

조습제 적용 박물관 전시케이스의 동적 습도조절 특성 해석

김 재 용, 오 명 도[†]

서울시립대학교 기계정보공학과 대학원, *서울시립대학교 기계정보공학과

Analysis of Dynamic Humidity Control Characteristics of Museum Showcase with Adsorption Material

Jae-Yong Kim, Myung-Do Oh[†]

Department of Mechanical Engineering, Graduate School, University of Seoul, Seoul 134-743, Korea

*Department of Mechanical Engineering, University of Seoul, Seoul 134-743, Korea

(Received January 3, 2003, revision received October 30, 2003)

ABSTRACT: This study was undertaken to judge the quality of air-tightened exhibition cases and to predict the dynamic variation of the relative humidity in the showcase. We performed a lot of experiments for the a few conditions and we numerically calculated the air change rate and the relative humidity in the showcase with the Artsorb under the same conditions. In all cases we confirmed that the numerical results about the relative humidity in the showcase had a good agreement with the experimental ones. Through the experiments of humidity control, we found out that the adsorption efficiency is varied with the location and the amount of the Artsorb. And the numerical results showed that the adsorption material is always needed to keep on the appropriate humidity condition in the showcase even though any kind of the showcases are used.

Key words: Museum showcase(박물관 전시케이스), Air change rate(공기교환율), Adsorption material(조습제), Adsorption efficiency(조습효율)

기 호 설 명

C : 조습효율
 K_{diff} : 확산 질량교환율 [$\text{kg}/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$]
 M_{abs} : 조습제의 건조질량 [kg]
 MW : 분자량
 N_{air} : 공기교환율 [1/day]
 R : 특정기체상수
 T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 t : 시간

V_{case} : 전시케이스의 체적 [m^3]
 W_{in} : 전시케이스 내부의 절대습도 [kg/kg]
 W_{out} : 전시케이스 외부의 절대습도 [kg/kg]

그리스 문자

$\rho_{air, in}$: 전시케이스 내 공기밀도 [kg/m^3]
 Ω : 조습제의 수분함습률 [kg/kg]

1. 서 론

유물을 손상 없이 잘 보존하고 전시하기 위해서 박물관에서는 전시케이스에 국소 습도 제어시스템을 적용하고 있다. 전시케이스 자체에 소형

[†] Corresponding author
Tel.: +82-2-2210-2756; Fax: +82-2-2248-5110
E-mail address: mdoh@uos.ac.kr

공조기를 적용한 공조식 환경제어시스템이 장착될 수도 있지만 비용이 비싸고, 일정한 상대습도를 유지하기 위한 설비의 유지 및 용량의 문제가 있으며 각 유물의 재질에 따라 상대습도를 맞추는데 있어서도 유연성이 떨어지는 단점이 있기 때문에 비공조식 시스템의 밀폐형 전시케이스를 많이 채택하고 있다.⁽¹⁾ 이러한 밀폐형 전시케이스에서는 내부의 보존유물에 따른 상대습도를 제어하기 위해 실리카겔과 같은 조습제를 설치하여 운영하고 있다. 본 연구에서는 비공조식 밀폐형 전시케이스를 대상으로 기존에 실시하였던 CO₂를 이용한 기밀도 평가^(2,3)와는 달리 수분을 이용한 기밀성능평가 실험과 조습제 설치시의 조습효율에 따른 상대습도의 동적거동에 대한 실험을 실시하였다. 이를 바탕으로 변화하는 동적인 외부 환경에 대해 전시케이스 내부습도 변화를 수치적 계산과 비교, 분석을 수행하였고, 이를 이용하여 공기교환율과 조습효율, 조습제사용량에 따른 내부습도의 변화를 예측하여 보았다.

2. 이론적 배경

이전의 연구^(2,3)에서는 밀폐형 전시케이스의 기밀성능을 CO₂ 가스를 이용하여 CO₂ 질량교환율을 계산하고 이를 다시 공기교환율로 환산함으로써 평가할 수 있었다. 하지만 전시케이스의 내부 환경은 전시케이스 자체의 기밀성능에만 의존하는 것이 아니라 내부에 설치된 조습제의 종류와 양에 따라 크게 달라진다. 전시케이스 내·외부의 온도편차가 크지 않다면 내부환경의 제어는 습도제어, 즉 조습제의 흡·방습현상을 포함한 수분변화의 영향을 받게 된다.

