

## 디퓨저 타입 레큐퍼레이터 헤더에서 유동분배에 미치는 베인의 영향

정 영 준, 김 서 영\*, 김 광 호\*, 콰 재 수\*\*, 강 병 하\*\*\*

국민대학교 대학원, \*한국과학기술연구원, \*\*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부, \*\*\*국민대학교 기계자동차공학부

### Effect of Vanes on Flow Distribution in a Diffuser Type Recuperator Header

Young Jun Jeong, Seo Young Kim\*, Kwang Ho Kim\*, Jae Su Kwak\*\*, Byung Ha Kang\*\*\*

*Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

*\*Thermal/Flow Control Research Center, KIST, Seoul 136-792, Korea*

*\*\*School of Aerospace and Mechanical Engineering, Hankuk Aviation University, Kyunggi 412-791, Korea*

*\*\*\*School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

*(Received January 26, 2006; revision received September 8, 2006)*

**ABSTRACT:** In a SOFC/GT (solid oxide fuel cell / gas turbine) hybrid power generation system, the recuperator is an indispensable component to enhance system performance. Since the expansion ratio to the recuperator core is very large, generally, the effective header design to distribute the flow uniformly before entering the core is crucial to guarantee the required performance. In the present study, we focus on the design of a diffuser type recuperator header with a 90 degree turn inlet port. To reduce the flow separation and recirculation flows, multiple horizontal vanes are used. The number of horizontal vanes is varied from 0 to 24. The air flow velocity is measured at 40 points just behind the core outlet by using a hot wire anemometer. Then, the flow non-uniformity is evaluated from the measured flow velocity. The experimental results showed that inlet air velocity did not effect on relative flow non-uniformity. According to increasing the number of horizontal vanes, flow non-uniformity reduced about 40~50% than without using horizontal vanes.

**Key words:** Recuperator header(레큐퍼레이터 헤더), Flow distribution(유동분배), Horizontal vane(수평 베인), Flow non-uniformity(유동 불균일도)

#### 기 호 설 명

$D$  : 입구관 내경 [mm]  
 $H$  : 헤더 높이 [mm]  
 $L$  : 헤더 폭 [mm]

$M$  : 수평 베인 개수  
 $N$  : 속도 측정지점수  
 $R$  : 수평 베인의 반경 [mm]  
 $R_c$  : 헤더 중심과 입구관 사이의 거리 [mm]  
 $Re$  : Reynolds 수,  $\rho V D_h / \mu$   
 $S$  : 상대 유속차  
 $t$  : 코어 간 두께 [mm]  
 $V$  : 공기속도 [m/s]  
 $X, Y$  : 좌표 [mm]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5683; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: seoykim@kist.re.kr

그리스 문자

- $\Delta P$  : 압력차
- $\epsilon$  : 축소비율
- $\sigma$  : 유동 불균일도

하첨자

- avg : 평균
- n : 속도 측정지점

1. 서 론

분산형 발전시스템에 대한 수요가 증가하는 추세에 맞춰 연료전지와 가스터빈을 결합한 혼합발전시스템에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 연료전지/가스터빈 혼합발전시스템에서 가스터빈의 배출가스와 연료전지 반응로에 유입되는 공기 사이의 열교환을 수행하는 레큐퍼레이터(recuperator)는 시스템의 효율을 향상시키는 데 필수적 장치이다. 일반적으로 열교환 성능을 향상시키기 위하여 체적당 열교환 면적비가 높은 판-핀 열교환기가 사용된다.<sup>(2)</sup> 레큐퍼레이터에서 판-핀 열교환기 코어를 통과하는 유동을 균일하게 분배하는 것은 설계된 열교환기의 성능을 보장하는 데 필수적이다. 만약 유동의 분배가 불균일하면 국부적인 열지점(hot spot)과 과도한 열응력의 발생을 초래할 수 있다.

유동의 불균일 분배는 형상에 의한 불균일 분배와 작동조건에 의한 불균일 분배로 구분할 수 있다.<sup>(2)</sup> 작동조건에 의한 불균일 분배는 높은 점성유동과 2상(two-phase) 유동에서 보통 발생한다. 하지만 형상에 의한 유동의 불균일 분배는 부적합한 헤더(header) 설계와 밀접한 관계가 있다.

