

## 정밀질량분석기를 활용한 우레탄폼의 장기열전도도 예측을 위한 분석기법

김진석, 전종한\*, 이진복, 이효진\*\*†

한국표준과학연구원 삶의질표준본부, \*한밭대학교 응용생명공학부, \*\*한밭대학교 건축설비공학과

### Long-Term Thermal Conductivity Prediction of Polyurethane Foam Applying Precision Mass Spectrometer for Cell Gas Analysis

Jin Seok Kim, Jonghan Chun\*, Jin Bok Lee, Hyo-Jin Lee\*\*†

*Division of Quality Life, Korea Research of Standard and Science, Daejeon 305-340, Korea*

*\*Division of Applied Chemistry and Biotechnology, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea*

*\*\*Department of Buiding Service Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea*

(Received October 21, 2009; revision received August 6, 2010)

**ABSTRACT:** A proprietary device is adopted to break out the membrane of cell in the rigid polyurethane foam. As it is known, the membrane of cell is hardly tearing-off thoroughly in a mechanical way due to both its elastic characteristic and micro sized pores. In this study, a novel experimental approach is introduced to burst out all gases inside the cells of the rigid polyurethane foam by abrasively grinding micro-cells completely into fine powder. The biggest advantage of this approach is to be capable of releasing all gases out from the cell even in the micro pores. As clearly reflected from the repeatability, the accuracy of the result is highly improved and high confidence in the data sets as well. For the measurements of not only gas composition but partial pressure for each gas simultaneously as well, a precision gas mass spectrometer is used in-line directly to the abrasive grinding device. To control the starting point of the polyurethane foam, all samples were prepared on site in the laboratory. Manufactured time is one of the most critical factors in characterization of cell gas composition because it is known that one of gas composition, especially, carbon dioxide, is diffused out dramatically in a short period of time as soon as it is foamed.

**Key words:** Polyurethane foam(우레탄폼), Aging(에이징), Thermal conductivity(열전도도)

#### 기 호 설 명

$D_{eff}$  : 유효확산계수 [ $m^2/s$ ]  
 $d$  : 셀 직경 [m]

$f_s$  : 폼의 셀 스트럿 부피 분율  
 $K$  : 소멸계수  
 $L$  : 단열재 두께 [m]  
 $M$  : 분자량 [kg/kmol]  
 $n$  : 몰분율  
 $P$  : 압력 [kPa]  
 $T$  : 온도 [K]  
 $t$  : 시간 [sec]

† Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1181; fax: +82-42-821-1175

E-mail address: hyojin@hanbat.ac.kr

$V$  : 부피 [ $m^3$ ]  
 $W$  : 무게 [g]

**그리스 문자**

$\lambda$  : 열전도도 [ $w/mK$ ]  
 $\mu$  : 점성계수 [ $Pa \cdot s$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\lambda$  : 열전도도 [ $w/mK$ ]  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 상수  
 $5.67 \times 10^{-8}$  [ $w/m^2K^4$ ]  
 $\phi$  : 기공도

**상첨자**

- : 평균

**하첨자**

*cell* : 셀  
*ch* : 분쇄기 챔버  
*eff* : 유효  
*env* : 대기조건  
*g* : 가스  
*He* : 헬륨  
*i, j* : 가스성분  
*inj* : 주사기  
*oi* : 셀 내 초기압  
*powder* : 분쇄입자  
*pur* : 폴리우레탄  
*r* : 복사  
*s* : 고체  
*strut* : 셀의 기둥  
*total* : 총합계  
*wall* : 셀내 벽면

**1. 서 론**

세계적인 지구 온난화문제 해결을 위하여 이산화탄소 저감과 에너지 절약에 대한 방안이 범세계적인 차원에서 새롭게 모색되고 있다. 우리나라는 경제발전과 더불어 삶의 질이 향상되면서 에너지 소비가 지속적으로 늘어나고 있다. 최근 자료에 의하면, 1차 에너지 소비는 전체 에너지 사용량의 약 20%<sup>(1)</sup>가

가정과 상업용으로 소비되고 있다. 이는 2007년 기준 총 에너지 수입액 950억불 중<sup>(1)</sup> 190억불이 가정 및 상업용으로 소비되고 있는 것이다.

