

## 오목, 볼록면에서 평면충격파의 반사

전홍균\* · 권진경\*\* · 권순범\*\*\*  
(1999년 5월 6일 접수)

### Reflection of Plane Shock Wave over Concave and Convex Walls

Heung-Kyun JEON, Jin-Kyung KWON and Soon-Bum KWON

**Key Words:** Regular Reflection(정상반사,RR), Mach Reflection(마하반사,MR), Transition(천이), Hysteresis, Neumann Paradox

#### Abstract

In the case of impingement of plane moving shock wave over concave or convex double wedges (pseudo-stationary flow) and cylindrical walls (truly non-stationary flow), it is expected that there are transitions from regular reflection to Mach reflection or vice versa in shock wave reflections. In these connections, it is necessary to verify the various of reflection process and transition angle for the reflection problems in double wedges, and to verify the transition angle, effects of curvature radius and initial wall angle on it for the reflection problems in cylindrical walls. Especially, we focused our attention to confirm the existence of hysteresis phenomenon induced by the different transition processes, and Neumann paradox, which is a small discrepancy between theoretical and experimental transition angles. Experiments were carried out by using the shock tube of  $6 \times 6 \text{ cm}^2$ , and high speed photographic technique consisted of delay unit, triggering system, light source of Xe lamp and so on was used for flow visualization.

#### 기호설명

- $M_i$  : 입사충격파마하수(incident shock Mach number)  
 $M_m$  : 마하스템 마하수(Mach stem Mach number)  
 $R$  : 곡률반경(radius of curvature), (mm)

#### 그리스문자

- $\theta_1$  : 제1단 벽 경사각(1st wall angle), (deg.)  
 $\theta_2$  : 제2단 벽 경사각(2nd wall angle), (deg.)  
 $\Delta\theta$  :  $\theta_2 - \theta_1$ , (deg.)  
 $\theta_w$  : 천이 벽면각(transition wall angle), (deg.)  
 $\theta_0$  : 초기 벽면각(initial wall angle), (deg.)  
 $\theta_{crit}$  : 임계 초기각(critical initial angle), (deg.)  
 $\theta_{det}$  : 이탈기준(detachment criterion), (deg.)  
 $\chi_1$  : 삼중점 궤적각(triple point trajectory angle), (deg.)

#### 1. 서론

충격파의 경사반사는 초음속 비행체의 외부유동, 대형압축기의 디퓨저내 유동, 증기터빈의 최종단 근방의 익털유동 혹은 메토네이션파가 벽면에 입사하는 경우 등에서 일어난다. 충격파의 반사 문제는 상기 유동장의 정확한 해석 및 전파하는 충격파 혹은 메토네이션파가 구조물과 간섭하는 경우의 벽면 영향의 해석 등과 관련되어 공학적으로 구명하여야 할 중요한 문제이다.

충격파 반사의 연구는 Mach<sup>(1)</sup>로부터 출발하며 von Neumann<sup>(2)</sup>이 이론적 해석을 하여 2충격파 이론과 3충격파 이론을 정립, 정상반사와 마하반사의 천이기준을 밝혔다. 이론적 천이기준은 1940년대 초 von Neumann에 의해 제안되고, 이후 Henderson과 Lozzi동에 의해 재 소개된 역학적 평형기준(mechanical equilibrium criterion)<sup>(3)</sup>과 1963년 von Neumann에 의해 제안된 이탈기준(detachment criterion)<sup>(4)</sup>이 있으며 이를 기초로 많은 실험적 연

\* 경북대학교 대학원 기계공학과  
 \*\* 회원, 경북대학교 기계공학과

구가 행해졌다. 특히 입사충격파가 약한 경우<sup>(5)</sup>나 경사각의 경사각이 매우 작은 경우<sup>(6)</sup> 실험적 천이각, 반사충격파각, 삼중점 제각각 등이 이론적 값과 일치하지 않는 소위 Neumann paradox가 발생한다는 것이 밝혀졌으며 이는 Birkhoff에 의해 최초로 언급되었다.<sup>(7)</sup>

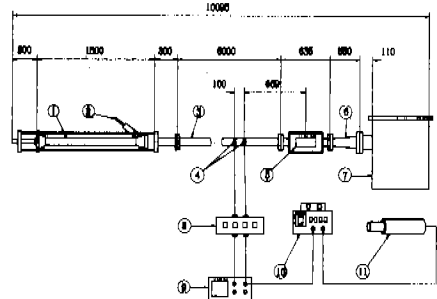
1960년대 이후 충격파반사의 천이 연구가 더욱 활발하게 진행되었으며 경사직선벽에 대해 Ben-Dor 등과 Henderson 등이 정상반사, 단순, 이중, 복합마하반사의 영역을 실험적으로 연구하였고 Neumann paradox에 대해서 Hornung<sup>(8)</sup> 등이 경계층 효과물 고려한 length scale criterion으로, Henderson<sup>(9)</sup> 등은 수정된 3충격파 이론으로 설명하였으나 천이각에 영향을 미치는 요인은 정확히 밝혀지지 않은 상태이다.

