

# 동적 단열재를 적용한 건물에서의 에너지소비량 비교 분석

강 은 철, 박 용 대\*, 이 의 준†, 윤 태 권\*\*

한국에너지기술연구원, \*충남대학교 건축공학과, \*\*(주)도원엔지니어링건축사사무소

## Heating Power Consumption Comparison Study Between Static Insulation and Dynamic Insulation at KIER Twin Test Cell

Eun-Chul Kang, Yong-Dai Park\*, Euy-Joon Lee†, Tae-Kwon Yun\*\*

Department of Renewable Energy, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 305-343, Korea

\*Department of Architecture, Chungnam National University, Daejeon, Korea

\*\*Dowon Engineering & Architects Co., Ltd. Daejeon, Korea

**ABSTRACT:** Power consumption in the building thermal load could be the sum of the building fabric conduction load, building ventilation convection load and other such as radiation loss load. Dynamic Breathing Building (DBB) is the state-of-the-art to improve the wall insulation and indoor air quality(IAQ) performance as making air flow through the wall. This heat recovery type DBB contributes the power consumption saving due to the improved dynamic U-value. KIER twin test cell with static insulation(SI) and dynamic insulation(DI) at KIER was developed to test building power consumption at the real outside conditions. Then, the actual results were compared with the theory to predict the power consumption at the KIER twin test cell and introduced the building new radiation loss factor *a* to explain the difference between the both the theory and the actual case. As the results, the power consumption at the breathing DI wall building could saved 10.8% at the 2ACH(Air change per hour) compared with conventional insulation. The building radiation loss factor *a* for this test condition to calibrate the actual test was 0.55 in the test condition.

**Key words:** Dynamic breathing building (숨쉬는 건물), Reference building (일반 건물), Static insulation (정적단열재), Dynamic insulation (동적단열재), U-value(열관류율), Building radiation loss factor (건물복사열손실계수)

### 기 호 설 명

- $c_a$  : 공기의 정압비열 [KJ/kg.K]
- $l$  : 두께 [m]
- $R$  : 열저항 [ $m^2 \cdot K/W$ ]

- $U_d$  : 동적 열관류율 [ $W/m^2.K$ ]
- $U_s$  : 정적 열관류율 [ $W/m^2.K$ ]
- $v_a$  : 공기유속 [m/s]

### 그 리 스 문 자

- $\alpha_i$  : 벽체 내부 표면 열전달율 [ $kcal/m^2.h.^{\circ}C$ ]
- $\alpha_o$  : 벽체 외부 표면 열전달율 [ $kcal/m^2.h.^{\circ}C$ ]

† Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3514; fax: +82-42-860-3739

E-mail address: ejlee@kier.re.kr

- $\gamma_a$  : 벽체 공간에 있는 공기층의 전열저항  
[m<sup>2</sup>.h.°C/kcal]
- $\lambda$  : 열전도율 [m<sup>2</sup>.K/W]
- $\rho_a$  : 공기밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

### 하첨자

- $i$  : Infiltration
- $v$  : Ventilation

## 1. 서론

2006년부터 “다중이용시설 실내공기질 관리법”의 시행으로 공공건물 및 공동주택에서도 일정수준의 신선공기 유지에 대한 규제가 마련되었으며, 이를 충족시키기 위해서는 차세대형 환기시스템의 개발이 적극적으로 요구되고 있는 실정이다. 현재의 건물내 실내공기질 개선을 위한 방안으로는 개구부 개방에 의한 자연환기나 기계적 설비에 의한 강제환기를 이용할 수 있으나, 이 두 가지 방법 모두 실내공기의 질적 측면에서는 유리할 수 있으나 건물에너지 측면에서는 에너지 소비 증가 요인으로 작용될 수밖에 없다. 따라서 기존의 에너지 다소비형 설비시스템을 과학적 원리를 이용한 자연형 실내 환경 개선 시스템으로의 개발이 절실히 요구되고 있으며, 이에 숨쉬는 벽체 기술은 건물 일부인 벽체나 천장 면에 적용함으로써 건물 냉난방에너지를 효과적으로 절감시키면서 공기정화 및 항균 기능을 포함하는 차세대 실내환경 개선 시스템이라 할 수 있다.