우리의 일상생활에서 에너지를 절약하기 위한 다각적인 방안이 모색되고 있으나, 현재의 소비 행태를 줄이기는 쉬운 일이 아니다. 최근 정부에서도 새로운 기술개발보다는 간접적으로는 대중적인 그린생활의 중요성을 강조하고 있다. 또한 직접적으로는 점차 대형화하고 있는 주거 환경 및 각종 열사용 기기에 대한 철저한 단열 설계로 에너지 낭비를 줄이는 것이다. 이와 관련하여 건물 및 냉난방을 필요로 하는 모든 제품에 낮은 열손실을 갖춘 시스템의 설계를 위하여 높은 열 저항을 갖는 표준화된 규격의 단열재가 필수적으로 요구 된다. 이를 위하여 우리는 시중에 판매되고 있는 단열재에 제조사에서 제시된 열 성능 값(열전도도 또는 열 저항)을 보고 단열재의 성능을 예측하여 설계하고 시공하게 된다.

현재 시판되고 있는 다양한 종류의 단열재 중에서 가장 열전도도가 낮은 제품으로는 폐기공 셀로 구성된 우레탄폼이나 압출형 스티로폼 단열재이며, 대략 0.02~0.03 W/mK의 열전도도를 나타내는 것으로 알려져 있다. 이러한 낮은 열전도도는 발포 시 발생하는 이산화탄소와 발포가스가 셀내에 존재하게 되며, 이산화탄소의 열전도도인 0.016 W/mK와 국내에서 사용되고 있는 발포재인 R-141b의 열전도도인 0.01 W/mK으로 인해 전체의 유효 열전도도가 매우 낮게 나타나게 된다. 이는 발포 후 기간이 짧으면 짧을 수록 낮은 값이 나오게 된다.<sup>(2)</sup> 그러나 발포 시 발생된 이산화탄소 가스는 수주일 내에 셀 막을 통과하여 대기로 확산되어 빠져나가게 된다. 또한 역으로 대기의 공기는( $\lambda = 0.025$  W/mK) 확산되어 셀 내부로 확산되어 들어오게 되는데, 결과적으로 단열재의 열전도도를 상승하게 되는 원인으로 작용하게 된다.

셀로 구성된 발포형 고분자 단열재는 내부의 가스 구성에 따라 열전도도가 지속적으로 변화되고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(2-5)</sup> 이러한 원인은 초기의 낮은 열전도도 값이 수 년 또는 수십 년 후에는 상당할 정도로 상승이 되었다면, 이에 상응하는 열 손실이 발생하게 될 것이다. 즉 단열재의 체계적이고 표준화된 열 성능 측정법이 조속히 수립되어, 향후 야기될 열 손실을 사전에 정확히 예측하고 최적설계를 할 수 있도록 단열성능의 변화를 정확하게 예

측할 수 있는 측정 프로그램이 무엇보다도 시급한 실정이다.

본 연구는 셀 구조를 갖고 있는 발포형 고분자 단열재의 장기 열전도도 변화를 정확히 예측하기 위하여 단열재내에 존재하는 가스 성분을 정밀 질량분석기를 이용하여 분석할 수 있는 시스템을 개발하였고, 그 결과를 이용한 우레탄 폼 단열재의 장기 열전도도를 예측하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치의 구성은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 우레탄폼 시료를 분쇄하여 가스를 포집할 수 있도록 하는 분쇄장치와 발생된 가스를 분석할 수 있는 정밀 질량분석기로 구성되어 있다. 정밀질량분석기는 Finnigan MAT271을 사용하였다, 본 기기는 가스의 종류 및 분압을 측정할 수 있도록 제작되었으며, 최소 0.2 cc의 미량의 가스만 포집하더라도 측정이 가능하며 매우 높은 분해능을 나타내기 때문에 거의 모든 종류의 가스분석이 가능한 분석 장치이다.

정밀질량분석기의 정밀도를 실험하기 위하여 표준가스를 이용한 실험을 실시하였다, 그 결과 Fig. 2에 보는바와 같이 99.7%의 몰 분율 정밀도를 나타내고 있으며, Table 1에서 보는바와 같이 모든 사용 가스의 분석 압력에 대해 평균  $\pm 0.2\%$ 의 정밀도를 나타내는 것으로 확인되었다.

