

콘크리트 두께와 자철광 함량에 따른 방탄 성능 평가

Evaluation of Ballistic Resistance Performance by Thickness and Proportion of Magnetic Aggregate of Concrete

임 채 연¹

김 국 주²

노 정 현³

장 창 수⁴

박 영 준^{5*}

Lim, Cha-Yeon¹ Kim, Kuk-Joo² Roh, Jeong-Heon³ Jang, Chang-Su⁴ Park, Young-Jun^{5*}

Researcher, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea¹

Assistant professor, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea²

Researcher, ROKA Nuclear-WMD Protection Research Center, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea³

An assistant, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea⁴

Professor, Korea Military Academy, Nowon-Gu, Seoul, 01805, Korea⁵

Abstract

The main purpose of protective facility for small military unit is to provide the protection of not all the weapons system but the near-miss bullet in Korean army. In particular about the small caliber bullets, especially KM80 in Korea, there were many studies that both of the experiential and structural design methods dose not reflect enough the military threat. For that reason, a new equation to calculate effective anti-piercing depths for RC slabs against small caliber bullets is proposed in earlier research with actual shooting test. But, the test only considers the strength of concrete without the thickness of concrete, types of aggregate, the angle of yaw of bullet, high-strength concrete, etc. Therefore, this study evaluated the ballistic resistance performance by thickness and proportion of magnetic aggregate of concrete. As a result, we identified two major statistical estimations that the error of piercing depth by the angle of yaw of bullet could be cancelled by barrage and the thickness and proportion of magnetic aggregate of concrete dose not effect on the protection ability of concrete structure.

Keywords : piercing depth, thickness of concrete, magnetic aggregate, correlation analysis

1. 서 론

1.1 연구의 목적

방호시설은 적의 무기체계로부터 아군의 전투력을 보호하는 매우 중요한 군사시설이다. 특히, 한국처럼 전략적 완충 지대가 없어 신속한 공세의 전환이 요구되는 국가(이스라엘, 필란드, 싱가포르 등)에서는 방호시설을 통한 초전의 생존성 보장은 뛰어난 무기체계 못지않게 중요한 국가방위 요소로

작용하고 있다. 적의 무기체계로부터 충분한 방호성능을 발휘하는 방호구조물을 설계하는 방법에는 경험적 설계방법과 구조공학적 설계방법이 있다. 경험적 설계방법은 시험을 통하여 얻어진 데이터를 정량적으로 분석하여 만들어진 수식, 도표, 차트를 이용하며, 구조공학적 설계방법은 공학적 원리에 기반을 두고 설계하는 방법이다[1].

소부대 축성시설 구축목적은 적의 모든 무기체계에 대한 완벽한 방호가 아니며[2], 한국군의 경우, 지근탄에 대한 방호개념을 적용하고 있다[1]. 특히 소구경 탄자의 경우, KM 80탄을 기준으로 설정하고 있는데, 이에 대한 경험적 설계방법과 구조공학적 설계방법 모두 현실적이지 못하다는 의견이 줄곧 제기되어 왔다[2].

이에 Kim et al.[2]는 콘크리트 슬래브의 소구경 탄자에

Received : September 16, 2019

Revision received : January 15, 2020

Accepted : January 31, 2020

* Corresponding author : Park, Young-Jun

[Tel: 82-2-2197-2955, E-mail: parky@mnd.go.kr]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

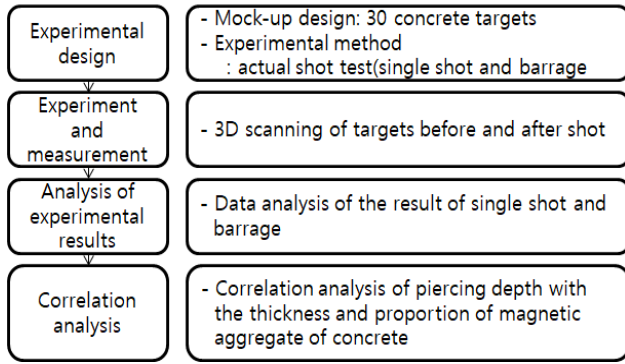


Figure 1. Research process

대한 관입저항력을 실사격 실험을 통해 평가하고, 관입저항력 계산식을 제안한 바 있다. 해당 연구에서는 소구경 탄자의 충격에 대한 콘크리트 관입깊이에 관한 기존의 연구결과와의 적용이 잘못되었음을 밝혀내었다[2]. 그러나, 해당 연구는 콘크리트 강도만을 변수로 설정하였고 표적의 두께, 굽은골재의 종류, 탄자의 편주각 등에 대한 변수가 고려되지 않았으며, 고강도 콘크리트에 대한 실험 결과가 부족하다. 특히, 중량골재를 사용하여 EMP 및 감마선 차폐 성능을 동시에 확보할 수 있는 중량 콘크리트 구조체에 대한 실험결과는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 고강도 콘크리트를 구성하기 위해 사용되는 자철광의 함량과 실험체의 두께에 따른 방호성능을 실험을 통해 확인하였다. 이를 위하여 총 30개의 실험체에 대하여 단발사격 및 추가 5연발 연속사격에 대한 관입깊이를 측정하였고 상관관계를 분석하였다. 향후 본 연구의 결과는 콘크리트 구조물의 방호성능 향상을 위한 연구에 활용될 수 있을 것이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 고강도 콘크리트에 대해 자철광 함량과 실험체의 두께를 변화시키고 소구경 탄자 사격을 통해 방호성능을 확인하는 것으로 제한한다. 이를 위하여 본 연구는 Figure 1과 같은 절차로 진행된다.

