



일반원고

탄약고 결로 발생 유도 시스템에 관한 실험적 연구

심 상 권
힘센에스코 대표이사

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

현재 군에서 사용하고 있는 탄약고 형태는 크게 블록조적조, 이글루 그리고 지하동굴형으로 세분할 수 있다. 요즘 장기적으로 경제적 측면을 고려할 경우, 보다 유리한 이글루 탄약고의 시공이 증대되고 있으며, 대부분의 탄약이 이글루 탄약고에 저장 관리되고 있는 것이 현실이다.

그러나 국내 전역에 설치되어 있는 군 탄약고는 군사시설이라는 특수성에 따른 엄폐, 은폐로 인하여 발생할 수 있는 주변 기류의 정체, 내부습기에 대한 효과적인 제습의 어려움, 두꺼운 방호벽 등으로 대다수의 시설에서 지속적인 결로가 발생되고 있다. 또한 현재 시공되고 있거나 최근에 시공되고 있는 이글루 탄약고는 피토층과 출입구, 외기 흡입구, 환기구 및 환기팬으로 구성되고 있다. 이러한 복토방식의 이글루 탄약고에는 여름철 고온 다습한 외부공기가 실내로 활발하게 유입되어, 내부의 차가운 벽체 및 탄약의 표면에 접해 노점 온도에 도달하게 되므로 내부표면과 탄약표면에 결로가 발생하게 된다. 결로가 발생되면 저장되어 있는 탄약의 부식과 성능저하의 문제점이 발생하는 것은 당연하다고 할 수 있다. 즉, 이러한 결로 발생 문제는 시설물에 보관, 저장되어 있는 탄약고의 유지 관리에 많은 예산이 소요되며, 유사시 군 작전에 막대한 지장을 초래할 수 있다. 따라서, 이에 대한 대책이 시급히 요구되고 있는 것이 현실이다.

한편, 1988년 이후 군에서는 결로발생에 대한

원인규명과 방지대책 수립을 위해 다각적인 조치를 시도한 바 있으나 현재까지 명확한 원인규명 및 효과적인 결로방지 대책을 설정하지 못하고 있는 실정이다. 지금까지 군에서 취한 조치로는 다음과 같다.

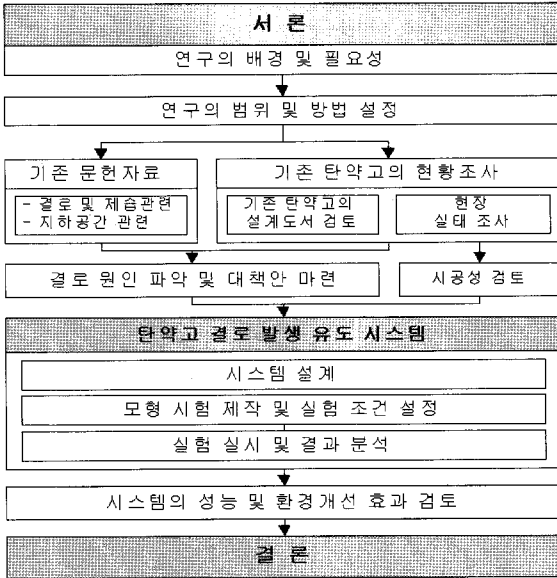
- 가. 강제환풍기 설치
- 나. 벽체 내부 및 출입구 부분의 단열재 보강
- 다. 내부표면에 대한 단열 스프레이 시공
- 라. 내부에 팬을 이용하여 와류를 발생시킴
- 마. 이중공간벽 설치

이러한 조치들은 일반적인 지상의 건축물 또는 기계설비가 갖추어진 시설의 결로방지에는 어느 정도 효과가 있으나, 사실상 온도가 낮은 지하공간에 여름철 고온다습한 외부공기를 유입시키는 환기개념을 전제로 하고 있기 때문에 탄피의 결로 발생을 오히려 증가시키는 결과를 초래할 수도 있다. 기계적인 설비의 설치를 최대한 자제해야 하는 탄약고의 실정과 지하공간의 이해가 충분히 고려되어야 할 필요가 있다.

1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구에서는 탄약고의 결로방지를 위한 소극적인 방법에서 탈피하여 탄약고 내부공기에 포함되어 있는 수증기를 제거하고 제습된 공기를 하절기 태양에너지를 이용하여 가열한 후 실내로 공급하는 공기순환개념 및 공기온도 상승을 위한 기술을 도입한 결로발생 유도장치를 제안하고 실험을 통해 적용 가능성을 평가하는데 목적이 있다.

기계 및 전기설비의 제한과 지하공간이라는 특수한 환경을 가진 탄약고의 환경적인 문제점을



[그림 1] 연구의 흐름

파악하고 지하공간 및 결로에 관한 기존의 문헌 및 자료조사를 통해 제반환경 특성을 검토하였으며, 기존 탄약고에서의 결로발생 유형과 원인을 규명하여 이를 토대로 탄약고 저장환경을 개선할 수 있는 시스템을 제안하고 실험을 통해 벽체의 온도분포, 공기온도분포, 상대습도 변화, 제습효과 등을 검토하였다. 그림 1은 본 연구의 연구 흐름도이다.