따라서 조습제 설치시 전시케이스 내부의 수분 변화에 대한 연구를 수행하기 위해서는 기밀성능 평가방법부터 수분의 이동현상으로 해석할 필요가 있다. 수분도 CO₂와 마찬가지로 가스이기 때문에 전시케이스 내·외부의 농도차에 의해 내부의 CO₂ 질량 변화가 일어나는 것과 마찬가지로 수분도 전시케이스 내·외부의 공기 중 수분함유량이 다르다면 분압차에 의해 이동하게 된다.^(4,5)

2.1 질량교환율

전시케이스 내·외부의 수분이동은 수증기의 분

압에 의한 확산과 압력변화에 의한 영향을 고려하여 다음과 같이 표현된다.^(4,5)

$$\rho_{air,in} \frac{dW_{in}}{dt} = K_{diff,H_2O}(W_{out} - W_{in}) + \dot{m}_b W_* \quad (1)$$

$$\dot{m}_b = \frac{d\rho_{air,in}}{dt} = \frac{d(P_b/RT_{in})}{dt} \quad (2)$$

여기서 \dot{m}_b 는 압력차에 의한 공기의 이동을 나타낸다. 실질적으로 압력차보다는 확산에 의한 가스의 이동량이 훨씬 크기 때문에 이 값은 무시할 수 있다. 단위체적당 수분의 질량교환율을 계산하는 방법은 임의로 가정한 질량교환율에 대하여 실제 측정된 내부 절대습도의 동적 변화와 계산에 의한 예상절대습도의 동적 변화의 RMS(Root Mean Square)가 최소가 될 때의 질량교환율을 찾음으로써 정할 수 있다. 그런 후 Graham's law를 이용하여 공기의 질량교환율로 변환할 수 있다.⁽³⁻⁵⁾

$$K_{diff,air} = K_{diff,H_2O} \sqrt{\frac{MW_{H_2O}}{MW_{air}}} \quad (3)$$

만약 전시케이스 내부에 조습제가 설치된다면 조습제의 영향을 고려해야 한다. 일반적으로 실리카겔이나 Artsorb와 같은 조습제는 상대습도와 함습률(water adsorption capacity)에 대한 함수로 특성화되기 때문에 식(1)은 다음과 같이 변환된다.

$$\rho_{air,in} \frac{dW_{in}}{dt} = K_{diff,H_2O}(W_{out} - W_{in}) - C \frac{M_{ab}}{V_{case}} \frac{d\Omega}{dt} \quad (4)$$

조습효율 C는 조습제의 설치방법 및 위치 등에 대한 함수이다. 그리고 함습률 Ω 는 조습제의 단위질량(kg)당 수분의 질량(kg)으로 정의된다.

2.2 온도 및 상대습도 조건

본 연구에서 전시케이스의 동적 습도조절 특성 해석을 위해 사용한 실내 온도와 상대습도 조건은 Fig.1과 같다. 이 값들은 국립중앙박물관의 금

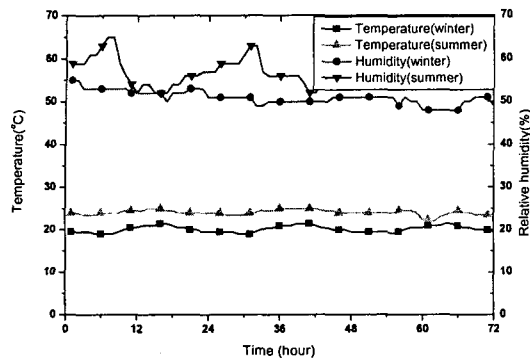


Fig. 1 Temperature and humidity variations in the museum in Seoul.

