RC 보의 충격저항성능 향상을 위한 강섬유 및 CFRP Sheet의 보강 효과

Strengthening Effect of CFRP Sheets and Steel Fibers for Enhancing the Impact Resistance of RC Beams

김미혜* · 민경환** · 류두열** · 윤영수***

Kim, Mi Hye · Min, Kyung Hwan · Yoo, Doo Yeol · Yoon, Young Soo

Abstract

In this study, a numerical analysis to investigate the effect of each reinforcing method on the impact resistance was performed by simulating the impact loading test of the RC beams strengthened with CFRP sheets and steel fibers using the finite element analysis program. LS-DYNA, which is the explicit finite element analysis program, was used to analyze the dynamic behavior of RC beams effectively. The energy absorption capacity and plastic strain aspect of RC beams were estimated as the applied impact energy increases step by step. Analysis results indicate that the absorbed energy rates of specimens strengthened with CFRP sheets and steel fibers were higher than those of other specimens. According to the evaluation result of plastic strain aspect, the those concentration was relieved by the dispersion of the impact energy due to the strengthening effects of CFRP sheets and steel fibers. In addition, the tendency of Shear-Plug crack for each specimen was similar to the experimental result of the previous study.

Key words : impact loading, CFRP sheet, steel fiber reinforced concrete, LS-DYNA

요 지

본 연구에서는 CFRP sheet 및 강섬유로 보강한 RC보의 충격하중 실험을 유한요소 프로그램으로 모사함으로써 각 보강방법이 충격저항성능 향상에 미치는 영향을 해석적 분석을 통해 알아보았다. RC 보의 동적거동을 효과적으로 분석하기 위해 명시적(Explicit) 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하였으며, RC 보에 가해지는 충격에너지가 단계적으로 증가할 때, RC 보의 에너지 흡수 성능 및 소성변형률 양상을 확인하였다. 해석 결과, CFRP sheet와 강섬유가 보강된 경우, 일반콘크리트 부재에 비해 에너지 흡수율이 급격히 증가했다. 소성변형률 양상을 분석한 결과, CFRP sheet 및 강섬유로 보강된 경우 그렇지 않은 경우에 비해 상대적으로 넓은 부분에 에너지를 분산시킴으로써 국부적으로 에너지가 집중되는 현상을 완화시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 소성변형률 양상을 통해 각 부재의 Shear-Plug 균열 형태를 파악하고, 기존의 연구 결과와 비교하였다.

핵심용어 : 충격하중, CFRP sheet, 강섬유 보강 콘크리트, LS-DYNA

1. 서 론

전 세계적으로 철근콘크리트 구조물이 충돌 및 폭발과 같은 극한 하중에 노출되는 빈도수가 증가함에 따라 철근 콘크리트 구조물의 충격저항성능을 향상시키고자하는 연구가 활발히 진행되고 있다(김호진 등, 2007; 민경환 등, 2011; 조성훈 등, 2010). RC 부재의 충격저항성능은 구조물의 에너지 흡수 성능으로 평가될 수 있으며, 인성(toughness)을 증가시킴으로써 에너지 흡수 성능을 향상시킬 수 있다. RC 부재의 인성을 증가시키는 방법은 크게 섬유를 혼입하여 콘크리트

자체의 인성을 향상시키는 방법과, 부재 표면에 FRP sheet 및 강판 등을 부착하여 인성을 향상시키는 방법으로 구분할 수 있다(Ishai et al., 1990; Mindess et al., 1994).

본 연구에서는 Table 1과 같이 강섬유와 CFRP sheet의 보강 방법을 변수로 하여 보강 방법에 따른 RC 보의 충격저항성능을 해석적으로 평가하고자 하였다. 해석에는 충격 및 폭발과 같은 동적거동 해석에 특화된 상용코드인 LS-DYNA를 이용하였다. 290×160×2200 mm 크기의 보 부재를 모델링하여 각기 다른 방법으로 보강한 후, 추를 자유낙하시켜 충격하중을 가하였다. 충격하중이 가해질 때, 각 부재에 흡수된 충

*정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (E-mail : oopskmh@korea.ac.kr)

**고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

***정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(교신저자)

Table 1. Mesh data

	NC-NF	NCS-NF SFS-NF	NCS-CF SFS-CF
Nodes	10560	10742	10967
Solid elements	8472	8472	8472
Beam elements	168	468	468
Shell elements	-	-	176
Element sizes	Solid : 25×25×25 mm Shell : 25×25 mm Beam : 25 mm		

격에너지 및 소성변형률 양상을 분석하여 각 보강 방법이 부재의 충격저항성능을 향상시키는 데 미치는 영향을 알아보았다.

