

급축소/확대관을 지나는 압축성 유동의 해석적 연구 (Analytical Study on Compressible Flow through Abrupt Enlargement and Contraction)

김희동*, 김태호**, 서태원*
Heuy-Dong KIM*, Tae-Ho KIM**, Tae-Won SEO*

* 안동대학교 기계공학부
** 안동대학교 대학원

Key Words : Compressure Flow(압축성유동), Choking(초우킹), Abrupt Enlargement(급확대), Abrupt Contraction(급축소), Vena Contracta(축류부), Internal Flow(내부유동)

ABSTRACT : The empirical factor and reaction force based on published data were involved to investigate compressible flows through sudden enlargement and sudden contraction passages. Analytical solutions of engineering interest were obtained from one-dimensional steady compressible gas dynamic equations. The effects of compressibility, cross-sectional area ratio, and inlet Mach number on the air flows were discussed with regards to the total pressure loss and flow choking. The present results provide available information necessary to design the compressible pipe flow systems.

I. 서론

최근 각종 플랜트의 고압·고속화의 경향에 따라 유체 수송배관계에서 발생하는 유속, 유량 및 에너지는 급속하게 증가하고 있다. 그러나 한편으로는 에너지 절약에 관한 사회적 필요성에 따라 플랜트의 효율향상, 구조물의 경량화가 절실히 요구되고 있으며, 이에 따라 고속유동의 특성이 심각한 문제로 대두되고 있는 배관계가 빈번히 발견되고 있다.

지금까지 배관계를 지나는 비압축성 유동에 관해서는 많은 연구가 수행되었다. 그 결과 배관계의 진동⁽¹⁾, 압력손실⁽²⁾, 유량계측⁽³⁾, 정류방법⁽⁴⁾ 등에 대하여 많은 것이 알려졌으며, 많은 연구자의 실험결과와 잘 일치하는 손실계수 등의 경험식⁽⁵⁾ 이 제안되었다. 그러나 압축성 유체를 대상으로 한 연구결과는 많지 않으며, 특히 배관계 유동에 미치는 압축성의 효과는 충분히 알려져 있지 않다. 따라서 각종 플랜트에서 고속유동을 수반하는 배관계의 설계자료는 대부분 레이놀즈수만을 일치시킨 비압축성 유동에 관한 자료를 대응하고 있는 경우가 많다.

배관계를 지나는 고속유동에는 상·하류의 압력조건에 따라 압축성, 유동의 초우킹 현상, 충격파의 발생, 박리, 재부착, 그리고 유동의 비정상성 등 고속유동 특유의 제현상이 발생하게 된다. 따라서 종래의 저속·비압축성 유동에 관한 연구결과로부터 유추하여 배관계를 설계하는 것은 곤란하다. 최근 고속·대형 컴퓨터의 발달로 인하여 배관계를 통하는 고속유동의 특성은 수치계산법을 이용하여 어느 정도 예측할 수 있게 되었다. 정교한 난류 모델의 개발이나 다양한 수치계산법들로 인하여 대부분의 실제 유동현상들을 실험실에서 재현할 수 있다. 그러나 이들 수치계산의 결과로부터 유동에 미치는 압축성의 효과, 큰 박리 영역을 포함한 유동, 유동의 초우킹 등의 제현상을 이해하기는 매우 어렵다. 더욱이 대부분의 수치계산법은 실용적이지 못하며, 수치계산의 결과를 위하여 기울인 노력에 비하여 얻어지는 정보는 많지 않다. 따라서 보다 간편하고 실용적인 계산법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 기본적인 배관요소 중의 하나인 급축소/확대관을 지나는 압축성 유동을 해석하기 위하여, 압축성 유체에 대한 이론계산을 수행하였다. 이론해석에서는 관 입구에서

해석하기 위하여, 압축성 유체에 대한 이론계산을 수행하였다. 이론해석에서는 관 입구에서 유동의 마하수, 단면 축소 및 확대비 등을 변화시켜, 압축성의 효과 및 유동의 초우킹 조건 등을 구하였다. 본 연구의 결과들은 배관계를 설계하는데 기초자료가 될 수 있을 뿐만 아니라, 배관계 압축성 유동에 대한 실용적인 계산법으로 활용될 수 있다.

II. 이론해석

1. 급확대관

이론해석에서는 급격한 단면적 변화를 수반하는 급확대 및 급축소 유로에 대하여 일차원 압축성 유동의 지배방정식들을 적용하였다. Fig.1에는 본 연구에 사용된 급확대관 및 급축소관과 각각의 압력분포를 도식적으로 나타내었다. 그림에서 F 는 각 단면에서의 단면적이며, 확대면적비 ϕ 는 F_1/F_2 로 정하였다. 여기서 하첨자 1과 2는 각각 급변하는 유로의 상류와 하류를 나타내며, 급확대 유로인 경우(Fig.1(a))는 유동이 재부착한 후의 지점을 ②로 가정하였으며, 급축소 유로(Fig.1(b))의 경우에는 박리 발생 전의 상태를 ①, 그리고 vena contracta 하류의 상태를 ②로 가정하였다. 그림에서 p 는 정압, $1/2\rho(\bar{u})^2$ 는 동압, p_f 는 기저압력(base pressure), Δp 는 유동 박리 등으로 인한 압력손실이다. Fig.1은 유로 입구에서 유동이 아음속($M_1 < 1$)인 경우로, 압력은 유동방향으로 감소한다. 이것은 관벽을 따라 발생하는 경계층을 고려한 것이며, 단면적이 급변하는 부분에서 압력손실은 박리유동과 관련된다. 본 연구에서는 구간 ①-② 사이에서 발생하는 벽마찰손실은 유체 혼합손실에 비교하여 작다고 가정하여 무시하였다. 또 유동을 단열상태로 가정하는 경우 지배방정식들은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\text{연속 방정식} : \rho_1 F_1 \bar{u}_1 = \rho_2 F_2 \bar{u}_2 = \dot{m} \quad (1)$$