첫째, 실험계획을 수행하여 총 30종의 실험체를 제작하였고, 90m 거리에서 단발 및 추가 연속사격을 수행하였다.

둘째, 사격 전후 3D 스캐닝을 통해 탄착점 형성 여부와 관입깊이를 측정하였다.

셋째, 단발사격 및 추가 연속사격에 대한 정규성 검증과 T 검증을 통해 탄자의 충격속도 및 입사각의 오류에 대한

상쇄효과를 확인하였다.

넷째, 콘크리트 굽은골재 및 잔골재의 자철광 함량과 실험체의 두께에 따른 방호성능을 상관관계 분석을 통해 확인하였다.

2. 문헌 고찰

2.1 철근콘크리트 방호 이론

한국군에서는 Table 1의 (a)와 같은 콘크리트 축성시설의 두께 기준이 제시되고 있다[4]. 소구경 탄자의 콘크리트 관입깊이에 관한 연구결과(b)는 대구경에 의한 피해를 중심으로 설정된 (a)보다 높은 안전율을 고려한 방호두께를 요구하고 있다. 반면, 소부대 전투 유경험자 혹은 일선부대 지휘관들은 연구결과 (b)보다는 (a)의 콘크리트 두께를 더 크게 신뢰하고 있으며, (b)에 근거한 벽체 두께는 소부대 전투시설에서의 적용이 현실적이지 못하다는 의견이 줄곧 제기되어 왔다[2].

Table 1. Required concrete slab thickness for protective structure

(a) Recommended thickness of concrete slab for protective facility (mm)			
Slab	Wall	Cover soil	
300	300	900	
(b) Piercing depth of concrete by bullets (f_{ck} : 240kg/cm ²)			
Bullet standards	KM100	km80	km184
piercing depth (mm)	68	973	184

2.2 탄자의 충격조건

목표물에 충돌한 탄자의 관입현상은 표적과 탄자의 특성에 따라 좌우되며, 강재와 달리 콘크리트에서 발생하는 탄자의 관입현상은 표적에 맞는 타격 각도에 따라라도 차이가 발생한다. 탄자의 콘크리트 관입현상에 영향을 주는 인자로는 콘크리트 압축강도와 같은 표적 특성인자와 탄자의 속도 및 무게와 같은 탄자 특성인자로 대별된다. 이 외에도 재료 조성 및 균질성 등 여러 요소가 관통에 영향을 미친다[5].

본 연구에서는 7.62mm 소화기탄을 기준으로 하며, 자철광이 함유된 콘크리트에 대한 관입깊이를 분석하고자 하므로 충격조건을 정확히 제어하여 실험을 수행할 필요가 있다. 탄자의 충격조건으로는 충격속도, 입사각, 편주각이 있다.

이 중, 지정된 거리와 위치에서 사격을 수행할 경우 충격속도와 입사각은 제어가 가능할 것으로 판단되지만 편주각의 경우 제어가 어렵다.

편주각이란 탄자의 길이 축 방향과 비행방향의 각을 의미하며, 탄자의 회전수가 요구치를 충족시키지 못하거나 회전량이 너무 높으면 편주현상이 발생하게 되며, 이는 탄착시의 관통력이 약해지는 현상을 일으킨다[6]. 즉, 장약이나 총렬 등의 미세한 불량 등, 예측하지 못한 변수로 인해 편주현상이 발생할 경우, 실험 결과에 오차가 발생할 수 있다. 그러나, 편주각에 의한 관통력 저하 현상은 초고속카메라 등을 사용하여야만 확인할 수 있으며, 이를 수치화 시키는데 많은 어려움이 따른다.

이와 같은 편주각에 대한 오차를 줄이기 위하여 미군 야전 교범 FM 5-103의 내용과 선행연구자료[7]에서는 사수와 표적의 이격거리를 90m 혹은 75m 로 제시하였고, 단발사격이 아닌 6발 연속사격을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 선행연구자료의 제안을 반영하여 사거리 90m에서 단발과 5발 추가 연속사격을 통해 편주각에 대한 오차가 상쇄되는 것을 확인하는 실험을 진행하였다.

2.3 고강도 콘크리트와 자철광

방호구조물은 일반적으로 콘크리트와 강재로 시공된다. 콘크리트는 강도가 좋고 형상과 크기를 임의로 시공할 수 있기 때문에 거의 모든 곳에 적용될 수 있는 가장 보편적인 재료이다. 반면 강재는 제한된 공간, 출입문, 창문, 송수관, 총안구 피복두께 등의 부속물에 적합한 재료이다[1].

미국의 한 연구에서는 일반 건축물에 보다 고강도인 콘크리트를 사용할 경우 건설비용이 하락됨을 지적한 바 있다 [8]. 콘크리트 관입깊이에 대한 미군의 경험식[1]과 Kim et al.[2]에서도 알 수 있는 것과 같이 콘크리트 구조물의 방호 성능 또한 콘크리트의 강도와 밀접한 연관이 있으므로, 공사비 대비 방호성능을 높이기 위해서는 고강도 콘크리트를 사용할 필요가 있다.

