

# SMART MCP 방출유로의 유동장해석

## An Analysis of the Flow Distribution in MCP Discharge Region of SMART

김영인, 강형석, 박홍준, 황영동, 이두정

한국원자력연구소

### 요 약

SMART MCP 방출유로는 90도로 유로의 방향이 전환되며 유로의 면적이 급격히 증가하는 형상으로 매우 큰 압력 손실이 발생하게 되어 원자로의 설계에 매우 중요한 인자로 작용한다. 그러나 SMART의 MCP 방출유로는 비대칭 형상으로 압력손실을 계산하는 경험 상관식이 없으며, 유사한 형상의 대칭형 경험 상관식을 이용할 경우 압력손실을 과도하게 계산하게 된다. 유로의 압력 손실은 난류의 특성에 큰 영향을 받으므로 대칭형 유로에 대한 경험 상관식과 FLUENT코드의 난류모델을 이용하여 계산결과를 비교하여 SMART MCP 방출유로의 유동장해석에 사용할 난류모델을 선정하였다. SMART MCP 방출유로는 유동의 분리에 의한 강한 이차유동 등이 발생하고 있어 RNG  $k-\epsilon$  모델을 이용한 계산결과가 standard  $k-\epsilon$  모델을 이용한 계산결과 보다 경험적상관식에 비교적 근접하게 나타났다. RNG  $k-\epsilon$  모델을 이용하여 SMART MCP 방출유로를 해석한 결과 압력손실은 약 18.7 KPa로 나타났으며, 방출유로 국부적으로 강한 이차유동이 발생하고 있어 유로의 개선을 위한 설계검토가 필요하다.

### Abstract

A significantly large portion of the pressure loss occurs in MCP discharge side of SMART due to the rapid increase of the flow area and the 90-degree turn of its flow direction. Therefore, the pressure loss in MCP discharge side becomes one the important parameters to be considered in SMART design. However, the pressure loss correlation for the asymmetrical shape applicable SMART design is not available. The use of the existing pressure loss correlation for the symmetrical shape may calculate too higher value of pressure loss than reality. In this study, the pressure loss of the discharge side of MCP was calculated using FLUENT code. Since the pressure loss is significantly influenced by the turbulence model used in calculation, the turbulence model was selected by simulating the existing symmetrical shape of the flow path similar to that of SMART design. Since the flow separation occurs in MCP discharge side and thus the strong secondary flow is generated, the RNG  $k-\epsilon$  model better simulates the experimental correlation than that of the standard  $k-\epsilon$  model. The FLUENT calculation with the RNG  $k-\epsilon$  model results in 18.7 KPa of the pressure loss. In addition, the strong local secondary flow needed for the flow path modification was observed in the flow field calculation.

## 1. 개요

SMART의 주냉각재펌프(MCP : Main Coolant Pump)는 캔드모터(canned motor) 구조의 축류형 펌프로 원자로집합체 상단에 4 대가 위치한다<sup>[1,2,3]</sup>. MCP 방출유로는 그림 1과 같이 MCP 후단에서 90도로 유로의 방향이 전환되며 유로 면적이 급격히 증가하여 큰 압력손실이 발생한다. 이때 발생하는 압력손실은 SMART 전 계통 압력손실의 20~30% 수준으로 펌프 및 계통설계에 매우 중요한 인자로 작용한다. SMART MCP 출구 형상은 비대칭 형상이므로 적절한 경험상관식의 선정이 어려우며, SMART MCP 출구 형상과 유사한 대칭형 경험 상관식으로 이용하여 압력손실을 계산할 경우 지나치게 보수적인 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 SMART MCP 유로에 대한 3차원 유동장해석을 통하여 SMART 설계를 위한 압력손실 및 유동분포 등에 대한 참고자료를 제공하고자 한다.

일반적으로 standard  $k-\epsilon$  모델은 eddy-viscosity가 등방성을 가진다는 가정에서 유도된 반실험식이기 때문에 curvature, rotation, vortice 등이 발생하는 복잡한 난류유동에서는 유동특성을 잘 묘사하지 못하는 것으로 알려져 있다. 반면 RNG  $k-\epsilon$  모델은 난류현상을 묘사함에 있어서 반 실험식이 아닌 수학적 기초를 근거로하여 벽 근처 유동, 굴곡을 가진 유동, 저 레이놀즈수 (low Reynolds number) 유동 등을 비교적 잘 예측하는 것으로 알려져 있다. 따라서 난류모델을 선정하기 위해서 SMART 주냉각재 펌프 방출유로와 유사한 대칭모형에 대한 경험적상관식의 결과와 FUENT코드의 standard  $k-\epsilon$  모델과 RNG  $k-\epsilon$  모델을 이용한 2/3차원 해석 결과를 비교한 후, 선정된 난류모델을 이용하여 SMART MCP 방출유로에서의 유동장을 계산하고자 한다.

## 2. 지배방정식 및 해석모델

본 연구는 MCP 출구에서의 유동장을 평가하기 위한 것으로 지배방정식 중 질량 및 운동량방정식이 채택되고, eddy viscosity를 결정하기 위해서 난류모델이 채택된다. 운동량 보존방정식은 유한체적법(FVM)을 사용하여 계산한다. 지배방정식은 곡면형상에 따라 유동장을 계산하기 위해서 곡면좌표계(curvilinear coordinate)에서 이산화(discretization) 처리되며 higher order up-wind scheme을 사용한다. 압력과 속도의 연계계산에는 SIMPLE 알고리즘을 이용하고, 이산화 방정식은 line-iterative 절차에 따라 해를 구한다.

### 가. 지배방정식

질량보존식은 압축성 유동과 비압축성 유동에 대한 일반적인 형태로 다음의 식이 사용된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$i$  방향에 대한 운동량보존식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

여기서  $p$ 는 static pressure,  $\tau_{ij}$ 는 stress tensor,  $\rho g_i$ 는 gravitational body force,  $F_i$ 는 외력 (external body force) 및 다공성매질(porous media)과 user-defined source 등에 의한 생성항 등을 나타낸다. 응력텐서(stress tensor)  $\tau_{ij}$ 는 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서  $\mu_{eff}$  는 분자의 점성계수와 난류에 의한 점성계수의 합으로 표현되고 오른쪽 두 번째 항은 체적팽창에 의한 효과로 전단응력에 주는 영향이 무시할 수 있다는 가정 하에 FLUENT에서는 사용하지 않는다.