한편, Hornung, Oertel, Sandeman 등에 의해 초음속풍동내 설치된 썬기로부터의 충격파반사와 같은 정상유동에 있어서 정상반사와 마하반사간의 천이과정의 방향에 따라 서로 다른 천이각이 존재할 것이라는 가설이 제기되었으며 Hornung과 Robinson<sup>(10)</sup>은 이러한 가설, 즉 hysteresis를 증명하기 위한 실험적 연구를 시도하였으나 실패하였다. 그러나 최근 Chpoun, Passerel, Li, Ben-Dor<sup>(11)</sup> 등은 그들의 정상유동에 대한 실험에서 충격파반사의 천이 과정에서 hysteresis현상이 분명히 존재함을 확인하였다.

본 연구에서는 전파하는 평면 충격파가 2단 경사직선벽에 입사하는 경우의 pseudo-stationary 유동과 원호벽에 입사하는 경우의 non-stationary 유동에서 충격파 반사의 천이각을 실험적으로 구하였으며 아울러 2단 경사직선벽에 대해서는 입사충격파 마하수와 제1단, 제2단 경사각에 따라 이론적으로 나타날 수 있는 7가지의 반사형상을 확인하였고, 곡면벽에 대해서는 천이각에 대한 초기벽면각, 곡률반경의 영향을 확인하였다.

실험적으로 구한 천이각과 이론적 이탈기준을 비교, 검토함으로써 pseudo-stationary 유동과 non-stationary 유동에서도 역시 hysteresis 현상과 Neumann paradox가 존재함을 확인하였다.

실험은 격침파막식 충격파관을 사용하였고 작동기체는 공기로 하였으며, triggering system, delay unit, 단발광원 등으로 구성된 슈리켄 가시화 시스템을 이용하여 얻은 사진을 통해 충격파 반사의 천이각과 반사형상을 조사하였다.



- ① high-pressure chamber
- ② needle
- ③ low-pressure chamber
- ④ pressure transducer
- ⑤ test section
- ⑥ diffuser
- ⑦ dump tank
- ⑧ amplifier
- ⑨ oscilloscope
- ⑩ delay unit
- ⑪ ultra short duration light source (20nsec)

Fig. 1 Schematic of shock tube apparatus.

## 2. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용한 충격파관과 계측장치의 개략도이다. 고압실은 내경 100mm, 길이 1.5m의 원형관이고 저압부는 6×6cm<sup>2</sup>인 정방형으로 평면 충격파가 형성되기에 충분한 길이인 6.9m로 하였다. 저압부 말단에는 확대관과 소음감소용 덤프탱크를 설치하였다. 고압실과 저압실은 다이어프램으로 분리되며 격침을 이용, 다이어프램을 파막시키면 저압실쪽으로 압축파의 집적에 의한 충격파가 형성, 이동하게 된다. 이동하는 충격파 전후의 압력차 감지를 통한 충격파 마하수 측정과 단발광원의 발광을 위하여 저압부에는 2개의 압력변환기를 일정 간격으로 설치하였다. 이때 가시화를 위한 단발광원으로는 광원 지속시간 20nsec의 Xe광원을 사용하였고, 카메라와 B셔터로 충격파의 상이 잡히도록 하였다.

## 3. 이론적 고찰

### 3.1 2단 경사직선벽에서의 반사<sup>(12)</sup>

오목 또는 볼록의 2단 경사직선벽에서 반사형상은 입사충격파 마하수( $M_1$ ), 제1단 경사각( $\theta_1$ ), 제2단 경사각( $\theta_2$ )에 의해 결정된다.  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 이라 하면  $\Delta\theta > 0$ 인 경우는 오목면,  $\Delta\theta < 0$ 을 볼록면이라고 하면 2단 경사직선벽에서 발생할 수 있는 반사형상은 Fig. 2에서와 같이 7가지 case로

된다. 그림들은 벽면 AO에 수직인 평면 충격파가 2단 경사 직선벽에 입사하여 반사하는 과정을 나타내며 (a)(b)(c)(d)의 순서로 시간에 따라 변화한다. 그림의 점선 및 일점쇄선은 각각 슬립면 (slip surface)과 3중점의 궤적을 나타낸다.

pseudo-stationary 유동에서의 천이기준은 이탈기준( $\theta_{det}$ )에 잘 일치한다는 것이 밝혀져 있다. 따라서 제1단 경사벽에서  $\theta_1 > \theta_{det}$ 의 경우 정상반사가,  $\theta_1 < \theta_{det}$ 의 경우 마하반사가 일어난다. 제1단 경사벽에서 마하반사가 일어나는 경우 마하스텝의 제2단 경사벽에서의 반사는 마하스텝의 마하수  $M_m = M_1 \cos \alpha_1 / \cos(\alpha_1 + \theta_1)$ 와  $\Delta \theta$ 에 의해 결정된다. (여기서  $M_1$ 는 입사충격파 마하수,  $\alpha_1$ 은 삼중점  $T_1$ 의 궤적각) 한편  $M_m > M_1$ 이지만 그 차는 크지 않으며 입사충격파와 마하스텝에 같은 이탈기준을 적용할 수 있다. 즉  $(\theta_{det})_{M_1} = (\theta_{det})_{M_m}$ 가 성립한다. 따라서 제2단 경사벽에서 마하스텝의 반사형상은  $\Delta \theta > \theta_{det}$ 이면 정상반사,  $\Delta \theta < \theta_{det}$ 이면 마하반사한다. 이로부터 Fig. 3에서와 같이  $\theta_1 = \theta_{det}$ ,  $\theta_2 = \theta_{det}$ ,  $\Delta \theta = 0$ ,  $\Delta \theta = \theta_{det}$  (  $\theta_1, \theta_2$  ) 평면에 나타낼 수 있으며 Fig. 2의 7가지 case는 Fig. 3에서와 같이 7개의 영역으로 정의될 수 있다.

