

< 논문 >

## 충격파-와동 간섭의 파라미터 연구

장세명<sup>†</sup>, 장근식<sup>\*</sup>

(2005년 1월 27일 접수, 2005년 7월 8일 심사완료)

### Parametric Study on Shock-Vortex Interaction

Se-Myong Chang and Keun-Shik Chang

**Key Words:** Shock Wave(충격파), Vortex(와동), Navier-Stokes Simulation(내비어-스톡스 수치 모사), Vortex Model(와류 모델), Parametric Study(파라미터 연구)

#### Abstract

In the idealized model problem of the interaction between a planar travelling shock and a symmetric vortex, the physics of shock distortion and quadrupole sound generation are well known to many researchers. However, the authors have distinguished the weak waves *reflected* and *transmitted* by the complicated photograph images obtained from a shock tube experiment. In this paper, we introduces a parametric study based on Navier-Stokes simulation and Rankin vortex model to see the difference of shock deformation shapes. Four combination of the strength of shock and vortex are respectively selected from a parameter plane of shock and vortex strength extended to the strong vortex region. The result shows clearly discernable wave morphology for the main parameters, which is not yet explicitly mentioned by other researchers.

#### 1. 서론

충격파-와동 간섭은 단순한 모델 문제로서 어떻게 하여 4 극자 소음이 발생하는가 하는 물리적인 의문에 대한 대답뿐만 아니라, 여러 가지 실용적 응용 가능성이 있다.<sup>(1)</sup> Fig. 1에서와 같이 초음속 유동장에 설치된 물체의 후류로부터 발생하는 비선형적인 소음 현상에 대해, 이를 약한 충격파인 마하 파(Mach wave)와 난류 소와동(turbulent eddies)의 간섭으로 해석할 수 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 본 연구 주제는 제트에서의 스크리치 톤

소음 발생 및 충격파-경계층 간섭 등 보다 복잡한 문제들을 이해하기 위한 기초 모형으로서의 의미를 지니고 있다.

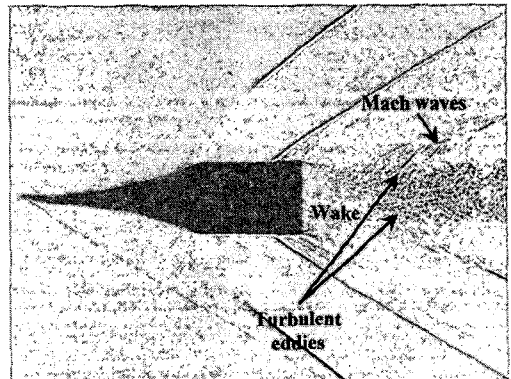


Fig. 1 Interaction of Mach wave and turbulent eddies in the wake of supersonic flow (National Ballistic Laboratory, US Army)

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 군산대학교 기계공학부

E-mail : smchang@kunsan.ac.kr

TEL : (063)469-4724 FAX : (063)469-4727

<sup>\*</sup> 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

충격파-와동 간섭에 의한 음향 발생의 원리에 대하여 현재 학계는 Ellzey 등<sup>(3)</sup>의 이론을 정설로 받아들이고 있다. 즉, 와동의 회전에 의하여 초기에 충격파는 심하게 뒤틀리게 되며(shock distortion), 충격파가 와동 중심을 통과하면서 그 주위 4 극자 음향(quadrupole sound)이 발생하여 전파된다는 것이다. 이 이론은 그 뒤 참고문헌<sup>(4,5)</sup>의 저자들에 의해 지지를 받으면서 그 기반을 넓혀가고 있다. 그러나 그들 모두 어떻게 하여 뒤틀린 충격파가 음향파로 산란되게 되는지 명쾌하게 설명하지는 못했다.

특히 이 이론으로는, 뒤이어 실험적으로 발견된, 충격파-와동 간섭 도중 와동 내에 국소적으로 초음속인 영역이 발생하였을 때, 즉 강한 와동과의 간섭에서 나타나는 부가적인 약한 파동들의 구조를 전혀 설명할 수 없었다.<sup>(6)</sup> 보통 실험 사진에서는 와동 주위 방사상 방향으로 약한 파동들이 나타났다가 사라지고는 한다. 본 논문의 저자들은 참고문헌<sup>(7)</sup>에서 충격파관 실험을 통하여 이러한 약한 파동들의 물리적 의미에 대해 각각 반사파와 관통파라는 가설을 세웠고, 이후의 논문에서 이들이 어떻게 4 극자 구조를 만들어 내는지에 대해 실험과 수치 해석의 비교를 통해 규명할 수 있었다.<sup>(8)</sup>

