

충격파 감금법을 이용한 배기가스 유동의 새로운 처리법에 관한 연구

김희동* · 김태호**, 우선훈**, K.Matsuo***

New Treatment of High-Pressure Exhaust Gas Flows Using Shock-Wave Confinement

Heuy-dong Kim*, Tea-ho Kim**, Sun-hoon Woo**, and Kazuyasu Matsuo***

ABSTRACT

In many industrial practices it is an important problem to discharge a high-pressure exhaust gas to the atmosphere without generating a loud noise and much vibration. This may be achieved by confining a shock system inside the exhaust duct with a double orifice. The objective of the current work is to develop a new treatment method for the high-pressure exhaust gases. A theoretical analysis was applied to one-dimensional, steady, viscous, compressible model flowfield, and an experiment was performed using a shock tunnel facility. The results showed that the total pressure drop increases with a decrease of the opening area of the upstream orifice, and the shock confinement to the duct is possible by decreasing the opening area of the downstream orifice.

초 록

본 연구에서는 유로의 상류와 하류에 오리피스를 가지는 일정 단면적의 관로에 충격파를 감금시킴으로써, 고압력의 배기가스 유동을 감압처리하는 새로운 방법을 시도하였다. 이론해석에서는 일차원 점성 압축성 유동이론을 두 오리피스를 가지는 내부유동에 적용하여 이론계산을 수행하였다. 실험에서는 충격파 풍동을 이용하여, 압력측정과 유동장의 광학관찰을 수행하였다. 그 결과 충격파를 관내에 감금하기 위해서는 관의 마찰계수를 크게 하는 것이 바람직하다는 것을 알았다. 또 상류 오리피스의 단면적을 일정하게 하는 경우, 하류의 오리피스 단면적을 변화시킨다고 하더라도 전압의 감소량은 크게 변화하지 않았으나, 하류 오리피스의 단면적을 일정하게 하는 경우, 상류 오리피스의 단면적을 작게 할수록 전압감소량은 커진다는 것을 알았다. 본 연구의 결과는 각종 플랜트에서 발생하는 고압의 배기가스유동에 대한 새로운 처리법으로 유용하리라 판단된다.

*안동대학교 기계공학부(Andong Univ. Dept. of Mechanical Eng.)

**안동대학교 대학원(Andong Univ. Graduate School)

***구주대학(Kyushu Univ.)

1. 서 론

최근 화학, 연소, 동력, 제철 등의 각종 플랜트에서 조업압력이 고압화되어 가고 있으며, 이에 수반하여 배관계를 통하는 고압가스 유동에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 배관계를 통하는 고압가스의 유동에 있어서 유량의 적절한 제어, 유동에 의하여 야기되는 배관계의 소음·진동, 그리고 배기가스의 적절한 처리법 등은 공학적으로 매우 중요한 문제로 알려져 왔다. 일반적으로 각종 플랜트에서 발생할 수 있는 고압 배기가스의 문제는 배기가스 Expander에 의하여 에너지를 회수하는 방법이 생각될 수 있으나, 실제 공업현장에서는 배기가스를 안전하고, 또 소음·진동을 발생시키지 않도록 적절하게 처리하는 것이 매우 중요한 기술적 과제로 남아 있다.

일반적으로 배기가스의 압력이 임계압력(critical pressure) 이상으로 되는 경우(실제 대부분의 플랜트에서 배기가스의 압력은 임계압력보다 매우 높다), 배관계 내부에서 충격파(shock-wave)가 발생하여 난류와동 혹은 난류경계층과 간섭하게 됨으로써 강력한 공기역학적 소음이나 진동을 발생시키게 된다¹⁾. 이와 같은 소음·진동에 대한 대책으로는 현재 가스 배출부에 감압밸브를 직렬로 설치하거나²⁾, 유로에 다공판(porous plates)들을 삽입하여 감압과정을 공간적으로 분산³⁾ 시킴으로써, 충격파가 발생하지 않도록 하는 방법을 주로 채택하고 있다. 그러나 이러한 방법을 적용하는 경우 배기가스 유동에 대한 유량의 제어기능이 저하되는 문제가 발생한다.

기체역학적 이론(gasdynamic theory)에 의하면⁴⁾, 배관계를 통하는 고압가스 유동장의 상류와 하류에 두 오리피스(orifice)를 설치하여, 유동이 두 오리피스에서 이중초크(double choking)⁵⁾하도록 하는 경우, 배기가스의 압력이 임계압력을 초과하더라도 충격파는 두 오리피스 사이에 한정되게 된다. 따라서 배관계에서 발생하는 소음·진동의 억제효과를 극대화할 수 있을 뿐만 아니라 각 초크조건에 따라서 유량을 정확하게 제어할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 개념을 이용하여, 충격파를 관내에 감금시킴으로써 고압 배기가스 유동에 대한 새로운 제어법 및 처리법을 개발하는 것을 목적으로, 실험 및 이론계산을 수행하였다. 실험에서는 충격파

풍동(shock tunnel)을 개조하여, 측정부에 두 오리피스를 설치하였으며, 두 오리피스의 단면적과 충격파 풍동의 압력비를 변화시켰다. 또 이론해석에서는 점성 압축성 내부유동을 모델화하여 수치계산을 적용하였으며, 충격파가 두 오리피스 사이의 공간에 감금되는 조건을 구하였다. 본 연구의 결과는 각종 플랜트에서 발생하는 고압 배기가스 유동에 대한 새로운 처리법으로 유용하리라 판단된다.

