

## 힌의 피치 및 배열 방식에 따른 프리히터의 전열 성능에 관한 연구

유지훈\* · 김귀순\*\*†

### A Numerical Study on the Effect of Fin Pitch and Fin Array on the Heat Transfer Performance of a Pre-heater

Ji Hoon Yoo\*, Kuisoon Kim\*\*†

*Key Words* : Pre-heater Boiler(프리히터), Internally-finned Tube(내측 힌 관), Fanning friction Factor(Fanning 마찰 계수), Colburn  $j$  Factor(Colburn  $j$  계수), Pressure Drop(압력 강하)

#### ABSTRACT

In this paper, a numerical study was performed to investigate the performance characteristics of a pre-heater. The effects of fin pitch and fin array type(in-line, staggered, leaned array) were reported in terms of Colburn  $j$ -factor and Fanning friction factor  $f$ , as a function of Re. Three-dimensional numerical simulation has been performed by using flow analysis program, FLUENT 13.0. The results show that Colburn  $j$ -factor decreases with the decrease of fin pitch attached in the annular tube. But the fin pitch has little effect on  $f$ -factor. The staggered array and leaned array show improved heat transfer performance compared with in-line array, so that Colburn  $j$ -factor was increased. It also shows that the  $f$ -factor of leaned array is the highest in the studied range of Reynolds number.

#### 1. 서 론

최근 자동차용 엔진의 연비향상 및 배기가스 저감을 위한 노력으로 연소 효율개선 및 연소가스의 온도와 엔진 발열량이 최소화 되고 있다. 이는 엔진 냉각수의 최고수온이 낮아지고 냉각수가 가지는 총 가용 열원을 감소시킨다. 이러한 엔진 냉각수의 가용 열원 감소는 난방을 냉각수의 온수 열원에 전적으로 의존하는 자동차 공기조화 시스템에서 열원의 부족을 야기하여 동절기에 적절한 난방 공기조화 시스템이 요구된다.

이러한 열원의 감소로 냉각수의 방출열량에만 의존하여 난방을 실시할 경우 외기 온도가 낮은 겨울철에는 냉각수온이 일정온도 이상 상승하기 전에는 실내난방이 이루어지지 않으며 적절한 실내난방을 수행하려면 공회전 시간이 길어지고 오염물질 배출도 증가한다. 이러한 문제로 인하여 현재

디젤엔진이 장착된 차량의 경우 추가의 열원 확보가 요구되며 이를 보완하기 위한 보조난방장치(Pre-heater Boiler)가 많이 사용되고 있다.

프리히터는 연소실에 공급되는 공기와 연료노즐에서 액체 상태로 분무된 연료의 연소반응으로 생성된 고온의 연소가스가 힌이 부착된 관을 지나면서 열에너지를 외부에 흐르는 냉각수로 전달하는 장치이다.

프리히터 내부에 부착된 힌은 연소가스와의 전열 면적을 증가시키고 추가적인 열 경계층을 생성함으로써 열전달율을 높일 수 있다. 또한 힌의 존재로 인하여 2차유동이 발생하게 되면 열전달이 크게 향상되고 마찰 계수도 매우 커지게 된다.

프리히터와 같이 힌이 부착된 관 내의 유동해석은 몇 가지 형상에 대해 실험 및 수치적인 방법으로 이루어졌다. Pak 등 (1)은 수치적인 방법을 이용해 힌이 부착된 원형관의 열 및

\* 부산대학교 항공우주공학과 대학원 (Graduate School, Department of Aerospace Engineering, Pusan National University)

\*\* 부산대학교 항공우주공학과 (Department of Aerospace Engineering, Pusan National University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : kuskim@pusan.ac.kr

유동특성을 해석하였고, 힨의 높이가 힨의 수보다 영향이 크다는 결론을 얻었다. Liu 등(2)은 수치해석적인 방법으로 원형관 내부에 나선형으로 부착된 사각형, 원형 및 삼각형 모양의 힨에 대해 힨의 수, 높이, 피치 그리고 나선형 각을 매개변수로 하여 관내 열전달 특성을 연구하였고 Asharful Islam 등(3)은 실험을 통해 원형 관 내측에 T자형 힨을 부착하면 매끈한 관에 비해 마찰 계수는 5배, 열전달계수는 2배 정도 증가하는 결과를 얻었다. 이주희 등(4)은 원형 관 열교환기의 힨의 높이와 폭, 그리고 힨의 수에 대해서 열전달률을 최대화 하면서 마찰에 의한 압력강하를 최소화하는 힨의 형상을 설계 하였다. 그 결과 힨의 높이, 힨 상부두께 그리고 하부두께 순으로 관내 열 및 유동 특성에 영향이 크다는 것을 확인하였다. Ma 등(5)은 수치 해석적인 방법으로 환형 관 내측에 힨이 부착된 열교환기에 대해 연구하였다. 힨과 안측 관사이의 간격이 열전달과 압력강하에 미치는 영향을 해석하였고 적합한 간격을 제시하였다. Wang 등(6)은 환형 관 내측에 부착된 S모양, Z모양 그리고 V모양의 힨에 대해서 수치해석을 수행하였고 힨 외부곡률반경에 비해 내부곡률반경은 열전달 성능에 큰 영향을 미치지 않는다는 결론을 얻었다.

