

# 저속 충격하중에서의 FRP Sheet 및 강섬유 보강 콘크리트의 거동 해석

## Analysis of Behaviors of Concrete Strengthened with FRP Sheets and Steel Fibers Under Low-Velocity Impact Loading

이진영<sup>1)</sup> 김미혜<sup>2)</sup> 민경환<sup>3)</sup> 윤영수<sup>4)\*</sup>  
Lee, Jin Young Kim, Mi Hye Min, Kyung Hwan Yoon, Young Soo

### Abstract

In the case of impact loading test, measurement of the test data has difficulties due to fast loading velocity. In addition, the dynamic behaviors of specimens are distorted by ignoring local fracture. In this study, therefore, finite element analysis which considers local fracture and strain rate effect on impact load was performed by using LS-DYNA, an explicit analysis program. The one-way and two-way specimens strengthened with FRP Sheets and steel fibers were considered as analysis models. The results showed that the impact resistance of steel fiber reinforced concrete (SFRC) and ultra high performance concrete (UHPC) was enhanced. In the case of specimens strengthened with FRP Sheets, GFRP was superior to CFRP in the performance of impact resistance, and there was little effect of the FRP Sheet orientation. The reliability of this analysis model was verified by comparing with previous experimental results.

**Keywords** : Low-velocity impact loading, FRP sheet, Steel fiber reinforced concrete, Ultra high performance concrete, LS-DYNA

### 1. 서론

충격 및 폭발 하중은 Fig. 1과 같이  $10^0 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 의 높은 변형 속도(strain rate)를 가지며 이에 따라 정하중 상태와 다른 동적 특성을 나타내게 된다. 특히 다양한 사회 기반 시설의 기본 재료로 사용되고 있는 콘크리트의 경우, 충격 및 폭발과 같은 극한 하중에 대한 저항 성능이 요구되고 있는 추세이며, 이를 만족시키기 위해 콘크리트의 동적 거동 특성을 파악할 필요가 있다(민경환 등, 2011; Wang et al., 2009). 이러한 점에서 콘크리트의 충격하중 및 폭발하중에 대한 연구는 최근에도 활발하게 진행되고 있지만 섬유보강 콘크리트 및 FRP 보강 콘크리트의 충격 저항성능에 대한 연구는 아직도 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 저속 충격하중에서의 FRP Sheet 및 강섬유 보강 콘크리트의 동적 거동을 해석적으로 분석하고 그 결과를 제시하였다.

충격하중 재하 실험의 경우, 하중의 재하속도가 빠르다

는 점에서 실험 데이터를 측정하는 장비와 수단에 있어 많은 어려움이 존재한다. 게다가 충격하중이 가해지는 지점의 스폐링(spalling) 및 낙하추 팁(tup)의 관입과 같은 국부적 파괴 거동은 측정이 어려우며 전체 거동 데이터의 왜곡을 유발하게 된다. 그렇기 때문에 충격하중 재하 실험에 대한 해석적 접근은 콘크리트의 동적 거동 분석을 위해 필수적이다. 본 연구에서는 충격 실험에서의 한계를 극복하기 위하여 충격 및 폭발 해석에 탁월하다고 알려진 명시적(explicit) 유한요소 해석프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 해석을 수행하였다(LSTC, 2007; Malvar et al., 2007). 해석 모델은 충격하중 재하 시 발생하는

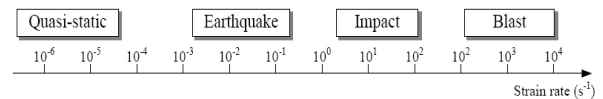


Fig. 1 Strain rates associated with loading types (Ngo et al., 2007)

1) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정  
2) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정  
3) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정  
4) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

\* Corresponding author : ysyoon@korea.ac.kr 02-3290-3320

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

딢의 관입을 고려하고 있으며, 민경환 등(2011)이 수행 하였던 충격 실험 결과와의 비교를 통해 해석 모델의 신 뢰성을 검증하였다.

## 2. FRP Sheet 및 강섬유 보강 콘크리트의 저속 충 격에서의 유한요소해석

### 2.1 해석개요

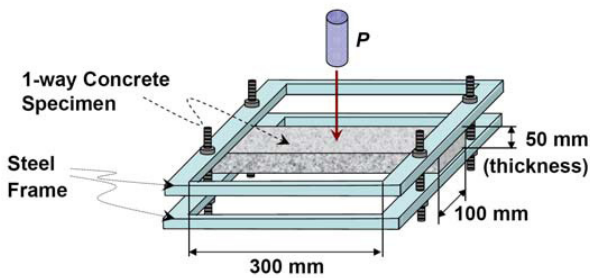
본 연구에서는 충격하중 재하 시 발생하는 딢의 국부적 관입 현상을 고려하여 FRP Sheet 및 강섬유 보강 콘크 리트의 저속 충격에서의 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 통해 딢의 관입을 배제한 부재 자체의 거동을 분석 하고자 하였다.

해석 모델은 Fig. 2와 3같이 1방향 및 2방향 모델이며, 재료 변수는 Table 1에 나타나 있다. 딢의 직경은 20mm 이고, 낙하추는 충격 시 속도가 5.92m/sec, 충격 에너지 는 800J이다.

