강섬유 및 FRP Sheet로 보강한 2방향 RC 슬래브의 고속 충격저항성능에 대한 해석적 평가

Analytical Evaluation of High Velocity Impact Resistance of Two-way RC Slab Reinforced with Steel Fiber and FRP Sheet

이진영¹⁾
Lee, Jin Young

신현오²⁾
Shin, Hyen Oh

민경환³⁾
Min, Kyeng Hwan

윤영수^{4)*}
Yoon, Young Soo

Abstract

This paper presents high-velocity impact analysis of two-way RC slabs, including steel fibers and strengthening with fiber reinforced polymer (FRP) sheets for evaluating impact resistance. The analysis uses the LS-DYNA program, which is advanced in impact analysis. The present analysis was performed similarly to the high-velocity impact tests conducted by VTT, the technical research center of Finland, to verify the analysis results. High-velocity impact loads were applied to 2100×2100×250 mm size two-way RC slab specimens, using a non-deformable steel projectile of 47.5kg mass and 134.9m/s velocity. In this research, extra impact analysis of material specimens was carried out to verify the material models used to the analysis. The elastic-plastic hydrodynamic model, concrete damage model and orthotropic elastic model were used to simulate the non-linear softening behavior of steel fiber reinforced concrete (SFRC), and material properties of normal concrete and FRP sheets, respectively. It is concluded that the suggested analysis technique has good reliability, and can be effectively applied in evaluating the effectiveness of reinforcing/retrofitting materials and techniques. Also, the Steel fiber and FRP sheet strengthening systems provided outstanding performance under high-velocity impact loads.

Keywords : High-Velocity impact loads, Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC), FRP sheets, LS-DYNA

1. 서론

콘크리트는 건설 재료로서 충격 및 폭발 하중에 대한 저항성이 우수하다고 알려져 있으며 이러한 점 때문에 원자력 발전소나 군사 주요 시설물을 보호하기 위한 방호구조물에 널리 적용되고 있다 (Teng et al., 2008; Zhou et al., 2008). 하지만 콘크리트의 단점인 취성적 파괴 거동과 낮은 인장강도는 여전히 극복해야 할 문제점으로 지적되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 섬유에 의한 보강 방법과 FRP (fiber reinforced polymer)에 의한 외부 보강방법이 그 해결책으로 제안되고 있으며, 여러 연구자들에 의해 연구되고 있다.

섬유를 혼입하여 구조 부재를 보강하는 경우에는 구조물의 휨-인장성능과 연성을 향상시키며, FRP에 의한 보강 방

법은 특히 높은 변형률속도의 충격 및 폭발하중에 대한 우수한 저항성능을 나타낸다고 알려져 있다 (Chen et al., 2005; Tavaréz, 2003). 하지만 이와 관련된 대부분의 연구는 Fig. 1에서의 준정적하중 혹은 지진 하중에 해당하는 낮은 변형률 속도 (strain rate)만을 고려하고 있어 충격 하중에 해당하는 높은 변형률 속도를 고려하고 있지 못하다. 또한 철근이 배근 되어 있지 않은 재료 단계의 연구에만 편중되어 RC부재의 구조적 거동에 대한 연구가 부족한 상태이다.

Fig. 1 Strain rates associated with loading types

- 1) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정
- 2) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정
- 3) 정회원, 고려대학교 방재과학기술연구소 박사후연구원
- 4) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, 교신저자

* Corresponding author : ysyoon@korea.ac.kr

- 본 논문에 대한 토의를 2013년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2013년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

따라서 본 연구에서는 강섬유 및 FRP sheet로 보강한 2방향 RC 부재의 고속 충격 하중에 대한 저항성능을 유한요소 해석을 통해 정량적으로 평가하고자 하였다. 또한 핀란드 VTT 연구소에서 수행된 보통콘크리트 2방향 RC부재에 대한 고속충격하중 실험 결과와의 비교를 통해 해석 결과의 타당성을 확보하고자 하였다 (Ari, 2010). 구조 해석에 필요한 재료 물성 값은 저속 충격 실험을 통해 결정하였으며, 별도의 해석과정을 거쳐 재료 모델을 검증하였다. 그리고 CEB (Comite Euro international du Beton)에서 제안하는 DIF (dynamic increase factor)를 재료 모델에 반영하여 변형률 속도에 따른 재료 거동의 변화를 고려하였다. 일련의 유한요소 해석은 충격 및 폭발 해석에 탁월하다고 알려진 외연적 유한요소 해석프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 수행되었다.