$$\text{운동량 방정식} : p_1 F_1 + p_f(F_2 - F_1) + \dot{m} \bar{u}_1 = p_2 F_2 + \dot{m} \bar{u}_2 \quad (2)$$

$$\text{에너지 방정식} : h_1 + \frac{1}{2}(\bar{u}_1)^2 = h_2 + \frac{1}{2}(\bar{u}_2)^2 \quad (3)$$

$$\text{상태방정식} : p = \rho RT \quad (4)$$

$$\text{마하수 식} : M = u/\sqrt{\gamma RT} \quad (5)$$

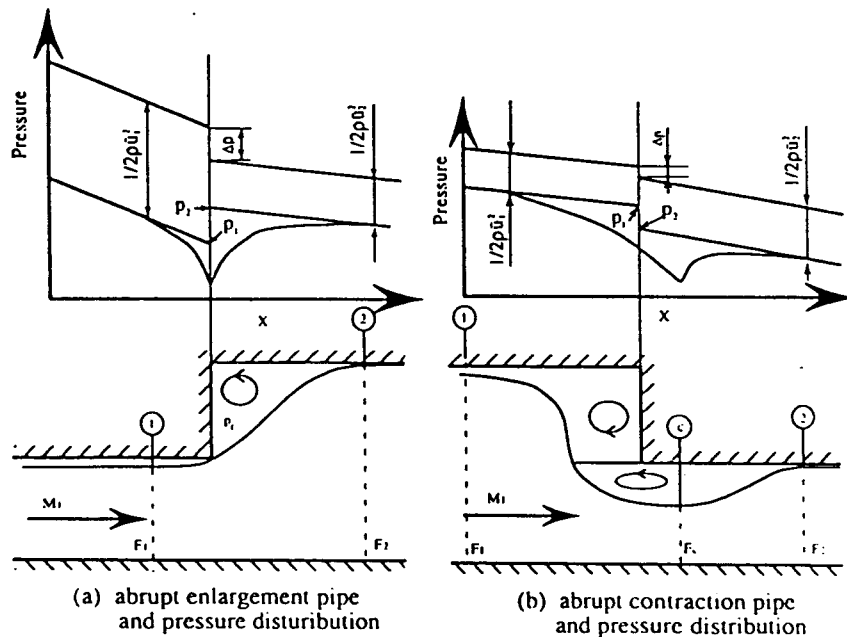


Fig.1 Schematics of abrupt enlargement and contraction pipes

위의 식(1)~(5)에서 급확대 유로의 입구에서 상태량들과 확대면적비 $\varphi(=F_1/F_2)$ 를 가정하는 경우 미지수는 $p_2, \bar{u}_2, T_2, \rho_2, M_2, p_r$ 로 되며, 위의 식들로부터 이들의 값은 구할 수 없다. 한편 식(1)과 (3), (4), (5)에 대하여 확대면적비 φ 를 적용하면 아래와 같이 정압비 p_2/p_1 을 얻을 수 있다.

$$\frac{p_2}{p_1} = \varphi \frac{M_1}{M_2} \left\{ \frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_2^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

단면 ①과 ②사이의 밀도비 ρ_2/ρ_1 는 식(4), (5), (7)을 이용하면

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \varphi \frac{M_1}{M_2} \left\{ \frac{2 + (\gamma - 1)M_2^2}{2 + (\gamma - 1)M_1^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

로 쓰여진다. 또 전압비 p_{02}/p_{01} 는 마하수 관계식 (5)와 식(6)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \varphi \frac{M_1}{M_2} \left\{ \frac{2 + (\gamma - 1)M_2^2}{2 + (\gamma - 1)M_1^2} \right\}^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (8)$$

위의 식(6)~(8)은 유동이 단열상태라고 가정한 것으로, 유로 단면적이 일정한 $\varphi=1.0$ 에 대해서도 성립한다. 급확대 전후의 마하수 관계식은 식(1), (3), (5)와 음속 $a(=\sqrt{\gamma RT})$ 를 이용하여 식(2)를 변형하면 아래와 같은 관계를 얻는다.

$$\frac{M_2 \{2 + (\gamma - 1)M_2^2\}^{\frac{1}{2}}}{1 + \gamma M_2^2} = \frac{M_1 \{2 + (\gamma - 1)M_1^2\}^{\frac{1}{2}}}{1 + \gamma M_1^2 + \left(\frac{p_r}{p_1}\right) \left(\frac{1 - \varphi}{\varphi}\right)} \quad (9)$$

여기에서 p_r 는 Fig.1(a)에 나타낸 바와 같이 유동의 압축성을 고려한 기저압력이며, 급확대 입구에서 유동이 초우크할 경우($M_1=1.0$), 다음과 같이 p_r 에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{p_r}{p_1} = \frac{\varphi}{1 - \varphi} \left\{ \frac{(\gamma + 1)^{\frac{1}{2}} (1 + \gamma M_2^2)}{M_2 \{2 + (\gamma - 1)M_2^2\}^{\frac{1}{2}}} - (\gamma + 1) \right\} \quad (10)$$

위의 식에서 기저압력 p_r 는 M_2 의 값이 1에 접근하면 $p_r/p_1=0$ 로 된다. 문헌(6)에 의하면 $M_1 < 1.0$ 의 경우, 식(9)에서 $p_r/p_1=1.0$ 으로 가정하였지만, p_r/p_1 의 값은 급확대면에서 발생하는 박리에 의한 것이므로, 급확대 입구에서 발생하는 경계층, 속도분포, 난류강도 등과 관련되게 된다. 따라서 박리영역내의 유동의 운동에너지와 급확대 모서리부분에서 발생하는 유동의 팽창을 고려하면 $M_1 < 1.0$ 에서도 $p_r/p_1 < 1.0$ 으로 될 수 있다. 일반적으로 급확대 부분에서 발생하는 재순환 유동과 난류상태는 레이놀즈수에 크게 의존하지 않는다. 따라서 p_r/p_1 에 대한 문헌(7)의 실험식을 사용하면 다음과 같이 주어진다.