2. 이론해석법

2.1 유동모델

유로의 상류와 하류에 오리피스를 가지는 일정 단면적의 관로내에 충격파가 발생하는 경우의 유동장을 Fig. 1에 모식적으로 나타내었다. 또 그림에는 관내에서 발생하는 상태량의 분포를 설명하기 위하여, 마하수 및 압력분포를 함께 나타내었다. 그림에서 고압가스의 유동은 단면적이 A_1 인 상류오리피스에서 초크하게 되며, 그 하류에서 팽창하여 단면적이 A_d 인 관로내로 유동하여 초음속으로 된다. 관로 전후의 압력비에 의하여 관로의 도중에서 충격파가 발생하게 되며, 유동은 이 충격파를 통하여 아음속으로 감속하게 된다. 이와 같은 아음속 유동은 단면적이 A_e 인 하류 오리피스에서 다시 초크하여 대기로 방출하게 된다.

이 경우 관로에서 발생하는 유동방향의 마하수 분포는 그림에 나타내는 바와 같이, 상류 오리피스에서 초크한 유동이 급확대부에서 팽창하게 되므로, 마하수는 급격하게 증가하게 되며, 단면적이 일정한 관로내에서 유동의 마찰효과에 의하여 유동방향으로 서서히 감소하게 된다.⁶⁾ 이러한 초음속 유동은 충격파에 의하여 유동의 마하수가 급격하게 감소하여 아음속 상태로 되며, 충격파 하류에서 마찰효과에 의하여 다시 점차 증가하여 하류 오리피스에서 마하수는 다시 1.0으로 된다.

본 연구에서는 위와 같은 유동장을 이론적으로 해석하기 위하여 다음과 같은 가정들을 압축성 유체역학의 보존방정식들에 적용하였다. 1) 관로내의 유동은 정상이고 1차원적이며, 상류오리피스와 하류오리피스에서 유동은 이중초크한다. 2) 관로의 급확대와 급축소로 인한 유동의 손실들은 관벽에서 발생하는

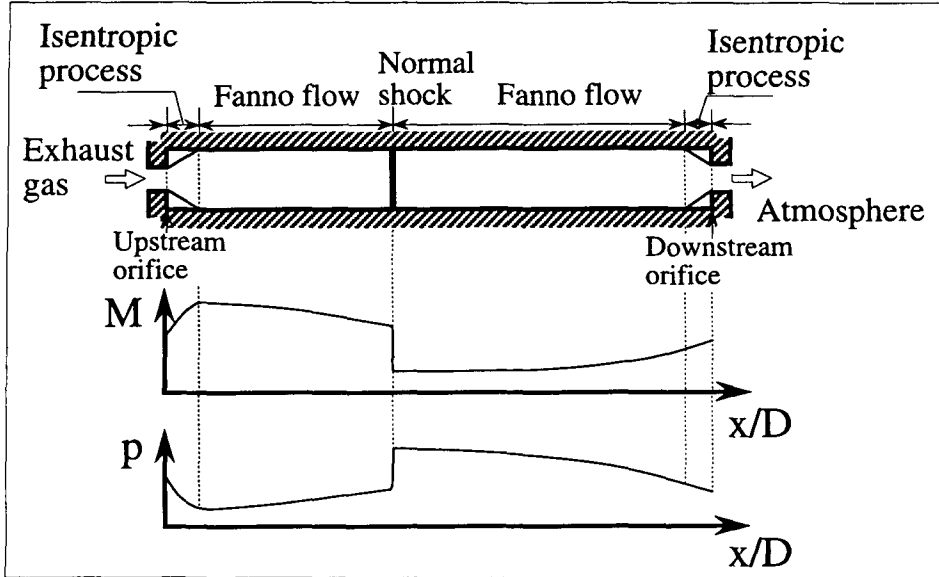


Fig. 1. Schematics of high pressure exhaust gas flow field

마찰효과에 비하여 작으므로 무시하며, 두 오리피스에서 발생하는 유동의 축류효과는 무시한다. 3) 상류 오리피스 바로 하류의 급확대 유로부분에서 발생하는 유동의 팽창과 하류 오리피스 바로 상류의 급축소 유로부분에서 발생하는 유동의 압축과정은 등엔트로피적으로 행하여지며, 이들 부분의 유동방향으로 길이는 관로 전체의 길이에 비하여 매우 작으므로 무시한다. 4) 관로내에서 발생하는 충격파는 정상 수직충격파(steady normal shock)이며, 이 충격파를 제외하고는 유동은 압축성 Fanno유동으로 근사화 된다고 가정한다.