2. 2방향 RC 슬래브의 유한요소 해석

2.1 해석 개요

본 연구에서는 Table 1에 나타난 변수들을 고려하여 고속 충격 하중을 받는 2방향 RC 슬래브에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 콘크리트 재료 변수로는 보통 콘크리트 (normal concrete, NC) 및 강섬유 보강 콘크리트 (steel fiber reinforced concrete, SFRC)를 고려하였으며, FRP sheet로는 CFRP (carbon fiber reinforced polymer, CFRP)를 사용하였다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 47.5kg의 강 (steel) 발사체를 134.9m/s의 속력으로 2방향 RC 슬래브에 충돌시켜 충격하중을 재하하였으며, 해석에 사용된 부재 및 철근의 배근 상세는 Fig. 3에 나타나있다.

본 해석의 목적은 고속 충격 하중을 받는 보통 콘크리트 2방향 RC 부재의 동적 거동을 해석적으로 검증하는 것이며, 해석 결과를 바탕으로 강섬유 및 FRP sheet 보강에 의한 충격 저항성능 향상 효과에 대해 분석하는 것이다. 또한 저속 충격 실험 및 해석을 통해 고속 충격 해석 결과를 검증하고, 하중 재하 속도와 발사체 재료 모델에 따른 해석결과를 분석함으로써 고속 충격 해석 시 적절한 발사체 재료 모델을 제

시하였다.

2.2 재료 및 계면 모델

해석에 사용된 재료 물성 값은 Tables 2~5에 나타나 있다.

2.2.1 보통 콘크리트 재료 모델

외연적 (explicit) 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA에서는 콘크리트 재료 모델로서 Winfrith Concrete Model, Pseudo Tensor Concrete / Geological Model, Concrete Damage Model,

Fig. 2 Test apparatus

Fig. 3 Details of two-way RC slab

Table 1 Model variables

Variable	Details	Notation
Concrete	Normal Concrete	NC
	Steel fiber reinforced concrete	SFRC
FRP sheet	Not retrofitted	N
	Carbon FRP	Carbon FRP

Table 2 Properties of concrete

Concrete	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Steel fiber (%)
NC	57.4	—	—
SFRC	46.7	8.7	2

Table 3 Properties of FRP

Fiber / Resin	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Carbon / Epoxy	2860	177

Table 4 Properties of reinforcement

Reinforcement	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Ultimate elongation (%)	Total elongation under max. load (%)
Deformed bar	10	605.3	18.67	11.4

Table 5 Properties of projectile

Projectile	Outer diameter (mm)	Weight (kg)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)
Steel	168.3	47.5	355	595

Brittle Damage Model 및 Soil-Concrete Model 등을 제안하고 있다. 본 해석에서는 폭발 및 충격 하중에서 콘크리트의 압축 및 인장 거동 예측에 적합하다고 알려진 Concrete Damage Model Rel3 (Mat_72R3)를 사용하였다 (LSTC, 2007; Magallanes et al., 2010; Schwer et al., 2005).

본 콘크리트 재료 모델은 식 (1)과 같이 삼축 응력 상태를 고려하고 있으며, 작용된 압력에 의해 변화하는 3개의 독립된 파괴면을 갖는 소성 이론을 바탕으로 한다.

$$F_i(p) = a_{0i} + \frac{p}{a_{1i} + a_{2i} \cdot p} \quad (1)$$

여기서, $F_i(p)$ 는 3차원 주응력 공간에서의 파괴면 (failure surface), p 는 콘크리트 응력에 대한 환산 압력, a_{0i} , a_{1i} , a_{2i} 등은 실험에 의해 결정되는 파괴면 변수 (parameters for three surfaces)이다.

2.2.2 강섬유 보강 콘크리트 재료 모델

강섬유 보강 콘크리트 (SFRC)의 재료 모델은 균열 이후의

연화 현상을 효과적으로 모사할 수 있는 Elastic Plastic Hydro Model (Mat_10)을 사용하였다 (Teng et al., 2008). 이 재료 모델의 변형률 연화 특성은 1축 압축 강도 실험을 통한 유효 응력-유효변형률 곡선을 통해 반영되며, 일반적으로 16개의 실측 데이터를 통해 재료의 비선형 거동을 반영한다. 다음의 식 (2)~(4)는 강섬유 보강 콘크리트 구성 모델에 관한 3축 비응력 (effective trial stress)에 관한 식이다.

$$*_\sigma^{n+1} = \left(\frac{3}{2} *_S^{n+1} *_S^{n+1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

여기서, $*$ 은 3축 응력, S_{ij} 는 편향응력 (deviatoric stress), n 은 계산 주기를 의미한다.

