

# SMART MCP 유로의 유동장 해석을 위한 난류모델평가

## Evaluation of the Turbulence Model for the Analysis of Flow on the SMART MCP

김영인, 이 준, 김환열, 황영동, 이두정  
한국원자력연구소

### 요 약

SMART MCP 입출구 유로의 유동장분석에 활용하기 위하여 디퓨저로부터 유출하는 유체가 디퓨저 후단에 놓여있는 벽면에 충돌하면서 방사방향으로 퍼지는 난류유동에 대해 수치해석을 수행하여 이러한 유동장을 보다 정확히 해석할 수 있는 난류모델 선정하였다. 해석결과 와류가 작은 레이놀드수의 경우 각 난류모델의 특성 차이에 의해 압력손실계수는 다소 차이를 보이고 있으나 변화추이는 대체적으로 유사하게 나타났다. 따라서 레이놀드수가 작고 형상에 의해 이차유동이 발생하지 않는 경우에는  $k-\epsilon$  모델도 사용가능한 것으로 판단된다. 레이놀드수가 큰 경우 와류가 커짐에 따라 RNG 모델에 의해 계산결과는 RSM에 의한 계산결과에 접근해 가는 것으로 나타났다. 따라서 레이놀드수가 크고 형상이 급변하여 와류가 유발될 가능성이 많은 유동에 대해서는 RNG 모델 또는 RSM의 사용이 추천된다.

### Abstract

This study was performed to investigate the turbulence model can be applicable for the analysis of the flow discharged from channel to the wall. The flow discharged from the channel exit is gradually spreading and then impinges on the baffle placed downstream of the diffuser, and finally turns flow direction radially. In case of low Reynolds No. with small eddy, the result showed some differences in pressure loss coefficient caused by the turbulence model characteristics used for calculation. However, the difference is relatively small and shows the similar trend. Therefore, the standard  $k-\epsilon$  model can be used for the practical purpose for these cases. With the increase of Reynolds No with large eddy., the pressure loss coefficients calculated using RNG model approaches that of RSM Therefore, the use of RNG model or RSM is recommended for these cases.

### 1. 개요

SMART MCP 입출구 유로는 기존유로에서 압력손실이 과다하게 발생하는 문제점과 비균일한 유동이 MCP impeller로 유입되는 문제점을 개선하기 위해서 설계가 크게 변경되었다. 설계변경된

MCP 유로는 임펠러 전단의 흡입부와 임펠러 주변의 곡면부 그리고 임펠러로부터 증기발생기 입구까지의 방출부로 구성되며, 이들 유로는 곡면, 확산 및 축소부를 포함하고 있어 유동장 해석을 위해서는 곡면유로에 대한 적절한 난류 모델을 선정하여야 한다.

경험상관식<sup>[1]</sup>을 이용하여 압력손실계수나 유동장을 예측하는 경우 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있으나, 경험상관식은 극히 제한적인 형상과 유동조건으로 국한되어 있으므로, 통상적인 유동과 레이놀드수가 크게 차이가 나는 SMART 일차계통 설계에는 직접적인 적용이 곤란하다. 전산유체해석 코드를 이용하면 매우 다양한 형태의 형상에 대한 해석이 가능하다. 그러나 전산유체해석 코드에는 많은 선택사항들이 있으며 선택사항들에 따라 수치해석결과는 크게 달라질 수 있다. 특히 와류가 발생하는 유동장에서는 난류모델, 벽면해석모델 등에 크게 영향을 받는다.

난류모델은 종류도 많고 종류별 선택 사항도 다양하다. 간단한 난류모델을 이용하는 경우 계산과정은 단순하나 난류유동의 물리적 현상을 세밀하게 해석할 수 없는 단점이 있으며, 좀더 복잡한 모델을 이용할 경우 계산과정은 복잡하나 물리적 현상을 좀더 세밀하게 해석할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그러나 후자의 경우도 물리적 현상이 좀더 정확히 반영된 그 수식들의 해를 구하기 위해서는 이에 상응하는 만큼 많은 가정사항을 도입해야 함으로서 결과에 대한 검증이 필요한 요인이 될 수 있다. 결론적으로 수치해석적 방법은 목적에 상응하는 적절한 난류모델을 선정하는 것이 관건이다.

본 연구에서는 채널에서 벽면으로 방출되는 확산유로에서의 난류유동에 관해 수치해석적으로 연구하고자 한다. 채널에서 벽면으로 방출되는 유로에 대한 경험상관식과 유동장해석에 적용 가능한 난류모델에 대해 고찰하고, 검증차원에서 각 난류모델(Standard  $k-\epsilon$  모델, RNG  $k-\epsilon$  모델, 그리고 RSM)을 적용하여 경험상관식을 모의해석하고 결과를 분석하여 유동조건에 따라 보다 정확한 유동장 계산이 가능한 난류모델을 선정하였다. 해석코드로는 Fluent 코드를 이용하였다<sup>[2]</sup>.

