

강제환기를 적용한 이글루형 탄약고 저장환경 개선에 관한 수치적 연구

윤해든¹⁾ · 김성훈^{*2)}

¹⁾ 한양대학교 대학원 융합국방학과

²⁾ 육군 탄약지원사령부 탄약기술시험평가실

Numerical Study on Improvement of Storage Environment of Igloo-Shaped Magazine Using Forced Ventilation

Hae-Deun Yoon¹⁾ · Seong Hoon Kim^{*2)}

¹⁾ Department of Convergence Defense, Hanyang University, Korea

²⁾ Ammunition Technical Test Assessment Center, Ammunition Support Command, Korea

(Received 15 December 2020 / Revised 25 January 2021 / Accepted 29 January 2021)

Abstract

This study explores the improvement of storage environment of igloo-shaped magazine using forced ventilation. Conjugate heat transfer analysis of forced convection and conduction are performed to calculate the flow, temperature, and relative humidity field in igloo-shaped magazine. Through the conjugate heat transfer analysis, the effects of inlet vent, volume flow rates of jet, and jet angles on the condensation and relative humidity are numerically investigated. The area of condensation in igloo-shaped magazine and relative humidity at the surface of ammunitions are then calculated.

Key Words : Igloo-Shaped Magazine(이글루형 탄약고), Forced Ventilation(강제환기), Condensation(결로), Relative Humidity(상대습도)

기 호 설 명

A_{cond} : Area of condensation

c_p : Specific heat at constant pressure

C : Concentration

D_B : Brownian diffusion coefficient

D_T : Thermophoresis diffusion coefficient

D_{jet} : Diameter of jet inlet

k_f : Thermal conductivity of fluid

k_s : Thermal conductivity of solid

P : Pressure

Pr_t : Turbulent Prandtl number

* Corresponding author, E-mail: kimsh9098@gmail.com

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

- Q_{jet} : Volume flow rate of jet inlets
- RH : Relative humidity
- RH_{amm} : Relative humidity of moist air at the surface of ammunitions
- Sc_t : Turbulent Schmidt number
- T : Temperature
- T_∞ : Free stream fluid temperature
- u_i, u_j : Cartesian components of velocity
- u'_i, u'_j : Cartesian components of fluctuating velocity
- V : Velocity
- V_{inlet} : Velocity of inlet vent
- x : Cartesian coordinate
- x_i, x_j : Cartesian components of position
- y : Cartesian coordinate
- z : Cartesian coordinate
- δ_{ij} : Kronecker delta
- θ_{jet} : Jet angle
- μ : Dynamic viscosity
- μ_t : Eddy viscosity
- ρ : Density

1. 서론

군에서 보유 중인 이글루형 탄약고는 Fig. 1과 같이 복토층이 형성된 콘크리트 구조물로서 곡사화기, 중화기 공격에 우수한 방호력을 지니며 적의 감시로부터의 은폐가 가능하다^[1]. 그러나 이글루형 탄약고는 지상에 구축된 구조물임에도 불구하고 복토층으로 인해 여름철 지중온도가 외기온도보다 낮게 유지된다^[2]. 특히, 고온다습한 공기가 실내로 유입되어 차가워진 표면에 접촉할 경우 온도가 내려가 상대습도가 높아지며, 탄약 및 벽체 표면 온도가 공기의 노점온도 이하로 내려갈 경우 표면에 결로가 발생하게 된다.

상대습도가 높은 탄약고에 장기 저장된 유도탄의 경우 소량의 습기로 인해 유도탄 내부 화약이 서서히 분해될 수 있고, 또한 전자 구성품이 부식되어 전기 저항이 증가함에 따라 유도탄의 성능이 저하될 수 있다^[3]. 탄약고 내부에 결로가 발생할 경우 탄약의 성능이 변화되고 치환주기가 단축되어 정비 및 유지관리에 추가 예산이 소요될 수 있다^[4]. 따라서 탄약고 내부 상대습도를 낮추고 결로를 해소시키는 것은 탄약고 설계에 매우 중요하다.