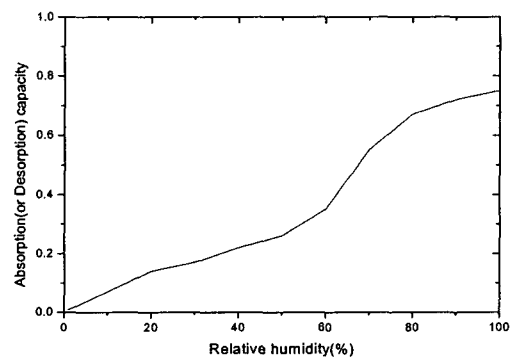


Fig. 2 The characteristic curve of water absorption capacity of the Artsorb.

속실에서 여름철과 겨울철에 3일 동안 측정된 온·습도 데이터이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도는 여름철 22.5~25°C, 겨울철 19~21.5°C로 측정되었고, 상대습도는 여름철 52~65%, 겨울철 48~55%의 범위로 측정되었다.

2.3 조습제 특성곡선

Fig. 2는 연구에 사용된 조습제의 상대습도에 따른 수분의 흡습률을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 조습제는 Artsorb로서 23°C, 50%로 예비처리된 것이다. 또한 일반적으로 상대습도에 따라 조습제의 흡착 및 탈착 특성이 약간 달라지지만 본 연구에서는 큰 차이가 없다고 가정하고 계산하였다.

2.4 수치해석방법

전시케이스 내부에서의 동적 환경을 예측하기

위해서 식(4)를 식(5)와 같은 양해법(explicit method)으로 이산화하고 수치계산을 수행하였다.

$$W_{in, new} = W_{in, old} + \frac{K_{diff, H_2O}}{\rho_{air, in}} \times \Delta t \times (W_{out, old} - W_{in, old}) - \frac{C}{\rho_{air, in}} \frac{M_{ab}}{V_{case}} (\Omega_{new} - \Omega_{old})$$

여기서, new는 현재 시간스텝의 값을, old는 이전 시간스텝의 값을 나타낸다.

식(4)에서 보듯이 모든 계산은 절대습도의 값으로 수행된다. 이러한 절대습도의 값을 계산하기 위하여 습공기선도에서의 온도에 따른 절대습도-상대습도 상관식이 사용되어졌다.⁽⁶⁾ 그리고 수치계산의 목적인 전시케이스 내부 상대습도 변화를 구하기 위해서는 먼저 내부의 온도를 알아야 하는데 이에 대한 박물관 전시케이스에서의 온도 데이터가 존재하지 않아 본 연구에서는 실내 온도와 동일하다고 가정하여 계산하였다.

3. 실험

3.1 실험장치

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 전시케이스의 실험장치 구성도를 보여준다. 실험에 사용된 전시

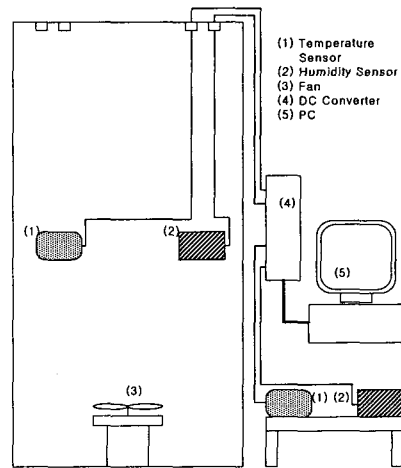


Fig. 3 Experimental setup of museum show case.

케이스의 크기는 900 m(W)×900 m(L)×2306 m(H) 이고 내부의 체적은 1.076 m³이다. 내부의 습도를 제어하기 위하여 전시케이스의 하단 중앙에 조습제박스가 설치된다. 전시케이스는 THK 11.76 mm 접합유리와 rolling door system을 사용하여 밀폐도를 높일 수 있는 구조로 되어 있다. 그리고 전시케이스 내부에 열이 전달되지 않고 균일한 고휘도를 얻을 수 있도록 하기 위하여 광섬유 조명장치가 사용되었다. 전시케이스의 수분에 대한 질량교환율과 조습제를 이용한 습도제어 실험을 수행하기 위하여 전시케이스 내·외부에 온도와 상대습도 센서를 설치하여 실시간으로 데이터를 수집하였다.

