

## 하나로 Flow straightener에 대한 압력강하평가

### Pressure Drop Evaluation for Flow Straightener in HANARO

박종학, 채희택, 박철, 김현일, 조영갑, 전병진  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

연구용 원자로인 하나로에서 노심하부로 유입되는 냉각수는 유입공동에서 대규모 와류동과 강한 난류유동이 발생되어 하나로 핵연료 집합체에 유체유발진동을 발생시킨다. 이러한 핵연료 집합체의 진동은 핵연료의 기계적 마모에 의한 손상의 한 원인이 된다. 이를 완화시키기 위해 핵연료 집합체가 설치된 유동관 입구에 한쪽 끝이 반구로 막히고 많은 작은 구멍이 뚫린 원통관 형태의 flow straightener를 설치하는 방안이 제안되었다. Flow straightener에서 발생하는 압력강하에 지배적인 영향을 미칠 것으로 판단되는 구멍의 크기를  $\varnothing 3\text{mm}$ 와  $\varnothing 5\text{mm}$  두 가지로 가정하고 상용 CFD 코드를 이용한 유동해석을 수행하여 발생하는 압력강하를 평가하였다. 전압을 기준으로 flow straightener의 구멍이  $\varnothing 3\text{mm}$ 인 경우는 약 136kPa,  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우는 약 99kPa의 압력강하를 보였으며 이는 flow straightener가 설치되지 않은 유동관에서 발생하는 압력강하(약 40kPa)에 비해 각각 3.4배, 2.5배 높은 값을 나타낸다. 또한 이를 압력손실계수로 환산해 보면 각각  $K_{\varnothing 3\text{mm}} = 1.35$  와  $K_{\varnothing 5\text{mm}} = 0.99$  정도이다.

#### ABSTRACT

Large scale vortex flow and high intense turbulent flow generated in the inlet plenum of HANARO research reactor attribute the wear of fuel assembly to the flow induced vibration. So, it is suggested that one-side-capped cylinder having many holes is installed at the inlet of each flow tubes where fuel assembly is loaded to reduce the fretting wear caused by vibration. Pressure drop across the flow straightener is evaluated by commercial CFD code for two types of muffler; one is  $\varnothing 3\text{mm}$ -holed, the other is  $\varnothing 5\text{mm}$ -holed. Hole size seems to dominate the pressure drop of flow straightener. According to CFD analysis results, pressure drop based on the total pressure through the flow straightener is about 136kPa for  $\varnothing 3\text{mm}$  and 99kPa for  $\varnothing 5\text{mm}$ , which is 3.4 times and 2.5 times higher than flow tube without flow straightener. Converting total pressure drop to loss coefficient,  $K_{\varnothing 3\text{mm}}$  and  $K_{\varnothing 5\text{mm}}$  are 1.35, 0.99, respectively

## 1. 서론

연구용 원자로인 하나로는 하부 유입공동에 냉각수가 유입되었다가 핵연료가 장전된 각각의 유동관으로 다시 배분되어 핵연료를 냉각하게 된다. 이 때 유입공동에서 대규모의 와류동과 강한 난류유동이 발생되어 핵연료 집합체에 유체유발진동을 일으키며, 이로 인해 핵연료 집합체의 마모 손상에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이러한 유체유발진동을 완화시키기 위해서 유동관 입구에 유동을 안정화시켜 줄 수 있는 flow straightener를 설치하는 방안을 고려하게 되었고, 한쪽 끝이 반구형으로 막힌 원통관에 냉각수가 통과할 수 있는 많은 작은 구멍을 뚫은 형태의 flow straightener가 제안 되었다. flow straightener는 핵연료 냉각을 위한 노심 유량에 미치는 영향을 최소화하기 위해 되도록 낮은 압력강하가 발생하도록 설계되어야 한다. 하지만 참고문헌[1,2]에는 이러한 형태의 물체에서 발생하는 압력강하 특성에 대한 자료가 부족하여 설계된 flow straightener에 대한 평가에 어려움이 있었다. 따라서 실험적인 방법으로 압력강하를 측정하기에 앞서 전산유동해석을 이용하여 flow straightener에서 발생하는 압력강하를 미리 예측하고 설계에 반영하고자 하였다.

