

# 황토지로 제작된 전열교환소자의 전열특성 및 항균특성에 관한 연구 Heat Transfer and Sterilization Characteristics of an ERV Element Made of Hwang-to Paper

조민철\* · 오세기\* · 안영철\*\*\*†

Min-Chul Cho\*, Sai-Kee Oh\* and Young-Chull Ahn\*\*\*†

(Received 11 November 2016, Revised 09 February 2017, Accepted 09 February 2017)

**Abstract:** To increase the enthalpy exchange efficiency of ERV elements, the moisture exchange character must be improved. The moisture exchange efficiency depends on material characteristics. The material used for ERV is Hwang-to paper based on Han-ji which is Korean traditional paper. The paper has excellent performance in moisture exchange and heat transfer compared with polymer and other papers. To have an anti bacteria performance and to improve moisture exchange performance of Han-ji, Hwang-to is added to the Han-ji. The enthalpy exchange efficiency of the Hwang-to paper shows 5% greater than that of the conventional paper. In case of Escherichia Coli, the reduction rate of bacteria is 96.6% and in case of Pseudomonas, the reduction rate of bacteria is 97.5%. The ERV element made of Hwang-to paper has a great possibility as an ERV element.

**Key Words :** ERV(Energy recovery ventilator), AHT(Absolute humidity transmission), Air permeability, Anti bacteria performance

## — 기호 설명 —

$A$ : 확산 면적 [ $m^2$ ]	$m_c$ : 유동율 [ $kg/m^2.s$ ]
$AHT$ : 절대습도 전달량 [ $g/kg$ ]	$OA$ : 외기, Outdoor Air
$C_r$ : 열 용량비 [-]	$RA$ : 환기, Return Air
$D$ : 확산계수 [ $m^2/s$ ]	$SA$ : 급기, Supply Air
$EA$ : 배기, Exhaust Air	$t$ : 전열교환소자 두께 [ $mm$ ]
$h$ : 엔탈피 [ $J$ ]	$T$ : 온도 [ $^{\circ}C$ ]
$H$ : 확산물의 농도 [ $kg/m^3$ ]	$U$ : 총괄 열전달 계수 [ $W/m^2K$ ]
$K$ : 열전도도 [ $W/mK$ ]	$x$ : 확산 거리 [ $m$ ]
	$\eta_h$ : 전열교환효율 [%]
	$\eta_s$ : 현열교환효율 [%]

\*\*\* 안영철(교신저자) : 부산대학교 건축공학과

E-mail : ycahn@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2492

\*조민철 : LG전자(주)

\*오세기 : LG전자(주)

\*\*\*† Young-Chull Ahn(corresponding author) : Department of

Architectural Engineering, Pusan National University.

E-mail : ycahn@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2492

\*Min-Chul Cho : LG Electronics Co., Ltd.

\*Sai-Kee Oh : LG Electronics Co., Ltd.

## 1. 서 론

환기는 실내 공기오염을 제거하여 실내를 쾌적하게 할 수 있는 적극적인 제어 방법이다.<sup>1)</sup> 그러나 환기는 실외공기의 도입으로 실내 냉난방부하를 증가시키기 때문에 이를 최소화 할 수 있는 전열교환소자를 이용한 환기장치가 많이 사용되고 있다.

전열교환소자는 1976년 마사타카 요시노에 의해 개발된 이래 열교환 효율을 증가시키기 위한 많은 연구가 진행되었다. 중국의 Min과 Su<sup>2)</sup>는 전열소자막의 흡수성과 전열교환성능의 관계에 관한 논문에서 흡수성이 온도교환보다 습도교환효율에 보다 많은 영향을 준다는 결과를 얻었다. 또한 그들의 다른 연구<sup>3)</sup>에서는 전열막의 두께가 얇을수록 그리고 적당한 높이의 공간을 가질수록 전열교환성능이 좋아진다는 결론을 얻었으며, 일본의 Mayu et al.<sup>4,5)</sup>은 전열교환소자의 전열막 재질을 종래의 것과 다르게 구성하여 전열막의 재질과 구조가 효율에 변화를 준다는 결과를 얻었다.

