

철근 모사 방법에 따른 콘크리트 관통성능 변화에 관한 수치적 연구

백승주[†]

Numerical Study on Variation of Penetration Performance into Concrete with Reinforcement Modeling Methods

Seung-Ju Baek[†]

ABSTRACT

This paper discusses the effect of numerical reinforcement modeling methods on the penetration performance of a penetrator into a concrete target. AUTODYN-3D has been used to conduct the numerical penetration analyses. In order to validate the computational approach, experimental data of Hanchak have been compared to a computation result and a reasonably good agreement could be obtained. The strength and the diameter of a reinforcement have been changed to find out the effect of reinforcement modeling methods on the penetration performance. The impact locations and velocities of a penetrator are also changed to investigate the effect of reinforcement modeling methods. Residual velocities of a penetrator are quantitatively compared in detail for the evaluation of reinforcement modeling effects on the penetration performance.

Keyword : Penetration, Reinforced Concrete Target, Numerical Reinforcement Modeling Method.

요약

본 논문에서는 철근 모사 방법에 따른 관통자의 콘크리트 관통성능 변화를 수치적으로 분석하였다. 관통해석은 상용 전산 해석 프로그램인 AUTODYN-3D를 사용하여 수행하였고, Hanchak의 시험 데이터를 사용하여 해석 방법의 신뢰성을 입증하였으며, 철근의 강도와 지름 및 관통자의 충돌위치, 속도를 변수로 사용하여 충돌 해석을 수행하였다. 철근 모사가 관통성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해, 관통자의 잔류 속도를 계산하여 침투/관통성능을 평가하였다.

주요어: 관통, 철근강화콘크리트, 철근 모사 방법.

1. 서론

최근 테러의 위협이 점차 증가함에 따라 세계적으로 방호설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 911테러 이후, 민간 건물까지 방호설계의 개념이 적용되는 추세다. 이에 따라, 구조물 손상연구가 군사적 목적뿐만 아니라 비군사적 목적으로도 확대되면서 방호구조물에 대한 연구(Itoh et al, 2007; Arros et al, 2007; Sharma et al, 2012)도 다양하게 시도되고 있다.

방호구조물에 대한 연구 중, 탄체와 같은 관통자 충돌

에 의한 침투/관통현상에 대하여 철근강화콘크리트의 두께, 관통자의 속도, 관통자의 형상, 크기 효과, 콘크리트 구성방정식 등을 고려한 연구가 국내외의 여러 연구자들(Luk and Forrestal, 1987; Warren et al, 2004; Tham 2005; Hansson and Male 2011; Kim and Yoo, 2015)에 의해 활발히 진행되고 있으며, 실제 고속충돌시험은 과도한 비용과 시간이 소요되므로 전산해석을 통한 침투/관통현상 연구가 충돌시험과 병행되어 수행되고 있다. 그러나 일반적으로 콘크리트에 대한 관통자의 충돌해석은 관통자의 제원과 콘크리트의 압축강도 등의 제원에 비해 콘크리트에 사용되는 철근의 영향은 합리적으로 고려하지 못하고 있으며, 철근의 영향을 고려한 연구(Chung et al 2010; Choi et al 2011)에서도 강화재의 모사 방법에 대한 고려 없이 해석을 수행하였기 때문에 철근 모사 방법이 관통성능에 미치는 영향에 관한 연구가 필요한 실정

Received: 8 July 2016, **Revised:** 12 September 2016,

Accepted: 19 September 2016

† Corresponding Author: Seung-Ju Baek

E-mail: bsj0727@add.re.kr

Agency for Defense Development, Daejeon, Korea

이다.

본 연구에서는 유한 요소 해석 프로그램인 AUTODYN-3D을 이용하여 관통해석을 수행하고 철근 모사 방법의 변화가 침투/관통성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이러한 해석결과는 고비용의 침투/관통시험 설계에 사용되는 설계비용의 감소 및 충돌 시나리오에 따른 적합한 표적 모사 방법을 선정하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 침투시험의 모델링

2.1 해석 검증

본 계산에 앞서 Hanchak et al(1992)의 실험 결과를 이용하여 침투/관통해석의 신뢰성을 검토하고, 본 연구에 사용되어질 모델의 적합성을 검증하였다. 참고문헌의 실험에서 관통자의 외형 치수는 직경 25.4 mm, 전체길이 143.7 mm, 전방 아치부(Ogive-nose)의 길이 42.1 mm이며, 중량은 0.5 kg 이다. 관통자의 재질은 T-250 마레이징강(Maraging Steel)이고, Fig. 1에 외형을 도시하였다.