3.2 수분을 이용한 기밀성능 실험

수분을 이용한 기밀성능 실험은 Fig. 3에 제시된 전시케이스를 이용하여 실시하였다. Fig. 4는

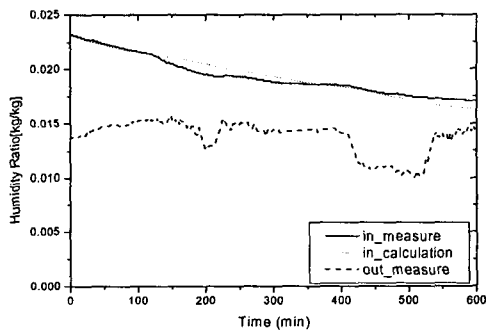


Fig. 4 Measurement of humidity ratios inside and outside of the exhibition case.

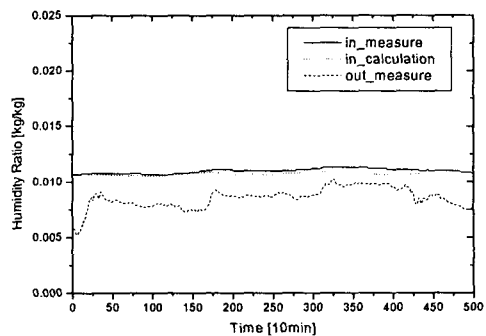


Fig. 5 Measurement of humidity ratios inside and outside of the exhibition case with the Artsorb (case 1).

약 50시간 동안 실험한 것으로 날씨의 영향으로 인해 외부습도의 변동이 있었던 경우이다. 이때 전시케이스 외부의 온도는 약 32±2℃로 나타났으며 전시케이스 내부는 케이스 외부의 온도보다 약 2℃ 정도 높은 것으로 나타났다.

수분을 이용한 기밀성능 실험결과, 단위체적당 질량교환율 K_{diff, H_2O} 값은 0.82×10^{-3} , 공기교환율은 N_{air} 는 0.96으로 각각 계산되었다. 그리고 그림에서 보는 바와 같이 실제 측정치와 식(5)를 이용하여 계산된 결과가 잘 일치하는 것으로 나타났고 이는 본 연구에서 사용한 수치계산의 타당성을 증명해 주고 있다.

3.3 조습제를 이용한 습도제어 실험

박물관 전시케이스용 조습제로는 일반적으로 Artsorb가 가장 널리 사용되고 있다. Artsorb는 일반 실리카겔보다 EMC(Equilibrium Moisture Content)가 높고, 흡습 및 방습능력이 상당히 뛰어나지만 다른 조습제에 비해 가격이 비싸고, 정형화된 케이스에 포장되어 판매되기 때문에 전시케이스의 크기 및 형태에 따른 사용량을 선정하는 데 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 조습효율의 개념을 도입하여 전시케이스 내부에 설치되는 조습제의 설치구조에 따라 전시케이스 내부에서 상대습도가 어떻게 변하는지를 측정하여 보았다.

일반적으로 전시케이스 내부에 설치되는 조습제는 0.33 m(W)×0.11 m(L)×0.04 m(H)인 종이상자에 포장되어 있다. 하지만 구조를 약간 변형하

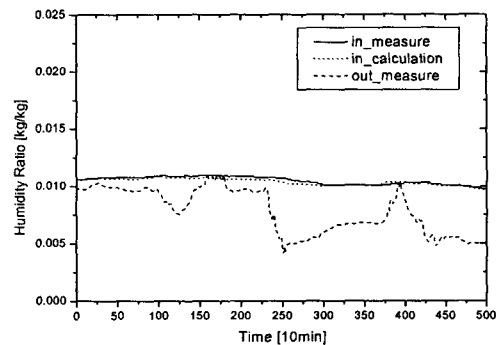


Fig. 6 Measurement of humidity ratios inside and outside of the exhibition case with the Artsorb (case 2).

