

# 복합 폭발하중을 받는 GFRP 보강 RC 벽체 구조물의 비선형 충격 손상거동 해석

## Analysis of impact damage behavior of GFRP-strengthened RC wall structures subjected to multiple explosive loadings

노 명 현\* 이 상 열\*\* 박 대 효\*\*\*

Noh, Myung-Hyun Lee, Sang-Youl Park, Taehyo

### ABSTRACT

In this paper, the analysis of impact damage behavior of a reinforced concrete structure that undergoes both a shock impulsive loading and an impact loading due to the air blast induced from an explosion is performed. Firstly, a pair of multiple loadings are selected from the scenario that an imaginary explosion accident is assumed. The RC structures strengthened with glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites are considered as a scheme for retrofitting RC wall structures subjected to multiple explosive loadings and then the evaluation of the resistant performance against them is presented in comparison with the result of the evaluation of a RC structure without a retrofit. Also, in order to derive the result of the analysis similar to that of real explosion experiments, which require the vast investment and expense for facilities, the constitutive equation and the equation of state (EOS) which can describe the real impact and shock phenomena accurately are included with them. In addition, the numerical simulations of two concrete structures are achieved using AUTODYN-3D, an explicit analysis program, in order to prove the retrofit performance of a GFRP-strengthened RC wall structure.

### 요 약

본 논문에서는 폭발하중으로 발생하는 폭풍파의 충격하중과 폭풍파로 초래된 파편의 충돌하중을 동시에 받는 RC 벽체 구조물의 비선형 충돌 손상거동 해석이 수행된다. 이를 위해 먼저 가상 폭발사고 시나리오로부터 RC 콘크리트 구조물에 충격과 충돌 하중이 복합적으로 작용하는 경우를 선정한다. 폭발하중으로 인한 구조물의 저항성능을 확보하기 방안으로는 GFRP 재료를 보강하는 경우가 고려되고, GFRP 무보강 RC 구조물과 보강성능을 비교하여 제시한다. 또한, 막대한 시설과 비용 투자가 요구되는 폭발실험과 근접한 해석을 도출하기 위하여 실제 충격과 충돌 현상을 정확하게 묘사한 구성방정식과 상태방정식을 포함시킨 정교한 해석을 수행한다. 폭발하중과 같은 순간적인 동적 문제를 해석하기 위하여 외연적 고속충돌 해석 프로그램인 AUTODYN-3D을 활용하여 두 가지 대상구조물에 대한 수치 모의실험을 수행하고 GFRP로 보강된 RC 벽체 구조물의 보강성능을 입증한다.

\* 정회원, 한양대학교, 토목공학과, 박사과정

\*\* 정회원, 한양대학교, 토목공학과, BK계약교수

\*\*\* 정회원, 한양대학교, 토목공학과, 부교수

## 1. 서 론

TNT 등의 폭발로 인한 폭발하중(explosive loading)은 아주 짧은 시간 동안 인근 구조물에 막대한 충격하중(shock induced loading)을 가하고, 동시에 발생하는 폭풍파(air blast)의 영향으로 폭발물의 파편(fragments)과 폭발물 주위의 잠재적인 투사체들을 표적(target) 구조물에 날려버릴 수 있는 충돌하중(impact loading)까지 초래한다. 따라서 이러한 폭발하중(explosive loading)에 노출된 구조물은 고에너지의 충격압력과 고운동량의 충돌하중을 동시에 저항할 수 있도록 폭발 및 운동 에너지를 충분히 흡수할 수 있어야 한다. 콘크리트의 경우 다양한 배합설계로부터 강도를 쉽게 향상시킬 수 있고 보강철근을 적절히 배근할 경우 RC 구조물의 강성과 연성능력을 충분히 향상시킬 수 있어 타 건설재료에 비해 폭발하중에 대한 저항성능을 쉽게 개선할 수 있다. 그러나 이것은 구조물 설계단계에서나 가능한 일로서 기 건설된 콘크리트 구조물의 경우는 다른 방법을 통한 저항성능을 향상시켜야 한다. 가능한 방법 중의 하나로서 현재 토목 및 건축 구조물의 보강재료로 널리 사용되고 있는 유리섬유(이하 GFRP)를 구조물에 부착하여 보강하는 경우를 고려할 수 있다. 이에 본 논문에서는 가상 폭발사고 시나리오를 면밀하게 분석하여 기 건설된 RC 콘크리트 구조물이 충격과 충돌 하중에 복합적으로 노출되는 표적 구조물인 경우 GFRP로 부착하여 보강하고 폭발하중으로부터 소요 저항성능을 확보할 수 있을지 여부를 수치적으로 평가하여 제시하고자 한다. 특히, 본 연구에서는 연구의 특성상 실험적 평가를 수행할 경우, 막대한 시설과 비용 투자가 요구된다는 점과 사실상 폭발 실험을 민간 산업영역에서 자유롭게 수행할 수 없다는 점에 착안하여, 실험을 수행하지 않더라도 실제 폭발로 인한 충격과 충돌 현상을 정확하게 묘사하기 위하여 고변형률과 고변형률 속도가 고려된 구성방정식을 포함시키고, 밀도변화에 따른 충격과 전파와 이로 인한 재료 변형을 묘사할 수 있는 상태방정식을 포함시킨 정교한 해석을 수행하게 된다. 순간적으로 급격히 작용하는 폭발하중에 의한 구조물의 동적 해석을 수행하기 위해서는 외연적(explicit) 시간적분법을 기반으로 개발된 유한요소해석 프로그램인 AUTODYN-3D[1]을 통하여 수치실험이 수행되고 GFRP로 보강된 RC 벽체 구조물의 보강성능이 입증되어진다.

