

## 충격파-와동 간섭에서 발생하는 반사파 및 관통 충격파

장세명\*, 장근식\*\*, 이수갑\*\*\*

### Reflected Wave and Transmitted Shock in the Shock-Vortex Interaction

Se-Myong Chang\*, Keun-Shik Chang\*\* and Soogab Lee\*\*\*

**Key Words :** Shock-Vortex Interaction (충격파-와동 간섭), Shock Tube Experiment (충격파관 실험), Reflected Wave (반사파), Transmitted Shock (관통 충격파)

#### Abstract

An experimental model and a conceptual model are investigated in this paper with both shock tube experiment and numerical technique. The shock-vortex interaction generated by this model is visualized with various methods: holographic interferometry, shadowgraphy, and numerical computation. In terms of shock dynamics, there are two meaningful physics in the present problem. They are *reflective wave* from the slip layer at the vortex edge and *transmitted shock* penetrating the vortex core. The discussion in this study is mainly focused on the two kinds of waves contributing to the quadrupolar pressure distribution around the vortex center during the interaction.

#### 1. 서론

충격파-와동 간섭은 초음속 제트에서 발생하는 스크리치 톤의 주 소음원으로 알려져 있으며, 충격파-경계층 간섭과 같은 보다 복잡한 문제들을 이해하기 위한 기초 모형으로, 1950년대부터 음향학이나 압축성 유체 과학 분야의 많은 연구자들에 의해 탐구되어 왔다.

Dansarjh 와 Weeks [1-2]는, Schlieren 과 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 이 문제에 정량적으로 접근하는 한편, Lighthill의 음향 유사법 (acoustic analogy)을 사용하여 이론 계산 결과와 실험 결과를 비교하였다. 이들의 실험에서 와동 중심에 대한 방사상의 4극자 음향장이 관찰되었다. Ribner [3] 역시 독창적인 이론 전개를 통하여 이들의 실험 데이터를 정량적으로 검증하였다. 그러나 그의 이론은 음향학에 기초하고 있었기 때문에 충격파와 같은 비선형 파동 근방에서는 잘 맞지 않는다는 단점이 있었다. 최근에 와서 전산 유체 역학 (CFD: computational fluid dynamics)과 전산 공력 음향학 (CAA: computational aeroacoustics)의 발달 덕분에 고립 와동과 충격파의 간섭을 다루는 많은 논문들이 출판되고 있다 [4-6].

특히 참고 문헌 [5]의 저자들은 충격파-와동 간섭이 크게 2 단계로 일어남을 밝혔다. 첫째로 충격파는 주위 유동의 영향을 받아 극도로 변형되고, 둘째로 4극자 음원 (sound source)이 발달하면서 음향파 (sound wave)가 전파된다는 것이다. 따라서 충격-와동의 간섭 문제는 충격파 역학 (shock dynamics)과 음향학 (acoustics) 문제 모두를 포함하고 있다.

본 논문에서는 먼저 간단한 실험 모델을 사용하여 비교적 약한 충격파와 강한 와동을 충돌시키는 연구가 제안되었다. 충격파관 안에 충격파 분리기 (shock splitter)라고 불리는 장치와 이에 연결된 평판을 사용하여, 홀로그래피 간섭법 및 음영 사진법을 이용하여 유동장을 가시화 하고, Navier-Stoke 방정식을 풀이하는 수치 모사를 통해 정량적인 데이터를 얻는다. 또한 간략화된 개념 모델을 사용하여 이 문제에 대한 중요 물리 현상을 추출하고자 한다. 그리하여 충격파-와동 간섭 중, 각각 와동에 대한 충격파의 반사 및 투과에 의해 발생하는 반사파 (reflected wave)와 전달 충격파 (transmitted shock)에 관심을 가지고 해석한다.

