

## 방폭 콘크리트 구조물의 해석기법 및 재료모델

Analysis Techniques of Blast Resistance Concrete Structures and Concrete Material Model



김정호\*  
Jang-Ho Jay Kim



박대효\*\*  
Tae-Hyo Park

### 1. 서론

전 세계는 지금 지진, 화학약품, 폭약, 충돌, 테러 등의 각종 원인에 의하여 폭발사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 인구가 밀집된 세계 여러 대도시들에서는 우연한 단 한 번의 폭발사고에도 수많은 인명피해 및 재산피해가 발생할 가능성이 높다고 할 수 있다. 특히, 세계에서 유일한 분단국가인 한국에서는 지속적인 국제정세의 변화 속에서 북한이나 다른 국가들에 의한 테러 발생 가능성이 항시 존재하며, 몇개의 대도시에 국가 인구 대부분이 밀집되어 있는 주거 특성을 가지고 있어 테러나 폭발사고가 발생할 경우 매우 큰 국가적인 손실과 피해를 예상할 수 있다(김장호 등, 2009). 더불어 최근에 발생한 천안함 피격사건과 연평도 포격사건 등 북한의 무차별적 공격이 증가하면서 군사시설 뿐 아니라 사회기반시설물 및 민간시설물에도 방호설계 개념의 도입이 필요한 상태이다. 이를 위하여 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동에 관한 연구를 통한 독자적인 방호기술의 구축에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나 실제 국내의 방호기술은 미국 및 유럽, 일본 등의 해외 선진국에 비하여 미흡한 수준의 단계에 있으며, 국가안보와도 밀접한 관계가 있는 분야이기에 국내를 비롯하여 해외의 기술 및 자료에 대한 정보 공유가 상당히 제한적으로 이뤄지고 있는 실정이다<sup>3, 11, 13~14</sup>.

기존의 폭발하중에 대한 방폭 구조물들은 정확한 설계가 이뤄지지 않았기에 초과압력하중으로 고려한 과도설계가 이뤄졌다. 실질적으로 폭발하중을 받는 구조물의 거동 및 성능을 폭발실험을 통해 얻어야 하나 실험장소 및 계측 등의 실험적 제약과 정확성의 부족으로 인하여, 폭발하중에 대한 구조물의 거동분석과 설계는 해석적 연구를 통해 이뤄져야 할 것이다<sup>13~14, 17</sup>. 그러나 폭발하중은 기존의 정적해석 및 동적해석과 달리 매우 짧은 시

간(100 ~ 104s<sup>-1</sup>)에 아주 큰 압력하중으로 작용하기 때문에 그 응답은 충격영역에 속하게 된다. 그러므로 기존의 해석적 기법과는 다른 방식의 접근이 필요하다<sup>13~14, 17</sup>. 따라서 본 고에서는 폭발하중에 대한 구조물의 거동 및 설계를 위하여 방폭구조물에 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. 단자유도 모델을 이용한 콘크리트 구조물의 폭발해석

폭발하중에 대한 구조물의 거동은 설계 및 해석상의 편의를 위해 Biggs(1964)에 의해 단자유도계(Single-Degree-Of-Freedom system, SDOF)와 다자유도계(Multi-Degree-Of-Freedom system, MDOF)의 집중질량(lumped mass) 모델을 이용하여 폭발하중에 대한 구조물의 거동을 평가하고 근사적으로 설계할 수 있는 기법을 제시하였다. 그러나 본 고에서는 단자유도계를 바탕으로 두고 있는 하중-충격량(pressure-impulse, 이하 P-I) 도표를 설명하기 위하여 단자유도계에 대해서만 다루고자 한다.

