

T800/AD6005계 복합재 연소관의 습기 투과에 관한 연구

박명규* · 류백능* · 최영보* · 도영대*

Water Vapor Transmission for T800/AD6005 Based Composite Motor Case

Myung-Kyu Park*, Baek-Neung Ryoo*, Young-Bo Choi* and Young-Dae Doh*

ABSTRACT

Water vapor transmission was tested in water bath controlled by 20°C, 90%RH for T800/AD6005 based composite motor case which made by filament winding method. We detected internal relative humidity of composite motor case by inserting the humidity detector through the head of motor case for the study of humidity transmission through the wall of composite motor case. We found out that this composite material appears the water vapor flux of $2.88 \times 10^{-9} \text{g/m}^2 \text{sec}$ and diffusivity of $7.98 \times 10^{-7} \text{mm}^2/\text{sec}$ at 20°C, 90%RH water vapor condition.

초 록

수분이 복합재를 통하여 투과되는 정도를 고찰하기 위하여 20°C, 90%RH의 온/습도를 유지하는 수조를 제작하였고, 이 수조에 보관한 복합재 연소관의 실린더 벽면으로 투과되는 습기를 측정하기 위하여 연소관 내에 습도 센서를 투입하여 상대습도를 직접 측정하였다.

습기의 투과는 내부에 라이너/인슐레이션이 피복되거나 또는 추진제가 충전된 경우 많은 감소효과를 보였다. Epoxy filament winding으로 제조된 순수 복합재 연소관의 경우 수조에 넣고 평형에 도달한 후로부터 약 8개월간의 습기 투과 상태를 볼 때 벽면을 통하여 들어가는 water vapor flux는 20°C, 90%RH에서 평균적으로 $2.88 \times 10^{-9} \text{g/m}^2 \text{sec}$ 로 나타났다. 이때 습기가 투과되는 연소관의 국지점을 평판으로 가정하고 Fick's law를 이용하여 구한 습기에 대한 복합재의 확산계수는 $D = 7.98 \times 10^{-7} \text{mm}^2/\text{sec}$ 였다. 밀폐된 장치 내의 습도 변화를 직접 측정하는 본 시험 방법은 실린더 형태 및 밀폐된 용기를 이루는 곡면형 재료의 환경에 따른 습기 투과량 및 재료의 확산 계수 측정에 유용할 것으로 생각된다.

기 호 설 명

- A : Water vapor transmission area
 a : Inner radius of test motor case
 b : Outer radius of test motor case
 C : Concentration of diffusion material
 C_1 : Average water vapor concentration between measuring point n and n+1, $(C_n + C_{n+1})/2$
 C_2 : Water vapor concentration of water bath
 C_n, C_{n+1} : Water vapor concentration at each detecting time in composite motor case
 D : Diffusivity
 F : Diffusion flux
 G : Quantity of transmitted material
 l : Thickness of composite motor case
 L : Axial length of diffusion area in test motor case
 Q : Quantity of water vapor diffused in unit time
 Q_l : Quantity of water vapor diffused through unit length of cylinder
 t : Water vapor transmission time
 V_{case} : Volume of composite motor case
 WVT : Rate of water vapor transmission
 x : Diffusion path

온도 또는 습도 등의 환경에 대한 영향을 고려해야 한다. 더구나 연소관은 내부에 추진제가 충전되어 있으므로 추진제의 기계적 특성이 습도에 민감함을 생각할 때 강도 뿐만 아니라 습기의 투과도 또한 매우 중요한 고려 요소가 된다. 그러나 온/습도 변화에 따른 복합재 자체의 재료 특성 변화에 대한 연구는 많이 보고되었으나 습기의 투과 정도에 관한 연구는 자료가 미흡한 실정이다. 한편, 포화 함수율은 복합재에 따라서 차이가 있고 본 연구에 사용된 복합재는 아니지만 T300/1034의 경우를 예로 들면 20~50°C에서 100% 상대습도에 노출시킬 경우 복합재 무게의 약 1.5%를 나타내고 있다^{1), 6)}.

본 연구에서는 일정 온/습도 조건을 유지하는 수조를 제작하고 이 수조 내부에 연소관을 보관한 후 시간 간격을 두고 복합재 연소관 내부의 상대 습도를 습도 센서로 직접 측정함으로써 복합재 연소관의 습기 투과 정도를 고찰하였다. 또한 복합재 연소관 내부의 수분 증가로부터 습기 투과도를 계산하고, Fick's law에 의거하여 확산 계수 D를 계산하였다.