Fig. 1. Igloo-shaped magazine^[1]

탄약고 내부 결로감소에 관한 수치적^[5-7], 실험적^[2,8] 연구들이 진행되었다. 이종찬과 김병선^[7]은 전산유체역학(CFD)을 이용하여 자연환기 적용 시 탄약 저장배열에 따른 탄약고 내부 기류 및 온도분포를 예측하여 결로가 가장 적게 발생하는 탄약 저장배열을 제시하였다. 그러나 상대습도를 고려한 농도 방정식을 적용하지 않았고, 평균 실내온도와 상대습도를 통해 산출한 이슬점 온도보다 낮은 온도일 경우 결로가 발생하였다고 가정하였는데 이는 위치에 따라 달라지는 이슬점 온도를 고려하지 않았다. 박선호 등^[8]은 강제환기 적용 시, 외부 따뜻한 공기가 탄약고 내부로 유입되고 탄약 표면온도가 공기의 노점온도 이상으로 유지되어 자연환기를 적용했을 경우에 비하여 결로 발생 면적이 크게 감소됨을 실험적으로 확인하였다. 그러나 탄약고 내부 결로뿐만 아니라 탄약 주위의 상대습도도 고려한 최적의 강제환기 장치 설계가 필요하고, 또한 강제환기 실험 시 비용적·시간적 제한사항이 있기 때문에 실험에 앞서 수치적 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 CFD를 이용하여 강제환기가 적용된 이글루형 탄약고 내부 습공기의 강제대류 및 탄약의 열전도를 고려한 복합 열전달해석을 수행하였다. 실제 군에서 운용 중인 이글루 탄약고의 형상 및 내부 퇴적된 탄약 사이의 안전거리를 반영한 수치해석 모델을 구축한 후 여름철 측정된 탄약고 내부 벽면 온도, 탄약고 외부 온·습도를 적용하였다. 습공기 분사 각도, 분사 유량 및 전면 환풍구의 개폐여부에 따른 습공기의 속도, 온도 및 상대습도를 예측하여 탄약고 내부 결로 발생 면적 및 탄약 표면에서의 상대습도를 비교하였다. 본 연구의 수치해석 결과는 향후 이글루형 탄약고 강제환기 장치 설계에 활용하고자 한다.

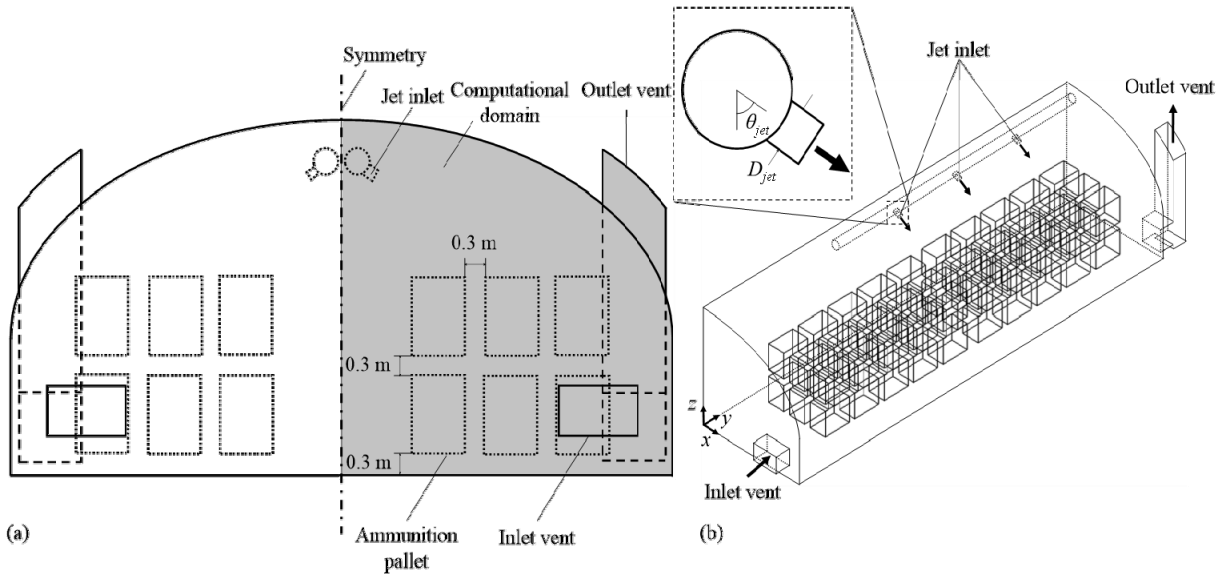


Fig. 2. Schematic of computational domain of igloo-shaped magazine: (a) front view (b) isometric view

2. 수치해석 모델

2.1 형상 및 가정

Fig. 2는 본 수치해석 연구에 사용된 해석 모델의 형상을 나타낸 것이다. 탄약고의 형상은 충청북도의 한 탄약고를 참고하였고, 탄약고 내부에 총 120개의 탄약 묶음이 저장되어있으며 2단으로 적재되어있다. 탄약 묶음의 크기, 탄약 묶음 사이의 간격, 탄약 묶음과 벽면 사이의 거리는 이종찬과 김병선^[7]의 논문을 참고하였다. Fig. 2(a)와 같이 계산시간 단축을 위해 yz -평면을 대칭면으로 하여 전체 탄약고의 절반만 모델링하였다. Fig. 2(b)에 나타난 것과 같이 탄약고의 전면 환풍구(Inlet vent)으로부터 외부 습공기가 유입되고 탄약고 상부의 급기관을 통해 외부 습공기가 강제로 분사되며, 후면 환풍구(Outlet vent)를 통해 내부 습공기가 외부로 배출된다. 이때, 급기관을 통해 강제로 유입되는 외부 습공기는 3개의 급기관 출구로부터 분사되며 속도는 모두 동일하다. 본 수치해석 모델에 적용된 가정은 아래와 같다.