#### 2. 실험 모델과 개념 모델

##### 2.1 실험 장치

충격파를 발생시키는 장치로는 KAIST 항공우주공학과가 보유하고 있는 저속 충격파관을 사용하였다 [7]. 본 논문의 실험에서는  $M_s=1.34$  인 약한 충격파를 발생시킨다. Fig. 1은 이러한 실험 장치의 측정 단면 근처를 개괄적으로 보여 준다. 평면 입사 충격파가 충격파 분리기에서 이르면, 상반부에서는 가속되어  $M_{su}=1.41$  이 되고, 하반부에서는 감속되어  $M_{st}=1.22$  가 된다 [8]. 이중 상반부 빠른 충격파가 평탄의 끝단에서 회절되면서 시작 와동 (starting vortex)을 만들고, 이어 도착하는 하반부의 느린 충격파가 이 와동에 충돌하면서 간섭을 일으킨다.

\* 군산대학교 기계공학부, smchang@kunsan.ac.kr

\*\* 한국과학기술원 항공우주공학과, kschang@kaist.ac.kr

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부, solee@plaza.snu.ac.kr

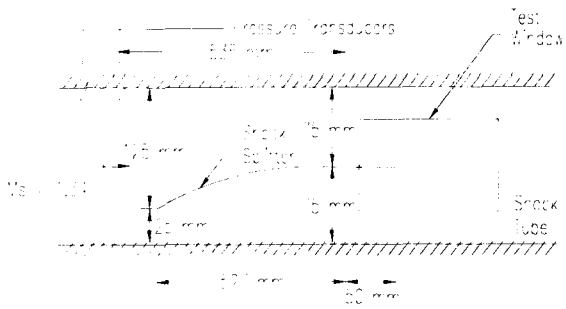
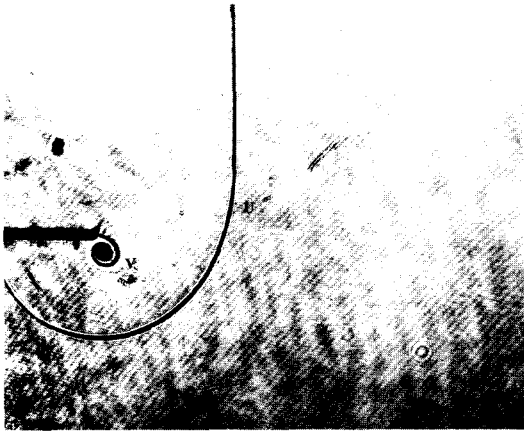
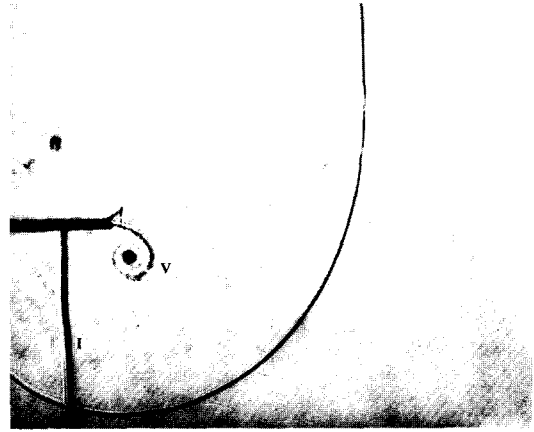


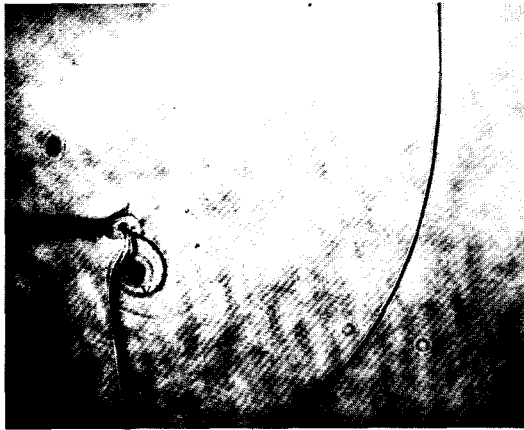
Fig. 1 Experimental apparatus.