하지만 이러한 연구들은 유동이 난류영역에 국한되어 있고 힨 배열에 따른 전열 특성 비교가 부족하다. 따라서 프리히터와 같이 낮은 레이놀즈 수에서 작동하며 힨과 힨사이의 간격이 있는 형상의 배열 방식에는 적용하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 프리히터의 전열성능 향상을 목적으로 길이방향의 힨-관 형상에 대해 압력강하 및 열전달 특성을 비교하고 분석하였다. 수치해석은 관 내벽에 부착된 힨의 피치( $s=18.99\text{mm}, 12.44\text{mm}, 9.00\text{mm}$ ) 및 배열(in-line array, staggered array, leaned array)을 달리하여 수행하였고 상용 전산 유동해석 프로그램인 FLUENT 13.0을 이용하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 수치해석 검증

본 연구에서는 수치해석의 타당성을 확인하고자 Ma 등(5)과 Tian 등(7)이 수행한 Fig. 1에 나타나 있는 환형 관 내부에 힨이 부착된 열교환기에 대해서 해석을 수행하였다.

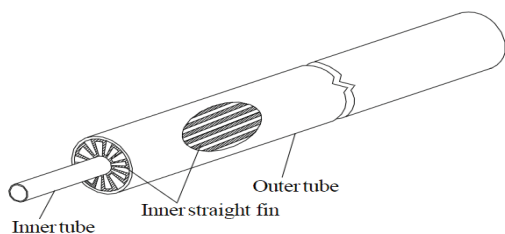


Fig. 1 Schematic of bayonet tube with internal longitudinal fin

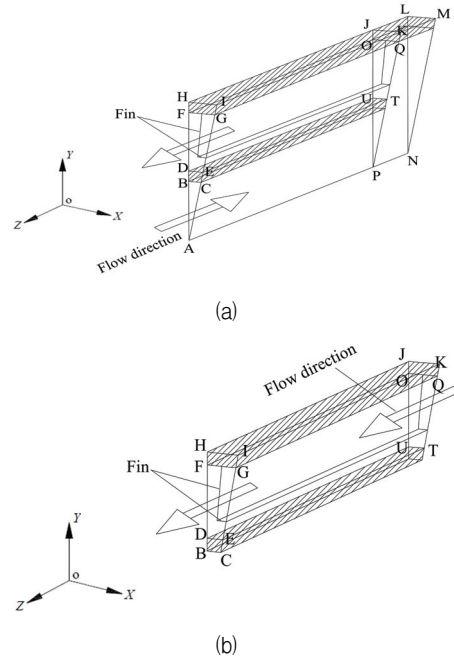


Fig. 2 Schematic of computational validation model

검증모델은 Fig. 2 (a)와 (b)에 나타나 있는 바와 같이 두 가지 경우이다. Fig. 2 (a)의 경우 입구 면(ABC)으로 873K 온도의 공기가 균일한 속도로 들어가서 출구 면(DEFG)로 빠져나오고 출구 쪽에는 전압력(354,638Pa), 면(HIKJ)에는  $92\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 의 열전달계수와 1223K의 자유흐름온도가 주어진다. 양 옆면은 회전주기조건에 해당되고, 빗금친 영역은 고체 영역이며 힨의 두께는 0.2mm이다. Fig. 2 (b)의 경우는 안쪽관이 막힌 형상이기 때문에 해석 시 안쪽 관의 벽면 경계조건을 단열로 설정하였고 입구 면이 (UTOQ)로 바뀐 것 이외에 나머지 경계 조건은 (a) 모델과 동일하다.

Fig. 3은 Fig. 2 (a) 형상의 내부 유동이 난류 영역일 때 레이놀즈 수에 따른 온도상승 값과 압력강하량을 나타낸다. 레이놀즈 수가 증가할수록 압력강하량은 커지고 온도상승 값은 작아짐을 볼 수 있다. Ma 등(5)이 수행한 해석결과와 비교할 때 압력강하량은 최대 4.3%, 온도상승 값은 최대 1.3% 이내의 차이를 가지며 전체적인 경향은 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 2 (b) 형상의 내부 유동이 층류 영역일 때 레이놀즈 수에 따른 마찰 계수  $f$  와 Nusselt 수를 나타낸 그래프로 Tian 등(7)의 상관식과 Ma 등(5)의 전산해석 결과와 비교하였다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라  $f$  는 감소하고 Nusselt 수는 증가하였다. Tian 등(7)의 상관식과 비교해 볼 때  $f$  와 Nusselt 수는 각각 9.3%, 14.1%의 차이를 보인다. Ma 등(5)의 전산해석 결과와 비교해 보면  $f$  와 Nusselt 수는 각각 1.3%, 3.7%의 차이를 갖지만 전체적인 경향은 잘 일치하였다.