Table 1 Results of accuracy measurement between MS and real gas pressure

Number of Test	Baratron gage Pressure(mTorr)	Gas/MS Analysis Result(mTorr)	Accuracy (%)
1	77.60	77.806	0.260
2	78.11	78.290	0.231
3	80.85	80.676	-0.215
4	82.16	81.991	-0.208
5	57.44	87.559	0.137
⋮	⋮	⋮	⋮
		Average	$\pm 0.2102$

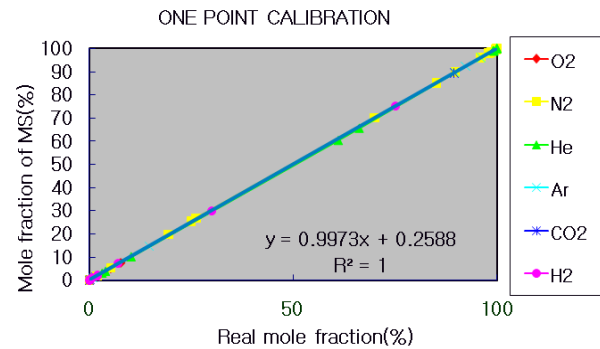


Fig. 2 Accuracy test result for the adopted Precision Mass Spectrometer.

Fig. 1의 분쇄장치는 본 연구를 위해 제작된 분쇄 장치는 외부 가스의 침입을 차단할 수 있도록 완전 기밀이 유지되도록 하였다. 이는 최초 설정된 0.1

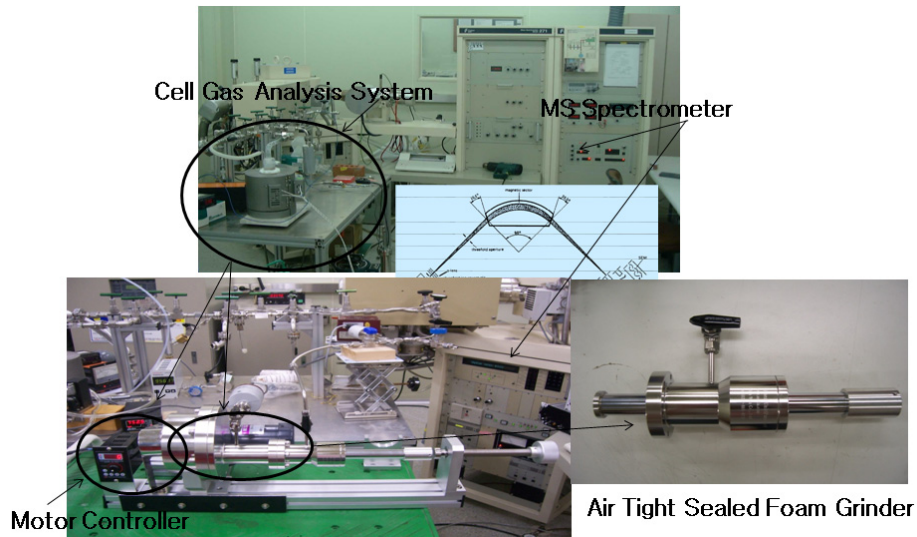


Fig. 1 Polyurethane foam grinding device and cell gas analysis system.

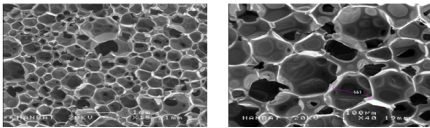
kPa의 바라트론(Baratron) 압력계의 눈금이 24시간 진공 시험 결과 최초 값을 그대로유지하고 있는 것을 확인 하였다. Fig. 3에는 각기 다른 형태의 분쇄 장치의 실험 후 얻은 셀 입자를 SEM으로 확대하여 미 분쇄된 잔여 셀 여부를 분석하였다. 특히 유럽의 칼날을 이용한 분쇄방법<sup>(2)</sup>이나 비틀어 짜는 기계적 힘을 이용한 분쇄법<sup>(3)</sup>과는 달리 본 연구에서는 우레탄폼을 마찰을 이용하여 완전히 갈아서 분쇄하는 방법을 취하여 셀 내의 가스가 완전히 포집할 수 있도록 하였다. 특히 이 방법은 정밀 질량분석법의 특징인 각 가스의 분압을 정확히 측정할 수 있도록 셀의 막을 완전 분쇄하여 셀의 전체 가스압력을 측정하였으며, 이러한 분쇄법에 의해 셀 내의 가스 분압에 대한 오차를 제거하였다.