#### 2.1 등가 단자유도계

복잡하고 연속적인 실제 구조물은 무한한 자유도를 가지지만, 동적 해석의 신속 및 편의를 위하여 폭발하중에 대한 구조물의 주요 응답을 산정함에 있어 허용 가능한 오차범위 내에서 구조물을 단자유도계(SDOF)로 가정하여 동적해석을 실시하기도 한다<sup>1, 12</sup>. 단자유도계는 거동이 한 방향으로만 일어나는 구조물의 동적거동을 의미한다. 즉, 실제 구조물을 단자유도를 이상화한 집중질량과 스프링 상수(또는 강성)를 갖는 스프링구조(단자유도 시스템)로 변환하여 해석하는 것이다. 이에 추가적으로 시

\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수  
jjhkim@yonsei.ac.kr

\*\* 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수

간 의존적 하중이 작용하는 감쇠작용이 고려된 전형적인 단자유도 시스템은 <그림 1>과 같으며, 식(1)과 같이 표현할 수 있다<sup>2)</sup>.

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

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

여기서,  $F(t)$ 는 재하함수,  $k$ 는 스프링상수,  $c$ 는 감쇠상수,  $M$ 은 집중질량(lumped mass),  $y$ 는 변위,  $\dot{y}$ 는 속도,  $\ddot{y}$ 는 가속도를 의미한다.

감쇠작용에 의한 에너지 소산은 진동수와 정상상태의 응답으로 돌아오기 전까지 구조물에 적용한 진동 사이클과 밀접한 관계가 있다. 그러나 실제로 모든 구조물은 이러한 감쇠력을 가지고 있지만 폭발하중과 같이 매우 짧은 시간에 가해지는 하중에 대해서는 감쇠효과가 크지 않은 것이 일반적이다. 그러므로 폭발하중을 받는 단자유도계의 운동방정식은 식(2)와 같이 감쇠력을 제외하며, 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 제시하고 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 최대처짐은 식(4)와 같이 산정할 수 있다.

$$P_{static} = DLF \cdot P \quad (3)$$

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

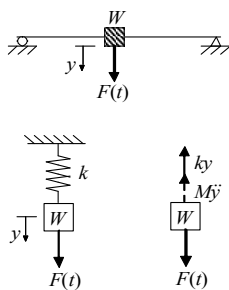


그림 1. 단자유도계의 모식도

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

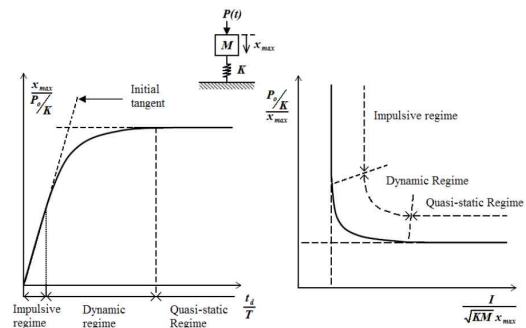
## 2.2 단자유도계를 이용한 P-I 도표

충격압력하중을 받는 구조부재의 거동은 가해지는 하중의 크기뿐만 아니라 하중과 지속시간에 의해 결정되는 충격량의 영향도 고려해야 한다. 단자유도 기법을 바탕으로 구조물에 동일한 수준의 손상을 일으키는 하중과 충격량의 조합을 도표로 나타낸 것이 P-I 도표를 사용하여 손상과 비손상 구역으로 구분할 수 있다.

$$\frac{P_0}{1/2 Kx_{max}} \left[ \propto \frac{\text{maximum load}}{\text{maximum resistance}} \right] = 1 \quad (5)$$

$$\left( \frac{P_0 t_d}{Kx_{max}} \right) \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{2I}{x_{max} \sqrt{KM}} \quad (6)$$

<그림 2-(a)>는 감쇠효과를 고려하지 않은 탄성 단자유도 시스템에 대한 전형적인 응답 스펙트럼을 보여주며, 이와 같은 스펙트럼은 식(5)와 식(6)을 이용하여 무차원의 <그림 2-(b)>와 같은 P-I 도표로 변환할 수 있다. 무차원 P-I 도표는 특정 하중에 대한 응답을 평가하는 데 쉽게 사용될 수 있으며, 정해진 최대 변위나 손상등급에 대해서 구조물에 파괴를 일으키는 하중과 충격량의 모든 조합을 나타내고 있다. 이 둘의 주요 차이점은 주어진 응답(또는 손상 등급)에 대해 응답 스펙트럼이 시스템 응답의 정규화된 시간(즉,  $t_d/T$ )의 영향에 초점을 맞추는 반면, P-I 도표는 최대 하중과 충격(등가 무차원의 량)의 조합에 초점을 맞춘다는 것이다<sup>2)</sup>. P-I 도표를 이용하여 특정 하중에 대한 응답을 손쉽게 평가할 수 있다. 도표는 정의된 최대 처짐 또는 손상 등급 범위 내에서 파괴나 특정 등급의 손상을 일으키는 하중(또는 압력)과 충격의 조합을 나타내고 있다. P-I 도표는