## 나. 난류모델

난류 유동은 속도장의 불규칙적인 요동(fluctuation)으로 특징지어 진다. 이러한 유동은 소규모(small scale)와 고주파(high frequency)의 성격을 갖고 있으므로, 실제의 공학적 계산에 있어서 수치적으로 모사하기가 매우 힘들다. 따라서 시간평균(time-averaged)과 앙상블평균(ensemble-averaged) 그리고 다른 조작을 통하여 좀 더 다루기 쉬운 변형하게 되는데

지배방정식을 세우게 되는데 이 과정에서 추가의 미지변수(unknown variables)가 생기게 되고 이 변수들을 결정하기 위해 난류 모델이 필요하다. 즉 운동량 방정식에서는 난류효과를 나타내는 Reynolds Stress 항인  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  이 생기게 되고 닫힌 형태(closed form)의 지배방정식을 갖기 위해서는 이 항이 모델링되어야 한다. 난류현상을 반영하기 위한 가장 일반적인 방법은 Boussinesq 가정을 이용하여 Reynolds stress를 평균속도구배(mean velocity gradient)와 연결시키는 것이다. 즉,

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) \delta_{ij} \quad (4)$$

여기서 난류 효과를 반영하기 위한 와점성(eddy viscosity)  $\mu_t$ 가 도입되었다. 지배방정식의 해를 구하기 위해서는 국부적으로 변하는  $\mu_t$ 를 결정하기 위해 추가의 방정식이 필요하다.

Two-equation model(standard  $k-\epsilon$  model)은 난류모델 중 가장 대표적이면서도 단순한 모델로, 별도의 두 수송방정식의 해에 의해 난류속도(turbulent velocity)와 길이척도(length scale)가 독립적으로 결정된다. 이 모델은 폭넓은 난류유동범위에 대해 계산시간의 경제성과 정확성을 특징으로 하고 있으며, 가장 널리 이용되는 모델중 하나이다. 이 모델은 semi-empirical model로 수송방정식의 유도과정에서 현상학적 측면과 경험의 고려된다.

난류운동에너지( $k$ )와 소산율( $\epsilon$ )은 다음의 수송방정식(transport equations)으로부터 구한다:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

위 방정식에서  $G_k$ 는 평균속도구배에 기인한 난류운동에너지의 생성항을 나타내며,  $G_b$ 는 부력에 기인한 난류운동에너지의 생성을 나타내고,  $Y_M$ 은 압축성 난류에 있어서 팽창(fluctuating dilatation)이 소산율에 기여하는 것을 나타낸다.

Eddy 또는 turbulent viscosity( $\mu_t$ )는 다음과 같이  $k$ 와  $\epsilon$ 에 의한 관계식으로부터 계산된다:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

FLUENT<sup>[4]</sup> 코드에서 모델상수  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ , 그리고  $\sigma_k$ 와  $\sigma_\epsilon$ 의 상수 값은 다음과 같이 주어진다 :

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

이 default 값들은 공기와 물에 대한 실험 값으로부터 결정되며 wall-bounded 유동과 free shear 유동에 대해 폭넓게 잘 맞는 것으로 알려져 왔다.

Standard  $k-\epsilon$  모델에 근거한 RNG  $k-\epsilon$  모델은 ReNormalization Group method라 불리는 수학적 통계기법에 근거하여 난류현상을 해석하는 방법이다. 난류 전달을 모사함에 있어서 semi-empirical 접근방법이 아닌 수학적 기초를 근거로하므로 더 일반적이고 기초적인 해석모델로 사용될 수 있으며, 벽 근처 유동, 굴곡을 가진 유동, 저레이놀즈수 유동 등을 예측하는 것이 개선되었다. Standard  $k-\epsilon$  모형과 비교할 때, Strained 유동에 대한 정확도 개선, Swirling 유동에 대한 정확도 개선, turbulent Prandtl number를 구하기 위한 analytical formula사용 등을 특징으로 한다. 특히, RNG model 내의 상수와 함수는 실험식이 아닌 이론에 근거하므로 수정 없이 널리 사용될 수 있으며, RNG 이론 내에 저레이놀즈수 효과와 압축성 효과가 포함되어있다.

RNG  $k-\epsilon$  모델의 수송방정식 형태는 Standard  $k-\epsilon$  모델과 유사하다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (8)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} - R \quad (9)$$

위 방정식에서  $G_k$ ,  $G_b$ ,  $Y_M$ 의 항들이 의미하는 바는 standard  $k-\epsilon$  모델과 같으며,  $a_k$ 와  $a_\epsilon$ 은 inverse effective Prandtl 수를 의미한다. 또한  $R$ 은 rate-of-stain 항으로 빠른 strain 효과와 streamline curvature에 대한 영향을 의미하며 다음과 같다.

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (10)$$

또한  $\eta = Sk/\epsilon$ ,  $\eta_0 \approx 4.38$ ,  $\beta = 0.012$ 이며,  $S^2 = 2S_{ij}S_{ij}$ 이며, 각각의 상수는  $C_\mu = 0.0845$ ,  $C_{1\epsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\epsilon} = 1.68$ ,  $\alpha = 1.39$ 이다.

#### 다. 벽법칙 및 수치확산

일반적으로 난류유동을 모사하기 위해서는 벽면 근처에서는 미세 격자를 사용하는 방법과 벽 함수를 사용하는 방법이 있다. 벽면이 존재하는 유동에서는 속도 구배가 큰 벽면 근처에는 격자를 집중시키는 것이 필요하나, 컴퓨터용량의 제약 때문에 격자 수를 억제해야만 하는 경우가 있다. 일반적으로 고 레이놀즈 수의 충분히 발달된 벽면 난류에서는 난류에너지의 생성과 소실이 균형을 이루고, 대류, 확산 등의 영향이 적다고 알려져 있다. 벽법칙(law of the wall)은 벽면 부근의 격자점 수를 억제하기 위해 특별히 고안된 것으로, 속도분포가 대수함수로 표현되는 이른바 대수영역(logarithmic region)으로 불리는 영역내의 점을 벽면의 제 1 격자점으로 취하고, 내부의 점성저층(viscous sublayer)의 계산은 필요로 하지 않는다. 이 대수영역에서의 경험식을 이용하여 대수영역내 격자점의  $k$ ,  $\epsilon$ ,  $\tau_w$  등을 결정한다. 즉, 운동에너지  $k$ 는 벽면에서 기울기의 구배가 없도록  $\nabla k=0$ 를 이용하여 벽면의 제어체적까지 계산한다. 또한 확산(dissipation)값은 확산 벽함수(wall function)식을 이용하여 계산한다. 수송방정식에서 계산된 운동에너지를 이용하여 벽면전단응력 (wall shear stress)을 계산하고 여기서 계산된 벽면전단응력과 sub-layer thickness를 이용하여  $y^+$ 를 계산한다. 계산된  $y^+$ 값으로  $u^+$ 식을 선택하여 속도 항에 대한 벽함수를 설정한다.

