

기계공학교육과정에서의 전산유체동역학의 기초예제개발 (I) (수평 원관의 층류 유동)

이성룡^{1*}, 조석수²

¹강원대학교 재료융합공학부, ²강원대학교 기계설계공학과

Development of Simple Example of CFD Course in Mechanical Engineering Curriculum (I) (Laminar Pipe Flow)

Sung-Riong Lee^{1*}, Seok-Swoo Cho²

¹Division of Materials Science and Engineering, Kangwon National University

²Department of Mechanical Design Engineering, Kangwon National University

요약 과학 및 공학 분야 등에서 유한체적법등과 같은 전산해석방법은 비약적으로 발전하여 주로 대학 연구실 및 기업 등에서 활용하고 있었으나 최근에는 대학의 교육과정에서도 전산해석방법이 도입되고 있다. 이것을 계기로 공학대학의 기계공학과등에서 전산유체동역학이 학부 3학년 또는 4학년에 개설되고 있다. 일반적으로 전산유체동역학에서 다루는 수치해석 예제는 상용 전산유체동역학 소프트웨어 회사에서 개발한 예제이다. 따라서 학부 학생들은 저학년에서 학습한 유체역학의 이론적 해와 전산유체동역학 강의에서 학습하는 수치해석 해를 서로 비교할 수 없는 상황이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 유체동역학의 고전적인 해석 대상인인 정상 상태의 수평 원관 층류 유동의 이론적 배경을 설명한 뒤 ANSYS FLUENT를 이용하여 정상 상태의 수평 원관 층류 유동에 대한 수치해석 해를 구하여 이론적 해와 수치해석 해를 서로 비교하여 학생들의 전산유체동역학에 대한 개념을 확실히 다짐으로서 학생들의 현장적응능력을 높였으며 해당 강좌에 대한 강의 평가 결과 학생들이 전산유체동역학에 대한 이해력과 tutorial에 대한 만족도가 매우 높았다.

Abstract With the ever increasing advances in computers and their computing power, computational fluid dynamics(CFD) has become an essential engineering tool in the design and analysis of engineering applications. Accordingly, many universities have developed and implemented a course on CFD for undergraduate students. On the other hand, many professors have used industrial examples supplied by computational analysis software companies as CFD examples. This makes many students think of CFD as difficult and confusing. This paper presents a simple CFD example used in the department of mechanical design engineering of Kangwon National University and shows its effectiveness. Most students answered that a simple CFD example is more comprehensive than an industrial example. Therefore, it is necessary to develop simple computational analysis problems in the engineering education field.

Keywords : Mechanical Engineering Curriculum, CFD(Computational Fluid Dynamics), Laminar Pipe Flow, 2-D Axisymmetric Model, Simple CFD Example, Axial Velocity, Pressure, Wall Shear Stress, Skin Friction Coefficient.

본 논문은 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로연구하였음(관리번호-620160049).

*Corresponding Author : Sung-Riong Lee(Kangwon National University)

Tel : +82-33-570-6414 email : sr0915@kangwon.ac.kr

Received April 16, 2018

Revised June 25, 2018

Accepted July 6, 2018

Published July 31, 2018

1. 서론

현재 학부과정에 전산유체동역학을 개설한 학문분야는 기계와 조선 및 건설등으로서 기계 및 구조물의 유동 설계와 깊은 관련성을 보이고 있다. 일반적으로 이들 학과는 저학년에 유체역학과 응용유체역학을 배치하여 해석해가 존재하는 기계 및 구조 부품의 해석을 학습하고 고학년에 유한체적방법을 활용하여 수치적 해를 계산하는 전산유체동역학 과목으로 학부 교육과정을 마무리하고 있다[1,2].

일반적으로 전산유체동역학에서 다루는 수치해석예제는 상용 전산유체동역학 소프트웨어 회사에서 개발한 예제이다[3,4]. 따라서 학부 학생들은 저학년에서 학습한 유체역학의 이론적 해와 전산유체동역학 강의에서 학습하는 수치해석 해를 서로 비교할 수 없는 상황이 되고 있다. 그러나 상용 전산유체동역학 소프트웨어 개발 업체는 목표 시장이 대학이 아닌 제품개발회사이므로 제품 개발회사의 기술자 수준에 맞는 예제만 계속적으로 개발하고 있다. 또한, 미국의 IOWA 대학의 우주항공공학과 등에서는 상용 전산유체동역학 소프트웨어와 산업용 예제를 이용하여 전산유체동역학 강의를 개설하고 해당 강좌에 대한 강의 설문을 실시한 결과 학생들의 대부분이 전산유체동역학은 어렵고 이해하기 힘들다고 대답하였다. 이러한 경향은 국내 대학에서도 동일하였다[5,6]. 이상의 문제를 해결하기 위해서는 대학 전산유체동역학의 교육과정에 맞는 기초 예제를 개발할 필요가 있다. 본 연구에서는 유체동역학의 고전적인 해석 대상인인 정상 상태의 수평원관층류유동의 이론적 배경을 설명한 뒤 ANSYS FLUENT를 이용하여 정상 상태의 수평원관층류유동에 대한 수치해석 해를 구하여 이론적 해와 수치

해석 해를 서로 비교하여 학생들의 전산유체동역학에 대한 개념을 확실히 다짐으로서 학생들의 현장적응능력의 기초를 제공해 주고자 한다.

