

벽면을 통한 유체유동을 수반한 난류유동장 해석

유근종* · 서영수**

Analysis of Turbulent Flows with Wall Transpiration

G. J. Yoo* and Y. S. Seo**

ABSTRACT

Characteristics of turbulent flow with wall transpiration is analyzed. The wall transpiration includes both of suction and injection and extends their range to 0~160 of absolute magnitude of Re_w . Reynolds number based on inlet velocity also covers wide range of $3 \times 10^3 \sim 8 \times 10^4$. The turbulent flow with wall transpiration induces change of wall boundary layer and rapid change of turbulent field. This, in turn, leads the change of whole flow field. For predicting this complicated flow field properly, newly modified $k-\epsilon$ model is utilized, which is formed by modifying dissipation rate equation. The modified $k-\epsilon$ model of Chien is also adopted for the comparison of model performance. Analysis shows the newly modified $k-\epsilon$ model is successfully able to reflect the characteristics of turbulent flow field with wall transpiration.

초 록

벽면을 통한 유체의 유동이 있는 난류유동장의 특성을 분석하였다. 벽면을 통한 유체의 유동은 유출과 유입의 경우를 포함하여 Re_w 의 절대크기가 0~160으로 다양하며 입구에서의 Re_{in} 도 3×10^3 에서 8×10^4 까지 넓은 범위를 대상으로 하였다. 벽면을 통한 유체의 유동은 벽면 경계층의 변화를 초래하고 이에 따라 난류 유동장의 급격한 변화를 일으켜 벽면을 포함한 전 유동장의 특성을 변화시킨다. 이러한 복잡한 유동장을 올바르게 예측하기 위하여 난류운동에너지 소산을 방정식의 각 항에 대한 모델을 개선한 수정 $k-\epsilon$ 모델을 도입하였으며 기존의 난류모델과의 비교를 통하여 성능 검증을 시도하였다. 해석을 통한 분석결과로부터 수정 $k-\epsilon$ 모델은 벽면을 통한 유체유동이 있는 복잡한 유동장을 올바르게 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 수정 $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 다양한 경우의 벽면 및 입구 조건을 갖는 난류유동장을 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

*창원대학교 기계설계공학과(Changwon National University, Dept. of Mechanical Design and Manufacturing Eng.)

**창원대학교 대학원 기계설계공학과(Changwon National University, Graduate School)

기 호 설 명

- C_ϕ : 모형상수
 f_{Re} : 레이놀즈 수에 따른 감쇄함수
 f_μ, f_β : 감쇄함수
 k : 난류운동에너지
 P_k : 난류운동에너지의 생성항
 r : y 방향의 좌표
 R : 관의 반지름
 Re_t : 난류 레이놀즈 수, $= \frac{k^2}{\nu \epsilon}$
 Re_w : 벽면유동 레이놀즈 수, $= \frac{V_w D}{\nu}$
 Re_δ : 평균유동장의 레이놀즈 수, $= \frac{U \cdot D}{\nu}$
 S : 평균변형률변수, $= \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$
 S_{ij} : 평균변형률텐서, $= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$
 U : 유동방향 국부평균 속도
 u_τ : 벽마찰속도, $= \sqrt{\tau_w / \rho}$
 $\overline{u_i u_j}$: 난류응력
 V_w : 벽면출입 유동의 속도
 y^+ : 벽면무차원거리, $= y u_\tau / \nu$
 ϵ : 난류운동에너지 소산율
 $\tilde{\epsilon}$: 가소산율, $= \epsilon - 2\nu(\sqrt{k_{,j}})^2$
 ν_t : 와점성 계수
 Π_k : k 방정식의 압력확산항
 Π_ϵ : ϵ 방정식의 압력확산항
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$: 난류 프란틀수

1. 서 론

벽면을 통한 유체의 유출(suction) 및 유입(injection), 즉 벽면 유출입(transpiration) 효과가 있는 유동은 다양한 응용이 가능한 현상이다. 고체 연료를 사용하는 추진체의 내부유동은 벽면 유출입이 있는 경우에 해당하는 예로서 이러한 유동특성의 정확한 이해는 추진체 내부의 연소현상의 이해를 도와, 성능예측을 가능케 한다. 이밖에 벽면 유출입 효과는 경계층의 조절을 통한 항력감소, 막냉각에

의한 터빈날개의 냉각, 화학공정 및 생체역학의 영역에까지도 그 응용범위를 찾을 수 있는 전형적인 유동현상의 하나이다. 따라서, 벽면 유출입 효과가 있는 유동장을 올바르게 이해하고 이를 해석할 수 있는 정확한 도구를 정립하는 것은 이러한 유동현상의 응용을 용이하게 하고 설정된 유동장의 이해에 신뢰도를 부여할 수 있는 기반을 제공할 수 있으므로 벽면 유출입 효과가 있는 유동장에 대한 체계적인 연구가 요구되고 있다.

이 분야의 연구는 실험적으로 많은 연구성과를 보유하고 있으나 해석적인 연구는 다소 미흡한 편이다. 해석적인 연구를 통한 해석도구의 개발은 궁극적으로 다양한 응용사례를 가지고 있는 벽면 유출입 유동의 활용을 용이하게 하므로 그 성과가 매우 기대되는 분야이다. 그러나 이제까지의 연구는 해석모델의 성능 혹은 그 적용대상 등에서 일부 제한적인 요소가 있었다. 즉, 해석모델에 있어서는 벽면 유출입으로 인하여 복잡성이 증대된 벽면근처에서의 유동장을 예측하는 능력이 미흡한 모델이 적용된 경우도 있었다. 한편, 적절한 모델이 적용된 경우에는 연구대상에서의 벽면 유출입 효과의 크기가 제한적이어서 그 연구결과를 데이터 베이스화하기에는 부족한 측면이 있었다. 이러한 제한적인 요소들을 극복하는 것은 제시될 해석도구의 응용성을 높이는 것이므로 본 연구에서는 벽면효과를 올바르게 예측할 수 있는 저 레이놀즈 수 형태의 난류모델을 기본 해석모델로 설정하였다. 또한 그 연구 대상으로는 유출에서부터 유입에 이르는 넓은 영역의 다양한 경우를 포함하여 벽면 유출입이 있는 유동의 특성을 정량적 및 정성적으로 제시하고자 한다.

벽면 유출입 유동에 대한 실험적 연구는 비교적 다양하게 제시되었다. Weissberg와 Berman¹⁾은 완전히 발달된 유동장에 유출조건을 적용하여 실험을 수행하였다. 이들은 출구에서의 Re 를 약 3×10^4 에서 8×10^4 으로 설정하고 이에 대한 난류 섭동속도 성분을 측정하여 유동장에 미치는 영향을 연구하였다. Olson과 Eckert²⁾는 완전히 발달된 유동장에 유입유동이 있는 경우에 대하여 입구 Re 가 3×10^4 에서 8×10^4 인 경우에 대한 연구를 입구영역을 중심으로 수행하였으나 난류장에 대한 측정이 결여되어 전체 유동장의 특성을 이해하기에는 미흡한 면이 있

었다. Aggarwal 등³⁾은 완전히 발달된 관류에 유출조건을 적용한 경우에 대한 실험을 수행하여 관 중심에서의 난류 섭동속도 성분의 크기는 낮은 유출 유동속도에서는 감소하고 높은 유출 유동속도에서는 증가함을 관찰하였으며 난류강도는 유출유동에 따라 감소하고 있음을 발견하였다. Brosch와 Winograd⁴⁾ 역시 그들의 실험에서 Aggarwal 등³⁾과 유사한 결과를 관찰하였다. Schildknecht 등⁵⁾의 실험도 완전히 발달된 유동장에 유출조건을 적용한 경우이나 다른 연구자들의 실험결과가 난류강도의 측정에 국한된 경우와는 달리 벽면 난류유동의 구조에 대한 이해를 시도한 점에서 이들의 연구의 특성이 있다. 이들은 유출의 증가에 따라 난류에너지의 크기가 감소하고 있음을 관찰하였으며 이는 유출방향의 평균속도 성분에 기인한 것으로 분석하였다. 한편, Pennell 등⁶⁾은 완전히 발달된 유동장에 유입조건을 적용하여 난류유동의 층류화 현상을 관찰하였다. 이들은 입구에서의 Re를 3×10^3 에서 6×10^3 으로 유지하고 유입으로 인한 유동장의 천이현상을 설명하였다. 유입량의 증가에 따라 유동장의 입구역에서는 점성저층 및 천이영역의 증가와 함께 난류강도의 감소에 따른 층류화 현상을 관찰할 수 있었으며 유동방향의 진행에 따라 유입으로 인한 운동량 증가에 따라 난류로의 재발달 과정을 관찰하여 난류에서 층류 그리고 다시 난류화의 과정을 이해할 수 있었다. 그러나 이들의 연구에서는 난류 유동장에 대한 정보가 제공되지 못한 아쉬움이 있었다. 완전히 발달된 유동장에 유입과 유출효과를 각각 적용하여 함께 연구한 경우들은 Mizushina와 그 그룹⁷⁻⁹⁾에 의하여 수행되었다. 이들은 Re가 8×10^3 에서 10^5 에 이르는 영역에서 평균속도와 압력분포를 측정하고, 이로부터 전단응력은 유입에 의하여 감소하고 유출에 의해서는 증가함을 보였다. 아울러 벽면에 수직인 평균속도 성분은 벽면 유출입 속도에 따라 선형적인 분포를 가짐을 관찰하였다. 이밖에 Suneja 등¹⁰⁾은 벽면 유출입 효과가 질량유속에 미치는 영향을 연구하였고 Aggarwal과 Hollingsworth¹¹⁾를 비롯한 다수의 연구자들¹²⁻¹⁴⁾은 벽면 유출입 유동이 완전히 발달된 유동장에서의 열전달에 미치는 영향을 고찰하였다.

