

이중 Orifice를 지나는 압축성 유동에 관한 해석적 연구

김희동* · 김태호** · 우선훈**

Analytical Study on the Compressure Flow Through a Double Orifice

Heuy-Dong KIM*, Tae-Ho KIM** and Sun-Hun WOO**

ABSTRACT

The flow choking in a double orifice is expected to depend on cross-sectional area ratios of the orifices, upstream Mach number and total pressure loss between the orifices. However, no research has been reported on the problems of the compressible flow through a double orifice so far. The present study investigated analytically the choke conditions of the compressible gas through a double orifice, using a simple compressible theory. The orifice area ratio, upstream Mach number, and total pressure loss were involved to find the effects that they have on the flow choking. The results of analytical method show that for orifice area ratios below 1.0, flow choking moves from the first to the second orifice as the total pressure loss increases, however, for orifice area ratios over 1.0, it occurs only at the second orifice.

초 록

본 연구에서는 이중 orifice를 지나는 압축성 유동을 해석하기 위하여 압축성 유체에 대한 이론계산을 수행하였다. 이중 orifice의 단면적비, orifice 상류의 마하수 및 orifice 사이의 전압손실을 변화시켜, orifice로 인하여 발생하는 축류부에서 유동이 초우크하게 되는 조건을 구하였다. 본 연구의 결과로부터 유동의 초우크 현상은 orifice 단면적비뿐만 아니라 전압손실에도 의존함을 알 수 있다.

1. 서 론

각종 노즐, 디퓨저, 급확대/급축소, orifice, 밸브 등의 유체요소를 지나는 기체의 내부 유동은 최근 공업의 발달과 함께 현저하게 고속화되고 있으며,

이에 따라 유동의 초우크(choke) 및 충격파(shock wave)의 발생 등 유체의 압축성에 기인하는 제 현상들이 발생하게 된다. 일반적으로 압력비가 약 2.0 이상인 기체가 유체요소를 통과하는 경우에 유동은 유로의 어느 단면에서 초우크하여, 그 하

*안동대학교(Andong Univ., Dept. of Mechanical Engineering)

**안동대학교 대학원(Andong Univ., Graduate School)

류에서 초음속으로 된다. 이 경우 초음속 유동이 아음속으로 감속하는 과정에서 필연적으로 충격파가 발생한다. 이와 같이 배관계에서 발생하는 충격파는 관벽의 경계층과 상호간섭함으로써 유동장의 소음·진동의 발생 원인으로 된다는 것이 알려져 있다^(1,2). 따라서 충격파의 발생은 관내 유동의 초우크 현상과 직결되며, 충격파의 발생을 예측하기 위해서는 유동이 초우크하게 되는 조건을 명확히 알 필요가 있다.

본 연구에서 적용한 이중 orifice 유로는 일반적으로 유량계측용 뿐만 아니라 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 예를 들면 증기터빈이나 가스 터빈에서 작동유체가 축으로부터 누설되는 것을 방지하기 위한 labyrinth sealing, 물질의 전달 및 열전달의 조절장치, 고액분리장치 등에 널리 적용되고 있으며^(3,4), orifice를 통하는 유량이나 압력을 정밀하고 정확하게 제어하기 위한 장치⁽⁵⁾에 적용되고 있다. 또 각종 플랜트에서 고압가스의 배출을 위하여 배관계 내부에 설치하는 연속 orifice⁽⁶⁾ 등을 들 수 있다. 이러한 이중 혹은 연속 orifice인 경우, 유동의 초우크는 orifice의 단면적 혹은 형상뿐만 아니라 orifice 사이에서 발생하는 유동의 손실, 상류 유동의 마하수 등 여러 요인들에 의하여 변화할 것으로 예상된다. 그러나 지금까지 이에 대한 구체적인 연구결과는 전무하다.

일반적으로 이중 orifice를 통하는 유동장의 초우크 현상을 조사하기 위해서는 기체의 점성을 고려한 3차원 비정상 유동장에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이들 연구에 앞서, 이중 orifice를 통하는 압축성 유동장을 일차원적으로 해석하였다. 이론해석에서는 이중 orifice의 단면적비, orifice 상류의 마하수 및 orifice 사이의 전압손실을 변화시켜, orifice로 인하여 발생하는 축류부에서 유동이 초우크하게 되는 조건을 구하였다.

