

충진재(Filler)가 대향류형(Counter Flow Type) 냉각탑 유동에 미치는 영향에 대한 연구

Effect of Filler on the Flow of Counter Flow Type Cooling Tower

신정훈¹, 이준경^{2*}, 진철규³

Jeong-Hoon Shin¹, Jun-Kyoung Lee^{2*}, Cheol-Gyu Jin³

〈Abstract〉

The white plume from the cooling tower can be generated by mixing between discharging hot and humid air and cold air outside. This causes various problems such as icing, traffic disturbances, and fire factors in the vicinity, moreover it can also damage the image of a company. Various methods can be used to prevent white plume, one of them is to install a heat exchanger at the outlet of the cooling tower so that the heat exchanger transfers as much heat as possible to lower the temperature. Therefore the air flow path in the cooling tower should be optimized. Installation of the filler can be used to make the air flow better, thus we investigate the effect of filler on the air flow using CFD method. The pressure and velocity profile in the cooling tower could be acquired by the calculations. The filler made the velocity of the air entering the heat exchanger uniform this was because high flow resistance of the filler suppresses the generation of eddy in the cooling tower. But the total air pressure drop increased about 2 times with filler because the pressure drop by the filler accounted for about 60% of the total pressure drop.

Keywords : Cooling Tower, Counter Flow Type, Visible Plume, Filler

1 정회원, 경남대학교 기계공학부

2* 정회원, 교신저자, 경남대학교 기계공학부
E-mail: jklee99@kyungnam.ac.kr

3 정회원, 경남대학교 기계공학부

1 Division of Mechanical Engineering, Kyungnam UNIV, Korea

2* Corresponding Author, Division of Mechanical Engineering,
Kyungnam UNIV, Korea

3 Division of Mechanical Engineering, Kyungnam UNIV, Korea

1. 서론

냉각탑은 냉각수와 공기를 직접 접촉시켜 열교환하는 장치로, 냉각수와 열교환이 된 공기는 고온 다습해 거의 포화에 가까운 공기로 냉각탑에서 토출된다. 이러한 공기가 외부의 차가운 공기 또는 습한 공기와 만나 혼합되는 과정에서 백연이 발생하게 되며 냉각탑에 있어 백연은 겨울철 가장 큰 문제 중 하나이다.

백연은 주변에 결빙이나 교통장애 및 화재요인 등 여러 가지 문제를 일으키고 심리적인 공해를 포함한 환경오염으로 정의되어 사업장의 이미지를 나쁘게 하므로, 냉각탑의 백연저감성능과 에너지 소비효율 등을 모두 충족하는 제품을 개발하기 위해 많은 노력을 하고 있다[1-4].

냉각탑의 백연을 방지하기 위해 여러 가지 방법을 사용하는데, 그 중 한가지는 냉각탑 출구부에 열교환기를 설치하여 냉각탑을 빠져나가는 고온 다습한 공기가 열교환기가 최대한 많은 열전달을 하여 온도를 떨어뜨리는 방법이며, 이를 위해서 냉각탑 내 공기 유로의 구조를 최적화해야 한다. 구조 최적화의 방법 중 하나는 공기 유로 내 충전재(Filler)를 설치하여 저항(resistance)을 발생하는 것이며, 충전재의 형상 및 재질 등을 최적화

하는 것이 중요하다[5].

본 연구에서는 냉각탑에서 발생하는 백연방지를 해결하기 위한 대향류형(Counter Flow Type) 냉각탑 부품의 충전재(Filler)가 공기의 유동에 끼치는 영향을 ANSYS FLUENT(R 18.2)[5]를 활용한 해석을 통해 파악하고자 한다.

2. 해석 전처리

2.1 모델링 간소화

Fig. 1은 냉각수와 외부공기가 정면으로 교차하며 열교환하는 대향류형(Counter flow type) 냉각탑을 나타낸 그림이다. 냉각탑의 크기는 12.81 m (W) × 12.81 m (L) × 18 m (H)이고, 냉각탑 내부에 백연방지 열교환기(1.655 m (W) × 6.3 m (L) × 0.6 m (H))가 총 14개 설치되어 있다. 열교환기는 핀 튜브 형태(Fin-Tube Type)이며 핀의 피치(Fin Pitch)는 6 mm, 열교환기 관은 15.88 mm (D) × 6,130 mm (L) × 0.45 mm (t)이며, 50 mm 간격으로 총 33 개로 구성되어 있다.

