

곡관 내부를 전파하는 약한 비정상 충격파에 관한 연구

김현섭* · 김희동**

Study of The Unsteady Weak Shock Propagating through a Pipe Bend

H.S.Kim and H.D.Kim

Key Words : Shock wave(충격파), Mach reflection(마하반사), Regular reflection(정상반사), Unsteady Flow(비정상 유동), Internal Flow(내부유동)

Abstract

This paper depicts the weak shock wave propagating inside some kinds of pipe bends. Computational work is to solve the two-dimensional, compressible, unsteady Euler Equations. The second-order TVD scheme is employed to discretize the governing equations. For the computations, the incident normal shock wave is assumed at the entrance of the pipe bend, and its Mach number is changed between 1.1 and 1.7. The turning angle and radius of the curvature of the pipe bend are changed to investigate the effects on the shock wave structure. The present computational results clearly show the shock wave reflection and diffraction occurring in the pipe bend. In particular, the vortex generation, which occurs at the edge of the bend, and its shedding mechanism are discussed in details.

1. 서론

일반적으로 충격파가 관로 내를 전파할 때 나타나는 충격파의 반사(reflection)나 회절(diffraction)현상은 충격파 동역학이라는 순수한 학문적인 관점에서 뿐만 아니라 기체의 연소나 폭발을 수반하는 테트네이션파나 블라스트파의 전파 형태, 충격파와 관 벽이나 구조물과의 간섭 등의 연구의 기초가 되며, 각종 플랜트의 배관계, 도시 가스 수송라인 및 내연기관의 배기시스템 등 산업 분야 전반에 걸친 응용면에서 매우 중요하다. 예를 들면 자동차 엔진의 고출력에 수반되는 배기소음의 저감 대책에 있어서, 배기관내를 전파하는 충격파가 배기관 끝에서 방출하기 전에 약한 충격파로 감쇠시키는 것이 요구되며, 이를 위해서는 관내를 전파하는 충격파의 전파나 감쇠특성에 관한 연구가 반드시 선행되어야 한다.

이와 같은 관 내부를 전파하는 비정상 충격파

의 거동과 전파특성에 관한 지식은 매우 중요하다.

종래 충격파가 고체벽면을 따라 전파하는 경우에 발생하는 충격파의 반사형태나 삼중점(triple point)의 궤적변화 등에 미치는 벽면의 곡소형상이나 각도, 입사충격파의 마하수, 주위 기체매질의 종류 등의 영향이 상세하게 조사되었다⁽¹⁻⁴⁾. 그 결과 충격파의 반사나 전파형태 등의 충격파의 동역학적 특성이 비교적 잘 알려져 있다.

그러나 이들 연구는 전파하는 충격파의 특성에 고체벽면의 구속효과를 무시한 외부 유동에 대한 것으로, 관내를 전파하는 충격파에 관한 기초연구는 많지 않다. 일반적으로 충격파가 직경이 크지 않는 관내를 전파하는 경우, 충격파의 반사형태나 삼중점 등의 주요 전파특성은 외부유동과는 매우 다르다. 이것은 전파하는 충격파 하류에 반사충격파가 반복하여 발생하게 되며, 이들 반사충격파는 고체 벽면을 따라 발생하는 경계층과 매우 복잡한 간섭을 일으키게 되므로, 유동장을 이해하기가 용이하지 않기 때문이다. 또 관의 형상이 곡소적으로 굴절부를 가지는 밴드형태(bend pipe)인 경우 굴절부에서 발생하는 충격파의 반사와 회절, 팽창파의 발생, 그리고 전파하는 충격파에 의하여 유

* 안동대학교 기계공학과 대학원

** 안동대학교 기계공학부

기되는 와류유동은 반사충격파와 다시 간섭을 하여 유동장은 더욱 복잡하게 된다.

지금까지 관내를 전파하는 충격파에 관한 연구는 실험과 수치계산 등의 방법을 이용하여 조사되었다(5-8). 실험적 연구의 경우, 충격파의 전파 마하수가 크지 않다고 하더라도 극히 짧은 시간내에 유동장을 측정하여야 하므로, 고체 벽면에서 측정된 비정상 압력이나 가시화 결과로부터 전파하는 충격파 유동장을 단지 정성적으로 이해하여 왔다(5,6). 또 수치계산의 경우 과도한 계산시간으로 인하여 관내의 극히 제한된 영역에 대해서만 유동장을 해석하였다(7,8).

