

## 튜브배열 변화에 따른 직교류형 열교환기의 성능에 관한 연구

전용한<sup>†</sup> · 김남진\* · 김종보\*\*

인하대학교 기계공학과 대학원, \*제주대학교 에너지공학과, \*\*인하대학교 기계공학과  
(2005년 10월 11일 접수, 2006년 1월 3일 채택)

### A Study on the Performance of a Cross-Flow Heat Exchanger by Tube Array Change

Yong-Han Jeon<sup>†</sup>, Nam-Jin Kim\* and Chong-Bo Kim\*\*

Graduate School, Inha University

\*Department of Energy Engineering, Cheju National University

\*\*Department of Mechanical Engineering, Inha University

(Received 11 October 2005, Accepted 3 January 2006)

#### 요 약

고온의 연소가스를 교란시키고 열교환 요소와 오랜시간 접촉하도록 원관을 옆으로 서로 맞대어 붙인 후 이 원관의 배열과 수직인 방향으로 연소가스가 흐르도록 설계된 열교환기에 대하여 실험적으로 열전달특성을 조사하기 위해서 유동이 충분히 발달한 영역에서 관 외부 원주방향으로 스테인레스 박판을 부착하고 직류 전원공급기를 통해 열유속을 주어, 관 주위의 대류열전달계수를 측정하였다. 실험 결과 서로피치 0.075 m, 가로피치 0.08 m이고 엇갈림 배열일 때 열전달계수가 15% 정도 차이가 크게 났으며, 레이놀즈수가 증가할수록 열전달계수도 증가함을 알 수 있었다. 또한 전체 평균 누셀트 수도 엇갈림 배열이 정렬배열에 비해 높게 나타났다.

**주요어** : 정렬 배열, 엇갈림 배열, 열전달, 레이놀즈수, 누셀트 수

**Abstract** — The convective heat transfer on the outer surface of tube arrays perpendicular to the flow direction was experimentally investigated. The test sections which include the aligned and staggered arrangements were made and the local heat transfer coefficients on the outer surface of the tube were measured after the flow has been fully developed. The results showed that the local heat transfer coefficients of the staggered arrangement, which has transverse pitch of 0.075 m and longitudinal pitch of 0.08 m, were about 15% greater than that of the aligned arrangement. Also, the overall mem Nusselt number of the former was greater than that of the latter.

**Key words** : Aligned arrangement, Staggered arrangement, Heat transfer, Reynolds number, Nusselt number

#### 1. 서 론

원통형 열교환기는 가격이 저렴하고, 유지 및 보수가 간편하며, 다양한 크기로 제작할 수 있기 때문에 석유화학,

발전, 공기조화, 폐열회수 등 많은 분야에서 널리 사용되고 있으며, 전체 산업용 열교환기 시장의 약 60%를 차지하고 있다. Fig. 1은 단일 관과 단일 셀 통로를 가진 가장 간단한 원통형 열교환기로서, 배플은 난류와 직교유동 속도성분을 유발하여 셀측의 대류열전달계수를 증가시키기 위해서 설치되지만 열전달 효율이 낮은 단점이 있다.

따라서 열교환기의 열전달 성능을 증대시키기 위해서 Fig. 2와 같이 열교환기 내의 원관을 옆으로 맞붙인 후

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
Graduate School, Inha University  
Tel: 032-862-7313  
E-mail: cv76@netian.com

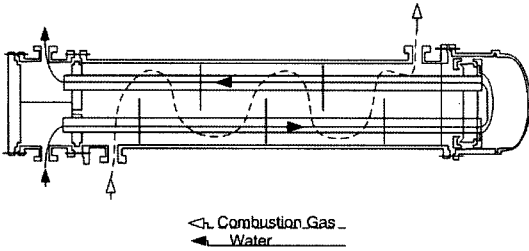


Fig. 1. Shell-and-tube heat exchanger.

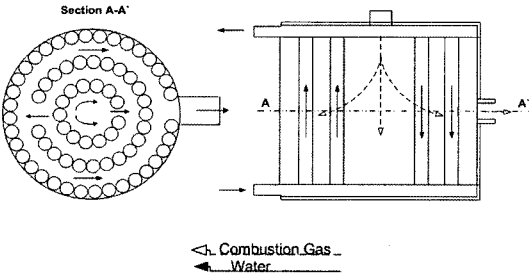


Fig. 2. Cross-flow heat exchanger.

