한국군사과학기술학회지 제16권 제3호, pp. 398～404, 2013년 6월

학술논문 에너지 부문

철근강화콘크리트에 대한 받음각이 없는 관통자의 수직관통거동 전산해석

Numerical Simulations of the Normal Perforation Behavior by Penetrator without AOA into Steel Reinforced Concrete Targets

윤 경 재* 유 요 한* 김 학 준*
Kyung Jae Yun Yoo-Han Yoo Hak Jun Kim

ABSTRACT

The simulation of the ballistic trajectory of penetrator into the spaced multi-layer RC targets is very important to predict the hitting condition in subsequent target. Because of perturbation by lateral load of penetrator caused by asymmetric hitting position between penetrator and steel bar reinforcement, penetrator rotates and deviates from the straight path. Therefore, penetration capability of penetrator is decreased in the subsequent targets. This paper presents the result of the penetration of steel-bar-reinforced concrete target by using the explicit finite element code LS-DYNA. A series of computations is performed and compared to experimental data and the computed results are in good agreement with the experimental results over a wide range of velocities. And then we conduct the simulation according to various RC target hitting condition and impact velocities.

Keywords : Numerical Simulation, Reinforced Concrete Target, Perforation, Perturbation

1. 서 론

철근강화 콘크리트는 군사적인 목적을 위한 건물구조로 광범위하게 사용된다. 그리고 철근강화 콘크리트 표적의 관통과정을 묘사하기 위해서 수많은 연구가 실험적으로, 해석적으로 그리고 수치적으로 진행되어왔다. 현재까지 철근콘크리트 연구는 콘크리트의 표적두께, 관통자 속도 및 관통자의 형상에 따른 관통과정과 구멍(crater)의 형상등에 관련해서 Luk and Forrestal[1,2]과 Hanchak and Forrestal[3]에 의해 연구가 진행 되어져 왔으나 아직까지 철근강화 콘크리트의 효과를 고려한 연구결과는 제시되지 않았다. 실제로 공간다층 철근강화 콘크리트 표적에 대한 관통자 궤적의 시뮬레이션은 다음층 표적의 표적조우조건을 예견하는데 매우 중요하다. 이는 관통자와 철근의 충돌 시 조우위치에 따른 비대칭조건에 의해 야기되는 측면방향 하중에 의한 관통자의 요동 때문에 관통자는 회전을 하게 되어 직진경로를 이탈하게 되며, 그리하여 관통자의 관통성능은 저하되기 때문이다. 본 논문에서 외연적 유한요소코드인 LS_DYNA를 통해서 철근콘크리트의 관통에 대한

† 2013년 2월 4일 접수～2013년 4월 26일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
책임저자 : 윤경재(kjyun@add.re.kr)

결과 및 관통자의 경로예측을 제시하였다. 우선 일련의 수행된 계산들을 실험적 데이터와 비교하였으며[3], 계산된 결과들은 다양한 속도범위에서 실험결과와 잘 일치함으로써 해석결과에 대한 신뢰성을 확보하였다. 그리고 다양한 철근강화 콘크리트 표적의 조우조건과 충돌속도에 따른 수치해석 결과들을 제시하였다.