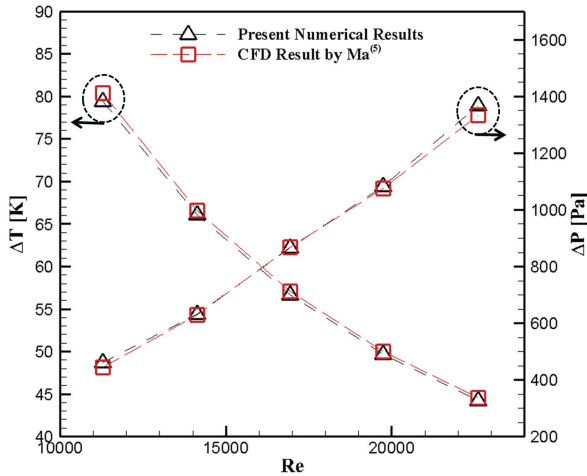


Fig. 3 Validation model (a) on turbulent flow region

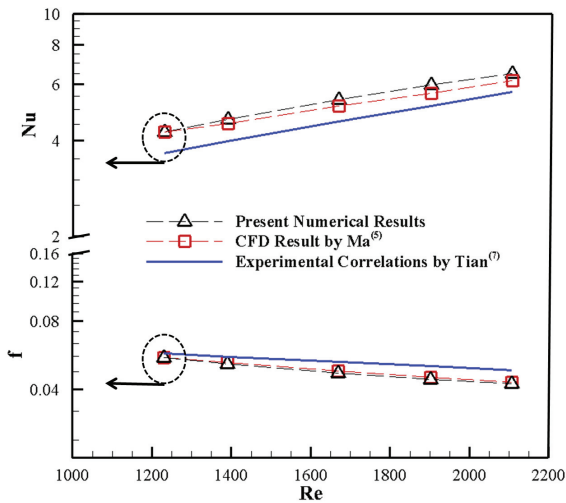


Fig. 4 Validation model (b) on laminar flow region

## 2.2 수치해석 형상

해석 대상은 내부에 환이 부착된 환형 관으로서, 전체적인 개략도는 Fig. 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 여러 개의 환은 관의 단면에 원주방향으로 일정한 간격으로 위치하며 안쪽 관과 바깥쪽 관은 모두 동심(Concentric)의 원형을 갖는 형태이다. Fig. 6은 프리히터의 단면의 형상이다. 안쪽 공간인 (a) 영역으로 고온의 연소 가스가 유입되며 바깥 쪽 공간 (b) 영역에서는 냉각수가 나선형으로 회전하면서 지나가는데, 이 과정에서 연소가스로부터 열에너지를 얻게 되는 장치이다. (a) 영역에 평판 환(plain fin)이 24개가 부착되어 주기적으로 형상이 반복되는 구조를 가지고 있다.

프리히터의 성능 향상을 위해 열전달 성능에 영향을 미칠 수 있는 매개변수 중 환 피치 및 환 배열방법을 선택하고, 그에 따른 열전달 현상을 관찰하기 위해 해석 모델의 공기 측 유로를 Fig. 7과 같이 단순화하였다. 길이방향으로는 70mm의 환이 4개 부착되어 있고 환과 환 사이에는 4mm, 유로의

제일 앞과 뒤에는 10mm의 빈 공간이 있다. Table 1에 환의 세부 치수를 나타내었다.

