한국동력기계공학회지 제19권 제1호 pp. 83-89 2015년 2월 (ISSN 1226-7813)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2015.19.1.083
Vol. 19, No. 1, pp. 83-89, February 2015

볼 여과기 스크린 모듈의 단면 폐쇄효과에 관한 수치해석적 연구
Numerical Analysis of Ball Strainer Screen Module Blockage Effects

정경철* · 이해수** · 이치우***†
Gyung-Cheol Jeong*, Hae-Soo Lee** and Chi-Woo Lee***†

(Received 16 January 2015, Revision received 23 January 2015, Accepted 23 January 2015)

Abstract: A ball strainer screen module, which is used for a condenser tube cleaning system, is a critical mechanical component for maintaining condenser cleanliness. Despite of this importance, not many research have been focused on this module because of its relatively low usage. Employing CFD, this study examines the implication of fluid velocity change and blockage ratio on the ball strainer screen velocity and the static pressure distribution. Through this study, the impact of blockage in the space between ball strainer screen modules is verified. Also, it is found that the ranges of non-dimensional velocity distribution and static pressure distribution decrease as blockage ratio becomes smaller.

Key Words : Blockage effect, CFD, Condenser tube cleaning system

— 기 호 설 명 —

A : 단면적 [m^2]
b : 스크린 요소의 폭 [m]
BR : 폐쇄율
h : 스크린 요소의 높이 [m]
k : 난류운동에너지 [J/kg]
p : 압력 [Pa]
t : 시간 [sec]
U : x방향 속도 [m/s]
w : z방향 속도 [m/s]
$\overline{w}$: z방향 평균 속도 [m/s]
x_i , y_i : 일반 좌표계
x , y : 직교 좌표계

그리스 문자

ϵ : 난류운동에너지 소산율 [m2/s3]
μ_t : 난류점성계수 [Pa · s]
ρ : 밀도 [kg/m3]

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

***† Chi-Woo Lee(corresponding author) : Automobile engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology
E-mail : leecw@gntech.ac.kr, Tel : 055-751-3643
*Gyung-Cheol Jeong : Graduate school,Gyeongnam National University of Science and Technology
**Hae-Soo Lee : Postdoctoral Research Fellow, Department of Mechanical Engineering Kyungnam University

1. 서 론

발전소에서 사용되는 복수기(condenser)는 습증기 상태의 작업유체를 액상으로 환원하기 위한 장치이다. 즉 발전기 내부에서 순환하는 작업유체가 증발잠열(latent heat of evaporation)로 흡수한 열량을 응축잠열(latent heat of condensation)의 형태로 방출하는 곳이다. 이 방출을 돕는 냉각물질은 대부분 바닷물이나 강물이지만 여기에는 고운 진흙, 미네랄, 각종 불순물, 녹조, 해초, 미생물 그리고 어폐류의 종자 등이 포함되어 있다. 미네랄이나 고운 진흙은 복수기 표면에 붙어서 복수기의 열전달을 방해하거나 미생물들의 번식이나 성장의 환경을 제공한다. 또한 미생물이나 어폐류가 붙어서 성장하여 작은 관들을 막아서 냉각수의 유동을 방해해 복수기의 효율이 저하 된다.

이러한 이유로 복수기 내부를 일정한 주기로 청소를 해야 한다. 유연한 축에 솔이 달려 있어서 작은 관 내부를 청소할 수 있는 기기를 튜브세관기라고 한다. 이 튜브세관기를 이용해서 하는 방법은 복수기의 일부나 전체를 분리해서 작업해야 하기 때문에 그 확실한 효과에도 불구하고 많은 시간과 비용이 들게 된다. 다음으로 탈방청제나 세척제 등의 화학약품을 이용하는 방법도 있지만 이 약품에 의한 2차 오염이 염려되는 곳에서는 사용이 힘들다. 그리고 스펀지 볼(sponge ball)을 이용해서 작은 관 내부를 청소하는 방법이 있다. 냉각수와 함께 스펀지 볼을 혼합해서 복수기의 관을 통과시키면서 볼이 관의 벽과 마찰을 하면서 청소가 된다. 복수기의 운용 중에도 사용이 가능한 장점을 가지고 있어 화력발전소나 원자력 발전소에서 많이 사용하고 있는 방법이다.