따라서 각종 플랜트나 배기관 등에서 발생하는 비정상 충격파 유동장과 같이 관의 등가직경의 수배 내지 수십 배의 거리를 전파하는 경우에 대한 유동해석 사례는 극히 드물다. 실제 전파하는 충격파에 관한 기계공학적인 응용측면에서 충격파의 감쇠나 유동장의 불안정성 뿐만 아니라 관 벽에서 발생하는 비정상 하중 등은 관로 요소의 설계에 대단히 중요하지만, 현재까지 이와 관련된 연구 사례는 거의 없다.

본 연구에서는 산업현장의 관로계에 빈번히 사용되는 90°, 75°, 45°, 30°로 꺾인관과 굴절각 90°관에서 곡률반경의 변화를 준 곡관을 선정하여, 충격파가 관로 내를 전파할 때의 전파특성과 곡관 굴절부가 충격파 전파특성에 미치는 영향을 수치해석법을 이용하여 조사하였다. 본 연구에서 적용된 초기 입사 충격파 마하수는 1.1~1.7의 범위이다.

2. 수치계산방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 비정상 압축성 Euler 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD 법을 적용하여 곡관을 전파하는 비정상충격파의 유동특성을 해석하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + W = 0 \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)v \end{bmatrix}, W = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e + p)v \end{bmatrix}$$

위 수식 (1)에서 t 는 시간, ρ 는 기체의 밀도, u 와 v 는 각각 축방향과 반경방향의 속도성분, γ 는

공기의 비열비, p 는 압력을 나타낸다. 공기의 단위 체적당 전에너지를 e 라 할 때, 전에너지 e 는 다음과 같이 주어진다.

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \quad (2)$$

수치계산에서 식 (1)은 다음과 같은 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

$$x' = \frac{x}{D}, y' = \frac{y}{D}, u' = \frac{u}{a_a \sqrt{\gamma}}, v' = \frac{v}{a_a \sqrt{\gamma}} \quad (3)$$

$$t' = \frac{t}{(D/a_a)\sqrt{\gamma}}, p' = \frac{p}{p_a}, \rho' = \frac{\rho}{\rho_a}, e' = \frac{e}{p_a}$$

위 식에서 a 는 음속, 상첨자(')은 무차원량, 하첨자(a)는 대기상태량을 나타낸다.

2.2 계산영역 및 경계조건

Fig. 1은 본 연구에서 수치계산에 사용된 계산영역과 경계조건을 나타낸 그림이다.

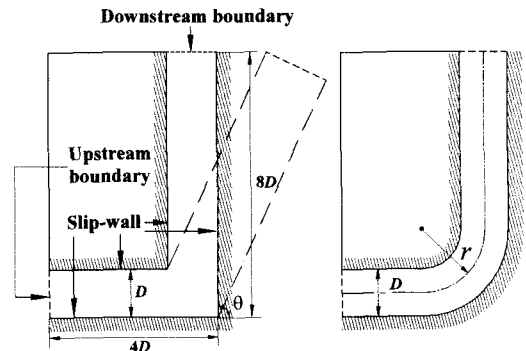


Fig. 1 Computational geometry and boundary conditions

계산영역은 관의 직경을 D 로 하여 관의 짧은 쪽 길이를 $4D$ 로, 관의 긴 쪽 길이를 $8D$ 로 설정하였으며, 굴절각 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 로, 곡률반경 r 을 $r/D = 0.5, 1.0, 1.5$ 로 변화시켜 수치계산을 수행하였다. 수치계산에 사용한 경계조건은 모든 고체벽면에 대하여 slip wall condition을 적용하였으며 그림에서 왼쪽 부분인 관의 입구와 위쪽 부분인 출구에 각각 유입조건과 유출조건을 적용하였다. 계산에 사용한 격자계는 정렬 격자계로 굴절각 θ 에 따라 약간의 차이는 있으나 약 70개의 격자를 생성하여 수치계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충격파의 반사와 회절

Fig. 2 에는 초기 입사충격파의 마하수 M_1 가 1.5 일 때 90° 굴절각을 가진 관내를 전파하는 충격파의 거동을 나타내었다.