본 연구에서는  $\varnothing 3\text{mm}$  과  $\varnothing 5\text{mm}$ 의 구멍을 갖는 두 가지 flow straightener에 대해 상용 CFD 코드(Fluent)를 사용하여 유동해석을 수행하여 유동현상과 발생하는 압력강하를 평가하였다. 또한 유동관에 flow straightener가 설치되지 않았을 경우에 대한 유동해석결과와 비교함으로써 순수한 flow straightener만의 압력강하 효과를 알아보았다.

## 2. 유동 해석

### 2. 1. 전산해석기법

Flow straightener에서의 유동을 해석하기 위해서는 다음과 같은 방정식들을 풀어야 한다.

- 연속 방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- 운동량 방정식

$$U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \overline{u_i u_k} \right) \quad (2)$$

이러한 지배방정식을 일반형으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k}) + S_\phi \quad (3)$$

여기서 좌변 항은 대류항이고, 우변의 첫 번째 항은 확산항이며,  $S_\phi$ 는 생성항이다.  $\phi = 1$ 인 경우

는 연속 방정식을 나타내고,  $\phi = U_i$ 인 경우는 운동량 방정식,  $\phi = T$ 인 경우는 에너지 방정식을 나타내며,  $\phi = k$ 와  $\varepsilon$ 인 경우는 난류 방정식을 나타낸다. 생성항  $S_\phi$ 는 각각의 지배방정식에 대해서 다른 형태로 표시된다.

유한체적법(FVM : Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식 (1)에 대한 차분방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_i) + S_c \quad (4)$$

범용 열유체해석 프로그램인 Fluent를 사용하여 차분방정식 (4)의 해를 구하였다. Fluent는 유한체적법을 기반으로 한 코드로서 속도 등 벡터량과 압력, 온도 등 스칼라 양을 같은 위치에 저장하는 비교차격자계(non-staggered grid)를 사용하며, 대류항을 계산하기 위한 차분방법들은 1차 상류차분법(First up-wind scheme) 2차 상류차분법(Second up-wind scheme), power-law scheme, 고차 상류차분법인 QUICK scheme을 선택하여 사용할 수 있다. 본 계산에서는 수렴성이 가장 우수한 1차 상류차분법을 사용하였다.

대부분의 해결해야 할 공학적인 문제가 난류현상을 포함하고 있어, 실제에 가까운 유동현상을 모사하고 정확한 결과를 얻기 위해서는 난류모델들이 반드시 도입 되어야 한다. Fluent에서는 2-equation 모델로서  $k-\varepsilon$ 모델을 기본으로 사용하고 RSM(Reynolds Stress Model)과 RNG(Renormalization Group) 모델을 선택적으로 사용할 수 있다.

본 연구에서는  $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였으며, 이때의 난류 운동에너지  $k$ 와 난류 운동에너지 소멸율  $\varepsilon$ 에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + G_k + G_b - \varepsilon \quad (5)$$

$$U_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 (G_k + G_b) - C_2)$$

(6)

여기서

$$G_k = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_i}, \quad G_b = \beta g_i \frac{\nu_t}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

계산결과에 대한 1차적인 수렴판정은 다음의 전 영역 잔류항의 총합이  $10^{-6}$  이하가 되는 시점으로 설정하였고, 계산값이 완전히 수렴했는지 판단하기 위해 출구에서의 압력값이 안정화되어 변화하지 않을 때까지 계산을 수행하였다.

$$\bar{R} = \frac{\sum_{nodesP} | [ A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P ] |}{\sum_{nodesP} | (A_P \phi_P) |} \leq 10^{-6}$$

(7)