복합재 연소관이 로켓에 사용될 때는 연소관 외부에 페인트 피막 처리를하고 연소관 내부에도 추진제와의 사이에 라이너가 접착되어 있어서 수분 침투 및 온도 등의 외부 환경 조건에 견디기에 좀더 양호한 조건이나 본 연구에서는 복합재 자체의 특성을 고찰 하기 위하여 섬유를 에폭시에 함침시켜 winding한 상태 그대로의 복합재 연소관 시료를 사용하였다.

1. 서 론

에폭시와 같은 유기 수지 기질에 탄소 섬유 또는 케블러 섬유 등과 같은 섬유를 강화한 복합재 재료는 강도가 훌륭하고 가볍기 때문에 최근 금속을 대신하여 여러가지 구조체에 많이 사용되고 있으며, 특히 로켓의 연소관으로 유용하게 사용되고 있다.

복합재 로켓 연소관은 제조 후 대기 환경에 장기적으로 노출되어 있기 때문에 금속 연소관과는 달리

2. 이론적 배경

2.1 Fick's law

일반적으로 확산 이론은 등방성 물질에 있어서 단위 면적을 통한 확산 물질의 이동 속도가 이동 수직 단면에 대한 농도 구배에 비례한다는 Fick의 법칙으로 표현되는 경우가 많다.

$$F = -D \partial C / \partial x \quad (1)$$

여기서 F 는 단면에 수직으로 이동한 단위 면적 당의 확산물질 이동속도, C 는 확산 물질의 농도, x 는 단면에 수직으로 이동하는 거리이며 D 는 확산 계수이다. 에폭시가 충분히 잘 접착되었음을 가정하고 수평 방향으로의 확산은 어느점에서나 같다고 생각하여 수직방향으로의 확산만을 고려하면 이 복합재에 Fick의 법칙을 적용할 수 있다. 한편 graphite-epoxy 복합재에 대하여 이 Fick 확산을 적용함에 무리가 없음을 문헌에서 찾아 볼 수 있다¹⁾.

2.2 Cylinder를 통한 확산²⁾

Long circular cylinder를 가정하고 확산은 어디서나 반경 방향으로만 일어난다고 가정할 때, 복합재 내부에서의 농도는 반경 r 과 시간 t 만의 함수이다. 이 때의 확산식은

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rD \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (2)$$

으로 표현된다.

실린더 내부가 비어 있는 hollow cylinder이고 내부 및 외부 반경이 a 및 b , 그리고 확산 계수 D 가 일정하다 하면 정상 상태 조건에서의 확산식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dC}{dr} \right) = 0, \quad a < r < b \quad (3)$$

이 식의 일반 해는

$$C = A + B \ln r \quad (4)$$

이고, 복합재 연소관 내외경 $r = a, b$ 에서의 수분의 표면 농도가 C_1, C_2 로 일정하다면, cylinder 형의 복합재 내부에서의 확산 물질 농도는 (4)의 일반 해로부터 다음과 같이 표현된다.

$$C = \frac{C_1 \ln(b/r) + C_2 \ln(r/a)}{\ln(b/a)} \quad (5)$$

이때, 시간 t 동안에 지름 D 인 실린더의 단위 길이 당 면적을 통하여 확산되는 확산물질의 양 Q_L 은

$$Q_L = \frac{2\pi Dt (C_2 - C_1)}{\ln(b/a)} \quad (6)$$

이 된다. 만일 Q_L 이 농도에 의존하는 계에서 측정된다면, 평판의 경우를 가정한 식(6)에 대한 확산 계수 D 의 평균값은

$$D_{avg} = \int_{C_1}^{C_2} D dC / (C_2 - C_1) \quad (7)$$

이다.

2.3 Water Vapor Transmission^{3,4)}

일정 습도를 유지하고 있는 한 계로부터 다른 계로 침투한 수분 증기의 투과량은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$WVT = G/tA = (G/t)/A \quad (8)$$

2.4 연소관 내부로의 water vapor flux 계산

연소관 내부로 스며드는 습기의 양은 단위 면적 및 단위 시간당 투과량으로 계산되는데, 이는 실험에서 직접 측정된 연소관 내부의 습도 변화로부터 계산될 수 있다.