(a) 응답 스펙트럼

(b) P-I 도표

그림 2. 전형적인 응답 스펙트럼과 P-I 도표<sup>21)</sup>

<그림 3>에서 보는 것과 같이 경계선을 통해 두 개의 구역으로 분할되며, 곡선의 좌측과 하단 구역의 하중-충격량의 조합은 부재의 파괴를 일으키지 않는 반면, 우측과 하단 구역의 하중-충격량 조합은 부재의 허용한계(예를 들면 최대 동적 변위)의 초과에 의한 손상을 일으킨다<sup>2, 21)</sup>.

대부분의 구조물은 구조적 응답과 파괴가 한 가지 이상의 모드에서 발생할 수 있으며, 일반적인 철근콘크리트 부재의 경우 휨이 지배적인 파괴모드로 가정하여 고려할 수 있으나 특정 재하조건에서는 휨부재가 직접전단에 의해 파괴될 수도 있다. 이에 대하여 <그림 4>와 같이 다중 손상모드를 고려한 손상곡선으로 나타낼 수 있다<sup>21)</sup>.

### 2.3 단자유도계 해석프로그램

단자유도 모델을 이용하여 간편하게 해석할 수 있도록 개발된 프로그램은 크게 <표 1>에서 보는바와 같이 Wbiggs와 SBEDS로 크게 나뉘볼 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 저항력만

을 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(sheet) 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. 정밀해석기법을 이용한 콘크리트 구조물의 폭발해석

폭발하중에 대한 구조물의 거동을 정밀하게 해석하기 위해서는 기본 역학 및 물리학 보존법칙에 기초한 모든 지배 방정식에 관성력을 포함하고, 시간과 거리에 따라 급격히 감소되는 충격파에 의한 구조물의 국부적인 변형을 고려할 수 있는 해석기법이 요구된다. 특히, 변형에 소요되는 시간이 1/1,000초 이하인 폭발해석의 경우 외연적(explicit) 시간적분에 기초한 유한요소 해석을 적용해야 한다<sup>16~18)</sup>. 폭발해석결과의 정확성 및 신뢰성의 향상을 위해 폭발하중 특성을 강도증진효과 및 변형률 속도가 고려된 적절한 재료모델과 유한요소 모델링을 적용한 정밀해석기법을 통해 콘크리트 구조물의 폭발해석을 수행해야 한다<sup>4, 10, 17, 19)</sup>.

#### 3.1 강도증진효과 및 변형률 속도를 고려한 재료모델

##### 3.1.1 콘크리트 구성모델

일반적으로 동적하중으로 인한 강도증가는 변형률을 기본으로 한 파괴면(failure surface)을 향상시킴으로써 고려되고 있으며, 동적하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동 해석을 위해 LS-DYNA에서는 숫자로 표현한 재료모델 5, 16, 17, 25, 72, 78, 159 등을 제공하고 있다<sup>8)</sup>. 그러나 이 중 재료모델 5, 17, 25, 78은 콘크리트의 소성 거동을 예측하는데 있어 부정확한 것으로 평가되어 콘크리트 거동을 모델링하는데 있어 상당히 제한적인 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>. 그러나 연구자에 따라 78(\*MAT\_SOIL\_CONCRETE) 재료모델은 섬유보강 콘크리트의 거동을 파악하기에 용이하다고 하였으며<sup>7)</sup>, 159(\*MAT\_CSCM) 재료모델 또한 콘크리트 손상모델과 침식(erosion)모델을 동시에