완전히 발달된 난류유동에서의 벽면 유출입 효과

에 대한 기초적인 해석적 연구는 여러 연구자들에 의하여 제시되었다¹⁵⁻¹⁹⁾. 이러한 기초적 해석은 주로 혼합거리모델을 이용하여 이루어졌으며 지배방정식 또한 포물선 형태로 단순화된 경우가 많아 난류유동장의 특성을 이해하기에는 한계가 있었다. Eroshenko 등²⁰⁾은 2-방정식 모델을 이용하여 접근하였으나 그들 역시 지배방정식으로 포물선 형태의 경계층 유동식을 이용하므로써 그 응용에 한계가 있을 수밖에 없었다. 최근에 Sofialidis와 Prinos²¹⁾는 몇 개의 저 레이놀즈 수 형태의 2-방정식 모델을 완전히 발달된 유동장에 유출이 있는 경우에 적용하여 각 난류모델의 장단점을 점검하고 이들을 이용한 해석을 수행하였다. So와 Yoo²²⁾는 그들이 개발한 저 레이놀즈 수 형태의 전응력모델을 유출이 있는 벽면 유출입 유동에 적용하여 난류유동장의 특성을 연구하였다. 이들은 전체 유동장의 특성을 반영할 수 있는 타원형 형태의 지배방정식과 벽면 근처의 유동을 정확히 해석하려는 노력으로 저 레이놀즈 수 형태의 난류모델을 적용하므로써 정확한 유동해석을 시도하였다. 해석의 결과로 전체 유동장에 대한 자세한 정보를 도출할 수 있었으나 이들의 연구대상은 유출이 있는 경우에 대한 것으로 제한되어 있으며 벽면근처에서의 난류강도의 크기가 실험결과와 다소 상이함을 보이는 문제점을 포함하고 있다. 유근종²³⁻²⁴⁾은 이러한 연구를 유입이 있는 경우로 확대 적용하여 저 레이놀즈 수 형태의 k- ϵ 모델 및 전응력 모델을 적용한 해석결과를 보고하였다.

이러한 일련의 연구결과들의 점검으로부터 벽면 유출입이 있는 유동장에 대한 연구에서는 실험적 연구보다는 이론적 연구부분의 결과가 다양하지 못함을 알 수 있다. 더욱이 각각의 이론적 연구는 난류모델의 성능에 제한성이 있어 유동장의 주요 변화요인이 집중되어 있는 벽면근처에서의 해석능력이 만족스럽지 못한 결과를 도출하고 있다. 또한, 연구대상이 유출 혹은 유입만이 있는 경우 등으로 분리되어 있거나 각각의 대상에 대해서도 벽면 유출입 속도의 범위가 다양하지 못한 제한성을 가지고 있다. 본 연구에서는 난류유동장 해석의 정확성을 향상시키기 위하여, 일반적으로 많은 오차를 가지고 있는 난류운동에너지 소산을 방정식의 개선을 통하여 제시된 송경 등²⁵⁾의 저 레이놀즈 수 k- ϵ 모델을

적용하여 넓은 범위의 벽면 유출입 효과가 있는 유동장을 대상으로 그 효과에 따른 전체적인 유동특성을 파악하고 구체적인 난류정보를 도출할 수 있도록 하였다.

2. 지배방정식과 난류모델

2.1 지배방정식

정상상태, 비압축성 난류유동의 지배방정식은 다음과 같이 제시할 수 있다.

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right)$$

여기서 대문자는 유동변수의 평균량을, 소문자는 변동량을 나타낸다.

2.2. 난류모델

모형의 간편한 특징으로 인하여 그 활용범위가 다양한 $k-\epsilon$ 모델은 예측능력 향상을 위하여 꾸준한 개선이 이루어져 왔으나 여전히 실험결과 혹은 DNS 결과와 비교할 때 소산율의 크기와 분포특성, 난류운동에너지의 최대값 및 그 위치 예측 등에서 무시할 수 없는 오차를 포함하고 있다. 전반적으로는 수정 $k-\epsilon$ 모델에 의한 벽면근처에서의 해석능력은 향상되었으나 그 정도는 미흡한 수준이다. 이러한 단점을 극복하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며 최근에는 $k-\epsilon$ 모델에서의 주요 오차는 난류운동에너지 소산율 방정식의 부정확한 모델링에서 기인한다는데 주목하여 이를 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다. 송경 등²⁵⁾은 난류운동에너지 소산율 방정식의 각 항들의 벽면근처에서의 변화양상을 분석하여 새로이 모델링하고, 감쇄함수와 레이놀즈 수의 영향을 고려한 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 모델을 제시하고 이를 이용하여 만족할 만한 해석결과를 제시하였다. 벽면을 통한 유체유동으로 인하여 벽면근처의 유동장이 급격한 변화를 일으키는 경우를 해석하는 본 연구에서는 난류유동장의 정확한 예측이 요구

되므로 송경 등²⁵⁾의 저 레이놀즈 수 형태의 $k-\epsilon$ 모델(이하 SYC 모델이라 함)을 기본 난류모델로 활용하였다. 아울러 모델의 성능에 따른 예측능력의 비교를 위하여 Chien²⁶⁾의 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 모델도 함께 사용하였다. SYC 모델에 관한 자세한 내용은 참고문헌 [25]에 제시되어 있으며 여기서는 그 간략한 난류유동장에 관한 식들을 다음과 같이 요약하여 제시한다. 우선 난류점성계수는

$$\mu_t = c_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

이며, 여기서 감쇄함수 f_μ 와 그 밖의 각 항들은 다음과 같이 정의된다.

$$f_\mu = \left[\left(\frac{4}{Re_t^{1/2}} \frac{1}{\tanh(Re_t^{1/4}/C_{dt})} \right)^4 + 1 \right]^{1/4}$$

$$[1 - \exp\{-(y^+/41)^2\}]$$

$$C_{dt} = 10f_{Re}$$

$$f_{Re} = 1 - 0.5 \exp(-Re_\delta/10^4)$$

난류운동에너지와 그 소산율방정식은 다음과 같이 모델링되었다.

$$\frac{Dk}{Dt} = \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) k_{,j} \right]_{,j} + P_k - \epsilon - 0.5 \left[\nu f_{wk} \frac{k}{\epsilon} \epsilon_{,j} \right]_{,j}$$

$$f_{wk} = \exp[-(y^+/9)^2]$$

$$\sigma_k = \frac{1.2}{1 + 3.5 \exp[-(Re_t/C_{fs})]}$$

$$C_{fs} = 120f_{Re}$$

$$\begin{aligned} \frac{D\epsilon}{Dt} = & \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \epsilon_{,j} \right]_{,j} \\ & + C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\epsilon^2}{k} - 0.35 \tilde{\epsilon} S f_\beta \\ & + 0.5 \left[\nu f_{wk} (1 - f_{wk}) \frac{\epsilon}{k} k_{,j} \right]_{,j} \\ & + 0.8 \left[\nu \nu_i (U_{i,jk})^2 + 0.006 \nu \frac{k}{\epsilon} k_{,j} U_{i,k} U_{i,jk} \right] \end{aligned}$$

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1.3}{1.2} \sigma_k$$

$$C'_{\varepsilon 1} = 1.45(1 + 0.65\beta f_\beta)$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1.90$$

$$f_\beta = \exp[-(Re_t/C_{f\beta})^2]$$

$$C_{f\beta} = 140f_{Re}$$

$$f_2 = [1 - 0.3\exp\{- (Re_t/6.5)^2\}] \cdot [1 - \exp(-y^+/6)]^2$$

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - 2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial r} \right)^2$$

$$\beta = \frac{S}{(\varepsilon/\nu)^{1/2}}$$

2.3. 수치해석

본 연구에서는 FVM을 이용한 SIMPLE 기법의 수치해석을 수행하였다. 격자계는 엇갈림 격자계를 채택하고 벽면근처에서 격자 수를 집중시켜 해석의 정확성을 높이도록 하였다. 경계조건으로는 실험 값으로 제시된 입구조건과 중심선을 따르는 대칭조건, 그리고 출구에서의 1차 Neumann 조건이 적용되었

다. 벽면에서는 유동방향속도에 대한 점착조건과 수직방향속도에 대한 벽면 유출입 속도조건이 사용되었으며 SYC 모델의 소산율 경계조건은 송경 등²⁵⁾이 제시한 바와 같이 다음과 같은 식을 채택하였다.

$$\varepsilon_w = 4\nu k_1 / y_1^2 - \varepsilon_1$$

여기서 하첨자 '1'은 벽면으로부터 첫 번째 격자 점을 나타낸다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1. 벽면을 통한 유출을 수반한 유동

