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

약한 충격파의 포커싱 현상에 관한 수치해석적 연구

권용훈* · 김희동**

A Computational Study of the Focusing Phenomenon of Weak Shock Wave

Yong Hun Kweon* and Heuy Dong Kim**

Keywords : *Compressible Flow(압축성 유동), Shock Wave(충격파), Shock Tube(충격파 관), Reflector(반사판), Shock Wave Focusing(포커싱), Unsteady Flow(비정상 유동)*

Abstract

When a plane shock wave reflects from a concave wall, it is focused at a certain location, resulting in extremely high local pressure and temperature. This focusing is due to a nonlinear phenomenon of shock wave. The focusing phenomenon has been extensively applied to many diverse fields of engineering and medical treatment as well. In the current study, the focusing of shock wave over a reflector is numerically investigated using a CFD method. The Harten-Yee total variation diminishing (TVD) scheme is used to solve the unsteady, two-dimensional, compressible, Euler equations. The incident shock wave Mach number M_s of 1.1~1.3 is applied to the parabolic reflectors with several different depths. Detailed focusing characteristics of the shock wave are investigated in terms of peak pressure, gasdynamic and geometrical foci. The results obtained are compared with the previous experimental results. The results obtained show that the peak pressure of shock wave focusing and its location strongly depend on the magnitude of the incident shock wave and depth of parabolic reflector. It is also found that depending up on the depth of parabolic reflector, the weak shock wave focusing process can classified into three distinct patterns : the reflected shock waves do not intersect each other before and after focusing, the reflected shock waves do not intersect each other before focusing, but intersect after focusing, and the reflected shock waves intersect each other before and after focusing. The predicted Schlieren images represent the measured shock wave focusing with a good accuracy.

1. 서 론

충격파가 어떤 매질을 전파하는 경우에 충격파의 파면형상과 전파속도와의 관계가 1953년 Chester와 1957년 Chisnell에 의하여 이론적으로 해석된 후, 1959년 Whitham에 의하여 완성되었다. 이러한 충격파의 동역학적 이론 (Shock Dynamics Theory)은 Ray-Shock Theory 혹은 기하학적 충격파 운동 이론 등으로 잘 알려져 있다.[1, 2] Whitham의 이론에 의하면, 전파하는 방향으로 오목한 형태의 충격파나 평면 충격파가 어떤 오목면에 충돌하여 반사하는 경우에 충격파 포커싱(Focusing or converging)하여 국소적으로 고온 고압의 상태를 창출하게 된다. 이러한 충격파 포커싱 현상은 일종의 비선형 현상 (Non-linear phenomenon)으로, 학문적으로 매우 흥미있는 연구과제일 뿐만 아니라, 초고온 고압의 극한상태를 용이하게 달성할 수 있는 신기술 응용으로 최근 여러 분야에서 각광을 받고 있다.

충격파 포커싱에 관해서는 실험적, 수치해석적으로 많은 연구들이 수행되었다. 예를 들면, 축대칭 충격파 포커싱[3], 희박 기체의 충격파 포커싱[4], 폭발을 수반하는 충격파 포커싱[5], 가연성 혼합기체의 충격파 포커싱[6], 포커싱 영역에서의 제트와 와류(vortex)의 형성[7], 그리고 음식물 부패 방지를 위한 충격파의 적용[8] 등의 연구들이 행해져 있다. 최근에 Kim 등[9]은 약한 충격파의 포커싱 현상에 관해서 실험적, 수치해석적인 연구를 수행하였다. 이러한 연구들로부터 일반적으로 충격파 포커싱은 반사파의 형상과 초기 충격파의 전파 마하수에 의존하며, 반사판의 형상에 의해서 결정되는 기하학적 포커싱 (geometrical focusing)의 위치와 충격파의 비선형적 거동에 의한 기체역학적 포커싱 (gasdynamic focusing)의 위치가 상이하다는 것 등이 알려져 있다[10].