2. 수치해석

가. 신뢰성 검증

관통자의 고속충돌에 의한 관통현상은 매우 짧은 시간에 여러 물리적인 현상이 복합적으로 얽혀 나타나는 과정이다. 시험을 통해서 가장 정확한 결과를 얻을 수 있지만, 시험에 고비용이 소요되거나 때로는 시험자체가 불가능 할 때가 있고 관통과정중의 중요한 각종 역학적 정보는 시험만을 통해서는 알기 어려운 것들이 많다. 따라서 점점 복잡해지는 방호구조물에 대한 관통현상의 이해를 위해 시험과 더불어 수치해석에도 많이 활용하고 있는 추세이다. 고압유체역학(hydrodynamics)을 이용한 전산해석 모사는 탄두 설계 시 정성적인 값을 미리 예측할 수 있는 보조수단으로 널리 이용되고 있다. 특히 앞서 언급한 바와 같이 탄두 설계 시 시험과 병행하여 설계변수 변경에 따른 성능변화를 정성적으로 비교해서 보여줌으로써 실제 시험횟수를 줄여 개발비용의 절감에 지대한 역할을 하고 있다. 본 논문에서는 외연적 유한요소해석 상용코드인 LS-DYNA를 이용하여 전산해석을 수행하였다. Fig. 1은 관통자의 형상을 나타내고 있으며, 이는 본 논문의 해석의 신뢰성을 확보하기 위해 참고문헌 [3]의 실험결과 비교하였으며 Fig. 1은 참고문헌 [3]에서 제시한 관통자 및 철근강화콘크리트 모델이며, Table 1은 참고문헌 [3]에서 사용한 관통자 및 표적 철근의 물성치 값을 동일하게 적용한 값들이며, Table 2와 Table 3은 참고문헌 [3]의 실험결과와 본 연구의 해석결과를 비교하여 나타낸 결과들이다. 표에서 알 수 있듯이 관통자의 잔류속도 및 자세 값들이 잘 일치하고 있음을 확인 할 수 있었다.

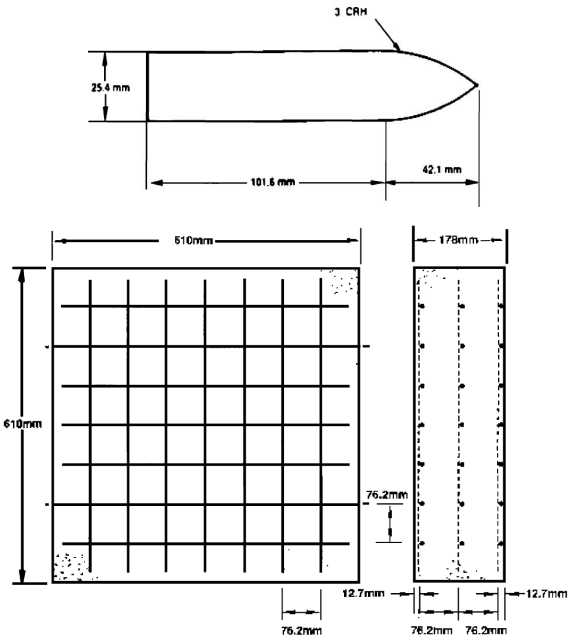


Fig. 1. 관통자 및 철근강화 콘크리트 표적 형상

Table 1. 관통자 및 콘크리트 표적 철근의 물성값

Items	Density (kg/m^3)	Elastic module (GPa)	Possion's ration	Plastic failure strain	Yield stress (MPa)
Reinforcing steel	7.5e3	2.1	0.284	0.8	235
Projectile	8.0e3	2.07	0.3	2.0	1724

Table 2. 48MPa(7ksi) RCT의 시험 및 해석결과 비교

v(m/s)	V_R(m/s)		Pitch(deg)		Yaw(deg)	
	sim	test	sim	test	sim	test
360	79	67	0	0	0.1up	1.5up
434	227	214	0	0	0.07up	0.5up
606	441	449	0	0	0.04dn	1.0dn

Table 3. 140MPa(20ksi) RCT의 시험 및 해석결과 비교

v(m/s)	V_R(m/s)		Pitch(deg)		Yaw(deg)	
	sim	test	sim	test	sim	test
382	0	0	0	0	0.15up	2.5up
443	165	171	0	0	0.09up	0
587	369	368	0	1.0R	0.05up	1.0up

V_S : Striking Velocity, V_R : Residual Velocity

Fig. 2와 3은 관통자가 철근강화콘크리트 표적을 관통할 때 조우 조건은 철근과 철근사이의 빈 공간을 관통한 경우이며 이 때 관통 후의 시험 및 해석의 관통 형상을 비교한 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 시험 및 해석결과의 형상이 일치함을 보여주고 있으며, 또한 빈 공간을 관통했을 경우에는 관통자가 직진성을 유지하면서 관통됨을 확인할 수 있었다.