벽면을 통한 유체의 유출은 벽면경계층의 교란을 일으킨다. 즉, 유체의 유출은 경계층의 성장을 저해하여 유동장의 발달속도를 저하시키고, 난류강도의 감소를 초래하게 된다. 이에 따라 벽면근처에서의

Table 1. Test cases for wall suction flow

구분 \ 경우	Case S0 ^{a)}	Case S1 ^{a)}	Case S2 ^{a)}	Case S3 ^{a)}
Re _{in}	17,250	17,250	80,000	80,200
Re _w	0	101.5	106.0	139.6
Re _w /Re _{ex}	0	0.6%	0.3%	0.5%

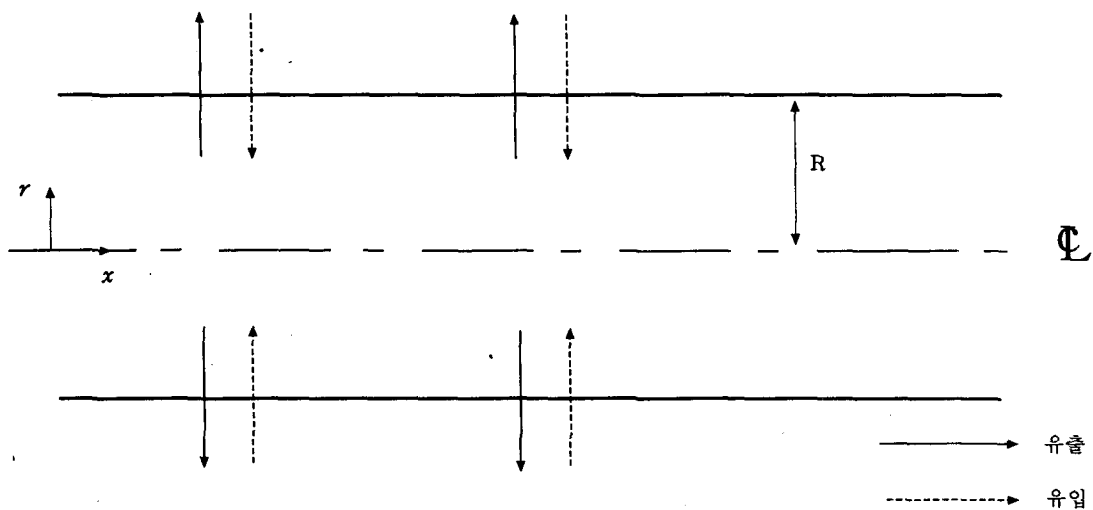


Fig. 1. Schematic of test section

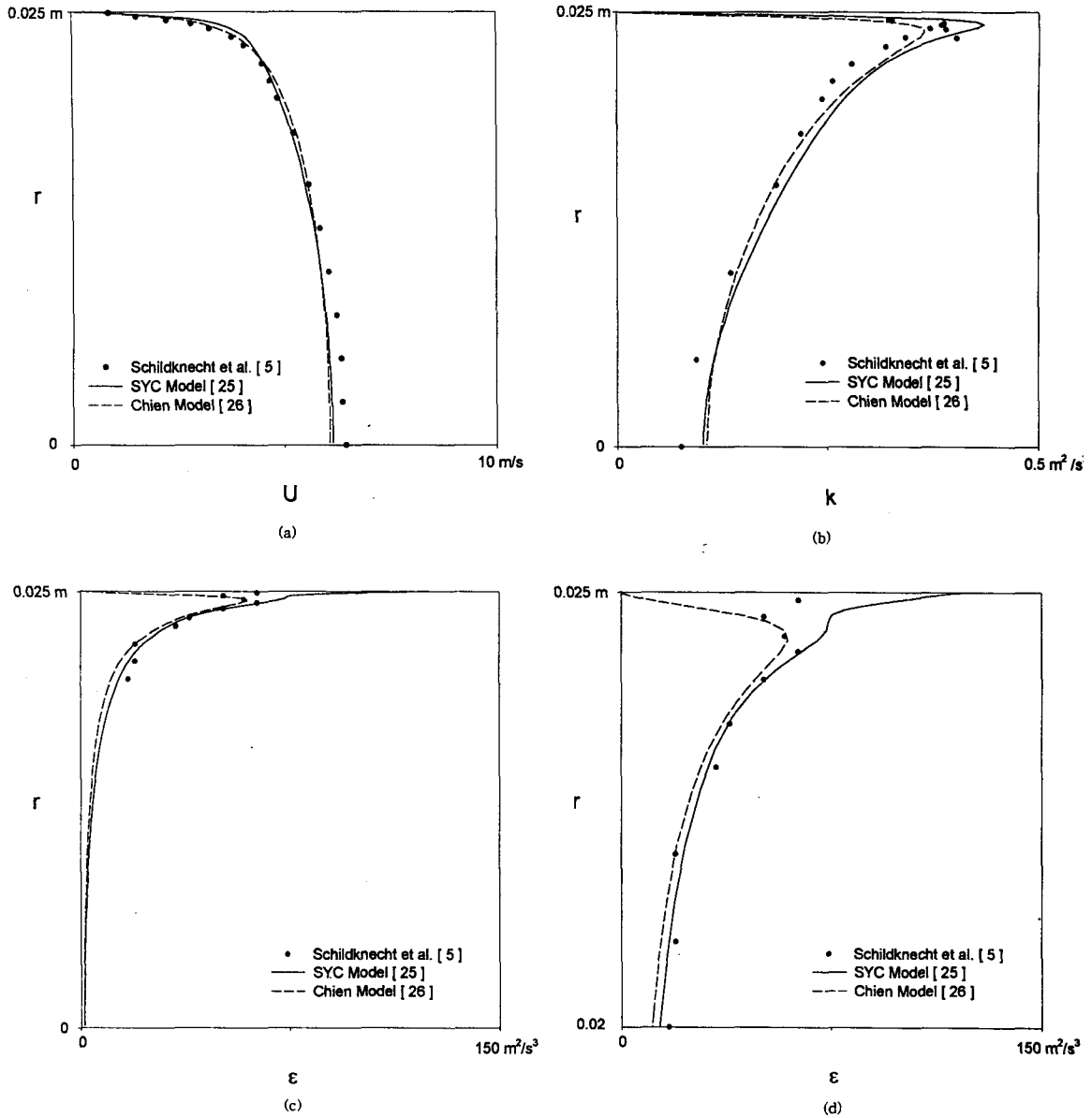


Fig. 2. Comparisons of a) streamwise mean velocity, b) turbulent kinetic energy, c) dissipation rate of turbulent kinetic energy, and d) near-wall behavior of dissipation rate for case S0

속도구배가 점차 증가하는 분포를 보이게 된다. 이러한 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 표 1과 같이 정상관류 및 3가지의 서로 다른 유출속도를 가진 유동장에 대한 분석을 시도하였다. 그림 1에는 관에서의 유동 현상을 간략히 도시하였다.

먼저 S0의 경우는 유체의 유출이 없는 정상관류

로서 SYC 모델의 검증이 가능한 경우이다. 그림 2에는 완전히 발달한 유동장의 속도, 난류운동에너지, 그리고 이의 소산율 분포가 제시되었다. 전반적인 SYC 모델의 예측능력은 송경 등²⁵⁾이 보고한 바와 같아 본 연구에서 구축한 해석도구의 신뢰성을 확인할 수 있다. 그림 3은 S1 경우의 속도분포를 보이