충격파 포커싱 현상을 공업적으로 응용하는 예로, 항공분야에서 초음속 항공기의 가속 / 선회시 발생하는 압력변동 및 파동시스템에 관한 연구, 구형 충격파의 포커싱에 의한 레이저 핵융합[11], 의학분야에서 회전 타원체를 이용한 수중 충격파 포커싱에 의한 체내 신장결석이나 담석의 치료[12, 13], 광업분야에서 충격파 포커싱에 의한 암석 파쇄, 재료과학 분야에서 고변형율 재료의 제작[14] 등과 같이 공업적, 산업적으로 폭넓게 응용되고 있다. 이와 같이 충격파 포커싱 기술은 다양한 분야에서 사용되고 있지만, 충격파 포커싱 현상의 상세특성은 아직까지 충분히 알려져 있지 않다. 따라서 충격파 포커싱 현상을 적절하게 이용하기 위해서는 포커싱 영역에서 발생하는 유동장에 대한 명확한 이해와 상세한 정보가 대단히 중요하다.

본 연구에서는 TVD법을 이용한 Euler 방정식의 수치해석을 통하여 약한 충격파가 포물형 반사판에 충돌하여 반사될 때 발생하는 충격파 포커싱의 유동특성과 반사판의 깊이변화에 따른 충격파 포커싱의 유형을 조사하였다. 얻어진 수치해석 결과를 쉴리렌 영상 처리하여 포커싱 영역에서의 유동장 변화를 가시화하였다. 수치해석으로부터 얻어진 결과들은 종래의 실험결과[15]와 비교하였다.

* 안동대학교, luisfigo132@hotmail.com
** 안동대학교, kimhd@andong.ac.kr

2. 수치계산 방법

본 연구에서는 2차원 비정상 압축성 Euler 유동방정식에 Harten-Yee의 TVD법[16]을 적용하여 약한 충격파가 포물형 반사판에 충돌하여 반사될 때 발생하는 충격파 포커싱 현상의 유동특성을 해석하였으며, 수치계산에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

위의 식(1)에서 t는 시간, ρ는 기체의 밀도, u와 v는 각각 축방향과 반경방향의 속도성분, γ는 공기의 비열비, p는 압력을 나타낸다. 공기의 단위체적당 전에너지를 e라고 할 때, 전에너지 e는 다음과 같이 주어진다.

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

식(1)은 다음과 같이 무차원 상태량으로 다시 쓰여진다.

$$x'=\frac{x}{D},\quad y'=\frac{y}{D},\quad u'=\frac{u}{a_1/\sqrt{\gamma}},\quad v'=\frac{v}{a_1/\sqrt{\gamma}},$$

$$t'=\frac{t}{\sqrt{\gamma}D/a_1},\quad p'=\frac{p}{p_1},\quad \rho'=\frac{\rho}{\rho_1}$$

위의 식에서 a는 음속, 상첨자(′)는 무차원량, 하첨자(1)은 대기상태를 나타낸다.

Fig.1은 수치계산에 적용된 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 그림에 나타낸 계산영역의 상반부에 대하여 $\Delta x=\Delta y=R/200$ 크기인 정방격자 120,000개를 생성하여 계산을 수행하였다. Fig.2에 나타나 있듯이, $x=Cy^2$ (R값은 고정시키고 L값만 변화시킴)으로 표시되는 포물형 반사판 C=0.25, 0.5, 0.75, 1.0에 대해서 초기 입사충격파의 전파마하수 M_s=1.1~1.3까지 변화시켰다. 경계조건으로는 관의 입구에 유입 / 유출조건, 관의 벽면과 반사판에 slip-wall 조건, 중심축에 축대칭 조건을 적용하였다.

