

루버형과 파형핀 열교환기에서 분진이 성능에 미치는 영향에 관한 연구

이 영 립* · 황 순 호

공주대학교 기계자동차공학부

A Study of Dust Effect on Performance of Heat Exchangers with Louver and Wavy Fins

Young Lim Lee* · Soon Ho Hwang

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Chungnam 330-717, Korea

(Received 17 December 2008 / Accepted 6 April 2009)

Abstract : Automotive heat exchangers use louver fins for their high efficiency. However, the efficiency can significantly drop for constructional vehicles or heavy equipments due to dust deposited on the louver fins with narrow slits. Thus it is necessary to develop new fins that lead to less fouling, so that a better performance can be achieved after exposure to a dusty environment over long period of time. New wavy fins were considered in the study and numerically analysed to compare with louver fins in the areas of air-side pressure drop, heat release rate, and particulate deposition. In addition, an experiment was done on the pressure drop and the particulate deposition. The results showed that the wavy fins would be a better choice for long-term use due to the excellent dust-proof performance in comparison to louver fins, in spite of the initial inferior performance of heat release.

Key words : Wavy fin(파형핀), Louver fin(루버핀), Dust-proof(내분진), Heat exchanger(열교환기), CFD(전산유체역학), Pressure drop(압력강하), Heat release rate(방열율)

Nomenclature

- P : air pressure, kPa
- Q : heat release rate, W
- Re : reynolds number
- T : temperature, K
- V : velocity, m/s

Subscripts

- p : pitch
- θ : angle

1. 서론

분진이 많이 발생하는 공사현장에 사용되는 건설 차량이나 중장비는 작업 중에 발생하는 분진으로 인하여 열교환기의 효율 저하를 경험하게 된다.

따라서 일반 승용차에 사용되는 고효율의 루버핀을 사용할 경우 루버 핀의 좁은 틈새 및 유로의 복잡성으로 인하여 많은 오염입자가 점착 될 가능성이 높다. 점착된 분진은 공기의 원활한 흐름을 방해하고 이는 방열 성능의 악화를 초래하게 된다. 또한, 형성된 분진으로 인한 공기 통과 속도 감소는 압력 강하를 더욱 증가시키게 된다. 따라서 이와 같은 내분진 성능은 건설 차량이나 중장비 열교환기 개발에 매우 중요한 요소이다.

*Corresponding author, E-mail: ylee@kongju.ac.kr

핀-관(fin-tube) 열교환기 분야에 대한 연구는 오래 전부터 시작되어 방대한 연구가 수행되어 왔다. 먼저 Kays와 London¹⁾은 수많은 형상을 가진 열교환기에 대하여 열전달과 압력강하에 관한 실험 데이터를 발표하였다. Webb²⁾은 염료를 이용한 유동가시화를 시도하였는데 유동효율은 레이놀즈수, 루버 피치, 핀 피치, 루버 각도가 증가하면 높아지고, 임계 레이놀즈 수 이상에서만 루버 피치와 핀 피치만의 함수라고 주장하였다. Kajino와 Hiramatsu³⁾는 염료주입법을 이용하여 Re_{Lp} 가 10^3 까지는 유동이 층류임을 보였으며 Antoniou 등⁴⁾은 열선 풍속계를 사용하여 Re_{Lp} 가 10^3 이하에서는 층류임을 다시 한번 확인하였다.

한편, Park 등⁵⁾은 수치 해석을 사용하여 루버 핀을 가진 증발기의 열 성능 해석을 성공적으로 수행하였고 Atkinson 등⁶⁾은 2차원 및 3차원 수치모델을 사용하여 루버핀을 가진 열교환기 성능을 예측하였다. 또한, Lee 등⁷⁾은 내분진 성능을 높일 수 있는 3차원 파형핀을 개발하였다.

본 연구에서는 3차원 파형핀의 내분진성능을 알아보기 위한 수치해석 및 실험을 수행하였다. 이를 위해 Fig. 1과 같이 동일한 제원의 루버핀을 고려하여 공기측 압력강하, 방열량 및 내분진 성능을 비교하였다.

Table 1에 본 연구에서 고려한 네 가지 핀을 각각 나타내었다. 핀 피치의 길이는 4.0 mm와 4.4 mm 두 가지를 고려하였다.