- (1) 습공기 유동은 비압축성, 정상상태 유동이다.
- (2) 고체 표면에서는 점착 조건(No-slip condition)을 적용하였다.
- (3) 상대습도가 100 % 이상일 경우 결로가 발생하는

것으로 판단하였고, 습공기의 액화현상은 무시하였다.

- (4) 탄약고 벽면의 온도는 일정하고, 두께는 무시하였다.
- (5) 탄약의 한 묶음에 대한 형상은 직육면체이다.

2.2 격자 및 경계조건

Fig. 3은 본 수치해석 모델에 사용된 격자를 나타낸 것이다. 급기관으로부터 분사되는 습공기의 정확한 열 유동 해석을 위해 급기관 주위에 상대적으로 많은 격자를 생성하였고, 계산의 수렴성 향상을 위해 급기관 주위를 제외한 대부분의 계산영역을 정렬격자로 구성하였다. Fig. 4(a), (b)는 격자 의존성 시험을 나타낸 것으로 격자 개수에 따른 탄약의 질량 평균(mass-average) 온도와 탄약고 내부 전체 상대습도 변화를 나타내었다. 약 237만개부터 1395만개까지 격자 개수를 증가시키며 격자 의존성 시험을 수행한 결과 862만개와 1081만개 사이의 오차율은 각각 0.054 %, 2.344 %이고, 1081만개와 1395만개 사이의 오차율은 각각 0.098 %, 0.278 %이다. 계산에 소요된 시간은 1081만개의 격자 시스템을 사용할 경우 약 52시간, 1395만개의 격자를 사용할 경우 약 70시간으로 다소 차이가 나나 둘 사이의 오차율은 미미함을 확인하였다. 따라서 본 수치해석 연구에는 1081만개의 격자로 이루어진 격자 시스템을 사용하였다.

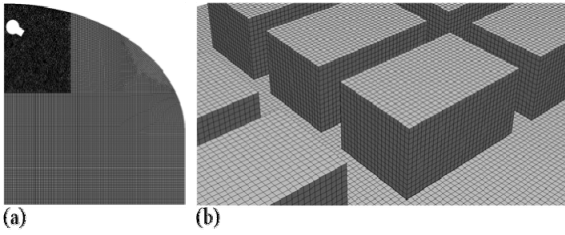


Fig. 3. Grid structure (a) at plane $y = 13.5$ m and (b) near ammunition pallet

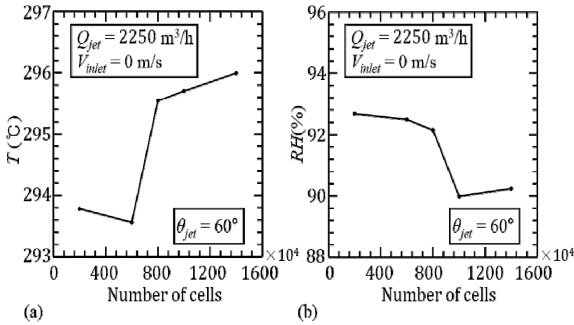


Fig. 4. Grid independence test for (a) the average temperature of ammunitions and (b) the average relative humidity of moist air in igloo-shaped magazine

Table 1. Boundary condition

Parameters	Value
Temperature of inlet vent [°C]	23.78
Relative humidity of inlet vent [%]	81.75
Temperature of jet inlets [°C]	23.78
Relative humidity of jet inlet [%]	81.75
Wall temperature [°C]	19.51

Table 2. Design parameters

Design Parameters	Value
Velocity of inlet vent, V_{inlet} [m/s]	0, 0.3
Volume flow rate of jet inlets, Q_{jet} [m ³ /h]	0, 562.5, 2250, 4500
Jet angle, θ_{jet} [°]	30, 60, 90