수치적으로 수송방정식을 차별화하여 종속변수를 구할 때, 실제 물리적 현상에서 벗어난 확산

과 같은 성격을 지닌 수치결과가 초래될 수 있는데 이를 거짓확산(false diffusion)이라고 한다. 이는 주로 유동방향과 grid line이 빗겨 배치될 때 흔히 발생한다. 거짓확산은 first order upwind scheme을 채택하여 확산항이 배제된 수송방정식을 풀 때 가장 현저하게 나타나며<sup>[5]</sup>, 종속변수의 분포를 감쇄(smearred)시키는 결과를 초래한다. 2차원 유동에서의 거짓확산계수는 다음과 같이 주어진다<sup>[6]</sup>.

$$\Gamma_{\text{false}} = \frac{\rho U \Delta x \Delta y \sin 2\theta}{4(\Delta y \sin^3 \theta + \Delta x \cos^3 \theta)} \quad (11)$$

즉 유동방향과 grid line이 45도 일때 최대이며, cell의 크기( $\Delta x, \Delta y$ )가 작으면 줄어든다. 특히, 고레이놀즈수의 유동에서 이 거짓 확산은 물리적으로 부정확한 결과를 초래할 정도로 큰 오차를 유발한다. 그리드 생성(grid generation)과 관련하여 거짓 확산을 피할 수 있는 방법은 되도록 grid line을 유동방향과 일치시키거나 세밀한 격자계를 사용하는 것이다. 그러나 실제 유동장 해석에서는 격자 수를 늘리는데는 많은 제한성이 존재하므로 higher order 차분화 scheme을 사용하여 차분화 오차를 줄이는 노력이 필요하다.

### 3. 해석격자 및 경계조건

해석코드를 검증하기 위하여 그림 2와 같은 축대칭 형상에 대하여 2차원 및 3차원 모의계산을 수행하였다. 그림 3은 2차원 축대칭 해석격자에 대한 민감도 분석을 수행하여 선정된 CASE 4의 격자 형상이다. 그림에서 보는 바와 같이 격자는 유동을 따라가는 사각형 정렬격자이며, 벽함수를 사용하므로 대수영역에 첫 번째 격자점을 위치시키기 위해 Y+ 값이 50 미만으로 설정하였다. 벽면근처의 속도분포가 급격히 변화하는 벽면근처에서는 조밀한 격자간격을 유지하고, 벽면으로부터 멀어지면서 서서히 격자의 크기를 증가시켰다. 그림 4는 RNG  $k-\epsilon$  모델의 타당성을 확인하기 위한 3차원 해석모델의 상부 형상을 나타내며, Case 5와 Case 6은 Case 4의 해석격자를 접선방향으로 -30도와 15도 회전한 것이다. 측면(반경 및 축방향) 격자는 2차원 축대칭 해석시 사용된 Case 4 해석격자와 동일한 격자를 사용하였고 접선방향의 격자 Case 5는 2도 간격, Case 6은 1도 간격으로 설정하였다. 그림 1은 격자민감도 및 코드 모델의 정확성 확인과정을 통해서 선정된 격자 형상이며, 계산영역은 SMART MCP 출구로부터 헤더공간 그리고 증기발생기 전단까지의 유로를 1/8 대칭으로 모델하였다. 펌프 축을 기준으로 측면격자는 2차원 축대칭 해석시 선정된 격자와 유사한 격자를 사용하였다. 접선방향의 격자는 대부분의 영역에서 사각형 정렬격자를 형성할 수 있도록 설정하고 구조적 특성상 사각형 정렬격자를 사용하기 힘든 영역에서는 quad 프리즘 격자를 사용하고 격자간격은 Case5, Case6의 해석결과를 고려하여 적절히 배치하였다. 본 연구에서 수행한 각 Case와 그에 대한 격자와 난류모델을 표1에 요약하였다.

MCP 펌프는 일차계통에서 요구되는 일정유량을 공급할 수 있도록 설계/제작되므로 펌프로부터 계산영역으로 유입되는 입구 경계조건은 FLUENT 코드의 속도-출구경계조건이 사용되며 입구속도는 일차계통의 요구유량을 기준으로 산정된다. 본 해석에서 사용된 출구 경계조건은 FLUENT 코드의 outflow 경계조건으로 일반적으로 밀도변화가 없는 비압축성유동에서 사용되며, 물리적으로 fully-developed flow와 접근방식 유사하다. 본 해석의 수렴조건은 유체의 질량보존이 충분히 만족될 수 있도록 질량보존 오차를  $1 \times 10^{-6}$ 이하로 설정하고, 속도 등 기타 유동변수들에 대해서는  $1 \times 10^{-4}$ 이하가 되도록 설정하였다.

표 1. Case 요약

구 분	Case No.	격자	난류모델 ( $k-\epsilon$ )		비고
2차원 해석	Case 1	25 x 85	Standard	RNG	
	Case 2	30 x 100	Standard	RNG	
	Case 3	40 x 100	Standard	RNG	
	Case 4	40 x 120	Standard	RNG	
	Case 5	40 x 130	Standard	RNG	
3차원 해석	Case 6	40 x 120 x 16	-	RNG	30 도
	Case 7	40 x 120 x 16	-	RNG	15 도
SMART 펌프출구 3차원 모의해석	Case 8	281,517	-	RNG	180도 symmetry

#### 4. 해석결과

SMART MCP 방출유로는 90도로 유로의 방향이 전환되며 유로의 면적이 급격히 증가하는 형상으로 매우 큰 압력 손실이 발생하게 되어 원자로의 설계에 매우 중요한 인자로 작용한다. 그러나 SMART의 MCP 출구는 비대칭 형상으로 압력손실을 계산하는 경험 상관식이 없으며, 유사한 형상의 대칭형 경험 상관식을 이용할 경우 압력손실을 과도하게 계산하게 된다. 유로의 압력 손실은 난류의 특성에 큰 영향을 받으므로 대칭형 유로에 대한 경험 상관식과 FLUENT코드의 난류모델을 이용하여 계산결과를 비교하여 SMART MCP 방출유로의 유동장해석에 사용할 난류 모델을 선정하고, 이를 이용하여 SMART MCP 방출유로에서의 유동장을 계산하였다.

