

## 환형 관출구로부터 방출되는 약한 충격파에 관한 연구

권용훈<sup>†</sup> · 이동훈\* · 김희동\*\*

### Study of the Weak Shock Wave Discharged from an Annular Tube

Yong-Hun Kweon · Dong-Hoon Lee · Heuy-Dong Kim

#### Abstract

The shock wave discharged from an annular duct leads to very complicated flow features, such as Mach stem, spherical waves, and vortex rings. In the current study, the merging phenomenon and propagation characteristics of the shock wave are numerically investigated using a CFD method. The Harten-Yee's total variation diminishing (TVD) scheme is used to the unsteady, axisymmetric, two-dimensional, compressible Euler equations. The Mach number of incident shock wave  $M_s$  is varied in the range below 2.0. The computational results are visualized to observe the major features of the annular shock waves discharged from the tube. On the symmetric axis, the peak pressure produced by the shock wave and its location depend upon strongly the radius of the annular tubes. A Mach stem is generated along the symmetric axis of the annular tubes.

**Key Words :** Compressible Flow(압축성 유동), Unsteady Flow(비정상 유동), Shock wave(충격파), Shock Tube(충격파 관), Mach Stem(마하스텝), Mach Reflection(마하반사)

#### 1. 서론

최근에는 충격파와 관련된 충격성 소음문제<sup>(1)</sup>와 는 별도로 충격파를 공업적으로 유용하게 이용하 려는 기술<sup>(2)</sup>이 중요한 공학적 과제로 부상하고 있 다. 이러한 이유로, 비정상 충격파에 관해서는 많 은 연구들이 실험적, 수치해석적으로 수행되어 왔 다. 그러나, 이들의 대부분은 단순한 단면형상을 가진 단일관이나 단면형상을 변화시킨 경우에 대 한 연구들이며, 복수의 관이나 환형관과 같이 특 수한 형태의 관출구로부터 방출되는 충격파의 거 동에 관한 연구들은 공학적으로 다수 응용되고 있

음에도 불구하고, 체계적으로 연구되지 않았다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서는 환형관을 대상으로, 2 차원 축대 칭 비정상 Euler 방정식에 Harten-Yee's 의 TVD 법 을 적용한 수치해석을 통하여 동축 환형 관출구에 서 방출되는 펄스파의 유동특성을 상세하고 체계 적으로 조사하였다. 본 연구로부터 얻어진 수치해 석 결과로 시간경과에 따른 유동장의 변화를 가시 화 하였으며, 다른 유용한 수치해석 결과<sup>(4)</sup>와 비 교하여 본 수치해석의 타당성을 검증하였다.

#### 2. 수치해석 방법

본 연구에서는 2 차원 비정상 압축성 Euler 유동 방정식에 Harten-Yee's 의 TVD 법을 적용하여 수치 해석 하였다. Fig.1 과 2 는 본 수치해석에 적용된 계산영역, 경계조건 및 초기조건을 나타낸다. 계산 영역은 환형관 내부와 외부영역으로 구성되었다.