국내에서는 김내현<sup>6)</sup>이 외기 상대습도의 증가에 따라서 습도교환효율 또한 증가함을 실험을 통하여 연구하였으며, 김광현<sup>7)</sup>과 최석용<sup>8)</sup>은 전열교환기가 실내외 절대습도차이에 따라 습도교환효율이 결정되며, 실내외 절대습도차가 약 30% 이상일 때 정상적인 효율을 나타내고 차이가 클수록 효율도 커진다고 하였다. 배철호<sup>9)</sup>는 전열교환기의 성능이 최대가 되기 위해서는 고온 다습한 외기 측의 수증기가 흡수체에 흡수될 수 있는 확률을 높이고, 흡수된 수증기가 실내 측의 저온 건조한 공기 쪽으로 쉽게 전달될 수 있도록 구성되어야 한다고 하였다.

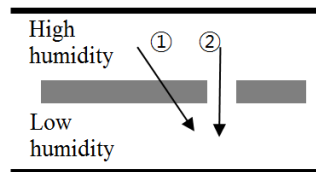
본 연구에서는 한국의 전통종이인 한지와 황토를 이용하여 만든 전열교환소자의 열교환 특성 및 항균특성에 대해 분석하였으며, 기존 소자와 비교하여 전열교환소자 재질로서의 가능성에 대해 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 수분 전달특성 평가 방법

전열교환소자는 급기와 배기간 공기의 이동 없이 현열과 잠열을 교환하는 기능을 한다. 잠열교환효율은 소자의 수분 전달 특성에 따라 결정되기 때문에 전열교환소자로서 중요한 특성이다. Fig. 1은 전열교환소자의 수분 전달 메카니즘을 나타낸다.<sup>10)</sup> 첫 번째는 식 (1)로 표현되는 Fick's Law로서 물질의 두 상(Phase)간의 농도차이에 의해서 일어나는데, 이는 물질의 확산계수에 지배적인 영향을 받게 된다. 둘째는 대류에 의해 일어나는 물질이동으로 매질의 기공, 투기도 및 공기 유속의 영향을 받게 된다. 하지만 실제로 전열교환소자의 수분교환은 주로 수분농도차이에 의한 방식이 주를 이룬다고 할 수 있다.

$$m_c = DA \frac{dH}{dx} \quad (\text{Fick's Law}) \quad (1)$$



- ① Moisture transfer by concentration difference
- ② Moisture transfer by convection

Fig. 1 Moisture transfer mechanism

Fig. 2는 수분전달특성을 평가하기 위한 실험장치를 나타낸다. 격막으로 나누어진 고습과 저습의 두 챔버로 구성되며 가운데 시편을 설치할 수 있는 구조로 되어 있다. 설치되는 시편의 크기는 100 mm × 100 mm이며, 고습조건과 저습조건 챔버는 각각 90 %RH, 25±3℃ 조건과 30 %RH, 25±3℃ 조건을 유지한다. 수분전달성능은 격막의 재질별 절대습도 전달량(AHT, Absolute Humidity Transmission) 측정을 통해 분석되었다. 시편주위의 수분전달을 위한 공기유동은 DC fan을 통해 제어하였으며, 정상상태 도달 후에 절대 습도량의 변화를 5분 간격으로 30분 동안 측정하였다.

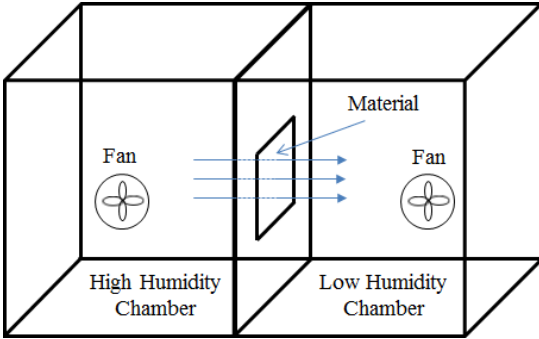


Fig. 2 Schematic diagram of the AHT measurement system

## 2.2 전열교환 특성 평가방법

Fig. 3은 환기시스템에서의 전열교환 효율을 측정하기 위한 시스템이다. 실내와 실외 공기상태를 조절할 수 있는 환경 챔버와 전열교환 소자를 삽입하여 가동시킬 수 있는 환기시스템으로 구성되어 있다. 실험조건은 여름철 조건의 냉방모드와 겨울철 조건의 난방모드로 구성하였다.<sup>11,12)</sup> Table 1은 실내측 챔버와 실외측 챔버의 모드별 상세 온도, 습도조건을 나타낸다.

