

튜브 클리닝 시스템 내부의 유동 특성에 관한 수치해석적 연구

The Numerical Analysis of Fluid Flow in the Tube Cleaning System

정경철* · 이치우***

Kyung-Chul Jung* and Chi-Woo Lee***

(접수일 : 2013년 10월 31일, 수정일 : 2014년 01월 06일, 채택확정 : 2014년 01월 06일)

Abstract: The numerical analysis of fluid flow in the tube cleaning system is examined. The working flow used in this study is seawater, and the temperature change is not considered as the temperature change of seawater in the tube cleaning system is negligible. Also, the analysis is performed under the assumption of steady state. The screens of complicated morphologies are simplified for the analysis, and only one fourth of the tube cleaning system is modeled as the system has a symmetrical shape. The velocity inlet boundary condition is employed for the seawater inlet, whereas the outflow boundary condition is employed for two seawater outlets. In applying the outflow boundary condition for the system with more than two outlets, the flow rate can be arbitrarily assigned. In the analysis, the finite-volume method based numerical analysis tool, the pressure based solver, the standard k- ϵ model are utilized, and the under relaxation factor is modified appropriately. From the analysis, the distribution of velocity vectors, pressure and path lines are obtained, and the physical characteristics of fluid flow in the tube cleaning system is well-examined.

Key Words : Tube Cleaning System, Sponge Ball, Pressure Drop

— 기 호 설 명 —

k : 난류운동에너지 [J/kg]
t : 시간 [sec]
 x_i, y_i : 일반 좌표계
 x, y : 직교 좌표계

μ_t : 난류 점성계수 [Pa · s]
 ρ : 밀도 [kg/m³]

1. 서 론

랭킨사이클에서 복수기(condenser)는 습증기를 포화액으로 응축하기 위한 발전설비의 한 부분이며 원자력발전과 화력발전은 복수기가 사용되는 대표적인 발전설비이다.⁽²⁾ 복수기의 안쪽은 고온고

그리스 문자

ϵ : 난류운동에너지 소산율 [m²/s³]

*** 이치우(교신저자) : 경남과학기술대학교 자동차공학과
E-mail : leecw@gntech.ac.kr, Tel : 055-751-3643
*정경철 : 경남과학기술대학교 대학원

*** Chi-Woo Lee(corresponding author) : Automobile Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology.
E-mail : leecw@gntech.ac.kr, Tel : 055-751-3643
*Kyung-Chul Jung : Gyeongnam National University of Science and Technology , Graduate School

압의 습증기가 들어와서 응축되고, 바깥쪽은 담수나 해수가 습증기를 응축시키기 위해서 항상 공급되고 있다. 복수기는 그 운전 특성상 항상 일정한 온도가 유지되어야 하며, 이는 미생물들이 번식하며 살아갈 수 있는 좋은 조건이 된다. 또한 펄(mud)이나 아주 고운 입자의 이물질이 복수기 표면에 침착되는 경우도 있다. 이러한 원인들은 복수기 표면에서 열전달을 방해하는 역할을 하며 랭킨사이클의 효율을 저해하는 원인이 된다.

청소를 위해서 복수기를 매년 분리해서 청소하는 것은 매우 비효율적이며 비용이 많이 발생되기 때문에 스펀지 볼(sponge ball)을 이용한 복수기의 청소가 현재 사용되고 있다.⁽⁵⁾ 이 스펀지 볼은 내부가 다공질이며 물을 가득 머금은 상태에서는 비중이 해당 작업유체와 비슷해져서 주유동의 방향으로 흘러가면서 복수기 표면을 청소하게 된다. 또한 친환경소재로 일정 시간이 흐르면 자연 상태에서 분해되도록 만들어졌다. 하지만 해수 중에서 스펀지 볼은 약 6개월 후부터 분해되기 때문에 신제품의 스펀지볼이 유출될 경우 어류가 삼켜 폐사할 수도 있고, 해변에 도달할 경우 공기 중에서는 부식이 지연되기 때문에 지역주민의 민원대상이 될 수 있다. 물론 스펀지 볼의 유출에 따른 비용 낭비에 대한 지적도 피할 수 없다. 때문에 스펀지 볼의 회수 및 세척 시스템이 필요하다.