## 2. 2. 해석모델

Flow straightener는 그림 1(a)와 같이 3mm 두께의 원통형 관으로 한쪽이 반구형이다. 원통관에는  $\varnothing 3\text{mm}$  구멍인 경우에는 원주 방향으로 24개, 길이 방향으로 13줄이 뚫려있고, 반구형 끝에도 총 61개의 구멍이 있다.  $\varnothing 5\text{mm}$  구멍인 경우에는 원주 방향으로 20개, 길이 방향으로 12줄, 반구에는 77개가 뚫려있다(그림 1(b)). 구멍 모서리부분은 어떠한 가공도 이루어지지 않은 것으로 가정하였다. 실제 하나로서는 39개의 유동관마다 flow straightener가 설치되지만 유동관 모두를 고려한 해석은 곤란하므로, 본 연구에서는 1개의 flow straightener만을 고려하였다. 또한 실제상황에서는 flow straightener에 접근하는 유동은 입구공동에서 형성되는 강한 와동으로 인해 횡방향으로의 유동이 있을 수 있지만 여기서는 단순히 아래쪽에서 위로 향하는 것으로 설정하였다. Flow straightener의 형상이 원통형으로 중심축에 대해 대칭적 구조이므로 1/4만을 해석 모델로 고려하였다. Flow straightener에 뚫린 구멍 직경이 두께에 비해 상당히 크다면 flow straightener의 두께를 무시하고 shell로 모델링 할 수 있지만 이 경우에는 구멍 직경과 두께가 3mm로 같은 크기를 갖기 때문에 이에 대한 고려가 필요하므로 flow straightener가 두께를 갖도록 모델링 하였다.

## 2. 3. 계산격자 및 경계조건

그림 2는 전체 계산영역과 flow straightener에서의 계산격자를 보여주고 있다. 전체 계산영역에 대한 격자는 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 총 약 25만개 가량으로 구성되어 있다. Flow straightener의 구멍은 원주방향으로 12개, 축방향으로 6개의 격자를 갖도록 했으며, flow straightener 주변에서는 그림 2(b)에 보는바와 같이 매우 많은 삼각형 격자가 밀집되어 있음을 볼 수 있다.

하나로에서 유입공동으로부터 유동관으로 접근하는 유속은 약 1.56 m/s 이며, 각 유동관을 흐르는 냉각수의 질량유량은 19.64kg/s 이므로, 계산모델은 이 두 가지 입구조건을 모두 만족하도록 입구쪽 모델의 유동단면적을 조절하였다. 1/4 경계면에서는 symmetry 조건이 주어졌으며, flow straightener로 접근하는 유동영역에서는 벽면효과가 나타나지 않도록 경계면을 free boundary로 설정하였다.

## 3. 해석결과 및 고찰

### 3. 1. 유동장

그림 3은 flow straightener 주변의 유동장을 속도벡터로 보여주고 있다. 상대적으로 낮은 속도로 flow straightener에 접근하는 유동은 구멍을 통과하면서 급속히 가속되는 것을 볼 수 있다. 구멍을 통해 안쪽으로 유입되는 유동의 유속을 살펴보면 flow straightener 하단부에서 상단부로 갈수록 더 크게 가속되는 것을 볼 수 있는데, 이러한 원인은 flow straightener로 접근하는 유동이 상부의 벽면을 만나 정체되면서 flow straightener의 하부에 비해 상대적으로 압력이 약간 더 높기 때문으로 생각된다. 이러한 유동현상은  $\varnothing 3\text{mm}$ 와  $\varnothing 5\text{mm}$  모두에서 비슷하게 나타나지만,  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우에는 구멍을 통과하면서 발생하는 가속이 상단부에서 더 집중적으로 일어나고 하단부에서는 상대적으로 미약하다. 이러한 현상은 정도의 차이는 있지만 모든 구멍에서 유동의 가속이 일어났던  $\varnothing 3\text{mm}$ 의 flow straightener

와는 다른 양상을 보이고 있다. 유동 궤적을 보여주고 있는 그림 4를 보면  $\varnothing 3\text{mm}$ 인 경우는 모든 구멍을 통해 비교적 고르게 유동이 흐르지만  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우는 상단부로 집중됨을 볼 수 있다.

### 3. 2 압력강하

Flow straightener에 접근한 유동은 구멍을 통과해야 하므로 flow straightener 바깥면에 정체되어, 내부에 비해 상대적으로 높은 압력이 형성된다. 그림 5(a)는  $\varnothing 3\text{mm}$ 인 경우 외부면의 압력분포를 보여주고 있다. 정체압력이 작용하기 때문에 전체 면에서 거의 동일한 압력 값을 보인다. 구멍에서의 압력값을 보면 muffler 하부에서보다는 상부에서 낮은 압력분포를 보이는데, 이는 앞서 그림 3의 유속분포에서 본 바와 같이, 상부 쪽 구멍에서의 유속이 더 빠르기 때문이다.