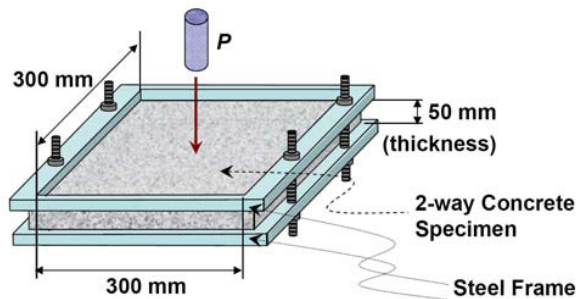
### 2.2 재료 모델

#### 2.2.1 일반 콘크리트 재료 모델

LS-DYNA에서는 200가지 이상의 재료 모델을 제공



(a) One-way model



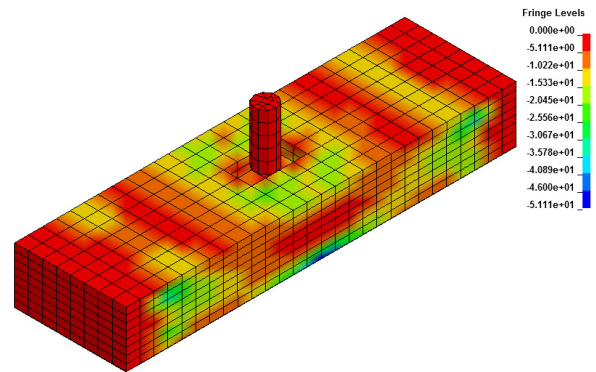
(b) Two-way model

Fig. 2 Test setup (민경환 등, 2011)

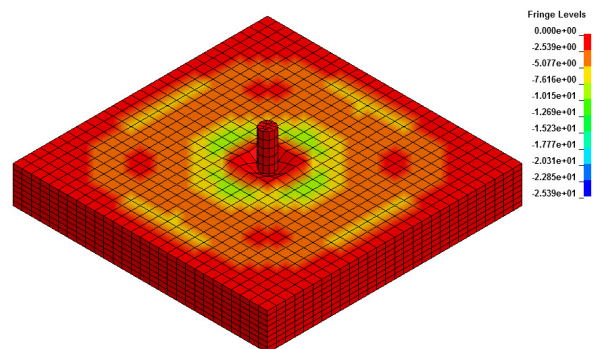
Table 1 Model variables (민경환 등, 2011)

Variable	Details	Notation
Concrete	Normal concrete	NC
	Steel fiber reinforced concrete	SFRC
	Ultra high performance concrete	UHPC
FRP	Not retrofitted	N
	Glass FRP	G
	Carbon FRP	C
Angle of fabrics	$\pm 45^\circ$	$\pm 45$
	0/90°	0/90

하고 있으며 그 중 콘크리트 모델로는 Winfrith Concrete Model, Pseudo Tensor Concrete / Geological Model, Concrete Damage Model, Brittle Damage Model 및 Soil-Concrete Model 등이 사용된다(김호진 등, 2007; LSTC, 2007). 본 연구에서는 일반 콘크리트의 충격 및 폭발 해석에 적합하다는 것이 실험적으로 입증된 Concrete Damage Model Rel3 (MAT\_72R3)를 사용하였다(Schwer et al., 2005). 이 콘크리트 재료 모델은 The Kargozian & Case (K&C) Concrete Model - ReleaseIII를 사용 하고 있으며, 이에 필요한 매개변수들은 실험에 의해 측



(a) One-way analysis model



(b) Two-way analysis model

Fig. 3 Analysis models

정된 압축강도를 통해 자체적으로 유도된다. 이렇게 유도된 매개변수들은 압축 강도 50 MPa 이하의 일반 콘크리트에서 적합하다고 알려져 있다(Magallanes et al., 2010).

이 콘크리트 재료 모델은 충격하중에 대한 거동 예측이 가능한 선형등방성의 hypoelastic-plastic 모델이다. 또한 삼축 응력 상태를 고려하고 있어, 충격하중 하에서도 효과적인 거동 예측이 가능하며 식 (1)과 같이 3개의 독립적인 파괴면을 갖는 소성이론을 기반으로 하고 있다(김호진 등, 2007; Hallquist, J. O., 2006).

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

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.

압력-체적 변형률(volume strain)에 대한 EOS (equation-of-state)는 Tabulated Compaction EOS 를 사용하고 있으며, 변형 속도에 따른 DIF(dynamic impact factor)는 CEB Code에 의해 고려되었다 (Schwer et al., 2005).

### 2.2.2 SFRC와 UHPC 재료 모델

강섬유 보강 콘크리트(SFRC)와 초고성능 콘크리트 (UHPC)의 재료 모델은 변형률 연화 현상을 잘 묘사할 수 있는 Elastic Plastic Hydro Model (MAT\_10)을 사용하였다(Teng et al., 2002). 이 재료 모델의 변형률 연화 특성은 아래의 삼축 비응력(effective trial stress)에 대한 식 (2)~(4)에 나타나있다(Wang et al., 2009).

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

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

만약 삼축 비응력이 항복응력을 초과하게 되면 아래의 식 (3), Von Mises 파괴 기준에 따라 식 (4)와 같이 응력 값이 변화하게 되며, 비 삼축응력이 항복응력 이하일 때  $m$ 은 1.0으로서 탄성 상태에 있게 된다.

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

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

이외의 경우에  $m$ 은 Fig. 4와 같은 알고리즘을 거쳐 그 값이 변화한다. 여기서  $G$ 와  $E_h$ 는 각각 전단계수와 소성 경화 변수(plastic hardening parameter)를 의미한다 (Wang et al., 2009; Hallquist, J. O., 2006).