2. 연구동향

스펀지 볼을 사용하는 튜브 클리닝 시스템(tube cleaning system 이하 TCS)은 대형(원자력발전소나 화력발전소 등)의 복수기를 사용하고, 분리해서 청소하기 어려운 곳에 사용되는 장치이다. 때문에 사용처가 한정되어있고, 외산 제품을 구입해서 사용해 왔기 때문에 이와 연관된 국내의 연구는 부족한 편이다.

Kang 등⁽¹⁾은 풍동(wind tunnel)에서 와이어 메쉬 스크린(Wire-Mesh Screen) 후류(wake)에 관해서 연구했다. 풍동 내에 원형과 타원형 형태의 와이어 메쉬 스크린을 설치하고 열선 유속계(hot wire)에 의해서 하류의 평균속도 및 난류량을 계측하고 그

난류유동 특성에 대해서 고찰하였다. 스크린의 후류의 평균속도는 스크린 축을 따라서 줄어들며, 풍동 단면의 한 쪽에 해당하는 하류에서 일정한 값에 도달하며 난류운동에너지는 전단층에서 최고가 됨을 보고하였다.

Kim 등⁽²⁾은 데브리스 필터(debris filter)의 운전 특성이 밸브의 개폐 정도에 연관되어서 특정 조건이 되면 임형펌프(vertical pump)와 고유진동주파수와 일치하는 가진 특성이 나타나 양 시스템에서 고진동이 발생됨을 보고하였다. 이에 대한 해결책으로 진동의 전달 경로를 차단하기 위해서 데브리스 배관의 분기지점마다 가이드 형태의 지지 장치를 추가시키는 것을 제안했다.

Oh 등⁽⁴⁾은 공기를 작업유체로 해서 경사진 와이어 스크린 배플이 설치되어 있는 채널에서의 유체 유동의 저항에 대해서 연구하였다. 채널 평균 마찰계수는 레이놀즈수가 증가할수록 감소하며, 메쉬 수가 증가 할수록 증가함을 밝혔다.

Jang 등⁽⁵⁾은 복수기 튜브 클리닝 시스템의 스크린 파손사례 분석을 했다. 스크린 재질의 성분 분석과, 조직시험 그리고 파손사례 분석 등을 통해서 스크린의 파손은 재질의 성분, 조직, 설계 등의 오류가 아니라 용접결함으로 인해서 스크린의 일부가 뜯어진(tear off) 것으로 결론 내었다. 그 외에 전력연구원 등에서 발간하는 보고서 등이 있으며 TCS와 관련된 직접 연관된 유동해석에 관한 국내 연구는 없다.

본 연구에서는 해수를 작업유체로 사용하는 TCS 내부유동을 상용 CFD 툴 이용해서 해석하였다. 그 결과인 속도, 압력, 난류운동에너지, 난류강도 그리고 유선을 분석하였다.

3. 수치해석

3.1 관련이론

3.1.1 지배방정식

해석에 사용된 상용 CFD 코드는 유한 체적법(finite volume method)을 사용하는 툴이다. 적용된

솔버(solve)는 Pressure based solve이며, 정상상태 (steady state)로 가정하고 해석을 수행했다. 그리고 시스템이 정상상태에 도달하면 복수기에서 나오는 냉각수의 온도는 일정하며, TCS에는 열원이 없다. 때문에 냉각수의 온도변화는 무시할 수 있어 에너지 항은 제외 했다. 점성 모델은 대표적인 난류 모델인 standard k-ε 모델이다. 이 모델은

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k \\ + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned}$$

그리고

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned}$$

의 두 식으로 이루어져 있다.⁽³⁾ 여기서 μ_t 는 turbulent viscosity로서 k 와 ϵ 으로 조합되어 있는데 그 식은 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 이다. 단 여기서 C_μ 는 일정하다. 부족완화계수(Under-Relaxation Factors)는 수렴이 원만하게 이루어지도록 적절히 조절했으며 압력과 속도의 커플링은 SIMPLE method를 사용했고, 이산화 방법에서 압력은 Standard scheme을 사용했고 momentum, Turbulent kinetic energy 그리고 Turbulent dissipation rate는 second order upwind scheme을 사용했다. 잔차(residual)의 설정은 continuity와 나머지 항목 모두 10^{-3} 이다.