2. 이론적 고찰

2.1 결로 방지대책

결로란 습공기가 낮은 온도의 표면과 접촉하여 냉각되어 더 이상 포함할 수 없는 양만큼의 수분이 응축되어 그 표면에 물방울로 맺히게 되는 현상을 말하며 이때 결로가 생기기 시작하는 온도를 노점온도라 한다. 이러한 결로의 발생은 기본적으로 습한 공기와 차가운 표면이 있어야 하며 결로의 발생요인으로 ① 수증기 발생원, ② 공기 온도, ③ 구조체의 표면온도, ④ 환기, ⑤ 시공불량 등이 있다. 결로는 특히 공기의 정체가 일어나

는 건물의 모서리 부분에서 주로 발생하며, 열교 현상이 발생하는 곳이 결로의 취약부위가 되며, 구조체의 열용량에 따른 반응속도도 결로 발생에 큰 영향을 미친다.

지속적으로 나타나는 결로를 방지할 수 있는 방법으로는 다음 네 가지로 요약할 수 있다.

2.1.1 환기(Ventilation)

일반적으로 동절기의 환기는 실내가 냉각될 때 결로를 발생시킬 가능성이 있는 습한 공기를 제거하게 된다. 수증기의 발생원 근처에서 환기를 한다면 가장 효과적으로 결로를 방지할 수 있다.

각 방에는 환기창이 있어야만 하는데, 이 환기창은 난방 에너지의 손실을 막을 수 있을 정도로 소량의 제어된 환기를 할 수 있어야 한다. 꼭 필요한 환기를 통해 손실되는 에너지의 비용은 비교적 적으며, 배기로부터 열을 회수 할 수 있는 기술을 적용하게 되면 더욱 감소할 것이다. 그러나 하절기의 환기는 냉각되어 있는 실내에 외부의 고온 다습한 공기를 유입하게 되므로 결로의 원인이 되기도 한다. 따라서 하절기에는 실내에서 필요로 하는 최소의 신선공기 외의 유입은 억제하고 내부 공기의 순환을 촉진하는 것이 바람직하다.

2.1.2 난방(heating)

건물을 난방하면 실내 표면의 온도가 상승하므로 표면 온도는 실내 공기의 노점온도보다 높게 유지된다. 그러나 더워진 공기는 또한 더 많은 수증기를 포함할 수 있는데, 이 수증기는 나중에 찬 표면과 접촉하여 응축되기 전에 제거해야 할 필요가 있다.

결로는 또 난방의 정도와 시간에 따라 영향을 받게 되는데, 일반적으로 높은 온도로 단시간 난방하는 것보다는 낮은 온도로 장시간 난방하는 것이 결로 방지에 유리하다. 콘크리트나 조적조와 같은 중량 구조는 완전히 냉각되어서는 안되며 건물 전체를 지속적으로 조금씩 난방함으로써 이를 방지할 수 있다.

2.1.3 단열(Insulation)

단열을 함으로써 벽체를 통한 열 손실이 감소되고 실내 표면 온도를 높이게 된다. 그러나 단열 자체는 열을 공급하지 않는 한 실내를 덥게 하지는 않는다. 콘크리트와 같은 중량 구조에서는 단열재가 실내 측에 위치하게 되면 난방 시 벽체 표면 온도를 빠르게 상승시키게 된다. 그러나 단열재가 실내 쪽에 있으므로 벽체의 바깥쪽 부분은 그대로 냉각되어 있으므로 내부 결로를 방지하기 위해서는 방습층의 설치가 필요할 수도 있다.

2.1.4 제습(dehumidification)

우리나라의 하절기에 고온다습한 외기를 실내로 유입하는 경우에는 실내 공기와 혼합되어 실내 공기가 가지는 수분량을 증가시키고, 결국 차가운 실내표면에 결로 발생을 유발시키게 된다. 이러한 실내공기에 포함된 수분을 제거하기 위해서는 환기가 아닌 기계적인 제습장치를 동원해야 한다.

2.2 제습조작 및 제습의 물질이동

주변에 존재하고 있는 공기 중에는 어느 정도의 수증기가 항상 포함되어 있다. 수증기를 전혀 포함하지 않은 공기를 일반적으로 건공기라 하고, 수분을 포함한 공기를 건공기에 이르게 하는 처리법을 감습 또는 제습이라고 부르고 있다. 수증기를 포함하고 있는 공기를 습공기라고 하며, 보통 건공기와 구별하여 처리하고 있다.

어떤 용기에 물질이 들어가서 상태의 변화를 거쳐서 떠나는 과정으로서, 입구와 출구의 에너지 수지가 취해질 수 있다. 이 경우 내부에너지, 위치에너지, 운동에너지, 장치 내에 가해지는 일, 장내에 가해지는 열량과 같은 항목을 고려해야 한다.

물에 수증기를 함유한 공기를 접촉하여 통과시키면 그때의 조건에 따라서 물로부터 공기로 혹은 공기로부터 물로 물분자의 이동이 일어난다. 소량의 수분이 다량의 공기 중에 존재하는 경우를 고려하여 보자.

습공기의 수증기 물분율 y 가 현재 포화수증기

물분율 y_s 보다도 낮은 상태에 있을 경우는 물로부터 공기로의 증발이 일어난다. 이때 증발하는 속도는 $y_s - y$ 의 크기에 비례하게 된다.

수면의 전 표면적을 A 로 하고, 비례정수를 K_G 로 두면, 이동량 N_w (kg/hr)은 다음의 식으로 주어진다.

$$N_w = K_G A (y_s - y) : \text{가습} \quad (1)$$

$$= K_G A (y - y_s) : \text{감습} \quad (2)$$

K_G 를 물질이동계수라 부르며, 실측에 의해서 주어지는 물성치이며, 장치의 설계에 매우 중요한 인자이다. 그런데 물이 증발하면 잠열이 소비된다. 공기 온도는 내려가며 공기가 잃은 열량과 이동수분량(N_w) 증발잠열(N_H)이 같은 평형상태가 된다.

