Proceedings of
The Second National Congress on Fluids Engineering
August 22-24, 2002, Muju, Korea

분지관을 전파하는 약한 충격파에 관한 수치해석적 연구

김현섭* · Ryszard Szwaba* · 김희동**

Study of the Shock Wave Propagating through a Branched Pipe Bend

Hyun-Sub Kim* , Ryszard Szwaba* and Heuy-Dong Kim**

Keywords : *Shock Wave(충격파), Branched Pipe Bend(분지관), Regular Reflection(정상반사), Mach Reflection(마하반사) Internal Flow(내부유동), Unsteady Flow(비정상유동), Compressible Flow(압축성유동)*

Abstract

This paper describes the dynamics of the weak shock wave propagating inside some kinds of branched pipe bends. Computations are carried out by solving the two-dimensional, compressible, unsteady Euler Equations. The second-order TVD(Total Variation Diminishing) scheme is employed to discretize the governing equations. For computations, two types of branched pipe(90° branch, 45° branch) with a diameter of D are used. The incident normal shock wave is assumed at D upstream of the pipe bend entrance, and its Mach number is changed between 1.1 and 2.4. The flow fields are numerically visualized by using the pressure contours and computed schlieren images. The comparison with the experimental data performed for the purpose of validation of computational work. Reflection and diffraction of the propagating shock wave are clarified. The present computations predicted the experimented flow field with a good accuracy.

1. 서 론

일반적으로 충격파의 반사(reflection)나 회절(diffraction)현상은 충격파가 고체 벽면과 간섭하는 경우에 나타나는 현상으로, 반사형태는 크게 정상반사(regular reflection)와 마하반사(Mach reflection)로 분류한다. 이러한 충격파의 반사나 회절현상은 충격파 동역학이란 학문적인 관점에서 뿐만 아니라 충격파와 관벽이나 구조물과의 간섭, 기체의 연소나 폭발에 의해 발생하는 데토네이션파(detonation wave)나 블라스트파(blast wave)의 전파특성 및 형태 등과 관련되어 공학적으로 매우 중요한 분야이다. 특히 관내를 전파하는 충격파의 반사와 회절현상은 내연기관의 배기계, 각종 플랜트의 배관계, 도시가스의 수송라인 등 다양한 분야에서 발생하며, 이에 관한 연구는 고속 내부 유동장치를 설계하는데 매우 중요하다.

예를 들어 자동차 엔진이 고출력화 됨에 따라 배기관에서 금속성 배기소음이 증가하고 그 소음의 저감대책이 중요한 과제로 대두되고 있다. 이러한 배기소음은 주로 엔진의 고속 회전에 의하여 배기관 내를 전파하는 압력파가 비선형 과정으로 충격파로 천이하여, 배기관 출구로부터 방출하게 되므로, 배기관 내를 전파하는 충격파가 배기관 출구에서 방출되기 전에 충격파를 감쇠시키는 것이 요구되며, 이를 위해서 관 내 요소를 전파하는 충격파의 전파나 감쇠특성에 관한 연구가 필요하다.

종래 충격파가 wedge나 cone과 같은 고체벽면을 따라 전파하는 경우에 벽면의 국소형상이나 각도, 입사충격파의 마하수, 주위 기체매질의 종류가 충격파의 반사형태나 삼중점(triple point)의 궤적변화 등에 미치는 영향이 상세하게 조사되었다[1,2]. 그러나 이들 연구의 대부분은 벽면의 구속효과를 고려하지 않은 외부유동에 대한 것으로 충격파가 관로 내를 전파하는 경우와 같은 내부유동의 경우는 그 동역학적 특성이 상당부분 다를 수 있다. 이는 전파하는 충격파 하류에 반사충격파가 반복하여 발생하게 되며, 이 반사충격파가 유동을 구속하는 벽면의 경계층과 간섭을 일으켜 유동장은 매우 복잡한 형태로 나타나기 때문이다. 특히 굴절부나 분지관을 가진 관(pipe bend)의 경우는 굴절부나 분지관의 접합부에서 발생하는 충격파의 반사와 회절, 전파하는 충격파에 의해서 접합부에서 발생하는 와류와 반사충격파의 간섭 등으로 인하여 유동장을 이해하는 것은 용이하지 않다.