수치해석에 있어서 수치해의 정확성을 보장받기 위한 여러 가지 요구사항들 중 기본적인 것은 수치해에 대한 해석격자에 대한 비의존성이다. 격자 수 변화에 따른 속도, 압력 등의 일관성을 점검하기 위해 2/3차원 해석격자에 대한 민감도분석을 수행하였다. 그림 6에는 해석격자 수에 대한 민감도 분석과 난류모델 선정을 위해 계산된 2차원 축대칭 해석결과를 나타내었다. 해석격자는 Case 2 이상의 격자에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

그림 6에는 난류모델을 Standard  $k-\epsilon$  모델을 적용한 경우와 RNG  $k-\epsilon$  모델을 적용한 경우의 2차원 축대칭 해석결과를 나타내었다. Standard  $k-\epsilon$  모델을 적용한 경우와 RNG  $k-\epsilon$  모델의 적용한 경우의 압력손실은 Idelchik의 경험적 상관식<sup>[7]</sup>에 의해 구한 압력손실은 34 KPa과 각각 약 25%, 15%를 차이를 보이고 있다. 그림 7, 8에는 Case 4의 전 계산영역의 속도분포와 유로 단면에서의 속도크기를 나타낸 것으로 절단한 단면은 그림 7에 나타내었다. 그림 8a~d에서 보는 바와 같이 RNG 모델에서는  $k-\epsilon$  모델에서 나타나는 속도 구배를 감쇄(smear)시키는 현상이 완화되어 좀더 실제 현상에 근접한 결과를 보여주고 있다. 또한 RNG  $k-\epsilon$  모델 적용하여 수행된 3차원 해석결과도 유로에서의 압력손실이 Case 6, 30.3 KPa과 case 7, 29.7 KPa로 RNG  $k-\epsilon$  모델을 이용한 2차원 축대칭 해석결과와 유사하게 나타났으며, 접선방향의 격자에 대해서는 큰 차이를 보이지 않았다(그림 9, 10).

유동이 회전과 팽창 등 급격한 유동 변화를 보이는 영역에서는 RNG  $k-\epsilon$  모델이 standard  $k-\epsilon$  모델보다 경험적상관식에 근접한 결과를 보여주고 있다. 이러한 차이는 standard  $k-\epsilon$  모델의 경우는 eddy-viscosity가 isotropic 하다는 가정 하에 유도된 반 실험식으로 일반적으로 curvature, rotation, vortices 등의 난류유동을 수반하는 경우에 대해서는 유동특성을 정확히 예측

하는데 한계가 있기 때문이다<sup>[8]</sup>. 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 수행되고 있어 일부 곡면유동에 대한 개선이 이루어지고 있다<sup>[9,10,11]</sup>. 전술한 바와 같이 RNG  $k-\epsilon$  모델은 난류 전달을 모사함에 있어서 semi-empirical approach가 아닌 수학적 기초를 근거로하므로 더 일반적이고 기초적인 model을 제시하며 벽근처 유동, 굴곡을 가진 유동, 저레이놀즈수 유동 등을 예측하는 것이 개선되었기 때문이다. SMART MCP 방출 유로는 주냉각주펌프 후단에서 90도 방향전환과 유로면적이 급격히 팽창하는 형상을 하고 있으므로 RNG  $k-\epsilon$  모델의 사용이 추천된다.

RNG  $k-\epsilon$  모델을 이용하여 SMART MCP 방출유로에서의 유동장을 계산하였다. 유로에서의 압력손실은 18.7 KPa로 계산되었다(그림 11). SMART 일차계통 유로의 압력손실은 약 91 KPa로 MCP 방출유로가 차지하는 비중은 약 20.5 %로 계산되었다. 그러나 난류모델에 대한 비교 결과에서 나타나듯이 RNG  $k-\epsilon$  모델에 의한 결과는 경험적상관식에 의한 결과에 비해 압력손실을 약 15% 낮게 예측하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 그림 12와 13에서 보는 바와 같이 SMART 방출유로에서는 구조적인 특성상 국부적으로 이차유동과 유동정체구간이 존재한다. MCP 방출유로의 내측 공동헤더와 외측공동헤더 모서리에는 특히 강한 이차유동이 존재하므로 유로개선을 위한 설계검토가 필요한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

SMART의 MCP 방출유로의 유동장에 대한 유동장해석을 수행하였다. SMART MCP 방출유로는 90도로 유로의 방향이 전환되며 유로의 면적이 급격히 증가하는 형상으로 매우 큰 압력 손실이 발생하게 되어 원자로의 설계에 매우 중요한 인자로 작용한다. 코드의 난류모델 선정을 위해 SMART MCP 방출유로와 유사한 대칭 모형에 대한 경험적상관식에 의한 결과와 FLUENT 코드의 standard  $k-\epsilon$  모델과 RNG  $k-\epsilon$  모델을 이용한 2/3차원 해석 결과를 비교하여 하였다. 선정된 난류모델을 이용하여 SMART MCP 방출유로에서의 유동장을 계산하였다.

RNG  $k-\epsilon$  모델은 난류 전달을 모사함에 있어서 반경험식이 아닌 수리적인 방법에 근거하므로 벽근처 유동, 굴곡을 가진 유동, 저레이놀즈수 유동 등을 예측하는 능력이 개선되어 실제현상에 근접한 결과를 보여주고 있다. SMART MCP 방출유로는 MCP 후단에서 90도 방향전환과 유로 면적이 급격히 증가하는 형상으로 난류모델로는 RNG  $k-\epsilon$  모델의 사용이 추천된다.

RNG  $k-\epsilon$  모델을 이용하여 SMART MCP 방출유로를 해석한 결과 압력손실은 약 18.7 KPa로 나타났으며, SMART 방출유로에서는 구조적인 특성상 공동헤더 내측과 공동헤더 외측 모서리 부분에서 특히 강한 이차유동이 발생하고 있으므로 유로 개선을 위한 설계검토가 필요한 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기개발 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] SMART 계통설명서, SMART-FS-SD210, Rev. 00, 1998. 11. 05
- [2] 김민환, 김종인, 박진석, 허형, 장문희, 축류펌프 임펠러의 3차원 유동해석 절차개발, KAERI TR-1353, 1999.
- [3] 유환동, 박진석, 김태완, 김용완, 김종인, SMART 냉각재순환펌프 임펠러의 구조해석, '99 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1999.
- [4] FLUENT 5 *User's Guide*, Fluent Inc., July, 1998.
- [5] H. H. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics(The Finite Volume Method)*, Chapter 9, Longman, 1995.
- [6] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publ. Corp., pp. 105-109, 1980
- [7] Idelchik I.E. *Handbook of hydraulic resistances*. Second edition, 1975.
- [8] Sung-Eun Kim, Dipankar Choudhury, and Jean-F. Duval, *Calculation of complex three-dimensional turbulent flows using a renormalization group based  $k-\epsilon$  turbulence model*, Turbulent Flows ASME, 1994
- [9] Gibson, M.M., *An algebraic stress and heat flux model for turbulent shear flow with streamline curvature*, Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 21, 1978
- [10] Leschziner, M.A. and Rodi, W., *Calculation of annular and twin parallel jets using various discretization schemes and turbulence model variation*, J. Fluids Eng. Vol. 103, 1981
- [11] Pourahmadi, F. and Humphrey, J.A.C., *Prediction of curved channel flow with and extended  $k-\epsilon$  model of turbulence*, AIAA J., Vol.21 1983