공기의 수분량이 감소할 경우에는 습공기를 그 노점이하의 물과 접촉할 경우에 일반적으로 응축열에 의해서 물의 온도는 상승한다. 이때에 수분 이동의 동특성과 온도의 정특성이 관계된다. 정적 관계는 습도선도나 공기엔탈피의 선도 상에서 구별할 수 있는 수치이다.

습공기 중의 수분 제거 방법을 크게 분류하면 ① 냉각제습법, ② 압축제습법, ③ 액체흡습제 제습법, ④ 고체흡착제 제습법의 원리가 이용되어 있다. 일반적인 제습기는 위의 네 가지 방식을 각각 조합시킴으로써 제습시스템을 구성하며 제습하는 공기의 풍량, 압력, 온도, 공기에 함유된 수분량(습도, 노점)에 따라 어떠한 원리의 조합이 제어에 적합한가를 검토하게 되는 것이다.

3. 결로 발생 유도 시스템

3.1 시스템의 개요

본 시스템은 1차적으로 기존 탄약고 벽면과 결로 유도장치(제습시스템)를 이용하여 실내공기 중에 포함되어 있는 수증기를 제거하여 절대습도

를 감소시키고, 2차적으로 하절기의 태양 복사에너지를 흡수한 열교환기를 이용하여 결로 유도장치를 통해 제습된 차가운 공기의 온도를 상승시켜 고온저습(상대습도 감소)한 상태로 만들어 실내에 공급, 순환시킴으로써 결로 발생의 억제와 동시에 실내 저장된 저장물(탄약)의 건조를 촉진시킴으로써 탄약고의 저장환경을 개선시키는 방법이다.

3.2 시스템의 구성

시스템의 구성은 크게 제습 시스템과 열교환 시스템, 공기 반송용 장치로 구성되며 그림 2는 시스템의 개념도이다.

3.2.1 공간벽체

공간벽체는 벽면과 실내를 분리시켜 완충공간부를 형성한다. 이 부분은 실내 공기가 직접 벽면에 영향을 미치지 못하게 함으로써 벽면 온도를 실내의 노점온도보다 낮게 유지시키는 역할을 하며, 탄약고 내부의 과습한 공기를 공간 벽체하부에

설치된 흡입구를 통하여 원활하게 완충공간부로 유입시킨다. 또한 결로 유도장치와 이에 의한 결로수 및 결로수 처리용 트렌치의 은폐 및 실내 마감재로서의 역할을 한다.

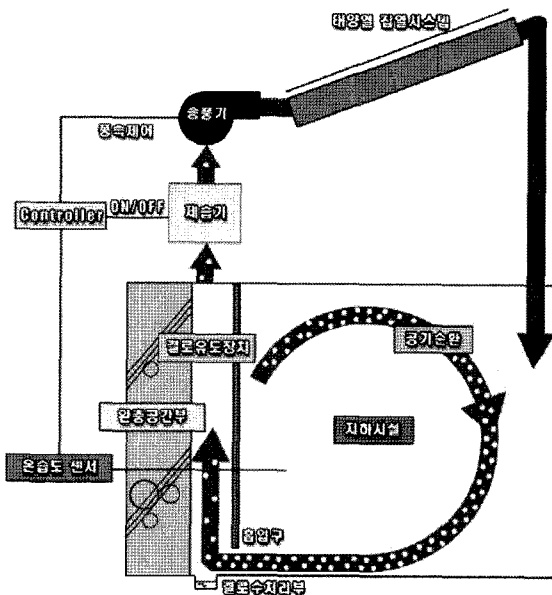
공간 벽체는 폴리우레탄 단열재가 충전된 PDF (Polyethylene Double Frame) Panel을 이용하고 벽체하부에 공기 흡입구를 설치한다.

3.2.2 결로유도장치

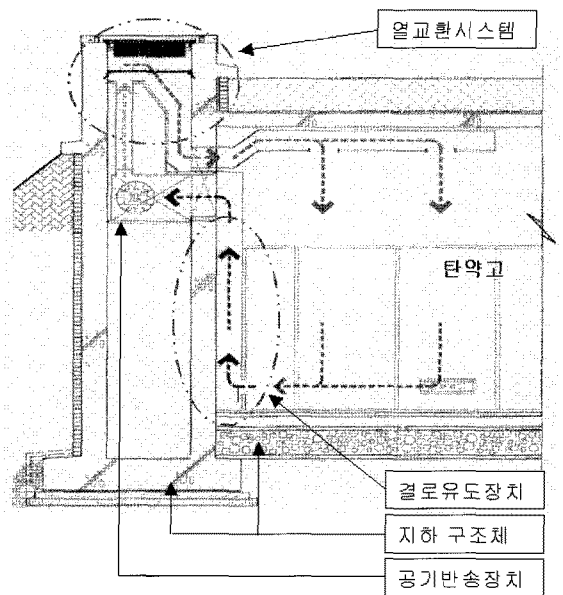
완충공간부로 흡입된 실내의 과습한 공기를 탄약고 벽면과 축열체를 이용하여 적극적으로 결로를 발생시키는 역할을 한다. 축열체는 토양과 접한 벽면으로부터의 전도 및 냉복사에 의해 장시간 차가운 표면온도 유지가 가능하고, 결로량의 증대를 위해 과습 공기와의 접촉 면적이 크며 유입공기의 원활한 흐름을 유지시킬 수 있는 "Link chain"으로 한다.