## 2. 비선형 충돌손상 거동 해석

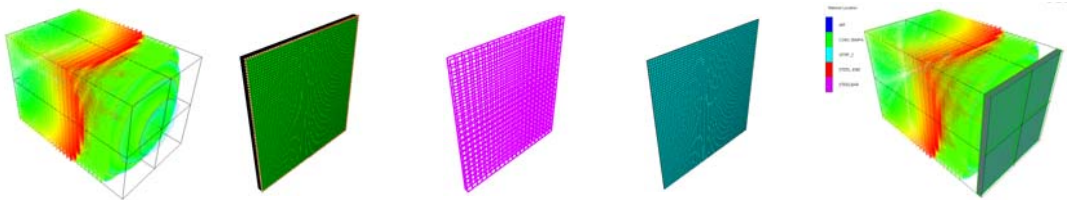
### 2.1 폭발사고로 인한 복합하중 시나리오

본 연구에서는 418.3mm의 반경을 갖는 500kg 상당의 구형 TNT가 지표면으로부터 1,750mm, 표적 구조물로부터 5,000mm 떨어진 지점에서 폭발하는 경우를 가상 폭발사고로 고려하였다. TNT 폭발로 인해 고에너지의 압력파가 폭풍파(air blast) 형태로 1.75ms 후에 표적 구조물에 도달하여 극심한 충격 손상을 지속적으로 가하고 3.05ms 시점에 직경이 100mm인 원주형 파편이 표적 구조물에 100m/s의 속도로 충돌하여 국부적인 충돌손상을 가하는 복합적 폭발하중 시나리오를 구성하였다.

### 2.2 표적 구조물의 구조와 해석 solver의 커플링

해석 대상 구조물은 폭 3,200mm, 높이 3,500mm, 두께 150mm인 철근 콘크리트 벽체로서 그림 1과 같이 콘크리트 내부에는 직경이 13mm인 철근이 150mm 간격으로 폭과 높이 방향으로 각각 인장과 압축력에 모두 저항할 수 있도록 배근되어 있다. 그리고 콘크리트 벽체 뒷면은 벽체와 동일한 크기의 GFRP가 완전 부착되어 있다. 본 연구에서는 해석시간의 효율적 단축을 위해  $y=0$ ,  $z=0$ 인 두 면에 대칭인 실제 3차원 모델을 1/4 모델을 축소하여 해석을 수행하였다. 또한 표적 구조물에서 5,000mm 떨어진 곳에서의 TNT 폭발은 3차원 해석에 앞서 2차원 복합 물질(multi-material) Euler solver를 통해 표적 구조물 지점까지의 폭풍파 해석을 수행하고, 이 후 TNT와 공기를 3차원 실제

공간 상에 그대로 맵핑하여 고에너지의 이상기체로 해석을 수행하는 Euler-FCT (Flux Corrected Transport) solver를 적용하여 해석시간을 크게 단축시켰다. 표적 구조물과 보강재는 손상 거동을 정확히 관측하기 위해 Lagrange solver를 적용하였고 폭풍파의 충격압을 고려하기 위해 Euler solver와 커플링하였다. 특히, 효율적인 Lagrange solver를 구성하기 위해 콘크리트의 경우는 3D 솔리드 요소로, 철근은 빔 요소로, GFRP는 복합재를 적층한 셸 요소로 각각 모델링하였다. 또한 극심한 변형으로 인한 매쉬 얽힘(tangling) 현상을 제거하기 위하여 기하학적 순간 변형률에 근거한 요소소진 알고리즘을 적용하였고, 파편이 표적 구조물에 충돌하는 경우 접촉(contact) 알고리즘을 적용하였다.



