

복합신소재로 보강된 철근 콘크리트 구조물의 충돌손상거동 평가

Evaluation of Impact Damage Behavior of a Reinforced Concrete Wall Strengthened with Advanced Composite Materials

노명현 Noh, Myung-Hyun*[†] · 이상열 Lee, Sang-Youl**

(Received July 6, 2010 ; Revised August 7, 2010 ; Accepted August 17, 2010)

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 advanced composite materials (ACM) 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 ACM-strengthened RC wall structure.

요 지

본 논문에서는 폭발하중으로 발생하는 폭풍파의 충격하중과 폭풍파로 초래된 파편의 충돌하중을 동시에 받는 철근 콘크리트 벽체 구조물의 비선형 충돌 손상거동 해석이 수행된다. 이를 위해 먼저 가상 폭발사고 시나리오로부터 철근 콘크리트 구조물에 충격과 충돌 하중이 복합적으로 작용하는 경우를 선정한다. 폭발하중으로 인한 구조물의 저항성능을 확보하기 방안으로는 복합신소재를 보강하는 경우가 고려되고, 복합신소재를 보강하지 않은 철근 콘크리트 벽체 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-3D를 활용하여 두 가지 대상구조물에 대한 수치 모의실험을 수행하고 복합신소재로 보강된 철근 콘크리트 벽체 구조물의 보강성능을 입증한다.

Key Words: ACM(복합신소재), impact damage(충돌손상), air blast(폭풍파), RC wall(철근 콘크리트 벽체)

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물은 보강철근의 배근량을 증가시키고 콘크리트의 성능을 개선시킬 경우 일정 수준의 폭발하중에도 구조물의 강성과 연성능력이 충분히 발휘될 수 있다. 따라서 방호 구조물이나 폭발사고위험이 내포된 구조물 설계단계에서는 대부분 철근콘크리트를 기본 골조로 설계가 수행된다. 그 이유는 철근과 콘크리트를 사용한 철근 콘크리트 구조물은 단일 건설재료로 구성된 철골조와 같은 구조물 등에 비해 폭발하중에 대한 저항성능을 쉽게 개선할 수 있을 뿐만 아니라, 폭파 시 발생하는 고압/고열에 대한 저항성능도

상대적으로 우수하기 때문이다. 그러나 철근 콘크리트의 구조물의 경우, 소요성능을 확보하기 위해서는 구조물의 두께를 불가피하게 증가시켜야 하며 여기에 투입되는 재료의 양도 크게 증가될 수밖에 없다. 또한, 폭발에 노출된 구조물 전면에서 전달된 충격파는 후면의 자유면에 반사되어 인장파를 형성시키고 구조물의 후면에 균열과 파쇄(spalling) 현상을 야기한다. 이로 부터 발생된 파편들은 구조물 내부에 피신해 있는 인명과 시설에 큰 손실을 입히며 폭발하중에 대한 구조물의 초기 소요성능을 달성하지 못하게 된다. 따라서 과다설계를 지양하며 일정 수준의 소요성능을 확보할 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 가능한 방법 중의 하나

*† 정회원.포항산업과학연구원 강구조연구소 선임연구원, 공학박사, 교신저자(mhnoh@rist.re.kr)

** 정회원.중부대학교 토목공학과 전임강사, 공학박사

로 구조물의 보강재료로 뛰어난 성능을 갖는 복합신소재(ACM)를 철근 콘크리트 구조물에 부착하여 보강하는 경우를 고려할 수 있다. 철근 콘크리트 벽체의 후면에 부착된 복합신소재는 벽체와의 합성거동을 통해 전반적인 강도와 강성을 증진시킬 수 있을 뿐만 아니라, 폭발 하중을 받는 철근 콘크리트 구조물의 가장 큰 문제점으로 지적되는 파편 억제효과를 동시에 발휘할 수 있게 한다.

본 논문에서는 먼저 철근 콘크리트 구조물 인근에서 폭발로 발생할 수 있는 동적하중의 종류와 특성을 제시하고 이러한 동적하중이 철근 콘크리트 구조물에 작용하게 되는 경우에 구조물에서 발생하는 극도의 비선형 거동 특성과 손상 모드의 종류를 간략히 고찰한다. 다음으로, 이러한 복잡한 충돌손상 현상을 시뮬레이션을 통한 검토를 수행하기 위한 복합신소재 보강 철근 콘크리트 구조물의 해석모델에 대한 이론적 배경을 간략히 소개한다. 이후, 폭발로 인해 발생할 수 있는 복합 폭발하중 시나리오를 선정하고 이론적 배경을 토대로 모델링된 해석대상 구조물의 충돌해석 과정을 통해 복합 폭발하중에 노출된 복합신소재 보강 철근 콘크리트 구조물이 폭발파에 의한 압력과 비산된 파편에 의해 소요성능을 확보할 수 있는지 검토한다. 소요성능은 해석결과로 나타난 충격 손상모드와 파편억제 성능을 통해 평가하여 제시하며, 궁극적으로 충돌 보강설계의 하나의 방안으로서 복합신소재의 적용성을 평가하고자 한다.