면 공기와의 접촉면적이 증가하기 때문에 조습효율도 달라질 것으로 예상되었다. 따라서 본 연구에서는 조습제의 양은 같고 조습면적(조습제와 공기의 접촉면적)이 다른 2가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 조습면적은 case 1의 경우 0.0363 m^2 ($0.33 \text{ m} \times 0.11 \text{ m} \times 0.04 \text{ m}$) 이고, case 2의 경우에는 0.097 m^2 ($0.66 \text{ m} \times 0.147 \text{ m} \times 0.015 \text{ m}$, case 2)이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 조습면적의 변화에 따른 실험 결과를 보여준다. 식(4)를 통하여 계산된 조습효율은 case 1의 경우 0.115로 측정되었고, case 2의 경우에는 0.277로 측정되었다. 이때 식(5)에 의해 계산된 수치적인 결과는 실제측정치와 상대오차 5% 이내로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 이 결과로부터 case 2와 같이 case 1에 비해 조습면적을 2.7배 증가시킨 결과, 조습효율은 2.4배가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 조습제의 설치위치나 양에 따라 조습효율이 달라질 수 있음을 보여주고 있다.

4. 전시케이스 내부환경의 동적 예측

전시케이스 내부습도를 좌우하는 인자는 크게 네 가지로 구분할 수 있다. 전시케이스의 공기교환율과 조습효율, 조습제의 사용량, 그리고 전시케이스 외부습도이다. 전시케이스 외부습도는 박물관이나 미술관에서도 하루 종일 공조기가 가동되지 않을 뿐만 아니라 갑작스런 사람들의 운집 등으로 인하여 쉽게 변동하게 된다.

따라서 본 연구에서는 동적으로 변화하는 외부 환경에 대해 전시케이스 내부습도 변화를 수치적 계산을 통해 예측할 수 있는 프로그램을 이용하여 조습제 설치 유·무에 따른 내부습도의 변화와 공기교환율과 조습효율, 조습제 사용량에 따른 내부습도의 변화를 예측하였다. 이때 사용된 전시케이스의 외부조건은 Fig. 1에 나와 있는 여름철과 겨울철에 측정된 온·습도 데이터이다. 3일 동안 측정된 데이터의 일변화가 심하지 않기 때문에 여름철과 겨울철 각각 하루 동안의 데이터만을 계산에 이용하였다. 전시케이스의 내부에서의 온·습도기준은 일본 국립역사민속박물관에서 금속 및 도검류의 수장고에서의 공조조건인 23°C , 35%를 기준으로 설정하였고 이를 이용하여 계산된 값에 대한 논의를 수행하였다.

4.1 공기교환율에 따른 내부 절대습도 변화

Fig. 7은 전시케이스 내부에 조습제를 설치하지 않은 경우 시간의 흐름에 따른 내부 절대습도 변화를 보여준다. 이는 초기에 전시케이스의 내부에서의 상대습도가 기준조건인 35%로 맞추어져 있다고 가정한 결과이다. 그림에서 공기교환율 0.2는 신축 국립중앙박물관에서 제시한 기밀성능 기준이고 1.0은 본 연구에서 사용된 전시케이스의 공기교환율값으로서 이들을 비교대상으로 삼았다.