이 원관의 배열과 수직인 방향으로 연소가스를 흐르게 하는 직교류형 열교환기가 제안되어지고 있다.

Zukauskas<sup>[1]</sup>는 엇갈림 배열과 정렬 배열의 열전달 특성에 대한 수치해석과 실험에 의한 결과를 비교하였고, Martin and Buyruk<sup>[2]</sup>은 직교류 유동에서 엇갈림 배열에 대한 수치해석 연구를 하였고, Debusschere<sup>[3]</sup>은 실험 결과를 비교하였다. 그러나 이와 같은 배열의 극부적인 열전달 현상에 대한 해석이 완전히 이루어진 상태가 아니기 때문에 원하는 설계자료를 찾는 데 많은 어려움이 있다. 또한, 주어진 운전조건에서 열전달이 가장 잘 일어나는 형상을 설계하려면 튜브의 직경과 튜브와 튜브 사이의 간격, 튜브의 배열 방법 등에 대한 자세한 데이터가 필수적이다. 따라서 본 실험에서는 열교환기의 튜브와 튜브 사이의 간격, 튜브의 배열 방법을 변화시키면서 높은 열전달률을 얻을 수 있는 설계조건이 무엇인지 살펴보고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 실험장치

본 실험을 위해서 Fig. 3과 같이 총길이 4.17 m, 최고풍속 18 m/sec인 개방형 흡입식 풍동이 사용되었으며, 균일한 유동을 얻기 위해서 허니컴(7)을 사용하였다. 시험부(3)의 재질은 두께 10 mm의 아크릴이며, 그 크기는 300 × 300 × 1,000 mm이다. 또한 정렬 배열 실험을 위해서

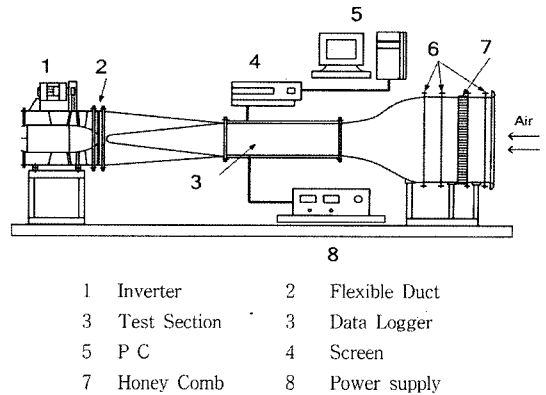


Fig. 3. Schematic diagram of the apparatus.

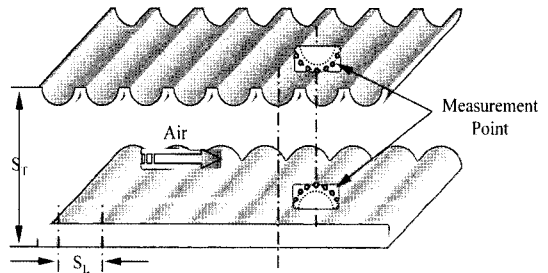


Fig. 4. Test section of aligned arrangement.

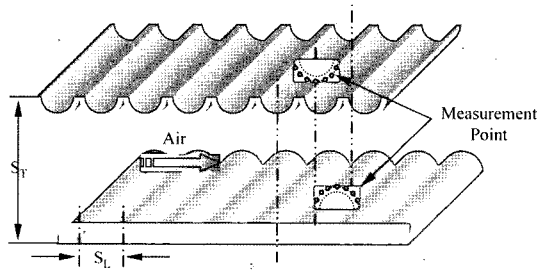


Fig. 5. Test section of staggered arrangement.