전면 환풍구와 급기관 출구에 velocity-inlet 경계조건을 적용하였고, 후면 환풍구 출구에 pressure-outlet 경계조건을 적용하였다. yz-평면을 대칭면으로 하였고, symmetry 경계조건을 적용하였다. 유입되는 습공기의 평균 온도와 평균 상대습도는 2019년 6월부터 8월까지 탄약고의 백엽상으로부터 측정된 값을 적용하였다. 벽면에는 일정한 온도조건을 적용하였고, 이는 2019년 6월부터 8월까지 측정된 탄약고 벽면의 평균 온도를 적용하였다⁹⁾. 상기 서술된 경계조건의 값은 Table 1에 정리하였다. Table 2는 본 연구에서 적용한 전면 환풍구의 개폐 시 습공기의 유입속도, 급기관을 통한 습공기 분사 유량 및 분사 각도를 나타낸 것이다. 전면 환풍구 개방 시 유입되는 습공기의 평균속도는 풍속계로 측정된 값을 적용하였다⁹⁾. 급기관을 통한 습공기 분사 유량의 경우 전면 환풍구로부터 유입되는 습공기 분사 유량(1982.0 m³/h)의 0~2.5배 사이의 값으로 선정하였다. 분사 각도의 경우 탄약에 습공기가 직접 분사되는 각도(30°, 60°), 탄약고 벽면에 직접 분사되는 각도(90°)를 선정하였다.

2.3 지배방정식

유체영역에서 습공기의 질량, 운동량, 에너지, 농도 보존에 대한 지배방정식은 각각 아래와 같다¹⁰⁾.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

$$\rho c_p u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k_f + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\rho u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \left(D_B + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial x_j^2} + \frac{D_T}{T_\infty} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (4)$$

식 (2)에서 Boussinesq 가설¹¹⁾을 적용하여 $-\rho(\overline{u_i' u_j'})$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$-\rho(\overline{u_i' u_j'}) = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k_f \delta_{ij} \quad (5)$$

식 (5)에서 난류 점성계수(μ_t)를 구하기 위해 Realizable

$k-\varepsilon$ 모델^[12]을 사용하였다.

고체-유체 경계면에서 고체와 유체의 온도와 열유속은 서로 동일하며 아래와 같이 나타낸다.

$$T_s = T_f \quad (6)$$

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_s = -k_f \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_f \quad (7)$$

2.4 수치해석 기법

탄약고 내부 습공기의 대류 열전달과 탄약의 열전도를 함께 고려한 복합 열전달현상 및 유동특성 분석을 위하여 ANSYS FLUENT^[13]를 사용하였다. Semi-implicit method for pressure linked equations-consistent (SIMPLEC)^[14] 알고리즘을 이용하여 지배방정식의 해를 구하였다. 모든 조건에 대하여 해석시간이 길게 소요되지 않으면서 정확한 값을 얻을 수 있을 때까지 반복 계산을 수행하였다. 반복 계산을 약 200번 수행 후 연속 방정식에 대한 잔차와 나머지 지배방정식에 대한 잔차가 각각 1×10^{-3} , 1×10^{-5} 이하가 됨을 확인하였고, 10,000번 반복 계산할 때까지 잔차가 각각 1×10^{-6} , 1×10^{-7} 자리에서 값이 계속 진동함을 확인하였다. 따라서 10,000번 반복 계산한 후 값이 수렴했다고 판단하여 계산을 종료하였다.

3. 수치해석 결과

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 전면 환풍구의 개폐여부 (V_{inlet}), 분사 유량(Q_{jet}) 및 분사 각도(θ_{jet})에 따른 결로 분포와 탄약에 인접한 습공기의 상대습도 분포를 나타낸 것이다. 상대습도가 100 % 이상일 경우 결로가 발생한 것으로 판단하였고, Fig. 5에서 결로가 발생한 영역을 파란색으로 나타내었다. Fig. 5(a)와 (b) 및 Fig. 6(a)와 (b)처럼 전면 환풍구를 폐쇄할 경우($V_{inlet} = 0$ m/s), 전면 환풍구를 개방할 경우($V_{inlet} = 0.3$ m/s)에 비해 탄약고 전면부의 벽면과 바닥면에 결로가 많이 발생하고, 탄약 표면에서의 상대습도가 높게 나타남을 확인하였다. 습공기의 분사 유량이 커질수록(Fig. 5(b), (c), (d) 및 Fig. 6(b), (c), (d) 참고) 탄약고 벽면과 바닥면에 결로가 덜 발생하고, 후면부에 퇴적된 탄약 표면에서의 상대습도가 낮아짐을 확인하였다. 또한, 전면부에 퇴적된 탄약의 경우 분사 유량이 562.5 m³/h일

때 분사 유량이 2250 m³/h와 4500 m³/h일 때에 비하여 상대습도가 낮게 분포됨을 알 수 있다. 습공기의 분사 각도(Fig. 5(b), (e), (f) 및 Fig. 6(b), (e), (f) 참고)가 90° 일 경우 30°, 60°일 경우와 다르게 탄약고 내부에 결로가 거의 발생하지 않으나 탄약 표면에서의 상대습도가 전반적으로 높게 나타남을 확인하였다. 위 결과들은 습공기의 열유동 특성에 따른 것으로 이에 관한 자세한 설명은 후술한다.