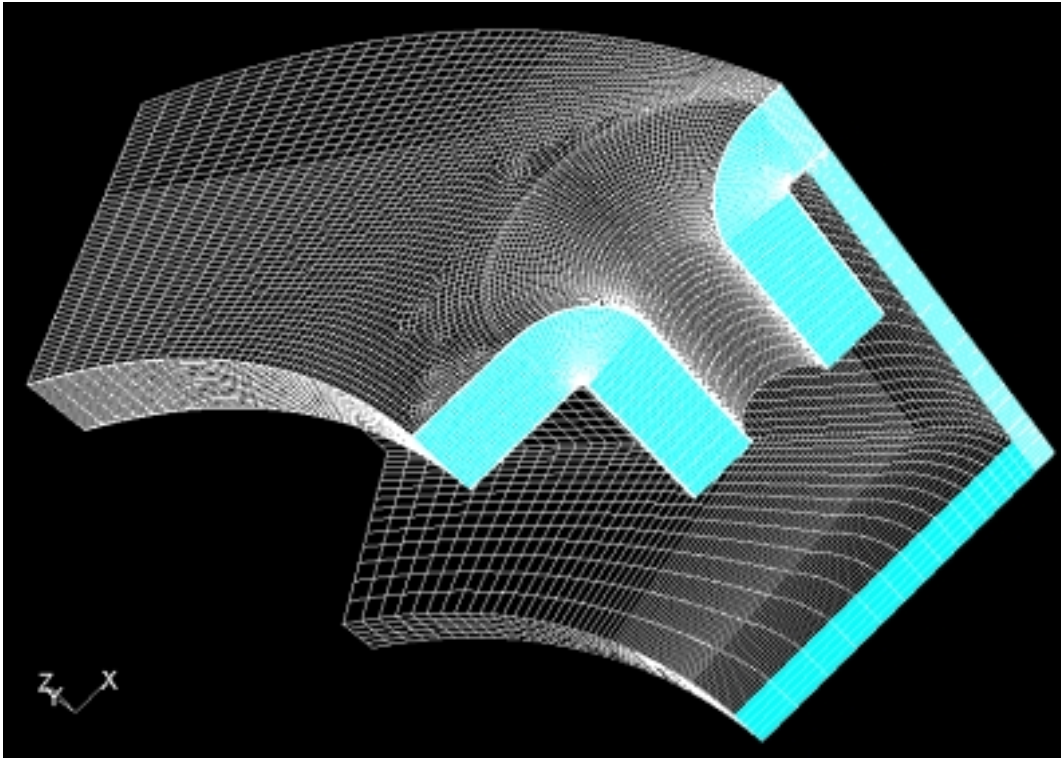


그림 1. SMART MCP 방출유로 해석격자 (1/8 대칭)

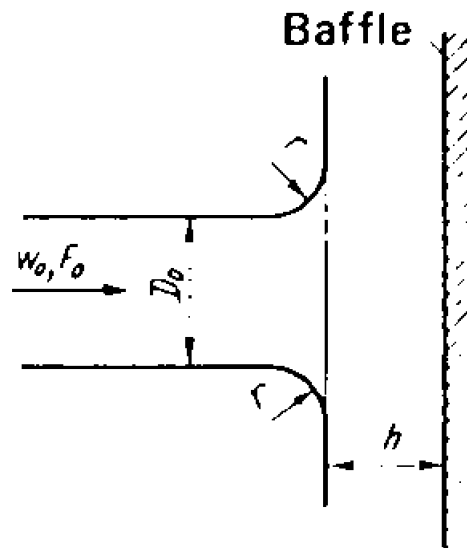


그림 2. 난류모델 검증계산용 형상

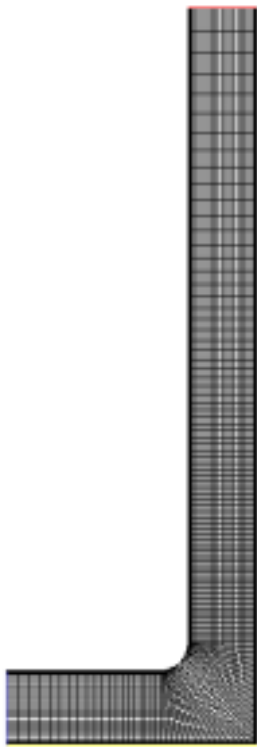


그림 3. 2차원 축대칭

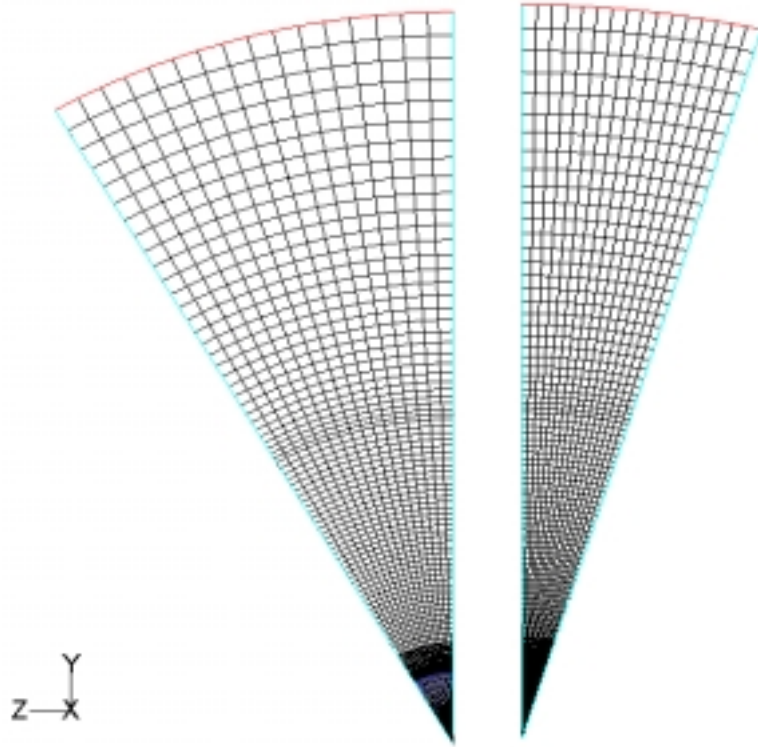


그림 4. 3차원(30도)

그림 5. 3차원(15도)