위의 가정들로부터 상류와 하류의 오리피스 단면적이 주어지는 경우, 수직충격파의 위치를 계산하여 관내에서 발생하는 유동장의 상태량을 다음과 같은 방법으로 구한다. 상류오리피스와 관로의 단면적의 비 A_i/A_d 로부터 관로입구에서 발생하는 유동의 마하수 M_d 는 등엔트로피 관계식으로부터 다음과 같이 쓰여진다.

$$\frac{A_i}{A_d} = M_d \left\{ \frac{x+1}{(x-1)M_d^2+2} \right\}^{\frac{x+1}{2(x-1)}} \quad (1)$$

위의 식에서 k 는 기체의 비열비이며, 본 연구에서는 편의상 $k=1.40$ 으로 가정하였다. 관로내에서 발생

하는 수직충격파의 위치 x/D (여기에서 x 는 관의 입구로부터 충격파의 위치까지의 거리이며, D 는 관로의 등가직경이다)를 가정한다. 이 경우 충격파 바로 상류의 마하수 M_{ni} 를 다음과 같이 Fanno유동의 관계식으로부터 계산할 수 있다.

$$4f \frac{x}{D} = F(M_i) - F(M_{ni})$$

$$F(M) = \frac{1-M^2}{xM^2} + \frac{x+1}{2x} \cdot \ln \left\{ \frac{(x+1)M^2}{(x-1)M^2+2} \right\} \quad (2)$$

여기에서 f 는 관의 마찰계수(wall friction coefficient)이다. 한편 충격파 바로 하류의 유동의 마하수를 M_{ne} 라고 하는 경우, 수직충격파의 관계식으로부터 다음의 식이 주어진다.

$$M_{ne}^2 = \frac{(x-1)M_{ni}^2+2}{2xM_{ni}^2-(x-1)} \quad (3)$$

또 관의 출구에서 유동의 마하수 M_e 를 Fanno유동의 관계식으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$4f \frac{(L-x)}{D} = F(M_{ne}) - F(M_e) \quad (4)$$

여기에서 L 은 관로의 길이이다. 하류 오리피스 출구에서 유동의 마하수 M^* 는 하류 오리피스와 관의 단면적비 A_e/A_d 와 동엔트로피 관계식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{A_e}{A_d} = \frac{M_d}{M^*} \left\{ \frac{(x-1)M^{*2}+2}{(x-1)M_d^2+2} \right\}^{\frac{x+1}{2(x-1)}} \quad (5)$$

위의 식들로부터 이론계산은 M^* 가 1.0으로 될 때까지 식(2)에서부터 식(5)까지를 반복계산하여, 하류 오리피스 출구에서 M^* 가 1.0으로 되는 유동의 상태를 구하였다.

2.2 이론해석결과

Fig. 2에는 두 오리피스 사이의 공간에 충격파가 위치하게 되는 경우에 대한 계산 결과를 나타내었다. 그림에서 관로의 길이를 $L = 210\text{mm}$ 로 하였으며, 관로의 단면적을 $10 \times 20\text{mm}$ 로 하여 등가직경 D 를 15.75mm 로 하였다. 그림의 횡축의 값은 상류 오리피스와 관의 단면적비 A_i/A_d 이며, 종축의 값은 A_e/A_d 를 나타내며, 그리고 변수로 관의 마찰계수 f 의 값을 변화시켰다. 그림에서 굵은 실선은 충격파가 관의 출구에 위치하는 경우에 대한 것이며, 가는 실선은 충격파가 관의 입구에 위치하는 경우이다. f 가 주어지는 경우, 그림의 굵은 실선과 가는 실선 사이의 영역은 충격파가 관의 내부에 감금되는 영역을

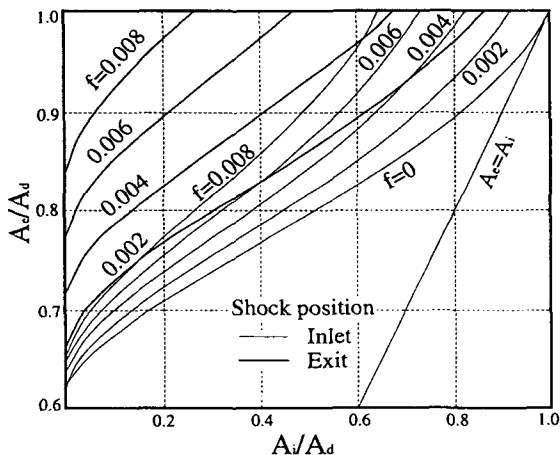


Fig. 2. Theoretical boundary of shock confinement

나타낸다. 따라서 그림에 나타낸 굵은 실선의 위쪽은 충격파가 관의 출구를 빠져나와 관내부 전체가 초음속 상태로 되는 영역이며, 그림에서 $A_e = A_i$ 을 나타내는 가는 실선과 $f = 0 \sim 0.008$ 을 나타내는 가는 실선 사이의 영역에 있어서 충격파는 상류 오리피스로부터 발생하는 제트유동 내부에 위치하게 되므로, 관내의 유동은 아음속으로 된다. 또 그림에서 $A_e = A_i$ 인 가는 실선 아래쪽은 하류 오리피스의 단면적이 상류 오리피스의 단면적 보다 작은 영역으로, 상류 오리피스에서 유동이 초크하지 않는 경우를 나타내며, 따라서 관내부 전체에서 유동은 아음속으로 충격파는 발생하지 않게 된다.

