

폭발 및 충격하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동

Concrete Structural Behavior under Blast Loading According to Blast and Impact



윤웅섭*
Woong-Sup Yoon



조성국**
Sung-Gook Cho



조양희***
Yang-Hee Joe

1. 서 론

최근 천안함 피격사건과 연평도 포격사건 등이 연속적으로 발생함에 따라 전쟁 및 테러의 위협이 증가하고 있다. 이와 같은 초국가적·비국가적 위협의 확산과 동북아 국가들 사이의 잠재적 갈등의 증가로 인해 우리의 안보에 대한 불안함은 최고조에 다다르고 있는 실정이다.

국방부에서는 이러한 안보위협에 대응하기 위해 ‘정예화된 선진강국’을 국방비전으로 선정하고, 이를 구현하기 위해 전력을 기울이고 있다. 이에 대한 일환으로 국방의 문민 기반 확대, 미래전쟁 양상에 부합된 군 구조 및 전력체계 구축, 저비용·고효율의 국방관리체제로의 혁신, 시대 상황에 부응하는 병영문화 개선 등의 4대 국방개혁 추진중점을 선정하여 분야별 추진 계획이 포함된 「국방개혁 기본계획(2006 ~ 2020)」을 공표하여 변화하는 안보환경과 국가재정 여건에 맞춰 보완·운영하고 있다. 특히 최근에는 미래전쟁 양상이 정밀성과 파괴력이 향상된 무기체계의 확산과 지휘통제통신체계의 발달로 인해 ‘네트워크 중심전(Network Centric Warfare; NCW)’이 지배될 것으로 예측되므로 연구개발 투자와 산·학·연 참여 확대를 통한 첨단 무기체계와 핵심 기술을 독자적으로 개발하기 위해 노력하고 있다.

국방부의 국방전력관리업무규정에서 제시하고 있는 무기체계는 크게 기동, 함정, 항공, 화력, 방호, 지휘통제·통신, 감시·정찰, 기타 등의 8대 무기체계로 나눌 수 있으며, 이 분야는 <표 1>과 같이 25대 대표무기체계로 세분할 수 있다. 이와 같은 무기체계들은 ‘창(槍)’이라 표현할 수 있으며, 실제 병커 및 군사시설물, 사회기반시설물과 같은 ‘방패(防牌)’역할의 구조물에서는 ‘창(槍)’의 특성을 파악해야만 ‘방패(防牌)’역할을 제대로 수행할 수 있는 구조물을 설계·시공할 수 있을 것이다. 그러므로

본 고에서는 방호시설 및 사회기반시설물에 직접적인 손상을 줄 수 있는 폭발하중 및 충격무기들의 특성에 대하여 간단히 소개하고, 폭발하중을 유발시키는 국내의 충격무기에 대한 동향을 분석하고자 한다. 본 고에서 다루고자 하는 무기는 크게 폭발물과 미사일에 대하여 분석하였으며, 더불어 폭발하중에 의해 예상되는 콘크리트 구조물의 거동특성을 파악하고자 한다.

표 1. 무기체계 분류

(국방기술품질원, 2010)

8대 무기체계 분야	25개 대표무기체계
지휘통제·통신	지휘통제체계
	전술통신체계
감시·정찰	레이더체계
	SAR체계
	전자광학장비체계
	수중감시체계
기동	전자전체계
	지상무인체계
	개인전투체계
	기동전투체계
함정	기동지원체계
	수상함체계
	잠수함체계
항공·우주	해양무인체계
	고정익항공기체계
	회전익기체계
	무인기체계
화력	우주무기체계
	화포체계
	화력지원체계
	탄약체계
	기뢰/지뢰체계
	유도무기체계
	수중유도무기체계
방호	특수무기체계
	방공무기체계
기타(M&S, SW)	화생방체계
	국방M&S체계
	국방SW체계

* 연세대학교 기계공학과 교수

wsyoon@yonsei.ac.kr

** (주)제이스코리아 기술연구소 소장

*** 정회원, 인천대학교 도시환경공학부 교수

2. 폭풍하중을 유발시키는 폭발 및 충격무기

2.1 개요

최근의 과학기술이 급속하게 발전하면서 충격하중을 유발시키는 무기들은 계속해서 지능형으로 발전, 개발되고 있다. 따라서 특정 방호 구조물을 설계하기 위해서는 무엇보다 무기에 의해 발생하는 폭풍하중에 대한 이해가 필요하다고 판단된다. 무기의 종류는 비핵무기인 재래식 무기(Conventional Weapon)와 핵·화학·생물 무기와 미사일을 일컫는 대량살상무기(Weapons of Mass Destruction; WMD)로 나눌 수 있다. 그러나 최근에는 사람이 조종해야 하는 전차나 박격포와 비행기에서 떨어뜨리는 폭탄 등은 재래식 무기로 분류하지만 목표물을 향하여 자동적으로 비행한 뒤 명중되는 폭탄과 같이 인공지능이나 컴퓨터가 탑재된 무기를 뜻하는 ‘현대식 무기’는 재래식 무기에 포함시키지 않고 있다.