2. 수평 원관 유동 문제의 정의와 해석

2.1 수평 원관 유동 문제의 정의와 해석

Table 1은 본 연구의 유동 문제에서 사용되는 유체의 물리적 성질을 나타낸 것으로 본 연구의 수평원관유동에 대한 레이놀드 수를 식 (7)을 이용하여 계산해 보면 100이 된다. 따라서 본 연구의 수평원관유동은 레이놀드 수가 2,100이하에 있으므로 층류 유동 상태에 있음을 알 수 있다.

Fig. 1은 정상 상태의 비압축성 3차원 수평원관유동 문제를 나타낸 것으로 유체가 직경 0.2m, 길이 8m의 원형 관에서 1m/s의 속도로 입구에 유입되어 출구에서 대기압으로 빠져 나간다. Fig. 2는 Fig. 1의 3차원 수평 원관 유동문제를 3차원 원통 좌표계와 2차원 축대칭 원통 좌표계로 나타낸 것으로 본 연구에서는 2차원 축대칭 원통 좌표계를 이용하는 유동 모델을 해석 모델로 사용하기로 한다. 본 연구의 유동 모델은 유동이 완전발달유동에 이를 정도로 일정 단면의 관이 길며 다음의 식 (1), (2), (3)과 같은 2차원 축대칭 모델의 연속 및 모멘트 방정식을 만족시키고 식 (4), (5), (6)과 같은 경계조건을 만족시킨다[7].

또한, 수평원관속에서 비압축성 유체가 정상류로 흐르고 있는 층류유동에 있어서의 속도 분포는 다음의 식 (8)과 같으며 이 식에 Hagen-Poiseuille equation을 이용

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] = \rho \left[v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right] \quad (2)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] = \rho \left[v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] \quad (3)$$

$$v_z = U \text{ at } z = 0 \text{ (Inlet)}, \quad P = P_{\max} \text{ at } z = L \text{ (Outlet)} \quad (4)$$

$$\tau_{rz} = 0 \text{ at } r = 0 \text{ (Axisymmetric)} \quad (5)$$

$$v_z = 0 \text{ at } r = 0.1\text{m (No slip on the wall)}, \quad v_r = 0 \text{ at } r = 0.1\text{m (Wall)} \quad (6)$$

단, ρ : 밀도, μ : 동점성계수, r, z : 좌표계 성분, R : 관 반경, v_i : i 방향 속도 성분, τ_{rz} : 전단응력

$$Re = \frac{\rho v_z d}{\mu} = \frac{1 \times 1 \times 0.2}{2 \times 10^{-3}} = 100 \quad (7)$$

$$\frac{v_z}{v_{z_{max}}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad \overline{v_z} = \frac{1}{2}, \quad v_z = v_{z_{max}} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \quad (8)$$

$$\Delta P = \frac{128 \mu L Q}{\pi d^4} = \frac{128 \mu L \times \pi \times d^2 \overline{V}}{\pi d^4 \times 4} = \frac{128 \times 2 \times 10^{-3} \times 8 \times \pi \times 0.2^2 \times 1}{\pi \times 0.2^4 \times 4} = 12.8 (Pa) \quad (9)$$

$$C_f = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A (\overline{v_z})^2} = \frac{\tau_{rz_w}}{\frac{1}{2} \rho (\overline{v_z})^2} = \frac{16}{Re} = \frac{16}{100} = 0.16 \quad (10)$$

$$\tau_{rz_w} = \frac{\Delta P d}{L} \frac{1}{4} = \frac{12.8 \times 0.2}{8 \times 4} = 0.08 (Pa) \quad (11)$$

$$P_{static,inlet} = 12.8 (Pa), P_{static,outlet} = 0 (Pa) \quad (12)$$

$$P_{total,inlet} = P_{static,inlet} + \frac{1}{2} \rho (\overline{V})^2 = 12.8 + \left(\frac{1}{2} \times 1 \times 1^2\right) = 13.3 (Pa) \quad (13)$$

한 평균 속도를 대입하면 관의 최대축방향속도 $v_{z_{max}}$ 과 평균축방향속도 $\overline{v_z}$ 사이의 관계를 구할 수 있다[8]. 즉, 최대축방향속도 $v_{z_{max}}$ 는 평균축방향속도 $\overline{v_z}$ 의 2배임을 알 수 있다. 본 수평원관유동문제의 경우 입구평균속도가 1m/s이므로 이론적 최대축방향속도 $v_{z_{max}}$ 는 2m/s이고 축방향속도 v_z 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1. Physical properties of operating fluid