2 압축성 유동의 초우크

압축성 기체가 관로를 통하여 유동하는 경우, 기체의 비열비(ratio of specific heats)를 γ , 기체상수 R , 기체의 유속을 u , 정압 p_c , 전압 p_0 , 전

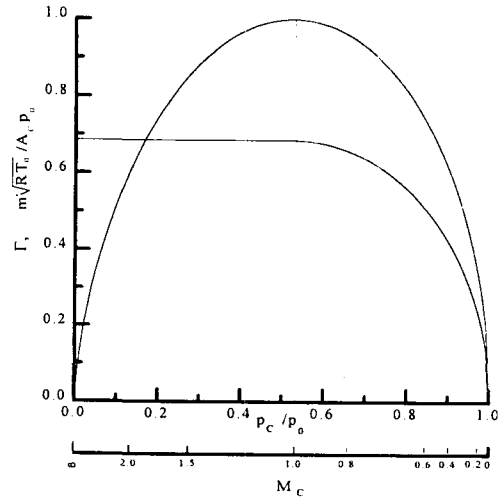


Fig.1. Γ and $m\sqrt{RT_0}/Ac p_0$ vs p_c/p_0 and M_c

온도를 T_0 , 밀도를 ρ , 그리고 관로의 단면적을 A_c 로 가정한다. 이 경우 단위시간당 관로의 어떤 단면(단면적: A_c)을 통하는 질량유량 \dot{m} 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\dot{m} = \frac{p_0 A_c \Gamma}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, \quad (\gamma=1.4) \quad (1)$$

위의 식(1)에서 Γ 는 기체 역학적 함수(gas dynamic function)로 불리워지며⁽⁷⁾, γ 와 p_c/p_0 의 함수이다. Fig. 1에는 Γ , \dot{m} 와 p_c/p_0 의 관계를 나타내었다. 그림의 횡축은 p_c/p_0 를 마하수 M_c 로 환산한 값을 함께 나타내었다. 그림에서 유동의 마하수 M_c 가 0으로부터 ∞ 까지의 모든 유동에 대하여, $0 \leq \Gamma \leq 1$ 이며, M_c 가 1.0인 경우 Γ 는 최대값으로 된다. 또 무차원 질량유량 $m\sqrt{RT_0}/Ac p_0$ 는 M_c 가 증가함에 따라 커지게 되며, $M_c=1$ 에서 0.685의 값으로 되어, M_c 이 더욱 증가하여도 일정한 값을 유지하게 된다. 한편 식(1)으로부터 일차원 정상유동인 경우, 임의의 단면에서 다음의 식이 성립한다.

$$\frac{p_0 A_c}{\sqrt{T_0}} \Gamma = \text{const.} \quad (2)$$

위의 식으로부터 $M_c < 1$ 인 아음속 유동이든, $M_c > 1$ 인 초음속 유동이든, 유동방향으로 단면적 A_c 가 감소하거나, 마찰 혹은 혼합손실 등으로 인하여 전압 p_0 가 감소하는 경우, 그리고 가열 등으로 인하여 T_0 가 증가하는 경우에 Γ 는 증가하여 1.0에 접근하게 된다. 그 결과 기체 역학적 함수는 $\Gamma = 1$, 즉 $M_c = 1$ 의 임계상태(critical condition)로 되며, 유동은 초우크하게 된다. 이러한 초우크 현상은 압축성 유동의 중요한 특징 중의 하나로, 초우크 위치의 하류에서 유동이 초음속으로 되면, 충격파가 형성된다. 일반적으로 유동의 초우크 현상은 벤츨리, 노즐, orifice, 엘보우관 등과 같이 유동의 유효단면적이 감소하는 경우 그리고 직관, 디퓨저 등과 같은 유로에서는 마찰에 의한 전압손실을 수반하는 경우에 자주 발생한다.