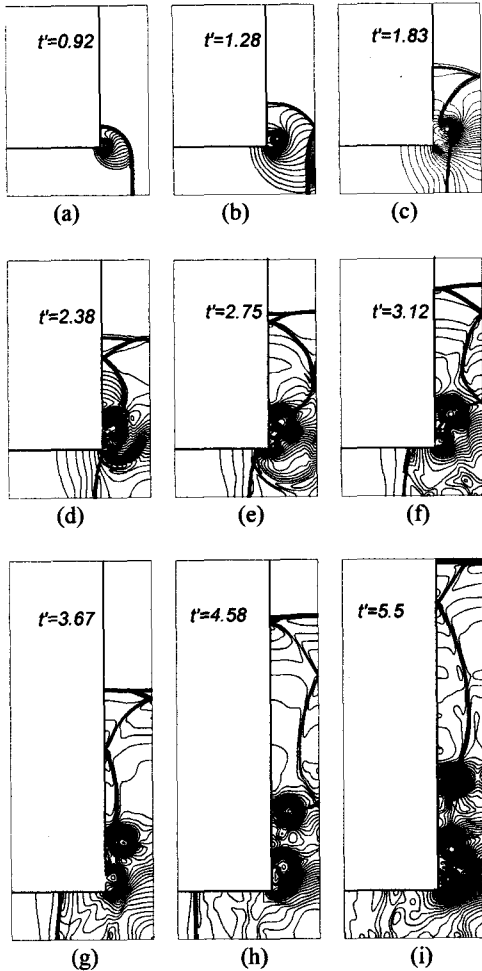


Fig. 2 Time histories of pressure contour ($M_1=1.5$)

그림에서 $t' = t(D/a_0)\sqrt{\gamma}$ 로 정의된 무차원 시간으로, $t' = 0.92$ 일 때 관내를 전파하는 충격파는 먼저 관 내벽의 모서리에서 회절하며, 이때 모서리 부분에서 발생한 팽창파의 영향으로, 유동은 국소적으로 가속된다. 이 후, 시간이 증가함에 따라서 입사충격파가 관의 외벽에 도달할 때 까지 회절부는 계속 성장한다. $t' = 1.28$ 에 이르러 입사 충격파는 관 외벽에서 정상반사(Regular reflection)

하며, 반사충격파의 일부는 관 출구로 향하게 되며, 나머지 일부는 관 입구를 향하여 전파한다. 시간이 더욱 경과함에 따라 관 출구로 향하는 충격파는 관 외벽에서 다시 마하반사(Mach reflection)하며, 관 입구를 향하여 전파하는 충격파는 관 모서리 부분에서 발생한 vortex 와 간섭을 하게 된다.

$t' = 1.83$ 에서 관 모서리 부분에서 발생한 팽창파의 영향으로 유동이 가속, 국소적으로 2 차 충격파가 나타나며, 반사충격파는 vortex 와 간섭을 하면서 관 상류방향으로 이동한다. 이때 반사충격파는 다시 정상반사와 마하반사를 일으키며 관 입구 쪽으로 전파한다. 한편 관 모서리 부분에서 발생한 vortex 는 시간이 경과함에 따라 모서리로부터 이탈하여, 하류로 유동하게 되며, 관 출구쪽을 향하여 전파하는 충격파의 반사파와 간섭하여 유동장은 매우 복잡하게 된다.

$t' = 2.38$ 에서 하류방향으로 전파하는 충격파는 관 내벽에서 정상반사 하며 관 외벽에서 마하반사로 천이하여 3 증점을 형성, 이 3 증점은 관 내벽을 향하여 이동한다. $t' = 2.75$ 에서 내벽쪽에 더욱 접근한 3 증점을 확인 할 수 있다. 반사충격파는 vortex 와 간섭을 일으키며 관 상류로 전파한 후 관의 내벽에서 정상반사 한다.