Density ρ (kg/m ³)	Dynamic viscosity μ (kg/ms)
1	2×10^{-3}

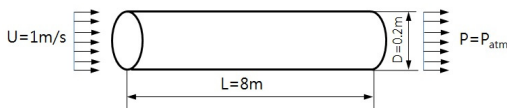


Fig. 1. Pipe flow geometry

압력강하 ΔP 는 Hagen- Poiseuille equation에서 구할 수 있으며[8] 식 (9)와 같으며 본 수평원관유동문제의 경우 입구와 출구사이의 압력 강하는 12.8Pa이 발생된다. 따라서 관 입구에서 형성되는 최대압력 P_{inlet} 는 출구 압력 P_{outlet} 이 0임을 고려하면 12.8Pa이 됨을 알 수 있다. 또한 표면마찰계수 C_f 는 동압 $\frac{1}{2} \rho (\overline{v_z})^2$ 에 대한 벽면전단응력 τ_{rz} 의 비로서 정의되며 식 (10)에 나타내었다[9]. 수평 원관 속에서 연속방정식이 성립하여 운동량 변화가 0이 되는 것을 이용하여 층류유동에 대한 표면마찰계수 C_f 를 레이놀즈 수로서 표현하면 다음 식

(10)과 같으며 본 수평원관유동문제의 경우 0.16의 값을 가진다. 또한, 벽면전단응력과 수평 원관 속의 검사체적에서의 압력과 벽면전단응력사이에서 발생하는 힘의 평형으로부터 구할 수 있으며 다음 식 (11)를 이용하여 구할 수 있으며 그 값은 0.08 Pa이다[10].

한편, Fig. 1의 경계조건을 이용하여 입구와 출구에 압력경계조건을 동시에 부여하는 경계조건의 경우 입구 경계조건으로 입구 정압 및 입구 정압과 동압을 동시에 고려하는 총압력을 부여하여야 하며 그 값은 식 (12)와 식 (13)에 나타낸 바와 같이 12.8(Pa)과 13.3(Pa)이다. 또한, 출구 압력경계조건은 출구 정압을 부여야 하며 식 (12)의 0(Pa)이다.

Table 2. Theoretical solutions obtained by classical fluid mechanics

Fluid mechanical parameters	Max. axial velocity at inlet $v_{z_{max}}$ (m/s)	Max. axial velocity at outlet $v_{z_{max}}$ (m/s)	Max. pressure at inlet $P_{MaxInlet}$ (Pa)
Value 1	1	2	12.8
Fluid mechanical parameters	Max. pressure at outlet $P_{MaxOutlet}$ (Pa)	Average wall shear stress τ_{rz_w} (Pa)	Skin friction coefficient C_f
Value 2	0	0.08	0.16

Table 2는 이상의 본 수평원관유동문제에 대한 유체 역학적 이론적 해를 식 (7)에서 식 (14)까지를 이용하여 체계적으로 계산한 결과를 정리한 것으로 ANSYS FLUENT에 의한 수치해석적 해와 비교를 하기 위한 표이다.

2.2 전산유체동역학 해석

2.1절의 수평원관에 대한 층류 유동을 수치해석하기 위하여 ANSYS FLUENT R18을 이용하기로 한다. 해석 영역은 Fig. 2의 (2)를 ANSYS FLUENT R18에서 제공하는 CAD 프로그램인 Design modeller를 이용하여 2차원 평면으로 모델링하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 2차원 축대칭 모델을 메싱하기 위하여 해석 영역의 가로와 세로를 각각 25×1, 50×2, 100×5, 200×10으로 분할하여 직사각형으로 메싱하였으며 Fig. 4에 해석 영역의 가로와 세로를 각각 100등분과 5등분으로 메싱한 것을 나타내었다.