3.2.3 열교환 시스템

하절기 태양 복사에너지를 집열시키고, 이 열을



[그림2] 결로발생 유도 시스템의 개념도



[그림3] 탄약고 적용을 위한 설계안

실내에 공급함으로써 결로유도장치를 통과한 저습, 저온의 공기를 고온, 저습 공기로 변화시켜 공급하고 순환시킴으로써 저장 공간 내부의 온도를 상승시켜 상대습도 저하 및 저장물의 표면온도를 상승시키는 역할을 한다.

열교환 시스템은 집열부, 열교환부로 구성되며 열전도성이 우수한 알루미늄판을 사용한다. 또한 열교환부는 공기와의 접촉면적을 증가시키고 공기의 흐름을 원활히 할 수 있는 형상으로 한다.

3.2.4 공기 반송용 장치(송풍기)

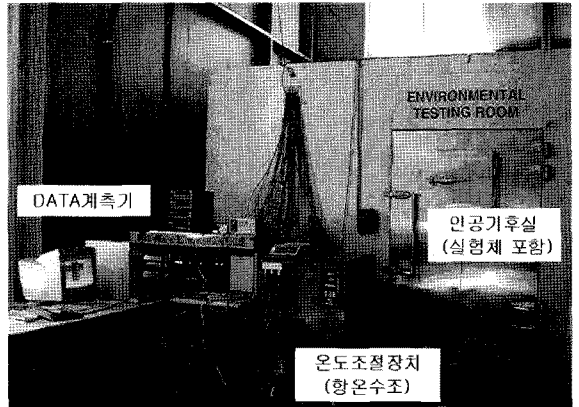
송풍기는 탄약고 내부의 과습한 공기를 완충공간부로 원활히 흡입되게 하고, 여기에 설치된 결로유도장치를 통과시켜 저온저습의 공기로 만들고 이 공기를 열교환 시스템으로 보내어 온도를 상승시켜 지하저장고 내부로 공급함으로써 탄약고 내부의 공기를 원활히 순환시키는 역할을 수행한다. 그림 3은 결로 발생 유도 시스템의 개념을 실제 탄약고 시설에 적용하기 위한 설계안을 보여준다.

4. 제습성능평가 및 적용성 검토를 위한 실험 대 모형시험

4.1 실험 개요 및 구성

기존의 문헌조사 및 현장조사를 통해 규명한 결로발생 원인과 그 대책을 근거로 실제 시공 시의 문제점을 고려하여 설계된 결로 발생 유도 시스템의 실험 대 모형을 제작하여 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 결로발생유도장치의 제습성능과 시스템 적용시의 탄약고 저장 환경 개선 정도를 파악하고 적절한 운전조건을 도출하는데 목적이 있다.

본 실험을 위한 실험장치는 전체 시스템 중 탄약고 한쪽 벽체의 결로 발생 유도 시스템 설치 부분만을 모사한 것으로 실제 시공성을 고려하여 설계되었으며, 실험 장치는 크게 인공기후실, 측정대상실(실험체) 및 계측기실로 구성되며, 그림 4



[그림 4] 실험 장치 전경

는 실험장치의 전경을 나타낸다.

4.1.1 인공기후실

결로발생유도장치의 성능평가 및 시스템 적용시 탄약고의 저장환경 개선 정도를 파악하기 위해서는 실제 탄약고의 외기조건과 유사한 기후조건을 조성할 수 있는 장치가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 실험체 내외부의 온습도 제어가 가능한 인공기후실 내에 실험체를 설치함으로써 실제적인 외기조건 및 실내조건을 구현하였다.

4.1.2 결로 발생 유도 발생 시스템 실험체

실제 탄약고의 한쪽 벽체에서의 결로발생유도장치를 포함하여 계측의 대상이 되는 실로서 인공기후실 내부에 전체 벽체가 설치되어 있는 형태로 구성하였다. 전체적인 구성은 벽체온도 조절장치, 결로발생유도장치, 공기 흡입구 및 취출구, 송풍기, 가습장치, 스크린으로 구성된다. 그림 5는 인공기후실내의 실험체 설치상황과 제어 및 계측의 계통을 나타낸 것이다.

1) 벽체온도 조절장치

실태 조사에 의해서 얻어진 데이터를 기준으로 실험체의 결로발생유도장치의 벽체온도를 제어하기 위한 장치이다. PID방식으로 제어하는 항온

수조를 이용하여 물의 온도를 조절하고, 조절된 물을 펌프 및 배관에 의해 벽체의 후면부를 순환 하도록 함으로써 온도를 조절한다.

2) 결로발생유도장치

결로발생유도장치는 온도조절장치에서 조절된 물이 벽체를 순환함으로써 실제 상황과 같은 온도를 유지하도록 되어 있다. 축열되어 있는 벽체의 하부에 흡입구와 상부에 송풍기를 연결하여 공기를 순환시킴으로써 실내공기를 제습하여 저습의 공기로 전환하는 역할을 하게 되며, 인공벽

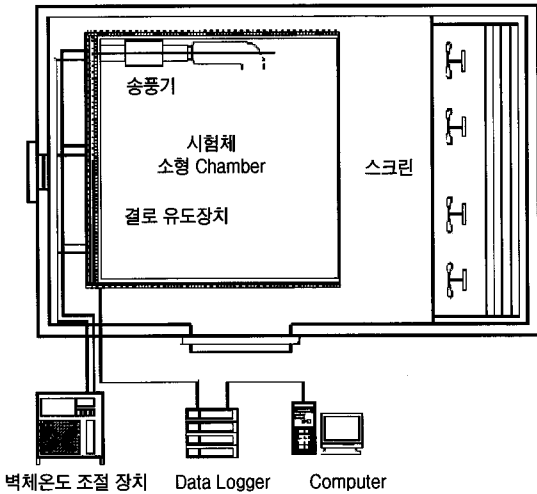
체와 완충공간부 및 공간벽으로 구성되어 있다.