한편 그림에서 $f = 0$ 인 가는 실선의 조건이 만족되는 경우 충격파는 두 오리피스 사이의 공간에 위치하게 된다는 것을 의미한다. 그러나 마찰계수 f 의 값이 증가할수록 충격파가 감금될 수 있는 범위는 넓어지게 되며, 마찰계수가 증가하게 되면 이 범위는 A_i/A_d 의 값이 작은 쪽으로, 또 A_e/A_d 의 값이 큰 쪽으로 이동한다는 것을 알 수 있다. 또 A_i/A_d 의 값이 일정한 경우, $A_e/A_d = 1.0$ 즉 하류 오리피스가 없는 경우에도 충격파는 관내에 감금되며, 마찰계수의 값이 클수록 그 범위는 넓어지고, A_i/A_d 의 값이 작은 쪽으로 이동하게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에는 Fig. 2에서 기술한 바와 같이 관내에 충격파가 감금되는 경우에 대하여, 관출구와 입구의 전압비 p_{0e}/p_{0i} 와 A_e/A_d 의 관계를 나타내었다. 그림의

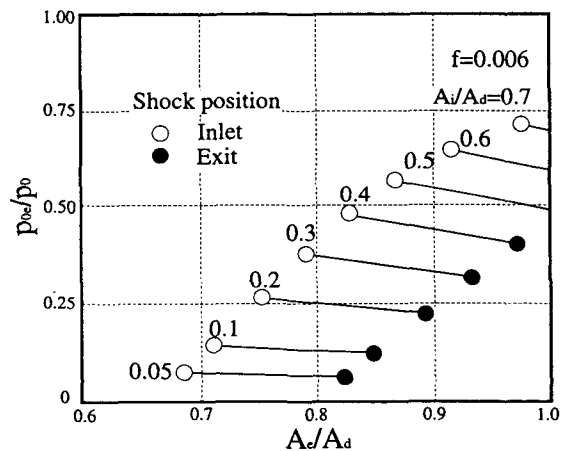


Fig. 3. Variation of total pressure with A_e/A_d

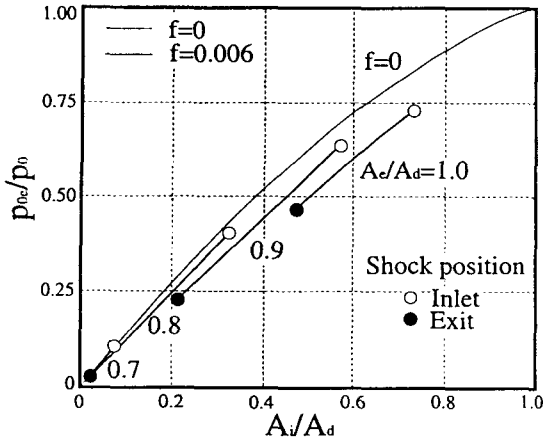


Fig. 4. Variation of total pressure with A_i/A_a

계산값들은 Fig. 2와 동일한 조건에 대한 것이며, 마찰계수의 값은 $f = 0.006$ 으로 고정하였다. 그림에서 실선은 각각 A_i/A_a 가 일정한 경우에 대한 계산값이며, ○와 ●는 충격파가 각각 관의 입구와 출구에 위치하는 경우를 나타낸다. 그림으로부터 A_i/A_a 가 일정한 경우 즉 상류오리피스의 단면적이 일정한 경우 관내에서 발생하는 충격파의 위치가 상류로부터 하류로 이동함에 따라 전압은 감소하게 되지만, 그 전압차는 A_i/A_a 가 작을수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 그러나 p_{0e}/p_0 의 값은 A_e/A_a 에는 크게 의존하지 않는 것으로 나타난다.

Fig. 4에는 p_{0e}/p_0 와 A_i/A_a 의 관계를 나타내었다. 그림에서 굵은 실선은 A_e/A_a 가 일정한 경우에 대한 계산값이며, ○와 ●는 Fig. 3과 같다. 그림의 가는 실선은 $f=0$ 의 경우를 나타내므로, 따라서 전압의 감소는 충격파만에 의한 것이다. 그림으로부터 A_e/A_a 가 일정 즉 하류 오리피스의 단면적이 일정한 경우, 충격파가 상류로부터 하류로 이동함에 따라 전압은 크게 감소한다. 또 전압 감소는 상류 오리피스의 단면적 A_i/A_a 에 거의 비례하며, A_i/A_a 가 작을수록 관의 출구에서 전압은 작아지게 된다.

이상의 계산결과로부터 관내 유동에서 발생하는 전압감소는 충격파 상류의 초음속 유동에서 발생하는 마찰손실, 충격파에 의한 압력손실 그리고 충격파 하류의 아음속 유동에서 발생하는 마찰손실(이외에도 난류혼합손실 등이 있지만 크지 않다)로 나누어 생각할 수 있다. 초음속 유동에서 발생하는 마찰손실은

충격파가 관의 입구에 위치하는 경우에는 0으로 되며, 충격파가 출구에 위치하는 경우에 최대가 된다. 또 충격파 자체의 비가역성에 의한 압력손실은 충격파가 관의 입구에 위치하는 경우에 가장 클 것으로 예상된다. 그러나 충격파가 벽면경계층과 간섭⁷⁾하는 경우에 발생할 수 있는 압력손실은 충격파의 강도뿐만 아니라 경계층의 특성에도 관련되므로 용이하게 평가하기가 곤란하다.

3. 실험장치와 방법

Fig. 5에는 본 연구의 실험에 이용된 충격파풍동을 개략적으로 나타내었다. 충격파 풍동의 고압실은 길이 1.5m, 내경이 85mm이며, 저압실의 길이는 약 7.0m인 사각단면(60×60mm)으로 되어 있다. Fig. 6에 상세하게 나타낸 바와 같이 저압실의 하류 끝에는 측정부가 설치되어 있으며, 이 측정부는 길이 210mm, 지면에 수직인 방향의 폭이 20mm이며, 높이는 임의로 조절할 수 있도록 되어 있다. 측정부의 양측벽에는 유동장의 광학관찰을 위하여 광학유리로 된 관측창이 설치되어 있으며, 관의 입구와 출구에 두께 5mm, 폭이 20mm인 오리피스를 설치하였다. 이들 오리피스의 높이를 조절함으로써 오리피스의 개구단면적을 조절하였다.

