

## 경사 분배관에 의한 다지관내의 유속분포에 대한 실험적 연구

### Experimental study on flow distribution in manifolds by a tapered header

윤 영 환\*, 이 상 현\*  
Y. H. Yoon, S. H. Lee

**Key words** : Tapered header(경사 분배관), Uniform flow distribution(균일한 유속 분포), Manifolds(다지관)

#### Abstract

A header is the device that makes uniform flow distribution in all branches from header of heat exchangers, pipe burner or chemical equipments. In this study, experimental tests have been performed in order to investigate the flow distribution characteristics in a straight header and tapered header which have 6 and 11 glass pipe branches. The experimental equipment consists of a water circulation system where the fluid velocity in each glass pipe is measured by Ar-ion LDV system.

From the experiments and the theoretical equation, it could be recommended that tapered header should be determined so that its internal velocities inside the header become uniform according to taper of the header and number of attached branches for uniform flow distribution in energy systems.

#### 1. 서 론

열교환기나 화학 장치에 부착된 분배관(distribution header)은 유체를 여러 갈래로 분배하는 장치로서 예를 들면 열교환기에서 유체가 균일하게 분배되지 않으면 국부적으로 고온부(hot spot)가 생기거나 전열 계수가 저감되며, 화학 장치 중 제지 기용 headbox에서 유체를 고루 분배시켜 주는 분배관의 설계가 잘못되는 경우 불균일 유속 분포로 인해 제품의 결함을 초래한다. 그러나 분배관 내의

유동 현상을 보면 각 분배관에서 모멘텀(momentum)의 변화, 관 마찰 또는 각종 압력 손실(minor losses)이 발생하므로 분배관 기기 자체는 단순하지만 유동 역학(mechanism)은 매우 복잡하여 해석적 설계가 용이하지 않다.

먼저 열교환기의 분배관에 대한 해석에 대해 Perlmutter<sup>(1)</sup> 및 Kubo<sup>(2)</sup>는 해석적 방법과 실험적 방법으로 분석하여 서로 비교하였고 Shen<sup>(3)</sup>, Choi<sup>(4)</sup> 및 Datta<sup>(5)</sup>는 열교환기의 분배관과 합류관에 대해 해석적 및 수치해석적 해법을 연구하였다. 이 중 Choi<sup>(4)</sup>는 수치해석적 기법에 의해 열교환기의 분배관과 합류관의 다지관(manifold)의 분배관(header)

\* 창원대학교 기계공학과

단면적이 클수록 더 좋은 유속 분포를 얻을 수 있음을 제시하였고, Datta<sup>(5)</sup>는 일차원 수학적 모델링으로 (AR) 및  $C_d C_r^{1/2}$ 의 값이 낮을수록 균일한 유속 분포를 얻을 수 있다고 제시했다. 여기서 AR은 분배관에서 나온 다지관(多枝管)과 분배관 단면적의 비이고  $C_d$ 는 배출손실,  $C_r$ 는 유입 손실 등으로 이도 자연히 분배관(header)의 단면적이 커질수록 AR값이 적어지며 Eguchi<sup>(6)</sup> 등도 AR값이 적을수록 C 등 각종 손실 계수가 적어짐을 보고하고 있다.

그러나 열교환기에서 분배관의 단면적은 설치 장소에 의해 한정되며, 특히 전술한 화학 장치인 제지기계용 headbox에서는 유체 내에 종이 섬유를 함유하고 있으므로 분배관의 단면적을 크게 하면 분배관 내의 유속이 감소하여 종이 침전하여 결함을 초래한다.

Hong<sup>(7)</sup>는 수치 해석의 결과로서 경사 분배관(tapered header)이 일정단면의 분배관보다 균일한 유속 분포를 얻을 수 있다고 발표하고 있다. 그리고 열교환기에서 분배관(header) 끝부분에 유체가 정체되어 압력의 상승으로 분배관에서 끝분지관의 유속이 상승하는 것을 막기 위해 제지기계의 headbox에서는 분배관의 끝부분에서 일정 유량을 유출(by-pass)시켜 유속 분포를 완전히 균일하게 하고 있다.

이와 같이 경사 분배관(tapered header)에서 분배관의 끝부분에서 일부 유량을 유출(by-pass)하여 분지관들로 흐름을 균일하게 하는 설계 기술은 제지기계의 headbox, 정밀 냉각장치 및 공기 조화 장치 등에 응용될 것이며, 유출(by-pass)이 없는 경우는 일반 열교환기의 설계에 적용될 것이다.

따라서 본 논문에서는 경사 분배관(tapered header)의 유체 유동 이론을 정리하고 경사 기울기, 분지관의 수 및 바이-패스 유량에 따라 유동 분포가 어떻게 변하는가를 LDV에 의해 실측하여 유동 이론과 실측치간 관계를 규명하여 경사 분배관(tapered header)의 설계 자료를 도출하고자 한다.