3.1.2 경계조건과 격자

Fig. 1은 TCS를 모델링한 것이다. TCS를 둘러싸고 있는 쉘(shell)과 스펀지 볼을 걸러내는 스크린 그리고 스크린을 구동할 수 있는 구동계통으로 나눌 수 있다. 상단에 입구가 있으며, 메인 출구와 앞뒤로 볼과 해수가 빠져나가는 출구가 각각 있다.

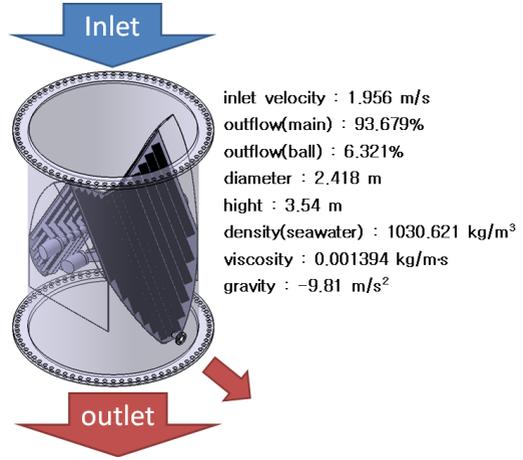


Fig. 1 Schematic of the TCS

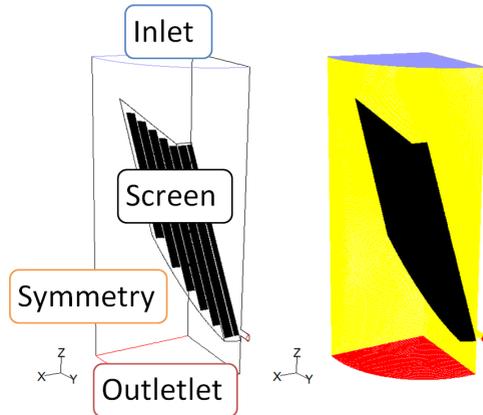


Fig. 2 Geometry and computational mesh of the TCS

Fig. 2는 TCS의 모델링과 격자를 나타내고 있다. TCS가 대칭 형태이기 때문에 1/4만 모델링해서 대칭조건(symmetry boundary condition)을 적용했다. 그리고 스크린의 형상이 매우 복잡하기 때문에 하나의 면으로 단순화시켜 해석에 적용했다. 입구는 velocity inlet, 출구는 두 곳으로 outflow로 정해서 볼이 빠져나갈 곳에 3 PS 펌프가 흡입하는 유량을 고려했다.

입구조건은 TCS를 통과하는 유량으로부터 속도를 구해서 적용시켰으며, 난류강도는 5%를 수력지름은 2.418 m를 적용했다. 벽에서는 난류경계층을 고려하기 위해서 벽함수(wall function)를 사용했다.

중력은 z방향으로 -9.81 m/s^2 이며, 해수의 밀도는 온도 10°C 를 기준으로 1030.621 kg/m^3 (constant) 그리고 점성은 0.001394 kg/ms 를 적용했다.

수치해석에 사용된 사면체 셀(cell)의 수는 6,350,730개, 면의 수는 13,052,384개 그리고 노드(node)의 수는 1,214,401개이다. Fig. 3과 같이 계산 시간을 단축할 수 있는 효율적인 격자생성 작업을 위해서 벽 쪽에는 작은 격자를 생성하게 하고 내부의 공간 쪽은 큰 격자를 생성하기 위해 size function 기능을 이용했다.