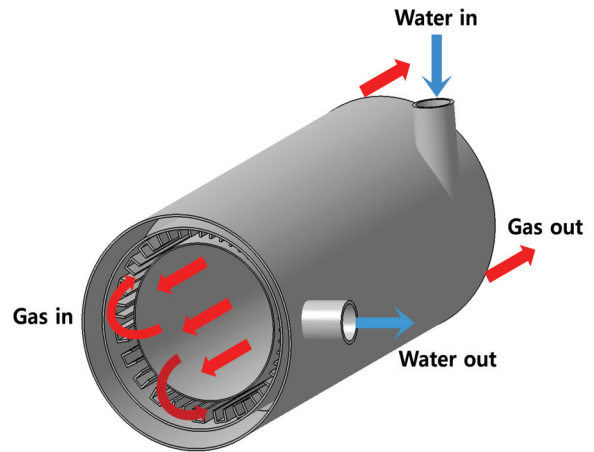


Fig. 5 Schematic of Pre-heater with internal longitudinal plain fin

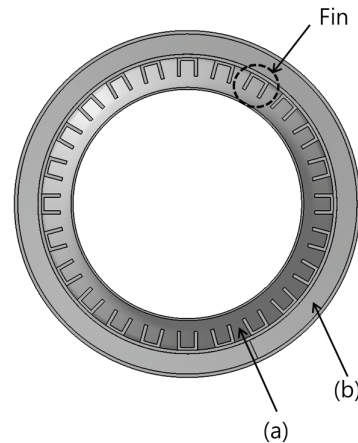


Fig. 6 Cross section of Pre-heater

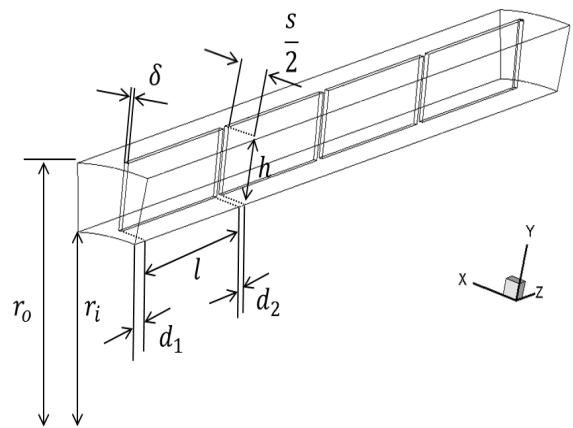


Fig. 7 Simplified computational model

Table 1 Specification of fin parameters

Variables	Values (mm)
Inner Radius ( $r_i$ )	68.24
Outer Radius ( $r_o$ )	84.63
Fin Length ( $l$ )	70
Fin Thickness ( $\delta$ )	1
Distance of Front and Rear ( $d_1$ )	10
Distance between Fins ( $d_2$ )	4

Table 2는 기준모델의 흰 피치 및 무차원 인자를 나타내었다. 무차원 인자는 흰 두께(fin thickness,  $\delta$ ), 흰 간 거리(fin spacing,  $s$ ), 흰 길이(fin length,  $l$ ) 그리고 흰 높이(fin height,  $h$ )를 이용하여 정의하였다.

Table 2 Geometric parameters of base model

Array Type	No. of Fin	$s$ (mm)	$\alpha = \frac{s}{h}$	$\beta = \frac{\delta}{l}$	$\gamma = \frac{\delta}{s}$
In-line	36	12.44	0.7587	0.0143	0.0804

### 2.3 경계 조건

경계조건으로 입구는 균일한 유량, 전온도(1500K)를 주었고 출구는 정압을 주고 계산하였다. 고온가스 측 입구유량은 공기유량과 연료공급량을 서로 합한 질량유량 조건을 주었다. 공기공급량은 실제 사용량인 과잉공기율 163%인 82.03 kg/h 을 연료공급량은 2.14 kg/h을 사용하였다. 연료에 비해 공기공급량이 많기 때문에 고온 가스는 공기로 가정하였고 공기의 물성치는 온도구간(300~1500K)에 따라 선형적으로 보간 하였다(8). 실제 형상에서는 외통주위를 나선형으로 물이 돌아가면서 열전달이 이루어지기 때문에 온도가 유동방향을 따라 변하지만 공기 측 유동을 모사하는 해석에서는 바깥벽면에 온도를 일정한 값(300K)으로 주고 안쪽 벽면은 단열로 가정하였다. 벽면과 흰의 고체영역은 강철의 물성치를 사용하였다. Fig. 8에는 해석모델의 형상과 표면 격자, 그리고 각각의 면에 적용한 경계조건을 나타내었다.

### 2.4 Friction factor $f$ 및 Colburn $j$ -factor

본 논문에서는 압력강하량의 특성을 정량적으로 나타내는 무차원 수인 마찰 계수  $f$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$f = \frac{\Delta p}{0.5\rho u^2} \frac{D_h}{4L} \quad (1)$$

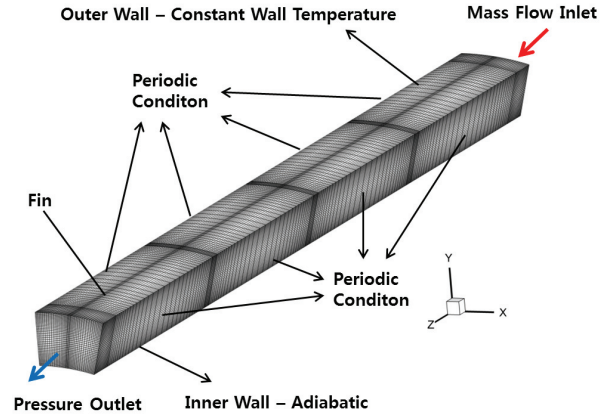


Fig. 8 Schematic of computational model

여기서  $\Delta p$ 는 열교환기의 입구와 출구의 압력차,  $u$ 는 입구속도,  $D_h$ 는 수력직경,  $L$ 은 열교환기의 유동방향 길이를 나타낸다.

