

영상처리 및 어파인변환을 이용한 핀튜브 열교환기 오염을 평가 알고리즘 개발에 관한 연구

박성민* · 정명인** · 황광일*** · 조경래†

A study on the development of the fin-tube heat exchanger pollution ratio evaluation algorithm using Image Processing and Affine Transformation

Sungmin Park*, Myungin Jung**, Kwangil Whang*** and Gyeongrae Cho†

Abstract Among the various factors that cause the performance decrease of heat exchangers used in many industries, flow path blocking is one of the important and serious factor. In order to solve this problem, proper maintenance and management of the heat exchanger is important and emphasized. In this study, we developed and algorithm that can quantitatively determine and diagnose the normal and blocked areas of fin-tube heat exchanger using pattern analysis, Gaussian Edge Detection, Image Processing and Affine Transformation techniques. The developed algorithms was applied to the actual heat exchanger and the performance was evaluated by comparing with the manual results. From these results, it was proved that the developed algorithm is effective in evaluating the pollution ratio of the fin-tube heat exchanger.

Key Words : Fin-tube heat exchanger(핀튜브 열교환기), Image Processing(영상처리), Gaussian Edge detection(가우시안 에지 검색), Affine Transformation(어파인변환), Pollution ratio evaluation (오염도평가)

1. 서론

열교환기는 온도가 다른 두 유체의 열 교환을 위한 장치로 그 사용목적에 따라 보일러, 증발기, 냉각기 등과 같은 다양한 형태로 여러 산업

분야에서 널리 사용되고 있다. 이러한 열교환기는 사용 환경 및 목적에 맞추어 형상 및 효율을 최적화 하기 위해 핀플레이트, 핀튜브, 이중관, 원통다관 식 열교환기 등 다양한 형태로 연구 및 발전되어왔다. 최근 열교환기의 형상에 따른 성능을 개선하기 위하여 김건우와 리광훈은 진산가시화를 이용하여 Wavy Fin 열교환기의 주름각에 따른 효율 개선에 관한 연구를 진행하였고^[1], 정태식 등은 광학기술을 이용하는 유동가시화 기법을 통해 열교환기 분배면의 유동을 측정하여 성능 분석을 진행하는 등 열교환기의 성능향상에 관한 많은 연구^[2]가 진행되고 있다.

† Brain Korea 21, Korea Maritime & Ocean University
E-mail: vpascal@kmou.ac.kr

* Graduate School of Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime & Ocean University

** R&D Lab./Reliability, LG Electronics

*** Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime & Ocean University

하지만 개발된 열교환기는 실사용 환경에서 시간이 지남에 따라 성능이 크게 저하되는데 그 요인으로는 크게 부식, 침식, 마모 등과 같은 형상 변형에 의한 성능 저하와 유로의 막힘과 같은 유동 특성 변화에 의한 성능 저하로 분류할 수 있다^{3,4)}.

특히 공기중에 존재하는 머리카락, 동물털, 보푸라기, 먼지 등과 같은 물질들이 열교환기에 핀에 부착 되어 유동의 흐름을 방해하여 성능을 크게 감소시킨다. 따라서, 열교환기의 성능을 유지하기 위하여 적절한 판단 및 관리가 뒷받침되어야 한다. 이를 위해서 산업 분야에서 대량으로 생산 및 설비되어 있는 열교환기의 상태를 진단하고 판단할 수 있는 정량적인 계측 시스템이 필요하다.

한편 최근 광학 기술의 발전으로 카메라를 이용하여 주어진 문제를 해결하기 위한 영상처리 분야가 큰 발전을 이루고 있다. 백운석과 이하운의 연구에 따르면 캐니에지 검출방법과 호프 변환을 사용하여 스크린도어에 접근하는 사람 감지 알고리즘을 개발하였고⁵⁾, 김진만 등은 영상처리를 이용하여 성공적으로 중성자 단층 영상을 생성하는 알고리즘을 개발하였으며⁶⁾, 조명옥 등은 영상처리 및 정규화를 통하여 고효율현미경법의 성능을 향상시키는⁷⁾ 등 영상처리를 활용한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 위와 같이 다양한 분야에서 영상처리가 활용되고 있다.