## 2. 지배방정식 및 난류모델

### 2.1 지배방정식

본 연구의 대상 유체는 압력이나 유속에 따라 체적이 변하는 압축성의 효과를 무시할 수 있는 비압축성 유체이다. 비압축성 유체에 대한 일반적인 질량 및 운동량보존식은 아래와 같다.

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

$$\text{운동량보존식} \quad \rho \left( \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

대상 유체의 유동은 난류유동이므로 Navier-Stokes 방정식에서 각 성분을 평균성분과 변동성분으로 분해하여 재구성하면 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식이 된다.

난류의 불규칙변동을 제외시키기 위해 속도 ( $U_i$ )를 평균속도 ( $\overline{U_i}$ )와 그 주변의 속도 변동성분 ( $u_i$ )으로 분해하면 아래와 같으며 압력  $P$ 에 대해서도 동일하게 적용한다.

$$\overline{U_i} = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} U_i(t) dt \quad (3)$$

$$U_i = \overline{U}_i + u_i \quad (4)$$

식(4)를 식(1), (2)에 대입하고 변동성분  $u_i$ 의 시간평균이 0인 사실을 이용하면 식(1), (2)는 시간평균 Navier-Stokes 방정식으로 표시할 수 있으며 결과식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\rho(\overline{U}_j \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j}) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (6)$$

식(6)을 (1)과 비교해보면 식(6)에는 새로운 항  $-\rho \overline{u_i u_j}$ 이 나타남을 알 수 있다. 이 항은 난류에 의해 발생하는 난류응력항으로서 레이놀드응력항이라 하며 상기 속도 변동성분에 의한 운동량 수송의 증가분을 나타낸다.

## 2.2 난류모델

난류모델은 많은 종류가 있지만 계산법에 따라 크게 분류하면 표 1과 같다. 난류모델은 레이놀드응력항의 처리방법에 관한 것이며, 시간평균 미분법을 사용하는 난류모델의 경우 이 응력항을 모델링하는 방법에 따라 크게 와점성 모델과 레이놀드응력 모델로 구분할 수 있다.

와점성모델은, 레이놀드응력항을 모델링하기 위해 일반적인 방법인 레이놀드응력과 평균속도 구배와의 관계를 나타내는 Boussinesq 가설을 도입함으로써 출발하게 된다. 이 가설은 레이놀드응력이 평균속도의 변형률에 비례한다고 가정하며 다음의 식으로 표현된다.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (7)$$

비례계수  $\mu_t$ 는 난류의 상태에 따라 변하는 값으로 와점성계수(eddy viscosity)라 부르며 등방성의 스칼라량으로 가정된 값이다.  $k [= (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})/2]$ 는 난류에너지이며  $\delta_{ij}$  (0 for  $i \neq j$ ,

1 for  $i = j$ )는 Kronecker delta이다. 와점성 모델은 이 와점성계수를 어떻게 구하느냐에 따라 제로방정식 모델(혼합거리 모델), 1방정식 모델( $k$  모델), 2방정식 모델(Standard  $k-\epsilon$  모델 및 RNG  $k-\epsilon$  모델) 등으로 세분화된다. 운동량방정식을 푸는 과정은 세분화된 모델별로 구해진 각각의 와점성계수를 포함한 레이놀드응력항을 시간평균 Navier-Stokes 방정식인 식(6)에 대입함으로써 시작된다. 레이놀드응력모델은, 레이놀드응력항에 대해 상기 가설을 사용하지 않고 직접 레이놀드응력항을 모델링하여 구하는 방법이다.

Standard  $k-\epsilon$  모델(이하 “ $k-\epsilon$  모델”이라 함)은 실험에 근거한 반실험식으로 난류에너지(turbulent kinetic energy  $k$ )와 소산율(dissipation rate  $\epsilon$ )이 독립적인 두 개의 수송방정식에 의해 결정된다.  $k-\epsilon$  모델은 일반적인 열/유동해석에 광범위하게 사용되는 모델이다. 그러나  $k-\epsilon$  모델은 유동이 분자의 점성을 무시할 수 있다고 가정하고, 유동이 fully turbulent 하다는 가정 하에 유도된 상관식이므로 유동이 fully turbulent 하지 않은 경우에 유효하지 않다.

RNG  $k-\epsilon$  모델(이하 "RNG 모델"이라 함)은 RNG(Renormalization Group) method라 불리는 수학적 통계기법에 근거하여 난류현상을 모델링하는 방법이다. Standard  $k-\epsilon$  모델과 비교해보면 수송방정식에 몇 개의 항이 추가되어 있으며 또한 상수 값이 다르다. RSN 모델에는 Standard  $k-\epsilon$  모델에 저레이놀드수(Low Reynolds No.)를 고려하기 위해 해석적으로 유도된 effective viscosity에 대한 미분공식을 사용하였고, Swirling flow의 정확성을 높이기 위한 swirl effect 인자의 함수로 와점성계수를 표현하였고, 사용자 입력 값이 아닌 RNG 이론에서 해석적으로 유도된 inverse effective Prandtl number에 대한 공식을 사용하였으며,  $\epsilon$  방정식에 rapidly strained flow의 정확성을 높이기 위한 항이 추가되었다.