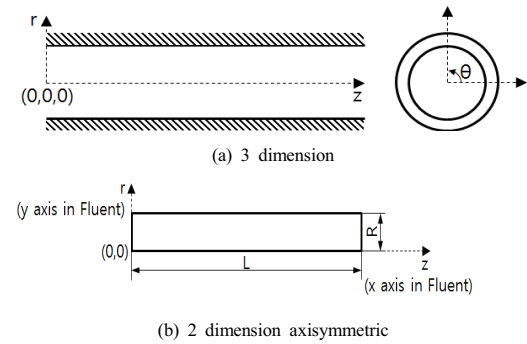


Fig. 2. Schematic drawing of pipe flow

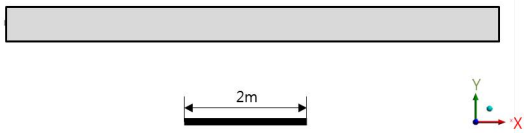


Fig. 3. 2-D axisymmetric model of laminar pipe flow

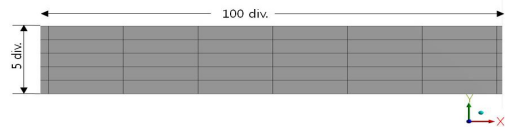


Fig. 4. Meshing of laminar pipe flow

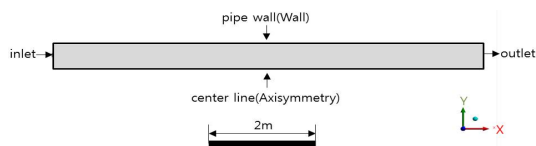


Fig. 5. Boundary and load conditions of laminar pipe flow

Fig. 5는 본 수평원관유동문제의 축대칭경계조건을 나타낸 것으로 입구, 출구, 관벽, 축대칭면을 해당 면의 각각의 edge에 설정하였으며 Table 3에 2개의 경계조건 (Case 1 : 입구속도경계조건과 출구압력경계조건, Case 2 : 입구압력경계조건과 출구압력경계조건) 및 기타 수치해석 조건을 나타내었으며 Continuity, z velocity (ANSYS FLUENT에서는 x velocity), r velocity (ANSYS FLUENT에서는 y velocity)는 Residual에 대한 수렴조건으로 엄격한 해석수렴조건인 1×10^{-6} 을 적용하였으며 해석반복수는 1000회로 설정하였다. 또한, Fig. 6에서 Fig. 15까지는 Case 1 경계조건(입구속도경계조건과 출구압력경계조건)에 해당하는 해석결과를 나타내었고 Table 4에는 Case 1 경계조건(입구속도경계조건과 출구압력경계조건)과 Case 2 경계조건(입구압력경계조건과 출구압력경계조건)을 동시에 나타내어 경계조건에 따른 해석 결과를 비교하였다.

Table 3. Set up of the CFD simulation in ANSYS FLUENT

General	Solver	Pressure-based		
	Time	Steady		
	2D Space	Axisymmetric		
Flow model	Viscous	Laminar		
Boundary	Inlet	Case 1	Velocity (m/s)	1
		Case 2	Pressure(Pa)	Total 13.3 Static 12.8
	Outlet	Case 1	Pressure(Pa)	0
		Case 2	Pressure(Pa)	0
Momentum	Wall motion		Stationary	
	Shear condition		No slip	
Convergence absolute criteria	Continuity		1×10^{-6}	
	z velocity		1×10^{-6}	
	r velocity		1×10^{-6}	
Number of iterations	1000			

3. 이론적 해와 전산유체동역학적 해석 해의 비교

Fig. 6은 각 메쉬 수의 Residual 수렴 한계 1×10^{-6} 에 대한 Continuity와 z velocity 및 r velocity의 수렴 Residual을 나타낸 것이다. 메쉬 수가 증가함에 따라 Continuity와 z velocity 및 r velocity의 Residual 분산은 적게 나타나고 있다. 그러나 유동 해석은 메쉬 수가 적더라도 수렴 한계에 도달되고 있다. 또한, Fig. 7은 유동 해

석의 각 메쉬 수에 따른 수렴 반복수를 나타낸 것이다. 각 메쉬 수가 증가함에 따라 수렴 반복수는 증가하고 있다. 한편, Fig. 8은 유동해석의 각 메쉬 수에 따른 최대 축방향 속도와 압력 강하를 나타낸 것이다. 메쉬 수가 증가함에 따라 최대 축방향 속도와 압력 강하는 초기에는 급격하게 증가하다가 일정 메쉬 수 이상에서는 더 이상 증가하지 않고 정상 상태에 접근하게 된다. 본 수평원관 유동문제의 경우 메쉬 수가 500개 이상이 되면 최대 축방향 속도와 압력 강하와 같은 유동 파라미터가 이론적 수렴 값에 접근하게 된다. 따라서 본 수평 원관유동의 경우 메쉬 수 500개를 최적의 메싱 조건으로 설정하였으며 이하의 결과는 메쉬 수 500개를 이용한 유동장을 기초로 도출하였다. 또한, 메쉬 수가 적어 수렴한계는 쉽게 접근하나 실제 유동 파라미터는 상당한 오차율을 보이고 있어 해석해가 이론해에 접근하기 위해서는 반드시 메쉬 수에 따른 속도나 압력의 수렴 거동을 파악하여야 하며 해당 파라미터가 수렴되는 최적의 메싱 조건을 찾아내어 해석을 수행하여야 한다. 따라서 수치해석해의 수렴 안정성은 메쉬 수에 따른 속도나 압력과 같은 유동 파라미터에 대한 거동이 안정화될 때 확보된다.

Fig. 9는 본 수평원관유동문제의 유동장을 메쉬 수 500개(100×5)로 메싱한 조건에서의 해석 반복수에 따른 Residual을 나타낸 것으로 r velocity와 z velocity 및 continuity순으로 Residual 수렴 한계 1×10^{-6} 에 차례로 도달되고 있으며 수렴 반복수는 52회이다.

Fig. 10과 Fig. 11 및 Fig. 12는 축 방향 속도를 스칼라와 벡터 및 유선으로 나타낸 것이다.