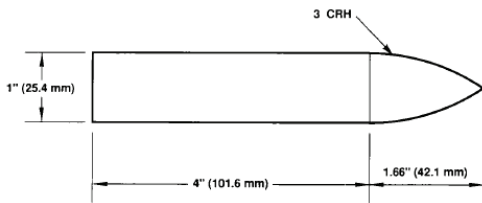


Fig. 1. Penetrator geometry

실험에 사용된 철근강화 콘크리트 표적은 610 x 610 x 178 mm(가로 x 세로 x 두께)의 직사각형이며, 5.69 mm 직경의 철근이 76.2 mm 간격으로 균등하게 배열되어 있고, 배열의 세부내역을 Fig 2에 나타내었다.

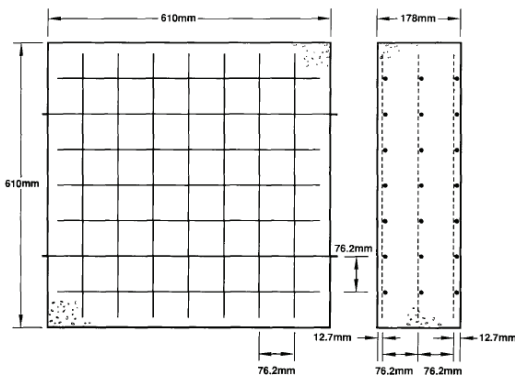


Fig. 2. Target geometry

관통자는 300 m/s에서 1000 m/s의 입사속도(V_i)로 철근강화 표적에 발사되었으며, Table 1에 입사속도에 따른 관통자의 잔류속도(V_r)를 정리하였다. Table 1에 정리된 결과는 시험결과 중에서 압축강도가 48 MPa인 콘크리트 표적을 대상으로 시험한 결과로서, 침투시험 해석 방법의 신뢰성을 평가하기 위한 자료로서 활용되었다.

Table. 1. Test data for 48 MPa concrete

Number	V_i [m/s]	V_r m/s
1	381	136
2	434	214
3	606	449
4	746	605
5	749	615
6	1058	947

2.1.1 상태 방정식, 재료모델

콘크리트의 거동 분석에는 탄성-완전소성 모델 (elastic-perfectly plastic), Drucker-Prager 모델, RHT 콘크리트 모델 등 다양한 재료모델을 사용할 수 있다. 탄성-완전소성 모델은 항복응력이 일정한 재료모델로서 정적 하중을 받는 콘크리트의 모사에 주로 사용되고, Drucker-Prager 모델은 항복응력을 압력의 함수로 표현하는 재료 모델로서 흙의 소성변형을 모사하는데 주로 사용하지만 콘크리트나 암반 등의 압력 종속 항복모델에도 널리 사용된다. 마지막으로 RHT 콘크리트 모델은 압력, 변형률, 손상에 따른 영향이 조합된 모델로서, 콘크리트, 암석, 세라믹과 같은 취성 재료에 사용되는 소성 모델이며, 특히 동적하중을 받는 콘크리트의 거동 모사에 유용하다.

본 논문에서는 위에서 설명한 세 가지 모델 중에, Riedel et al.(1999;2009)에 의해 제안된 RHT 콘크리트 재료모델을 사용하여 해석을 진행하였으며, 재료의 상태 방정식은 아래의 식(1)에 공극률 α 를 도입한 p - α 상태 방정식을 사용하였다.

$$p = f(\rho, e) = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 \dots + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \quad \text{for } p \geq 0 \quad (1)$$

여기서, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ (ρ_0 : 초기 기준 밀도)로서 압력에 따른 상대 부피 변화이며, e 는 단위질량당 내부에너지이다. 그 외 A_1, A_2, A_3, B_0, B_1 은 재료 상수에 해당한다. 식(1)에 공극률을 도입한 p - α 상태방정식은 식(2)와 같다.

$$p = f(\rho\alpha, e) = A_1\bar{\mu} + A_2\bar{\mu}^2 + A_3\bar{\mu}^3 \dots + (B_0 + B_1\bar{\mu})\rho_0 e \quad \text{for } p \geq 0 \quad (2)$$

$$\alpha = 1 + (\alpha_i - 1) \left[\frac{p_{solid} - p}{p_{solid} - p_{ini}} \right]^n \quad (3)$$

위 식에서 $\bar{\mu} = \rho\alpha/\rho_0 - 1$ 이고 α_i 는 초기 공극률이고, p_{ini} 는 초기 압력, p_{solid} 는 최대 압축상태에서의 압력으로 정의된다. 해석에 사용한 입력 값들을 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Parameter for the P-alpha EOS

Parameter	Value
Reference Density, ρ_0	2314 kg/m ³
Porous Density, ρ_{porous}	3000 m/s
Initial comp. pressure, p_{ini}	35 MPa
Solid comp. pressure, p_{solid}	6000 MPa
Compaction exponent, n	3
Bulk Modulus A1	35.27 GPa
Parameter A2	39.58 GPa
Parameter A3	29.8 GPa
Parameter B0	1.22
Parameter B1	1.22