지금까지 많은 연구자들에 의하여 충격파의 반사와 회절현상에 관한 실험적, 수치해석적 연구가 수행되었다[4~7]. 실험적 연구의 경우, 충격파의 전파 마하수가 크지 않다고 하더라도 극히 짧은 시간 내에 유동장을 측정해야 하기 때문에, 고체 벽면에서 측정한 비정상 압력이나 가시화 결과로부터 전파하는 충격파 유동장을 단지 정성적으로 이해하여 왔다[5,7]. 또 수치계산의 경우 과도한 계산시간으로 인하여 관내의 극히 제한된 영역에 대해서만 유동장을 해석하였다[4,7]. 따라서 각종 플랜트나 배기관 등에서 발생하는 비정상 충격파 유동장에 관한 유동해석 사례는 최근 김 등[12]에 의하여 수행되었을 뿐, 많지 않으며 충격파의 감쇠나 유동장의 불안정성, 관 벽에서 발생하는 비정상 하중 등은 관로 요소의 설계에 매우 중요하지만, 현재까지 이와 관련된 연구결과는 거의 없다.

본 연구는 분지관 내부를 전파하는 충격파의 전파특성과 분지관 내부의 복잡한 유동장이 관 벽면에 미치는 영향 등을 수치해석법을 이용하여 조사하였다. 본 연구에서 적용된 초기 입사충격파의 마하수는 1.1~2.4의 범위이며 참고문헌[5][11]의 실

* 안동대학교 기계공학과 대학원,samak@anuis.andong.ac.kr
** 안동대학교 기계공학부, kimhd@andong.ac.kr

험 및 수치해석결과와 비교하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구는 비정상 압축성 Euler유동방정식에 Harten-Yee의 TVD법을 적용하여 분지관을 지나는 비정상 충격파의 유동특성을 해석하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial y}=0 \tag{1}$$

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

위 식(1)에서 t는 시간, ρ는 기체의 밀도, u와 v는 각각 x방향과 y방향의 속도성분이며 e는 아래 식(3)으로 주어지는 단위 체적당 전에너지 이다.

$$e=\frac{p}{\gamma-1}+\frac{1}{2}\rho(u^2+v^2) \tag{3}$$

여기서 γ는 공기의 비열비로 본 연구에서는 γ=1.4로 설정하였다. 수치계산에서는 식(1)의 각각의 변수들에 대하여 다음과 같이 주어지는 무차원 상태량으로 변환하여 사용하였다.

$$x'=\frac{x}{D}, y'=\frac{y}{D}, u'=\frac{u}{a_a\sqrt{\gamma}}, v'=\frac{v}{a_a\sqrt{\gamma}}$$
$$t'=\frac{t}{(D/a_a)\sqrt{\gamma}}, p'=\frac{p}{p_a}, \rho'=\frac{\rho}{\rho_a}, e'=\frac{e}{p_a} \tag{4}$$

위 식(4)에서 a는 음속, 상첨자 '은 무차원량, 하첨자 a는 대기의 상태량을 나타낸다.

