

## 한가지 자유분사흐름에 대한 수치모의연구

김 철 석

선행연구[3]에서는 자유분사흐름의 특성량들을 정의하고 계산하는 아브라모비츠공식을 소개하였다. 또한 정상자유분사흐름을 계산하기 위하여 대기경제조건으로는 압력조건을 주고 란류모형으로는 표준  $k-\varepsilon$  모형을 리용하였다.[1] 여기서 압력-속도련결방법은 SIMPLE도식이고 계산속도를 가속시키기 위하여 다중그물해석기를 리용하였다.

선행연구[2]에서는 가로진동하는 류입흐름을 가지는 란류혼합층의 직접수치모의를 진행하였다.

론문에서는 눈막이에 리용되는 한가지 자유분사흐름장치에서의 흐름을 해석하는 방법을 제기하고 설계제작하여 측정한 실험자료로 해석방법의 타당성을 확증하였다.

### 1. 수치계산방법

#### 1) 기본방정식

자유분사흐름에서 성립하는 기본방정식들은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V} = \rho F - \nabla p + \nabla \cdot \sigma - \rho \nabla \left( \frac{2}{3} k \right) + \mathbf{F}_p \quad (2)$$

$$\sigma = 2\mu \dot{S} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{V}$ 는 공기의 속도,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $p$ 는 압력,  $k$ 는 란류운동에너지를,  $\mu$ 는 동력학적점성계수,  $\dot{S}$ 는 변형속도텐서,  $F$ 는 질량힘의 세기이다.

란류에 대한  $k-\varepsilon$  모형의 란류수송방정식들은 다음과 같다.

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{V}k) = -\frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot \mathbf{V}) + \sigma (\nabla \cdot \mathbf{V}) + \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu_e}{Pr_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{V}\varepsilon) = -\left( \frac{2}{3} C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 2} \right) \rho \varepsilon (\nabla \cdot \mathbf{V}) + \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu_e}{Pr_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} [C_{\varepsilon 1} \sigma (\nabla \cdot \mathbf{V}) - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon]$$

여기서  $k$ 는 란류운동에너지를,  $\varepsilon$ 은 란류점성산일률,  $\mu_e$ 는 유효점성계수,  $c_{\varepsilon 1}$ ,  $c_{\varepsilon 2}$ ,  $c_\mu$ 는 상수이고  $Pr_k$ ,  $Pr_\varepsilon$ 은 란류확산을 지배하는 란류프란틀수이다. ( $c_{\varepsilon 1}=1.44$ ,  $c_{\varepsilon 2}=1.92$ ,  $c_\mu=0.09$ ,  $Pr_k=1.0$ ,  $Pr_\varepsilon=1.3$ )

#### 2) 경계조건

입구 —  $U_{in} = Q/S = 40\text{m/s}$ , 관벽 —  $U_{wall} = 0$ , 지면 —  $U_{ground} = 0$ , 출구 —  $p_{out} = p_{대}$

### 3) 계산방법

수치계산에서 리산화도식은 1계풍상리산화도식이고 압력-속도연결방법은 SIMPLE도식을 리용하였다. 그리고 완화파라미터들은 기정으로 하였으며 초기입구에서 난류운동에 네르기와 점성산일률은 아래와 같은 식에 따라 주었다.

$$k = (0.05v_{in})^2 = 4\text{m}^2/\text{s}^2, \quad \varepsilon = \frac{0.09^{3/4} \cdot k^{3/2}}{l}, \quad l = 0.07D_{in} \quad (5)$$

여기서  $D_{in}$ 은 입구관로의 등가직경이고  $v_{in}$ 은 입구속도이다.

수렴성기준은 련속성이  $10^{-7}$  정도로 되게 주었다.

## 2. 계산결과와 분석

그림 1에서는 한가지 자유분사흐름장치의 기본부분인 분사노즐의 리론도를 보여주었다.

계산그물수는 18만개와 31만개, 60만개로 하였다.

