

파울링 가속장치를 이용한 공기조화기용 열교환기의 공기측 파울링 특성에 대한 예측 모델링

안 영 철^{*†}, 이 재 근

^{*}부산대학교 기계기술연구소, 부산대학교 기계공학부

Modeling of the Air-side Particulate Fouling in Finned-Tube Heat Exchangers of Air Conditioners using Accelerated Particle-Loading System

Young-Chull Ahn^{*†}, Jae-Keun Lee

^{*}Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea
Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

(Received October 25, 2004 ; revision received January 18, 2005)

ABSTRACT: The air-side particulate fouling in the heat exchangers of HVAC applications degrades the performance of cooling capacity, pressure drop across a heat exchanger, and indoor air quality. Indoor and outdoor air contaminants foul heat exchangers. The purpose of this study is to investigate and to model the air-side particulate fouling characteristics of the heat exchangers using accelerated particle loading system. The main variables of the modeling equation are face velocity and dust concentration. The modeling equation shows good agreements with the experimental results at the face velocity of 0.5, 1.0, 1.5 m/s and the dust concentration of 1.28 and 3.84 g/m³. It will be very useful to predict fouling characteristics such as variations of pressure drop and heat transfer capacity in finned-tube heat exchangers of air conditioners.

Key words: Empirical modeling(경험적 모델링), Heat exchanger(열교환기), Particulate fouling(입자상 파울링), Pressure drop(압력손실), Cooling capacity(냉방능력),

기 호 설 명

C : 분진농도, [g/m³]
 k : 파울링 특성 상수, [-]
 R : 열저항, [m²K/W]
 t : 파울링 시간, [min.]
 V : 열교환기 통과 유속, [m/sec]

P : 압력손실, [mmAq]
 Q : 냉방능력, [kcal/hr]

그리스 문자

Δ : 변화량, [-]
 α : 파울링 특성 상수, [-]
 β : 파울링 특성 상수, [-]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2492; fax: +82-51-512-9835

E-mail address: ycahn@pusan.ac.kr

- 0 : 초기상태
- d : 파울링 초기 지연
- f : 파울링 특성
- ft : 시간에 따른 파울링 특성
- f_{∞} : 포화시의 파울링 특성

1. 서론

열교환기는 공조설비의 핵심부품으로서 생활수준의 질적 향상 및 대기 오염 등의 이유로 최근 가정이나 사무실 등에 그 수요가 급증하고 있으며 그로 인한 설치 후 유지 관리에 대한 중요성이 점점 중요한 요소로 자리 잡게 되었다. 그런데 대부분의 가정이나 사무실 등에서 공기조화기의 사용 중 주기적인 청소와 점검은 거의 이루어지지 않고 있으므로 실내 분진 및 오염물의 퇴적으로 인한 열교환기 표면의 파울링 현상의 초래와 그에 따른 냉방능력 감소와 에너지소모의 증가는 반드시 해결되어야 할 문제점의 하나로 자리 잡게 되었다.

그러므로 본 연구에서는 공조기용 열교환기의 입자상 파울링 현상에 대한 실험적 분석을 바탕으로 핀-관형 열교환기에 적용 가능한 파울링 예측 경험식을 도출하였으며, 향후 공조용 열교환기의 공기측 파울링 현상에 따른 압력손실의 증가와 전열능력의 저하를 손쉽게 예측할 수 있도록 하였다.

2. 이론적 배경

Fig. 1은 시간에 따른 입자의 침착 및 열저항 변화 특성을 나타낸 이상적인 곡선으로 곡선의 형태에 따라 직선, 감속곡선, 점근곡선 및 톱니형 곡선을 나타낸다. 직선(linear curve)은 시간에 따라 지속적으로 침착만 발생하며 탈리현상이 없는 경우를 나타내며 감속곡선(falling rate curve)의 경우 약간의 탈리현상을 보이며 오랜 시간이 경과하면 일정한 값으로 수렴하는 특성을 나타낸다. 점근곡선(asymptotic curve)은 점차적인 파울링의 진행에 따라 전단력의 증가로 인한 탈리현상과 부착현상이 평형을 이루어 일정한 값으로 수렴하는 특성을 나타내며 가장 일반적인 파울링의 진행상태를 나타낸다. 그리고 톱니형(sawtooth curve)은 일정기간 입자의 침착에 의해 열