2. 충돌해석의 기본적인 특징

2.1 폭발로 발생된 동적하중의 특성

수류탄, 고에너지 폭탄, 미사일 등 폭발로 인하여 발생하는 동적하중 작용은 폭발파(blast wave)로 인한 하중작용과 파편충돌로 인한 하중작용으로 나누어 생각할 수 있다. 폭발현상으로 인해 구조물의 동적하중을 이해하기 위해서는 폭발로 발생하는 폭발파 및 반사파 형성과 더불어 파편생성 과정에 대한 물리적 이해가 선행되어야 한다. 대기 또는 지표면 폭발로 인해 표적 구조물에 영향을 미치는 동적하중에 대한 연구는 재래식 무기효과 또는 특성(Conventional weapon load effects or characteristics)을 면밀히 검토하여 군사적 방호 시설이나 민간 차원의 대피시설을 효율적으로 구축하기 위한 목표로 방위산업분야에서 주도적인 연구가 수행되어 왔다. 방호구조물의 구조적 안전설계를 위해 고려해야 하는 무기효과, 즉 수류탄, 고에너지 폭탄, 미사일 등 폭발로 인하여 구조물에 영향을 미칠 수 있는 동적하중은 일반적으로 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 1) 폭발로 인해 유체의 매질로부터 급격히 방출되는 고 에너지에 의한 폭발파 충격 하중

- 2) 폭발로 발생된 파편이나 고속으로 표적을 타격하는 투사체의 충격 하중
- 3) 폭발로 발생된 파편이나 고속으로 표적을 타격하는 투사체의 충돌 하중

여기서 1)과 2)의 충격하중은 철근 콘크리트 구조물의 전반적인 거동에 영향을 미치게 되며 3)의 충돌 하중의 경우는 철근 콘크리트 벽체 또는 슬라브에 파편 또는 투사체의 관입과 관통과 같은 국부적인 거동에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 세 가지의 동적하중작용을 받는 철근 콘크리트 구조물을 대상으로 하였다.

1)에서 제시한 폭풍과 충격하중은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 대기압으로부터 최대압력(P_{so}^+)으로 급상승한 다음 대기압 이하로 급하강한 후 서서히 대기압 상태로 회복하는 특징을 보인다. 철근 콘크리트 구조물에는 정압단계의 최대압력이 구조물의 거동에 중요한 영향을 미치며 부압단계에 의한 충격량은 정압단계의 충격량에 비해 상대적으로 작기 때문에 그 영향이 미미하다.

철근 콘크리트 구조물과 거리를 두고 폭발이 발생하는 경우의 폭풍과 하중은 Fig. 2와 같이 대기 중이나 지표면에서 폭발이 발생하는 두 가지 경우를 고려할 수 있다. 대기 중 폭발이 발생하는 경우, 폭발파는 방호구조물에 도달하기 전에 지표면에 의한 반사파와의 상호작용으로 마하선단(Mach front)이 형성된다. 마하선단의 높이는 폭발이 발생하는 지점에서 멀어질수록 증가하며 입사파, 반사파, 마하전단이 겹치는 3중점의 경로와 같다. 방호구조물의 높이가 3중점의 경로보다 낮은 경우 균일한 폭풍과 하중을 받게 된다. 이와는 달리, 지표면 폭발의 경우, 폭발이 발생한 지점에서부터 입사파는 반사파와 합쳐져서 반구형의 단일파를 형성하면 전파된다. 방호구조물 설계시 폭풍과 선단은 균일압력으로 가정한다. 지표면에서의 폭발이 대기 중에서의 폭발보다 폭풍과 효과가 큰 것으로 알려져 있다 (강영철 2005).

