

원형단면 노즐의 급확대 축소부를 통한 유동손실에 대한 연구

고 영 하*

A Study on the Flow Loss for Sudden Expansion and Contraction
Part of Circular Pipe Nozzle

Y-H Koh*

Key words : Flow loss(유동손실), sudden Expansion and Contraction Part(급확대 축소부)**Abstract**

To obtain an exact flow loss in piping systems is very important in the face of efficiency anticipation and work control of plant. The object of this study is to get the flow loss through the experiment for sudden expansion and contraction part of circular pipe nozzle.

The experiment in this study is performed after getting the flow loss factor for sudden expansion and contraction through preliminary experiments.

It is confirmed that the results of this study agreed with the approximated equation of Ikeda and Matsuo. It is proved that flow loss factor ζ_3 for sudden expansion and contraction part of circular pipe is dependent on L/D_1 in these experimental conditions.

NOMENCLATURE

a : Modulus of equation(5)
 D : Diameter of pipe
 L : Distance between sudden expansion
and contraction
 l : Length of coupled part
 m : Area ratio(= D_1^2/D_2^2)
 n : Modulus of equation(18)
 p : Pressure

Re : Reynolds number
 V : Average velocity
 ζ : Loss coefficient of circular pipe

SUBSCRIPTS AND OTHERS

1 : Brass pipe
2 : Pipe of vinyl chloride
3 : Coupled part
 λ : Friction factor of pipe

* 조선이공대학(원고접수일 : 2000년 6월)

ν : Kinematic viscosity of air
 ρ : Density of air

1. 서 론

공조덕트 설비, 열교환기 및 유체기계에 연결된 각종 공업용 플랜트의 관로망에는 직관부, 곡관부, 분기부, 압축부, 급확대부 및 급축소부 등의 각종 관로요소가 포함되어 있다. 이러한 관로요소에 있어서 정확한 손실을 얻는 것은 플랜트의 계획 조업, 효율예상 및 운전제어의 측면에서 아주 중요한 요소이다.

각 관로요소가 단독적으로 존재하는 경우의 손실에 있어서는 종래보다 많은 실험적, 이론적^{(1),(2)} 연구가 행해져 왔다. 또한, 최근 컴퓨터를 활용한 수치계산법이 활발하게 진행되고 있고, 각종 관로요소의 형상이 복잡해도 흐름이 박리를 수반하지 않는 경우에 유동손실의 계산은 가능하다고 판단된다. 그러나, 각종 관로요소가 설치된 복잡한 흐름장에서의 손실은, 흐름이 박리를 수반하므로 이론적으로 손실을 구하는 것은 매우 어렵다. 그러므로, 지금까지 연구되지 않은 수많은 각종 관로요소의 조합된 경우 중에서 급확대부와 급축소부가 설치된 경우를 연구하고자 한다. 이 연구는 먼저 Ikeda⁽³⁾, Matsuo⁽⁴⁾ 등에 의하여 연구되었지만, 두 사람의 결과가 약간 다르게 나타나고 있기 때문에, 실험범위를 변화시켜서 얻은 결과를 두 사람의 결과와 비교 검토하고자 한다.

이 연구는 세 종류의 면적비를 가진 시험관로에 대해서, 우선 급확대 손실계수, 급축소 손실계수에 대하여 예비실험을 거친 후에 실시하였다. 면적비가 제일 큰($m=0.5426$) 시험관로에 대해서는 두 실험과도 양호한 결과가 얻어졌지만, 급확대 손실계수는 면적비에만 의존하여 Borda-Carnot의 식에 양호하게 일치했다. 또한, 급축소 손실계수에서는 면적비 의존성과 Ikeda와 Matsuo 등이 제시한 레이놀즈 수에 대한 의존성을 확인하고, 급축소 손실계수를 나타내는 실험식을 제시했다. 이상의 2종류에 대한 예비실험을 마치고, 이 연구의 목적인 원형단면 노즐의 인접된 급확대, 급축소부를 통한 유동손실에 관한 실험을

급확대부와 급축소부의 간격(L)을 변화시켜가면서 실시하였다. 그 결과 간격이 작아진 영역에서는 손실계수가 간격과 가는 쪽의 관직경과의 비에 비례하고, 간격이 큰 영역에서는 급확대 손실계수, 급축소 손실계수 및 두꺼운 관로의 관마찰에 의한 손실계수의 산술화로 근사화 할 수 있다는 Ikeda와 Matsuo 등이 나타낸 결과와 일치하고 있는 것을 확인했다.