Flow straightener에 접근한 유동은 구멍을 통과하면서 급격히 가속되고 이로 인해 압력강하를 수반한다. Flow straightener 내부면에서의 압력분포를 보여주고 있는 그림 5(b)를 보면 외부면에 비해 압력이 상당히 떨어져 있음을 볼 수 있다. 전체적으로 거의 동일한 압력분포를 보였던 외부 면과는 달리, 내부면은 하부보다는 상부에서 더 낮은 압력분포를 볼 수 있는데 이는 상부쪽에 위치한 구멍에서의 유속이 하부에 위치한 구멍에서의 유속에 비해 상대적으로 더 빠르기 때문이다. 따라서 가장 상부에 위치한 구멍 주변에서 가장 낮은 압력값을 보인다. 유동이 flow straightener를 통과하면서 발생한 급격한 압력강하는 flow straightener 후미 유동관에서 유동의 발달이 이루어지면서 어느 정도 압력회복이 일어난다.

$\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우(그림 5(c),(d)) 역시  $\varnothing 3\text{mm}$ 인 경우처럼 외부면에 유동정체로 인해 압력이 거의 같은 값을 보이는 것은 같으나, 하단부 구멍에서 유동의 가속이 상대적으로 미미하여 하단부에서는 flow straightener 외부면과 내부면의 압력이 비슷한 값을 보이는 것을 볼 수 있다.

Flow straightener가 설치되기 전의 유동관은 급축소관 형태로 이 부분에서도 상당히 큰 압력강하가 발생된다. 따라서 순수하게 flow straightener 설치에 의한 압력강하를 평가하기 위해서 flow straightener 설치 전의 유동관에서 발생하는 압력강하를 계산하였다.

표 1은 질량유량이  $19.64 \text{ kg/s}$  일 때  $\varnothing 5\text{mm}$  및  $\varnothing 3\text{mm}$  구멍을 갖는 flow straightener를 설치한 경우와 flow straightener가 없는 경우에 대해 flow straightener 전·후단에서 각각의 전압(total pressure), 정압(static pressure), 동압(dynamic pressure)의 변화량을 보여주고 있다.

전압(total pressure)을 기준으로 flow straightener 구멍이  $\varnothing 3\text{mm}$ 인 경우에는 flow straightener가 없는 경우에 비해 약 3배( $\approx 1 \text{ bar}$ ),  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우는 약 2배( $\approx 0.6 \text{ bar}$ ) 더 큰 압력강하를 보인다. Flow straightener의 구멍을  $\varnothing 5\text{mm}$ 로 뚫는 것은  $\varnothing 3\text{mm}$  비해 압력강하 측면에서 상당한 개선이 있으나, 아직까지도 큰 압력강하를 보이고 있다.

각각의 경우에 대한 압력강하량(total pressure 기준)을 손실계수  $K$ 를 이용하여 나타내 보면, flow straightener 구멍이  $\varnothing 3\text{mm}$ 인 경우가 1.35를 보인데 비해,  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우는 0.986정도이다. Flow straightener가 설치되지 않은 경우의  $K$ 값도 0.8정도로  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우와 근소한 차이를 나타낸다.  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 flow straightener에서 발생하는 압력강하가 flow straightener가 없는 경우에 비해 2배 정도 더 크에도 불구하고 이처럼 비슷한 값을 보이는 것은 flow straightener 설치에 의해 flow straightener 두께만큼 유동관 단면적이 감소하여 유속이 증가했기 때문이다. 또한  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우의  $K$ 값이 flow straightener가 없는 경우에

거의 근접했다는 것은 flow straightener에 더 큰 구멍을 뚫더라도 압력강하를 감소시키는 효과는 상대적으로 미미할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

하나로 노심 유입공동에 생성되는 대규모 와류 및 난류유동에 의한 유체유발진동을 완화시키기 위해, 작고 많은 구멍을 가진 원통형의 flow straightener에 대한 전산유동해석을 수행하여 구멍의 크기에 따른 유동현상 및 압력강하를 알아보았다.