2.2 계산영역 및 경계조건

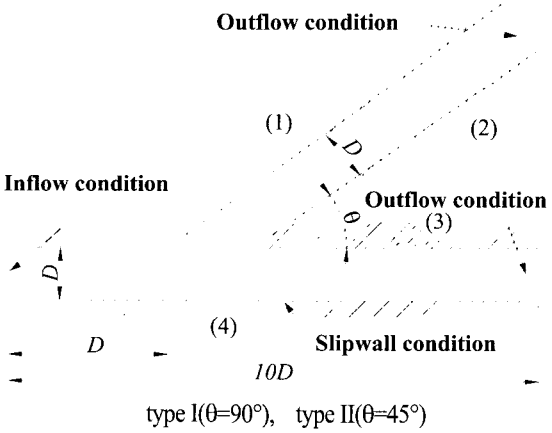


Fig.1 computational geometries and boundary conditions

Fig.1은 본 연구에서 사용한 수치계산 영역과 경계조건을 나타낸 개략도이다. 계산영역은 관의 직경 D를 기준으로 전체 관의 길이를 10D로 설정하였으며, 초기 입사충격파는 관의 왼쪽에서 오른쪽으로 전파해 간다. 경계조건으로는 관의 입구에 유입조건, 출구에 유출조건을 주었으며 벽면에는 단열, slip wall 조건을 적용하였다. 분지되는 관의 각도(θ)의 변화에 따른 분지관 내부의 충격파 시스템 변화를 알아보기 위하여 분지관의 각도를 변화시켜 수치계산 하였다. 수치계산에 사용한 격자계는 정렬격자계로서 50만개에서 70만개의 격자를 생성하여 계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.2는 초기 입사충격파의 마하수 M_s=2.4 인 경우 수치계산을 통해 얻어진 등압력 선도와 참고문헌[5]의 실험을 통한 가시화 사진을 비교하여 나타낸 것이다. 관의 왼쪽 에서 관 내부로 유입된 입사충격파는 관의 오른쪽으로 전파해 가면서 관 모서리 부분에서 회절하고(Fig.2(a), (b)) 시간이 증가하면서 계속 전파하여 수평분지관의 아래벽에서 마하반사 하고 (Fig.2(c), (d)) 수직분지관의 우측벽에서는 정상반사 후 마하반사로 천이한다(Fig.2(e), (f)). 수치해석 결과는 실험결과를 매우 잘 예측하고 있어 본 연구의 수치해석 결과가 실제 유동장 해석에 적합함을 알 수 있다.

Fig.3은 입사충격파의 마하수가 2.0일 때 참고문헌[11]의 수치해석 결과와 본 연구의 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 관의 모서리 부분에서 나타나는 vortex의 shedding현상이나 수평분지관 벽면에서 충격파의 마하반사, 수직분지관 벽면에서 충격파의 정상반사에서 마하반사로의 천이, 3중점(triple point)의 위치등이 매우 잘 일치하고 있다.

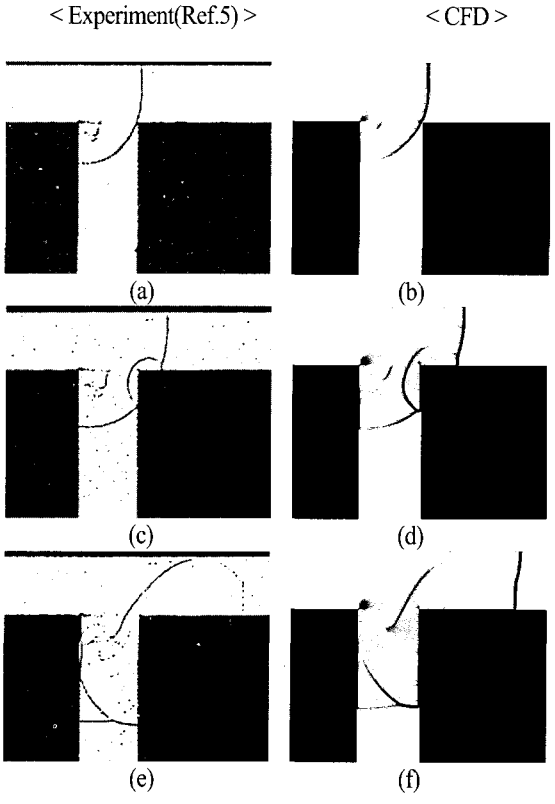


Fig.2 Experimental shadowgraphs(Ref.5) and Numerical simulation(M_s=2.4)

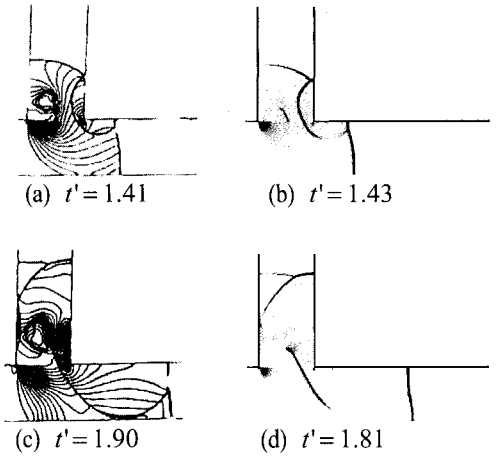
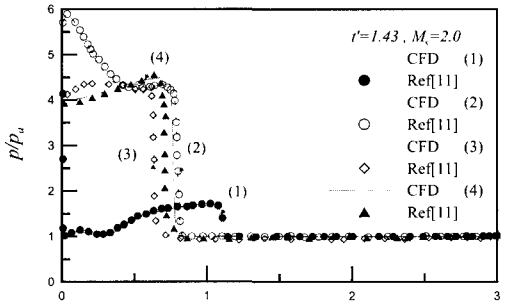
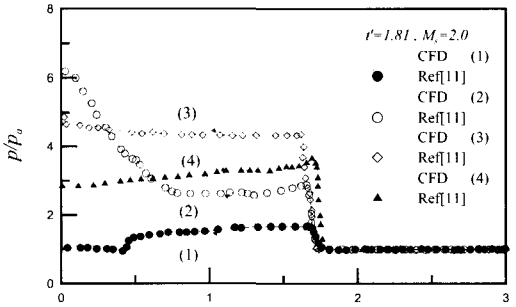