그림에서 보는 바와 같이 공기교환율값이 작을수록 전시케이스 외부 절대습도 변화에 대한 영향이 작아지지만 시간이 지남에 따라 모든 경우

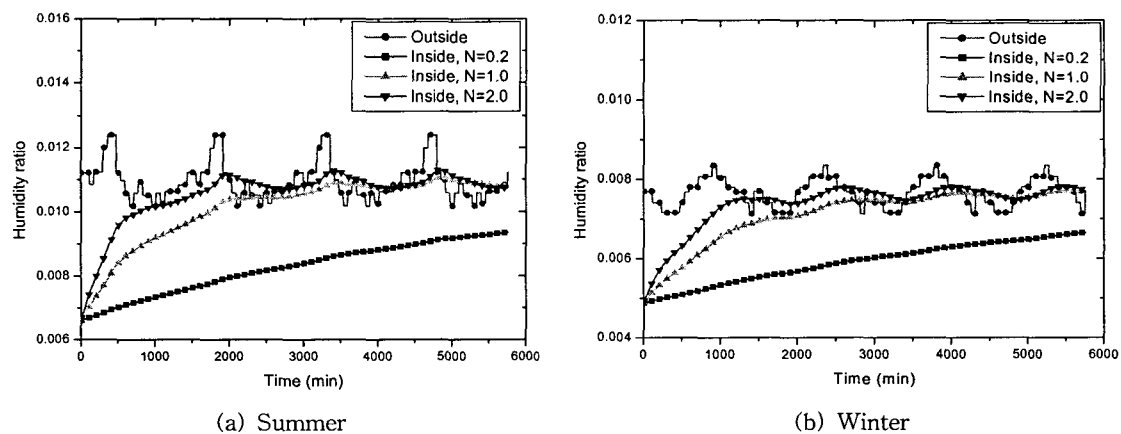


Fig. 7 Variation of humidity ratio inside the exhibition case without the adsorption material for different value of N_{air} .

에 대해서 전시케이스 내부 절대습도는 외부 절대습도와 비슷한 값으로 증가해 가는 것을 볼 수 있다. 이는 전시케이스가 공기교환율만큼 외부와의 공기교환이 지속적으로 이루어지기 때문에 외부로부터 수분이 지속적으로 유입되어 내부 절대습도가 증가하는 것이다.

공기교환율이 0.2인 경우에는 여름철과 겨울철 모두 5800분이 지난 후에도 외부 절대습도와 같아 지지 않았으나 공기교환율이 1.0이고 여름철인 경우에는 약 3500분이 지난 후부터 외부 절대습도와 거의 비슷하게 나타났고, 겨울철의 경우에는 약 3300분 후부터 외부 절대습도와 비슷한 값을 나타내었다. 공기교환율이 2.0이고 여름철인 경우에는 약 2000분이 지난 후부터 외부 절대습도와 거의 비슷하게 나타났고, 겨울철의 경우에는 약 1300분

후부터 외부 절대습도와 비슷한 값을 나타내었다.

이 결과로부터 박물관의 금속실에서 사용되는 전시케이스의 경우 조습제가 사용되지 않는다면 공기교환율에 따른 정도의 차이만 있을 뿐 일정시간이 지난 후 내부 절대습도는 외부 절대습도에 수렴하게 된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 박물관 금속실에서는 기밀성능이 우수한 전시케이스를 사용하더라도 전시케이스 내부에 조습제를 사용하여 내부습도를 제어할 필요성이 있다고 판단된다.

4.2 조습제 사용량에 따른 내부 상대습도 변화

Fig. 8과 Fig. 9는 공기교환율이 1.0인 전시케이스를 대상으로 조습효율이 0.115와 0.277인 경우에 대하여 조습제 사용량에 따른 내부 상대습도