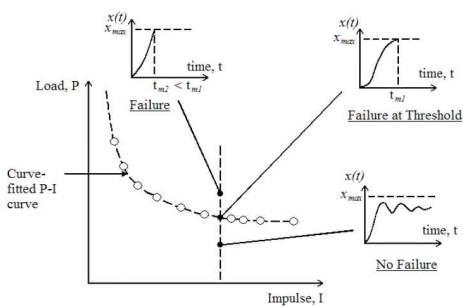


그림 3. P-I 도표의 손상등급

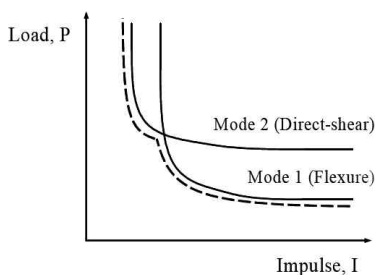
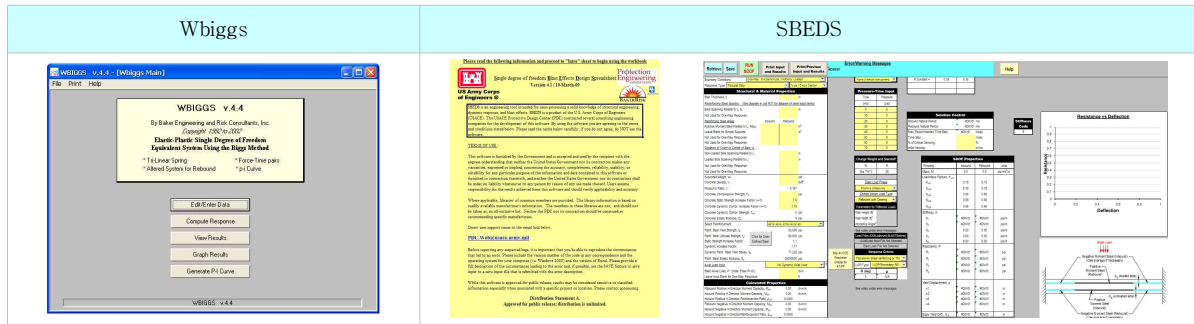


그림 4. 다중손상모드에 대한 P-I 도표

표 1. SDOF를 이용한 단순해석프로그램



적용하여 손상도를 파악할 수 있다고 하였다<sup>6)</sup>. 그러나 지금까지 많은 연구자들에 의해 사용되고 있는 콘크리트 재료모델은 16모델을 수정 보완하여 재료의 변형을 효과와 누적 손상의 특징을 고려할 수 있게 개발된 재료모델 72(\*MAT\_CONCRETE\_DAMAGE)을 많이 사용하고 있다<sup>9, 11, 17, 19)</sup>. 이 콘크리트 재료 모델은 표준 1축, 2축 및 3축 콘크리트 압축과 인장거동을 신뢰성 있게 예측할 수 있다는 것이 실험적으로 입증된 바 있으며, 본 연구에서 적용한 폭발하중에 대해서도 효과적으로 거동 예측이 가능한 선형 등방성의 초탄성-소성(hyperelastic-plastic) 모델이다<sup>9)</sup>. 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 <그림 5>와 식(7) ~ 식(9)와 같은 3개의 독립된 파괴면과 함께 빠른 동적 폭발하중에 대한 콘크리트 재료 강도 증진이 추가적인 파괴면(식(10))과 변형률 속도를 고려하였다<sup>9)</sup>. 한편, 변형률 속도에 따른 증가된 콘크리트 강도는 보통 콘크리트 강도에 강도증진계수  $r_f$  (enhancement factor)를 곱하여 산정하며, CEB-FIP 및 실험결과에 기초하여 고품발의 경우  $3E+02s^{-1}$  이상의 변형률 속도까지 나타낼 수 있도록 강도증진계수를 연장시켰다 <그림 6><sup>11, 16~17, 19)</sup>.