열교환기의 열전달과 유동특성은 주로 흰의 모양과 배열에 영향을 받으며, 열전달특성은 식 (2)과 같은 Colburn  $j$  계수로 나타낸다.

$$j = St Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{Nu}{Re} Pr^{-\frac{1}{3}} \quad (2)$$

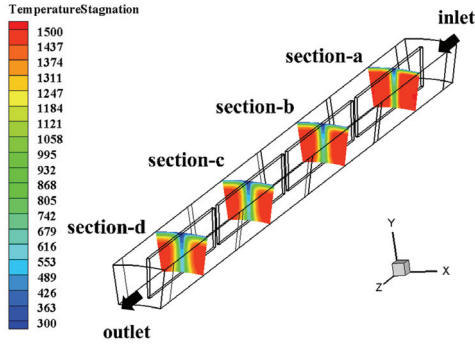
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 흰 피치에 의한 영향

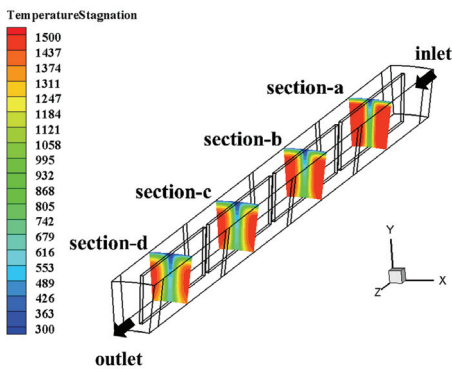
흰의 피치의 영향을 보기위해 배열은 정렬방식으로 고정하여 관 내부에 흰이 24개( $s=18.89\text{mm}$ ), 36개( $s=12.44\text{mm}$ ) 그리고 48개( $s=9.00\text{mm}$ ) 부착된 모델을 비교하였다.

Fig. 9는 입구 면의 전체 유량이 0.0432 kg/s로 동일할 때 흰 피치의 변화에 따른 유동방향 온도 분포이다. a 단면부터 d 단면까지 z방향으로 유동이 흐르면서 바깥 벽면의 낮은 온도 조건 때문에 흰 주위의 온도가 낮아지고 있다. 흰과 흰 사이의 간격( $d_2$ )의 존재로 유동이 흰의 전면부에 직접 접촉하여 정체점을 형성하고 흰을 중심으로 두 부분으로 나누어져 하류로 흐르는 유동의 형태가 반복된다. Fig. 9의 (a) 18.99mm와 (b) 12.44mm를 비교할 때 같은 입구 유량 조건에서 흰 피치가 작아지면 출구 쪽의 온도분포가 더 낮아짐을 볼 수 있다. 이는 전열면적의 증가로 흰을 통해서 더 많은 양의 열에너지가 전달되었기 때문이다. 흰 피치가 9.00mm로 작아지면 전열면적이 더 증가하여 그 경향이 더 크게 나타났다.

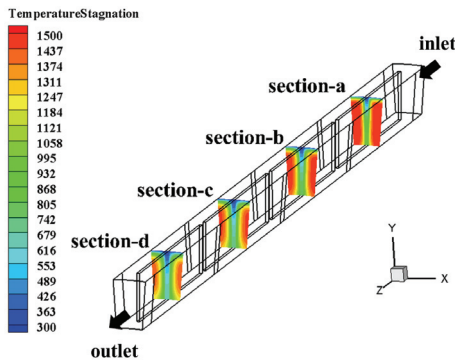
Fig. 10은 레이놀즈 수에 따른 마찰 계수  $f$ 를 도시한 그래프이다.  $f$ 는 레이놀즈 수가 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 흰 피치를 변화 시켜도 큰 차이 없이 비슷한 값이 나타났다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Temperature distribution for the cases of (a)  $s=18.99\text{mm}$  (b)  $s=12.44\text{mm}$  (c)  $s=9.00\text{mm}$

Fig. 11은 레이놀즈 수에 따른 Colburn  $j$  계수를 도시한 그래프이다.  $j$  는 레이놀즈 수가 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 흰의 피치가 작아질수록 낮게 분포했다. 레이놀즈 수가 1100일 때 흰 피치가 18.89mm에서 12.44mm로 줄어들 때와 12.44mm에서 9.00mm로 줄어들 때 각각 12.4%, 10.7% 낮았다.