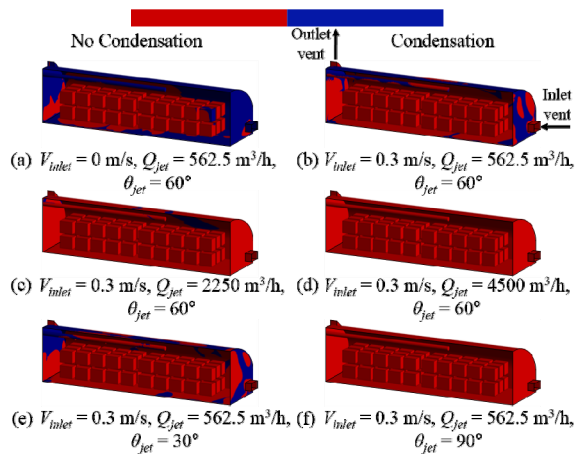


Fig. 5. Condensation distributions for different V_{inlet} , Q_{jets} , θ_{jet}

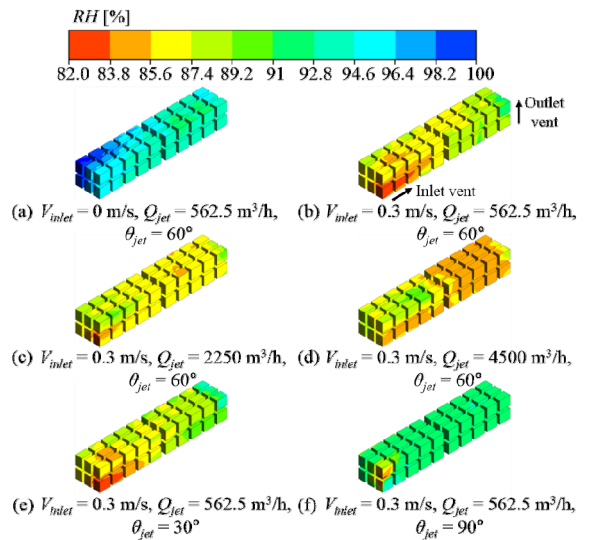


Fig. 6. Humidity contours of moist air at the surface of ammunitions for different V_{inlet} , Q_{jets} , θ_{jet}

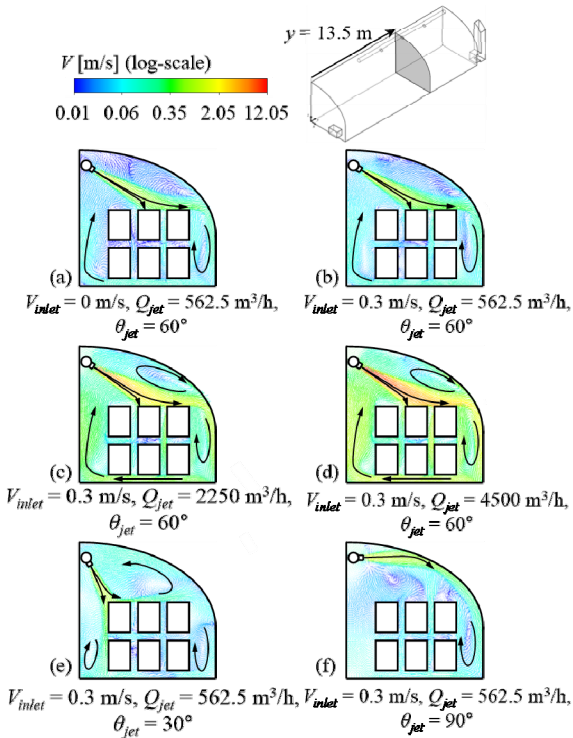


Fig. 7. Velocity vectors at $y = 13.5$ m for different V_{inlet} , Q_{jet} , θ_{jet}