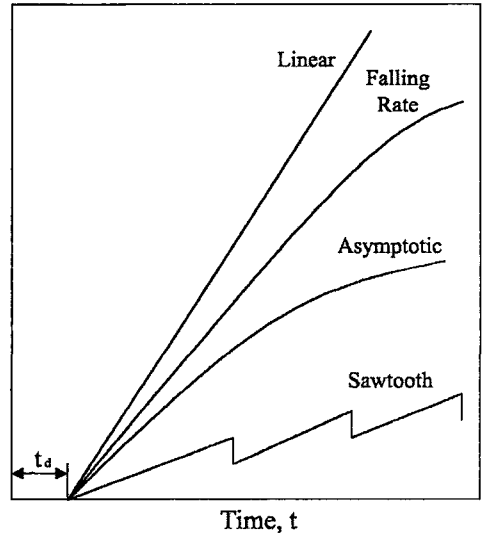


Fig. 1 Characteristic fouling curves.⁽¹⁾

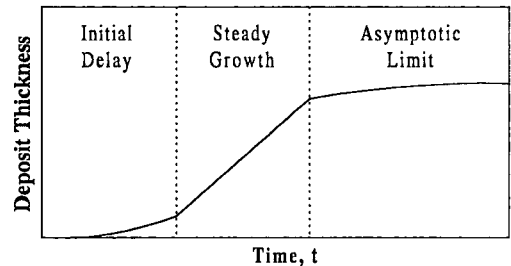


Fig. 2 Idealized asymptotic fouling curve.⁽³⁾

저항이 증가하다가 전단력의 증가로 인해 파울링 물질의 탈리가 발생하여 열저항이 급격히 감소하는 형태가 반복되어 나타나는 특성을 보여준다.

안영철 등⁽²⁾의 연구결과에 의하면 공기조화기용 열교환기의 파울링은 점근곡선의 형태를 나타내며 이러한 점근곡선은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 초기 지연 구간, 지속 성장구간, 포화구간으로 나눌 수 있다. Kern and Seaton⁽⁴⁾은 이러한 점근곡선 형태의 파울링 열저항을 설명하기 위해 다음과 같은 모델을 제시하였다.

$$R_{ft} = R_{f\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

파울링에 의한 열저항의 증가는 전열표면의 입자 부착 두께에 비례하며 압력손실과도 비례하는 특성을 가지므로 식(1)을 사용한 압력손실의 변

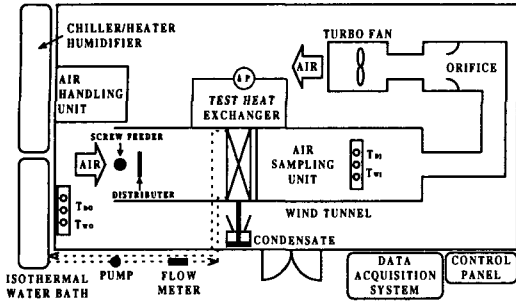


Fig. 3 Schematic diagram of the fouling measuring apparatus in the psychrometric calorimeter.

화도 예측이 가능하다. 그러나 식(1)은 Fig. 2에서 나타낸 초기 지연 구간에 대한 부분이 고려되어 있지 않으며 $R_{f\infty}$, k 등의 계수는 실험에 의하여 구해야 하는 변수들이다.

그래서 본 연구에서는 식(1)을 보완하여 초기 지연 구간에 대한 부분도 예측이 가능하도록 다음과 같은 식을 이용하여 압력손실 변화를 모델링 하였다.

$$\Delta P_f = \Delta P_{f\infty}(1 - ae^{-\beta t}) \quad (2)$$

여기서 α 는 파울링 초기 지연 시간에 관여하는 상수이며 β 는 분진농도에 관여하는 상수로서 파울링 가속실험을 통하여 경험적으로 산출되었다.