3. 지배방정식

이론해석에서는 이중 orifice가 설치된 유로에 대하여 일차원 압축성 유동의 지배방정식을 적용하였다. Fig.2에는 본 연구에 적용된 이중 orifice의 개략도를 나타내었다. 그림에서 A는 각 orifice의 단면적이며, 면적비 ϕ 는 A_2/A_1 로 정하였다. 또 그림의 하첨자 0, 1, 2, c는 각 정체점 상태 및 orifice유로의 기하학적 상태와 축류부의 상태를 의미한다. 그림에서 p_c 는 각 축류부(Vena contractor)에서 정압, p_0 는 orifice의 상류전압, M_∞ 는 상류마하수, M_c 는 각 축류부에서 마하수이며, 본

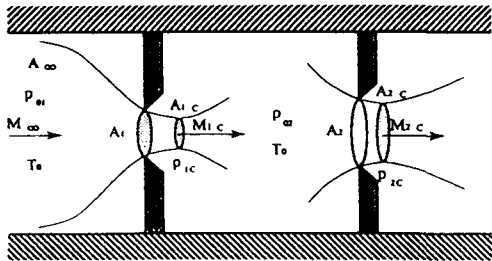


Fig. 2 Sketch of a double orifice

연구에서는 편의상 $A_1/A_\infty = 0.5$ 로 고정하여, ϕ 값을 변화시켰다. 또 본 연구에서는 Fig. 2는 유로 입구에서 유동이 아음속($M_\infty < 1$)인 경우, 이중 orifice 사이에서 발생하는 벽마찰손실은 유체 혼합손실에 비교하여 작다고 가정하여 무시하였다. 또 공기는 완전기체이며, 단열유동으로 가정하는 경우, 단면적이 A_c 인 축소부를 통하는 질량유량은 다음으로 주어진다.

$$\frac{m\sqrt{RT_0}}{A_c p_0} = \begin{cases} \sqrt{\left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{p_c}{p_0} \right)^{2/\gamma} \left\{ 1 - \left(\frac{p_c}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\} \right]} & \text{for } \frac{p_c^*}{p_0} \leq \frac{p_c}{p_0} \leq 1 \\ \sqrt{\left\{ \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right\}} & \text{for } 0 \leq \frac{p_c}{p_0} \leq \frac{p_c^*}{p_0} \end{cases} \quad (3)$$

여기에서 단일 orifice를 통하는 임계압력비로 $p^*/p_0 = 0.528$ 이다. 본 연구에서는 식(3)을 이용하기 위하여 orifice 사이의 전압손실을 임의로 가정하였다. 또 유동은 축류부까지 등엔트로피적으로 팽창한다고 가정하여, 축류계수(contraction coefficient)를 이용하여 축류부의 면적을 다음과 같이 구했다.

$$A_c = C_c A \quad (4)$$

여기서 C_c 는 축류계수로, 문헌(8)의 식을 사용하였다.

$$C_c = 0.61375 + 0.13318\phi - 0.26095\phi^2 + 0.51146\phi^3 \quad (5)$$

여기에서 $\phi = A/A_\infty$ 이다. 한편 문헌(9)에서는 이중 orifice의 첫 번째 축류부인 A_{1c} 에서 발생하는 운동에너지는 orifice 사이의 팽창실에서 모두 열에너지로 변환된다고 하여, 두 번째 orifice 상류전압은 첫 번째 축류부에서 정압과 동일하다고 가정하였다($p_{1c} \cong p_{02}$). 그러나 실제의 경우 첫 번째 오리피스로부터 방출되는 유동의 운동에너지는 완전히 열에너지로 변환되지 않는다.

본 연구에서는 orifice사이에 전압손실을 임의로 가정하여 이론해석을 수행하였다. 이중 orifice 상류의 전압과 하류의 정압비인 전체 압력비(overall pressure ratio) p_{2c}/p_{01} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{p_{2c}}{p_{01}} = \frac{p_{2c}}{p_{02}} \cdot \frac{p_{02}}{p_{01}} \quad (6)$$

위의 식으로부터 전체 압력비는 두 번째 orifice의 압력비(p_{2c}/p_{02}), orifice 사이의 전압손실에 의존한다. 정상유동인 경우 식(3)에서 $\dot{m}\sqrt{RT_0}$ 는 각 orifice에 대하여 일정한 값을 가지므로, 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\dot{m}\sqrt{RT_0}}{A_{2c}p_{02}} = \left(\frac{\dot{m}\sqrt{RT_0}}{A_{1c}p_{01}} \right) \frac{A_{1c}}{A_{2c}} \frac{p_{01}}{p_{02}} \quad (7)$$

위의 식들을 사용하여, 본 연구에서는 orifice 면적비 $\phi(=A_1/A_2)$ 와 orifice 사이의 전압손실 $\eta(=p_{02}/p_{01})$ 를 변수로 하여, 각 orifice의 축류부에서 유동이 초우크하는 조건을 조사하였다.