2. 유한요소 해석

2.1 해석 개요

본 연구에서는 조성훈 등(2010)에 의해 수행된 실험과 동일한 크기의 부재에 대해 해석을 수행하였다. 290×160×2200 mm 크기의 보 부재에 밑면의 면적이 100×100 mm인 150 kg의 추를 자유 낙하시켜 충격하중을 가하였다. 모델링한 부재 및 추의 제원은 실험과 동일하며 부재 단면은 Fig. 1과 같다. 콘크리트와 철근은 절점을 공유하도록 모델링하여 완전 부착

(a) RC beams with shear reinforcement

(b) RC Beams without shear reinforcement

Fig. 1. Detail of reinforcement RC Beams (조성훈 등, 2010)

(a) RC beams with shear reinforcement

(b) RC Beams without shear reinforcement

Fig. 2. Analysis models

Table 2. Analysis variables (조성훈 등, 2010)

Variable	Details	Notation
Concrete	Normal concrete without shear reinforcement	NC
	Normal concrete with shear reinforcement	NCS
	Steel fiber reinforced concrete with shear reinforcement	SFS
FRP sheet	Not retrofitted	NF
	Flexural retrofitted with CFRP	CF

Fig. 3. View of RC beams variables (조성훈 등, 2010)

상태를 가정하였다. LS-DYNA를 이용해 모델링 한 모습은 Fig. 2에서 확인할 수 있으며, 각 부재의 mesh data는 Table 1에 나타나 있다. 해석 변수는 크게 전단철근의 유무와 CFRP sheet 부착 및 강섬유 보강 콘크리트(SFRC)의 사용으로 나눌 수 있으며 각 보강방법을 단일 또는 중복으로 적용시켜 충격저항성능에 미치는 영향을 알아보았다. 보강방법에 따른 부재 표기 방법은 Table 2에 정리되어 있으며 각 부재의 변수를 그림으로 표현하여 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 충격하중을 고려한 재료 모델

충격하중이나 폭발하중과 같은 동적하중이 재료에 가해질 경우, 재하속도가 증가할수록 재료 강도가 증가하는 경향이 있다. 강도의 증가는 변형률 속도에 비례하며 이는 국부적인 파쇄와 동적 전단파괴에 대한 저항을 증가시킬 수 있다. 따라서 동적하중에 대한 재료의 강도 증가 효과를 반영할 수 있는 재료 모델을 적용하여야 한다.

2.2.1 일반 콘크리트(NC) 재료 모델

LS-DYNA를 이용한 해석 연구에서 일반 콘크리트를 모사하기 위해 사용하는 재료 모델은 Pseudo tensor, Soil concrete, Winfrith concrete, CSCM concrete, Concrete EC2, Concrete beam 등이 있으나, 선행된 많은 연구에서 폭발 및 충격하중과 같은 동적하중이 작용한 콘크리트 구조물의 경우 Concrete damage(MAT_072)모델을 사용하는 것이 콘크리트의 압축 및 인장 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있다는 것이 입증되었다 (Malvar et al., 1997). 본 연구에서는 MAT_072를 보완하여 개발된 Concrete damage REL3(MAT_72R3) 모델을 사용하여 충격하중이 가해질 때의 콘크리트 거동을 예측하고자 하였다.

2.2.2 강섬유 보강 콘크리트(SFRC) 재료 모델

SFRC는 배합 시 섬유를 혼입하여 일반 콘크리트에 비해 인성(toughness)이 강화된 재료이므로 일반 콘크리트와는 상이한 응력-변형률 곡선을 갖는다. 따라서 재료의 변형률 연화(strain softening) 경향을 반영할 수 있는 Elastic plastic hydro (MAT_010) 모델을 적용하였다. MAT_010 모델의 경우, 강도에 동적 증가계수 DIF(dynamic impact factor)를 곱해줌으로써 동적하중에 대한 재료 강도 증가 효과를 반영할 수 있다. 저속충격하중이 가해지는 콘크리트의 DIF는 CEB (Comite Euro international du Beton)에서 제안한 Eq. (1)에 의해 결정되었다.