즉, 재래식 무기에 포함되어 있던 일반적인 무기들 또한 과학기술의 발전과 더불어 더 강력하고, 정밀한 수준으로 발전하고 있다. 그리하여 국방기술품질원에서는 이와 같은 주요 국방기술에 대하여 미국, 프랑스, 러시아, 일본, 이스라엘, 중국 등의 16 개국을 대상으로 국방과학기술 수준조사를 실시하였다. 조사대상 국가는 SIPRI(스웨덴 스톡홀름국제평화연구소, Stockholm International Peace Research Institute)와 CIA World Factbook을 참조하여 국방비 지출규모, 무기체계 자체 개발여부, 우리나라와 국방기술 협력여부 등을 고려하여 선정되었으며, 우리나라의 국방과학기술은 최고수준인 미국에 비해 78%로서 중상위권을 유지하고 있음을 알 수 있다(국방과학기술품질원, 2009). 특히, <표 1>에서 언급한 대표무기체계별 국방과학기술의 수준을 살펴보면, 대표무기체계로는 화포체계가 90% 이상으로 매우 우수하고, 수상함, 기동전투, 방공, 수중유도무기, 무인지상체계, 유도무기 등은 80~85% 이상으로 선진수준임을 알 수 있다. 그러나 발사탄약 및 레이다, 위성의 경우 72~77%로 상대적으로 취약한 체계들임을 알 수 있다. 그러므로 본 장에서는 이와 같은 대표무기체계중에서 발사탄약과 같은 폭발물과 대량살상을 유도하는 미사일에 대하여 자세히 살펴보도록 하겠다.

2.2 폭발물의 종류 및 특성

폭발물은 열이나 충격에 의하여 화학반응을 일으키는 혼합물(화학물)으로 폭발위력에 따라 고성능 폭약(high explosive)과 저성능 폭약(low explosive)으로 크게 구분할 수 있다. 고성능 폭약은 폭발속도가 빨라 주로 파괴목적의 군용 폭약인 작약(bursting charge)으로 사용된다. 저성능 폭약은 폭발속도가

표 2. 주요 폭발물의 특성

폭발물	구성비	폭발열 (cal/g)	폭발속도 (m/s)	밀도 (g/cm ³)	폭발효과	
					폭풍 압력	충격력
ANFO	질산암모늄(94), Fuel Oil(6)	710	3,300	1.3	0.82	-
Composition B	RDX(60), TNT(40)	1,240	7,840	1.68	1.11	0.98
Composition C-2	RDX(77), TNT(5), DNT(12), 기타(4)	1,120	7,660	1.57	-	-
Composition C-3	RDX(77), TNT(4), Tetryl(3) 기타(6)	1,100	7,630	1.60	-	-
Composition C-4	RDX(91), 비폭발성가소제(9)	1,230	8,040	1.59	1.37	1.19
RDX	-	1,280	8,180	1.65	-	-
PETN	-	1,390	8,300	1.70	1.27	-
Tetryl	-	1,100	7,850	1.71	1.07	-
Cyclotol	RDX(75), TNT(25)	1,230	8,000	1.70	1.14	1.09
Pentolite	PETN(50), TNT(50)	1,220	7,470	1.66	1.42	1.00
니트로글리세린	-	1,600	7,700	1.60	-	-
피크르산	-	1,000	7,350	1.71	0.90	0.93
저속 다이내마이트	TNT(68)	625	4,400	0.90	-	-
중속 다이내마이트	RDX(75), TNT(15)	990	6,000	1.10	-	-
TNT	-	1,080	6,800	1.10	1.00	1.00
Minol-II	질산암모늄(20), TNT(40), 알루미늄(20)	1,620	5,820	1.68	1.20	1.11
Torpex	RDX(42), TNT(40), 알루미늄(18)	1,800	7,500	1.81	-	-
Tritonal	TNT(40), 알루미늄(20)	1,770	6,700	1.72	1.07	0.96
Lead Azide	-	370	4,070	2.00	-	-
무연화학	질소(14.14)	1,060	7,300	1.20	-	-