본 연구에서는 지금까지 충격파-와동 간섭 연구에서 발견된 충격파 변형, 4 극자 음향 발생, 그리고 약한 파동들의 복합 구조 등의 물리 현상이 선택된 파라미터에 대해 어떻게 달라지는지 살펴보기로 한다. 이를 위해 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 풀이하는 모의 실험과 고전적인 Rankin 와류 모델에 기반을 둔 이론적 연구를 통하여 약한 충격파-약한 와동, 강한 충격파-약한 와동, 약한 충격파-강한 와동, 그리고 강한 충격파-강한 와동 등 네 가지 경우에 대한 파동 구조의 차이점을 관찰한다.

## 2. 수치 모사

### 2.1 수치 모사 방법

먼저 2 차원 비정상 압축성 점성 유동에 대한 지배 방정식은 Navier-Stokes 방정식이며, 이를 수치적으로 풀이한다. TVD 유한 체적법과 MUSCL 확장을 통해 시간과 공간 모두에 대해 2 차 이상의 정확도를 갖는 수치 식을 유도한다. 특히 본

연구에서는 QUAG(quadrilateral unstructured adaptive grid) 기법을 이용하여, 충격파와 같이 구배가 큰 파동 근방에 좀더 조밀한 격자들을 분포시켜 세밀한 물리 현상까지도 잡아낼 수 있도록 한다.<sup>(7)</sup>

본 문제에서 경계 조건은 특별히 필요하지 않고, 충격파에 관한 초기 조건으로는 이동 충격파 마하수에 따른 충격파 전후의 압력 비를 적용한다.

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_s^2 - 1) \quad (1)$$

여기에서  $M_s$ 는 교란되지 않은 자유류를 기준으로 한 이동 충격파 마하수이고,  $\gamma$ 는 비열비로 공기의 경우 1.4이다.

### 2.2 와류 모델

한편 와동에 대해서 고전적인 Rankin 와류 모델을 사용하는데, 와동은 반경 방향에 대해 정확히 대칭이라고 생각하고 접선 속도  $V_\theta$ 는 와동 핵의 반경  $r_c$ 에 대해 그 초기 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_\theta = \begin{cases} U_{\max} \frac{r}{r_c}, & r \leq r_c \\ U_{\max} \frac{r_c}{r}, & r \geq r_c \end{cases} \quad (2)$$

즉, 와동 핵의 외부( $r \geq r_c$ )에서는 와도가 일정한 비회전 유동(irrotational flow)을 가정하고, 와동 핵의 반경 이내( $r \leq r_c$ )에서만 엔트로피의 구배를 가지도록 한다. 그러나 반경 방향으로도 에너지 보존 법칙에 의한 단열 조건(adiabatic condition)은 성립하는 것으로 본다.

기존의 연구자들은 위의 식 (2)에서 와류를 외부 유동과 완전히 고립시키기 위하여 인공 항(artificial term)을 첨가하였다. 그러나 이는 오히려 중요한 물리 현상을 발견하는데 방해가 되었기 때문에 본 연구에서는 이를 제거한다. 충격파는 초기에  $x = -20r_c$  지점에서 출발한다. 와류를 고립시키지 않았기 때문에 약간의 오차가 발생하지만 이 정도의 먼 거리에서 그 영향은 그다지 크지 않다. 기존의 연구 및 실험 데이터와 비교한 본 모델의 검증은 참고문헌<sup>(8,9)</sup>에 제시되어 있다.

Table 1 Four cases of interaction

Weak shock Weak vortex <b>(WSWV)</b> $M_s = 1.1,$ $M_{v,max} = 0.58$	Strong shock Weak vortex <b>(SSWV)</b> $M_s = 1.5,$ $M_{v,max} = 0.58$
Weak shock Strong vortex <b>(WSSV)</b> $M_s = 1.1,$ $M_{v,max} = 1.17$	Strong shock Strong vortex <b>(SSSV)</b> $M_s = 1.5,$ $M_{v,max} = 1.17$

2.3 파라미터 설정

본 연구에서 주요 파라미터로 선택한 것은, 식 (1)에서의 이동 충격파 마하수인  $M_s$ 와 다음과 같이 정의할 수 있는 초기 와동의 최대 회전 마하수  $M_{v,max}$ 이다.

$$M_{v,max} = \frac{U_{max}}{\sqrt{\gamma \frac{p_1}{\rho_1}}} \quad (3)$$

여기에서 분모는 초기 조건에서 교란되지 않은 충격파 앞 영역의 자유류 음속이다. 와류의 경우 반경 좌표에 대해 각 지점의 음속이 변하기 때문에 실제로는 이를 고려한 국소 마하수에 의해 유동이 영향을 받지만, 충격파 마하수와 비교하기 위해서 같은 기준 음속을 사용하는 것이다. 이 원칙은 참고문헌(4,5)에서의 방법을 따른 것이다.