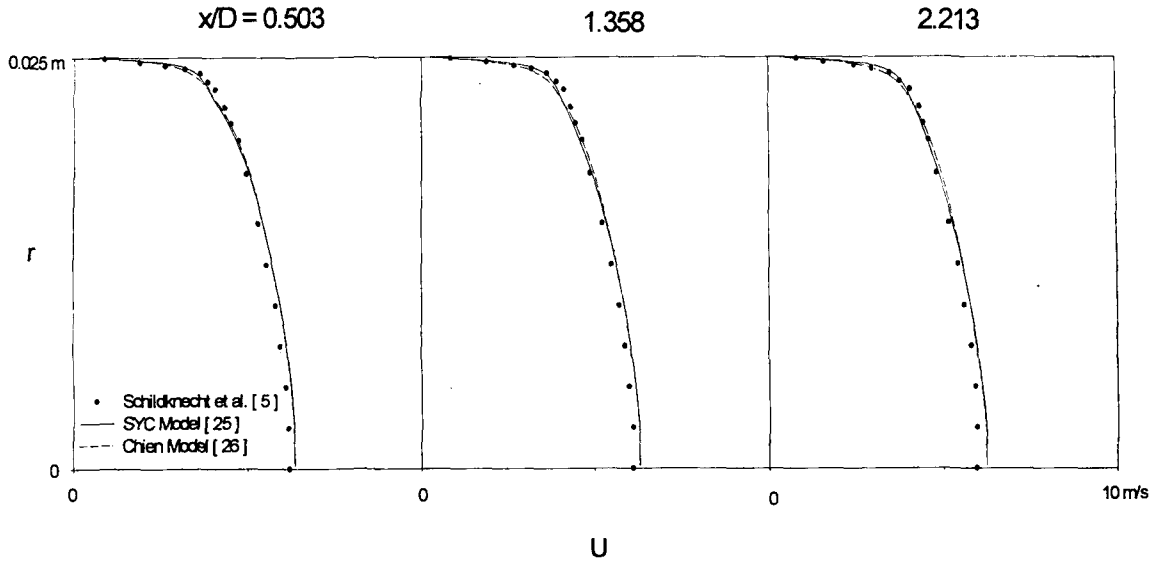


Fig. 3. Comparison of streamwise mean velocities for case S1

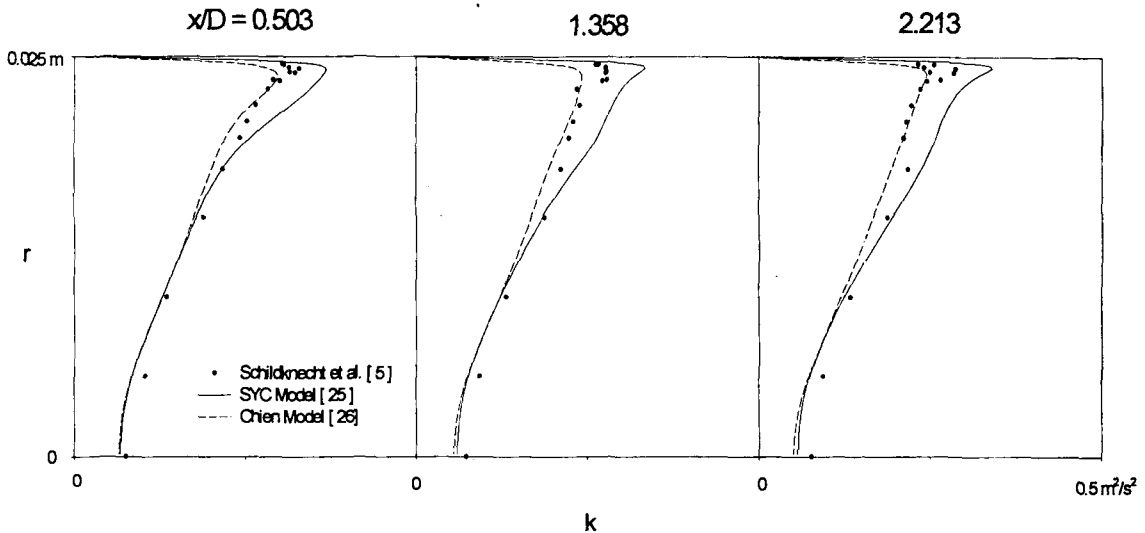
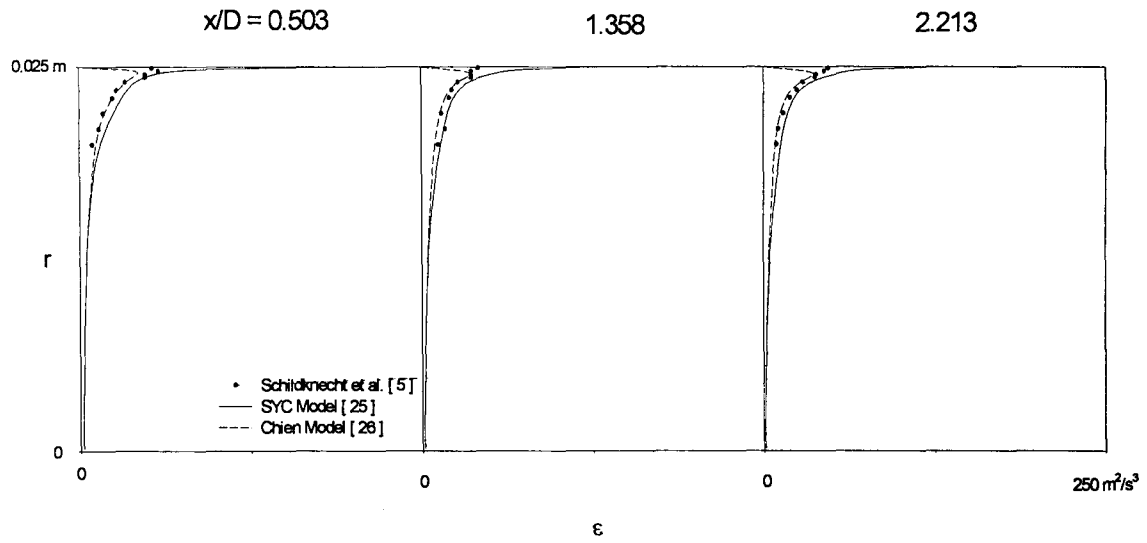


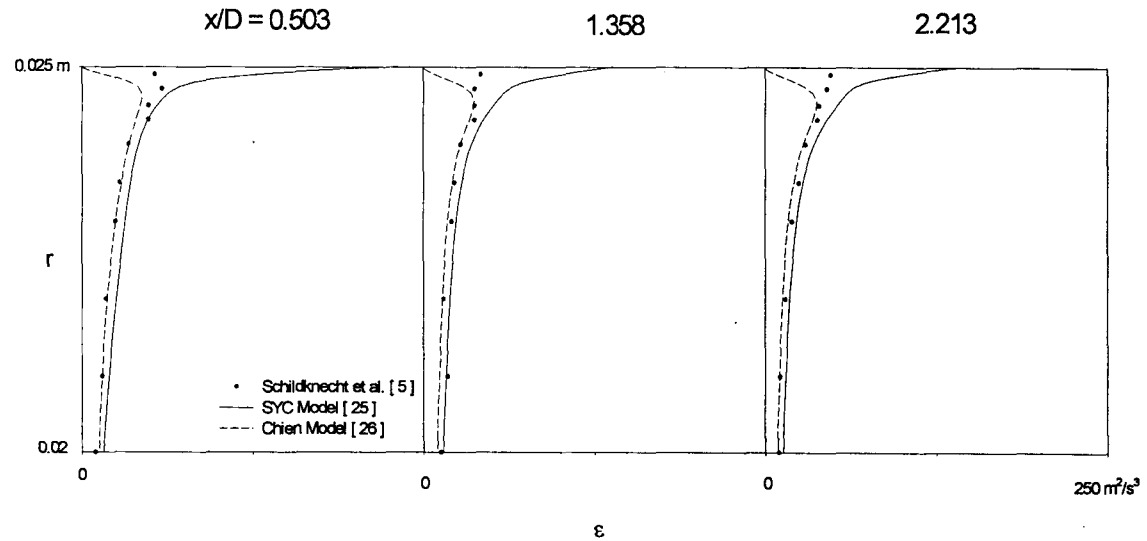
Fig. 4. Comparison of turbulent kinetic energy for case S1

고 있는데 하류로 전진할수록 벽면근처의 속도구배는 점차 증가하고 관 중앙 부분의 속도구배는 감소하고 있음을 관찰할 수 있다. Chien 모델의 예측성능도 신뢰할 만 하나 벽면근처에서는 SYC 모델이 약간 나은 결과를 보이고 있다. 그림 4에 제시한 난류운동에너지의 분포는 SYC 모델이 그 크기뿐만 아니라 변화형태와 최대 값의 위치 등까지 개선된

예측결과를 제시하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 개선은 그림 5에서 보인 소산율 분포의 개선에서 기인한 것임을 알 수 있다. 즉, 그림 2 c) 와 d)에서도 보인 바와 같이 벽면과 그 근처 영역에서의 소산율 변화양상을 올바르게 예측할 수 있는 SYC 모델의 개선이 중요함을 알 수 있다. 그림 6과 7 그리고 8과 9는 각각 S2 및 S3 경우의 유동방향의 속도 및 난



(a)



(b)

Fig. 5. Comparisons of a) dissipation rate of turbulent kinetic energy, b) near-wall behavior of dissipation rate for case S1

류강도 분포를 보이고 있다. 전체적으로는 예측결과가 유동장의 물리적 특성을 잘 반영하고 있으며 SYC 모델이 Chien 모델에 비하여 개선된 결과를 제시하고 있음을 관찰할 수 있다. 그러나 Re_w 이 증가함에 따라 SYC 모델의 우월성이 감소하는 경향

이 있는데 이는 모델에서의 층류화 효과가 다소 강한 결과로 분석된다. 여기서 난류강도는 실험자료의 한계성으로 인하여 난류모델 해석에서 구한 난류운동에너지를 이용하여 등방성 가정 하에 도출한 값과 비교하였다.