2. 실험장치 및 실험조건

실험장치와 압력측정 방법에 대한 개략도를 그림 1에 나타냈다. 작동유체로는 공기를 사용하였고, 블로어(Blower)를 이용하여 정상유동을 발생시켰다. 유량은 밸브②를 완전하게 연 상태로 밸브 ①에서 조절하였고, 유량의 측정은 오리피스를 사용하였다. 또한, 압력측정에는 압력변환기와 전압계를 사용하였다.

시험관로의 면적비 $m(=D_1^2/D_2^2)$ 은 Table 1에 나타낸 것처럼 3종류의 것을 사용하였다. 직경 D_1 의 관은 동 파이프, 직경 D_2 의 관은 염화비닐 관이다. 동 파이프에는 스텐레스 플랜지를 플랜지 면과 관의 단면이 같은 평면상에 설치되도록 유의하였다. 관의 접합부근에서는 관의 중심 축이 어긋나지 않

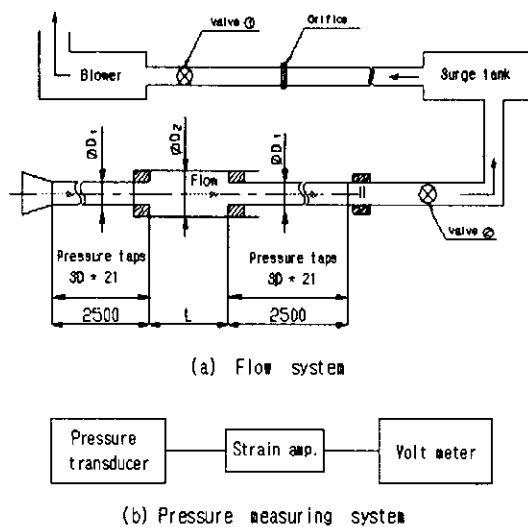


Fig. 1 Experimental apparatus and measuring system

Table 1. Experimental Conditions

Test Pipe	D_1 (mm)	D_2 (mm)	L/D_1	m	Re
No. 1	38.0	51.50	0~10	0.5426	50,000
					40,000
					30,000
No. 2	38.0	61.20	0~13	0.3836	50,000
					40,000
					30,000
No. 3	38.0	100.20	0~15	0.1431	50,000
					40,000
					30,000

도록 충분히 주의 기울였다. 상류측의 동파이프를 직경 D_2 의 염화비닐관의 한쪽 끝에 고정하고, 하류측의 동파이프를 염화비닐관 속을 슬라이드 시켜서 급확대부와 급축소부의 간격을 설정하였다. 압력 탭은 압력구멍의 직경을 1 mm로 하고, 동파이프에서 각 압력 측정 위치의 원주 상에 90° 의 각도로 3개를 설치하였다.

인접된 급확대, 급축소부를 통한 유동에서의 실험조건은 Table 1에 나타났다. 공기의 동점성계수를 구하는데 필요한 기온, 기압에 대해서 기온은 시험관로의 입구에서, 기압은 실험실내의 값을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 관마찰계수

동파이프에는 각 압력 측정 단면 위치에 붙어있는 3개씩의 압력 탭을 설치했지만, 어느 위치에서도 3개의 측정값은 거의 같았다. 따라서 이 시험관로 내의 흐름은 편류가 존재하지 않는 축대칭 유동으로 간주할 수 있다.

그림 2에는 실험에서 사용한 동파이프의 관마찰계수 λ_1 과 레이놀즈 수 Re_1 의 관계를 나타내고 있다. 각 레이놀즈 수에 관한 관마찰계수가 8% 정도의 오차범위 내에서 Blasius의 식에 일치하고 있기 때문에 이 시험관로는 수력학적 해석에 있어서 문제가 없다고 판단하고, 실험 데이터의 신뢰도는 관마찰계수 λ_1 이 이 오차범위 내에서 Blasius의 식에 일치하는가 아닌가로 판단하였다.