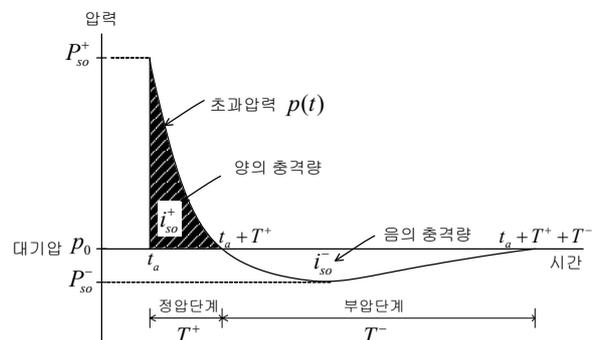


Fig. 1 폭발파의 전형적인 압력-시간 곡선

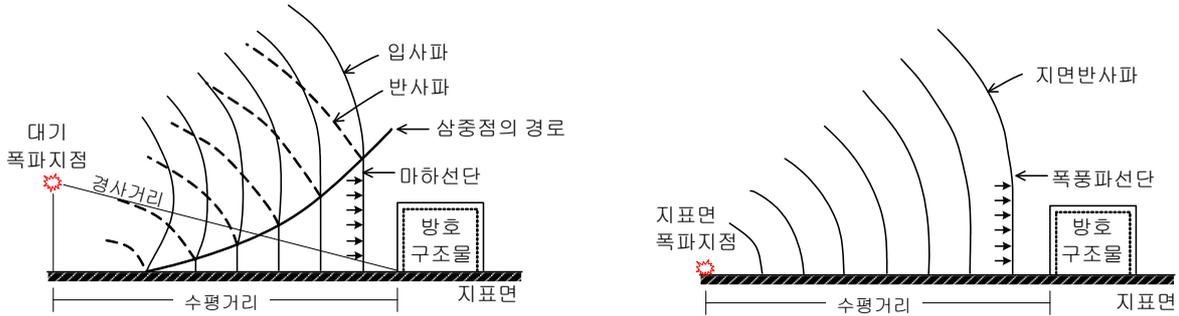


Fig. 2 대기 폭발 및 지표면 폭파에 의한 폭풍파 전파

(폭풍파와 더불어 폭발로 인한 동적하중의 또 다른 예가 2)와 3)에서 제시한 고속 파편에 의한 충격 및 충돌하중이다. 폭발에 따른 폭탄의 금속 외피 파열과 폭풍파로 인해 비산하는 주위 부속 물체들은 방호구조물에 직접 혹은 간접적인 파편하중으로 작용하여 피해를 입힐 수 있다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 작약의 폭발시 발생하는 금속 외피는 매우 많은 수의 파편들로 쪼개지고 형상도 매우 임의적일뿐만 아니라 질량은 미세한 가루로부터 수 kg까지 매우 다양하게 발생된다. 이러한 파편들의 동적하중은 파편의 형태, 질량, 초기 속도, 폭발지점과 구조물 사이의 거리 및 구조물에 대한 파편의 입사방향 등과 관련이 있으며 공기마찰에 의해 파편속도가 감소되기는 하지만 구조물을 관통하고 손상을 입힐 수 있는 운동량을 확보한 무거운 파편의 경우에도 약 1,000m이상의 거리에 까지 날아갈 수 있는 것으로 알려져 있다. 상대적으로 무거운 파편이 저속으로 비행한 후 구조물에 타격을 가하는 경우 구조물에 순간적인 충격하중으로 작용하게 되고 더욱이 날카로운 파편이 고속으로 타격을 가하는 경우 구조물에 국부적인 손상을 초래할 수 있는 충돌하중으로서 작용하게 되므로 이러한 파편하중들은 폭풍파와 더불어 콘크리트 충돌해석에 중요한 동적하중으로 고려해야 한다.

한편, 폭발과 무관하게 KEP와 같은 투사체의 대상 구조물에 대한 직접적인 공격은 방호 구조물 설계에서 반드시 고려해야 하는 가혹한 위협 시나리오 중의 하나이다. 이 경우는 폭풍파를 수반하지는 않지만 투사체의 크기, 질량, 타격속도 및 각도 등에 따라 구조물에 충격하중으로 작용하여 전반적인 거동에 영향을 줄 뿐만 아니라 관입 및 관통을 유발하는 충돌하중으로 작용하여 방호구조물 내부의 인명과 시설에 직접적인 타격을 가할 가능성이 매우 크므로 철근 콘크리트 방호구조물 설계 시 매우 중요하게 검토되어야 하는 항목이다. 이 경우, 투사체의 운동에너지에 따른 관입깊이 등은 철근 콘크리트 방호 구조물에 대한 매우 중요한 설계인자로 고려할 수 있다. 궁극적으로 방호 구조물에 대한 설계는 폭풍파와 파편충돌이 복합적으로 작용되는 가혹한 동적하중 작용을 고려한 비선형 해석은 물론 고속 투사체가 대상 구조물에 충돌하여 관통이 발생하는 경우에 대한 검토가 수반되어야 한다. 본 논문에서는 폭발로 발생한 폭풍파와 이로 인해 초래된 파편 충돌이 대상 구조물에 충돌하는 경우에 대한 연구에 초점을 둔다.

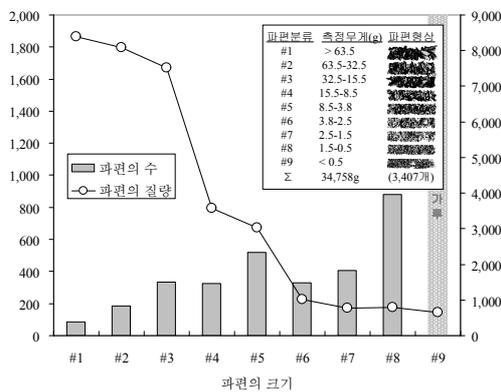


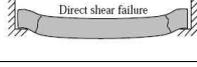
Fig. 3 155mm 포병HE탄(총무게 42.91kg, 작약무게 6.99kg(TNT))의 파편형성 예 (Leppänen, 2002; 강영철 2005)

2.2 동적 하중작용에 의한 충돌손상 특징

동적 하중작용에 의한 철근 콘크리트 구조물의 손상은 파편 및 투사체의 일시적인 충격에 의해서 구조물의 전체적인 거동에 영향을 주는 전반응답과 비교적 고속으로 충돌하는 부분에서 초래되는 충돌손상과 같은 국부응답으로 구분된다.