본 고에서는 숨쉬는 벽체 기술의 일환으로 동적단열재인 Energyflow cell<sup>(1)</sup>을 한국에너지기술연구원내 실험용 건물인 Twin test cell에 적용한 후 외기상태에서 일반 단열재 대비 동적단열재를 적용할 경우에 기대될 수 있는 건물에너지 소비량 절감효과를 정량적으로 분석하여 봄으로써 차세대 실내환경 개선용 숨쉬는 벽체 기술에 대한 적용 가능성을 평가해보고자 한다.

## 2. 숨쉬는 벽체 기술

숨쉬는 벽체 기술<sup>(2)</sup>이란 건물에 적용되는 벽체에 공기흐름이 발생할 수 있도록 미세기공을 형성시켜줌으로써 단열성과 통기성, 항진성의 기능

이 기대되는 기술을 말한다. 일반 벽체와는 달리 숨쉬는 벽체에서의 열손실은 감소하게 되는데, 이는 벽체 내부에서 공기의 흐름이 발생하여 벽체에서의 열전달율을 낮춰주기 때문이며, 이러한 기능은 건물에서의 냉난방에너지 소비량을 상대적으로 줄여주게 된다.

Figure 1은 숨쉬는 벽체 내부에 쓰이는 동적단열재인 Energyflo cell에서의 공기 유입속도에 따른 열관류율을 나타낸 그림이다<sup>(3)</sup>. 그림에서 보면 셀의 두께가 두꺼울수록, 유입속도가 빠를수록 열관류율이 감소함을 알 수 있으며, 95 mm cell의 경우 유입속도가 0 일 때 0.36 W/m<sup>2</sup>.K의 열관류율을 보이고 있으며, 유입속도가 0.003 m/s 일 때 열관류율이 0에 근접함을 알 수 있다.

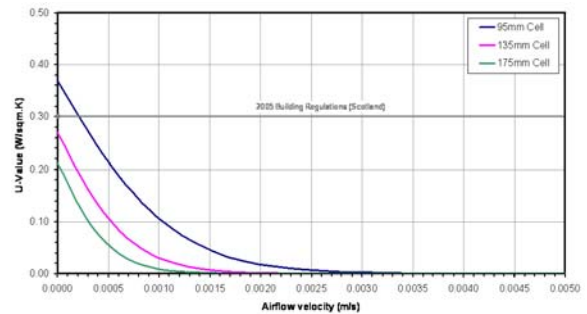


Figure 1. Energyflo cell's dynamic U-value.

## 3. 실험장치 구성 및 방법

### 3.1 KIER twin test cell

숨쉬는 벽체의 대한 연구를 수행하기 위하여 한국에너지기술연구원내 Figure 2와 같이 동일한 형태의 Twin test cell을 제작하였고, 외기조건하에서 일반 벽체 대비 숨쉬는 벽체에 특징을 평가할 수 있는 실험 장치를 구현하였다.



Figure 2. KIER twin test cell.

Twin test cell 내부에는 모니터링 공간을 중심으로 좌우에는 2.0×3.8×2.4 m<sup>3</sup>의 동일한 크기와 형태의 실내공간이 있으며 Table 1에서 나타낸 바와 같이 건물의 남쪽벽을 제외한 나머지 벽체들은 동일한 특성을 갖는 재질로 구성되었다. 그리고 동쪽 실내공간의 남쪽벽에는 동적 단열재인 Energyflo cell을 이용하여 습취는 벽체를 제작하였고, 서쪽 실내공간의 남쪽벽에는 일반 단열재인 Styrofoam을 이용하여 벽체를 구성하였다.

### 3.2 실험 장치 구성

Figure 3은 일반 단열재를 적용한 건물(위)과 동적 단열재를 적용한 습취는 건물(아래)에서의 에너지소비량을 분석하기 위한 실험 구성도를 보여주고 있다. 실험장치에는 실내온도와 실험용 벽체 전·후단, 그리고 외기온도 측정을 위한 센서를 설치하였다. 또한 실내로 유입되는 공기유량을 측정하기 위하여 실험용 벽체에 지름 100mm의 통풍구를 형성하였고, 이 통풍구를 통하여 들어오는 공기유량 측정을 위하여 통풍구 중앙에 풍량계를 설치하였다. 아울러 실내에서 외부로 빠져나가는 환기량을 측정하기 위하여 실내 환풍구에 지름 100mm, 길이 1m의 덕트를 설치하였고, 덕트 안에 풍량계를 달아 외부로 배출되는 환기량을 측정하고자 하였다.