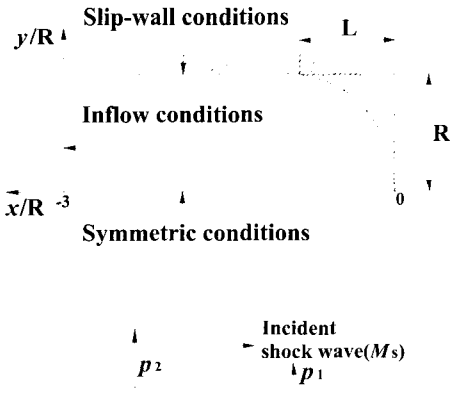

Fig.1 Computational flow field and boundary conditions

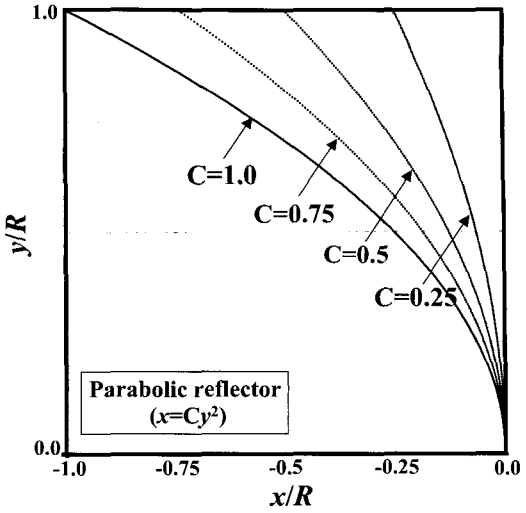

Fig.2 Geometries of parabolic reflectors

3. 결과 및 고찰

Fig.3에는 M_s=1.1, C=0.25의 경우, 무차원 시간 t'의 경과에 따른 충격파 포커싱 과정을 나타내었다. 여기에서 무차원 시간 t'은 충격파가 관 내부에서 반사판을 향해 전파하는 순간부터의 시간을 의미한다. 위의 그림은 Izumi, K.등의 실험[15]에 의해 얻어진 쉴리렌 가시화 사진을 나타내며, 아래의 그림은 본 수치계산을 통해서 얻어진 쉴리렌 이미지 사진을 나타내었다. 그림(a)는 초기 입사충격파가 반사판의 양쪽 모서리에 도달하는 순간을 나타낸 것이다. t'=0.005일 때, 반사판의 양쪽 모서리에서 반사/굴절된 충격파는 반사판의 중심을 향해서 전파하며, 반사판의 중심에서 완전히 반사된 충격파가 다시 상류방향으로 전파한다. 시간이 경과하여 t'=0.010일 때, 충격파 포커싱이 발생한다. 충격파 포커싱 이후에는 반사판의 양쪽 모서리에서 반사/굴절된 충격파는 반사판의 중심축을 따라서 마하반사(Mach reflection)를 하며, 중심축상에는 마하스템(Mach stem)이 나타난다. 본 수치해석의 쉴리렌 이미지 사진은 실험[15]의 쉴리렌 가시화 사진과 잘 일치한다.

Fig.4에는 M_s=1.1, C=0.5의 경우, 무차원 시간 t'의 경과에 따른 충격파 포커싱 과정을 나타내었다. 그림(b)에서 T는 삼중점(triple point)을 나타낸다. t'=0.009일 때, 충격파 포커싱이 발생한다. 충격파 포커싱 이후에는 반사판의 양쪽 모서리에서 발생한 반사/굴절된 충격파는 중심축에서 서로 교차하며, 그 배후에서는 삼각형 모양의 루프와 둥근 굴절 충격파가 형성된다.

