

## 충격파에 의한 물방울의 변형에 관한 경험적 해석 연구

홍윤기<sup>\*.1)</sup> · 염금수<sup>2)</sup> · 문관호<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구본부

<sup>2)</sup> 군산대학교 기계자동차공학부

### Empirical Analysis Research on Waterdrop's Deformation by Shock Wave

Yun Ky Hong<sup>\*.1)</sup> · Geum Su Yeom<sup>2)</sup> · Kwan Ho Moon<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

<sup>2)</sup> School of Mechanical and Automotive Engineering, Kunsan National University, Korea

(Received 15 February 2016 / Revised 11 July 2016 / Accepted 23 September 2016)

#### ABSTRACT

In this research, theoretical study on empirical analysis method to estimate waterdrop's deformation by shock wave is presented. Flow field is calculated using theoretical and empirical relations. Waterdrop's deformation including movement, size, mass, and orientation is modeled using empirical relations derived from existing experimental data. Developed method is applied to specific flight examples with arbitrary flight speed and vehicle's configuration. The flight speed is assumed to Mach number of 2 and 4. The diameter of waterdrop is varied from 1 to 5 mm. Waterdrops along the stagnation line in front of hemispherical nose with the radius of 50 mm and around a cone-shaped side wall with the half angle of 20 degree are considered. It is found that the maximum diameter of the waterdrop is increased up to 2.77 times the initial diameter. The mass is conserved more than 66.7 %. In the case of a cone-shaped side wall, waterdrop's orientation angles defined from the flight direction when the Mach number is 2 and 4 are calculated as 33.0 and 25.6 degree, respectively.

Key Words : Waterdrop(물방울), Waterdrop's Deformation(물방울 변형), Shock Wave(충격파)

#### 1. 서론

고속의 비행체는 대기 중에 존재하는 수 mm 크기의

물방울 입자들과의 충돌로 인해 손상을 받는다. 이런 현 상을 입자 침식이라 한다.

고속 비행체의 경우, 물방울은 비행체 전방에 생성 되는 충격파로 인해 형상 변화, 질량 감소 등의 변형 을 겪은 후, 비행체와 충돌한다. 물방울의 변형 강도 에 따라 비행체가 받는 손상 정도가 바뀌기 때문에,

\* Corresponding author, E-mail: shinehyk@gmail.com  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

충격파에 의해 변형된 물방울의 상태는 비행체가 입자 침식으로 인해 받는 영향을 연구할 때, 꼭 고려되어야 하는 요소로 알려져 있다<sup>1,2)</sup>.

충격파 유동장으로 인한 물방울의 변형은 반사 충격파, 투과 충격파, 경계면의 이동과 같은 복잡한 현상의 상호작용에 일어난다. 이 현상을 수치적으로 해석하기 위해서는 기체-물과 같은 이상유동(two phase flow)에서의 충격파 전과 현상을 직접 모사할 수 있는 압축성 다상유동 해석 기술이 필요하다.

해석의 기술적 어려움으로 인해, 기존의 Adler and Mihora<sup>1)</sup>의 연구에서는 유동장과 물방울을 분리해 비행체 주변의 유동장은 수치적으로 해석하고, 물방울의 변형은 경험식을 이용해 예측하는 방법을 이용하였다. 하지만, 해당 연구에서 물방울의 상태를 예측하기 위해 적용한 경험식이 계측에 한계가 있는 시험 자료로부터 도출된 것이기 때문에, 이를 이용한 해석 결과의 신뢰성에 문제가 있다.

본 논문에서는 실제 비행체 개발 환경에 보다 손쉽게 적용할 수 있도록 수치 해석 기술을 이용하지 않고 충격파 유동장에서의 물방울 변형을 해석할 수 있는 기법에 대해 연구하였다. 유동장 해석은 이론식 및 경험식을 바탕으로 수행하였으며, 물방울의 변형 해석은 기존에 발표된 신뢰할 수 있는 실험 자료를 바탕으로 수립한 경험식을 이용해 수행하였다.