실험장치내의 실내 적정 온도를 유지시키기 위하여 실내에 각각 동일한 사양의 히터를 설치하였으며, 히터에서 소비되는 전력량을 측정하기 위한 전력량계를 설치하였다. 온도 및 습도, 유량, 전력량은 Agilent 34970A 데이터로거에 의해 모니터링 컴퓨터에 1분 간격으로 자동 저장된다.

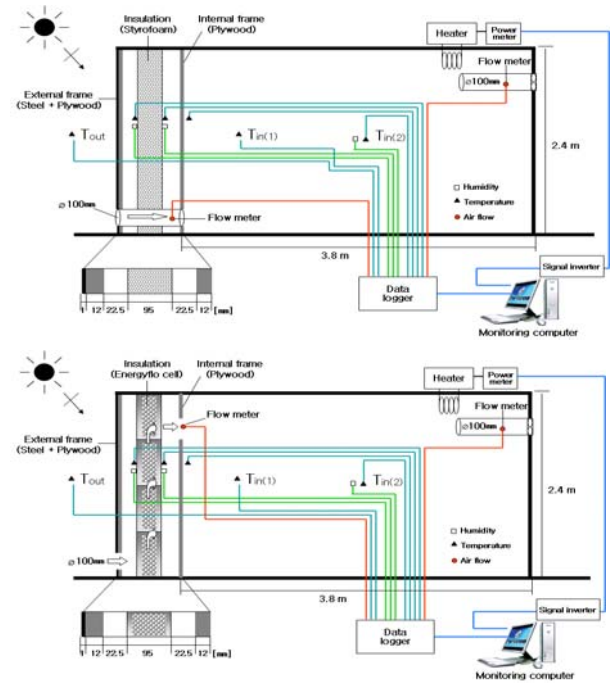


Figure 3. Design of RW(above) and BW(below) building at twin test cell.

Table 1 KIER twin test cell specification

Type	Area (m <sup>2</sup> )	Material	Conductivity (W/m.K)	Thickness (m)	U-value (W/m <sup>2</sup> .°C)
Wall (East, West)	9.12	Steel panel	194.000	0.001	0.29
		Urethane foam	0.023	0.075	
Wall (North)	4.80	Steel panel	194.000	0.001	0.29
		Urethane foam	0.023	0.075	
Wall (South)	4.80	Air	0.170	0.045	0.27
		Plywood	0.140	0.024	
		Insulation (Styrofoam)	0.032	0.100	
	4.80	Steel panel	194.000	0.001	0.30 (zero flow)
		Air	0.170	0.045	
		Insulation (Energyflo cell)	0.035	0.095	
Floor	7.60	Steel panel	194.000	0.001	0.29
		Urethane foam	0.023	0.075	
Roof	7.60	Urethane foam	0.023	0.100	0.20
		Gypsum board	0.180	0.045	
		Air	0.170	0.040	
		Steel panel	194.000	0.001	

### 3.3 실험 방법

실험에 앞서 Twin test cell의 초기 조건을 확인하기 위하여 사전 실험을 수행하였다. 실험 결과 주간에는 태양에 의한 영향으로 실내온도의 변화가 발생함을 알 수 있었으며, 이는 건물에너지 소비량에 직접적인 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 실험은 태양에너지의 영향을 전혀 받지 않는 야간에 수행하며, 실내환기 횟수에 따른 건물에너지 소비 저감량을 평가하기로 하였다. 실험은 겨울철 난방에너지 소비량을 기준으로 실내온도는 22℃로 설정하고, 최초 실내환기량 0ACH에서부터 7ACH 일 때까지의 각각의 실내에서 소비되는 에너지량을 분석한다.

## 4. 이론적 분석

### 4.1 동적 열관류율 측정

일반적으로 건물 벽체에서의 단열효과는 벽체의 열관류율( $U_s$ )을 측정함으로써 구할 수 있다. 열관류율은 표면적 1m<sup>2</sup>인 구조체를 사이에 두고 온도차가 1℃일 때 구조체를 통해 전달되는 열량을 표시한 값으로 이 값이 작을수록 구조체 단열성은 좋아지며 그 값은 식(1)로 구할 수 있다.

$$U_s = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \sum_{i=1}^n \frac{l}{\lambda} + \gamma_a + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (1)$$