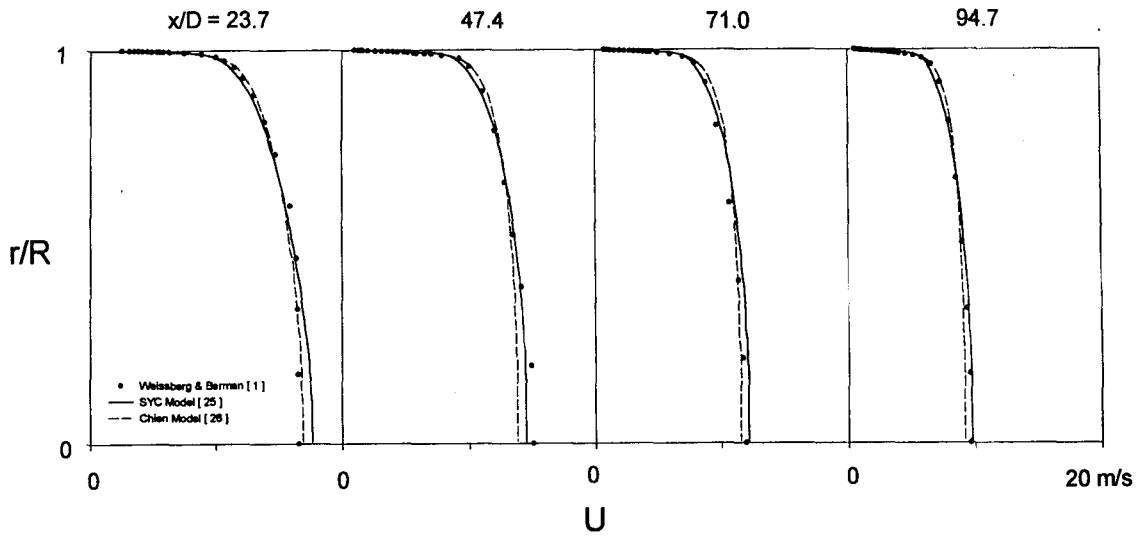


Fig. 6. Comparison of streamwise mean velocity for case S2

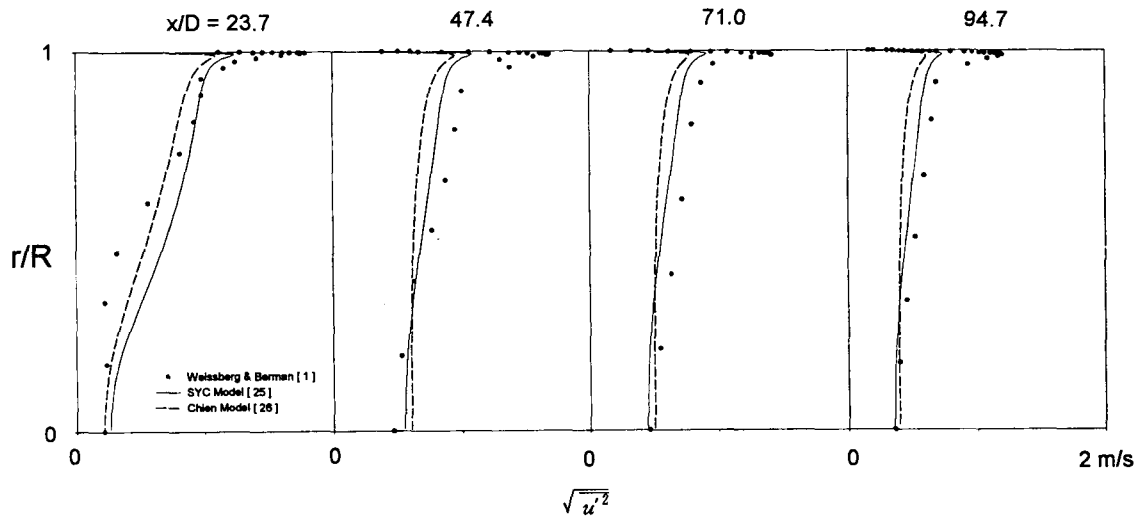


Fig. 7. Comparison of turbulence intensity for case S2

그림 10에는 관중심에서의 압력변화를 제시하였다. 유체의 유출은 운동량의 감소를 초래하여 전체 유동장에는 역압력구배가 형성되는데 임의의 위치에서와 관입구에서의 압력차로 이를 표현하면 그림 10과 같이 나타난다. SYC와 Chien 모델이 모두 실험에서의 압력차의 크기와 다소 차이를 나타내고 있으나 유동장에 직접 영향을 미치는 것은 압력 자체가 아니라 압력구배, 즉 압력차의 기울기임을 감안하면

해석결과들은 실험에서 제시한 압력구배와 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 난류모델을 이용한 유체유출이 있는 난류 유동장의 해석이 제대로 이루어지고 있음을 나타내는 결과이다.

3.2 벽면을 통한 유입을 수반한 유동

벽면을 통한 유체의 유입은 경계층의 성장을 촉진하여 벽면근처의 점성저층과 천이층의 발달을 유도

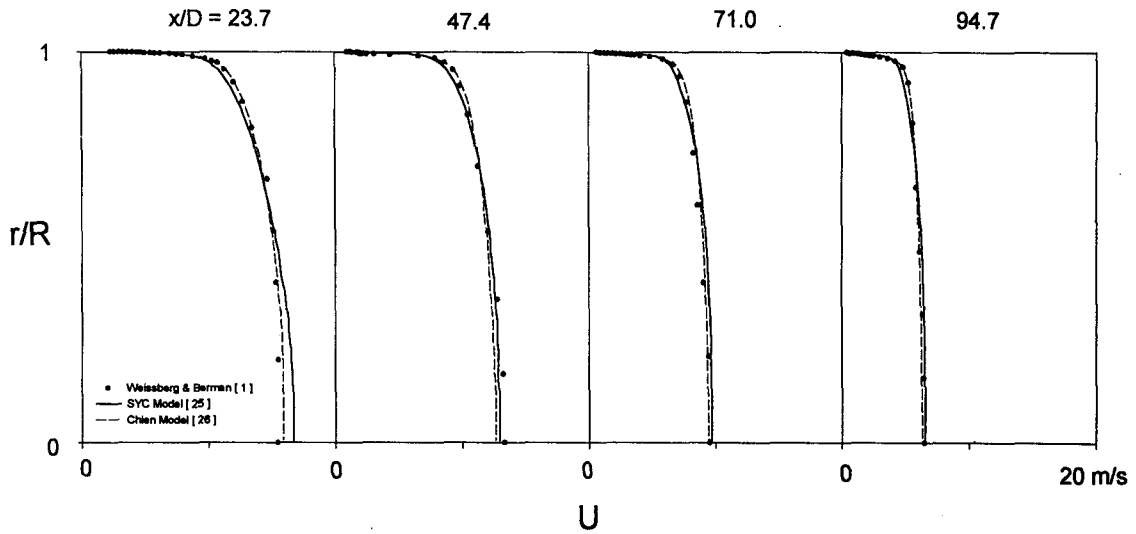


Fig. 8. Comparison of streamwise mean velocity for case S3

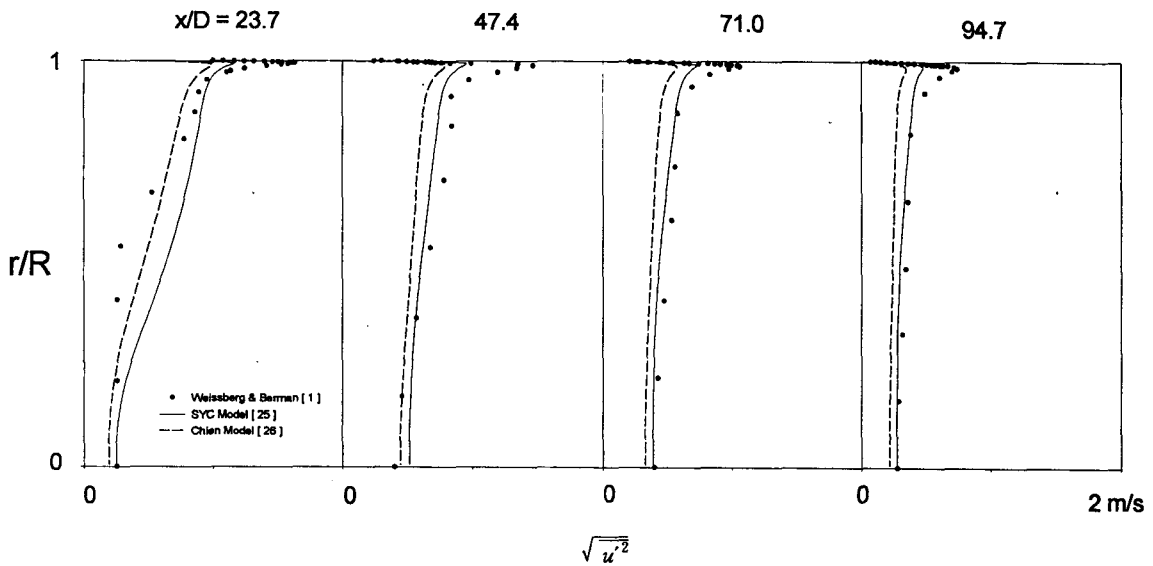


Fig. 9. Comparison of turbulence intensity for case S3

하고 이로 인하여 유동장은 층류화 경향을 보이게 된다. 그러나 유체의 유입이 계속되는 하류로 갈수록 운동량의 증가가 이루어져 유동장은 다시 난류화 되는 경향을 보여 전체 유동장은 입구의 층류화와 하류의 난류화가 병존하는 천이현상을 나타내게 된다. 난류모델은 이러한 천이현상을 올바르게 예측할 수 있는 능력이 요구되며 이는 벽면근처의 난류에너

Table 2. Test cases for wall injection flow

구분 \ 경우	Case 11 ⁶¹	Case 12 ⁶¹	Case 13 ⁶¹	Case 14 ⁶¹	Case 15 ⁶¹	Case 16 ⁶¹	Case 17 ⁶¹
Re _{in}	3200	3090	4540	4150	4250	5850	6350
Re _w	60	150	60	90	160	60	160
Re _w /Re _{in}	1.9%	4.9%	1.3%	2.2%	3.8%	1.0%	2.5%

