

# 발사체 관통 콘크리트 충격손상 모델

## Impact damage model of projectile penetration into concrete target

박대호\*                      노명현\*\*  
 Park, Tae-Hyo      Noh, Myung-Hyun

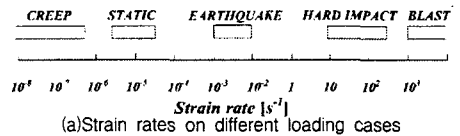
### ABSTRACT

Impact damage modeling of concrete under high strain rate loading conditions is investigated. A phenomenological penetration model that can account for complicated impact and penetration process such as the rate and loading history response of concrete, the microstructure-penetration interaction etc. is discussed. Constitutive law compatible with Second Law of thermodynamics and coupled damage and plasticity modelling based on continuum damage mechanics are also examined. The purpose of this paper is preliminarily to study with respect to impact and penetration models for concrete before the development of that model.

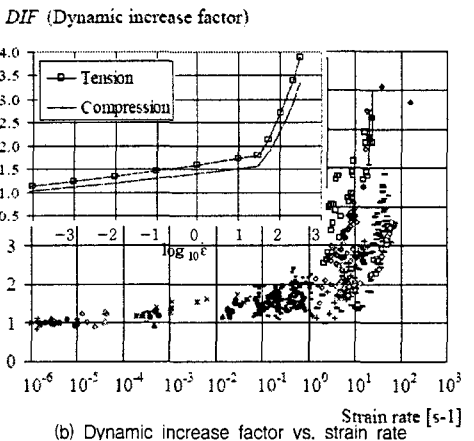
### 1. 서론

콘크리트에 정적하중이 재하될 때와 달리 충돌, 분쇄, 폭발, 폭발 등과 같은 순간적인 동적하중이 재하되는 경우 재료거동은 정적거동과 상당히 다른 것으로 알려져 있다. 또한 동적하중 재하 시 재료의 변형기구는 변형률 속도에 크게 의존하는 것으로 보고되고 있다. Bischoff와 Perry (1991)는 많은 기 연구자료를 종합한 후 콘크리트의 동적압축강도는 변형률 속도의 증가와 함께 향상되며, 콘크리트의 거동은 재하속도에 의해 결정됨을 보였고, Fig 1(a)와 같이 하중형태에 따른 재료의 변형률 속도를 구분하여 나타내었다. CEB-FIB Model Code (1990)는 동적극한강도와 정적극한강도의 상대비로 표현되는 DIF(Dynamic Increase Factor,  $f_c^{dyn}/f_c^{sta}$ )가 변형률 속도에 따라 비례적으로 상승하며, 충격하중을 받는 경우 재료의 강도는 더욱 향상된다고 보고하였다.

콘크리트의 동적 극한압축강도는, Bischoff와 Perry (1991)에 따르면 정적 극한압축강도의 2배 이상이 되며, 동적 일축인장의 경우, Ross and Jerome (1996)에 따르면 매우 높은 변형률 속도에서 정적강도에 비해 약 5~7배까지 증가된다. 재하속도의 증가에 의한 더욱 큰 강도는 콘크리트가 복합 파괴에 노출되어 골재 파괴의 양이 증가하고 파괴면이 변화하는 것으로 설명될 수 있다. 이러한 강도 증진은 대부분 콘크리트 공극 속 수분의 점성효과에 의한 내압발생으로 설명된다. 인장을 받는 콘크리트 경우  $\dot{\epsilon} < 10^0 s^{-1}$  구간에서는 점성효과가 지배적이며,  $\dot{\epsilon} > 10^1 s^{-1}$  구간에서는 방사구축압에 의한 관성력이 지배적이고 강도가 더욱더 증진된다. 압축을 받는 콘크리트의 경우는 대략  $60 s^{-1} < \dot{\epsilon} < 80 s^{-1}$ 에서 관성력이 지배적이다(Ross and Jerome, 1996; Leppänen and Gylltoft, 2003). 그러나 변형률 속도가  $\dot{\epsilon} > 10^2 s^{-1}$ 인 경우, 제시된 자료들의 회귀분석으로 동적강도가 추정될 경우 과대평가될 가능성을 제기하기도 하였다. 또한 강도가 정확히 예측된다 하더라도 발사체가 콘크리트 면에 충돌하여 콘크리트를 관통하는 과정에서 겪게 되는 일련의 현상들은 매



(a) Strain rates on different loading cases



(b) Dynamic increase factor vs. strain rate

Fig 1. Dynamic increase factor vs. strain rate

\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수  
 \*\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

우 복잡하여 물리적으로 명쾌하게 설명하는 데는 한계가 있다.