본 연구에서는 핀튜브 형태의 열교환기에서 발생할 수 있는 열교환기 막힘 및 변형에 대하여 정량적으로 평가할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

이를 위하여 카메라를 이용하여 실사용으로 인해 오염이 발생된 열교환기의 형상을 획득하고, 패턴 분석을 통하여 정상인 영역과 오염된 영역 분류하였다. 오염도 평가를 위하여 열교환기의 에지점 및 영역 정보를 이용하여 전체 영역에 대한 선형변환을 수행하고, 전체 영역에 대한 오염된 영역을 정량적으로 평가하는 알고리즘을 개발하고, 수동 측정 결과와 비교평가를 통한 신뢰도를 평가하였다.

2. 영상 처리 알고리즘

본 논문에서는 생활 및 산업환경에서 사용중인 열교환기의 유지 보수 및 관리를 위하여 열교환기의 영상을 획득하고, 획득된 영상으로부터 열교환기의 오염 정도를 판단하고, 관리할 수 있는 정량적 계측 방법을 개발하는 것으로 Fig. 1과 같은 단계로 구성되어 있다.

Fig. 1과 같이 열교환기 영상에서 오염 영역과 정상 영역을 구분하고, 정량적인 오염도를 평가하기 위해서는 열교환기의 특징을 분석하고, 에지 연산을 통한 핀 영역과 오염 영역을 분류하고, 특징 점들을 비교 분석하여 영상에서의 위치 점을 결정하고, 위치정보를 이용하여 영상을 어파인변환을 수행한다. 이와 같은 방법으로 전체 영역에 대한 오염영역을 정량적으로 평가하게 된다.

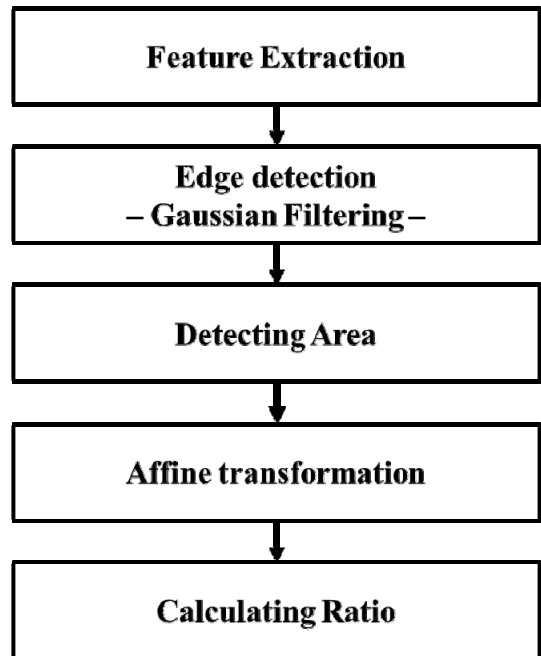


Fig. 1. Flow diagram for pollution measurement system of Fin-tube heat exchangers.

2.1 Feature Extraction

첫 번째 단계인 Feature Extraction은 열교환기의 특징을 추출하는 과정이다. Fig. 2는 CMOS 카메라로 획득한 열교환기 영상으로 해상도는 1600x1200 pixels 이다. 카메라와 열교환기의 거리는 1m를 유지하여 설치되어있다. 그러나 고정 되어있는 카메라와 달리 열교환기는 작업자가 교체하여 설치하는 형식으로 교체작업시 약 $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 의 각도 차이와 $\pm 50\text{mm}$ (약 ± 100 pixels) 이내의 차이가 발생하였다. 이를 보정하기 위해 어파인 변환을 사용하며 자세한 내용은 2.4절에서 설명된다. 사용된 열교환기는 핀튜브 형태의 열교환기로 Fig. 2에서 보이는 것처럼 4개의 튜브와 핀으로 구성 되어 있으며, 이를 양끝에 철재 프레임이 지지하고 있는 구조이다. 전체 구조에 대한 영역을 정의하기 위하여 양 끝의 프레임을 두개의 수직 에지로 정의하고, 열교환기 상하 끝 단을 전체 영역으로 하는 두개의 수평 에지로 정의하여 특징점 데이터를 생성하고, 전체 계측 영역을 정의하였다.