$$\Delta\sigma_m = a_o + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad (\text{최대파괴면}) \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f} p} \quad (\text{잔류파괴면}) \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y} p} \quad (\text{항복파괴면}) \quad (9)$$

$$\Delta\sigma_e = r_f \Delta\sigma(p/r_f) \quad (\text{증진파괴면}) \quad (10)$$

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

### 3.1.2 철근의 구성모델

콘크리트 내의 철근 역시 폭발하중에 대한 변형률속도 효과를 고

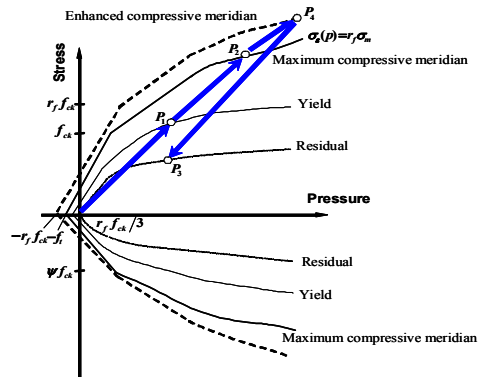


그림 5. 3축 응력에서 향상된 콘크리트 재료모델의 파괴 기준면

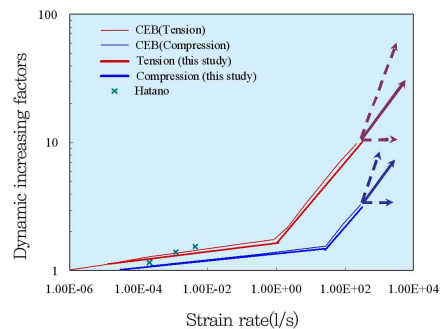


그림 6. 콘크리트의 강도증진계수

려할 수 있는 재료모델 24(\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY)를 주로 사용한다. 여기서, 철근의 항복함수를 만족하는 철근의 편차응력(deviatoric stress)와 항복응력 함수는 식(11), 식(12)와 같다<sup>8)</sup>.

$$\phi = \frac{1}{2} s_{ij}s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \leq 0 \quad (11)$$

$$\sigma_y = \beta[\sigma_o + f_h(\epsilon_{eff}^p)] \quad (12)$$

경화함수(hardening function)  $f_h(\epsilon_{eff}^p)$ 는 선형 경화형태로 식(13)와 같이 표현할 수 있으며, 소성 탄성계수  $E_p$ 와 유효 소성변형률  $\epsilon_{eff}^p$ 는 식(14)와 식(15)를 이용하여 각각 계산된다.

$$f_h(\epsilon_{eff}^p) = E_p(\epsilon_{eff}^p) \quad (13)$$

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_o + \beta E_p \epsilon_{eff}^p) \quad (14)$$

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\epsilon_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}} \quad (15)$$

$$\beta = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{(1/p)} \quad (16)$$

여기서,  $\beta$ 는 변형률속도 효과에 대한 변수로서 Cowper와 Symonds의 모델을 적용하여 식(16)로부터 계산하였으며 (Jones, 1983), 적용한 철근의 실험 자료에 근거하여 변형률 속도에 따른 철근의 유효소성 변형률과 항복강도와의 관계를 <그림 7>과 같이 정의하였다<sup>18)</sup>.

### 3.2 정밀해석기법의 특성

#### 3.2.1 Hydrocode를 이용한 폭발하중의 정밀해석

일반적으로 구조물에 충돌, 폭발 등의 짧은 시간에 큰 하중이 가해지게 되면, 구조물은 가장 큰 변형을 일으키면서 파괴 및 손상이 발생하게 된다. 이때 충돌부위에서는 대변형이 발생하고, 경우에 따라서 변형에너지는 폭발 및 화재의 형태로 발현하게 된다. 이러한 물체의 초고속 충격체에 의한 재료의 대변형, 대회전, 대변형률, 상태변화의 현상을 해석하는 코드를 Hydrocode라고 한다. Hydrocode는 이론적으로 전산연속체역학을 바탕으로 유체나 고체, 또는 고체와 유체의 결합으로 이루어진 연속체를 대상으로 한다. 따라서 Hydrocode는 전산고체역학과 전산유체역학을 포함하는 광범위한 해석분야를 포함하는데, 고체역학을 기본으로 하는 Lagrangian code와 유체역학의 Eulerian code가 개발되어 왔으며, 각각의 Lagrangian,