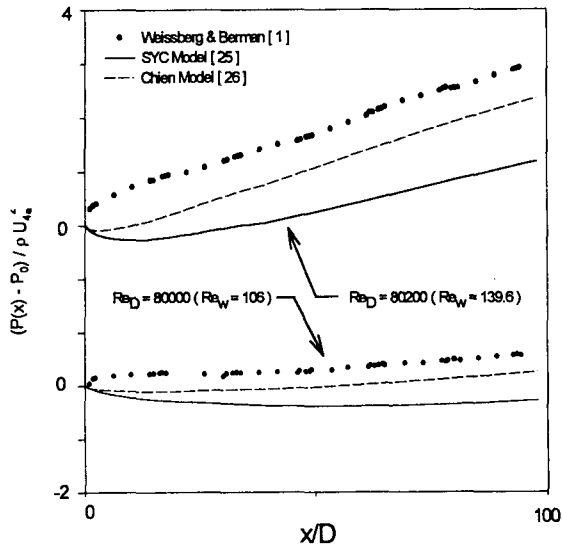


Fig. 10. Comparison of pressure difference along pipe axis for suction flow

지 균형을 고려한 저 레이놀즈 수 형태의 난류모델 개선을 통하여 구현할 수 있다. 본 연구에서는 표 2에 제시된 바와 같이 7가지의 다양한 레이놀즈 수 조건의 유동장에 대한 해석을 수행하였다. 이들은 입구의 레이놀즈 수에 대한 벽면 레이놀즈 수의 비가 상대적으로 높아 유체의 유입이 전체 유동장에 미치는 효과가 크므로 이에 대한 분석에 도움이 되는 경우들이다.

그림 11은 I4 경우의 유동방향 속도분포를 보이고 있다. 전체적인 속도비교는 두 가지의 난류모델이 유사한 능력을 보이고 있으나 벽면근처 그리고 이에 따라 관 중심에서의 비교는 SYC 모델이 약간 나은 것으로 관찰되고 있다. 특히 x/D 가 10 이하인 입구영역에서는 벽면근처의 속도구배가 현저히 감소하는 층류화 현상을 나타내다가 이 이후에는 속도구배가 증가하여 빠르게 난류화하는 현상을 잘 예측하고 있는 것으로 보인다. 여기서 I4의 경우에는 난류 유동장에 대한 실험결과가 제시되지 않아 평균속도만을 비교하였으며 여타의 경우에는 평균속도에 대한 실험결과가 없어 난류강도만을 비교하였으나 전체적인 경향에는 큰 차이가 없었음을 밝힌다.

그림 12에서 17까지는 유동방향의 난류강도를 비교하였는데 여기서도 난류강도는 각 모델에서 구한 난류에너지를 이용하여 등방성 가정 하에 도출한 값을 사용하였다. 대부분의 경우가 x/D 가 10보다 작은 입구영역에서 벽면근처의 난류강도가 급격히 감소하는 층류화 현상을 뚜렷이 보이고 있다. 그러나 x/D 가 10보다 큰 하류 영역에서는 벽면근처의 난류강도가 빠르게 증가하여 난류화가 촉진되고 있음을 보이고 있다. 전체적으로는 SYC 모델이 Chien 모델보다 난류강도의 크기와 변화형태까지 실험값에 가까운 개선된 예측결과를 제시하고 있음을 알 수 있다. 이는 벽면을 통한 유체의 유입이 하류로 진행

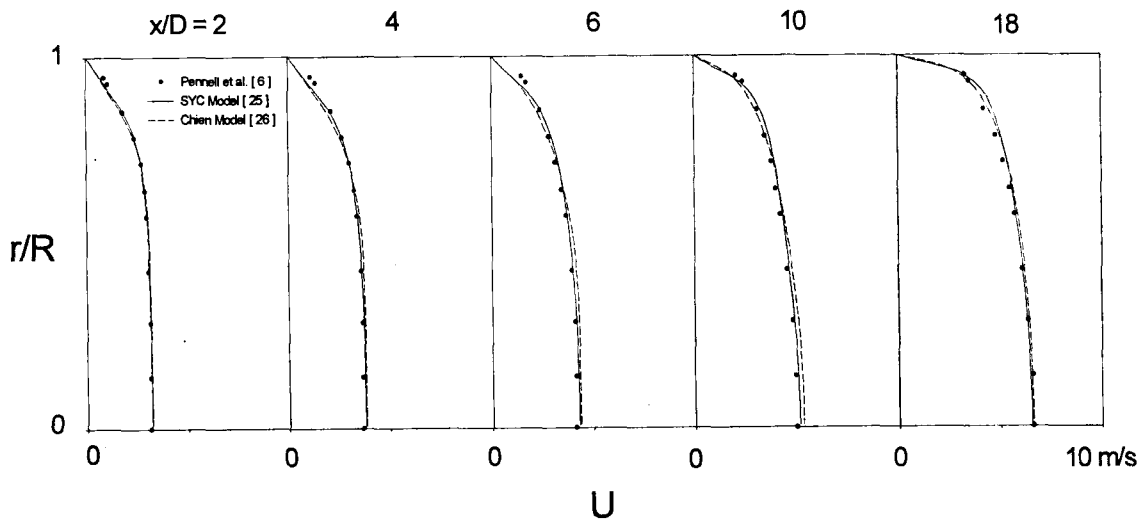


Fig. 11. Comparison of streamwise mean velocity for case I4

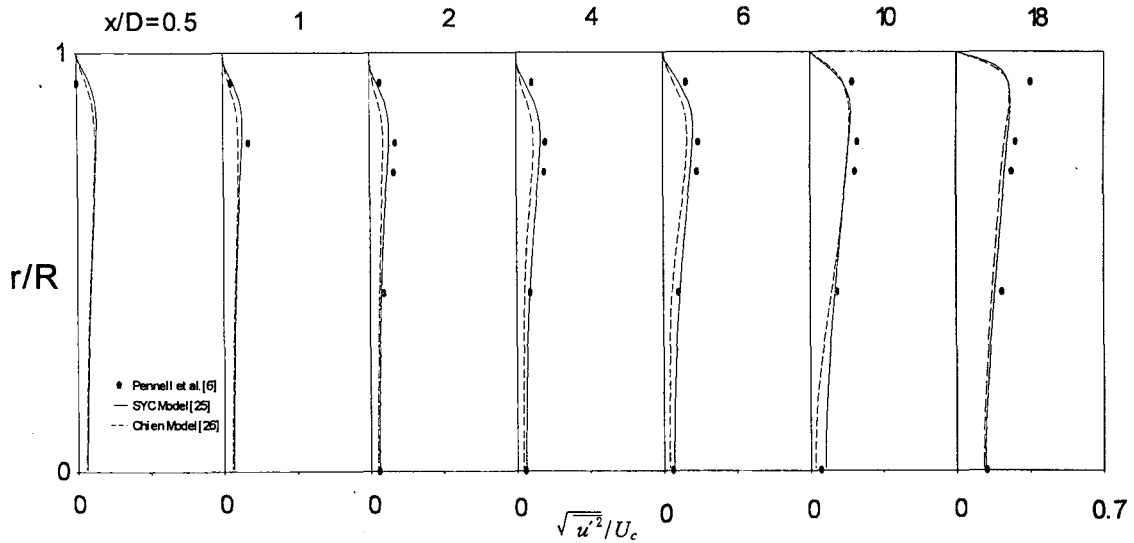


Fig. 12. Comparison of turbulence intensity for case I1

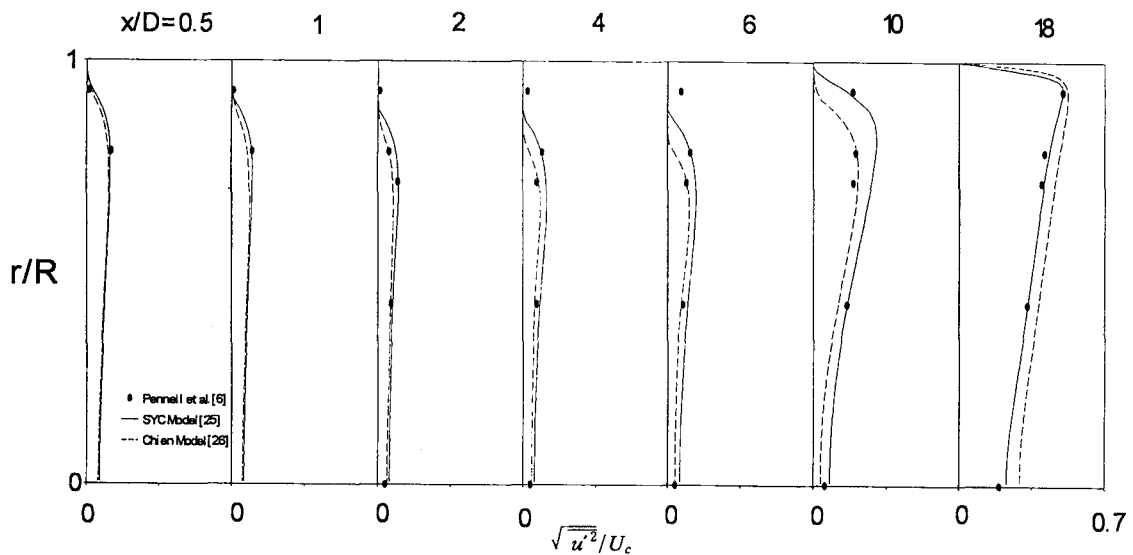


Fig. 13. Comparison of turbulence intensity for case I2

될수록 증가하여 운동량의 증가를 수반하고 이에 따른 난류화 현상이 일어난다는 물리적 현상을 SYC 모델이 올바르게 예측하고 있음을 나타내는 것이다.