전반적 응답의 경우는 비교적 무거운 파편 및 투사체가 저속으로 충돌하여 충격하중으로 작용하는 경우로서 충격에너지에 의해 구조물의 전체적인 거동에 영향을 미치게 된다. 이러한 충격하중을 받는 철근 콘크리트 보와 슬라브에서 발생 가능성이 높은 전반적인 충격 손상모드로 다음 Table 1과 같이 분류할 수 있다 (Johansson 2000; Krauthammer 2006). 소성 휨 파괴, 미끄럼 휨 파괴, 전단 파괴의 경우 정적 재하하중을 받는 구조물에서 발생하는 원인과 동일한 메커니즘을 가지는 것으로 고려할 수 있는 반면 동적 전단 파괴와 부재 파괴는 일시적인 충격하중을 받는 구조물에서만 발생하는 파괴모드이다. 특히, 직접 전단 파괴의 경우,

Table 1 충격하중에 의한 전반적인 충격 손상모드

손상모드 종류	발생원인과 메커니즘	관련 내력	전반적 손상 형상
소성 휨 파괴	휨응력에 의한 소성힌지	휨 인장응력	
미끄럼 휨 파괴	휨거동과 관련된 지점의 미끄럼	휨 인장응력	
전단 파괴	휨거동과 관련된 사인장력 및 압축력	사인장력 및 압축력	
동적(직접) 전단 파괴	일시적 충격하중에 의한 관성력 증가	직접 전단력	
부재 파괴	면내 변형 저항에 충분한 강성/강도 증가에 따른 구속효과 (양단고정보/이방향슬라브)	인장력, 압축력 면내 응력	

충격하중이 집중되는 기하학적으로 국부영역에서 발생하기 때문 국부응답으로 고려할 수는 있지만 구조물의 전체적인 거동에 영향을 미치기 때문에 전반응답으로 고려해야 한다. 직접 전단 파괴는 일시적인 하중작용에 의해 휨 변형 발생 전에 순간적으로 발생하는 전단 변형과 관련되어 있다.

국부적 응답의 경우, 비교적 고속인 파편 및 투사체가 일정 수준의 운동량을 가지고 철근 콘크리트 구조물에 충돌하는 경우에 발생한다. 이때, 구조물의 충돌 전면에서는 높은 압축응력이 발생하고 박리(spalling)라고 불리는 국부화된 분화구를 야기한다. 반면, 분화구를 형성할 만큼의 충분한 충돌에너지를 가지고 있지 않은 경우에는 충돌 전면에서 방사균열을 전파시킨다. 충돌 시 발생하는 높은 압축 응력과는 콘크리트 두께에 걸쳐 이동하고 후면에 도달할 때 인장파로서 반사된다. 이러한 인장파는 인장력에 취약한 충돌 후면의 콘크리트에 방사상 균열을 발생시키거나 재료의 파괴를 유발하여 콘크리트 덩어리를 뒤쪽 공간으로 비산시키는 파쇄(scabbing)현상을 발생시킨다. 충돌 후 파편과 투사체는 파편 및 투사체의 특성과 콘크리트의 재료적 특성에 따라 다양한 깊이로 관입이 발생하게 된다. 상대적으로 깊은 관입이 발생한 경우, 콘크리트와 같은 취성재료에서는 투사체의 전면에서 원뿔형상의 균열을 형성하고 뒤이어 편칭 전단에 의한 플러깅과 함께 관통을 발생시키기도 한다 (Li and Chen, 2003). 비교적 고속의 파편 및 투사체가 콘크리트 두께를 통과하기에 충분한 충돌 운동에너지를 가지는 경우 플러깅의 발생 없이 직접 관통이 발생할 수도 있다. Krauthammer (2000)에 따르면 50% 정도의 관입에 도달한 경우 충돌 후면에서 파쇄가 발생하며 강영철 (2005)에 따르면 70%정도의 관입에 도달한 경우는 관통이 발생하는 것으로 보고하고 있다. 이상의 파편 및 투사체 충돌에 의한 국부적 손상의 모드가 Fig. 4에 제시된다.

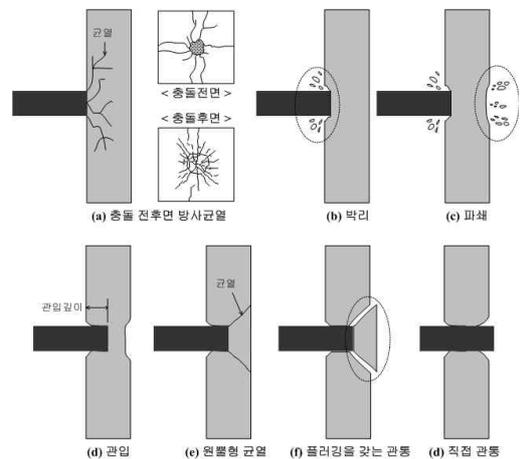


Fig. 4 충돌하중에 의한 국부적인 충돌 손상모드

3. 충돌손상에 대한 복합신소재 효과

폭발로 발생하는 동적하중은 아주 짧은 시간 동안 인근 구조물에 막대한 충격하중을 가하고, 동시에 발생하는 폭발파의 영향으로 폭발물의 파편과 폭발물 주위의 잠재적인 투사체들을 대상 구조물로 향하게 하여 철근 콘크리트 구조물에 심각한 전반적 손상과 국부적 손상을 야기할 수 있음을 앞서 제시하였다. 따라서 이러한 폭발하중에 노출된 구조물은 고에너지의 충격압력과 고운동량의 충돌하중을 동시에 저항할 수 있도록 충격 운동 에너지를 충분히 흡수할 수 있도록 설계되어야 한다.