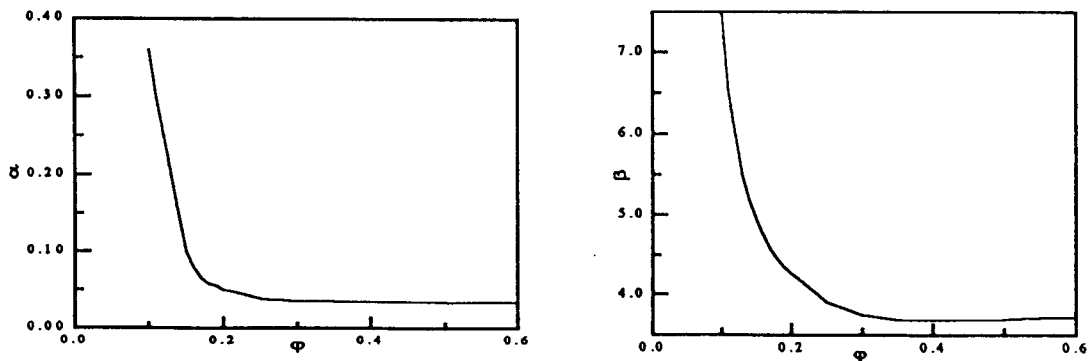


Fig.2 α and β vs φ

$$\frac{p_l}{p_1} = 1.0 - \alpha M_1^\beta \quad (11)$$

여기에서 α 와 β 는 $M_1 < 1$ 보다 작은 경우 확대면적비에 의존하는 값으로, Fig.2에는 α, β 와 φ 의 관계를 나타내었다. 그림의 급확대 유로에서 α 와 β 의 값은 φ 값이 증가함에 따라 급격하게 감소하여, φ 가 약 0.2보다 커지는 경우 거의 일정하게 된다. 이러한 경향은 $M_1 < 1$ 에서 거의 일정하게 나타나며, 이러한 정성적 정량적 경향은 실험결과와 잘 일치한다고 보고되어 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig.2에 나타낸 α 와 β 값으로부터 얻어진 p_l/p_1 값을 계산에 이용하였다.

2. 급축소관

일반적으로 급확대관과는 달리 급축소관의 유동은 상류의 마하수에 따라 초우킹 현상이 나타나게 된다. 이러한 현상은 유로의 상류와 하류의 압력비와 단면적비에 의존하게 되며, Fig.1(b)에서 나타낸 바와 같이 단면 2의 상류 vena contracta에서 발생한다. 그림에서 단면 C는 유로 단면적이 최소로 되는 vena contracta이며, 축소면적비 φ 는 F_1/F_2 로 정의하였다. 이론해석에 사용된 유동모델은 그림과 같이 Borda mouthpiece를 설치함으로써, 스텝면에 작용하는 전압은 단면 1의 전압과 동일하다고 가정하였으며, 또 유로 단면의 축소에 따른 축류계수(Contraction coefficient) C_c 를 도입하였다. 이러한 축류계수 C_c 는 레이놀즈수가 비교적 크고 비압축성 유동인 경우, 그리고 단면 축소비가 큰 경우에는 아래와 같은 관계가 성립하는 것으로 알려져 있다.

$$C_c = \frac{F_c}{F_2} = \frac{\pi}{\pi+2} = 0.611 \quad (12)$$

위의 식은 잘 알려진 바와 같이 비압축성 유동에 적용되어 왔으며, 문헌(8)에서 인용된 바 있다. 그러나 이 값은 축소면적비 $\varphi (= F_1/F_2)$ 에 의존하며, φ 의 값이 1에 접근할 경우에 부분적인 축류가 발생하여, 실제 유동과 잘 일치하지 않게 된다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 식을 이용하였다⁽⁶⁾.

$$C_c = 0.61375 + 0.13318\varphi^2 - 0.26095\varphi^4 + 0.51146\varphi^6 \quad (13)$$

급축소 유로를 압축성 유체가 통과할 때 발생하는 유동의 초우킹은 축류계수 C_c 에 관한 위의 실험식을 이용하면 근사적으로 구해진다. 먼저 점 C의 유동단면적과 점 2의 단면적이 같다고 가정하면, 급확대관에 사용된 지배방정식들을 적용할 수 있다. 따라서 급축소 유로인 경우 운동량 방정식은 다음과 같이 쓰여진다.

$$p_1 F_1 + p_{01}(F_2 - F_1) + \rho_1 \overline{u_1^2} F_1 = p_2 F_2 + \rho_2 \overline{u_2^2} F_2 \quad (14)$$

여기서 왼쪽 두 번째 항은 급축소 부분에서 발생하는 reaction force를 나타내며, 위의 식들에 대하여 축소면적비 φ 와 입구마하수 M_1 를 적용하면 다음과 같이 쓰여진다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{(\overline{u_2})^2}{(\overline{u_1})^2} &= \frac{F_4(1-F_5)}{M_1^2 \varphi}, & \frac{\rho_2}{\rho_1} &= \frac{M_1^2 \varphi}{F_4(1-F_5)} \\ \frac{p_2}{p_1} &= F_4(1+\gamma F_5), & M_2 &= \sqrt{\frac{1-F_5}{1+\gamma F_5}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{F_4^2}{M_1^2 \varphi^2} (1+\gamma F_5)(1-F_5) \quad (16)$$

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = F_4(1+\gamma F_5) \left(\frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} \frac{1-F_5}{1+\gamma F_5}}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (17)$$

위의 식들에서 사용된 F_4 와 F_5 는 다음의 식으로 정의된다.