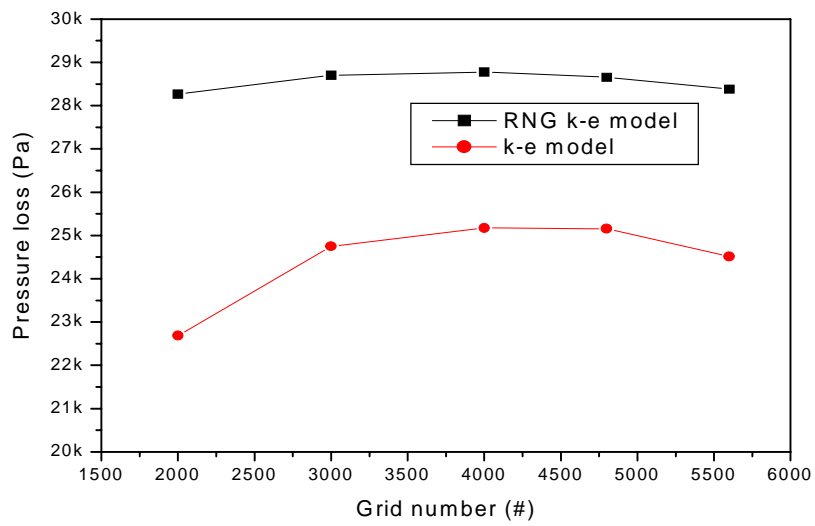
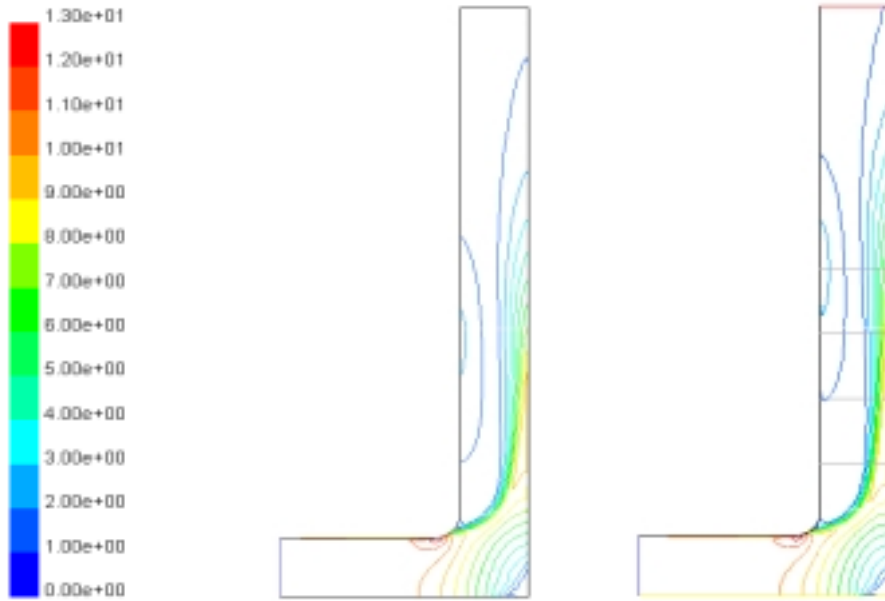