이러한 두 가지 파라미터에 대해 Table 1과 같이 네 가지 경우를 선택한다. Fig. 2에서는 본 연구의 파라미터 점들을  $M_s$ 와  $M_{v,max}$ 를 각각 가로축과 세로축으로 하는 파라미터 평면 위에 나타내었다. 지금까지 기존의 계산 연구(3-5)들은 모두 참고문헌(1)의 실험값을 기준으로 하였기 때문에, 주로 약한 와동 영역인  $M_{v,max} < 1$  경우에만 집중되어 왔다. 그러나 강한 와동 영역 ( $M_{v,max} > 1$ )에 대해서 파라미터를 확장시켜 보면, 참고문헌(6-8)에서 관찰되는 약한 파동들인 반사

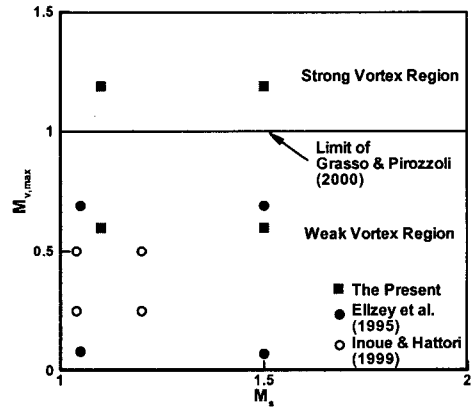


Fig. 2 Extended parameter plane of shock-vortex interaction

파와 관통파를 검출해 낼 수 있을 것으로 예상된다.

3. 해석 결과 및 토의

다음 페이지에 제시된 Fig. 3부터 Fig. 6까지의 그림은 이러한 방법으로 수치 모사한 충격파-와동 간섭의 파라미터 연구 결과이다 (밀도 분포). 각각의 그림에서 충격파-와동 간섭은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- (a) 충격파 변형 (shock distortion)
- (b) 충격파 분리 (shock separation)
- (c) 충격파-충격파 간섭 (shock-shock interaction)
- (d) 음향 방사 (sound radiation)

먼저 입사 충격파( $I$ , incident shock)는 시계 방향 와동의 회전에 의하여 상반부는 가속(순풍)되고 하반부는 감속(역풍)된다. 이러한 전파 속도의 차이에 의해 충격파는 변형되고, 이중 가속된 충격파( $A$ , accelerated shock)가 와동 중심( $V$ , vortex center)을 먼저 통과함으로써 상하반부의 충격파가 분리된다.

분리된 충격파는 서로 교차하면서, 경우에 따라서는 마하 충격파(Mach stem)를 형성하며 두개의 삼중점(triple point)과 이에 연결된 미끄럼선( $S$ ,

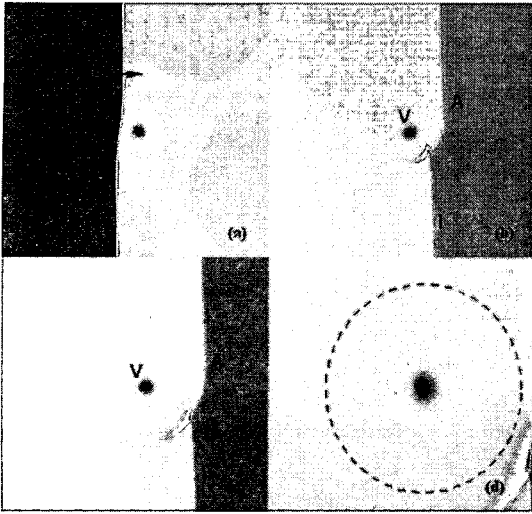


Fig. 3 Weak shock and weak vortex interaction (WSWV)