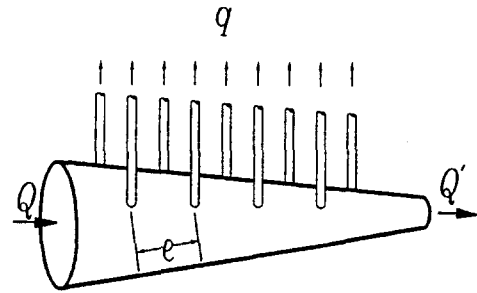


Fig. 1 Illustration of tapered header

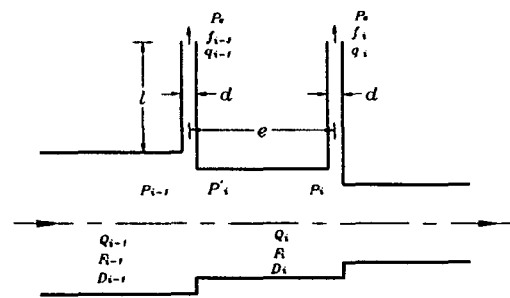


Fig. 2 Multiple step pipes simplified from tapered header for analysis

## 2. 이 론

단면적이 출구 쪽으로 축소되는 분배관(tapered header)의 모양을 입체적으로 간략히 그리면 Fig. 1과 같고 그림에서  $Q$ 는 펌프에서 공급되는 유량을 나타내고  $Q'$ 은 유출(by-pass)되는 유량이며  $q$ 는 분배관에 수직인 방향으로 연결된 다지관(manifold)으로 흐르는 유량을 나타낸다. 이 분배관에 베르누이 방정식을 적용하여 분배관의 기울기와 분지관의 개수에 대한 관계 이론은 다음과 같다.<sup>(8)</sup>

먼저 해석의 단순화를 위해 분배관의 직경을 평균 직경으로 일정한 계단식 관이라고 가정하면 Fig. 2와 같다.

먼저 다지관중  $i-1$  분지관의 직전에서 분배관의 압력인  $P_{i-1}$ 과 분배관 직후 압력  $P'_i$  사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{P_{i-1}}{\gamma} + \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{i-1}}{F_{i-1}} \right)^2 = \frac{P_i}{\gamma} + \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_i}{F_i} \right)^2 + \xi_{i-1} \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{i-1}}{F_{i-1}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서,

- $P_{i-1}$  : i-1번 분지관 직전에서 분배관의 압력  
 $Q_{i-1}$  : i-1번 분지관 직전에서 분배관의 유량  
 $F_{i-1}$  : i-1번 분지관 직전에서 분배관의 단면적  
 $P_i$  : i-1번 분지관 직후에서 분배관의 압력  
 $Q_i$  : i번 분지관 직전에서 분배관의 유량  
 $F_i$  : i번 분지관 직전에서 분배관의 단면적  
 $\xi_{i-1}$  :  $P_{i-1}$ 과  $P_i$ 사이의 수두 손실 계수  
 $\gamma$  : 유체의 비중량  
 $g$  : 중량 가속도

그리고  $P_i$ 와  $P_{i+1}$ 사이의 직선 관에 해당하는 분배관에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{P_i}{\gamma} = \frac{P_{i+1}}{\gamma} + \lambda_i \frac{e}{D_i} \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_i}{F_i} \right)^2 \quad (2)$$

여기서,

- $D_i$  : i번 분배관의 수력 직경  
 $F_i$  : i번 분배관의 단면적  
 $e$  : 각 분지관 사이의 분배관 길이  
 $\lambda_i$  : i번 분배관의 관 마찰 손실 계수

다음 i-1번 분지관의 입구와 출구 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{P_{i-1}}{\gamma} = \frac{1}{2g} \left( \frac{q_{i-1}}{f_{i-1}} \right)^2 + \xi_{i-1} \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{i-1}}{F_{i-1}} \right)^2 + \lambda_{i-1} \frac{l}{d} \frac{1}{2g} \left( \frac{q_{i-1}}{f_{i-1}} \right)^2 + \frac{P_e}{\gamma} + z \quad (3)$$

여기서,

- $q_{i-1}$  : i-1번 분지관 내의 유량  
 $f_{i-1}$  : i-1번 분지관의 단면적  
 $\lambda_{i-1}$  : i-1번 분지관 내의 관 마찰 손실 계수  
 $l$  : 분지관의 길이  
 $\xi_{i-1}$  : i-1번 분지관의 입구 수두 손실 계수  
 $P_e$  : i-1번 분지관의 출구 압력

$z$  : i-1번 분지관의 입구와 출구의 위치 수두 차

그리고 i-1번 분지관에 대해서 연속의 식을 쓰면 다음과 같다.

$$Q_{i-1} = n \cdot q_{i-1} + Q_i \quad (4)$$

여기서,  $n$  : 분지관의 열 수

(1)식과 (2)식에서  $\frac{P_i}{\gamma}$ 를 소거하면

$$\frac{P_{i-1}}{\gamma} + \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{i-1}}{F_{i-1}} \right)^2 = \frac{P_i}{\gamma} \left( 1 + \lambda_i \frac{e}{D_i} \right) \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_i}{F_i} \right)^2 + \xi_{i-1} \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{i-1}}{F_{i-1}} \right)^2 \quad (5)$$

(3)식을 i번 분지관에 대해 다시 쓰면

$$\frac{P_i}{\gamma} = \left( 1 + \lambda_i \frac{l}{d} \right) \frac{1}{2g} \left( \frac{q_i}{f_i} \right)^2 + \xi_i \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_i}{F_i} \right)^2 + \frac{P_e}{\gamma} + z \quad (6)$$