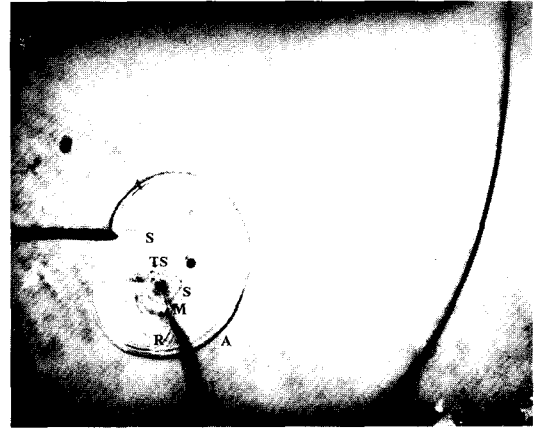
(a) 64  $\mu$ s



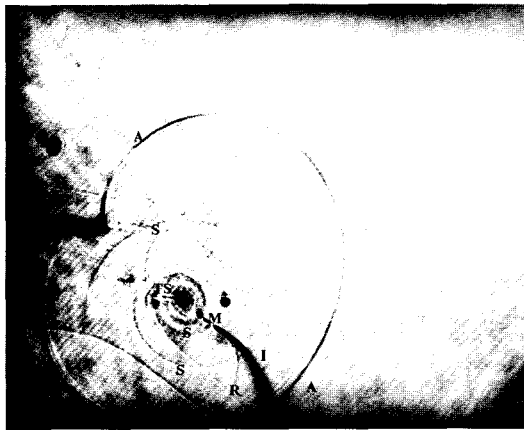
(b) 118  $\mu$ s



(c) 153  $\mu$ s



(d) 200  $\mu$ s



(e) 241  $\mu$ s



(f) 323  $\mu$ s

Fig. 2 Experimental model: shadowgraphs.

## 2.2 계산 방법

충격파관 실험과 비교할 수치 데이터를 얻기 위하여 Navier-Stokes 방정식을 수치 해석한다 [8]. Roe 의 유량 차분 법(flux difference scheme)과 MUSCL (monotone upstream-centered schemes for conservative laws) 확장을 통한 TVD (total variation diminishing) 기법을 사용한다. 특히 충격파와 같이 구배가 큰 부분에서는 좀더 조밀한 격자를 사용하는 사각형 비정렬 적응 격자 (QUAG: quadrilateral unstructured adaptive grid) 기법을 이용한다.