RSM(이하 "RSM"이라 함)은 와점성계수가 등방성을 가진다는 가정을 적용하지 않고 레이놀드 응력에 대한 여러 개의 수송방정식 및 소산률에 대한 1개의 수송방정식과 함께 시간평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 해를 구한다. RSM은 보다 현실적인 방법으로 곡률, 선회, 변형, 회전등에서의 급속한 변화에 대한 영향을 고려하기 때문에, 1-Equation 또는 2-Equation 모델 등에 비해 복잡한 유동을 좀 더 정확히 예측할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 레이놀드응력의 수송방정식에서 나타나는 다양한 항목을 모델링하는데 있어 사용된 가정들로 인해 정확도가 낮아질 수 있다. 따라서 RSM이 모든 종류의 유동에서 1-Equation 또는 2-Equation 모델 등에 비해 항상 더 우수한 결과를 산출할 수 있는 것은 아니며, 단지 유동이 비등방성인 유동의 경우에 RSM의 적용이 보다 타당하다는 것을 의미한다. 예를 들어 강한 선회류, 곡률이 심한 유동, 덕트 등에서 이차유동이 야기되는 경우, 사이클론 유동, 회전유동 등의 해석에서 RSM을 적용하는 것이 효과적이다. 상세 모델은 참고문헌 [2, 3, 4, 5]에 기술되어 있다.

### 표 1. 난류모델의 분류

1. Classical models : Based on(time-averaged) Reynolds equation <ul style="list-style-type: none"> <li>1) zero equation model - mixing length model</li> <li>2) two equation model             <ul style="list-style-type: none"> <li>- k-epsilon(<math>k-\epsilon</math>) model</li> <li>- Renormalization-group(RNG) k-epsilon model</li> <li>- Realizable k-e model</li> </ul> </li> <li>3) Reynolds stress equation model(RSM)</li> <li>4) Algebraic stress model</li> </ul>
2. Large eddy simulation(LES) model
3. Direct Numerical Simulation (DNS)

### 3. 해석격자 및 해석 Case

해석 유로형상은 출구 모서리가 곡면인 디퓨저에서 벽으로 확산되는 그림 1의 형상으로 디퓨저 입구의 수력직경에 대한 디퓨저 끝에서 벽면까지의 거리의 비 ( $h/D_0$ )에 따른 압력손실계수 (pressure loss coeff.)  $\zeta$  값의 변화를 레이놀드수가 다른 세 가지 경우에 대해 해석하였다. 표 2

에서 레이놀드수는 유로 입구에서 산정된 값이다.

격자 수 변화에 따른 속도, 압력 등의 일관성을 점검하기 위해 2차원 축대칭 해석격자에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 분석 결과 약 12,000 개 이상의 해석격자에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 해석격자는 레이놀드수가 커서 벽함수를 적용할 수 밖에 없는 경우에는  $y^+$ 를 50~500사이가 되도록 설정하였고 레이놀드수가 작은 경우에는  $y^+$ 가 1이하가 되도록 설정하였다. 해석격자는 유동을 따라가는 사각형 정렬 격자로 속도가 급격히 변화하는 벽면근처에서는 조밀한 격자 간격을 유지하고 벽면으로부터 멀어지면서 서서히 격자의 간격을 증가시켰다. 선정된 해석격자의 대표적 형상은 그림 2에 나타나 있다.

표 2 해석 Case 요약

Simulation case		$h/D_0$	$r/D_0$	난류모델			Re
				$k-\epsilon$	RNG	RSM	
A	A-1	0.07	0.5	o	o	o	9.95E+04
	A-2	0.10	0.5	o	o	o	
	A-3	0.15	0.5	o	o	o	
	A-4	0.20	0.5	o	o	o	
	A-5	0.30	0.5	o	o	o	
	A-6	0.40	0.5	o	o	o	
	A-7	0.60	0.5	o	o	o	
B	B-1	0.07	0.5	o	o	o	1.99E+05
	B-2	0.10	0.5	o	o	o	
	B-3	0.15	0.5	o	o	o	
	B-4	0.20	0.5	o	o	o	
	B-5	0.30	0.5	o	o	o	
	B-6	0.40	0.5	o	o	o	
	B-7	0.60	0.5	o	o	o	
C	C-1	0.07	0.5	o	o	o	5.04E+06
	C-2	0.10	0.5	o	o	o	
	C-3	0.15	0.5	o	o	o	
	C-4	0.20	0.5	o	o	o	
	C-5	0.30	0.5	o	o	o	
	C-6	0.40	0.5	o	o	o	
	C-7	0.60	0.5	o	o	o	

#### 4. 해석결과

SMART MCP 유로의 유동장 해석을 위한 난류모델선정을 위해 SMART MCP의 출구 유로와 유사한 형상(그림 1)에 대한 난류모델을 평가하였다. 난류모델은 Standard  $k-\epsilon$  모델, RNG 모델, 그리고 RSM을 평가대상으로 선정하였다.