3축 비응력이 항복응력을 초과하게 될 경우, 식 (3)의 Von Mises 파괴 기준에 따라 식 (4)와 같이 응력이 변하게 된다. 3축 비응력이 항복응력 이하일 때 m 은 1.0으로서 탄성 상태에 있게 된다 (LSTC, 2007).

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

$$S_{ij}^{n+1} = m *_S^{n+1} \quad (4)$$

2.2.3 FRP sheet 재료 모델

일반적으로 FRP의 경우에는 인장강도에 도달하기 전의 응력-변형률 관계를 선형탄성 거동으로 가정하고, 한계 변형률에 도달한 이후에는 취성파괴가 발생하는 선형탄성이론을 사용하여 해석을 수행한다 (Hallquist, 2006). 또한 콘크리트 및 강재와 같이 전단탄성계수가 큰 구조재료를 휨부재로 사용할 경우, 전단변형에 의한 처짐은 무시할 수 있으나 CFRP sheet와 같은 섬유보강재의 경우, 탄성계수와 전단탄성계수의 비가 매우 크므로 전단변형 효과를 고려해 주어야 한다. 따라서 본 연구에서는 전단 변형이 고려된 직교 이방성의 Orthotropic Elastic Model (Mat_2)을 사용하였다. 이 재료 모델의 응력-변형률 관계는 식 (5) 및 (6)과 같다 (Kim et al., 2011; Kim et al., 2007).

$$\bar{C} = \bar{T}^T \bar{C}_L \bar{T} \quad (5)$$

$$\bar{C}_L^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_a} & -\frac{v_{ba}}{E_b} & -\frac{v_{ca}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{ab}}{E_a} & \frac{1}{E_b} & -\frac{v_{cb}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{ac}}{E_a} & -\frac{v_{bc}}{E_b} & \frac{1}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{bc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ca}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $\bar{T}$ 는 변환행렬, $\bar{C}_L$ 는 구성행렬 (constitutive matrix), v 는 푸아송비, E 는 탄성계수, a, b, c 는 좌표축을 의미한다. 또한 식 (6)에서 직교 이방성의 특징을 적용하면 구성요소간의 관계는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{v_{ab}}{E_a} = \frac{v_{ba}}{E_b}, \frac{v_{ca}}{E_c} = \frac{v_{ac}}{E_a}, \frac{v_{cb}}{E_c} = \frac{v_{bc}}{E_b} \quad (7)$$

또한 FRP의 변형률 속도와 강도 증진과의 관계는 Al-Hassani의 연구결과에 기초한 로그선형 함수를 통해 반영하였다 (Al-Hassani et al., 1998).

2.2.4 발사체 (Projectile) 및 철근 재료 모델

준정적 해석이나 저속 충격 해석에서는 튕 (tup) 혹은 발사체의 재료 모델을 강체 (rigid)로 모델링하는 것이 일반적이지만 본 해석에서와 같이 변형률 속도가 큰 고속 충격의 경우에는 발사체의 재료 모델에 따른 영향을 고려해 줄 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 발사체의 재료 모델에 대한 별도의 해석을 수행하였다. 해석은 Fig. 2에 나타난 보통콘크리트 2방향 RC 부재에 대하여 이루어 졌으며, 해석에 사용한 발사체의 재료 모델은 대표적인 강 (steel) 재료 모델인 Piecewise Linear Plastic (Mat_24)와 강체 (rigid) 재료 모델인 Rigid (Mat_20)이다 (Kim et al., 2011). 해석결과는 VTT 연구소의 실험결과와 함께 Table 6에 나타나 있다 (Ari, 2010). 해석 결과에서 강체 (rigid) 재료 모델은 RC 슬래브 관통 후의 잔류 속도가 실험 결과에 비해 29.1% 크게 나타났다. 부재 뒷면의 스폐링 (spalling) 지름 또한 작게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 상기의 비교를 통해 고속 충격 해석에서는 발사체의 재료모델을 강체 (rigid)로 가정하는 것이 적절하지 않으며, 실제 재료 물성을 반영한 재료모델을 사용