(3)식 및 (6)식을 (5)식에 대입하면

$$\left( 1 + \lambda_i \frac{l}{d} \right) \frac{1}{2g} \left( \frac{q_{i-1}}{f_{i-1}} \right)^2 + \xi_{i-1} \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{i-1}}{F_{i-1}} \right)^2 + \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{i-1}}{F_{i-1}} \right)^2 + \frac{P_e}{\gamma} + z = \left( 1 + \lambda_i \frac{l}{d} \right) \frac{1}{2g} \left( \frac{q_i}{f_i} \right)^2 + \xi_i \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_i}{F_i} \right)^2 + \left( 1 + \lambda_i \frac{e}{D_i} \right) \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_i}{F_i} \right)^2 + \xi_{i-1} \frac{1}{2g} \left( \frac{Q_{i-1}}{F_{i-1}} \right)^2 + \frac{P_e}{\gamma} + z \quad (7)$$

(7)식의 양변에  $2g \left( \frac{f_i}{q_i} \right)^2$ 을 곱하고 정리하면

$$\left( 1 + \lambda_i \frac{l}{d} \right) \left( \frac{f_i}{f_{i-1}} \right)^2 \left( \frac{q_{i-1}}{q_i} \right)^2 + (1 + \xi_{i-1} - \xi_{i-1}) \cdot \left( \frac{f_i}{F_{i-1}} \right)^2 \left( \frac{Q_{i-1}}{q_i} \right)^2 - \left( 1 + \lambda_i \frac{l}{d} \right) \cdot \left( \frac{f_i}{F_i} \right)^2 \left( \frac{Q_i}{q_i} \right)^2 - \left( 1 + \xi_i + \lambda_i \frac{e}{D_i} \right) \left( \frac{f_i}{F_i} \right)^2 \left( \frac{Q_i}{q_i} \right)^2 = 0 \quad (8)$$

(4)식을 양변 제곱하면

$$Q_i^2 = n^2 \cdot q_{i-1}^2 + 2n \cdot q_{i-1} \cdot Q_i + Q_i^2 \quad (9)$$

그리고 각 손실 계수 항들을 아래와 같이 나타내면

$$A_i = 1 + \lambda_i \frac{l}{d}$$

$$K_i = 1 + \xi_i - \xi'_{i-1} \quad (10)$$

$$K'_i = 1 + \xi_i + \lambda' \frac{e}{D}$$

(9) 및 (10)식을 (8)식에 대입하고 정리하면

$$\begin{aligned} & \left[ A_i \left( \frac{f_i}{f_{i-1}} \right)^2 + n^2 K_i \left( \frac{f_i}{F_{i-1}} \right)^2 \right] \left( \frac{q_{i-1}}{q_i} \right)^2 \\ & + 2n K_i \left( \frac{f_i}{F_{i-1}} \right)^2 \left( \frac{Q_i}{q_i} \right) \left( \frac{q_{i-1}}{q_i} \right) \\ & + \left[ K_i \left( \frac{f_i}{F_{i-1}} \right)^2 - K'_i \left( \frac{f_i}{F_i} \right)^2 \right] \left( \frac{Q_i}{q_i} \right)^2 - A_i = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

위 식에서 분지관의 면적이 모두 동일하므로  $f_i = f_{i-1} = f$ 라 놓고, 분지관으로 분사되는 유체의 유량이 분배관의 길이 방향으로 균일 유동이라면  $q_{i-1} = q_i$ 가 되어서 (11)식을 다시 정리하면

$$\begin{aligned} \left( \frac{F_{i-1}}{F_i} \right)^2 &= \frac{K_i}{K'_i} \left( \frac{n + Q_i}{q_i} \right)^2 \left( \frac{q_i}{Q_i} \right)^2 \cdot \frac{F_{i-1}}{F_i} \\ &= \sqrt{\frac{K_i}{K'_i}} \frac{n + \frac{Q_i}{q_i}}{\frac{Q_i}{q_i}} \quad (12) \end{aligned}$$

(10)식에서  $\xi_i, \xi'_{i-1}, \lambda_i$  은 그 크기가 1에 비해 무시할 정도로 적은 값이므로  $K_i \approx K'_i \approx 1$ 이라 가정하면,

$$\frac{F_{i-1}}{F_i} = \frac{n + \frac{Q_i}{q_i}}{\frac{Q_i}{q_i}} \quad (13)$$

만약 분지관의 열 수  $n=1$ 이고, 분지관이 24개 라면 바이패스(By-pass) 유량비는 다음 식 (14)

와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{Q}{24q_i + Q} \quad (14)$$

$Q$  : 분배관을 통과하는 전 유량

$Q'$  : 유출(by-pass)되는 유량

위 식에  $Q$ 와  $Q'$ 의 비만 결정되면 (13)식에  $Q/q_i$ 의 값을 분배관의 출구 끝에서 역으로 순차적으로 계산하여  $F_{i-1}/F_i$ 의 값을 역시 역으로 순차적으로 계산할 수 있으므로  $Q'/Q$ 의 비에 따라 분배관의 기울기를 계산할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이상이 문헌(8)의 이론을 본 분배관에 적용하는