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 3은 파울링 가속실험을 위한 장치의 개략도를 나타낸 것으로서 항온 항습실, 열교환기 성능 측정부, 작동유체의 구동부, 제어판으로 구성되어 있다. 파울링에 의한 열교환기의 성능변화 측정은 선행연구^(5,6)와 동일한 방법으로서, 열교환기를 통과한 공기의 풍량, 온도, 습도를 측정하여 열교환기의 능력을 계산한다. 또한 작동유체(증류수)의 유량 및 입구온도 등을 제어하여 관내측의 조건을 설정할 수 있으며 그로부터 산출되어지는 관내측의 전열량과 열전달에 의해 변화하는 공기측의 엔탈피로부터 계산되는 전열량 값을 비교하여 오차범위가 $\pm 3\%$ 이내 에 들도록 장치를 안정화하여 결과를 도출함으로써 실험값의 신뢰도를 확보하였다.

Table 1 Specifications of the finned-tube heat exchanger used in present study

Parameter		Dimension
Coil	Width	310 mm
	Height	210 mm
Staggered Tube	Diameter	7 mm
	Pass No. (Pitch)	10 (21 mm)
	Row No. (Pitch)	2 (12.7 mm)
Slitted Fin	FPI (Fins/Inch)	18
	Thickness	0.1 mm

압력손실은 0.5, 1.0, 1.5 m/sec 조건에서 수행되었으며 열교환기의 전·후단에서 발생하는 압력 차이를 차압계로 측정하였으며, 냉방능력은 항온·항습실내에서, 공기의 온·습도는 에어컨 성능시험시 기준이 되는 한국산업규격 “에어 컨디셔너”(KS C 9306)⁽⁷⁾에 준하여 습구온도 19.5℃, 건구온도 27℃로 설정하여 측정하였다.

파울링 입자는 JIS 11종 표준분진⁽⁸⁾을 사용하였으며 입경 분포는 0.1 ~ 10 μm 로 대기분진중 개수농도의 대부분을 차지하는 입경 영역의 입자들로 구성되어있다. 밀도는 2.9 ~ 3.1 g/cm³, 평균 입경은 1.6 ~ 2.3 μm 를 가지며 구성성분은 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 등으로 이루어져 있다.

입자 공급장치는 스크류 피더(screw feeder)와 Vacuum transducer pump (Air-vac, TD260H)를 이용하여 1.28, 3.84 g/m³로 균일하게 발생시켰으며 50 mesh의 분산망을 설치하여 공급되는 입자

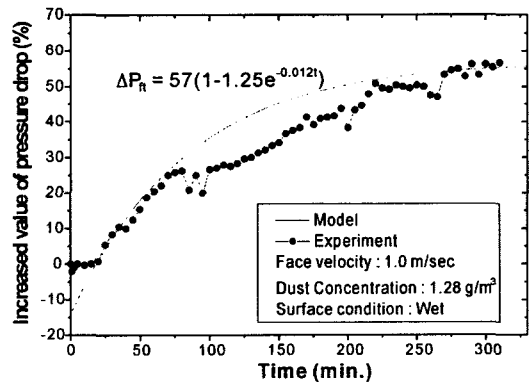


Fig. 4 Modeled and measured pressure drop for 1 m/sec face velocity.

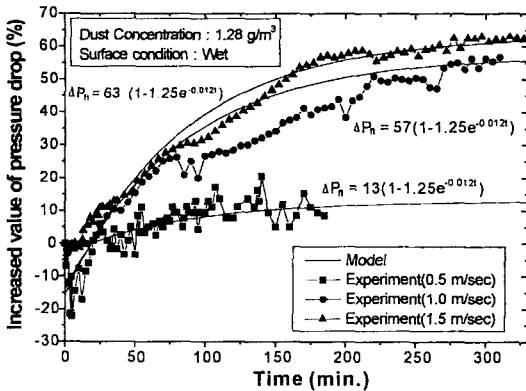


Fig. 5 Effects of face velocity on the pressure drop across heat exchangers.