한편 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 관의 하벽에는 직경 1.0mm인 5개의 정압공을 설치하여 고감도 압력센터를 이용하여 유동장의 압력을 측정하였다. 유동장의 광학관찰은 쉘리렌 장치를 이용하였으며, 광원으로는 발광시간이 약 $2\mu s$ 정도인 Xe순간 광원이 이용되었다. 한편 시험기체로는 공기를 사용하였으며, 측정부 전후의 압력비 p_0/p_b 는 3.0에서 70까지의 범위에 대하여 실험을 수행하였다.

실험에서는 충격파 풍동의 고압실에 가압건조된 공기를 충전시켜, 고압실과 저압실 사이의 격막을 파괴함으로써 저압실쪽의 유동을 얻을 수 있다. 저압실 하류에는 덤프탱크를 설치하여, 필요에 따라서는 진공펌프를 이용하여 덤프탱크내의 압력을 조절하였다. 압력센서로부터 전기적인 신호는 직류증폭기를 거쳐 PC에 장착된 데이터 획득장치에 기록된다. 압력센서로부터 측정된 압력값은 압력센서의 검정과

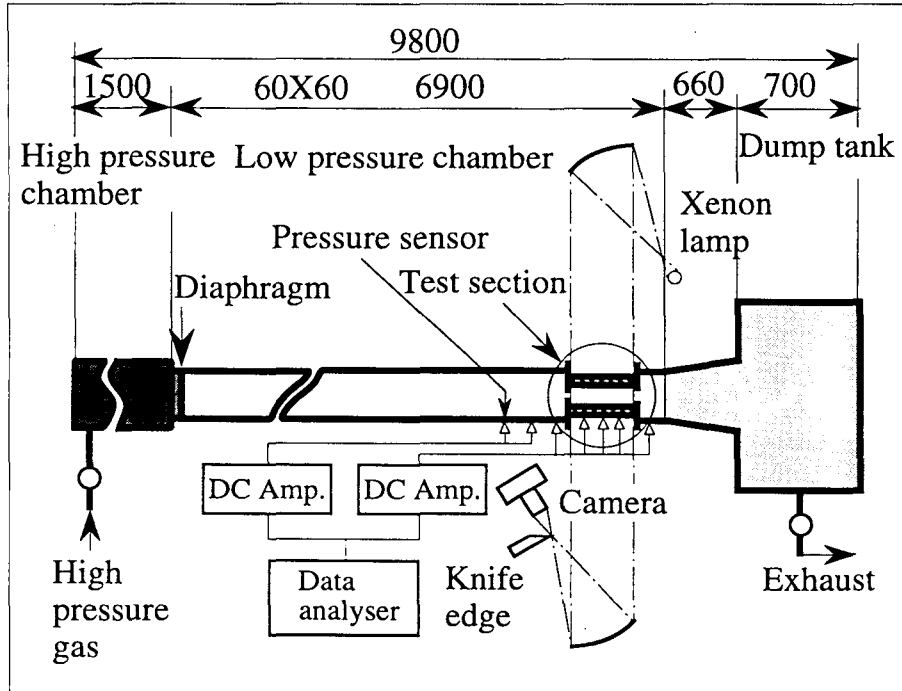


Fig. 5 Sketch of test facility

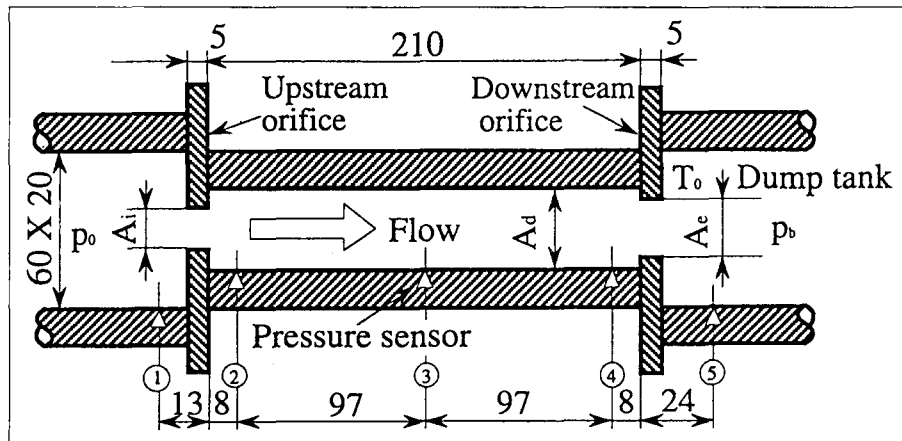


Fig. 6. Details of test section (Unit : mm)

반복측정을 이용하여 확인하였으며, 약 $\pm 2.0\%$ 의 오차를 가지는 것으로 확인되었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유동장의 가시화

Fig. 7에는 $A_i/A_d = 0.2$, $p_0/p_b = 60$ 으로 일정하게

유지하고, A_e/A_d ($A_d = 10 \times 20\text{mm}$) 값을 변화시킨 경우에 대한 일련의 쉐리텐 사진을 나타내었다. 그림 (a)는 $A_e/A_d = 1.0$ 의 경우로, 상류 오리피스출구에서 발생하는 부족팽창 제트유동⁸⁾이 관벽에 충돌하여 경사충격파(oblique shock wave)가 발생한다. 이 경사충격파는 하류방향으로 전파하여 관벽에서 반사를 반복하게 된다. 관입구에서 초음속 유동은 반복적인 경사충격파들을 통하여 감속하게 되지만, 관출구에서