Flow straightener를 통과하는 유동은 구멍을 지나면서 급속한 가속이 일어나고 압력강하가 발생된다. 구멍을 통한 가속은 flow straightener 하단부보다는 상단부가 상대적으로 더 큰데, 이는 상부에 있는 벽면에 유동이 정체되면서 부근의 압력이 하단부에 비해 높기 때문이며, 이러한 현상은 구멍 직경이 큰  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우에 더 심화된다.

해석결과, 유량  $19.64\text{kg/s}$ 에서 flow straightener에 뚫린 구멍의 크기가  $\varnothing 3\text{mm}$ 인 경우에는 전압기준으로 약  $136\text{kPa}(K=1.35)$ ,  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 경우에는  $99\text{kPa}(K=0.99)$  정도의 압력강하를 보였으며, 이는 flow straightener가 설치되지 않은 유동관에서 발생하는 압력강하(약  $40\text{kPa}$ )에 비해 각각 3.4배, 2.5배 높은 값을 나타내므로 압력강하를 낮출 수 있는 다른 형태의 flow straightener가 강구되어야 할 것으로 보인다.

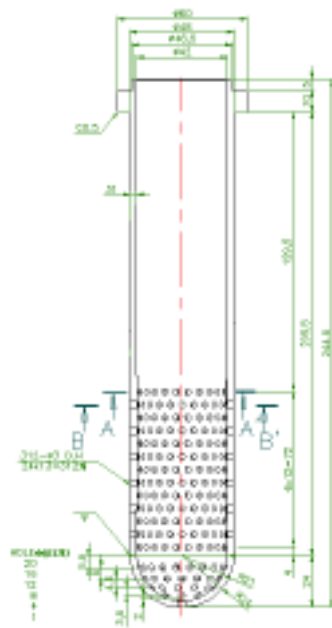
#### 참고문헌

- [1] I. E. Idelchik, "Handbook of Hydraulic Resistance", 3rd Ed. bellhouse, 1996
- [2] D. S. Miller, "Internal Flow System", 2nd Ed. BHRA, 1990
- [3] Fluent User's Guide

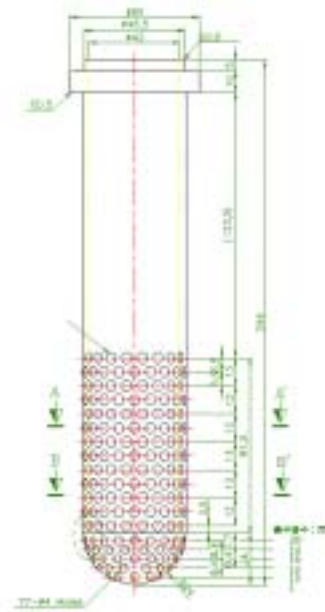
표 1. Comparison of pressure drop

(unit : kPa)

	Ø5mm			Ø3mm			No-muffler		
	P <sub>total</sub>	P <sub>static</sub>	P <sub>dynamic</sub>	P <sub>total</sub>	P <sub>static</sub>	P <sub>dynamic</sub>	P <sub>total</sub>	P <sub>static</sub>	P <sub>dynamic</sub>
P <sub>in</sub>	1.2	0	1.2	1.3	0.1	1.2	1.2	2.4	1.2
P <sub>out</sub>	-97.9	-203.7	105.7	-135.0	-242.0	107.0	-39.2	-89.9	50.6
ΔP	99.2	203.7	104.5	136.3	242.1	105.8	40.4	92.3	49.4
K	0.986			1.35			0.81		