비교적 느려 폭발위력이 낮게 나타나며 주로 추진장약(propellant)이나 흑색화약이 이에 해당된다. 또한 점화감도(sensitivity autoignition)에 따라 1차 폭약(primary explosive)와 2차 폭약(secondary explosive)으로 분류된다. 1차 폭약은 전기 스파크, 열, 또는 충격에 의해 쉽게 점화가 되는 폭발물을 말하며, 아지화납(lead azide), 스티판산납(lead styphnate) 등이 이에 해당하고 주로 뇌관 등의 기폭제로 사용

된다. 2차 폭약은 점화에 덜 예민하나 일단 점화가 되면 강력한 폭발력을 발휘하는 TNT, RDX, Tetryl 등이 이에 해당하며, 군용폭약은 완전한 폭발을 위해서 감도가 높은 폭약으로 된 기폭제와 감도가 보다 낮은 2차 폭약이 함께 사용되며 일반적으로 4,000~8,400 m/s 범위에 있으며, TNT의 폭발속도는 약 6,900 m/s가 된다.

이와 같은 주요 폭발물의 특성은 <표 2>와 같이 정리할 수 있다. 여기서, 폭발효과는 폭발물의 효과를 상대적으로 비교하기 위하여 군용 표준폭약으로 사용하고 있는 TNT를 기준으로 하여 특정 폭발물이 공중에서 폭발하였을 때 나타나는 평균 폭풍압력과 충격력을 TNT 동일 무게의 폭발효과와 비교할 수 있다. 즉, TNT의 폭풍압력과 충격력을 1.0으로 놓았을때, ANFO의 경우 0.82로 TNT에 비하여 적은 폭발효과를 나타내며, Composition C-4의 경우 1.37, 1.19로 TNT에 비하여 큰 폭발효과를 발생하는 것으로 나타났다.

이와 같은 폭발물로 만들어지는 폭탄은 고폭탄(high-explosive bomb, HE폭탄), 소이폭탄(fire and incendiary bomb), 산탄형 폭탄(dispenser and cluster bomb) 및 특수폭탄(special-purpose bomb)으로 나눌 수 있으며, 그 중 HE폭탄은 폭풍파압과 파편에 의해 구조물에 큰 영향을 끼친다. 주로 폭파를 위한 고성능 폭약은 다음의 형태로 고려해볼 수 있다.

- 1) 일반용폭탄(general-purpose bomb : GP폭탄)
- 2) 경상자폭탄(light-case bomb : LC폭탄)
- 3) 세열폭탄(fragmentation bomb : FRAG폭탄)
- 4) 철갑폭탄(armor-piercing bomb : AP폭탄)
- 5) 기화폭탄(fuel-air explosive bomb : FAE폭탄)

GP폭탄의 경우 폭풍압과 파편효과로 콘크리트 구조물 및 장갑관 등은 관통할 수 있으며, 상당한 피해를 발생시킬 수 있다. 또한 LC폭탄은 폭풍압에 의해, FRAG폭탄은 다량의 파편으로 피해를 발생시킨다. AP폭탄은 군함 또는 구조물 등과 같이 강력하게 방호된 표적에 충격을 받을 때 변형에 저항하도록 두꺼운 케이스로 된 폭탄이며, FAE폭탄은 얇은 금속 통속에 연소성 가스로 채워진 폭탄으로 헬기착륙장을 마련하고, 지뢰와 부비트랩을 폭파시켜 지상구조물을 파괴하는데 사용할 수 있다.

2.3 국내외 연구동향

미사일이란 어원적으로 '투창·화살·총포 등 날아가는 도구'라는 의미였지만 현재는 지상·해상·공중의 표적을 공격하기 위한 무기로, 자체 추진력으로 외부 또는 미사일 내부 유도에 의해 표적에 접근하도록 설계 및 제작된 비행체를 의미한다. 최근

의 국제사회는 세계평화와 안정을 위해 미사일 확산방지에 노력하고 있음에도 불구하고 종교 및 민족간의 갈등, 영토, 문제 등의 불안정한 안보상황 속에서 자국보호를 위해 미사일 개발과 성능향상을 지속적으로 추진하고 있다.