Fig. 4에 나타난 것처럼 직경 50 mm인 8개의 원관이 부착된 윗판과 아래판이 서로 마주보고 있도록 시험부를 제작하였다. 특히, 윗판과 아래판 사이의 간격을 조절할 수 있도록 제작하였으며, 시험부 입구에 경사판을 설치하여 시험부 입구 부분에서 유동이 왜곡되는 것을 방지 하도록 하였다. Fig. 5와 같은 엇갈림 배열에서는 정렬 배열에 사용된 원관을 그대로 사용하였으며, 단지 8개의 원관이 부착된 윗판과 아래판의 배열을 어긋나게 하여 사용하였다. 또한, 입구로부터 유동이 충분히 발달되는 6번째 관에 일정한 열유속을 공급하기 위하여 스테인레스 스틸 박판을 부착하였고, 유동방향과 마주보는 곳

을 0°로 기준삼아 30°, 50°, 70°, 90°, 110°, 130°, 150°인 지점에 원주 방향으로 8곳에 열전대를 삽입·부착하여 시험부의 온도를 측정하였다. 8개의 열전대로부터 측정된 온도는 데이터 취득장치(4)와 컴퓨터(5)를 이용하여 수집·저장하였고, 시험부에 일정한 열유속을 공급하기 위하여 직류 전원공급기(8)를 시험부에 부착된 구리막대와 연결하였다. 또한, 유속을 측정하기 위해서 시험부 앞에 부착된 피토투브와 마노미터를 이용하였다.

2-2. 실험방법

풍동의 전원을 켜고 인버터(1)를 이용하여 시험부(3) 내의 유속을 조절하고 직류 전원공급기(8)로 스테인레스 스틸 박판에 일정한 열 유속을 공급하였다. 이후 시험부(3)가 정상상태가 될 때까지 1시간정도 경과 된 후 온도와 유속을 측정하였다. 이와 같은 방법으로 정렬 배열과 엇갈림 배열, 튜브 중심사이의 거리인 가로피치( $S_L$ )를 0.05 m와 0.075 m, 위 튜브와 아래 튜브의 중심거리인 세로피치( $S_T$ )를 0.08, 0.10, 0.12 m, 중대형 보일러에 초점을 두었기 때문에 레이놀즈수를 20,000, 30,000, 40,000, 50,000로 변화시키면서 반복 실험을 수행하였다.

실험을 통해 측정된 결과를 다음과 같은 방법으로 정리하였다.

$$h = \frac{IV}{A\Delta T} = \frac{IV}{A(T_{wall} - T_\infty)} \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 각 열전대의 국부 대류 열전달 계수,  $T_{wall}$ 은 시험부 내벽의 온도를 의미하고, 국부 누셀수의 정의는 다음과 같다.

$$Nu_\theta = \frac{hD}{k} \quad (2)$$

레이놀즈수는 시험부 내에서 발생하는 최대 유체속도에 기초하여 다음 식으로 정의되었다.

$$Re_{D, max} = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \quad (3)$$

본 실험에서 평균 누셀수의 정의는 다음과 같다.

$$\overline{Nu} = \frac{S_1 N_{\theta 1} + S_2 N_{\theta 2} + S_3 N_{\theta 3} + S_4 N_{\theta 4} + S_5 N_{\theta 5} + S_6 N_{\theta 6} + S_7 N_{\theta 7}}{\pi r \frac{150}{180} + \pi r \frac{150}{180}} \quad (4)$$

$$S_1 = S_7 = \pi r \frac{25}{180}$$

$$S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = S_6 = \pi r \frac{20}{180} \quad (4)$$

여기서  $r$ 은 시험부에 사용된 원관의 반경 길이이고,  $S$

는 각 열전대 사이의 원호의 길이를 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 원관을 이용한 실험방법의 검증

본 실험장치와 실험방법의 타당성을 검증하기 위해서 단일 원관에 대한 예비실험을 수행하였다. 단일 원관을 유동의 흐름방향과 수직하게 배열한 후 이 원관의 표면에서 국부적인 열전달계수를 측정하여 Giedt<sup>[5]</sup>의 데이터와 비교하여 Fig. 6에 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 Giedt의 데이터와 예비실험의 결과가 최대 오차 5% 이내로 잘 일치하였다. 따라서 본 실험에서 사용된 실험장치와 방법이 타당함을 확인하였다.