따라서 충돌과 관통, 변형을 겪는 콘크리트 재료의 복잡한 과정을 적절하게 설명할 수 있는 현상학적 접근에 의한 모델이 도입되어야 한다. 특히 콘크리트는 골재입자, 마이크로 균열, 계면 천이구역(ITZ), 공극, 세공과 페이스트를 포함하는 복잡한 미시구조를 갖는 복합재료이며, 이러한 구성물질의 특성들은 상당히 다르고 그것들의 상호작용 또한 매우 복잡하다. 인성, 강도, 탄성계수와 같은 유효한 콘크리트의 특성들이 이러한 미시구조에 의존하기 때문에 발사체의 콘크리트 관통을 설명할 수 있는 실제적인 현상학적 모델은 미시구조의 특성, 미시구조의 진전, 발사체-미시구조 특성 사이의 상호작용, 발사체-콘크리트 계면 특성을 고려하지 않고서는 제시될 수 없다. 본 논문에서는 이러한 효과를 현상학적으로 고려한 콘크리트의 충격손상 모델을 제안하기 위해 선행 연구된 문헌들을 고찰하고 제안될 모델에 대한 이론적 배경을 제시한다.

## 2. 충격손상 구성모델

### 2.1 연구동향

Heuze (1990)는 일반적인 관통 문제에 대해서 다양한 해석적, 수치적, 실험적 접근법들을 검토하여 제시하였다. 이러한 접근 중에서 현상학적 모델들은 주로 관통과정을 탄성 또는 탄소성 매체를 관통하는 강체로서 다루고 있다. Li and Chen (2003)은 비변형 발사체의 해석적 관통모델을 충격함수와 발사체의 기하학적 함수라는 두개의 무차원 수를 도입하여 무차원 해석을 수행하였으며, 무차원 공식에 의한 해석값과 실험값이 잘 일치함을 보여주었다. Gran et al. (1997)은 발사체의 콘크리트 관통과정에서 발생하는 응력파를 모니터링하는 축소된 관통실험은 실용적인 모델을 정립하는데 기여하였다. 이와 관련하여 Forrestal et al. (1996), Frew et al. (1998), Frew et al. (1998), Jones et al. (1998) 등은 콘크리트의 비구속 압축응력과 금속 발사체의 관통속도를 관통깊이와 관련시킨 실험모델을 제시하기도 하였다. 이러한 실험모델은 관통깊이를 꽤 정확히 예측하였지만, 콘크리트 손상기구와 재료 열역학적 해석은 전혀 고려되지 않았다. 또한 변형속도와 하중이력 효과가 전혀 분석되지 않았다. 또한 콘크리트-발사체의 계면 특성들과 발사체와 콘크리트 내부에 포함된 균열과 그 분포 상태와 같은 미시구조 특성과 그것들의 상호작용은 전혀 고려되지 않았다. 결과적으로 일정 수준 균열이 이미 진전된 부위에 대해서는 이러한 모델로부터 충격손상을 평가할 수 없다. 이러한 실험모델들은 충격 손상과정에서 발생된 현상들에 대해 명쾌한 물리적 함축성을 갖지 못하는 실험인자를 도입하여 손상효과를 설명하지만, 축소효과(scaling effect)로 인해 실험크기의 모형에 적용할 수 없다.

