학술기사

폭발 및 충격하중을 받는 건설재료의 거동 예측

Prediction of Construction Materials Behavior under Blast and Impact Loads

홍 성 원[1)*] 강 현 구[2)]

Hong, Seongwon Kang, Thomas H.-K.

1. 머리말

지난 14년간 전 세계적으로 일어난 테러사건은 대략 48,000 건이 넘는 것으로 추산이 된다. 이러한 테러의 수는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 그 수가 점점 증가하여 2013년에만 10,000 건의 테러가 전 세계적으로 일어났으며 그 사망자수는 18,000명에 이르렀다. 비록 테러사건의 60 퍼센트가 이라크, 아프카니스탄, 파키스탄, 나이지리아, 시리아에서 발생하였지만 그 이외의 지역에서도 테러의 수가 점차 증가하고 있는 추세이다(Fig. 2). 주요 5개 국가 이외의 2013년 총 4,000 건의 테러사건으로 3,200 여명의 사망자를 냈으며 이는 그 2012년에 비해 50% 이상 증가한 수치이다.

이러한 테러에 사용된 주된 무기는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 2000년부터 2013년까지 테러사건의 대략 60%가 폭발물이었다.

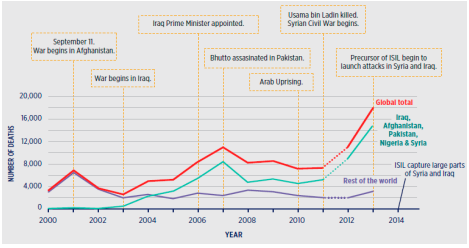

Fig. 1 2000–2013년 사이 테러로 인한 사망자 수[2]

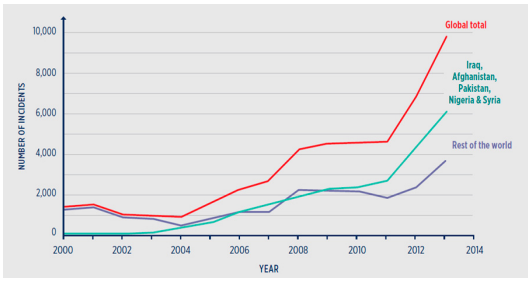

Fig. 2 2000–2013년 세계 테러 사건 수치[2]

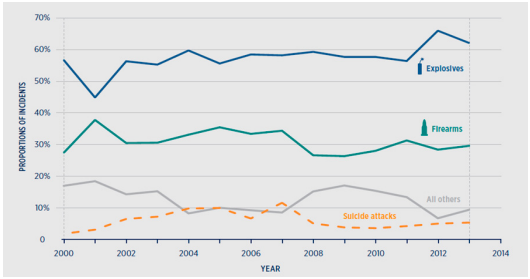

Fig. 3 2000–2013년 테러에 사용되는 무기[2]

우리가 잘 알고 있는 9.11테러는 2001년 9월 11일에 미국에서 벌어진 동시다발적인 테러이다. Fig. 4는 두 대의 항공기 납치 및 자살 테러에 의하여 뉴욕의 110층짜리

1) 한국도로공사 도로교통연구원 포장연구실 박사후 연수자
2) 서울대학교 건축학과 부교수
* E-mail : shong@ex.co.kr

세계무역센터(WTC) 쌍둥이 빌딩이 공격받고 있는 사진이다.

Fig. 4 뉴욕에서 발생한 911 세계무역센터 테러[5]

국내에서 발생한 사건을 살펴보면 가장 대표적인 테러는 북한에 의한 테러이다. 연평도 포격은 2010년 11월 23일 오후 2시경에 북한이 76.2mm 평사 포, 122mm 대구경 포, 130mm 대구경 포 등을 이용해 대한민국의 연평도의 군부대 및 인근 민가를 향해 개머리 해안포기지로부터 무차별 포격을 가한 사건이다(Fig. 5). 이 사건으로 인해 군인과 민간인 20여명의 인명 피해와 각종 시설 및 가옥 파괴로 재산 피해를 입었다.