냉각탑 내 유동의 경우 Fig. 2와 같이 구성되어

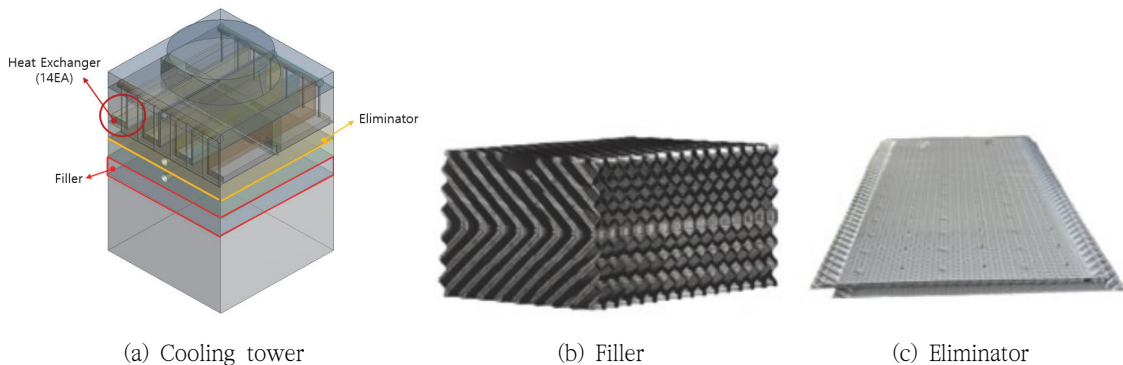


Fig. 1 Counter flow type cooling tower system

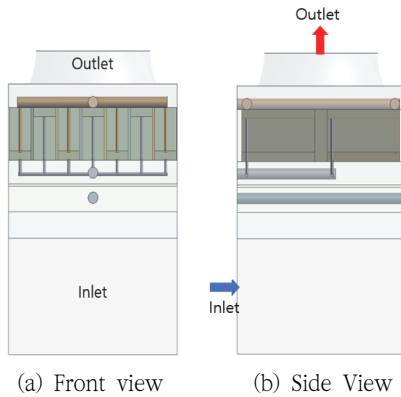


Fig. 2 Boundary conditions for cooling tower

있다. 입구(Inlet)부로 공기가 유입되고, 팬(Fan)을 통해 출구(Outlet)부로 나갈 수 있도록 설정하였다. 냉각탑 하단 공기 입구루버를 통해서 공기가 유입되고, 이후 유입공기를 유로 전체에 고루게 분포시키기 위한 충진재(필러, Filler, 12.8 m (W) x 12.8 m (L) x 1.8 m (t), Fig. 1(b)), 습공기에서 냉각수를 분리시키는 비산방지장치(엘리미네이터, Eliminator, 12.8 m (W) x 12.8 m (L), 0.145 m (t), Fig. 1(c)), 공기의 열을 제거하는 열교환기(Heat exchanger)를 각각 통과하여 출구로 배출된다.

2.2 계산모델 선정

냉각탑에 대해 충진재(Filler), 비산방지장치(Eliminator), 열교환기(Heat exchanger) 부분 각각에 대한 유동 및 압력강하를 계산하기 위해 각 부분을 따로 분할하여 모델링을 수행하였고, 3개 부분은 다공성 물질(Porous zone)로 설정하여 계산을 수행하였다. 열교환기에 공급되는 냉각수 유로를 모델링 하였으며, 크기가 상대적으로 작은 유로의 경우는 유동해석에 미치는 영향이 미미할 것이라 판단하여 되도록 간단하게 모델링을 수행하였다.