$\Delta \theta = 0$ 의 위쪽은 오목, 아래쪽은 볼록 2단 경사직선벽 영역이다. Fig. 2의 case1은 Fig. 3의  $\theta_1 > \theta_{det}$ ,  $\theta_2 > \theta_{det}$ ,  $\Delta \theta > 0$  영역에 해당하며 제1단, 제2단 경사벽에서 모두 정상반사 한다. 실험에서 구한 충격파각에 2중격파 이론을 적용하면 제1단 경사벽의 (2)영역과 제2단 경사벽의 (3)영역간에 갑작스런 압력의 변동이 발생하였음을 알 수 있으며 이는 제1단 경사벽에서 제2단 경사벽으로 전파함에 따라 유동내에서 압축파 또는 팽창파가 발생함을 의미한다. case2는  $\theta_1 > \theta_{det}$ ,  $\theta_2 > \theta_{det}$ ,  $\Delta \theta < 0$  영역에 해당하며 제1단, 제2단 경사벽에서 모두 정상반사한다.

case3은  $\theta_1 < \theta_{det}$ ,  $\theta_2 < \theta_{det}$ ,  $\Delta \theta < 0$  영역에 해당하며 제1, 2단 경사벽에서 모두 마하반사 하지만 그 사이에 삼중점 궤적각이 변화하는 non-stationary 천이 과정이 존재한다. 3중격파 이론에 근거한 계산에 따르면 (5)영역의 압력은 (3)영역의 압력보다 낮으며 이는 볼록 corner에서 발생한 팽창파가 마하스텝  $T_2M_2$  후방의 유동에 영향을 미치기 때문이다. case4는  $\theta_1 > \theta_{det}$ ,  $\theta_2 < \theta_{det}$ ,  $\Delta \theta < 0$  영역에 해당하며 제1단 경사벽의 정상

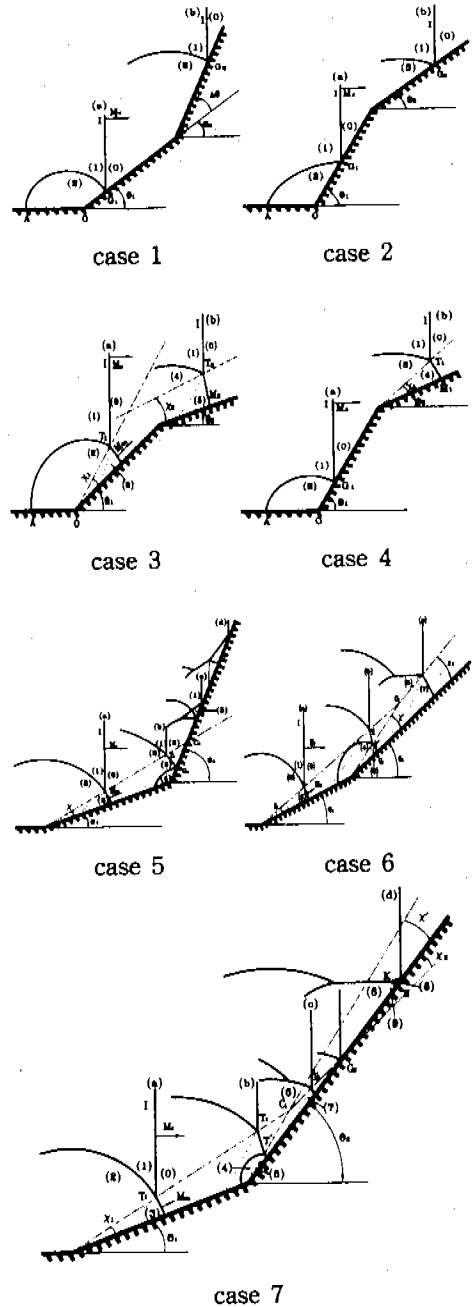


Fig. 2 Schematic illustrations for the configuration of shock wave reflections over double wedges.

반사가 제2단 경사벽에서 마하반사로 천이한다. case5는  $\theta_1 < \theta_{det}$ ,  $\theta_2 > \theta_{det}$ ,  $\Delta \theta > 0$ ,  $\Delta \theta > \theta_{det}$  영역에 해당하며 제1단 경사벽의 마하반사의 마

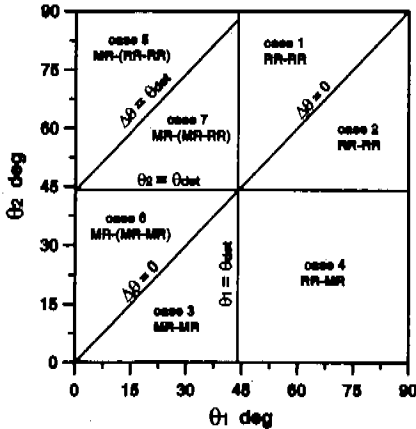


Fig. 3 Seven different cases of shock wave reflection processes in the  $(\theta_1 - \theta_2)$  plane.