콘크리트를 고강도화 하는 방법은 크게 3가지가 있다. 먼저 결합재인 시멘트를 통한 강도를 개선하는 방법이고, 다음으로 골재의 강도를 개선하는 방법이 있으며, 마지막으로 골재와 결합재인 시멘트와의 부착강도를 개선하는 방법이 있다[3]. 시멘트를 통한 콘크리트의 고강도화는 보통 포틀랜드 시멘트의 일부나 대부분을 고로슬래그 미분말로 대체하거나[9], 조강시멘트를 사용하는 방법[10] 등이 있다. 골재

의 강도 개선을 통해 고강도화 하는 방법으로 중량골재의 사용이 대표적이다[3]. 골재와 시멘트의 부착강도 개선을 통한 콘크리트의 고강도화 방법으로는 고성능 감수제 등을 사용하여 물시멘트비를 저감시키는 방법, 실리카퓌름과 같은 고분말의 결합재를 사용하여 수화물량을 증가시키는 방법 등으로 분류할 수 있다[11-13]. 이와 같이 콘크리트의 고강도화를 위한 수많은 연구들이 수행되었고, 이 중, 중량골재를 사용한 콘크리트는 염해저항[14], 감마선 차폐[15] 등 특수 목적으로 많이 사용되고 있다. 즉, 중량 콘크리트로 이루어진 방호시설은 탄자에 대한 방호 뿐 아니라, 핵무기 등에 의한 감마선 차폐 성능과 EMP 차폐 성능 등을 기대할 수 있다. 이에 본 연구에서는 중량 콘크리트를 대상으로 한다.

ACI 304.3R[16] 보고서에서는 중량 콘크리트의 경제성을 확보하기 위해서는 지역에서 생산되는 중량골재의 사용이 필요함을 지적하였다. 국내의 경우 생산 가능한 중량골재는 자철석이 유일하다. 국내의 경우, 자철석을 이용한 중량 콘크리트의 생산은 특별한 용도에 따라 중요하게 요구될 수 있다[17].

이에 본 연구에서는 방호성능 향상을 위해 자철광을 골재로 사용하는 중량 콘크리트를 대상으로 한다. 특히 자철광 함량에 따른 방호성능을 확인하고자 실험체를 제작하였고 사격 실험을 시행하였다. 단, 자철광을 사용한 중량 콘크리트의 감마선 및 EMP 차폐 성능은 본 연구에서 다루지 않는다.

3. 실험개요

3.1 콘크리트 배합 설계 및 실험체 제작

실험에 사용한 배합은 Table 2와 같이 자철광 함량에 따라 총 5가지 배합을 설계하였으며 별도의 혼화제는 사용하지 않았다. 실험체는 콘크리트 30.4cm(가로)×30.4cm(세로)의 크기로, 각 배합 별로 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm의 두께로 총 30개의 실험체를 제작하였다. 모든 실험체는 압축강도의 정확도를 기하기 위하여 PC(Precast Concrete) 공장에서 실험체의 크기 및 소요강도에 맞게 주문 제작하였으며, 타설된 실험체는 증기양생을 시행하였다.

3.2 변수 산정

관통 및 관입 현상에 관한 기존 연구결과에 따르면, 실험 결과에 영향을 미치는 가변 요소는 표적에 영향을 주는 인자

Table 2. Mix proportion

No.	F _{cr} (MPa)	G _{max}	Slump (mm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	M/A (%)	Unit amount (kg/m ³)						F ₂₈ (MPa)
								W	OPC	C	F	Cm	Fm	
1	50	25	230	3.6	31	46	0%	167.0	539	897	750	0	0	56.4
2	50	25	230	3.4	31	46	25%	167.0	539	673	562	231	194	59.2
3	50	25	235	3.9	31	46	50%	167.0	539	449	374	445	372	58.4
4	50	25	230	3.9	31	46	75%	167.0	539	224	191	669	562	57.5
5	50	25	230	3.8	31	46	100%	167.0	539	0	0	895	751	58.3

F_{cr} : required average compressive strength of concrete used as the basis for selection of concrete proportion
 G_{max} : Maximum size of coarse aggregate
 W/C : Water-cement ratio
 S/a : Sand to aggregate ratio
 M/a : Magnetite to coarse aggregate ratio
 W : Water

OPC : Ordinary Portland Cement
 F : Coarse aggregate
 Cm : Fine aggregate
 Fm : Magnetite coarse aggregate
 F₂₈ : Magnetite fine aggregate
 : Compressive strength of concrete on 28th day from casting

와 탄자에 영향을 주는 인자로 나눌 수 있다[2]. 이에 본 연구에서는 표적에 영향을 주는 인자와 탄자에 영향을 주는 인자로 나누어 일부 인자는 고정하고 일부 인자는 변수로 고려하여 실험을 시행하였다.