Table 6 Comparisons of material models

Variable	Residual velocity of projectile (m/s)	Spall diameter on front surface (mm)	Spall diameter on back surface (mm)
Rigid (Mat_20)	58.49	481.25	743.75
Piecewise Linear Plastic (Mat_24)	47.63	481.25	962.5
Experiment	45.3	262.9	1082~1394

하여야 한다는 결론을 내릴 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 발사체의 재료 모델로서 Piecewise Linear Plastic (Mat_24)를 사용하였다.

철근 재료 모델 또한 강 (steel)의 재료 특성을 효과적으로 반영하고 있는 Piecewise Linear Plastic (Mat_24)를 사용하였으며, 식 (8)에 나타난 Coper and Symond's equation에 의해 철근의 변형률 속도 효과를 고려하였다.

$$\sigma = [A + \epsilon_p^n] \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{D} \right)^{1/p} \right] \quad (8)$$

여기서, A = 초기 항복 응력

ϵ_p = 소성 변형률

$\dot{\epsilon}_p$ = 소성 변형률 속도

2.2.5 계면 모델

충격 또는 폭발 하중을 받는 FRP sheet로 보강한 콘크리트 모델은 일반적으로 계면에서 부착파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 콘크리트와 FRP sheet를 완전 부착으로 가정하는 것은 FRP sheet에 의한 보강효과를 과대평가하게 된다 (Kim et al., 2007).

본 해석에서는 콘크리트와 FRP sheet 사이의 동적 계면 파괴를 모사하기 위하여 Automatic Surface to Surface Tiebreak Model을 사용하였다. 이 계면 모델은 두 재료의 요소 (element) 간에 생성된 결합 (tie)에 의해 상호관통 (interpenetration)에 저항하며, 계면의 인장응력과 전단응력을 기준으로 파괴한계가 정의된다 (Lee et al., 2011; Hallquist et al., 2006).

2.3 저속 충격 실험에 의한 재료 모델 검증

본 해석에 사용한 콘크리트, FRP sheet와 철근의 재료 모델을 검증하기 위하여 Fig. 4에 나타난 2방향 슬래브에 대한

Fig. 4 Test setup of low-velocity impact test

저속 충격 실험을 수행하였다. 낙하추 팁 (tip)의 직경은 20mm이고, 낙하추는 충격 시 속도가 5.92ms/s, 충격 에너지는 800J이다 (Min et al., 2011; Lee et al., 2011).

실험 결과와 해석 결과에 대한 비교는 Fig. 5에 나타나 있으며, 부재 중앙 하부의 처짐값을 나타내었다. FRP sheet로 보강하지 않은 NC-N 및 SFRC-N의 경우 최대처짐을 기준으로 하여 약 1% 범위 내에서 부재의 거동이 일치하고 있으며, FRP sheet로 보강한 NC-C 및 SFRC-C의 경우에도 5% 범위 내에서 실험 결과와 유사한 거동을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

상기의 보통콘크리트, 강섬유 보강 콘크리트 재료 모델은 CEB (Comite Euro international du Beton)에서 제안한 식 (9), (10)의 DIF (dynamic increase factor)를 적용하여 변형률 속도에 의한 영향을 고려하고 있으며, 고속 충격 해석 시에도 동일한 식을 적용하였다 (Malvar et al., 1998). 일반적으로 콘크리트의 동적 재료 거동은 변형률 약 $10s^{-1}$ 를 기준으로 다르게 나타나며, 본 연구의 저속 및 고속 충격 해석은 $10s^{-1}$ 이하의 변형률 속도에 해당하므로 저속 충격 실험 및

해석을 통해 고속 충격 해석의 재료모델을 검증하는 과정은 타당하다고 판단할 수 있다. 저속 및 고속 충격 실험결과, 콘크리트 변형률 속도는 각각 약 $0.2s^{-1}$,와 $2s^{-1}$ 으로 측정되었다.

$$DIF = \frac{\hat{f}_c'}{f_c'} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\epsilon_o} \right)^{1.026\alpha} \quad \text{for } |\dot{\epsilon}_d| \leq 30 s^{-1} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{5 + 9 \frac{\hat{f}_c'}{f_o'}} \quad (10)$$