<sup>†</sup> 안동대학교 기계공학부  
E-mail : kimhd@andong.ac.kr

\* 서울산업대학교 기계공학과

\*\* 안동대학교 기계공학부

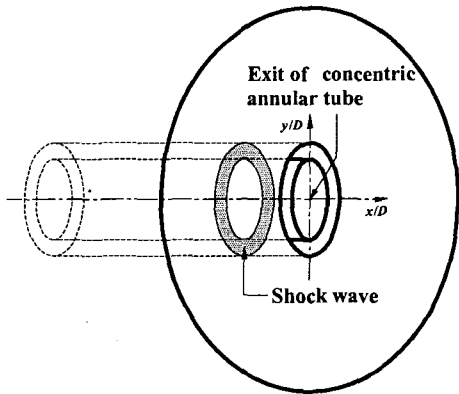


Fig. 1 Schematic of computational flow field and the exit of an annular tube

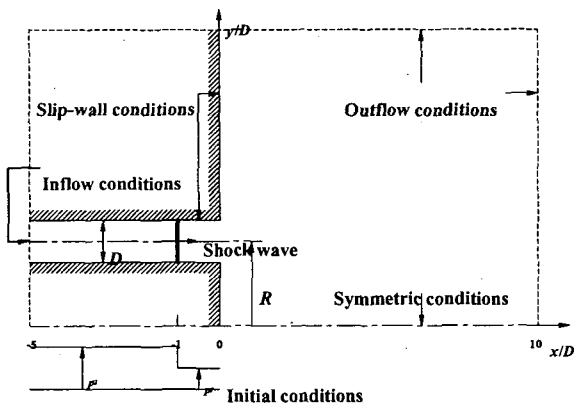


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

유동장은 대칭축을 기준으로 상하 대칭이므로, 수치계산은 상반부에 대해서만 수행하였다. 그림에서  $R$  은 환형관의 내경,  $D$  는 환형관의 두께라고 정의한다. 경계조건으로는 관의 입구에 유입조건, 모든 벽면에 대해서 slip-wall 조건, 하류경계에는 유출조건을 적용하였다. 초기조건으로는 마하수  $M_s$  를 갖는 충격파가  $x/D = -1.0$  에서 관출구를 향해서 전파하도록 설정하였다. 본 연구에서는 초기 충격파의 마하수  $M_s = 1.1 \sim 2.0$ ,  $R/D = 1.5 \sim 3.0$  범위에서 수치계산을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig.3 는  $R/D = 2.0$  인 경우, 무차원 시간  $t'$  의 경과에 따른 유동장 변화를 나타낸 등압력 선도이다. 여기에서 무차원 시간  $t'$  는 관내의 충격파가 관출구를 향해서 이동하는 순간부터의 시간을 의미한다. Fig.2 로부터,  $t' = 0.42$  일 때, 관내를 전파하는

충격파는 환형관 출구로부터 방출하여 하류방향으로 전파하기 시작한다.  $t' = 1.67$  인 경우, 하류방향으로 전파하는 충격파는 대칭축상에서 만나게 되며, 급격한 압력상승을 발생시킨다. 대칭축상에서의 충격파는 초기의 정상반사(regular reflection)에서 마하반사(Mach reflection)로 천이하며, 관출구 근처에서는 와류의 발달로 인해 복잡한 유동장이 형성된다.  $t' = 2.50$  일 때, 대칭축상에서 충격파의 집중(focusing)으로 인하여 발생한 반사충격파가 발달하면서 관출구 근처의 와류와 상호간섭하며, 바깥방향으로 전파한다. 반사충격파에 의해서 대칭축상에서 나타나는 마하반사는 수직형태에서 둥근형태로 바뀌면서 초기 충격파보다 더 빠르게 하류방향으로 전파한다.

Fig.3 와 비교해 보면, Fig.4 의  $R/D = 3.0$  인 경우에서는 전파형태는 유사하지만, 환형관의 반경  $R/D$  의 증가로 인해서 대칭축상에서 충격파의 집중은 늦어진다.

Fig.5 는  $R/D = 2.0$  일 때,  $M_s$  의 변화에 따른 유동장의 변화를 나타낸 등압력 선도이다. 그림으로부터 관출구 근처에서 와류와 반사충격파 등의 간섭으로 인하여 형성되는 유동장은  $M_s$  가 증가할수록 더 복잡해진다는 것을 관찰할 수 있다. 당연한 결과이지만,  $M_s$  가 클수록 충격파는 하류방향으로 더 빠르게 전파된다.

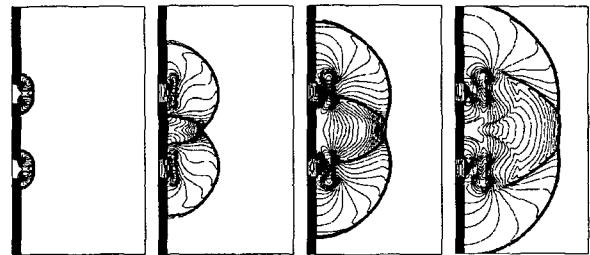


Fig. 3 Pressure contours for  $R/D = 2.0$  ( $M_s = 1.5$ )