(a) 폭풍파 (Euler) (b) 콘크리트 (솔리드) (c) 철근 (빔) (d) GFRP (셸) (e) 전체 해석 대상

그림 1. 해석 대상의 구조

### 2.3 해석에 사용된 재료모델

본 연구에서는 콘크리트 구성모델로서 Riedel 등[2]에 의해 정립된 RHT 콘크리트 모델을 적용한다. RHT 모델은 일반적인 취성재료를 분석하기 위한 모델로서 압력경화, 변형률 경화, 변형률 속도 경화, 누적손상, 변형률 연화 등과 같은 여러 특징을 도입할 수 있는 장점이 있다. 또한, 이 모델에서는 식 (1)~(3)로서 제시되는 탄성 한계면( $Y_{elastic}$ ), 재료 파괴면( $Y_{fail}$ ), 파손된 재료의 잔류 강도면( $Y_{resid}^*$ )과 같은 세 강도 면을 도입하여 충격과 충돌을 받는 콘크리트 재료의 비선형적 손상거동을 효과적으로 묘사할 수 있다.

$$Y_{elastic} = Y_{fail} \cdot F_{elastic} \cdot F_{CAP(p)} \quad (1); \quad Y_{fail} = Y_{TXC(p)} \cdot R_3(\theta) \cdot F_{RATE(\dot{\epsilon})} \quad (2); \quad Y_{resid}^* = B \cdot p^* \cdot M \quad (3)$$

식 (1)에서  $F_{elastic}$ 은 파괴면 강도에 대한 탄성 강도의 비,  $F_{CAP(p)}$ 은 정수압력( $p$ ) 상태의 탄성 편차 응력을 제한하는 함수이며, 식 (2)에서  $Y_{TXC} = f_c [A(p^* - p_{spall}^* F_{RATE(\dot{\epsilon})})^N]$ 이고, 여기서,  $f_c$ 는 압축강도,  $A$ 는 파괴면 상수,  $N$ 은 파괴면 지수,  $p^*$ 는  $f_c$ 로 정규화한 압력,  $p_{spall}^* = p^*(f_t/f_c)$ ,  $F_{RATE(\dot{\epsilon})}$ 은 변형률 속도 함수,  $R_3(\theta)$ 는 날줄비 (meridian ratio)  $Q_2$ 와 제 2, 3 불변량의 함수로서 모델의 세 번째 불변량의존성을 정의하며,  $\theta$ 는 콘크리트 입자 사이의 각도,  $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도이며, 식 (3)에서  $B$ 는 잔류 파괴면 상수,  $M$ 은 잔류파괴면 지수이다.

충격 및 충돌 하중 상태의 보강 철근의 비선형 거동을 정확히 묘사하기 위해서는 철근의 변형률 경화, 변형률 속도 경화, 열적 연화효과가 고려되어야 한다. 본 연구에서는 식 (4)와 같이 재료의 항복응력( $Y$ )을 속도 의존적, 탄소성 거동으로 잘 묘사할 수 있는 John-Cook 모델[3]을 채택하여 콘크리트에 묻힌 철근을 모델링 한다.