개발한 해석 기술을 임의의 속도로 비행중인 비행체에 적용하였다. 이를 통해, 고려된 고속 비행체에서 발생하는 물방울의 변형을 예측할 수 있었다.

## 2. 해석 기법

본 연구에서 수행한 해석 기법은 이론식 및 경험식을 이용한 유동장 모델링과 경험식을 이용한 물방울 모델링으로 구성된다.

### 2.1 유동장 모델링

유동장은 비행체의 구형 첨두부 주변에 생성되는 유동장 해석과 원추부 주변을 따라 생성되는 유동장 해석으로 구분된다.

#### 2.1.1 첨두부 유동장

비행체의 첨두부가 일정한 반경을 가진 구형일 경우, 정체점의 전방에는 수직 충격파가 생성된다. 충격

파 이후의 유동은 아래와 같은 충격파 관계식을 이용해 계산한다.

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1}(M_1^2-1) \quad (1)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma+1)M_1^2}{2+(\gamma-1)M_1^2} \quad (2)$$

$$M_2^2 = \frac{1 + [(\gamma-1)/2]M_1^2}{\gamma M_1^2 - (\gamma-1)/2} \quad (3)$$

위 식에서  $p$ ,  $\rho$ ,  $\gamma$ ,  $M$ 은 각각 유동의 압력, 밀도, 기체상수, 유동 마하수이며, 하첨자 1과 2는 충격파 전, 후의 물성치를 나타낸다. 충격파의 형상은 아래의 경험식을 이용해 구한다<sup>3)</sup>.

$$x = R + \Delta - R_e \cot^2 \phi \left[ \left( 1 + \frac{y^2 \tan^2 \phi}{R_e^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (4)$$

Fig. 1에서 확인할 수 있듯이, 위 식에서  $x$ ,  $y$ 는 비행체의 첨두부 원점을 중심으로 한 좌표축에서 충격파의 위치를,  $R$ 은 첨두부의 곡률반경을,  $\phi$ 는 충격파의 각도를 나타낸다.  $\Delta$ 와  $R_e$ 는 충격파 거리(shock standoff distance)와 충격파의 곡률반경으로 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta/R = 0.143 \exp(3.24/M_1^2) \quad (5)$$

$$R_e/R = 1.143 \exp[0.54/(M_1 - 1)^{1.2}] \quad (6)$$

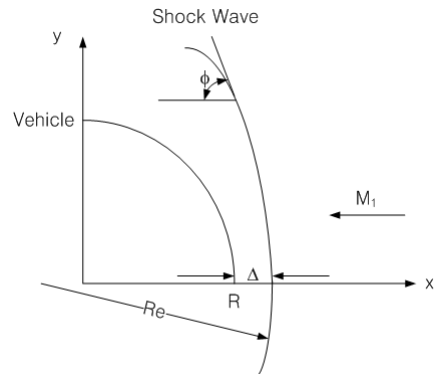


Fig. 1. The shape of detached shock wave around stagnation region<sup>[3]</sup>

2.1.2 원추부 유동장

원추형 비행체 주변에 생성되는 경사충격파 유동장 계산을 위해서는 경사충격파의 각도가 먼저 결정되어야 한다. 이를 위해, 아래의 Taylor-Maccoll식을 Runge-Kutta법을 이용해 적분하였다<sup>[4]</sup>.

$$\frac{\gamma-1}{2} \left[ 1 - V_r^2 - \left( \frac{dV_r}{d\theta} \right)^2 \right] \times \left[ 2V_r + \frac{dV_r}{d\theta} \cot\theta + \frac{d^2V_r}{d\theta^2} \right] - \frac{dV_r}{d\theta} \left[ V_r \frac{dV_r}{d\theta} + \frac{dV_r}{d\theta} \left( \frac{d^2V_r}{d\theta^2} \right) \right] = 0 \tag{7}$$

$$V_\theta = \frac{dV_r}{d\theta} \tag{8}$$

위 식에서  $V$ 는 유동 속도를,  $r, \theta$ 는 반지름과 각방향을 나타낸다. 비행체 표면에서 표면과 수직인 방향(각방향)의 속도 성분의 크기가 영이라는 조건을 이용해, 위 식을 반복계산하여 경사충격파의 각도를 결정했다.