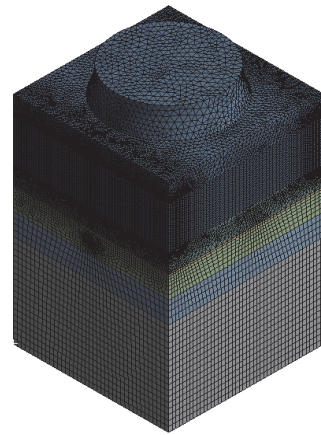
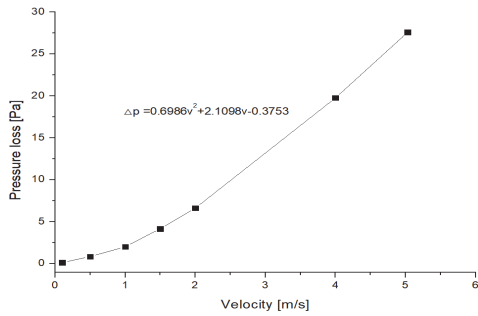


Fig. 3 Mesh generation

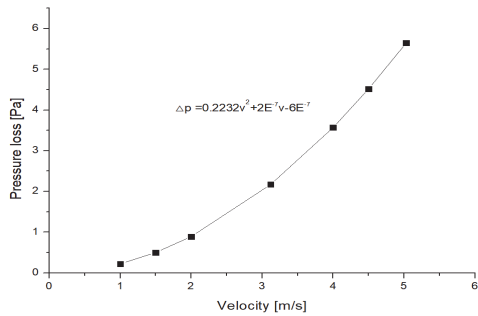
Fig. 3은 시험대상인 냉각탑에 대해 Mesh 생성을 나타낸 그림이다. Elements 개수는 4,545,654개로 형상이 매우 복잡하여 Mesh의 개수가 많이 증가하였으며, 각 Parts가 접하는 부분의 Mesh의 Node를 각각 접하게 하여 정확도를 높였다. 특히 공기의 경우 압축성 유체로써 Mesh 개수를 증가시켜 계산의 정확도를 높였으며, Mesh Independence를 체크하였다.

기체 유입 조건은 5 m/s 속도를 기준으로 하였고, 이는 난류 영역에 해당함을 확인 할 수 있었고, K-epsilon model을 선정하였다. 냉각탑에 대해 충진재(Filler), 비산방지장치(Eliminator), 열교환기(Heat Exchanger) 부분은 유체 유동을 방해하는 구조로 되어 있으며, 이를 세부적으로 모델링하여 유동해석을 수행하기가 불가능하므로, 각 부분에 대한 유동 및 압력강하를 계산하기 위해 다공질 영역(Porous zone)으로 설정하여 계산을 수행하였다.

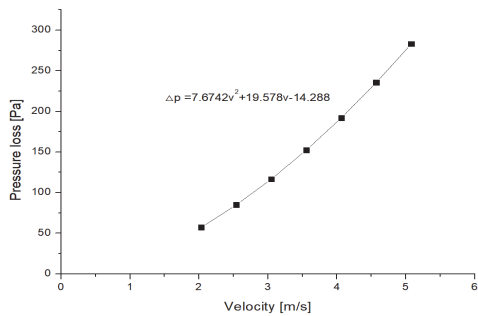
각각의 영역에 대한 세부적인 계수를 결정하기 위해 속도와 압력강하 관계를 실험을 통하여 Fig. 4와 같이 구했다. 그 결과를 활용하여 ANSYS FLUENT 내 다공성 물질에 대한 계수들을 Table 1과 같이 정리하였다[6].



(a) Heat exchanger



(b) Eliminator



(c) Filler

Fig. 4 Flow resistance formulation for each component

Table 1. Variables for Heat exchanger porous zone

Variables	Values
Inertial Resistance [m^{-1}]	1.9
Viscous Resistance [m^{-2}]	195351.852
$V [m^3]$	5.52108
$V_{solid} [m^3]$	0.363395
Porosity (V_{fluid}/V)	0.93418

Table 2. Variables for Eliminator porous zone

Variables	Values
Inertial Resistance [m^{-1}]	2.513159747
Viscous Resistance [m^{-2}]	0.07662835249
$V [m^3]$	295.373
$V_{solid} [m^3]$	0.39824
Porosity (V_{fluid}/V)	0.998652