Table 1 Specification of fin types with various fin pitch

Fin name	Fin type	Fin pitch (mm)
L4.0	Louver	4.0
L4.4	Louver	4.4
W4.0	Wavy	4.0
W4.4	Wavy	4.4

2. 수치해석 및 실험

2.1 압력강하 및 방열량 해석 방법

본 연구에서 고려되어진 유동은 3차원, 비압축성, 정상상태 및 층류유동을 가정하여 상용 열유동 해석 프로그램인 Fluent⁸⁾를 이용하여 해석하였다. Fig. 2에 루버핀과 파형핀의 제원을 각각 나타내었다. 핀

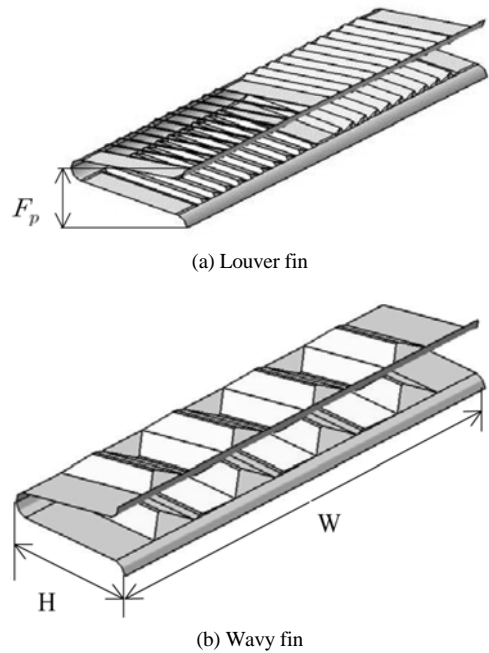


Fig. 1 Schematic of louver and wavy fins

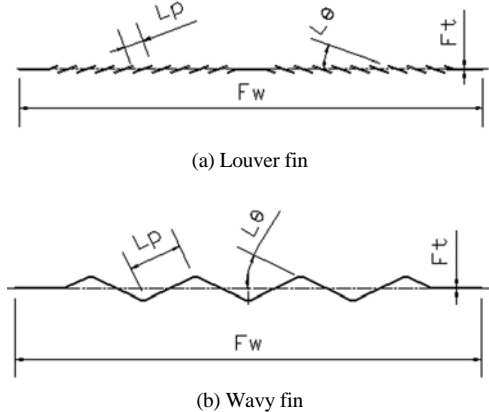


Fig. 2 Specification of louver and wavy fins

피치 F_p 는 4 혹은 4.4 mm, 루버 피치 L_p 는 각각 1.42 및 2.37 mm, 루버 각도 L_θ 는 24° , 핀 두께 F_t 는 0.1 mm이다. 또한, 핀의 높이 H 는 10 mm, 폭 W 는 32mm이다. 재료는 알루미늄 합금이며 공기의 온도는 298K, 핀의 온도는 343K로 가정하였다.

컴퓨터의 성능제한으로 전체 열교환기를 대상으로 하는 해석은 아직 타당하지 않으므로 Fig. 1과 같이 핀 피치에 해당하는 하나의 단위구간만을 고려하였다.

경계조건은 주기 조건(periodic condition)을 양 옆과 위아래로 설정하였고, 전면 풍속은 2 ~ 8 m/s를 고려하였다.

사용된 격자 종류는 사면체이고 격자 수는 약 150만개~170만개이다.

본 연구에서는 루버핀과 파형핀 열교환기의 성능 비교를 위하여 다음과 같은 열교환기 방열율을 사용하였다.

$$Q = \dot{m}_a (h_{a,outlet} - h_{a,inlet}) \quad (1)$$

여기서, \dot{m}_a , $h_{a,inlet}$ 및 $h_{a,outlet}$ 은 공기의 질량유량 및 입구와 출구에서의 엔탈피를 각각 나타낸다.

또한, 핀효율은 핀 표면온도가 베이스 온도와 같다고 가정할 때의 열전달율에 대한 실제 열전달율의 비이며 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_f = \frac{q_f}{hA_f(T_b - T_\infty)} \quad (2)$$

여기서, q_f , h , A_f , T_b 및 T_∞ 는 실제 열전달율, 열전달 계수, 핀면적, 핀 베이스 온도 및 주변 온도이다.