숨쉬는 벽체의 열관류율( $U_d$ )은 벽체를 통과하는 공기량에 따라 그 값이 달라지기 때문에 식(1)과 같은 방법으로는 열관류율을 측정할 수 없으며, 숨쉬는 벽체의 열관류율( $U_d$ )은 식(2)와 같은 방식에 근거하여 계산할 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$U_d = \frac{v_a \rho_a c_a}{\exp(v_a \rho_a c_a R) - 1} \quad (2)$$

이와 같이 숨쉬는 벽체에서의 공기유속 변화  $v_a$ 에 따른 동적인 열관류율( $U_d$ )를 측정함으로써 숨쉬는 벽체의 단열효과를 분석할 수 있다.

### 4.2 건물에너지 소비량 분석 방법

건물에너지 소비량은 외기온도와 실내온도 차로 인하여 벽체에서 발생하는 단열부하와 외부에서 실내로 공기 유동에 의해 발생하는 환기부하의 합으로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

여기서,  $U_T A_T \Delta T$ 는 건물 벽체를 통해 손실되는 부하량을 나타내며,  $M_T C_P \Delta T$ 는 외부에서 실내로 유입되는 공기에 의한 부하량을 의미한다.

$$POWER = U_T A_T \Delta T + M_T C_P \Delta T \quad (3)$$

여기서  $U_T$ 는 건물 전체의 열관류율을 말하며,  $A_T$ 는 벽체 면적을 모두 합한 값을 말한다.

건물에너지 소비량에서 공기에 의한 부하량은 세부적으로 환기에 의한 부하량과 침기에 의한 부하량으로 나타낼 수 있으며, 환기부하는 자연 환기나 기계식환기에 의해 외기를 실내로 직접 유입시킬 때 발생되고, 침기부하는 환기에 의한 부하량을 제외한 모든 공기흐름에 의해 발생하는 부하를 말한다. 따라서 실내에서 배출되는 공기에 의한 부하량은 외부에서 실내로 유입될 때 발생하는 환기부하와 침기부하의 합과 같으며, 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(M_T C_P \Delta T)_{out} = (m_v C_{Pv} \Delta T_v + m_i C_{Pi} \Delta T_i)_{in} \quad (6)$$

여기서  $(M_T C_P \Delta T)_{out}$ 는 실내에서 외부로 빠져나가는 환기부하량을 나타내고 있다. 그리고  $m_v C_{Pv} \Delta T_v$ 는 외부에서 실내로 유입되는 환기에 의한 부하량을 나타내고 있고,  $m_i C_{Pi} \Delta T_i$ 는 외부에서 실내로 유입되는 침기의 의한 부하량을 나타내고 있다.  $C_P$ 는 공기의 정압비열로 1.0kJ/kg·℃의 값을 나타낸다.

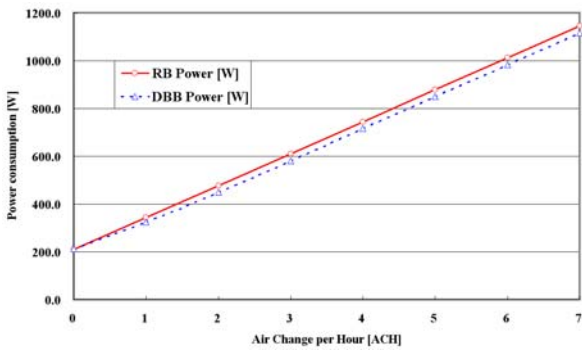
### 4.3 건물에너지 사용량 분석

Twin test cell을 대상으로 일반 단열재 대비 동적 단열재를 적용한 건물에서의 에너지 소비량을 분석하기 위하여 Table 2와 같은 이론적 실험 조건을 제시하였다. 실험 조건은 한국에서의 겨울철 난방기준이며, 외기온도 0℃일 때 실내온도를 22℃로 설정하였다. 또한 실내 환기량을

0ACH에서 7ACH까지 1ACH 간격으로 변화시킴으로써 실내 환기량에 따른 건물에너지 소비량을 식(3)과 식(6)에 의하여 분석하였다. Figure 4는 일반 건물과 숨쉬는 건물에서의 에너지소비량을 나타내고 있으며, 숨쉬는 건물에서의 에너지소비량은 일반 건물에 비해 2ACH에서 최대 5.7%까지 저감되는 것으로 평가되었다.