하지만 스펀지 볼이 유실될 경우 여러 가지 문제를 일으킨다. 스펀지 볼 유실의 원인은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 여과망의 문제로 인해서 정상적인 스펀지 볼이 유실되는 것이다. 두 번째는 사용된 스펀지 볼의 손상으로 인해서 정상적인 여과망 사이로 빠져나가는 것이다. 스펀지 볼이 유실될 경우 그에 따른 비용, 유실된 스펀지 볼이 해상이나 해변으로 떠내려가 미관상 좋지 못한 점, 볼을 어류들이 먹이로 착각해 먹고 폐사 할 수도 있다. 스펀지 볼은 사용 후 6개월이 지나면 자연적으로 부식되는 친환경소재이나 사용 초기에 유실될 경우 6개월이라는 기간 동안 잔존하기 때문에 스펀지 볼을 이용한 복수기의 세정에서 볼의 회수는 중요한 문제이다.

콘덴서 튜브 클리닝 시스템에서 여과망은 스펀지 볼을 냉각수에서 분리해 걸러주는 역할을 한다. 이 여과망은 단위 모듈로 되어 있는데 여과요소들의 간격이 좁으면 스펀지 볼을 잘 걸러줄 수는 있지만 압력강하가 크고 간격이 넓으면 압력강하는 작지만 스펀지 볼이 유출될 수 있다. 본 연구에서는 스펀지 볼 회수에 사용되는 여과망의 모듈의 간격과 유속의 변화에 따른 유동 특성을 파악하고자 한다.

2. 연구동향

Kim 등은 풍동시험에서 풍동 벽이 시험 모형에 미치는 영향인 위벽효과(wall effect)에 대해서 2차원 수치모사를 통해서 연구하였다.[1] 위벽효과에 대한 부가항력은 층류 영역에서 레이놀즈 수가 낮을수록 급격하게 증가하는 경향을 보임을 보고하였다. Blockage ratio 변화에 따른 시험 모형 주위의 층류유동에서 레이놀즈 수가 20미만일 때 위벽효과로 인하여 유동 특성(마찰계수, 압력계수, 항력 그리고 속도)이 크게 변함을 보고하였다. 즉 낮은 레이놀즈 수에서는 풍동벽의 영향이 시험 모형에 큰 영향을 미친다는 것이다.

Oh 등은 공기를 작업유체로 하는 열교환기의 성능 향상에 관한 연구하였다. 연구의 범위는 와이어 스크린 배플이 경사각 3°, 5° 그리고 7°로 설치된 채널이었다. 채널의 평균 마찰계수는 레이놀즈 수와 메시(mesh) 수에 따라 변함을 보고하였다. 특히 경사각이 3°인 경우 직조 금속 스크린(woven metal screen)의 종류에 관계없이 무차원 마찰계수가 일정함을 보고하였다.[3]

Jang 등은 콘덴서 튜브 클리닝 시스템의 스크린 파손사례에 대한 분석을 했다.[4] 파손된 스크린 재질의 성분은 미국재료시험협회(ASTM)에서 요구

하는 화학적 조성에 모두 만족 하였고, 조직 시험의 경우 austenite와 ferrite 계열의 조직이 적절히 분포되어 있음을 알았다. 또한 유속이 최대 3 m/s에서도 스크린의 허용강도를 초과하는 일이 없음을 판단했으며 스크린의 강도에 문제가 되지는 않는다고 보고하였다. 즉 파손의 원인이 스크린 구조물의 강도에 기인하지는 않는다는 것이다.

해당 연구에서는 용접에 의한 열영향부에서 파단이 발생하는 것으로 결론 내렸다. 하지만 이 연구에서는 작업유체의 유동에 대한 것은 주유동 방향의 속도에만 한정지었고 유동 형태에 대한 것은 고려하지 않았다.

Jeong 등은 풍동 실험에서 수직축 풍력 발전기의 단면 폐쇄효과에 대한 연구에서 주유동 방향의 속도가 증가함에 따라서 동력계수가 작아짐을 보고하였다. 동력계수는 $C_p = p/(0.5\rho A_s U^3)$으로 정의하였다.[5)]

Oh 등은 주 복수기 냉각해수배관의 직각 엘보 내부유동에 관한 실험에서 유동가속부식(flow accelerated corrosion)에 대한 언급이 있었다.[6)]

하지만 여과망 스크린 요소의 재질은 스테인리스이기 때문에 이에 대한 부식의 영향은 고려의 대상이 아니다. 그리고 곡관(elbow)을 지나면서 유동의 형태가 바깥쪽은 빨라지고 안쪽은 늦어지는 현상이 발생했다. 즉 주 유동의 방향의 평균속도보다 국부적으로는 더 빠른 유속이 발생함을 보고하였다.

