접촉 폭발 하중을 받는 RC 슬래브의 국부 손상 및 내폭 성능 평가

Evaluating Local Damages and Blast Resistance of RC Slabs Subjected to Contact Detonation

리 령¹⁾
Li, Ling

이 진 영²⁾
Lee, Jin Young

민 경 환³⁾
Min, Kyung Hwan

윤 영 수^{4)*}
Yoon, Young Soo

Abstract

In this study, the resistance of various reinforced concrete (RC) slabs subjected to contact detonation was assessed. In order to enhance the blast resistance, fibers and external FRP sheets were reinforced to RC slabs. In the experiment, the 2,000×1,000×100 mm sized RC slabs were fabricated using normal concrete (NC), steel fiber reinforced concrete (SFRC), polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composite (PVA FRCC), and ultra-high performance cementitious composites (UHPCC). The damage levels of RC slabs subjected to contact detonation were evaluated by measuring the diameter and depth of crater, spall and breach. The experimental results were compared to the analyzed data using LS-DYNA program and three different prediction equations. The diameter and depth of crater, spall and breach were able to be predicted using LS-DYNA program approximately. The damage process of RC slabs under blast load was also well expressed. Three prediction equations suggested by other researchers had limitations to apply in terms of empirical approaches, therefore it needs further research to set more analytical considerations.

Keywords : Contact detonation, CFRP sheet, PVA, SFRC, UHPCC, Crater, Spall, Breach, LS-DYNA

1. 서론

최근 충격 및 폭발과 같은 고속 하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동에 대한 연구가 국내외에서 다양한 방향으로 진행되고 있다(Kim et al., 2008; Min et al., 2011; Cho et al., 2010; Ha et al., 2010; Buchan and Chen, 2006; Silva and Lu, 2007; Schenker et al., 2008). 특히 콘크리트의 낮은 인장 강도에 따른 취성 파괴의 문제점을 보완하기 위해 섬유 혼입에 의한 보강 방법과 부재 표면에 FRP(fiber reinforced polymer) 시트를 부착하여 RC 부재의 인성을 향상시키는 방법이 연구되고 있다.

콘크리트 구조물은 폭발 하중의 인장 응력파에 의하여 스폴 손상이 나타나는 특성을 갖고 있다. 스폴 손상으로

박리되어 나간 콘크리트 파편에 인한 인명피해가 크므로 내폭 저항 RC 구조물 설계에서 스폴 손상을 최소화 하는 것이 가장 중요한 문제이다.

폭발 하중을 받는 RC 구조물의 손상정도를 평가할 때에는 구조물과 폭발물 간의 위치에 따라 크게 3 가지로 구분 할 수 있다. 구조물 표면에서 일정한 거리를 둔 발파(근접 발파), 구조물 표면에서의 발파(접촉 발파), 구조부재 내부에서 발파(천공 발파)이다(Yamaguchi et al., 2011).

본 연구에서는 구조물 표면에서의 발파(접촉 발파)에 의한 RC 부재의 국부적 손상도를 평가 하였다. 이를 위해 일반 콘크리트와 강섬유 보강 콘크리트(steel fiber reinforced concrete, SFRC), 하이브리드 PVA (polyvinyl alcohol) 섬유 보강 시멘트 복합체(PVA fiber reinforced cementitious

1) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정
2) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정
3) 정회원, 고려대학교 방재과학기술 연구소 박사후 연구원
4) 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, 교신저자

* Corresponding author : ysyoon@korea.ac.kr 02-3920-3320

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2013년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

composite, PVA FRCC) (Kim et al., 2008), 초고성능 콘크리트(ultra-high performance cementitious composite, UHPCC) (Kim et al., 2006)를 적용한 RC 슬래브를 제작하였다. 또한 CFRP(carbon fiber reinforced polymer) 시트를 외부에 부착하여, 이의 영향을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 콘크리트 및 RC 슬래브