철근 콘크리트의 경우, 고강도 콘크리트와 보강철근을 적절히 배근함으로써 구조물의 강성과 연성능력을 충분히 향상시킬 수 있어 비교적 타 건설재료에 비해 충돌 저항성을 쉽게 개선할 수 있기는 하지만, 폭발로 인한 복합 하중작용을 받게 되는 경우 충돌 손상을

억제하기 위해 철근을 촘촘히 배근하는 것만으로는 부족하다. 특히, 고속의 파편과 투사체가 콘크리트에 관입되어 관통되는 경우 인명 피해 가능성이 높은 충돌 후면의 콘크리트의 파쇄 현상을 보강 철근망으로 완전히 억제할 수 없다. 또한, 인장 철근량을 과대하게 보강하는 방법은 비용과 시공 측면에서 한계가 따르며 가능하다 하더라도, 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, 탄소섬유와 같은 복합신소재를 구조물에 부착하여 보강하는 방안을 고려할 수 있다. 복합신소재는 뛰어난 인장강도와 인성을 확보할 수 있어 적절한 보강을 통해서 구조물의 전반적인 연성거동을 유도하고 파편의 억제를 도모할 수 있다. 특히 파쇄의 경우는 충돌 후면에서 반사되어 오는 인장파에 의한 재료의 파손이 지배적인 메커니즘이기 때문에 뛰어난 인장강도 성능을 갖는 복합신소재의 보강을 통해 인장에 대한 저항력을 높이는 것은 근본적인 해결책이 될 것이다.

4. 충돌손상 평가 방법 및 이론적 배경

4.1 충돌손상 평가 방법

폭발에 의해 야기되는 폭풍파 또는 파편과 투사체의 충돌하중을 받는 철근 콘크리트 구조물의 응답을 평가하기 위해서는 다양한 방법이 사용될 수 있다. Table 2는 충돌 손상 평가 방법을 개략적으로 분류하고 그 특징을 소개한 것이다.

실험적 또는 해석적 공식은 파편 및 투사체 충돌로 야기되는 그것들의 관입깊이, 관통한계 두께와 관통한계 속도, 파쇄한계 두께 등의 국부적 손상을 평가하는데 이용되는 것들이다. 등가 단자유도 시스템(SDOF 시

스템) 해석을 이용한 평가는 폭풍파 하중뿐만 아니라 파편과 투사체 충격하중으로 인한 구조물의 전체적인 응답 평가에 이용된다. 진동형태의 복잡한 충격하중은 단자유도(MDOF) 시스템을 고려한 동적 해석을 수행해야 정확한 결과를 얻을 수 있지만, 파편 및 투사체의 충격하중과 같은 비진동 하중의 경우, 오직 최대응답만이 요구될 때에는 단자유도(SDOF)를 사용하여도 충분한 해석이 가능하다.

수치모사를 통한 평가방법은 막대한 시설과 비용을 투자하는 실험을 통한 평가방법에 비해서 평가비용이 상대적으로 저렴하고 사고의 위험이 높은 실제 폭발 시험을 수치상으로 구현할 수 있는 방법이기 때문에 초기 실험에 의존하던 대부분의 충돌해석을 대체할 수 있는 유용한 접근법이라 할 수 있다. 특히, 사용된 재료 모델의 매개변수에 대한 정밀한 제어와 수치적 기법들의 적절한 활용을 통해 실험에 버금가는 정밀도를 구현할 수 있는 장점이 있기 때문에 본 논문에서는 이 방법을 통한 복합신소재 보강 철근 콘크리트 구조물의 충돌손상을 평가하도록 한다.

4.2 충돌해석의 재료 모델

본 연구에서는 폭발 및 충돌 실험을 수행하지 않더라도 실제 폭발로 인한 충격과 충돌 현상을 정확하게 묘사하기 위하여 고변형률과 고변형률 속도가 고려된 구성방정식을 포함시키고, 밀도변화에 따른 충격파 전파와 이로 인한 재료 변형을 묘사할 수 있는 상태방정식을 포함시킨 정교한 해석을 수행하게 된다. 충돌해석에 사용된

해석에 사용된 콘크리트 구성모델로서 Riedel et al. (1999), Riedel (2000)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 충돌현상에서 발생하는 여러 특징을 도입할 수 있는 장점이 있

