

공기조화기용 열교환기의 공기측 파울링 입자 분석 연구

안 영 철, 신 희 수, 황 유 진, 이 창 건, 이 재 근[†],
이 현 옥*, 안 승 표*, 윤 덕 현*, 하 삼 철*, 강 태 옥**

부산대학교 기계공학과, *LG전자 디지털 어플라이언스 사업본부 연구소, **LG전자 에어컨사업부

Characteristics of the Air-side Particulate Fouling Materials in Finned-Tube Heat Exchangers of Air Conditioners

Young-Chull Ahn, Hee-Soo Shin, Yu-Jin Hwang, Chang-Gun Lee, Jae-Keun Lee[†],
Hyun-Uk Lee*, Seung-Phyo Ahn*, Deok-Hyun Youn*, Sam-Chul Ha*, Tae-Wook Kang**

Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Digital Appliance Company Research Lab., LG Electronics, Gyeongnam 641-711, Korea

**Air Conditioner Division, LG Electronics, Gyeongnam 641-713, Korea

(Received February 19, 2003; revision revised June 10, 2003)

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 the characteristics of the air-side particulate fouling materials in finned-tube heat exchangers of air conditioners. Air conditioners being used in the field such as inns, restaurants, and offices are collected in chronological order in use. Typical fouling materials on the heat exchangers include fibers and dusts ranged from 6.6 to 20.9 μm in mass median diameter.

Key words: Heat exchanger(열교환기), Particulate fouling(입자상 파울링), Fouling materials(파울링 물질), Indoor dusts(실내분진), Air conditioner(공기조화기)

1. 서 론

열교환기는 공조설비의 핵심부품으로서 생활수준의 질적 향상 및 대기오염 등의 이유로 최근 가정이나 사무실 등에 그 수요가 급증하고 있으며 향후 지속적인 수요증가가 있을 것으로 예상된다. 특히, 냉방용 공기조화기에 대한 수요가 증가하면서 설치 후 유지, 관리에 대한 중요성이 점점 중요한 요소로 자리잡게 되었다. 그런데 대부분의 가정이나 사무실 등에서 공기조화기의 사

용중 주기적인 청소와 점검은 거의 이루어지지 않고 있으므로 실내 분진 및 오염물의 퇴적으로 인한 열교환기 표면의 파울링(fouling) 현상의 초래와 그에 따른 냉방능력 감소와 에너지소모의 증가는 반드시 해결되어야 할 문제점의 하나로 자리잡게 되었다.

열교환기의 전열 표면에 부착, 퇴적되어 열전달 현상을 방해하고 압력손실을 증가시키는 파울링은 일반적으로 공기 중에 부유된 입자가 열교환기를 통과하면서 관성충돌, 브라운 확산, 난류 확산, 간섭, 중력침강, 열영동력 등의 메커니즘에 의하여 전열면으로 이동한 뒤 부착되어 발생한다.^(1,2)

파울링은 열교환기와 에너지관련설비(냉난방장치, 보일러, 공업로) 등에서 심각한 문제를 야기

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2455; fax: +82-51-512-5236

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

할 뿐만 아니라 열·유체역학적으로 매우 중요한 문제 중의 하나이다. 특히, 공조기용 열교환기의 파울링은 냉방능력의 저하뿐만 아니라 세균 및 박테리아가 서식할 수 있는 환경을 제공해 주기 때문에 실내 공기질의 저하로 인해 거주자의 건강에 악영향을 미칠 수 있으므로 파울링 발생을 억제하기 위한 주기적인 유지, 관리가 반드시 필요한 실정이다. 따라서 후 처리기술이라 할 수 있는 청정작업보다는 예방기술이라 할 수 있는 파울링 저감기술은 에너지절약 및 설비유지, 보수비를 크게 줄일 수 있는 미래지향적 기술이라 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 실공간에서 사용되어지고 있는 공기조화기용 열교환기의 공기측 파울링 현상분석을 통하여 침적되는 입자의 물리적, 화학적 특성을 분석하고, 입자의 부착특성 및 발생원을 분석하여 파울링 저감을 위한 기초자료로 사용하고자 한다.