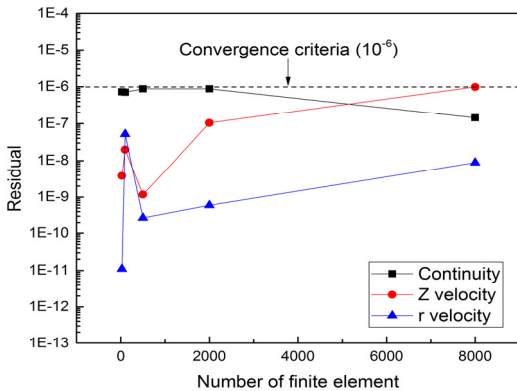


Fig. 6. Relationship between number of finite element and residual for convergence

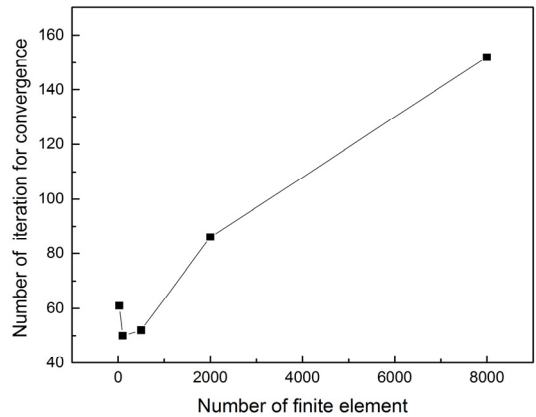


Fig. 7. Relationship between number of finite element and number of iteration for convergence

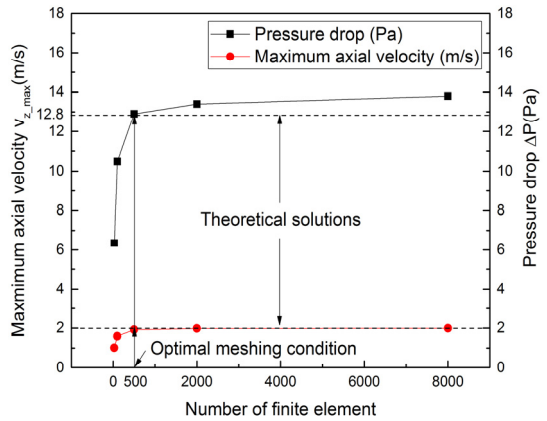


Fig. 8. Relationship between number of finite element and flow parameters

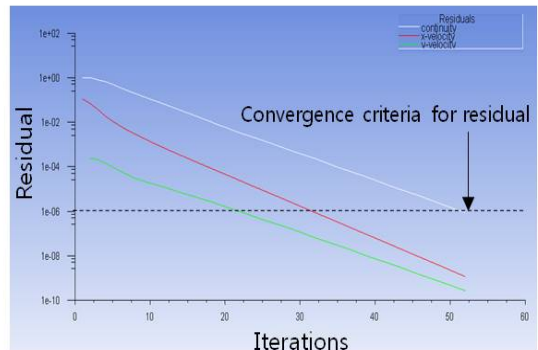


Fig. 9. Convergence of residual with number of iteration (Meshing 5×100)

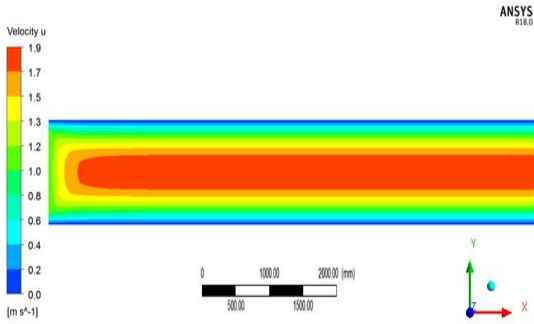


Fig. 10. Axial velocity contour plot for laminar pipe flow model

속도분포는 해석 대상이 수평원형직관이므로 축방향 속도만 관찰하였으며 입구 영역에서는 거의 반경방향에 대하여 균일한 속도 분포를 보이는 비점성거동을 보이고 있고 입구영역에서 벗어나기 시작하면 유동이 발달하여 반경방향에 대하여 포물선 속도 분포를 보이는 점성거동을 보이고 있다. 한편, 수평 원관유동이 완전발달층류유동영역에 도달하면 축 방향에 따른 반경 방향 속도 분포는 거의 동일한 포물선 형상을 보이고 있다. 유동해석모델이 수평원형직관이므로 속도 벡터는 z 축 방향 이외에 r 축 방향의 속도 벡터가 전혀 나타나지 않고 있어 관벽에서의 경계층 거동에 있어 특별한 거동은 관찰되지 못하고 있다. 또한, 관 입구에서의 최대축방향속도는 1m/s 이고 완전발달층류유동영역에서의 최대축방향속도는 1.92m/s로서 이론적 최대축방향속도 2m/s에 비하여 0.08m/s보다 적다. 따라서 이론적 최대축방향속도는 입구유동영역보다는 완전발달층류유동영역에서의 최대축방향속도에 가깝다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 수평 원관 압력을 축방향에 대하여 나타낸 것으로 입구에서 출구쪽으로 가면 갈수록 압력이 감소하고 있다. 그러나 수평 원관 압력이 반경방향에 대하여는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 관 입구에서의 최대압력은 12.9Pa이고 관 출구에서의 최대압력이 0Pa인 것을 고려하면 수평 원관에서 발생하는 차압은 12.9Pa로 이론적 차압 12.8Pa보다 0.1Pa보다 더 작다.