RHT 콘크리트 모델에서 파괴면은 다음과 같은 식(4)로 나타낸다.

$$p = f(p, \sigma_{eq}, \theta, \dot{\epsilon}) = \sigma_{eq} - Y_{TXC(p)} \times F_{CAF(p)} \dots \times R_{3(\theta)} \times F_{RATE(\dot{\epsilon})} \quad (4)$$

파괴면을 통해 압력 경화, 변형 경화, 인장과 압축에 의한 변형을 경화, 손상에 의한 변형 연화, 공극 붕괴에 의한 손상 결합 등을 고려할 수 있다. 식에서 σ_{eq} 는 등가응력이며, $Y_{TXC(p)}$ 는 파단면(Fracture Surface)으로서 식(5)와 같이 표현하고, $R_{3(\theta)}$ 은 삼축압축 대비 삼축인장에서 재료의 강도 감소를 나타내는 항으로 식(6)과 같이 나타낸다.

$$Y_{TXC(p)} = f_c [A_{fail} (p^* - p_{spall}^* F_{RATE})^{N_{fail}}] \quad (5)$$

식(5)에서 f_c 는 공시체 압축강도, A_{fail} 과 N_{fail} 은 파단면을 정의하는 상수와 지수이고, p^* 는 압축강도로 정규화된 압력이며 p_{spall}^* 은 정규화된 동적 인장 한계로 정의된다.

$$R_{3(\theta)} = \frac{2(1 - Q_2^2)\cos\theta + (2Q_2 - 1)\sqrt{4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta - 4Q_2}}{4(1 - Q_2^2)\cos^2\theta + (1 - 2Q_2)^2} \quad (6)$$

$$\text{where, } \cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}J_3}{2^{3/2}\sqrt{J_2}}$$

$$Q_2 = Q_{2,0} + BQp^* ; 0.5 < Q_2 < 1, BQ = 0.0105$$

식(6)에서 $Q_{2,0}$ 은 압력 0에서 강도비이고, BQ는 압력의 증가에 따라 파단면의 변화율을 정의하는 계수이다. 식(4)와 (5)에서 $F_{RATE(p)}$ 는 변형률 속도 함수로서 압력에 따라 아래의 식(7)과 같이 정의된다.

$$F_{RATE}(\dot{\epsilon}) = \begin{cases} 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{3e^{-7}} \right)^\alpha & \text{for } p > \frac{1}{3}f_c ; \text{comp.} \\ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{3e^{-6}} \right)^\delta & \text{for } p < \frac{1}{3}f_c ; \text{tens.} \end{cases} \quad (7)$$

변형 경화는 식(8)과 같이 탄성한계면(Elastic Limit Surface)과 경화도(Hardening Slope)로 표현된다. 탄성한계면은 한계면의 비율을 정의하는 상수(Elastic Strength/ f_c 및 Elastic Strength/ f_t)에 따라 파괴면을 축소하여 결정된다.

$$Y^* = Y_{el} + \frac{\epsilon}{\epsilon_{pl(pre-softening)}} (Y_{fail} - Y_{el}) \quad (8)$$

$$\text{where, } \epsilon_{pl(pre-softening)} = \frac{Y_{fail} - Y_{el}}{3G} \times \left(\frac{G_{el}}{G_{el} - G_{pl}} \right)$$

RHT 콘크리트 모델에서 손상은 소성변형의 누적으로 간주하고, 식(9)로 정의한다.

$$D = \sum \frac{\Delta\epsilon_{pl}}{\epsilon_{pl}^{fail}} \quad (9)$$

$$\text{where, } \epsilon_{pl}^{fail} = D_1 (p^* - p_{spall}^*)^{D_2}$$

D_1 과 D_2 는 재료상수이고, 손상 누적은 각각 식(10)과 (11)처럼 변형을 연화하고 전단강도를 감소시킨다.

$$Y_{fractured}^* = (1 - D) Y_{fail}^* + D Y_{residual}^* \quad (10)$$

where, $Y_{residual}^* = B(p^*)^M$
 $G_{fractured} = (1-D)G_{el} + DG_{res}$ (11)

탄성한계, 파괴, 잔류면을 조합하여 압력과 강도에 대하여 나타내면 Fig. 3과 같고, 앞에서 서술한 내용에 일치하는 RHT 콘크리트 모델 입력 값을 Table 3에 정리하였다.