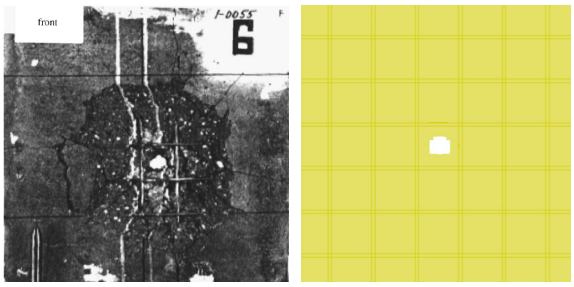


Fig. 2. 관통 후 표적형상 비교(시험 및 해석; 앞면)

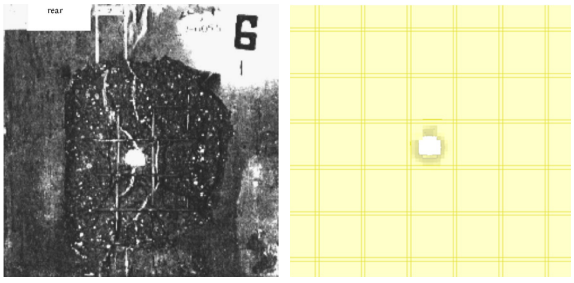


Fig. 3. 관통 후 표적형상 비교(시험 및 해석; 뒷면)

나. 다양한 표적조우 조건에 따른 수치해석 결과

앞서 해석결과의 신뢰성을 검증하였으므로 본 연구의 핵심인 다양한 표적조우 조건에 따른 관통해석 결과를 확인하고자 한다. 우선 표적콘크리트 강도 48MPa와 140MPa 두가지 경우에 대해 수행하였고 표적조우조건은 Table 4에서처럼 7가지 경우로 나누어 해석을 수행하였다. 또한 관통 후 관통자의 직진성을 확인하기 위해 관통 직후 관통자와 표적간의 충돌각도 AOI(Angle of Impact)의 좌표축을 Fig. 4와 같이 정의하였다.

Table 5의 결과처럼 표적조우조건이 type 7처럼 철근과 철근사이의 빈공간을 관통한 경우가 가장 직진성도 우수하고 잔류속도도 높게 나타났다. 철근의 효과가 작용하지 않기 때문에 무근콘크리트와 같은 효과를 나타냈기 때문이다. 반면에 비대칭인 경우에는 잔류속도도 감소하며 직진성이 상당히 많이 벗어나 완전히 다른 방향으로 빗겨나감을 확인할 수 있었다.

Table 4. 다양한 표적조우조건 형상

표적조우조건	형상	비고
type 1		철근과 철근 교차점 관통
type 2		철근과 철근 교차점 비대칭 관통(좌/상 33% 이동)
type 3		철근과 철근 교차점 비대칭 관통(좌/상 66% 이동)
type 4		철근 1개 정 중앙 관통
type 5		철근 1개 비대칭 관통 (좌 33% 이동)
type 6		철근 1개 비대칭 관통 (좌 66% 이동)
type 7		철근과 철근사이 구멍 관통

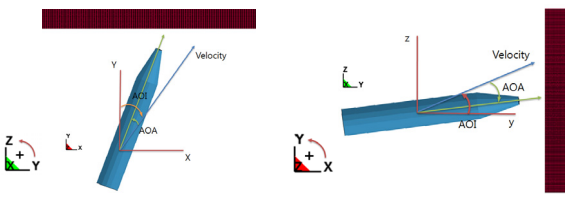


Fig. 4. AOI 확인을 위한 좌표축 정의

그리고 비대칭조건인 경우를 서로 비교해보면 66% 비대칭조건이 33% 비대칭조건보다는 잔류속도 및 직진성이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 이는 66% 비대칭 조건이 33% 비대칭조건보다 더 type 7의 조건에 가깝기 때문에 관통을 하면서 철근과 상대적으로 멀어지고 그렇기 때문에 철근의 효과가 적게 작용한 것으로 판단된다. 그리고 철근과의 교차점이 두 개인 경우보다 한 개인 경우가 직진성 및 잔류속도가 더 우수함을 확인 할 수 있었다. 두 개의 경우는 관통자의 직진성에 수평방향 및 수직방향으로 동시에 작용하여 대각선 방향으로 크게 빗겨나간 반면 한 개의