Fig3. Computed pressure contours at M_s=2.0



(a) $t'=1.43$



(b) $t'=1.81$

Fig.4. Pressure distributions along the branched wall(M_s=2.0)

Fig.4는 초기 입사충격파의 마하수가 2.0이고 $t'=t/(D/a_u)\sqrt{\gamma}$ 로 정의된 무차원 시간(t')이 각각 1.43(Fig.4(a)), 1.81(Fig.4(b))인 경우 분지관의 각 벽면을 따르는 압력분포를 참고문헌[11]의 수치해석 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 (1), (2), (3), (4)는 각각 Fig.1에 표시한 수직분지관의 좌측벽, 우측벽, 수평분지관의 윗벽, 아래벽을 의미한다. 그래프의 횡축은 수평분지관과 수직분지관의 접합부를 원점으로, 하류방향을 따르는 길이를 관 직경으로 무차원한 거리이며 종축은 국소 정압을 대기압으로 무차원한 값이다. $t'=1.43$ 일 때 벽(1)의 p/p_a는 분지관의 접합부 부근에서 발생한 강한 vortex의 영향으로 급격하게 감소하였다가 x/D가 증가함에 따라서 서서히 증가하고 있으며 벽(2), (3), (4)의 p/p_a에 비하여 상대적으로 매우 낮게 나타난다. $t'=1.81$ 일 때는 $t'=1.43$ 와 비교하여 벽(2)와 벽(4)의 p/p_a가 현저하게 감소되어 있는 것을 알 수 있다. 참고문헌[11]의 수치해석결과와도 매우 잘 일치하고 있다.

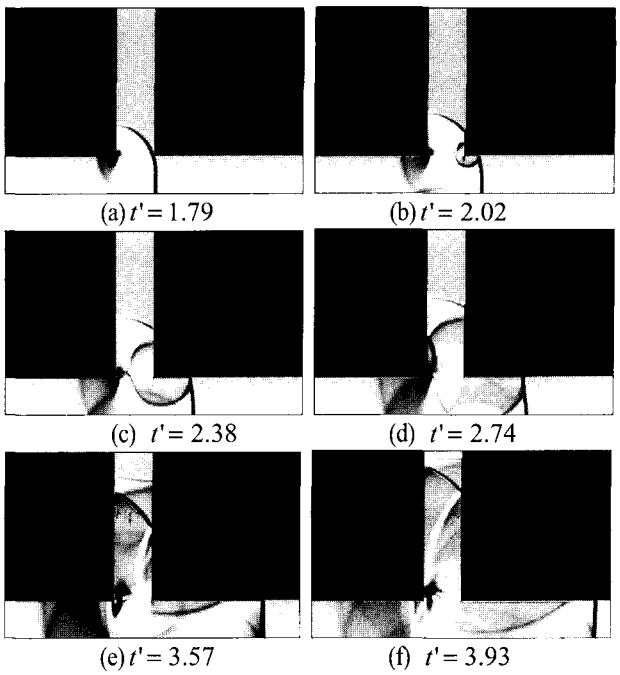
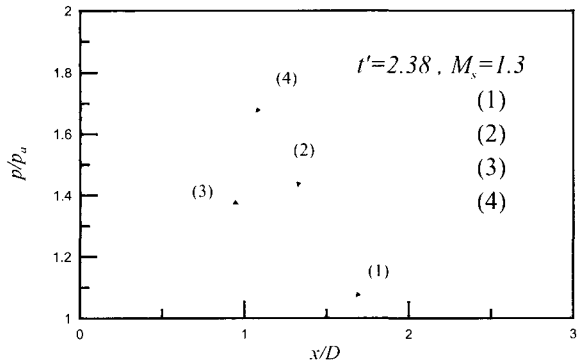