3.2.1 표적에 영향을 주는 인자

표적에 영향을 주는 인자는 대표적으로 콘크리트 강도와 두께가 있다[1]. 먼저 콘크리트 강도의 경우, 설계된 배합에 따라 실험체와 함께 제작된 공시체의 28일 강도는 Table 2와 같이 평균 58MPa이 측정되었다. 실험체 제작과정에서 증기양생을 수행하였기에 28일 강도의 측정결과는 설계강도인 50MPa보다 높은 수준인 56.4~59.2Mpa로 나타났다. 그러나, 자철광 함량에 따라 강도가 증가하지 않는 것으로 파악되었다. 이는 자철광의 함유량을 증가시킬수록 자철광 내 미립분의 함유량도 증가하여 강도개선의 효과가 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 이에 콘크리트 강도는 모두 동일한 것으로 보고 실험을 진행하였다. 콘크리트 두께의 경우, 앞서 언급한 바와 같이 각 배합 별로 6가지 두께를 제작하였다. 이는 실험체의 두께가 관입깊이에 영향을 주는지 확인하기 위함이다. 또한, 실험 결과를 분석하여 자철광 함량이 콘크리트의 방호성능에 영향을 주는 것으로 밝혀질 경우, 파쇄한계두께와 관통한계두께의 대략적인 범위를 추정하기 위함이다. 따라서 표적에 영향을 주는 인자 중 독립변수는 실험체의 두께와 자철광 함량이다.

3.2.2 탄자에 영향을 주는 인자

탄자에 영향을 주는 인자는 속도, 무게, 입사각, 편주각



Figure 2. Live fire test results and 3D scanning

등이 있다[1]. 본 연구에서는 7.62mm 보통탄을 사용하고 사수의 위치를 고정하여 탄자의 무게, 입사각을 고정하였다. 탄자의 속도의 경우는 실험 여건 내에서 능동제어가 현실적으로 제한된다[2]. 이에 본 연구에서는 사수와 표적 사이의 거리를 90 m로 설정하였고, 여러 가지 손실 요소를 고려하여도 충격속도가 일정한 것으로 가정하였다. 편주각의 경우, 전술한 바와 같이 제어나 측정이 어렵기에 단발사격과 연발사격을 통해 상쇄 가능한지 확인하였다. 따라서 본 실험에서 탄자에 영향을 주는 인자 중 독립변수는 없다고 볼 수 있다.

3.2.3 실험 결과 측정 방법

실험은 시험체별, 단발사격과 추가 5발의 연속사격을 통해 총 6회씩 수행하여 관입깊이를 측정하였다. 관입깊이는 Figure 2와 같이 3D 스캐너를 통해 측정하였으며, 모든 실험체에 대하여 3회씩 스캔하여 사격 전/후 스캔 데이터의 편차를 Figure 3과 같이 비교 분석하여 수치화하였다. 스캔 시점은 사격전/ 1회 사격 후/ 추가 5회 사격 후 이다. 이에 따라 본 실험의 종속변수는 관입깊이 이다.

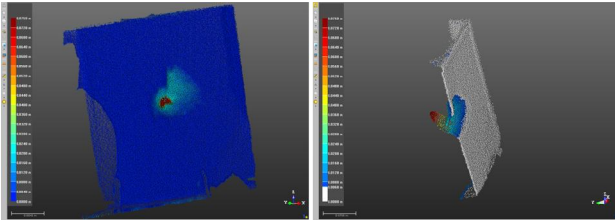
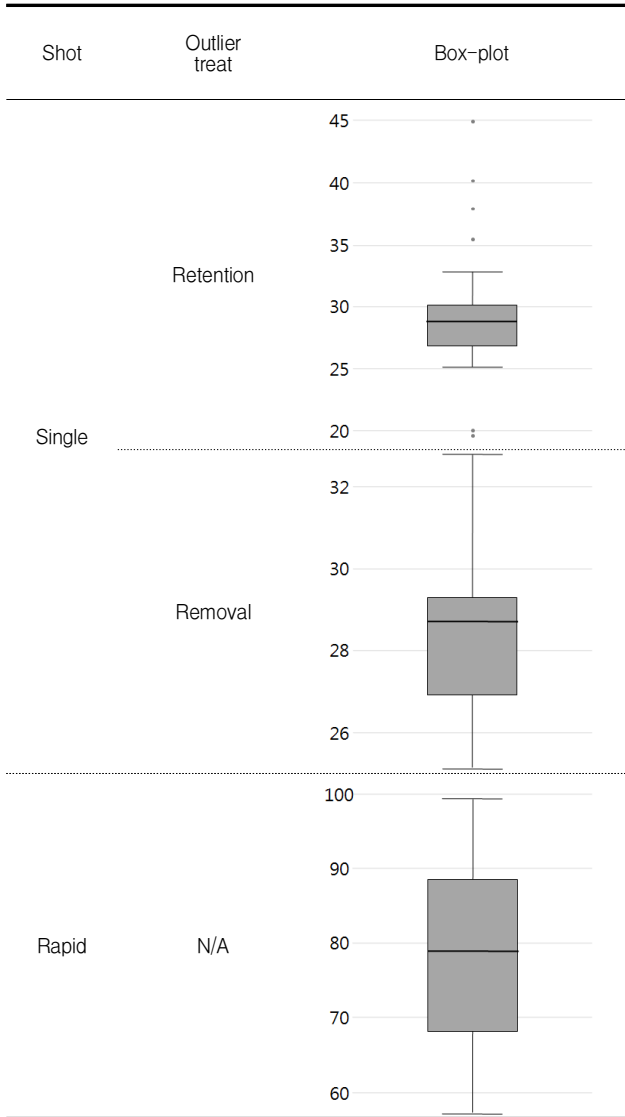


Figure 3. 3D scanning data

Table 3. Box-plot (low data)



3.4 관입 깊이 측정 결과

측정결과를 박스플롯으로 표현하면 Table 3와 같이 단발사격에서 6건의 아웃라이어가 식별되었고, 연속사격에서는 아웃라이어가 식별되지 않았다.