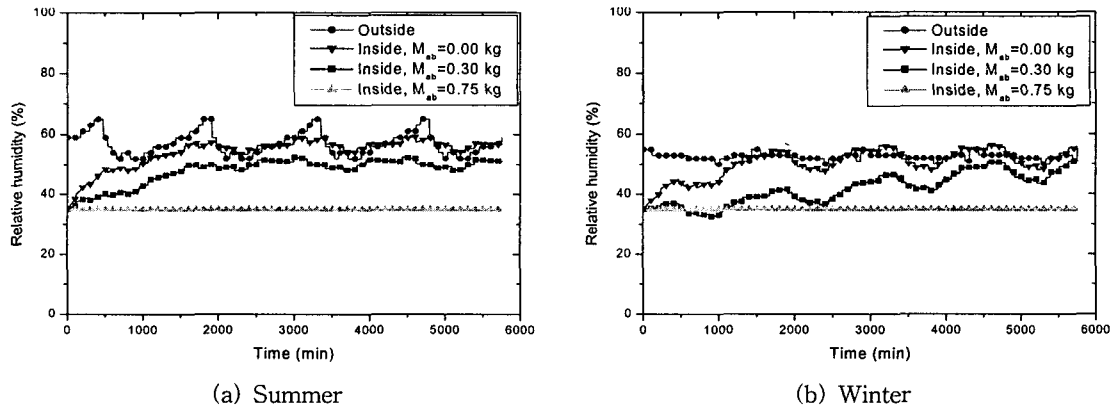


Fig. 8 Variation of the relative humidity in the exhibition case for the amount of adsorption materials when $N_{air}=1.0$ and $K_{abs}=0.115$.

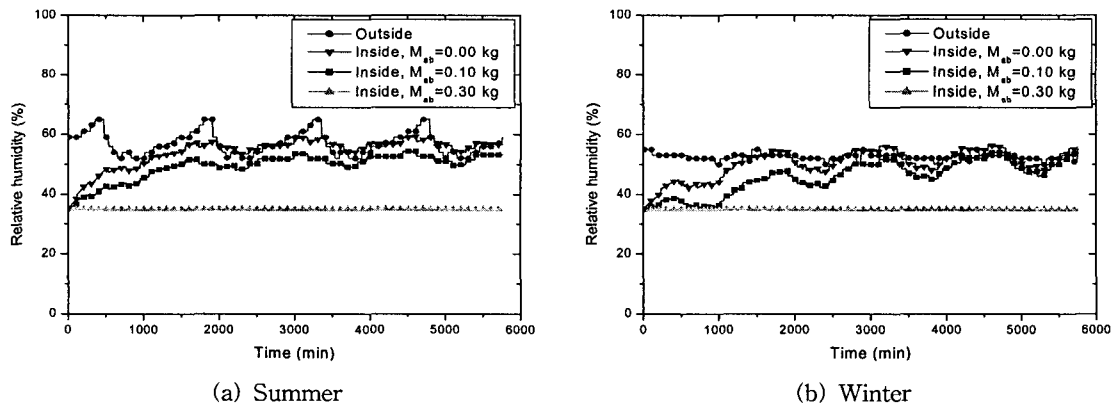


Fig. 9 Variation of the relative humidity in the exhibition case for the amount of adsorption materials when $N_{air}=1.0$ and $K_{abs}=0.277$.

변화를 예측한 것이다. 그림들에서 보는 바와 같이 조습제가 사용되면 일정시간이 흐른 뒤부터 전시케이스 내부 상대습도는 어떤 값을 중심으로 주기적으로 반복하는 경향을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 조습제가 사용되면서 전시케이스 외부로부터 유입된 수분이 조습제에 의해 흡착되어 제어되기 때문이다.

Fig. 8에서 조습효율이 0.115이고 여름철 조건인 경우 0.3 kg의 조습제가 사용되면 전시케이스 내부 상대습도가 약 3000분 후부터 $50 \pm 2.5\%$ 를 주기적으로 반복하는 경향을 볼 수 있다. 그리고 0.75 kg의 조습제가 사용하면 주어진 외부 상대습도에 대해서 전시케이스 내부 상대습도는 거의 변화 없이 35%를 유지하는 것을 나타내서 습도 설정조건을 잘 만족하는 것으로 나타났다. 겨울철 조건에서 0.3 kg의 조습제가 사용된 경우에는 전시케이스 내부 상대습도가 약 4000분 후부터 $47 \pm 3\%$ 를 주기적으로 반복하는 경향을 나타냈으며 0.75 kg을 사용한 경우에는 내부 상대습도가 35%에서 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이 결과들로부터 조습효율이 0.115인 경우 전시케이스 내부의 상대습도 설정조건인 35%를 잘 유지하기 위해서는 0.75 kg 이상의 조습제가 사용되어야 하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 조습효율이 0.277인 경우에 대한 내부 상대습도 변화결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 사용된 조습제양만 감소하였을 뿐 전체적인 내부 상대습도 변화경향은 조습효율이 0.115일 때와 비슷하였다.