한편, 열교환기의 방열효율은 다음과 같은 j 계수로써 나타낼 수 있다.

$$j = \frac{\eta h Pr^{2/3}}{\rho u_c C_p} \quad (3)$$

여기서, η , h , Pr , ρ , u_c 및 C_p 는 표면 효율, 열전달 계수, 프란틀(Prandtl) 수, 밀도, 최소 단면 유속, 비열을 각각 나타낸다.

2.2 분진성능 해석 방법

건설현장에서의 비산먼지는 크기가 대략 10 μm 내외로 입자 크기가 충분히 작으므로 본 연구에서는 유동과 연계시키지 않고 유동 해석이 끝난 후 분진 입자 거동 해석을 수행하였다. 이것은 입자가 유동에 영향을 끼치지 않는 단방향 연계(one way coupled) 해석이다. 약 3000개의 분진 입자가 입구로 유입된다고 가정하였고 이 중에서 몇 개의 입자가 벽에 점착되는지 수량을 확인하였다. 벽에 점착된 입자의 개수를 구하기 위하여 유동장을 해석 한 후에 유동장 입구에서 일정 크기의 입자를 띄워 유속에 의해 입자가 흘러가는 경로를 추적하였다. 점착

모델은 사용하지 않고 단지 입자가 벽에 부딪히는 순간 반사되지 않고 모두 벽에 포집(trapped)되는 것으로 가정하였다.

입자 크기와 포집율과의 상관관계를 알아보기 위하여 일정한 전면 속도에서 입자 크기를 1~10 μm 로 변화시켰다. 또한 전면 속도 변화에 따른 포집율 변화를 알아보기 위해 10 μm 의 입자 크기에 대해 전면 속도를 2~8 m/s로 변화시켰다.

2.3 실험 방법

풍동 시험기 안에 열교환기를 위치시켜 속도에 따른 압력강하 실험을 실시하였다. 단단히 고정된 열교환기에 2,3,4,5,6,7,8m/s의 전면풍속을 주었으며 열교환기의 앞과 뒤에서 피토투브를 이용하여 압력을 측정하였다. 핀 형상에 따른 압력강하 변화를 알아보기 위하여 핀 피치가 4.4mm인 열교환기를 고려하였다.

분진 실험의 경우 실제 분진 대신 Fig. 3과 같이 초음파 진동자를 사용하여 만든 수증기를 사용하였다. 초음파 수증기의 입자 크기는 물분자의 약 8만 배로써 물분자가 0.00014 μm 이므로 약 10 μm 의 크기를 갖는다. 초음파 수증기 발생기의 출구부분과 열교환기는 속도에 상관없이 일정하게 0.22m의 거리를 유지시켰으며 열교환기 뒤에 0.14A의 전력을 가진 팬 두개를 설치하였다. 팬을 이용해 10분간 강제적으로 초음파 수증기를 흡입하였으며 이 과정으로 인해 핀 유로에 응축되는 물의 양으로 내분진 성능을 간접적으로 비교할 수 있었다. 본 연구에서는 4.4mm의 핀피치를 가진 루버형과 파형핀 열교환기

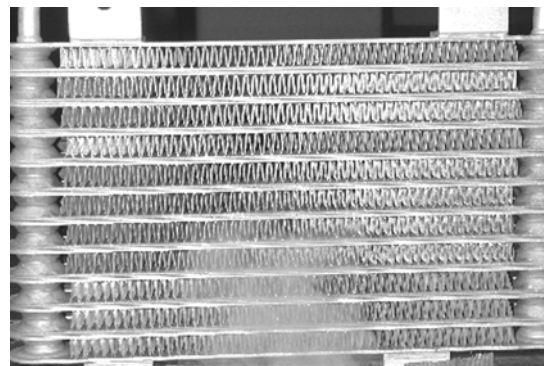


Fig. 3 Photo of water droplets across the heat exchanger

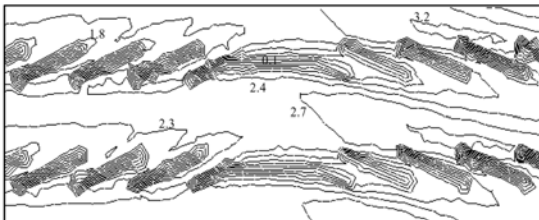
만을 대상으로 실험하여 핀 피치 변화에 따른 내분진 성능비교는 수행하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