$$\begin{cases} F_4 = \frac{1}{\gamma+1} \left[\varphi(1+\gamma M_1^2) - (\varphi-1) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right] \\ F_5 = \sqrt{1 - \frac{M_1^2 \varphi^2 [2 + (\gamma-1) M_1^2]}{(\gamma+1) F_4^2}} \end{cases} \quad (18)$$

이론해석에서는 Fig.1(b)에 나타낸 바와 Borda mouthpiece로부터 단면 C까지의 제트 유동면적과 제트의 표면에서 압력이 주어질 필요가 있으나, 실제적으로 이를 추정하기는 매우 곤란하므로, 본 해석에서는 압력 p_c 가 유동의 단면에 대하여 일정하다고 가정하였다. 따라서 단면 ①과 ③ 사이에 보존방정식들을 적용하면 지배방정식들은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\text{연속 방정식} : \dot{m} = \rho_1 \bar{u}_1 F_1 = \rho_c \bar{u}_c F_c \quad (19)$$

$$\text{운동량 방정식} : p_1 F_1 + p_{01} \left(\frac{F_c}{\varphi} - F_1 \right) + \rho_1 (\bar{u}_1)^2 F_1 = p_c \frac{F_c}{C_c} + \rho_c (\bar{u}_c)^2 F_c \quad (20)$$

$$\text{에너지 방정식} : \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{\bar{u}_1^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_c}{\rho_c} + \frac{\bar{u}_c^2}{2} \quad (21)$$

$$\text{마하수 식} : M_c = \sqrt{\frac{1 - F_{5c}}{1 + \gamma(C_c - 1) + \gamma \varphi F_{5c}}} \quad (22)$$

위의 식에서 상첨자 $-$ 는 유로단면에 대한 평균값을 의미하며, F_{4c} 와 F_{5c} 는 각각 다음으로 정리된다.

$$\begin{cases} F_{4c} = \frac{1}{1 + \gamma(2C_c - 1)} \left[\varphi(1 + \gamma M_1^2) C_c - (\varphi - 1) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} C_c \right] \\ F_{5c} = \sqrt{1 - \frac{M_1^2 \varphi^2 [2 + (\gamma-1) M_1^2]}{[1 + \gamma(2C_c - 1)] F_{4c}^2}} \end{cases} \quad (24)$$

위의 식(18)~(21)을 정리하면, 식(14), (15), (16)과 같이 단면 ①과 ③에서의 상태량 비로 나타낼 수 있다. 따라서 단면 ①의 상태량이 주어지는 경우에 단면 ③에서 상태량들을 구한다.

III. 결과 및 고찰

1. 급확대관을 지나는 압축성 유동의 특성

Fig.3에는 단면적비 φ 를 파라미터로 하여, 입구마하수 M_1 의 변화에 따른 급확대 전후의 밀도비 ρ_2/ρ_1 를 나타내었다. 그림에서 입구마하수 M_1 이 약 0.3보다 작은 영역에서는 유로 단면적 확대가 밀도비에 거의 영향을 미치지 않으나, M_1 이 0.3보다 커짐에 따라 φ 가 중요한 파라미터로 작용한다는 것을 볼 수 있다. 즉 유동의 압축성은 φ 에 따라 크게 변화한다는 것을 알 수 있다. 예를 들면 $\varphi=0.6 \sim 0.14$ 인 경우 ρ_2/ρ_1 의 값은 M_1 이 증가할수록 점차 증가하는 경향을 나타내지만, $\varphi=0.10$ 과 0.12 에 대해서는 M_1 이 증가함에 따라 최대값을 가지며, M_1 이 더욱 증가하는 경우에는 그 점으로부터 감소하게 된다. 이것은 단면적 확대에 따른 유동의 팽창효과와 입구마하수가 밀도비에 미치는 영향 때문으로, φ 의 값이 작을수록 높은 입구마하수에서 ρ_2/ρ_1 는 급격하게 감소한다. 또 $M_1 > 0.3$ 인 경우 그림으로부터 일정 M_1 에서 φ 의 값이 증가함에 따라 ρ_2/ρ_1 의 값은 증가하지만, 일정 ρ_2/ρ_1 를 유지하기 위해서는 M_1 과 φ 의 값이 동시에 변해야 한다는 것을 알 수 있다.

Fig.4에는 φ 와 M_1 이 ρ_2/ρ_1 과 p_2/p_1 에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 가는 실선은 φ 가 일정한 선을, 굵은 실선은 M_1 이 일정한 선을 의미한다. 그림으로부터 일정 φ 에 대하여, M_1 이 증가할수록 ρ_2/ρ_1 과 p_2/p_1 의 값이 증가하지만, 일정 M_1 에 대해서는 φ 가 증가함

에 따라, ρ_2/ρ_1 과 p_2/p_1 의 값은 증가하다가 어느 φ 값에서 최대값을 가지된다. 그 점으로부터 φ 가 더욱 증가하는 경우에 압력과 밀도값은 감소함을 알 수 있다. 한편 그림에서 ρ_{max} , p_{max} 로 나타낸 바와 같이 M_1 이 비교적 큰 경우에는 급확대 하류에서 발생하는 밀도의 최대값과 압력의 최대값은 일치하지 않는다는 것을 알 수 있다. 한편 $M_1 < 1$ 이고 p_2/p_1 가 일정한 경우, 동일한 입구마하수에 대하여 ρ_2/ρ_1 및 φ 의 값은 각각 두 값이 존재하게 된다. 유동이 아음속이라고 할지라도, 유동의 압축성과 유로단면의 면적비에 따라 같은 p_2/p_1 의 값을 얻을 수 있다. 즉 입구마하수가 일정한 기체가 관내를 통과하는 경우, 디퓨저와 같이 압력에너지를 증가시키기 위해서는 유로단면적은 두 값이 존재하게 된다. 이 사실은 배관계를 설계할 때 매우 중요하며, 유로면적을 작게 하고도 동일한 압력상승 효과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