## 2.2 실험절차 및 방법

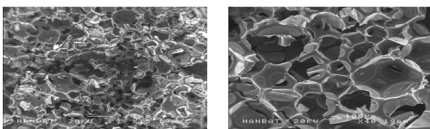
우레탄 시료는 크기가  $0.3 \times 0.3 \times 0.08 \text{ m}^3$ 의 사각크기의 우레탄폼을 R-141b 발포제와 각 혼합액을 정량으로 계량하여 제조 시 시료의 균일화를 추구하였으며, 현장에서 직접 발포 제작하여 필요한 시간대별 실험을 할 수 있도록 제작 하였다.

이렇게 준비된 시료는 분쇄장치에 맞도록 직경이 0.033 m이고 높이가 0.08 m인 원통형으로 절단하여 분쇄장치에 장착하여 분쇄하였다. 분쇄 장치는 감속기가 달린 모터를 이용하여 50~70 rpm의 속도로 회전하면서 시편을 분쇄하도록 하였다.

### • Comparison of Different Crushing Methods - Before Crushing (by SEM)



### - After Chopping by the way of Knife



### - After Grinding in this experiment

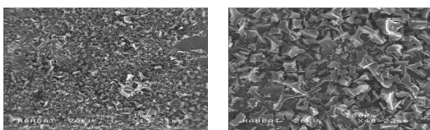


Fig. 3 Comparison of photographs for different grinding method between chopped and abrasively grinded foams.

시편이 장치 내에 설치되기 전에 분석장치내의 잔류 가스를 제거하기 위하여 전체 시스템에 대한 플러싱(Flushing)을 실시하였다. 플러싱을 위해 사용한 가스로 헬륨을 사용하였으며, 이후시스템 내의 가스를 분석하여 헬륨이외의 다른 가스가 존재하지 않음을 확인 하였다.

실험은 시료를 장착하기 전 장치 내 총 부피  $V_{ch}$ 와 샘플을 장착한 후 헬륨으로 채워진 공간의부피  $V_{He}$ 을 다음 식(1)에 의하여 구하였다. 이를 위하여 주사기에  $P_{inj}$ 인 대기압상태에서 일정량의 헬륨가스  $V_{inj}$ 를 장치 내 주입한 후 장치의 압력변화  $P_{ch}$ 나  $P_{He}$ 를 바라트론 압력게이지에 의하여 읽어 각 각의 부피  $V_{ch}$ 와  $V_{He}$ 를 측정한다. 즉,

$$P_{inj} V_{inj} = P_{ch} V_{ch} \text{ or } P_{He} V_{He} \quad (1)$$

그 다음 장착된 시료를 분쇄하면 장치에 부착된 바라트론 압력게이지의 값이 상승하게 되는데 이때 총 압력  $P_{total}$ 은 아래 식(2)값을 의미하며, 질량분석기를 통하여 구한 각 가스의 분압을 합한 총 압력은 실제 실험 장치에서 나타난 값과 0.1~0.3%의 오차를 보일 정도로 일치하는 값을 나타냄을 확인하였다.

$$P_{total} = P_{He} + P_{CO_2} + P_{141b} + P_{N_2} + P_{O_2} \quad (2)$$

상기과정에서 얻은 장치내의 각 가스의 분압을 이용하여 실제 우레탄 폼의 셀 내의 분압으로 환산하기 위하여 다음 식(3)과 같이 계산하였다.

$$P_{ch-i} \times (V_{ch} - V_{solid}) = V_{cell} \times P_{cell-i} \quad (3)$$

식(3)에서  $V_{solid} = \frac{W_{powder}}{\rho_{solid}}$  와  $(V_{ch} - V_{solid})$ 을 구한다. 여기서 우레탄 소재의 밀도인  $\rho_{solid} = 1200 \text{ kg/m}^3$ <sup>(2-3)</sup>을 적용하였다. 또한  $V_{cell} = V_{sample} - V_{cell}$ 이므로 식(3)으로부터 각 가스의 셀 내부의 분압인  $P_{cell-i}$ 를 구할 수 있다.