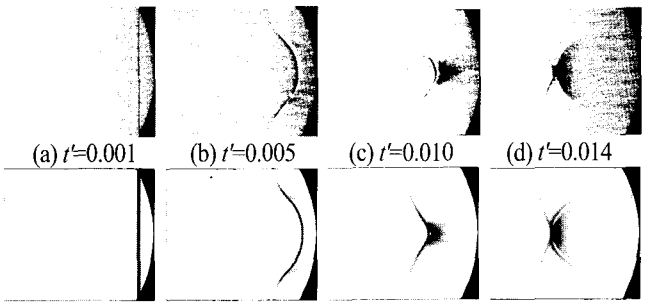

Fig.3 Measured and predicted Schlieren images (M_s=1.1, C=0.25)

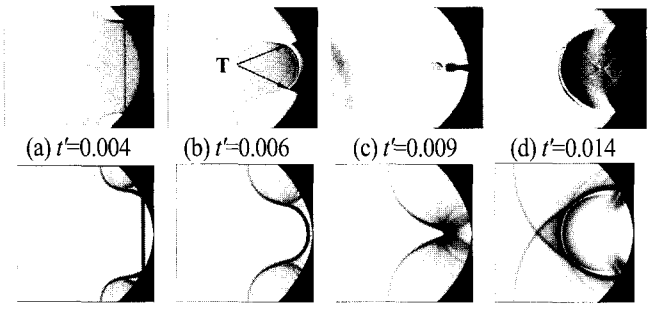

Fig.4 Measured and predicted Schlieren images (M_s=1.1, C=0.5)

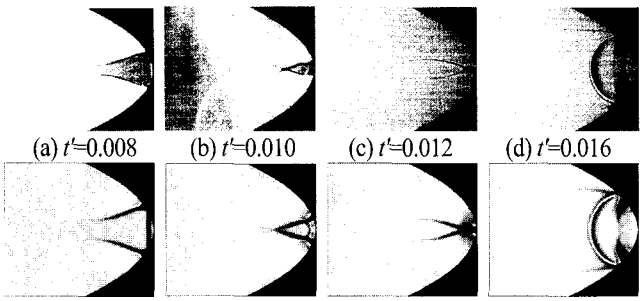

Fig.5 Measured and predicted Schlieren images (M_s=1.1, C=1.0)

Fig.5에는 M_s=1.1, C=1.0인 경우, 무차원 시간 t'의 경과에 따른 충격파 포커싱 과정을 나타내었다. 그림(a)에서 초기 입사충격파가 반사판의 모서리에 도달할 때 발생하는 반사/굴절된 충격파는 반사판의 중심축을 향해서 전파한다. t'=0.010일 때, 모서리에서 반사/굴절된 충격파는 빠르게 성장하여 충격파 포커싱이 발생하기 전에 중심축상에서 서로 교차하며, 그 배후에서는 2개의 삼중점이 명확하게 관찰된다. 시간이 경과하여 t'=0.012일 때, 2개의 삼중점이 반사판의 중심축에서 합쳐지는 순간에 충격파 포커싱이 발생한다. 충격파 포커싱 이후에는 배후에서 둥근 굴절 충격파가 형성되며, 반사판 벽면에서 마하반사가 나타난다.

Fig.3 ~ 5로부터 충격파 포커싱의 유형을 크게 3가지 패턴으로 분류할 수 있다. C=0.25(Fig.3)의 경우, 반사판의 양쪽 모서리에서 발생한 반사/굴절된 충격파는 충격파 포커싱 전후에 서로 교차하지 않는다. C=0.5(Fig.4)의 경우, 반사/굴절된 충격파는 충격파 포커싱이 발생하기 전에는 중심축상에서 교차하지 않지만, 충격파 포커싱 이후에는 서로 교차하여 삼각형 모양의 루프를 형성시킨다. C=1.0(Fig.5)의 경우, 반사/굴절된 충격파는 충격파 포커싱 전후 모두 반사판 중심축상에서 서로 교차한다. 따라서, 반사판의 깊이 변화에 의해 충격파 포커싱의 유형이 달라진다는 것을 알 수 있다.

