.,and Kim, J.H.J. (2010), Numerical Evaluation of the Retrofit Effectiveness for GFRP Retrofitted Concrete Slab Subjected to Blast Pressure, Composite Structures, Vol. 92, No. 5, pp. 1212-1222.
19. TM5-1300/AFR 88-2/NAVFAC P-39 (1990), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Joint Departments of the Army, Air Force and Navy Washington, DC.

[담당 : 전세진, 편집위원]