단발사격의 결과는 총 30건 중, 4건의 관통현상으로 인해

관입깊이 측정할 수 없었다. 나머지 26건의 관입깊이 측정 결과의 평균은 약 29.5mm이며, 26mm에서 33mm의 결과가 가장 많이 관측되었다. 아웃라이어로 판정된 결과로는 하위 2건과 상위 4건이며, 하위 2건은 19.6mm와 20mm로 하위 세 번째 관입깊이인 25.2mm와 많은 차이를 보인다. 또한, 상위 4건의 경우, 36mm~44.9mm의 관입깊이를 보여준다. 이는 상위 5번째 결과인 33.7mm와 비교하여 3.3mm~33.2mm의 차이를 보여준다.

연발사격은 단발사격에서 관통되지 않은 24개의 시험체를 대상으로 하였다. 그 결과 13개의 시험체에서 관통이 일어났고, 나머지 13개 시험체에서 57.2mm~99.6 mm의 관입깊이를 보여주었고, 이들의 평균은 81.5mm로 나타났다.

3.5 결과 분석 방법

본 연구에서 실험을 통해 확인하고자 하는 바는 크게 두 가지이다. 첫째, 탄자의 편주현상에 의한 오차는 연발사격을 통해 상쇄할 수 있는지 확인하기 위하여 단발사격과 추가 연속사격을 수행하였다. 둘째, 자철광 함량 및 시험체의 두께와 관입깊이의 상관관계를 분석하기 위하여, 단발사격과 연발사격 결과 중 통계적으로 보다 유의미한 결과를 바탕으로 통계분석을 시행하였다.

3.5.1 단발사격 및 추가 연속사격의 결과 비교 분석

자료의 정규성은 통계학적으로 매우 중요한 사항이므로 측정 데이터가 정규분포를 보이는지 여부에 대한 분석이 선행되어야 한다[18]. 이에 본 연구에서는 측정된 데이터의 정규성을 확인하기 위해 제곱근, 로그, 역수변환을 통해 정규성을 검토하였다. 이후 가장 높은 정규도를 보이는 데이터를 바탕으로 등분산 검증과 t-검증을 통해 어느 데이터가 통계적으로 더욱 유의미한지 확인하였다.

3.5.2 상관관계 분석

둘 또는 그 이상의 변수들이 서로 관련성을 가지고 변화할 때 그 관련의 정도를 규명해야 할 경우가 많이 있다. 이때, 변수 간의 상관관계를 분석하기 위해 사용되는 통계분석 방법에는 상관분석과 회귀분석이 있다. 상관분석이란 변수들의 관련 정도를 분석하는 통계적 방법을 말한다. 회귀분석이란 독립변수와 종속변수들 사이의 관련성을 수학적 모형을 이용하여 측정된 변수들의 자료로부터 추정하고 분석하는 통계적 방법이다[2,18]. 이에 본 연구에서는 자철광 함량과

실험체 두께에 따른 관입깊이의 차이에 대한 상관관계를 분석하였다.

4. 결과 분석

4.1 정규성 검증

본 연구에서는 측정된 데이터를 Table 4와 같이 제공근, 로그, 역수 변환을 통해 정규성을 검토하였다. 검토 결과 단발사격의 경우 아웃라이어를 제거한 역수의 p-value가 가장 높게 나타났으며, 연발사격의 경우, 로그 변환의 p-value가 가장 높게 나타났다. 그러나, 단발사격의 경우, 로그 변환과 역수의 p-value가 0.001의 차이로 거의 유사한 값을 나타내므로, 단발사격과 연발사격의 데이터 속성을 같게하기 위하여 본 연구에서는 log 변환을 통해 데이터를 분석하였다. 각 데이터의 log 변환 후 Q-Q plot은 Table 5와 같으며, 이를 box plot으로 표현하면 Figure 4과 같다.

Table 4. Test of normality

shot	outlier treat.	stat.	Transformation to Normalization			
			raw	square	log	recipr.
single	retention	w	0.878	0.898	0.907	0.890
		p-value	0.004	0.012	0.020	0.008
	removal	w	0.972	0.975	0.977	0.978
		p-value	0.787	0.846	0.882	0.902
rapid	N/A	w	0.940	0.944	0.945	0.937
		p-value	0.453	0.512	0.527	0.413