## 2.3 셀 가스 분석

일반적으로 폴리우레탄의 경우 기공도(Porosity)가 약 94~98%에 달하며, 이는 밀도에 따라 달라질 수 있다.

기공도는 식(4)에 의하여 계산된다.

$$\phi = 1 - \frac{\rho_{foam}}{\rho_s} \quad (4)$$

일반적으로 고체 형태의 등방성 물질(Isotropic)에 대한 열전달은 Fourier's Law에 의하여 표현된다.

$$q = -\lambda_{eff} \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

경질의 폐기공을 갖는 우레탄폼에서의 열전도도는 고체의 고분자물질을 통한 열전도 및 복사와 폐기공 내의 기체를 통한 열전도의 형태로 전달된다. 대부분의 셀의 크기가 대략 500 μm이하로 Rayleigh수가 약 10<sup>-2</sup>정도로 대류가 일어날 수 있는 10<sup>3</sup>보다 월등히 작기 때문에 대류현상은 열전도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.<sup>(3-5)</sup>

결론적으로 셀을 구성하고 있는 단열 폼 구조의 열전달은 셀의 구성물질인 우레탄의 고체물질과 셀 내부의 가스에 의한 전도 및 복사에 의하여 지배적인 영향을 받게 된다. 한편 가스를 통한 열전도는 셀 내의 가스 종류 및 농도가 확산현상에 의하여 지속적으로 변화를 하게 되므로 이에 대한 유효 열전도도는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\lambda_{eff}(t) = \lambda_r + \lambda_s + \lambda_g(t) \quad (6)$$

식(6)에서 셀 내에서 복사에 의한 열전도도는 Rosseland 식에 의하면 다음과 같다.

$$\lambda_r = \frac{16\sigma T^3}{3K} \quad (7)$$

여기서 소멸계수(Extinction Coefficient)  $K$ 는 식(8)에 의하여 주어진다.<sup>(6)</sup>

$$K = 4.1 \cdot \frac{\sqrt{\frac{f_s \cdot \rho_f}{\rho_s}}}{d} + \left[ \frac{(1-f_s) \cdot \rho_f}{\rho_s} \right] \cdot K_w \quad (8)$$

식(8)에서  $K_w = 60000 \text{ m}^{-1}$ 이다.<sup>(7)</sup>

$f_s$ 는 셀의 스트럿(Struts)의 부피에 대한 분율로 식(9)과 같이 정의되며 대략 0.8정도이다.

$$f_s = \frac{V_{struts}}{V_{struts} + V_{wall}} \quad (9)$$

식(6)에서 우레탄 폴리머를 통한 열전도도인  $\lambda_s$ 는 다음 식(10)와 같이 정의된다.<sup>(7)</sup>

$$\lambda_s = \left( \frac{2}{3} - \frac{f_s}{3} \right) \cdot (1 - \phi) \cdot \lambda_{pur} \quad (10)$$

식(10)에서  $\lambda_{pur}$ 은 0.13~0.7 W/mK<sup>(8)</sup>이며, 유럽 기준<sup>(9)</sup>에 따르면 0.25 W/mK로 본 연구에 적용하였다.

셀 내의 혼합가스의 열전도도  $\lambda_g$ 는 각 가스의 분율(Fraction)과 열전도도에 영향을 받는다. 즉 셀 내의 가스 분율에 따른 Wassiljewa를 수정한 식(11)~식(13)<sup>(10)</sup>에 의하여 계산되었다.