3-2.  $S_L=0.05$  m일 때의 열전달 특성

3-2-1. 정렬 배열에서의 열전달 특성

Fig. 7~9는  $S_L=0.05$  m이고  $S_T$ 가 0.08, 0.1, 0.12 m로 변화할 때 정렬 배열에서 원주방향 위치에 따른 누셀수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 레이놀즈수가 30,000, 40,000, 50,000으로 변화함에 따라 누셀수가 각각 33, 30, 27%씩 증가하였다. 또한, 30° 부근에서 누셀수가 최소가 되며, 원주 방향의 위치에 따라 누셀수가 크게 변화하는 것을 알 수 있었다. 즉, 유체의 흐름에 가장 많이 노출된 50~90° 부근에서는 누셀수가 크게 나타나고 특히 70°일 때 누셀수가 최대가 되며 70~130°에서는 누셀수가 감소하는 경향을 보였다. 또한  $S_T=0.08$  m인 경우가  $S_T=0.1$  m와  $S_T=0.12$  m인 경우

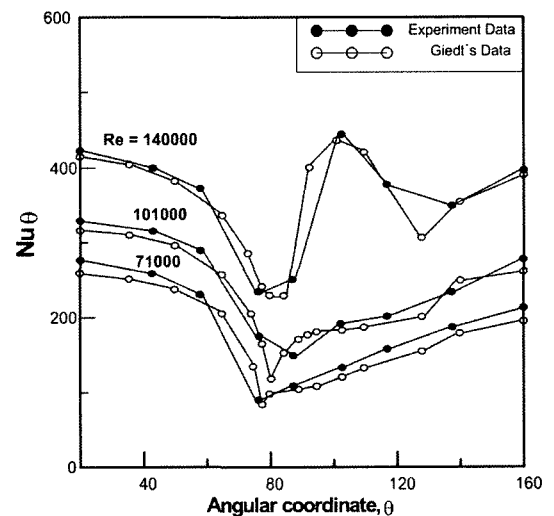


Fig. 6 Comparison of the experiment data with Giedt's data.

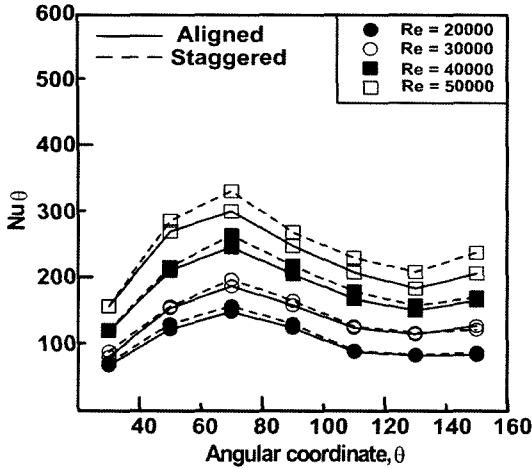


Fig. 7. Comparison of Nusselt number for aligned arrangement ( $S_L=0.05$  m,  $S_T=0.08$  m).

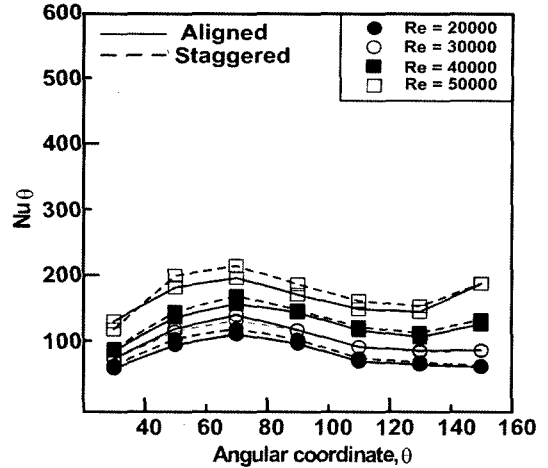


Fig. 9. Comparison of Nusselt number with aligned and staggered arrangement ( $S_L=0.05$  m,  $S_T=0.12$  m).

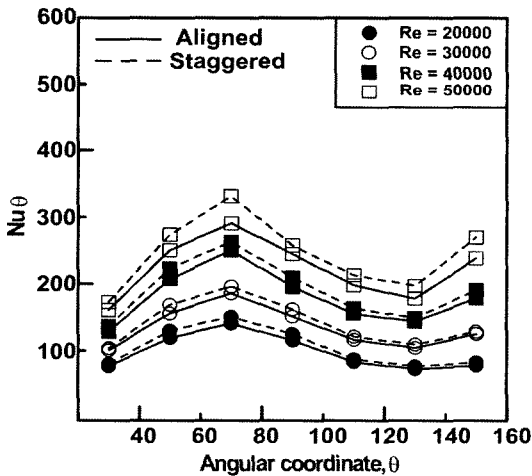


Fig. 8. Comparison of Nusselt number with aligned and staggered arrangement ( $S_L=0.05$  m,  $S_T=0.1$  m).