Fig. 7은 $y = 13.5$ m에서 전면 환풍구의 개폐여부, 분사 유량 및 분사 각도에 따른 속도벡터를 로그 스케일로 나타낸 것이다. 모든 경우에 대해 분사된 습공기가 탄약고 벽면을 타고 흐른 후 벽면과 탄약 사이에서 습공기의 재순환영역이 형성되었다. Fig. 7(a), (b)에서 전면 환풍구의 개폐여부에 따라 모든 위치에서 속도벡터의 방향과 크기는 거의 변하지 않음을 확인하였다. Fig. 7(b), (c), (d)에서 분사 유량이 커질수록 탄약고 벽면과 탄약 사이에 형성된 재순환영역에서 습공기의 속도가 빨라짐을 확인하였다. 이에 따라 벽면에 습공기가 정체되지 않아 결로가 덜 발생한 것으로 보인다(Fig. 5(b), (c), (d) 참고). Fig. 7(b), (e), (f)에서 분사 각도가 90° 일 경우, 분사 각도가 30° , 60° 일 경우와 다르게 습공기가 탄약 표면에 분사되지 않고 탄약고 벽면을 향해 분사된 후 벽면을 타고 빠른 속도로 흐르게 되어 결로가 덜 발생한 것으로 보인다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 $z = 1.0$ m에서 전면 환풍구의 개폐여부, 분사 유량 및 분사 각도에 따른 속도 분포와 온도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)와 (b) 및

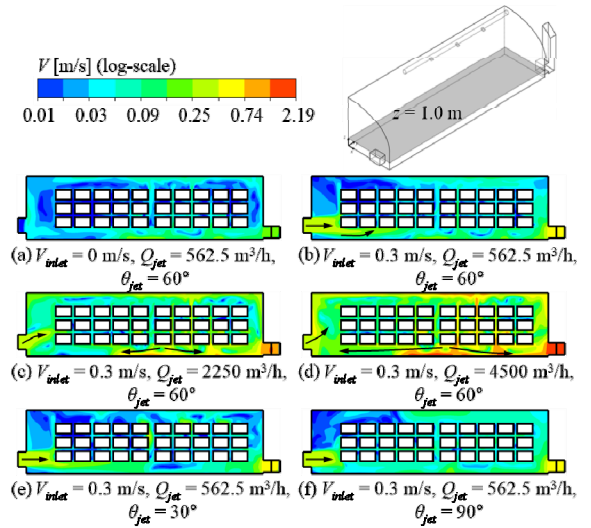


Fig. 8. Velocity contours at $z = 1.0$ m for different V_{inlet} , Q_{jet} , θ_{jet}

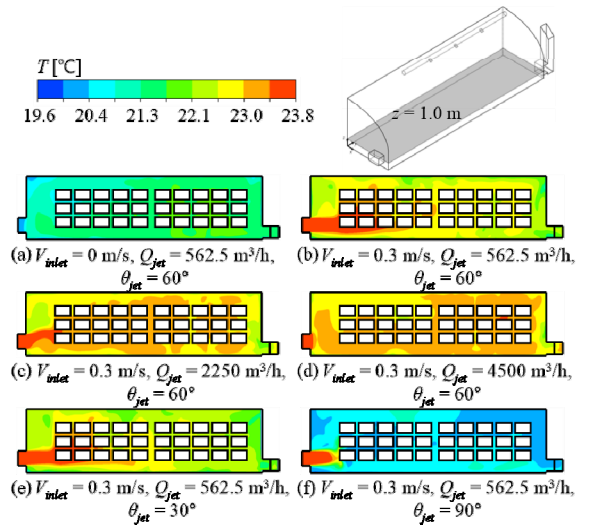


Fig. 9. Temperature contours at $z = 1.0$ m for different V_{inlet} , Q_{jet} , θ_{jet}

Fig. 9(a)와 (b)에서 전면 환풍구를 개방할 경우, 폐쇄할 경우와 다르게 환풍구로부터 유입된 습공기가 전면부 주변에 퇴적된 탄약에 도달하였고, 또한 일부 습공기는 전면부 탄약고 벽면을 따라 흘러 벽면에서 습공기가 정체되지 않음을 알 수 있다. 이에 따라 전면부에 퇴적된 탄약의 표면 온도가 상승하여 상대습도가 낮아지고, 또한 탄약고의 벽면에 결로가 덜 발생한

것으로 보인다. 습공기의 분사 유량이 커질수록 후면부에 퇴적된 탄약에서 상대습도가 낮아지는데 이는 급기관을 통해 분사된 습공기가 후면부에 퇴적된 탄약 사이를 빠른 속도로 흐르게 되어 탄약 표면의 온도를 높였기 때문인 것으로 보인다(Fig. 8(b), (c), (d) 및 Fig. 9(b), (c), (d) 참고). 분사 유량이 2250 m³/h와 4500 m³/h일 경우 급기관을 통해 빠른 속도로 분사된 습공기가 탄약고의 벽면에 도달한 후 일부 습공기는 전면부를 향해 흐르고, 나머지는 후면부를 향해 흐르게 된다(Fig. 8(c), (d) 참고). 이때 전면부를 향해 흐르는 습공기는 전면 환풍구로부터 유입되는 습공기가 탄약에 도달하는데 방해하는 것으로 보인다. 따라서 분사 유량이 2250 m³/h와 4500 m³/h일 경우 분사 유량이 562.5 m³/h일 경우에 비해 전면부에 퇴적된 탄약 표면에서의 온도가 낮아져 상대습도가 높게 나타난 것으로 보인다. Fig. 9(b), (c), (f)에서 습공기의 분사 각도가 90°일 경우 30°, 60°일 경우에 비해 탄약 표면에서의 온도가 전반적으로 낮게 나타나게 된다. 이는 위에서 언급했듯이 급기관을 통해 분사되는 습공기가 탄약에 직접 분사되지 않아(Fig. 7(b), (c), (f) 참고) 탄약과 습공기 사이의 열교환이 거의 발생하지 않았기 때문인 것으로 보인다. 이로 인해 분사 각도가 90°일 경우, 30°, 60°인 경우보다 탄약 표면에서의 상대습도가 높게 나타난 것으로 보인다.