하스텝은 제2단 경사벽에서 정상반사한다. 삼중점  $T_1$ 과 반사점  $G_1$ 은  $C_1$ 점에서 간접한 후 정상반사를 유지하며 제1단 경사벽에서 마하반사의 반사충격파는 2단벽에 입사하여 2차 정상반사하여 입사충격파의 정상반사 뒤를 따른다. 2, 3충격파 이론에 의하면 (4)영역의 압력에서 (5)영역의 압력으로 갑작스런 압력감소가 있음을 알 수 있고 이는 영역 (5)와 (4) 사이에 2차 정상반사에 의한 압력의 증가를 의미한다. 이 2차 정상반사의 반사파는 시간이 지남에 따라 입사파를 따라잡아 (c)의 과정을 거친후 (d)와 같이 정상반사한다. case6은  $\theta_1 < \theta_{det}$ ,  $\theta_2 < \theta_{det}$ ,  $\Delta\theta > 0$ ,  $\Delta\theta < \theta_{det}$  영역에 해당하며 제1단 경사벽의 마하반사의 마하스텝이 제2단 경사벽에서 마하반사하는 경우이다. 삼중점  $T_1, \Gamma$ 은  $C_1$ 에서 충돌하고  $\chi_2 > 0$ 인 직접 마하반사(direct MR)를 형성한다. case7은  $\theta_1 < \theta_{det}$ ,  $\theta_2 > \theta_{det}$ ,  $\Delta\theta > 0$ ,  $\Delta\theta < \theta_{det}$  영역에 해당하며 제1단 경사벽의 마하반사의 마하스텝은 제2단 경사벽에서 역시 마하반사한다. 그러나 삼중점  $T_1, \Gamma$ 은  $C_1$ 에서 충돌하여  $\chi_2 < 0$ 인 반전마하반사(inverted MR)를 형성하며 삼중점  $T_2$ 는 벽면상의  $G_2$ 에서 충돌하여 정상반사로 천이한다.

3.2 원호벽에서의 반사<sup>(13)</sup>

Fig. 4에서와 같이 전파하는 평면충격파가 오목, 볼록의 원호벽에 입사하는 경우는 충격파가 전파함에 따라 RR $\rightleftharpoons$ MR의 천이가 일어난다. 오목 원호벽에서는 충격파가 전파함에 따라 입사충격파각이 감소하며 직접마하반사(direct MR)가 정치

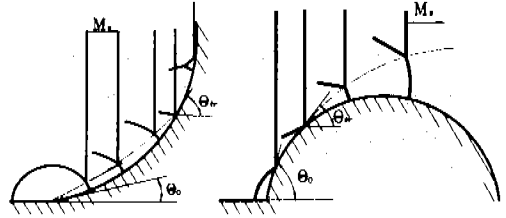


Fig. 4 Schematic illustrations of the RR $\rightleftharpoons$ MR transition over cylindrical walls.

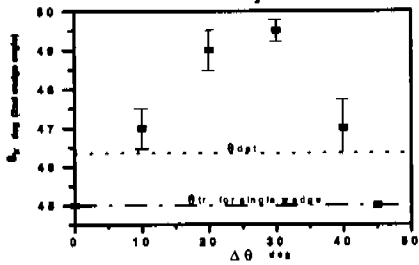
마하반사(stationary MR)와 반전마하반사(inverted MR)를 거쳐 정상반사(RR)로 천이하게 된다. 또한 볼록 원호벽에서는 충격파가 전파함에 따라 입사충격파각이 증가하며 초기의 정상반사가 마하반사로 천이하게 된다. 두 경우 모두 삼중점의 궤적은 비선형이다. 그림에서  $\theta_0$ 는 벽면 초기각,  $\theta_{cr}$ 은 천이각을 의미한다.

4. 실험결과 및 고찰

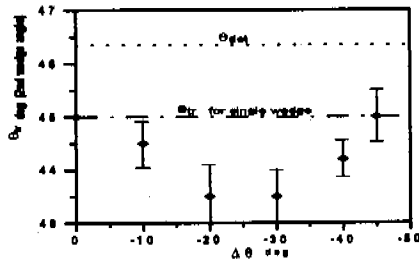
4.1 2단 경사직선벽에서의 반사

Fig. 5는 입사충격파 마하수 1.3와 약한 충격파인 경우  $\Delta\theta$ 에 대해 RR $\rightleftharpoons$ MR의 천이가 일어나는 제2단 경사벽의 각도를 나타낸 그림이다. 정상반사가 일어나는 최소각과 마하반사가 일어나는 최대각의 평균을 천이각  $\theta_{tr}$ 로 하였다. 그림중 점선과 임계선은 각각  $M_1=1.3$ 에 대해 이론적 이탈기준으로부터 구한 천이각 및 1단 경사벽인 경우 실험으로부터 구한 천이각이다. 입사충격파 마하수 1.3인 경우 이론적 이탈기준은  $\theta_{det}=46.35^\circ$ 이다. Fig. 5(a)는  $\Delta\theta > 0$ 의 오목 2단 경사직선벽에서 RR $\rightleftharpoons$ MR의 실험적 천이각을 나타낸 것이다.  $\Delta\theta = 0^\circ$ , 혹은  $\Delta\theta = 45^\circ$ 의 단일 직선벽에서 실험값은  $\theta_{tr}=45^\circ$ 로 이론값보다 작다. 이는 벽면 경계층과의 간섭에 의한 영향으로 생각된다.  $\theta_{tr}$ 은  $\Delta\theta = 30^\circ$ 일 때 약  $49.5^\circ$ 로 최대값을 가지며 실험적 천이각은 이탈기준보다 대부분 큰 값을 가진다. Fig. 5(b)는  $\Delta\theta < 0$ 인 볼록 2단 경사직선벽인 경우 RR $\rightleftharpoons$ MR의 실험적 천이각을 나타낸 그림이다.