보다 누셀수가 크게 나타났다. 이는  $S_T=0.08$  m 주변이나 그 이하의 거리에서 최적값이 존재하고 있다는 것을 의미한다. 결과적으로  $S_L=0.08$  m, 레이놀즈수 50,000, 각도 70°일 때 누셀수가 가장 크다는 것을 알 수 있었다.

### 3-2-2. 엇갈림 배열에서의 열전달 특성

엇갈림 배열에서의 누셀수 변화도 정렬 배열과 같은 방법으로 계산하였다. Fig. 7~9에서 볼 수 있듯이 정렬 방식과 같이 30~70°까지는 증가하며 그 이후 차츰 감소하다가 150° 부근에서 증가하였다. 또한, 누셀수가 가장 크게 나타내는 곳도 정렬 배열과 마찬가지로 레이놀즈수 50,000, 각도 70° 부근으로 나타났다.

### 3-2-3. 정렬 배열과 엇갈림 배열에서의 열전달 특성

$S_L=0.05$  m인 경우에 정렬 배열과 엇갈림 배열의 누셀수를 비교해보면, 평균적으로 엇갈림 배열이 정렬 배열보다 누셀수가 4~6% 정도 크게 나타났으며, 최대 15%까지도 나타났다. 또한, 같은 각도에서 레이놀즈수에 따른 누셀수를 비교해 보면, 레이놀즈수가 증가함에 따라 누셀수 역시 증가하였으며, 극부적으로 54%의 상승을 보인 곳도 있다. 그리고  $S_T$  변화에 따른 누셀수를 비교해보면, 레이놀즈수가 20,000일 때 정렬 배열은  $S_T$ 가 0.08 m의 경우가 0.1 m와 0.12 m인 경우보다 누셀수가 각각 3.6%와 6% 정도 크게 나타났다. 그러나 레이놀즈수가 40,000일 때  $S_T$ 가 0.08 m의 경우가 0.1 m와 0.12 m인 경우보다 누셀수가 각각 30%와 40% 더 크게 나타났으며, 이는 엇갈림 배열에서도 동일한 경향을 보였다.

### 3-3. $S_L=0.075$ m일 때의 열전달 특성

#### 3-3-1. 정렬 배열에서의 열전달 특성

Fig. 10~12는  $S_L=0.075$  m이고  $S_T=0.08, 0.1, 0.12$  m로 변할 때 정렬 배열의 원관 군에서 완전히 발달한 유동에 의한 표면에서의 원주 방향 위치에 따른 누셀수의 변화이다. 그림에서 볼 수 있듯이 레이놀즈수가 30,000, 40,000, 50,000으로 증가함에 따라 누셀수는 47, 35, 27%씩 증가하였다. 그러나  $S_L=0.05$  m일 때와는 다소 다른 경향을 보인다. 우선, 150°에서 누셀수가 최소가 되고,  $S_L=0.05$  m인 경우와 유사하게 50°와 70° 부근에서 누셀수가 최대가 된다. 그러나  $S_L=0.05$  m에서는 최대값이 70° 부근에서 형성되는 반면,  $S_L=0.075$  m인 경우 50°와 70° 두 위치에서 누셀수가 최대가 된다. 이러한 결과는 50°와 70° 사이 어디에서든 최대값이 형성될 수 있다는 것

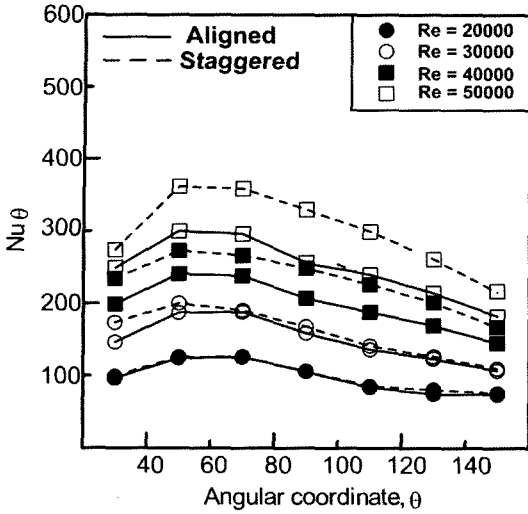


Fig. 10. Comparison of Nusselt number with aligned and staggered arrangement ( $S_L=0.075$  m,  $S_T=0.08$  m).