그림 3은  $h/D_0$ 비 변화에 따른 난류모델별 압력손실 계수의 변화로 (a), (b)와 (c)는 레이놀드수에 증가에 따른 압력손실 계수의 변화를 보여주고 있다. 경험상관식에 대한 자료 부족으로 인해 직접 비교는 수행할 수 없었으나, 레이놀드수가 작은 경우의 유동조건에서 비교한 결과 난류모델별  $\zeta$ 의 변화추이는 경험상관식에 근접한 결과를 나타내었다. 또한 값이 최소가 되는  $h/D_0$ 비도 경험상관식과 매우 유사하게 나타났다. 레이놀드수를 변화시켜 해석한 결과, 유로에

서의  $\zeta$ 는 레이놀드수와 직접적인 관계가 있음을 보였다. 즉,  $\zeta$ 는 저 레이놀드수 경우 커지고 고 레이놀드수 경우 작아지는 현상을 보였다. 이러한 현상은 본 연구대상 형상 이외의 다른 형상에 대한 경험상관식에서 나타나는 일반적인 경향과 유사하다.

레이놀드수가 작고(유속이 작거나 점성계수가 큼, 그림 3a)  $h/D_0$ 비가 작은 경우, 즉 이차유동이 생성되기 전에는 각 난류모델의 특성의 차에 의해  $h/D_0$ 비에 대한  $\zeta$  값들은 다소 차이를 보이고 있으나,  $\zeta$  값들의 변화추이는 대체적으로 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나  $k-\epsilon$  모델은 저레이놀드 영역에서는 RNG 모델, RSM과 유사한 경향을 보이거나  $h/D_0$ 비가 증가하여 2차유동(Flow separation)이 발생하면 RNG 모델, RSM와 차이를 보이며 압력손실을 다소 작게 계산하고 있다. 고 레이놀드수 유동의 경우(그림 3c) 저레이놀드수 유동에서의 미세하게 발생하는 난류모델의 영향이 좀 더 심화되고 있음을 알 수 있다. 즉 RNG 모델과 RSM에 의한 계산결과는 매우 유사하게 나타났다. 그러나  $k-\epsilon$  모델은 전 영역에서 RNG 모델, RSM과 상이한 결과를 나타내고 있다. 저레이놀드수 유동에서는 RNG 모델에 의한 결과는 RSM에 의한 결과와 전반적인 경향은 유사하나 다소 차이가 있었으나 고레이놀드수 유동에서는 RNG 모델에 의한 결과는 RSM에 의한 결과에 매우 근접하게 나타났다.

본 해석대상 유로에서는  $h/D_0$ 비가 커지면  $k-\epsilon$  모델은 유체저항을 증가하는 방향으로 유동장에 영향을 미치는(난류모델이 와류 등의 유동현상을 잘 모의하지 못하는 경우 유로의 저항을 증가시키거나 감소시키거나 하는 문제는 유로의 형상에 따라 다를 수 있다) 와류현상을 잘 모의하지 못하여 상대적으로 다른 모델에 비해  $\zeta$  값을 낮게 예측하고 있다. RNG 모델의 경우는,  $k-\epsilon$  모델에 추가하여, 빠르게 변형되는 유동(rapidly strained flow) 및 곡률 유동(curvature flow) 등의 유동현상에 대한 좀 더 정확한 예측이 가능하도록 모델링되어 있어 와류가 커지는 경우  $k-\epsilon$  모델보다는 RSM에 점차 근접하는 결과를 보여준다. RSM의 경우는 좀 더 현실적인 방법으로 즉, 와점성계수가 등방성을 가진다는 가정을 적용하지 않고 레이놀드응력에 대한 수송방정식을 직접 푸는 방법으로 변형, 곡률 등에서의 급속한 변화에 대한 영향을 고려하기 때문에 타 모델에 비해  $\zeta$  값이 높거나 같게 나타나는 것으로 판단된다.

그림 4에는 레이놀드수가 작은 경우(Case A-4~A-7)와 레이놀드수가 큰 경우(C-4~C-7)에 대한 유동분포를 나타내었고, 그림 5에는  $y=0.2, 0.3, 0.6m$  단면에서의 반경방향 속도분포(Case A-7, C-7)를 나타냈다. 그림 5에는 레이놀드수가 작은 경우(Case A-7)와 레이놀드수가 큰 경우(C-7)에 대한  $y=0.2, 0.3, 0.6m$  단면에서의 전압력분포를 나타내었다.

그림 4에서와 같이 RNG 모델에서의 속도분포는 와류가 발생하기 시작하기 전 (Case A-4) 영역에서는  $k-\epsilon$  모델과 유사한 분포를 나타내고 있으며, 와류가 발생한 후(Case A-5 이후)에는 다소 차이를 보이기 시작하며 전반적인 유동형상이 RSM과 유사해진다. 그림 4 및 그림 5에서와 같이 와류가 발생하면 RNG 모델, RSM은  $k-\epsilon$  모델에 비하여 벽면 부근에서 속도구배가 더 크게 발생하는 것으로 계산하고 있다. 반면 RSM에서는 타 모델과는 달리 모델링 방법이 상이하여 RNG 모델과  $k-\epsilon$  모델에서 나타나지 않은 벽면에서의 반사현상도 계산하고 있으며, 이러한 효과로 벽면에서의 속도구배가 RNG 모델보다 빨리 감소되고 있다.