2. 파울링 입자 특성분석 방법

본 연구에서 사용된 공기조화기는 먼지를 함유한 공기가 전처리필터(prefilter)를 거쳐 바로 증발기용 열교환기로 유입되는 구조이며 부가적인 공기청정장치는 부착되지 않은 것들이다. 먼지제거용 전처리필터는 약 30 mesh의 망으로 구성되어 있으며, 열교환기는 핀-관(finnd-tube) 형식으로 1 inch당 15~18개의 핀을 가지고 있다. 수거된 공기조화기는 3~15년간 사용된 벽걸이형과 창문형으로, 벽걸이형은 사무실, 식당 등에서 수거되었으며 창문형은 해안가 여관에서 사용된 것을 수거하였다.

공기조화기는 사용된 장소 및 연도에 따라 열교환기에 형성되는 파울링 입자의 형상 및 성분이 다르며, 입자의 크기 및 성분에 따라 파울링 형성 메커니즘 또한 다르게 나타난다.

파울링 입자는 물리적, 화학적 특성에 따라 분석할 수 있는데, 물리적 특성은 입자의 크기와 형상에 대해 분석하였으며 화학적 특성으로 입자의 구성성분을 분석하였다. 파울링 입자는 공기조화기의 사용연수 및 적용공간에 따라 채취하여 분석하였으며, 입자의 형상분석을 위해 광학현미경(Nikon, Eclipse ME 600), 전자현미경(Hitachi, S-4200)을, 성분분석을 위해 에너지 스펙트럼 분

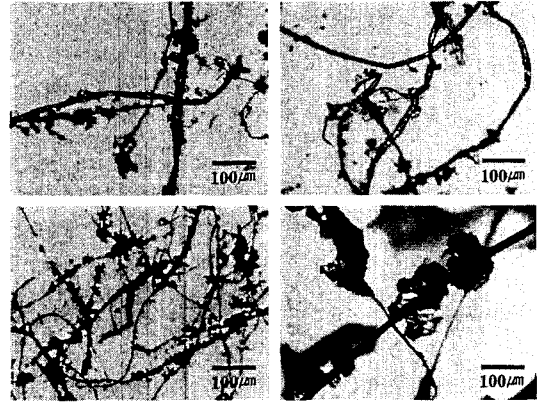


Fig. 1 Fouling particles attached on the pre-filters.

석(energy dispersive X-ray analysis)을 사용하였다. 파울링 입자의 크기분포 측정은 입도 분석장치(API, Aerosizer)를 사용하였다.

3. 분석결과 및 고찰

3.1 전처리필터에 포집된 입자 분석

본 연구에서 사용된 공기조화기는 열교환기 전단에 약 30 mesh의 기공을 가지는 전처리필터만 설치되어 있는 것들을 대상으로 하였으며, 열교환기 전단에 부가적인 공기청정장치는 부착되어 있지 않았다.

Fig. 1은 공기조화기 전처리필터에 형성된 파울링 입자의 형상을 광학현미경을 통해 분석한 결과이다. 주로 수~수십 μm 굵기의 섬유상 물질과 100 μm 이하의 입자상 물질이 혼합되어 형성되어 있음을 알 수 있다. 전처리필터의 기공 크기는 약 30 mesh(500~600 μm) 정도로 비교적 크기 때문에 개수 측면에서 실내분진의 대부분을 차지하고 있는 10 μm 이하의 입자들은 파울링 초기에는 전처리필터에 포집되지 않고 기류와 함께 전처리필터를 통과하게 된다. 그러나 섬유상 입자들은 지름에 비해 길이가 상당히 길기 때문에 전처리필터의 기공을 빠져나가지 못하고 포집되게 되며 포집된 섬유상 입자들은 2차적인 여과층을 형성하게 되어 미세분진까지도 포집이 가능해진다. 파울링 입자들에 의한 전처리 필터의 막힘은 공조시스템 전체의 압력손실 상승 및 흡입