$$F = \frac{(C_{n+1} - C_n) \cdot V_{case}}{A \cdot t} \quad (9)$$

$$Q = F \cdot At \quad (10)$$

2.5 확산 계수 계산

복합재 연소관의 수분 침투를 식(1)의 Fick's law에서 일정 시간 및 실린더 표면적에 대해 고려함으로써 식(6)에서 연소관 외부에서 내부로 침투되는 수분량 투과량을 구할 수 있고 식 (9) 및 (10)에서 복합재 연소관 내부의 습도 변화로부터 일정 시간에 투과된 수분량을 구할 수 있으므로 (6)식과 (10)식에서 구한 수분 투과량을 같게 놓으면 길이 L 인 실린더형 연소관에 대하여 습기 투과량 식을 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{2\pi LDt(C_2 - C_1)}{\ln(b/a)} = (C_{n+1} - C_n) \cdot V_{case} \quad (11)$$

(11)식을 확산 계수에 대해 정리하면

$$D = \frac{\ln(b/a)}{2\pi L t (C_2 - C_1)} \cdot (C_{n+1} - C_n) \cdot V_{case} \quad (12)$$

로부터 확산 계수를 구할 수 있다.

3. 실험

3.1 Full scale 연소관

복합 재료 자체의 투습 특성을 알아보기 위하여 full scale 모터를 그대로 사용하여 외기 조건에 대한 내부 습도의 변화를 직접 측정하였다. 본 시험에 사용된 시료는 T800/AD6005계 탄소섬유/에폭시 복합 재료로서 filament winding으로 제조되었으며 로켓의 연소관으로 사용되고 있다. 시료 연소관은 세 종류로서 1)복합재 연소관 내부에 인슐레이션 및 고무 라이너와 함께 추진제가 충전된 실제 로켓 추진 기관, 2)복합재 연소관에 인슐레이션 및 라이너만 부착되어 있는 경우, 3)내부에 부착 또는 충전 물질 없이 복합재 연소관만 있는 경우의 3종류를 사용하였다. 한편 추진제가 충전된 연소관에서 추진제 두께는 case로부터 두꺼운 쪽은 약 52cm, 얇은 부분은 약 12.5cm 의 두께를 지니고 있다. 실제 복합재 연소관 생산품은 연소관 표면에 페인트 피막 처리를 하여 사용하고 있으나, 본 실험에서는 복합재 자체의 투습 특성을 고찰 하기 위하여 winding 후 경화된 에폭시 표면 상태를 그대로 사용하였다. 이 복합재 연소관의 제원을 Table 1에 종합 하였으며, full scale motor 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1. Specification for composite motor case

Item	Dimension
ID(mm)	157
OD(mm)	165
Thickness of moter case(mm)	4
Density(g/cm ³)	1.55
Fiber volume fraction V _f (%)	60
Filament winding, lay up	[(90) ₂ /(18) ₃ /(90) ₄ /(55)/(90) ₂ /(55)(90) ₂] _T
Thickness of liner(mm)	0.5
Thickness of NBR (Nitrobutadiene Rubber) (mm)	4.5

3.2 절단 연소관 시료

복합재 연소관을 통하여 실제로 습기가 투과하는가를 확인하기 위해서 추진제 및 라이너가 부착되지 않은 순수 복합재 연소관과 금속 연소관을 절단하여 내부에 습도를 식별할 수 있는 색상 흡습제를 투입한 후 유리판으로 양 끝단을 밀폐시켜 습도 조건에 투입하여 습기 투과 상태를 비교하였다(Fig. 2). 이때 연소관은 길이를 130mm 정도로 절단하여 사용하였고 시료 외부의 습도 조건, 즉 데시케이터 내부의 습도조건은 90% RH이다.

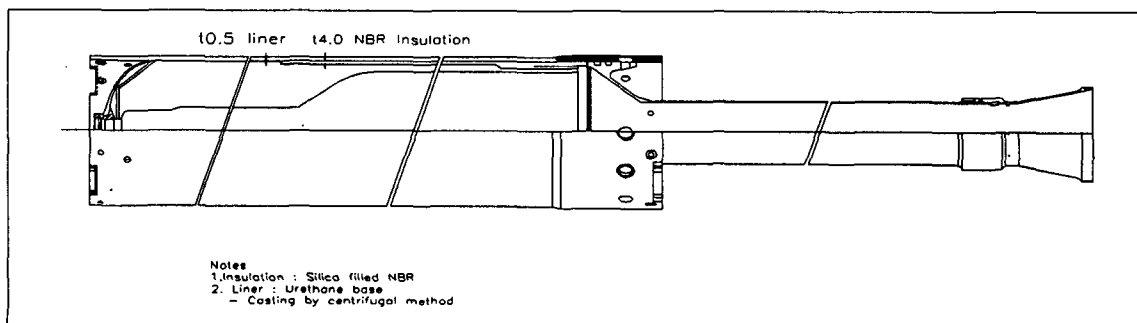


Fig. 1. Composite motor case which is used in the test of water vapor transmission