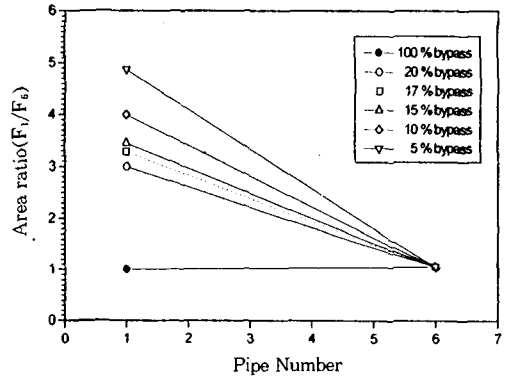


Fig.3 Theoretical slope of tapered header with 6 branch pipes

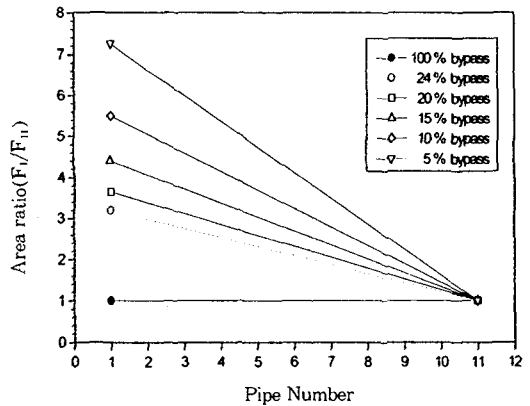


Fig.4 Theoretical slope of tapered header with 11 branch pipes

것이나, 저자가 단순히 헤더내의 내부 유속( $V_i, V_{i-1}$ )이 균일하다고 가정하고 유량 관계식을 유도하면 다음 식(15)와 같이 되어 결국 에너지 방정식에서 유도한 식(13)과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\frac{V_{i-1}}{V_i} = \frac{F_{i-1}}{F_i} = 1 \text{에서}$$

$$\frac{F_{i-1}}{F_i} = \frac{Q_i + nq}{Q_i} = \frac{n + \frac{Q_i}{q}}{\frac{Q_i}{q}} \quad (15)$$

본 식 (13) 혹은 (15)에 대해 분지관의 개수가 6개 및 11개에 대해 각 바이-패스 유량비에 따라 헤더의 기울기를 계산한 값들을 나타내면 Fig.3 및 Fig.4와 같다. 양 그림에서 점선은 본 실험 헤더의 기울기인 3.25 : 1(첫 분지관의 헤더 단면적과 마지막 분지관의 헤더 단면적 비)를 나타내고 이에 대한 요구 바이패스 유량이 기재되어 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

Fig.5에 실험 장치의 개략도가 나타나 있다. 이 그림에서는 항상 일정한 수위를 유지하는 수조(water reservoir)로부터 전양정 18m의 원심 펌프가 물을 흡입하여 분배관으로 보내면 유리로 된 분지관들을 통해 수조로 다시 유입되고 일부 바이

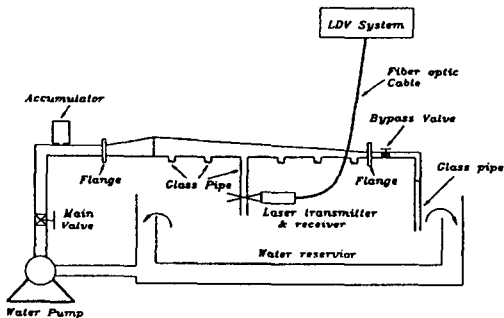


Fig.5 Schematic diagram of experimental apparatus

패스(by-pass)유량도 다시 수조로 유입되도록 되어 있다. 수조는 분지관으로부터 고속으로 분사되는 물과 함께 펌프로 유입될 수 있는 대기 중의 공기로 인한 공동 현상(cavitation)을 방지하기 위해 2중 구조로 하였다.

속도의 측정은 LDV로 측정하였는데 각 분지관과 바이-패스 관에서 유리관을 설치하여 유속을 측정하고 측정된 결과는 컴퓨터를 통해 저장되도록 하였다. LDV는 유체 내의 한 지점의 유속만 측정하므로 정확한 측정 지점의 선정을 위해서 이송 장치를 제작하여 설치하였다. 분배관은 플랜지로 연결하여 형상이 다른 분배관의 교체가 용이하도록 하였고 각 배관과 분배관의 재질은 부식을 고려하여 스테인레스로 하였다. 본 실험에서 분배관에서 사용된 유속 측정기는 1-Dimension LDV가 사용되었으며 주요 제원은 Laser source power가 300 mW Ar · ion laser generator이다.