입사 충격파 마하수는 1.3으로 (a)의 경우와 동일하다. 제2단 경사벽의 실험적 천이각은 오목 2단 경사직선벽과 반대로 대부분 이론적 이탈기준보다 작으며  $\Delta\theta = -20^\circ, -30^\circ$ 일 때 약  $43.5^\circ$ 로



(a) Second wedge angle of RR to MR transition for concave wedge



(b) Second wedge angle of RR to MR transition for convex wedge

Fig. 5 Second wedge angles of RR to MR transition on concave double and convex double wedges. ( $M_s=1.3$ )

최소값을 나타냈다. 따라서 약한 충격파의 경우 실험적 천이각은 이론적 이탈기준과 차이를 보이며 이로부터 Neumann paradox가 존재함을 알 수 있다. 또한 pseudo-stationary 유동에서 RR to MR와 MR to RR의 천이과정에 따라 서로 다른 천이각을 가지는 hysteresis 현상이 존재함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 3에 보인 case 6과 7, case 2와 4의 경계는 수정되어야 하며 수정된 각 case별 영역은 Fig. 6과 같이 실선으로 나타낼 수 있다.

4.2 원호벽에서의 반사

Fig. 7은 오목, 볼록 원호벽면에 충격파가 입사하여 천이하는 경우, 초기벽면각이 천이각에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 경우 입사 마하수는 1.4, 곡률반경 R은 150mm이다. 실험에 의하면 오목 원호벽에서의 천이각은 볼록 원호벽에서의 천이각 보다 크며 이는 2단 경사직선벽의 실험결과와 같은 경향이다.

오목 원호벽의 경우 초기 벽면각이 클수록 마하 반사에서 정상반사로의 천이각이 작아진다. 이는 초기 벽면각이 클수록 반사 충격파의 강도가 커지고 그 결과 마하시스템의 마하수가 증가되는 원인

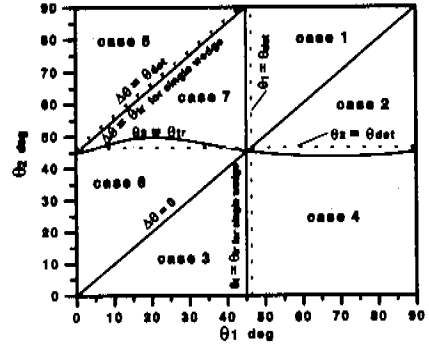


Fig. 6 Actual seven different cases of shock wave reflection processes over a double wedge in the  $(\theta_1 - \theta_2)$  plane ( $M_s=1.3$ )

에 기인된 것이다. 볼록 원호벽의 경우는 전술한 것과 반대의 효과 때문에 초기벽면각이 커질수록 천이각은 오히려 증가한다. 실험적으로 구한 천이각과  $\theta_{1c} = \theta_{2c}$  line이 만나는 각을 임계 초기각 (critical initial angle,  $\theta_{1,cr}$ )이라 하면 벽면 초기각이 이 각보다 크면 오목 원호벽에서 MR to RR의 천이 대신 처음부터 정상반사가 일어나고 벽면 초기각이 이 각보다 작으면 볼록 원호벽에서 RR to MR의 천이 대신 처음부터 마하 반사가 일어난다. 실험 결과, 오목 원호벽과 볼록 원호벽에 대한  $\theta_{1,cr}$  for concave와  $\theta_{1,cr}$  for convex는 서로 다르며 이로부터 non-stationary 유동에서 hysteresis가 존재함을 알 수 있다.

오목, 볼록 원호벽에서의 천이각과 이에 대한 곡률반경과 초기벽면각의 영향을 밝히기 위해 Table 1과 같은 조건으로 실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 그림에서 단린기호와 열린기호는 각각 볼록 원호벽과 오목 원호벽에 대한 실험결과를 나타낸다. 볼록 원호벽의 경우 실험적 천이각은 대부분 이탈기준(A)보다 작았으며 동일  $M_s$ 에 대해 곡률반경이 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈다. case A, B, C의 경우 천이각은 대부분  $\pm 4.0^\circ$  내에 집중되어 나타났다. 이는 곡률반경이 작은 경우 초기 벽면각의 영향이 작음을 의미한다. 곡률반경을 250mm로 한 case E는 이탈기준과 같 일치하였다. 오목 원호벽에 대한 실험에 의하면 실험적 천이각은 대부분 이론적 이탈기준보다 큰 값을 나타냈으며 동일한  $M_s$ 에 대해 곡률반경이 증가할수록 천이각은 작게 나타났다. 여기에서도 곡률반경이 제일 큰 250mm로 한 case J의 천이각이 이탈기준에 가장 가까운

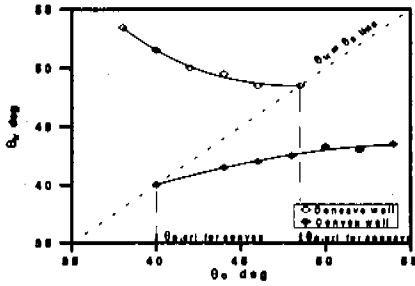


Fig. 7 Effect of initial wall angle on transition angle( $M_s=1.4, R=150\text{mm}$ ).