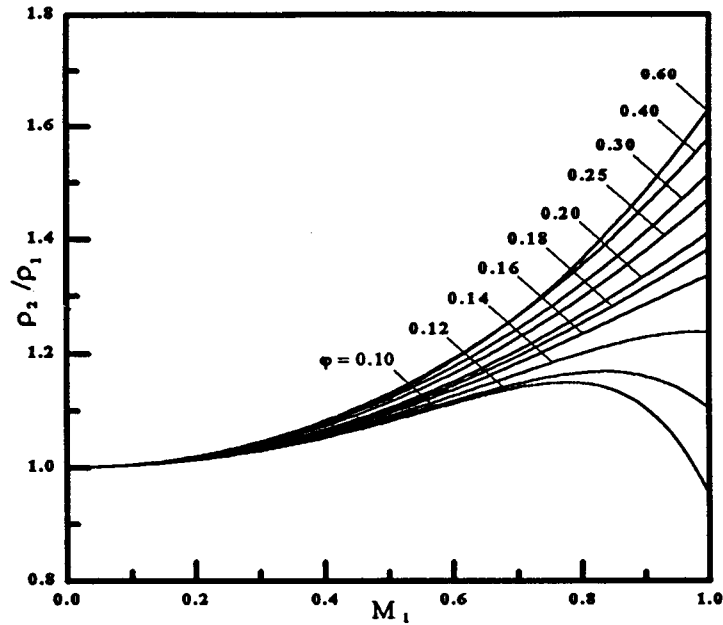


Fig.3 Relation of ρ_2/ρ_1 and M_1 in abrupt enlargement pipe

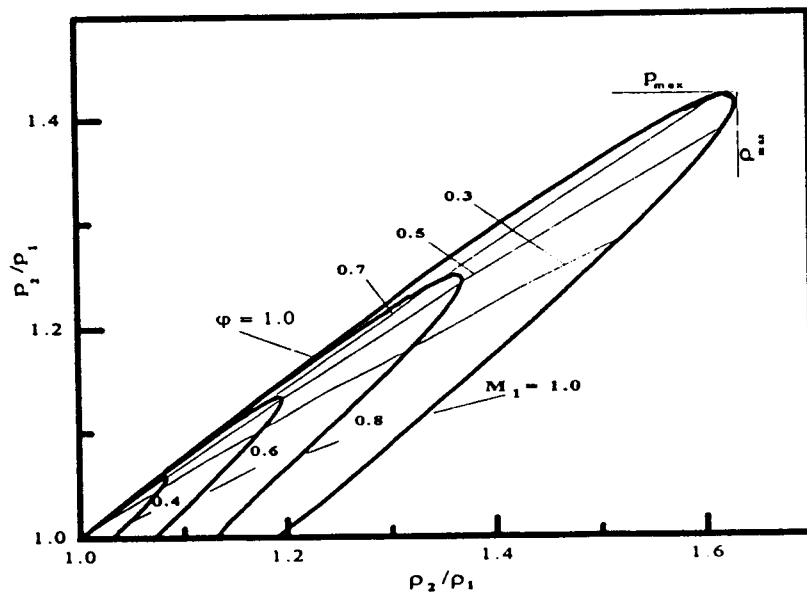


Fig.4 Relation of p_2/p_1 and ρ_2/ρ_1 in abrupt enlargement pipe

Fig.5에는 M_1 과 ϕ 의 값을 파라미터로 하여 전압비 p_{02}/p_{01} 과 마하수 M_2 의 관계를 나타내었다. 그 그림에서 굵은 실선은 각 ϕ 에 대하여 입구마하수 $M_1=1.0$ 인 점들을 연결한 선이며, 오른쪽 방향으로 증가하는 경향을 나타내는 가는 실선은 일정 M_1 값을, 또 오른쪽 방향으로 감소하는 선은 일정 ϕ 값을 나타낸다. 그림으로부터 M_1 이 일정인 경우, ϕ 값이 감소(유로면적이 확대)함에 따라 전압비 p_{02}/p_{01} 과 M_2 는 모두 감소하지만, ϕ 의 값이 일정한 경우 M_1 이 증가함에 따라 전압은 감소하지만 M_2 는 증가한다. 또 그림에서 ϕ 가 비교적 큰 경우(예를 들면 $\phi=0.6$)에는 M_1 이 증가할수록 압력손실은 증가하며 급확대 하류에서 유동의 마하수 M_2 는 상당히 커진다. 또 ϕ 가 비교적 작은 경우(예를 들면 $\phi=0.1$)에는 M_1 이 증가할수록 전압손실은 상당히 작아지며, M_2 는 단지 약간 증가하게 된다. 이 사실은 배관계 입구에서 M_1 이 주어지는 경우 ϕ 값을 조절하여 압력손실을 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다. 또 급확대관 하류에서 동일한 M_2 를 얻으려고 하는 경우에는 급확대부에서 발생하는 압력손실의 크기에 따라 적절한 배관계를 선택하여야 한다는 것을 알 수 있다.