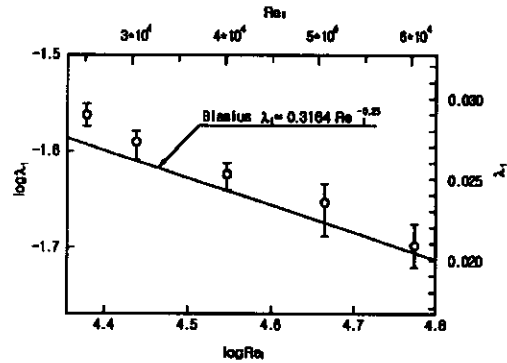


Fig. 2 Relation between friction factor λ_1 and Reynolds number Re_1

3.2 급확대부와 급축소부의 손실계수

그림 3에서 급확대 유동의 압력손실 p 를

$$\Delta p = p_1 - p_2 + \rho(v_1^2 - v_2^2)/2 \quad (1)$$

라고 정의하면 급확대 손실계수 ζ_1 은

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \Delta p / (\rho v_1^2 / 2) \\ &= 2(p_1 - p_2 + \rho(v_1^2 - v_2^2)/2) / (\rho v_1^2) \end{aligned} \quad (2)$$

라고 나타낼 수 있다.

그림 4에서 급축소 유동의 압력손실 Δp 를

$$\Delta p = p_1 - p_2 + \rho(v_2^2 - v_1^2)/2 \quad (3)$$

라고 정의하면 급축소 손실계수 ζ_2 은

$$\begin{aligned} \zeta_2 &= \Delta p / (\rho v_1^2 / 2) \\ &= 2(p_1 - p_2 + \rho(v_2^2 - v_1^2)/2) / (\rho v_1^2) \end{aligned} \quad (4)$$

라고 나타낼 수 있다.

이 실험의 레이놀즈 수 범위 ($2.5 \times 10^4 \leq Re_1 \leq 6 \times 10^4$)에 있어서 급축소 손실계수는 레이놀즈 수 및 면적비의 증가와 함께 감소하는 경향이 있다. 이것은 Ikeda의 실험식 $\zeta_2 = 2.810(1-m) Re_1^{-0.145}$ 과 Matsuo의 실험식 $\zeta_2 = 2.158(1-m) Re_1^{-0.145}$ 과도 일치하고 있다. 레이놀즈수의 의존성을 나타내는 지수 -0.145 에 대해서는 같은 값으로 생각하여 식(5)와 같이 정리하였다.

$$\zeta_2 = a Re_1^{-0.145} \quad (5)$$

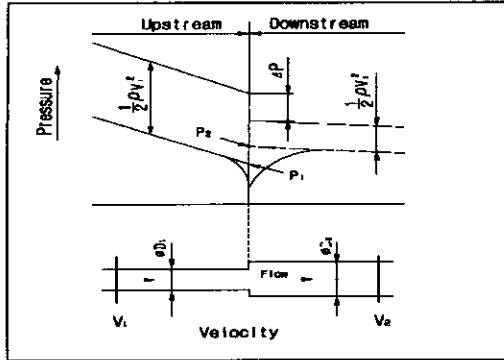


Fig. 3 Definition of flow loss for sudden expansion Δp

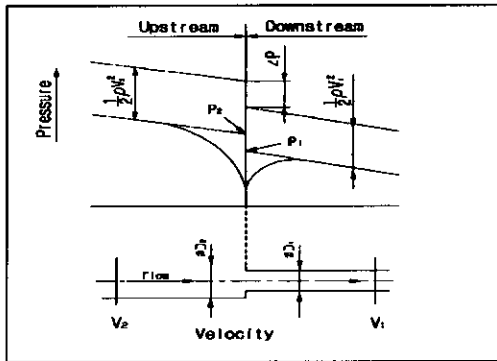


Fig. 4 Definition of flow loss for contraction part Δp

또한, 면적비 의존부분을 $a=f(m)$ 로 해서 가능한 실험값이 근사하도록 a 의 값을 결정했다. 이 결과, a 에 대해서

$$a = 2.2 - 1.2m - m^2 \quad (6)$$

라는 관계를 얻어, 급축소 손실계수에 대해서 다음과 같이 정리하였다.