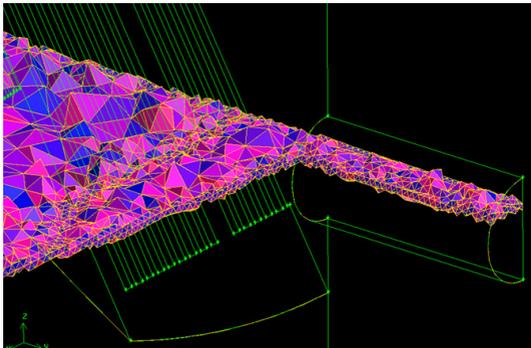


Fig. 3 Examine mesh(display elements)

3.2 해석 결과 및 검토

Fig. 4의 (a)와 (b)는 TCS 내부의 여러 단면에서의 속도벡터의 크기를 나타낸 것이다. 대칭 경계 조건이 적용되어 전체의 형상이 나타났다. 그런데 중앙부의 스크린과 좌우측의 스크린을 모두 나타내면 입의 단면에서의 속도분포를 볼 수 없기 때문에 중앙부의 스크린만 나타내었다. 입구에서 들어오는 속도벡터는 노란색에 가깝고, 스크린에 부딪히는 속도벡터는 녹색에 가깝다. 스크린 사이를 통과할 때는 작업유체가 통과하는 단면적이 축소되기 때문에 붉은색을 띄며 스크린 뒷부분에서는 다시 녹색을 거쳐서 노란색을 띄게 되는데 이것은 스크린 사이를 통과 하면서 속도가 빨라졌다가 다시 원래의 속도로 돌아오기 때문이다. 그리고 셀 내부에서 스크린을 지지하기 위한 가이드 부분은 속이 비어 있기 때문에 유체가 들어가게 되는데

이 부분은 속도벡터의 길이가 거의 0에 가까워져서 파란색을 띄게 된다. 스펜지 불이 나갈 측면의 출구 쪽은 셀 내부의 속도에 비해 월등히 크기 때문에 Fig. 4-(b)에 따로 나타내었다. 셀에서 출구로 나갈 때 관 입구 효과가 나타났다. 때문에 중앙부위의 속도벡터의 색깔이 적색을 띄다가 유동이 점차 안정되어감에 따라서 노란색을 띄게 되었다.

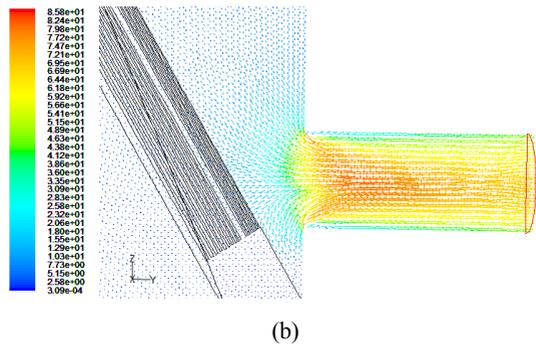
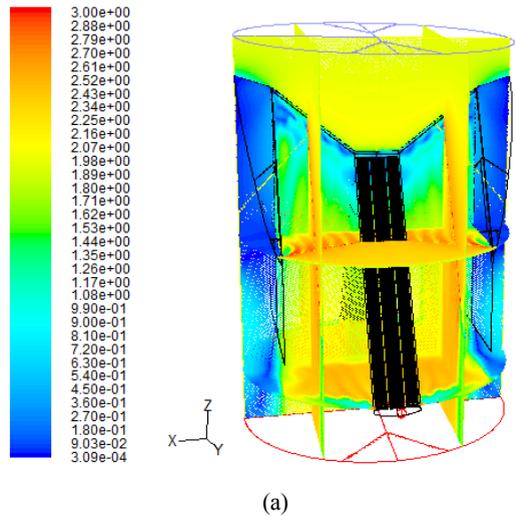
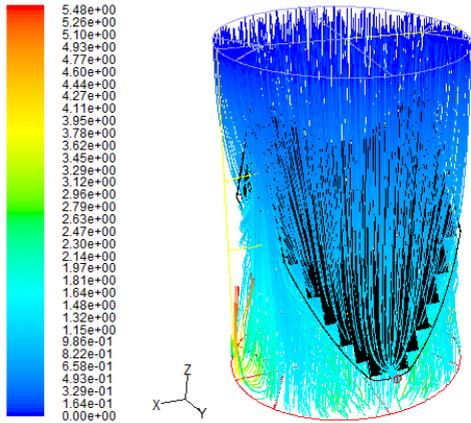