다음 류체흐름해석프로그램인 FLUENT6.326으로 수렴오차가  $10^{-7}$  정도될 때까지 계산을 진행하였다. 이때 송풍기에서 출구속도는 40m/s이다. 여기서는 내부흐름구역과 외부흐름구역이 동시에 존재하므로 관벽에서의  $y^+$  조건도 만족시켜야 하고 지면과 대기구역에서의 경계조건도 충분히 고려하여야 한다. 즉 류체력학의 내부분제와 외부분제를 함께 풀어야 한다.

그물수가 31만개인 경우와 60만개인 경우에 분사노즐출구속도와 입출구압력차를 비롯한 계산결과들이 같았다. 그러므로 우리는 그물수가 31만개이상부터 계산결과가 요소수에 무관계하다는것을 확증할수 있었다.

그림 2와 3에서는 요소수가 31만개일 때 흐름의 전구간에서 속도분포와 압력분포를 보여준다.

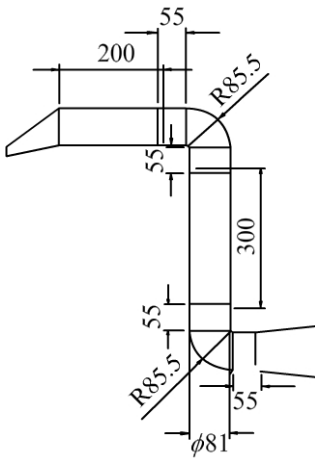


그림 1. 분사노즐의 리론도(mm)

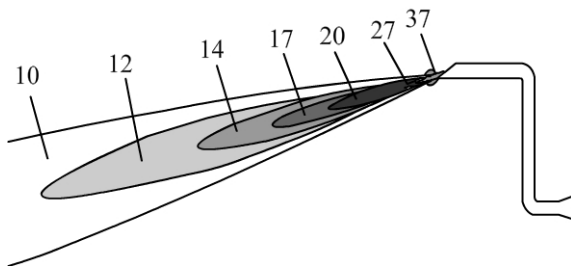


그림 2. 속도분포(m/s)

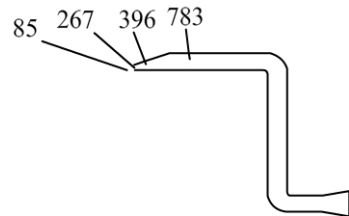


그림 3. 압력분포(Pa)

그림 4에서는 수치계산결과와 설계제작한 자유분사흐름장치로 측정한 실험값을 비교하였다.

그라프에서 보여주는바와 같이 수치계산값과 실험값과의 상대오차는 6%정도이다.

그러므로 앞에서 론의한 수치계산방법을 다른 자유분사흐름의 해석과 설계에 리용할 수 있다.

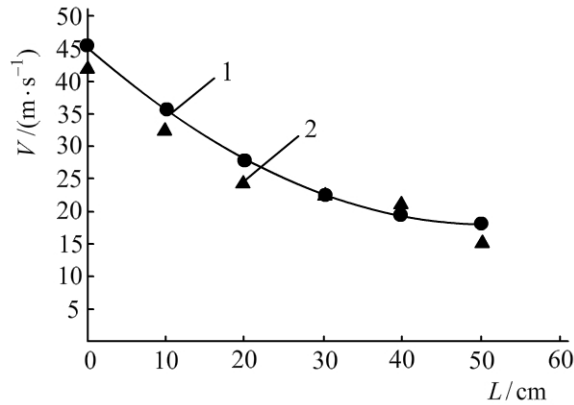


그림 4. 수치계산결과와 실험값과의 비교

1—CFD계산값, 2—실험값

## 참 고 문 헌

- [1] X. Zhou et al.; Computers and Mathematics with Applications, Pergamon, 179~191, 2015.
- [2] Y. Kametani; Journal of Fluid Science and Technology, Bulletin of the JSME, 10, 1, 1, 2015.
- [3] H. Schlichting; Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill, 136~157, 1987.

주체108(2019)년 6월 10일 원고접수

## Numerical Simulation Research on a Free Jet Flow

Kim Chol Sok

We propose the analysis method on a free jet flow, design and manufacture the equipment for this method. Then validity of the proposed analysis method is proved by comparison between measuring data and calculation ones.

Key words: free jet flow, numerical simulation, internal flow, external flow