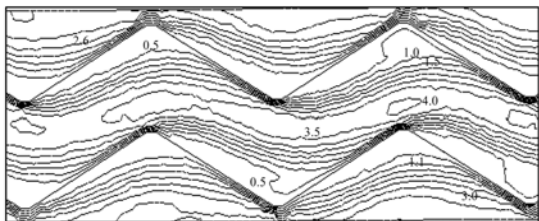
3.1 압력강하 및 방열량 해석 결과

먼저 핀높이의 1/2에 해당하는 단면(section plane)에서 루버핀과 파형핀을 지나는 전형적인 속도장을 Fig. 4에 나타내었다. 속도장 분포는 루버핀의 경우가 상대적으로 균일하고 파형핀의 경우에는 가속이 심하게 발생함을 알 수 있다. 실제로 최대 속도는 루버핀의 경우 약 4.1 m/s이고 파형핀의 경우 약 4.7 m/s로 해석되었다. 이것은 파형핀이 상대적으로 공기가 잘 빠져 나가고 있다는 것을 의미한다.

다음으로 동일한 조건에서 루버핀과 파형핀의 공기측 압력강하를 비교해 보았다. Fig. 5와 6에 핀 피치가 4.0과 4.4 mm일 때 루버핀과 파형핀의 압력강하를 각각 나타내었다. 핀 피치가 4.0일 때 파형핀의 압력강하가 루버형보다 평균적으로 약 11% 정도 적었으나 전면 공기 속도가 증가할수록 그 차이는 줄어들어 5 m/s에서는 거의 압력 강하 값이 차이가 나지 않았다. 이러한 경향은 핀 피치가 4.4 mm일 때도 유사하며 전면풍속이 커질수록 파형핀의 압력강하가 루버핀보다 더 가파르게 증가함을 알 수 있다.



(a) Louver fin



(b) Wavy fin

Fig. 4 Contours of velocity magnitude at $V_{in} = 2 \text{ m/s}$ and $F_p = 4.0 \text{ mm}$

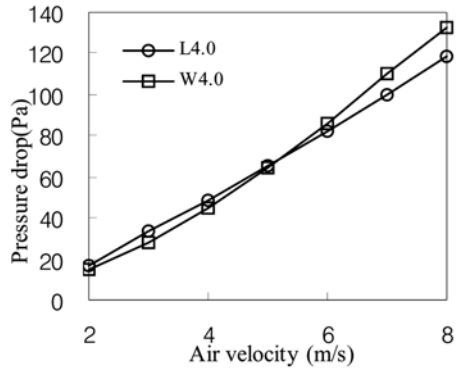


Fig. 5 Variation of pressure drop with air velocity for $F_p = 4.0 \text{ mm}$

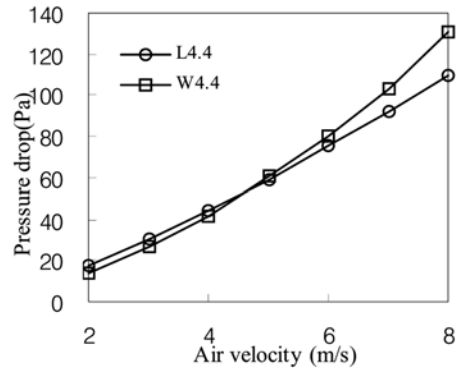


Fig. 6 Variation of pressure drop with air velocity for $F_p = 4.4 \text{ mm}$

한편, 핀 피치를 4.0 mm에서 4.4 mm로 10% 증가시키면 공기측 압력 강하는 약 7% 감소함을 보였다. 본 연구에서 방열율은 하나의 단위 구간에서 교환되는 열량을 의미한다. 전체 열교환기의 방열율은 단위 구간의 개수를 곱하여 얻을 수 있겠다.