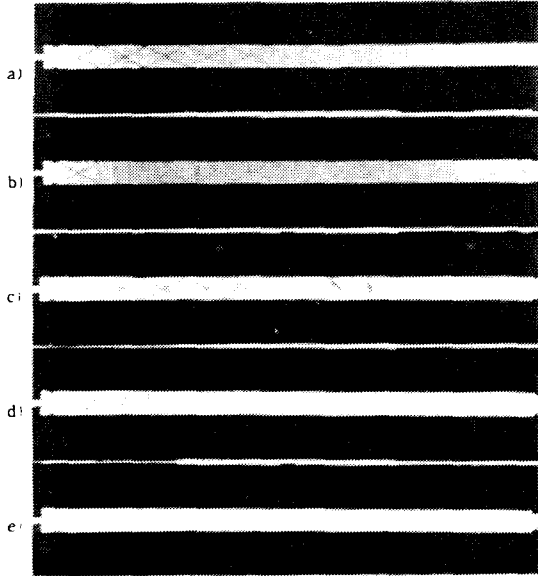


Fig. 7. Typical schlieren pictures showing shock confinement

유동은 초크하지 않는 것으로 관찰된다. 따라서 관내의 전체 유동장은 초음속 상태라는 것을 알 수 있다. 그림 (b)는 $A_e/A_d = 0.9$ 의 경우로, 관출구 부근에서 발생하는 수직충격파를 관찰할 수 있다. 하류 오리피스 단면적을 더욱 작게 한 그림 (c) ($A_e/A_d = 0.85$)와 (d) ($A_e/A_d = 0.80$)에서는 관출구 부근에서 발생하는 수직 충격파가 상류로 이동하여 관벽에서 발생하는 난류경계층과 간섭함으로써 의사충격파⁹⁾로 불리는 다수의 수직충격파를 형성하게 된다. 그림에서 의사충격파의 길이⁹⁾는 관 등가직경의 약 10배정도에 달한다는 것을 관찰할 수 있다. 하류 오리피스의 단면적을 $A_e/A_d = 0.70$ 으로 더욱 작게 한 그림 (e)에서 의사충격파의 선두 충격파는 상류 오리피스로부터 발생하는 초음속 제트유동과 간섭하는 형태로 되며, 관내의 유동은 거의 아음속 상태로 된다는 것을 알 수 있다. 위의 그림 (a)를 제외한 모든 유동은 하류 오리피스에 초크하여 하류 오리피스의 edge에서 경사충격파가 발생한다.

4.2 충격파의 감금조건

일반적으로 의사충격파를 구성하는 충격파들에서 선두충격파의 강도가 가장 강한 것으로 알려져 있다⁹⁾. 따라서 본 연구에서는 관내에서 발생하는 충격파가

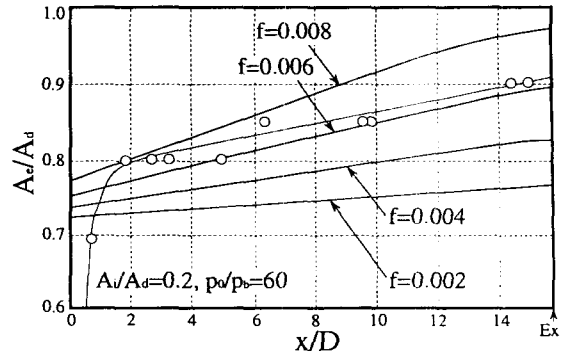


Fig. 8. Shock position in duct

의사충격파인 경우에 충격파의 위치를 선두충격파의 위치로 가정하였다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이 유동장의 광학관찰 결과로부터 얻어진 선두충격파의 위치 x/D 와 하류 오리피스의 단면적 A_e/A_d 와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 여기에서 x/D 의 값은 관 입구로부터 선두충격파의 위치까지의 거리를 관의 등가직경으로 나눈 값을 나타낸다. 실험조건은 $A_e/A_d = 0.2$, $p_0/p_b = 60$ 이며, \circ 값은 실험값이며, 이들을 곡선근사화하여 가는 실선으로 나타내었으며, 실선들은 이론계산값을 나타낸다. 그림에서 $x/D > 2.0$ 인 경우 실험값은 $f = 0.006$ 인 이론계산값과 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 그러나 $x/D < 2.0$ 인 경우 실험값과 이론계산값의 차이는 Fig. 7(e)에서 관찰되는 바와 같이 선두충격파가 상류 오리피스로부터 방출되는 초음속 제트유동과 간섭함으로써 충격파의 강도가 이론값 보다도 약한 것에 기인하며, 또 오리피스에서 발생하는 유동의 축류효과를 고려하지 않았기 때문이라 판단된다.

