



액적을 동반한 기체에서 이차원 충격파 회절

염금수¹, 장근식^{*2}

TWO-DIMENSIONAL SHOCK WAVE DIFFRACTION IN DROPLET-LADEN GAS MEDIA

G.S. Yeom¹ and K.S. Chang^{*2}

Shock wave interaction with droplet-gas medium is investigated in this paper. In the present computation, the shock wave is initially started in a pure gas and reflected from the wedge to interact with the droplet-ridden gas flows. We used the compressible two-fluid two-phase model that is solved by the two-fluid version of the HLL scheme. The interfacial drag force and heat transfer were included to model the interaction between continuous and dispersed phases. The parametric effect of void fraction on the shock wave reflection in the two-phase media was investigated.

Key Words : 충격파 반사(Shock Wave Reflection); 액적-기체 이상유동(Droplet-Gas Two-Phase Flow); 이유체모델(Two-Fluid Model); HLL 기법(HLL Scheme)

1. 서론

충격파가 이상유동을 속을 통과해서 지나갈 경우, 단상유동에서와는 달리 여러 가지 흥미로운 현상이 나타난다. 예를 들어, 고속의 비행체가 구름이나 폭풍우 속을 지나는 경우 종종 충격파와 액적의 상호작용이 발생한다. 이 경우 비행체의 양력과 항력에 상당한 영향을 미치게 된다.

기체에서 충격파가 경사면에서 반사되는 문제는 이전부터 실험과 수치적으로 많은 연구가 수행되어 왔다[1]. 하지만 이상유동에서의 충격파와 경사면의 문제는 주로 고체입자의 경우에 한정되어 연구되어 왔다[2, 3]. 이것은 액적의 경우 고려해야 할 점이 많아서 그 해석이 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 액적과 기체의 충격파가 초기에 순수한 기체에서 출발하여 액적-기체 이상유동 매질을 통과하여 기울어진 경사면에서 반사되는 문제를 다룬다. 또한 본 계산에서는 액적분열이 발생하지 않는 매우 작은 액적에 대해서만 다루고자 한다. 지배방정식으로 압축성 이유체 이상유동 모델을

사용하고, 수치기법으로는 이유체 모델에 맞게 수정된 HLL 기법[4, 5]을 사용한다. 연속상과 분산상 사이의 상호작용을 모사하기 위해 상경계면의 항력과 열전달 항을 추가하였다. 본 모델을 사용하여 이상유동에서의 충격파 반사에 대한 액적 기공률의 영향을 수치적으로 조사하였다.

2. 지배방정식 및 수치기법

본 연구에서 사용된 이차원 압축성 이유체 이상유동 모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial x} + \mathbf{H} \frac{\partial \alpha_g}{\partial x} + \mathbf{I} \frac{\partial \alpha_g}{\partial y} = \mathbf{S}, \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \alpha_g \rho_g \\ \alpha_l \rho_l \\ \alpha_g \rho_g u_g \\ \alpha_l \rho_l u_l \\ \alpha_g \rho_g v_g \\ \alpha_l \rho_l v_l \\ \alpha_g \rho_g E_g \\ \alpha_l \rho_l E_l \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \alpha_g \rho_g u_g \\ \alpha_l \rho_l u_l \\ \alpha_g \rho_g u_g^2 + \alpha_g p_g \\ \alpha_l \rho_l u_l^2 + \alpha_l p_l \\ \alpha_g \rho_g u_g v_g \\ \alpha_l \rho_l u_l v_l \\ \alpha_g \rho_g u_g E_g + \alpha_g u_g p_g \\ \alpha_l \rho_l u_l E_l + \alpha_l u_l p_l \end{pmatrix}$$

1 정회원, 한국과학기술원 기계항공시스템학부

2 종신회원, 한국과학기술원 기계항공시스템학부

* TEL : (042) 350-3711

* Corresponding author, E-mail: kschang@kaist.ac.kr



$$G = \begin{pmatrix} \alpha_g \rho_g v_g \\ \alpha_l \rho_l v_l \\ \alpha_g \rho_g u_g v_g \\ \alpha_l \rho_l u_l v_l \\ \alpha_g \rho_g v_g^2 + \alpha_l p_l \\ \alpha_l \rho_l v_l^2 + \alpha_l p_l \\ \alpha_g \rho_g v_g E_g + \alpha_l v_l p_l \\ \alpha_l \rho_l v_l E_l + \alpha_l v_l p_l \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -p^i \\ p^i \\ 0 \\ 0 \\ -p^i u^i \\ p^i u^i \end{pmatrix}, I = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -p^i \\ p^i \\ -p^i v^i \\ p^i v^i \end{pmatrix}$$