Table 3. Variables for Filler porous zone

Variables	Values
Inertial Resistance [m^{-1}]	6.960725624
Viscous Resistance [m^{-2}]	604259.2593
$V [m^3]$	295.37298
$V_{solid} [m^3]$	6.2391
Porosity (V_{fluid}/V)	0.978877215

3. 해석 결과

3.1 충전재가 없는 경우

3.1.1 압력분포

Fig. 5는 입구속도 $v_{in} = 5$ m/s 조건으로 충전재(Filler)가 없는 냉각탑 내 전체 압력분포를 파악하여 나타낸 그림이다. 냉각탑 입/출구의 전체 압력강하가 111.14 Pa가 됨을 확인할 수 있었고, 열교환기, 비산방지장치의 경우 각각 70.84 Pa, 28.14 Pa의 압력강하가 발생하는 것을 확인하였다. 충전재가 없는 경우는 열교환기 부분에서 대부분의 압력강하가 발생함을 알 수 있다.

3.1.2 속도분포

Fig. 6는 입구속도 $v_{in} = 5$ m/s 조건에 대해 속도 분포를 나타낸 그림이다. 냉각탑 우측하단(입구부 반대편)과 비산방지장치 좌측에서 속도가 거

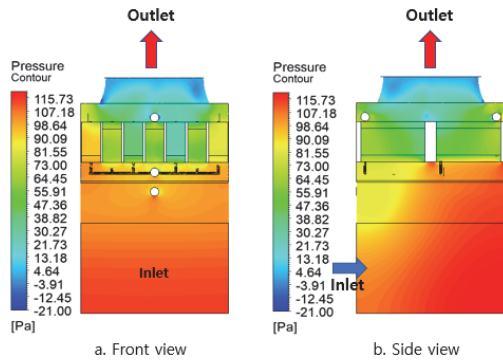


Fig. 5 Pressure contour ($V_{in} = 5 \text{ m/s}$)

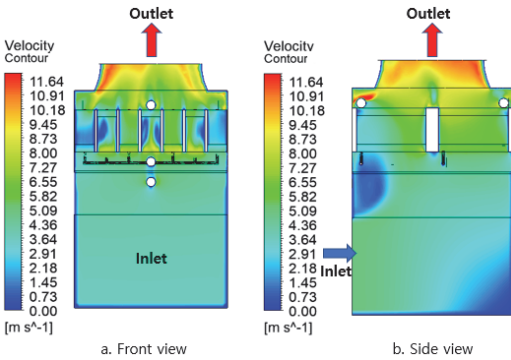


Fig. 6 Velocity contour ($V_{in} = 5 \text{ m/s}$)

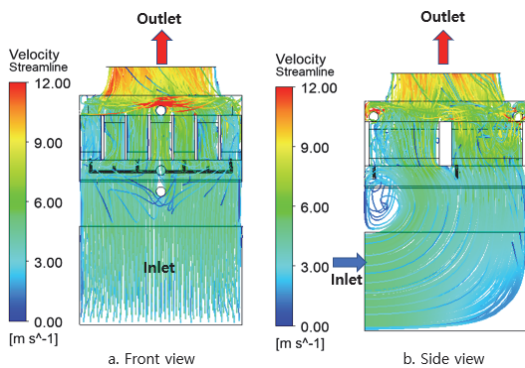


Fig. 7 Velocity streamline ($V_{in} = 5 \text{ m/s}$)

의 0 m/s에 가깝게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 냉각탑 좌측하단의 경우 부위 모서리에 의한 와류영역이 발생해서 유동의 정체가 발생함

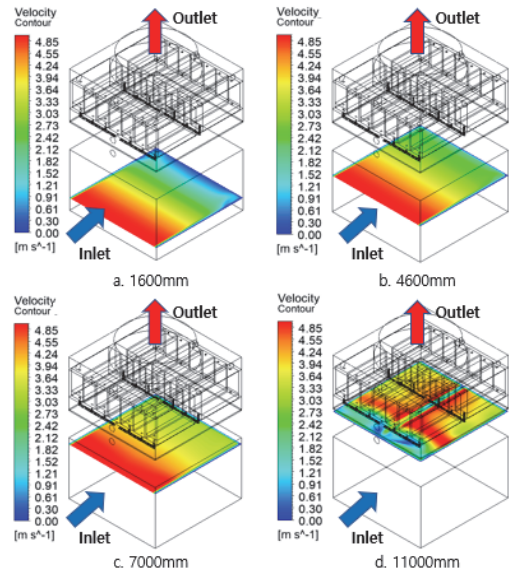


Fig. 8 Velocity contour for each position ($V_{in} = 5 \text{ m/s}$)