Jung 등은 튜브 클리닝 시스템 내부 유동의 연구에서 스크린 주위를 흐르는 내부 유동장의 형태와 속도 분포 등에 관한 연구를 하였다.[7)] 하지만 시스템 전체에 대한 해석에서 얇은 스크린 영역은 표현하기 힘들었기 때문에 단일 벽으로 간주해서 해석하였기 때문에 스크린 모듈의 내부의 유동장에 대한 특성은 파악할 수 없었다. 그리고 단일 유속에 대한 제한적 유동 특성만을 파악했다. 볼 여과기 스크린은 사용 제품처럼 많이 사용되는 것이 아니기 때문에 연구가 적었다. 이에 본 연구에서는 볼 여과기 스크린 모듈에서의 유동 특성을 폐쇄율(blockage ratio) 5가지 경우에 대해서 각각 유속 2 m/s, 4 m/s 그리고 6 m/s에서 상용 CFD 툴을 이용해서 연구하고자 한다.

3. 스크린 형상

Fig. 1은 스크린 모듈의 3차원 형상을 나타낸 것이다. 길이가 매우 길기 때문에 긴 판재처럼 보인다. 재질은 S31803이며 항복강도가 448 MPa에 이른다. 스크린 모듈의 크기는 133 mm × 8 mm × 2298 mm이다. Fig. 2는 폐쇄율(blockage ratio, BR)에 따른 스크린 모듈의 단면, 실제 사용된 스펀지 볼의 사진 그리고 스펀지 볼의 형태를 그림으로 나타내었다. 한 모듈 안에는 폭(b) 5 mm, 높이(h) 8 mm 그리고 길이 2288 mm의 요소들이 들어가 있으며 10개에서 6개까지 폐쇄율에 따라 다른 수가 들어있으며 폐쇄율은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{폐쇄율}(BR) = \frac{\text{스크린요소두께}}{\text{스크린요소두께} + \text{스크린요소간격}}$$

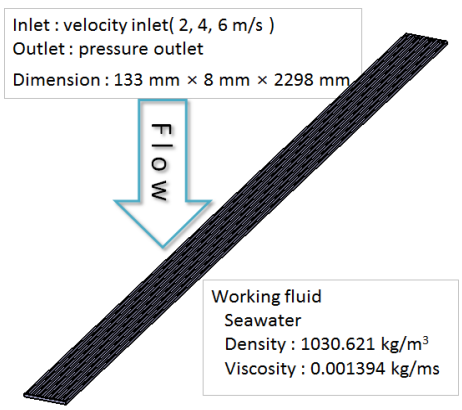

Fig. 1 Schematic of the ball strainer screen module

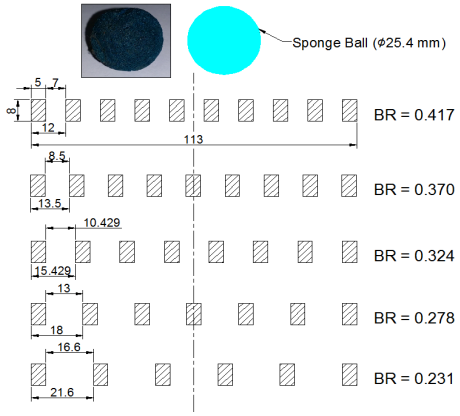

Fig. 2 Cross section of the ball strainer screen module and blockage ratio (BR)

Fig. 2의 중심선은 실제 해석에 사용될 부분을 나타내기 위한 것이다. 이번 연구에서는 Fig. 1과 같은 상하 좌우 대칭인 형상이기 때문에 1/4만 해석하는 대칭 경계조건(symmetry boundary condition)을 사용하였다.