여기서 α 는 기공률, ρ 는 밀도, u 는 x-속도, v 는 y-속도, E 는 총에너지, p 는 압력을 나타낸다. 하첨자 g 는 기체상을, l 은 액체상(액적)을 의미한다. 계면압력 p^i 와 계면속도 u^i 는 Yeom & Chang의 모델식[5]을 사용한다.

$$p^i = p - \delta \frac{\alpha_g \alpha_l \rho_g \rho_l}{\alpha_g \rho_l + \alpha_l \rho_g} [(u_g - u_l)^2 + (v_g - v_l)^2] \quad (2)$$

$$u^i = \frac{\alpha_g \rho_g u_g + \alpha_l \rho_l u_l}{\alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l}, v^i = \frac{\alpha_g \rho_g v_g + \alpha_l \rho_l v_l}{\alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l} \quad (3)$$

또한 액적과 기체는 압축성으로 취급되며 stiffened-gas 상태방정식을 사용한다.

$$p_k = (\gamma_k - 1) \rho_k e_k - \gamma_k p_{\infty, k} \quad (4)$$

단일 액적에 의한 항력과 액적과 기체 사이의 열전달은 다음의 식으로 표현된다.

$$D = -\frac{1}{8} \pi d^2 C_{D \rho_g} (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_l) |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_l| \quad (5)$$

$$Q = \frac{\pi d \mu_g C_{p, g} N}{Pr} (T_l - T_g) \quad (6)$$

지배방정식은 연산자 분리기법을 사용하여 편미분방정식항과 소스항을 분리하여 푼다. 편미분방정식항은 이유체 방정식을 위해 수정된 HLL 해법[5]을 사용하며 소스항은 Runge-Kutta 방법을 사용하여 계산하였다.

4. 계산 결과 및 토의

본 계산에서 충격과 앞의 초기조건은 다음과 같으며, 충격과 이후의 조건은 Rankine-Hugoniot 조건으로부터 구해진다.