4. 결과 및 고찰

본 해석에서는 일정 A_1/A_∞ 에 대하여, orifice 사이의 전압손실과 두 번째 orifice의 단면적 즉 ϕ 의 값을 변화시켜 계산을 수행하였다.

Fig. 3에는 단면적비 $\phi = 0.8$ 인 경우, 전압손실 η 와 두 번째 orifice의 축류부에서 마하수 M_{2c} 를 파라미터로 하여, 전체 압력비 p_{2c}/p_{01} 와 M_∞ 의 관계를 나타내었다. 그림에서 오른쪽 방향으로 증가하는 가는 실선은 일정 M_{2c} 선, 오른쪽 방향으로 감소하는 경향을 나타내는 점선은 η 가 일정한 선을 의미한다. 횡축에 평행한 굵은 실선($M_\infty = 0.287$)은 각 전압손실에 대하여, 첫 번째 orifice의 축류부에서 마하수 $M_{1c} = 1$ 인 선을, 오른쪽 방향으로 증가하는 굵은 실선은 $M_{2c} = 1$ 인 선을 나타내며, ●는 두 orifice에서 유동이 동시에 초우크하는 경우로 $M_{1c} = M_{2c} = 1$ 인 점을 의미한다. 이 경우 상류 마하수 $M_\infty = 0.287$ 이다. 그림에서 M_{2c} 가 일정한

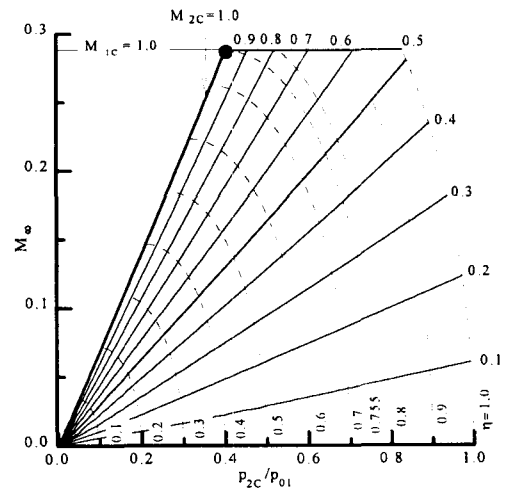


Fig. 3. M_∞ vs p_{2c}/p_{01} ($\phi = 0.8$)

선에 대하여 $\eta(=p_{02}/p_{01})$ 가 증가하는 경우 p_{2c}/p_{01} 와 M_∞ 는 모두 증가하지만, 일정 η 값에 대하여 M_{2c} 가 증가하는 경우 p_{2c}/p_{01} 는 감소하며, M_∞ 는 증가한다. 또한 전압손실이 비교적 작은 경우($\eta = 1.0 \sim 0.755$), 유동은 첫 번째 orifice에서 초우크 현상이 나타나는 반면에, 전압손실이 큰 경우($\eta = 0.755 \sim 0$), 두 번째 orifice에서 초우크하게 된다. 이것으로부터 유동의 초우크 현상은 orifice 단면적비뿐만 아니라 전압손실에도 의존함을 알 수 있다.

Fig. 4는 orifice 단면적이 같은 경우($\phi = 1.0$), 전압손실 η 와 두 번째 orifice의 축류부에서 마하수 M_{2c} 를 변수로 하여 전체 압력비 p_{2c}/p_{01} 와 상류 마하수 M_∞ 의 관계를 나타내었다. 그림에서 실선, 점선 등은 Fig. 3와 동일하다. 그림에서 전압손실이 없는 경우($\eta = 1.0$) $M_\infty = 0.287$ 이 되면, 그림의 ●점에서 두 orifice에서 유동이 동시에 초우크하게 되지만, 전압손실이 있는 경우($\eta < 1.0$) 반드시 두 번째 orifice에서만 유동이 초우크하게 된다. 그림으로부터 M_{2c} 가 일정한 경우, η 가 증가함에 따라 p_{2c}/p_{01} 와 M_∞ 는 모두 증가하지만, η 가 일정한 경우에는 M_{2c} 가 증가함에 따라 p_{2c}/p_{01} 는 감소하며, M_∞ 는 증가한다.