SFRC와 UHPC 재료 모델의 유효응력-유효 변형률 관계는 실험에 의해 결정하였으며, 변형 속도에 따른 DIF는 CEB Code 식에 의해 결정하였다. DIF가 반영된 유효응력-유효 변형률 그래프는 Fig. 5에 나타나있다.

압력-체적 변형률에 대한 EOS는 Gruneisen EOS를

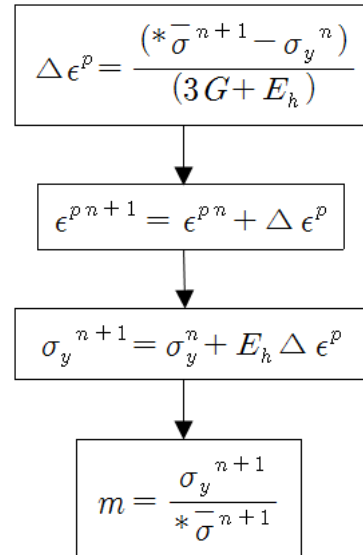


Fig. 4 Algorithm for material in plastic loading stage

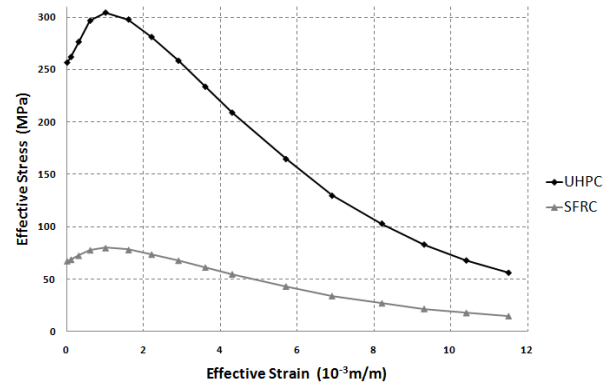


Fig. 5 Effective stress and effective plastic strain curves of SFRC and UHPC

사용하였다. 또한 충격하중 재하 시 낙하추와 콘크리트 접촉면에서 국부적으로 발생하는 텃의 관입 현상을 고려하기 위해 “Failure strain for erosion”을 고려해 주었다. “erosion”은 콘크리트의 파쇄를 묘사하며 식 (5), (6)에 의해 규정된다(Wang et al., 2009).

$$\sigma_t \geq f_{tc} \quad (5)$$

$$\gamma \geq \gamma_{max} \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_t$ 는 인장 응력,  $\gamma$ 는 전단 변형률,  $f_{tc}$ 와  $\gamma_{max}$ 는 파괴시의 인장 응력 값과 전단 변형률 값을 의미한다.

### 2.2.3 FRP Sheet 재료 모델

GFRP Sheet 와 CFRP Sheet는 1방향의 섬유 Sheet 2장을 콘크리트 시편에 대해  $\pm 45^\circ$ ,  $0/90^\circ$ 의 방향 변수를 고려하여 에폭시 수지로 부착 하였으며 이를 고려하기 위해 전단 변형이 고려된 직교 이방성의 Orthotropic Elastic Model (MAT\_2)을 사용하였다. 이 FRP 재료 모델의 응력-변형률 관계는 식 (7) 및 (8)과 같다 (LSTC, 2007).

$$\bar{C} = \bar{T}^T \bar{C}_L \bar{T} \quad (7)$$

$$\bar{C}_L^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_a} & -\frac{\nu_{ba}}{E_b} & -\frac{\nu_{ca}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{ab}}{E_a} & \frac{1}{E_b} & -\frac{\nu_{cb}}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{ac}}{E_a} & -\frac{\nu_{bc}}{E_b} & \frac{1}{E_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{bc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ca}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $\bar{T}$ 는 변환행렬,  $\bar{C}_L$ 는 구성행렬(constitutive matrix),  $\nu$ 는 푸아송비,  $E$ 는 탄성계수, a, b, c는 좌표축을 의미한다. 또한 식 (8)에서 직교 이방성의 특징을 적용하면 구성요소간의 관계는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\nu_{ab}}{E_a} = \frac{\nu_{ba}}{E_b}, \frac{\nu_{ca}}{E_c} = \frac{\nu_{ac}}{E_a}, \frac{\nu_{cb}}{E_c} = \frac{\nu_{bc}}{E_b} \quad (9)$$

Table 2 Mechanical properties of concrete

Concrete	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)
NC	47.8	6.0
SFRC	46.7	8.7
UHPC	179.8	29.5

Table 3 Mechanical properties of composite materials

Fiber / Resin	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
E-glass / epoxy	1080	39
Carbon / epoxy	2860	177

상기 재료에 대한 물성치는 Table 2와 3에 나타나있다.

## 2.3 Contact 모델

콘크리트와 낙하추 사이의 Contact 모델은 LS-DYNA에서 제공하는 Automatic Surface to Surface Model을 사용하였으며 콘크리트와 FRP Sheet 간의 Contact 모델은 두 재료 간 계면에서의 부착 파괴를 묘사하기 위해 Automatic Surface to Surface Tiebreak Model을 사용하였다.

위의 두 Contact 모델은 서로 다른 재료 사이의 계면을 자동적으로 생성하며, 두 재료 사이의 정지마찰계수와 운동마찰계수에 의해 그 계면 특성이 결정된다. Automatic Surface to Surface Tiebreak Model의 경우 두 재료의 요소(element)간의 생성된 결합(tie)에 의해 상호관통(interpenetration)에 저항하며 FRP와 콘크리트의 부착 파괴를 묘사하게 된다. 계면의 인장응력과 전단응력을 기준으로 하여 부착파괴가 결정되며 부착파괴 이전에는 완전부착 거동을 한다.