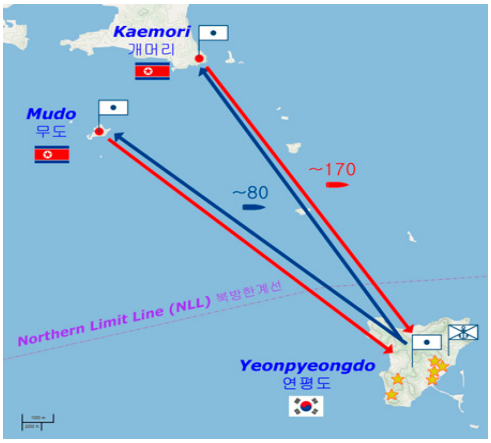

Fig. 5 지난 2010년 연평도 포격 사건[5]

한편, 우리는 뉴스를 통해서 해양 및 가스 플랜트 폭발사고를 종종 접해 왔다. 가장 최근 발생한 두 개의 사고는 다음과 같다. 7월 3일 한화케미컬 울산플랜트 폭발 사고와 13일 발생한 울산 남구 황성동에 신설중인 SK 어드밴드 가스화학플랜트 폭발 사고라 할 수 있다. 이러한 폭발은 사상자의 발생과 함께 플랜트 건물에도 막대한 피해를 입히기 때문에 구조설계 시 반영해야 한다.

위에서 살펴본 사건들의 공통점은 폭발물로 인한 피해이다. 비록 대한민국은 이슬람 수니파 극단주의 무장단체(IS)와 같은 테러단체에 의한 주요타격 국가는 아니지만 최근 IS에 가담한 한국인이 있음을 보았을 때 안심할 수는 없는 입장이다. 또한 세계유일의 분단국가로 북한의 위협을 받고 있는 상황이다. 마지막으로 해양 및 가스 플랜트 건설은 폭발사고의 가능성이 언제나 존재한다. 이를 종합해 보면 폭발에 의한 구조재료의 거동 해석을 통해 구조설계를 수정 및 보완할 수 있어야 하고 이는 폭발사고의 피해를 최소화 할 수 있는 궁극적인 방법이라 할 수 있다. 본 학술기사에서는 폭발과 같은 극한하중을 받는 건설재료 중 콘크리트와 철근의 거동 측정 시험방법에 대해서 알아보고 이를 통해 정의된 동적증가계수(Dynamic Increase Factor)에 대해서 알아보고자 한다.

2. 재료의 동적거동 시험 방법

가스 및 폭발물에 의한 폭발, 차량이나 항공기충돌 등과 같은 인위적인 현상과 지진에 의한 충격 등과 같은 자연현상에 의해 발생하는 에너지가 구조물 및 구조재료에 전달되었을 경우 그 거동은 정적 거동과 매우 다르게 나타난다. 차량에 의한 충돌의 경우 대략 10^{-5} ~ 10^{-3} s^{-1} 정도의 변형률 속도를 발생시키며 폭발물에 의한 폭발의 경우는 매우 빠른 변형률 속도인 10^{2} ~ 10^{4} s^{-1}을 발생시킨다. 일반적으로 10^{-5} ~ 10^{-1} s^{-1}를 정적 및 준정적 변형률 속도로 정의 하며 10^{2} ~ 10^{4} s^{-1}는 고변형률 속도이다. 이러한 정적(static) 및 고변형률속도(high-strain rate)에 의한 재료의 거동은 매우 달라 재료에 따른 정확한 해석이 있어야 구조설계에 제대로 반영할 수 있다. 이 장에서는 이러한 변형률 속도를 제어할 수 있는 시험 방법에 대해서 알아보기로 한다.

2.1 서보 유압식 시험법

가장 일반적이면서도 보편적인 구조재료시험 방법은 서보 유압식 기계(servo-hydraulic machine)를 이용한 시험법이다. 문헌을 통해 계산된 콘크리트의 정적 및 준정적(quasi-static) 변형률 속도는 대략 10^{-6} s^{-1} 정도이며 철근의 경우는 10^{-4} s^{-1}이다. 서보 유압식 기계를 사용할 경우 최소 10^{-6}부터 최대 10^{1} s^{-1}의 변형률 속도를 낼 수 있다.

2.2 드롭해머 시험법

Fig. 6은 트롭해머 시험(drop hammer method)을 위한 개략도이다. 무게가 다른 해머를 일정 높이에서 자유낙하 혹은 가속낙하 시켜 발생되는 충격 에너지를 이용하여 다른 변형률 속도를 발생시키는 시험법이다. 일반적으로 10^0 ~ 10^2 s^{-1} 정도의 변형률 속도를 발생시키는 것으로 보고된다.