2.2 Edge Detection

핀튜브 열교환기의 영상에서 핀이 있는 부분과 없는 부분에서 명확한 명도 차를 가지게 되며, Fig. 2에서 보이는 것처럼 하나의 수직 선의 형태로 나타난다. 영상처리에서 이러한 수직 에지를 검색하는 많은 방법이 있지만, 본 연구에서는 핀의 형상 정보를 이용하여 수식(1)로 정의된 가우시안 필터를 이용하여 수직 에지를 검색하였다.

$$G(X, Y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{X^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

수식에서 G는 가우시안 필터이고, σ 수직 선의 두께를 의미한다. 즉, 필터의 X위치에 따라 값이 σ 의 두께로 값이 변하는 수직 필터이다. 본 연구에서는 핀의 간격이 평균 약 14 pixels이였으므로 $\sigma = 3.0$ pixels을 이용하여 필터를 생성

하였다. 수직 에지 필터 E는 수식(2)에 보이는 것과 같이 가우시안 필터의 평균값 \bar{G} 를 이용하여 구하였다.

$$E = G - \bar{G} \quad (2)$$

Fig. 3은 에지 필터 E를 이용한 영상처리 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보이는 것처럼 높은 값과 낮은 값이 일정한 패턴을 보이며 반복되는 것을 알 수 있다. 즉, 그림에서 밝은 부분은 핀이 있는 곳이고, 어두운 부분은 핀과 핀 사이이다.

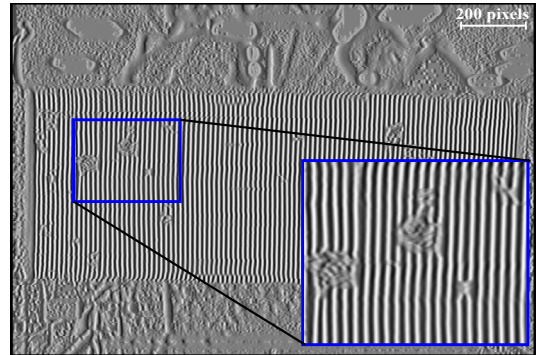


Fig. 3. Image processing with Gaussian edge filter

본 연구에서는 열교환기의 오염된 부분에서는 이러한 반복 패턴이 계측되지 않는 점을 이용하여 열교환기 오염도 평가를 수행하였다. 이를 위해 먼저 필터 결과로부터 최대 및 최소 점을 수식(3)을 이용하여 구하였다.

$$\begin{aligned} E(X)_{Max} &= E(X-1) \leq E(X) \geq E(X+1) \\ E(X)_{Min} &= E(X-1) \geq E(X) \leq E(X+1) \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 4는 수식(3)을 이용하여 검색한 최대(분홍색 선) 및 최소(연두색 선) 에지 점들의 결과이다. 그림에서 보이는 것처럼 오염되지 않은 핀의 경우 이러한 점들이 하나의 선을 이루며 분포하고 있지만, 그렇지 않을 경우 따로 떨어져 잡음처럼 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 잡음은 영상처리에서 라벨링 기법으로 자주 사용되는 8

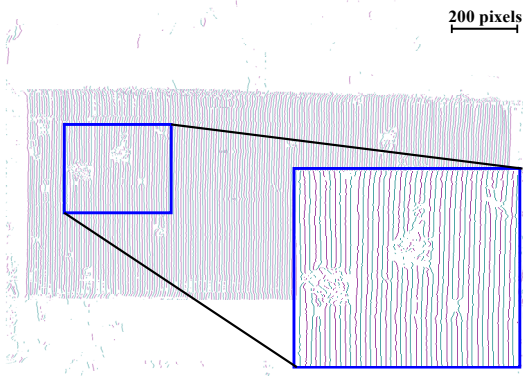


Fig. 4. Max and Min thresholding image

방향 검색 기법을 이용하여 크기가 5 pixels 미만 일 경우 잡음으로 판단하여 제거하였다.