## 3. 해석 결과

### 3.1 1방향 모델

1방향 모델의 해석 결과는 Table 4에 정리되어 있다. 최대 처짐은 텃의 관입을 배제하기 위해 부재 중앙부 하단에서의 처짐을 사용하였으며, Fig. 6(a)의 NC series와 같이 부재의 파괴로 인한 과도한 처짐이 발생하는 경우, 부재에 최대 하중이 작용하는 순간을 파괴 시점으로 하여 최대 처짐을 정의하였다. NC series에서 GFRP와

Table 4 Analysis results of one-way model

Specimen	Max Deflection at Mid span(mm)	Dissipated energy (J)
NC-N*	1.713	65.232
NC-G-±45°	1.479	82.576
NC-G-0/90°	1.543	82.679
NC-C-±45°	1.569	77.993
NC-C-0/90°	1.569	77.873
SFRC-N	0.9596	124.898
SFRC-C-±45	0.9228	120.620
SFRC-C-0/90	0.9227	120.623
UHPC-N	0.9016	620.904
UHPC-C-±45	0.8983	610.769
UHPC-C-0/90	0.8983	610.992

\* Data is determined at the time of fracture of the specimen

CFRP로 보강한 경우, 최대 처짐에서 각각 9.9%, 8.4%의 처짐 감소 효과를 나타냈으며, Fig. 6(a)가 보여주듯 충격 하중 재하 극초반부 이후부터는 CFRP로 보강한 NC series가 GFRP로 보강한 NC series보다 더 뛰어난 처짐 제어 성능을 나타냈다. 충격하중 재하 시 소산되는 에너지(dissipated energy)는 FRP로 보강한 NC series의 경우가 보강하지 않은 NC series에 비해 18~26% 증가하였으며 GFRP가 CFRP에 비해 에너지 소산 능력이 우수함을 보였다. SFRC-N과 UHPC-N의 경우 충격하중 재하 시 최대 처짐이 NC-N에 비해 각각 44%, 47% 이상 감소하였으며, FRP로 보강한 경우는 각각 46%, 48%의 처짐 감소 효과가 나타났다.

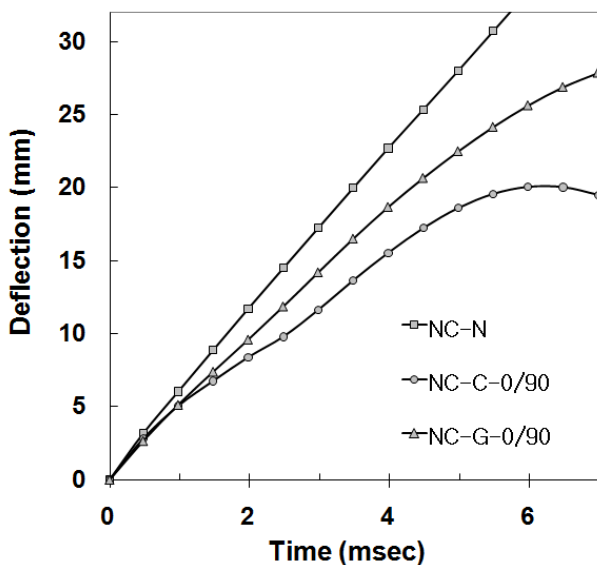
Fig. 6(b)와 같이 FRP로 보강한 SFRC series와

UHPC series의 경우 최대 처짐은 FRP로 보강하지 않은 경우와 큰 차이를 보이지 않았지만 FRP로 보강한 경우가 시간 경과에 따른 처짐 제어 성능이 보다 우수함을 나타냈다. 또한 SFRC series의 경우, UHPC series와 비교해 처짐이 확연하게 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 상대적으로 낮은 압축 및 인장강도의 SFRC series의 표면에서 국부적 파괴가 발생하며 충격 에너지를 소산시켰기 때문으로 판단된다. SFRC series와 UHPC series의 소산되는 에너지는 NC series에 비해 약 2배, 10배씩 각각 증가하였다. FRP Sheet의 방향성에 의한 차이는 NC, SFRC, UHPC series 모두에서 미소하게 나타났으며 그래프의 구별성(distinguishability)을 위해 Fig. 6과 7에서는 FRP의 ±45°변수를 생략하여 나타냈다.

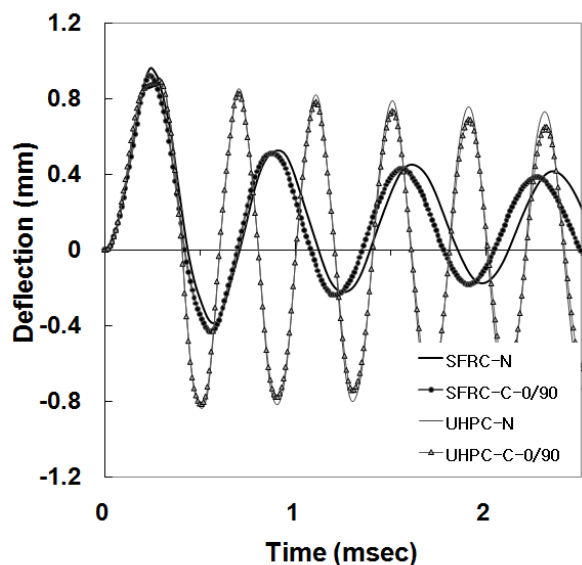
### 3.2 2방향 모델

2방향 모델의 해석 결과는 Table 5에 정리되어있다. NC series의 경우 1방향 부재와 동일하게 부재에 최대 하중이 작용하는 순간을 파괴 시점으로 하여 최대 처짐을 정의하였다. 2방향 부재는 1방향 부재와 유사한 거동 양상을 나타냈으며, 최대 처짐은 약 11~56% 감소하였고 소산 에너지는 1.2~5.9배 증가하였다. NC series에서 GFRP로 보강하였을 때가 CFRP로 보강하였을 때보다 최대 처짐이 1.8% 작게 나타났다.