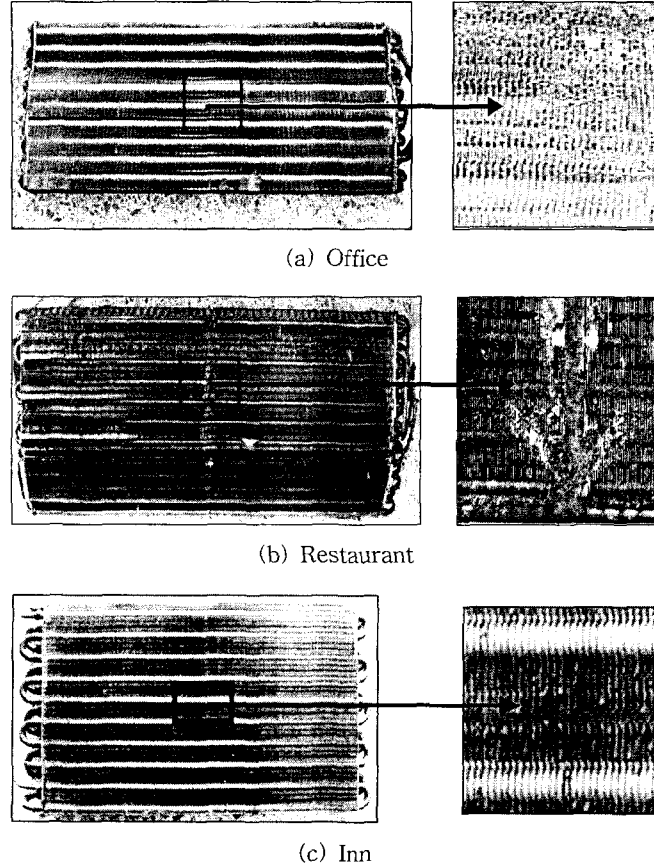


Fig. 2 Photographs of the fouled evaporator heat exchangers used in various places.

유량의 감소를 초래하여 심각한 냉방능력의 저하를 가져온다. 또한 전처리필터에서의 압력손실 상승은 바이패스(bypass) 기류를 발생시키고 여과되지 않은 공기가 열교환기를 직접 통과함으로써 심각한 열교환기 파울링을 초래하게 된다.

3.2 열교환기 파울링 입자 분석

Fig. 2에는 사용장소에 따른 열교환기의 파울링 형성 모습을 나타내었다. 사무실과 식당에서 사용된 공기조화기는 벽걸이형이고 여관에서 사용된 공기조화기는 창문형이다. 사용환경에 따라 다소의 차이는 있으나 모든 시료에서 전처리필터에서 포집되지 않았거나, 혹은 포집된 입자에서 박리되었거나, 전처리필터 자체를 바이패스하여 유입된 입자들이 열교환기 표면에 부착되어 있었으며, 특히 벽걸이형의 경우는 전처리필터가 두 부분으로 분리되어 있어 전처리필터에 의해 덮여지지 않

는 가운데 부분에 집중적으로 파울링 입자들이 부착되어 있는 것을 확인할 수 있다. 반면에 창문형의 경우는 파울링 입자들이 열교환기의 전면에 걸쳐 고르게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 사무실, 식당, 여관에서 사용된 공기조화기용 열교환기에 부착된 파울링 입자의 크기를 측정하여 나타낸 것이다. 사무실, 식당, 여관시료의 파울링 입자의 크기는 각각 6.6, 9.8, 20.9 μm 로 측정되었으며, 여관의 열교환기 파울링 입자의 크기가 20.9 μm 로 가장 큰 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 여관용 공기조화기는 창문형이고 그 외의 사무실, 식당 등은 모두 벽걸이형으로서, 창문형 공기조화기는 일반적으로 1.5m 정도의 높이에 설치되며 벽걸이형은 천장의 바로 아래, 즉 2~2.5m 높이에 설치된다. 그렇기 때문에 실내에서 거주자의 활동에 의해 바닥 혹은 벽에 침전, 부착되어 있던 먼지들이 재비산되게 되