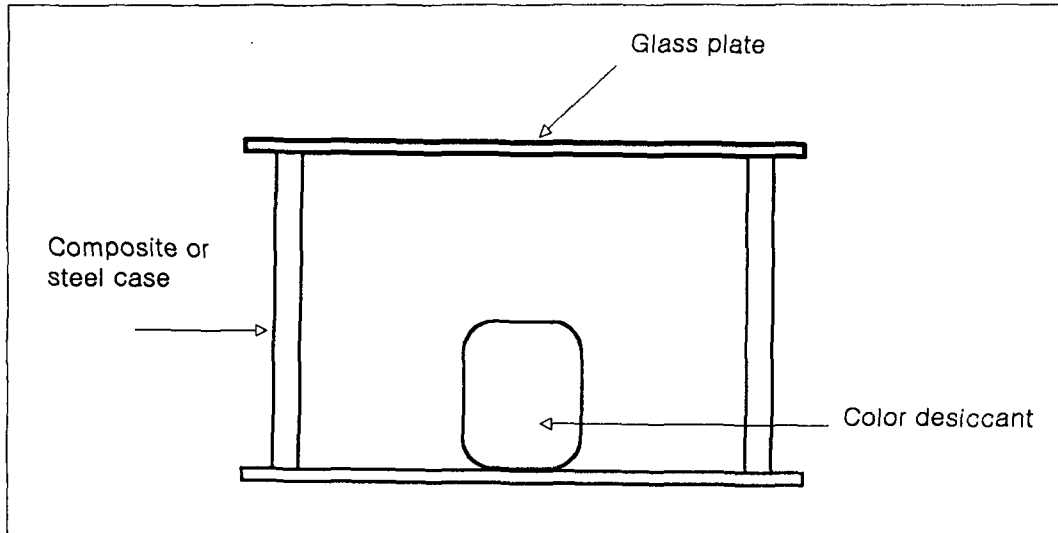


Fig. 2. Dissected sample of composite and steel motor case for confirmation of water vapor transmission.

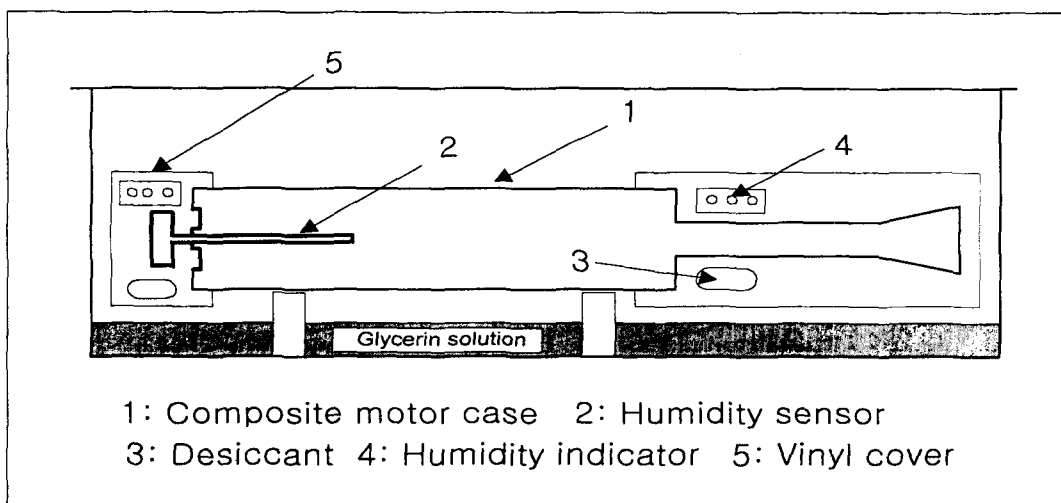


Fig. 3. Humidity controlled water bath which contains the composite motor case

3.3 실험 조건

복합재 연소관의 습기 투과 시험을 위한 연소관 외부의 환경은 대형 수조를 제작한 후 내부에 20℃, 90%RH의 일정한 습도를 조성하고 여기에 시료 연소관을 보관하였다(Fig. 3). 습도는 독일 공업 표준 DIN50 008(part1)방법에 따라 90% 상대 습도와 평형을 이루는 글리세린 용액을 제조하여 수조 내에

투입하고 선반을 만들어 이 위에 연소관을 올려 놓았다⁵⁾.