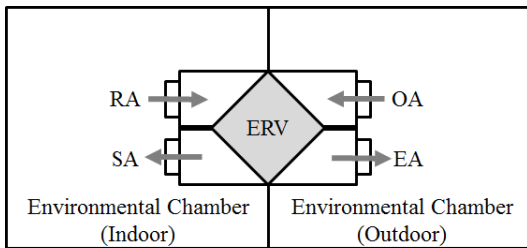


Fig. 3 Energy exchange efficiency measurement system for an energy recovery ventilator (ERV)

Table 1 ERV element test conditions

Mode	Indoor condition		Outdoor condition	
	DB	WB	DB	WB
Cooling	27±1 °C	20±2 °C	35±1 °C	29±2 °C
Heating	20±1 °C	14±2 °C	5±1 °C	2±2 °C

식 (2)와 (3)은 각각 현열교환 효율과 전열교환

효율의 계산식을 나타내고 있으며, 급배기의 유량을 동일하게 설정한 후 급기 및 배기되는 공기의 건구온도와 습구온도를 측정하여 계산된다.

$$\eta_s = \frac{T_{OA} - T_{SA}}{T_{OA} - T_{RA}} \times 100 \quad (2)$$

$$\eta_h = \frac{h_{OA} - h_{SA}}{h_{OA} - h_{RA}} \times 100 \quad (3)$$

## 2.3 기능성 종이

본 연구에서 기능성 종이로 사용된 전열교환소자의 재질은 전통적인 한지에 황토를 혼합하여 만든 것이며, 섬유장의 길이가 길고 셀룰로오스의 섬유를 형성하는 미소섬유가 축방향으로 배향되어 섬유의 강도가 크다. 셀룰로오스 표면에 있는 수산기(OH-)는 물에 대해서 큰 친화력을 가지고 있어 주변 상대습도의 증가에 따라서 함수율이 높아지는 특징이 있으며, 섬유와 섬유 사이에 형성되어 있는 다공질에 의한 모세관 현상으로 강한 수분흡수성을 가진다.

황토는 다량의 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)을 가지고 있는데, 이 탄산칼슘에 의해 쉽게 부서지지 않는 점성력을 가지게 된다. 황토는 표면이 넓은 벌집구조로 수많은 공간이 복층구조를 이루고 있으며 이러한 미세기공 안에는 원적외선이 다량 흡수, 저장되어 있어 열을 받으면 발산하여 다른 물체의 분자활동을 자극한다. 이와 같은 이유로 황토는 항균과 탈취성능을 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>13)</sup>

본 연구에서 사용된 전열교환 소자용 재질의 특징은 다음과 같다. 우선 두 가지 종류의 기능성 종이(황토지)를 제작하여 사용하였으며, “기능성 종이 1”은 황토의 배합비율이 한지의 무게 대비 20%를, “기능성 종이 2”는 10%를 혼합하여 제조하였다. 그리고 일반적인 전열교환 소자로 사용되고 있는 종이재질을 기반으로 하여 “종이 1”은 흡수성을 강화시킨 재질이며 “종이 2”는 투기성능을 개선한 재질이다. 그리고 데이터의 비교를 위하여 고분자 재료로 만들어진 소재와 연료전지용으로 개발되어 높은 공기 투과시간과 수분 흡수성을 가지는 멤브레인을 사용하여 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 재질별 공기투과도와 수분교환 특성

Fig. 4는 재질별 절대습도 교환량과 공기투과시간을 나타낸다. 수분교환특성은 서로 수분 농도가 다른 조건에서 전열교환소자를 통해 얼마나 효과적으로 수분이 전달되는지를 나타내는 특성으로 잠열교환특성을 반영한다. 실험결과 기능성 종이 1, 2가 다른 재질의 전열교환소자에 비하여 2~3배 정도의 높은 습도교환특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 한지에 포함된 셀룰로오스 섬유와 친수 특성과 섬유들 사이에 형성되어 있는 다공질에 의한 모세관현상으로 강한 흡수성과 셀룰로오스 표면의 수산기(OH-) 영향 때문인 것으로 분석된다.