Fig. 7에 핀 피치가 4.0 mm 일 때 공기속도에 변화에 따른 루버핀과 파형핀에 대한 방열율을 나타내었다. 초기 전면 풍속 2m/s에서 8m/s까지 변하는 동안 두 핀 모두 방열율이 증가하였고 초기 전면 풍속 2 m/s에서 루버핀의 방열율이 파형핀 대비 약 28% 더 많았다. 전면 풍속이 증가할수록 이러한 방열율 차이는 28%에서 33%까지 점진적으로 증가하였다.

이는 루버핀이 파형핀 대비 압력강하는 약 11% 증가시키지만 방열율은 약 32% 증가시켰다. 이는 파형핀과 루버핀의 표면적이 같다는 사실을 유추해보면 루버핀의 열전달계수가 파형핀에 비해 훨씬

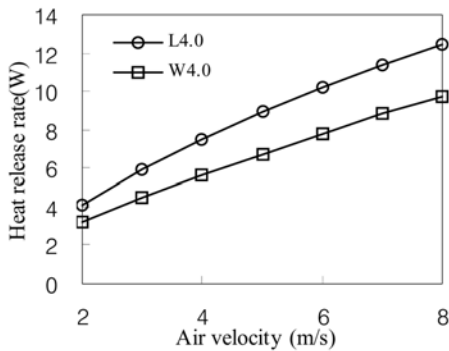


Fig. 7 Variation of heat release rate with air velocity for $F_p = 4.0$ mm

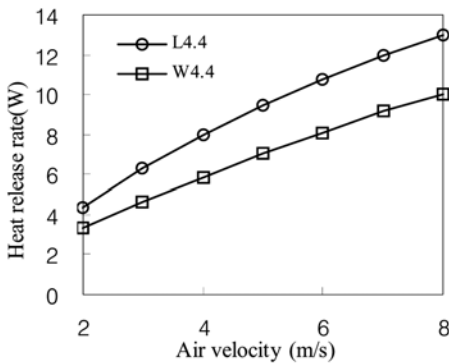


Fig. 8 Variation of heat release rate with air velocity for $F_p = 4.4$ mm

크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에 핀 피치가 4.4 mm일 때 공기속도에 변화에 따른 루버핀과 파형핀에 대한 방열율을 나타내었다. 전반적으로 핀 피치가 4.0 mm일 때와 같은 경향을 보여준다. 하지만 전면 풍속이 증가할수록 두 핀의 방열율 차이는 32%에서 36%로써 핀 피치가 4.0mm인 경우 대비 루버핀의 방열율이 조금 더 증가하였다. 한편 핀 피치가 4.0 mm에서 4.4 mm로 10% 증가하였지만 방열율은 평균적으로 약 4.2% 증가하는데 그쳐 전체 열교환기 방열율은 오히려 약 5.3% 감소하였다. 따라서 오염이 없는 환경에서는 파형핀 대신 루버핀을 사용하는 것이 매우 적절한 선택이라 사료된다.

3.2 분진성능 해석 결과

내분진 성능을 예측하기 위하여 전면 풍속 2 m/s를 유지하면서 입자 크기를 1, 5, 7.5, 10 μm 로 바꾸어

가며 핀에 얼마만큼의 분진이 점착되는지를 해석하였다.

Fig. 9에 입자크기에 따라 점착되는 분진 입자 비율을 나타 내었다. 루버핀의 경우 입자 크기가 증가함에 따라 점착비율이 10에서 50% 가까이 증가되었다. 이는 건설현장에서 발생하는 비산 먼지가 10 μm 내외인 것을 감안할 때 심각한 오염이 예상되어 주기적인 세척이 요구된다. 반면에 파형핀은 5 μm 까지는 거의 점착이 발생되지 않고 그 이상의 입자크기에 점착이 발생하는데 10 μm 에서도 점착비율이 루버핀에 비해 1/2정도 밖에 지나지 않아 매우 우수한 내분진 성능을 보여 주고 있다.