경우는 수평방향에 영향을 미치기 때문에 직진성이 수평방향으로 빗겨나감을 확인할 수 있었다. 콘크리트 압축강도가 140MPa의 경우가 48MPa 보다 더 크게 직진성이 벗어남을 알 수 있는데 이 또한 강도가 크고 잔류속도가 상대적으로 작기 때문에 직진성이 더 떨어짐을 확인할 수 있었다.

특이할 만한 결과는 두 철근의 교차점 대칭 관통조건인 type 1이 한 철근 교차점 대칭 관통조건인 type 4에 비해 직진성 및 잔류속도가 더 우수한 결과를 나타냈다. 이는 type 1인 경우는 두 개의 서로 교차된 철근이 그 사이를 지나는 관통자의 경로를 벗어나는 것을 상호간에 잡아주는 효과가 발생하여 Table 5와 Table 6

Table 5. 48MPa 콘크리트에 대한 조우조건별 관통결과

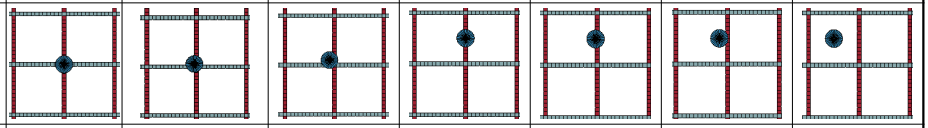
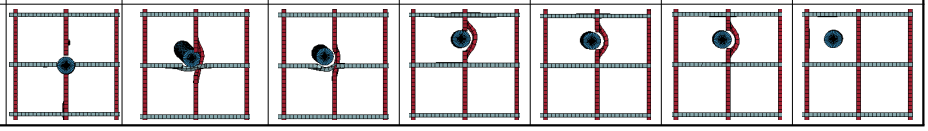
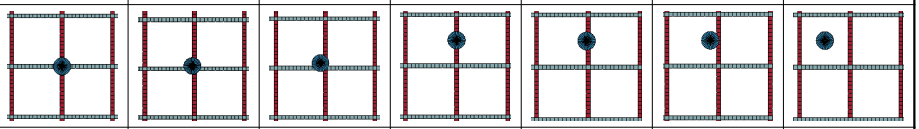
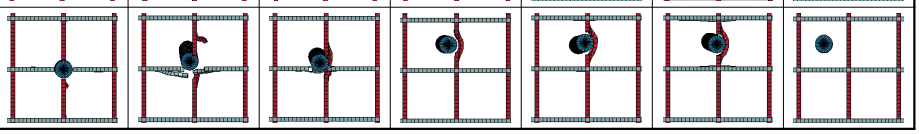
구분		type1	type2	type3	type4	type5	type6	type7
AOI (°)	z축에 대한 회전	0.5	6.3	2.7	2.8	3.5	3.1	0
	x축에 대한 회전	0.3	6.7	4.8	0.1	0.2	0.1	0.07
AOA (°)	z축에 대한 회전	0.2	9.3	3.8	2.1	4.5	2.4	0.04
	x축에 대한 회전	0.3	3.1	1.7	0.8	2.4	1.2	0.03
탄두 노즈 위치(mm)		-0.3, 1.8	-15.2, 14.2	-4.5, 7.9	-1.7, 0.4	-2.5, 1.0	-2.1, 0.5	-0.1, 0.1
잔류 속도(m/s)		191.1	120.8	144.5	169.1	138.1	157.4	227.1
관통 전 형상								
관통 후 형상								