Table 1 Concave and convex cylindrical walls used in present experiment.

convex		concave			
	R(mm)	$\theta_1$ (deg)		R(mm)	$\theta_2$ (deg)
A ●	25	90	F ○	25	0
B ■	50	90	G □	50	0
C ▲	55	40	H △	55	40
D ▼	150	45	I ▽	150	45
E ◆	250	40	J ◇	250	35

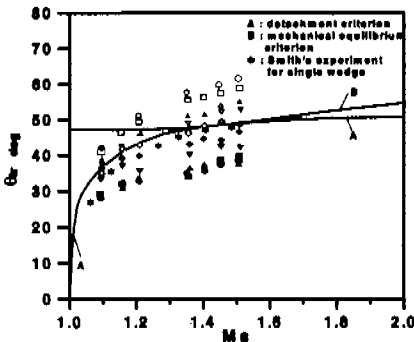


Fig. 8 Transition angles of concave and convex cylindrical walls.

것으로부터 곡률반경이 증가할수록 이달기준에 잘 일치함을 볼 수 있다. 결국 오목 원호벽에서의 MR→RR 천이과정과 볼록 원호벽에서의 RR→MR 천이과정은 서로 다른 천이각을 가지며 이는 원호벽면에서의 충격파 반사과정 즉, non-stationary 유동에서 역시 hysteresis 현상이 존재함을 의미한다.

5. 가시화 결과

5.1 2단 경사직선벽에서의 반사

Fig. 2 (or Fig.3)에서 정의된 7가지 case를 확인

하기 위해 제1단, 제2단 경사각을 조합하고 입사 충격파 마하수를 1.3과 1.41로 한 경우의 가시화 사진을 Fig. 9에 나타냈다. case1은  $M_s=1.3, \theta_1=60^\circ, \theta_2=75^\circ$  인 경우의 슈리멘 사진이며 제1단 경사벽에서의 정상반사가 압축파의 역할을 하는 제2단 경사벽과 만나서 역시 정상반사 하는 경우이다. 이때 corner에서 발생한 압축파는 집적되어 2개의 원호충격파로 되어 상류와 하류로 각각 전파하는 것을 볼 수 있다.

case2 사진은  $M_s=1.3, \theta_1=60^\circ, \theta_2=50^\circ$  의 경우이며 제1단 경사벽에서의 정상반사가 팽창파의 역할을 하는 제2단 경사벽과 만나면서 정상반사한다. case2.b에서 알 수 있듯이 입사충격파가 볼록 corner를 통과함에 따라 우측으로 유기된 흐름이 corner를 지남에 따라 팽창파를 발생시키고 이 팽창파가 상, 하류로 전파함을 가시화 사진을 통해 볼 수 있다. case3 사진은  $M_s=1.3, \theta_1=20^\circ, \theta_2=10^\circ$  인 경우로 제1단 경사벽에서 마하반사가 제2단 벽에서 역시 마하반사함을 볼 수 있으며, 이때 볼록 corner에서 팽창파가 발생함을 볼 수 있다. case4 사진은  $M_s=1.3, \theta_1=60^\circ, \theta_2=30^\circ$  인 경우로 제1단 경사벽의 정상반사는 제2단 벽에서 마하반사로 천이하며 볼록 corner에서 발생한 팽창파가 하류로 전파하는 것을 볼 수 있다. case5 사진의 (case5. a~c)는  $M_s=1.3, \theta_1=20^\circ, \theta_2=75^\circ$  의 경우에 대한 사진이며, 제1단 경사벽에서의 마하반사의 마하스텝은 제2단 벽에서 정상반사하며, 특히 (case5.c)에서는 전술한 2차 정상반사를 볼 수 있다. 사진 (case5.d~e)는  $M_s=1.41, \theta_1=20^\circ, \theta_2=70^\circ$  인 경우이며, 2차 정상반사의 반사파가 입사파를 따라잡아 하나의 수직충격파를 형성함을 볼 수 있다. case6의 사진은  $M_s=1.41, \theta_1=20^\circ, \theta_2=35^\circ$  인 경우로, 제1단 벽에서의 마하반사의 마하스텝은 제2단 벽에서 역시 마하반사하며 2개의 삼중점이 충돌한후 직접 마하반사를 계속 유지함을 볼 수 있다. case7의 사진은  $M_s=1.41, \theta_1=20^\circ, \theta_2=55^\circ$  인 경우로, 제1단 직선벽에서 마하반사의 마하스텝은 제2단 직선벽에서 역시 마하반사하고 2개의 삼중점이 간섭한 후 반전마하반사를 거쳐 정상반사로 천이하며, 이때 정상반사의 반사점 후방에 수직충격파가 발생한 것을 볼 수가 있다. 이 충격파는 반전마하반사가 끝남과 동시에 발생하므로 2차 정상반사로부터 형성되는 (case5.e)의 수직충격파와