특히, 북한은 2006년 7월 5일 대포동 2호 미사일을 포함한 7발의 미사일 시험발사를 실시하였으며, 미국은 국제질서를 주도하고 있는 가운데에서도 최근 '트라이던트II(사거리7,000 km, 조정밀무기)' 탄도미사일에 재래식 탄두를 장착하여 미사일기지와 화생방무기 은닉처 등의 표적에 사용하고 1시간 내에 목표물 타격이 가능한 무기체계를 개발하고 있다. 중국은 2006년 3월 서북부지역 사막에서 신형 요격미사일을 시험 발사하여 목표물 격추에 성공하였으며, 미국과 일본이 공동연구 중인 미사일방어(MD) 기술개발에 대응하기 위해 미사일 방공망을 구축하고 있다. 러시아 역시 2005년 12월 신형 전략미사일 시험발사에 성공하였다. 이와 같이 러시아에서 개발한 미사일은 그동안 미국이 추진해온 MD 체계를 뚫을 것으로 보인다. 이란은 2004년 8월 레이더추적을 피할수 있는 신형 미사일의 시험발사에 성공하였으며, 북한으로부터 미사일을 구매한 것으로 알려져있다. 인도는 2006년 7월 AGNI-III(사거리3,000 km)를 시험 발사한 것에 이어 자체개발한 단거리 지대공미사일 '트리쉬(삼지창)'의 시험발사를 실시하였다. 이밖에도 파키스탄 이스라엘 프랑스 등이 미사일을 시험발사하였다. 이처럼 세계 각국이 미사일을 개발하고 있는 가운데 국제사회는 미사일 수출 통제기구인 MTCR(Missile Technology Control Regime)을 통해 탄도미사일 기술이전 제한은 물론 순항 미사일 개발통제를 강화하고 있다.

2.4 미사일의 종류

전 세계적으로 미사일은 길이 0.8 m의 소형 미사일에서부터 길이 36 m의 대형 미사일에 이르기까지 여러 종류의 미사일이 있으며, 크게 용도, 발사장소와 표적, 사거리 등에 따라 분류할 수 있다. 용도에 따라서 <표 3>과 같이 전략 미사일과 전술 미사일로 나눌 수 있으며, 핵탄두를 탑재한 사거리 5,500 km 이상의 미사일을 전략 미사일로 규정하였으며, 그 이외의 미사일은 전술 미사일로 분류하고 있다. 또한 발사장소와 표적에 따라 지대지·지대공·공대공·공대지 등으로 사거리에 따라 단거리·중거리·장거리 미사일로 분류한다.

공격미사일은 <표 4>에서 보는 것과 같이 탄도미사일과 순항유도미사일로 나눌 수 있다. 탄도미사일은 로켓의 원리를 응용하여 비행초기 최대속도를 통해, 그 속도를 이용하여 포물선 궤적으로 비행하며, 이는 지구상에서 다른 지점으로 이동할 때 최소 에너지로 가장 멀리 그리고 빠르게 갈 수 있는 궤적이다. 그렇기에 탄도미사일의 경우에 비행속도가 매우 빠르며, 짧은

표 3. 미사일의 종류

전략 미사일	공격 미사일	탄도미사일 BM	공중발사(ALBM)	
			지상발사 (GLBM)	대륙간탄도탄(ICBM)
				중거리탄도탄(IRBM)
				준중거리탄도탄(MRBM)
				단거리탄도탄(SRBM)
		잠수함발사(SLBM)		
		순항유도 미사일 CM	공중발사(ALCM)	
			지상발사(GLCM)	
			수상·잠수함발사(SLCM)	
			위성공격 미사일(ASAT Missile)	
탄도탄 요격 미사일(ABM)				
전술 미사일	공대공 미사일(AAM)		정밀유도무기(PGM)	
	지대공 미사일(SAM)			
	함대공 미사일(SAM)			
	공대지 미사일(ASM)			
	공대함 미사일(ASM)			
	함(잠)대함 미사일(SSM/USM)			
	지대지 미사일(SSM)			