인공벽체(온도조절벽체)는 탄약고의 실제 벽체를 대신하게 되며, 벽체에서 일정 간격을 이격시킨 위치에 공간벽을 설치하고 그 사이에 공기를 통과시켜 제습을 하도록 한다.

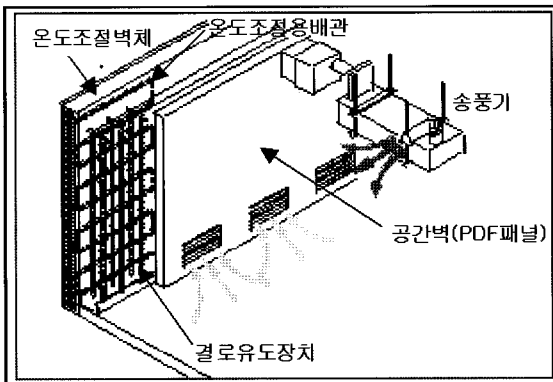
공기가 통과하는 공간을 완충공간부라 하며 벽체로부터 냉열취득이 용이하며 공기와의 전열면적이 넓은 재료를 사용하여 결로를 유도하게 된다. 공간 내에서의 결로를 촉진하기 위해서 인공벽체와 복사열교환 및 전도에 의한 냉열취득이 용이하도록 아연도금 링크체인을 사용하여 전열면적을 넓게 했다.

완충공간부와 실내를 구분하며 실내로의 전열을 차단하기 위하여 단열성이 있는 재료를 사용한다. 그리고, 결로에 의한 수분에 접하게 되므로 내식성이 있는 재료를 사용한다. 본 실험에서는 폴리우레탄 단열재를 충전한 PDF(Polyethylene Double Frame) Panel을 사용하였다. PDF Panel은 흡습성이 없고, 가공성 및 보수가 용이한 재료이다. 공간벽의 하부에는 공기를 유입시키는 흡입구가 있으며, 본실험에서는 결로의 유무를 판단하기 위하여 공간벽의 일부를 유리로 교체하여 내부관찰용 모니터로 관찰하였다.

기본원리는 하계 지중온도가 외부공기의 노점온도보다 낮으며 온도의 변화가 크지 않다는 점을



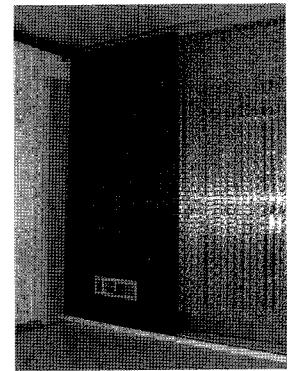
[그림5] 실험체 설치와 제어 및 계측의 계통도



[그림6] 결로발생유도장치의 개념 및 전체 구성도



a) 인공벽체 전경



b) 공간벽체 및 결로유도장치 (아연도금링크체인)

[그림7] 인공벽체 및 공간벽체 설치 전경

이용하여 지중냉열을 이용하여 결로를 유도하고 제습을 하는 것이다. 그림 6과 그림 7은 결로발생 유도장치의 전체적인 개념과 구성을 보여준다.

3) 송풍기 및 취출구와 가습장치

송풍기는 결로유도장치에서 제습된 공기를 끌어 들여 실내부로 재순환시키는 역할을 한다. 송풍기에는 풍량(송풍기 주파수)을 조절할 수 있도록 인버터를 설치하였다. 또한 취출구는 송풍기에서 보내어지는 공기를 실내로 공급하는 부분이다. 그리고 송풍기의 송풍량을 측정하기 위하여 송풍기 말단에 노즐을 설치하여 TSI 기류계를 설치하였다.

실제 탄약고의 내·외부 습도조건을 조성하기 위하여 별도의 가습장치를 설치하였다. 가습장치는 초음파 가습기를 사용하였으며, 일정 수준의 습도 유지를 위해 3way valve를 이용한 PID제어 방식을 채택하여 실내에 공급되는 수분량을 조절하였다.

4) 스크린 및 내부 축열체

실험체 내부와 인공기후실 내부의 온습도 조건이 서로 다르기 때문에 인공기후실의 공기가 실험체에 직접적인 영향을 미치지 않도록 스크린을 설치하였다. 스크린에는 공기유통 구멍을 설치하여 인공기후실의 공기가 서서히 스며들도록 하였

다. 실험체 내부의 저장물에 결로발생 유무를 관찰하기 위해 실험체 내부에 축열체(탄약 대용)를 설치하였다. 축열체로는 열전도성이 뛰어난 두랄미늄 파이프를 사용하였다. 그림 8은 스크린 및 내부 축열체 설치를 보여준다.