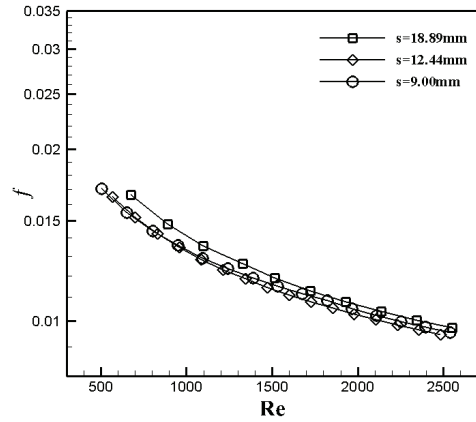


Fig. 15 Effect of fin pitch on the  $f$ -factor

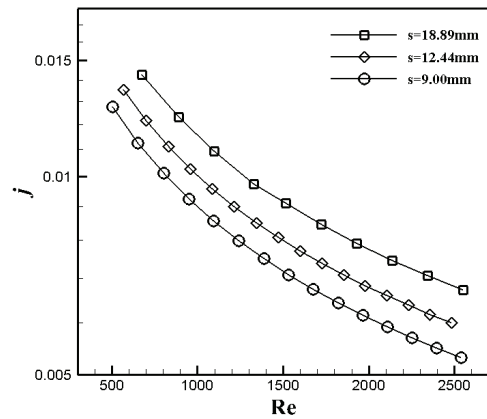


Fig. 10 Effect of fin pitch on the  $j$ -factor

### 3.2 흰 배열에 의한 영향

흰 배열 방식에 대한 특성을 살펴보기 위해 흰의 피치 ( $s=12.44\text{mm}$ )는 고정하고 정렬 배열, 엇갈린 배열 그리고 기울어진 배열 이 세 가지 배열에 대한 계산을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

Fig. 12는 입구 면의 전체 유량이  $0.0432\text{ kg/s}$ 로 동일 할 때 흰 배열의 변화에 따른 유동방향 온도 분포이다. Fig. 12 (a)는 정렬 배열의 온도 분포이다. 유동은 흰 좌우로 온도가 대칭적으로 나타나고 바깥 벽면에서의 낮은 온도조건 때문에 최고온도는 유동의 가운데 부분에 위치하며 흰 주위로 온도 경계층이 발달함을 볼 수 있다. 흰과 맞닿는 부분에서 점차 발달하기 시작한 유동이 흰 사이의 공간을 지나며 약간의 교란이 발생하지만 다른 배열 방식에 비해서 유동이 일정하게 진행되었다. 출구 면에서 평균온도는  $1186\text{K}$ 이다. Fig. 12 (b)는 엇갈린 배열의 온도 분포이다. 첫 번째 흰 주위를 지나면서 발달한 경계층이 다음 구간의 흰을 만나면서 새로운 경계층이 생기는 현상이 반복된다. 유동은 흰을 지나면서 발생한 후류로 인해 교란되고 이것이 다음 흰 구간에서 난류강도 및 열전달을 증가시켰다. b, c, d 단면에서는 흰 주변뿐만 아

나라 흰에서 떨어진 영역에서도 낮은 온도 분포가 나타나는데 이는 앞선 흰을 지나면서 냉각된 공기의 흐름 때문이다. 출구 면은 1115K의 평균온도를 가졌다. Fig. 12 (c)는 기울어진 배열의 온도 분포이다. 정렬배열의 첫 번째와 세 번째 흰은 왼쪽으로 60° 기울어지고, 두 번째와 네 번째 흰은 오른쪽으로 60° 기울어진 형상이다. 앞쪽 흰을 지나온 유동이 유로 형상이 달라짐에 따라 다른 배열방식과는 달리 온도가 흰 좌우로 대칭적으로 나타나지 않았다. 엇갈린 배열과 마찬가지로 앞선 흰에 의한 냉각된 공기의 흐름이 나타났으며 첫 번째 흰에서 발달한 경계층이 다음 흰 구간에서 새롭게 생성되기를 반복하였다. 출구 면은 1092K의 평균온도를 얻었다.