들이 한쪽으로 치우치지 않고 고르게 분산되도록 하였다.

Table 1에는 본 연구에서 사용한 열교환기의 상세 사양을 나타내었다. 이 열교환기는 창문형 공기조화기의 증발기용으로 사용되는 것으로서 외곽 치수는 310 × 210 mm이며 18 fpi의 슬릿 (slit)형 핀을 가진 핀-관형 열교환기이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유속 변화에 따른 파울링 특성

Fig. 4에서는 열교환기 통과 유속이 1 m/sec일 경우 열교환기 표면에 응축수가 형성되는 Wet 조건에서의 실험결과와 모델링 결과를 비교하여

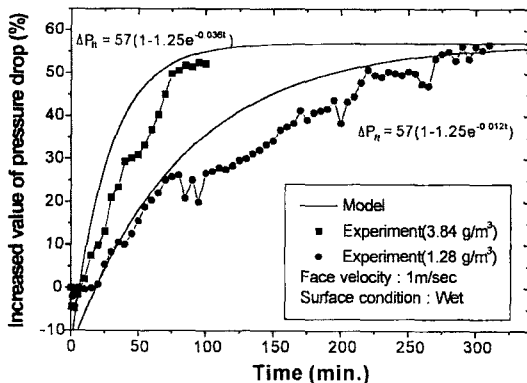


Fig. 7 Variation of the pressure drop as a function of particle loading rate and operation time.

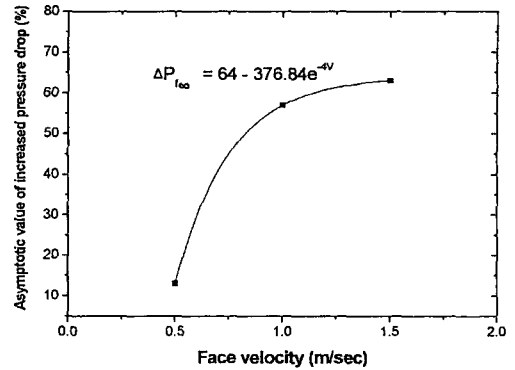


Fig. 6 Asymptotic values of pressure drop as a function of face velocity.

나타내었다. 파울링 초기 약 25분까지 지연시간이 나타나고 있으며 이후부터 압력손실이 증가하기 시작하여 270분부터 포화에 도달하는 특성을 보여주고 있으며 전체적으로 실험 결과와 모델링 결과가 잘 근사되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에는 일정한 분진농도에서 유속의 변화에 따른 파울링 압력손실 변화를 나타내었는데 파울링이 발생하지 않은 초기상태의 열교환기에 응축수가 충분히 형성되어 있는 상태를 기준으로 하여 0으로 표시 하였으며 유속에 따라 변화하는 값을 측정하여 나타내었다. 유속이 0.5 m/sec일 때는 포화값이 13% 증가, 1.0 m/sec일 때는 57% 증가, 그리고 1.5 m/sec일 때는 63%증가로 나타났는데 유속이 증가함에 따라 열교환기 자체의 압력손실이 증가하게 되어 파울링 포화 압력손실

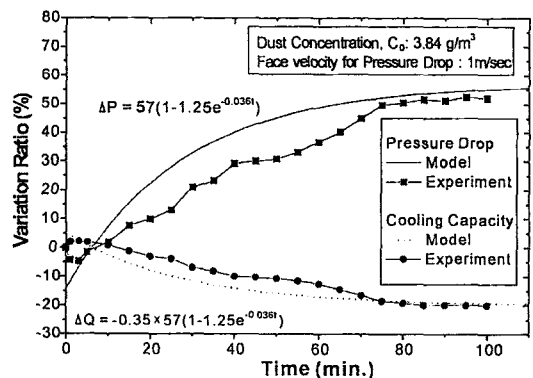


Fig. 8 Comparison of the experimental data with the modeling data for the pressure drop and the cooling capacity.