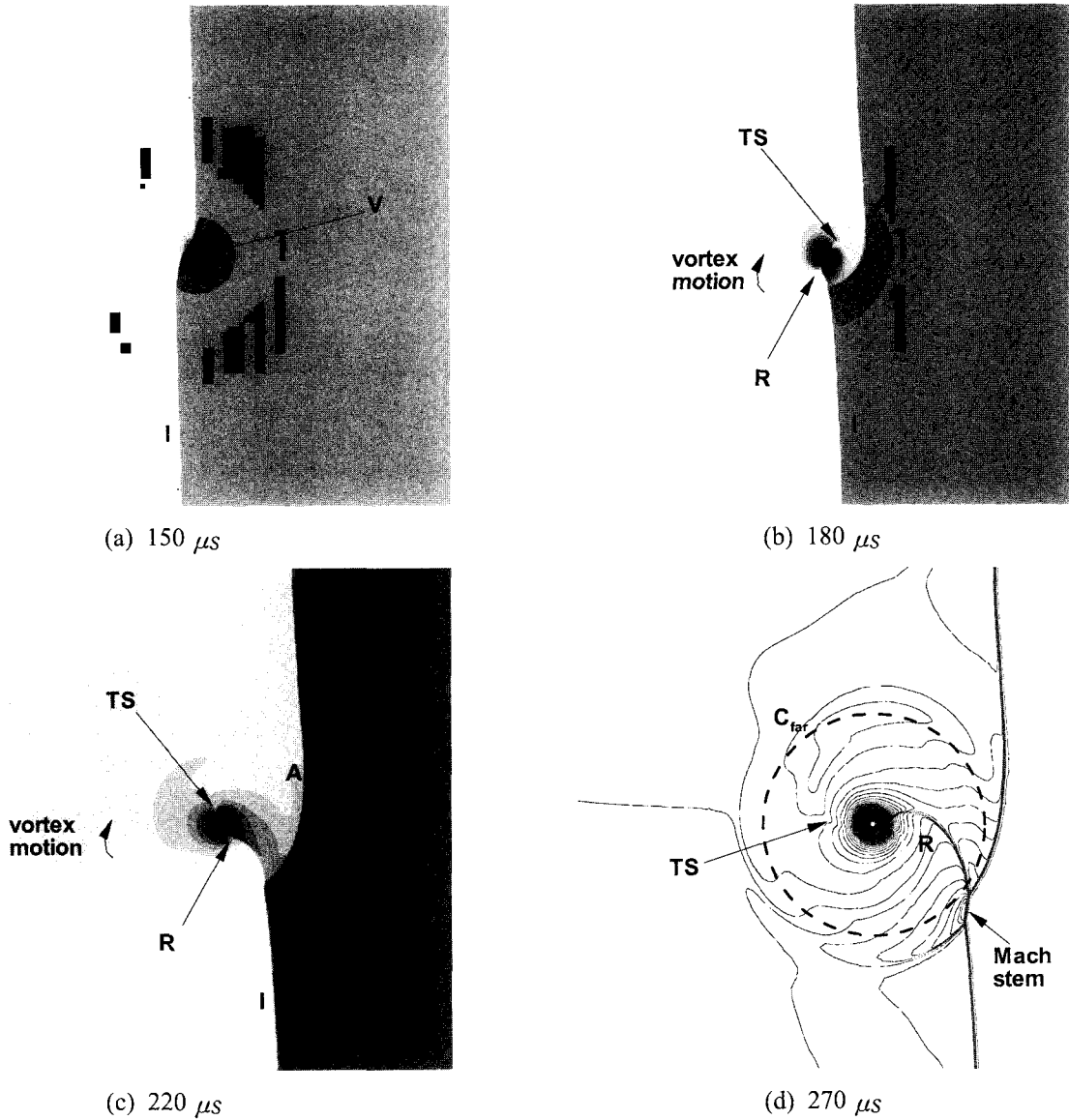


Fig. 3 Conceptual model: pressure plot.

### 2.3 개념 모델

와동 모델에는 매우 많은 종류가 있지만, 모두 다음의 고전적인 Rankin 와동 모델에 기초를 하고 있다. 와동이 오직 접선 방향의 속도 성분 ( $V_\theta$ )만을 가지는 소용돌이라고 가정하면, 그 분포는 다음과 같다.

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

참고 문헌 [4-6]에서는 (1) 식의 외부 유동 ( $r \geq r_c$ ) 부에 와동 핵의 회전 (circulation)  $\Gamma = 2\pi U_{\max} r_c$  을 상쇄시키는 반 회전  $-\Gamma$  을 적용시켜 인위적으로 와동을 고립시킨다. 그러나 이는 비 물리적 개념으로, 실제 실험에서 시작 와동은 미끄럼선 (slip line)을 통해 물체와 연결된다: Fig. 2 참조. 따라서 본 연구에서는 반 회전 없이 입사 충격파를 와동 중심으로부

터  $20r_c$  만큼 떨어뜨린 곳에서 출발시키는 방법을 사용하였다. 이 정도 거리에서는 비 물리적인 진조파 (precursor wave)가 거의 발생하지 않는다.

### 3. 실험 결과 및 토의

Fig. 2(a) 에서 충격파 U 는 평판의 끝단에서 이미 회절되어 강한 와동 (V)을 만들어 낸다. Fig. 2(b) 는 아래쪽 입사 충격파 (I) 가 막 V 를 치기 직전의 장면이다. 충격파-와동 간섭의 전반기에서, I 의 위쪽 부분은 V 의 시계 방향 운동에 의하여 Fig. 2(c) 에서와 같이 심하게 뒤틀린다. 조금 더 시간이 지나면, Fig. 3(d) 처럼 평판과 V 사이에 놓인 I 의 일부는 가속되어 강난공 모양의 파동으로 쪼개져 나가고, I 의 아래쪽 끝단은 와동 중심에 붙잡히게 된다. 이러한 가속파 (A)는 방사상으로 전파되며, I 의 감속된 부분은 서서히 반시계 방향으로 회전한다:

Fig. 2(e)-(f) 참조.