을 알 수 있다. 비산방지장치 좌측의 경우, 수직으로 썩인 유동과 열교환기와 비산방지장치의 유동저항으로 인해 와류 영역이 발생하고 마찬가지로 유동 정체가 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 와류발생 구간을 보다 자세히 살펴보기 위해 유선(velocity streamline)을 나타낸 그림이다. 수직으로 썩어서 나가는 유동에 의해 전술한 2군데 와류가 잘 관찰이 되었다.

Fig. 8은 냉각탑 높이에 따른 속도분포를 나타내었다. 대부분의 영역에서 속도가 일정하지 않으며, 특히 와류발생 부분인 Fig. 8(a)와 (d)(높이 1.6와 11 m)의 경우 속도의 분포가 크게 불균일함을 확인할 수 있다.

3.2 충진재가 있는 경우

3.2.1 압력분포

Fig. 9는 충진재가 있는 경우 입구속도 $v_{in} = 5 \text{ m/s}$ 조건으로 냉각탑 내 전체 및 열교환기, 충진

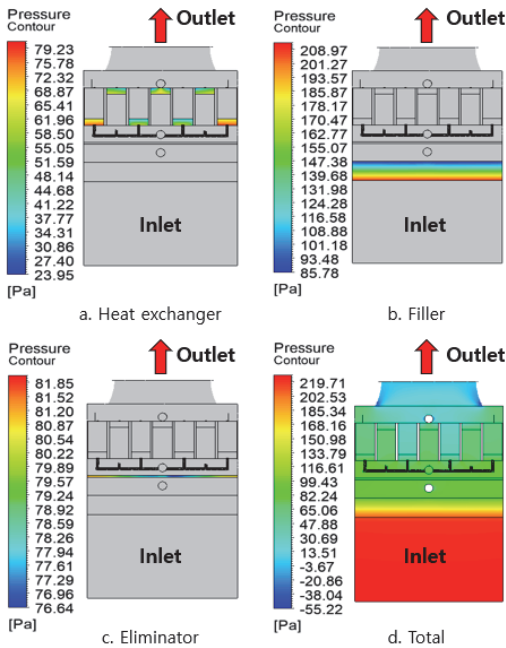


Fig. 9 Pressure contour ($V_{in} = 5 \text{ m/s}$)

재 그리고 비산방지장치 각 부분에 대해서 압력분포를 계산하여 나타낸 그림이다. 냉각탑 전체 압력강하는 206.06 Pa, 열교환기 55 Pa, 충전재 123 Pa, 그리고 비산방지장치는 5 Pa로 각각 확인되었다. 대부분의 압력강하가 충전재에서 발생하고 있음을 판단할 수 있다. 그리고 충전재가 없는 경우와 비교하여 열교환기와 비산방지장치에서의 압력강하가 낮음을 확인할 수 있다. 이는 충전재 이후에 위치한 열교환기와 비산방지장치 부분에서의 속도 분포와 밀접하게 관련이 있고, 그와 관련해서 자세히 살펴보았다.