$t' = 3.12$ 에서는 3 증점이 관 내벽에 도달하여 관 내벽에서 충격파 강도가 외벽에 비해 강해지게 되고 이 3 증점은 다시 관 외벽을 향하여 이동한다. 관 내벽에서 성장한 vortex 의 영향으로 유동은 재차 가속, 2 차 충격파가 형성되어 관의 외벽에서 정상반사 하게 된다. 관 상류의 반사충격파는 관의 입구쪽으로 이동하면서 내벽에서 마하반사로 천이 하게 되며 관 모서리에서는 하류방향으로 vortex shedding 이 발생한다.

$t' = 4.58$ 및 $t' = 5.5$ 에서 입사 충격파는 내벽과 외벽을 반복적으로 이동하는 3 증점의 영향으로 벽면에서 반사하는 반사충격파의 강도가 점점 약해지게 되어 거의 평면에 가까운 수직 충격파로 되며, 시간이 증가함에 따라 일정한 형태의 파면으로 접근하게 된다.

Fig. 3 은 충격파가 관 전체 영역을 통과하고 난 이후의 관 전체의 압력분포를 확인해 보기 위하여 Fig. 2 의 (i)에 대하여 관의 내벽과 외벽 그리고 중심선을 따른 압력값을 도시 하였다. 그림에서 x/D 가 0 인 점이 관의 입구이며, x/D 가 3 인 점이 관 내벽이 꺾이는 지점, x/D 가 4 인 점이 관 외벽이 꺾이는 지점이다.

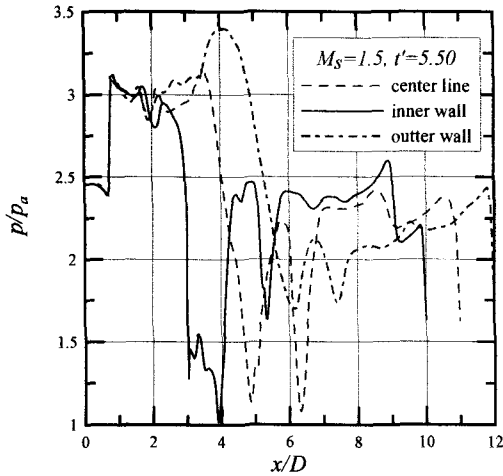


Fig. 3 Static pressure distributions at $t'=5.50$ ($M_s=1.5$)

그림으로부터 vortex의 형성에 따른 급격한 압력 감소와 반사 충격파에 의한 압력 상승을 명확히 확인할 수 있다. 또 3중점이 관 내벽에 도달할 경우와 관 외벽에 도달할 경우의 압력 역전 현상을 확인할 수 있다. 특히 관 외벽의 굴절 부분인 x/D 가 4인 지점에서 관 내벽과 관 외벽의 압력차가 가장 큰 것을 알 수 있는데 이는 이 부분이 가장 큰 압력변동을 발생하게 되므로 파손가능성이 가장 크다는 것을 의미한다.

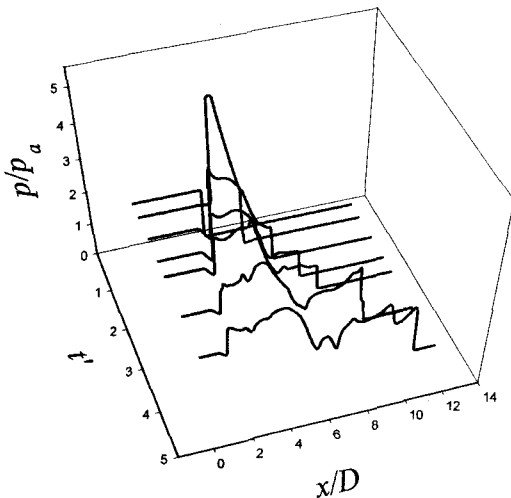


Fig. 4 Pressure histories along the outer wall ($\theta=90^\circ$, $M_s=1.5$)

Fig. 4는 위의 Fig. 2에서 관 외벽을 따르는 압력을 시간에 따라 도시한 그래프이다. x 축을 무차원 시간 t' 으로, y 축을 무차원 거리 x/D 로, 그리

고 z 축을 무차원 압력값 p/p_a 로 나타내었다. 무차원 시간이 증가함에 따라서 vortex의 위치가 상류로 이동하고 있으며 관 모서리 부근에서 형성된 2차 충격파와 반사 충격파의 영향으로 인한 압력의 감소와 증가가 반복되고 있음을 알 수 있다. 또한 외벽에서 반사한 반사 충격파는 시간이 증가함에 따라서 관 상류쪽으로 이동해 가며 그 강도가 점점 약화되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 반사 충격파가 관 모서리 부분의 팽창파의 간섭으로 인하여 강도가 약화되는 것으로 생각된다.