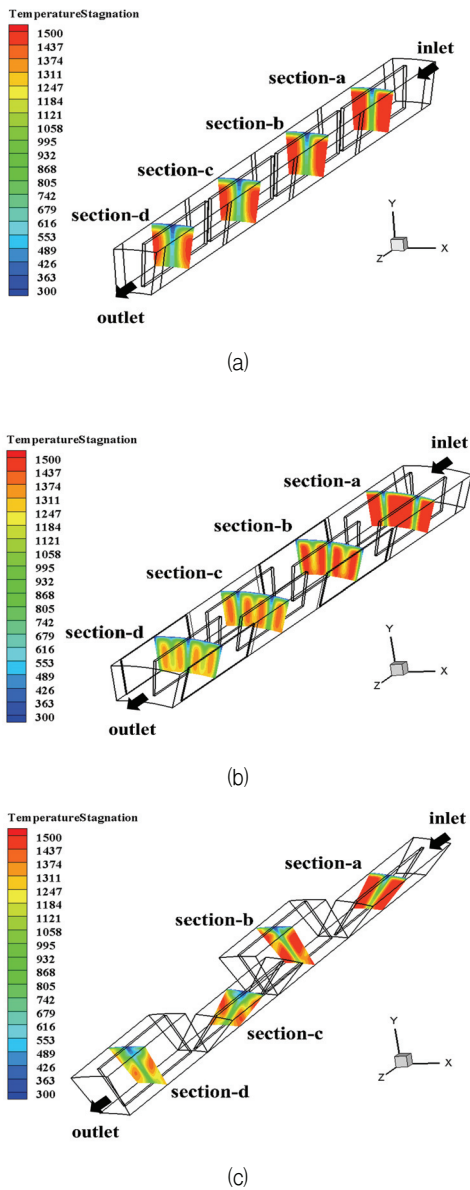


Fig. 12 Temperature distribution for the cases of (a) in-line array (b) staggered array (c) leaned array

Fig. 13에 흰의 배열 변화에 따른 마찰 계수  $f$  를 도시하였다.  $f$  는 흰의 배열에 따라 크게 차이를 보였다. 레이놀즈 수가 증가할수록 정렬 배열과 다른 배열과의 차이는 더 크게 나타났다. 레이놀즈 수가 1100에서 정렬배열보다는 엇갈린 배열이 22.4% 높았고 엇갈린 배열보다는 기울어진 배열이 13.1% 높은 값을 가졌다. 기울어진 모양의 배열이 다른 배열 방식보다 마찰 계수 값이 높게 나오는데 그 이유는 흰의 배열 구조에 따른 유동의 불균일성으로 인해 압력손실이 증가하고 흰 주위로 계속해서 새로운 경계층이 발달되어 전단응력이 커졌기 때문이다.

Fig. 14에 흰의 배열 변화에 따른 Colburn  $j$  계수를 도시하였다.  $j$  는 정렬 배열보다는 기울어진 배열과 엇갈린 배열이 높았다. 레이놀즈 수가 1800 이하에서는 엇갈린 배열이, 그 이상인 경우에는 기울어진 배열이 더 높았지만 대체로 비슷한 경향을 가졌다.

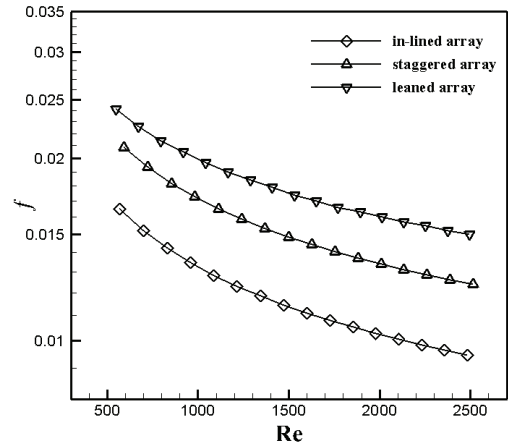


Fig. 13 Effect of fin array type on the  $f$ -factor

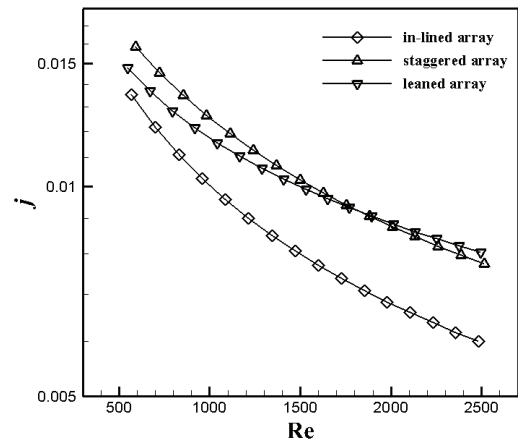


Fig. 14 Effect of fin array type on the  $j$ -factor

### 3.3 Volume goodness factor

열전달 성능을 정량적으로 평가하기 위해 volume goodness factor를 계산하였으며, 식 (3)과 (4)로 정의하였다.

$$h = \frac{c_p \mu}{Pr^{2/3}} \frac{1}{D_h} j Re \approx \frac{1}{D_h} j Re \quad (3)$$

$$E = \frac{P}{A} = \frac{1}{2g_c} \frac{\mu^3}{\rho^2} \frac{1}{D_h^3} f Re^3 \approx \frac{1}{D_h^3} f Re^3 \quad (4)$$

Fig. 15는 흰 피치의 변화에 따른 volume goodness factor를 도시하였다. 레이놀즈 수가 높아질수록 열전달 성능은 높아지지만 흰 피치의 변화에 따른 열전달 성능은 큰 차이 없이 비슷하게 분포하였다.

Fig. 16은 흰 배열의 변화에 따른 volume goodness factor를 도시하였다. 마찰 계수가 동일한 상태에서 정렬 배열보다는 엇갈린 배열과 기울어진 배열의 열전달 성능이 높게 분포하며 레이놀즈 수가 1800 이하에서는 엇갈린 배열이, 그 이상인 경우에는 기울어진 배열이 더 높았지만 대체로 비슷한 경향을 가졌다.