최근에는 이러한 실험모델의 한계를 인식하고 관통, 충격 현상을 실제적으로 모사하기 위한 모델이 해석적, 수치적, 실험적으로 다양하게 제안되고 있다. 특히 높은 변형률 속도에 의존하는 콘크리트 재료의 순간 동역학적 해석과 연속체손상역학을 연계시킨 콘크리트 재료의 속도의존 구성관계는 본 연구에서 제시될 모델의 핵심이기도 하다. 이와 관련하여 Sukontasukkul et al. (2004)은 정적 및 충격하중에 의한 콘크리트의 손상을 정량화하기 위하여 탄성계수와 변형속도의 변화에 근거한 손상역학이론을 적용하여 손상은 재하속도에 의존함을 실험적으로 입증하였다. Dubé et al. (1996)은 Perzyna의 점소성 모델에 기초하여 소성곱(plastic multiplier)의 정의를 수정하고, 속도에 의존하지 않는 손상모델에서 손상진전방정식의 형태를 변형하여 속도의존 등방성 손상모델을 제안하였다. Gatuingt and Pijaudier-Cabot (2002)은 점소성론과 속도의존 손상모델을 연계시켜 스폐링(spalling), 스캐빙(scabbing), 터널링(tunnelling)과 같은 세 가지 파괴모드를 해석할 수 있는 모델을 제안하였다. 이 모델에서는 압축으로 인한 콘크리트 재료의 공극률 변화를 포함시키기 위하여 탄성 및 전단계수를 공극률의 함수로 표현하였고, 미시균열에 의한 손상진전을 설명하기 위하여 두개의 압축, 인장 손상변수를 도입하였으며, 삼축압축 상태에서 재료 점소성 거동을 설명하기 위하여 Perzyna (1966)의 접근법의 점소성 변형률과 Needleman and Tvergaard (1984)이 제안한 수정 Gurson 항복이론을 도입하였다.

이상의 고찰된 모델들은 높은 변형률 속도에서 발생하는 콘크리트 미시구조 변화에 대해서 좀더 물리적인 의미를 부여한 모델로서 고려될 수는 있지만, 발사체의 변형, 콘크리트-발사체의 계면 특성, 발사체 충격 및 관통에 따른 충격과 발생, 균열진전에 따른 재료의 불연속성 발생 등과 같은 현상들은 고려되지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 현상을 고려한 현상학적 모델을 제시하고, 콘크리트의 재료의 하중이력 및 속도반응, 미시구조-발사체의 상호작용과 온도, 변형률, 변형률 속도, 기타 다른 장(field) 변수들의 급격한 시간 변동을 설명하기 위하여, 재료의 내부상태의 진전을 설명할 수

있는 속도 의존 재료구성모델과 발사체-콘크리트 계면모델이 제안된다

## 2.2 현상학적 모델

순간 동역학적 충격손상거동에서 수많은 균열의 개시, 진전, 상호작용 등을 미시구조관점에서 개별적으로 모델링 하는 것은 수치계산 관점에서 사실상 불가능하다. 이러한 관점에서 충격손상 모델은 분명히 보이는 넓은 범위의 다양한 현상들에 대한 정확한 인식을 토대로 이러한 현상들을 어떻게 통합할 수 있는지가 관건이 된다. 따라서 본 모델에서는 균열의 개시와 진전, 상호작용 등을 효과적으로 설명할 수 있는 내부변수를 도입하여 복잡한 재료거동을 현상학적으로 모델링하는 방법을 적용한다.

Fig 2.에 묘사된 것처럼, 현상학적으로 관통이란 재료내부에 원뿔형의 뾰족한 거시 균열이 발생하는 과정으로 보일 수 있다. 그리고 발사체의 운동에너지는 다음과 같은 결과들에 의해 소산된다. ① 원뿔형 균열이 진전됨에 따라 재료의 불연속성을 발생시킨다. ② 발사체와 콘크리트 사이의 마찰력을 극복한다. ③ 발사체 주위의 콘크리트에 비가역적 변형을 야기한다. ④ 발사체의 변형을 야기한다. ⑤ 2차 방사상 거시균열과 미시 균열을 발생시킨다. ⑥ 충격파를 발생시킨다. ⑦ 균열 앞에 국부화 된 손상영역을 발생시킨다.