Fig. 5에서는 $\phi = 1.2$ 인 경우 이중 orifice를 통한 압축성 유동에 대한 M_∞ 의 영향을 조사하기 위하여, η 와 두 번째 orifice의 축류부에서 마하

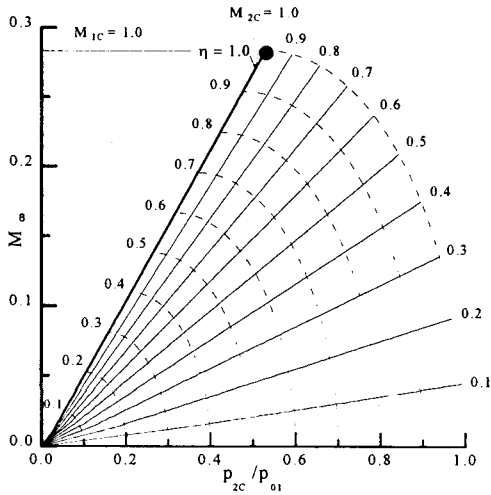


Fig. 4. M_∞ vs p_{2c}/p_{01} ($\phi = 1.0$)

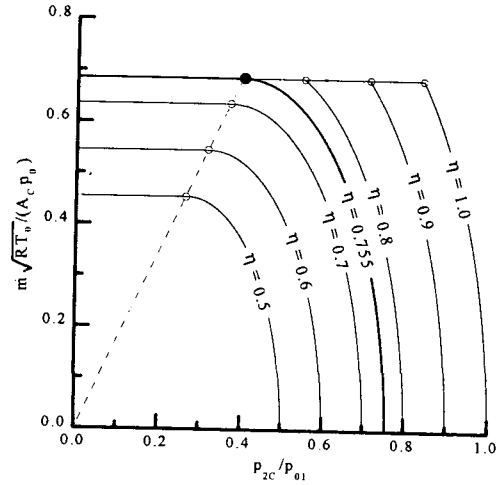


Fig. 6. $\dot{m}\sqrt{RT_0}/A_c p_0$ vs p_{2c}/p_{01} ($\phi = 0.8$)

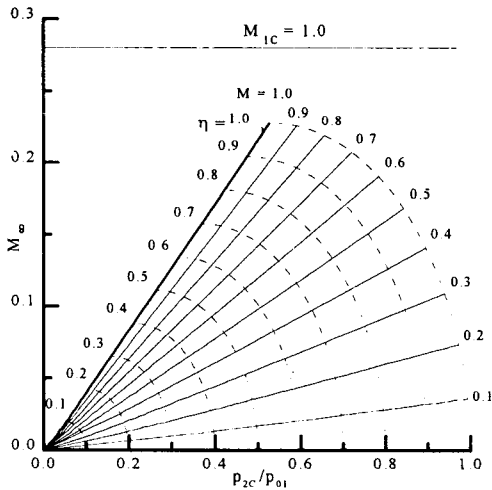


Fig. 5. M_∞ vs p_{2c}/p_{01} ($\phi = 1.2$)

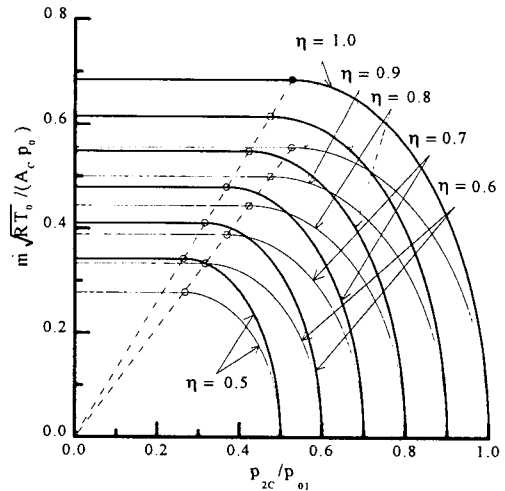


Fig. 7. $\dot{m}\sqrt{RT_0}/A_c p_0$ vs p_{2c}/p_{01} ($\phi = 1.0, 1.2$)