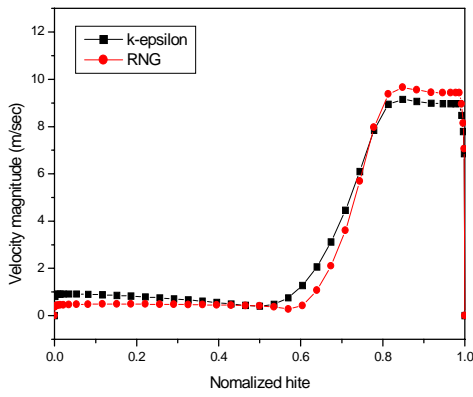
그림 6. 2차원 격자 및 난류모델 민감도



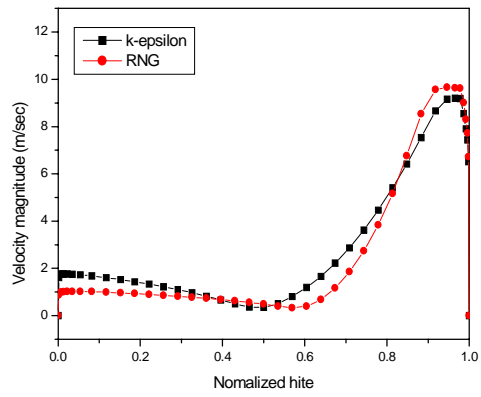
Standard

RNG

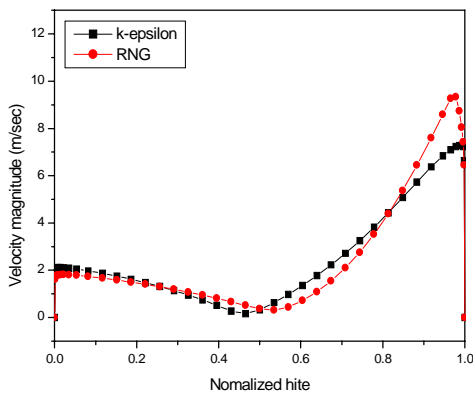
그림 7. 2차원 축대칭 해석 전 영역의 속도분포



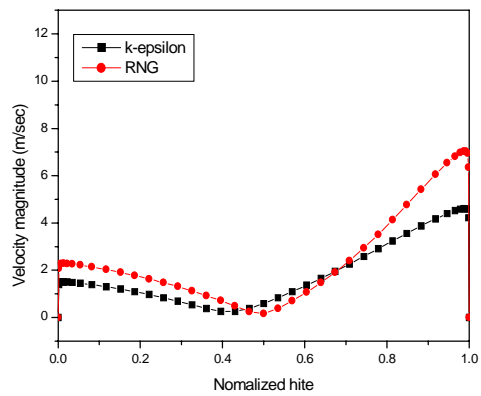
a.  $y=0.2$  m



b.  $y=0.3$  m



c.  $y=0.4$  m



d.  $y=0.5$  m

그림 8. 2차원 축대칭 해석 각 단면의 속도분포

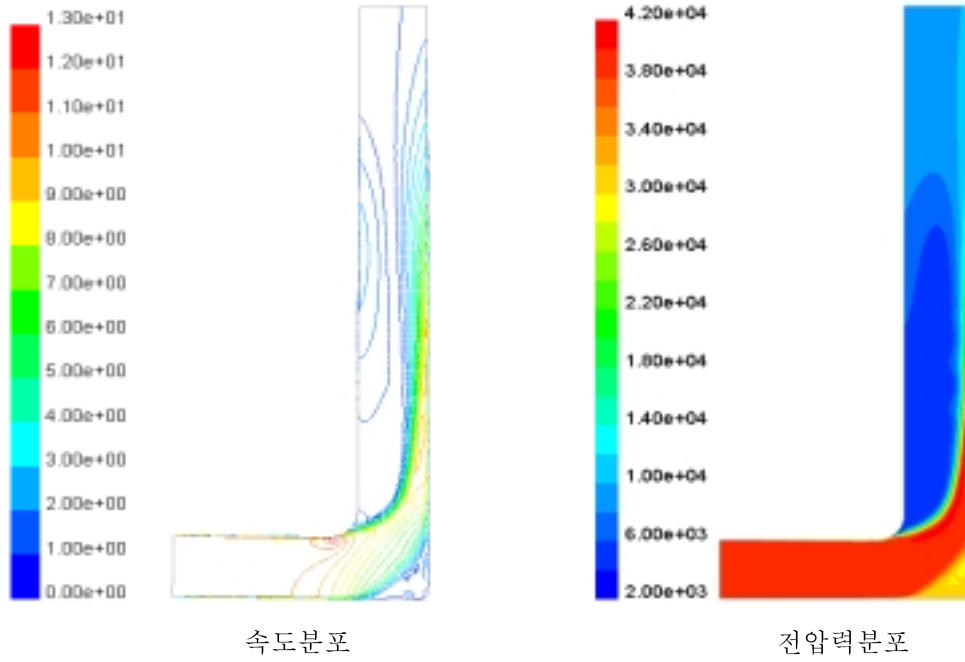


그림 9. 3차원 해석 중심 단면의 속도 및 전압력분포 (15 도)

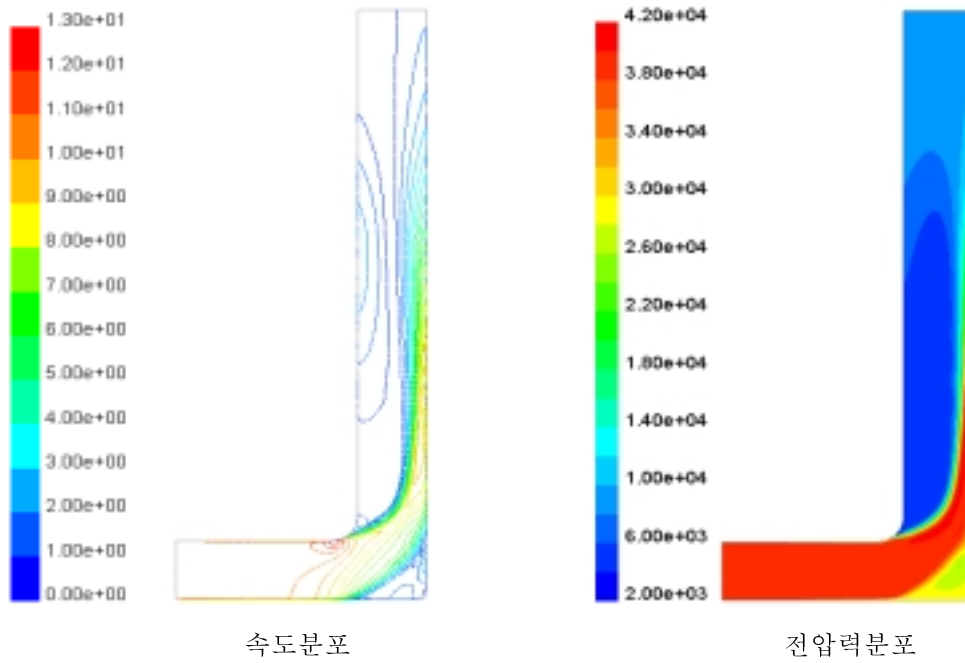


그림 10. 3차원 해석 중심 단면의 속도 및 전압력분포 (15 도)