Fig. 10에 입자 크기가 10 μm 인 경우 전면 풍속에 따른 분진 입자의 점착 비율을 나타내었다. 점착비율은 초기 투입된 입자 개수 대비 벽에 포집된 입자

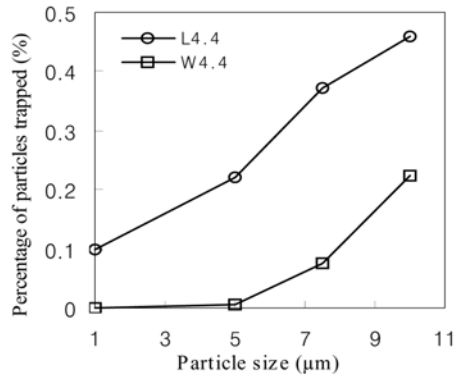


Fig. 9 Variation of percentage of particles trapped with particle size for $F_p = 4.4$ mm

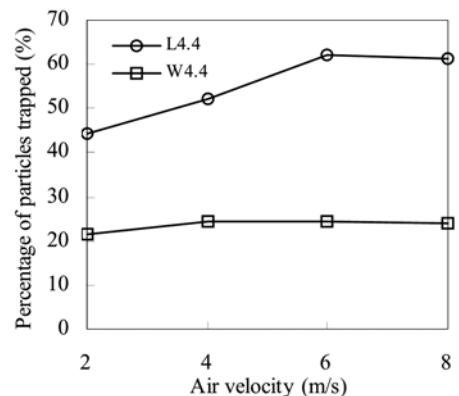


Fig. 10 Variation of percentage of particles trapped with air velocity for particle size of 10 μm

개수의 비율을 의미한다. 루버 핀의 경우 전면 풍속이 증가함에 따라 점착비율이 계속 증가하는 경향을 보여주는 반면 파형핀의 경우 전면 풍속의 크기에 상관없이 비교적 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 따라서 루버핀은 입자 크기 뿐만 아니라 전면 풍속에 대해서도 점착율이 증가하여 파형핀 대비 내분진 성능이 매우 취약함을 다시 한번 보여 주고 있다.

열교환기에서 분진 입자의 점착은 공기 유동의 방향을 통한 압력 강하 상승 및 방열율 감소를 유발하게 된다.

3.3 압력 강하 실험 결과

Fig. 11에 전면 풍속에 따른 공기측 압력 강하의 변화를 나타내었다. 실험으로 측정된 압력 강하는 이 전 연구^{5,7)}에서와 마찬가지로 정성적으로 일치하나 정량적으로는 큰 차이를 보였다. 저속에서는 루버핀의 압력 강하가 크나 고속으로 가면 역전되어 파형핀의 압력 강하가 심해진다. 이러한 사실은 Fig. 6과 같이 수치해석으로도 동일하게 예측되었다. 또한 모든 속도 범위 내에서 실험을 통해 나타난 압력 강하는 수치해석에 비해 루버핀의 경우 약 2배, 파형핀의 경우 약 2.2배의 상승을 보였다.

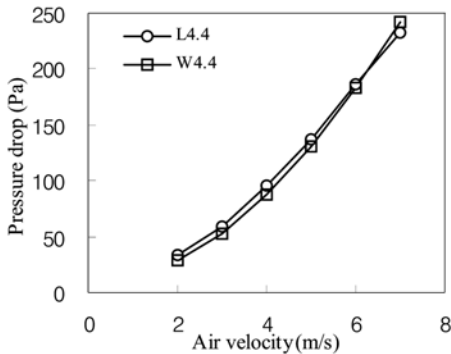


Fig. 11 Variation of pressure drop with air velocity

3.4 분진 성능 실험 결과

분진 성능 실험은 열교환기 통과 풍속을 변화시켜 가며 실시하였다. 통과 풍속은 팬의 회전수를 조절하여 변화시켰는데 팬의 후방에서 최대 풍속 기준으로 2,4,6 및 8 m/s로 변화시키었다.