표 4. 순항유도미사일과 탄도미사일의 특성

분 야	순항유도미사일	탄도미사일
사거리	50 ~ 3,000 km	100 ~ 13,000 km
비행 방식	저고도 순항비행, 기계회 경로 비행	외대기권, 상층 대기권 탄도 비행
항법/보 정방법	관성항법+GPS+지형대조	관성항법, 관성항법+천측항법, 관성항법+GPS 등
종말 유도	초고주파 탐색기, 적외선 영상 탐색기, 영상대조기 등을 이용한 정밀 탄착	탐색기 없이 관성항법으로 탄착
정확도	사거리와 상관없이 수십에서 수 m 내 탄착	사거리에 비례하여 오차 증가, 일반적으로 수백에서 수 km 내
탄두	고폭, 분산자탄, 침투탄두, 핵탄두	고폭, 분산자탄, 핵탄두
추진 방식	발사 초기 고체추진 로켓 가속후 공기흡입식 엔진 시동 - 항공기 엔진과 유사	단일·다단 고체추진 로켓 단일·다단 액체추진 로켓 - 연료 및 산화제 내장
발사체	지상차량, 잠수함, 수상함, 항공기	고정식 발사대, 이동식 차량, 잠수함
용도	핵심 표적 선별 타격 - 보복공격용	전략적 및 정치적 위협 목적 - 피해 과장 및 공포감 조성 유리

비행시간으로 인해 적국의 효과적인 미사일 방어를 어렵게 하는 점이 있다. 순항유도미사일은 비행경로에서 양력을 이용한 자체 추진력으로 일정속도 비행하는 미사일로, 핵 또는 재래식 탄두를 운반할 수 있으며, 비교적 낮은 고도에서 비행을 하게 된다.

2.5 미사일 특성

전 세계적으로 개발된 미사일 중 한반도에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 북한의 미사일의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 북한은 1970년대부터 탄도미사일을 개발하여 1980년대 중거리 스킨드-B와 스킨드-C를 생산하였으며, 1990년대에는 사거리 1,300 km인 노동미사일을 배치하였으며, 2007년에는 사거리 3,000 km 이상의 중거리 탄도미사일을 배치하여 한반도를 포함한 일본과 괌 등 주변국에 대한 직접적인 타격능력을 보유하고 있다. 북한에서 보유하고 있는 미사일 종류별 사거리는 <표 5>와 <그림 1>에서 보는 것과 같다. 이와 같은 미사일은 핵탄두 또는 고폭탄을 탑재할 수 있으며, 탄두의 탑재중량 및 형태, 충격각도에 폭풍하중은 각기 나타난다.

3. 폭발·충격하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동

3.1 폭발압력과 콘크리트 구조물의 반응

폭발하중은 폭발되는 위치에 따라 구조물에 가해지는 폭발파의 형상이 달라지며, 본 고에서는 대기 중 자유폭발, 대기 중 폭발, 지표면 폭발 3가지에 대해 고려하고자 한다.

대기 중 자유폭발은 <그림 2>와 같이 초기충격파의 중폭이 없는 구조물 근처에서 발생하며 구조물에 작용하는 폭발하중은 반사파의 영향이 없는 폭발압력으로 작용하게 된다. <그림 3>은 대기 중 폭발과 폭발로 인한 압력이 구조물에 도달하는 형상을 나타내며, 대기 중 폭발은 대기 중 자유폭발과 달리 초기충격파가 구조물에 도달하기 전 지표면의 영향을 받아 지표면의 반

표 5. 북한의 탄도미사일 사거리에 따른 도달가능 목표

구분	사거리(km)	도달가능 목표
KN-02	100 ~ 200	한국(전술목표)
화성5호	300	한국
화성6호	500(추정)	한국
스커드-B	300	한국(대전, 영주, 삼척)
스커드-C	500	한국(목포, 여수, 부산)
스커드-D	700(추정)	한국
노동 1호	1,300	일본
대포동 1호	2,500	오키나와, 대만, 괌
대포동 2호	5,500	미국, 하와이, 알래스카 등