Fig. 9에는 Fig. 8과 같은 조건에 대하여 관내 유동에서 발생하는 전압감소 p_{0e}/p_0 와 충격파의 위치 x/D 와의 관계를 나타내었다. 그림에서 \circ 는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 측정점 ④에서 측정된 압력값을 이용하여 등엔트로피 관계식으로부터 산출한 하류 오리피스 출구에서의 전압 p_{0e} 와 관의 입구에서의 전압 p_0 의 비를 나타내며, 그림의 굵은 실선들은 Fanno유동의 관계식으로부터 이론적으로 계산한 값을 나타낸다. 그림으로부터 $x/D > 2.0$ 의 경우에 실험값의 값의 경향은 계산값과 일치하지만, 그 값들은 계산값 보다 작다. 이것은 실험에서 나타나는 의사충격파를 이론계산에서는 하나의 수직충격파로 가정하

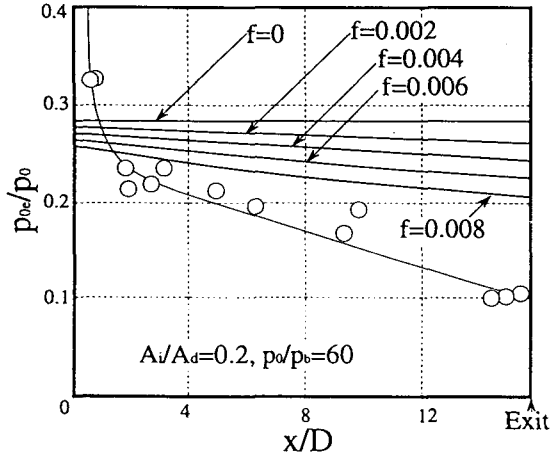


Fig. 9. Total pressure p_{0e}/p_0 vs shock position

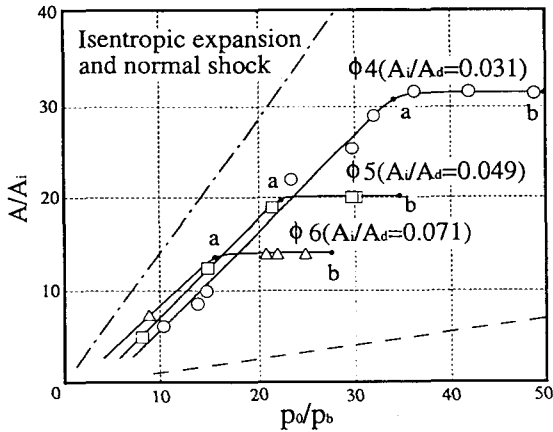


Fig. 10. Variation of shock position with pressure ratio

였으므로, 전압의 감소를 과소평가한 때문으로 생각된다. 한편 $x/D < 2.0$ 의 범위에서 실험값이 이론값보다 큰 것은 전술한 바와 같이 충격파가 상류 오리피스로부터 형성되는 초음속 제트 유동과 간섭하기 때문이다.

이상의 결과로부터 관내에 충격파를 감금하기 위해서는 관의 출구에 오리피스를 설치하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다. 또 고압의 배기가스를 효과적으로 처리하기 위해서는 가능한 전압손실을 크게 하는 것이 필요하며, 본 연구의 이론계산 결과에 의하면, 상류 오리피스의 단면적 A_i/A_a 를 작게 하는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에는 A_i/A_a 의 값을 작게 하는 경우에 관로의 상류와 하류의 압력비 p_0/p_b 와 충격파의 발생위치에서 유동장의 유효단면적 A 와 상류 오리피스의 단면적 A_i 의 비의 관계를 나타내었다. 이 실험에서 관의 단면적은 $20 \times 20\text{mm}$ (등가직경 $D = 20\text{mm}$)이었으며, 관의 길이 $L=210\text{mm}$, 그리고 충격파의 발생 위치는 $x/D = 10.5$ 이었다. 또 하류 오리피스의 단면적 $A_e/A_d = 1.0$ 으로 일정하였으며, 각 실험값에 대한 A_i/A_a 의 값을 그림중에 기술하였다. 그림에 나타난 굵은 실선상의 a점은 상류 오리피스로부터 초음속 제트유동장내에 존재하던 충격파가 관의 상하벽까지 도달하는 상태를 나타낸다. 또 굵은 실선상의 b점은 충격파가 관밖으로 빠져 나오기 직전의 상태를 나타낸다. 본 연구에서는 유동장의 가시화를 위하여 관의 길이를 비교적 짧게 하였으므로, 압력비 p_0/p_b 가 증가하는 경우에 관내에 위치하던 충격파가 관외로 빠져 나오게 된다. 그림에서 파선은 초음속 자유팽창 제트유동에서 발생하는 마하디스크(Mach disk)의 형상에 관한 경험식¹⁰⁾으로부터 구한 이론값을 나타내며, 일점쇄선은 초음속 등엔트로피 제트유동 바로 하류에 수직충격파가 위치한다고 가정된 경우의 이론계산값을 나타낸다. 그림으로부터 실험값은 파선과 일점쇄선 사이에 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 오리피스에서 발생하는 축류효과나 급확대유로의 벽근처에서 발생하게 되는 재순환유동¹¹⁾의 영향 때문이며, 그림에서 A_i/A_a 가 작을수록 보다 넓은 압력범위에서 충격파가 관내에 감금된다는 것을

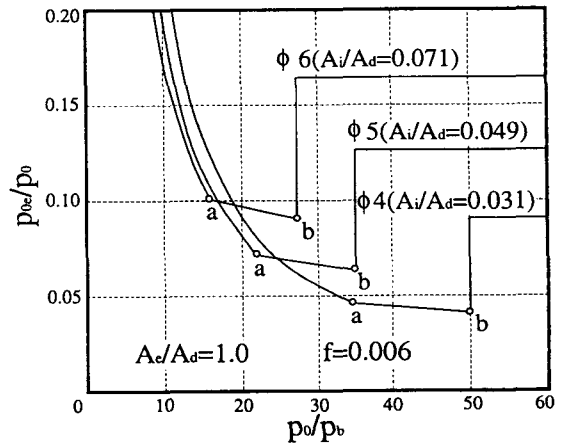


Fig. 11. Exit total pressure vs pressure ratio

알 수 있다.