본 연구에서 사용한 실험 변수는 Table 1과 같다. SFRP는 일반 콘크리트에 강섬유를 추가한 것으로서 0.75%는 뭉침이 생기지 않고 고르게 잘 분포되는 최대 혼입률이다. PVA FRCC는 서로 다른 두 종류 PVA 섬유의 혼입비를 변화시켜 실험한 결과 가장 높은 휨 성능 및 연성을 나타낸 1.6%의 단섬유(REC15)와 0.4%의 장섬유(RF4000)가 혼입된 시편을 적용하였다. UHPCC는 한국건설기술연구원에서 재료공급을 받았으며 이의 강섬유 혼입률은 2%이다. 콘크리트의 종류와 CFRP 보강여부에 따라 Fig. 1과 같이 2000×1000×100 mm 크기의 RC 슬래브 부재 8본을 제작하였다(Wu et al., 2009). UW-1은 종방향 및 횡방향 철근을 1단씩만 배근하였으며, UW-2는 Fig. 1과 동일하게 철근을 2단 배근하였다. 철근은 모두 D13 철근($f_y=400\text{MPa}$)을 사용하였으며, UHPCC를 적용한 부재는 CFRP를 부착하지 않았다. 각 콘크리트와 CFRP의 역학적 특성은 Table 2 및 Table 3에 나타나 있다.

구조물에 대한 폭발 실험은 일반적으로 실외에서 수행

Fig. 1 Details of RC slab

Table 2 Properties of concrete

Concrete	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)
NC	37.35	3.65
SFRC	33.73	4.86
PVA FRCC	53.08	9.77
UHPCC	151.0	29.5

Table 3 Properties of CFRP materials

Carbon sheet	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Ultimate strain (%)	Thickness (mm)
	4,900	230	2.1	0.111
Epoxy resin	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Ultimate strain (%)	Density (g/cm^3)
	90	3.0	8.0	1.2

Table 1 Specimen variables

Variable	Detail	Notation
Concrete	Normal concrete (NC)	NW
	Steel fiber reinforced concrete (SFRC) with $\phi 0.5 \times 30$ mm steel fiber and 0.75% volume fraction	SW
	Hybrid PVA fiber reinforced cementitious composites (PVA FRCC) with $\phi 0.4 \times 12$ mm short and $\phi 0.66 \times 30$ mm long fiber by 1.6% and 0.4% volume fraction, respectively.	PW
	Ultra high performance cementitious composite (UHPCC) with $\phi 0.2 \times 13$ mm short fiber by 2% volume fraction	UW ^a
CFRP	Retrofitted	-R
	Not retrofitted	

^a For the UW members, one and two layer of reinforcing steels were applied, and their notations are UW-1 and UW-2, respectively.

Fig. 2 Section view of assembled specimens

Fig. 3 Test specimen

되며, 충분한 강성을 지닌 별도의 지지부를 제작해야 하는 어려움이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 4본의 RC 슬래브를 박스 형태로 조립하여 별도의 지지부 없이 부착 발파를 수행하였다. 각 모서리는 Fig. 3과 같이 강재 앵글로 결합하여 슬래브 상호간의 간섭을 최소화하였다.

2.2 폭발 실험

국내에서는 법규상 군사용 폭약을 민간에서 사용할 수 없으므로, 본 연구에서는 산업용 화약을 사용하였다. 적용된 폭약의 특성은 Table 4와 같고, 각 시험체의 중앙에 500g을 부착하여 발파하였다. 실험에 사용된 뉴-에뮤라이트 폭약은 유제폭약으로 유중수적형(water in oil)의 에멀전상이며, 연속상은 탄화수소계 원료인 광유, 왁스 등이며, 불연속상은 질산암모늄, 질산나트륨으로 구성된 산화제 수용액이다. 실험 전경은 Fig. 4와 같다.

3. 국부 손상 평가

3.1 접촉 발파 실험 결과

콘크리트의 국부 손상은 Fig. 5와 같이 크레틀, 스폴, 브리치 세 가지로 나눌 수 있다(Morishita et al., 2000). 크레틀은 폭발하중을 받는 면의 콘크리트가 부분적으로 파쇄되어 움푹 파인 현상을 뜻하며, 스폴은 폭발의 인장 응력파에 의하여 폭발 하중을 받는 콘크리트 슬래브가 크레틀 현상과 함께 뒷면도 같이 파쇄되는 현상을 말한다. 브리치는 크레틀과 스폴 깊이가 깊어 콘크리트 슬래브가 관통되는 현상을 의미한다. 본 연구에서는 폭발실험 종료 후 Fig. 6에 나타난 바와 같이 시험체에 발생한 국부 손

Table 4 Properties of explosives

Detonation velocity (m/s)	Volume density (g/cc)	Energy of explosion (kcal/kg)	Drop sensitivity (cm)	Amount of gas (l/kg)
5,900	1.15~1.20	950	100	888

Fig. 4 View of blast test

Fig. 5 Failure modes of local damage

상을 측정하고 균열 상황을 관찰하여 손상 정도를 평가하였다.