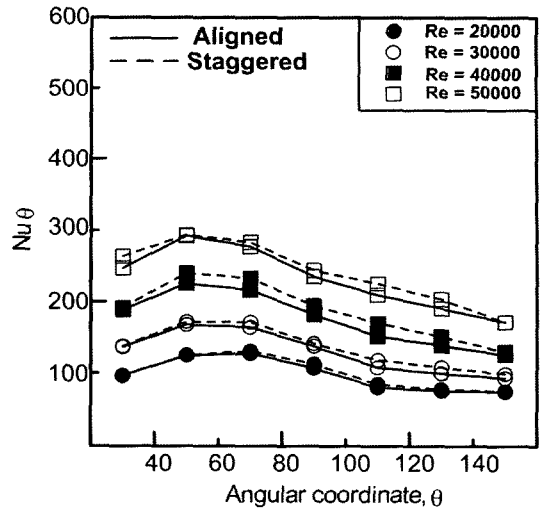


Fig. 12. Comparison of local Nusselt number with aligned and staggered arrangement ( $S_L=0.075$  m,  $S_T=0.12$  m).

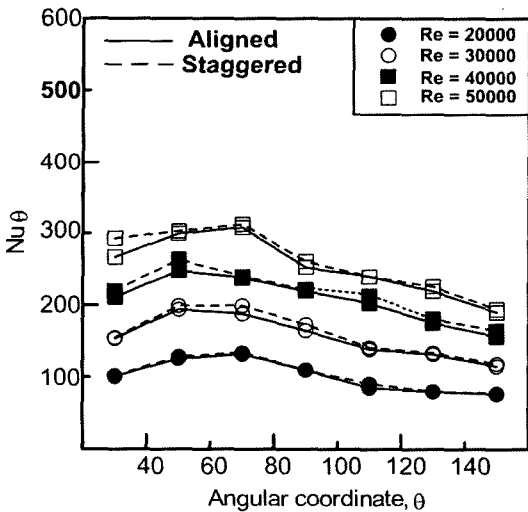


Fig. 11. Comparison of Nusselt number with aligned and staggered arrangement ( $S_L=0.075$  m,  $S_T=0.1$  m).

을 보여준다. 또한,  $S_T$ 가 증가하면서도 큰 변화가 나타난다. 우선  $S_T=0.08$  m인 경우보다  $S_T=0.1$  m인 경우가 누셀수가 더 크게 나타나고,  $S_T=0.12$  m인 경우는  $S_T=0.08$  m와  $S_T=0.1$  m에 비해 더 작은 누셀수를 나타낸다. 결과적으로  $S_T=0.1$  m, 레이놀즈수 50000, 각도  $70^\circ$ 일 때 누셀수의 최적값이 존재하고 있다.

3-3-2. 엇갈림 배열에서의 열전달 특성

엇갈림 배열에서의 누셀수는 전체적으로  $30^\circ$ 에서 증가하여  $50^\circ$ 와  $70^\circ$ 에서 가장 크고, 점차 감소하여  $150^\circ$

서 가장 작아진다. 그리고  $S_T=0.08$  m인 경우와  $S_T=0.1$  m인 경우를 비교해 보면 레이놀즈수가 30,000까지는  $S_T=0.1$  m인 경우가 더 큰 누셀수가 나타나지만, 레이놀즈수가 증가함에 따라  $S_T=0.08$  m인 경우가 더 큰 누셀수가 나타난다. 또한, 레이놀즈수가 30,000 이하의 경우  $S_T=0.1$  m인 경우가 누셀수가 크고, 레이놀즈수가 증가함에 따라  $S_T=0.08$  m인 경우가 가장 큰 누셀수가 나타난다. 따라서  $S_T$ 와 레이놀즈수 모두 누셀수가 최적값을 가지게 하는 요소가 됨을 알 수 있다.