3.2.2 속도분포(Velocity Contour)

Fig. 10은 입구속도 $v_{in} = 5 \text{ m/s}$ 조건에 대한 속도분포를 벡터로 나타낸 그림이다. Fig. 10(a)는 하단부가 입구가 되고, (b)는 좌측하단이 입구가 된다. 냉각탑 우측하단의 경우 속도가 0에 가깝게 나타나고 있음을 확인할 수 있고, 이는 우측하단

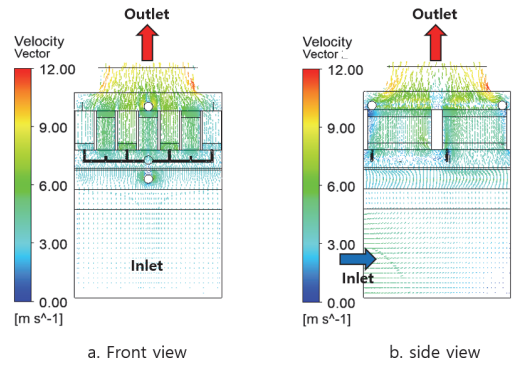


Fig. 10 Velocity vector contour ($V_{in} = 5 \text{ m/s}$)

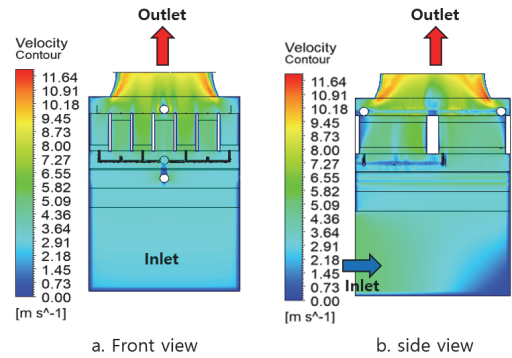


Fig. 11 Velocity contour ($V_{in} = 5 \text{ m/s}$)

부위 모서리에 의한 와류영역 발생에 의해 나오는 경향이라 판단할 수 있다. 충전재 부분의 유동저하이 커서 압력강하가 크에 따라 충전재 유입부의 속도가 비교적 균일하게 형성됨을 확인할 수 있었다. 그러나 출구 Fan 부위 속도가 상대적으로 크게 나타나 벡터가 정확하게 관찰이 되지 않으므로 Velocity Contour를 Fig. 11에 나타내었다. 냉각탑 우측하단 부분에서 속도 강하가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 모서리에 의한 와류발생효과로 볼 수 있으며, 이는 충전재 부분의 압력강하가 크거나, 입구 속도가 작으면 와류발생효과를 억제할 수 있을 것으로 판단하였다. 충전재 부분에서의 압력강하가 커짐으로 인해 충전재에서 유체의 속도를 균일하게 하는 영향을 미치는 것은

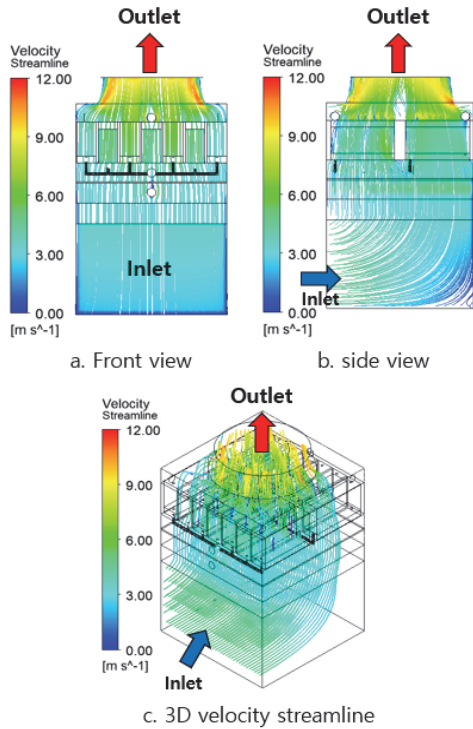


Fig. 12 Velocity streamline ($V_{in}=5m/s$)

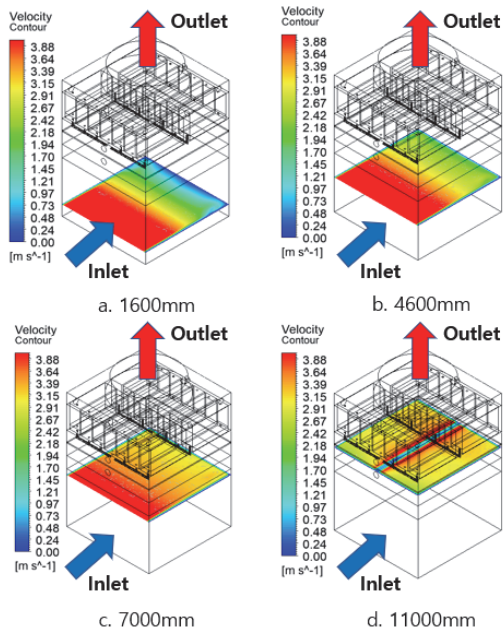


Fig. 13 Velocity contour for each position ($V_{in} = 5 m/s$)

로 볼 수 있었고, 이로 인해 충진재 이후 부분은 속도가 비교적 균일함을 확인하였다.