4. 수치해석

4.1 전처리

Fig. 3은 볼 여과망 요소를 해석에 적용하기 위해서 간략화 한 것이다. 입구에서 2, 4, 6 m/s의 속도로 해수가 유입되어 스크린을 거쳐서 출구로 나가게 된다. 앞쪽은 벽(wall)으로 설정되어 있으며 좌측, 우측 그리고 뒷면은 모두 대칭 경계조건이 적용되었다. 스크린의 부분은 벽으로 설정 되었다. BR=0.417 모델이기 때문에 현재 그림에서는 5개의 요소가 설치되어 있다.

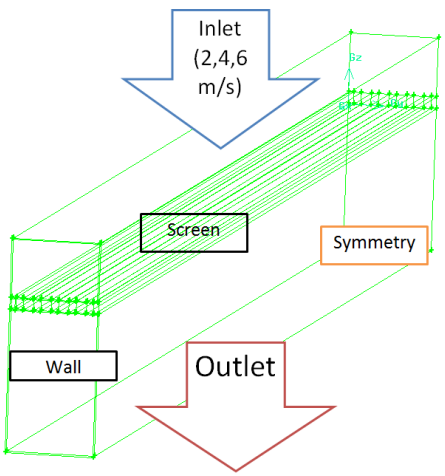

Fig. 3 Geometry and boundary conditions of the ball strainer screen module (BR=0.417)

격자 생성은 비정렬 격자 생성 툴을 이용했으며 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 격자(grid)가 적용된 것이며 여과망 스크린 요소의 부분을 확대해서 나타내었다. 요소의 뒷부분은 와류의 영향이 있기 때문에 주 유동의 반대 방향으로 속도벡터가 나타나기 때문에 이 현상이 나타나지 않는 구간까지 길기 늘여서 생성했으며 격자도 뒷부분에 더 많이 투자되었다. 격자는 모두 육면체 격자를 생성했으며 BR에 따라서 조금씩 다르지만 약 4,880,000개의 cell이 적용되었다.

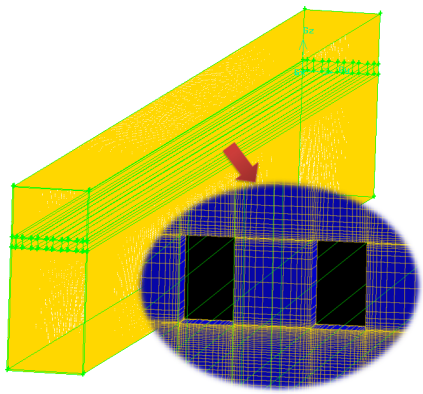

Fig. 4 Computational grid of the ball strainer screen module (BR=0.417)

4.2 지배방정식과 경계조건

해석에 사용된 툴은 유한체적법을 사용한 것이다. 비압축성 정상 상태의 난류유동에 대한 연속방정식과 시간평균된 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i)=0$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j)=\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\overline{u_i'u_j'}\right)$$

여기서 레이놀즈 응력 텐서는 다음과 같다.

$$-\overline{u_i'u_j'}=\frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)-\frac{2}{3}k$$

단 μ_t는 난류 점성계수로서 레이놀즈 응력 성분의 영향을 나타내며 standard k-ε 모델을 이용하여 계산하였다. 해석에 사용된 솔버는 각 방정식을 따로 풀어나가는 pressure based solve이며 압력은 속도와 압력 사이의 관계를 해석하여 보정하는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 이는 압력을 초기값으로 가져와 운동량방정식을 풀어서 여기서 계산된 속도를 이용해서 연속방정식을 풀어

압력을 계산한다. 이렇게 계산된 압력을 다시 운동량방정식을 순환계산해서 근사해를 구하게 된다. 이 방법은 식들을 별개로 순차적으로 풀기 때문에 한 번에 여러 방정식을 푸는 것에 비해서 계산량이 적고 계산의 난이도가 상대적으로 낮다.

입구조건은 velocity inlet 조건을 사용했으며 난류강도는 5%로 주었으며 출구는 pressure outlet 조건을 적용하고 역시 난류강도는 5%로 주었다. 벽 근처에서 난류경계층을 고려하기 위해 벽함수(standard wall function)를 사용했으며 압력 일정 조건을 사용하였다.

5. 해석결과

5.1 속도 분포

Fig. 5는 BR=0.417에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 스크린 요소 정면은 속도벡터의 크기가 작으며 요소와 요소 사이는 유동이 급격하게 빨라지는 것을 볼 수 있다. 또한 요소 뒷면은 와류의 영향으로 주유동의 반대방향의 속도벡터가 관찰되었다.