Table 2 충돌손상 평가방법의 분류

평가방법	특징	동적 하중	평가 항목	평가 비용	평가 복잡도	평가 정확도	평가 위험도
1. 실험을 통한 평가	실제 실험을 통한 구현	B,F,P	G,L	고가	보통	정확	위험
2. 공식을 통한 평가	기준에 제시된 실험에 기초한 실험적이나 해석적 공식 이용	F,P	L	적음	단순	보통	없음
3. SDOF 혹은 MDOF 해석을 통한 평가	단일자유도 시스템의 운동방정식을 해석적으로 풀이	B,F,P	G	적음	보통	보통	없음
4. 차트를 통한 평가	2와 3방법의 결과를 도표화	B,F,P	G,L	적음	단순	보통	없음
5. 수치적 모사를 통한 평가	복잡한 재료모델을 도입한 유한요소코드나 하이브리드코드를 통해 수치적으로 재현	B,F,P	G,L	보통	복잡	정확	없음

B: 폭풍파 하중, F: 파편 하중, P: 투사체 하중; G: 전반적 손상; L: 국부적 손상

다. 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.

$$Y_{elastic} = Y_{fail} \cdot F_{elastic} \cdot F_{CAP(p)} \quad (1)$$

$$Y_{fail} = Y_{TXC(p)} \cdot R_3(\theta) \cdot F_{RATE(\dot{\epsilon})} \quad (2)$$

$$Y_{resid}^* = B \cdot p^* \cdot M \quad (3)$$

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 압축 강도, 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 불변량의 의존성을 정의하며, θ 는 콘크리트 입자 사이의 각도, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도이며, 식 (3)에서 B 는 잔류파괴면 상수, M 은 잔류 파괴면 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 속도의존적, 탄소성 거동으로 잘 묘사할 수 있는 John-Cook 모델(Johnson and Cook, 1983)을 채택하여 콘크리트에 묻힌 철근을 모델링 한다.

$$Y = [Y_0 + B\epsilon_p^n][1 + C \log \dot{\epsilon}_p^*][1 - T_H^m] \quad (4)$$

여기서, Y_0 는 초기 항복강도, ϵ_p 와 $\dot{\epsilon}_p^*$ 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 상응(homologous)온도이며, 여기서 T_{ref} 와 T_{melt} 는 각각 기준 및 용점온도를 나타낸다.

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

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

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

4.3. 적용된 충돌해석의 수치기법

철근 콘크리트 구조물의 인근에서 TNT 폭파 시물레

이션은 3차원 해석에 앞서 2차원 복합 물질(multi-material) Euler solver를 통해 폭파지점부터 표적 구조물 지점까지의 폭풍과 해석을 수행하고, 이 후 TNT와 공기를 3차원 실제공간 상에 그대로 맵핑하여 고에너지의 이상기체로 해석을 수행하는 Euler-FCT (Flux Corrected Transport) solver를 적용하여 해석시간을 크게 단축시켰다.

철근 콘크리트 구조물과 복합신소재 보강재는 손상 거동을 정확히 관측하기 위해 Lagrange solver를 적용하였고 폭풍과의 충격압을 고려하기 위한 Euler solver와 커플링하였다. 특히, 효율적인 Lagrange solver를 구성하기 위해 콘크리트의 경우는 3D 솔리드 요소로, 철근은 빔 요소로, 복합신소재는 복합재를 적층한 쉘 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.

순간적인 폭발하중에 의한 구조물의 비선형 동적 해석을 수행하기 위해 복합적(multiple)인 커플링 해석에 적합한 외연적(explicit) 유한요소해석 프로그램인 AUTODYN을 통하여 수치실험을 수행하고 복합신소재로 보강된 철근 콘크리트 구조물의 보강성능을 평가하였다(Century Dynamics, 2007).

5. 충돌 수치 실험

5.1 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 폭풍과 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 Fig. 5에 제시된 바와 같은 복합적 폭발하중 시나리오를 구성하였다.