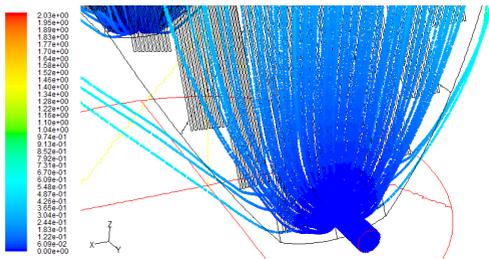
Fig. 4 Velocity vector distribution (m/s)

Fig. 5-(a)는 TCS 내부의 유적선(path line)을 나타내고 있다. TCS의 입구에서부터 시작해서 출구 쪽으로 유적선이 나가는 것이 보이며 스크린을 구동할 축을 지지하는 가이드 부분 안쪽에서 주유동의 반대 방향으로 유동이 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 차후 가이드 부분의 설계변경을

통해서 유동을 안정시키는 것이 필요하다. Fig. 5-(b)는 스펀지 불이 나갈 출구 쪽에서 역으로 유적선을 그린 것이다. 메인 출구 쪽으로 나가는 유량이 절대적으로 많기 때문에 불이 나갈 측면의 출구 쪽은 유적선이 많이 그려지지 않아서 개별적으로 나타내었다. 스크린이 유체가 측면의 불이 나가는 출구 쪽으로 안내하는 가이드 역할을 하는 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 Path line

Fig. 6은 TCS 내부의 난류운동에너지를 나타낸 것이다. 유동의 교란이 없이 주유동의 방향으로 가는 영역은 파란색에 가깝고 스크린과 접한 영역은 붉은색으로 나타나며 주위 영역은 노란색에 가깝게 나타난다. 이것은 스크린의 근접 후류에서 발생한 역압력구배 및 스크린 하류에서 형성되는 반경방향의 속도성분에 인한 영향이다.⁽¹⁾

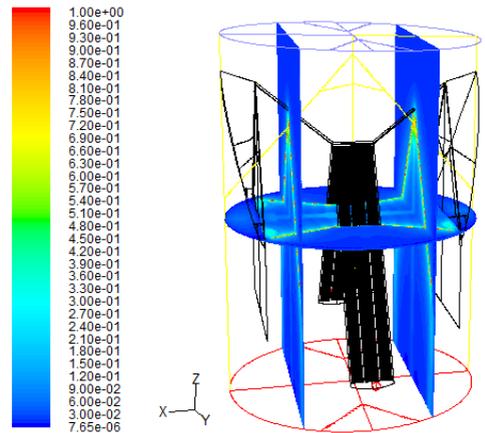


Fig. 6. Turbulent kinetic energy (k) (m^2/s^2)

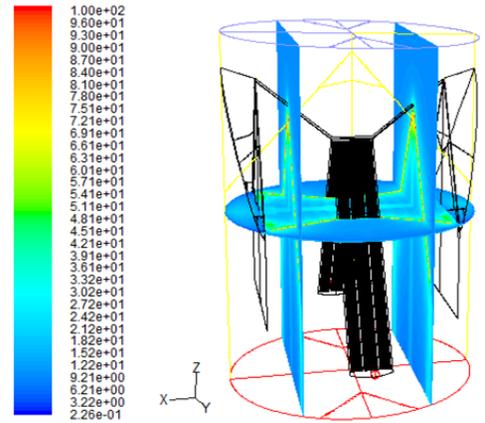


Fig. 7 Turbulent intensity (%)

Fig. 7은 난류강도를 나타낸 것이다. 스크린 뒤에서는 스크린에 의해서 발생된 강한 난류강도가 나타난다. 이러한 난류강도는 코어에서 하류로 내려갈수록 급격히 줄어들며, 주유동의 방향에 접근할수록 작은 값을 나타내고 있다. 이는 물리적으로 타당한 결과이다.