2.3 Detecting Area

최종적으로 영상에서 최대 최소가 공존하는 영역을 정상적인 영역으로 판단하고, 영상처리에서 자주 사용되는 팽창 및 축소 필터를 반복 적용하면서 영역을 팽창하여 오염되지 않는 영역을 결정하였으며 그 결과를 Fig. 5에서 보여주고 있다.

Fig. 5에서 보라색으로 표현된 부분이 열교환기에서 오염되지 않는 영역, 즉 일정한 패턴이 존재하는 영역으로 개발된 알고리즘이 오염된 영역과 정상적인 영역을 잘 구분해 주고 있음을 알 수 있다.

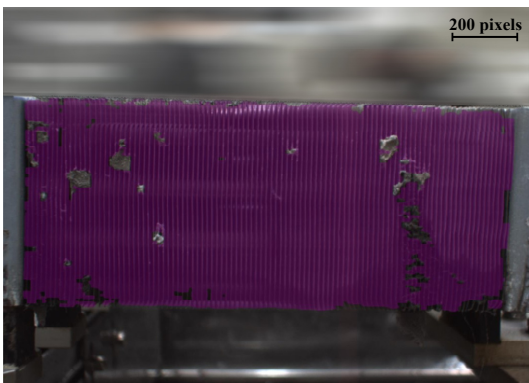


Fig. 5. Non-pollution area detected by image processing methods

2.4 Affine Transformation

2.1~2.3절에서는 영상처리 기법들을 이용하여 영역을 구분하였다. 그러나 이러한 영역은 카메라와 대상체의 거리 및 각도에 그 영역의 크기가 영향을 받기 때문에 정확한 영역을 평가하기 위해서는 기준으로 정한 절대적 위치로 변환할 필요성이 있다. 영상의 선형성을 유지하면서 전체적인 영상을 변환하는 방법으로 아파인 변환이 많이 사용되고 있으며^[8], 본 연구에서도 아파인 변환을 이용하여 오염도의 정량적 평가를 수행하였다.

수식(4)은 아파인변환 방정식을 보여주고 있다.

$$\begin{aligned} x' &= \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + 1} \\ y' &= \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

수식에서 x', y' 은 변환 전 영상 위의 좌표이고, x, y 는 변환 후의 좌표이며, $a_{11} \sim a_{32}$ 은 변환 계수이다. 수식(4)를 사용하여 영상변환 하기 위해서는 최소한 3개 이상의 변환 전후의 좌표쌍이 존재해야한다. 본 연구에서는 이를 위해 Fig. 1에서 수평 및 수직 에지 들의 선분 위의 점을 변환 전의 기준점을 이용하고, 변환 후의 점은 계측 영상 위의 점으로 에지 연산을 이용하여 구하였다.

계측 영상에서 에지점을 검색하기 위해 Fig. 6에 보이는 4가지 에지 연산자를 정의하였다. Fig. 6에서 좌우 에지는 프레임과 열교환기의 영

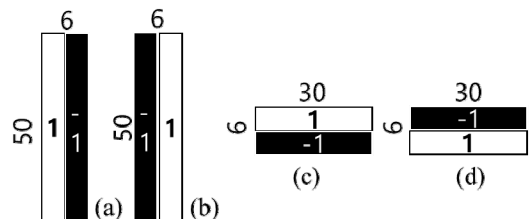


Fig. 6. Edge filter for boundary edge detection of the fin-tube heat exchanger (a) Left edge, (b) Right edge, (c) Top edge, (d) Bottom edge.