특히 Fig. 2의 마지막 두 사진에서 반사파 (R: reflected wave)와 전달 충격파 (TS: transmitted shock)라는, 지금까지 그 메커니즘이 충분히 규명되지 않은 약한 파동들이 발견된다. Fig. 2(d)에서, 파동 R은 파동 A의 일부분으로 합쳐짐을 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 2(d)-(e)에서 충격파 I가 와동 핵 (V, 음영 사진에서 어두운 점에 해당함)을 꿰뚫고 나선형 꼬리를 지닌 TS의 약한 흔적을 찾아볼 수 있다. 그러나 이는 Fig. 2(f)에서는 약해지면서 거의 사라진다. 한편 전단층 (S) 위에서의 유동 불안정성 때문에 위성 와동 (satellite vortex: 사진상의 까만 점)이 보이는데, 충격파 I와 위성 와동의 간섭 때문에 생기는 약한 압축성 파동은 반사파 R과 분명히 구분되어야 한다.

#### 4. 계산 결과 및 토의

실험 조건과 동일한  $M_s = 1.22$ ,  $U_{max} = 421$  m/s (Rankin 모델에서의 이론적인 값임),  $r_c = 3.3$  mm 를 사용하여, 2.3 절의 개념 모델에 적용하였으며, 그 결과는 Fig. 3(a)-(d)에 나와 있다. 평면 입사 충격파는 그림 좌에서 우로 움직이면서 회전된다. 충격파 역학의 관점에서, 약한 충격파와 강한 와동의 간섭에서의 충격파 변형은 다음의 세 단계를 거친다.

(1) 충격파 변형: 입사 충격파는 와동의 회전에 의하여 심하게 변형된다: Fig. 3(a) 참조.

(2) 충격파 분리: 입사 충격파는 와동의 중심에 잡혀 감속되는 부분 (I)과 가속되는 부분 (A)으로 갈라진다: Fig. 3(b)-(c) 참조.

(3) 충격파-충격파 간섭: 파동 I와 파동 A는 서로 교차하면서 마하 충격파 (Mach stem)를 생성한다. 즉, 정규 반사 (regular reflection) 모양에서 마하 반사 (Mach reflection) 모양으로 천이한다: Fig. 3(d) 참조.

또한 Fig. 3을 자세히 살펴 보면, 앞의 3 절에서 관찰한 반사파 (R)와 관통 충격파 (TS)를 개념 모델의 수치 모사에서도 역시 발견할 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 충격파 분리를 이용하는 실험 모델과 이를 간략화한 개념 모델을 제안하였다. 실험에서 얻은 가시화 사진을 바탕으로 충격파와 와동 경계 미끄럼 층에서의 반사와 와동 핵의 투과에 대해 관찰할 수 있었다. 나아가 개념 모델을 통하여 이러한 반사파 (R)와 관통 충격파 (TS)의 존재를 규명할 수 있었다. 충격파-와동 간섭은 충격파 변형, 충격파 분리, 충격파-충격파 간섭의 3 단계로 일어난다. 그 과정에서 반사파와 관통 충격파는 4 극자 음원을 형성하는데 공헌한다.

#### 참고 문헌

- [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, pp. 216-223.
- [2] Weeks T. M. and Dosanjh D. S., 1967, "Cylindrical Sound Wave Generated by Shock-Vortex Interaction," *AIAA Journal*, Vol. 5, pp. 660-669.
- [3] Ribner H. S., 1985, "Cylindrical Sound Generated by Shock-Vortex Interaction," *AIAA Journal*, Vol. 23, pp. 1708-1715.
- [4] Meadows K. R., Kumar A. and Hussaini M. Y., 1991, "Computational Study on the Interaction Between a Vortex and a Shock Wave," *AIAA Journal*, Vol. 29, pp. 174-179.
- [5] 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, pp. 172-184.
- [6] Chatterjee A., 1999, "Shock Wave Deformation in Shock-Vortex Interactions," *Shock Waves*, Vol. 9, pp. 95-105.
- [7] 장세명, 장근식, 1999, 앞이 무딘 물체에서 반사되는 약한 충격파, *대한기계학회 논문집 (B)*, Vol. 23, pp. 901-910.
- [8] 장세명, 2000, 압축성 전단층에서의 이동 충격파-와동 상호 간섭 연구, 박사 학위 논문, KAIST.