Fig. 14는 관벽에서의 벽면전단응력을 축방향에 대하여 나타낸 것으로 관 입구유동영역에서 최대벽면전단응력 0.13Pa을 보이고 있으며 완전발달층류유동영역에서의 벽면전단응력은 0.079Pa이다. 따라서 관 입구유동영역에서 최대벽면전단응력은 완전발달층류유동영역에서의 벽면전단응력에 비하여 1.6배 더 크게 나타나고 있는

며 이론적 벽면전단응력 0.08Pa보다 0.01Pa보다 더 적다. 특히, 이론적 벽면전단응력은 관 입구유동영역보다는 완전발달층류유동영역에서의 벽면전단응력에 가깝다는 것을 알 수 있다.

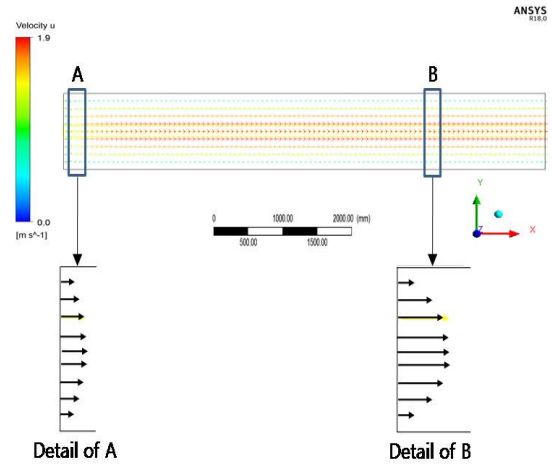


Fig. 11. Axial velocity vector profile at developing and fully developed flow region

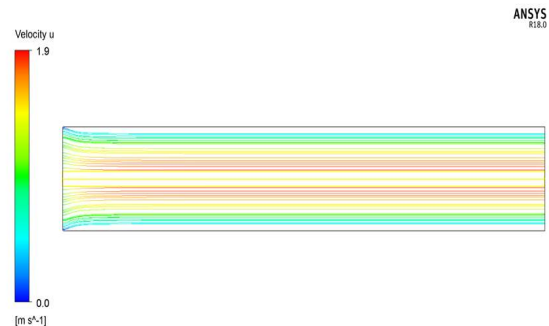


Fig. 12. Streamline contour plot for laminar pipe flow model

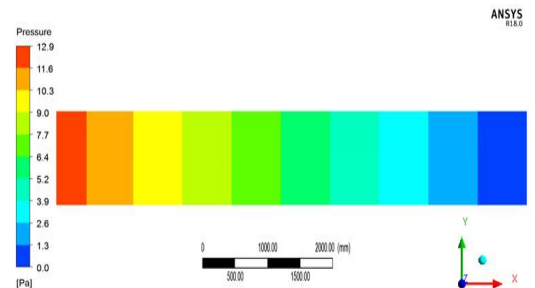


Fig. 13. Pressure contour plot for laminar pipe flow model



Fig. 14. Wall shear stress contour at pipe wall



Fig. 15. Skin friction coefficient contour at pipe wall

Fig. 15는 관벽에서의 표면마찰계수를 축방향에 대하여 나타낸 것으로 관 입구유동영역에서 표면마찰계수는 0.25를 보이고 있으며 완전발달층류유동영역에서의 표면마찰계수는 0.157이다. 따라서 관 입구유동영역에서 표면마찰계수는 완전발달층류유동영역에서의 표면마찰계수에 비하여 1.6배 더 크게 나타나고 있다. Fig. 15는 Fig. 14와 매우 유사한 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 관벽에서의 표면마찰계수가 유체 밀도와 자유 흐름 속도의 제곱에 대한 전단응력 비로서 정의되고 수평원관 층류유동문제에서 유체 밀도와 자유흐름속도가 상수인 것을 고려하면 표면마찰계수는 벽면전단응력에 비례하기 때문이다. 또한, 이론적 표면마찰계수는 관 입구유동 영역보다는 완전발달층류유동영역에서의 표면마찰계수에 가깝다는 것을 알 수 있다.

한편, 본 연구에서는 이상의 유동해석에 대한 신뢰성을 평가하기 위하여 이론해에 대한 수치해석해 오차의 백분율인 오차율 e 를 다음 식 (16)에서의 최대 축방향 속도로서 4%정도의 오차로 계산되어졌으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

$$e = \frac{|Solution_{the} - Solution_{anal}|}{Solution_{the}} \times 100 \quad (16)$$