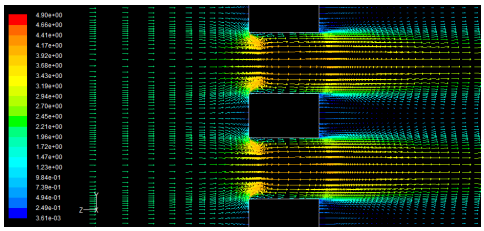

Fig. 5 Distribution of velocity vectors $\overline{w}=2m/s$ at BR=0.417

Fig. 6은 왼쪽에서부터 두 번째 요소와 세 번째 요소 사이의 영역에서 주유동 방향의 속도를 평균유속으로 나누어 무차원화 해서 나타낸 것이다. 나타낸 범위는 요소망의 높이를 h로 했을 때 요소 앞쪽과 뒤쪽 1h만큼의 영역이다. 유속이 2 m/s인 경우의 무차원 속도 분포로서 다른 유속도 마찬가지의 형태를 나타내었다. 요소의 영역은 z/h값이 0.0~1.0까지이며 우측에서 좌측으로 작업

유체가 흘러간다. BR의 값이 클수록 스크린 요소와 요소사이의 거리가 가깝고 작을수록 멀다. BR 값이 큰 경우 w방향의 무차원속도의 절대값이 크며, BR 값이 작을수록 무차원 속도의 절대값이 작게 나타났다. 이는 단면폐쇄효과(blockage effect)로서 물리적으로 타당하다. 그리고 모든 BR에서 z/h 2.0에서 무차원 속도의 절대값이 1에 가깝게 나오는데 이는 유동장이 스크린 요소들의 영향을 적게 받기 때문이다.

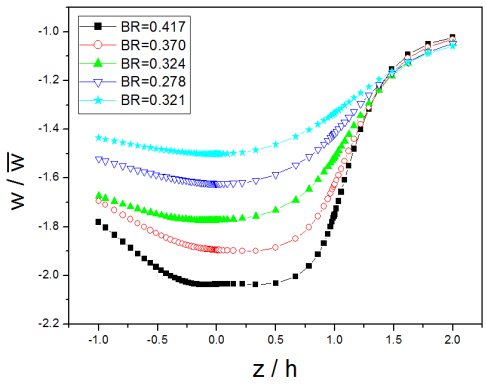

Fig. 6 Non-dimensional velocity distribution at $\overline{w}=2m/s$

5.2 정압 분포

Fig. 7은 BR=0.417에서의 정압 분포를 나타낸 것이며 단위는 Pa이다. 좌에서 우측으로 유동이 일어난다. 스크린 요소의 정면 중앙은 작업유체가 정면에서 타격하는 곳으로서 가장 높은 압력 분포를 나타내었다. 스크린 요소와 요소 사이는 단면폐쇄효과의 영향으로 속도가 빠르기 때문에 낮은 압력분포를 나타내었다. 스크린 요소의 뒷면은 와류의 영향으로 낮은 압력분포를 나타내었다.

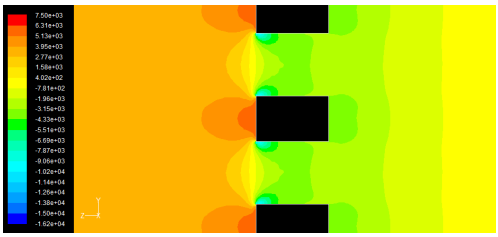

Fig. 7 Static pressure distribution at BR=0.417 $(\overline{w}=2m/s)$

Fig. 8은 $\overline{w}=2m/s$에서의 무차원 정압 분포를 나타낸 것이다. 유동은 우측에서 좌측으로 흘러간다. 앞의 무차원 속도와 마찬가지로 요소의 높이 h에 해당하는 만큼 앞뒤의 압력을 $\frac{1}{2}\rho\overline{w^2}$으로 나누어 무차원 정압 분포 그래프를 작성했다. 무차원 정압 분포도 속도 분포와 동일하게 같은 BR에서는 모두 겹치기 때문에 유속 2 m/s에서만 나타내었다. BR 값이 낮아질수록 무차원 압력 값의 범위가 좁아진다. 이는 요소 사이의 간격이 넓기 때문에 속도차이가 작아져서 나타는 현상이다. 또한 z/h가 1보다 약간 작은 값에서 그래프가 겹치는데 이는 무차원 압력값의 범위가 BR의 값이 감소하면서 그 폭이 좁아지는 과정에서 생긴 것이다.