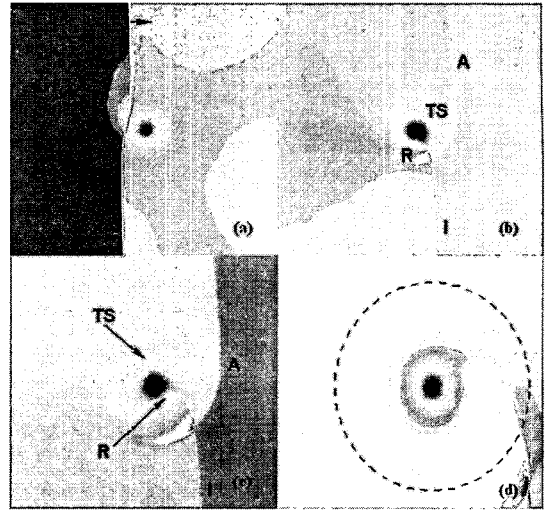


Fig. 5 Weak shock and strong vortex interaction (WSSV)

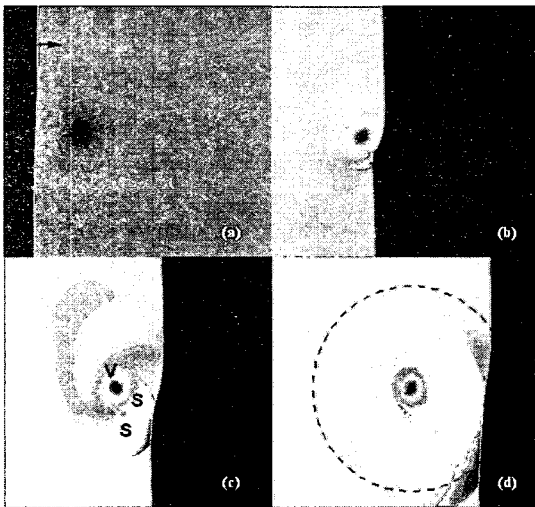


Fig. 4 Strong shock and weak vortex interaction (SSWV)

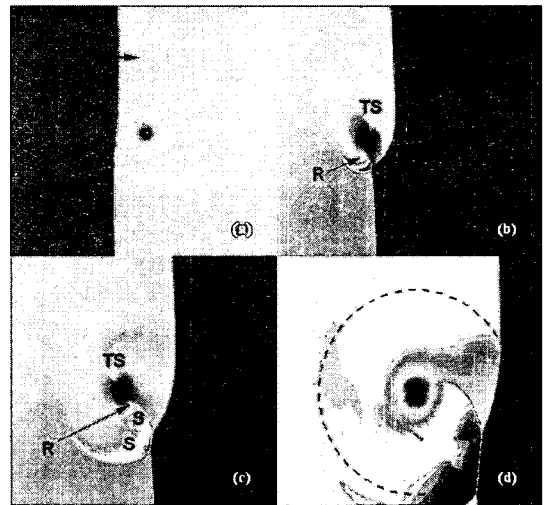
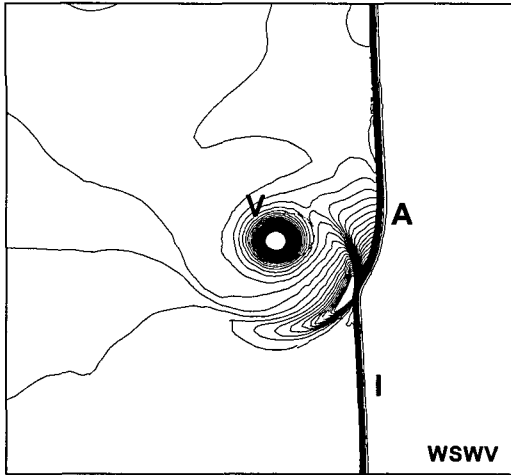


Fig. 6 Strong shock and strong vortex interaction (SSSV)

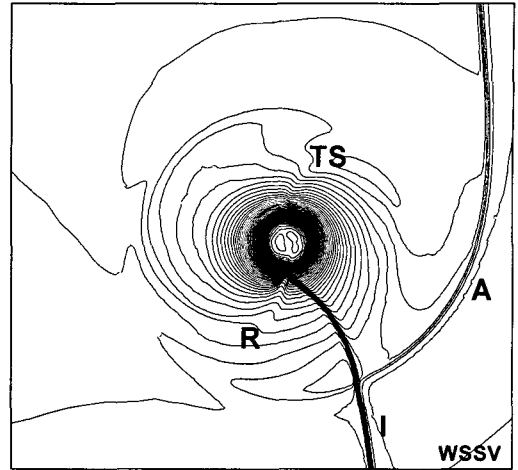
slip line)의 구조를 보이기도 한다. 마지막으로 충격파가 와동으로부터 멀어지면서 이러한 파동들은 음향파로 산란되어 간다.