#### 3.2 분배관의 실험 방법

연구 대상이 된 분배관중에서 분배관의 입구와

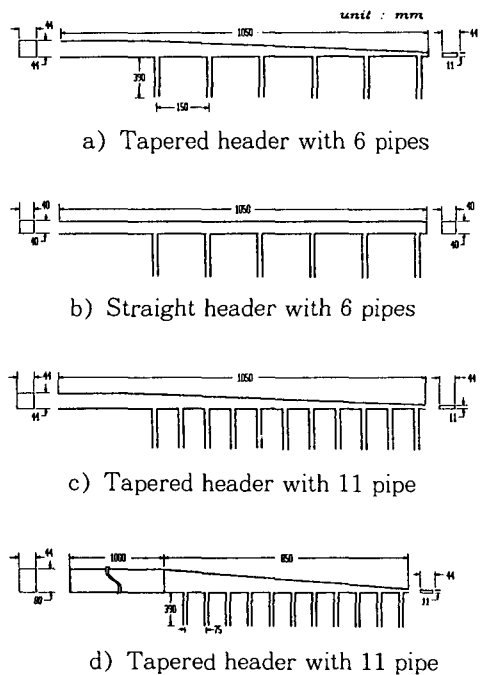


Fig.6 Shape and dimension of various distribution headers

출구의 단면적 변화에 따른 속도 분포를 규명하기 위한 실험 모델들이 Fig.6에 도시되어 있다.

a)번의 분배관은 분배관의 입구와 출구의 면적비가 약 4:1로 축소하는 분배관에 직경 10mm인 유리관으로 된 6개의 분지관이 설치되었고 b)번은 분배관의 면적 변화가 없는 직선 관에 6개의 분지관이 설치되었으며 c)번은 입구와 출구의 면적비는 a)번 분배관과 같으나 분지관을 11개 설치한 것이며 d)번은 입출구 면적비를 약 7.3:1로 크게 하고 11개의 분지관을 부착한 것이다.

각각의 실험 방법은 펌프 직후에 설치된 밸브의 개도를 조절하여 최대 유량, 최대 유량의 약 3/4, 최대 유량의 약 1/2로 세 가지로 변화시켰고 바이패스 관에 설치된 밸브를 이용하여 바이패스 유량을 최대 유량, 최대 유량의 약 1/2, 바이패스 유량이 없는 경우의 세 가지로 변화시켜 가며 실험했으며, 그 구체적인 데이터는 Table 1 및 Fig.12와 Fig.13에 나타나 있다.

Table 1 Experimental methods for testing of various headers

Type of distributor	Total flowrate (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s)	Bypass flowrate (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s)	Remark
Tapered header with 6 pipes	4.81	0.00	Case T1
	5.23	0.75	Case T2
	5.80	1.71	Case T3
	3.65	0.00	Case T4
	3.84	0.63	Case T5
	4.01	1.22	Case T6
	2.37	0.00	Case T7
	2.34	0.35	Case T8
	2.4	0.75	Case T9
Straight header with 6 pipes	5.15	0.00	Case S1
	5.57	0.82	Case S2
	6.00	1.60	Case S3
	4.06	0.00	Case S4
	4.27	0.60	Case S5
	4.48	1.21	Case S6
	2.56	0.00	Case S7
	2.63	0.41	Case S8
	2.70	0.78	Case S9

위의 Table 1의 각 경우에 대한 분배관(header) 및 분지관내의 평균 유속 및 유량은 다음과 같이 계산했다.

먼저 원관내의 속도 분포를 다음 식(16)과 같이 Karman · Prandtl의 1/n 승근법칙이라고 가정했다.

$$u_{y_1} = u_{max} \left( \frac{y_1}{\gamma_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (16)$$

여기서,

$u_{max}$  : 원관내의 최대 유속

$\gamma_0$  : 원관의 반지름

$y_1$  : 벽으로부터 거리

$u_{y_1}$  :  $y_1$  지점의 유속

다음 직경  $d=10\text{mm}$ 의 분지관내에서 한쪽 벽면에서부터  $y=0.1d, 0.5d$  및  $0.9d$ 인 지점의 유속을 측정하면  $0.5d$  지점의 유속이  $u_{max}$ 가 되고  $0.1d$ 와  $0.9d$ 의 지점은 양쪽 벽면으로부터 거리가 같은 지점이므로 두 지점의 유속의 평균값을 다시  $0.1d$  지점( $y_1$ )의 유속( $u_{y_1}$ )으로 취하여 식 (16)에  $y_1, u_{y_1}$  및  $u_{max}$ 의 측정값을 대입하여 지수값  $n$ 을 구한 후에 다음 식(17)과 같이 적분하여 평균 유속( $\bar{u}$ )을 구하였다.

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \int u_{max} \left( \frac{y}{\gamma_0} \right) dA = \frac{2n \cdot u_{max}}{2n+1} \quad (17)$$

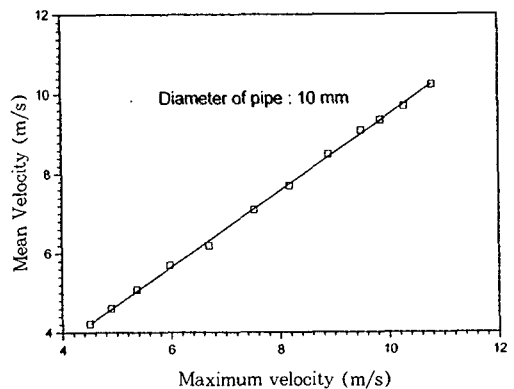


Fig.7 Relationship between maximum velocity and mean velocity in a distributor pipe

식 (17)에서 구한 원관내의 평균 유속과 최대 유속의 관계를 나타내면 Fig.7과 같다. 이 그림에서 보면 최대 유속과 평균 유속은 거의 선형적인 관계를 나타내므로 이후 분지관 내의 최대 유속을 측정하여 Fig.7에 의해 평균 유속을 구했다.