또한 그림 6에서와 같이 RNG 모델에 의해 계산된 전압력의 분포도 와류가 발생한 후(Case 5 이후)에는 RSM에 의한 결과에 근접해 가는 경향을 보인다. 레이놀드수가 작은 경우에는 RNG 모델의 계산결과는 RSM의 계산결과와 다소 차이를 보이거나 레이놀드수가 증가하면서 RSM의 결과에 매우 근접해진다.

해석결과를 종합하면 유로 입구에서의 유동이 저 레이놀드수 유동의 경우,  $h/D_0$  값이 작아 이차유동이 발생하지 않는 경우에는 상기 3가지 난류모델 모두  $h/D_0$ 비에 대한  $\zeta$  값들은 다소 차이를 보이고 있으나  $\zeta$  값들의 변화추이는 대체적으로 유사하게 나타났다. 그러나  $h/D_0$  값이 커 이차유동이 발생하는 경우에는  $k-\epsilon$  모델은 와류현상을 적절히 모의하지 못해 압력손실을 다소 작게 계산하고 있다. 따라서 레이놀드수가 작고  $h/D_0$ 비가 크지 않으며 요구되는 정확도가 크지 않는 경우에는 일반적이고 많이 활용되고 있는 난류모델인  $k-\epsilon$  모델을 사용하여도 타 모델에 비해 큰 차이가 없을 것으로 판단된다. 반면  $h/D_0$ 비가 크거나 고 레이놀드수 유동의 경우에는 유발되는 와류의 영향이 크므로 이를 보다 잘 예측하는 RNG 또는 RSM 난류모델을 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

SMART MCP 유로의 유동장 해석을 위한 난류모델선정을 위해 SMART MCP의 입출구 유로와 유사한 유로에 대한 난류모델을 평가하였다. 난류모델은 Standard  $k-\epsilon$  모델, RNG 모델, 그리고 RSM을 평가대상으로 선정하였다.

저 레이놀드수 유동의 경우,  $h/D_0$  값이 작아 이차유동이 발생하지 않는 경우 유발되는 와류의 영향이 작아 각 난류모델의 특성의 차에 의해  $h/D_0$ 비에 대한  $\zeta$  값들은 다소 차이를 보이고 있으나,  $\zeta$  값들의 변화추이는 대체적으로 유사하게 나타났다. 그러나  $h/D_0$  값이 큰 경우  $k-\epsilon$  모델에 의한 계산결과는 RNG 모델, RSM에 의한 계산결과와 차이를 보인다. 따라서 형상에 의해 이차유동이 발생할지 않고 요구되는 정확도가 크지 않는 경우에는 일반적으로 많이 활용되고 있는 난류모델인  $k-\epsilon$  모델을 사용하여도 타 모델에 비해 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.

고 레이놀드수 유동의 경우 상기 저 레이놀드수 유동에서의 미세하게 발생하는 난류모델의 영향이 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 RNG 모델과 RSM의 계산결과는 매우 유사하게 나타났다. 그러나  $k-\epsilon$  모델은 전 영역에서 RNG 모델, RSM과 상이한 결과를 나타내고 있다. 저레이놀드수 유동에서는 RNG 모델에 의한 결과는 RSM에 의한 결과와 다소 차이가 있었으나 고레이놀드수 유동에서는 RNG 모델에 의한 결과는 RSM에 의한 결과에 매우 근접하게 나타났다. 따라서 고레이놀드 유동이나  $h/D_0$  값이 큰 유로에서는 와류의 영향이 크므로 이를 보다 잘 예측하는 난류모델을 적용하는 것이 필요하다. RNG 모델과 RSM은  $k-\epsilon$  모델에 비해 본 연구에서 모의한 유로에 대한 압력손실을 좀 더 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기개발 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] I. E. Idelchik, "Handbook of Hydraulic Resistance". Second edition, Hemisphere Pub. Corp., 1986
- [2] FLUENT 5 User's Guide, Fluent Inc., July, 1998
- [3] 荒川 忠一, "數値流體工學". 東京大學出版會, 1993(번역판)
- [4] D. Choudhury, "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling", Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107, 1993
- [5] 김영인 외, "SMART MCP 유로의 유동장 해석을 위한 난류모델평가", 기술보고서, 2001