Fig. 10은 전면 환풍구의 개폐여부, 분사 유량 및 분사 각도에 따른 결로 면적과 탄약 표면에서의 면평균(area-average) 상대습도를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에서 분사 유량이 562.5 m³/h일 경우 전면 환풍구가 개방되었을 때 폐쇄하였을 때보다 결로 면적은 약 17 %p, 탄약 표면에서의 평균 상대습도는 약 8 %p 감소함을 알 수 있다. 또한, 분사 유량이 0 m³/h이고 전면 환풍

구를 개방한 경우가 분사 유량이 562.5 m³/h이고 전면 환풍구를 폐쇄한 경우에 비해 결로 면적이 약 9 %p 감소함을 알 수 있다. 이는 전면 환풍구를 폐쇄하고 급기관을 통해 분사되는 유량(562.5 m³/h)이 전면 환풍구를 통해 유입되는 유량(1980 m³/h)보다 더 작기 때문인 것으로 보인다. 반면, 2250 m³/h와 4500 m³/h일 경우 전면 환풍구의 개폐여부에 따라 결로 면적과 탄약 표면에서의 평균 상대습도가 크게 달라지지 않음을 알 수 있는데 이는 충분한 운동량의 습공기가 급기관을 통해 분사되어 탄약 표면의 온도를 높였기 때문인 것으로 보인다. Fig. 10(b)에서 분사 각도가 30°, 60°일 때 분사 유량이 562.5 m³/h일 경우가 분사 유량이 2250 m³/h와 4500 m³/h일 경우보다 결로가 약 12 %p 더 발생함을 확인하였다. 반면, 분사 유량이 2250 m³/h와 4500 m³/h일 경우 세 각도 모두에서 결로가 거의 발생하지 않는데 이는 각도와 상관없이 충분한 운동량의 습공기가 분사되어 벽면에서의 습공기가 정체되지 않아 결로가 덜 발생했기 때문인 것으로 보인다. 탄약 표면에서의 평균 상대습도는 분사 유량에 따라 크게 달라지지 않는데 이는 분사 유량이 커질수록 후면부에 퇴적된 탄약에서의 상대습도가 낮아지나 전면부에 퇴적된 탄약에서의 상대습도가 높아지기 때문인 것으로 보인다. 또한, 분사 유량에 상관없이 분사 각도가 90°일 때 30°, 60°일 때보다 약 4-5 %p 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 위에서 언급된 것처럼 분사 각도가 90°일 때 습공기가 탄약에 직접 분사되지 않기 때문인 것으로 보인다. 따라서 위 결과들을 통해 전면 환풍구를 개방하고 분사 유량은 2250 m³/h, 분사 각도는 30°, 60°일 경우가 결로 면적과 탄약 표면에서의 평균 상대습도를 감소시키면서 외부 동력이 가장 적게 소요되는 최적의 설계 조건임을 확인하였다.

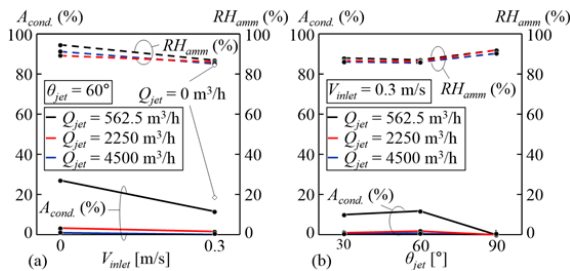


Fig. 10. Area of condensation and average of relative humidity of moist air at the surface of ammunitions for different (a) V_{inlet} , and (b) θ_{jet}