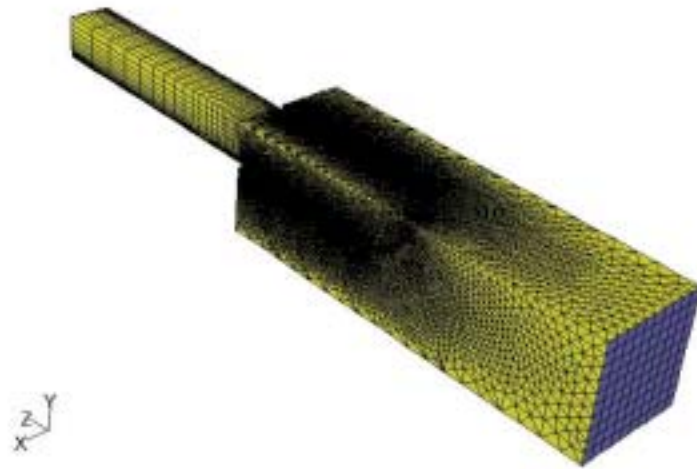


(a) Ø3mm



(b) Ø5mm

그림 1. Drawing of flow straightener



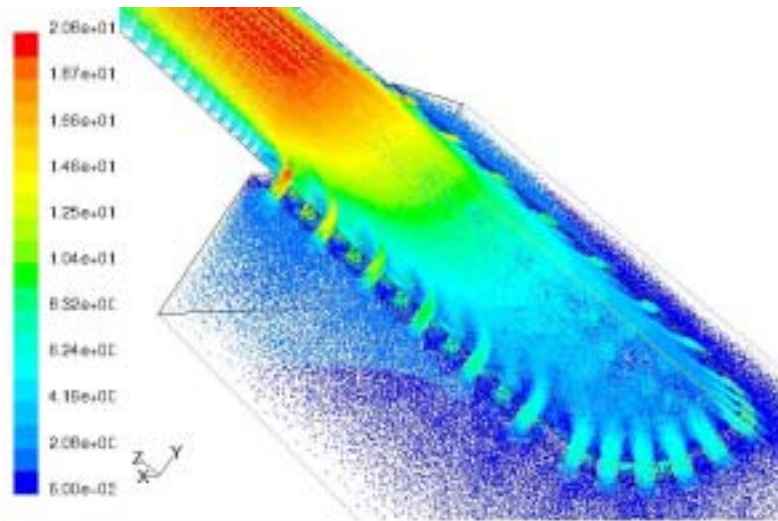
(a) computational domain



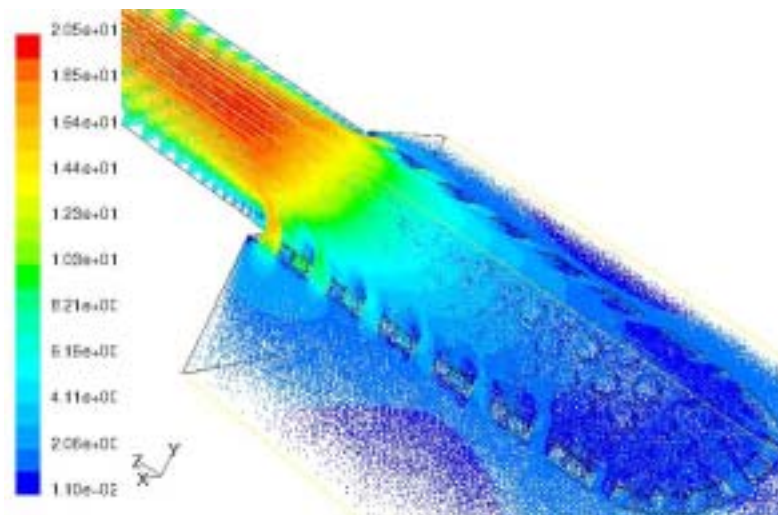
(b) grid for flow straightener surface

그림 2. Computational model



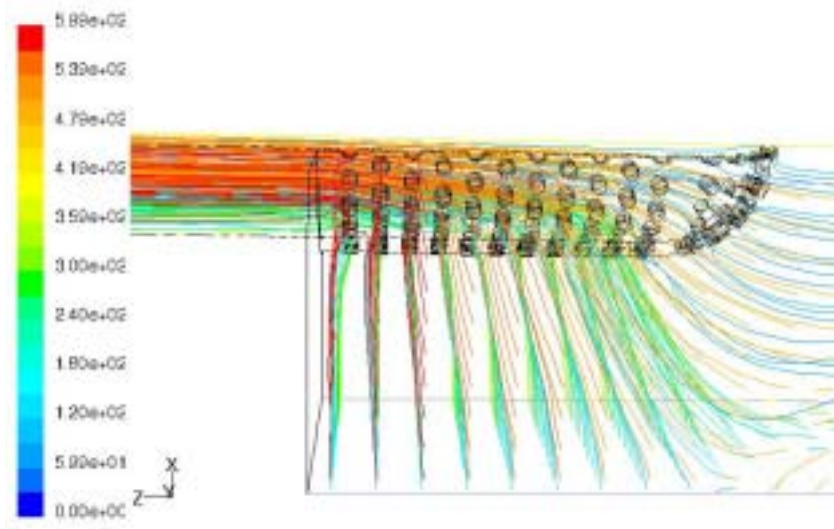


(a)  $\varnothing 3\text{mm}$

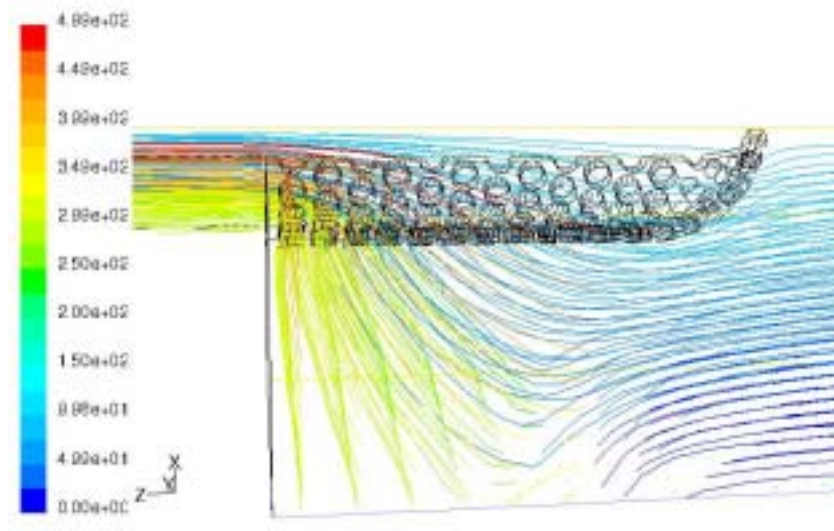


(b)  $\varnothing 5\text{mm}$