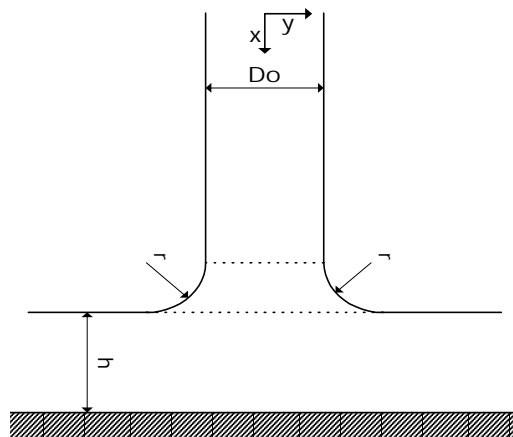


그림 1. 유로형상<sup>[2]</sup>

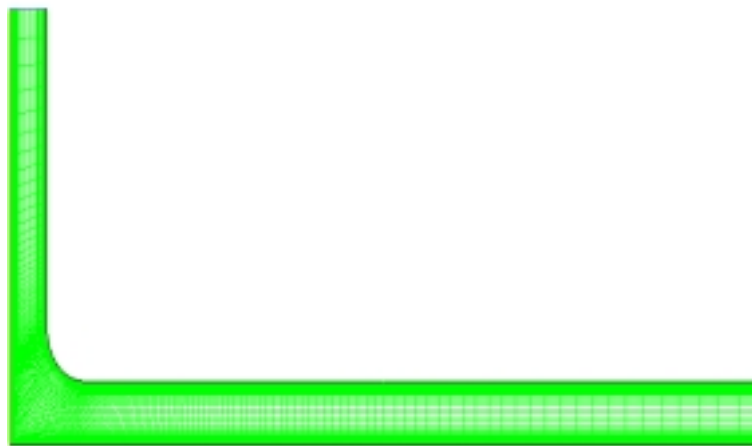
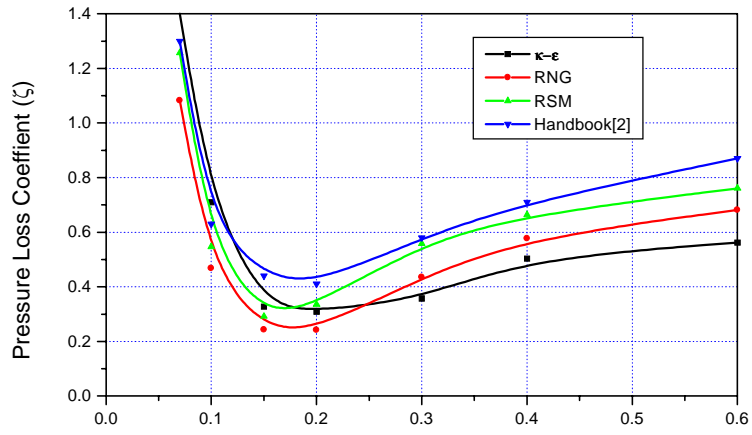
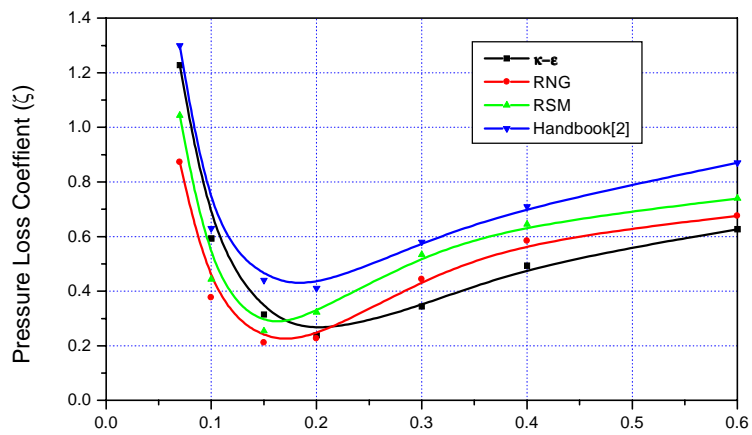


그림 2. 해석격자(Case A-7)