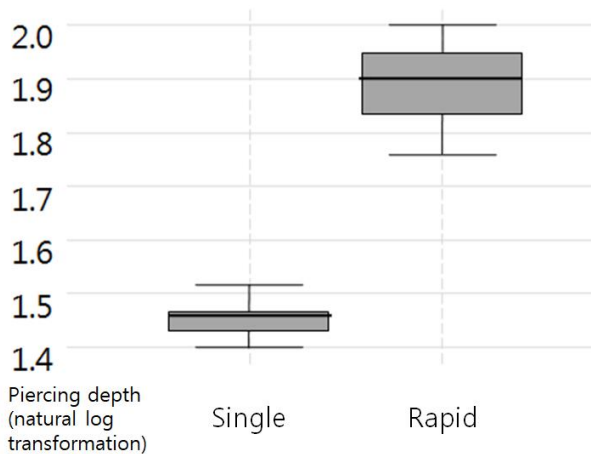
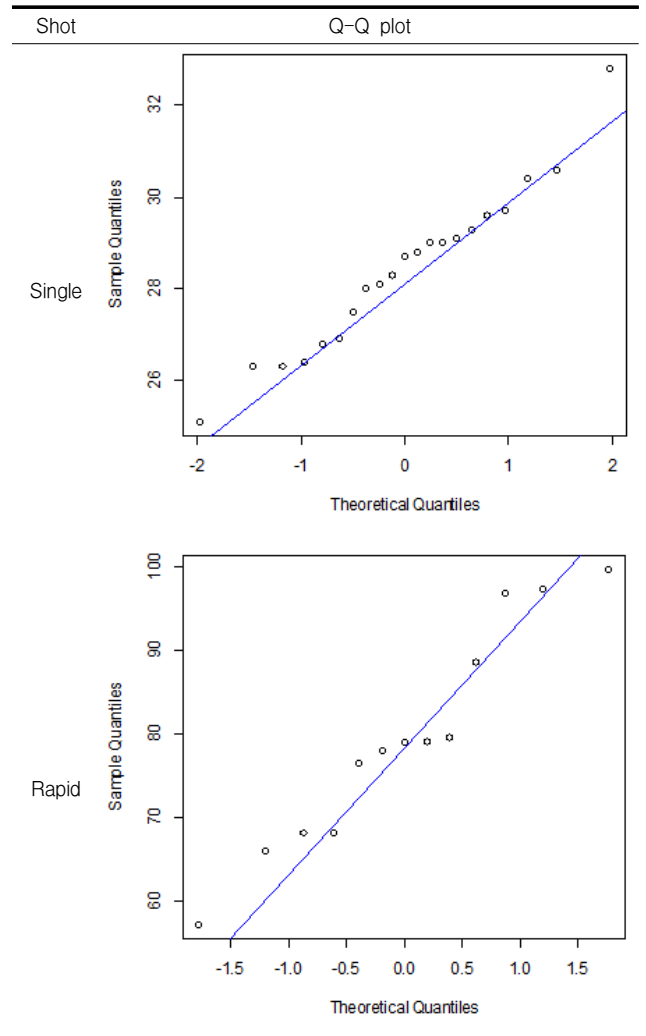


Figure 4. Box-plots (single shots and rapid shots)

Table 5. Q-Q plot (log-transformation)



데이터 속성을 통계적으로 확인하기 위해 본 연구에서는 단발사격과 연발사격의 관입깊이 결과값이 등분산이라는 귀무가설을 설정하여 등분산 검증을 수행하였다. 그 결과는 Table 6과 같이 p-value가 0.05보다 작은 값이 도출되었기에 귀무가설을 기각하여 두 데이터는 등분산이라고 볼 수 없음을 확인하였다.

이를 바탕으로 본 연구에서는 두 집단의 차이가 같다는 귀무가설을 수립하고 등분산이 아니므로 웰치 t 검증을 수행하였다. 그 결과는 Table 7과 같이 p-value가 0.05보다 작은 값이 도출되었기에 귀무가설을 기각하여 연발사격에 의한 관입깊이가 단발사격에 의한 것보다 통계적으로 유의미하게 깊다는 것을 확인하였다.

단, 이 경우 두 집단의 잔차는 정규분포에 문제가 없어야 하므로, 잔차에 대한 샤피로 윌크 검증(Shapiro-Wilk test)

를 통해 정규성검증을 수행하였다. 그 결과, 잔차의 p-value는 0.1563으로 0.05보다 큰 값이 도출되었으므로 정규분포 가정에 문제가 없음을 확인하였다.

즉, 아웃라이어 제거한 데이터에 대한 통계적 검증에 의해 연발사격이 단발 사격보다 일관적인 관입깊이를 보여 주고 있는 것이며, 이는 편주각을 포함한 발생 가능한 오차들에 대하여 상쇄효과가 발생하였다고 추론해 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 고른 결과를 보이는 연발사격에 의한 관입깊이 데이터를 바탕으로 자철광 함량과 관입깊이의 상관관계 분석을 수행하였다.

Table 6. F-test(single and rapid shot)

F	nun df	denom df	p-value
7.1718	12	20	0.0001338

Table 7. Welch's t test(single and rapid shot)

t	D _f	p-value
21.132	14.098	4.484e-12

D_f : degree of freedom

4.2 상관관계 분석

콘크리트의 자철광 함량 및 실험체 두께와 관입깊이의 관계를 분석하기 위하여, 본 연구에서 설정한 두 독립변수와 종속변수에 대하여 상관관계 분석을 수행하였다.

상관관계를 규명하기 위하여 산포도, 공분산 분석, 상관계수 분석을 수행하였다. 로그 변환한 연발사격의 관입깊이(log_depth), 실험체의 두께(cont), 자철광 함량(magn)의 산포도는 Figure 5와 같으며, 각 변수간에 상관관계를 찾을 수 없는 것을 확인할 수 있다.

공분산 분석 결과는 Table 8과 같다. 공분산은 각 변수가 함께 변하는 정도를 수치화 한 것이며, 각 변수사이의 척도가 모두 다르기에 공분산만 가지고는 각 변수가 상관이 있는지 여부를 확인하기 어렵다. 이에, 수행한 상관계수 분석 결과는 Table 9와 같다. 상관계수의 범위는 -1에서 1 사이이며 절대값이 1에 가까울수록 서로 강한 상관관계를 보인다. 따라서 분석결과를 해석하면, 로그로 변환된 관입깊이 데이터는 실험체의 두께와 약한 음의 상관관계를 가지며, 자철광 함량은 매우 약한 양의 상관관계를 가짐을 확인할 수 있다.