3-3-3. 정렬 배열과 엇갈림 배열의 열전달 특성

$S_L=0.075$  m일 때 정렬 배열과 엇갈림 배열 사이의 누셀수 값은 엇갈림 배열이 더 크게 나타났으며, 국부적으로 74%의 증가를 보이는 부분도 있고, 평균적으로는  $S_L=0.075$  m일 때 엇갈림 배열이 정렬 배열보다 22% 정도 크게 보였다. 그리고 누셀수의 증가폭이 가장 큰 부분은  $S_T=0.08$  m인 경우  $130^\circ$  부분이고,  $S_T=0.1$  m인 경우  $30^\circ$  부분이며,  $S_T=0.12$  m인 경우는  $110^\circ$  부분이다.  $S_T$  변화에 따른 누셀수를 보면, 정렬 배열은  $S_T=0.1$  m인 경우가 누셀수가 가장 크고, 엇갈림 배열에서는 레이놀즈수가 30,000 이하에서는  $S_T=0.1$  m인 경우가 누셀수가 가장 크게 나타나지만, 레이놀즈수가 30,000 이상에서는  $S_T=0.08$  m인 경우가 가장 큰 누셀수가 나타난다. 따라서 정렬 배열의 경우  $S_T$ 만이 누셀수에 영향을 주지만, 엇갈림 배열에서는  $S_T$  뿐만 아니라, 레이놀즈수 역시 변수가 됨을 알 수 있다.

3-4.  $S_L=0.05$  m와  $S_L=0.075$  m 열전달 특성

Fig. 13과 14는  $S_L=0.05$  m인 경우와  $S_L=0.075$  m인 경

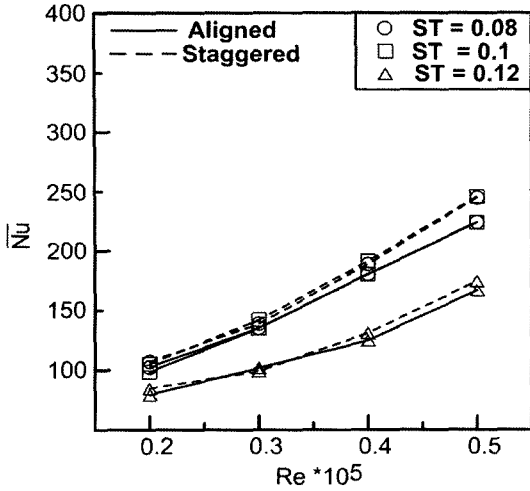


Fig. 13. Comparison of average Nusselt numbers with  $S_r$  ( $S_L=0.05$  m).

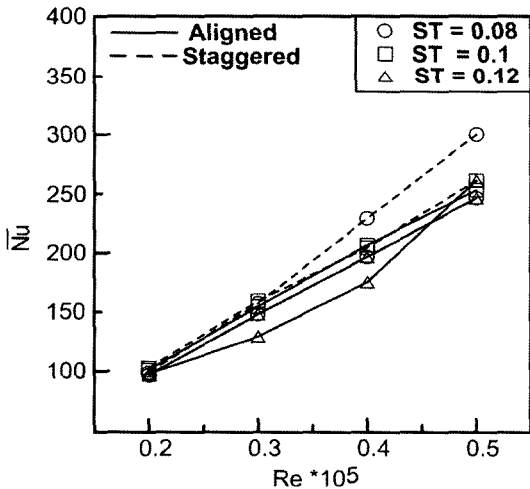


Fig. 14. Comparison of average Nusselt numbers with  $S_r$  ( $S_L=0.075$  m).