$$Y = [Y_0 + B\epsilon_p^n][1 + C \log \epsilon_p^*][1 - T_h^m] \quad (4)$$

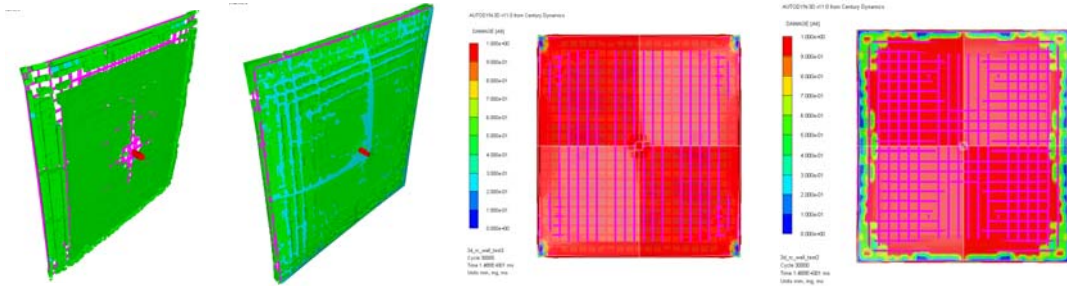
여기서,  $Y_0$ 는 초기 항복강도,  $\epsilon_p$ 와  $\epsilon_p^*$ 는 각각 소성 변형률과 정규화된 유효 변형률 속도를 의미하고,  $B$ ,  $C$ ,  $n$ ,  $m$ 은 재료상수,  $T_h$ 는  $T_h = (T - T_{ref}) / (T_{melt} - T_{ref})$ 로서 구해지는 상온(homologous)온도이며, 여기서  $T_{ref}$ 와  $T_{melt}$ 는 각각 기준 및 용점온도를 나타낸다.

콘크리트에 완전 부착하여 거동하는 것으로 모델링 하는 GFRP 재료는 직교이방성 재료로서 식 (5)와 같이 선형탄성 거동을 하는 것으로 가정하고, 주변형률 방향의 임계 변형률 도달 후 급격한 취성파괴를 겪는 것으로 모델링한다.

$$[\sigma]^{n+1} = [\sigma]^n + [C][\epsilon] \Delta t \quad (5)$$

여기서,  $[C]$ 는 9개의 독립된 성분을 갖는 직교이방성 판의 재료강성 행렬을 나타낸다.

### 3. 수치 실험 결과



(a) GFRP 무보강 (파손) (b) GFRP 보강 (파손) (c) GFRP 무보강 (손상) (d) GFRP 보강 (손상)  
그림2. RC 벽체 구조물의 충격 및 충돌 파손 및 손상 상태 (26.64ms)

### 4. 결과 분석 및 결론

본 연구에서는 충격 및 충돌과 같은 복합 폭발 하중에 노출된 콘크리트 구조물의 비선형 충격 손상거동 해석을 수행하였다. 폭발하중에 대한 저항성능을 향상시키기 위한 방안으로 GFRP를 보강을 고려하였고, GFRP 보강 유무에 따른 성능평가를 수행하기 위해 두 경우에 대한 수치 모의실험을 수행하였다. 실험 결과, GFRP를 보강하지 않은 경우가 보강한 경우에 비해 파손상태가 더욱 극심하게 발생되었다. 초기 폭발과가 지배적인 상태(1.75ms~3.05ms)에서는 두 구조물 모두 폭발과로 인한 충격압이 콘크리트 벽체에 전체적으로 전달되어 전반적(global) 파손과 손상이 야기된다. 이러한 극심한 손상과정에서 파편이 표적 구조물에 충돌하는 경우, GFRP를 보강하지 않은 구조물은 파편의 충격을 억제할 수 있는 충분한 제어력이 확보되지 못해 파편이 벽체를 관통하는 현상이 발생된다. 이 경우 구조물 내부의 시설과 인명은 보호받지 못하는 상황이 발생되어 시급한 대책이 요구된다. 그러나 GFRP를 보강한 경우 분쇄된 콘크리트와 보강된 GFRP가 파편충돌에 동시에 저항할 수 있게 되어 폭발과로 인한 벽체의 극심한 파손과 손상에도 불구하고 파편의 운동에너지를 흡수할 수 있어 기대했던 보강성능이 나타난다. 이는 GFRP 보강시 파편 제어력이 확보되어 파편 관입에 의한 마찰에너지, 콘크리트의 파손 후 압축시 잔류강도에 의한 파괴에너지, GFRP 재료의 변형에너지 등이 운동에너지 흡수에 기여한 것으로 분석된다.

### 감사의 글

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구비조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-311-D00862).

### 참고문헌

1. Century Dynamics, AUTODYN Theory Manual, 2003.
2. Riedel W., Thoma K. and Hiermaier S., "Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes," Proceedings of 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures, 1999, pp. 315-322.
3. Johnson G.R. and Cook W.H., "A Constitutive modeling and data for metals subjected to large strain rates and high temperatures," Proceedings of 7th international symposium on ballistics, 1983, pp. 541-577.