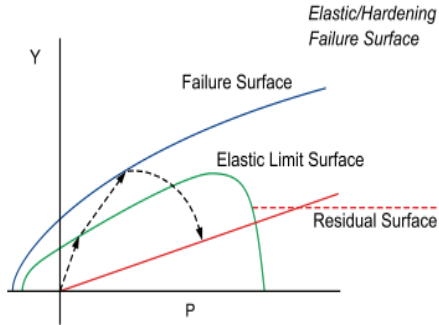


Fig. 3. Combination of Three Limit Surface

Table 3. Parameters for the RHT concrete model

Parameter	Value
Shear Modulus, G_{elas}	16.7 GPa
Compressive Strength, f_c	48 MPa
Tensile Strength, f_t/f_c	0.083
Shear Strength, f_s/f_c	0.18
Intact Failure Surface Constant, A_{fail}	1.6
Intact Failure Surface Exponent, N_{fail}	0.61
Tens./Comp. Meridian ratio, $Q_{2,0}$	0.6805
Brittle to Ductile Transition, BQ	0.0105
Hardening Slope, $G_{el}/(G_{el} - G_{pl})$	2
Scale Constant, elastic strength, $/f_t$	0.7
Scale Constant, elastic strength, $/f_c$	0.53
Fracture Strength Constant, B	1.6
Fracture Strength Exponent, M	0.61
Compressive strain rate Exponent, α	0.032
Tensile Strain Rate Exponent, δ	0.036
Damage Constant, D_1	0.04
Damage Constant, D_2	1
Minimum strain to Failure, ϵ_{min}^{fail}	0.01

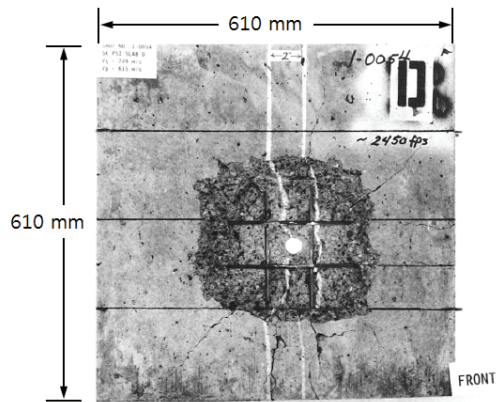
철근과 관통자는 고속변형을 표현하기 좋은 Johnson Cook 강도모델을 사용하였으며, Table 4에 관통자 및 철근의 물성 값을 정리하여 나타내었다.

Table 4. Parameter for projectile and reinforcement

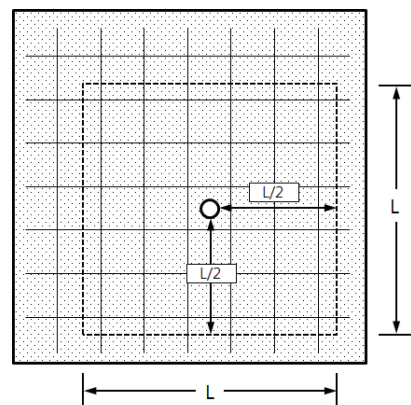
Object	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	ν	ϵ_{pl}^{fail}	σ_y [MPa]
Projectile	8000	207	0.3	2.0	1724
Reinforcement	7500	210	0.284	0.8	300

2.1.2 요소 및 경계조건, 초기조건 설정

검증에 사용하는 시험결과는 Fig. 4과 같이 충돌부를 중심으로 좌우 대칭이므로, Fig. 2의 시험표적을 Fig 5와 같이 단순화하고 y축과 z축에 대칭조건을 부여하여 1/4 형상으로 모사하였다.



(a) Post-test Photographs of the Impact



(b) Analysis of Dimensions and Configuration

Fig. 4. Simplification of target

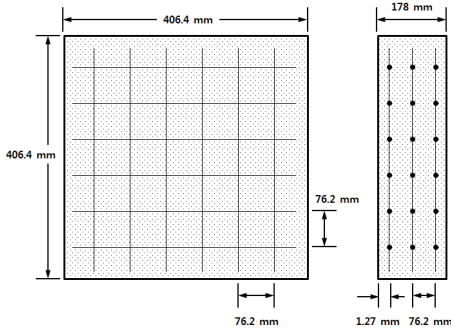


Fig. 5. Geometry used in the analysis.

이때 콘크리트 표적은 56 X 64 X 64(x X y X z)로 나누어 격자의 한 변이 0.3175 cm가 되도록 하였으며, 콘크리트 내부의 철근은 y축과 z축을 따라 각각 62개의 빔요소로 나누어 모사된 콘크리트 표적과 철근의 절점이 일치할 수 있도록 하였다. 철근은 체적 요소 강화 (Volume Element Reinforcement)로 취급하고 콘크리트 표적의 절점과 연결하여 전체 모델링을 완성하였다. 전체 모델링 요소의 수는 콘크리트 표적 229376개, 탄체 1080개, 철근 1116개로 구성되어 있고, 해석모델의 형상 및 경계조건을 Fig. 6에 도시하였다. 철근의 모사 방법이 관통성능에 미치는 영향을 분석하는 것이 목적이기 때문에 콘크리트 모델의 침투 변형(Erosion Strain)값은 3.5로 동일하게 설정하였다.