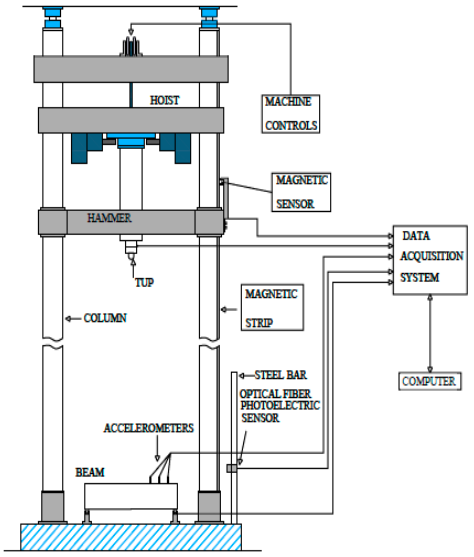

Fig. 6 드롭해머 시험 개략도[4]

2.3 분할 홉킨스 압력바 시험법

Fig. 7은 분할 홉킨스 압력 바(split Hopkison pressure bar)시험을 위한 개략도 이다. 우선 발사체(striker bar)를 이용하여 한쪽 바에 압력파(compressive pulse)를 발생시킨다. 이렇게 발생된 압력파는 시험체를 통과하여 다른 한쪽 바로 전달되었다가 되돌아오는 방식으로 되어 있다. 1차원 탄성응력-파 (one-dimensional elastic stress-wave)의 가정 하에 해석을 하여 그 변형률 속도를 측정할 수 있다. 이 실험을 통해 얻을 수 있는 변형률 속도는 4 ~ 10^4 s^{-1}이다.

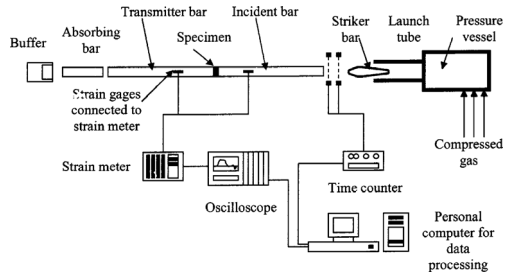

Fig. 7 분할 홉킨스바 시험 개략도[1]

3. 동적증가계수

폭발이나 충돌이 발생할 경우 빠른 속도의 하중이 콘크리트에 전해져 대략 10^2~10^4 s^{-1}에 해당하는 매우 높은 변형률 속도가 발생하는데, 이는 콘크리트 재료의 응력-변형률 곡선에 반영되어야 한다. 고변형률 속도로 인하여 콘크리트의 강도가 증가하는 현상을 볼 수 있고, 이때 증가한 강도를 동적응력(dynamic stress)이라고 정의하며 정적응력(static stress)이나 준정적응력(quasi-static stress)과의 비율을 동적증가계수(Dynamic Increase Factor, DIF)라고 부른다.

1990년부터 미국에서는 육, 해, 공군의 방호설계기준을 통합하여 TM5-1300를 출판하였다. Fig. 8은 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로 고변형률 속도에서의 변형률 에너지가 더 큼을 알 수 있다. Fig. 9는 일반적인 철근의 응력-변형률 곡선으로 항복 이후 완전소성변형을 볼 수 있고 그 후에는 경화(hardening)와 연화(softening)의 거동을 관찰할 수 있다. 고변형률 역시 그 변형률 에너지의 값이 증가함을 알 수 있다.

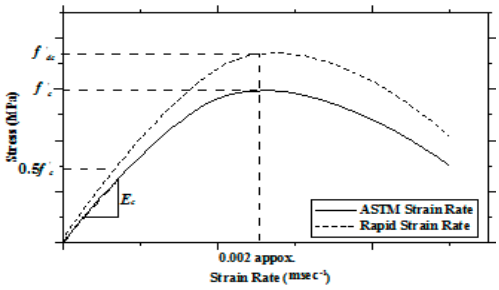

Fig. 8 콘크리트의 응력-변형률 곡선[3]

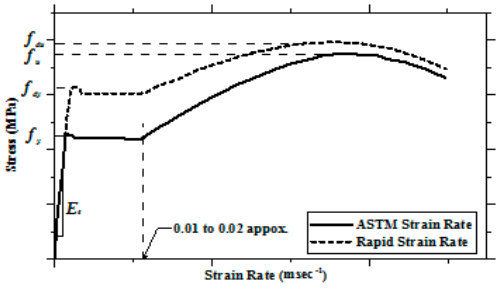

Fig. 9 철근의 응력-변형률 곡선[3]

Figs. 8과 9에서 관찰한 바와 같이 변형률의 속도를 증가하면 같은 변형률에서의 응력 값이 증가하고 그 관계는 Figs. 10과 11에서와 같이 나타낼 수 있다. Fig 10은 압축강도가 17MPa에서 34MPa 사이의 콘크리트를 대상으로 동적증가계수와 변형률 속도과의 관계를 나타낸 그래프로서 동적증가계수의 값이 비선형적으로 증가함을 알 수 있다.