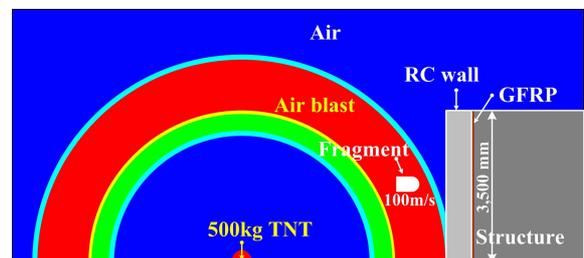


Fig. 5 복합하중 시나리오

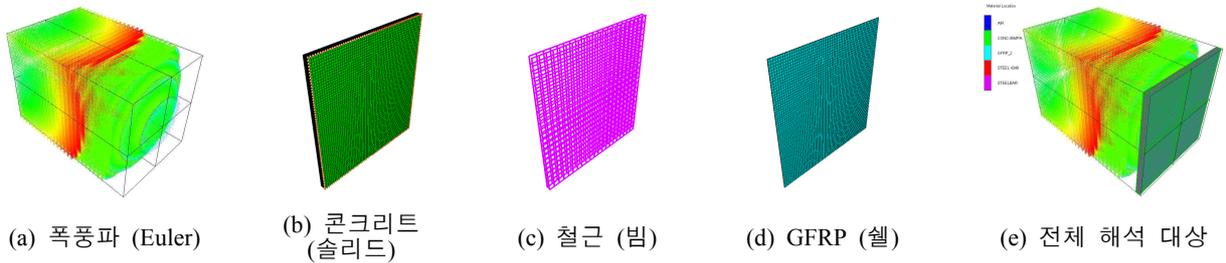


Fig. 6 해석 대상의 구조

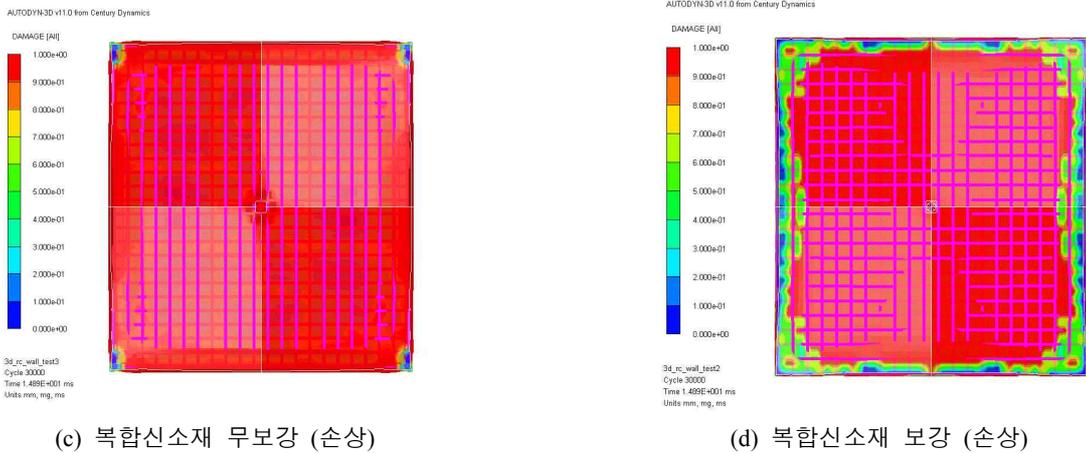
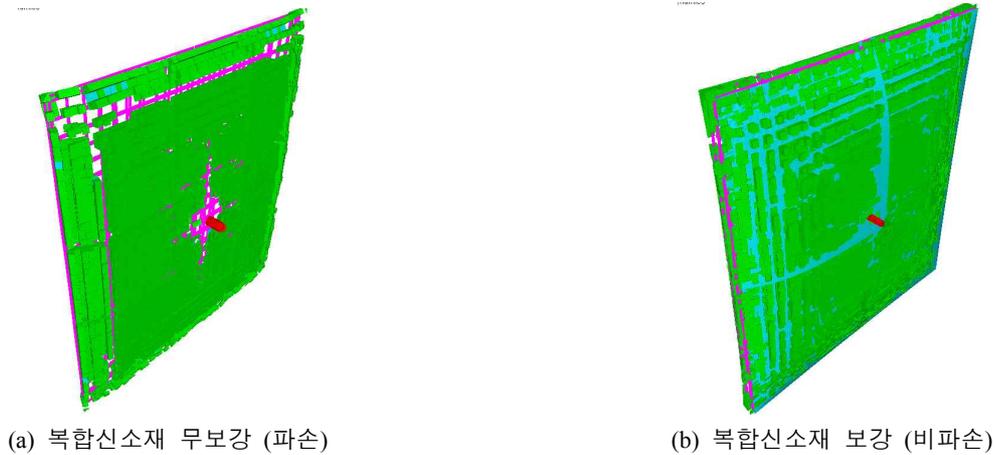


Fig. 7 철근 콘크리트 벽체 구조물의 충격 및 충돌 파손 및 손상 상태 (26.64ms)

5.2 전체 해석대상의 구조

해석 대상 구조물은 폭 3,200mm, 높이 3,500mm, 두께 150mm인 철근 콘크리트 벽체로서 Fig. 6(e)와 같이 콘크리트 내부에는 직경이 13mm인 철근이 150mm 간격으로 폭과 높이 방향으로 각각 인장과 압축력에 모두 저항할 수 있도록 배근되어 있다. 그리고 철근 콘크리트 벽체 뒷면은 벽체와 동일한 크기의 복합신소재 (유리섬유, GFRP)가 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.

수치실험 결과 복합 폭발 하중에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 복합신소재 보강유무에 따른 비선형 충돌 손상모드가 Fig. 7에 제시되어 있다. 초기 폭풍파가 지배적인 상태(1.75~3.05ms)에서는 두 구조물 모두 폭풍파로 인한 충격압이 콘크리트 벽체에 전체적으로 전달되어 전반적 손상을 야기하는 것으로 나타났다.

복합신소재를 보강하지 않은 철근 콘크리트 벽체 구조물의 경우 폭풍파와 파편 충돌에 의한 복합작용으로 인해 벽체의 파괴가 전반적 및 국부적으로 모두 크게 발생하였다. 전반적 충돌 손상모드는 동적 직접 전달 파괴로 나타났고, 국부적 손상모드는 충돌과정에서 발생한 충격 인장파에 의한 콘크리트 파쇄로서 예상했던 결과가 발생하였다. 이후, 파편이 벽체를 뚫고 관통하여 보강대책이 수립되지 않을 경우, 벽체 내부에 심각한

6. 수치실험 결과 및 고찰

한 인명과 재산 피해 우려가 발생하였다.