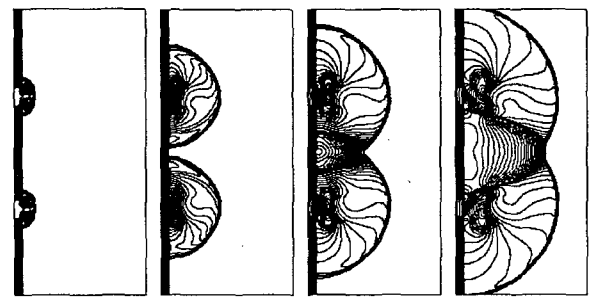
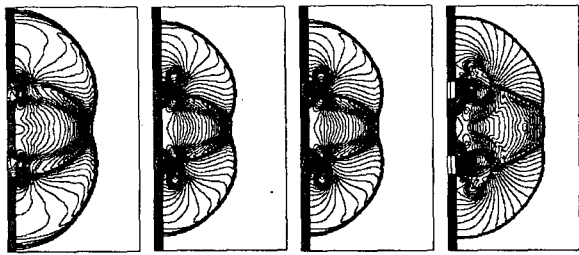
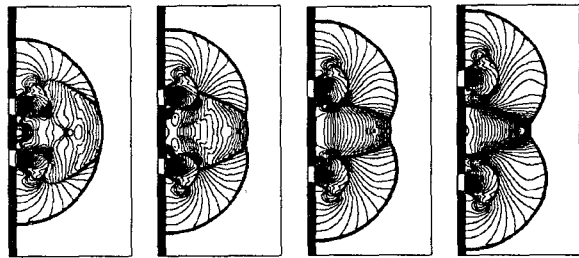


Fig. 4 Pressure contours for  $R/D = 3.0$  ( $M_s = 1.5$ )



(a)  $M_s=1.25$  (b)  $M_s=1.5$  (c)  $M_s=1.75$  (d)  $M_s=2.0$   
 $(t'=3.16)$   $(t'=2.49)$   $(t'=2.78)$   $(t'=2.41)$

Fig. 5 Pressure contours for  $R/D=2.0$



(a)  $R/D=1.5$  (b)  $R/D=2.0$  (c)  $R/D=2.5$  (d)  $R/D=3.0$

Fig. 6 Pressure contours at  $t'=2.41$  ( $M_s=2.0$ )

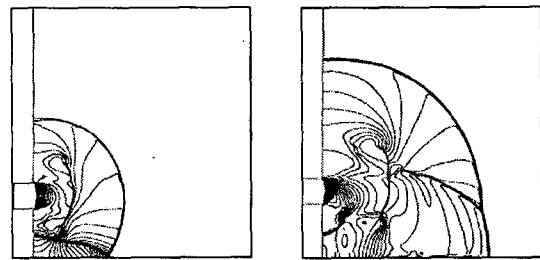
Fig.6 에는  $M_s=2.0$ ,  $t'=2.41$  일 때,  $R/D$  의 변화가 유동장에 미치는 영향을 나타낸다.  $R/D=1.5$  인 경우, 대칭축상의 마하스텝은 2 차원 평면 wedge 에서 발생하는 평면 마하스텝(planar Mach stem)<sup>(5)</sup>과 다른 동근형태로 발달하며, 초기 충격파보다 빠른 속도로 하류방향으로 전파하여 거의 단일 충격파와 유사한 형태를 하고 있다.  $R/D$  의 값이 커질수록 대칭축상에서 충격파의 집속은 늦게 발생하지만, 충격파의 집속, 반사충격파의 형성 및 상호 간섭현상은 더 강하게 일어난다. 그림(a)~(d)로부터, 초기 충격파의 배후영역과 관출구로부터 발생한 팽창파 영역 사이의 압력차로 인해서 고리 모양의 2 차 충격파(secondary shock wave)가 발생하며, 이것은 전단층(shear layer)을 따라서 발달한 와류에 연결된다. 그림(a)와 (b)는 대칭축상에서 발생한 반사 충격파와 2 차 충격파 및 와류가 간섭하여 복잡한 유동장을 형성한다.

Fig.7 에는  $M_s=2.0$  이고  $R/D=2.5$  인 경우, 문헌(4)의 수치계산 결과와 본 수치계산 결과를 비교하였다. 두 결과는 정확히 동일한 시간에서의 결과는 아니지만, 시간경과에 따른 초기 충격파의 전파형태, 마하스텝의 성장 및 대칭축상에서의 반사충격파의 거동은 대체로 잘 일치한다. 그러나, 관출구 근처에서 와류 및 2 차 충격파의 형성과 반사충격파와의 간섭 등의 현상은 다소 상이하게 나타난다.

