

약한 충격파의 반사와 방출에 관한 개구단 보정

이동훈* · 김희동** · 瀬戸口俊明***

Open End Correction for the Reflection and Discharge of Weak Shock Wave

D.H. Lee, H.D. Kim and T. Setoguchi

Key Words : Compressible Flow(압축성유동), Impulsive Noise(충격성 소음), Open End Correction(개구단 보정), Impulsive Wave(펄스파), Shock Wave(충격파)

Abstract

The present study addresses the open end correction associated with the reflection and discharge phenomena of a weak shock wave from an open end of a duct. The open end correction of the weak shock wave is investigated experimentally and by numerical computation. An experiment is made using a simple shock tube with an open end, and computation is performed to simulate the experimental flow field using the unsteady, axisymmetric, compressible, flow governing equations. The results obtained show that an open end correction should be involved for shock wave discharge and reflection problems generated from the exit of the duct with an open end baffle plate. With a baffle plate less than three times the duct diameter, it is found that the open end correction is a function of both the diameter of the baffle plate and normal shock wave magnitude. However, for a baffle plate larger than three times the duct diameter, it is independent of the baffle plate diameter. The present computations predict the results of shock tube experiment with good accuracy. A new empirical equation for prediction of the open end correction is found for the weak shock reflection and discharge phenomena occurring at the open end of the duct with and without a baffle plate

1. 서 론

관출구 부근에서 발생하는 약한 충격파의 파동 현상은 고속열차/터널시스템을 비롯한 각종 충격류, 동력엔진의 배기계, 펄스연소기 그리고 동력보일러 및 도시가스의 blow-off 라인 등과 관련하여 공학적으로 해명되어야 할 많은 문제들을 내포하고 있다.

관내부에서 발생한 충격파가 관개구단에 도달하여 외부로 방출될 때의 전파형태는 개구단 경계에서 팽창파의 형태로 반사되어 상류측의 관내부로 전파하는 경우와 관외부의 하류측으로 전파하는 펄스파로 구분된다.⁽¹⁾ 전자는 관내부에서 강력한 압력변동을 야기시켜 진동에 의한 배관계의 피

로파괴를 초래시키고, 후자는 강력한 세기의 충격성 소음을 야기시켜 환경소음의 주된 원인이 된다.⁽²⁾ 따라서 관내에서 발생한 충격파의 전파로 인한 압력변동과 충격성 소음에 대한 문제는 배관계 자체는 물론이거니와 배관계와 연결된 각종 시스템의 성능과 안전성 및 환경문제 차원에서 시급히 해결되어야 할 매우 중요한 공학적 과제로 부상하고 있다. 이 때문에 관외부로 방출되는 펄스파 및 관내의 압력변동을 최소화시키기 위한 실험적/수치해석적 연구가 활발히 진행되고 있다.^(3,4)

특히 수치해석적 연구에서 관내의 압력변동이나 관외부로 전파하는 펄스파에 관한 특성을 정확히 예측하고 평가하기 위해서는 관개구단에서의 파동경계에 관한 정보가 대단히 중요하다. 일반적으로 관의 개구단으로부터 방출된 충격파는 Fig. 1에 도시된 파동선도($x-t$ 선도)에서 보듯이 개구단으로부터 완전하게 반사하지는 않는다. 즉 관의 출구로 충격파가 방출하게 되면 충격파의 일부가

* 서울産業大學校 機械工學科

** 安東大學校 機械工學科

*** 佐賀大學校 機械工學科(日本)

반사충격파인 팽창파의 형태로 되어 상류측으로 반사되고, 충격파의 또 다른 일부는 펄스파의 형태로 되어 하류측으로 전파하게 된다. 이 때 관개구면으로부터 완전 반사인 것으로 가정할 수 있는 Fig. 1 에 제시된 개구단으로부터 팽창파의 가상중심점까지의 거리인 개구단 보정값 e 를 구하는 것이 관외부의 펄스파와 관내의 압력변동 특성을 정확히 예측하고 평가하는데 있어서 매우 핵심적인 요소가 된다.