Fig.6에는 M_s=1.2인 경우, C의 변화에 따른 충격파 포커싱이 발생하는 순간을 나타내었다. 그림에서 C=1.0인 경우에는 충격파 포커싱 이전에 반사/굴절된 충격파가 중심축상에서 서로 교차한다. C의 값이 커질수록, 충격파 포커싱이 발생하는 위치는 반사판의 중심점 근처로 이동한다.

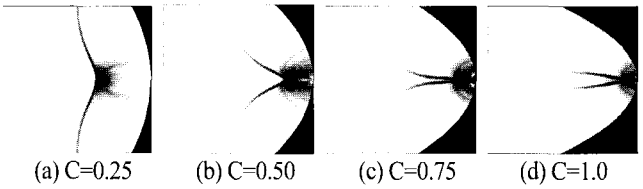

Fig.6 Measured and predicted Schlieren images (M_s=1.2)

Fig.7에는 M_s=1.2인 경우, 반사판의 중심축을 따르는 최대 압력값의 분포를 나타내었다. 횡축에는 반사판의 중심점으로부터 거리 x/R을 나타내었고, 종축에는 최대 압력값 p를 대기압 p_1으로 무차원한 값 p/p_1을 나타내었다. 여기에서 x/R=0은 반사판 중심점을 의미한다. C=0.25인 경우를 보면, 반사판 중심점에서 멀어질수록 최대 압력값 p/p_1이 점점 증가하여 x/R=-0.72인 지점에서 최대값을 가진 후, 서서히 감소하는 경향을 나타낸다. 즉, 최대값이 나타나는 x/R=-0.72인 지점에서 충격파 포커싱이 발생한다. 이러한 경향은 다른 C값에 대해서도 정성적으로 유사하게 나타난다. 그림으로부터 C값이 증가할수록 충격파 포커싱에 의해 발생하는 최대 압력값 p/p_1은 커지며, 충격파 포커싱이 발생하는 위치(gasdynamic focus)는 반사판 중심점 근처로 이동한다.

Fig.8에는 M_s와 C의 값이 충격파 포커싱에 의해 발생하는 최대 압력값 p_{max}에 미치는 영향을 나타내었다. C=0.25인 경우를 보면, M_s가 증가할수록 최대 압력값 p_{max}/p_1은 증가한다. 이러한 경향은 다른 C값에 대해서도 정성적으로 유사하게 나타난다. 일정한 M_s에 대해서 C값이 증가할수록, 즉 반사판의 깊이가 깊어질수록 최대 압력값 p_{max}/p_1은 증가한다.

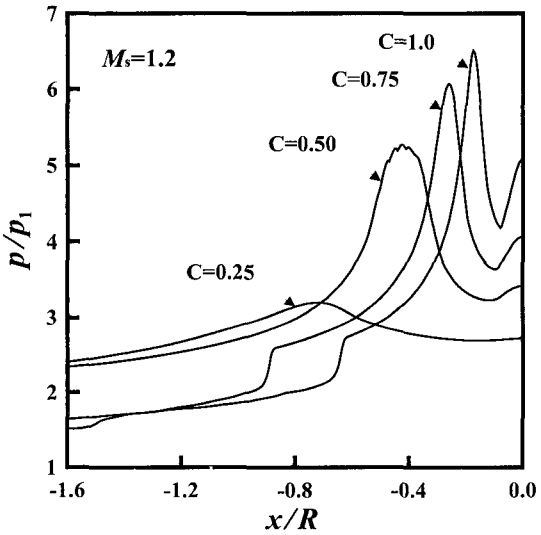

Fig.7 Pressure variation along the centerline of reflector (M_s=1.2)