여기서, f_c' = 준-정적 압축강도

$\hat{f}_c'$ = 동적 압축강도

$f_o' = 10 \text{ MPa}$

$\dot{\epsilon}_d$ = 변형률 속도

$\epsilon_o = 30 \times 10^{-6} s^{-1}$

3. 고속 충격해석의 결과 및 분석

2방향 RC 슬래브의 해석 및 실험 결과는 Table 7에 정리되어 있다. 본 해석에서는 발사체의 잔류속도, 부재 앞면에서의 처짐, 소산에너지 (dissipated energy), 그리고 스포링 지름 (spall diameter)을 비교 분석하였으며, 이를 통해 고속 충격 하중을 받는 구조 부재의 충격 저항 성능과 거동 양상을 파악하고자 하였다.

NC-N의 경우, 실험결과와 비교하여 잔류속도는 5.1%의 차이를 보였으며, 부재 앞면에서의 처짐은 최대 처짐을 기준

(a) NC series

(b) SFRC series

Fig. 5 Comparison of experiment and analysis results for NC and SFRC series

Table 7 Analysis and test results

Variables	Residual velocity (m/s)	Max. deflection (mm)	Dissipated energy (kJ)	Spall diameter at front surface (mm)	Spall diameter at back surface (mm)
Exp. NC-N	45.3	7.20	—	262.5	1080~1394
NC-N	47.63	7.62	284.41	481.25	962.5
NC-C	14.87	7.58	312.67	437.5	1618.75
SFRC-N	23.36	1.05	370.41	306.25	350.0
SFRC-C	-14.47	2.20	378.26	206.5	0.0

Fig. 6 Time-velocity relationship of projectile

으로 하여 5.8% 차이를 나타냈다. 이러한 결과는 기존의 충격 하중에 대한 해석적 연구 결과와 비교하여 보았을 때 충분히 작은 차이이며, 이를 통해 본 해석 모델이 충분한 신뢰성을 갖는다고 판단할 수 있다.

잔류속도는 발사체가 부재를 관통한 이후의 속도를 의미하며, SFRC-C의 경우에는 발사체가 부재와 충돌이후 반발되어 나온 속도를 뜻한다. 발사체의 잔류속도는 Fig. 6에 나타나 있다. NC-N의 잔류속도를 기준으로 하였을 때 FRP sheet로 보강한 NC-C의 잔류속도는 약 68.8% 감소하였으며, 강섬유에 의해 보강된 SFRC-N의 경우, 약 50.1% 감소하였다. FRP sheet와 강섬유로 보강한 SFRC-C는 발사체가 부재를 관통하지 못하였다.

Fig. 7에 나타나 있는 소산에너지 (dissipated energy)는 부재가 발사체와 충돌하며 흡수한 에너지로서 충격 저항성을 나타내는 지표로 사용될 수 있다. NC-N의 소산에너지를 기준으로 하였을 때 NC-C, SFRC-N, SFRC-C의 소산에너지는 각각 10.0%, 30.2%, 33.0% 증가하였다.

상기의 잔류속도와 소산에너지의 결과를 보면, FRP sheet로 보강한 경우가 강섬유로 보강한 경우보다 발사체의 관입을 억제하는 효과가 더 우수하게 나타났으며, 소산에너지 측

Fig. 7 Time-dissipated energy relationship

Fig. 8 Deflections of the slab at front surface

면에서는 강섬유에 의한 보강이 더 우수한 충격 저항 성능을 나타냈다. FRP sheet로 보강했을 때 발사체의 잔류 속도가 비교적 크게 감소한 이유는 2860MPa의 높은 인장 강도를 지닌 FRP sheet가 발사체의 관입에 의해 파괴되며 발사체의 운동에너지를 감소 시켰기 때문이다. 또한 강섬유로 보강한 강섬유 보강 콘크리트의 소산에너지가 비교적 크게 나타난 이유는 수많은 미세균열이 발생하며 충격에너지를 소산시킬 때, 강섬유가 균열 사이에서 가교역할 (bridge effect)을 하며 균열 저항성능을 증가시켰기 때문이다.