그림 1. 북한 미사일 종류 및 사정거리

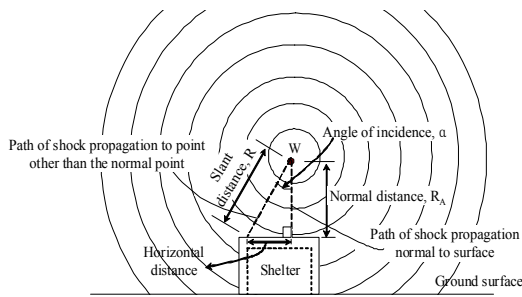


그림 2. 대기 중 자유폭발의 형상⁶⁾

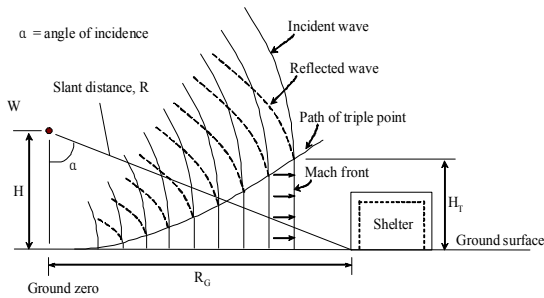


그림 3. 대기 폭발(air blast) 형상⁶⁾

사파에 의해 마하전단(mach front)이 발생한다. 초기충격파(입사파)와 반사파, 마하전단이 겹쳐지는 3중점(triple point)의 위치가 구조물의 높이보다 낮게 되면 구조물은 높이에 따라 다른 압력을 받게 되며, 3중점의 위치가 구조물의 높이보다 크면 구조물은 균일한 압력을 받게 된다. 지표면 폭발은 폭발 원점에서

부터 입사파와 반사파가 하나로 합쳐져 파가 형성되며, 그 만큼 공중 폭발에 비해 파에 의한 효과가 큰 것을 알 수 있다. 즉, 지표면 폭발은 <그림 4>와 같이 반구형으로 전파되며 주로 방호 구조물은 균일 압력을 받는 것으로 보고 설계할 수 있다⁶⁾.

이와 같은 폭발하중 압력은 케이스 유무에 관계없이 TNT의 폭발에 의한 최대 폭발압력(P_{so})으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{so} = \frac{18.08}{Z^3} - \frac{1.16}{Z} + \frac{1.1}{Z} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

여기서, $Z = \frac{r}{w^{1/3}}$, r 은 폭발 원점에서 측정점까지의 거리(m), w 은 폭발물의 무게(kg)이다.

이와 같은 최대 폭발압력이 구조물과 같이 견고한 표면에 부딪히게 되면 그 표면에서 반사압력(P_r)이 발생하며, 이는 최대 입사압력(P_{so})과 입사각(α : 반사표면과 충격전단면이 이루는 각)의 함수로 TM5-1300에서 제시하고 있는 반사압력계수를 구하여 결정할 수 있다. TM5-1300에서는 대기 중 자유폭발, 대기폭발, 지표면 폭발의 최대 입사압력과 반사압력, 입사각, 반사압력계수 등의 각종변수에 따른 폭발압력을 그래프로 제시하고 있으나 본 고에서는 생략하도록 한다.

폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 거동은 다음 <그림 5>와 같이 진행되는 것을 확인할 수 있다. 물론 폭발하중의 위치, 콘크리트의 강도, 철근의 배근, 구속조건 등에 따라 파괴양상은 변화되지만 전반적인 폭발압력을 받는 구조물의 거동은 <사진

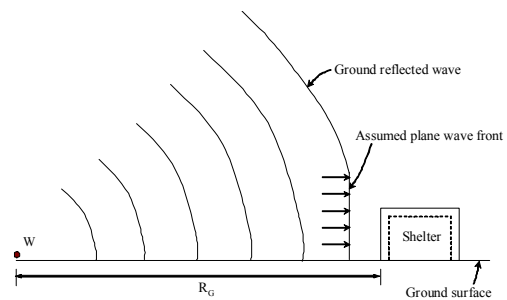


그림 4. 지표면 폭발 시 충격파⁶⁾

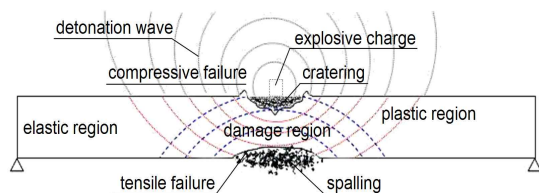


그림 5. 폭발하중에 의한 콘크리트 구조물의 응력전파 및 파괴양상⁴⁾

1, 그림 6>과 같이 진행된다고 판단할 수 있다. <사진 1>에서 보는 것과 같이 4번이 고정된 일반강도 콘크리트 구조물의 경우에는 콘크리트의 항복이론에 따라 구조물이 파괴하는 양상을 파악할 수 있다.

3.2 충격하중과 가해진 콘크리트 구조물의 반응

주요 콘크리트 구조물은 충격하중에 대하여 충분히 저항할 수 있도록 설계되어야 한다. 실제 충격저항설계에 고려되고 있는 충격하중은 강봉, 자동차, 미사일과 같은 충격체(tornado-generated missile)와 내부 시설물의 우연한 폭발로 유발되는 사고성 충격체(aircraft-generated missile) 및 항공기 충돌(aircraft crash) 등으로 구별할 수 있으나 본 고에서 다른 내용과 같이 충격체에 의한 충격하중에 대한 콘크리트 구조물의 파괴형상에 대하여 간단하게 살펴보고자 한다¹⁶⁾.