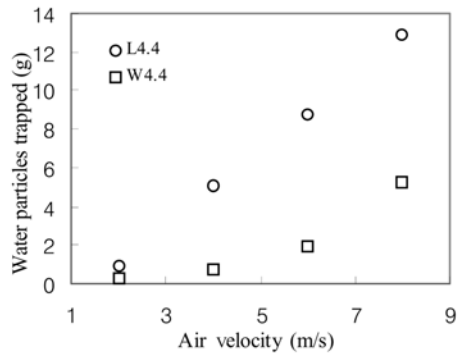


Fig. 12 Variation of water particle trapped with air velocity

Fig. 12에 전면 풍속에 따른 응축된 물의 양을 나타내었다. 2m/s와 8m/s의 통과 풍속에서 루버핀의 경우 각각 0.9g과 12.9g이 응축되었으며, 파형핀의 경우 0.3g과 5.3g이 응축되었다. 통과 풍속이 증가할수록 핀 형상에 상관없이 수증기의 응축양이 증가하였고 파형핀의 경우가 루버핀에 비해 응축량이 적음을 알 수 있다. 이는 파형핀 열교환기가 루버핀에 비해 내분진 성능이 훨씬 우수하리라는 것을 간접적으로 유추할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수치 해석을 통하여 파형핀과 루버핀의 내분진 성능을 분석하였다. 또한 공기측 압력강하와 방열율에 대한 비교도 이루어졌다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 압력 강하는 저·중속에서는 루버핀이 크나 6m/s 이상의 고속에서는 역전되어 파형핀이 커지게 된다. 이는 저·중속에서는 파형핀, 고속에서는 루버핀이 효율적이라는 것을 의미한다.
- 2) 성능 해석 결과에 의하면 루버핀의 경우 공기측 압력 강하는 파형핀 대비 평균적으로 약 11%가 높지만 방열율은 약 33% 정도 향상된 결과를 보여 준다. 이것은 비분진 환경에서는 루버핀의 열전달계수가 파형핀에 비해 훨씬 크다는 것을 의미한다.
- 3) 수치해석 결과에 의하면 핀피치를 4.0mm에서 4.4mm로 10% 증가시키었을 때 압력 강하는 약 7% 정도 감소하였고 방열율은 약 4.2% 증가하는데 그쳐 전체 열교환기 방열율은 오히려 5.3% 감

소함을 보여 준다. 이는 열교환기 설계시 핀피치 역시 중요한 최적화 대상임을 보여 준다.

- 4) 파형핀의 내분진 성능이 루버핀 대비 약 2배 이상 우수하다는 것이 수치해석으로 판명되었는데 이는 초음파 수증기를 이용한 실험에서도 재확인되었다.

결론적으로 본 연구에서 고려된 3차원 파형핀은 루버핀 대비 방열량 성능은 열세이지만 6 m/s 이하의 속도에서는 압력 강하 성능이 우수하였다. 또한, 파형핀은 루버핀 대비 내분진 성능이 양호한 것으로 나타나 건설 차량이나 중장비 등에 성공적으로 사용될 가능성이 있다. 향후 실제 건설 현장의 분진 환경에서 파울링 실험을 통한 검증이 요구된다.

References

- 1) W. M. Kays and A. L. London, Compact Heat Exchangers, 3rd Edn, McGraw-Hill, New York, 1964.
- 2) R. L. Webb, "The Flow Structure in the Louvered Fin Heat Exchanger Geometry," SAE 900722, 1990.
- 3) M. Kajino and M. Hiramatsu, "Research and Development of Automotive Heat Exchangers," Heat Transfer in High Technology and Power Engineering, Hemisphere, pp.420-432, 1987.
- 4) A. A. Antoniou, M. R. Heikal and T. A. Cowell, "Measurements of Local Velocity and Turbulence Levels in Arrays of Louvered Plate Fins," Proceedings of the 9th International Heat Transfer Conference, pp.105-110, 1990.
- 5) B.-S. Park, J.-H. Cho and C.-S. Han, "Three Dimensional Analysis for the Performance of the Corrugated Louver Fin for a Vehicle Heat Exchanger," Journal of SAREK, Vol.14, No.2, pp.116-127, 2002.
- 6) K. N. Atkinson, R. Drakulic, M. R. Heikal and T. A. Cowell, "Two and Three-dimensional Numerical Models of Flows and Heat Transfer Over Louvered Fin Arrays in Compact Heat Exchangers," International Journal of Heat and Mass Transfer, Pegamon, Vol.41, pp.4063-4080, 1998.
- 7) Y. L. Lee and E. S. Jeon, "Study of Development of Dust-proof Oil Cooler," Transactions of KSAE, Vol.16, No.3, pp.60-65, 2008.
- 8) Fluent, Version 6.1, Fluent, Inc., Lebanon, NH 2005.