Fig. 8에는 부재 앞면에서 측정된 부재의 처짐이 나타나 있다. 처짐 값의 크기가 부재의 충격 저항 성능을 의미하는 것은 아니지만 이를 통해 충격 하중을 받은 부재의 거동을 파악할 수 있다. 강섬유에 의한 보강이 없는 NC-N과 NC-C의 경우, 약 5mm 정도의 잔류 처짐이 발생하였으며, FRP sheet로 보강한 NC-C가 최대 처짐 및 잔류처짐에서 NC-N보다 작은 값을 나타냈다. 강섬유로 보강한 SFRC-N과 SFRC-C의 경우, 발사체에 의한 국부손상을 제외하면 부재

(a) Exp. NC-N

Fig. 9 Spall diameter and plastic strain distribution of specimens

전체적으로 연성거동을 나타내었다. SFRC-C의 최대 처짐이 SFRC-N보다 큰 이유는 발사체가 부재를 관통하지 못해 더 큰 충격에너지가 가해졌기 때문이다.

Fig. 9에는 충격하중이 가해진 이후의 부재 사진이 나타나 있다. Fig. 9(a)는 충격 실험 이후의 부재 앞, 뒷면 사진이며, Figs. 9(b)~(e)는 소성변형률 분포와 스폐링 지름 (spall diameter)이 표시된 부재 앞, 뒷면의 해석 결과이다. 강섬유로 보강한 SFRC series의 경우 보다 작은 스폐링 지름 (spall diameter)이 나타났으며, NC-C의 경우 충격하중 재하 시 FRP sheet와 콘크리트 사이의 계면에서 부착파괴가 발생하

며 부재 뒷면에서 비교적 큰 스폐링 지름 (spall diameter)을 발생시켰다.

4. 결 론

본 연구에서는 강섬유의 혼입과 FRP sheet에 의한 보강 여부를 변수로 하여 고속 충격하중을 받는 2방향 RC 슬래브에 대한 유한 요소 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) FRP sheet로 보강한 경우, 보통콘크리트 부재와 강섬유 보강 콘크리트 부재 모두에서 향상된 충격 저항성을 확인할 수 있었다. FRP sheet에 의해 발사체의 잔류속도는 약 68% 감소하고, 소산에너지의 크기는 약 2~10% 증가하였다. 특히 FRP sheet에 의한 보강은 발사체의 관입을 억제하는 효과가 우수하게 나타났으며 이는 큰 인장강도를 지닌 FRP sheet가 파괴되면서 큰 에너지를 소산시켰기 때문이다.
- (2) 강섬유를 혼입하여 보강한 경우, 충격 저항 성능이 향상되었다. 강섬유에 의해 잔류 속도는 약 50% 감소하였으며, 소산에너지는 약 30% 증가하였다. 이는 많은 미세균열이 발생하며 충격에너지가 소산될 때, 강섬유가 균열 사이에서 가교역할 (bridge effect)을 하며 균열 저항성을 증가시켰기 때문이다. 또한 강섬유 보강 콘크리트는 충격 하중을 받은 후 잔류변형이 크게 나타나지 않았으며, 발사체에 의한 국부 손상을 제외하면 부재 전체가 연성 거동을 나타냈다.
- (3) 높은 변형률 속도 (strain rate)를 발생시키는 고속 충격 하중에 대한 해석에서는 발사체의 재료 모델에 의한 영향이 비교적 크게 나타났다. 그렇기 때문에 정하중 해석에서와 같이 발사체의 재료 모델을 강체 (rigid)로 가정하는 것은 적절하지 않다.
- (4) 저속 충격 실험 결과를 바탕으로 검증한 재료 모델은 고속 충격 해석에서도 충분한 신뢰성을 나타내었으며, 변형률 속도 (strain rate)에 따른 영향을 고려해 주기 위하여 CEB에서 제안하는 DIF를 반영하는 것은 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2012년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다 (No. 2012R1A2A1A05026406).