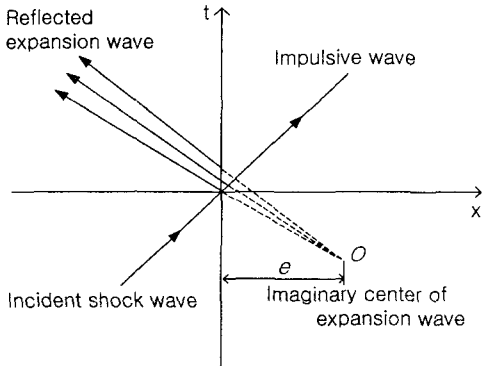


Fig. 1 Wave diagram and open end correction

한편 선형음향 이론에서도 개구단에서의 음향학적 파동경계를 구하는 문제는 관내를 전파하는 음장과 함께 개구단의 방사음장 및 방사음의 음향 임피던스를 예측하는데 있어서 매우 중요한 사항으로 다루어지고 있다. 선형음향에서의 개구단 보정값은 관지름에 의존하며, 특히 관출구에 부착된 플랜지의 부착유무 그리고 주파수에 따라 개구단 보정값은 각기 다르게 된다.⁽⁵⁾ 선형음향에서의 개구단 보정값을 구하는 문제는 일찍이 Rayleigh⁽⁶⁾ 및 Levine 과 Schwinge 등⁽⁷⁾ 의 연구를 통해 해석적 결과가 얻어졌으며, 이후 다수의 실험적 연구를 통해 이들 연구결과가 검증된 바 있다.^(8,9)

그러나 본 연구에서와 같이 유한진폭을 갖는 약한 충격파가 관외부로 방출될 때의 개구단 보정값에 관해서는 Rudinger⁽¹⁰⁾ 의 연구결과만이 보고되고 있는 정도이다. Rudinger 는 개구단 보정값을 구할 수 있는 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$\frac{e}{D} = \left\{ 0.90 + \frac{0.677}{(p_1/p_0) - 1} \right\} (\gamma + 1.08) - 3.8 \quad (1)$$

식 (1)에서 p_0 대기압, p_1 은 충격파의 과잉압력, D 는 관지름 그리고 γ 는 비열비를 뜻한다. 특히 Rudinger 의 경험식은 배플판이 없는 직관에만 적용할 수 있는 결과이므로 배플판이 부착된 관에

그의 경험식을 적용할 수 있는지의 여부에 대해서는 지금까지 검증되지 않았다.⁽¹¹⁾ 그러나 실제의 배관계에서는 관출구에 플랜지 또는 배플판이 부착되어 지므로 배플판이나 플랜지의 부착유무 및 크기변화에 따른 개구단 보정값을 구하는 것은 학술적으로나 공학적 측면에서 매우 흥미롭고 유용한 연구라고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 배플판이 부착된 관의 개구단으로부터 방출하는 약한 충격파에 대한 개구단 보정값을 실험과 수치해석적 방법을 통하여 구하고자 한다. Rudinger 식에서 보듯이 개구단 보정값은 충격파강도에 좌우되므로 본 연구에서는 충격파의 압력비 범위 $p_1/p_0 = 1.1 \sim 1.5$ 그리고 배플판 지름을 D_b 라 할 때 배플판의 크기 $D_b/D = 1 \sim 5$ 인 범위에서 개구단 보정값을 구하였다. 실험은 관단이 개방된 대기개방형 충격파관을 이용하여 수행하였으며, 수치계산은 Harten Yee 의 TVD 법⁽¹²⁾ 을 이용하여 비정상 축대칭 압축성 유동방정식의 해를 구하였다. 특히 본 연구의 실험과 수치계산결과 그리고 Rudinger 의 경험식을 이용하여 배플판이 있는 관개구단과 배플판이 없는 관개구단의 두 조건 모두에 대해서 개구단 보정값을 구할 수 있는 새로운 경험식을 도출하였다.

2. 실험

실험장치는 Fig. 2 와 같이 관출구에 배플판의 부착이 가능하도록 제작된 대기 개방형 충격파관을 이용하였다. 충격파관은 안지름 66mm 인 원형관이며, 고압실 및 저압실의 길이는 각각 1620mm 와 2150mm 이다. 고압실과 저압실 사이에 위치한 격막재료로는 두께 0.03mm 인 셀로판 시트를 이용하였다. 고압실은 압축된 건조공기로 충전되어 있고 격막을 파막시키기 위한 격침이 장착되어 있다. 또한 대기에 개방되어 있는 저압실의 개구단에는 $D_b/D = 1 \sim 5$ 크기의 배플판을 부착하였다.