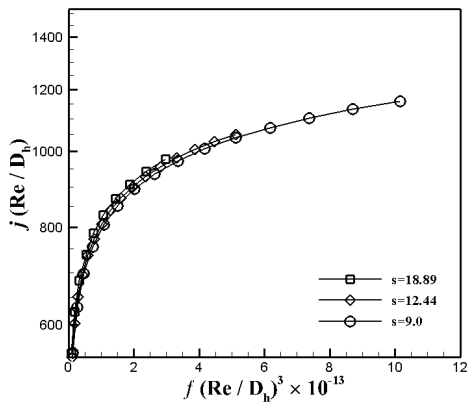


Fig. 15 Volume goodness factor for different fin pitch

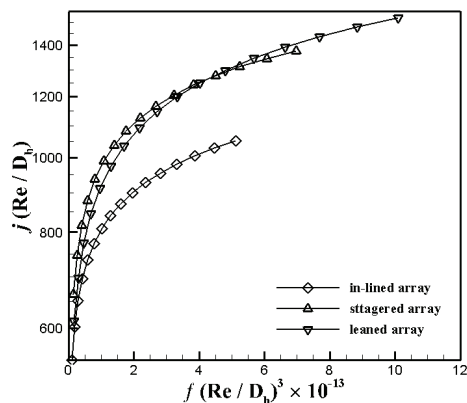


Fig. 16 Volume goodness factor for different fin array

### 4. 결론

본 연구는 프리히터의 열전달 성능을 향상시키기 위해 내부에 흰이 부착된 관에 대해서 전산해석을 수행하였다. 그 방법으로 흰 피치 및 배열 방식에 따른 영향을 확인하였다. 도출된 결과는 크게 다음과 같다.

- 1) 흰이 정렬 배열일 때 흰 피치에 의한 영향은 다음과 같다. 마찰 계수  $f$  는 흰 피치에 의한 영향이 거의 없이 비슷하게 나타났다. 흰 피치를 작게 할수록 Colburn  $j$  계수는 낮게 분포하며 레이놀즈 수가 1100인 조건에서 흰 피치가 18.89mm에서 12.44mm로 줄어들 때와 12.44mm에서 9.00mm로 줄어들 때 각각 12.4%, 10.7% 낮아졌다.
- 2) 흰 배열 방식에 의한 영향은 다음과 같다.  $f$  는 정렬 배열이 가장 낮고 기울어진 배열 가장 높게 나타났다. 그리고 정렬배열보다는 어긋난 배열과 기울어진 배열이 높은 대류열전달계수를 얻을 수 있었고 그 결과  $j$  는 높게 나타났다. 이는 흰의 배열 방식에 의해 새로이 생성된 경계층으로 유동혼합이 촉진되어 전열성능이 향상되었기 때문으로 판단된다.

### 후기

본 연구는 2013년도 산업통상부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다 (No. G031162313).

### 참고문헌

- (1) Pak, H. Y., Park, K. W. and Choi, M. S., 1998, "Numerical Analysis of the Flow and Heat Transfer Characteristics for Forced Convection-Radiation in Entrance Region of an Internally Finned Tubes," KSME International Journal, Vol. 12, No. 2, pp. 310~319.
- (2) Liu, X. and Jensen, M. K., 2001, "Geometry Effects on Turbulent Flow and Heat Transfer in Internally Finned Tubes," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 123, pp. 1035~1044.
- (3) Asharful Islam, Md. and Mozumder, A. K., 2009, "Forced Convection Heat Transfer Performance of an Internally Finned Tube," Journal of Mechanical Engineering, Vol. ME 40, No. 1, pp. 54~62.
- (4) 이주희, 이상환, 임효재, 박경우, 2005, "내부흰이 부착된 원형관 열교환기의 열/유동 해석 및 최적설계," 대한기계학회논문집 B권, 제 29 권, 제 4 호, pp. 460~468.

- (5) Ma, T., Lin, M., Zeng, M., Ji, Y. P., Wang, Q. W., 2010, "Numerical Study of Internally Finned Bayonet Tubes in a High Temperature Bayonet Tube Heat Exchanger with Inner and Outer Fins," ASME Turbo Expo 2010, GT2010-22360.
- (6) Wang, Q. W., Lin, M., Zeng, M., 2009, "Effect of Lateral Fin Profiles on Turbulent Flow and Heat Transfer Performance of Internally Finned Turbs," Applied Thermal Engineering, pp. 3006~3013.
- (7) Tian, L., Wang, Q. W., Xie, G. N., Zhao, C. L., and Luo, L. Q., 2008, "Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Annular Tubes with Three Different Internal Longitudinal Fins," Heat Transfer-Asian Research, 37 (1), pp. 29~40.
- (8) Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 2007, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," Wiley Press.