Table 6. 140MPa 콘크리트에 대한 조우조건별 관통결과

구분		type1	type2	type3	type4	type5	type6	type7
AOI (°)	z축에 대한 회전	0.5	3.2	3.2	1.8	5.3	2.5	0
	x축에 대한 회전	0.3	8.9	3.9	0.5	-0.8	0.8	0
AOA (°)	z축에 대한 회전	0.4	5.7	5.4	4.3	9.0	5.1	0.07
	x축에 대한 회전	0.4	18.4	9.1	2.7	8.1	6.0	0.06
탄두 노즈 위치(mm)		-0.3, 2.0	-8.0, 20.3	-8.8, 9.1	-4.6, 1.0	-9.4, -1.7	-8.1, 2.9	-0.04, 0.03
잔류 속도(m/s)		150.5	91.6	92.7	145.7	98.8	112.7	164.5
관통 전 형상								
관통 후 형상								

에서처럼 관통 후 형상이 직진성 있게 관통한 것으로 보여지며 type 4의 경우는 한 개의 철근효과로 인해서 수평방향의 직진성 보정효과가 상대적으로 적게 작용하여 수평방향으로 벗어남을 확인 할 수 있었다. 좀 더 쉽게 확인할 수 있도록 각 콘크리트 표적별 AOI, AOA, 관통 후 탄두 노즈 위치를 Fig. 5~Fig. 7로 나타냈다.

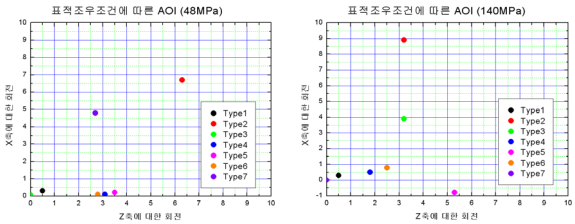


Fig. 5. 표적조우조건에 따른 AOI(48MPa, 140MPa)

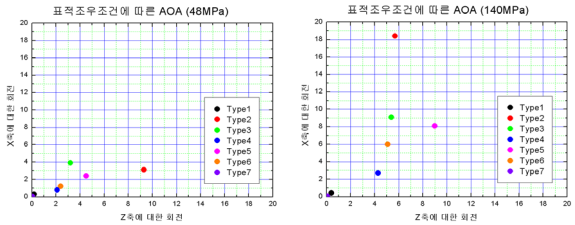


Fig. 6. 표적조우조건에 따른 AOA(48MPa, 140MPa)

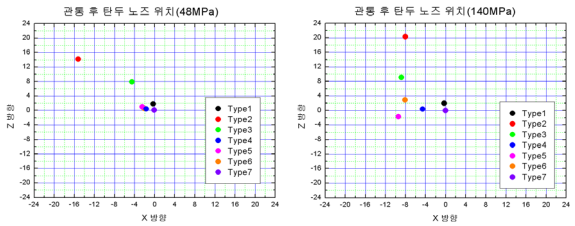


Fig. 7. 관통 후 탄두 노즈 위치(48MPa, 140MPa)

Fig. 5~7에서도 확인할 수 있듯이 표적조우조건이 대칭인 경우에 두 철근의 교차점 대칭조건이 AOA, AOI, 탄두의 노즈 위치에서 상대적으로 원점에서 가깝게 위치해 한 철근의 교차점 대칭조건보다 상대적으로 직진성이 우수하고 표적조우조건이 비대칭인 경우에는 66%의 비대칭조건이 AOA, AOI, 탄두의 노즈 위치로 볼 때 원점에 가깝게 위치하여 33% 비대칭조건보다 직진성이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다.

또한, 콘크리트 압축강도가 큰 140MPa의 경우가 작은 48MPa 보다 관통 후의 AOA, AOI, 탄두의 노즈 위치가 상대적으로 원점에서 크게 벗어나 향후 탄두의 경로가 크게 벗어날 것으로 예측 할 수 있었다.