위의 충격파의 위치에 관한 실험값과 Fanno유동의 가정에 의하여 이론적으로 계산한 값을 이용하여, Fig. 11에는 관 출구에서의 전압 p_{0e} 와 p_0 의 비를 관로 상하류의 압력비 p_0/p_b 에 대하여 나타내었다. 그림에서 실험조건 및 a점과 b점은 Fig. 10과 동일하며, 마찰계수 f 의 값은 0.006으로 가정하였다. 그림으로부터 압력비 p_0/p_b 가 증가함에 따라 관출구에서 전압은 급격하게 감소한 후, 충격파가 관출구를 향해 이동함에 따라 전압값은 점차 감소한다. 점 b에서 충격파가 관의 외부로 빠져 나가게 되면, 전압은 급격하게 증가하여 일정하게 된다. 이 경우 관출구로부터 방출되는 유동은 초음속 자유제트 상태¹²⁾로 된다.

위의 결과로부터 충격파를 관내에 감금시키는 것은 유동의 전압감소를 크게 하는 것으로, 압력비 p_0/p_b 가 변동한다고 하더라도 충격파가 관밖으로 빠져 나가지 않도록 하기 위해서는 충격파가 가능한 관의 상류쪽에 위치하도록 하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다. 따라서 실제 고압력의 배기가스에 대하여 감압처리를 적용하려는 경우, 요구되는 감압의 정도에 대하여 상류 오리피스 단면적을 결정 한 후에 충격파가 관내에 감금될 수 있도록 하류 오리피스의 단면적을 결정하면 된다. 이 경우 유량은 상류 오리피스의 단면적과 초크조건에 의하여 결정 될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 상류와 하류에 오리피스를 가지는 일정 단면적의 관로에 충격파를 감금시킴으로써, 고압력 배기가스 유동을 감압처리하는 새로운 방법을 시도하였다. 그 결과 충격파를 관내에 감금하기 위해서는 관의 마찰계수를 크게 하는 것이 바람직하다는 것을 알았다. 또 상류 오리피스의 단면적을 일정하게 하는 경우, 하류의 오리피스 단면적을 변화시킨다고 하더라도 전압의 감소량은 크게 변화하지 않았다. 그러나 하류 오리피스의 단면적을 일정하게 하는 경우, 상류 오리피스의 단면적을 작게 할수록 전압감소량은 매우 커진다는 것을 알았다. 실용적인 측면에서

관 입구의 전압이 변화한다고 하더라도, 충격파가 관 외로 빠져 나가지 않도록 하기 위해서는 가능한 한 충격파를 상류 오리피스 가까이에 위치하도록 하는 것이 바람직하다. 본 연구의 결과는 각종 플랜트에서 발생하는 고압 배기가스유동에 대한 새로운 처리법으로 유용하리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Kim, H. D. and Matsuo, K., 1994, "Normal Shock Oscillations in Supersonic Diffusers," International Jour. Shock Waves, Vol. 3, pp.25~33.
2. Reethof, G. and Ward, W. C., 1986, "A Theoretically Based Valve Noise Prediction Method for Compressible Fluids," ASME, Jour. of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, Vol. 108, No. 3, pp.329~338.
3. Beranek, L. L., 1971, "Noise and Vibration Control," McGraw-Hill.
4. Shapiro, A. H., 1953, "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow," The Ronald Press Company, Vol. 1.
5. 김희동, 김태호, 우선훈, 1997, "이중 오리피스를 지나는 압축성 유동에 관한 해석적 연구," 한국추진공학회 논문집, 제1권 제2호, pp.41~47.
6. 김희동, 김태호, 1996, "초음속 노즐 유동에 관한 일차원 해석법," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, B권, pp.80~85.
7. Kim, H. D. and Matsuo, K., 1996, "Investigation on Onset of Shock-Induced Separation," International Jour. Shock Waves, Vol. 2, pp.275~286, Springer-Verlag.
8. 김희동, 이종수, 1996, "가스 미립화용 초음속 노즐로부터 방출되는 분류에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집, 제20권, 제2호, pp.679~709.
9. Kim, H. D. and Matsuo, K., 1998, "Pseudo-

- Shock Wave Phenomena in Internal Gas Flows," Progress in Aerospace Sciences, Pergamon Press(in press).
10. 김희동, 이호준, 김윤곤, 1997, "초음속 부족팽창 제트유동에 관한 해석적 연구," 한국추진공학회 논문집, 제1권 제1호, pp.46~54.
 11. 김희동, 김태호, 서태원, 1997, "급축소/급확대관을 지나는 압축성 유동의 해석적 연구," 한국추진공학회 논문집, 제1권 제1호, pp.55~63.
 12. 김희동, 1996, "초음속 노즐을 통하는 부족팽창 제트에 관한 수치계산적 연구," 대한기계학회 논문집, 제20권, 제6호, pp.1994~2004.