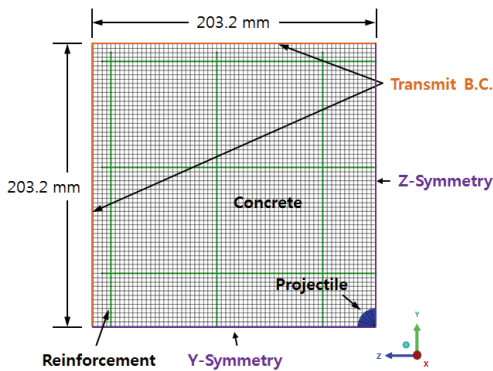


Fig. 6. Geometry and boundary conditions

2.1.3 해석 신뢰도 검증 결과

Hanchak et al(1992)이 수행한 실험결과의 일부를 검증모델의 해석결과와 비교하여 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 초기속도에 따른 잔류속도가 저속보다는 고속에서 시험값과 더 가까우나, 전체적으로 유사

한 것을 알 수 있다.

해석결과 얻어진 잔류속도는 실험결과와 비교했을 때 충돌속도 381m/s 에서 약 50%의 차이를 보이나, 충돌속도 606 m/s 이상부터는 실험결과의 차이가 8% 이하이다. 저속에서 잔류속도가 높게 계산된 가장 큰 이유는 개방 경계조건(Transmit Boundary Condition)을 설정하였기 때문으로 판단된다. 개방경계조건을 설정하면 침투 변형 값이 최종 계산결과에 미치는 영향이 미미하기 때문에, 본 전산해석방법이 철근 모사 방법이 충돌해석에 미치는 영향을 살펴보는데 신뢰성이 있다고 판단된다.

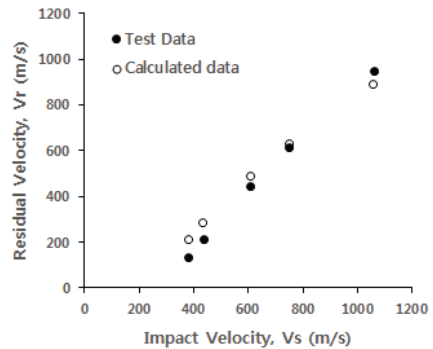


Fig. 7. Comparison of test and calculated data.

3. 침투시험의 해석

3.1 모델링 조건 및 변수 정의

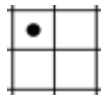
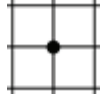
앞서 수행하였던 전산해석결과를 통해 검증된 해석모델을 이용하여, 철근 모사 방법에 따라 침투/관통성능이 어떻게 변하는지 확인하기 위해 다음과 같은 3가지의 철근 모사 방법을 고려하였다. 첫째는 철근을 체적 요소 강화로 취급하지 않고 콘크리트의 절점과 공유시켰을 경우이고, 둘째는 철근을 체적 요소 강화로 취급하고 콘크리트의 절점과 결합시켰을 경우이며, 마지막으로 철근을 체적 요소 강화로 취급한 경우를 고려하였다. 철근 모사 방법의 구분은 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Description of M.M.(Modeling methods)

Item	Description
M.M. 1	Beam nodes are attached to the concrete nodes.
M.M. 2	Beam nodes are modeled as volume element reinforcement(there is no direct interaction with projectile) and attached to the concrete nodes.
M.M. 3	Beam nodes are modeled as volume element reinforcement.

각각의 방법에 대하여 관통 후 잔류속도를 분석하고, 충돌 위치, 충돌 속도, 철근의 강도, 철근의 굵기를 변수로 채택하여 관통 후 잔류속도를 비교함으로써 철근 모사 방법이 관통특성에 미치는 영향을 분석하였다. 철근의 두께와 강도는 KS D 3504에 제시되어 있는 철근의 호칭에 따른 공칭 지름과 항복강도를 기준으로 사용하였으며, 각 변수의 정의 및 형태는 Table 6에 정리하였다.

Table 6. Description of variables

Item	Description
Var 1	Impact Position 1 : 
	Impact Position 2 : 
Var 2	Projectile Velocity 434 m/s ~ 749 m/s
Var 3	Strength of Reinforcement SD300 ~ SD700(KS D 3504)
Var 4	Reinforcement Diameter D4 ~ D16(KS D 3504)

3.2 해석 결과

3.2.1 충돌 위치 및 속도의 영향

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 관통자의 충돌 위치가 콘크리트와 콘크리트 사이일 때와 철근(철근의 직경 $D_{5.29}$)과 철근의 교차점일 때, 충돌속도(V_s)에 따른 잔류속도(V_r)를 철근 모사 방법에 따라 정리한 그림이다.