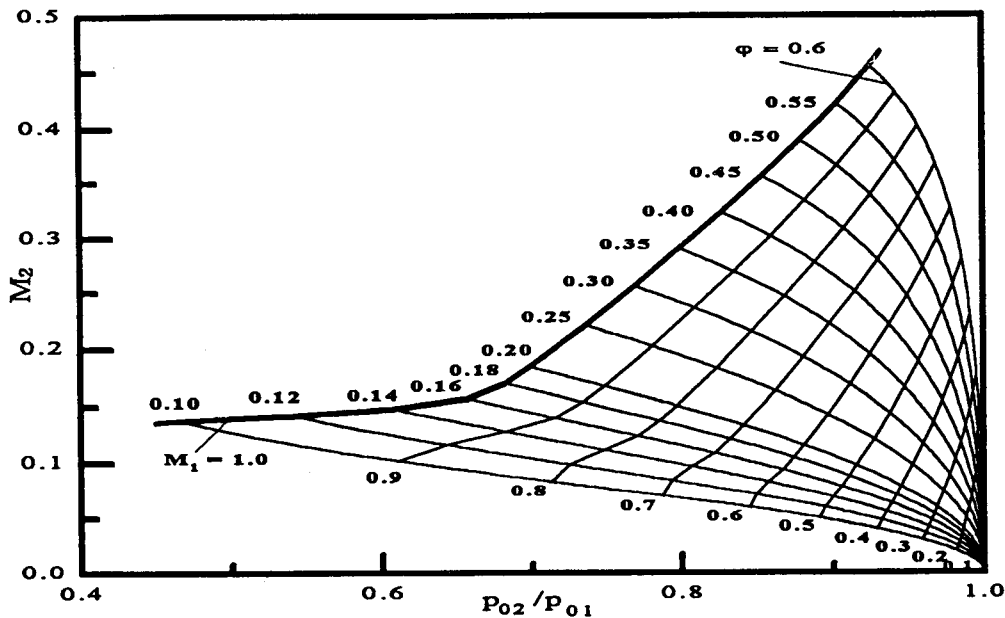


Fig.5 Relation of M_2 and p_{02}/p_{01} in abrupt enlargement pipe

Fig.6에는 ϕ 가 주어지는 경우 M_1 에 따른 전압비 p_{02}/p_{01} 을 나타냈었다. 그림으로부터 동일한 ϕ 값에 대하여 압력손실은 M_1 이 증가할수록 커진다. 또 유로입구에서 M_1 이 주어지는 경우, ϕ 값이 작아질수록 압력손실은 커지게 된다는 것을 알 수 있다.

2. 급축소관을 지나는 압축성 유동의 특성

Fig.7에는 ϕ 가 주어지는 경우 M_1 에 대한 단면 C에서 마하수 M_c 와 급축소 하류의 마하수 M_2 의 관계를 나타내었다. 그림에서 실선은 단면 C의 M_c 의 값을, 점선은 급축소관의 출구에서 M_2 의 값을 나타내었다. 그림에서 ϕ 의 값이 일정할 경우 주어진 M_1 에 대하여 M_c 가 M_2 보다 크게 나타난다. 따라서 실제로 유동이 초우크할 수 있는 지점은 관출구가 아니라 단면 C이며, 그림으로부터 $M_c=1$ 이 되는 유동의 초우킹은 축소면적비 ϕ 가 증가할 경우에는 작은 입구마하수 M_1 에서도 발생한다는 것을 알았다. 반면에 ϕ 가 작은 경우에 유동의 초우킹이 발생하기 위해서는 상대적으로 높은 M_1 값이 필요하다. 예를 들면 일반적으로 아음속 유동으로 간주될 수 있는 $M_1=0.2$ 인 경우, ϕ 값이 약 1.8 정도로 되면 급축소부분에서 유동은 초우크하게 된다. 따라서 이 경우 배관계에서 유동의 초우크현상을 피하기 위해서는 $\phi < 1.8$ 이하로 설계하는 것이 필요하다.