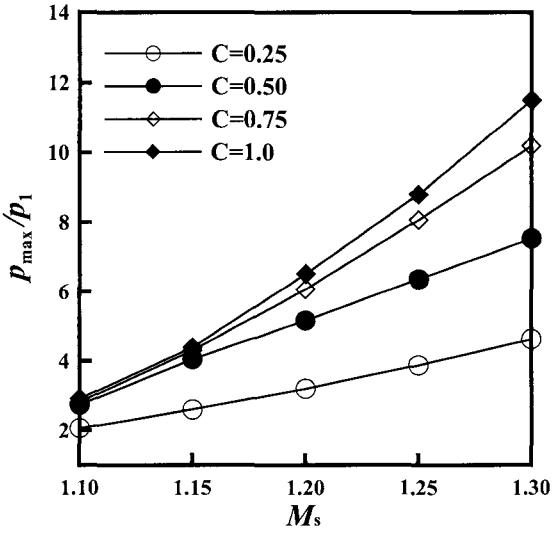

Fig.8 Peak pressure vs M_s

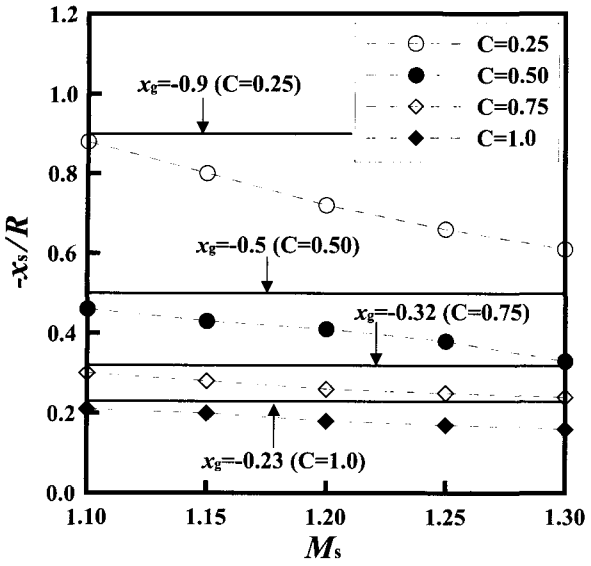

Fig.9 Gasdynamical focus vs M_s

Fig.9에는 M_s와 C의 값이 기체역학적 포커싱 위치 x_s에 미치는 영향을 나타내었다. 횡축에는 M_s를 나타내고, 종축에는 기체역학적 포커스 위치 x_s를 R로 무차원한 값 x_s/R를 나타내었다. 그림에서 x_g는 반사판의 형상에 의해서 결정되는 기하학적 포커스 위치를 나타낸다. C=0.25인 경우, x_s는 M_s가 증가할수록 작아진다. 이것은 반사판의 중심점과 가까운 지점에서 충격파 포커싱이 발생한다는 것을 의미한다. 모든 M_s에 대해서 x_s는 x_g에 비해 작은 값을 가지며, M_s가 증가할수록 x_s와 x_g의 차이는 점점 커진다. 이러한 경향은 다른 C값에 대해서도 유사하게 나타나며, C값이 증가할수록 x_s와 x_g의 값은 작아진다.

4. 결 론

본 연구에서는 초기 입사충격파가 포물형 반사판에서 반사될 때 발생하는 충격파 포커싱의 유동특성에 대해서 Harten-Yee의 TVD법을 이용하여 수치해석을 하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 포물형 반사판의 깊이 변화에 의해, 충격파 포커싱은 크게 3가지 유형으로 분류할 수 있다.

(a) 반사판의 양쪽 모서리에서 반사/굴절된 충격파가 충격파 포커싱 전후 모두 반사판 중심축상에서 교차하지 않는 경우

(b) 반사/굴절된 충격파가 충격파 포커싱 이후에만 반사판 중심축상에서 교차하는 경우

(c) 반사/굴절된 충격파가 충격파 포커싱 전후 모두 반사판 중심축상에서 교차하는 경우

2. 충격파 포커싱에 의해 발생하는 최대 압력값과 기체역학적 포커스는 초기 입사충격파의 마하수와 포물형 반사판의 깊이에 크게 의존한다.