계산된 경사충격파 각도에 대해 위의 충격파 관계식과 Taylor-Maccoll식, 그리고 등엔트로피 관계식을 이용해 유동장을 계산하였다.

2.2 물방울 모델링

충격파 유동장에 의한 물방울의 변형은 아래와 같이 정의되는  $We$ 수에 영향을 받는다.

$$We = \frac{\rho_w U^2 D_0}{\sigma} \tag{9}$$

위 식에서  $\rho_w, D_0, \sigma$ 는 각각 물방울의 밀도, 초기 직경, 표면 장력을 가리킨다. 입자침식에 영향을 끼치는 대기 물방울의 크기는 지름 1 ~ 5 mm로, 이에 해당하는  $We$ 수의 크기는 수천에서 수만에 달한다<sup>[2]</sup>. 본 연구에서는 이 영역에 해당하는 실험 자료들만을 이용해 경험적 모델을 도출해 물방울의 변형을 모델링하였다.

2.2.1 물방울의 이동

충격파를 통과한 물방울은 유동에 의해 가해지는 외력을 받아 운동한다. 물방울의 이동은 Adler and Mihora<sup>[1]</sup>의 연구에서와 동일하게 아래와 같이 모델링

하였다.

$$X = AT^2 \tag{10}$$

위 식에서  $A, X, T$ 는 각각 가속도, 무차원화된 거리와 시간으로 아래와 같이 정의된다<sup>[4,5]</sup>.

$$A = \begin{cases} 0.252 \text{Ln } We & \text{for } 12 \leq We \leq 300 \\ 2.966 - 0.268 \text{Ln } We & \text{for } 300 \leq We \leq 8000 \\ 0.062 \text{Ln } We & \text{for } 8000 \leq We \end{cases} \tag{11}$$

$$X = x/D_0 \tag{12}$$

$$T = t \frac{U}{D_0} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_w}} \tag{13}$$

위 식에서  $\rho_g$ 와  $U$ 는 유동의 밀도와 상대속도를 가리킨다.

2.2.2 물방울의 변형

충격파를 통과한 물방울의 변형은 유동과의 경계면에서 생성되는 반사 충격파, 투과 충격파, 경계면의 이동과 같은 복잡한 현상의 상호작용에 일어난다. 특히, 물방울 내부에 생성되는 투과 충격파의 이동 및 반사로 인해 물방울은 유동장에 수직인 방향으로 변형을 겪게 된다. 이러한 변형 과정은 기존의 이론적<sup>[1,2]</sup> 및 실험적 연구<sup>[6,7]</sup>들을 통해 밝혀져 왔으며, 이로부터, 물방울의 변형을 Fig. 2와 단순화할 수 있다. 구형의 물방울은 일정 시간 동안( $0 < T < T_1$ ) 원래의 형상을 유지하다가, 타원에 가까운 단면을 가진 납작한 원관 형태로 변하기 시작한다. 이로 인해 유동과 수직인 방향의 직경  $D$ 는 점차 커지게 된다( $T_1 < T < T_2$ ). 이와 동시에 외부 유동으로부터 물방울에 가해지는 전단력에 의해 표면에서부터 미세입자들이 떨어져 나가, 물방울은 유성(fireball)과 같은 형상을 띠게 된다. 이 현상은 시간이 흐를수록 심해지고, 이로 인해, 물방울의 직경은 다시 작아진다. ( $T_2 < T < T_3$ ) 시간이 더 경과하면, 물방울은 완전히 포말로 바뀌어 소멸(breakup)하게 된다.