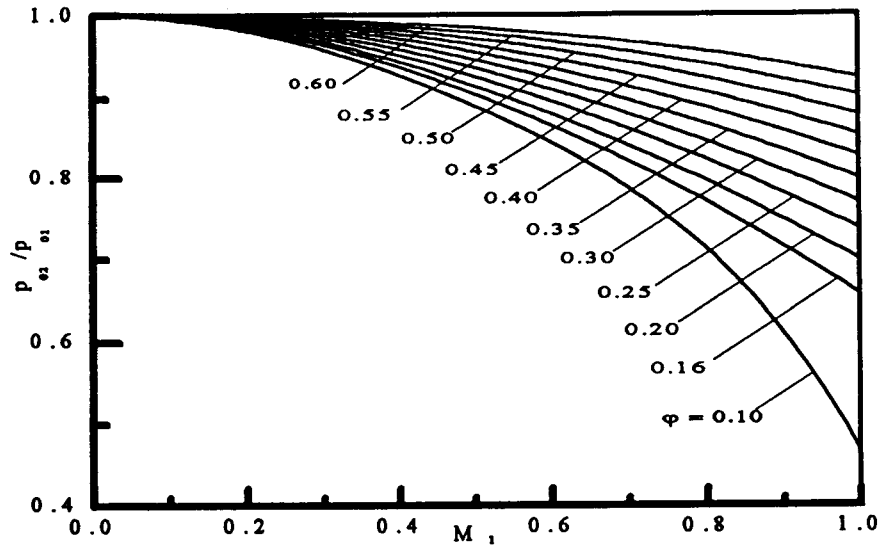


Fig.6 Effects of M_1 and φ on p_{02}/p_{01}

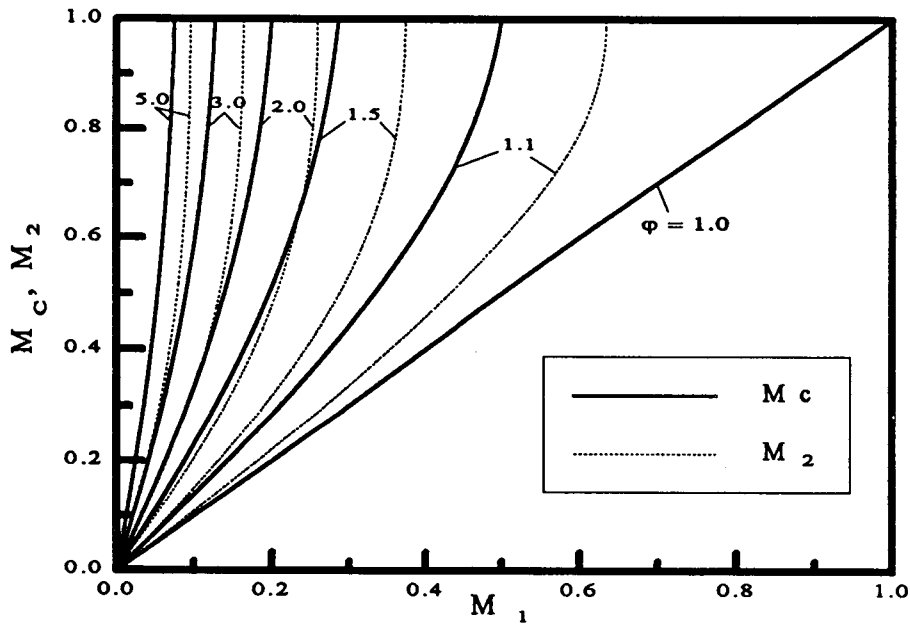


Fig.7 M_2 and M_c vs M_1 in abrupt contraction pipe

Fig. 8에는 φ 를 파라미터로 p_2/p_1 과 M_1 의 관계를 나타내었다. 그림에서 실선은 M_1 과 φ 의 변화에 따른 p_2/p_1 의 값을, 두 점선은 단면 C($M_c=1$)와 출구($M_2=1$)에서 유동이 초우크하는 경우의 p_2/p_1 를 연결한 선이다. 그림에서 각 φ 에 대하여, p_2/p_1 의 값은 M_1 이 증가할수록 감소한다. 구체적으로 φ 가 비교적 작은 값($\varphi=1.02$)인 경우에 M_1 의 증가에 따른 p_2/p_1 의 감소는 $M_1 > 0.7$ 의 영역에서 급격하게 나타나지만, φ 가 비교적 큰 값($\varphi=3.5$)인 경우에는 작은 M_1 의 값에 대해서도 p_2/p_1 의 값은 급격하게 감소하게 된다. 한편 vena contracta에서 유동이 초우크하는 경우($M_c=1$)에 대하여 p_2/p_1 의 값은 M_1 값이 증가할수록 커지게 된다. 이것은 유로 입구에서 M_1 값이 비교적 큰 값을 가진다고 하더라도 φ 의 값이 작은 경우에는 밀도변화가 작다는 것을 의미한다.