References

1. Al-Hassani, S. T. S. and Kaddour, A. S., "Strain Rate Effect on GRP, KRP and CFRP Composite Laminates", Key Engineering Materials, vol. 141-143, No. 2, 1998, pp.427-452.
2. Ari Vepsa, "Experimental tests for bending and punching behaviour of reinforced concrete walls under impact loading", VTT-R-05587-10 VTT, Finland, 2010, pp.1-158.
3. Chen, C. C. and Li, C. Y., "Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Glass Fiber Reinforced Polymer Laminates", ACI Structural Journal, vol. 102, No. 4, 2005, pp.535-542.
4. Hallquist, J. O., LS-DYNA Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation, 2006, pp.1-18.
5. Kim, H. J., Nam, J. W., Kim, S. B., Kim, J. H., Byun, K. J., "Analytical Evaluations of the Retrofit Performances of Concrete Wall Structures Subjected to Blast Load", Journal of Korea Concrete Institute, vol. 19, No. 2, 2007, pp.241-250. (in Korean)
6. Kim, M. H., Min K. H., Yoo, D. Y., Yoon, Y. S., "Strengthening Effect of CFRP Sheets and Steel Fibers for Enhancing the Impact Resistance of RC Beams", Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation, vol. 11, No. 5, 2011, pp.41-47. (in Korean)
7. Lee, J. Y., Kim, M. H., Min, K. H., Yoon, Y. S., "Analysis of Behaviors of Concrete Strengthened with FRP Sheets and Steel Fibers under Low-Velocity Impact Loading", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 15, No. 4, 2011, pp.155-164. (in Korean)
8. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA Keyword User's Manual Version971. Livermore Software Technology Corporation, 2007, pp.1447-1451.
9. Magallanes, J. M., Wu, Y. and Malvar, L. J., "Recent Improvements to Release III of the K&C Concrete Model", 11th International LS-DYNA Users Conference, Michigan (USA), 2010, pp.3-37.
10. Malvar, L. J. and Grwford, J. E., "Dynamic Increase Factors for Concrete", 28th DDES Seminar. Orlando (USA), 1998, pp.1-18.
11. Min K. H., Shin, H. O., Yoo, D. Y., Yoon, Y. S., "Flexural and Punching Behaviors of Concrete Strengthening with FRP Sheets and Steel Fibers under Low-Velocity Impact Loading", Journal of Korea Concrete Institute, vol. 23, No. 1, 2011, pp.31-38. (in Korean)
12. Schwer, L. E. and Malvar, L. J., "Simplified Concrete Modeling with MAT_CONCRET_DAMAGE_MODEL_REL 3", JRI LS-DYNA user week, Nagoya (Japan), 2005, pp.1-14.
13. Tavarez, F. A., Bank, L. C. and Plesha M. E., "Analysis of Fiber-Reinforced Polymer Composite Grid Reinforced Concrete Beam", ACI Structural Journal, vol. 100, No. 2, 2003, pp.250-258.
14. Teng, T. L., Chu, Y. A., Chang, F. A., Shen, B. C. and Cheng, D. S., "Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact", Computational Materials Science, vol. 42, No. 1, 2008, pp.90-99.
15. Zhou, X. Q. and Hao, H., "Modelling of Compressive Behaviour of Concrete-Like Materials at High Strain Rate", International Journal of Solids and Structure, vol. 45, No. 17, 2008, pp.4648-4661.

Received : 09/05/2012

Revised : 02/26/2013

Accepted : 03/11/2013

요 지

본 연구에서는 강섬유와 FRP 시트에 의한 충격 저항성능 향상 효과를 평가하기 위하여 고속 충격하중을 받는 2방향 RC 슬래브에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석 프로그램으로는 충격해석에 탁월하다고 알려진 LS-DYNA를 사용하였으며, 실험결과와의 비교를 위하여 핀란드 VTT 연구소에서 수행한 고속 충격 실험과 동일한 조건으로 해석을 수행하였다. 2100×2100×250 mm의 RC 슬래브에 강 (steel)발사체를 통해 충격하중을 가하였으며 발사체의 무게는 47.5kg, 속도는 134.9m/s였다. 본 연구에서는 별도의 재료부재에 대한 충격실험을 통해 해석에 사용할 재료 모델을 검증하였다. 본 해석에서는 SFRC의 비선형적 연화 현상을 모사하기 위해 elastic-plastic hydro model을 적용하였으며, 보통콘크리트와 FRP의 재료모델을 모사하기 위해서 concrete damage model과 orthotropic elastic model을 각각 사용하였다. 해석 결과, 제안된 해석 기법은 충분한 신뢰성을 가지고 있으며, 보강 재료와 보강 기법의 유효성을 평가하는데 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 강섬유와 FRP Sheets 보강방법은 고속충격하중에서 우수한 충격 저항 성능을 보여주는 것을 확인하였다.

핵심 용어 : 고속충격하중, 강섬유보강콘크리트 (SFRC), FRP sheet, LS-DYNA