발표된 Adler and Mihora<sup>[1]</sup>의 해석 기법에서는 물방울의 변형 계산을 위해 Ranger and Nicholls<sup>[6]</sup>의 실험 결과를 이용하였다. 이 실험에서 물방울의 변형은 섀도우 기법(shadowgraph)을 이용해 관찰되었다. 하지만,

이 기법을 이용할 경우, 물방울의 주변과 후류에 존재하는 미세 입자층이 입사된 광을 산란(scattering)시키기 때문에 정확한 물방울의 형상을 관측하기 어렵다<sup>[7]</sup>.

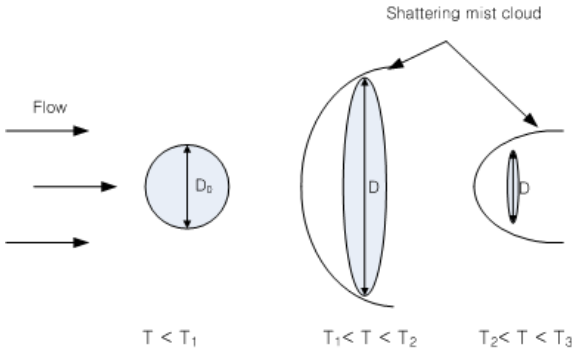


Fig. 2. Waterdrop's deformation history after passing through shock wave

Table 1. Characteristic non-dimensional time related waterdrop's size change

시간	d = 1.03 mm	d = 4.3 mm
T <sub>1</sub>	0.17	0.095
T <sub>2</sub>	1	1.4
T <sub>3</sub>	4	3.5

이러한 기존 관측 기법의 한계를 벗어나기 위해, Wierzba and Takayama<sup>[7]</sup>는 레이저를 활용한 홀로그래픽 간섭계를 이용해 물방울의 정확한 크기를 관측하는 실험을 수행하였다. 시험한 물방울의 직경은 1.03 mm 와 4.3 mm이고, We 수의 범위는 600에서 7600이며, 시험 결과는 Table 1과 같다. T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>는 각각의 직경의 물방울이 변형을 시작하고, 최대치에 도달하고, 소멸되는 시간을 나타낸다. 이 시험 결과에 따르면, 변형 초기에는 Ranger and Nicolls와 Wierzba and Takayama에 의해서 관측된 물방울의 크기가 서로 유사한 결과를 보여준다. 하지만, 물방울의 직경, D가 최대치에 도달한 순간 전후부터는, 즉, 물방울의 주변과 후류에 미세입자층이 활발하게 발달한 순간 이후부터는 Wierzba and Takayama에 의해서 관측된 물방울의 크기가 더 작은 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 Table 1의 시험 결과로부터 아래와 같은 직경을 모델을 도출하였다.

$$D/D_0 = \begin{cases} 1.0 & \text{for } T < T_1 \\ 2(T - T_1) + 1 & \text{for } T_1 < T < T_2 \\ \frac{2(T_2 - T_1) + 1}{T_2 - T_3}(T - T_3) & \text{for } T_2 < T < T_3 \\ N/A \text{ (breakup)} & \text{for } T_3 < T \end{cases} \quad (14)$$

위 식에서 D는 유동방향에 수직한 물방울의 직경을 나타낸다. T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>은 물방울의 직경에 따라 다른 값을 가지며, 이 값들은 Table 1에서 주어진 값을 외삽 혹은 내삽하여 구하였다.

시간이 흐름에 따라 감소되는 물방울의 질량을 계산을 위해 Waldman and Reinecke<sup>[8]</sup>가 도출한 경험적 모델을 Wierzba and Takayama<sup>[7]</sup>의 실험 결과에 맞게 아래와 같이 수정하여 적용하였다.

$$m/m_0 = \begin{cases} 1.0 & \text{for } T < T_1 \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \left( \frac{T - T_1}{T_3 - T_1} \pi \right) \right) & \text{for } T_1 < T < T_3 \\ N/A \text{ (break up)} & \text{for } T_3 < T \end{cases} \quad (15)$$