유동 불균일 분배에 관한 대부분의 선행 연구들은 U-type과 Z-type의 헤더에 대해 수행되었다. Lalot et al.<sup>(3)</sup>은 대향류 방식의 열교환기에서 유동의 불균일 분배가 25% 이상의 효율 감소를 유발하는 것을 보였다. Jiao et al.<sup>(4)</sup>은 판-핀 열교환기에서 헤더의 형상이 유동의 불균일 분배에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Jiao et al.<sup>(5)</sup>은 판-핀 열교환기에서 유동분배에 미치는 분배기의 입구각의 영향에 대해 조사하였고, 분배기의 입구각은 압력강하에 미미한 영향을 끼치는 것을 보

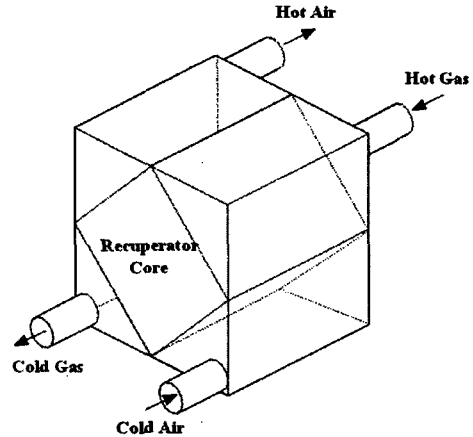


Fig. 1 Diffuser type recuperator.

고하였다. Wen and Li<sup>(6)</sup>는 판-핀 열교환기에서 개선된 헤더 형상에 대해 실험하였다.

현재 연료전지/가스터빈 혼합 발전시스템을 개발하기 위한 국가 연구사업이 수행되고 있다. 시스템의 통합을 위해서 Fig.1과 같이 입구관에서 유동이 90° 회전하는 캐비닛 디퓨저 방식(cabinet diffuser type)의 레큐퍼레이터 헤더의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 입구 헤더에서의 유동분포를 살펴보고, 수평 베인(horizontal vane)이 유동분배에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치 개략도를 Fig.2에 나타내었다. 실험장치는 입구 헤더, 코어, 그리고 출구 헤더로 구성이 된다. 헤더는 5mm 두께의 아크릴 판을 사용하여 제작하였으며 출구 헤더의 형상은 베인이 없는 입구 헤더의 형상과 동일하다. 입구 헤더와 출구 헤더에는 점선과 같이 경사판을 설치하였다.

레큐퍼레이터 코어에 유동을 균일하게 분배하기 위해 Fig.3(a)와 같이 입구 헤더에 수평 베인을 설치하고 그 영향을 살펴보았다. 본 연구에 사용된 베인은 1mm 두께의 아크릴판으로 제작되었고, Fig.3(b)와 같이 헤더 입구관에서 5mm 떨어진 위치에 설치하였다.

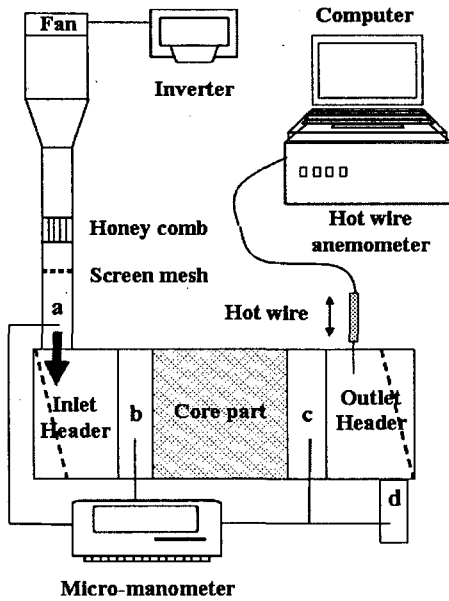


Fig. 2 Schema of the present experimental set-up.