압력센서(PCB pressure transducer 112A21)는 파막시에 관내에서 발생한 충격파의 압력비 p_1/p_0 와 하류측으로 전파하는 충격파의 전파마하수 M_s 을 구하기 위하여 관개구단으로부터 상류측의 187mm 와 322mm 위치에 각각 설치하였다. 압력센서로부터 얻어진 모든 출력신호는 직류증폭기를 거쳐 증폭된 뒤, 파형기록장치에 저장됨과 동시에 X-Y 레코더에 기록된다.

4. 결과 및 고찰

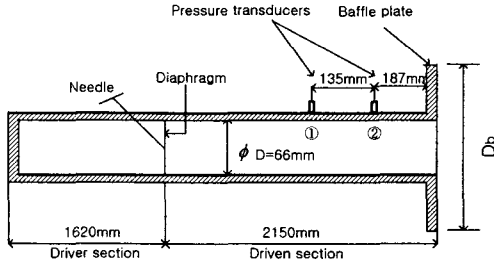


Fig. 2 Configuration of a shock tube with a baffle plate.

3. 수치계산

수치계산은 축대칭 비정상 압축성 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD 법⁽¹²⁾을 적용하여 유동장을 수치계산하였다.

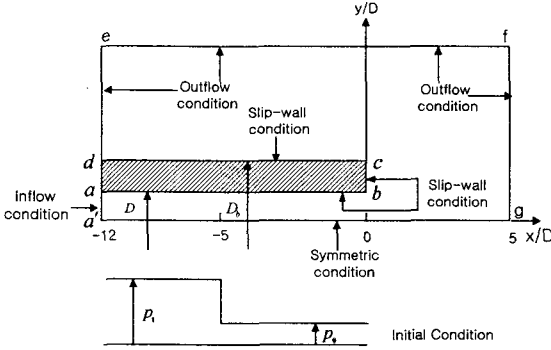


Fig. 3 Flow field and boundary conditions

Fig. 3은 수치계산에 이용한 유동장에 대한 계산영역과 경계조건을 도식적으로 나타낸 것이다. 유입유동의 초기조건($t=0$)은 충격파 방출로 상류측으로 되돌아 오는 팽창파를 감안하여 관개구면을 기준하여 $x/D=-5$ 의 위치에서 충격파강도 p_1/p_0 을 갖는 충격파가 관의 개구단으로 방출되는 것으로 가정하였다. 수치계산 영역은 관개구면을 기준하여 상류측 경계는 $x/D=-12$ 그리고 하류측은 $x/D=5$ 로 설정하였다. 또한 유동장의 대칭성을 고려하여 중심축을 기준으로 반평면만을 계산영역으로 취하였다. 수치계산시의 격자는 $\Delta x = \Delta y = 1.1mm$ 크기의 정방형 격자를 사용하였다. 이 때 모든 고체벽면은 slip-wall 조건을 적용하였다.

Fig. 4는 지점①과 지점②에서 측정된 충격파의 압력파형(실선)을 수치계산한 압력파형(파선)과 비교 도시한 것이다. 그림의 종축은 측정점에서의 압력을 그리고 횡축은 격막을 과막한 후부터의 경과시간을 나타낸다. 경과시간과 측정지점간의 거리를 이용하여 충격파의 전파마하수를 구하면 $M_s = 1.08$ 에 해당된다.

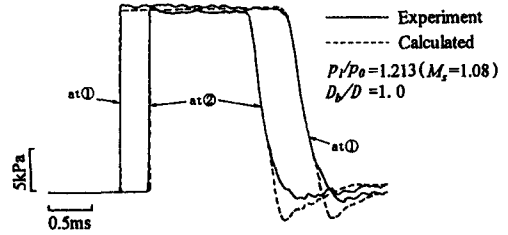


Fig. 4 Pressure history of shock waves

도시된 결과에서 압력파형에 대한 측정결과와 수치계산 결과가 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 특히 압력파형 결과에서 급격하게 압력상승이 이루어진 후에 다시 급격하게 압력이 감소하는 것은 관내를 통과하는 충격파와 관개구단에서 발생하여 반사된 팽창파가 각각 측정점 ①과 측정점 ②에 도달하였기 때문이다.