1방향 부재에서 UHPC series의 최대 처짐이 SFRC

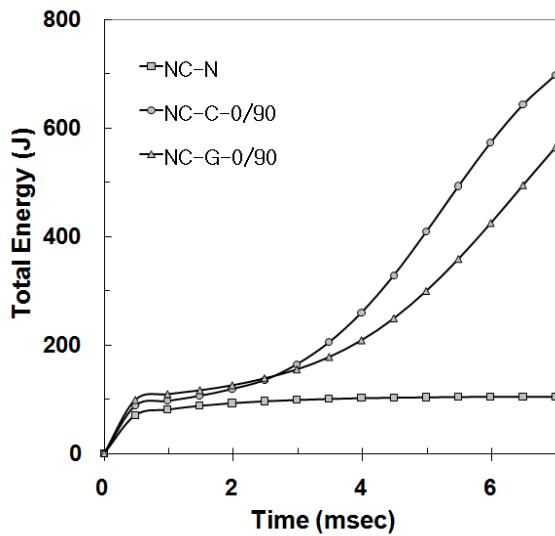


(a) Time-deflection relationship of NC series

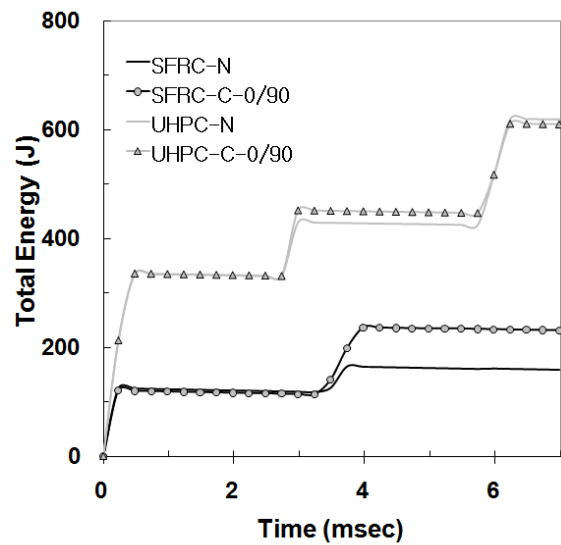


(b) Time-deflection relationship of SFRC and UHPC series

Fig. 6 Time-deflection relationship in center node for one-way analysis model



(a) Time-energy relationship of NC series



(b) Time-energy relationship of SFRC and UHPC series

Fig. 7 Total Energy of one-way analysis model

Table 5 Analysis results of two-way model

Specimen	Max Deflection at Mid span(mm)	Dissipated energy (J)
NC-N*	1.389	115.813
NC-G-±45°	1.322	153.459
NC-G-0/90°	1.316	154.585
NC-C-±45°	1.346	147.696
NC-C-0/90°	1.341	147.818
SFRC-N	0.4233	515.313
SFRC-C-±45	0.4140	708.306
SFRC-C-0/90	0.4139	708.305
UHPC-N	0.4248	714.230
UHPC-C-±45	0.4355	798.970
UHPC-C-0/90	0.4354	798.965

\* Data is determined at the time of fracture of the specimen

series에 비해 작게 나타난 해석 결과와 달리 2방향 부재의 SFRC series는 UHPC series 보다 최대 처짐이 작게 나타났다. 이러한 결과는 UHPC에 비해 상대적으로 압축 및 인장강도가 작은 SFRC의 경우, 부재 표면에서 텃의 관입 및 스폴링이 발생하여 충격하중이 소산되었기 때문이며, 2방향 부재는 1방향 부재에 비해 최대 처짐이 작아져 부재의 국부적 파괴에 의한 영향이 상대적으로 커졌기 때문이다. 이러한 분석은 텃의 관입이 고려된 Fig. 11의 시간-처짐 그래프가 뒷받침해주고 있다.

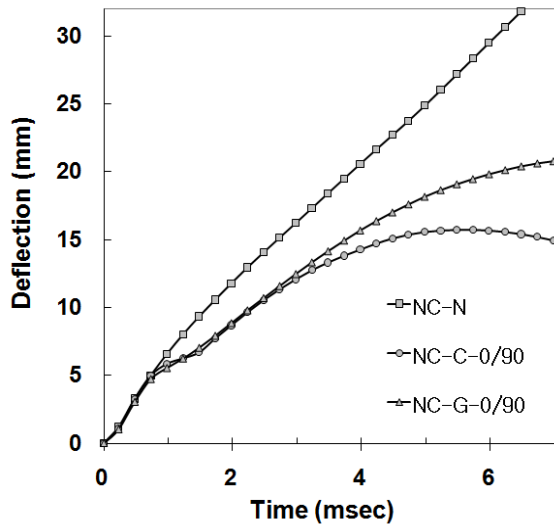
강섬유에 의한 보강 효과는 SFRC series와 UHPC series의 소산 에너지 결과를 통해 확인할 수 있다. 이는 Fig. 9(b)에 나타나 있으며 SFRC series의 에너지 소산 능력이 UHPC series의 결과에 비해 상대적으로 작은 값

을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 SFRC의 압축 강도가 UHPC 압축강도의 1/4 임에도 약 70~90%의 에너지 소산 능력을 발휘한다는 점으로 미루어 보아, 압축 강도의 증가보다는 인성의 증가가 충격 저항 성능 향상에 더 큰 영향을 준다고 판단할 수 있다.