연소관 내부 습도 증가의 측정에 사용된 습도 센서는 Visala HMD-20UB/YB 모델로써 복합재 연소관 head부에 고정시킬 수 있도록 fitting을 제작하여 연소관 입구로 밀어넣고 체결 및 고정시켰다. 한편, 실험시 full scale 연소관은 체결부로 습기가 침

투하는 것을 방지하기 위하여 전방 센서 삽입부 및 후방 노즐 삽입부 틈새를 1차로 그리이스로 도포하였다. 또한 2차로 연소관 전방부 및 후방 노즐부 외부를 종이 습도계 및 건조제를 넣고 비닐로 감싸 밀폐시켜서 중간 연소관 몸체로만 수분이 투과되도록 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 수조시험 전 시료 전처리

연소관 3종류에 습도 측정장치를 부착하여 수조에 투입하기 전에 내부에 흡착된 수분이 증발되는 것을 방지하기 위해 3종류의 연소관 내부에 흡습제를 넣어 연소관 내부를 최대한 건조 시켰으며 충전체를 제외한 순수 복합재 및 라이너가 도포된 연소관은 60°C 오븐에서 약 5일간 건조 시켰다. 그러나 추진제가 충전된 추진체는 오븐에서 건조시키기에 적당하지 않으므로 흡습제로 연소관 내부를 건조시킨 후부터 습도 측정 실험을 계속 진행하였다.

4.2 오븐 건조 후/수조투입 전 연소관 2기의 습도 변화 상태

순수 복합재 연소관과 라이너가 부착된 연소관은 오븐에서의 건조 과정을 거친 후에도 정도 차이는 있으나 건조시키지 않은 경우와 마찬가지로 측정 초기에 연소관 내부의 습도가 급한 상승을 보이고 있었는데, 이는 연소관 내부 벽에 흡착된 수분의 탈착이라기 보다는 복합재 자체에 포함하고 있던 수분이 연소관 내부 공간으로 이동된 것으로 생각된다.

4.3 수조 투입 후 습도 증가 추세

연소관의 건조 후 연소관 내부 습도가 어느 정도 일정하게 된 다음 습기 투과 시험을 수행하기 위하여 연소관 3기를 20°C, 90%RH 수조에 투입하였다. 연소관을 수조에 투입한 후의 시험 과정중에 모타 전/후부의 밀폐용 비닐 봉지를 1회 개봉하여 건조제를 교체하였으며 비닐 봉지내에는 항상 10%RH 이하의 습도를 유지시켰다. 연소관의 수조 투입후의 습도 상태를 Fig. 4에 나타내었는데, 충전체(1기)와 미충전체(2기)의 시험 시작 시간이 차이가 나는 것은

충전체는 건조제로 충전체 내부를 건조시키고 습도 평형을 이룬 후 바로 습기 투과 시험이 진행되었으나 미충전체의 경우 그 후 오븐에서의 건조 과정을 더 거쳤기 때문이며, 시험 시작 기준점을 오븐에서의 건조과정을 거치지 않고 측정을 계속한 충전체의 시험 시작 시간으로 하였기 때문이다.

Fig. 4의 수조 투입 후의 연소관 실험 결과를 보면 수조 투입 전 오븐의 건조과정을 거치지 않고 흡습제로만 내부를 건조시켰던 충전체는 약 400시간 후 연소관 내부 습도가 일정 구배의 평형에 도달했으나 미충전 연소관의 경우 오븐에서의 건조에도 불구하고 수조 투입 후 약 700 시간이 지나야 어느 정도 일정 구배가 되었다. 이 결과로 볼 때 미충전 연소관의 경우 시험 초기에 복합재 자체에 포함된 수분이 확산되어 나온 것으로 판단된다. 시험 결과에서 연소관 내부의 습도 상승구배가 일정해지기 시작하는 점이 복합재 또는 충전체가 수조 내부에서 포화 함수율에 도달하는 점이다. 따라서 본 시험 결과로 볼 때 filament winding으로 제작된 T800/AD6005계 복합재의 경우, 20°C, 90%RH에서 습도 평형에 이르는 시간은 약 700시간 정도로 생각된다.

충전체는 수조에 투입하여 습도가 외견상 평형에 도달한 후 약 13개월 동안 약 4%의 연소관 내부 습도 증가를 보였는데, 미 충전체의 경우와 비교해 볼 때 충전된 추진제가 모타 내부로의 수분 확산에 저항으로 작용한 것으로 생각된다. 이 때 충전체 모타

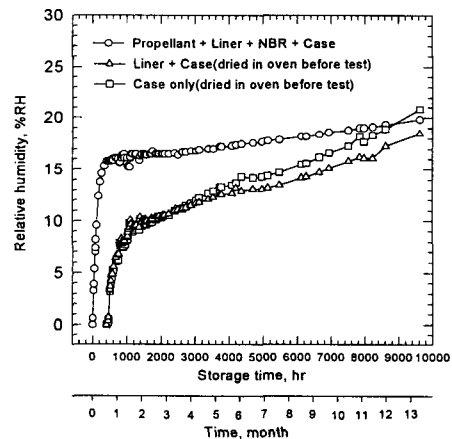


Fig. 4. Water vapor transmission of composite motor case in the water bath of 20°C, 90%RH

의 습기 투과 경향을 선형적이라 간주하더라도 90% RH에서 10년간 노출되었을 때 충전체 내부의 습도는 50%내외에서 머무를 것으로 생각된다.