충돌 위치가 콘크리트와 콘크리트 사이일 경우, 잔류속도는 무근콘크리트를 사용하였을 때의 결과와 비교하여 철근을 모사한 경우가 더 작게 나타나는 경향이 있으나 그 차이는 미미하다는 계산결과를 얻을 수 있었다. 관통자가 철근과 철근 사이의 빈 공간에 충돌하는 경우, 철근 강화효과가 발현되지 못하는 것으로 판단된다. 반면에, 관통자가 철근과 철근의 교차점을 타격하는 경우에는 잔류속도의 감소가 모사 방법 1(M.M. 1) > 모사 방법 3(M.M. 3) > 모사 방법 2(M.M. 2)의 순으로 나타나는 경향이 있으며, 상대적으로 저속인 영역에서는 그 차이가 미미하거나 없지만, 고속으로 갈수록 차이가 커진다는 계산결과가 도출되었다.

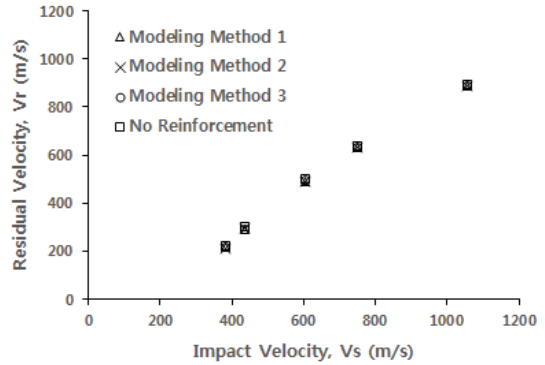


Fig. 8. Vs verse Vr : Impact position 1

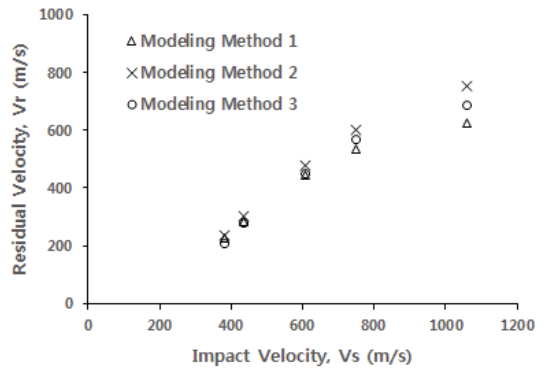


Fig. 9. Vs verse Vr : Impact position 2

3.2.2 철근 강도의 영향

Fig. 10과 Fig. 11은 충돌 위치가 철근과 철근의 교차점일 때, 철근(철근의 직경 D_6)의 항복강도(σ)를 증가시키면서 철근 모사 방법에 따른 잔류속도(V_r)의 감소를 충돌속도 434 m/s와 749 m/s에 대하여 나타낸 그림이다. 모사 방법 1과 3에서 공통적으로 항복강도가 증가할수록 관통속도가 감소한다는 해석결과를 얻을 수 있었으나, 모사 방법 2의 경우에는 철근 강도에 따른 잔류속도의 변화가 거의 없다는 경향이 나타났다. 모사 방법 2의 경우 빔 요소를 철근 체적 요소로 취급하고 빔 요소의 절점을 콘크리트 표적의 절점과 공유시켰다. 그러므로 빔 요소의 직경이 작을수록 체적 강화 요소에 영향을 주는 콘크리트 요소가 줄어들기 때문에, 강도가 강해져도 잔류속도 감소에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다.