Fig. 5는 Fig. 4에 도시된 압력파형에 대한 측정결과를 $x-t$ 파동선도에 작도하여 개구단으로부터 팽창파의 가상중심점까지의 거리 e 를 구하는 과정을 소개한 것이다. 먼저 측정점 ①과 측정점 ②의 압력파형 결과에서 충격파의 파두점을 각각 S_1, S_2 그리고 팽창파의 파두점을 각각 $E_{1,0}, E_{2,0}$ 라 하고, 이들 지점으로부터 x 축과 평행한 선을 그어 파동선도의 x 축상의 측정점과 직교하는 수직선과 교차시키면 네개의 교점 S'_1, S'_2 그리고 $E'_{1,0}, E'_{2,0}$ 가 구해진다. 또한 측정점 ①의 파인압력 Δp_1 보다 작은 압력조건인 $\Delta p = 0.5\Delta p_1, \Delta p = 0$ 및 $\Delta p = -0.05\Delta p_1$ 압력값을 갖는 지점을 $E_{1,1}, E_{1,2}, E_{1,3}$ 라 하고, 측정점 ②의 파인압력 Δp_2 에 대해서도 동일한 방법으로 $E_{2,1}, E_{2,2}, E_{2,3}$ 지점을 정한 다음에 수평선을 그어 x 축상의 측정점과 직교하는 수직선과 교차시키면 파동선도상에서의 교점 $E'_{1,1}, E'_{1,2}, E'_{1,3}$

그리고 교점 $E'_{2,1}$, $E'_{2,2}$, $E'_{2,3}$ 를 얻을 수 있다.

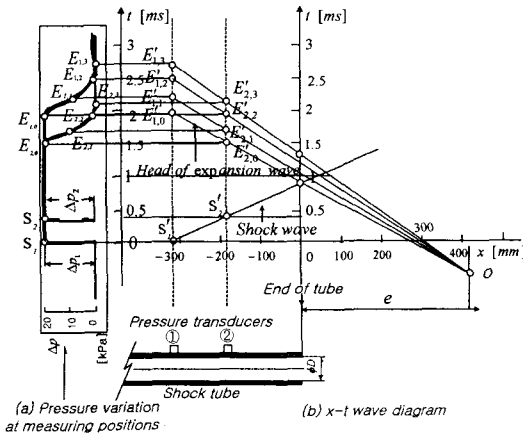


Fig. 5 Procedure for obtaining the open end correction using wave diagram.

다음에는 교점 S'_1 과 S'_2 그리고 교점 $E'_{1,0}$ 과 $E'_{2,0}$ 를 각각 연결하면 이들 두선은 시간축상의 동일지점을 통과하게 된다. 같은 방법으로 $E'_{1,1}$ 와 $E'_{2,1}$, $E'_{1,2}$ 와 $E'_{2,2}$, 그리고 $E'_{1,3}$ 와 $E'_{2,3}$ 를 연결하는 연장선을 그으면 모든 선들이 교점 o 에서 만나게 된다. 이 o 점을 팽창파의 가상중심점이라 부르며, 관개구단으로부터 o 점까지의 거리가 개구단 보정값 e 가 된다. 이와 같이 $x-t$ 파동선도를 이용하여 구한 개구단 보정값은 동일조건을 Rudinger의 경험식 (1)에 대입하여 계산한 결과와 잘 일치한다.

Fig. 6은 각기 다른 크기의 배플판을 관출구에 부착한 상태에서 충격파강도 변화에 따른 개구단 보정값 e/D 을 실험과 수치계산으로 구한 결과이다. 수치계산 결과를 표시하는 (e/D) 의 괄호밖의 하첨자는 배플판의 크기를 뜻한다. 즉 하첨자 1은 배플판의 무차원지름 $D_b/D=1$ 에 해당하며, 하첨자 3은 $D_b/D=3$ 을 나타낸다. 실험값은 측정된 압력 파형을 이용하여 Fig. 5와 같은 파동선도를 작도하여 구하였으며, 계산값은 TVD 수치계산법을 이용하여 구하였다. 결과에서 보듯이 실험값과 수치계산값은 비교적 잘 일치한다. 또한 개구단 보정값 e/D 는 충격파강도 p_1/p_0 에 좌우되며 배플판의 크기에 따라서도 그 감소폭이 달라지는 것을 알 수 있다. 즉 충격파강도가 1.45 이하에서는 배플판의 크기에 따른 개구단 보정값의 차이가 크지

만, 충격파강도를 더욱 증가시키게 되면 개구단 보정값이 거의 0으로 수렴된다. 보정값이 0으로 되면 파동경계에 대한 개구단 보정을 무시할 수 있거나 필요치 않음을 뜻한다. 한편 같은 충격파강도 조건에서는 배플판의 크기가 커질수록 개구단 보정값이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 배플판의 크기가 관지름의 3배 이상으로 되면 배플판의 크기와 관계없이 개구단 보정값은 거의 같아진다. 이것은 배플판이 관지름의 3배 이상이 되면 배플판을 무한평판으로 간주할 수 있음을 의미한다.