값도 증가한 것으로 볼 수 있으며, 또한 본 실험은 분진의 농도를 일정하게 고정한 상태에서 실험이 수행된 것이므로 유속이 빠른 경우에 더 많은 분진이 투입되었기 때문에 더 높은 압력손실의 상승을 초래한 것으로 파악된다. 일반적으로 작동유체의 유속을 증가시키면 벽면에서의 전단력이 증가하여 파울링 입자의 부착이 억제되어 파울링을 저감할 수 있는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 열교환기 표면에서의 응축수 비산(carry over)이 발생하지 않는 조건에서 수행된 것이므로 공기유속의 증가에 의한 전단력의 증가는 파울링 입자의 탈리를 유도할 만큼 충분히 전달되지 않는 것으로 판단되며, 빠른 유속에서는 열교환기와 표면의 응축수에 더 많은 입자들이 포집되기 때문에 압력손실이 증가한 것으로 볼 수 있다.

여기서 파울링 초기에 압력손실이 그다지 변화가 없거나 혹은 감소하는 경향이 나타나는데 이는 열교환기 표면에 미세 입자들이 부착되면서 편 표면에 형성된 슬릿(slot)에 의한 강한 난류의 형성을 다소 완화시키기 때문으로 추정된다. 본 연구에서는 이 구간을 초기 지연 구간으로 간주하였으며 식(2)의 계수 $\alpha = 1.25$ 의 값을 가질 때 실험결과와 모델링 식이 가장 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 식(2)에서 분진의 농도에 관계하는 계수 β 는 다음과 같은 관계로 분진농도에 비례한다는 것을 확인하였다.

$$\beta = 9.38 \times 10^{-3} \times C_0 \quad (3)$$

또한 Fig. 5의 결과로부터 동일한 분진농도에서 파울링의 포화 압력손실 값은 유속에 따라 변화한다는 것을 알 수 있는데, 이때 유속에 따라 변화하는 ΔP_{∞} 의 경향을 Fig. 6에 나타내었으며 그 관계는 아래의 식(4)와 같다.

$$\Delta P_{\infty} = 64 - 376.84e^{-4V} \quad (4)$$

여기서 얻어진 식(4)를 식(3)과 함께 식(2)에 대입하면 다음과 같은 파울링 관계식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P_f = (64 - 376.84e^{-4V}) \times (1 - 1.25e^{-9.38 \times 10^{-3} \times C_0 t}) \quad (5)$$

4.2 분진 농도별 특성

Fig. 7은 분진 농도에 따른 파울링 특성을 나타낸 것으로 1.28 g/m³과 3.84 g/m³의 농도에서 실험이 수행되었다. 분진농도는 3배의 차이가 나지만 포화에 이르는 값은 157%로 동일하게 나타났으며 단지 포화에 이르는 시간이 대략 100분과 300분으로 3배의 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Bott⁽²⁾의 실험결과와 일치하는 것으로 분진 농도는 포화값에는 영향을 미치지 않고 포화에 도달하는 시간에만 관여한다는 것을 알 수 있다.

그리고 식(5)를 이용하여 $V = 1$ m/sec, $C_0 = 1.28, 3.84$ g/m³을 각각 대입한 결과 실험결과와 매우 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있으며 본 열교환기를 이용한 입자상 파울링에 대하여 모델링 결과를 이용함으로써 예측이 가능함을 확인하였다.