단, $Solution_{the}$: 이론해, $Solution_{anal}$: 해석해

가장 오차율 e 가 큰 유동 파라미터는 Case 1 경계조건의 경우 출구 축방향속도이고 Case 2 경계조건의 경우 입구 축방향속도이고 가장 오차율 e 가 적은 유동 파라미터는 경계조건이 적용되는 파라미터로서 Case 1 경계조건의 경우 입구 축방향 속도와 출구 압력 압력이고 Case 2 경계조건의 경우 출구 압력이다. 또한, 입구와 출구 평균 속도의 오차율은 0이므로 경계조건에 관계없이 매우 낮은 오차율을 나타내고 있다. 한편, 경계조건과 관계없는 조건인 Case 1의 출구 축방향 속도와 입구 압력 및 Case 2의 입구와 출구 축방향 속도는 동일 경계조건의 유동 파라미터에 대하여 가장 높은 오차율을 나타내고 있다. 따라서 2차원축대칭 수평원관유동 해석의 경우 Case 1의 경계조건(입구속도경계조건, 출구압력경계조건)은 모든 유동 파라미터가 공학적 오차 한계 5%이내의 수렴되나[11] Case 2의 경계조건(입구와 출구 압력경계조건)의 경우 최대 축방향 속도가 20% 정도의 오차율을 보이고 있어 해석값이 이론값에 수렴되지 못하고 있다.

Table 4. Error percentage of CFD Solutions

Fluid mechanical parameters	Max. axial velocity at inlet $v_{z_{max,inlet}}$ (%)	Max. axial velocity at outlet $v_{z_{max,outlet}}$ (%)	Mean axial velocity at inlet $v_{z_{mean,inlet}}$ (%)
Case 1	0	4	0
Case 2	20	4.2	1
Fluid mechanical parameters	Mean axial velocity at outlet $v_{z_{mean,outlet}}$ (%)	Max. pressure at inlet $P_{max,inlet}$ (%)	Max. pressure at outlet $P_{max,outlet}$ (%)
Case 1	0	0.78	0
Case 2	0.37	0.15	0
Fluid mechanical parameters	wall shear stress $\tau_{rz,w}$ (%)	Skin friction coefficient C_f (%)	
Case 1	1.25	1.88	
Case 2	0.17	2	

따라서 ANSYS FLUENT를 이용한 수평 원관의 층류유동해석에서 Case 2의 경계조건(입구와 출구 압력경계조건)보다 Case 1의 경계조건(입구속도경계조건, 출구 압력경계조건)이 유동 파라미터의 이론값에 잘 수렴되고

있어 수평 원관의 층류 유동 해석의 경계조건으로 Case 2의 경계조건보다는 Case 1의 경계조건을 이용하여야 한다.

이상의 예제는 K 대학교의 기계설계공학과 전산유체 설계 강의에서 2015년부터 2017년까지 이론적 해와 해석적 해를 동시에 비교하는 강의 교안이 제시되었다 [12,13]. 또한, Fig. 16은 K 대학교의 기계설계공학과 전산유체설계 강의에서 2010년부터 2014년까지 취급하였던 CFD 입문예제로서 ANSYS FLUENT Tutorial에서 제공되는 예제이다. Fig. 16의 예제는 분지관이 있는 곡선 원관 유동으로서 해석에 대한 이론해가 제시되지 못한 상태에서 유동해석하는 순서만 제시되었다. 이상의 두 강좌에 대한 강의 설문조사를 수행하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 강의 설문 대상 학생 수는 기초예제는 30명이고 산업용 예제는 67명이다. 설문 내용은 ANSYS FLUENT에 대한 전처리와 솔버 및 후처리에 대하여 사용 및 학습 용이성, 메싱 용이성, 유동모델의 이해력, 기초문제에 대한 이해력, Tutorial의 유용성, 가시성 등으로 구성하였다[14]. 학생들은 본 연구에서 제시한 기초 예제가 산업용 예제에 비하여 문제에 대한 학습 용이성, 메싱 용이성, Tutorial의 유용성, 가시성 등에 대하여 높은 만족도를 나타내었다. 그러나 학생들이 본 연구에서 제시한 기초 예제가 산업용 예제에 비하여 사용 용이성에 대하여 약간 높은 만족도를 보이고 있으며 이러한 결과는 기초 예제가 기초 문제에 대한 이해력 및 Tutorial의 유용성에 높은 만족도를 보여서 학생들이 ANSYS FLUENT가 사용하기 쉽다고 설문에 응답한 것으로 보여서 학생들이 ANSYS FLUENT가 사용하기 쉽다고 설문에 응답한 것으로 보인다.

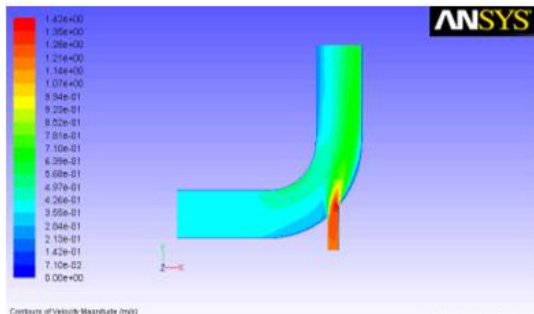


Fig. 16. Industrial CFD example taken from ANSYS FLUENT

Table 5. Results of the student survey on the CFD example

Features	Satisfaction(%)	
	Industrial example	Basic example
ANSYS Fluent Preprocessing		
Ease of use	43	62
Ease to learn/Intuitive	56	87
Usefulness of tutorials	41	92
Ease of meshing	35	95
Ease to understand flow models	52	68
ANSYS Fluent Solver		
Ease of use	43	62
Ease to learn/Intuitive	56	87
Usefulness of tutorials	41	92
ANSYS Fluent Postprocessing		
Ease of use	43	62
Ease to learn/Intuitive	56	87
Usefulness of tutorials	41	92
Visualization	52	87
Plotting	62	87