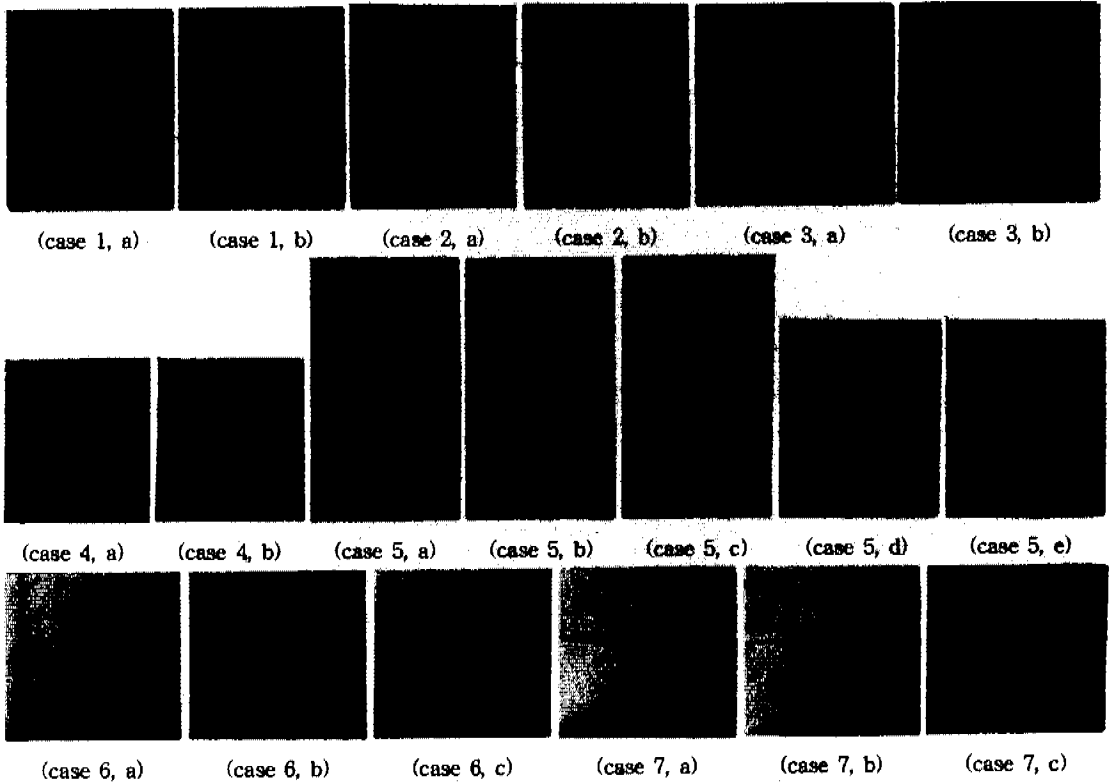


Fig. 9 Schlieren photographs showing the reflection process on double wedge(case1:  $M_s=1.3$ ,  $\theta_1=60^\circ$ ,  $\theta_2=7^\circ$ , case2:  $M_s=1.3$ ,  $\theta_1=60^\circ$ ,  $\theta_2=50^\circ$ , case3:  $M_s=1.3$ ,  $\theta_1=20^\circ$ ,  $\theta_2=10^\circ$ , case4:  $M_s=1.3$ ,  $\theta_1=60^\circ$ ,  $\theta_2=30^\circ$ , case5 a,b,c:  $M_s=1.3$ ,  $\theta_1=20^\circ$ ,  $\theta_2=75^\circ$ , case5 d,e:  $M_s=1.41$ ,  $\theta_1=20^\circ$ ,  $\theta_2=70^\circ$ , case6:  $M_s=1.41$ ,  $\theta_1=20^\circ$ ,  $\theta_2=35^\circ$ , case7:  $M_s=1.41$ ,  $\theta_1=20^\circ$ ,  $\theta_2=55^\circ$  ).

그 형상은 유사하나 형성과정은 다르다.

5.2 원호벽에서의 반사

Fig. 10 (a)는 볼록 원호벽면에서 평면 입사충격파가 벽면에 입사하여 정상반사에서 마하반사로 천이하는 과정을 보여준다. Fig. 10 (b)는 오목 원호벽면에서 평면 입사충격파가 벽면에 입사하여 마하반사에서 정상반사로 천이하는 과정을 나타낸 사진이다.  $M_s=1.37$ ,  $R=50\text{mm}$ ,  $\theta_0=0^\circ$  로 한 경우 2단 경사직선벽에서와 마찬가지로 정상반사가 진행함에 따라 반사점 후방에서 수직 충격파가 발생함을 볼 수 있다.

6. 결 론

오목, 볼록 2단 경사직선벽과 원호벽에 입사하는 평면충격파의 경사반사형상을 충격파판과 슈

리렌 가시화 장치를 사용하여 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 2단 경사직선벽의 경우 제1단, 제2단 경사벽의 각도에 따라 서로 다른 7가지 case의 반사 과정이 존재함을 확인하였고, 실험적으로 구한 천이각은 오목벽의 경우 이론적 이탈기준보다 대부분 크고, 최대값은  $\Delta\theta=30^\circ$  일 때 약  $49.5^\circ$  이며, 볼록벽의 경우 대부분 작고 최소값은  $\Delta\theta=-30^\circ$  일 때 약  $43.5^\circ$  정도로 측정되었다.