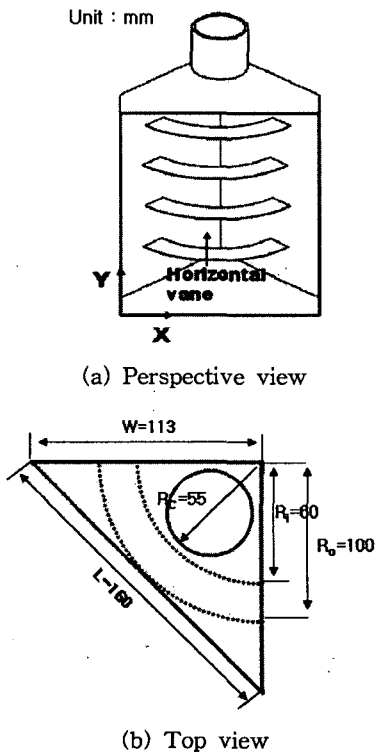


Fig. 3 Inlet header configuration.

Table 1 Core dimension

Core type	$D$ [mm]	$t$ [mm]	$\epsilon$
A	20	3	0.6
B	7	0.1	0.93
C	5.2	1	0.5

본 연구에 사용된 실험 장치 코어의 형상을 Table 1에 나타내었다. 실제 판-핀 열교환기 코어에서의 압력강하 특성을 모사하기 위해 원형 판다발을 사용하였다. 코어 관의 직경이 감소함에 따라 코어에서의 압력강하는 증가하고 코어의 입구와 출구에는  $60 \text{ holes/in}^2$ 의 철망을 설치하여 유입되는 공기가 접하는 면을 균일하게 하였다.

공기 유동은 입구관에 부착된 AC팬(Sanyo-Denki, No. 109-602)을 통하여 공급하였으며 인버터를 사용하여 유량을 조절하였다. AC팬에서 헤더 입구관에 유입되는 공기의 유동이 균일 유입되게 하기 위해  $32 \text{ holes/in}^2$ 의 철망과 허니컴을 설치하였다. 실험장치에 유입되는 공기의 압력과 온도는 1기압, 300 K이다.

공기의 속도는 Fig.4와 같이 코어 출구부분의 40개 지점에서 열선유속계(Dantec, No. 91N10)를 사용하여 측정하였다. 공기의 속도는 30초간 수집된 자료를 평균하여 각 지점의 속도로 사용하였다. 입구 헤더, 코어, 그리고 출구 헤더에서의 압력강하는 a~d 네 지점에서 디지털 마이크로압력계(Fueness Control Model, No.FCO510)를 사용하여 측정하였다.

본 연구에서는 입구 헤더에서 유동의 불균일도

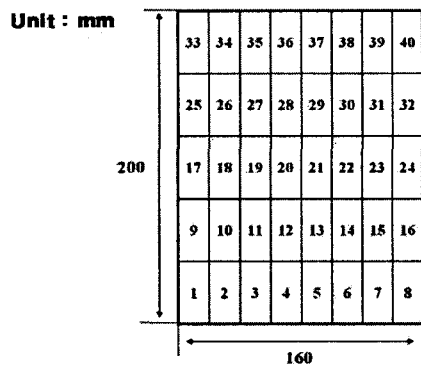


Fig. 4 Velocity measuring points in the outlet header.

를 정량적으로 나타내기 위해 상대 유속차( $S$ )와 표준편차 개념의 유동 불균일도( $\sigma$ )를 사용하였다.

$$S = \frac{V_n - V_{avg}}{V_{avg}} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (V_n - V_{avg})^2}{N-1}} \quad (2)$$

여기서,  $V$ 는 측정지점 속도이고,  $N$ 은 전체 속도 측정지점수이다.

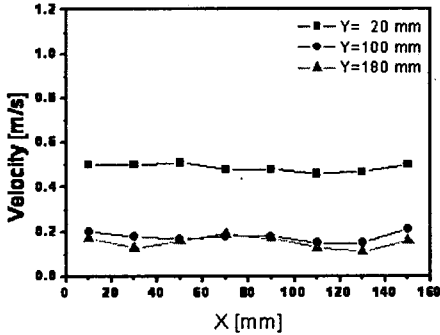
### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 상온 상압(300 K, 1기압)의 조건에서 입구 헤더에 유입되는 공기의 유량을 변화시키면서 각 지점의 속도분포를 측정하였다.