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

$$\alpha = \frac{1}{5 + 9 \frac{\hat{f}_c'}{f_o'}} \quad (2)$$

여기서,

f_c' = 의사-정적 압축 강도 (quasi-static compressive strength)

$\hat{f}_c'$ = 동적 압축 강도 (dynamic compressive strength)

$f_o' = 10 \text{ MPa}$

$\dot{\epsilon}_d$ = 변형률 속도 (strain rate)

$\dot{\epsilon}_o = 30 \times 10^{-6} s^{-1}$

일반콘크리트(NC)와 강섬유 보강 콘크리트(SFRC)의 재료 물성치는 Table 3에서 확인할 수 있으며, 이는 조성훈 등 (2010)에 의해 수행된 실험 부재의 특성과 동일하다.

2.2.3 철근 재료 모델

압축, 인장 및 전단철근을 모사하기 위해 사용한 재료 모

Table 3. Properties of NC and SFRC

Concrete	Compressive Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)
NC	39.8	6.0
SFRC	36.7	8.7

Table 4. Properties of FRP sheets and epoxy

Sheet	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Ultimate Strain (%)	Thickness (mm)
CFRP	4900	230	2.1	0.111
Resin	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Ultimate Strain (%)	Density (g/cm)
Epoxy	90	3.0	8.0	1.2

델은 Piecewise linear plasticity(MAT_024)으로, MAT_010과 마찬가지로 동적증가계수 DIF를 철근의 항복강도에 곱해줌으로써 동적 하중에 대한 재료 거동을 효율적으로 고려할 수 있는 모델이다. Coper and Symond's equation (Eq. (3))에 의해 철근의 변형률 속도 효과를 고려하였다.

$$\sigma = [A + \epsilon_p^n] \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{D} \right)^{1/p} \right] \quad (3)$$

여기서,

A = 초기 항복응력 (initial yield stress of the material)

ϵ_p = 소성 변형률 (plastic strain)

$\dot{\epsilon}_p$ = 소성 변형률 속도 (plastic strain rate)

2.2.4 CFRP sheet 재료 모델

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. 또한 섬유보강재는 인장강도에 도달하기 전까지 선형탄성거동을 보인다고 간주하는 것이 일반적이다. 따라서 본 해석에서는 CFRP sheet 재료모델은 전단변형이 고려된 Orthotropic elastic(MAT_002) 모델을 사용하였다.

CFRP sheet의 물성치는 Table 4에서 나타나 있으며, 이 역시 조성훈 등(2010)에 의해 수행된 실험의 재료 물성과 동일하다.

2.3 재료 모델 검증

민경환 등(2010)에 의해 수행된 1, 2방향 슬래브의 저속충

Table 5. Deflection data of experiment and analysis

Specimen	Deflection by impact loading							
	One way flexure				Two way punching			
	NC-N	NC-C	SFRC-N	SFRC-C	NC-N	NC-C	SFRC-N	SFRC-C
Experiment	1.77	2.35	1.83	2.86	2.54	4.53	2.09	9.23
Analysis	1.71	2.20	1.79	2.83	2.49	4.31	2.06	8.76

격하중 실험을 바탕으로 한 해석 연구를 통해 2.2절에서 기술한 재료 모델에 대한 검증이 이루어졌다(이진영 등, 2011). 1방향 휨 실험과 2방향 편칭 실험 및 해석 결과는 다음의 Table 5에 정리되어 있다. 이는 앞서 언급한 MAT_072R3, MAT_010 및 MAT_020 모델이 실제 재료의 거동을 잘 묘사하고 있음을 보여준다. 따라서 동일한 재료 모델을 이용하여 진행된 본 해석 연구의 결과 또한 타당성을 가진다고 할 수 있다.