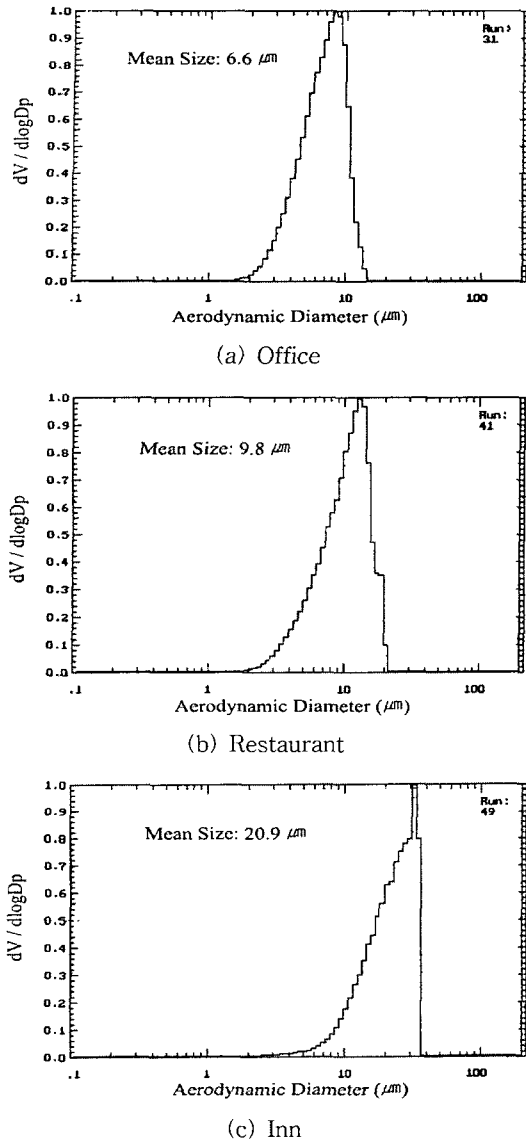


Fig. 3 Size distributions of the fouled dusts on the heat exchangers.

고 상대적으로 설치위치가 낮은 창문형 에어컨이 분진의 영향을 크게 받았기 때문에 분석할 수 있다. 특히, 거주자의 활동에 의한 입자의 재비산은 $5\mu\text{m}$ 이상의 큰 입자일수록 크게 나타나기 때문에⁽³⁾ 창문형 공기조화기에 부착된 파울링 입자들의 크기가 더 크게 나타나게 된다.

Table 1에는 열교환기 파울링 입자의 화학적 조성을 에너지 스펙트럼 분석기로 분석한 결과를 나타내었다. 공기조화기의 실내기용 열교환기 파

Table 1 Chemical components of the fouled dusts in heat exchangers

Element	Applications			
	Indoor unit			Outdoor unit
	Office	Restaurant	Inn*	Inn*
O	64.29	44.59	52.40	46.37
Al	10.58	11.67	11.11	19.25
Si	13.36	21.42	21.41	8.58
K	2.16	1.91	3.40	1.13
S	-	2.80	-	3.70
Na	-	-	-	2.97
Cl	-	-	-	1.83
Ca	3.05	4.06	1.55	3.90
Fe	6.56	13.54	10.14	6.55
Zn	-	-	-	5.72
Total	100	100	100	100

*Seaside samples

울링 입자의 화학적 성분은 대부분 O, Al, Si, Fe, Ca 등으로 구성되어 있고, 해안가 실외기에는 사무실이나 식당의 실내기와 내륙의 실외기용 열교환기의 파울링 성분에는 없는 Na, Cl의 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이는 바닷물의 주요 염류성분 중 하나인 NaCl에서 유입된 것으로서 이러한 염류로부터 유입된 성분에 의해 부식에 많이 노출되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 4에는 공기조화기용 열교환기 파울링 입자의 성분분석 결과와 전자현미경 사진을 나타내었다. 실내에서 사용되는 증발기용 열교환기에서는 사진에서 볼 수 있듯이 실내에서 많이 발생하는 섬유질(의류, 침구류, 종이, 목재 등)의 물질과 거주자에 의해 발생하는 머리카락, 담배연기 등의 분진 입자들이 응집되어 고리 형상을 띠고 있음을 확인할 수 있다. 반면, 해안가 실외기용으로 사용된 응축기용 열교환기는 실내기의 파울링 입자의 형상과는 다르게 섬유상 입자는 거의 찾아볼 수 없으며, 대기분진의 영향을 직접 받아 입자상 물질이 주로 나타남을 알 수 있고 그 외에 나뭇잎의 부스러기, 조류의 깃털 혹은 분비물 등이 부착되어 있는 경우도 확인할 수 있었다.