Fig. 8은 정압분포를 나타낸 것이다. 스크린을 모두 나타내면 스크린의 뒷부분을 볼 수 없기 때문에 스크린의 중앙 부분만 나타내고(Fig. 8의 검은색 부분) 좌우측의 스크린은 숨겼다. 스크린을 기준으로 명확하게 압력강하를 확인할 수 있다. 앞서 설명한 스크린 뒷부분의 역압력구배에 의한

압력 분포가 잘 나타나있다. 노란색 부분은 스크린 통과전의 영역이며 이고 하늘색 영역은 스크린 뒤의 와류가 발생한 영역이며 녹색 영역은 스크린 통과 후의 하류 영역이다.

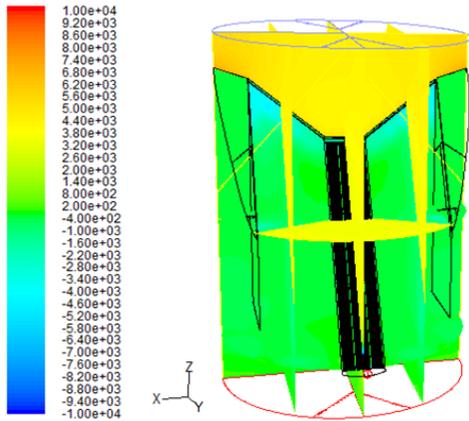


Fig. 8 Static pressure distribution (Pa)

복수기 내부를 청소하는 불을 회수하기 위한 튜브 클리닝 시스템의 수치해석을 통해서 위의 결과를 얻었다. 실제 TCS에 사용된 스크린은 형상이 매우 복잡해서 이를 모두 반영하지는 못했다. 차후에는 이를 최대한 반영해서 실물에 가까운 형상으로 해석을 수행하고자 한다.

5. 결 론

튜브 클리닝 시스템의 수치해석을 통해서 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 속도벡터의 분포 및 유적선으로 내부 유동장의 형태를 파악할 수 있었다.
2. 속도벡터를 통해서 불이 나가는 출구 쪽에서 vena contractor 형성된 것을 관찰할 수 있었고 이 부분은 라운딩을 통해서 더 줄일 수 있다.
3. 스크린 때문에 발생한 압력강하를 잘 관찰할 수 있었다.
4. 역압력구배에 기인한 스크린 뒷부분의 압력 분포를 잘 관찰할 수 있었고, 이는 물리적으로 타당한 결과이다.

후 기

본 연구는 2013년도 (주)금우산기가 “산업통상자원부”, “한국산업기술진흥원”, “동남지역사업평가원”의 “광역경제권 선도산업 육성사업”으로 수행된 연구결과입니다.

References

1. S. H. Kang, H. K. Lee and W. P. Jeon, 1991, "An Experimental Study on Turbulent Characteristics in the Wake of Mesh-Screens", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 274-284.
2. Y. W. Kim, J. R. Goo, Y. C. Bae, H. Lee, Y. S. Lee, 2001, "Vibration Phenomena between Condensate Vertical Pump and Condenser Debris system in Power Plant", Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Autumn Conference, pp. 1020-1025.
3. Fluent Manual, 2005
4. S. K. Oh, B. K. Ary and S. W. Ahn, 2009, "Fluid Flow Resistance in a Channel with Wire-Screen Baffles", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 13, No. 2, pp. 36-41.
5. B. S. Jang, Y. M. Lim, N. H. Kim, J. H. Koh, 2011, "The failure Analysis of fractured Screen of Condenser Tube Cleaning for Seawater Desalination in Nuclear and Thermal Power Plants", Proceedings of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society Annual Autumn Conference, pp. 391-393.