4.3 냉방능력 변화

Fig. 8은 파울링에 의해 감소되는 냉방능력의 변화를 압력손실의 모델링 결과와 비교하여 나타낸 그래프이다. 압력손실의 변화는 유속이 1 m/sec로 고정되어 있을 때 파울링 입자의 부착에 의해 증가하는 값을 나타낸 것이며 냉방능력의 변화는 열교환기의 압력손실이 파울링 발생 전 초기 압력손실을 유지하도록 파울링 입자의 부착에 대하여 유량을 감소시켜 측정된 값이다. Bott and Bemrose⁽⁹⁾는 파울링에 의한 열전달 능력의 변화는 압력손실의 증가와 비슷하게 점진적으로 변화하며 감소하는 경향을 나타낸다고 실험적으로 보고하였으며 압력손실의 증가량에 비하여 열전달 능력의 감소는 그다지 크게 나타나지 않는 것으로 분석하였다. 본 연구에서의 결과도 선행연구와 비슷한 경향을 나타냄을 확인할 수 있었는데, 압력손실의 변화가 점진적으로 증가하여 포화에 이르는 것과 마찬가지로 냉방능력도 점진적으로 감소하며 포화에 이르는 것으로 분석되었고 변화 경향도 압력손실의 변화 폭에 비하여 냉방능력의 변화 폭이 작게 나타남을 확인하였다. 특히 냉방능력의 변화는 압력손실의 상승에 대하여 아래의 식과 같이 0.35에 비례하여 감소하는 것으로 측정되었다.

$$\Delta Q = -0.35\Delta P \quad (6)$$

5. 결론

본 연구에서는 파울링 가속장치를 통한 열교환기의 성능 변화 특성에 대한 실험과 모델링을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 공기조화기용 핀-관형 열교환기에서 입자상 파울링에 의한 압력손실의 증가와 냉방능력의 감소를 예측할 수 있는 모델링 식을 도출하였다.

(2) 본 연구에 사용된 슬릿형 핀-관 열교환기에 대하여 통과 유속과 분진의 농도에 의해 변화하는 파울링 압력손실은 다음의 관계식으로 표현된다.

$$\Delta P_f = (64 - 376.84e^{-4V}) \times (1 - 1.25e^{-9.38 \times 10^{-3} \times C_0 \times t})$$

여기서, ΔP_f [%]는 시간에 따라 변화하는 파울링에 의한 압력손실의 변화를, V [m/sec]는 열교환기를 통과하는 공기의 유속을, C_0 [g/m³]는 열교환기로 유입되는 공기중 분진의 질량농도를 나타내며 t [min.]는 파울링 진행 시간을 각각 나타낸다.

(3) 증발기용 열교환기의 파울링에 의한 유입 유량 감소를 고려한 냉방능력의 저하는 압력손실 증가에 대하여 다음과 같은 관계로 나타난다.

$$\Delta Q = -0.35\Delta P$$

후 기

본 연구는 LG전자(주)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Webb, R. L., 1994, Principles of enhanced heat

transfer, John Wiley & Sons Inc., p. 287.

2. Ahn, Y. C., Cho, J. M., Lee, J. K., Lee, H. U., Ahn, S. P., Youn D. H., Ha S. C., Kang, T. W., and Ock, J. H., 2003. An experimental study of the air-side particulate fouling of finned-tube heat exchangers of air conditioners by using accelerated particle-loading system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 10, pp. 802-808.

3. Siegel, J. A., 2002, Particulate fouling of HVAC heat exchangers, Ph. D. thesis, University of California, Berkeley, U.S.A.

4. Kern, D. Q. and Seaton, R. E., 1959, A theoretical analysis of thermal surface fouling, British Chemical Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 258-262.

5. Ahn, Y. C., Cho, J. M., Lee, J. K., Lee, H. U., Ahn, S. P., Youn D. H., and Kang, T. W. 2003. An Experimental Study of the Air-side Particulate Fouling in Fin-and-Tube Heat Exchangers of Air Conditioners, Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 873-877.

6. Ahn, Y. C., Cho, J. M., Lee, J. K., Lee, H. U., Ahn, S. P., Youn D. H., Ha S. C., and Kang, T. W., 2003. Performance evaluation of heat exchangers due to air-side particulate fouling in the air conditioners, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 447-453.

7. Korean Standard, KS C 9306, 2002, Air Conditioners.

8. Japanese Industrial Standard, JIS Z 8901, 1995, Test powders and test particles.

9. Bott, T. R., and Bemrose, C. R., 1983, Particulate fouling on the gas-side of finned tube heat exchangers, Journal of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 178-183.