3. 해석 결과

3.1 에너지 흡수 성능

각 부재의 에너지 흡수 성능을 통해 충격저항성능을 평가하였다. 추에 의해 이론적으로 가해지는 에너지 중 부재에 흡수되는 에너지 비율을 비교함으로써 상대적인 에너지 흡수 성능을 확인할 수 있고, 이를 Table 6과 Fig. 4에 나타내었다. Table 6의 Total absorbed energy는 충격하중이 작용한

Table 6. Energy absorption capacity

Specimen	Applied impact energy of 2.6 kJ		Applied impact energy of 5.3 kJ		Applied impact energy of 7.9 kJ	
	Total absorbed energy (kJ)	Absorbed energy rate (%)	Total absorbed energy (kJ)	Absorbed energy rate (%)	Total absorbed energy (kJ)	Absorbed energy rate (%)
NC-NF	1.66	63.85	2.71	51.13	3.42	43.29
NCS-NF	1.70	65.38	2.98	56.23	3.99	50.51
NCS-CF	1.95	75.00	3.92	73.96	5.56	70.38
SFS-NF	2.41	92.69	4.62	87.17	6.10	77.22
SFS-CF	2.60	100.00	4.70	88.68	6.23	78.86

Fig. 4. Total absorbed energy

직후, 부재에서 흡수된 전체 에너지를 의미하며 Absorbed energy rate는 Total absorbed energy 대 이론적으로 가해진 에너지를 백분율로 나타낸 값이다. 즉, 각부재의 Absorbed energy rate를 비교하여 상대적인 충격저항 성능을 파악할 수 있다. 조성훈 등(2010)에 의해 수행된 실험에서 추에 의해 가해진 충격에너지인 2.6 kJ를 기준으로 2배, 3배로 에너지를 증가시키면서 해석을 진행하였다.

2.6 kJ 충격에너지가 가해지는 경우 NC-NF 부재와 NCS-NF 부재의 에너지 흡수율의 차이는 약 1% 정도로 유사한 값을 보이나, 가해지는 충격에너지가 증가할수록 NC-NF 부재와 NCS-NF 부재의 에너지 흡수율의 차이가 7%까지 증가한다. 즉, 상대적으로 작은 충격에너지가 가해질 때 전단철근이 부재의 에너지 흡수 성능에 미치는 영향이 미미하지만 일정한 크기 이상의 충격에너지가 가해질 경우, 저항 성능 향상에 기여한다고 볼 수 있다.

충격에너지가 증가하게 되면 모든 부재의 에너지 흡수율도 감소하게 된다. NCS-CF 부재의 경우, 충격에너지 증가에 따른 에너지 흡수율의 감소 정도가 상대적으로 작다. 다른 부재들이 약 15% 정도 감소하는데 반해 NCS-CF 부재는 약 5% 정도의 감소를 보이고 에너지 단계가 높아질수록 에너지 흡수율 면에서 NCS-NF 부재와 큰 격차를 나타낸다. 2.6 kJ에서 7.9 kJ로 가해지는 충격에너지가 증가할 때, 두 부재의

에너지 흡수율 차이는 10%에서 20%로 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해 CFRP sheet를 이용한 휨 보강을 함으로써 일반콘크리트 부재의 충격저항성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

강섬유로 보강한 부재의 경우에도, 일반콘크리트 부재에 비해 높은 에너지 흡수율을 보였다. NCS-NF 부재와 비교하여 흡수되는 에너지가 1.5배 이상 증가하였다. 7.9 kJ 충격에너지의 약 80% 정도를 흡수할 수 있는 것으로 보아, 더 큰 에너지 단계에서도 충분히 충격에 저항할 수 있을 것으로 판단된다. SFS-NF 부재와 강섬유 보강 부재에 CFRP sheet를 추가 보강한 SFS-CF 부재는 큰 성능차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 해석에 검토한 범위 내의 충격하중에서는 SFRC에 CFRP sheet를 추가 적용할 경우 그 보강 효과가 미미하다고 할 수 있다.