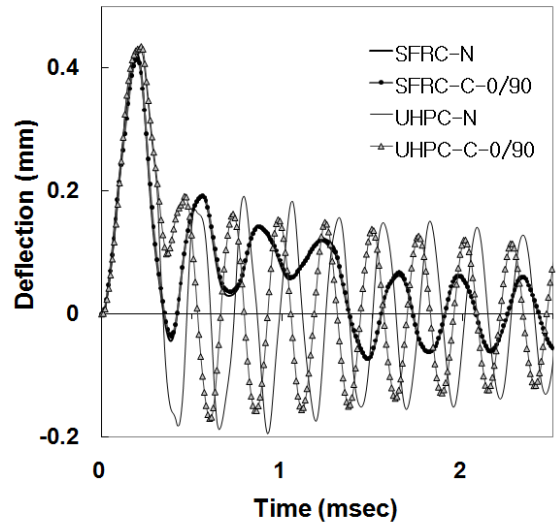
FRP로 보강한 SFRC와 UHPC series의 경우, 소산 에너지가 1.1~1.4배 증가하였지만 최대 처짐에 있어서는 보강하지 않은 경우에 비해 미소한 증가를 보였다. FRP Sheet의 방향성에 의한 보강 효과의 차이는 미미한 것으로 나타났으며 그래프의 구별성(distinguishability)을 위해 Fig. 8과 9에서는 FRP의 ±45°변수를 생략하여 나타냈다.

### 3.3 해석 결과의 검증

본 연구에 사용된 재료 모델 및 해석기법은 기존의 연구자들에 의해 그 신뢰성이 입증되었다(Magallanes et al., 2010; Teng et al., 2002; Wang et al., 2009). 이러한 점에서 이 절에서는 기 수행된 실험결과와 해석결과의 비교를 통해 본 연구의 해석결과에 신뢰성을 확보하고자 하였다. 실험결과는 텃에 설치된 센서에 의해 부재의 중앙부에서 측정되었으며, 텃의 관입이 고려된 해석결과와의 비교를 통해 검증과정을 수행하였다. 1방향 및 2방향 부재의 실험결과와 해석결과에 대한 비교는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타나있다.