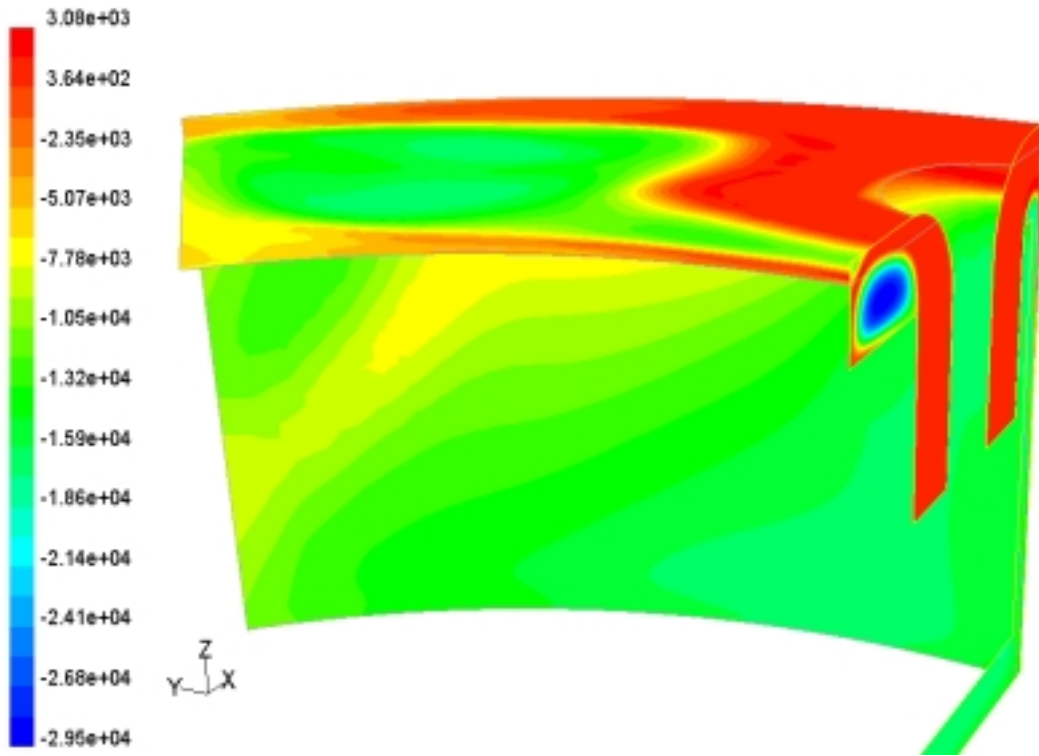


그림 11. SMART 주냉각재 펌프 방출유로 주요단면의 전압력분포

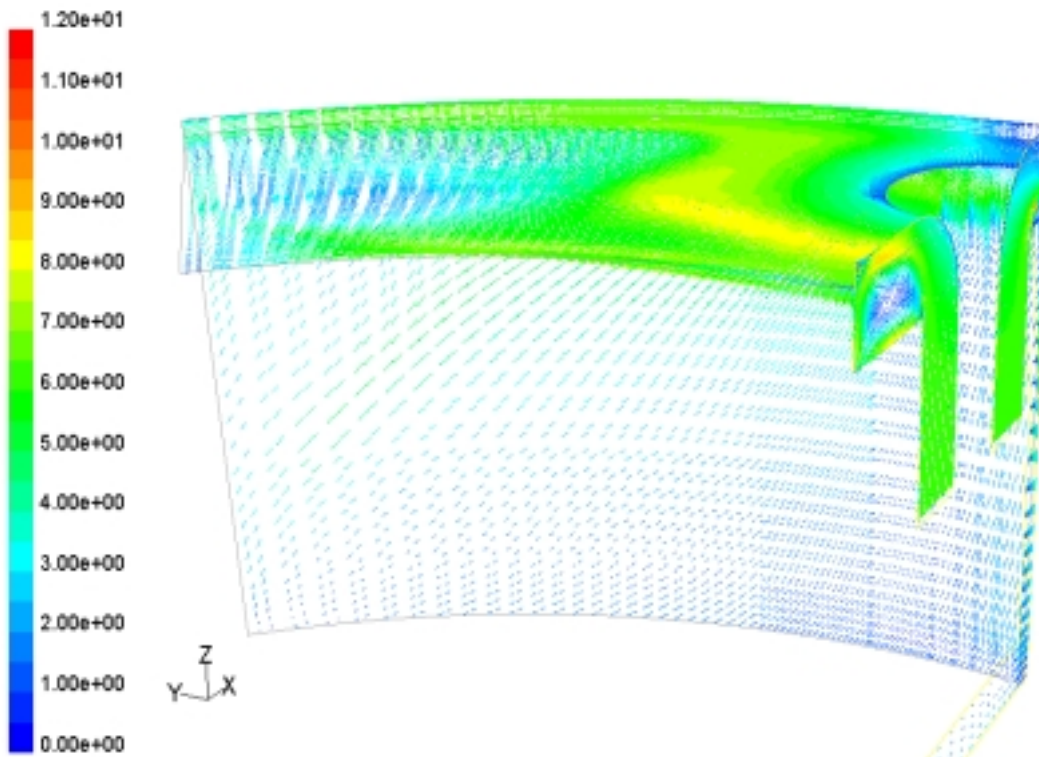


그림 12. SMART MCP 방출유로 주요단면의 속도분포

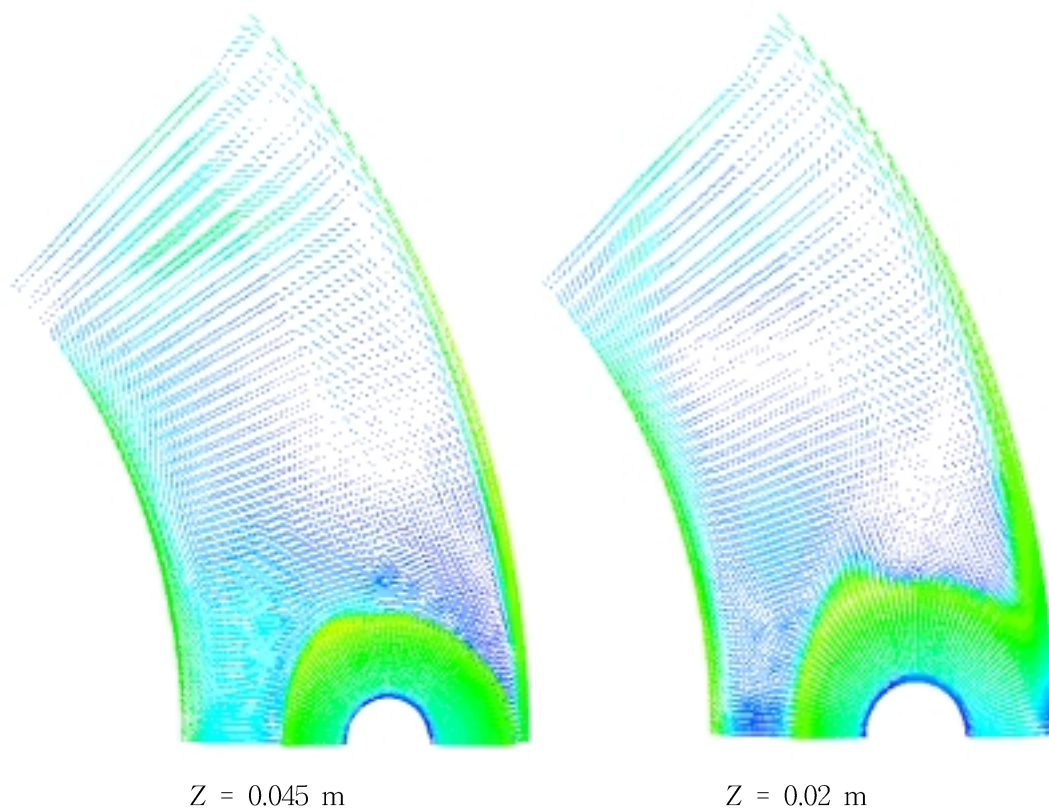
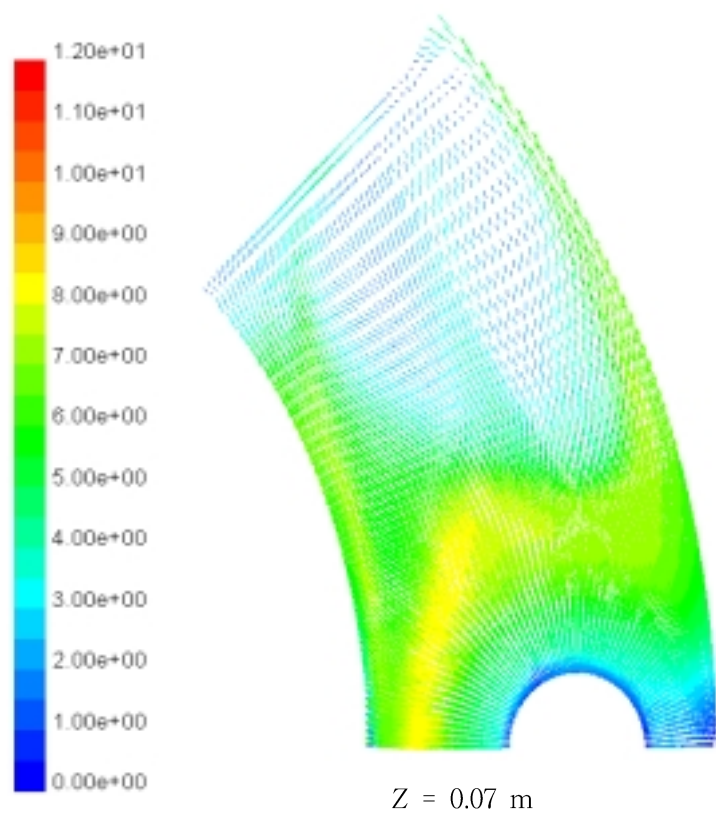


그림 13. SMART MCP 방출유로 공동헤더 단면별 속도분포