3.2 소성변형률 양상

Plastic strain 양상을 분석함으로써 부재 내 에너지 전달 형태를 확인하였다. 부재에 충격하중이 가해지는 경우 물체의 관입현상으로 인해 Shear Plugging이 발생하게 되는데, 이는 부재의 균열이 접촉면에서 발생하여 하단으로 발달하는 양상을 보인다(Nataraja et al., 1999). 결과적으로 충격하중이 작용하는 국부에서 콘(cone)모양의 균열을 형성하여 전단파괴가

Fig. 5. Distribution of plastic strain

Table 7. Shear-Plug crack degree

Specimen	Shear-Plug crack degree (°)	
	Experiment	Analysis
NC-NF	63	50
NCS-NF	59	45
NCS-CF	55	46
SFS-NF	40	40
SFS-CF	43	43

(a) NC-NF

(b) NCS-NF

(c) NCS-CF

(d) SFS-NF

(e) SFS-CF

Fig. 6. Crack aspect of experiment specimens

더 쉽게 발생한다. 균열과 부재 밑면이 이루는 각을 측정하여 에너지 전달 범위를 정량적으로 확인할 수 있는데 이를 Shear-Plug 균열각이라 한다.

Fig. 5의 (a)~(c)에서, 충격이 가해지는 부재 중앙부에서 사다리꼴 형태로 strain이 크게 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 앞서 설명한 Shear Plugging 현상으로써, NC-NF 및 NCS-NF 부재에서는 2.6 kJ의 충격에너지가 가해지는 경우에도 콘의 형태를 비교적 뚜렷하게 확인할 수 있다. 따라서 두 부재는 2.6 kJ의 충격하중이 가해지는 경우에도 Shear-Plug 균열에 의한 취성적인 파괴가 발생할 가능성이 있다고 할 수 있다.

Fig. 5(a)와 (b)를 비교함으로써, 전단 철근의 유무가 부재의 충격 전달에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 가해지는 충격에너지가 증가하면서 NC-NF, NCS-NF 부재 중앙부의 Shear-Plug 균열 형태를 뚜렷하게 확인할 수 있다. 일반콘크리트 부재에 전단철근을 배근하면, Shear-Plug 균열의 각도가 50°에서 45°로 작아지면서 에너지가 전달되는 범위가 확장된다. 그러나 NC-NF 부재와 마찬가지로 충격이 가해지는 부재의 중앙에 충격에너지가 집중되기 때문에 파괴 형태가 취성적일 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 5(c)와 같이 일반 콘크리트 부재에 CFRP sheet를 보강할 경우, Shear-Plug 균열각의 크기는 46°로 NCS-NF 부

재와 큰 차이가 없다. 그러나 Plastic strain 양상을 통해 가해진 충격에너지가 부재 전체로 분산됨을 확인할 수 있다. 이는 조성훈 등(2010)의 실험에서 동일한 횡수의 타격이 가해진 후, NCS-CF 부재가 NCS-NF 부재에 비해 상대적으로 많은 균열이 발생하는 것과 유사한 결과라고 볼 수 있다. 즉, CFRP sheet를 보강함으로써 부재에 부분적으로 에너지가 집중되는 것을 방지하고 연성적인 파괴를 유도할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5(d)와 (e)에서 보여주듯 SFRC 부재의 경우, 2.6 kJ의 충격에너지가 가해질 때는 Shear-Plug 균열 형태를 볼 수 없으며 충격에너지가 부재 전체로 분산된 것을 볼 수 있다. 분산되어 있는 변형률의 크기도 일반콘크리트 부재에 비해 상대적으로 작다. 7.9 kJ의 충격에너지가 가해질 때, Shear-Plug 균열을 확인할 수 있는데 균열각이 5°정도 크게 감소하면서 전달되는 에너지 범위가 확장된다. SFS-NF 부재와 SFS-CF 부재의 Plastic strain 양상은 단계적으로 유사하며, 측정된 균열 각 또한 큰 차이가 없다.

Table 7은 조성훈 등(2010)에 의해 수행된 실험과 본 해석적 연구에서 도출된 Shear-Plug 균열각을 비교하여 정리한 것이다. 실험에서 측정된 균열 각은 상부에서 발생한 Shear-Plug 균열이 하부까지 진행되었을 때 직선으로 가정하여 부재하단으로부터 측정된 양쪽 각의 평균으로 산정되었다. 실험에서 측정된 Shear-Plug 균열의 형태는 Fig. 6에서 확인할 수 있다. Shear-Plug 균열각을 비교한 결과, 전체적인 경향은 해석 결과와 유사한 것으로 판단된다. 특히, SFRC 부재의 균열 각은 실험 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