Fig. 7은 폭발 실험 종료 후에 시험체 중앙에서 발생한 국부 손상에 대한 형상을 나타낸 것이다. NW-R과 PW 시험체는 폭발 실험 중에 폭약이 표면에서 탈락하여 부재에 파괴형태가 발생하지 않았다. UW 시리즈는 크레틀과 스폴이 발생하였고, 다른 모든 부재는 브리치가 나타났다.

측정된 국부 손상은 Table 5와 같다. 접촉 폭발하중에 대한 국부 손상은 감섬유 및 PVA 섬유 보강으로 인해 감소하였다는 것을 볼 수 있다. 스폴 직경은 NC 대비 SFRC

Fig. 6 Measuring size of external damage (Morishita et al., 2000) (where, C: crater diameter, S: spall diameter, C_d: crater depth, S_d: spall depth, and H: breach diameter)

Fig. 7 Local damage of concrete slabs

Table 5 Measured local damages

Specimen	Average spall diameter (mm)	Average breach diameter (mm)
NW	580	246
SW	505	240
SW-R	520	240
PW-R	425	155
UW-1	315	—
UW-2	315	—

는 12.9%, PVA FRCC는 26.7%, UHPC는 45.7% 감소하였다. CFRP 시트는 슬래브 전면에 보강된 것이 아니라 메인 휨방향으로 일부분만 보강되었고 발파위치에는 CFRP 시트로 보강되어 있지 않음으로 접촉발파로 인한 국부 파괴에서 내폭저항능력이 많이 향상되지 않았다.

3.2 국부 손상 예측식

기존의 연구에서는 접촉 발파에 의한 콘크리트의 국부 손상에 대한 예측식을 실험을 통해 제안하고 있다. Morishita 등(2000; 2004)은 기존의 접촉 발파 실험 결과를 종합하여 아래의 식 (1) ~ (3)과 같은 예측식을 제안하였다 (Lonnquist et al., 1993; Kraus et al., 1994; FMB, 1979; Takeda et al., 1976; Okayama et al., 1982). RC 슬래브의 두께와 장약량으로 손상깊이를 예측할 수 있었다. 하지만 해당 식들은 일반 강도 콘크리트의 접촉 발파 결과를 토대로 얻은 경험식으로서 일반 강도 콘크리트에만 적용가능하다.

$$\text{Crater: } 3.6 < T/W_m^{1/3}, \quad \frac{C_d + S_d}{T} = \frac{C_d}{T}$$

$$C_d = T(-0.046 T/W_m^{1/3} + 0.42) \quad (1)$$

$$\text{Spall: } 2.0 \leq T/W_m^{1/3} \leq 3.6,$$

$$\frac{C_d + S_d}{T} = -0.49 \frac{T}{W_m^{1/3}} + 2.0 \quad (2)$$

$$\text{Breach: } T/W_m^{1/3} < 2.0, \quad \frac{C_d + S_d}{T} = 1.0$$

$$\frac{H}{T} = -6.7 \log \left(\frac{T}{W_m^{1/3}} \right) + 2.7 \quad (3)$$

여기서, α = Modified-scaled concrete thickness

$$\alpha = \frac{T}{W_m^{1/3}} = \frac{T}{W^{1/3}} \cdot \left(\frac{K_{TNT}}{k} \right)^{1/3} \quad (\text{cm/g}^{1/3})$$

T = 슬래브 두께 (cm)

H = 브리치 직경 (cm)

C_d = 크레틀 손상 깊이 (cm)

S_d = 스폴 손상 깊이 (cm)

W = 사용한 폭약량 (g)

W_m = TNT 등가환산 폭약량 (g)