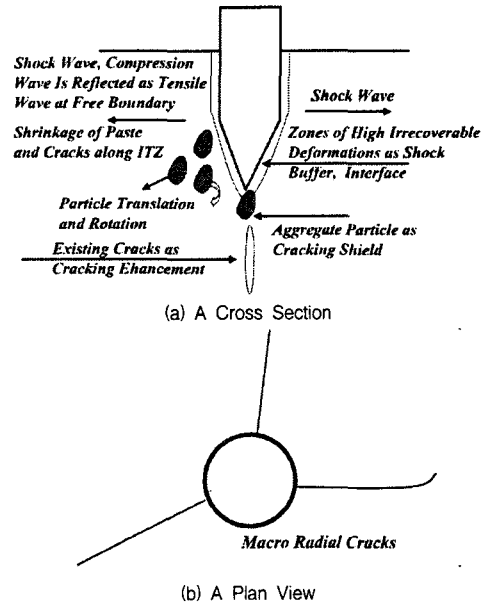


Fig 2. Phenomenological Illustration of the Penetration Process

## 2.3 탄성-점소성-손상이 연계된 통합모델 전개를 위한 열역학적 체계

최근 비가역 열역학과 연속체 손상역학 분야에서 새롭게 제시되고 있는 재료구성법칙들은 충격손상에 관한 구성모델링에서 열역학 제2법칙의 역할과 이해를 심화시켜 주었고, 기 제안모델에서도 이러한 이론적 바탕위에 몇 가지 관련 현상을 간단히 수정 보완할 경우, 열역학적으로 양립하는 구성모델로 확장시킬 수 있는 가능성을 제시하였다. 본 모델은 재료의 안정성을 고려할 수 있는 비가역적 열역학에 근거하여 콘크리트 재료를 충격, 손상, 파손을 포함하는 소산이 발생하는 시스템으로 고려하고 열역학 제2법칙과 양립할 수 있는 구성법칙에 근거한다. 비가역 열역학관점에서 발사체의 충격에 의한 재료의 파쇄, 미시균열 성장에 의한 파손과 파괴는 재료의 불안정성의 한 종류로서 고려될 것이다. 또한 콘크리트 재료의 탄성-점소성-손상-파손 등의 연계성을 찾아내기 위하여 연속체 손상이론을 적용한다.

순간 동역학적 충격손상 및 관통모델에서 신뢰성 높은 해석결과를 얻기 위해서는 콘크리트 재료의 구성모델이 핵심이 된다. 이에 본 모델에서는 콘크리트 재료가 충격시 탄성-점소성-손상이 연계되어 손상과 파손을 겪는 취성재료로 고려되며, 기본적으로 재료 열역학적으로 모순이 없는 구성모델이 제2법칙을 통해 유도된다. 열역학에 기초한 구성방정식을 유도하기 위해서는 앞서 언급된 충격손상거동에 대한 재료내부의 복잡한 현상과 미시구조적 기구들이 내부변수를 포함하는 거시적 상태변수들이 정의되어야 한다. 열역학적 상태변수 중 외부변수는 절대온도( $T$ )와 변형률 텐서( $\epsilon$ ) 등이며, 내부변수는 손상변수( $d$ ) 등을 포함하는 다음과 같은 짝수차수의 텐서로 구성된 집합을 가정할 수 있다.

$$\{ V_k, k=1, 2, \dots \} \quad (1)$$

총 변형률 텐서는 다음과 같이 탄성과 비탄성 변형을 텐서로 분해될 수 있다고 가정한다.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (2)$$

손상의 진전과 구성방정식을 도출하기 위해서 외부 및 내부변수로 특성화되는 볼록형 헬름홀츠 자유에너지 다음과 같은 형태로 존재한다고 가정한다.

$$\Psi = \Psi(T, \epsilon^e, V_k) \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 Clausius-Duhem의 부등식에 대입하면 다음과 같은 소산관계를 얻을 수 있다.