수 M_{2c} 를 변수로 하여 전체 압력비 p_{2c}/p_{01} 와 M_∞ 의 관계를 나타내었다. 그림에서 굵은 실선과 가는 실선 등은 Fig. 3과 동일하다. orifice 단면적비 $\phi \leq 1.0$ 인 경우에 첫 번째와 두 번째 orifice에서 동시에 초우크할 수 있었지만, $\phi = 1.2$ 인 경우에 유동은 전압손실에 관계없이 반드시 두 번째 orifice에서만 초우크하게 된다. 또한 그림에서 일정한 M_∞ 에 대하여 η 가 증가하는 경우에 M_{2c} 의 값은 작아진다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 고압가스 등이 배관계를 통하여 대기 방출시키는 경우에 발생하는 소음은 관 출구

에서 유동의 마하수에 의존하게 되므로, 본 연구의 결과로부터 orifice 전후의 압력비를 작게 하는 즉 감압과정을 공간적으로 분산시키는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 $\phi < 1.0$ 인 경우 전압손실 η 를 변수로 하여, 무차원 질량유량 $\dot{m}\sqrt{RT_0}/A_c p_0$ 와 전체 압력비 p_{2c}/p_{01} 의 관계를 나타내었다. 그림에서 \circ 는 유동이 초우크할 때의 상태를, \bullet 는 두 orifice에서 동시에 유동이 초우크할 때의 점을, 가는 실선은 η 가 일정한 선을 의미한다. 또 그림으로부터 굵은 실선($\eta = 0.755$)을 기준으로 하여, p_{2c}/p_{01}

가 감소함에 따라 $\eta > 0.755$ 인 영역에서는 첫 번째, $\eta < 0.755$ 인 영역에서는 두 번째 orifice에서 유동이 초우크하게 된다. 따라서 유동이 첫 번째 orifice에서 초우크하게 되는 경우 η 가 감소함에 따라 p_{2c}/p_{01} 의 임계값은 작아지고, 무차원 질량유량의 값은 일정하게 유지된다. 그러나 두 번째 orifice에서 η 가 감소함에 따라 p_{2c}/p_{01} 의 임계값은 그림과 같이 원점을 향하여 직선적으로 감소하고, 무차원 질량유량의 값도 감소함을 알 수 있다.

Fig. 7에는 $\phi = 1.0, 1.2$ 에 대한 무차원 질량유량의 값을 전압손실 η 를 파라미터로 하여, 전체 압력비 p_{2c}/p_{01} 에 대하여 나타내었다. 그림에서 굵은 실선은 $\phi = 1.2$, 가는 실선은 $\phi = 1.0$, 점선은 유동의 초우크 점 \circ 을 연결한 선을 의미한다. 그림에서 η 가 감소함에 따라 $\phi = 1.0$ 과 $\phi = 1.2$ 인 두 경우 모두, 유동이 초우크할 때의 p_{2c}/p_{01} 의 임계값은 그림과 같이 감소하고, 무차원 질량유량의 최대값도 감소하게 된다. η 가 일정한 선에 대하여, ϕ 가 클수록 p_{2c}/p_{01} 의 임계값은 감소하며, 무차원 질량유량의 최대값은 작아진다. 이것은 $\phi > 1.0$ 인 경우에는 반드시 두 번째 orifice에서만 유동이 초우크하기 때문이다.