(2) 원호벽에 대해 곡률반경과 초기 벽면각을 조합한 10가지 경우에 대해 충격파반사의 천이각을 구한 결과 볼록벽의 경우 천이각은 이탈기준보다 작았으며 곡률반경과 초기각의 영향이 작은 반면 오목벽의 경우 천이각은 이탈기준보다 크며 곡률반경과 초기각의 영향이 큼을 알 수 있었고, 초기각이 각각  $40^\circ$ ,  $35^\circ$ , 곡률반경이 250mm인 경우의 천이각이 이탈기준과 잘 일치하였다.

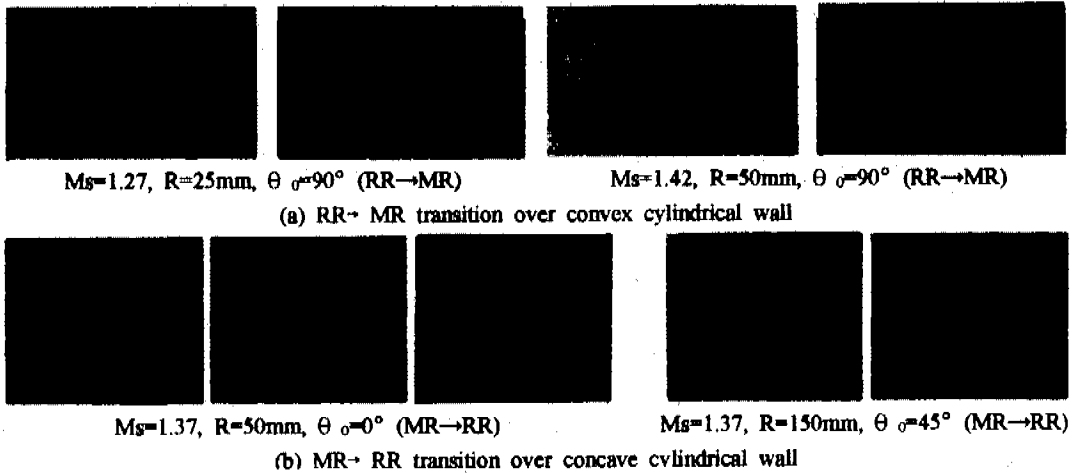


Fig. 10 Schlieren photographs showing the reflection processes over concave and convex cylindrical walls.

(3) 위의 결과에 의해 pseudo-stationary 유동과 non-stationary 유동에서 hysteresis 현상과 Neumann paradox가 존재함을 확인하였다.

#### 참고문헌

- (1) Mach, E. Akad. Wiss., 1878, 77-2, 1228.
- (2) Neumann, J. von, 1945, "Refraction, Interaction and Reflection of Shock Wave," NAVORD Rep203-245, Navy Dep, Bureau of Ordinance, Washington, DC.
- (3) Henderson, L. F. and Lozzi, A, 1979, "Experiments on Transition of Mach Reflection," *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, pp. 139~149.
- (4) Neumann, J. von, 1963, *Collected Works of Neumann, J. von*, Vol. 6, Pergamon Press, NewYork.
- (5) Sakurai, A. Henderson, L. F. Takayama, K. Walenta, Z. and Colella, P, 1989, "On the von Neumann Paradox of Weak Mach Reflection," *Fluid Dyn. Res.* 4, pp. 333~345.
- (6) Lighthill, M. J., 1949, "The Diffraction of Blast," *Proc. R. Soc. Lond.* A198, pp. 454~470.
- (7) Akihiro Sasoh and Kazuyoshi Takayama 1994, "Characterization of Disturbance Propagation in Weak Shock Wave Reflection," *J. Fluid Mech.*, Vol. 277, pp. 331~345.
- (8) Hornung, H. G. and Taylor, J. R., 1982, "Transition from Regular to Mach Reflection of Shock Waves Part1. The Effect of Viscosity in the Pseudosteady Case," *J. Fluid Mech.*, Vol. 123, pp. 143 ~153.
- (9) Henderson, L. F. and Siegenthaler, A., 1980, *Proc. R. Soc. Lond.* A369, 537.
- (10) Hornung, H. G. and Robinson, M. L., 1982, "Transition from Regular to Mach Reflection of Shock Waves Part 2. The Steady Flow Criterion," *J. Fluid Mech.*, Vol. 123, pp.155~164.
- (11) Chpoun, A. Passerel, D. Li, H. and Ben-Dor, G, 1995, "Reconsideration of Oblique Reflection in Steady Flows. Part 1.," *J. Fluid Mech.*, Vol. 301, pp. 19~35.
- (12) Ben-Dor, G., Dewey, J.M. and Takayama, K., 1987, "The Reflection of a Plane Shock Wave over a Double Wedge," *J. Fluid Mech.*, Vol. 176, pp. 483~520.
- (13) Itoh, S., okazaki, N. and Itaya, M., 1981, "On the Transition between Regular and mach Reflection in Truly Non-Stationary Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 108, pp. 383~400.