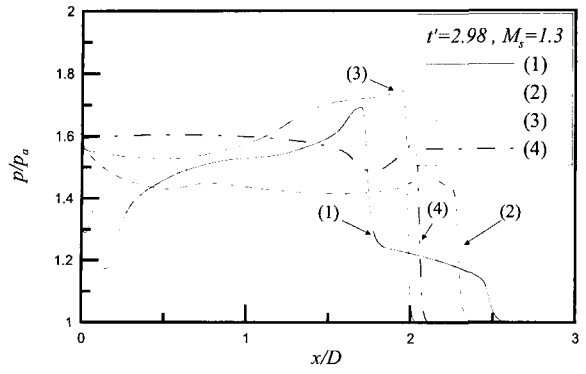
Fig5. Computed schlieren images at branched bend(M_S = 1.3)

Fig.5는 입사충격파의 마하수가 1.3인 경우 무차원 시간의 증가에 따른 분지관 내를 전파하는 충격파의 전파형태를 수치해석 결과로부터 가시화한 것이다.

$t'=1.79$ 에서 관 왼쪽에서 오른쪽으로 유입된 입사충격파는 분지관 접합부의 좌측 모서리에서 회절(diffraction)하여 회절충격파는 수직분지관으로 전파하고 입사충격파는 수평분지관을 따라 전파한다. $t'=2.02$ 에서 충격파는 수직분지관 내벽에서 정상반사하고 수평분지관 윗벽에서 마하반사 한다. 시간이 더욱 증가하여 $t'=2.74$ 에서 수평분지관의 마하반사에 의해 형성된 3중점은 수평분지관 아래벽쪽으로 이동해 가며 반사충격파는 수평분지관 아래벽에서 정상반사 한다. 또한 수직분지관의 좌측벽면에서 반사한 반사충격파와 함께 분지관 접합부 좌측모서리에서 발생한 vortex와 간섭을 일으키게 된다. $t'=3.57$ 에서 수평분지관 아래 벽면에 도달한 3중점을 확인할 수 있다. 수직분지관을 전파하는 충격파는 관 우측벽면에서 정상반사 후, 마하반사로 천이하여 3중점을 형성한다. 이 3중점은 $t'=3.93$ 에서 관 좌측벽면으로 이동해 가게 된다. Fig.5는 이러한 분지관 내부의 복잡한 전파양상을 적절하게 가시화하고 있다.



(a) $t'=2.38$



(b) t'= 2.98

Fig.6 Pressure distributions along the branched wall(M_s = 1.3)

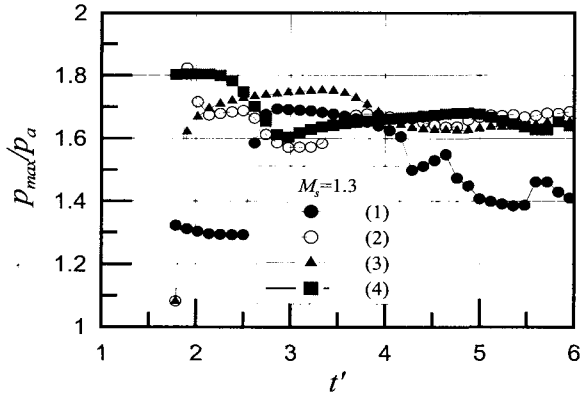


Fig.7 Peak pressure distributions along the branched wall(M_s = 1.3)

Fig.6은 입사충격파의 마하수가 1.3인 경우 Fig.1에 표시한 각 벽면을 따르는 압력분포를 나타낸 그래프이다. Vortex와 반사충격파, 입사충격파의 영향으로 분지관이 겪는 압력변동이 잘 나타나 있으며 압력변동의 정성적인 결과는 마하수가 2.0인 경우와 유사하게 나타나고 있다.

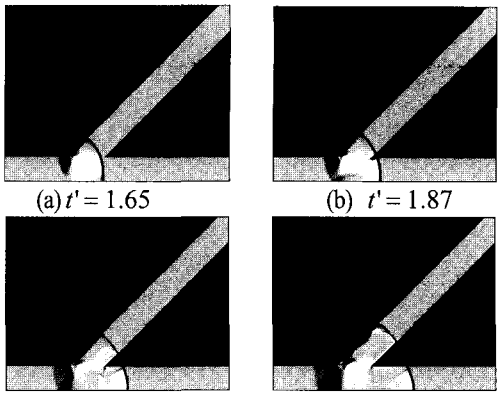
Fig.7은 입사충격파의 마하수가 1.3인 경우 무차원 시간의 증가에 따른 각 벽면이 겪는 최대 압력값의 변화를 나타낸 그래프이다. 무차원 시간이 증가함에 따라서 각 벽면의 최대압력값은 반사충격파와 vortex등의 영향으로 증가와 감소를 반복하지만 점차적으로 감소하고 있으며 벽(1)의 최대압력의 진동폭이 벽(2), (3), (4)에 비하여 더 큼을 알 수 있다.