식(11)에서  $n_i$ 는 가스  $i$ 의 몰분율을 나타내며,  $\lambda_i$ 는 가스  $i$ 의 열전도도이다. 또한  $A_{ij}$ 는 식(12)과 같이 정의 된다.

$$\lambda_g = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^n n_j A_{ij}} \quad (11)$$

$$A_{ij} = \frac{[1 + \alpha_{ij}^{0.5} (M_i/M_j)^{0.25}]^2}{[8 \cdot (1 + M_i/M_j)]^{0.5}} \quad (12)$$

여기서  $M_i$ (kg/kmol)은 가스  $i$ 의 몰 분자량이다. 또한 식(12)에서  $\alpha_{ij}$ 는 다음 식(13)와 같이 정의 된다.

$$\alpha_{ij} = \frac{\mu_i M_j}{\mu_j M_i} \quad (13)$$

상기 식(13)에서  $\mu_i$  (Pa · s)는 가스성분  $i$ 의 점성 계수를 나타낸다.

## 2.4 확산계수

본 연구에 적용되는 확산모델은 우레탄폼이 단일 물질로 이루어져 있으며 전체적으로 일정한 유효확산계수를 갖고 있다고 가정하여 유도되었다.<sup>(11)</sup> 유효 확산계수는 시간 및 농도에 독립된 값을 갖으며, 셀 내의 가스 간에 상호작용이 없다는 가정 하에 다음의 Fick's 법칙을 이용하여 풀 수 있다.

$$\frac{dp_i}{dt} = D_{eff} \frac{d^2 p_i}{dx^2} \quad (14)$$

식(14)에서 초기 값  $t = p_{oi}$ , 경계조건으로  $x = 0$ 과  $L$ 에서  $p = p_{env}$ 을 풀면 다음과 같다.

$$\frac{p_i - p_{env}}{p_{oi} - p_{env}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(2n-1)\pi} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{L} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{L^2}} \quad (15)$$

식(15)에서 확산계수를 계산하면 다음과 같다.

$$D_{eff} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{L^2}{(2n-1)^2 \pi} \frac{d \ln(\bar{p}_i)}{dt} \quad (16)$$

## 2.5 실험적 불확실성 분석

본 연구에서 발생할 수 있는 실험결과에 대한 오차를 줄이기 위한 방안으로 일정한 형상의 구조를 갖는 폼을 제작위해 발포용 시료의 정량 계량을 통한 제조를 실시하였다. 그러나 자연 발포를 인위적으로 조절하기란 불가능하기 때문에 제조시 정량 시료에 따른 일정한 밀도를 유지할 수 있는지 측정하였다. 시편을 제조할 때마다  $0.3 \times 0.3 \times 0.08 \text{ m}^3$  크기의 시편을 절단하여 밀도를 측정하여 비교하였다. 그 결과 평균 밀도는  $44.35 \text{ kg/m}^3$ 으로 각 시편의 편차는  $-0.11 \sim +0.34\%$ 의 오차가 나타났다.

또한 제조에서 시편의 일정한 구조 및 성분의 변화 여부를 판명하기 위하여 발포 초기 셀 내부의 핵심 가스인 이산화탄소 가스의 압력 변화를 비교하였다. 이는 실험에 사용되는 시편은 한 개의 시료에서 직경이  $0.033 \text{ m}$ 이고 높이가  $0.08 \text{ m}$ 인 한 개의 샘플만을 채취하기 때문에 상호 값에 대한 일관성 여부를 판명하는데 기준으로 삼을 수 있을 것으로 여겨진다.

매 실험 마다 3개의 시편을 제조하였고, 각 시편마다 한 개의 시료를 채취하여 분석하여 보았다. 발포 후 하루 경과된 시료의 경우 이산화탄소 가스의 Fig. 4에 나타난 바와 같이 평균  $53.37 \text{ kPa}$ 을 나타내었고,  $-2.5\% \sim +1.25\%$ 의 편차를 보였다. 이를 경과된 시편의 경우  $\pm 1.5\%$ 의 압력편차를 보였다. 그 이후의 값에 대한 변화는 폴리머의 물리적, 화학적 특성에 따른 확산에 크게 영향을 받기 때문에 분석결과를 비교하는 것에는 무리가 있을 것으로 여겨져 상