강한 와동과의 간섭일 경우 (Fig. 5, 6), 입사 충격파(I)는 와동 중심에 상대적으로 긴 시간동안 붙잡혀 있으며, 그 결과 와동 경계면에서 반사파(R, reflected wave)와 와동의 중심을 꿰뚫는 관통파(TS, transmitted shock)를 발생시킨다.

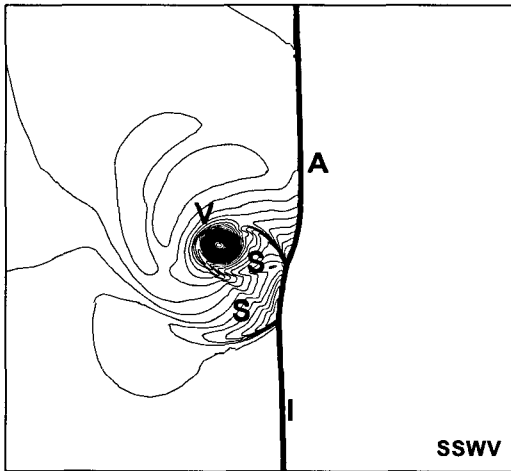
위에서 각 그림의 (d)에서 이러한 차이점은 두드러진다. 그림에서 점선은 중심으로부터  $10r_c$  지점을 나타낸다. 와동과 충격파 모두가 약할 경우(Fig. 3), 와동은 대칭 형태를 유지하면서 음향파를 발생시킨다. 그러나 충격파의 강도가 강해지면 와동은 타원형으로 찌그러지고(Fig. 4), 반대로 와동 강도가 증가하면 반사파와 관통파같은 약한 파동이 발생하는 것이다(Fig. 5, 6).



(a) Weak shock, Fig. 3(c)

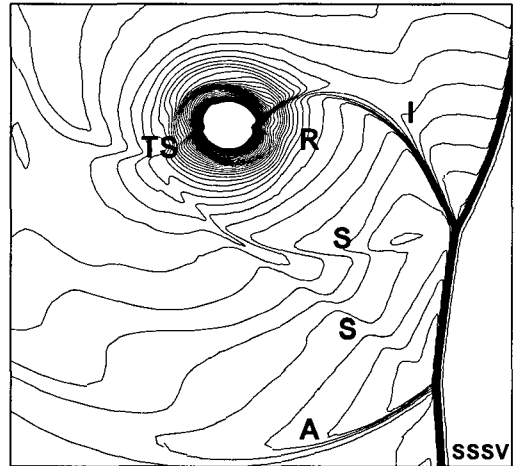


(a) Weak vortex, Fig. 5(c)



(b) Strong shock, Fig 4(c)

Fig. 7 Effect of shock strength



(b) Strong vortex, Fig. 6(d)

Fig. 8 Effect of vortex strength

#### 4. 각 파라미터의 영향

##### 4.1 충격파 강도

Fig. 7(a), (b)에서 상반부의 가속된 충격파(A)와 하반부의 감속된 충격파(I)는 서로 교차하는데, 약한 충격파의 경우 두 파동이 단순 교차하는 형태를 취하는 반면(regular type), 충격파의 강도가 강해지면 충격파-충격파 간섭을 통하여 마하 충격파를 생성한다(Mach type). 마하 충격파가 발생하면 원래의 충격파들과 함께 삼중점을 이루는데, 여기에서 나온 미끄럼선(S)들은 함께 와동에 탈리면서 나선형(spiral)이 된다. 또한 와동도 원

형이 아닌 타원형을 이룬다.

강한 충격파의 경우, 마하 충격파가 생김으로 인하여 원래의 평면 형태로 복원되는 시간을 훨씬 더 단축시킬 수 있다[Fig. 4(c), (d) 및 Fig. 6(c), (d) 참조].

이러한 Fig. 7(a), (b)의 파동 패턴은 Fig. 9의 (1), (2)번에서 개념도로 제시되고 있다.