### 2.2.3 물방울의 회전 각도

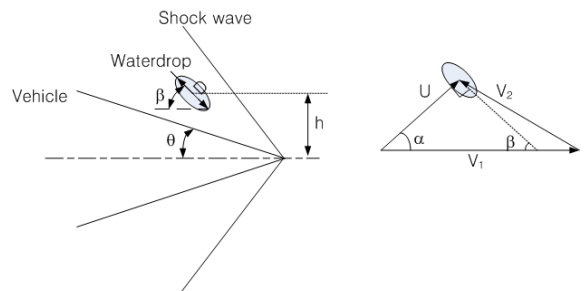


Fig. 3. Waterdrop's orientation angle in the flow field by a flight vehicle with cone-shaped side wall

반각,  $\theta$ 를 가진 원추형의 비행체 주변에는 Fig. 2의 왼쪽과 같이 경사충격파가 생성된다. 경사충격파를 통과한 물방울은 비행체의 속도 방향에 대해서 회전 각도,  $\beta$ 를 가지고 비행체와 충돌한다. 이는 물방울의 변형이 물방울에 가해지는 유동의 방향에 수직하게 일어나기 때문이다<sup>[8,9]</sup>. Fig. 3의 오른쪽에서 살펴 볼 수 있듯이, 물방울에 가해지는 속도 U는 아래와 같이 유동 속도 V<sub>2</sub>와 비행체의 속도 V<sub>1</sub>의 합으로부터 구할 수 있다. 속도 U가 흐름과 이루는 각도  $\alpha$ 로부터 아래와

같이 물방울의 회전 각도  $\beta$ 를 구할 수 있다.

$$\beta = 90 - \alpha \tag{16}$$

### 3. 비행체 적용

개발한 해석 기법을 임의로 속도(마하 2와 4)로 비행하는 비행체의 첨두부 주변에 생성되는 정체점 유동과 원추부 주변에 생성되는 유동에 적용해 물방울의 변형을 계산하였다.

#### 3.1 첨두부 유동장에 의한 물방울의 변형

임의의 첨두부 반지름(50 mm)를 가진 비행체의 정체점 영역에 생성되는 유동장에 의한 물방울의 변형을 계산하였다. 비행체에 입자침식을 일으킨다고 알려진 지름 1 ~ 5 mm인 물방울의 변형을 고려하였다<sup>[2]</sup>.

해석 결과를 Fig. 4와 5에 도시하였다. 각각의 그림들은 비행체와 충돌하는 순간에 물방울이 가지는 직경율과 질량율을 나타낸다.

유동 속도가 빠를수록, 물방울은 강한 충격파를 만나기 때문에, 더 빠른 변형을 겪는다. 하지만, 유동 속도가 빠를수록 더 짧은 충격파 거리를 가지기 때문에, 결과적으로는 더 작은 변형, 즉 작은 직경율과 큰 질량율을 갖는 것을 그림들을 통해 확인할 수 있다.

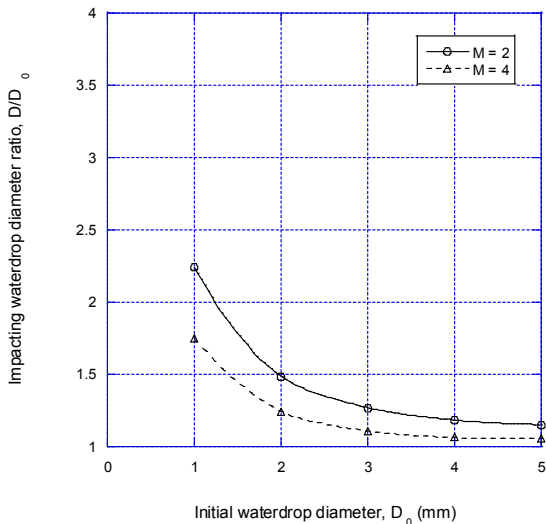


Fig. 4. Waterdrop's diameter ratio in the shock flow field by a hemispherical nose