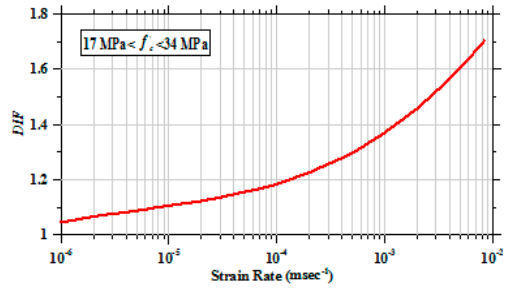

Fig. 10 극한압축강도를 이용한 동적증가계수 곡선[3]

Fig. 11은 콘크리트의 압축과 인장강도에 대한 동적증가계수 곡선이다. 인장과 압축에 따라 변형률 속도의 변곡점을 각각 1 s^{-1}과 30 s^{-1}으로 제시하였다. 하지만 이 값들은 광범위한 실험적 연구를 통해 추가 검증이 요구된다.

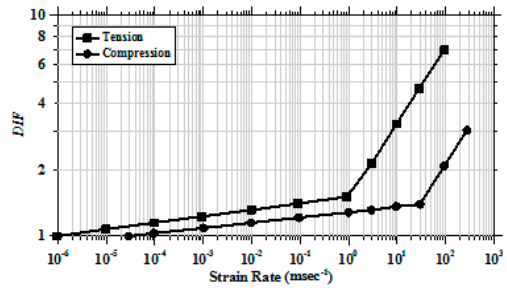

Fig. 11 압축과 인장강도를 이용한 동적증가계수 곡선[3]

Fig. 12는 TM5-1300(1990)에서 제시된 ASTM A615 Grade 40, 60, 75 철근의 항복강도와 극한강도에 대한 동적증가계수 곡선이다. 위에서 제시된 콘크리트에 비해 그 값이 비교적 정확하게 예측 가능한 모습을 볼 수 있다. 이는 재료의 균질성 때문인 것으로 추정된다.

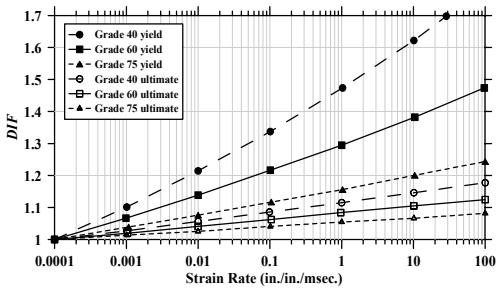

Fig. 12 철근의 동적증가계수[3]

4. 맺음말

폭발과 같은 극한하중이 구조재료에 전달될 경우 매우 빠른 변형률 속도를 유발시킨다. 이렇게 발생된 변형률 속도는 콘크리트와 철근과 같은 구조재료의 응력-변형률 곡선에 영향을 미치며 고변형률 속도로 발생된 변형률 에너지는 정적 및 준정적 변형률 속도로 야기된 변형률 에너지에 비해 그 크기가 큼을 알 수 있었다. 이렇게 증가하는 비율을 동적증가계수로 표현할 수 있고, 또한 변형률 속도와 동적증가계수의 관계를 그래프로 나타낼 수 있다. 이러한 계수와 곡선은 내폭 및 방폭설계에 있어 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

[1] Lok, T. S. and Zhao, P. J. (2004), "Impact Response of Steel Fiber-Reinforced Concrete Using a Split Hopkinson Pressure Bar", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 16(1), 54-59
[2] Institute for Economics and Peace (2014), Global Terrorism Index 2014
[3] TM5-1300 (1990), "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", Department of the Army, Navy and Air Force, U.S.
[4] Zhang, X.X., Ruiz, G., and Yu, R.C. (2008), "A New Drop-Weight Impact Machine for Studying Fracture Processes in Structural Concrete", An International Journal for Experimental Mechanics, V. 46, No. 3, pp. 252-257.
[5] www.wikipedia.org

담당 편집위원: 홍성원
(한국도로공사 도로교통연구원)
shong@ex.co.kr