이상의 관계에서 이론적으로 0.1d 지점과 0.9d 지점의 유속은 동일해야 하나 측정 오차에 의해 평균값을 취하였으며 실험의 효율성을 위해 Fig.7의 최대 유속과 평균 유속의 관계 도표로 평균 유속을 구한만큼 보간법에 의한 오차가 있을 수 있다.

그리고 헤더(header) 내부 평균유속은 헤더의 전체 유입유량에서 첫번째 분지관으로 빠져 나간 유량(즉 상기 측정값)을 뺀 값이 그 다음 헤더로 가는 유량이며 이와같이 순차적으로 계산하여 헤더 내부 유량을 구하고 그 단면적으로 나누면 헤더 내부의 평균 유속이 계산된다.

#### 4. 실험 결과

Fig.8 및 9는 입출구 면적비가 약 4 : 1(1번 분지관과 6번 분지관의 면적비가 약 3.25 : 1)로 축소되는 분배관에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. Fig.8은 6개의 원형유리 분지관에서 분사되는 유체의 평균 속도를 나타내고 있는데 실선은 공급 밸

브를 전개하여 유량이 최대인 경우, 긴 점선은 밸브를 교축하여 최대 유량의 약 3/4인 경우 및 가는 점선의 최대 유량의 1/2인 경우에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. 그리고 각 경우에서 바이-패스 밸브(by-pass valve)를 완전히 교축한 경우 (●, △, +), 1/2 개방한 경우(○, ◇, ×), 완전히 전개한 경우(□, ☆, \*)를 각각 나타내고 있다. 먼저 최대유량의 경우(실선)을 보면 속도가 가장 높은 것이 바이-패스 유량이 영인 경우, 다음 것은 바이-패스 유량이 전 유량의 13.8%인 경우, 가장 낮은 것이 29.3%인 경우이다. 식(13)의 이론에 의하면 Fig.3과 같이 분지관에서 유체가 균일하게 분포되는 조건은 실험 대상 경사관(1번 분지관의 분배관 단면적이 6번 분지관의 분배관 단면적의 약 3.25배)에서 바이-패스 유량이 17.0%로 나왔다. 그림에서 보는 바와 같이 바이-패스 유량 17.0%에 가장 근접한 13.8%인 경우(T2)가 다른 경우보다 비교적 유량이 균일하게 분사됨을 볼 수 있다. 그리고 최대 유량의 3/4 및 1/2일 때 바이-패스 유량을 절반 정도 하는 경우(T5, T8)가 비교적 균일하게 분사됨을 볼 수 있고 전체적으로 보면 전체 유량이 적을수록 분사 속도가 균일해짐을 볼 수 있다.