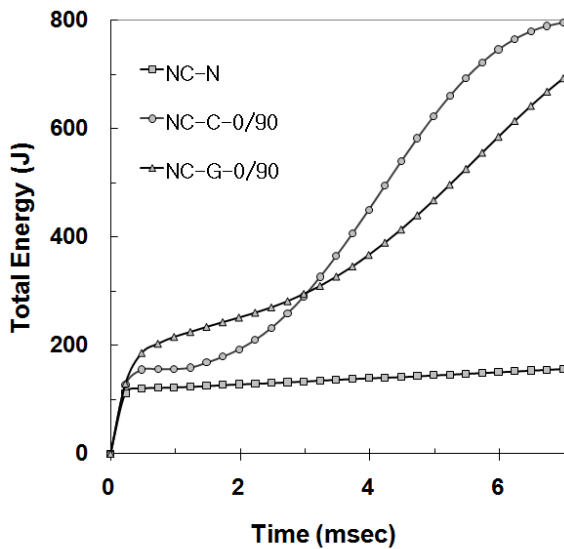


(a) Time-deflection relationship of NC series

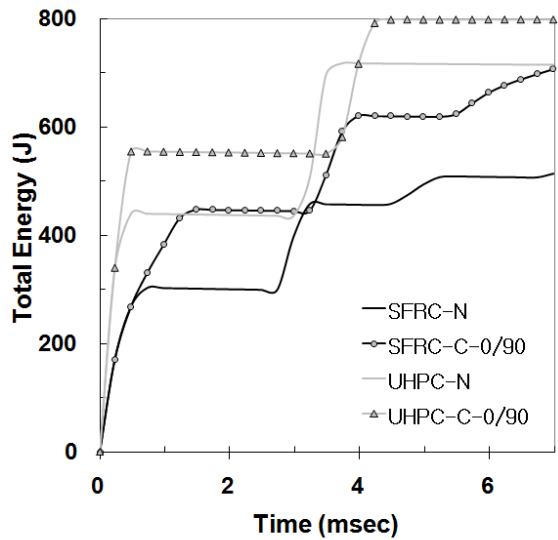


(b) Time-deflection relationship of SFRC and UHPC series

Fig. 8 Time-deflection relationship in center node for two-way analysis model

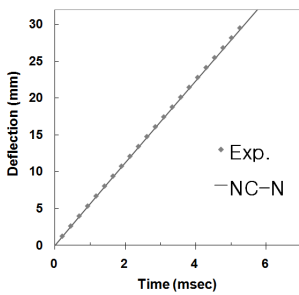


(a) Time-energy relationship of NC series

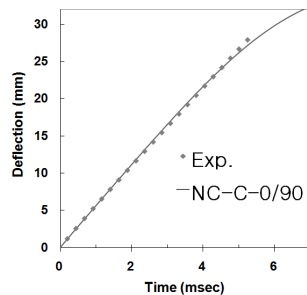


(b) Time-energy relationship of SFRC and UHPC series

Fig. 9 Total Energy of two-way analysis model

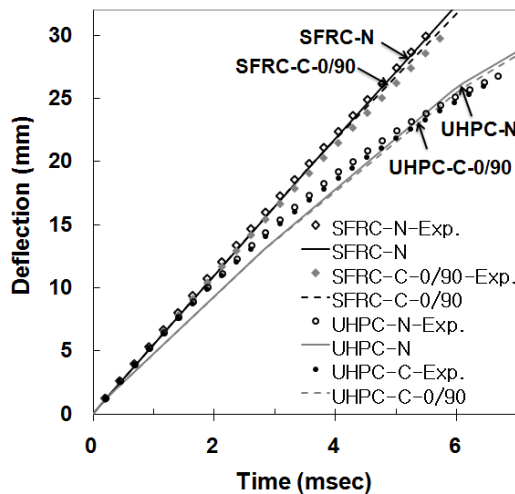


(a) One-way NC series

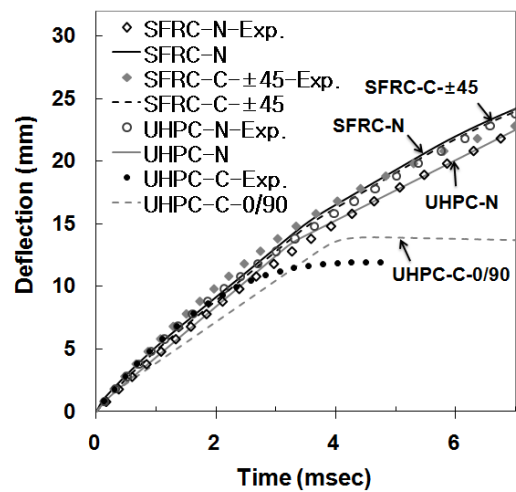


(b) Two-way NC series

Fig. 10 Comparison of experiment and analysis results for NC series



(a) One-way SFRC and UHPC series



(b) Two-way SFRC and UHPC series

Fig. 11 Comparison of experiment and analysis results for SFRC and UHPC series

Fig. 10(a)와 11(a)에서 알 수 있듯이 1방향의 NC-N, SFRC-N, UHPC-N 부재의 경우, 해석결과는 실험결과에 대해 부재 최대 처짐을 기준으로 하여 약 1% 범위 내에서 부재의 거동이 일치하고 있다. 또한 FRP Sheet로 보강한 1방향 부재의 경우에서도 해석결과는 5% 이하의 범위 내에서 실험결과와 유사한 거동을 나타내고 있다.

Fig. 10(b)와 11(b)가 보여주듯 2방향 부재의 경우, NC-N, UHPC-N은 최대 처짐을 기준으로 5% 이하의 범위 내에서 부재의 거동이 일치하고 있으며, FRP Sheet로 보강한 부재의 경우에서도 2mm 이하의 차이를 나타내며 전체적인 거동 양상이 일치하고 있다.

이상의 그래프를 통해 일반 콘크리트와 SFRC 및 UHPC의 재료모델로서 사용된 Concrete Damage Model Rel3 (MAT\_72R3)과 Elastic Plastic Hydro Model (MAT\_10)이 적절하게 부재의 거동을 묘사하고 있으며, 텅의 관입 현상 또한 잘 고려하고 있음을 알 수 있다. 또한 FRP Sheet로 보강한 콘크리트의 경우에도 최대 처짐에 대해 약 10% 범위 내에서 부재의 전체적 거동 양상을 묘사하고 있다. FRP Sheet로 보강한 콘크리트의 경우에서 실험결과와 해석결과의 차이가 비교적 크게 나타난 원인은 FRP Sheet와 콘크리트 사이의 동적 부착 특성을 반영하는 과정에서 고려해야 할 변수가 늘어남으로 인해 불확실성이 증가하였기 때문으로 판단된다. 상기 비교 분석을 통해 나타난 해석결과와 실험결과의 차이는 기존의 충격 하중에 대한 해석적 연구(Farnam et al.,

2010; Wang et al., 2007)에서 나타난 값보다 작게 나타났다으며 이를 통해, 본 연구의 해석 모델을 이용한 분석은 충분한 신뢰성을 갖는다고 판단할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 FRP Sheet 및 강섬유로 보강된 콘크리트의 저속 충격하중에서의 거동에 대해 명시적(explicit) 유한요소 해석프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 해석 및 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 부재 중앙부에서의 최대 처짐과 소산 에너지를 통해 나타난 충격 저항 성능은 강섬유에 의해 보강된 SFRC, UHPC series가 NC series에 비해 2~7배 이상 우수한 성능을 발휘하였다. 소산 에너지의 경우 UHPC series가 SFRC series보다 90~200J 큰 에너지 소산 성능을 보였다. 이러한 충격 저항성능의 향상은 강섬유 혼입에 의한 인성의 증가에 기인한 것으로 판단된다.
- (2) FRP로 보강한 경우, NC, SFRC, UHPC series에서 충격 저항 성능이 증가하였다. GFRP로 보강한 경우 CFRP로 보강한 경우보다 최대 처짐 및 소산 에너지 측면에서 다소 우수한 보강 효과를 나타냈다. FRP에 의한 보강 효과는 SFRC 부재에서 가장 크게 나타났으며, 섬유 방향성에 의한 보강 성능의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 또한 FRP로 보강한 부재에서는 시간에 따른 진동감쇠 효과가 나타났다.