Fig. 8에는 전압손실 η 와 orifice 단면적비 ϕ 를 변수로 하여, 상류마하수 M_∞ 와 orifice의 축류부에서의 마하수 M_{1c} 와 M_{2c} 의 관계를 나타냈으며,

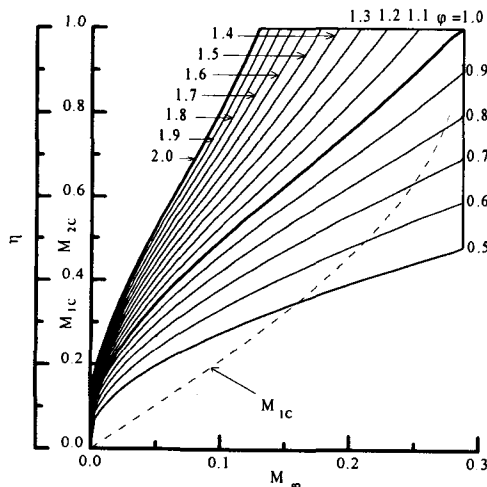


Fig. 8. M_{1c} , M_{2c} and η vs M_∞

그림의 횡축은 M_∞ 를, 종축은 M_{2c} , M_{1c} , 그리고 η 를 함께 나타내었다. 그림에서 가는 실선은 ϕ 가 일정한 선을, 점선은 M_{1c} 를 의미한다. 종축에 평행한 굵은 실선은 첫 번째 orifice에서 유동이 초우크할 때 ϕ 값을 연결한 선, 횡축에 평행한 굵은 실선은 $M_{2c}=1$ 인 선, 오른쪽 방향으로 증가하는 굵은 실선은 $\phi=1.0$ 인 선을 나타낸다. 그림으로부터 각 ϕ 에 대하여, η 가 감소하는 경우 M_∞ , M_{2c} , M_{1c} 모두 감소한다. 또한 일정 η 에 대하여 ϕ 가 증가하는 경우 M_{1c} 와 M_{2c} 는 일정하게 유지되지만, M_∞ 는 감소함을 알 수 있다. 이것으로부터 전압손실을 일정하게 유지하는 경우, 동일한 M_{2c} 의 값을 적절한 orifice 단면적비와 상류마하수 M_∞ 에 의존한다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 배관계의 기초 요소인 이중 orifice를 통과하는 압축성 기체의 초우크 조건을 이론적으로 조사하였다. 이론해석에서는 이중 orifice의 단면적비, orifice 상류의 마하수 및 orifice 사이의 전압력을 변화시켜, orifice로 인하여 발생하는 축류부에서 유동이 초우크하게 되는 조건을 구하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. $\phi = 0.8$ 일 때 전압손실이 작은 경우($\eta = 1.0 \sim 0.755$) 유동은 첫 번째 orifice에서 초우크 현상이 나타나는 반면에, 전압손실이 큰 경우($\eta = 0.755 \sim 0$) 두 번째 orifice에서 유동이 초우크하게 된다.
2. $\phi = 1.0$ 일 때 전압손실이 없는 경우($\eta = 1.0$), 상류마하수 $M_\infty = 0.287$ 이 되면 유동은 두 orifice에서 동시에 초우크하지만, 전압손실이 있는 경우($\eta < 1.0$) 반드시 두 번째 orifice에서 만 유동이 초우크하게 된다.
3. $\phi = 1.2$ 인 경우 전압손실에 관계없이 반드시 두 번째 orifice에서만 유동이 초우크하게 된다.

참 고 문 헌

1. Arant, J. B., 1973, "How to Cope with Control Valve Noise," Instr. Tech., Vol.20, No.3.
2. Kim, H. D. and Matsuo, K., 1993, "Normal Shock Oscillations in Supersonic Diffusers," Intl. Jour, Shock Waves, Vol.3, Springer-Verlag.
3. Trutnovsky, K., 1973, "Berührungsfreie Dichtungen," VDI-Verlag
4. 小茂鳥, 1973, "非接觸シール論," Korona Co.
5. Yudin, E. Y., 1955, "The Acoustic Power of the Noise Created by Airduct Elements," Soviet Phys. Acoust., Vol.1, pp.383~398.
6. Davis, D. D., Skokes, G. M., Moore, D. and Stevens, G. L., 1954, "Theoretical and Experimental Investigation of Mufflers with Comments on Engine Exhaust Muffler Design," NACA Report 1192.
7. Benedict, R. P., 1983, "Fundamentals of Gas Dynamics," John Wiley & Sons, Inc., Chap.4.
8. 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.
9. Anderson, A., 1992, "A Note on Compressible Flow through Orifices in Series," Journal of Mechanical Engineering Science, pp.361~366