이상과 같이 실내기용 열교환기와 실외기용 열교환기의 파울링 입자의 종류가 다르고 발생 메커니즘이 다르기 때문에 각각 열교환기의 사용 시간에 따른 전열성능 및 압력손실 변화 경향에

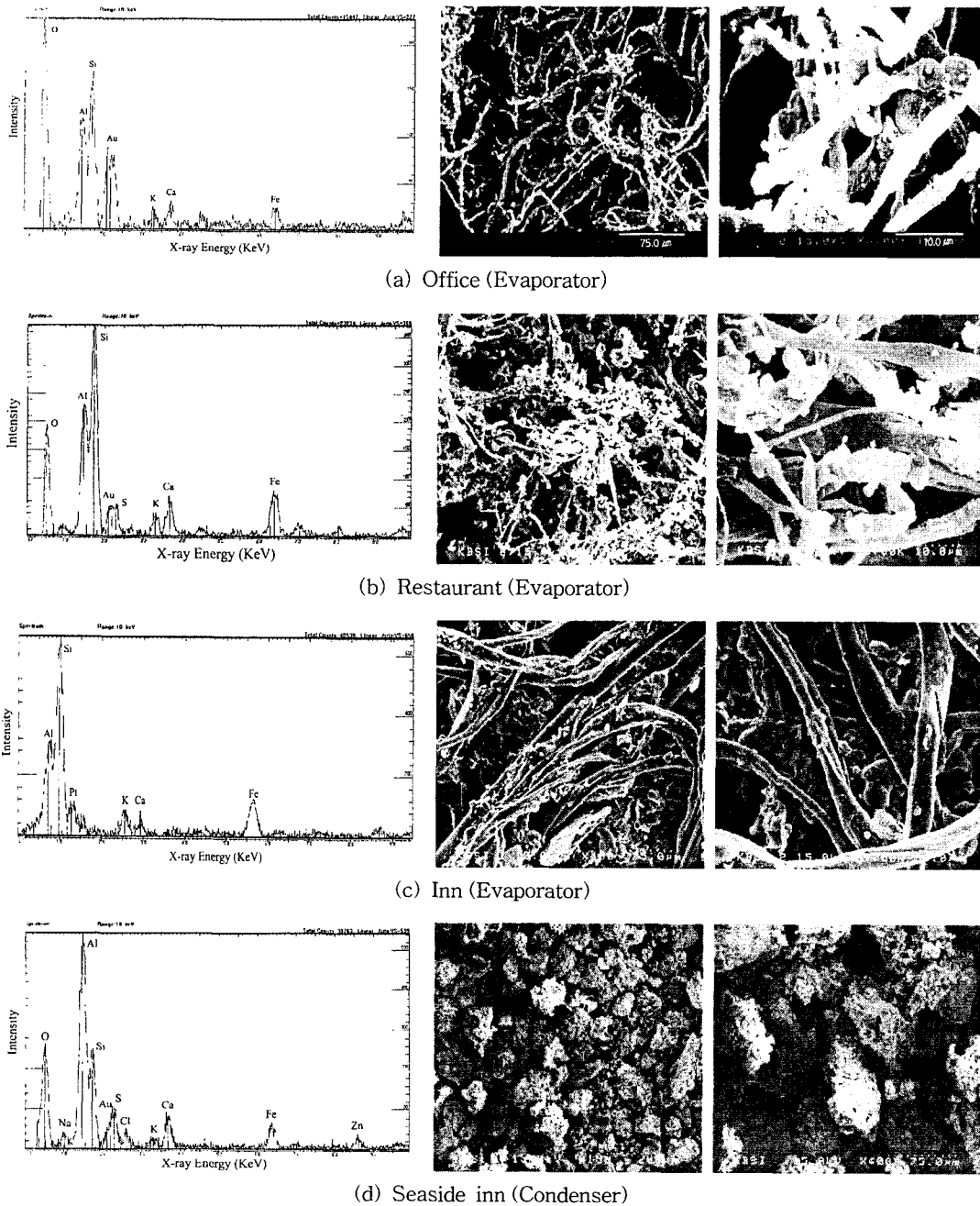


Fig. 4 Photographs of the fouling particles on the heat exchangers used in various places.