반면, 복합신소재로 보강된 철근 콘크리트 벽체 구조물의 경우는 미보강한 경우에 비해 파손상태가 비교적 양호하게 나타났다. 특히, 뛰어난 인장강도와 인성을 보유한 복합신소재 보강으로 벽체 후면에는 콘크리트 파쇄, 복합재 파괴, 파편 관통 현상이 전혀 발생하지 않았다. 이로부터 폭발하중에 대한 저항성능을 향상시키기 위한 목적으로 복합신소재를 보강할 경우, 파쇄에 따른 파편비산 현상을 억제할 수 있는 충분한 제어력이 확보됨을 알 수 있다. 더욱이 폭풍과 및 파편 충돌로 분쇄된 콘크리트 재료가 파손 이후에도 후면에 보강된 복합신소재와 함께 지속적으로 저항력을 발휘하는 것으로 나타남에 따라 2차 파편 충돌이 발생하더라도 콘크리트와 복합신소재의 잔류 성능으로 충격력과 파편의 운동에너지를 일정 수준 지속적으로 흡수할 수 있을 것으로 기대된다. 이는 복합신소재 보강시 파편 제어력이 확보되어 파편 관입에 의한 마찰에너지, 콘크리트의 파손 후 압축시 잔류강도에 의한 파괴에너지, 복합신소재의 변형에너지 등이 운동에너지 흡수에 기여한 것으로 분석된다.

Table 3에 본 연구 범위에서 복합신소재 보강유무에 따른 철근 콘크리트 벽체의 손상모드와 처짐발생 범위가 간략히 요약 제시된다.

Table 3 복합신소재 보강 유무에 따른 손상모드와 벽체의 처짐발생 범위 (26.64ms)

복합신소재 보강유무	전반적 손상모드	국부적 손상모드	벽체의 처짐
미보강	동적 직접 전단 파괴	파쇄, 관입, 직접관통	< 190mm
보강	휨 대변형 발생	관입	< 230mm

7. 결 론

본 연구에서는 충격 및 충돌과 같은 복합 폭발 하중에 노출된 콘크리트 구조물의 비선형 충격 손상거동 해석을 수행하였다. 폭발하중에 대한 저항성능을 향상시키기 위한 방안으로 유리섬유인 복합신소재 보강을 고려하였다. 복합신소재 보강 유무에 따른 성능평가를 수행하기 위해 두 경우에 대한 수치 모의실험을 수행한 결과, 복합신소재를 보강하지 않은 경우가 보강한 경우에 비해 파손상태가 더욱 극심하게 발생되었다.

초기 폭풍파가 지배적인 상태에서는 두 구조물 모두 폭풍파로 인한 충격압이 콘크리트 벽체에 전체적으로 전달되어 전반적 파손과 손상이 야기되었고, 이러한 극심한 손상과정 중에 파편이 대상 구조물에 충돌하는 경우, 복합신소재를 보강하지 않은 구조물은 파편의

충돌을 억제할 수 있는 충분한 제어력이 확보되지 못해 파편이 벽체를 관통하는 현상이 발생되어 구조물 내부의 시설과 인명은 보호받지 못하는 상황이 발생되어 시급한 대책이 요구된다.

복합신소재를 보강한 철근 콘크리트 벽체의 경우 벽체 후면에 콘크리트 파쇄, 복합재 파괴, 파편 관통 현상 등이 전혀 발생하지 않아 복합신소재의 보강성능이 입증되었다. 따라서 기존 구조물의 충돌 저항에 대한 보강이 요구되는 경우 복합신소재의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 강영철 (2005) 방호공학, 청문각.
2. 노명현, 이상열, 박대효 (2008) 복합 폭발하중을 받는 GFRP보강 RC 벽체 구조물의 비선형 충격 손상 거동 해석, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제20권 1호.
3. Century Dynamics (2007) AUTODYNA User Manuals. Version 11.
4. Johansson, M. (2000) Structural behavior in concrete frame corners of civil defence shelters, Non-linear finite element analysis and experiments, *Doctoral Thesis, Department of Structural Engineering, Concrete Structural, Chalmers University, Göteborg, Sweden.*
5. Johnson G.R. and Cook W.H. (1983) A Constitutive modeling and data for metals subjected to large strain rates and high temperatures, *Proceedings of 7th international symposium on ballistics*, pp. 541-577.
6. Krauthammer, T. (1999) Blast-resistant structural concrete and steel connections, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, No. 9-10, pp.43-62.
7. Leppänen, J. (2002) Dynamic Behaviour of concrete structures subjected to blast and fragment impacts. *Licentiate Thesis, Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.*
8. Li, Q.M. and Chen X.W. (2003) Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, pp.93-116.
9. Riedel W., Thoma K. and Hiermaier S., (1999) Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes, *Proceedings of 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures*, pp.315-322.
10. Riedel, W. (2000) Beton unter dynamischen Lasten Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter (in German). *Doctoral Thesis, der Bundeswehr Munchen, Freiburg, Germany.*