명시적 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 전단철근 및 CFRP sheet, 강섬유 보강 유무에 따른 철근 콘크리트 보의 충격저항성능을 평가하였으며, 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 부재에 가해지는 충격에너지가 증가할수록 에너지 흡수율을 감소하는 경향을 보였다. CFRP sheet로 보강된 부재는 보강되는 않은 부재에 비해 에너지 흡수율이 크게 감소되었다.
- 2) 강섬유가 혼입된 부재(SFS-NF)의 에너지 흡수율은 보강되지 않은 부재(NCS-NF)에 비해 약 1.5배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 강섬유 보강 콘크리트의 경우, CFRP sheet 보강 효과가 미미하였다.
- 3) Plastic strain 양상을 통해 확인한 결과, CFRP sheet 및 강섬유로 보강한 RC보의 Shear-Plug 균열각은 보강하지 않은 부재(NCS-NF)에 비해 상대적으로 작은 값을 가진다. 즉, RC보를 CFRP sheet 및 강섬유로 보강할 경우 에너지 전달 범위가 확장되어 충격에너지가 국부적으로 집중되는 것을 방지할 수 있다. 이는 조성훈 등(2010)에 의해 실험적으로 측정된 Shear-Plug 균열 각이 나타내는 경향과 일치한다.
- 4) 충격에너지의 흡수 및 분산 정도를 평가한 결과, RC보

에 CFRP sheet 및 강섬유를 보강할 경우 충격저항 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 하지만 강섬유와 FRP sheet를 동시에 사용할 경우, 단일하게 보강하는 경우에 비해 큰 성능 향상이 나타나지 않았다.

감사의 글

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

참고문헌

김호진, 남진원, 김성배, 김장호, 변근주 (2007) 폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조물의 보강 성능에 대한 해석적 분석, **한국콘크리트학회 논문집**, 제19권, 제1호, pp. 241-250.

민경환, 신현오, 류두열, 윤영수 (2011) FRP 시트 및 강섬유 보강 콘크리트의 저속 충격에서의 휨 및 펀칭 파괴 거동, **한국콘크리트학회 논문집**, 제23권, 제1호, pp. 31-38.

이진영, 김미혜, 민경환, 윤영수 (2011) 저속충격하중에서의 FRP sheet 및 강섬유 보강 콘크리트의 거동 해석, **한국구조물진단학회 논문집**, 제15권, 제4호, pp. 155-164.

조성훈, 민경환, 김윤지, 윤영수 (2010) CFRP Sheet 및 강섬유로 보강된 RC 보의 충격저항 성능 평가, **한국콘크리트학회 논문집**, 제22권, 제5호, pp. 719-725.

Ishai, O. and Shragai, A. (1990) Effect of Impacts Loading on Damage and Residual Compressive Strength of CFRP laminated beams, *Composite Structures*, Vol. 14, No. 4, pp. 319-337.

Hallquist, J.O. (2006) LS-DYNA Theoretical Manual.

Livemore Software Technology Corporation (LSTC) (2007) LS-DYNA Keyword User's Manual Version 971.

Magallanes, J.M., Wu, Y. and Malvar, L.J. (2010) Recent Improvements to Release III of the K&C Concrete Model, *11th International LS-DYNA Users Conference Simulation*, pp. 3-37.

Malvar, L.J., Crawford, J.E., Wesevich, J.W., and Simons, D. (1997) A Plasticity Concrete Material Model for DYNA3D, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No. 9/10, pp. 847-873.

Mindess, S., Chen, L. and Morgan, D.R. (1994) Determination of the First-Crack Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 1, pp. 201-208.

Nataraja, M.C., Dhang, N. and Gupta, A.P. (1999) Statistical Variations in Impact Resistance of Steel Fiber-Reinforced Concrete Subjected to Drop Weight Test, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 7, pp. 989-995.

Wang, N., Mindess, S. and Ko, K. (1996) Fibre Reinforced Concrete Beams Under Impact Loading, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 363-376.

Tang, T. and Saadatmanesh, H., P.E., M.ASCE (2003) Behavior of Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Laminates under Impact Loading, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 7, No. 3, pp. 209-218.

Yankelevsky, D.Z., (1997) Local response of concrete slabs to low velocity missile impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No. 4, pp. 331-343.

◎ 논문접수일 : 11년 04월 26일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 05월 02일
 ◎ 심사완료일 : 11년 07월 18일