$$\zeta_2 = (2.2 - 1.2m - m^2) Re_1^{-0.145} \quad (7)$$

그림 5에는 Ikeda와 Matsuo의 실험 면적비 범위(각각 $0.1135 \leq m \leq 0.4295$, $0.05609 \leq m \leq 0.2721$) 및 이 실험의 면적비 범위($0.1431 \leq m \leq 0.5426$)에 관한 a 의 값도 나타냈다. 그림에서 식 (7)과 Ikeda의 실험값과는 상당히 차이(최대 20% 정도)가 있었으나, Matsuo의 실험값과는 양호하게 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 레이놀

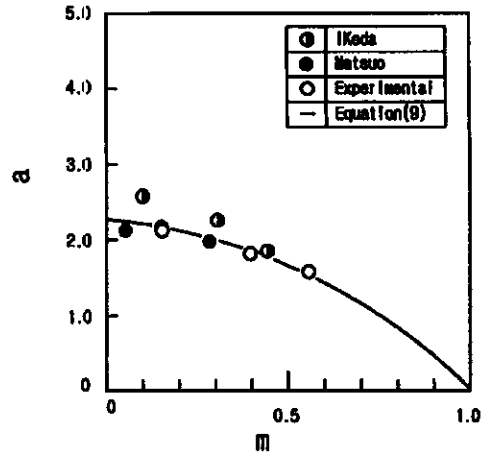


Fig. 5 Relation between factor a and area ratio m

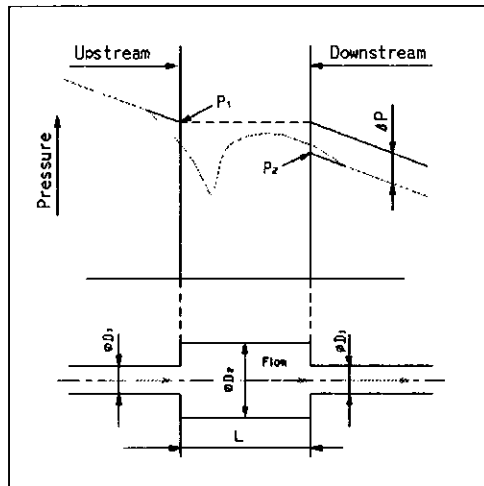


Fig. 6 Definition of flow loss p passed through sudden expansion and contraction part

즈 수에 대한 의존성을 고려하지 않았기 때문이라고 생각되지만, 손실계수 20% 정도의 차이는 급축소 손실의 원인이 된 축소관 입구 부근의 박리 성질이 주류나 가는 관 입구 형상의 매우 작은 변화에 대해서도 상당히 민감하기 때문으로 사료된다.

3.3 인접된 급확대, 급축소부의 손실계수

인접된 급확대, 급축소부의 압력손실 Δp 를 그림 6과 같이 정의하면 손실계수 ζ_3 는

$$\begin{aligned} \zeta_3 &= \Delta p / (\rho v_1^2 / 2) \\ &= (p_1 - p_2) / (\rho v_1^2 / 2) \end{aligned} \quad (8)$$

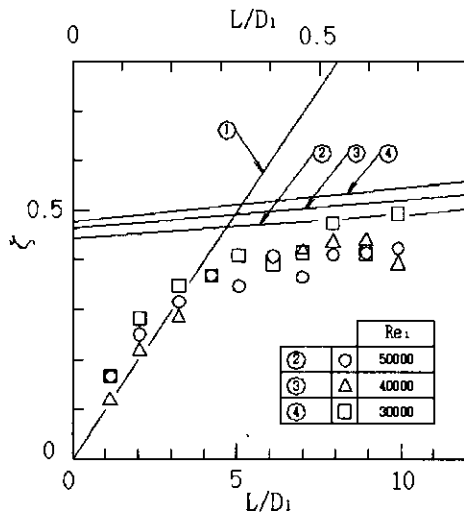


Fig. 7 Relation between friction factor ζ and distance L for test pipe No. 1

이 된다.

3종류의 시험관로(No. 1 ~ No. 3)에 관한 손실 계수 ζ_3 와 인접된 급확대, 급축소부의 간격 L 의 관계는 그림 7과 그림 8에 나타냈다. 이 경우의 손실 계수는, Matsuo가 언급했던 것처럼 (1)급확대부와 급축소부의 간격 L 이 작은 영역, (2)급확대부와 급축소부의 간격이 큰 영역, (3)간격 L 이 (1)과 (2)의 중간영역에서 각각 특유의 경향을 나타내기 때문에, 이 실험에서 손실계수를 세 영역으로 나누어서 분석 검토하였다.