Fig. 8은 표적 간 3m 이격된 공간다층표적인 경우에 실제로 탄두가 첫째 콘크리트 표적을 관통한 이후 3m를 비행한 후 다음 표적을 조우하기 직전의 탄의 자세를 확인한 결과이다. 모든 조건 중에서 48MPa 콘크리트 표적 중에서 가장 관통 후 직진성이 안 좋을 것으로 예측되는 비대칭조건 33%인 Type 2조건을 수행하였다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 탄의 자세가 왼쪽 윗방향으로 완전히 벗어나 있는 것을 확인 할 수 있다. 이 경우 관통성능 및 탄두생존성에 치명적인 악영향을 끼칠 것으로 판단된다.

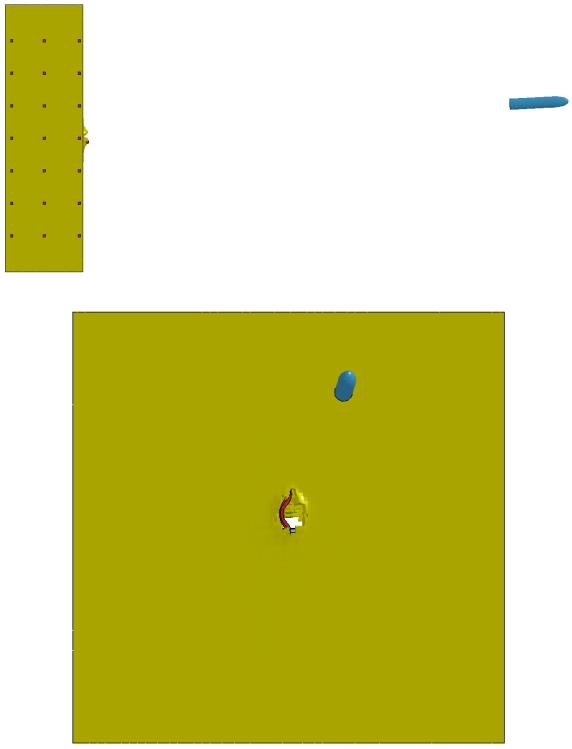


Fig. 8. 첫 번째 표적 관통하고 3m 비행한 후 다음 표적을 관통하기 직전의 탄두의 자세(측면/전면)

Fig. 9와 10은 각각의 콘크리트 표적에 대한 표적조우조건에 따른 관통 및 잔류속도의 변화를 비교하여 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 철근의 빈 공간을 관통한 type 7의 경우의 잔류속도가 가장 크게 나타났고, 대칭조우조건의 경우가 비대칭조우조건의 경우보다 상대적으로 크며, 비대칭 조우조건의 경우 두 철근

교차점의 33%를 비대칭으로 관통한 type 2의 경우가 가장 작게 나타남을 확인할 수 있었다.