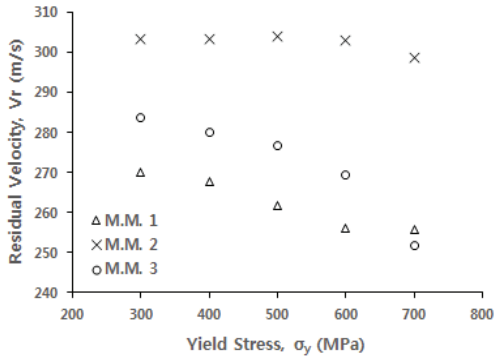


Fig. 10. σ_y verse V_r : Impact velocity 434 m/s

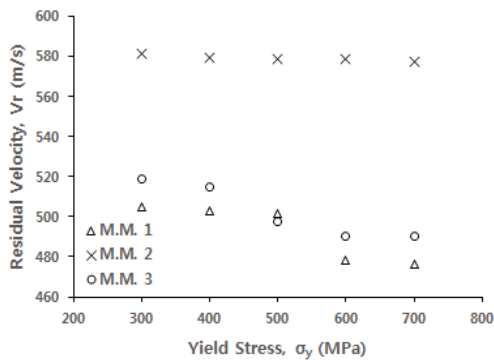


Fig. 11. σ_y verse V_r : Impact velocity 749 m/s

3.2.3 철근 직경의 영향

철근과 철근 교차점에 충돌할 때의 잔류속도(V_r)를 철근 직경(D)에 따라 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 12에서, 관통자의 잔류속도 감소는 모사 방법 1의 경우 철근의 직경 4.23, 6.35, 5.69, 9.53, 15.9mm에 대하여 잔류속도가 각각 303.38, 285.86, 270.15, 163.19 m/s이며, 충돌속도에 대비 속도감소량이 30.1, 34.1, 37.8, 62.4 %로 직경이 커질수록 속도가 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 반면에, 모사 방법 2, 3의 경우는 철근의 직경 9.53 및 15.9mm에 대해서는 선형적으로 감소하지만, 상대적으로 작은 직경 4.23, 5.69, 6.35 mm에 대해서는 그 차이가 거의 없거나 작은 것으로 계산되었다. 이는 빔 요소의 직경이 커질수록 체적 강화 요소에 영향을 주는 콘크리트 요소들이 많아지기 때문으로 판단된다.

Fig. 13에서, Fig. 12와 달리 모사 방법에 관계없이 철근 직경이 증가할수록 잔류속도가 감소하는 결과를 볼 수 있다. 체적 강화 요소로 철근을 모사할 경우 콘크리트와 철근의 절점을 물리적으로 일치시킬 필요가 없어 모

델링이 간편하지만, 관통자와 철근 사이에 직접적인 접촉이 없다고 가정한다. 그러므로 콘크리트 표적의 변형이 더 빠르게 발생하여(충돌 속도가 더 높아질 경우) 침투변형을 초과하는 콘크리트 요소(요소 탈락)가 많아지면, 관통자와 철근 사이에는 접촉 조건이 부과되어 있지 않으므로 충돌속도에 따른 잔류속도가 모사 방법 1에 비해 상대적으로 높아지는 것으로 판단된다.

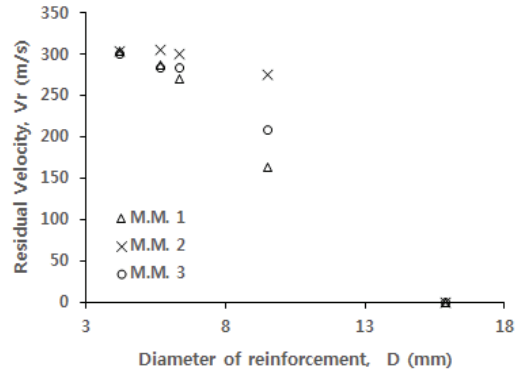


Fig. 12. D verse V_r : Impact velocity 434 m/s

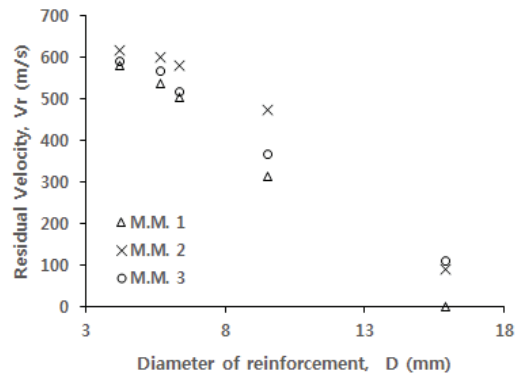


Fig. 13. D verse V_r : Impact velocity 749 m/s

4. 결론

본 연구에서 철근 모사 방법에 관통자의 철근강화콘크리트 침투/관통성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 범용 유한요소 해석 프로그램 AUTODYN -3D을 사용하여 전산해석을 수행하였다. 관통거동을 전산해석으로 구현하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째로, 해석 결과의 신뢰도 확보를 위해 시험결과와 해석결과를 비교하여 해석의 신뢰도를 확보하였다.

둘째로, 관통자의 표적 충돌위치에 따른 관통 후 잔류 속도를 비교하였으며, 철근과 철근 사이를 관통하는 경우 철근 모사 방법에 관계없이 철근 잔류속도가 초기 충돌 속도에 따라 일정하게 수렴되는 것으로 계산되었다. 관통자가 철근과 철근 사이의 빈 공간을 수직으로 타격하는 경우, 철근강화효과를 발휘하지 못하는 것으로 판단된다.

셋째로, 충돌위치가 철근과 철근의 교차점일 때, 충돌 속도가 증가할수록 철근 모사 방법에 따른 잔류속도의 차이가 증가하며, 잔류속도의 감소는 모사 방법 1(M.M.1) > 모사 방법 2(M.M.2) > 모사 방법 3(M.M.3)의 순서로 나타났다.

넷째로, 기존 해석 모델의 철근을 더 강한 항복강도를 가지는 재질로 대체한 모델의 경우 철근을 체적 강화 요소로 모사하고, 절점을 콘크리트 표적과 공유하면(모사 방법 2) 강도가 강해져도, 잔류속도 감소에 미치는 영향은 미미하다는 계산결과를 얻었다.