(1) 급확대부와 급축소부의 간격 L 이 작은 영역에서의 손실계수

그림 8과 그림 9에서, 시험관로 2에서는 $0 \leq L/D_2 \leq 2.5$, 시험관로 3에서는 $0 \leq L/D_2 \leq 3$ 의 영역에 있어서 실험데이터에 근사하면서 원점을 통과하는 직선의 기울기는 면적비 m 및 레이놀즈 수 Re_1 에도 의존하지 않았다.

그림 7에서 그림 9의 실선 ①은 실험 값에 근사하도록 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta_3 = 0.1253 L/D_1 \quad (9)$$

이런 경향을 Ikeda는 $D_1 = 33.75\text{mm}$ 에서 Matsuo는 $D_1 = 23.73\text{mm}$ 에서도 확인하였고, Ikeda는 실험식으로서

$$\zeta_3 = 0.1440 L/D_1 \quad (10)$$

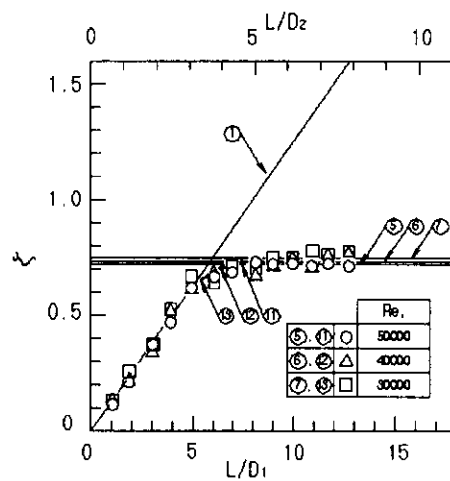


Fig. 8 Relation between friction factor ζ and distance L for test pipe No. 2

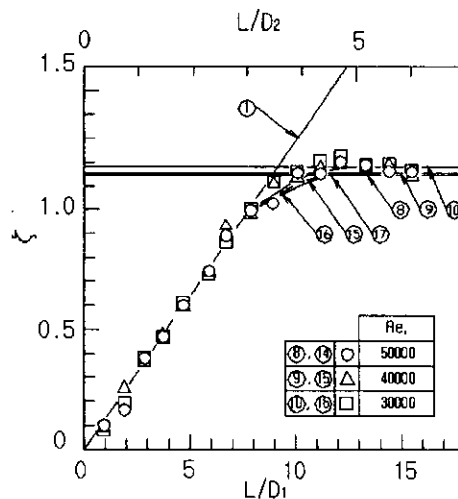


Fig. 9 Relation between friction factor ζ and distance L for test pipe No. 3

Matsuo는

$$\zeta_3 = 0.1306 L/D_1 \quad (11)$$

을 얻었다. 따라서 이 영역에서의 손실계수 ζ_3 는 면적비 m 과 레이놀즈 수 Re_1 에도 의존하지 않고, L/D_1 에 의존함을 알았다.

그런데, 3개의 실험식 계수가 약간 다르게 나타났는데, Matsuo는 이 차이를 계수 자체가 D_1 에 의존하기 때문에 발생하는 것이 명확하지 않다고 언

급하였다. 이 실험을 포함해서 세 종류의 D_1 에 관해서 같은 실험을 반복해 보았지만, 위의 3개의 실험식에서 계수가 D_1 에 의존하고 있다고 생각할 수 없으므로 3개의 계수는 거의 같다고 해도 좋다고 판단된다.