Table 2 Twin test cell pre-test condition

Heating condition			
Outdoor temperature		0 [°C]	
Indoor temperature		22 [°C]	
Monitoring room temperature		18 [°C]	
$A_T$		43.04 [m <sup>2</sup> ]	
Volume		18.24 [m <sup>3</sup> ]	
		$U_T$ [W/m <sup>2</sup> k]	
ACH	$M_T$ [m <sup>3</sup> /hr]	RB	DBB
0	0	0.272	0.274
1	18.24	0.272	0.252
2	36.48	0.272	0.243
3	54.72	0.272	0.241
4	72.96	0.272	0.241
5	91.20	0.272	0.241
6	109.44	0.272	0.241
7	127.68	0.272	0.241



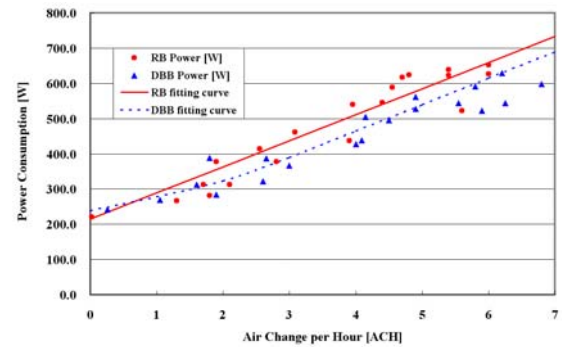
ACH	RB [W]	DBB [W]	Saving (%)
0	209.6	211.7	-1.0
1	343.3	324.9	5.4
2	477.1	449.8	5.7
3	610.9	582.2	4.7
4	744.6	715.9	3.9
5	878.4	849.7	3.3
6	1,012.0	983.4	2.8
7	1,145.9	1,117.2	2.5

Figure 4. Twin test cell power consumption pre-test results graph (above), data(below).

## 5. 실험에 의한 건물에너지 절감량 분석

Table 3 Twin test cell power consumption actual data arrangement

Date (2007-2008)	Average $T_{out}$ [°C]	RB		DBB	
		ACH	Power [W]	ACH	Power [W]
12/02-12/03	0.14	0.02	220.0	0.26	242.9
12/03-12/04	0.46	3.08	461.1	4.09	438.9
12/06-12/07	3.16	2.10	312.2	2.60	322.2
12/07-12/08	-0.13	2.80	377.8	3.00	366.7
12/09-12/10	-1.70	4.55	588.9	5.55	544.4
12/13-12/14	0.13	1.30	266.7	1.05	268.9
12/14-12/15	-1.30	1.90	377.8	1.80	388.9
12/15-12/16	-0.90	5.60	522.2	5.90	522.2
12/17-12/18	-1.70	3.95	540.0	4.15	505.6
12/22-12/23	0.45	1.70	312.2	1.60	313.3
12/23-12/24	-1.40	4.40	545.6	4.50	495.6
12/24-12/25	-0.50	2.55	414.4	2.65	387.8
12/25-12/26	1.60	3.90	437.8	4.00	427.8
12/26-12/27	1.30	1.80	282.2	1.90	284.4
01/02-01/03	-0.68	6.00	652.2	6.20	630.0
01/03-01/04	-2.25	5.40	638.9	5.80	591.1
01/04-01/05	-1.50	4.70	617.8	4.90	562.2
01/05-01/06	-0.90	4.80	624.4	4.90	527.8
01/07-01/08	1.65	5.40	622.2	6.25	544.4
01/08-01/09	1.49	6.00	626.7	6.80	597.8
Average	-0.13				



ACH	RB [W]	DBB [W]	Saving (%)
0	240.0	215.0	-11.6
1	278.8	289.1	3.6
2	323.8	363.1	10.8
3	390.1	437.2	10.8
4	465.2	511.2	9.0
5	540.4	585.5	7.7
6	615.5	659.3	6.7
7	690.6	733.4	5.8

Figure 5. Twin test cell power consumption actual test results graph(above), data(below).

KIER twin test cell에 일반 단열재와 동적 단열재를 각각 설치하여 겨울철 난방부하 저감 분석 실험을 수행하였다. 실내 난방온도를 22℃로 설정한 후 외기조건 하에서 오후 10:00부터 다음 날 오전 07:00까지 총 9시간 동안에 소비되는 전력량을 비교 분석함으로써 에너지 저감량을 평가하였다. 실험에 의한 실내환기량에 따른 소비동력 변화량 결과는 Figure 5에 나타내었다. 실험 결과 동적인 단열재를 사용하여 숨쉬는 벽체를 적용한 건물에서의 에너지소비량은 일반 단열재를 사용한 건물에 비해 최대 10.8%의 에너지 저감효과가 나타남을 알 수 있었다.