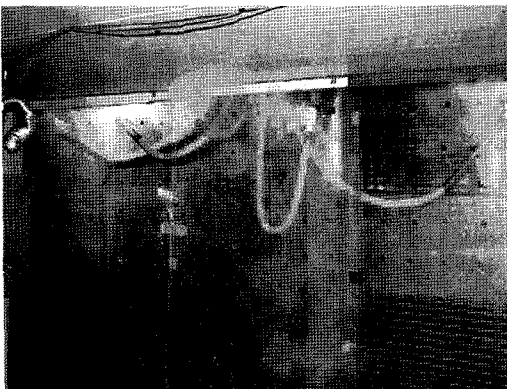
4.2 실험방법

실험체 내부의 환경을 실제 탄약고 하절기 온습도 조건인 실내평균온도 21.5℃(편차±0.5℃), 실내평균상대습도 93%(편차±3%), 인공벽체 평균온도 19℃(편차±0.5℃), 외기평균습도 95%로 설정한 후 전반적인 실험을 진행하였다.

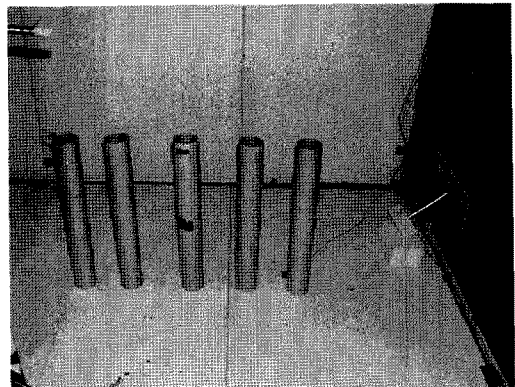
실험은 결로발생유도장치의 설치에 따른 효과를 검증하기 위한 Case 1과 결로발생유도장치의 최적 운전제어 방식을 도출하기 위한 Case 2로 나누어서 실시하였으며, 각각의 실험내용은 표 1과 같다.

Case 1은 탄약고에서의 상황을 재현하여 그 문제점을 파악하고 결로발생유도장치의 설치에 따른 효과를 검토하기 위한 것이다. 실험을 진행하기 위하여 실제 조건을 위한 예열운전을 충분히 실시한 후 실내의 온습도조건이 구성되었음을 확인하고 결로방지 시스템을 운전 할 때와 하지 않을 때의 비교실험을 실시하였다.

Case 2는 결로발생유도장치의 저장환경 개선을 위한 시스템 설계의 기초 자료를 확보하기 위한



a) 스크린 전경



b) 내부 축열체

[그림8] 실험체에 설치된 스크린 및 내부 축열체 전경

실험으로, Case 1과 동일한 실내의 환경을 설정하여 실내에 충분한 습기를 공급한 후 결로발생 유도장치의 송풍기 풍량을 변화시켜 각각의 경우에 대한 실험을 실시하였다.

4.3 실험결과 및 분석

4.3.1 결로발생유도장치의 유무에 따른 제습효과검증

Case 1에 의한 실험으로 실내 상대습도 변화, 절대습도와 노점온도 변화를 살펴봄으로써 결로발생 유도장치의 설치에 따른 제습효과를 분석하였다.

1) 실내 상대습도의 변화

그림 9는 대표적인 지하저장고인 이글루형 탄약고와 동일한 실내조건을 구성한 후 결로발생 유

도장치를 가동하였을 때와 가동하지 않았을 때 실내 상대습도의 변화를 나타낸 것이다.

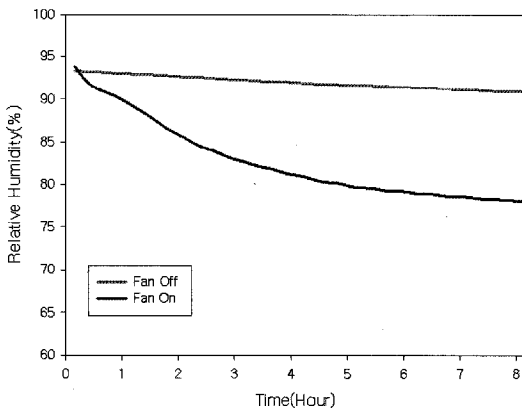
결로발생유도장치를 가동하지 않았을 경우에는 실내의 상대습도는 거의 감소하지 않는 것을 알 수 있다. 조금 감소하고 있는 것은 인공기후실을 OFF 하였을 시 실험체 내부의 온도조절이 용이하지 않아, 약간의 온도상승으로 인한 상대습도의 감소를 보이고 있다. 반면, 결로발생유도장치를 가동했을 경우에는 현저하게 줄어든다는 것을 알 수 있다.

2) 절대습도 및 노점온도 변화

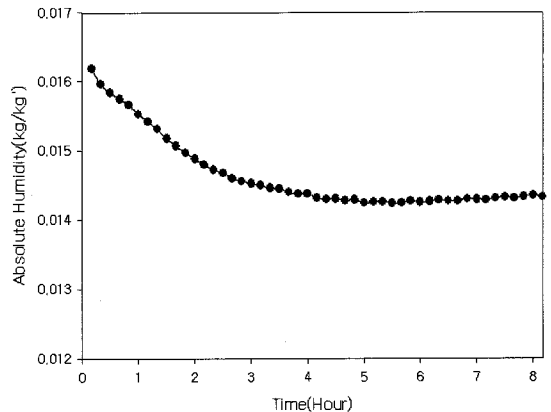
그림 10은 결로발생유도장치가 가동되고 있을 때의 실내 절대습도의 변화량을 나타낸 것이다.