Fig.8은 입사충격파의 마하수가 1.5인 경우 분지관의 분지각(θ)이 45°인 경우 분지관 내부를 전파하는 충격파의 전파형태를 나타낸 그림이다. 충격파의 반사나 회절형태는 90° 분지관과 유사하게 나타나지만 shock front의 형태가 좀 더 심하게 굽어 있는 것을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 분지관 내부를 전파하는 충격파의 거동을 이해할 목적으로 두가지 형태의 분지관에 대하여 TVD scheme을 이용한 Euler 방정식의 수치해석방법을 적용하여 분지관 내부에서의 충격파의 반사와 회절, vortex 생성과 상호 간섭등 충격파의 전파특성을 규명하고자 하였으며 계산결과의 검증을 위하여 유효한 실험 및 수치결과와 비교하였다.

본 연구의 결과로부터 연구에 사용한 수치해석코드는 분지관 내부의 충격파 거동을 적절히 가시화 하였으며 실험으로부터 얻어진 결과를 매우 잘 예측하였다. 따라서 본 연구의 수치계산은 분지관 내부의 충격파 전파특성의 규명에 매우 유용



(a) t' = 1.65 (b) t' = 1.87

(c) t' = 2.20 (d) t' = 2.64

Fig.8 Computed schlieren images of a branched pipe type II (θ=45°,M_s=1.5)

할 것으로 판단된다. 또한 분지관의 각 벽면이 겪는 압력변동을 예측하였으며 결과를 고려할 때 벽(1)에서 압력의 변동폭이 가장 큼을 알았다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

[1] Li, H. and Ben-Dor, G., "Analysis of double-Mach-reflection wave configurations with convexly curved Mach stems," Shock Wave Journal, No.9(1999), pp. 319-326.

[2] Takayama, K. and Jiang, Z., "Shock wave reflection over wedges : a benchmark test for CFD and experiments," Shock Wave Journal, No.7(1997), pp. 191-203.

[3] Heiling, W.H., "Propagation of Shock Waves in Various Branched Ducts," Proc. 10th Int. Shock Tube Symp.(1976), pp. 273.

[4] Takayama, K., Honda, M. and Onodera, O., "Shock Propagation along 90 Degree Bend," Rep. IHSM Tohoku Univ., Vol.35(1976), pp. 83.

[5] Igra, O., Wang, L., Falcovitz, J. and Heilig, W., "Shock Wave Propagation in a Branched Duct," Shock Wave Journal, No. 8(1998), pp. 375-381.

[6] Igra, O., Wu, J., Falcovitz, J., Meguro, T., Takayama, K. and Heilig, W., "Experimental and theoretical study of shock wave propagation through double-bend ducts," Journal of Fluid Mechanics, Vol.437(2001), pp.255-282.

[7] Aki, T., "A Numerical Study of Shock Propagation in Channels with 90 Degree Bends," NAL Tech Rep.(1987)

[8] Watanabe, M., Saito, T. and Takayama, K., "Study of Shock Wave Propagation Past a Circular Cross Sectional 90 Degree Bend," Shockwave Symp.(1990), pp. 329-332.

[9] Sod, G. A., "A Numerical Study of a Converging Cylindrical Shock," Journal of Fluid Mechanics, Vol.83(1977), pp. 785-794.

[10] Yee, H.C. and Harten, A., "Implicit TVD Schemes of Hyperbolic Conservation Laws in Curvilinear Coordinates," AIAA Journal, Vol. 25-2(1987), pp. 266-274.

[11] Kazuyuki, K., Hiromitsu, H., Katsuya, I., Yustiar, G., Katsutaka, I. and East, R., "Numerical Study of the Stabilizing Process of Nonuniform Shock Waves Propagating in Branched Ducts," JSME ICFE-97-214.(1997), pp. 391-396.

[12] 김현섭, 김희동, "곡관 내부를 전파하는 약한 비정상 충격파에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회논문집 B(2001), pp.456-461.