(3) 콘크리트의 변형 속도에 따른 DIF를 해석에 반영하였으며 실험결과와의 비교를 통해 해석모델의 신뢰성을 검증하였다. 또한 콘크리트 표면강도에 따른 텃의 관입을 모사하여 충격 저항 성능이 과소평가되는 문제를 해결할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0056796).

#### 참고문헌

1. 김호진, 남진원, 김성배, 김장호, 변근주, “폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조물의 보강 성능에 대한 해석적 분석”, 한국콘크리트학회논문집, Vol. 19, No. 2, 2007, pp.241-250.
2. 민경환, 신현오, 류두열, 윤영수, “FRP sheet 및 강섬유 보강 콘크리트의 저속 충격에서의 휨 및 편칭 파괴 거동”, 한국콘크리트학회논문집, Vol. 23, No. 1, 2011, pp.31-38.
3. 이현승, 이영신, “다중 하중을 받는 콘크리트 방호벽의 충격해석”, 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회 논문집, 2009, pp.308-311.
4. 조성훈, 민경환, 김윤지, 윤영수, “CFRP 시트 및 강섬유로 보강된 RC보의 충격저항 성능 평가”, 한국콘크리트학회논문집, Vol. 22, No. 5, 2010, pp.719-725.
5. Bank, L. C., Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials, John Wiley & Sons, NJ, USA, 2006, pp.214-271.
6. 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.
7. Farnarm, Y., Mohammadi, S. and Scekarachi, 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. Habel, K. and Gauveau, P., “Response of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) to Impact and Static Loading”, Cement and Concrete Composites, Vol. 30, No. 10, 2008, pp.38-946.
9. Hao, Y., Hao, H. and Li Z. X., “Numerical Analysis of Lateral Inertial Confinement Effects on Impact Test of Concrete Compressive Material Properties”, International Journal of Protect Structures, Vol. 1, No. 1, 2010, pp.145-167.
10. Hallquist, J. O., LS-DYNA Theoretical Manual, March 2006.
11. Livermore Software Technology Corporation(LSTC), LS-DYNA, Keyword User's Manual Version971, 2007.
12. 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 imulation, 2010, pp.3-37.
13. Malvar, L. J. and Grwford, J. E., “Dynamic Increase Factors for Concrete”, 28th DDESB Seminar, Orlando(USA), August 1998, pp.1-18.
14. Malvar, L. J., Crawford, J. E. and Morrill K. B., “Use of Composites to Resist Blast”, J. Comp. Constr., ASCE, Vol. 11, No. 6, 2007, pp.601-610.
15. Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. and Ramsay, J., “Blast Loading and Blast Effects on Structures-An Overview”, EJSE Special Issue : Loading on Structures, 2007, pp.76-91.
16. Schwer, L. E. and Malvar, L. J., “Simplified Concrete Modeling with MAT\_CONCRET\_DAMAGE\_MODEL\_REL 3”, JRI LS-DYNA user week, 2005, pp.1-14.
17. 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.
18. Tavarez, F. A., “Simulation of Behavior of Composite Grid Reinforced Concrete Beams Using Explicit Finite Element Method”, Thesis of Master of Science, University of Wisconsin-Madison, 2001, pp.152.
19. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. and Lam, L., FRP-Strengthened RC Structures, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 2002, pp.31-46.
20. Wang, Z. L., Konietzky, H. and Huang, R. Y., “Elastic-Plastic-Hydrodynamic Analysis of Crater Blasting in Steel Fiber Reinforced Concrete”, Theoretical and Applied Fracture mechanics, Vol. 52, No. 2, 2009, pp.111-116.
21. Wang, Z. L., Li, Y. C., Sheen, R. F. and Wang, J. G., “Numerical Study on Craters and Penetration of Concrete Slab by Ogive-Nose Steel Projectile”, Computers and Geotechnics, Vol. 34, No. 1, 2007, pp.1-9.
22. Wang, Z. L., Wu, L. P. and Wang, J. G., “A Study of Constitutive Relation and Dynamic Failure for SFRC in Compression”, Construction and Building Materials, Vol. 24, No. 8, 2010, pp.1358-1363.
23. 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.

(접수일자 : 2011년 3월 7일)

(수정일자 : 2011년 5월 4일)

(심사완료일자 : 2011년 5월 31일)

---

## 요 지

충격 하중 재하 실험의 경우 빠른 하중 재하 속도로 인해 실험 데이터를 측정하는 방법에 있어 많은 어려움이 있다. 또한 부재의 국부적 손상을 측정하지 못함으로써 부재의 동적 거동을 왜곡하는 문제점이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 충격 실험에서의 한계를 극복하기 위하여 명시적(explicit) 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 FRP Sheet 및 강섬유로 보강된 콘크리트의 저속 충격 하중 하에서의 동적 거동을 분석하였다. 해석 모델은 1방향 및 2방향 부재이며 충격 하중 재하 시 부재의 국부적 파괴를 고려하고 있다. 해석결과 강섬유에 의해 보강된 SFRC와 UHPC 부재의 경우 충격 저항성능이 크게 향상되었다. FRP Sheet로 보강한 경우 GFRP가 CFRP보다 우수한 충격 저항 성능을 보였으며 FRP Sheet의 방향성에 의한 영향은 크게 나타나지 않았다. 본 연구에서 수행된 해석은 충격 실험 결과와의 비교를 통해 그 신뢰성이 검증되었다.

**핵심 용어** : 저속 충격 하중, FRP sheet 보강콘크리트, 강섬유보강콘크리트, 초고성능콘크리트, LS-DYNA

---