일반적으로 콘크리트 구조물에 충격체에 의한 충동이 발생하게 되면 충격된 부분에 <그림 6>와 같은 국부적인 손상(local impact effects)과 휨, 전단거동 등 구조물의 전반적인 응답(overall response)이 발생하게 된다. 국부적인 손상은 콘크리트 구조물의 충격면과 충격반대면의 파괴형상으로 구분할 수 있으며, 이는 스펀링(spalling), 스케빙(scabbing), 충격체의 벽

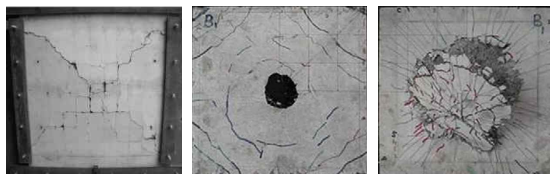


사진 1. 폭발 및 충격하중에 의한 콘크리트 구조물의 파괴양상 (Weerheijm et al. 2009; Farnam et al.2010)

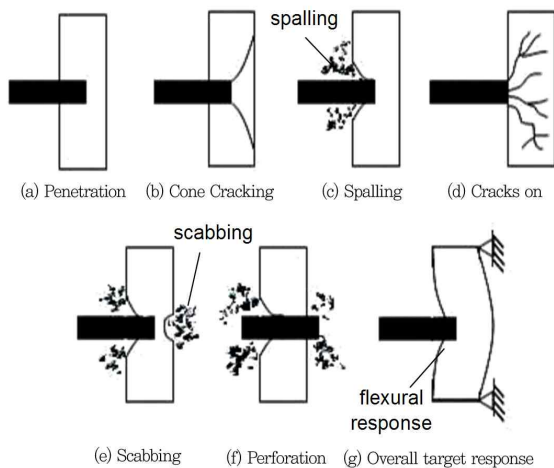


그림 6. 충격체에 의한 콘크리트 구조물의 손상파괴양상

면관입(penetration) 및 벽체관통(perforation) 등으로 구분한다. 국부적인 손상에 관해서는 수많은 연구자들에 의하여 식이 제시되고 있으며, 더불어 충돌체의 충돌면의 현상계수, 질량, 직경, 충격속도, 충격계수 등에 의하여 충돌하중에 대하여서도 고려하고 있다. 그러므로 충격하중을 받는 콘크리트 구조물을 설계할 경우 설계대상으로 하는 충격하중의 특성을 충분히 반영하여 구조물에 대하여 설계되어야 할 것이다.

이와 같은 충돌하중을 받는 구조물은 무기의 운동에너지를 흡수하여 충돌체를 정지시킬 수 있는 시간을 확보하기 위한 연성 혹은 강도를 증진하거나 두께 보강 또는 후면보강 등으로 설계되어야 한다. 이와 같은 충격을 받는 구조물은 <표 6>과 <그림 7>과 같은 변수의 영향을 받게 된다.

충격체에 의해 철근콘크리트 구조물에 유발되는 손상정도를 충격체의 관입깊이로 판단할 수 있는데, 이는 경험식으로 표현한다. 식 (2)는 비활성철갑탄, 철갑탄, 만철갑탄이 수직으로 충돌했을 경우의 관입깊이(X, in)를 경험식으로 나타낸 것이다.

$$X = \frac{222 P_p d^{0.215} V^{1.5}}{(f'_c)^{0.5}} + 0.5 d \quad (2)$$

여기서, P_p 는 폭탄의 단면압력(무게/최대단면적, lb/in^2), d 는 폭탄의 직경(in), V 는 충돌속도 비(충돌속도/1,000 fps), f'_c 는 콘크리트의 압축강도(psi)이다.

식(2)의 정확도는 짧은 충격체의 경우에는 15% 내외이지만 높은 세장비를 가지는 폭탄의 경우에는 1,000 fps 이하의 속도로 충돌할 경우는 구한 깊이에 30%를 증가시켜 고려해야 한다.