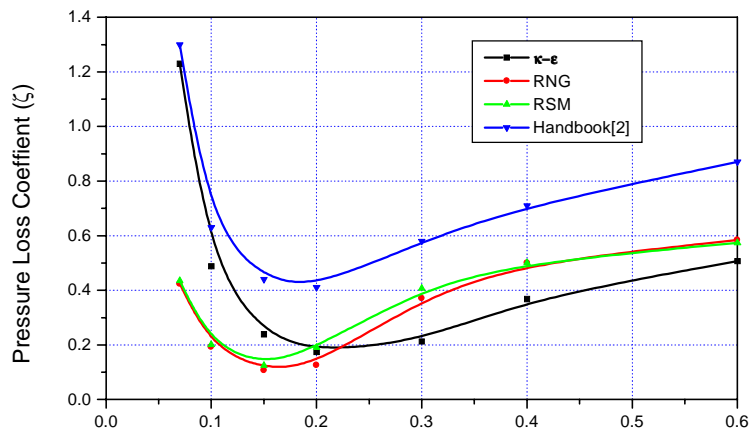




(a) Case A

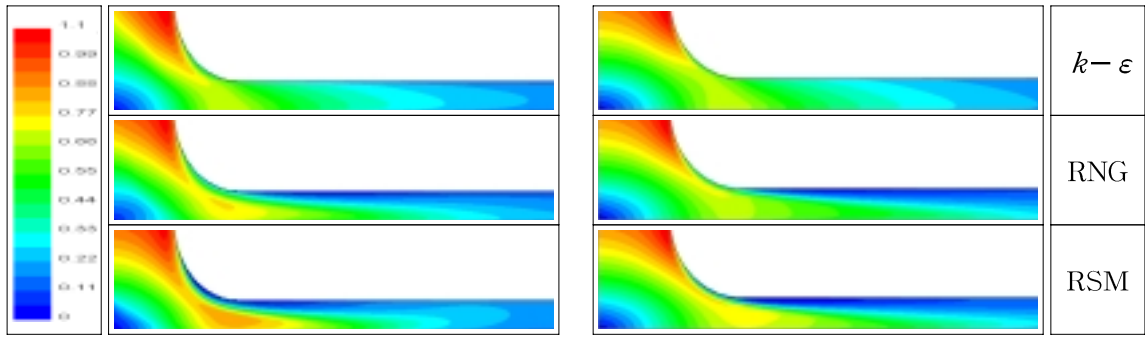


(b) Case B



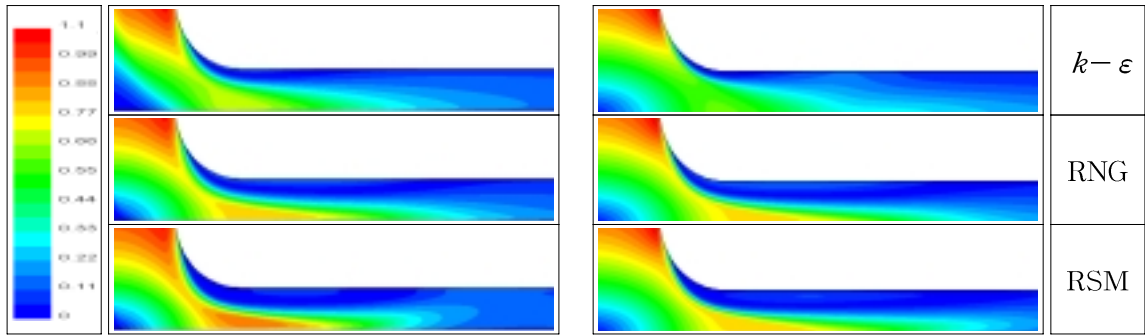
(c) Case C

그림. 3 압력손실계수 ( $\zeta$ ) 변화



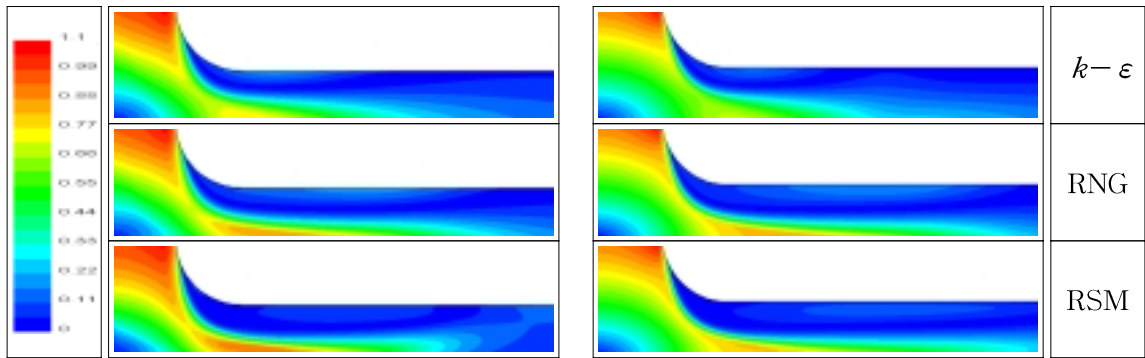
Case A-4

Case C-4



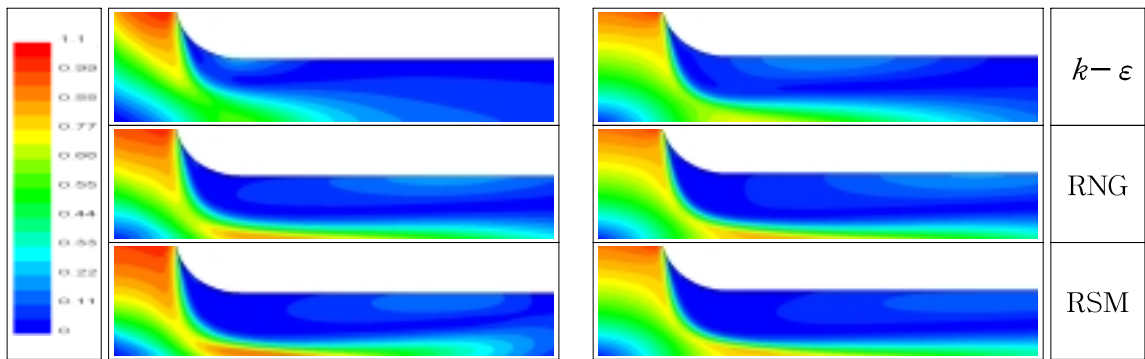
Case A-5

Case C-5



Case A-6

Case C-6



Case A-7

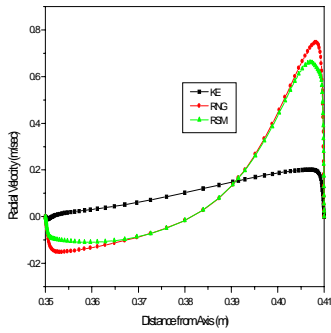
Case C-7

그림 4 속도분포 비교

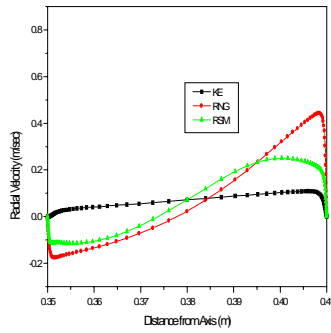


y=0.2m      y=0.3m

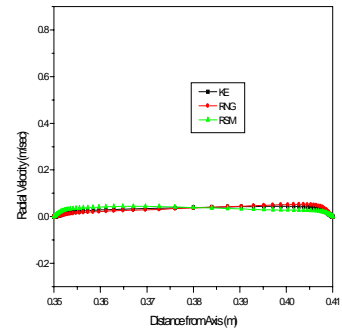
y=0.6m



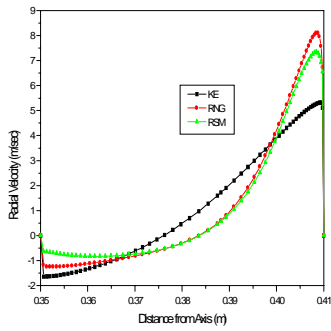
(a) Case A-7(y=0.2m)