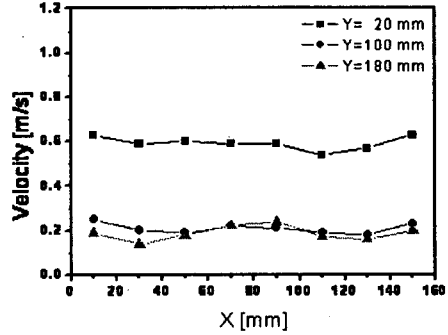
먼저 베인이 장착되지 않은 헤더에 대해 실험하였다. Type C 코어의 경우 AC팬 인버터를 사

용하여 Reynolds 수를 약 2,700에서 4,800까지 변화시켰을 경우 각 지점의 속도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 높이에 따른 속도분포를 살펴보면  $Y=20$  mm인 바닥 지점의 속도가 상부 두 지점의 속도보다 약 5배 정도 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.  $Y=100, 180$  mm에서는 중심부분의 속도가 약간 높게 나타나고 있다. 이러한 경향은 유속이 증가하여도 유사하게 나타났다.

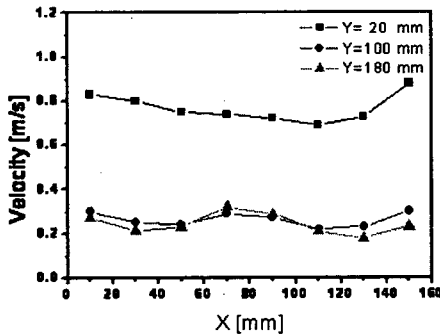
입구 헤더에 유입되는 공기의 Reynolds 수에 따른 속도분포의 변화를 비교하기 위해 식(1)을 사용하여 상대 유속차를 Fig. 6에 나타내었다.  $Y=20$  mm인 지점의 경우 평균 속도보다 약 2~2.5 배 정도 높은 속도분포를 나타내고 있고,  $Y=100, 180$  mm 지점의 속도는 평균 속도보다 50% 가량 낮았다. Reynolds 수가 증가하여도 상대 유속차는 유사한 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Reynolds 수를 4,200으로 고정시키고 코어 타입을 A, B, C로 변화시키면서 유동 균일도를 관찰하였다.



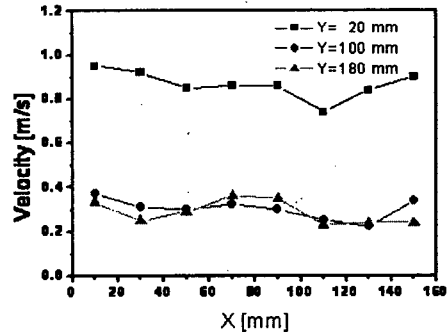
(a) Re=2760



(b) Re=3320

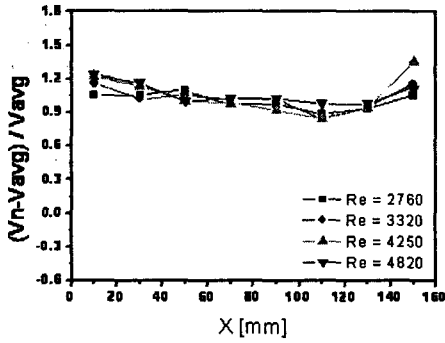


(c) Re=4250

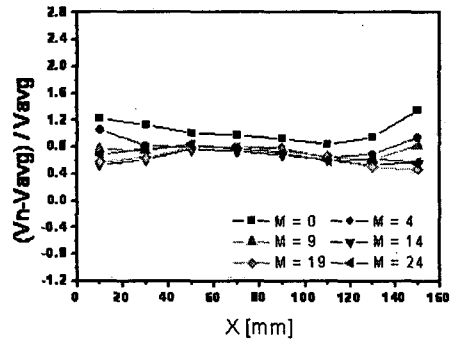


(d) Re=4820

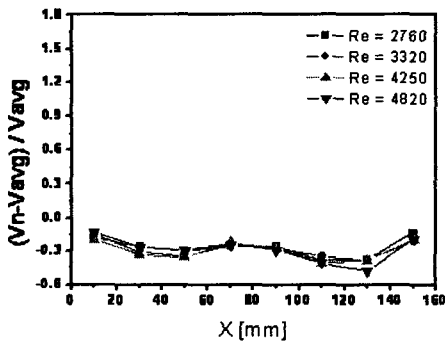
Fig. 5 Velocity profiles according to Reynolds number (Core C).