공기 투과시간은 KS M 7020<sup>14)</sup>의 규격에 의해 측정된 값으로 100 ml의 공기가 재질을 투과하는데 소요되는 시간을 나타낸다. 투과시간이 짧은 재료는 환기가 되는 동안 실내의 유해가스가 전열교환소자를 통과하여 쉽게 이동할 수 있기 때문에 환기용 전열교환소자로 부적당하며, 투과시간이 길면 길수록 전열교환소자로서 적합하기는 하나, 일반적으로 공기 투과시간이 큰 재질일수록 수분교환특성이 떨어지기 때문에 이를 보완하기 위해 흡습성이 높은 물질을 추가하여 특성을 보완해야 한다. 따라서 공기 투과시간은 전열교환소자 선정 시 반드시 검토해야 하는 중요한 특성이며 한지를 이용한 황토지의 경우 비교대상인 다

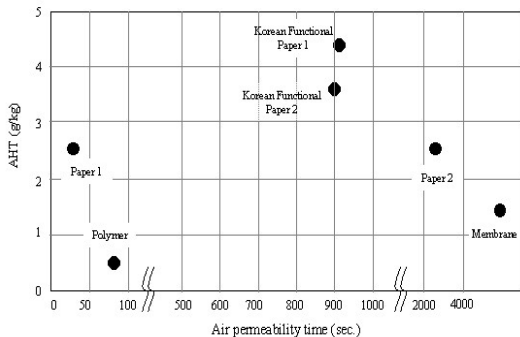


Fig. 4 Absolute humidity transmission rates and air permeability times of each material

른 재질에 비해 수분교환특성은 상당히 우수하고 공기 투과시간은 900초 정도로 분석되었다.

본 연구에서 사용된 황토지의 경우는 기본적으로 한지의 흡습성과 황토의 흡습성이 서로 상호작용을 하여 추가적인 흡습성 물질이 없더라도 높은 수분교환특성을 나타내는 것으로 확인되며, 또한 공기 투과시간은 일반적인 전열교환소자의 평균 투기도인 1,000초 부근에서 형성되어 전열교환소자로서 충분히 사용가능하다고 판단된다.

#### 3.2 열교환 효율

전열교환소자의 성능은 현열교환효율과 잠열교환효율로 표현된다. 일반적으로 잠열교환효율은 재질의 수분흡습 및 전달특성에 영향을 받고, 현열교환효율은 재질의 종류나 두께에 영향을 받는다. 특히 열전도도가 큰 재질의 경우 현열교환효율이 높다. 본 연구에서는 한지로 만들어진 황토지의 현열교환효율 특성을 분석하기 위해 Cross flow, Single pass, Unmixed의 조건을 가지는 열교환기의 현열교환효율식을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 사용된 관계식은 Effectiveness- NTU 방법으로 식 (4)와 같다.

$$\epsilon = 1 - e^{\left\{ \frac{1}{C_r} \cdot NTU^{0.22} \times e^{-C_r \cdot NTU^{0.78}} - 1 \right\}} \quad (4)$$

Fig. 5는 알루미늄, 폴리프로필렌, 한지 등 열교환소자의 재질에 따른 현열교환효율을 분석한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과 현열교환효율은

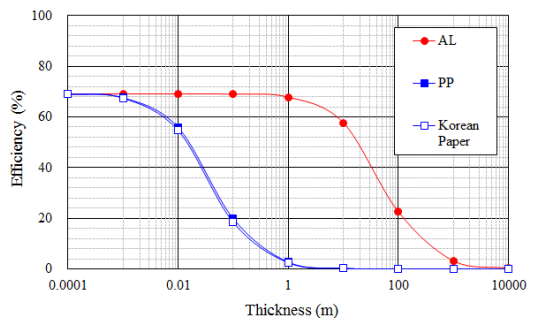


Fig. 5 Sensible heat exchange efficiencies with various materials and thicknesses

열전도특성이 좋은 재질일수록 높은 효율을 가지지만 재질의 두께가 얇아질수록 재질에 따른 특성이 사라지고 거의 동일한 현열교환효율 특성을 나타낸다. 이러한 결과는 열교환소자가 특정 두께 이하에서는 전도율 차이에 의한 효과가 무시되고 거의 동일한 수준의 현열교환효율을 갖는다는 것을 나타낸다. 따라서 0.1 mm 이하의 두께로 전열교환소자를 제작할 경우에는 황토지를 이용하더라도 금속을 사용한 경우와 동일한 현열교환특성을 나타낸다.