K = 사용된 폭약의 Chapman-Jouguet 폭발 에너지 (MJ/kg)

K_{TNT} = TNT Chapman-Jouguet 폭발 에너지 (MJ/kg)

Zhang 등(2006)은 식 (4)와 같은 변수들을 분석하여 식 (5)의 예측식을 제안하였다. 이 식에서는 콘크리트의 인장강도를 변수에 포함하여, 최종적으로 k 값으로 대표되는 콘크리트의 손상 정도를 더욱 세분화하였다. 손상 정도는 Table 6에 나타나 있다. 즉 k 값이 0.0002 일때 손상등급이 3임으로 브리치가 발생하였다고 추측할 수 있다.

$$h = f(m, e, f_t, C_t, \rho) \quad (4)$$

$$k = \frac{(h - e)f_t \rho^{1/3}}{E_t m^{1/3}} \quad (5)$$

여기서, m = 폭약량

e = 발파거리

h = 슬래브 두께

f_t = 콘크리트 인장강도

E_t = 탄성계수

ρ = 슬래브 밀도

C_t = 파속

Yamaguchi 등(2011)은 폴리에틸렌(polyethylene) 섬유 보강 콘크리트를 적용한 RC 슬래브의 내폭 성능 실험을 통해 Morishita 식을 보완하여 식 (6)의 예측식을 제안하였다. 이 식에서는 섬유보강 콘크리트의 인장 성능을 고려하였지만, 섬유의 종류에 대해서는 명확하게 구분하지 않고 있다.

$$\frac{C_d + S_d}{T} = 1.9 - 0.50 \cdot \frac{T}{W_m^{1/3}} - 0.048 \cdot \bar{\sigma}_b \quad (6)$$

여기서, $\bar{\sigma}_b$ = 인성계수

3.3 유한요소해석

폭발 저항 성능 및 손상에 대한 해석적 평가와 실험 결과를 비교하기 위해 LS-DYNA를 이용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 1/4 해석 모델이 Fig. 8에 나타나 있다. 콘크리트와 같은 취성 재료는 하중 속도가 증가할수록 재료의 동적 강도가 증가하는 경향이 있으며, 이를 반영하기 위해 동적 증가 계수(dynamic increase factor, DIF)를 재료 모델에 적용해 주어야 한다. 따라서 본 연구에서는 폭발 하중과 같은 동적하중이 작용할 때 국부적인

Table 6 Damage levels with factor k (Zhang et al., 2006)

Damage level	Definition	k ($\times 10^{-4}$)
1	Create crater in detonation side with no spall in back side	6.0
2(I)	Create spall in back side with short and shallow cracks	4.0~6.0
2(II)	Create spall in back side with long and deep cracks	3.2~4.0
2(III)	Create large spall and it threatens the human life	2.5~3.2
3	Breach: perforated by cratering and spalling	1.0~2.5
4	Punch: perforated by punch	1.0

Fig. 8 Analysis model

파쇄와 동적 전단파괴에 대한 재료의 저항능력이 증가하는 현상을 반영할 수 있는 적절한 재료 모델을 적용하였다.

본 연구에서는 일반 콘크리트의 충격 및 폭발 해석에 적합하다는 것이 실험적으로 입증된 Concrete Damage Model Rel3(MAT_72R3)를 사용하였다.(Lee et al., 2011; Schwer et al., 2005) 이 재료 모델은 고속하중에 대한 거동 예측이 가능한 선형등방성의 Hypoelastic-Plastic Model이다. 또한 삼축 응력 상태를 고려하고 있어, 고속 하중 하에서 효과적인 거동 예측이 가능하다.

SFRC와 PVA FRCC, UHPCC 등 섬유보강 시멘트계 복합체의 재료 모델은 변형률 연화 현상을 잘 묘사할 수 있는 Elastic-Plastic-Hydro Model (MAT_10)을 사용하였다.(Wang et al., 2009) 압력-체적 변형률(pressure-volume strain)에 대한 EOS(equation-of-state)는 Gruneisen EOS를 사용하고 있으며, 변형 속도에 따른 Ngo가 제안한 식 (7),(8)에 의해 고려되었다 (Ngo et al., 2007).