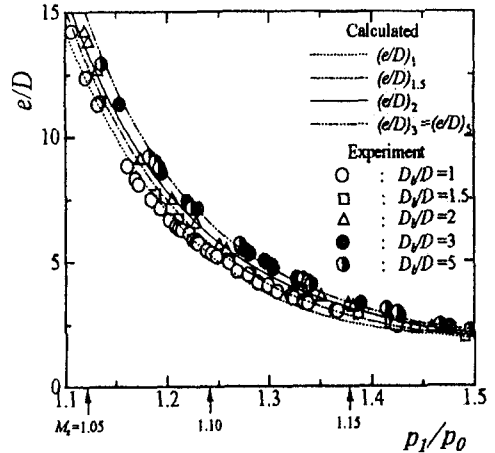


Fig. 6 Relationship between e/D and p_1/p_0 for baffle plates with different size.

한편 배플판의 크기가 각기 다른 $(e/D)_{1.5}$, $(e/D)_2$ 그리고 $(e/D)_3$ 에 대한 개구단 보정값은 배플판이 없는 경우, 즉 $(e/D)_1$ 을 기준하여 비교해 보면 각각 $1.046(e/D)_1$, $1.123(e/D)_1$ 그리고 $1.215(e/D)_1$ 의 결과와 일치한다. 따라서 관출구에 배플판을 부착할 경우에는 Rudinger의 경험식으로 정확한 개구단 보정값을 구할 수 없으므로 식 (1)은 수정되어야 한다.

Fig. 7은 개구단 보정값에 미치는 배플판의 크기효과를 알아보기 위하여 충격파강도 p_1/p_0 을 파라메타로 해서 수치계산한 결과이다. 결과에서 개구단 보정값은 배플판크기가 커짐에 따라 점차 증가하다가 $D_b/D=3$ 이상으로 커지게 되면 개구단 보정값은 거의 일정하게 된다. 이러한 결과추세는 충격파강도가 클수록 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 7의 결과를 토대로 하여 배플판의 크기와

개구단 보정값과의 상관관계를 구하기 위하여 배플판이 없을 때의 개구단 보정값 $(e/D)_{D_b/D=1}$ 와 임의의 크기를 갖는 배플판에 대한 보정값 $(e/D)_{D_b/D}$ 사이의 비를 $f(D_b/D)$ 로 하여 $(e/D)_{D_b/D}$ 에 대하여 정리하면 다음식과 같다.

$$\left(\frac{e}{D}\right)_{D_b/D} = f\left(\frac{D_b}{D}\right) \cdot \left(\frac{e}{D}\right)_{D_b/D=1} \quad (2)$$

식 (2)에서 $(e/D)_{D_b/D=1}$ 은 식 (1)에 제시된 Rudinger 의 경험식을 나타낸다. 따라서 식 (1)과 식 (2)의 관계를 이용하여 Fig. 7 에 제시된 $1 \leq D_b/D \leq 3$ 범위의 결과들을 $f(D_b/D)$ 에 대하여 정리하면 다음과 같은 다항근사식의 형태로 쓸 수 있다.

$$f(D_b/D) = -0.0517(D_b/D)^3 + 0.2947(D_b/D)^2 - 0.3992(D_b/D) + 1.1562 \quad (3)$$

이와 동일한 방법으로 $D_b/D > 3$ 범위의 결과에 대해서도 $f(D_b/D)$ 값을 구하면 상수값 1.215 가 된다.