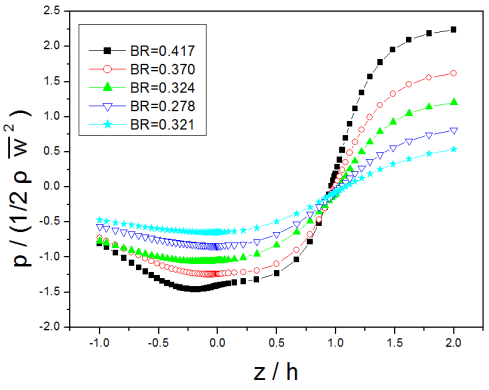

Fig. 8 Non-dimensional static pressure distribution at $\overline{w}=2m/s$

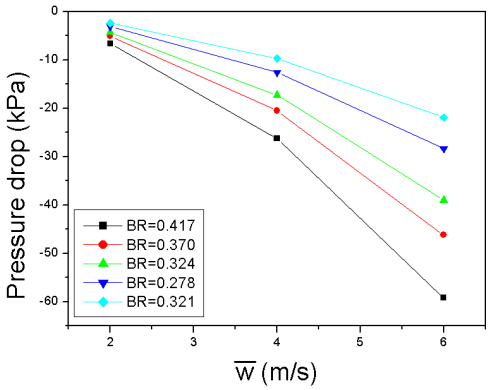

Fig. 9 Pressure drop depending on average flow velocity and BR

Fig. 6과 Fig. 8에서 보는 것과 같이 BR=0.417의 그래프의 구배가 심하게 변하는데 이는 스크린 요소의 좁은 틈 사이에서 유동의 변화가 심하기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 스크린 전후의 압력강하를 나타낸 것이다. 유속이 증가하고 BR 값이 클수록 압력강하도 크게 일어났다. BR=0.417과 BR=0.321을 비교해 보면 유속이 6 m/s일 때 3배 정도의 압력강하 차이가 나타났다. 즉 무조건 BR 값을 크게 해서 스펀지 볼을 걸려 내려할 것이 아니라 최적의 간격을 찾아내는 것이 필요하다.

6. 결 론

콘덴서 튜브 클리닝 시스템에 사용되는 볼 여과기 스크린의 모듈 단면 폐쇄효과에 관한 수치해석적 연구 통해서 다음의 결론을 얻었다.

(1) 스크린 요소의 사이에서 단면폐쇄효과를 확인할 수 있었다.

(2) 단면폐쇄효과로 인해서 BR 값이 큰 경우 w방의 무차원속도의 절대값이 크며, BR 값이 작을수록 무차원 속도의 절대값이 작게 나타났다.

(3) BR값이 작을수록 무차원속도분포의 범위와 정압 분포의 범위가 작았다.

(4) BR값이 클수록 스크린 요소 사이의 속도 구배가 커진다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2014년도 (주)금우산기가 “산업통상부”, “한국산업기술진흥원”, “동남지역사업평가원”의 “광역경제권 선도산업 육성사업”으로 수행된 연구결과입니다.

References

1. J. J. Kim and H. T. Kim, 1998, “Numerical Analysis for the wall effect in the Two Dimensional Incompressible Flow”, Korean

Society for Computational Fluids Engineering, Conference, pp. 160-166.
2. Fluent Manual, 2005.
3. 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.
4. B. S. Jang, Y. M. Lim, N. H. Kim and 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.
5. S. H. Jeong, G. P. Jo and I. T. Chang, 2012, “A Study on Blockage Effects of Vertical Axis Wind Turbines”, The Wind Engineering Institute of Korea, Conference, pp. 201-206.
6. S. J. Oh, D. H. Cho, T. G. Bong and O. S. Kim, 2012, “Experimental study of internal flow field about 90degree elbow for cooling seawater pipe at the main condenser”, The Korea. society of Marine Engineering, Conference, pp. 152-153.
7. K. C. Jung and C. W. Lee, 2014, “The Numerical Analysis of Fluid Flow in the Tube Cleaning System”, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 63-68.