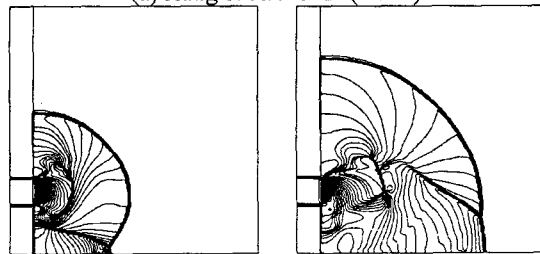
Fig.8 에는  $M_s=2.0$  이고  $R/D=2.5$  인 경우, 대칭축을 따르는 피크압력값의 분포를 나타내었다. 종축의  $p_{peak}$  는 피크압력값,  $x/D$  는 관출구를 의미한다.

문헌(4)의 결과와 비교해 볼 때,  $x/D < 2.5$  에서는 다소 차이가 있으나,  $x/D > 2.5$  에서는 거의 일치하며 전체적으로 유사한 경향을 나타낸다. 특히, 최대 피크압력값과 그 위치는 서로 잘 일치한다.

Fig.9 에는  $M_s$  와  $R/D$  의 변화가 최대 피크압력값의 변화에 미치는 영향을 나타내었다.  $R/D=1.5$  인 경우,  $M_s$  가 증가할수록 최대 피크압력값은 커지며, 다른  $R/D$  에 대해서도 유사한 경향을 나타낸다. 일정한  $M_s$  에 대해서  $R/D$  의 값을 증가시키면 최대 피크압력값은 커진다.  $p_{max}/p_1$  에 대한  $R/D$  의 영향은 약한 충격파에 비해서 강한 충격파일 경우에 현저하다.  $R/D=2.5$  인 경우, 본 수치해석 결과는 기호 "O"으로 표시된 문헌(4)의 결과와 잘 일치한다.



(a) Jiang et al.'s CFD (Ref.4)



(b) Present CFD

Fig. 7 Pressure contours for  $R/D=2.5$  ( $M_s=2.0$ )

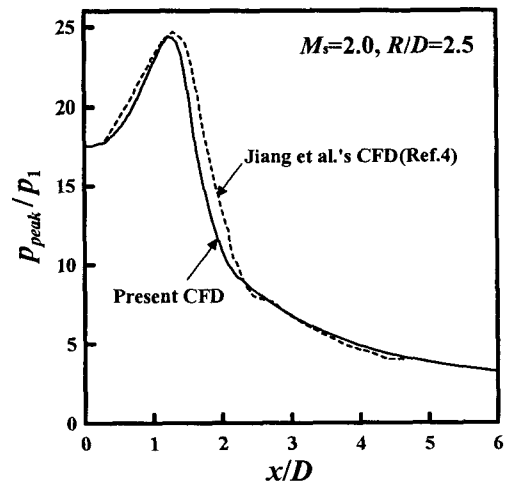


Fig. 8 Variation of peak pressure on the symmetric axis for  $R/D=2.5$  ( $M_s=2.0$ )