4. 결론

본 연구에서는 ANSYS FLUENT를 이용하여 수평 원관의 층류유동에 대한 대학 전산유체동역학의 기초예제를 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수치해석해의 수렴 안정성은 메쉬 수에 따른 속도나 압력과 같은 유동 파라미터에 대한 거동이 안정화될 때 확보된다.
- (2) 가장 오차율이 큰 유동 파라미터는 Case 1 경계조건의 경우 출구 축방향속도이고 Case 2 경계조건의 경우 입구 축방향속도이고 가장 오차율이 적은 유동 파라미터는 경계조건이 적용되는 파라미터로서 Case 1 경계조건의 경우 입구 축방향 속도와 출구 압력 압력이고 Case 2 경계조건의 경우 출구 압력이다.
- (3) 유체역학에서 계산된 이론적 해인 최대축방향속도와 벽면전단응력 및 표면마찰계수는 관 입구유동영역이 아닌 완전발달층류유동영역에서의 수치해석 값에 근접하고 있으나 차압은 파라미터의 특성상 관입구유동영역에서의 값에 접근하고 있다.

- (4) 산업용 예제와 기초예제를 이용한 전산유체동역학 교육과정에 대한 학생들의 설문결과 기초예제가 훨씬 더 유체동역학에 대한 이해를 잘 할 수 있다고 대답해 전산유체동역학 교육과정에서 기초 예제가 학생들의 전산유체동역학의 이해에 훨씬 더 유효하다.

References

- [1] Department of Mechanical Design Engineering at Kangwon National University, Mechanical Design Engineering Curriculum[Internet], Samcheok, Kangwon National University, c2018[cited 2018 April 8], Available From: <http://knu.kangwon.ac.kr/mde/> (accessed April, 1, 2018)
- [2] Department of Mechanical Engineering at Hanyang University, Mechanical Engineering Curriculum[Internet], Seoul, Hanyang University, c2018[cited 2018 April 8], Available From: <http://me.hanyang.ac.kr/ko/edu/curh/views/findCurriCulHi.do> (accessed April, 1, 2018)
- [3] ANSYS, ANSYS Education Center[Internet], ANSYS, c2018[cited 2018 April 8], Available From: <https://www.ansys.com/ko-kr/academic> (accessed April, 1, 2018)
- [4] WEBSYSTEM, SOLIDWORKS Flow Simulation[Internet], WEBSYSTEM, c2018[cited 2018 April 8], Available From: http://www.websco.co.kr/mall/design/design2_2.asp (accessed April, 1, 2018)
- [5] TAESUNG S&E, ANSYS FLUENT Tutorials, pp.1-470, TAESUNG S&E Co., 2011.
- [6] C. W. Park, C. H. Hong, "Structural and thermal analysis using ANSYS Workbench", pp.7-327 Intervision Publisher, 2008. ISBN: 9788956674513
- [7] Korean Research Council for Mechanical Engineer License, Fluid Mechanics, pp. 151-152, Won Hwa Publisher, 1985.
- [8] Korean Research Council for Mechanical Engineer License, Fluid Mechanics, pp. 154-155, Won Hwa Publisher, 1985.
- [9] Wikipedia, Skin friction drag[Internet], Wikipedia, c2018[cited 2018 April 8], Available From: https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_friction_drag (accessed April, 1, 2018)
- [10] D. Bhandari, S. Singh, "Analysis of Fully Developed Turbulent Flow in a pipe using Computational Fluid Dynamics", *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol.1, No.5, pp.1-9, 2012.
- [11] S. S. Cho, W. S. Joo, "A Study on Fatigue Crack Growth and Life Modeling using Backpropagation Neural Networks", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers. A*, Vol.24, No.3, pp.634-644, 2000.
- [12] K. Aung, "Design and Implementation of an Undergraduate

Computational Fluid Dynamics (CFD) Course", *Proceedings of the 2003 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, pp.8.367.1-8.367.8, 2003.

이 성 룡(Sung-Riong Lee)

[정회원]



- 1983년 2월 : 동아대학교 대학원 금속공학과 (학사)
- 1990년 8월 : 동아대학교 대학원 금속공학과 (공학박사)
- 1994년 11월 ~ 1996년 9월 : ㈜서경열처리, 대표이사
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 재료융합공학부 교수

<관심분야>

화학야금

조 석 수(Seok-Swoo Cho)

[정회원]



- 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 기계설계공학과 교수

<관심분야>

재료강도학, 전산구조해석