$$DIF = \frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1.026\alpha} \quad \text{for } \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_1 \quad (7)$$

$$DIF = \frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = A_1 \ln(\dot{\epsilon}) - A_2 \quad \text{for } \dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_1 \quad (8)$$

여기서,

f'_{cd} = 동적 최대 응력(MPa)

f'_{cs} = 정적압축강도(MPa)

$\dot{\epsilon}$ = 변형률속도

$\dot{\epsilon}_s = 30 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$

$\alpha = 1/(20 + f'_{cs}/2)$

$\dot{\epsilon}_1 = 0.0022f'^2_{cs} - 0.1989f'_{cs} + 46.137$

$A_1 = -0.0044f'_{cs} + 0.9866$

$A_2 = -0.0128f'_{cs} + 2.1396$

철근을 묘사하기 위해 사용한 재료 모델은 Piecewise Linear Plasticity Model(MAT_024)로, MAT_010과 마찬가지로 동적증가계수 DIF를 철근의 항복강도에 곱해 줌으로써 동적 하중에 대한 재료 거동을 효율적으로 고려할 수 있는 모델이다(Kim et al., 2011; LSTC, 2007).

콘크리트 및 강재와 같이 전단탄성계수가 큰 구조재료를 휨부재로 사용할 경우, 전단변형에 의한 처짐은 무시

Fig. 9 Damage process of NW target during breach

할 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 시트 재료모델은 전단 변형이 고려된 Orthotropic Elastic Model (MAT_002)을 사용하였고 FRP와 콘크리트를 완전 부착으로 가정하여 부착효과를 무시하고 해석을 수행하였다. (Lee et al., 2011; Kim et al., 2011; LSTC, 2007) Fig. 9는 LS-DYNA를 이용한 유한요소해석에서 NW 부재의 시간에 따른 파괴 양상을 나타낸 것이다.

3.4. 국부 손상 비교

LS-DYNA 프로그램과 예측식을 이용하여 얻은 결과 값을 실험 결과와 비교분석하였다. Fig. 10, 11은 LS-DYNA 및 실험에서 스폴, 브리치 직경의 측정 방법과 비교결과를 보여주고 있다. 접촉 발파로 인한 국부손상 정도를 크레틀, 스폴, 브리치로 구분할 때 LS-DYNA로 해석한 결과는 실험의 거시적 거동과 일치하였으며, 스폴과 브리치 직경을 비교한 결과 각각 3%~23%, 4%~30%의 차이가 나타났다. 이러한 점에서 LS-DYNA 프로그램을 이용하여

(a) Experiment

(b) FEA simulation

Fig. 10 Spall and breach results

크레틀, 스폴, 브리치의 직경 및 깊이에 대한 개략적인 예측이 가능하며, 폭발하중 하에서 손상부의 거시적 거동을 모사함으로써 부재의 파괴 이력을 나타낼 수 있었다.

Fig. 12에서는 Morishita와 Yamaguchi 예측식으로 얻은 총 손상깊이를 실험결과와 비교하여 나타내었다. $(C_d+S_d)/T$ 의 값이 1보다 크면 브리치 현상이 나타났음을 의미한다. Morishita 식으로 계산한 결과, 모든 경우에서 1보다 큰 값을 나타냈으므로 초고성능 콘크리트 UW series에는 적합하지 않다는 것을 알 수 있다. Yamaguchi 식으로 계산한 결과 SW, PW, UW 모두 브리치 현상이 나타나지 않았다. 이 식은 폴리에틸렌 섬유 보강 콘크리트를 적용한 RC 슬래브의 내폭 성능을 실험하여 얻은 식임으로 휨

(a) Spall diameter

(b) Breach diameter

Fig. 11 Comparisons of local damages

Fig. 12 Comparison of experiment with predict Eqs.

Table 7 Local damage evaluation with Zhang's Eq.

	h (mm)	K ($\times 10^{-4}$)	Damage level
NW	100	1.17	3
SW	100	1.15	3
PW	100	1.26	3
UW	100	3.50	2(II)

인성이라는 변수를 적용하였지만 본 연구에서 적용한 강 섬유와 하이브리드 섬유로 보강된 부재의 총 손상깊이에 대해서는 과소평가되었다.