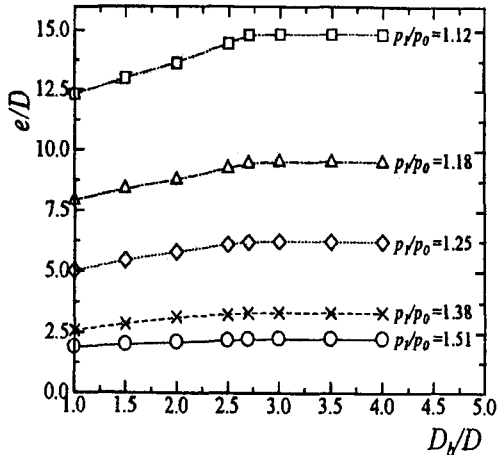


Fig. 7 Effect of baffle plate sizes on open end correction.

Fig. 8 은 앞서 도출한 경험식의 결과에 실험결과를 중첩시켜 나타낸 것으로서, 결과에서 보듯이 두 결과는 잘 일치하고 있음을 보여준다. 따라서 Fig. 8 의 결과로부터 $f(D_b/D)$ 값을 구하여 식 (2) 에 대입하면 개구단 보정값은 쉽게 결정된다.

Fig. 9 는 개구단에 무한평판으로 간주할 수 있는 배플판을 부착한 상태에서 서로 다른 무차원시간 t' 조건에서 수치계산으로 구한 중심축선상의

압력분포와 등압선도를 나타낸 결과이다.

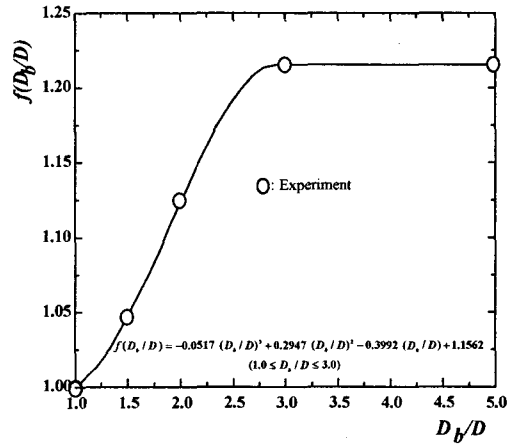
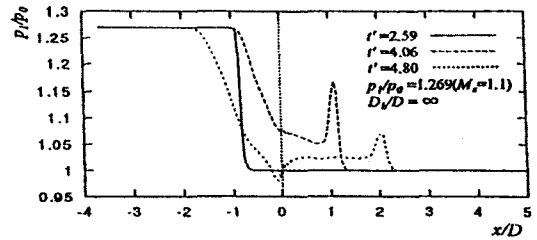
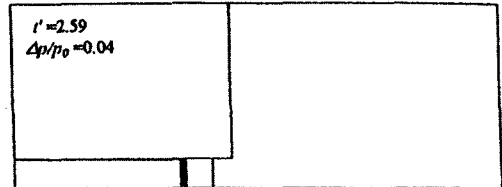


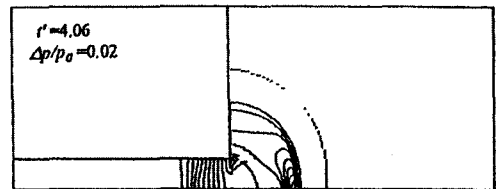
Fig. 8 Relationship between $f(D_b/D)$ and D_b/D .



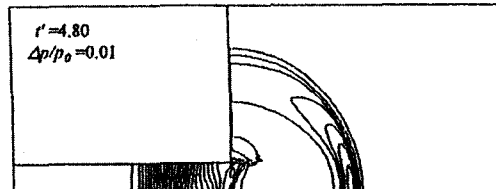
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9 Pressure distribution along the duct axis and iso-pressure contours.

도시된 결과에서 그림 (a)는 압력분포를 그리고 그림 (b)부터 그림 (d)까지는 등압선도를 나타낸 것이다. 또한 등압선도 결과에서 $\Delta p/p_0$ 는 선도상의 압력간격을 나타낸다. 여기서 무차원시간 t' 는 $t/[(D/a_0)\sqrt{t}]$ 로 정의된 것으로서 t 는 $x/D = -5$ 지점에 위치한 충격파의 출발시점을 기준으로 경과된 시간을 의미하며 a_0 는 음속을 뜻한다.