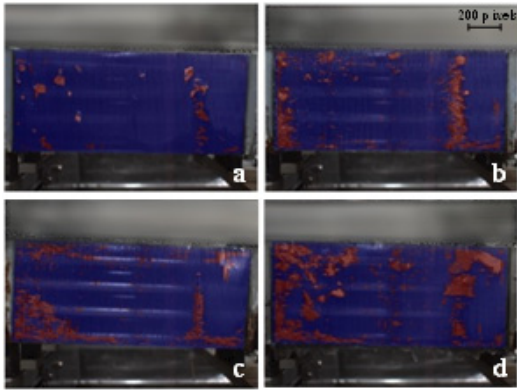


Fig. 7. Results of affine transformation and Area detection algorithm (a. 4.1%, b. 8.2%, c. 12%, d. 18%).

상차를 이용하기 위해 6×50 pixels의 수직 필터 (Fig. 6(a), (b))를 제작하여 검색하고, 상하는 핀과 배경의 차를 이용하여 30×6 pixels의 수평 필터를 이용하였다.

검색된 영상위의 에지점은 기준 점들과 거리가 최소인 점들을 쌍으로 하는 데이터를 생성하고, 어파인 변환을 수행하는 이러한 과정을 반복적으로 수행하여 최적의 매칭 영역을 구하였다. 수행 결과 어파인변환을 2~3회 반복으로 최적의 해를 구할 수 있었다.

Fig. 7은 어파인변환을 적용한 최종결과들을 보여주고 있다. 그림에서 파란색으로 표현된 부분은 정상적으로 패턴이 존재하는 영역이고, 빨간색으로 표현된 부분이 오염된 영역이다. 각각의 그림은 개발된 알고리즘을 이용하여 영상에 대한 오염 영역 및 오염도를 측정된 결과로 a는 4.8%, b는 8.2%, c는 12%. d는 18%이다. 이로부터 사용자에 따라 발생하는 다양한 측정 조건 및 여러 형태의 오염물 분포에 대하여 개발된 알고리즘이 전체 열교환기 영역 및 오염 영역을 잘 구별하고 있음을 알 수 있다.

2.5 Calculating ratio

앞서 나열한 방법을 통해 핀 영역과 오염 영역을 구분하고, 어파인변환을 이용하여 기준 영역에 대한 오염 영역의 넓이를 구하였다. 이로

부터 전체 영역에 대한 오염 영역의 비인 오염도를 다음과 같은 수식(5)을 사용해 정의하였다.

$$P = \frac{A_p}{A_c + A_p} \times 100 \quad (5)$$

위 식에서 P 는 오염도이고, A_c , A_p 는 각각 정상인 영역과 오염된 영역을 나타낸다. 두 영역의 비교를 통해 막힘 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 기준을 제시하였다.

3. 수동 측정과 알고리즘 결과 비교

개발된 알고리즘의 신뢰성 평가를 위해서 본 연구에서는 개발된 알고리즘 결과와 수동으로 직접 평가한 결과를 비교 분석하여 알고리즘의 성능을 평가하였다.

3.1 수동 측정 방식

오염도 성능평가를 위해서는 정확한 기준 값을 정의할 필요가 있다. 본 연구에서는 이를 위해

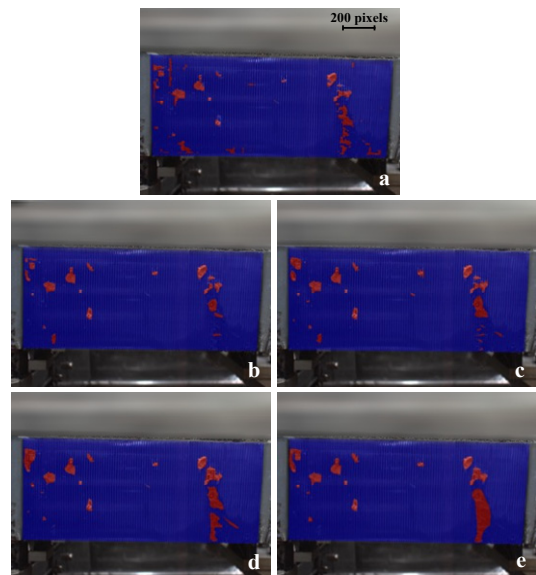


Fig. 8. Pollution area results of developed algorithm (a=4.1%) and manual by 4 different users (b=3.2%, c=4.1%, d=4.6%, e=5.1%).