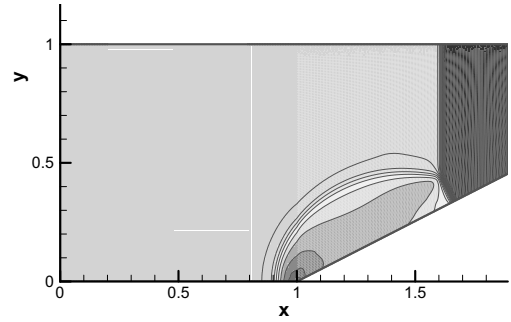


Fig. 1. $\alpha_l = 0.0001\%$ 일때 등압력도

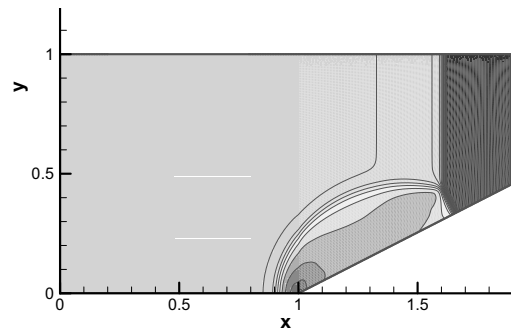


Fig. 2. $\alpha_l = 0.001\%$ 일때 등압력도

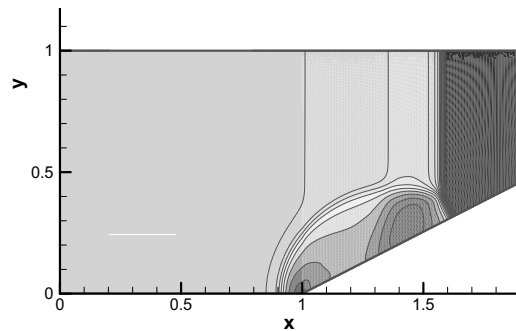
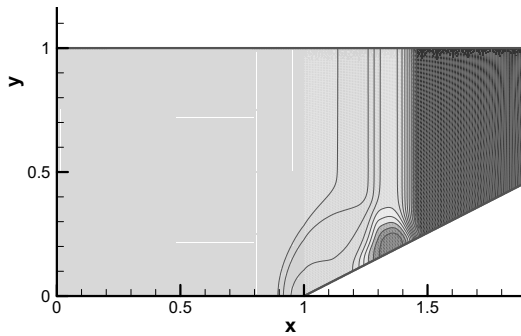
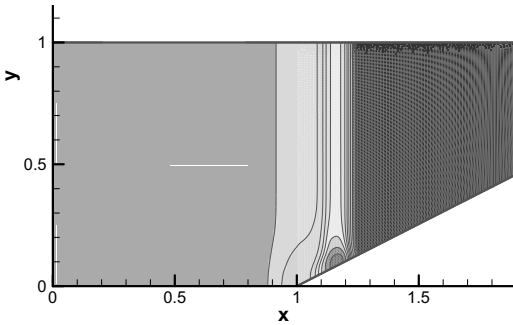


Fig. 3. $\alpha_l = 0.01\%$ 일때 등압력도

$$p_0 = 101 \text{ kPa}, T_0 = 299.2 \text{ K}, \rho_0 = 1.1766 \text{ kg/m}^3$$

또한, 액적의 크기는 $d = 10 \mu\text{m}$, CFL 수는 0.4 값이 사용되었다. 초기 기체에서 진행하는 입사 충격파의 강도는 2.03이고 경사면의 각도는 27도로 설정하였다.

Figs. 1-5는 액적의 기공률이 각각 0.0001%, 0.001%, 0.01%, 0.1%, 그리고 1% 일 때 경사면에서 충격파가 반사되는 모습을 보여준다. 액적의 기공률 매우 작을 때는 단상유동의 충격파 반사와 유사한 모습을 보여주지만, 기공률이 증가 하면서

Fig. 4. $\alpha_l = 0.1\%$ 일때 등압력도Fig. 5. $\alpha_l = 1\%$ 일때 등압력도

입사충격과 뒤의 이완영역(relaxation zone)이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이완영역과 반사충격과(reflected shock)과의 간섭현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이완영역에서 기체의 밀도는 액적의 기공율이 증가함에 따라 같이 증가하며, 이곳에

서 주로 운동량 및 열의 교환이 발생하며 액적과 기체가 비평형상태가 된다. 또한 액적에 의해 입사충격과 뒷부분에 새로운 접촉불연속면이 발생함을 알 수 있다. 액적들은 반사충격과 안의 이완영역에서 가장 밀집하게 된다.

Fig. 5에서, 액적의 기공율이 매우 큰 경우(1%) 물질경계면에 의해 입사충격과와 반대 방향으로 진행되는 수직 반사충격과의 모습이 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 이완영역의 크기가 기공율이 작은 경우(0.0001%)에 비해서 상대적으로 매우 줄어드는 것을 보여준다.

참고문헌

- [1] 1991, Ben-Dor, G., "Shock Wave Reflection Phenomena," Springer-Verlag, New York.
- [2] 1991, Kim, S.W. and Chang, K.S., "Reflection of Shock Wave from a Compression Corner in a Particle-Laden Gas Region," *Shock Waves* Vol.1, pp.65-73.
- [3] 2001, Ben-Dor, G., Igra, O. and Wang, L., "Shock Wave Reflections in Dust-Gas Suspensions," *ASME J. Fluid Engr.* Vol.123, pp.145-153.
- [4] 2006, Yeom G.S. and Chang, K.S., "Numerical Simulation of Two-Fluid Two-Phase Flows by HLL Scheme Using an Approximate Jacobian Matrix," *Numer. Heat Tr. B-Fund.*, Vol.49, pp.155-177.
- [5] 2009, Yeom G.S. and Chang, K.S., "Two-Dimensional Two-Fluid Two-Phase Flow Simulation Using an Approximate Jacobian Matrix for HLL Scheme," *Numer. Heat Tr. B-Fund.*, Vol.56, pp.372-392.