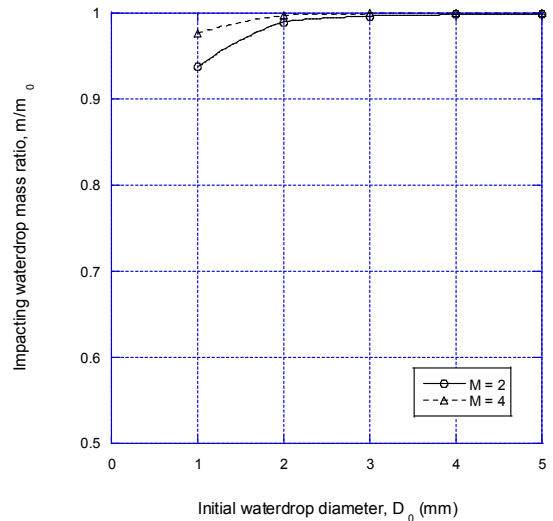


Fig. 5. Waterdrop's mass ratio in the shock flow field by hemispherical nose

또한, 물방울의 크기가 클수록, 더 작은 변형을 겪는 것을 확인할 수 있다. 이는 물방울의 변형을 정의하는 무차원 시간, T가 물방울의 크기에 반비례하기 때문에 발생하는 현상이다.

#### 3.2 원추부 유동장에 의한 물방울의 변형

반각,  $\theta$ , 20도를 가진 원추형의 비행체 주변에 생성되는 유동장에 의한 물방울의 변형을 계산하였다. 물방울이 비행체와 충돌하는 위치,  $h$ 에 따라 충격파를 통과한 물방울이 비행체와 충돌하는 순간까지 이동하는 거리가 달라진다. 본 연구에서는 원추부의 중심축으로부터 25 mm, 50 mm, 100 mm 떨어진 높이에서 물방울이 충돌하는 경우를 고려하였다.

Fig. 6과 7에 해석 결과를 도시하였다. 각각의 그림들은 비행체와 충돌하는 순간에 물방울이 가지는 직경율과 질량율을 나타낸다.

Fig. 6을 살펴보면, 앞의 Fig. 3과 달리 원추부 중심축으로부터 100 mm 높이에서 마하 2 혹은 4의 속도로 충돌하는 물방울의 경우, 직경이 작은 물방울이 가장 큰 직경율을 가지지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만, Fig. 7을 살펴보면, 직경이 작을수록, 정체점 유동에서 살펴본 바와 마찬가지로, 큰 질량 변화를 겪는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 원추부 중심축으로부터 100 mm 위에서 충돌하는 지름 1 mm의 입자는 물방울이 최대 직경율을 가지는 시점( $T_2$ )를 지나 직경율이

감소하는 변형 과정을 겪고 있다는 것을 알 수 있다. 실제로 마하 2의 속도로 충돌하는 경우에는 물방울의 지름이 1.57 mm보다 클수록, 마하 4의 속도로 충돌하는 경우 지름이 1.06 mm보다 클수록 직경율이 다시 작아지기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이 크기보다 큰 물방울들의 경우, 충돌 순간까지 걸린 시간이  $T_2$ 를 넘지 않는 것을 알 수 있다.

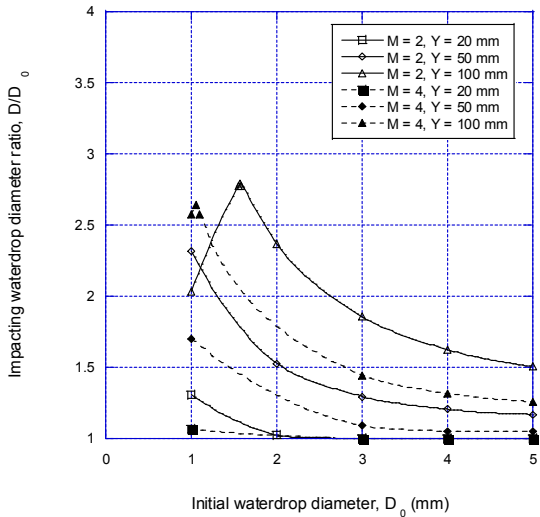


Fig. 6. Waterdrop's diameter ratio in the shock flow field by the cone-shaped side wall