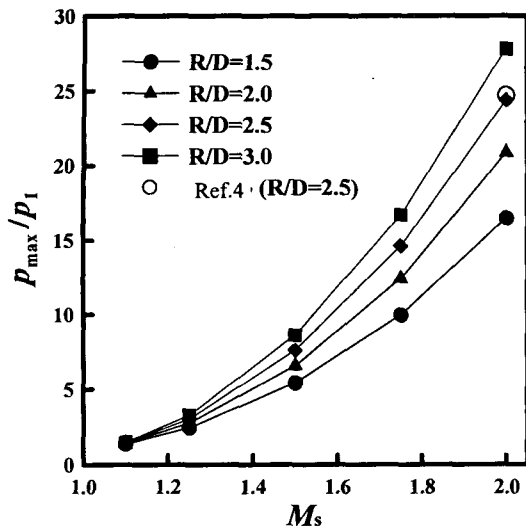


Fig. 9 Maximum peak pressure vs  $M_s$

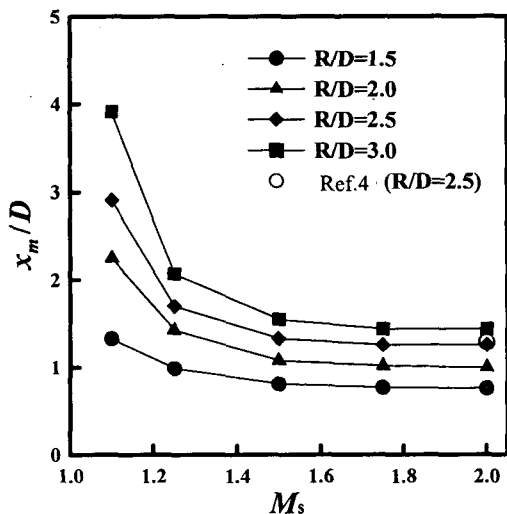


Fig. 10 Location of maximum peak pressure vs  $M_s$

Fig.9 의 결과들은  $R/D$  3.0 인 비교적  $R/D$  의 변화가 작은 경우에 해당한다. 만약  $R/D$  의 값을 계속해서 증가시킨다면, 방출된 충격파가 대칭축상에서 충돌하기까지는 충분히 긴 시간을 필요로 한다. 이 때, 초기 충격파의 강도는 점점 약해지므로, 충격파의 집속에 의한 최대 피크압력값은 오히려 감소하는 경향을 나타낼 것으로 판단된다. 따라서, 이에 대한 보다 명확한 정보를 얻기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다.

Fig.10 에는 초기 충격파의 마하수  $M_s$  와 환형관의 반경  $R/D$  의 변화가 최대 피크압력값의 위치에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 증축은 최대 피크압력값의 위치  $x_m$  을  $D$  로 무차원한 값  $x_m/D$  를 나타낸다.  $R/D=1.5$  인 경우,  $M_s$  가 증가할수록  $x_m/D$  값은 작아지지만,  $M_s$  가 어느 정도 증가하게

되면  $x_m/D$  의 값은 일정값으로 접근하게 된다. 그림으로부터  $x_m/D$  에 대한  $R/D$  의 영향은 초기 충격파의 강도가 약할수록 현저하게 나타난다.  $R/D=2.5$  인 경우, 본 수치해석 결과는 기호 "O"으로 표시된 문헌(4)의 결과와 잘 일치한다.

#### 4. 결 론

1. 본 수치계산을 통해 환형 관출구에서 방출되는 충격파의 전파형태를 가시화할 수 있었으며, 2 차원 평면 wedge 에서의 평면 마하스텝과는 다른 형태의 마하스텝이 발달함을 관찰하였다.
2. 환형관의 반경이 동일할 경우, 초기충격파의 강도가 증가할수록 최대 피크압력값은 증가하며, 초기충격파의 강도가 동일할 경우, 환형관의 반경이 커질수록 최대 피크압력값은 커진다. 환형관의 반경이 최대 피크압력값에 미치는 영향은 초기충격파가 강할수록 현저하게 나타난다.
3. 초기충격파의 강도가 동일할 경우, 환형관의 반경이 커질수록 최대 피크압력값의 위치는 관출구로부터 멀어진다. 한편, 환형관의 반경이 동일한 경우, 초기충격파의 강도를 증가시키면 최대 피크압력값의 위치는 관출구 근처로 이동한다.

#### 후 기

이 논문은 2002 년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

#### 참 고 문 헌

- 1) Raghunathan, S., Kim, H.D. and Setoguchi, T., 1998, "Impulse Noise and Its Control," Progress in Aerospace Sciences, Vol.34, No.1, pp.1~44.
- 2) Smedly, G.T., Phares, D.T. and Flagan, R.C., 1998, "Entrainment Fine Particles from Surfaces by Impinging Shock Wave," Experiments in Fluids, Vol.26, pp.116~125.
- 3) Masaaki, H., Kazuo, M. and Hiroki, H., 1999, "An Interferometric CT for Three-Dimensional Shock Waves Discharged from Two Circular Open Ends," JSME, Series B, Vol.65, No.630, pp.648~653.
- 4) Jiang, Z. and Takayama, K., 1998, "Reflection and Focusing of Toroidal Shock Waves from Coaxial Annular Shock Tube," Computers & Fluids, Vol.27, No.5-6, pp.553~562.
- 5) Ben-dor, G., Mazor, G., Takayama, K. and Igra, O., 1987, "Influence of Surface Roughness on the Transition from Regular to Mach Reflection in Pseudo-Steady Flows," J. Fluid Mech., Vol.176, pp. 333~356.