그림 3. Velocity vectors around the flow straightener

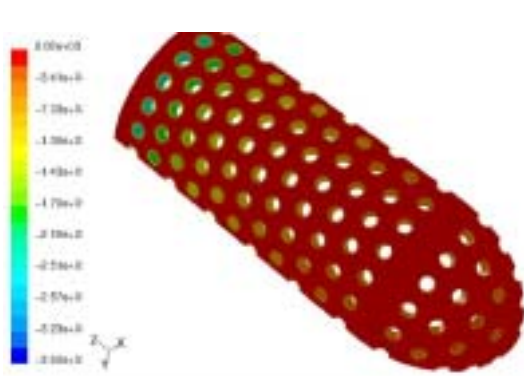


(a)  $\varnothing 3\text{mm}$



(b)  $\varnothing 5\text{mm}$

그림 4. Flow path for the flow straightener



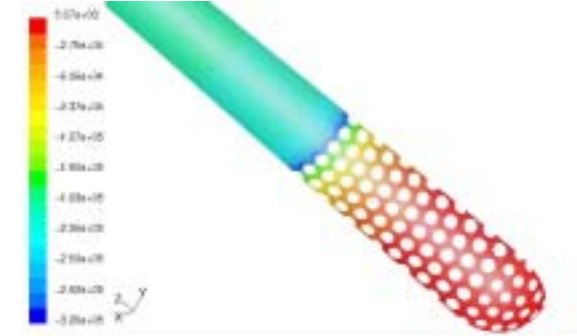
(a) inner( $\varnothing$ 3mm)



(b) outer( $\varnothing$ 3mm)



(c) inner( $\varnothing$ 5mm)



(d) outer( $\varnothing$ 5mm)

그림 5. Pressure contour on the flow straightener surface