도 큰 차이가 있음을 선행연구^(4,5) 결과를 통해서도 알 수 있다.

Fig. 5는 창문형 공기조화기의 열교환기에 형성되는 파울링 물질의 부착특성을 나타낸 것으로서, 실내기용 열교환기는 공기유입 전면부에 파

울링 입자들이 집중적으로 분포하고 있으며 공기가 유입되는 깊이방향으로 열교환기를 절단하여 분석한 결과 파울링 입자는 그다지 깊게 침투하지 못하고 공기유입구로부터 5mm 이내에 집중적으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉, 실내기

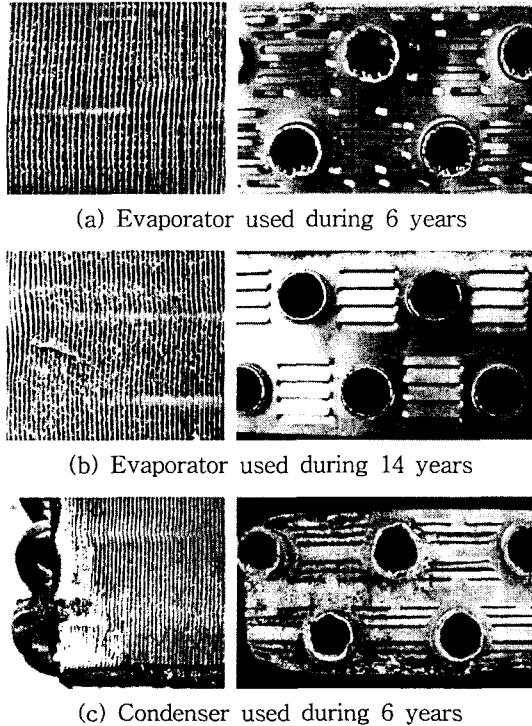


Fig. 5 Photographs of the fouled heat exchangers.

용 열교환기의 공기유입 전면부는 파울링 입자들에 의해 상당히 많이 뒤덮여 있어도 열교환기 후면은 비교적 깨끗하게 유지되고 있는 모습을 확인할 수 있다. 그러나 실외기용 열교환기는 시간이 지남에 따라 부식이 진행되기 때문에 공기유입 전면부나 후면부 모두 비슷한 상태의 부식 양상을 나타내고 있다. 그리고 열교환기가 수직으로 설치되기 때문에 상부보다는 하부에 부식이 더 크게 나타나는데 창문형 공기조화기의 경우 실내기와 실외기가 일체형으로 되어 있기 때문에 실내기에서 발생하는 응축수가 흘러 나가면서 실외기용 열교환기의 하부를 젖게 만들고 비나 눈 등의 기상변화에 직접 노출되며, 특히 하부에는 대기 중의 모래먼지나 여러 가지 이물질이 쌓여 있어 습한 환경이 오래 지속되기 때문이다.

Fig. 6은 실내기용 열교환기의 공기유입부에 형성된 파울링 입자의 모습을 깨끗한 열교환기 핀 표면과 비교하여 나타내었다. 핀 표면에 형성된 파울링 입자는 점유상 물질도 존재하기는 하나 대부분이 입자상 물질로 이루어져 있으며 공기가 유입되는 전면부로부터 5mm 이내에 집중적으로

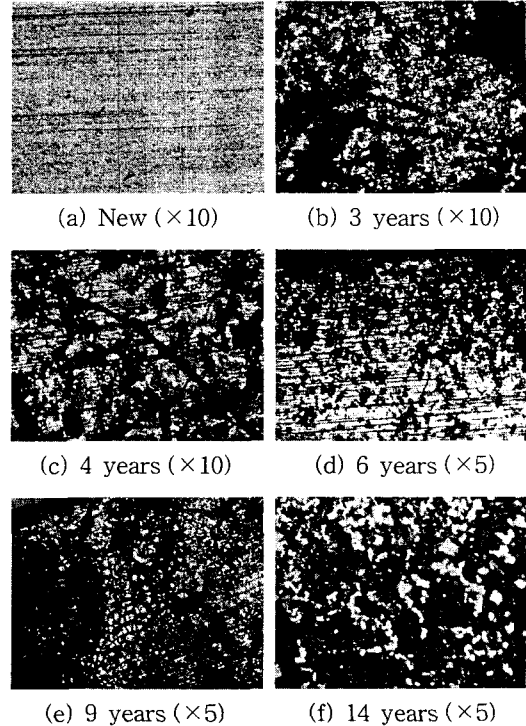


Fig. 6 Photographs of the fin surfaces of the fouled heat exchangers.