$$\sigma : \dot{\varepsilon}^p + A_k \cdot V_k + \frac{g}{T} \cdot q - \rho \Psi \geq 0 \quad (4)$$

$$\sigma = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon^e}, \quad A_k = -\rho \frac{\partial \Psi}{\partial V_k}, \quad g = -\nabla T \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 이용해서 현재상태의 역학적 유속벡터( $J$ )와 켈레힘 벡터( $X$ )를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$J = \rho \left\{ \dot{\varepsilon}^p, V_k, q \right\}^T \quad (6)$$

$$X = \rho \left\{ \sigma, A_k, \frac{g}{T} \right\}^T \quad (7)$$

또한, 균질하며 관련 켈레힘의 볼록함수인 소산 포텐셜  $F(X)$ 의 존재를 가정하면 역학적 유속벡터의 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_k = \frac{\partial F}{\partial X_k} \quad (8)$$

식 (6)~(8)을 이용하면  $J$ 의 각 성분은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{\partial F}{\partial \sigma}, \quad V_k = \frac{\partial F}{\partial A_k}, \quad q = \frac{\partial F}{\partial (g/T)} \quad (9)$$

이상의 절차는 열역학적 체계를 기본으로 상태변수의 구성 및 진전함수를 정식화하기 위한 기본적인 방법이 된다. 본 연구에서는 탄성-점소성-손상이 연계된 연속체손상모델을 제안하기 위해 구성 및 진전 함수를 개별적으로 정식화하지 않고 하나의 포텐셜 함수로 통합하여 정식화한다.

#### 2.4 Gradient enhanced 접근법을 통한 비국부 정식화

또한, 본 모델에서는 발사체 관통 및 충격손상과정에서 발생하는 손상집중화 현상을 모델링하기 위해 연속체 손상에 기초한 비국부(nonlocal) 그라디언트 강화(gradient enhanced) 접근법을 이용한 유한 요소해석을 제시한다. 따라서 발사체 관통과 콘크리트 충격손상 과정에 대한 수학적 모델의 수치 적정성과 의미 있는 물리적 해로의 수렴성을 보장하기 위해서 관통과정에서 충격손상으로 인해 국부적으로 발생하는 변형을 연화영역에 대한 손상모델의 효과가 활용된다(Voyiadjis et al., 2001; Voyiadjis and Dorgan, 2001). 메소스케일의 그라디언트를 이용한 하위 대표체적요소(sub- $V_{RVE}$ )의 손상 특성화 모델에서는 국부 손상변수의 공간평균으로부터 대표체적요소( $V_{RVE}$ )의 손상변수  $d$ 를 다음과 같이 비국부화 하였다.

$$d = \frac{1}{V_{RVE}} \int_{V_{RVE}} \bar{d} dV_{RVE} \quad (10)$$

콘크리트와 같은 취성재료의 관통과정에서의 충격손상은 미세공극들과 미시균열들의 성장과 합체로 유도되고 결과적으로 좁은 손상 지역에 국부적인 변형 집중화를 초래한다. 따라서 비국부 그라디언트 강화 손상 모델은 유한요소해석 시 발사체 관통 및 충격손상과정에서 손상 집중화 현상을 메쉬 왜곡 없이 모델링 할 수 있는 장점이 있다.

#### 3. 향후연구계획

본 논문에서는 발사체의 콘크리트 관통에 대한 충격손상모델을 제안하기에 앞서 선행 연구된 문헌을 고찰하고 제안될 모델에 대한 이론적 배경을 제시하였다. 결론적으로 충들과 폭파 등과 같은 높은 변형을 속도에 의존하는 순간 동역학 문제에서는 콘크리트의 충격손상과 관통과정을 해석하기 위한 속도의존적 구성관계와 손상집중화 현상을 완화시킬 비국부 모델이 매우 중요하다. 따라서 향후 연구에서는 복잡한 관통과정의 현상학적 모델링과 비가역 열역학 및 연속체손상역학에 기초한 비국부 형태의 콘크리트의 구성모델을 제안하고, 유한요소 코드로 제안된 모델을 통해 다양한 관통과정에 대한 시뮬레이션 결과를 제시한다.

#### 참고문헌

1. Ragueneau, F. and Gatuingt, F. (2003) " Inelastic behaviour modelling of concrete in low and high strain rate dynamics," Computer & Structures, Vol 81, No.12, pp.1287-1299.