3.2 굴절각의 영향

Fig. 5는 관의 굴절각이 충격파 전파에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동일한 M_s 와 t' 인 경우에 굴절각 변화에 따른 등압선도를 슈리렌 이미징화 하여 나타낸 그림이다.

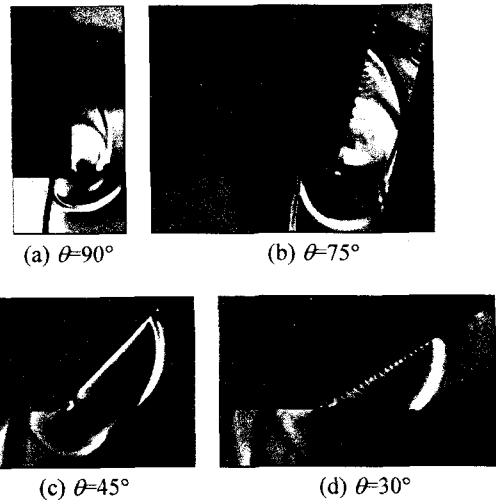


Fig. 5 Computed Schlieren images at $t'=2.38$ ($M_s=1.3$)

굴절각 $\theta=90^\circ$ 일 때 관 모서리에서 형성된 vortex는 θ 가 감소함에 따라서 그 강도가 점차적으로 감소하여 $\theta=30^\circ$ 일 때는 90° 일 때와 비교하여 현저하게 약화된 것을 알 수 있다.

Fig. 5의 정성적인 결과를 좀 더 명확히 알아보기 위하여 관의 외벽을 따르는 압력값을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 굴절각이 감소함에 따라서 vortex 강도가 감소함으로 압력강하 값이 점점 감소하고 있으며, 반사충격파의 영향으로 인한 압력 상승폭 또한 감소함을 알 수 있다.

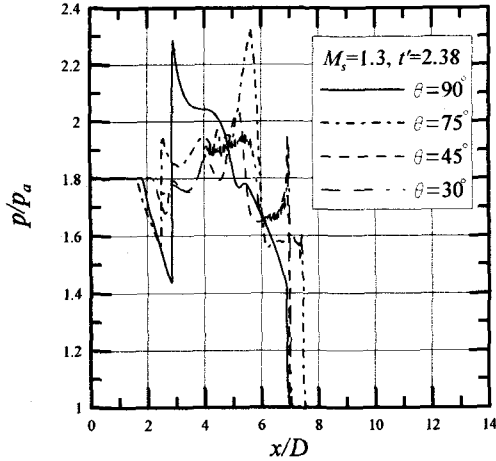


Fig. 6 Static pressure distributions along the outer wall of bended tube at $t' = 2.38$ ($M_s = 1.3$)

3.3 입사 마하수의 영향

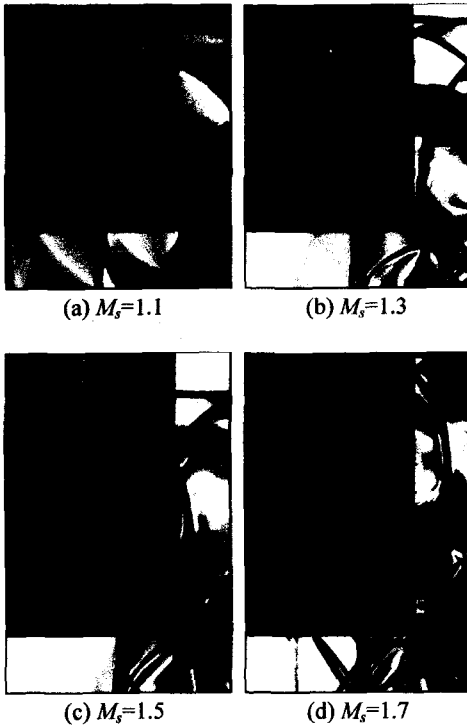


Fig. 7 Computed Schlieren images at $t' = 3.67$

Fig. 7 은 마하수 변화에 따른 충격파의 전파 특성을 나타낸 수치계산으로 얻은 슈리엔 이미지이다. 전파 마하수가 커질수록 관 모서리 부분에서 vortex 가 강하게 되며 충격파의 반사형태에 있어서 마하반사에서 정상반사로 전이가 발생한다.