벽면을 통한 유체의 유입량과 관입구로의 유체 유입량의 비로 정의한 유체유입율이 1~2%에 불과한 I1, I3, 그리고 I6의 경우에는 유체의 유입량이 적어 유동장의 천이효과도 미미하게 나타나고 있다. 다만

난류강도의 비교는, 유동장의 비등방성 특성으로 인하여, 등방성 난류강도로 제시된 본 연구의 결과가 유근종²⁴⁾이 보고한 비등방성 예측결과에 비하여 그 크기가 실험결과보다 작게 나타나고 있다. 그림 17은 벽면을 통한 유체유입율이 2.5% 정도를 유지하는 중간 경우인 I7의 난류강도 비교인데 여기서는 x/D가 1~2인 입구영역에서 난류강도가 감소하는 층류화 현상을 보이다가 곧 난류로의 발달 현상을

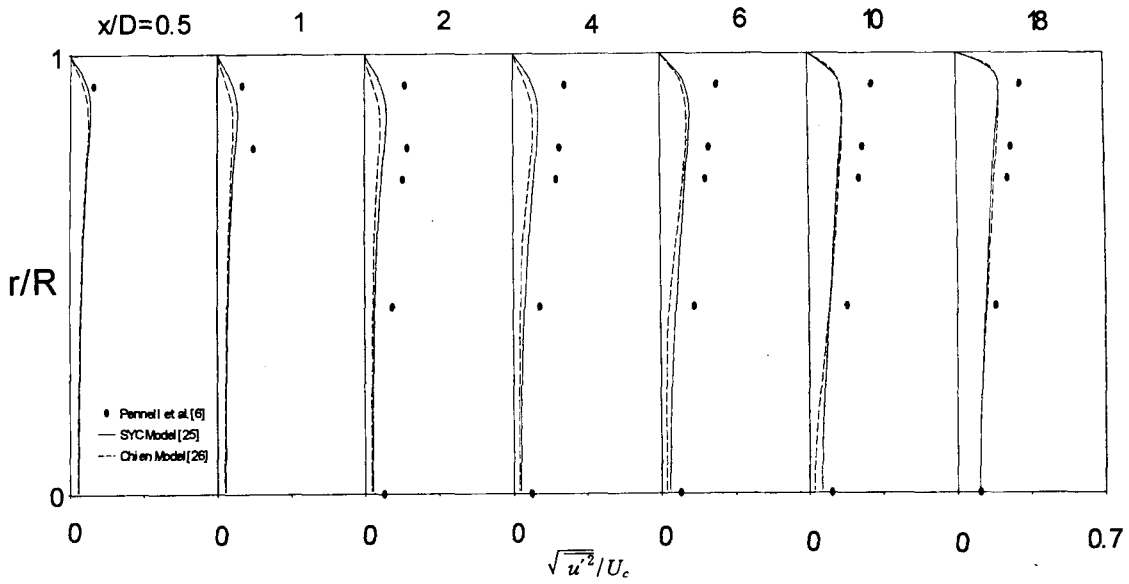


Fig. 14. Comparison of turbulence intensity for case I3

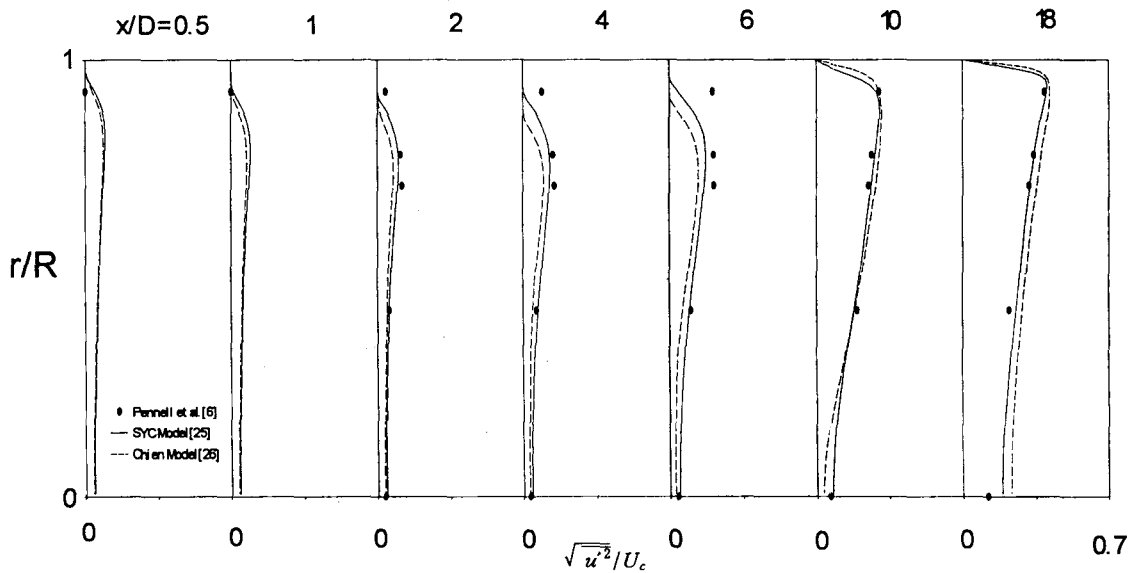


Fig. 15. Comparison of turbulence intensity for case I5

보이고 있으며 난류강도의 크기도 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경우들은 유체의 유입량이 비교적 적어 유동장의 층류화가 활발히 이루어지지 않았으나 I2와 I5는 벽면을 통한 유체의 유입율이 약 4% 이상을 유지하는 대규모 유입이 이루어지는 경우로서 층류화를 거쳐 난류로의 재발달이 명확하

게 발생한 것을 볼 수 있다. 그림 13과 16에 보인 난류강도의 비교는 x/D 가 10보다 작은 입구영역의 벽면근처에서 그 크기가 현저히 감소하여 유동장의 층류화 특성을 반영하고 있으며 x/D 가 10을 거쳐 18 이후의 영역으로 전진하면 유체 유입량의 증가로 인한 난류화의 경향이 뚜렷해져 난류강도가 크게