사용자가 직접 마우스를 이용하여 열교환기 영역 및 오염 영역을 정의하고, 오염도를 계측할 수 있는 프로그램을 제작하였다. 프로그램을 이용하여 4명의 사용자에게 40장의 영상을 제공하고 동일한 기준으로 오염도를 평가하도록 하였으며 그 결과를 Fig. 8에서 보여주고 있다.

Fig. 8에서 a는 개발된 알고리즘으로 계측된 영역으로 오염도는 4.1%였지만, 수동으로 측정된 결과는 Fig. 8의 b~d와 같이 전체적인 분포는 유사하지만 사용자에게 따라 오염도는 약간의 차이 보여주고 있다. 본 연구에서는 수동으로 구한 4개의 오염도의 평균값을 기준으로 정의하고 개발된 알고리즘의 성능을 평가하였다.

3.2 수동 측정과 알고리즘 결과 비교

수동 측정 결과와 알고리즘의 결과에 대해 통계적 분석을 위해 t-검정 방법을 사용했다. t-검정 방법은 소량의 표본을 가진 두 집단의 모평균을 비교하여 유사성을 증명하는 통계적 가설 검정 방법으로 딥러닝⁹⁾, 의료분야¹⁰⁾ 등 다양한 영역에서 활용되고 있다.

본 연구에서는 “수동 측정을 통해 관측한 오염 영역과 알고리즘을 통해 관측한 오염 영역이 유사하다”라는 가설을 설정하고 다음 식(6)을 적용하여 가설을 판단하였다.

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{(S_1)^2}{n_1} + \frac{(S_2)^2}{n_2}}} \quad (6)$$

위 식에서 첨자 1, 2는 각각 수동 측정 및 알고리즘 측정 방법을 의미하며, S 는 표본 분산을 나타내며 n 는 자유도를 나타내고 x 는 평균을 나타낸다. t 는 검정 계수 값으로 T 테이블을 이용하여 유의 확률을 구하게 된다. 본 연구에서 계산 결과 유의 확률은 5%가 나왔고, 이는 일반적으로 사용되는 유의 수준 5%에 부합하는 결과이다. 이로부터 가설이 성립함을 확인하였으며, 수동 측정 결과와 알고리즘 결과가 유사하다는 것을 의미한다.

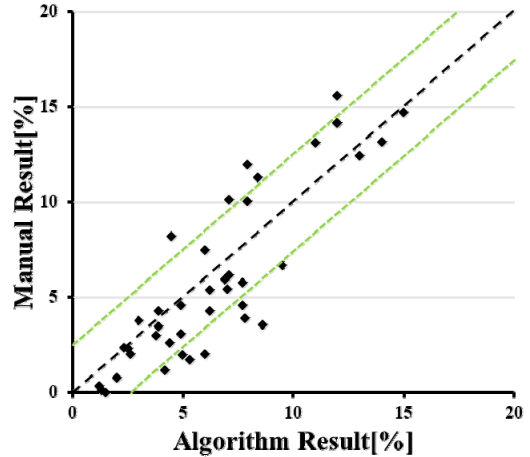


Fig. 9. Pollution ratio evaluation results of developed algorithm and manual.