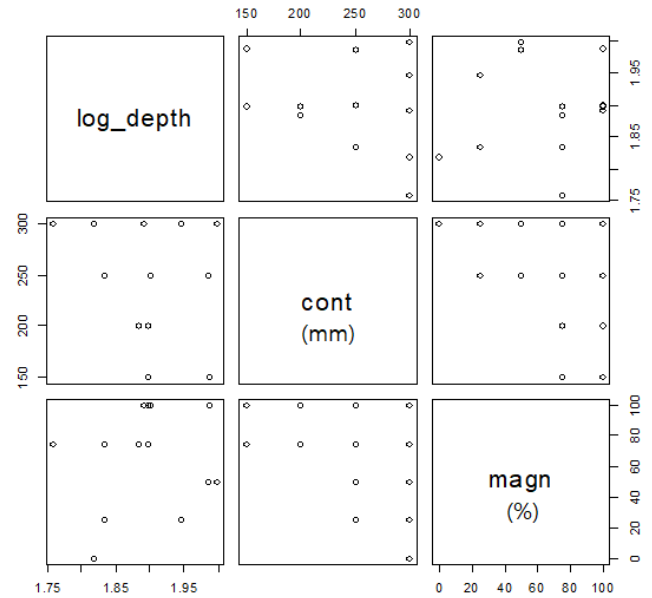


Figure 5. Scatter diagram between depth, thickness of concrete and magnetite to coarse aggregate ratio

Table 8. Analysis result of covariance

cov	log_depth	cont	magn
log_depth	0.005	-1.016	0.314
cont	-1.01594	3108.974	-873.397
magn	0.314	-873.397	1097.756

cov : covariance

Table 9. Analysis result of coefficient of correlation

cor	log_depth	cont	magn
log_depth	1.000	-0.252	0.131
cont	-0.252	1.000	-0.473
magn	0.131	-0.473	1.000

cor : coefficient of correlation

Table 10. Regression analysis result of variance

	D _f	sum sq	mean sq	F value	Pr(>F)
cont	1	0.003984	0.003984	0.6769	0.4298
magn	1	0.000012	0.000012	0.0020	0.9655

두 독립변수와 관입깊이를 대상으로 회귀분석을 수행한 결과는 Table 10과 같다. 회귀분석 결과로는 실험체의 두께와 자철광 함량 모두 Pr 값이 0.05보다 매우 크게 도출되었

다. 즉, 콘크리트 두께와 자철광 함유율은 관입깊이에 영향을 미친다고 볼 수 없다.

5. 결 론

본 연구에서는 고강도 콘크리트를 구성하기 위해 사용되는 자철광의 함량과 실험체의 두께에 따른 방호성능을 확인하였다. 이를 위해 자철광 함량과 콘크리트 표적의 두께에 따라 30개의 실험체를 표적으로 단발사격 및 추가 5연발사격에 대한 관입깊이 측정하였으며 상관관계를 분석하였다. 이번 연구를 통해 밝혀진 결과는 다음과 같다.

첫째, 연발사격에 의한 관입깊이가 단발사격에 의한 것보다 통계적으로 유의미하게 깊다는 것을 확인하였다. 이는 미군 야전교범 FM 5-103에서 제안된 바와 같이 탄자의 편주각 등, 통제하기 어려운 변수들에 의한 오차를 연발사격에 의해 상쇄시킬 수 있음을 의미한다. 따라서, 향후 수행될 탄자의 충격에 의한 콘크리트 구조물의 방호성능 확인 실험의 정확도 향상을 위해서는 연발사격을 수행하는 것이 타당하다고 사료된다.

둘째, 자철광의 함량 및 콘크리트 두께는 관입깊이와 통계적으로 상관관계가 있다고 할 수 없다. 즉, 콘크리트의 강도 개선이 없는 한 자철광 함량과 콘크리트 두께는 관입깊이에 영향을 주지 않음을 밝힐 수 있었다.

본 연구에서는 굵은골재와 잔골재의 대체재로 자철광만을 고려하였다. 보다 정확하고 신뢰성 있는 연구를 위해서는 자철광 이외에 혼합물, 합금, 다중체, 세라믹 등의 복합재료를 활용한 고강도 콘크리트 실험체를 제작하여 방호성능을 확인하는 연구가 수행된다면 활용가치가 높은 연구결과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

요 약

소부대 방호시설의 주된 목적은 적의 모든 무기체계에 대한 완벽한 방호가 아니며, 한국군의 경우, 지근탄에 대한 방호를 적용하고 있다. 특히 소구경 탄자의 경우, KM 80탄을 기준으로 설정하고 있는데, 이에 대한 경험적 설계방법과 구조공학적인 설계방법 모두 현실을 제대로 반영하지 못한다는 선행연구들이 있다. 이에 실사격 실험을 수행한 선행연구에서는 콘크리트 슬래브의 소구경 탄자에 대한 관입저항력

계산식을 제안한 바 있다. 그러나, 해당 실험에서는 콘크리트 강도만을 변수로 설정하였고 콘크리트의 두께, 굵은골재의 종류, 탄자의 편주각, 고강도 콘크리트 등에 대한 변수가 고려되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 두께와 자철광의 함량에 따른 방탄성능을 평가하였다. 그 결과 탄자의 편주각에 의한 오차를 연발사격에 의해 상쇄시킬 수 있다는 것과 자철광의 함량과 콘크리트 두께는 방호성능 향상에 영향을 주지 않는다는 것을 통계적으로 확인하였다.