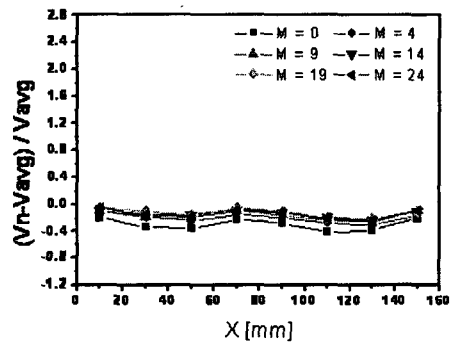
(a) Y=20 mm



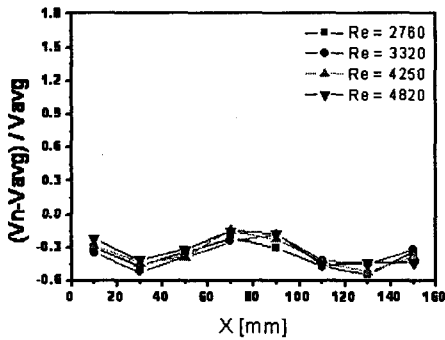
(a) Y=20 mm



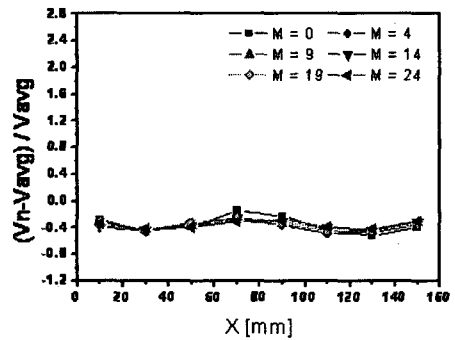
(b) Y=100 mm



(b) Y=100 mm



(c) Y=180 mm



(c) Y=180 mm

Fig. 6 Relative flow non-uniformity (Core C).

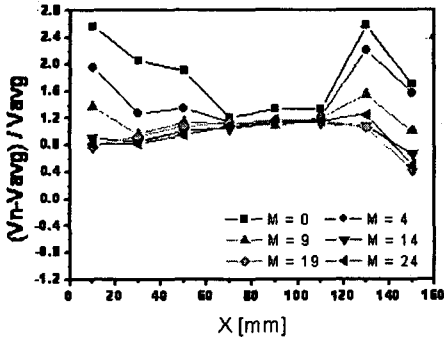
Fig. 7 Relative flow non-uniformity according to the number of horizontal vanes (Core C).

Fig. 5와 Fig. 6을 통해 동일한 높이에서 최고 속도와 최저 속도의 차이가 20%를 넘지 않는 반면에 동일한 X지점에서 높이에 따라 속도 차이는 최대 5배까지 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 코어면의 높이에 따른 유동분포의 균일도를 향상시키기 위해 수평 배인만

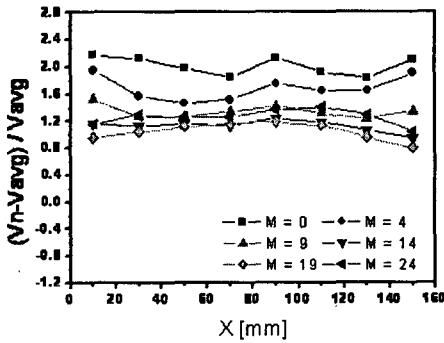
을 사용하였다.

유동분포의 균일도를 향상시키기 위해 수평 배인을 사용하였을 경우 높이에 따른 상대 유속차를 Fig. 7에 나타내었다. 수평 배인의 개수가 9개 이상이 되면 비슷한 속도분포를 나타내고 있다.