우의 평균 누셀수를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 모두 경우에서 엇갈림 배열이 정렬 배열에 비해 누셀수가 크게 나타났다. 그 중에서도 레이놀즈수가 30,000 이상에서는  $S_r$ 에 관계없이  $S_L=0.075$  m인 경우가  $S_L=0.05$  m인 경우 보다 현저하게 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 레이놀즈수가 20,000에서  $S_r=0.08$  m이고  $S_L=0.05$  m인 경우는  $S_r=0.08$  m이고  $S_L=0.075$  m인 경우 보다 평균 누셀수가 9% 크고, 레이놀즈수가 20,000에서  $S_r=0.1$  m이고  $S_L=0.05$  m인 경우가  $S_r=0.1$  m이고  $S_L=0.075$  m인 경우보다 평균 누셀수가 2% 정도 크게 나타났다. 결과적으로, 30,000 이상의 레이놀즈수에서는  $S_r$ 와 상관없이

$S_L=0.075$  m인 엇갈림 배열이 크고, 30,000 미만의 레이놀즈수에서 각각의 각도에서 누셀수의 평균을 계산하였을 때,  $S_L=0.05$  m인 엇갈림 배열이 가장 크게 나타났으며, 가장 큰 누셀수는  $S_L=0.075$  m,  $S_r=0.08$  m, 레이놀즈수 50,000인 엇갈림 배열에서 나타났다.  $S_r$ ,  $S_L$ , Re수에 대한  $Nu_b$ ,  $\bar{Nu}$ , 오차는 각각 5, 8%로 나타났다.

#### 4. 결 론

직교류형 열교환기의 가로피치( $S_L$ )가 0.05 m와 0.075 m 일 때, 세로피치( $S_r$ )를 0.08, 0.1, 0.12 m로 변화시킬 경우의 정렬 배열과 엇갈림 배열에 대한 열전달 특성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

(1) 모든 배열에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 누셀수가 증가하였다.  $S_L=0.05$  m인 경우에는 레이놀즈수가 10,000씩 증가할 때마다 약 30% 증가하였고,  $S_L=0.075$  m인 경우에는 30~75% 증가하였다.

(2) 같은 레이놀즈수에서 엇갈림 배열이 정렬 배열에 비해 큰 누셀 값을 갖으며,  $S_L=0.05$  m의 간격을 가진 경우 정렬 배열에 비해 대략 4~15% 증가하였고,  $S_L=0.075$  m의 간격을 가진 경우 5~50% 증가하였다.

(3)  $S_L=0.075$  m일 때가  $S_L=0.05$  m인 경우에 비해 보다 40% 이상 증가하였다. 그러나 엇갈림 배열에서 레이놀즈수 20,000에서는  $S_L=0.05$  m일 때 열전달이 더 좋게 나타나는 것을 볼 때 정렬 배열의 경우 레이놀즈수 30,000 이상이라는 조건이 필요함을 알았다.

(4) 같은 레이놀즈수에서  $S_L=0.05$  m의 간격을 가진 경우에 70°에서 가장 큰 누셀수가 나타났고 그 이후 감소하였으며,  $S_L=0.075$  m 경우에는 50°와 70°에서 최대가 되며 그 이후 감소하였다.

#### 후 기

이 논문은 2004학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음(INHA-31455).

#### 기호설명

- A : 열전달면적[m<sup>2</sup>]
- D : 튜브 지름[m]
- h : 대류열전달계수[W/m<sup>2</sup> · K]
- Nu : 국소 누셀수
- k : 열전도율[W/m · K]
- I : 전류[A]
- V : 전압[V]
- Re : 레이놀즈수

$S_L$  : 관 중심 사이를 측정된 가로피치[m]

$S_T$  : 관 중심 사이를 측정된 세로피치[m]

$\overline{Nu}$  : 평균 누셀수

#### 하첨자

wall : 튜브 표면

$\infty$  : 대기

#### 참고문헌

1. Zhukauskas, A. "Heat Transfer of a Cylinder flow", Hemisphere Publishing Co., 1985.
2. Martin, A.R.; Saliel, C. "Frictionlosses and convective heat transfer in sparse, periodic cylinder arrays in cross flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, 41, 2383-2397.
3. Buyruk, E.; Jonhson, M.W. "Numerical and experimental study of flow and heat transfer around a tube in cross-flow at low Reynolds number", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 1998, 223-232.
4. Debusschere, B. "Measurement of friction, heat transfer, and mass transfer in a severely outgassing tube banks", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 1998, 3015-3024.
5. Giedt, W.H. "Local Nusselt number for airflow normal to a circular", *Trans, ASME*, 1949, 71, 375.
6. 정재호. "충류 유동에서 튜브군 주위의 대류 열전달에 관한 연구", 인하대학교 석사학위논문, 2000.08.