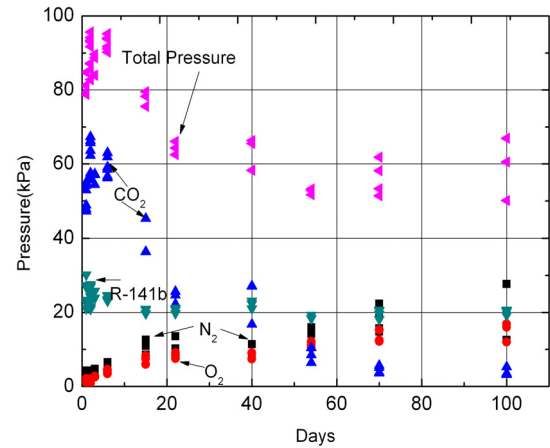


Fig. 4 Cell gas analyzed results for 100 days aging of polyurethane foam.

기 두 개의 값을 언급하고자 한다.

가스 분석과정에서 발생할 수 있는 측정오차는 정밀 질량분석기의 측정 분해능에 관한 값으로 Table 1에 나타난 결과와 같이  $\pm 0.2102\%$ 의 정밀도를 보였으며, 이러한 정밀도는 일반적으로 가스 분석기법에 활용되고 가스 크로마토그래피(Gas Chromatograph, G/C)보다 우수한 성능을 입증하고 있다.

또한 셀의 미 분쇄된 정도에 따라 바르타론 압력계의 값에 영향을 미칠 수 있으나, 본 실험 결과 SEM에 의한 측정된 표본과 측정하여 분석한 각 가스의 분압을 이용한 총 압력의 비교가 일치하고 있음을 볼 때 미 분쇄에 의한 오차는 전혀 발생하기 않은 것으로 확인 되었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

우레탄폼의 셀 가스 분석결과를 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 초기에는 1, 2, 3, 6, 15일 경과된 짧은 시간적 간격을 두고 실험을 수행하였다. 이후 약 30~40일간의 간격을 두고 셀 내의 가스 변화량을 측정하였다. 결과에서 나타난 바와 같이 초기에는 발포가스인 R-141b와 우레탄폼의 팽창을 담당한  $\text{CO}_2$ 만이 존재함을 알 수 있다. 이후  $\text{CO}_2$ 양이 급속히 줄어드는 것을 알 수 있는데 이는 우레탄폼에서 대기 중으로 확산해 나갔기 때문이며, 반면에 R-141b는 매우 느린 속도로 감소하고 있다. 반면에 초기에 존재하지 않았던  $\text{N}_2$ 와  $\text{O}_2$ 가스가 셀 내부로 서서히 확산되어 들어오고 있음을 확인 하였다. 이는 대기 중의 공기가 셀 내부로 확산되어 들어오고 있기 때문이다. Fig. 5는 상기 Fig. 4의 총 100일간

의 분압변화를 이용한 곡선맞춤(Curve Fitting)을 수행한 후 4년 간의 분압변화를 예측하였다. 초기 상태에서 CO<sub>2</sub>가 확산하여 외기로 빠져나가는 속도에 비하여 대기에서 셀 내부로 확산해 들어오는 공기의 속도가 느리기 때문에 얼마동안은 진공상태를 유지하다가 약 1.5년이 지난 후에는 대기압 이상으로 상승하는 것으로 나타났다.

Table 2는 식(16)을 이용하여 구한 각 가스의 확산 계수이다. 확산계수는 실제로 시간에 따라 변화하고 있는 것으로 확인 되었으며, 이는 내부의 가스 압이 지속적으로 변화를 하고 있기 때문이다.

Fig. 6은 Fig. 5의 장기 분압변화를 이용하여 식(6)에 대입하여 얻어진 결과이다. 총 4년 간의 열전도도 변화가 초기 얻어진 값에 비하여 50% 가까이 상승하고 있으며, 이러한 변화를 설정된 기간 이후에도 지속적으로 상승하고 있음을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에 의하여 얻어진 결과를 요약하면 다음

Table 2 Diffusion coefficient of each gas from polyurethane foam

Gas	Deff(m <sup>2</sup> /sec)
CO <sub>2</sub>	2.6654E-10
N <sub>2</sub>	1.74714E-10
O <sub>2</sub>	2.04602E-10
R-141b	4.35971E-11