반면 미충전체의 경우에는 약간 다른데, 두 경우 모두 뚜렷한 습도 투과의 경향을 나타내고 있다. 라이너가 존재하는 ACM9403 연소관의 경우 수조에서 연소관 내부 습도가 평형에 이른 후 약 12개월 동안 10%에서 19%로 약 9%, 그리고 라이너가 없는 KCMC9603M 연소관의 경우 9%에서 21%로 약 12%의 습도 증가를 보였는데, 복합재 연소관 내부에 도포된 라이너가 복합재 습기투과에 대해서도 저항으로 작용하여 라이너가 없는 경우에 비하여 습기투과 구배가 약간 작게 나타남을 알 수 있다.

4.4 복합재 습기 투과의 확인

복합재를 통하여 실제로 습기가 투과되는가를 비교 확인하는 시험에서 90%RH에 보관한 절단 금속 연소관 시료는 내부에 넣어둔 색상 흡습제의 색이 처음과 같은 푸른색으로써 10%RH 이하를 나타내고 있으나 절단 복합재 연소관 내부에서는 붉은 색으로 변색하였다. 이는 습기가 투과되어 흡습제에 많은 양의 수분이 흡습 되었음을 나타내며 색상으로 볼 때 내부 습도도 50%RH 이상임을 나타낸다. 따라서 복합재 연소관의 습기 투과를 확인할 수 있었다.

4.5 습기 투과 면적

습기 투과 면적은 수조내에서 습기에 노출된 면적으로 연소관 표면적에서 앞 뒤의 비닐로 감싼 부분을 뺀 부분이다. 수조에서 보관된 연소관의 앞 뒤 비닐 커버 부분을 뺀 길이는 1.0693m이고 연소관의 외부 지름은 0.165m이다. 따라서 습기 투과 면적은 $2\pi \times 0.165/2 \text{ m} \times 1.0693 \text{ m} = 0.5542 \text{ m}^2$ 이다. 한편 연소관의 내부 부피는 연소관 전방부가 도움 형태라서 정확히 측정할 수는 없으나 실린더 부분은 연소관 내부 지름이 0.157m이고 내부 길이가 약 1.142m이므로 $\pi \times (0.157/2)^2 \text{ m}^2 \times 1.142 \text{ m} = 0.0221 \text{ m}^3$ 로 계산되며 노출부의 부피가 약 0.0014 m^3 으로 연소관 총 내부 부피는 0.0235 m^3 (23.5l)가 된다

4.6 복합재 연소관의 확산 계수 계산

복합재의 확산 계수를 계산하기 위해서 우선 복합재가 수조에 투입된 후 내부 함수율이 충분히 평형에 도달했다고 생각되는 수조 투입 후 약 100일 (2400시간) 이후의 데이터를 취하였다. 또한 확산 계수를 구하기 위한 Fick의 법칙을 적용하기 위해 각 측정 점 사이에서의 복합재 연소관 내부 습도 상승은 계단 함수로 단순화하여 두 측정시간 습도의 평균값을 이용하였다. 각 측정점 사이에서의 연소관 외부 수조 습도 및 복합재 연소관 내부의 습도를 일정한 값으로 단순화 함으로써 연소관 내부로의 water vapor flux를 쉽게 구할 수 있고 따라서 확산 계수가 쉽게 구해진다. 각 측정점 사이에서의 water vapor flux 및 확산 계수의 계산 결과를 Table 2에 나타내었는데, 계산 과정 일부를 예로들어 보면, 측정 시간 2542.5hr 과 2685hr 사이에서의 투습 시간은 142.5hr이고 이 때의 복합재 내부습도는 12.7% RH에서 12.9%RH로 변화였으므로 이를 수분 농도로서 계산하기 위해 습도 도표로부터 외삽하여 절대 습도로 고치면, 각각 1.905×10^{-3} 및 $1.935 \times 10^{-3} \text{ g/g dry air}$ 가 된다. 이를 단위 부피당의 수분 농도로 계산하기 위해 공기 1mol 당의 수분량을 계산하고 이를 22.4로 나누면 부피 1l 당의 수분 농도를 계산할 수 있다. 이 때 두 측정점에서의 수분 농도는 2.466×10^{-3} 및 $2.505 \times 10^{-3} \text{ g/l}$ 이다. 한편 4.5절에서 나타난 복합재 연소관 습기 투과 면적 및 연소관 내부 부피를 참조하여 (9)식에 의해 water vapor flux를 구하면 $F = (3.8800 \times 10^{-5} \text{ g/l}) (23.5 \text{ l}) / (0.5542 \text{ m}^2) (142.5 \text{ hr}) = 3.21 \times 10^{-9} \text{ g/m}^2 \text{ sec}$ 이다. 한편 확산 계수는 (12)식에 복합재 내, 외 반경 a, b, 수조 습도 C_2 및 측정 시간 사이의 연소관내 평균 습도 C_1 을 적용하여 구한다.