3. 초기 입사충격파가 강해질수록 기체역학적 포커스와 기하학적 포커스의 차이는 커지며, 약한 충격파일 경우에는 서로 근접한 값을 갖는다.

후 기

이 논문은 2002년 한국과학재단 신진연구자 연수지원사업 (과제번호 KOSEF 2001-1-30500-003-3)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

[1] Chisnell, R. F., "The Motion of a Shock Wave in a Channel with Application to Cylindrical and Spherical Shock Wave," Jour. Fluid Mechanics, Vol.2 (1957), pp.286.

[2] Whitham, G. B., "On the Propagation of Shock Waves through Regions of Non-uniform Area or Flow," Jour. Fluid Mechanics, Vol.2 (1959), pp.337.

[3] Liang, S. M., Wu, L. N. and Hsu, R. L., "Numerical Investigation of Axisymmtric Shock Wave Focusing over Paraboloidal Reflector," Shock Waves, Vol.9 (1999), pp.367~379.

[4] Kowalczyk, P., Platkowski, T. and Walus, W., "Focusing of a Shock Wave in a Rarefied Gas," Shock Waves, Vol.9 (2000), pp.77~93.

[5] Bartenev, A. M., Khomik, S. V., Gelfand, B. E., Gronig, H. and Oliver, H., "Effect of Reflection Type on Detonation Initiation at Shock Wave Focusing," Shock Waves, Vol.10(2000), pp.205~215.

[6] Gelfand, B. E., Khomik, S. V., Bartenev, A. M., Medvedev, S. P., Gronig, H. and Oliver, H., "Detonation and Deflagration Initiation at the Focusing of Shock Waves in Combustible Gaseous Mixture," Shock Waves, Vol.10 (2000), pp.197~204.

[7] Shugaev, F. V., Serov, A. O., Shtemenko, L. S., Kishige, H. and Nishida, M., "Formation of a Jet and Vortices behind a Shock Wave Reflected from a Concave Body," Shock Waves, Vol.9 (1999), pp.31~35.

[8] Loske, A. M., Prieto, F. E., Zavala, M. L., Santana, A. D. and Armenta, E., "Repeated Application of Shock Waves as a Possible Method for Food Preservation," Shock Waves, Vol.9 (1999), pp.49~55.

[9] Kim, H. D., Kweon, Y. H., Setoguchi, T. and Matsuo, S., "A Study on the Focusing Phenomenon of Weak Shock Wave," Jour. IMechE (2002, in press).

[10] Sturtevant, B. and Kulkarny, V. A., "The Focusing of Weak Shock Waves," Jour. Fluid Mechanics, Vol.73, Part 4 (1976), pp.651~671.

[11] Jiang, Z., Takayama, K., Moosad, K. P. B., Onodera, O. and Sun, M., "Numerical and Experimental Study of a Micro-Blast Wave Generated by Pulsed-Laser Beam Focusing," Shock Waves, Vol.8 (1998), pp.337~349.

[12] Kuwahara, M., Ioritani, N., Kambe, K., Orikasa, S. and Takayama, K., "Anti-Miss-Shot Control Device for Selective Stone Disintegration in Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy," Shock Waves, Vol.1 (1991), pp.145~148.

[13] Delius, M., "Medical Applications and Bio-effects of Extracorporeal Shock Waves," Shock Waves, Vol.4 (1994), pp.55~72.

[14] Hasebe, T., Takenaga, Y., Kakimoto, H. and Imaida, Y., "High Strain Rate Forming using an Underwater Shock Wave Focusing Technique," Jour. Materials and Processing Technology, Vol.85 (1999), pp.194~197.

[15] Izumi, K., Aso, S. and Nishida, M., "Experimental and Computational Studies Focusing Processes of Shock Waves Reflected from Parabolic Reflectors," Shock Waves, Vol.3 (1994), pp.213~222.

[16] Yee and Harten, C., "Upwind and Symmetric Shock Capturing Schemes," NASA TM-89464 (1987).