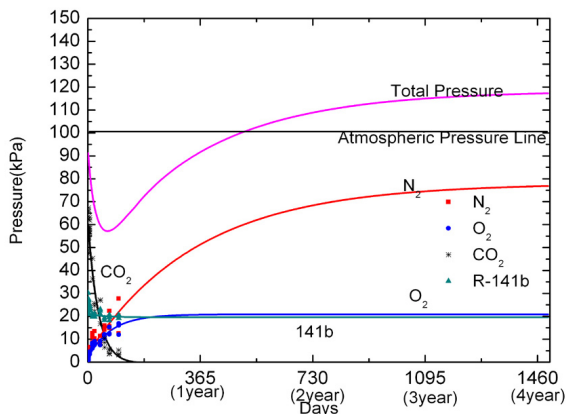


Fig. 5 Results of Curve Fitting with the experimental data for the changes of each gas in the polyurethane foam for long term partial pressure prediction.

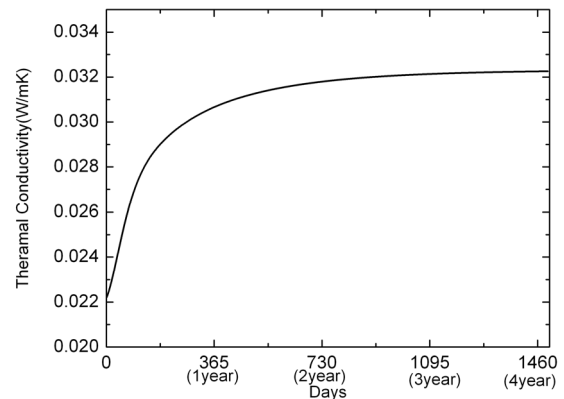


Fig. 6 Long-term Prediction of Thermal Conductivity of Polyurethane Foam.

과 같다.

(1) 개발된 마찰형 우레탄폼 분쇄장치를 이용하여 단열재내의 셀을 완전 분쇄하는 것으로 확인 되었다.

(2) 정밀 가스 질량분석기를 이용한 각 기체의 분압형태로 셀 내부의 가스분석의 정밀도를 상승시켰다.

(3) 데이터의 정밀도 향상을 위하여 현장에서 직접 우레탄 폼을 제작하였다.

(4) 폼 제작 후 초기 약 한 달간 CO<sub>2</sub>는 급속히 확산되어 대기로 빠져나가고, 공기는 지속적으로 셀 내부로 확산되어 들어와 우레탄 폼의 열전도도를 상승시키는 주요인으로 작용하고 있는 것으로 확인 되었다.

#### 참고문헌

1. KEMCO, 2009, 2009 Energy Saving Statistic Handbook.
2. Jarfelt, U. and Ramnäs, O., 2006, Thermal Conductivity of Polyurethane Foam-Best Performance, 10th International Symposium on District Heating and Cooling.
3. Modesti, M., Lorenzetti, A. and Dall'Acqua, C., 2005, Long-term performance of environmentally-friendly blown polyurethane foams, Polymer Engineering and Science, pp. 260-269.
4. Holman, J. P., 1981, Heat Transfer, McGraw-Hill, New York.
5. Alvarez-Lainez, M., Rodriguez-Perez, M. A.,

- and DE Saja, J. A., 2008, Thermal Conductivity of Open-Cell Polyolefin Foams, *J. of Polymer Science : Part B : Polymer Physics*, Vol. 46, pp. 212-221.
6. Mozgowiec, M. D., 1990, The use of small cells to reduce radiation heat transfer in foam Insulation, M. S. Thesis, MIT.
  7. Moreno, J. D., 1991, Radiative transfer and thermal performance levels in foam insulation board stocks, M. S. Thesis, MIT.
  8. Boetes, R., 1986, Heat transfer reduction in closed cell polyurethane foams, Ph.D. Thesis, Technical University of Delft, Netherlands.
  9. European Standard EN 12524, 1997, Building materials and products-Energy related properties-tabulated design values.
  10. Mason, E. A. and Saxena, S. C., 1958, An approximate formula for the thermal conductivity of multicomponent gas Mixtures. *Phys. of Fluids*, Vol. 1, No. 5, pp. 361-369.