Fig.9는 Fig.8의 분배관 길이방향 내부 유속을

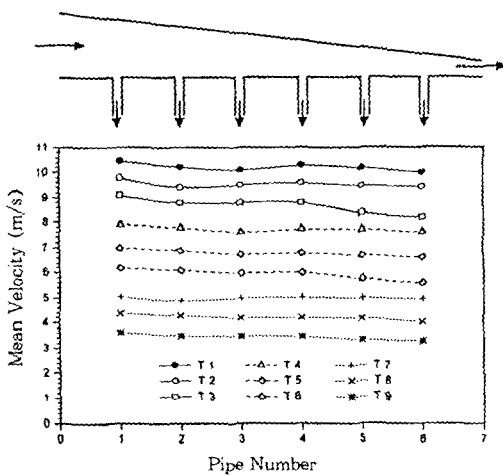


Fig.8 Mean velocities in branches of tapered header with 6 branch pipes

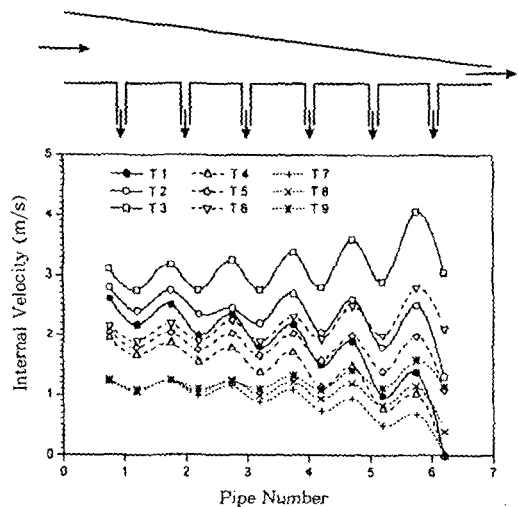


Fig.9 Internal velocities in tapered header with 6 branch pipes

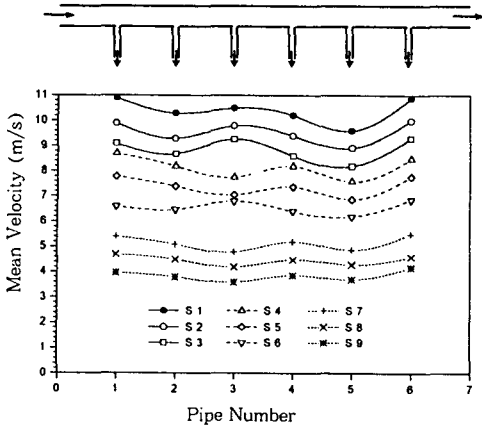


Fig.10 Internal velocities in straight header with 6 branch pipes

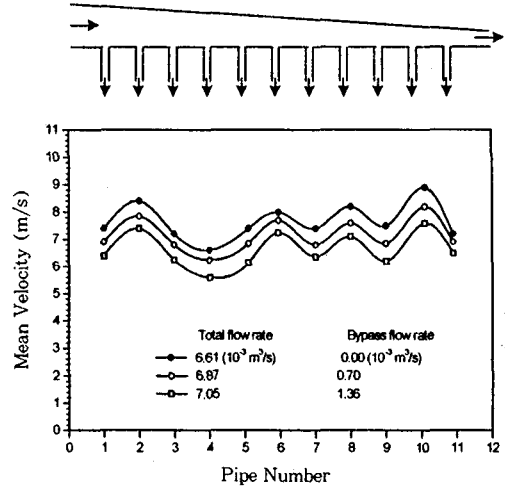


Fig.12 Mean velocities in branches of tapered header with 11 branch pipes

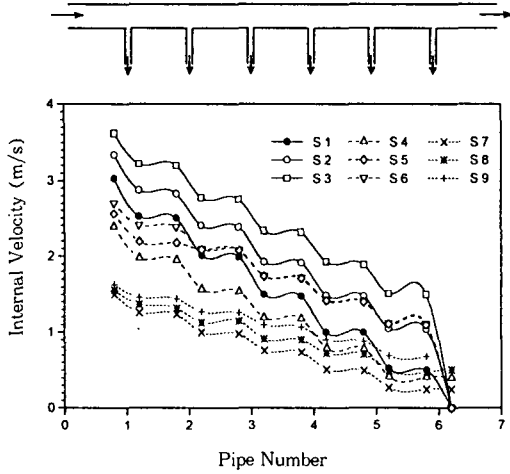


Fig.11 Mean velocities in branches of tapered header with 6 branch pipes

각 실험들에 대해 표시한 것인데 예를 들어 1번 분지관 바로 전의 분배관 속도는 분지관 후 유량 감소에 의해 속도가 크게 강하여 다음 분지관 직전면적 감소에 의해 속도가 다시 증가하는 현상을 반복하고 있다. 그리고 전체 유량이 최대 유량인 경우(실선)를 보면 바이-패스 유량이 영인 경우(T1) 분배관 내부 속도가 전체적으로 흐르는 방향으로 급속히 하강하는 경향을 보이고 바이-패스 밸브를 절반 개방한 경우(T2) 전체적으로 수평에서 약간 하강하는 모습을 보이고, 다음 바이-패스

밸브를 전개한 것(T3)은 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 따라서 위의 그림을 보면 내부 유속이 거의 균일할수록 분지관들을 통하는 유속도 거의 균일해지는 경향을 볼 수 있다.

Fig.10과 Fig.11은 단면적이 40mm×40mm로 균일한 직선 사각 관에 6개의 분지관이 달린 경우에 대한 실험이다. 먼저 Fig.10에 분지관 내의 평균 속도가 나타나 있는데 기호 표기 방법은 경사진 분배관과 동일하다. 그림에서 보면 유속이 빠르고 느림에 관계없이 분지관 내의 유속 분포가 과도 모양으로 균일하지 못함을 볼 수 있다. 다음 Fig.11은 Fig.10의 분배관 내부 유속으로서 Fig.9의 경우와 동일한데, 예를 들면 제1분지관 전의 속도가 유입 속도이며 제1분지관 직후 속도가 감소되며 그 후 단면적이 일정하기 때문에 다음 분지관까지 분배관 내의 속도는 일정하다. 그리고 제2분지관에서 또 유속이 감소하여 내부 유속은 6번 분지관까지 계속 감소하게 된다.

Fig.12와 Fig.13은 전과 같이 입출구 면적비가 약 4 : 1인 분배관에 11개의 분지관을 설치한 경우의 실험 결과를 나타내고 있다. Fig.12는 각 분지관에서 평균 분사속도를 나타낸 것인데 전체 유량이 최대일 때 바이-패스 밸브를 완전히 잠근 경우(●), 절반 개방한 경우(○) 및 전개한 경우(□)를 각각 나타낸 것으로서 속도 분포가 경사진 분배