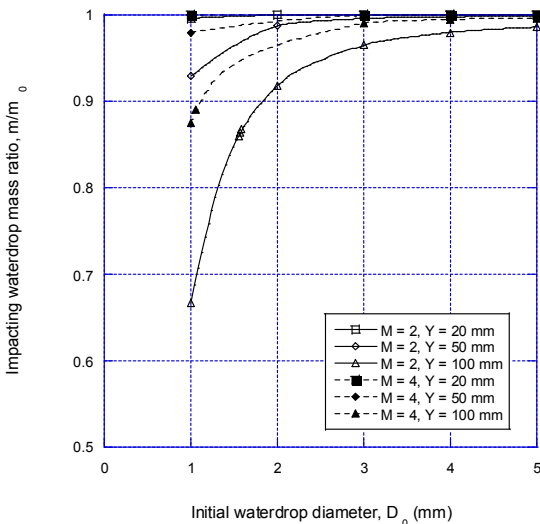


Fig. 7. Waterdrop's mass ratio in the shock flow field by the cone-shaped side wall

물방울이 유동장내에서 머무르는 시간이  $T_2$ 보다 짧은 경우, 침투부에서 살펴 볼 수 있었던 것과 같이, 속도가 빠를수록 물방울이 충격파를 통과해 이동하는 거리가 짧아지기 때문에, 더 작은 변형을 겪는 것을 확인할 수 있다.

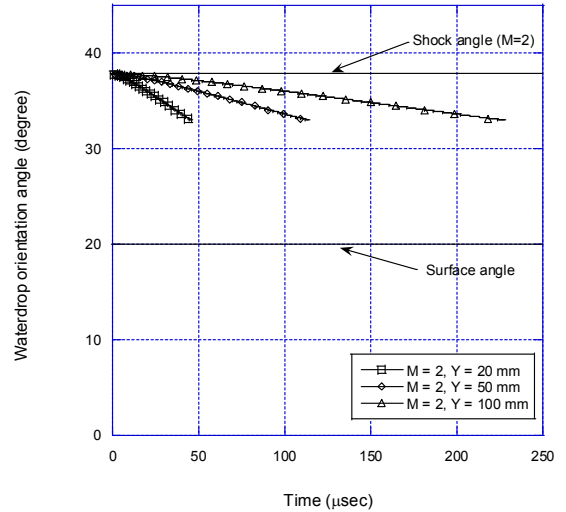


Fig. 8. Waterdrop's orientation angle history in the shock flow field by the cone-shaped side wall (M = 2)

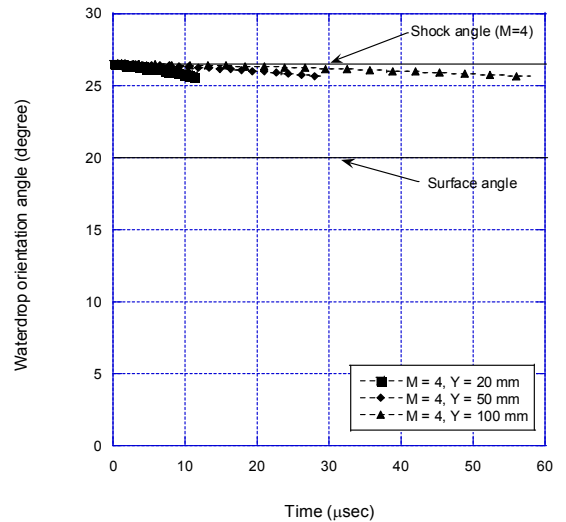


Fig. 9. Waterdrop's orientation angle history in the shock flow field by the cone-shaped side wall (M = 4)