먼저 그림 (a)에 도시된 무차원시간 $t' = 2.59$ 에 해당하는 결과는 충격파가 관내부에 존재하고 있을 때를 나타낸 것으로서, 이에 대응한 등압선도의 결과는 그림 (b)에 도시되어 있다. 또 $t' = 4.06$ 일 때의 중심축선상의 압력분포는 충격파 방출로 인하여 충격파의 일부가 개구단으로부터 팽창파의 형태로 관상류측으로 되반사되고, 다른 일부는 펄스파의 형태로 하류측으로 전파하는 것을 볼 수 있다. 이와 대응한 2 차원 등압선도를 그림 (c)에 나타내었다. 그림 (c)에서 관개구단으로부터 대기를 향해 방출된 충격파는 반구면파 형태의 펄스파로 되어 주변으로 전파한다. 특히 그림 (c)의 등압선도상에서의 밀한 부분이 그림 (a)의 $t' = 4.06$ 결과에서 나타난 펄스파형에 해당한다. 그림 (d)의 무차원시간 $t' = 4.80$ 일 때의 등압선도결과에서는 시간경과로 인해 반사팽창파가 관내부측으로 더 멀리 전파함과 동시에 관외부의 펄스파도 관개구단으로부터 하류방향으로 더 멀리 전파하였음을 볼 수 있다. 특히 이와 대응되는 조건에서의 압력분포 결과에서 나타난 펄스파의 피크압력은 시간경과에 따른 전파거리의 증가로 인해 $t' = 4.06$ 일 때의 펄스파 피크압력에 비하여 더 한층 감소하였음을 알 수 있다.

5. 결 론

배플판이 부착된 관의 출구로부터 약한 충격파가 방출될 때의 개구단 보정값은 관출구에 부착된 배플판의 크기와 충격파강도에 좌우됨을 실험과 수치계산결과를 통하여 알 수 있었다. 즉 배플판의 지름이 충격파관 지름의 3 배보다 작은 경우의 보정값은 배플판의 크기 및 충격파강도의 함수인 반면에, 배플판이 충격파관 지름의 3 배보다 더 큰 경우의 보정값은 단지 충격파강도만의 함수임을 확인하였다. 이러한 함수관계를 이용하여 관출구에 배플판이 있을 때와 없을 때의 두 경우 모두에 대하여 개구단 보정값을 정확하면서도 쉽게 구할 수 있는 새로운 경험식을 도출하였다.

“이 논문은 2001 년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음”

참고문헌

- (1) Kim, H.D. and Setoguchi, T., 1999, "Study of the Discharge of Weak Shocks from an Open End of a Duct," *Journal of Sound and Vibration*, 226(5), pp.1011-1028.
- (2) Raghunathan, S., Kim, H.D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control, *Progress in Aerospace Science*, Vol.34, pp.1-44.
- (3) 김희동, Setoguchi, T., 1996, "다공벽을 전파하는 압축파의 실험적 연구," *대한기계학회 논문집(B)*, 제 20 권, 제 12 호, pp. 4036-4043.
- (4) 김희동, Setoguchi, T., 1997, "다공벽을 전파하는 압축파에 대한 수치해석적 연구," *대한기계학회 논문집(B)*, 제 21 권, 제 11 호, pp. 1403-1412.
- (5) Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. and Sanders, J.V., 1982, *Fundamentals of Acoustics*, Chap.9.
- (6) Rayleigh, J.W.S., 1945, *The Theory of Sound*, Vol.2, Chap.XVI, No.307.
- (7) Levine, H. and Schwinger, J., 1948, "On the Radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe," *Physical Review*, Vol.73, No.4, pp.383-406
- (8) Wiryadi, A.I. and Hagi, S., 1988, "Experimental Study of Sound Radiation at the Open End of Pipe with Flange and Outer Pipe," *Transactions of JSME, Series B*, Vol.54, No.503, pp.1637-1641 (in Japanese).
- (9) Davies, P.O.A.L., Bento Coelho, J.L. and Bhattacharya, M., 1980, "Reflection Coefficients for an Unflanged Pipe with Flow," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.72, No.4, pp.543-546.
- (10) Rudinger, G., 1957, "The Reflection of Pressure Wave of Finite Amplitude from an Open End of a Duct," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.3, pp.48-66.
- (11) Kim, H.D. et al., 1998, "Studies on Reflection of Weak Shock Waves from an Open End of a Tube with Baffle Plate," *Proceedings of 11th International Symposium on Transport Phenomena, ISTP-11, Hsinchu, Taiwan, November 29-December 3*, pp.94-99.
- (12) Yee, H.C., 1987, *Upwind and Symmetric Shock Capturing Schemes*, NASA TM-9464.