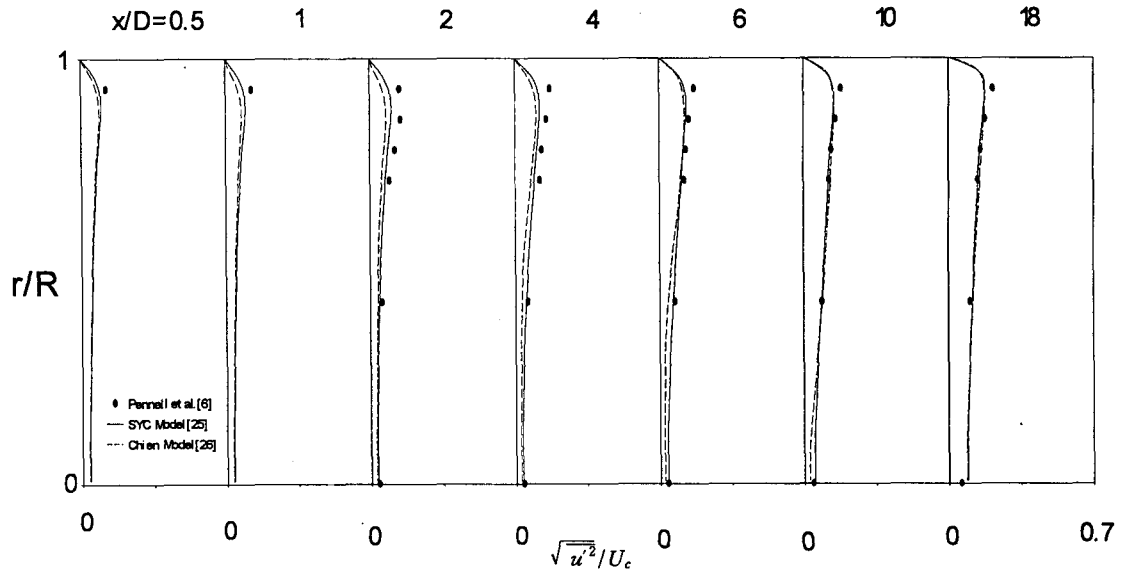


Fig. 16. Comparison of turbulence intensity for case 16

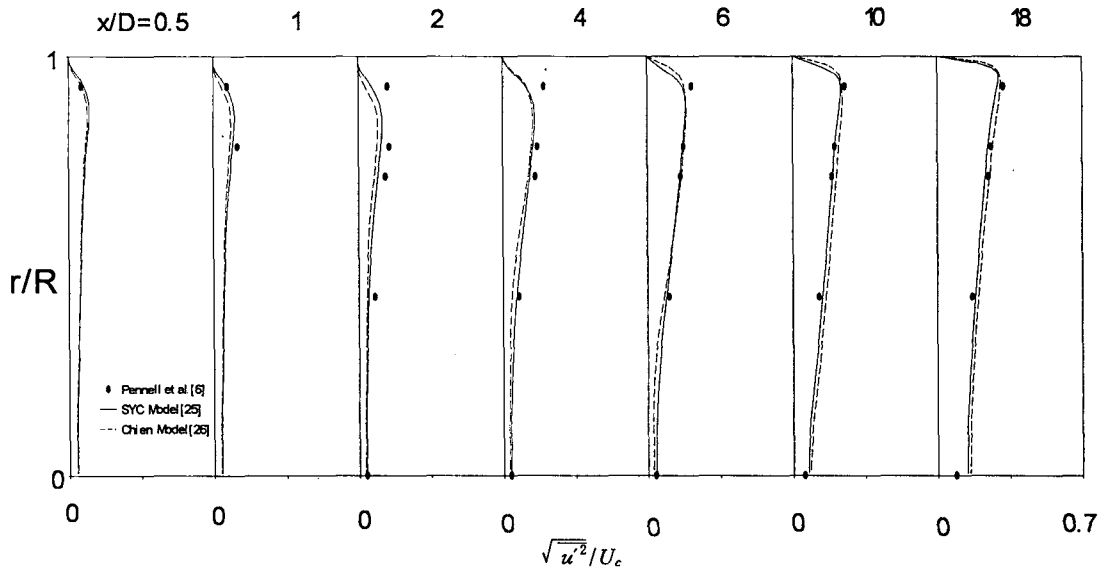


Fig. 17. Comparison of turbulence intensity for case 17

증가하는 양상을 보이게 된다. 특히 난류로 재발달한 x/D 가 18에서는 난류강도의 크기가 실험결과와 잘 일치하고 있으며 SYC 모델이 Chien 모델보다도 나은 예측능력을 보이고 있음을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

벽면을 통한 유체의 유출 및 유입이 있는 관유동을 해석하기 위하여 난류운동에너지 소산을 방정식을 개선하여 구성한 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 모델인

SYC 모델을 선정하였고 이를 기존의 Chien 모델과 비교하여 그 성능을 평가하였다. 분석대상은 벽면을 통한 유체의 유출과 유입이 있는 경우를 모두 포함하고 다양한 범위의 유출입 속도와 관입구에서의 유동속도의 조합으로 하여 전반적인 유동특성 분석이 가능하도록 하였다.

해석결과는 벽면을 통한 유체의 유동에 따른 경계층의 변화와 난류유동장의 변화를 올바르게 예측할 수 있음을 보이고 있다. 유체유출이 있는 경우에는 벽면 경계층의 발달지연과 이에 따른 난류강도의 감소 등을 예측할 수 있었으며, 유체유입이 있는 경우에는 난류유동장의 층류화, 그리고 난류로의 재발달을 거치는 천이현상을 난류강도와 벽면근처에서의 속도구배의 변화 등을 통하여 올바르게 예측할 수 있었다. 두 개의 수정 모델 중에는 전반적으로 SYC 모델이 Chien 모델보다 나은 예측능력을 보였으며, 유근종²⁴⁾이 수행한 비등방성 모델에 의한 분석과도 비교가 가능하여 난류에너지 소산을 방정식의 수정이 모델성능 향상에 중요하게 기여하였음을 알 수 있다.

그러나 벽면을 통한 유체의 유동이 있는 경우의 유동장은 비등방성 특성이 있는 것을 감안하면 난류에너지 소산을 방정식의 개선을 통한 난류모델의 개선을 비등방성 모델 등으로 확장하여 예측능력의 더 나은 개선을 위한 노력이 필요하다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

Reference

1. Weissberg, H. L., and Berman, A. S., "Velocity and Pressure Distributions in Turbulent Pipe Flow with Uniform Wall Suction," Proceedings of the Heat Transfer Fluid Mechanics Institute, University of California, Los Angeles, Vol. 14, 1955, pp. 1~30.
2. Olson, R. M., and Eckert, E. R. G., "Experimental Studies of Turbulent Flow in a Porous Circular Tube with Uniform Fluid Injection through the Tube Wall," Transaction of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 33, 1966, pp.7~17.
3. Aggarwal, J. K., Hollingsworth, M. A., and Mayhew, J. R., "Experimental Friction Factors for Turbulent Flow with Suction in a Porous Tube," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, 1972, pp.1585~1602.
4. Brosh, A., and Winograd, Y., "Experimental Study of Turbulent Flow in a Tube with Wall Suction," Transaction of ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 94, 1974, pp.338~342.
5. Schildknecht, M., Miller, J. A., and Meier, G. E. A., "The Influence of Suction on the Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 90, 1979, pp.67~107.
6. Pennell, W. T., Eckert, E. R. G., and Sparrow, E. M., "Laminarization of Turbulent Pipe Flow by Fluid Injection," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 52, 1972, pp.451~464.
7. Mizushima, T., Takeshita, S., and Unno, G., "Study of Flow in a Porous Tube with Radial Mass Flux," Journal of Chemical Engineering Japan, Vol. 4, 1971, pp.135~140.
8. Mizushima, T., Takeshita, S., Yoshizawa, J., and Namae, I., "Study of Turbulent flow in a Porous Tube with High Mass Flux to and from the Wall," Journal of Chemical Engineering Japan, Vol.5, 1972, pp.361~364.
9. Mizushima, T., Ogino, F., and Takeshita, S., "Eddy Diffusivity in a Turbulent Pipe Flow with Uniform Fluid Injection and Suction

- through the Wall," Journal of Chemical Engineering Japan, Vol. 8, 1975, pp.217~223.
10. Suneja, S. K., Shea, R. H., and Wasan, D. T., "Turbulent Diffusion in the Core of a Pipe with Uniform Transversw Flow at the Walls," AIChE Journal, Vol. 18, 1972, pp.194~200.
 11. Aggarwal, J. K., and Hollingsworth, M. A., "Heat Transfer for Turbulent Flow with Suction in a Porous Tube," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 16, 1973, pp.591~609.
 12. Lombardi, G., Sparrow, E. M., and Eckert, E. R. G., "Experiments on Heat Transfer to Transpired Turbulent Pipe Flows," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 17, 1974, pp.429~437.
 13. Mizushina, T., Ogino, F., and Fukuda, T., "Heat Transfer for Turbulent Flow with Injection in a Porous Tube," Journal of Chemical Engineering Japan, Vol. 10, 1977, pp.428~434.
 14. Zatchik, L. I., "High-Prandtl-Number Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe Flow with Liquid Suction or Injection," Heat Transfer - Soviet Research, Vol. 11, 1979, pp.75~84.
 15. Kinney, R. B., and Sparrow, E. M., "Turbulent Flow, Heat Transfer, and Mass Transfer in a Tube with Surface Suction," Transaction of ASME, Journal of Heat Transfer, Vol.92, 1970, pp.117~125.
 16. Wasan, D. T., Jones, W. O., and Von Behren, G. L., "Entry Region Mass Transfer in Turbulent Pipe Flow," AIChE Journal Vol. 17, 1971, pp.300~308.
 17. Merkin, L., Sloan, A., and Winograd, Y., "Turbulent Flow in a Tube with Wall Suction," Transaction of ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 93, 1971, pp.242~244.
 18. Doshi, M. R., and Gill, W. N., "Turbulent Flow in a Tube with Wall Suction," Transaction of ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 96, 1974, pp.251~254.
 19. Ito, R., Hirata, Y., Ikeda, J., Imamura, N., and Sakata, K., "Single Correlation of Eddy Diffusivity and Mixing Length in Core Region of Porous Pipe Flow with Injection and Suction," Journal of Chemical Engineering Japan, Vol. 12, 1979, pp.91~97.
 20. Eroshenko, V. H., Ershov, A. V., and Zaichik, L. I., "Calculation of Turbulent Flow of an Incompressible Fluid in a Circular Tube with Suction Through Porous Walls," Fluid Dynamics, Vol.17, 1982, pp.559~564.
 21. Sofialidis, D., and Prinos, P., "Wall Suction Effects on the Structure of Fully Developed Turbulent Pipe Flow," Transaction of ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 118, 1996, pp.33~39.
 22. So, R. M. C., and Yoo, G. J., "Low Reynolds Number Modelling of Turbulent Flows with and without Wall Transpiration," AIAA Journal, Vol.25, 1987, pp.1556~1564.
 23. 유근중, "Computation of Turbulent Pipe Flow with Uniform Wall Injection," 대한기계학회 '93년도 추계학술대회논문집(II), 1993, pp.24~27.
 24. 유근중, "벽면을 통한 유동이 있는 관에서의 난류유동," 대한기계학회, '94년도 추계학술대회 논문집 (II), 1994, pp.465~469.
 25. 송경, 유근중, 조강래, "소산율 방정식의 개선을 통한 저레이놀즈수 $k-\epsilon$ 모형의 개발," 대한기계학회논문집 B권, 제22권 제5호, 1998, pp.685~697.
 26. Chien, K. Y., "Prediction of Channel and Boundary-Layer Flows with a Low-Reynolds-Number Turbulence Model," AIAA J., Vol. 20, 1982, pp. 33~38.