Fig. 6은 황토지를 이용하여 제작한 전열교환소자와 일반적인 전열교환소자의 유량별 현열 및 전열교환성능을 나타낸다. 현열교환성능에서는 두 소자의 두께를 0.1 mm로 동일하게 제작하였기 때문에 두 시료 간 동일한 성능을 보이고 있으며, 황토지를 이용한 기능성 종이의 전열교환효율이 일반적인 전열교환소자에 비해 5% 이상 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 특성은 황토지로 제작한 전열교환소자의 잠열교환특성이 일반적인 전열교환소자보다 우수하기 때문이며, 일반적으로 이러한 특성은 난방시즌보다 냉방시즌에서 더 효과를

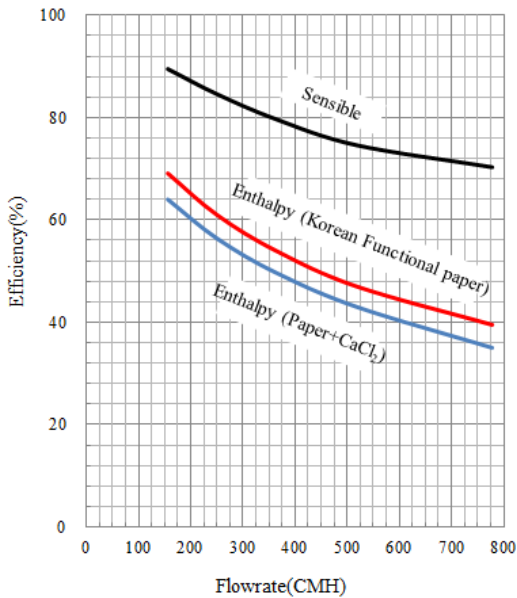


Fig. 6 Variations of heat exchange efficiencies of ERV elements

볼 수 있다고 판단된다. 이는 냉방시즌의 현열비가 난방시즌의 현열비보다 낮기 때문에 냉방시즌에 잠열의 영향도가 높아지기 때문이다.

### 3.3 항균 특성

황토는 그 자체로 항균과 탈취성능을 가지는 것으로 알려져 있으며, 이러한 황토가 혼합된 기능성 전열교환소자에서의 항균 성능을 확인하기 위해 “기능성 종이 1”을 대상으로 실험을 수행하였으며 Fig. 7에 결과를 나타내었다. 항균성 실험 결과 Escherichia Coli의 경우 96.6%의 정균 감소율을 보였으며 Pseudomonas의 경우 97.5%의 정균 감소율을 나타냄으로써 위생적인 실내환경 구현을 위해 황토지를 전열교환소자로 사용하는 것이 의미가 있음을 확인하였다.

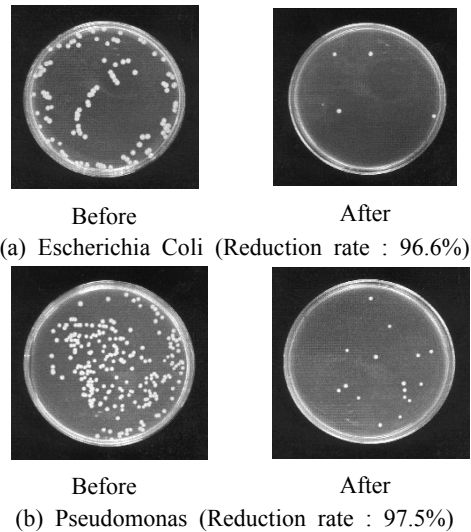


Fig. 7 Antibacteria performance of Korean paper

## 4. 결 론

본 연구에서는 한지와 황토를 섞은 기능성 종이로서 황토지를 제작하였고 단품 및 셋트에서의 전열교환특성을 분석하였으며, 이를 기존에 사용하고 있는 전열교환소자와 비교함으로써 전열교환소자로서의 사용 가능성을 확인하였다.