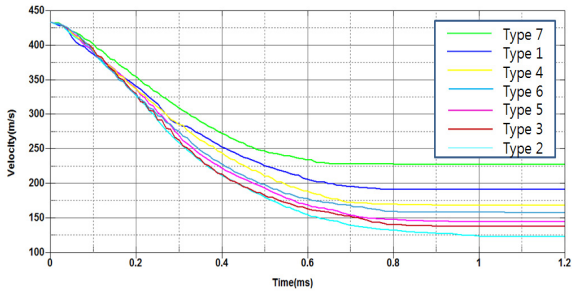


Fig. 9. 48MPa 콘크리트표적에 대한 다양한 표적조우조건에 대한 관통 및 잔류속도비교

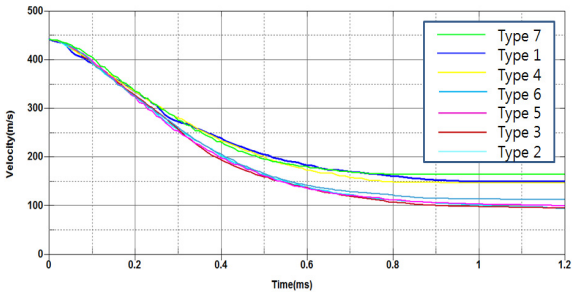


Fig. 10. 140MPa 콘크리트표적에 대한 다양한 표적조우조건에 대한 관통 및 잔류속도비교

3. 결 론

본 연구에서 관통자의 철근콘크리트 표적조우조건에 따른 관통해석결과를 제시하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 철근콘크리트의 관통해석 결과를 시험결과와 비교하여 해석결과의 신뢰성을 검증하였다.
(2) 7가지의 다양한 표적조우조건에 대한 관통성능 및 경로를 비교하였으며, 철근과 철근사이의 빈 공간을 관통하는 type 7의 경우가 가장 관통성능 및 직진성이 우수하게 나타났다. 그리고 표적의 조우조건이 대칭의 경우가 비대칭의 경우보다 훨씬 더 우수한 관통성능을 갖는 것을 확인 하였다.
(3) 표적조우조건 66% 비대칭 조건의 경우가 33% 비대칭 조건보다 관통성능 및 직진성능이 우수하게 나타났다. 비대칭 66%의 경우가 관통초반에 철근을 관통하면서 철근과 멀어지면서 철근효과가 상대적으로 덜 작용한다는 결과를 제시하였다.
(4) 두 철근의 교차점 대칭조건이 한 철근의 교차점 대칭조건보다 상대적으로 관통성능 및 직진성이 우수하게 나타났으며 두 철근이 관통자의 직 수평 및 수직방향으로의 이탈을 각각의 철근들이 상호간에 보완해줌으로써 직진성을 유지할 수 있음을 보여주었다.
(5) 콘크리트 압축강도가 큰 140MPa의 경우가 작은 48MPa 보다 직진성 및 관통성능이 많이 떨어짐을 확인 할 수 있었다. 강도가 크고 및 잔류속도가 작아 직진성이 크게 벗어나는 것을 확인할 수 있다.

References

[1] Luk VK, Forrestal MJ., “Penetration into Semi-infinite Reinforced-concrete Targets with spherical and Ogive-nose Projectiles”, Int. J. Impact Eng, 1987:6, 291～301.
[2] Luk VK, Forrestal MJ., “Penetartion into Semi-infinite Reinforced-concrete Targets with Spherical and Ogive-nose Projectiles”, Int. J. Impact Eng, 1989:8, 83～84.
[3] Hanchak SJ, Forrestal MJ, Young Er, Et Al., “Perforation of Concrete Slabs with 48MPa and 140MPa Unconfined Compressive Strengths”, Int. J. Impact Eng, 1992:12, 1～7.
[4] Holmquist TJ, et al., “A Computational Constitutive Model for Concrete to Large Strain, High Strain Rate, and High Pressure[A]”, 14th Int. Symposium on Ballistics, Vol. 2, 591～600, 1993.
[5] Chen EP., “Simulation of Concrete Perforation Based on a Continuum Damage Model”, DE 95000544, 1994.
[6] De-qing Cao, “Numerical Simulation of Penetration of Reinforced Concrete”, Beijing Institute of Technology, 2000.
[7] Gomez JT, Shuka A., “Multiple Impact Penetration of Semi-infinite Concrete”, Int. J. Impact Eng, 2001:25, 965～979.
[8] Dancygier A. N., Yankelevsky D. Z., “Penetration

Mechanism of Non-deforming Projectiles into Reinforced Concrete Barriers", Struct Eng Mech., 2002:13, 171～186.

[9] Fenglei Huang, Haijun Wu, Qiankun Jin, Qingming Zang., "A Numerical Simulation on the Perforation of Reinforced Concrete Targets", Int. J. Impact Eng, 2005:32, 173～187.

[10] Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M., and Telford, A. R., "Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets", Int. J. Impact Eng, 2005:32, 224～284.

[11] Livermore Software Technology Co. LS-DYNA Keyword User's Manual, California. 2007.