마하수가 증가함에 따라서 충격파의 전파속도가 증가하게 되어 동일한 시간에서 전파거리가 증가하고 반사충격파의 강도는 마하수가 증가함에 따라서 더 강하게 된다.

Fig. 8 은 굴절각 $\theta = 90^\circ$, 무차원 시간 $t' = 3.67$ 인 Fig. 7 의 경우에 대하여 마하수 변화에 따른 압력 분포를 나타낸 그림으로써 횡축은 관 입구에서 관 외벽을 따르는 길이를 관 직경으로 무차원한 값이며, 종축은 국소 정압을 대기압으로 무차원한 값이다.

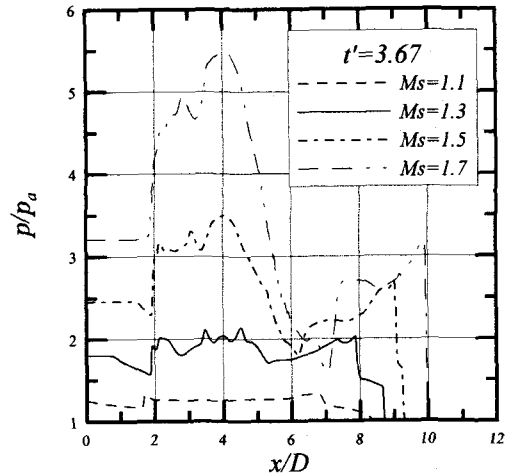


Fig. 8 Static pressure distributions along the outer wall at $t' = 3.67$

앞에서 설명한 충격파 전파의 메커니즘에 근거한 압력변화가 잘 나타나 있으며 전파 마하수가 클수록 강한 vortex 가 형성되어 압력 강하 폭은 낮은 마하수에 비하여 상대적으로 크다는 것을 확인 할 수 있다.

3.4 곡률반경의 영향

Fig. 9 는 굴절각이 90° 일 때 곡률반경 r/D 를 변화 시킨 관내를 전파하는 충격파의 거동을 알아 보기 위한 등압력 선도이다. 곡률반경이 작을수록 굴절부에서 vortex 의 강도가 강하게 나타나며, 복잡한 형태의 반사형태를 가지나 곡률반경이 커질수록 vortex 의 강도가 약해지며, 충격파 반사형태는 정상반사에 가깝게 된다. 그러나 관의 외벽에서 발생하는 반사충격파는 곡률반경이 작을수록 강하게 되어, 선행충격파에 영향을 미치게 되며, 충격파를 강하게 하는 요인으로 작용하게 된다. 따라서 동일한 시간에 충격파의 전파거리는 r/D 가 작을수록 증가한다.