1) 황토지는 한지에 황토를 첨가하여 만든 재질로 한지의 섬유질과 섬유질사이의 다공에 의해 형성되는 모세관현상으로 강한 수분 흡수성을 가진다. 이러한 특성은 전열교환소자의 잠열교환특성을 개선하는 효과가 있다.

2) 전열교환소자의 현열교환특성은 재질의 두께가 얇아질수록 전도에 의한 열전달보다 대류에 의한 열전달이 지배적이기 때문에 두께 0.1 mm 이하에서는 재질의 열전도도와 상관없이 거의 동일한 특성을 가진다.

3) 황토지로 만든 전열교환소자는 염화칼슘이 포함된 일반적인 소자에 비해 뛰어난 수분흡수특성을 가지고 있어 전열교환효율이 5% 정도 우수함을 확인하였다.

4) 황토지의 항균 성능 시험 결과 Escherichia Coli의 경우 96.6%의 평균 감소율을 보였으며, Pseudomonas의 경우 97.5%의 평균 감소율을 나타내었고, 이러한 특성은 환기 시 오염된 공기에 의한 2차오염을 예방하기에 적합하다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## References

1. D. W. Bearg, 1993, "Indoor air quality and HVAC Systems", Lewis Publishers.
2. J. Min and M. Su, 2010, "Performance analysis of a membrane-based enthalpy exchanger: Effect of the membrane properties on the exchanger performance", Journal of Membrane Science, No. 348, pp. 376-382.
3. J. Min and M. Su, 2010, "Performance analysis of a membrane-based enthalpy exchanger: Effect of the membrane spacing and thickness on the ventilator performance", Applied Thermal Engineering, No. 30, pp. 991-997.
4. Y. Mayu, S. Hiroaki, T. Takashi, O. Makoto and T. Hirokuni, 2010, "The study on total heat exchange ventilation system in cold region. Part. 2 Examination of heat exchange element property and structure", Proceedings of the Architectural Institute of Japan Symposium, No. 41492, pp. 999-1000.
5. Y. Mayu, S. Hiroaki, T. Takashi, O. Makoto and T. Hirokuni, 2010, "The study on total heat exchange ventilation system in cold region. Part.3 Calculation of heat exchange efficiency and development for new heat exchange element", Proceedings of the Architectural Institute of Japan Symposium, No. 060, pp. 239-242.
6. N. H. Kim, E. J. Lee, K. S. Song and W. K. Oh, 2010, "Thermal performance of an enthalpy exchanger made of paper at different outdoor temperatures and humidities", Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers: B, Vol. 34, No. 7, pp. 697-702.
7. K. H. Kim and J. J. Yee, 2008, "A study on operating method by energy evaluation and performance evaluation of heat recovery ventilator according to outdoor conditions", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 57-64.
8. S. Y. Choi, J. J. Yee, M. J. Park, S. K. Kim, and K. H. Kim, 2009, "A performance prediction on the element cores of total heat recovery ventilator according to outdoor conditions", Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 2, pp. 241-248.
9. C. H. Bae, Y. H. Lim, J. Y. Park, K. M. Kwak, E. S. Ju, Y. S. Kim, and J. Y. Kim, 2005, "A Study on the Characteristics of Total Heat Exchanger under Various Conditions", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 10, pp. 891-897.

10. R. L. Webb, "Heat Exchanger Design", Lecture Overhead Materials, 1994.
11. ASHRAE, "Method of Testing Air to Air Heat Exchangers", Ashrae Handbook 84-1991, 1991
12. JIS B 8628, 2000, Air to air heat exchangers.
13. H. M. Jung, H. Y. Choi, H. Z. Hwang, M. H. Hong and M. H. Kim, 1997, "The research on the general properties of Red-Clay", Proceedings of Architectural Institute of Korea, Vol. 17, No. 2, pp. 1251-1255.
14. KS M 7020, 2001, Paper and board - Determination of air permeability(medium range) - Part 5: Gurley method, Korean Standard.