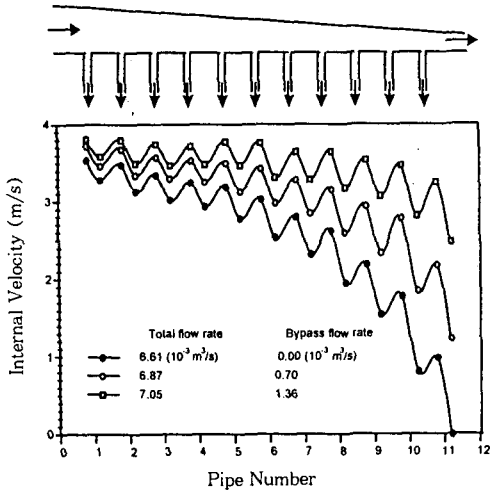


Fig.13 Internal velocities in tapered header with 11 branch pipes

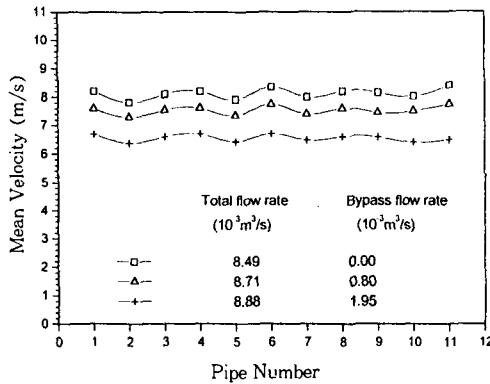


Fig.14 Mean velocities in branches of higher tapered header with 11 branch pipes

관에 비해서 현저한 불균일 분포를 보이고 있다. Fig.13은 이 경우의 분배관내의 내부 유속을 나타낸 것으로 분지관 수에 비해서 분배관의 기울기가 부족하여 내부 유속이 길이 방향으로 점점 떨어지고 있음을 볼 수 있다.

여기서 분배관에 대한 분지관의 분사 속도가 균일하지 못한 이유를 살펴보면 바이-패스 밸브를 전개한 경우는 19.7%이다. 그러나 식(13)에 의한 이론에 의하면 Fig.14에서와 같이 본 실험 분배관의 경사(1번의 단면적이 11번의 3.25배)인 경우 바

이-패스 유량은 24%라야 균일한 분사속도를 얻을 수 있다. 그러나 본 실험장치에서 최대 바이-패스 유량은 19.7%로서 이에 미치지 못한다. 따라서 세 번째 분배관에서 좀 더 경사가 큰 분배관이 필요하거나 바이-패스 유량이 더욱 커져야 분지관에서 균일한 속도 분포를 얻을 수 있으리라 사료된다.

따라서 다음 Fig.14는 분배관의 기울기를 더 크게 하여 분배관의 입출구 면적비를 약 7.3 : 1로 증가한 경우 헤더내의 유속 분포를 측정된 것으로 Fig.13보다 현저히 개선되었음을 보여준다.

### 5. 결 론

본 연구는 열교환기나 화학 장치에 부착되어 유체를 균일하게 분배하는 경사 분배관(tapered header)에 대한 실험으로 단면적이 일정한 헤더와 경사 헤더, 그리고 분지관의 개수가 6개 및 11개인 구성들에 대한 실험으로 다음과 같이 기술할 수 있었다.

(1) 분배관(header)의 기울기와 분지관 개수의 관계에서는 헤더 내부 유속이 균일할수록 분지관들을 통한 유속들이 균일해지는 경향이 있음을 알 수 있었다. 이는 운동방정식인 베르누이 방정식에서 분지관들의 평균 유속을 균일하도록 헤더의 단면적비를 정한 이론은 결국 분배관의 길이 방향 내부 유속이 균일하다는 조건과 같음을 제시하였으며, 따라서 헤더 내부 유속이 균일하게 헤더의 단면적을 축소하여 그 기울기를 설계하여야 한다는 것을 이론적 및 실험적으로 제시되었다. 이는 또한 헤더에서 각 분지관들로 통하는 입구 수두 손실들이 헤더의 내부 유속이 비례한다고 추론할 수 있다.

(2) 헤더의 내부 유속이 균일하지 않은 경우, 즉 기울기가 없는 헤더 혹은 헤더의 기울기와 분지관 수가 맞지 않는 경우는 분지관들을 통한 유속 분포는 파형(wave)으로 나타남을 실험으로 보여 주었다. 따라서 이 경우 열교환기의 경우 전열량의 불균일을 초래할 것이다.

### 후 기

본 연구는 통상산업부에서 시행한 공업기술기반

기술사업의 지원하에 수행되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표한다.

### 참 고 문 헌

1. Permutter, M, 1961, "Inlet and exit-header shapes for uniform flow through a resistance parallel to the main stream", J. of Basic Engineering, Transactions of the ASME, September, pp. 361~370.
2. Kubo, T. and Ueda, T., 1969, "On the characteristics of divided flow and confluent flow in header", Bulletin of JSME, Vol. 12, No. 52, pp. 802~809.
3. Shen, P. I., 1992, "The effect of friction on flow distribution in dividing and combining flow manifold", J. of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 114, March, pp. 121~123.
4. Choi, S. H., Shin, S. and Cho, Y. I., 1993, "The effect of area ratio on the flow distribution in liquid cooling module manifolds for electronic packaging", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 20, pp. 221~234.
5. Datta, A. B and Majumdar, A. K., 1990, "Flow distribution in parallel and reverse flow manifolds", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 2, No. 4, pp. 253~262.
6. Eguchi, A., Kuragasaki, M. and Sueoka, Y., 1988, "Performance improvement on ACDEFLO headbox of paper machine", Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 25, No. 3, pp. 191~196.
7. Hong, J. C. and Riggs, J. B, 1987, "Flow distribution in tapered, rectangular cross section manifolds", Journal of the Chin. I. Ch. E., Vol. 18, No. 14, pp. 193~202.
8. 石黒久三, 1994, "最新抄紙技術" 日本製紙科學研究所 편.