4. 결론

본 연구에서는 군에서 보유 중인 이글루형 탄약고 내부 결로 및 상대습도 감소를 위한 수치적 연구를 수행하였다. 전면 환풍구의 개폐여부, 급기관의 분사 유량 및 분사 각도에 따른 탄약고 내부 습공기의 속도, 온도 및 상대습도 분포를 복합 열전달 해석을 통해 계산하였다. 이를 통해 탄약고 벽면의 결로 면적과 탄약 표면에서의 평균 상대습도를 계산하였다. 향후 탄약고 강제환기 장치 설계에 본 연구결과를 활용하

고 나아가 군의 탄약 정비예산 감소에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단하였다. 본 연구의 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 분사 유량이 562.5 m³/h일 경우 전면 환풍구가 개방되었을 때 폐쇄하였을 때보다 결로 면적은 약 17 %p, 탄약 표면에서의 평균 상대습도는 약 8 %p 감소함을 확인하였다. 반면, 분사 유량이 2250 m³/h와 4500 m³/h일 경우 전면 환풍구의 개폐여부에 따라 결로 면적과 탄약 표면에서의 평균 상대습도가 크게 달라지지 않음을 확인하였다.
- (2) 분사 각도가 30°, 60°일 때 분사 유량이 562.5 m³/h일 경우가 분사 유량이 2250 m³/h와 4500 m³/h일 경우보다 결로가 약 12 %p 더 발생함을 확인하였다. 반면 분사 유량이 2250 m³/h와 4500 m³/h일 경우 세 각도 모두에서 결로가 거의 발생하지 않음을 확인하였다. 탄약 표면에서의 평균 상대습도는 분사 유량에 따라 크게 달라지지 않으나 분사 각도가 90°일 때 30°, 60°일 때보다 약 4~5 %p 높게 나타남을 확인하였다.
- (3) 전면 환풍구를 개방하고 분사 유량은 2250 m³/h, 분사 각도는 30°, 60°일 경우가 결로 면적과 탄약 표면에서의 평균 상대습도를 감소시키면서 외부 동력이 가장 적게 소요되는 최적의 설계 조건임을 확인하였다.

References

- [1] J. Lee, S. Kim, P. Lee, and B. Kim, "A Study on Reducing Condensation of Corrugated Steel Plate Magazine," J. Architectural Institute Korea Planning & Design, Vol. 27, No. 6, pp. 85-92, 2011.
- [2] H. Jeon, S. Yoon, and J. Sohn, "Effect on Condensation Prevention in Igloo-Shaped Ammunition Depot by Forced Ventilation Using Fan in Summer," J. Korean Society Living Environmental System, Vol. 15, No. 2, pp. 257-269, 2008.
- [3] B. Ryoo, B. Kim, and J. Yoo, "Storage Humidity Management Method of Missiles," Proc. Korean Society Propulsion Engineers, Fall Conference, pp. 687-690, 2016.
- [4] J. F. Dunnigan, "How to Make War," William Morrow Company, New York, p. 312, 1982.
- [5] J. Lee, S. Park, and B. Kim, "An Analysis of the Surface Condensation of Stored Ammunition in a Igloo-Magazine with Using Numerical Method," J. Architectural Institute Korea Planning & Design, Vol. 22, No. 11, pp. 297-304, 2006.
- [6] J. Lee, S. Park, and B. Kim, "The Reform Measure for Reduce to Surface Condensation of Ammunition in Igloo Magazine," J. Architectural Institute Korea Planning & Design, Vol. 23, No. 3, pp. 215-222, 2007.
- [7] J. Lee, and B. Kim, "The Reform Measure for Reduction of Condensation in Igloo Magazine by Computational Fluid Dynamics," J. Architectural Institute Korea Planning & Design, Vol. 24, No. 6, pp. 337-346, 2008.
- [8] S. Park, S. Yoon, and J. Sohn, "Forced Ventilation Method for Preventing Surface Condensation of Magazine of Igloo Type in Summer," J. Korea Institute Ecological Architecture Environment, Vol. 10, No. 2, pp. 57-62, 2010.
- [9] Korea Army, Ammunition Support Command, "The Results of Test for the Reduction of Condensation," 2019.
- [10] Ansys, Inc., "ANSYS FLUENT Theory Guide," Pennsylvania, USA, 2013.
- [11] J. O. Hinze, "Turbulence," McGraw-Hill Publishing Company, New York, 1975.
- [12] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabir, Z. Yang, and J. Zhu, "A New $k-\epsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation," Computers & Fluids, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238, 1995.
- [13] Ansys, Inc., "ANSYS FLUENT 18.0 in Workbench User's Guide," Pennsylvania, USA, 2017.
- [14] J. P. Van Doormaal, and G. D. Raithby, "Enhancements of the Simple Method for Predicting Incompressible Fluid Flow," Numerical Heat Transfer, Vol. 7, No. 2, pp. 147-163, 1984.