Fig. 9은 주어진 영상에 대한 수동 및 자동으로 오염도를 평가한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 세로축은 수동으로 오염도를 평가한 결과이고, 가로축은 알고리즘에 의한 오염도 측정 결과이다. 그림에 보이는 흑색 선은 동일한 결과를 나타내는 기준선이고, 녹색 점선은 약 2.5%의 오차율을 나타내는 기준선이다. 측정을 진행한 모든 데이터는 $\pm 5\%$ 의 오차율 이내에 포함되었으며, 그중 88%가 $\pm 2.5\%$ 이내의 오차범위 내에 들어왔다. 이를 통해 알고리즘과 수동 측정이 충분히 유사한 판단을 가지고 있으며, 오염도에 대한 정량적 평가에 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 영상처리 및 어파인변환을 활용한 평판형 열교환기의 정량적 오염도 측정 알고리즘을 제시하였다. 이를 위해 형상을 분석하고 형상에 맞는 가우시안 에지 필터를 제작하여 열교환기의 정상 영역과 오염 영역을 구분하였고, 어파인 변환을 통해 촬영에서 발생할 수 있는 여러가지 변수로부터 정량적으로 오염도를 평가할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

알고리즘의 성능평가를 위해 수동으로 오염

도를 측정하였으며 개발된 알고리즘의 결과와 비교 분석하였다. 결과적으로 수동 및 자동으로 계측된 오염도는 모두 $\pm 5\%$ 이내의 오차율 범위 내에 포함되어있고, 그중 88%가 $\pm 2.5\%$ 이내의 오차율 범위 내에 포함되었다. 이로부터, 본 연구에서 개발된 영상처리 및 어파인변환을 이용한 정량적인 오염도 평가 알고리즘이 핀튜브 열교환기의 오염도 평가에 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

또한, 개발된 알고리즘을 핀튜브 열교환기의 구조 특성에 맞추어 필터의 크기 및 형태를 변경하여 여러 형태의 핀튜브 열교환기의 오염도 평가에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업(No 2020R1I1A1A01052771)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCE

- 1) Kim, G. W. and Rhee, G. H., 2017, "Numerical Visualization Study of Offset Flow Control in a Wavy Fin Heat Exchanger" Proc. KSV Spring Conference, pp.25~26.
- 2) Jeong, T. S., Park, S. H., Kim, C. S. and Kim, H. B., 2012, "Flow Visualization Study around the Distributor of Plate-fin Heat Exchangers" Journal of KSV, Vol. 10(3), pp.37~41.
- 3) Addepalli, S., Eiroa, D., Lieotrakool, S., François, A. L., Guisset, J., Sanjaime, D., Kazarian, M., Duda, J., Roy, R. and Phillips, P., 2015, "Degradation study of heat exchangers" Procedia Cirp, Vol 38, pp.137~142.
- 4) Allahkaram, S. R., P. Zakersafae, and S. A. M. Haghgoo., 2011, "Failure analysis of heat exchanger tubes of four gas coolers" Engineering Failure Analysis, Vol 18(3), pp.1108~1114.
- 5) Baek, W. S. and Lee, H. W., 2018, "Algorithm for Detecting PSD Boundary Invasion in Subway PSD using Image Processing" Journal of the KIECS, Vol. 13(5), pp.1051~1058.
- 6) Kim, J. M., Kim, T. J. and Yu, D. I., 2020, "Research for development of our own image processing code for neutron tomography" Journal of KSV, Vol. 18(1), pp.44~49.
- 7) Cho, M. O., Yoon, S. H., Han, W.T. and Kim, J. K., 2015, "Improvement of Image Processing Algorithm of High-Throughput Microscopy for Automated Counting of Asbestos Fibers" Journal of KSV, Vol. 13(3), pp.15~19.
- 8) Cho, G. R., Doh, D. H., Kim, H. Y., Jin, G. J. and Kim, D.H, 2019, "Development Tobust Video Stabilization algorithm based Optical Flow" Journal of KSV, Vol. 17(3), pp.66~69.
- 9) S. W, Kim and J, M, Song., 2021, "Statistical hypothesis testing using deep learning: Focusing on two sample t-test", Journal of the Korean Data And Information Science Society, Vol 32(1). pp. 25~35.
- 10) D. N, Lee and C, W, Lim., 2019, "Statistical methods for testing tumor heterogeneity", The Korean Journal of Applied Statistics, Vol 32(3). pp. 331~348.