##### 4.2 와동 강도

Fig. 8(a), (b)에서 강한 와동의 존재는 감속된 입사 충격파(I)를 더 오랜 시간 동안 와동 중심에 잡아놓음으로서 와동 경계면에서의 반사와 와동

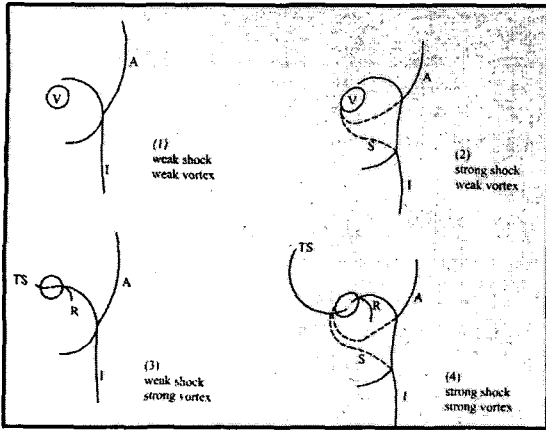


Fig. 9 Schematic of this parameter study

중심으로의 투과 현상을 발생시킨다.

참고문헌<sup>(7,8)</sup>의 실험 결과는 바로 Fig. 8(a)의 파라미터 영역에 있다. 입사 충격파가 와동 중심을 투과한다는 증거는 와동 핵의 등밀도선이 두 부분으로 나뉘어 있다는 사실로부터 확인할 수 있다[Fig. 8(a) 및 Fig. 9의 (3)번 참조]. 한편 강한 충격파와 강한 와동이 간섭하는 Fig. 8(b)에서는 지금까지 열거한 모든 물리 현상들을 한꺼번에 관찰할 수 있어 매우 흥미롭다[Fig. 9의 (4)번 참조].

5. 결 론

본 연구에서는 Navier-Stokes 수치 모사와 Rankin 와류 모델에 입각한 충격파-와동 간섭의 수치 모델을 개발한 다음, 충격파와 와동의 강도를 각각 파라미터로 하는 인자 해석을 실시하였다. 기존의 연구자들이 미처 관심을 갖지 못했던 국소적으로 초음속 유동장이 존재하는 강한 와동 영역까지 탐구 범위를 넓히었다.

충격파의 강도는 충격파-충격파 간섭의 형태와 와동의 변형에 관계한다. 약한 충격파의 경우 정상 형태의 모습을 보이지만, 강한 충격파의 경우에는 마하 충격파를 형성한다. 그리고 충격파가 강해질수록 원형 와동은 변형되어 타원형에 가까워진다.

와동 강도 또한 충격파-와동 간섭에서의 파동 구조를 다양화시킨다. 강한 와동의 경우, 반사파

및 관통파와 같은 약한 파동의 존재가 확인되었다. 이 파동들이 와동 주변을 회전하면서 비대칭적인 4 극자 음향을 발생시킨다.

참고문헌

- (1) Dosanjh, D.S. and Weeks, T.M., 1965, "Interaction of a Starting Vortex as well as a Vortex Street with a Travelling Shock Wave," *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 216~223.
- (2) White, F.M., 1986, *Compressible Flow in Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, 2e, pp. 511~592.
- (3) Ellzey, J.L., Henneke, M.R., Picone, J.M. and Oran, E.S., 1995, "The Interaction of a Shock with a Vortex: Shock Distortion and the Production of Acoustic Waves," *Physics of Fluids*, Vol. 7, No. 1, pp. 172~184.
- (4) Inoue, O. and Hattori, Y., 1999, "Sound Generation by Shock-Vortex Interactions," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 380, pp. 81~116.
- (5) Grasso, F. and Pirozzoli, S., 2000, "Shock Wave-Vortex Interaction: Shock and Vortex Deformations, and Sound Production," *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 13, pp. 421~456.
- (6) Skews, B.W. and Erasmus, C., 2003, "Interaction of Complex Shock Geometry with a Spiral Vortex," *Proceedings of the 5th International Workshop on Shock Wave/Vortex Interaction*, Kaoshiung, Taiwan, pp. 1~6.
- (7) Chang, S.M. and Chang, K.S., 2002, "Shock Reflection and Penetration into a Vortex (I): Experimental Model," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 26, No. 9, pp. 1311~1318.
- (8) Chang, S.M., Chang, K.S. and Lee, S., 2004, "Reflection and Penetration of a Shock Wave Interacting with a Starting Vortex," *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 796~805.
- (9) Chang, S.M. and Chang, K.S., 2004, "Successive Interactions of a Shock Wave with Serially Arranged Vortices," *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 4, pp. 664~670.