형성되어 있다. 이러한 파울링층의 형성은 공기조화기의 사용 초기에는 국부적으로 발생되다가 사용기간이 길어질수록 거의 전 영역으로 확산되며 핀 표면에 부착된 파울링 입자의 모습은 사용연수에 무관하게 비슷한 형상을 나타내고 있다. 그리고 초기 열교환기의 핀 표면에 비해 가로로 길게 그어진 흠집(scratch)이 많이 발생한 것을 알 수 있는데, 이러한 흠집의 발생은 열교환기가 설치되었을 때 응축수가 흘러내리는 방향과 일치하는 것으로 장시간의 사용에 의한 핀 표면에 형성된 친수 코팅층의 손상과 파울링 입자들이 응축수와 함께 흘러내리면서 발생하는 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기조화기용 열교환기에 형성되는 파울링 물질에 대해 물리적, 화학적인 분석을 통해 파울링 형성과정 및 오염물의 발생원에 대한 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 에어컨 열교환기에 부착된 파울링 입자의 특성분석 결과 실내기용 열교환기에는 섬유상 물질과 입자상 물질이 혼합되어 있으며 실외기용 열교환기에는 입자상 물질이 주로 부착되어 있다. 특히 해안가 실외기에는 Na, Cl의 염류가 검출되어 부식환경에 상당히 노출되어 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 사용공간에 따른 파울링 입자의 크기는 6.6~20.9 μm (질량 중위경)로서 여관에서 사용된 열교환기의 파울링 입자가 20.9 μm 로 가장 크게 나타났다. 이는 여관이 다른 공간에 비해 가동시간이 길고 분진 입자들의 재비산 등에 의해 큰 입자에 노출되는 시간이 많았기 때문이다.

(3) 실내기용 열교환기에서의 파울링은 기류가 유입되는 전면부에만 집중적으로 나타나며 열교환기 깊이 방향으로 5mm 이내에 주로 형성된다. 그래서 열교환기의 후면은 비교적 깨끗한 상태가 그대로 유지된다. 반면에 실외기용 열교환기는 시간이 지남에 따라 열교환기 전역에서 부식에 의한 파울링이 발생하며, 특히 상부에 비해 하부에서의 부식이 크게 나타난다. 실외기용 열교환기는 모래 등의 먼지에 의해 열교환기 하부가 항상 덮여 있으며 눈, 비 등에 의해 습한 환경이 오래 유지되기 때문이다.

후 기

본 연구는 LG전자(주)의 지원에 의하여 수행되

었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Marner, W. J., MacDavid, K. S. and Muzio, L. J., 1989, Development of a gas side fouling measuring device, National Heat Transfer Conference, Vol. 108, pp. 305-314.
2. Bott, T. R., 1995, Fouling of Heat Exchangers, Elsevier Science, pp. 55-96.
3. Thatcher, T. R. and Layton, D. W., 1995, Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence, Atmospheric Environment, Vol. 29, No. 13, pp. 1487-1497.
4. Ahn, Y. C., Han, J. G., Cho, J. M., Ock, J. H., Lee, H. W., Ahn, S. P., Youn, D. H. and Lee, J. K., 2002, An experimental study of the air-side fouling in heat exchangers of air conditioners, Proceedings of the 3rd Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, July 11-13, pp. 159-160.
5. Ahn, Y. C., Cho, J. M., Lee, J. K., Ock, J. H., Lee, H. W., Kang, T. W., Ahn, S. P. and Yoon, D. H., 2002, An experimental study of the air-side particulate fouling in heat exchangers of air conditioners, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, Nov. 21, pp. 187-192.