(2) 급확대부와 급축소부의 간격 L 이 큰 영역에서의 손실계수

급확대부와 급축소부의 간격 L 이 큰 경우의 손실은 급확대에 의한 손실, 관마찰에 의한 손실, 급축소에 의한 손실의 합으로 계산될 수 있으므로, 이 경우의 압력손실 Δp 는

$$p = \zeta_3 / (\rho v_1^2 / 2) = \zeta_1 (\rho v_1^2 / 2) + \lambda_2 (L / D_2) (\rho v_2^2 / 2) + \zeta_2 (\rho v_1^2 / 2) \quad (12)$$

으로 나타낼 수 있다. 식(12)의 우변 제2항은 Blasius의 식

$$\lambda_2 = 0.3164 Re_2^{-0.25} \quad (13)$$

및 연속방정식

$$(\pi D_1^2 / 4) v_1 = (\pi D_2^2 / 4) v_2 \quad (14)$$

를 이용하면

$$\lambda_2 (L / D_2) (\rho v_2^2 / 2) = 0.3164 Re_1^{-0.25} m^{2.375} (L / D_1) (\rho v_1^2 / 2) \quad (15)$$

이 된다. 따라서 식(12)와 식(15)에서 이 경우의 손실계수의 식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\zeta_3 = \zeta_1 + 0.3164 Re_1^{-0.25} m^{2.375} (L / D_1) + \zeta_2 \quad (16)$$

이 식(16)의 ζ_1 에 Borda-Carnot의 식 $\zeta_1 = (1 - m)^2$ 을, ζ_2 에 식(7)을 각각 대입하면

$$\zeta_3 = (1 - m)^2 + 0.3164 Re_1^{-0.25} m^{2.375} (L / D_1) + (2.2 - 1.2m - m^2) Re_1^{-0.145} \quad (17)$$

이 된다.

그림 7에서부터 그림 9의 실선 ②~⑩은 식(17)에 각 조건을 대입하여 나타낸 것이다. 이 식은 그림 8에서는 $5 \leq L / D_2$, 그림 9에서는 $4.5 \leq L / D_2$ 의 영역에서 실험 값과 양호하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 식(17)에서 이 경우의 손실계수는

레이놀즈 수의 의존성이 나타나는 것이 당연하지만, 이 실험조건에서는 그런 경향이 명확하게 나타나지 않았다. 이것은 레이놀즈 수에 의존하는 변화량이 이 실험조건을 벗어나 있기 때문으로 사료된다.

(3) 간격 L 이 (1)과 (2)의 중간영역에 있어서 인접된 급확대, 급축소부의 손실계수

이 경우의 손실계수는 식(9)에 나타낸 손실계수 ζ_1 , 식(17)에 나타낸 손실계수 ζ_2 로 했을 때의 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\zeta_3 = (\zeta_1)^n + (\zeta_2) \quad (18)$$

여기서, 지수 n 은 이 실험에서 얻어진 값으로 $n = -8$ 이다.

그림 8과 그림 9의 실선 ⑪~은 식(18)에서 얻을 수 있는 값이다. 실험식(18)은 그림 8에서는 $2.5 \leq L / D_2 \leq 5$, 그림 9에서는 $3 \leq L / D_2 \leq 4.5$ 의 영역에 거의 일치하고 있다.

(4) 인접된 급확대, 급축소부의 손실계수 정리

급확대, 급축소부의 간격 L 이 작은 영역에서는, 급확대나 급축소부가 단독으로 존재하는 경우에 형성될 수 있는 분류나 박리선 단층이 충분히 발달되어 있지 않기 때문에 이 영역에서의 압력손실은 간격 L 과 함께 단조롭게 증가한다고 생각되며, 이 실험에서도 Ikeda와 Matsuo 등의 결과와 일치함을 확인했다.

또한, 급확대부에서의 손실계수 ζ_1 에서는 면적비 의존성이, 급축소부에서의 손실계수 ζ_2 에서는 면적비 및 레이놀즈 수 의존성이 있는 것을 실험적으로 확인했고, 이 영역의 손실계수 ζ_3 에서도 이런 의존성이 나타나는 것이 당연하지만, 그러한 경향이 나타나지 않았다. 이 영역에서는 주류가 두꺼운 쪽의 관 벽에 도달하지 않기 때문에 손실계수는 두꺼운 쪽의 관 지름에 의존하지 않고, 가는 쪽의 관 지름과 급확대부와 급축소부의 간격으로 결정되기 때문에 이 영역의 손실계수에서는 면적비 의존성을 나타낼 수 없다고 사료된다.