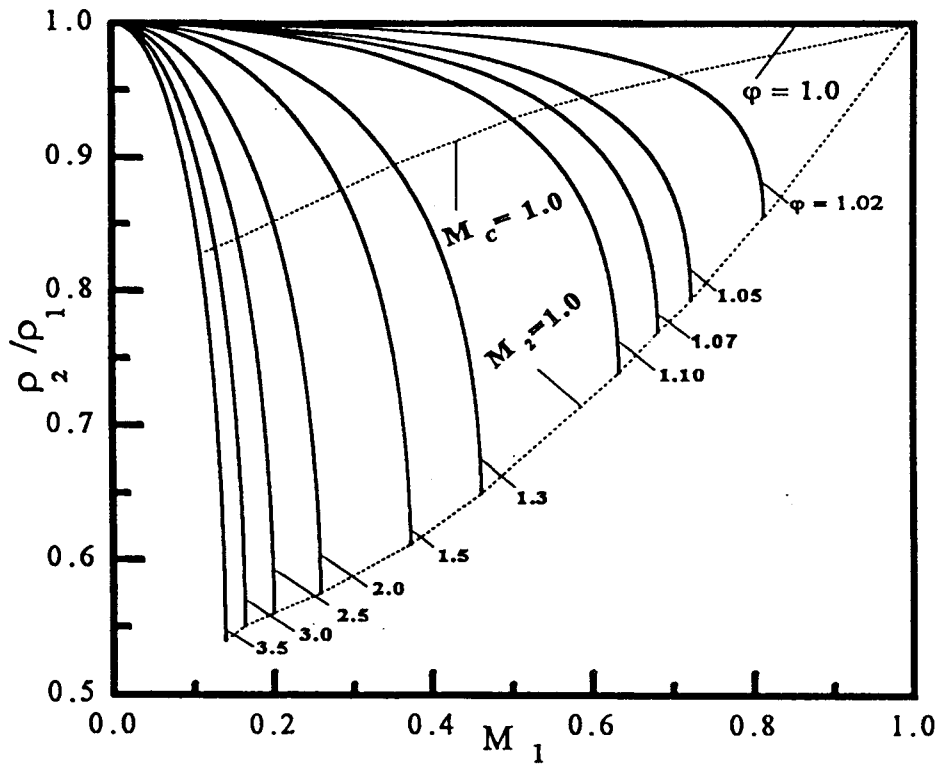


Fig.8 Relation of ρ_2/ρ_1 and M_1 in abrupt contraction pipe

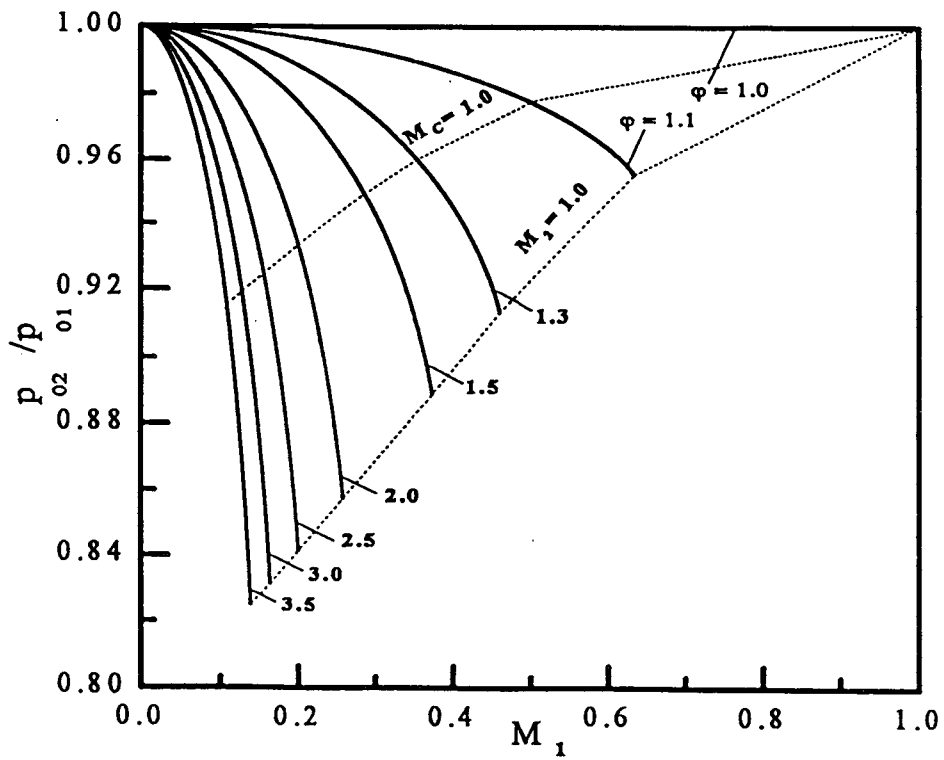


Fig.9 Effects of M_1 and ϕ on p_{02}/p_{01}

Fig.9에는 각 ϕ 의 값에 대하여 M_1 과 전압비 p_{02}/p_{01} 의 관계를 나타내었다. 그림에서 실선은 각 ϕ 에 대하여 M_1 과 전압비 p_{02}/p_{01} 의 관계를, 점선은 각각 두 단면 C와 출구에서 유동이 초우크할 때의 p_{02}/p_{01} 를 연결한 선이다. 그림으로부터 각 ϕ 의 값에 대하여 압력손실은 M_1 이 증가할수록 커진다. ϕ 가 비교적 작은 값(예를 들면 $\phi=1.1$)인 경우, 마하수 증가에 대한 유동 압력손실의 정도는 크지 않지만, ϕ 가 비교적 큰 값(예를 들면 $\phi=3.5$)인 경우에는 M_1 이 약간만 증가하더라도 압력손실은 매우 커진다는 것을 알 수 있다. 즉 급축소관 입구에서 M_1 이 주어지는 경우에 압력손실은 마하수가 증가할수록 작아진다. 이것은 배관계에서 M_1 이 작다고 하더라도, 유동에서 발생하는 압력손실이 증대하게 되면 유동의 초우크 현상의 발생은 보다 용이해 진다는 것을 의미한다. 따라서 급축소관에서 유동의 손실을 줄이는 것은 초우크현상을 방지하는 목적에 대해서도 필요하다.

IV. 결론

본 연구에서는 기본적인 배관요소 중의 하나인 급축소/확대관을 지나는 기체유동을 해석하기 위하여, 일차원 압축성 유동의 지배방정식을 이용하여 간단한 이론계산을 수행하였다. 이론해석에서는 관입구에서 유동의 마하수, 단면의 축소 및 확대비 등을 변화시켜, 압축성의 효과 및 유동의 초우크 조건 등을 구하였다. 그 결과 급확대 유로에서 $M_1 > 0.3$ 경우, 유동의 압축성은 단면 확대비 ϕ 에 따라 상당히 변화하였다. 또 주어지는 입구마하수에 대하여, 동일한 p_2/p_1 의 값을 얻기 위해서는 상당히 p_2/p_1 및 ϕ 의 값이 각각 두 값이 존재하였다. 이 사실은 배관계를 설계할 때 매우 중요하며, 유로면적을 작게 하고도 동일한 압력 상승 효과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 급확대관 하류에서 동일한 M_2 를 얻으려고 하는 경우에는 급확대부에서 발생하는 압력손실의 크기에 따라 적절한 배관계를 선택하여야 한다는 것을 알았다. 급축소관인 경우에는 M_1 이 작다고 하더라도, 유동에서 발생하는 압력손실이 증대하게 되면 유동의 초우크 현상이 발생은 보다 용이해 진다는 것을 알았다. 따라서 급축소관에서 유동의 손실을 줄이는 것은 초우크 현상을 방지하는 목적에 대해서도 필요하다. 본 연구에서는 각종 배관계를 통하는 압축성 유동을 예측하는데 필요한 실용적인 계산법을 제시하였을 뿐만 아니라, 본 연구에서 얻어진 결과들은 배관계를 설계하는데 기초자료로 활용될 수 있다.

V. 참고문헌

- (1)Jungowski,W.M., 1968, "Investigation of Flow Pattern, Boundary Conditions and Oscillation Mechanism in a Compressible Flow through Sudden Enlargement of a Duct," Warsaw Technical Univ. Publ. No. 3.
- (2)Benedict,R.P., and Carlucci, N. A., 1965, "Flow with Losses," Journal of Engineering for Power, No.63-WA-105.
- (3)Bean,H.S., 1971, "Fluid Meters, Their Theory and Application," Report of ASME Research Committee on Fluid Meters, 6th Edition.
- (4)Bradshaw,P., 1965, "The Effect of Wind Tunnel Screens on Nominally Two-Dimensional Boundary Layers," Journal of Fluid Mech, Vol.22, No.4.
- (5)Iguchi,M. and Ohmi, M., 1986, "Loss Coefficients for Flows Through a Sudden Expansion and a Sudden contraction closely Placed," Trans. JSME, Series B, vol.52, No.481.
- (6)Benedict,R.P. and Swetz,S.D., 1966, "Flow Losses in Abrupt Enlargements and Contractions," Journal of Engineering for Power, No.65-WA /PTC-1.
- (7)森棟隆昭, 平山直道, 前細稔幸, 1980, "管路係の高速流動特性に関する研究," Trans. JSME, Series B, Vol.46, No.404.
- (8)Milen-Thompson,L.M., 1955, "Theoretical Hydrodynamics," MacMillan & Co., London, pp.296.