Zhang 등(2006)의 예측식에서는 k 라는 새로운 계수를 제안하였고 그 값에 따라 내폭등급을 평가하였다. Table 7에서는 NW, SW, PW, UW의 k 값에 의한 내폭등급을 표현하였다. 이 결과는 실험에서 얻은 결과와 일치하는 경향을 나타내었지만 크레틀, 스폴, 브리치 등의 직경과 깊이를 계산할 수 없는 단점이 나타났다.

4. 결 론

- (1) 접촉 폭발하중에 대한 국부 손상은 감섬유 및 PVA 섬유 보강으로 인해 감소하였다. 스폴 직경의 경우 NC 대비 SFRC는 12.9%, PVA FRCC는 26.7%, UHPC는 45.7% 감소하였다. UHPC의 경우, 브리치 현상이 발생하지 않았다. UHPC의 내폭성능이 가장 우월하다는 것을 알수 있다.
- (2) 비선형 재료모델을 적용한 유한요소해석을 통하여 접촉 폭발하중에 의한 국부손상을 예측하였으며, 실험 결과와의 비교를 통하여 사용한 재료모델의 타당성을 검증하였다.
- (3) 국부손상에 대한 상기의 세 가지 예측식은 경험식으로서의 한계가 존재하며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.
 - a. Morishita 예측식을 통하여 접촉 발파 하에서 생긴 크레틀, 스폴, 브리치의 직경과 깊이를 계산할 수 있었지만 일반 콘크리트에만 적용가능하다.
 - b. Zhang 등의 예측식으로 예측된 손상부의 거시적 거동은 실험과 일치하지만 크레틀, 스폴, 브리치의 직경과 깊이를 계산할 수 없다.
 - c. Yamaguchi 예측식은 폴리에틸렌 섬유보강 콘크리트 부재에 대한 예측식으로 toughness factor가 추가적으로 고려되었다. 하지만 다른 종류의

섬유로 보강된 부재에 대한 적용성은 검토되지 않았다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Buchan, P. A. and Chen, J. F., "Blast Resistance of FRP Composites and Polymer Strengthened Concrete and Masonry Structures - A State-of-the-art Review", Composite Part B: Engineering, vol. 38, No. 5-6, 2006, pp.509-522.
2. Cho, S. H., Min, K. H., Kim, Y. J., Yoon, Y. S., "Impact resistance evaluation of RC beams strengthened with carbon FRP sheet and steel fiber", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 22, No. 5, 2010, pp.719-725. (in Korean)
3. FMB Zurich, Forschungsinstitut fur militarisches Bautechnik Zurich, FMB 79-13, 1979.
4. Ha, J. H., Yi, N. H., Kim, S. B., Choi, J. K., Kim, J. H., "Experimental study on blast resistance improvement of RC panels by FRP retrofitting", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 22, No. 1, 2010, pp.93-102. (in Korean)
5. 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)
6. Kim, S. W., Kang, S. T., Han S. M., "Characteristics and application of ultra high performance cementitious composite", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 18, No. 1, 2006, pp.16-21. (in Korean)
7. Kim, Y. W., Min, K. H., Yang, J. M., Yoon, Y. S., "Flexural and impact resisting performance of HPFRCCs using hybrid PVA fibers", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 21, No. 6, 2008, pp.705-712. (in Korean)
8. Kraus, D., Roetzer, J. and Thoma, K., "Effect of High Explosive Detonations on Concrete Structures", Nuclear Engineering and Design, vol. 150, No. 2-3, 1994, pp.309-314.
9. 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)
10. Livemore Software Technology Corporation(LSTC), LS-DYNA, Keyword User's Manual Version971, 2007.
11. Lonnquist, L., "The Effects of High Explosives in Contact with Reinforced Concrete Plates", Proceedings