표 6. 충돌을 받는 구조물 파기에 영향을 주는 변수

미사일 특성	조우 조건	표적 특성
무게	충돌 속도	강도, 경도
구경, 직경(d)	충돌 각도	밀도
형태	요(yaw)	연성
신관		공극률
구조적 안정성		

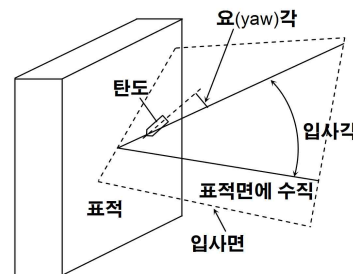


그림 7. 충돌 형상⁵⁾

수직 충돌이 아닌 경우에는 TM5-855-1에서 제시하고 있는 계산도표를 이용해야 한다.

4. 결론

콘크리트는 과거부터 현재까지 중요한 건설재료로서의 역할을 담당하였으며, 앞으로의 건설 산업에서도 반드시 필요한 재료임에는 틀림없을 것이다. 과학기술의 비약적인 발전과 더불어 무기체계를 비롯한 국방과학기술의 발전 및 연구개발지원에 많은 노력과 예산이 투입되고 있다. 아울러 천안함 사건과 연평도 포격 사건 등과 같은 최근의 몇몇 군사사건을 계기로 국내의 방호 기술 수준에 대한 연구 수준 및 개발지원에 대해서도 큰 관심이 집중되고 있다. 앞서 언급한 것과 같이 나날이 발전해가는 과학 기술에 따라 ‘창’의 개념인 무기체계 및 그에 대한 파괴력은 눈부신 발전을 하고 있으므로 실제 시민들의 안보를 책임지고 불안함을 감소시킬 수 있는 ‘방패’ 개념의 사회기반시설 및 토목·건축구조물, 군사시설물의 방호성능(protective performance)에 대한 연구개발 수준도 크게 향상될 것으로 기대된다.

본 고에서는 구조물에 적용 가능한 폭발 및 충격하중에 대한 국내·외 연구수준에 대해 다루었으며, 이를 통해 다소 콘크리트 분야와는 생소할 수 있는 무기분야에 대한 이해를 꾀하고자 하였다. 이로 인하여 방호성능분야에 대한 관심 및 필요성의 증가와 더불어 새로운 방호기술 개발에 대한 투자 및 연구가 증가하기를 기대해본다. □

참고문헌

- Farnam, Y., Mohammadi, S., Shekarchi, M., Experimental and Numerical Investigations of Low Velocity Impact Behavior of High-Performance Fiber Cement Based Composite, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 2, 2010, pp. 220 ~ 229.
- Krauthammer, T., *Modern Protective Structures*, CRC, 2008.
- Li, Q.M., Rcid, S.R., Wen, H.M., Telford, A.R., Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 1 ~ 4, 2005, pp. 224 ~ 284.
- Riisgaard, B., Gupta, A., Mendis, P., Ngo, T., Enhancing the Performance under Close-in Detonations with Polymer Reinforced CRC, *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 6, 2006, pp. 75 ~ 79.
- TM 5-855-1/AFPAM 32-1147/NAVFAC P-1080/DAHS CWEMAN-97, Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects, Joint Departments of the Army, Air Force, Navy and the Defense Special Weapons Agency, Washington, DC, December 1997.
- TM5-1300/AFM 88-22/NAVFAC P-397, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Joint Departments of the Army, Air Force and Navy Washington, DC., 1990.
- Weerheijm, J., Explosive Loading of Multi Storey RC Buildings: Dynamic Response and Progressive Collapse, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 32, No. 2, 2009, pp. 193 ~ 212.
- 고홍석, 김용한, 한국 국방과학기술의 취약 요소와 개선방안에 대한 제언, 국방기술품질원, 국방기술기획 Focus, 2010, pp. 3 ~ 17.
- 국방기술품질원, 16개 국가 국방과학기술 순위조사 보고서, 2009.
- 국방기술품질원, 미리보는 미래무기, 2009.
- 국방기술품질원·한국과학기술기획평가원, 미래국방 유망기술 30선, 2010.
- 국방부, 「2010 국방백서」, 2010.
- 국방부, 「대량살상무기에 대한 이해」, 2007.
- 박종일, 「방호공학개론」, 씨아이알, 2011.
- 서관세, 「방호공학」, 청문각, 2005.
- 오병환, ‘철근콘크리트 벽체의 충격거동 및 충격해석연구’, 콘크리트학회지, Vol. 4, No. 2, 1992, pp. 127 ~ 137.
- 홍현의, 국방의 미래를 밝혀줄 미래 국방유망기술 30선 발표, 국방기술품질원, 기술로 품질로, 2010.

담당 편집위원 :
정해문(한국도로공사 도로교통연구원) haimoon@ex.co.kr