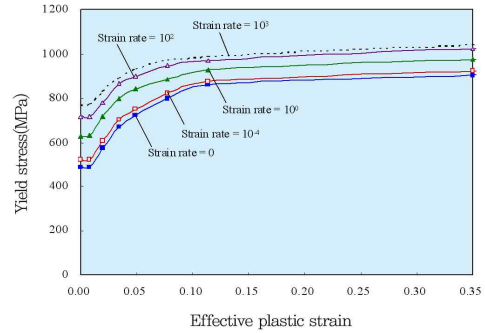
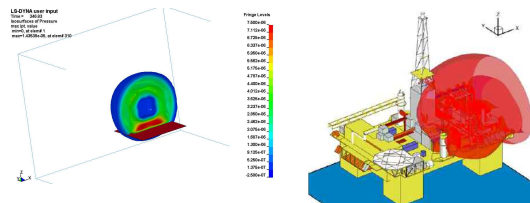


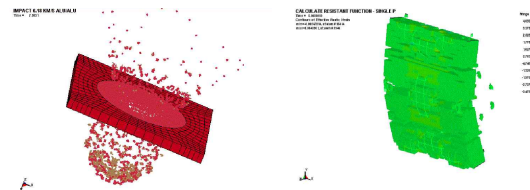
그림 7. 철근의 항복응력과 유효 소성변형률의 관계

Eulerian code의 단점을 극복하기 위해 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian), SALE(Single-Material Arbitrary Lagrangian-Eulerian), CEL(Coupled Eulerian-Lagrangian Code), SPH(Smoothed-Partial Hydrodynamics)의 이론이 개발되어 각각의 Hydrocode에 추가되고 있다.

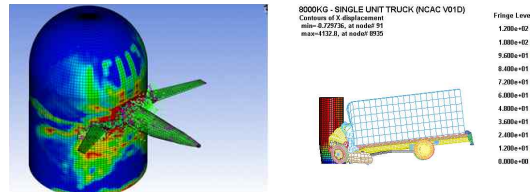
우리에게 많이 알려진 Hydrocode는 LS-DYNA, ANSYS/AUTODYN, PARM-CRASH, MSC/DYTRAN 등이 있으며, 이들 코드의 공통된 특징은 고체역학의 Lagrangian code를 기본으로 Eulerian 해석기능이 추가되었다는 것과 미국의 국방연구소에서 개발이 시작되어 상용화 되었다는 점이다.



(a) ALE 기법을 이용한 폭발해석



(b) SPH 및 erosion을 이용한 폭발 및 충돌해석



(c) SPH와 Lagrangian을 이용한 충돌해석

그림 8. Hydrocode의 폭발 및 충격 해석기법



Hydrocode는 초고속충격, 폭발 해석을 위해서 외연적해석법을 사용하고, 물체 간 상호 충돌해석을 위해서 접촉면 탐색기법을 보유하고 있으며, 재료의 상태방정식을 사용하고 있는 점이 일반적인 유한요소해석프로그램과 구별된다고 할 수 있다. 그 중 현재 많이 사용되고 있는 상용해석프로그램인 LS-DYNA와 AUTODYN을 간단히 소개해 보면 다음과 같다.

#### 1) LS-DYNA

LS-DYNA는 1976년부터 저속 충돌 문제를 해석하기 위해 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)에서 John O. Hallquist 박사에 의해 최초로 개발되기 시작하여 1988년에 LSTC사의 설립과 함께 다양한 접촉 문제의 해결과 충돌해석 분야의 광범위한 적용 등이 이루어졌다. 주요 활용 분야로는 폭발해석, 비선형 충돌해석, 음장해석, 열해석, 유체해석 등의 광범위한 분야에서 쓰이고 있다.