여름철의 경우 0.1 kg의 조습제가 사용되면 전시케이스 내부 상대습도가 약 1500분 후부터 $50 \pm 2.5\%$ 를 주기적으로 반복하는 경향을 볼 수 있다. 그리고 0.3 kg의 조습제가 사용하면 주어진 외부 상대습도에 대해서 전시케이스 내부 상대습도는 거의 변화 없이 35%를 유지하는 것을 나타냈고 습도 설정조건을 잘 만족하였다.

겨울철에는 0.1 kg의 조습제가 사용된 경우 전시케이스 내부 상대습도가 약 4000분 후부터 $50 \pm 4\%$ 를 주기적으로 반복하는 경향을 나타냈으며 0.3 kg을 사용한 경우에는 내부 상대습도가 35%에서 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 조습효율이 0.277의 경우에는 여름철과 겨울철 조건에서 조습제양이 0.3 kg만 되어도 전시케이스 내부 상대습도는 설정조건인 35%를 잘

유지하는 것으로 나타났다. 이는 3.3절에서 설명한 바와 같이 조습면적이 넓어질수록 조습효율이 증가하고 이로 인해 적은 양의 조습제를 사용해도 습도 설정조건을 잘 유지할 수 있기 때문이다.

5. 결 론

이상의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 수분을 이용한 기밀성능 평가실험을 실시하여 수분의 질량교환율과 공기교환율을 측정하였고, 수치모델링을 이용한 결과가 실험값과 잘 일치하는 것으로 나타나 본 연구에서 수행한 수치계산의 타당성이 증명되었다.

(2) 조습제를 이용한 습도제어 실험을 통하여 조습제의 설치위치나 양에 따라 조습효율이 달라지는 것을 확인하였고, 조습제를 고려한 수치계산 결과가 실험값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

(3) 박물관의 전시케이스에서 조습제가 사용되지 않은 경우 일정시간이 지나면 내부 절대습도가 외부 절대습도에 수렴하게 된다는 것을 알 수 있었고, 이로부터 기밀성능이 우수한 전시케이스를 사용하더라도 전시케이스 내부에 조습제를 사용하여 내부습도를 제어할 필요성이 있다고 판단되었다.

(4) 전시케이스 내부에 조습제가 사용되면 일정시간이 흐른 뒤부터 전시케이스 내부 상대습도는 임의의 값을 중심으로 주기적으로 반복하는 경향을 관찰할 수 있었고, 조습제 양과 조습효율이 증가할수록 초기 설정조건에 빠르게 근접해가는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002년도 서울시립대학교 교내학술연구조성비에 의해 연구되었으며 대학의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Minister of Culture and Tourism Republic of Korea, 1996, A Study on HVAC Standards for Exhibition and Collection Preser-

- vation Space in the Museum, Minister of Culture and Tourism Republic of Korea, pp. 224-240.
2. Institute of Industrial Technology in University of Seoul, 2001, A Study on the Evaluation Method for the Airtightness of the Closed Showcase in the Museum and Gallery, University of Seoul.
 3. Kim, J. Y., Noh, K. C. and Oh, M. D., 2002, Study on the performance evaluation of the air-tightened exhibition case in the museum, Korean Journal of SAREK, Vol. 14, No. 2, pp. 184-190.
 4. Noh, K. C. and Oh, M. D., 2001, Dynamic characteristics inside the exhibition case for the variation of the indoor environment in the museum, Proceedings of the SAREK 2001 Winter Annual Conference, pp. 400-405.
 5. Ault, J. R., 2000, Environmental Requirements for Museum, MS Thesis, Univ. of Wisconsin-Madison.
 6. ASHRAE handbook FUNDAMENTAL, 1997, Psychrometrics, ASHRAE, pp. 6.1-6.9.
 7. Miura T., 1982, Show Case as an Environmental System, Tokyo National Research Institute of Cultural Properties, Conservation Science, No. 21, pp. 55-59.
 8. Kim, M. N. and et al., 2000, Study on the Effect of silica gel on the humidity control in the showcase, Museum Conservation Science, Vol. 2, No. 2, pp. 77-82.