<표 1> 실험조건

항 목	설정 조건			비 고
	CASE 1	CASE 2		
실내온도	21.5 ± 0.5℃			하절기 실제 탄약고 온습도 조건
실내상대습도	93 ± 3%			
인공벽체 온도	19 ± 0.5℃			
외기 상대습도	95%	95%	95%	
인공기후실	정지	정지	정지	
송풍기	가동	정지	정지	송풍량 변수
가습장치	내부	정지	정지	
	외부	가동	가동	



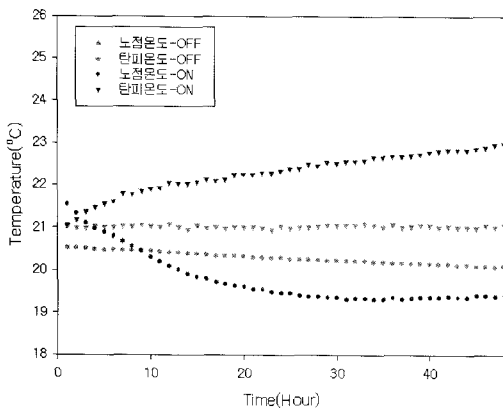
[그림9] 결로발생유도장치의 유무에 따른 상대습도 변화



[그림10] 실내 절대습도 감소량

실내의 절대습도가 제거된다는 것은 실내의 수분량이 줄어든다는 것을 의미한다. 그러나 실내 공기의 노점온도가 벽체의 온도와 같아지는 때까지의 습도는 줄어들지만 그 이하는 줄어들지 않는다. 그러나 실제 저장되는 내용물의 표면에 결로가 전혀 생기지 않는 수준까지의 제습은 충분히 이루어지는 것으로 나타났다.

그림 11은 실내의 노점온도를 나타낸 것이다. 실제 탄약고와 마찬가지로 시스템 off시 적치물의 온도가 실내노점온도보다 0.5℃ 높게 나타나고 있으나, 온도편차가 미세하고 냉열복사나 대류에 의해 냉각된 적치물의 열용량이 크므로 외부로부터



[그림11] 실내 노점온도와 탄약 외피의 온도

터 지속적으로 습한 공기가 유입되는 시점에서 적치물의 표면온도가 노점온도보다 낮아져 우각부나 적치물이 과적되어 있는 부위 등에서는 결로의 발생확률이 높다. 따라서 이로 인한 결로발생 부위는 확대될 수밖에 없다.

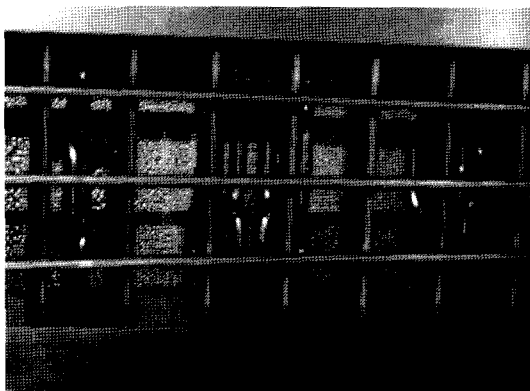
그러나, 본 제안시스템을 작동하였을 시에는 실내의 노점온도와 적치물인 내부 축열체의 표면온도가 3~4℃의 많은 온도차를 보임으로써 결로의 발생우려가 없는 저장환경으로 개선시킨 조건하에서 적치물을 저장할 수 있음을 알 수 있다. 그림 12는 완충공간에 발생한 결로를 관찰한 것이다.

4.3.2 송풍기 작동에 따른 특성 변화(Case 2)

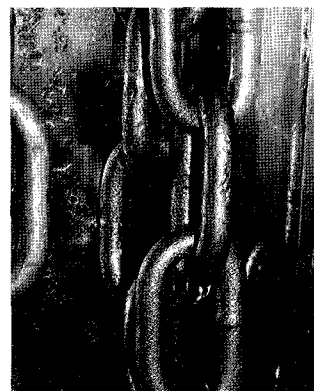
시스템의 최적 운전 제어 방식을 도출하기 위해 제습된 공기를 실내부로 재순환시키는 송풍기의 작동에 따른 특성을 실험하였다.

1) 제습량과 송풍기 소비전력의 관계

그림 13에서 보듯이 제습량은 소비전력에 비례하여 점차 증가하는 경향을 나타내고 있으나 소비전력 60W 이상 되면 제습량이 거의 증가하지 않는다. 이것은 소비전력이 증가하여도 송풍량이 더 이상 증가되지 않으므로 인하여 열전달량이