Fig. 8과 9에 물방울이 충격파를 통과해 비행체와 충돌하는 순간까지 가지는 회전 각도 히스토리를 나타냈다. 각각의 그림들은 비행 속도가 마하 2와 4인 경우를 가리킨다. 비교를 위해, 비행체의 원주 각도와 충격파 각도도 함께 도시하였다. 해석 결과에 따르면, 충격파를 통과한 순간의 물방울의 회전 각도는 충격파각도와 동일하고, 이후 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 충격파를 통과한 순간, 물방울이 충격파 방향과 동일한 방향으로 변형을 겪기 때문에 발생하는 현상이다.

#### 4. 결론

충격파를 통과해 비행체와 충돌하는 물방울의 변형을 효율적으로 예측할 수 있는 경험적 해석 기법을 개발하였다. 유동장 해석을 위해서는 기존의 이론식 및 경험식을, 물방울의 변형 해석을 위해서는 기존의 실험 결과를 바탕으로 수립한 경험식을 이용하였다.

본 해석 기법을 이용해, 임의로 정한 비행 조건에서 발생하는 물방울의 변형을 해석해 보았다. 비행 속도는 마하 2와 4로 가정하였으며, 비행체의 첨두부와 원추부는 각각 50 mm의 반경과 20도의 반각을 가지고 있다고 가정하였다. 첨두부의 정체점 영역에서 물방울의 직경은 최대 2.24배 증가하고, 질량은 10 % 미만으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 원주 주변에서 물방울은 100 mm의 충돌 높이에서 최대 2.77배의 직경 증가를 보이고, 질량은 66.7 %까지 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 물방울의 회전 각도는 마하 2와 4인 경우, 각각 33.0도와 25.6도를 가리키는 것으로 확인되었다.

본 연구에서 개발한 해석 기법을 이용할 경우, 적은 비용으로 다양한 비행체 형상 및 유동 조건에서 물방울의 변형을 계산할 수 있다. 따라서, 본 기술은 비행체 개발 단계에서부터 물방울 충돌로 인한 비행체의 손상을 고려하는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 여겨진다.

#### References

- [1] W. F. Adler and D. J. Mihora, "Infrared-Transmitting Window Survivability in Hydrometeor Environments," Proc. SPIE, Vol. 1760, pp. 291-302, 1992.
- [2] C. R. Seward, C. S. J. Pickles, E. J. Coad, M. Watt, and J. E. Field, "Studies of Rain Erosion Mechanisms in a Range of IR Transmitting Ceramics - Including Coated Samples," SPC-92-4032, 1997.
- [3] F. S. Billig, "Shock-Wave Shapes around Spherical and Cylindrical-Nosed Bodies," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 4, No. 6, pp. 822-823, 1967
- [4] J. D. Anderson, "Modern Compressible Flow," McGraw-Hill, Inc. New York, pp. 250-259, 1982.
- [5] W. G. Reinecke and G. D. Waldman, "Shock Layer Shattering of Cloud Drops in Reentry Flight," AIAA Paper 75-152, AIAA 13th Aerospace Sciences Meeting, January, 1975.
- [6] A. A. Ranger and J. A. Nicholls, "Aerodynamic Shattering of Liquid Drops," AIAA Journal, Vol. 7, No. 2, pp. 285-290, 1969.
- [7] A. Wierzba and K. Takayama, "Experimental Investigation of the Aerodynamic Breakup of Liquid Drops," AIAA Journal, Vol. 26, No. 11, pp. 1329-1335, 1988.
- [8] G. D. Waldman and W. G. Reinecke, "Raindrop Breakup in the Shock Layer of a High-Speed Vehicle," AIAA journal, Vol. 10, No. 9, pp. 1200-1204, 1972.
- [9] M. Bruce, L. Brian, and R. Gerald, "Investigation of the Physical Phenomena Associated with Rain Impact on Supersonic and Hypersonic Flight Vehicles," US Army Research. Paper 209, 2013.