- of the 6th International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures, 1993, pp.262-266.
12. Min, K. H., Lee, J. Y., Kim, M. H. and Yoon, Y. S., "Behaviors of Concrete Segmented Composites Using Polymer Mortar Under Static and Impact Loadings", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 15, No. 5, 2011, pp.170-177. (in Korean)
 13. Morishita, M., Tanaka, H., Ando, T. and Hagiya, H., "Effects of Concrete Strength and Reinforcing Clear Distance on the Damage of Reinforced Concrete Slabs subjected to Contact Detonation", Concrete Research and Technology, vol. 15, No. 2, 2004, pp.89-98. (in Japanese)
 14. Morishita, M., Tanaka, H., Ito, T. and Yamaguchi, H., "Damage of Reinforced Concrete Slabs subjected to Contact Detonations", Journal of Structural Engineering, vol. 46A, 2000, pp.1787-1797. (in Japanese)
 15. Ngo, T., Mendis, P. and Krauthammer, T., "Behavior of Ultrahigh-Strength Prestressed Concrete Panels Subjected to Blast Loading", Journal of Structural Engineering, vol. 133, No. 11, 2007, pp.1582-1590.
 16. Okayama, P., Taketa, J., Kazuo, F., Akira, Y., Ken, T., "Fracture of RC Slabs Subjected to Contact Detonation", Journal of the Industrial Explosives Society, vol. 43-1, 1982, pp.156-167. (in Japanese)
 17. Schenker, A., Anteby, I., Gal, E., Kivity, Y., Nizri, E., Sadot, O., Michaelis, R., Levintant, O. and Ben-Dor, G., "Full-scale Field Tests of Concrete Slabs subjected to Blast Loads", International Journal of Impact Engineering, vol. 35, No. 3, 2008, pp.184-198.
 18. 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.
 19. Silva, P. F. and Lu, B., "Improving the Blast Resistance Capacity of RC Slabs with Innovative Composite Materials", Composite Part B: Engineering, vol. 38, No. 5-6, 2007, pp.523-534.
 20. Takeda, J., Hiroyuki, T., Kazuo, F., Toshiaki, K., Koli, I., "Deformation and Fracture of RC Slabs Subjected to Detonation", Civil Engineering Research Report, vol. 16, 1976, pp.67-73. (in Japanese)
 21. 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.
 22. Wu, C., Oehlers, D. J., Rebstrost, M., Leach, J. and Whittaker, A. S., "Blast Testing of Ultra-high Performance Fibre and FRP-retrofitted Concrete Slabs", Engineering Structures, vol. 31, No. 9, 2009, pp.2060-2069.
 23. Yamaguchi, M., Murakami, K., Takeda, K. and Mitsui, Y., "Blast Resistance of Polyethylene Fiber Reinforced Concrete to Contact Detonation", Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 9, No. 1, 2011, pp.63-71.
 24. Zhang, X., Yang, X., Chen, Z. and Deng, G., "Explosion Spalling of Reinforced Concrete Slabs with Contact Detonations", Journal of Tsinghua University(Science & Technology), vol. 46, No. 6, 2006, pp.765-768. (in Chinese).

Received : 06/29/2012

Revised : 09/17/2012

Accepted : 10/22/2012

요 지

본 연구에서는 다양한 RC 슬래브의 접촉 발파 실험을 수행하여 내폭 성능을 평가하였다. RC 슬래브의 내폭 성능 향상을 위해 섬유 보강과 외부 CFRP 시트 보강을 도입하였다. 폭발하중 실험은 2000×1000×100mm RC 슬래브를 제작하였고, 일반 콘크리트와 강섬유 보강 콘크리트, 하이브리드 PVA 섬유 보강 시멘트 복합체, 초고성능 콘크리트를 적용하였다. 접촉 발파로 생긴 RC 슬래브의 손상 정도를 크레틀, 스폴과 브리치의 직경과 깊이로 평가하였다. 실험 결과를 LS-DYNA 유한요소해석 프로그램과 Morishita 등의 예측식으로 검증하고 비교분석하였다. 분석 결과, LS-DYNA 프로그램을 이용하여 크레틀, 스폴, 브리치의 직경 및 깊이에 대한 개략적인 예측이 가능하며, 폭발하중 하에서 손상부의 거시적 거동을 모사함으로써 부재의 파괴 이력을 나타낼 수 있었다. 국부 손상에 대한 세가지 예측식이 소개되어 있으나 경험식으로써의 한계가 존재하며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

핵심 용어 : 접촉 발파, CFRP 시트, 하이브리드 PVA 섬유보강 콘크리트, 강섬유 보강 콘크리트, 초고성능 콘크리트, 크레틀, 스폴, 브리치, LS-DYNA