LS-DYNA는 폭발해석을 하기 위한 폭발하중에 대한 정의를 기본적으로 하며, 폭발하중을 받는 철근콘크리트 구조물 모델에 대한 재료모델에 복잡한 비탄성, 비선형 거동에 대하여 비교적 정확하게 정의할 수 있다. 실제적으로 폭발하중과 철근콘크리트 구조물의 상호작용을 컴퓨터를 사용하여 모사한다는 것은 매우 어려운 일이다. 동적 효과, 대변위와 재료의 비선형 거동 등이 모두 고려되어야 함은 물론이고 동적하중에 대한 구조물 거동의 에너지 개념에서의 평형조건 및 적합조건 등을 만족해야만 한다. 이러한 복잡성 때문에 LS-DYNA는 FEMB, ETA/VPG, LS-POST와 같은 선행처리(Pre-processor) 및 후행처리(Post-processor) 프로그램을 사용하여 입력자료의 작성과 결과분석을 위한 편의성을 갖추고 있다. 더불어 LS-DYNA는 사용자정의에 의한 모델(User Define Model)을 삽입할 수 있어 사용자에게 직접 코딩된 재료특성 등을 추가하여 사용할 수 있도록 되어 있다.

#### 2) ANSYS/AUTODYN

1985년 캘리포니아에서 설립된 Century Dynamics, Inc.는 1986년에 AUTODYN-2D를 발표하였고, 3차원 버전인 AUTODYN-3D를 1991년에 발표하였다. 이후 Eulerian 기능과 CEL, ALE, SPH를 보강하였으며, 현재는 ANSYS의 자회사로 흡수되어 ANSYS/AUTODYN으로 배포되고 있다.


AUTODYN은 유한요소법, 유한차분법, 유한체적법을 사용하고, 비교적 간단한 인터페이스에 의해 PC에서 구동되는 고체,

유체, 기체역학분야에 고루 사용될 수 있는 범용 Hydrocode이다. AUTODYN의 장점은 해석절차 및 프로그램의 사용이 편리하고 간단하다는 점이다. 고체와 고체, 유체와 유체 및 고체와 유체의 상호 접촉면 계산이 자동으로 이루어지고, 다양한 재료 모델이 라이브러리로 제공된다. 특히 유체-구조물 상호작용 해석을 위한 ALE, CEL, SPH 기능을 쉽게 사용할 수 있어, 복잡하고 다양한 물리적 현상의 해석을 쉽게 수행할 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 추가연구

방폭 해석기법은 단자유도계를 이용한 단순해석기법과 유한요소모델링과 강도증진효과 및 변형률 속도를 고려한 재료모델을 적용한 정밀해석기법으로 나뉘어 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 유한요소 해석을 통하여 구조물의 동적 거동을 판단하는 방법은 복잡한 구조물에 대한 정밀한 해석이 가능하고 국부적인 미세한 결과를 나타낼 수 있는 반면, 해석기법과 결과가 복잡하고 해석 시간이 상당히 오래 걸린다는 단점이 있다. 즉, 방폭 콘크리트 구조물의 해석 및 설계는 사용자의 판단에 의해 신뢰성과 용이함으로 나뉘어 선택되어야 할 것이다. 그러나 결국 방폭 해석에 대한 연구는 결국 방호 구조물의 효율적인 설계를 위함일 것이다. 이에 관련하여 필자는 앞으로의 방폭 해석에 대한 연구가 다음과 같은 방향으로 진행되는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

- (1) 폭발·충격하중 이후 발생하는 2차적 위협, 즉 화재 등의 복합 시나리오의 해석적 고려
- (2) 복합 극한하중 시나리오에 대한 연쇄붕괴 모사
- (3) 방폭 해석 및 실험을 통한 설계 매뉴얼의 작성

이는 최근 구조물이 초고층·초대형화 되어 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 해석 기법이 필요하다고 판단된다. 이에 따른 연쇄붕괴에 대한 해석적 연구와 더불어 해석적 연구를 통한 방호구조물의 설계 매뉴얼의 작성이 필요하다고 판단된다. 