다섯째로, 관통자가 철근과 철근의 교차점을 관통하는 경우, 철근의 직경이 4.23 mm에서 15.9 mm까지 증가할수록 동일 충돌속도에서 관통자의 잔류속도가 감소한다. 또한 철근을 체적 강화 요소로 모사한 경우, 관통자와 철근 사이에는 접촉 조건이 부과되지 않기 때문에 철근 모사 방법 1에 비해 잔류속도 감소가 크지 않다는 해석결과를 얻었다.

결론적으로, 철근 모사 방법 2의 경우, 모사 방법 1과 3에 비해 관통자의 속도 및 충돌위치와 철근의 직경 및 강도 변화에 따른 잔류속도의 변화가 적은 것으로 나타났다. 이로부터 모사 방법 2는 변수들의 변화에 대한 영향을 제대로 반영하지 못하는 것으로 판단된다.

References

AUTODYN, Theory Manual, Revision 4.0, Century Dynamics Inc., 1998.

Arros J. and Doumbalski N., "Analysis of Aircraft Impact to Concrete Structures", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 237, 2007, 1241-1249

Chung C. H., Choi H., Lee J. W., Choi K. R., "Evaluation of Local Effect Prediction Formulas for RC Slabs Subjected to Impact Loading", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol 30, 2010, 543-560
(정철현, 최헌, 이정휘, 최강릉, "충격하중이 작용하는 RC 슬래브의 국부손상 산정식에 대한 고찰", *대*

한토목학회, Vol.30, 2010, 543-560).

Choi H., Chung C. H., Yoo H. K., Kim S. Y., "Effect of Reinforcement Ratio and Impact Velocity on Local Damage of RC Slabs", *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol 31, 2011, 311-321

(최헌, 정철현, 유현경, 김상윤, "철근비 및 충돌속도가 RC 슬래브의 국부손상에 미치는 효과", *대한토목학회*, Vol.31, 2011, 311-321).

Hanchak S. J., Forrestal M. J., Young E.R., Ehr Gott J.Q., "Perforation of Concrete Slabs with 48MPa (7 ksi) and 140MPa (20 ksi) Compressive Strengths", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 12, 1992, 1-7.

Hansson H., and Malm R., "Non-linear Finite Element Analysis of Deep Penetration in Unreinforced and Reinforced Concrete", *Nordic Concrete Research*, 2011, Vol. 44, 87-107.

Itoh Y., Liu C., and Kusama R., "Dynamic Simulation of Collisions of Heavy High-Speed Trucks with Concrete Barriers.", *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 34, 2007, 1239-1244

Kim S. B., Yoo Y. H., "Concrete Target Size Effect on Projectile Penetration", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 18, 2015, 154-159

(김석봉, 유요한, "침투시험에서의 콘크리트 표적크기 영향 분석", *군사과학기술학회*, Vol.18, 2015, 154-159).

Luk V. K., Forrestal M. J., "Penetration into Semi-infinite Reinforced-Concrete Targets with Spherical and Ogive-nose Projectiles", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 6, 1987, 291-301

Riedel W., Thoma K., Hiermaier S., Schmolinske E., "Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500 Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes. 9". *Internationales Symposium, Interaction of the Effects of Munitions with Structures*, Berlin Strausberg, 1999, 315 - 322

Riedel W., Kawai N., Kondo K., "Numerical Assessment for Impact Strength Measurements in

- Concrete Materials”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, 2009, 283-293
- Sharma H, Hurllebaus S and Gardoni P, “Performance-Based Response Evaluation of Reinforced Concrete Columns Subject to Vehicle Impact”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 43, 2012, 52-62
- Tham C. Y., “Reinforced Concrete Perforation and Penetration Simulation using AUTODYN- 3D”, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, 2005, 1401-1410
- Warren T. L., Fossum A. F. and Frew D. J., “Penetration into Low-strength(23 MPa) Concrete : Target Characterization and Simulations”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 39, 2004, 477-503
- Yun K. J., Yoo Y. H., Kim H. J., “Numerical Simulations of the Normal Perforation Behavior by Penetrator without AOA into Steel Reinforced Concrete Targets”, *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 16, 2013, 398-404
- (윤경재, 유요한, 김학준, “철근강화콘크리트에 대한 받음각이 없는 관통자의 수직관통거동 전산해석”, *군사과학기술학회지*, Vol.16, 2013, 398-404).



백 승 주 (bsj0727@add.re.kr)

2004 아주대학교 기계공학 학사

2012 포항공대 기계공학 석사

2013~ 현재 국방과학연구소 제4기술연구본부 연구원

관심분야 : 충돌 M&S, 폭발, 관통 시험