키워드 : 관입깊이, 콘크리트 두께, 자철광 골재, 상관관계 분석

Funding

The ROKA Nuclear · WMD Protection Research Center at Korea Military Academy is gratefully acknowledged for providing the financial support that made this study possible. The authors would like to acknowledge ROKA Nuclear · WMD Protection Research Center for their assistance with data collection and technical advice.

ORCID

Chayeon Lim, <http://orcid/0000-0001-5686-0593>

Kuk-Joo Kim, <http://orcid/0000-0002-9747-1807>

Jeong-Heon Roh, <http://orcid/0000-0003-4604-8619>

Chang-Su Jang, <https://orcid/0000-0002-2466-3189>

Young-Jun Park, <http://orcid/0000-0003-4006-8192>

References

1. Kim SB, Oh KD, Baek SH, Lee JH, Park YJ, Baek JH, protection engineering. 2nd ed, Paju (Korea): Cheongmoongak; 2013. 612 p. Korean.
2. Kim SB, Kang YC, Lee JC, Baek SH, Park YJ. An assessment for anti-piercing designs of rc slabs against small caliber bullets. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology. 2007 Jun;10(2):69-75.
3. Shin SW. High strength-high performance concrete design. Seoul (Korea): Kimoondang; 2011. 341 p. Korean.
4. ROK - Army Headquarter, Stronghold and Protective Facility.

- Gyeryong (Korea): ROK - Army Headquater; 1998, 25 p. Korean.
5. Suh KS. Research on multi level protective facility for non-nuclear weapon, Seoul (Korea): Hwarang-dae Research Institute; 1885, 31 p. Korean.
 6. Cho PG, Lee KI. Easy guns and ballistics. Seoul (Korea): Shinhwajunsangihoeok; 2013, 50 p. Korean.
 7. Dong Yang Engineering & Construction. Study for improving the protection ability of concrete structure. Seoul (Korea): Korea Military Academy; 2005. 45 p. Korean.
 8. Schmidt WFH, Hoffman ES. 9000-psi concrete - why? why not?. *Civil Engineering-ASCE*, 1975;45(5):52-5.
 9. Yang WH, Ryu DW, Kim WJ, Park DC, Seo CH. An experimental study on early strength and drying shrinkage of high strength concrete using high volumes of ground granulated blast-furnace slag(GGBS). *Journal of The Korea Institute of Building Construction*, 2013 Aug 20;13(4):391-9. <http://doi.org/10.5345/jkibc.2013.13.4.391>
 10. Min TB, Cho IS, Lee HS. Fundamental study on the strength development of cement paste using hardening accelerator and high-early-strength cement. *Journal of The Korea Institute of Building Construction*, 2013 Aug 20;13(4):407-15. <https://doi.org/10.5345/jkibc.2013.13.4.407>
 11. Kim KH, Lee JS, Noh SK, Lee HI, Hwang YS, Han CG. Fundanumental characteristics of high performance cement mortar using pre-mix cement according to the combination of binders and the change of mixing hours, Autumn Annual Conference of Architectural Institute of Korea; 2008 Oct 24-25; Chonnam National University, Gwangju, Korea. Seoul (Korea): Architectural Institute; 2008. p. 459-62.
 12. Kim KH, Hwang YS, Kim SS, Choi SY, Han MC, Han CG. The influence of the type of silica fume on the property of cement binder for ultra high strength. Spring Annual Conference of the Korea Institute of Building Construction, 2007 Apr 28; Konkuk University, Seoul, Korea. Seoul (Korea): The Korean Institute of Building Construction; 2007. p. 51-4.
 13. Jin SR, Pei OC, Kim KH, Hwang YS, Kim SS, Han CG. Fluidity of the cement paste depending on pulverulent combination of pre-mix cement for high-strength concrete. Autumn Annual Conference of Korea Concrete Institute, 2007 Nov 3; Sungkyunkwan University, Suwon, Korea. Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2007. p. 657-60.
 14. Moon H, Kim JH, Lee JY, Chung CW. Evaluation of chloride attack resistibility of heavyweight concrete using copper slag and magnetite as aggregate. *Journal of The Korea Institute of Building Construction*, 2017 Dec 20;17(6):483-92. <https://doi.org/10.5345/jkibc.2017.17.6.483>
 15. Oh JH, Mun YB, Lee JH, Choi HK, Choi S. Aggregate effects on γ -ray shielding characteristic and compressive strength of concrete. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology*. 2016 Dec 31;14(4):357-65. <http://doi.org/10.7733/jnfcwt.2016.14.4.357>
 16. ACI Committee 304. Heavyweight Concrete : Measuring, Mixing, Transporting, and Placing (ACI 304.3R-96). Mi (USA): American Concrete Institute; 1996. 8 p.
 17. Mun JS, Mun JH, Yang KH, Lee H. Effect of substituting normal-weight coarse aggregate on the workability and mechanical properties of heavyweight magnetite concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2013 Aug 31;25(4):439-46. <https://doi.org/10.4334/jkci.2013.25.4.439>
 18. Sung TJ. Basic Statistics. Seoul (Korea): Hakjisa; 2017. 598 p. Korean.