## 참고문헌

1. ASCE, Structural Design for Physical Security, State of the Practice, 1999.
2. Biggs, J.M., Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, New York, 1964.
3. Byun, K.J., Nam, J.W., Kim, H.J., and Kim, S.B., Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Wall under Blast Loading, Proceeding of 2nd ACF International Conference, Asian Concrete Federation, Bali, Indonesia, 20-21 November, 2006.
4. Choi, H.J. and Krauthammer, T., Investigation of Progressive Collapse Phenomena in a Multi Story Building, 11th International Symposium on Interaction of Effects of Munitions with Structures, Mannheim, Germany, May, 2003.
5. Clutter, J.K., Stahl, M., Hydrocode Simulations of Air and Water Shocks for Facility Vulnerability Assessments, Journal of Hazardous Materials, Vol. 106A, 2004, pp. 9 ~ 24.
6. Coughlin, A.M., Musselman, E.S., Schokker, A.J., Linzell, D.G., Behavior of Portable Fiber Reinforced Concrete Vehicle Barriers Subject to Blasts from Contact Charges, International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, No. 5, 2010, pp. 521 ~ 529.
7. Farnam, Y., Mohammadi, S., and Shekarchi, M., Experimental and Numerical Investigations of Low Velocity Impact Behavior of High-Performance Fiber-Reinforced Cement Based Composite, International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, No. 2, 2010, pp. 220 ~ 229.
8. Livermore Software Technology Corporation(LSTC), LS-DYNA keyword Users Manual Version 970, Livermore, California, April, 2003.
9. Malvar, L.J., Crawford, J.E., Wesevich, J.W., and Simons, D., A Plasticity Concrete Material Model for DYNA3D, International Journal of Impact Engineering, Vol. 19, No. 9/10, 1997, pp. 847 ~ 873.
10. Nam, J.W., Kim, H.J., Kim, S.B., Kim, J.H.J., and Byun, K.J., Analytical Study of Finite Element Models for FRP Retrofitted Concrete Structure under Blast Loads, International Journal of Damage Mechanics, Vol. 18, No. 5, 2009, pp. 461 ~ 490.
11. Nam, J.W., Kim, H.J., Kim, S.B., Yi, N.H., and Kim, J.H.J., Numerical Evaluation of the Retrofit Effectiveness for GFRP Retrofitted Concrete Slab Subjected to Blast Pressure, Composite Structures, Vol. 92, No. 5, 2010, pp. 1,212 ~ 1,222.
12. TM5-1300/AFR 88-2/NAVFAC P-39, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Joint Departments of the Army, Air Force and Navy Washington, DC, November, 1990.
13. 김장호, 이나현, 김성배, 최중권, 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동분석 : (I) 실험수행절차, 대한토목학회논문집, 29(5A), 2009, 557 ~ 564.
14. 김장호, 이나현, 김성배, 조윤구, 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동분석 : (II) 초고강도 콘크리트 및 RPC 구조물의 실험결과 대한토목학회논문집, 29(5A), 2009, pp. 565 ~ 575.
15. 김장호, 이나현, 판덕형, 김성배, 이강원, 차량 충돌하중을 받는 RC압축부재의 성능기반형 저항성능 평가방법 개발, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 22, No. 4, 2010, pp. 535 ~ 546.
16. 김호진, 남진원, 김성배, 이우철, 변근주, 폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조물의 보강성능에 대한 해석적 분석, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 241 ~ 250.
17. 남진원, 김호진, 김성배, 변근주, 폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조의 해석기법, 대한토목학회논문집, Vol. 27, No. 3, 2007, pp. 433 ~ 442.
18. 연세대학교 방호기술연구센터, 고성능 섬유복합재로 보강된 철근 콘크리트 벽체의 방폭성능 평가, 2006, pp. 45 ~ 49.
19. 이나현, Arbitrary Lagrangian-Eulerian 기법을 적용한 콘크리트 구조물의 폭발해석기법 구축, 연세대학교 석사학위 논문, 2008.
20. 전세진, 이윤석, 정철현, 정연석, 대형 민항기 충돌 하중에 대한 국내 원전 격납건물의 동적 비선형 응답, 대한토목학회논문집, Vol. 25, No. 1, 2005, pp. 1 ~ 10.
21. 조정희, 충격압력하중을 받는 철근콘크리트 보의 하중-충격량 해석, 연세대학교 석사학위 논문, 2006.
22. 하계선, 가상 일의 원리에서 유한요소코드, 그리고 Hydrocode까지, 전산구조공학회, Vol. 16, No. 2, 2003, pp. 13 ~ 29.

담당 편집위원 :  
정해문(한국도로공사 도로교통연구원) [haimoon@ex.co.kr](mailto:haimoon@ex.co.kr)