## 6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 동적 단열재인 Energyflow cell을 적용한 건물과 일반 단열재인 스티로폼을 적용한 건물에서의 외기조건하에서 건물에너지 소비량 절감효과를 정량적으로 분석하고자 하였다.

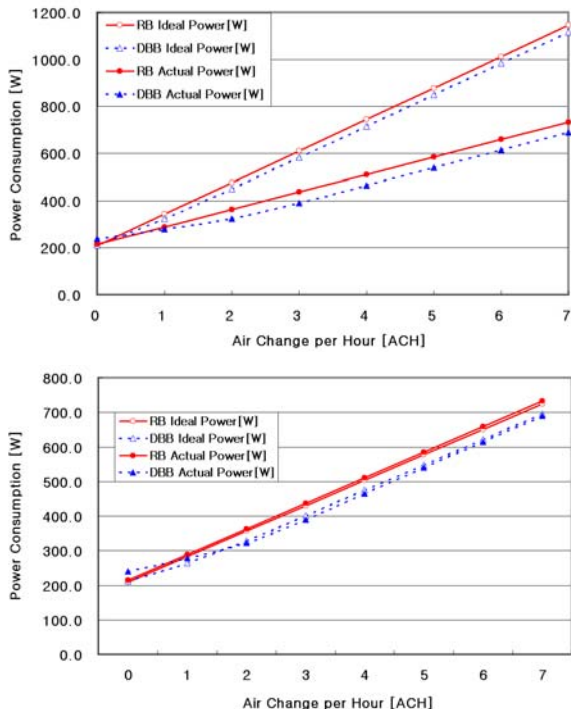


Figure 6. Power consumption comparison results (left,  $\alpha=1.00$ , right,  $\alpha=0.55$ ).

이론식을 이용한 에너지 절감효과를 분석해 본 결과 숨쉬는 건물에서의 에너지 소비량이 약 5.7% 절감되는 것을 알 수 있었고, 외기 상태하

에서 비교실험에 의하여 측정된 결과 숨쉬는 건물에서의 에너지 소비량이 약 10.8%까지 절감되는 것을 알 수 있었다. 다만, 이론식과 실측에서 구한 값이 오차가 크게 나타났는데, 이는 건물에서의 단열손실과 환기손실 이외에 건물복사열손실이 고려되지 않았기 때문이며, 이 건물복사열손실은 건물의 기밀도와 관련이 있을 것으로 사료된다. 따라서 이러한 건물복사열손실을 고려하기 위하여 건물복사열손실 계수  $a$ 를 도입하였다. Figure 6은 이론과 실제의 비교결과를 보여주고 있으며,  $a$ 가 0.55일 때 이론값과 실측값이 거의 일치함을 보여주고 있다. 따라서 본 실험에서의 건물복사열손실 계수는 0.55임을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 산업자원부 연구비 지원 사업(과제명: 실용형 숨쉬는 위피 Breathing Wall(BW) 기술 개발. 과제번호 : 2006-E-BD02-P-02-0-000)으로 진행되었음.

## 참고문헌

1. M. S. Imbabi, 2006, "Full-scale evaluation of energy use and emissions reduction of a dynamic breathing building", Building and Environmental.
2. M. S. Imbabi, 2004, New Developments in the Science and Art of Breathing Walls, World Renewable Energy Congress, Denver, September 2004.
3. Mohammed Salah-Eldin Imbabi, 2005, Energyflo<sup>TM</sup> Cell-Thermal Performance, Environmental Building, Technical Bulletin 2.
4. Mohammed Salah-Eldin Imbabi, 2005, Energyflo<sup>TM</sup> Cell and the Dynamic Breathing System, Environmental Building, Technical Bulletin NO. 1
5. Mohammed Salah-Eldin Imbabi and Jim M. Wong and Fredrik P., 2005, Breathable Concrete for Low Energy Buildings.
6. Taylor B, Imbabi M., 1998, The application of dynamic insulation in buildings. Renewable Energy, 15(1-4).