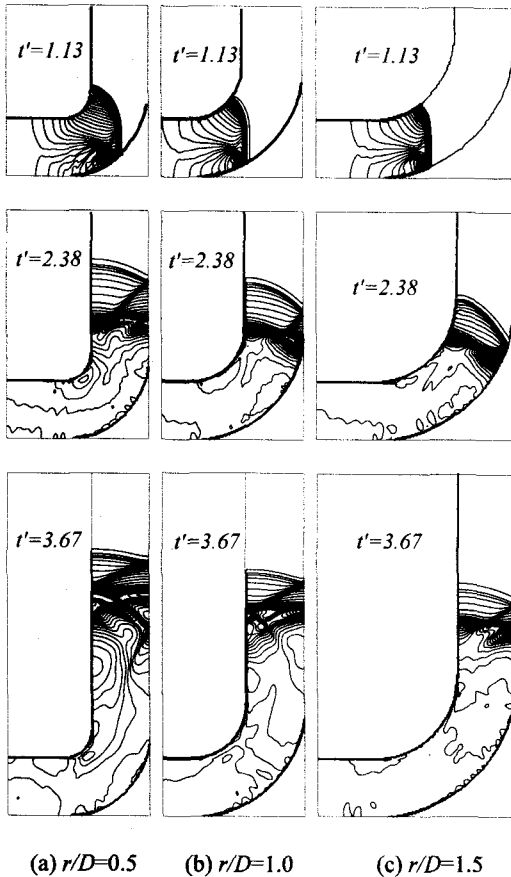


Fig. 9 Time histories of pressure contour ($M_s=1.1$)

4. 결론

본 연구에서는 관내를 전파하는 충격파의 반사와 회절 등 충격파의 동역학적 메커니즘을 이해할 목적으로 TVD scheme 을 이용한 Euler 방정식의 수치해석을 통하여 충격파의 전파특성을 가시화하였으며 관로의 형태와 초기 충격파의 마하수의 변화가 충격파의 전파특성에 미치는 영향을 분석하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 전파하는 충격파의 반사와 회절, vortex 형성의 메커니즘을 수치해석을 통하여 유동장을 가시화하였으며, 충격파의 반사/회절 현상을 명확하게 관찰할 수 있었다.
- 2) 굴절각을 가진 관로내를 충격파가 전파하는 경우 굴절각이 작아질수록 관 모서리 부분에서 발생하는 vortex 강도가 약해지며, 회절충격파의 각도는 굴절각이 작아진다.
- 3) 동일한 관로에서 초기 입사충격파의 마

하수가 클수록 모서리 부분에서 발생하는 vortex 가 강하게 형성되며, 반사충격파의 강도는 증가하게 된다.

- 4) 곡률반경을 가진 관로를 전파하는 충격파의 경우 곡률반경이 작을수록 굴절부에서 vortex 의 강도가 강하게 나타나며, 복잡한 형태의 반사형태를 가지나 곡률반경이 커질수록 vortex 의 강도가 약해지며, 충격파 반사형태는 정상반사에 가깝게 된다.

후 기

이 논문은 2001 년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Li, H. and Ben-Dor, G., 1999, "Analysis of double-Mach-reflection wave configurations with convexly curved Mach stems," Shock Wave Journal, No.9, pp. 319-326.
- (2) Takayama, K. and Jiang, Z., 1997, "Shock wave reflection over wedges : a benchmark test for CFD and experiments," Shock Wave Journal, No.7, pp. 191-203.
- (3) Heiling, W.H., 1976, "Propagation of Shock Waves in Various Branched Ducts," Proc. 10th Int. Shock Tube Symp., pp. 273.
- (4) Takayama, K., Honda, M. and Onodera, O., 1976, "Shock Propagation along 90 Degree Bend," Rep. IHSM Tohoku Univ., Vol.35, pp. 83.
- (5) Igra, O., Wang, L., Falcovitz, J. and Heilig, W., 1998, "Shock Wave Propagation in a Branched Duct," Shock Wave Journal, No. 8, pp. 375-381.
- (6) Aki, T., 1987, "A Numerical Study of Shock Propagation in Channels with 90 Degree Bends," NAL Tech Rep.
- (7) Watanabe, M., Saito, T. and Takayama, K., 1990, "Study of Shock Wave Propagation Past a Circular Cross Sectional 90 Degree Bend," Shockwave Symp., pp. 329-332
- (8) Sod, G. A., 1977, "A Numerical Study of a Converging Cylindrical Shock," Journal of Fluid Mechanics, Vol.83, pp. 785-794
- (9) Yee, H.C. and Harten, A., 1987, "Implicit TVD Schemes of Hyperbolic Conservation Laws in Curvilinear Coordinates," AIAA Journal, Vol. 25-2, pp. 266-274.
- (10) Yee, H.C., 1983, "Upwind and Symmetric Shock Capturing Schemes," NASA TM-89464.
- (11) Honda, M., Takayama, K., Onodera, O. and Kohama, Y., 1975, "Motion of Reflected Shock Waves in Shock Tube," Proc. 10th Int. Shock Tube Symp., pp. 320