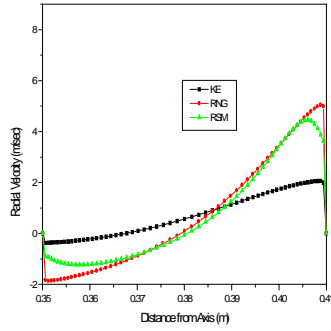
(b) Case A-7 (y=0.3m)



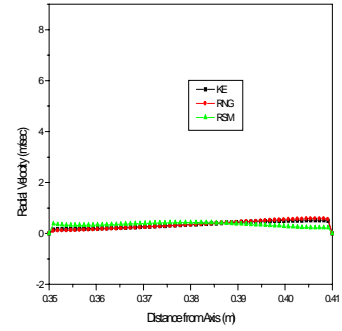
(c) Case A-7 (y=0.6m)



(d) Case C-7(y=0.2m)

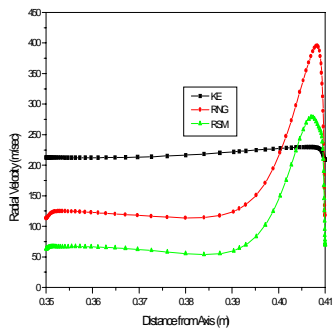


(e) Case C-7 (y=0.3m)

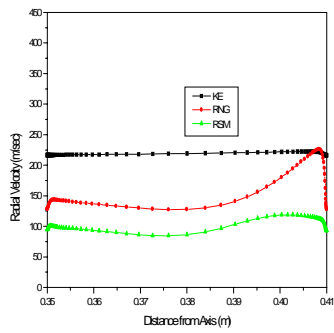


(f) Case C-7 (y=0.6m)

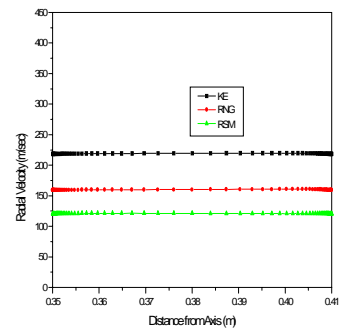
그림 5. 반경방향속도분포



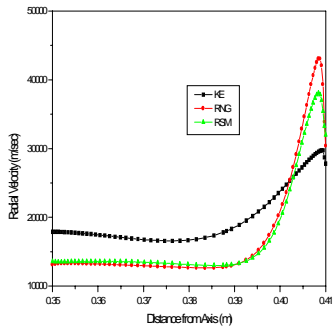
(a) Case A-7(y=0.2m)



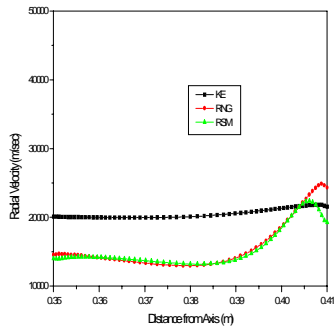
(b) Case A-7 (y=0.3m)



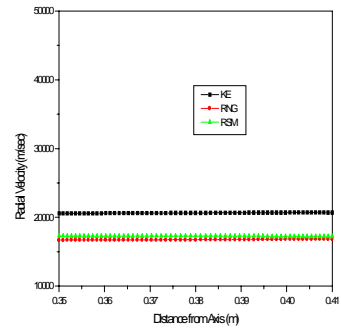
(c) Case A-7 (y=0.6m)



(d) Case C-7(y=0.2m)



(e) Case C-7 (y=0.3m)



(f) Case C-7 (y=0.6m)

그림 6. 전압력분포