T800/AD6005계 복합재 연소관의 수분투과 특성 값은 각 시간에 따른 측정값들의 평균값으로서 나타내었으며, water vapor flux는 $2.88 \times 10^{-9} \text{ g/m}^2 \text{ sec}$, 확산 계수는 $7.98 \times 10^{-7} \text{ mm}^2 \text{ /sec}$ 의 값을 보이고 있다. 이에 대한 측정 결과들을 Fig. 5~7에 나타내었다.

Table 2. Diffusivity of T800/AD6005 based composite motor case

Total storage time in water bath at measuring point t_n (hr)	Relative humidity at inside of composite motor case (H_n, H_{n+1})	Absolute humidity at inside of composite motor case ($A_n, A_{n+1} : \times 10^{-3}$ gH ₂ O/gdry air)	Water vapor flux from water bath to inside of composite motor case, F (g/m ² sec)	Diffusivity, D (mm ² /sec)
2542.5 →	12.7 → 12.9	1.905 → 1.935	3.210E-9	8.438E-7
2685.0 →	12.9 → 13.3	1.935 → 1.995	3.828E-9	1.079E-6
2924.0 →	13.3 → 13.5	1.995 → 2.025	1.458E-9	3.864E-7
3238.5 →	13.5 → 13.7	2.025 → 2.055	3.812E-9	1.013E-6
3358.5 →	13.7 → 14.3	2.055 → 2.145	1.791E-9	5.115E-7
4124.5 →	14.3 → 14.4	2.145 → 2.160	1.386E-9	3.720E-7
4289.5 →	14.4 → 14.7	2.160 → 2.205	2.030E-9	5.464E-7
4628.0 →	14.7 → 15.5	2.205 → 2.325	2.817E-9	7.637E-7
5278.0 →	15.5 → 15.6	2.325 → 2.340	1.642E-9	4.480E-7
5417.5 →	15.6 → 16.2	2.340 → 2.430	3.595E-9	9.857E-7
5799.5 →	16.2 → 16.6	2.430 → 2.490	3.175E-9	8.766E-7
6088.0 →	16.6 → 17.3	2.490 → 2.595	2.781E-9	7.738E-7
6664.0 →	17.3 → 18.2	2.595 → 2.730	6.142E-9	1.728E-6
7125.5 →	18.2 → 18.3	2.730 → 2.745	5.879E-10	1.666E-7
7389.5 →	18.3 → 18.9	2.745 → 2.835	3.624E-9	1.032E-6
7768.5	18.9	2.835	4.303E-9	1.248E-6
Average			2.883E-9	7.984E-7

t_n (hr) : Total time in water bath, H_n, H_{n+1} : Relative humidity, %RH, A_n, A_{n+1} : Absolute humidity, gH₂O/g dry air

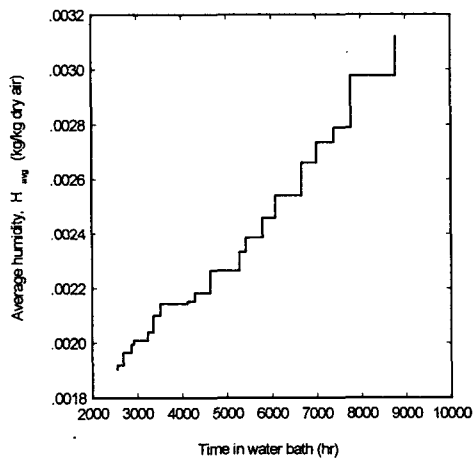


Fig. 5. Absolute humidity of the inside of composite motor case for calculation of diffusivity at each detecting time