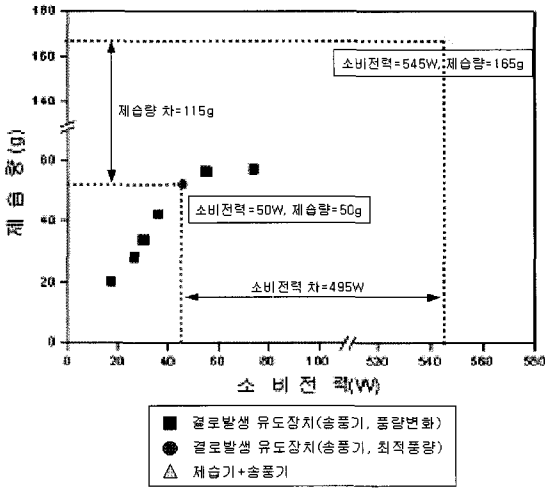


a) 하부 그릴을 통해 본 결로발생



b) 쇠사슬에 맞힌 표면결로

[그림12] 완충공간부의 결로 발생 관찰



[그림13] 제습량과 송풍기의 소비전력

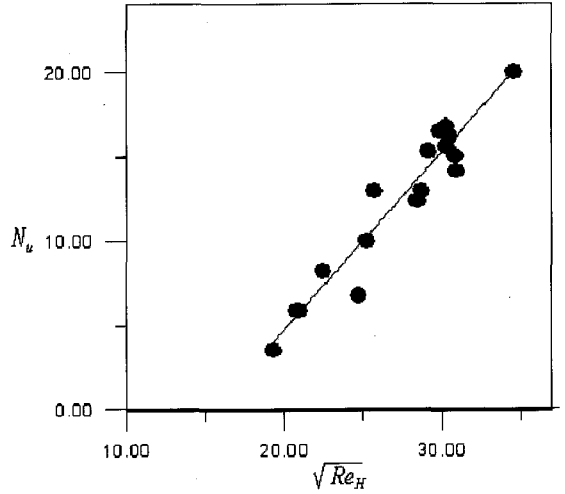
더 이상 증가되지 않기 때문이다. 최적풍량이 소비전력 50W 부근에서는 단위 전력당 제습량이 약 1g/W 정도임에 비하여 제습기를 사용한 경우에는 약 0.3g/W 정도이므로 약 3배의 에너지 효율성을 가지고 있음을 알 수 있다.

2) 송풍량과 제습량

이중 벽체 내의 제습 효과는 내벽, 열전달 축진을 위한 쇠사슬 및 PDF panel에서의 응축 열전달에 의한 것이다.

송풍량에 따른 열전달 특성의 변화는 그림 14와 같이 무차원수인 Nusselt (Nu) 수와 Reynolds (Re) 수의 관계로 나타내어 질 수 있다. 대류 열전달에 있어서 일반적인 관계식은 $Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n$ 로 표시되며 본 실험에서는 실내 공기와 냉벽 간의 온도차이가 크지 않으므로 Prandtl 수는 0.7 근처에서 거의 일정하여 상수로 간주할 수 있다. 따라서 Nu 수는 Re 수만의 함수이며 상첨자 m은 Re 수의 범위에 따라 다르지만 0.3에서 0.8까지의 값을 가지고 있다. 본 실험 결과의 regression에서는 $m=0.5$ 로 하였다.

$$Nu = 1.05 \cdot ReH^{0.5} - 16.4 \quad (3)$$



[그림14] 응축 열전달 특성

$$Nu = (Q/A_h \Delta T) \cdot L/k = (m_c \cdot h_g / A_h \Delta T) \cdot L/k \quad (4)$$

$$Re_H = VD_H / \nu$$

$$D_H = 4A_f / P \text{ (Hydraulic diameter)}$$

m_c : 응축수량

h_g : 응축잠열

A_h : 열전달 면적

A_f : 수평단면 면적

V : 평균 공기 유속

5. 결론

본 연구에서 논의된 탄약고 및 지하저장고의 결로방지와 보온을 위한 결로 발생 유도 시스템은 하절기에 낮은 지중온도를 최대한 이용할 수 있도록 응축 열교환 축진용 아연도금 링크체인을 공기의 유로(완충공간)에 설치하여 직접 제습을 한다. 또한 제습된 공기를 송풍기에 의해 열교환기로 순환시키고 실내공기를 이중벽체 내에서 재순환 제습하여 실내 습기와 적재물의 결로를 제거한다. 또한 동절기에 실외기보다 높은 지열을 효과적으로 실내공기와 적재물에 공급하여 보온과 결빙방지의 역할도 수행할 수 있을 것으로 보인다.

실물 모형실험을 통해 도출된 결과는 다음과 같

이 정리하였다.

- (1) 결로발생유도장치의 작동에 따른 제습효과를 분석한 결과, 장치의 가동에 의해 실내 상대습도가 현저히 낮아지고 절대습도의 감소가 발생했으며 실내의 노점온도보다 실내 적재물인 내부 축열체의 표면온도가 3~4℃ 높게 유지됨으로써 실제 저장되는 내용물의 표면에 결로가 전혀 발생하지 않는 수준까지 제습이 충분히 이루어지는 것으로 나타났다.
- (2) 결로 발생 유도 시스템의 활용은 탄약고내의 탄약의 표면결로를 제거함으로써 결로발생 또는 흡습에 의한 탄약의 부식 또는 성능저하를 방지할 수 있을 것으로 보인다.
- (3) 결로 발생 유도 시스템의 에너지 소비는 송풍기에 사용되는 전력뿐이므로 제습량과 전력량의 비인 단위 전력 당 제습효과는 기존

의 기성품 제습기에 비해 약 3배의 에너지 절약성을 보였다.

- (4) 응축수 실험(Case 2) 결과는 다소 분산이 있기는 하지만 대류 열전달의 일반식으로 회귀곡선을 구했을 경우 뚜렷한 경향이 나타나고 있으며 응축 열전달 계수, 즉 결로량은 Reynolds수의 0.5승에 비례하는 것으로 나타나고 있어 향후 이중벽체 순환구조 설계에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후, 실제 시공 시 고려되어야 할 응축 열교환 촉진용 아연도금 링크체인의 길이나 이중벽체 내의 배치간격 등에 의한 밀도, 그리고 송풍기 용량 등에 대한 보다 자세한 연구가 필요하다. 또한 현재 개,보수가 용이한 수직 벽체만을 활용하고 있으나 신축의 경우 지열이 풍부한 바닥의 활용에 대한 연구가 요구된다. 