손실계수가 $L / D_2 = (2.5 \sim 3)$ 부근부터 $L / D_2 = (4.5 \sim 5)$ 부근 사이에서 곡선상에 분포하는 것은 유동의 급확대에 의해서 생긴 박리 단층의 난류 천이에

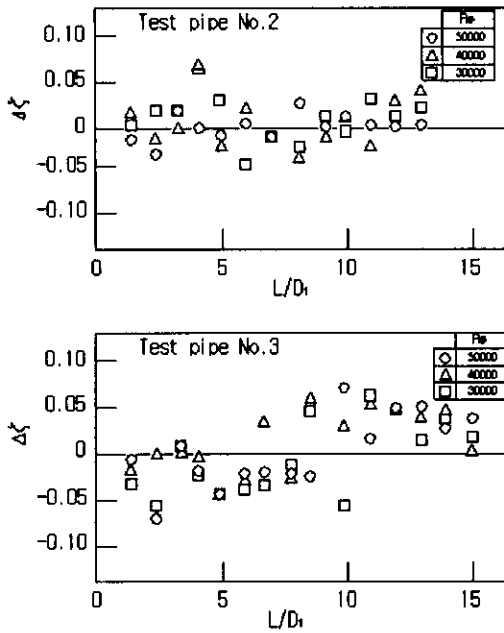


Fig. 10 Relation between error ζ compared with Eq. (17) and distance L

의한 것으로 사료된다. $L/D_2=(2.5\sim3)$ 부근에서는 두꺼운 쪽의 관 벽 영향을 받기 시작하고, $L/D_2=(4.5\sim5)$ 부근에서는 주류가 재부착됨으로써 L의 큰 영역에서는 앞에서 나타낸 식(13)이 근사적으로 성립된다고 사료된다.

마지막으로 시험관로 2, 3에 관하여 추정식(17)과의 추정오차 ζ 와 L의 관계를 그림 10에 나타냈다. 그림에서 ζ 가 ± 0.07 이내에 들어가 있는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

원형단면 노즐의 인접된 급확대, 급축소부의 유동손실계수에 관한 실험에서 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 급축소 손실계수는 면적비와 레이놀즈 수에 의존한다는 것을 확인하였고, 다음 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\zeta_2 = (2.2 - 1.2m - m^2) Re_1^{-0.145}$$

- (2) 인접한 원형단면 급확대, 급축소부의 손실계수에 대해서 다음의 실험식과 추정식을 얻었다.

i) $0 \leq L/D_2 \leq (2.5\sim3)$ 의 영역

$$\zeta_3 = 0.1253 L/D_1$$

- ii) $(4.5\sim5) \leq L/D_2$ 의 영역

$$\zeta_3 = (1-m)^2 + 0.3164 Re_1^{-0.25} m^{2.375} (L/D_1) + (2.2 - 1.2m - m^2) Re_1^{-0.145}$$

- iii) $(2.5\sim3) \leq L/D_2 \leq (4.5\sim5)$ 의 영역

$$\zeta_3 = (\zeta_1)^n + (\zeta_2)^n, (n = -8)$$

- iv) $n = -8$ 일 경우 ζ 는 $-0.07 < \Delta\zeta < 0.07$ 의 범위 내에 존재한다.

REFERENCES

1. 立花, 喜多, 福井大學 工學部 研究報告, 25-2, P5, 1977
2. 植松, 機論, 2-7, p254, 1936
3. Ikeda, Osaka Univ. Metal Eng. thesis, 1983
4. Matsuo, Osaka Univ. Metal Eng. thesis, 1984
5. Ohmi, M., Iguchi, M. and Akao, F., "Laminar-turbulent Transition and Velocity Profiles of Oscillatory Rectangular Duct Flows", Bull. JSME, Vol. 27, No. 229, p. 1399, 1984
6. Koh, Y. H., "A Study on Turbulent Characteristics of Developing Turbulent Steady and Unsteady Flows in the Entrance Region of a Square Duct", Ph. D. dissertation presented at Chosun Univ., 1992
7. Koh, Y. H., "A Theoretical and Experimental Study on the Developing Turbulent Unsteady Flows in the Entrance Region of a Square Duct", 한국박용기관 학회 논문집 Vol. 22, No. 5, 1998

후 기

이 논문은 1999년도 조선이공대학 교내 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

저 자 소 개



고영하(高永河)

1959년 10월생 1985년 조선대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1987년 조선대학교 대학원 우주공학과 졸업(석사). 1992년 동대학원 기계공학과 졸업(박사). 2000년 현재 조선이공대학 기계공학부 교수