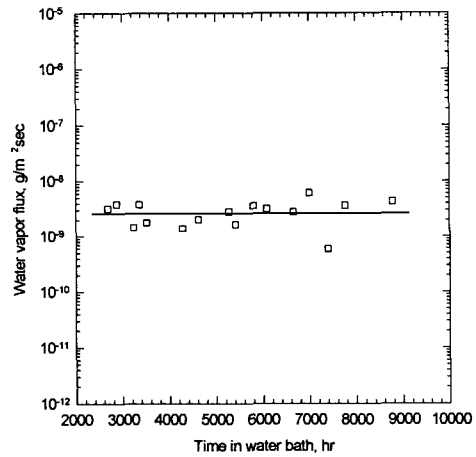


Fig. 6. Water vapor flux of T800/AD6005 based composite motor case at 20°C, 90%RH condition

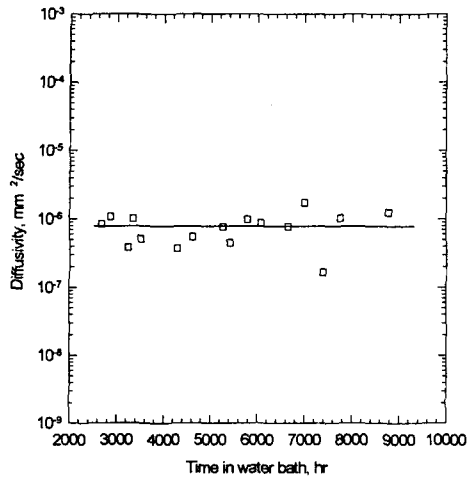


Fig. 7. Diffusivity for water vapor on T800/AD6005 based composite motor case at 20°C, 90%RH condition

5. 결 론

미 충전 연소관의 경우 2회에 걸친 연소관의 건조에도 불구하고 실험 초기에 연소관 내부의 급격한 습도 상승이 일어나는 것으로 볼 때 이 습도 상승은 복합재 자체에 포함된 수분이 내부로 확산되는 것으로 볼 수 있으며, 복합재는 자연 상태에서 상당한 수분을 포함하고 있음을 알 수 있었다. 같은 조건의 절단된 금속 및 복합재 연소관 시료를 통하여 습기 투과 상태를 비교해 볼 때 복합재 연소관을 통하여 습기가 투과됨을 확인할 수 있었고 연소관 내부에 라이너/인슐레이션이 도포되거나 추진제가 충전되었을 때에는 수분 투과가 상당히 감소되었다. 한편 수조에서의 복합재에 대한 습기 투과 경향을 단순화하여 선형적으로 볼 때 순수 복합재 연소관은 90%RH, 20°C에 노출될 경우 습도 평형에 이른 후 최초 1년 동안 약 12%, 라이너가 존재하는 연소관의 경우 약 9%, 그리고 추진제가 충전된 full scale 연소관의

경우 약 4%RH의 상대 습도 증가를 나타내었다. 복합재의 수분 투과 경향으로 볼 때 좀더 높은 수준에서 습도 평형에 이르더라도 비슷한 증가율을 나타낼 것으로 예상된다. 한편 습도 증가 결과로부터 계산된 T800/AD6005계 복합재의 water vapor flux는 20°C, 90%RH에서 $2.88 \times 10^{-9} \text{g/m}^2 \text{sec}$ 이며, 습기에 대한 확산 계수는 같은 조건에서 $D = 7.98 \times 10^{-7} \text{mm}^2/\text{sec}$ 로 나타났다. 이 값을 문헌상 유사한 재료의 평판 복합재(T300/1034, $D \approx 1.8 \times 10^{-8} \text{mm}^2/\text{sec}$ at 20°C, humid air)와 비교해 볼 때, 동일 수지 조성에서 filament winding에 의해 제조된 복합재가 적층법에 의해 제조된 평판 복합재 보다 확산 계수가 클 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. G. S. Springer, Environmental Effects on Composite Materials, Technomic Publication, pp.1~49, 1981
2. J. Crank, The Mathematics of Diffusion, Oxford University Press, Ely House, London, pp.2, 1975
3. Anon, "Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Materials", ASTM Designation E 96-92, The American Society for Testing and Materials, pp.401, 1992
4. J. Crank, The Mathematics of Diffusion, Oxford University Press, Ely House, London, pp.45, 1975
5. Anon, "Standard Atmospheres over aqueous solutions", DIN 50 008 part1, pp.3, 1981
6. G. S. Springer, Environmental Effects on Composite Materials (II), Technomic Publication, pp.15, 1984