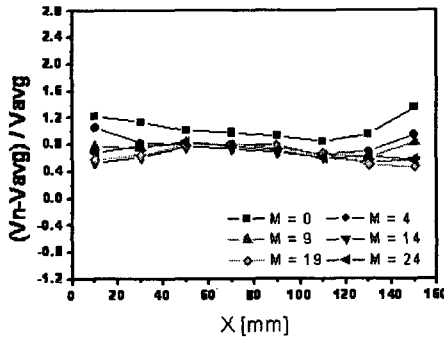
Fig. 8에 Y=20 mm인 지점에서 각각의 코어형



(a) Core A



(b) Core B



(c) Core C

Fig. 8 Relative flow non-uniformity parameter according to the core type ( $Y=20$  mm).

상에 따른 상대 유속차를 나타내었다. 코어에서의 유동저항이 가장 작은 Type A의 경우  $X=150$  mm 지점의 상대 유속차값이 다른 경우에 비해 매우 큰 것을 알 수 있다. 이것은 코어에서의 유동저항이 적기 때문에 유동이  $Y=20$ ,  $X=150$  mm인 지점으로 유동이 집중되었기 때문이다. 따라서 코어에서의 유동저항이 큰 경우에 유동 균

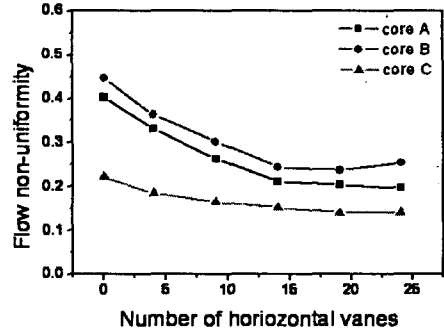


Fig. 9 Flow non-uniformity according to the number of horizontal vanes.

일도의 측면에서는 유리함을 알 수 있다.

Fig. 9에 베인의 개수에 따른 유동 불균일도 공식(2)를 사용하여 나타내었다. 베인의 개수가 증가함에 따라 코어 형상 A, B, C의 경우 모두 유동의 불균일도가 감소하다가 베인의 개수가 20인 지점에서 수렴되었다. 또한 코어에서의 유동저항이 큰 코어 C의 경우 유동의 불균일도( $\sigma$ )가 0.23에서 0.14로 약 40% 감소하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 연료전지/가스터빈 혼합발전시스템용 레큐퍼레이터 헤더를 설계하기 위해 입구 헤더에서 유량의 증가에 따른 속도분포의 변화와 헤더에 설치된 수평 베인이 유동분배에 미치는 영향을 살펴보았다.

실험결과 상대 유속차는 입구 유속에 큰 영향이 없었다. 동일한 Reynolds 수에서 코어에서의 유동저항이 클수록 유동 불균일도가 감소하였고, 수평 베인의 개수 증가에 따라 유동 불균일도는 베인을 사용하지 않았을 경우보다 약 40~50% 유동 불균일도가 감소하였다.

#### 후 기

본 연구는 산자부 차세대 신기술개발 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Fuel Cell Annual Report, 2003, US Depart-

- ment of energy, NEFL.
2. Kay, W.M. and London, A.L., 1984, Compact Heat Exchanger, 3rd ed., McGraw-Hill.
  3. Lalot, S., Florent, P., Lang, S.K. and Bergles, A.E., 1999, Flow distribution in heat exchanger, Applied Thermal Engineering, Vol. 19, pp. 847-863.
  4. Jiao, A., Zhang, R. and Jeong, S., 2003, Experimental investigation of header configuration on flow maldistribution in plate-fin heat exchanger, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 1235-1246.
  5. Jiao, A., Li, Y., Chen, C. and Zhang, R., 2003, Experimental investigation on fluid flow maldistribution in plate-fin heat exchanger, Applied Thermal Engineering, Vol. 24, pp. 25-31.
  6. Wen, J. and Li, Y., 2004, Study of flow distribution and its improvement on the header of plate-fin heat-exchanger, Cryogenics, Vol. 44, pp. 823-831.