Fig. 12는 와류발생 구간을 보다 자세히 살펴보기 위해 유선(Velocity Streamline)으로 나타낸 그림이다. 충진재 부분에서의 유선이 일직선 형태를 보이고 있으며, 충진재가 압력강하를 크게 하여 이전 부분에서의 속도를 균일하게 만들고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 13은 냉각탑 높이에 따른 속도분포를 나타내었다. 입구와 가까운 부분(Fig. 13(a) 및 (b))의 유동 불균일은 여전히 나타나지만, 충진재 이후 위치한 열교환기 내 유동은 비교적 균일함을 확인할 수 있다(Fig. 13(d)). 이와 관련하여 3.2.1에서 충진재가 있는 경우에 열교환기와 비산방지장치에서의 압력강하가 충진재가 없는 경우와 비교하여 낮음을 언급하였고, 그 이유는 균일 속도분포에 의한 압력강하가 불균일 속도분포로 인해 생성되는 압력강하보다 작기 때문이라고 정리할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 충진재(Filler)가 대향류형(Counter flow type) 냉각탑 내 공기 유동에 끼치는 영향을 파악하기 위해, 냉각탑 내 충진재 유무에 대한 압력 및 속도 계산 결과를 살펴보았다.

충진재 유무에 상관없이 공기 입구부 반대편은 공기 유동이 수직으로 이루어지면서 와류가 발생하게 된다. 충진재가 없는 경우보다 있는 경우의 와류 크기가 감소하게 되는데, 이는 충진재의 유동저항이 커서 와류발생을 억제하는 효과가 있기 때문이다. 충진재가 없는 경우는 열교환기가 있는 하류에서도 와류가 발생하게 되는데, 이는 열교환기를 지나가는 공기의 유동 불균일을 크게 만드는 요소가 된다. 결과적으로 모든 조건이 동일한 경

우, 충전재는 열교환기로 진입하는 유체의 속도를 균일하게 만들어 주었다. 다만, 전체 압력강하가 충전재가 없는 경우 111.14 Pa, 있는 경우 206.06 Pa로, 충전재가 있는 경우가 없는 경우의 2배 정도로 압력강하가 증가하였다. 충전재가 있는 경우 충전재 부분에서 123 pa로 냉각탑 전체 압력강하에서 60% 정도를 차지함으로써, 충전재의 큰 유동저항이 유체의 속도를 균일하게 하는 효과를 만드는 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 충전재의 유무에 대한 유동특성의 차이만 살펴보았는데, 냉각탑 유동의 최적화(가능한 균일한 속도분포 및 낮은 압력강하)를 위해 향후 충전재의 두께 등 충전재 형상에 따른 냉각탑 내 유동특성이 어떻게 변할지 연구가 필요하다.

후 기

본 과제(결과물)는 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-003).

참고문헌

- [1] R. Zhao, S. Bu, X. Zhao and B. Bao “Study on thermal performance of new finned heat exchange tube bundles in cooling tower,” *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 168, No. 1, 107064, (2021).
- [2] Z. Yu, C. Sun, L. Zhang, S. Bu and W. Xu “Analysis of a novel combined heat exchange strategy applied for cooling towers,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 169, 120910, (2021).
- [3] S.Y. Yoo, J.H. Kim, K.H. Han, et al., “Thermal performance analysis of heat exchanger for closed wet cooling tower using heat and mass transfer analogy”, *J. Mech. Sci. Technol.* Vol. 24, pp.893-898, (2010)
- [4] E. Masi, J. Bellan, K.G. Harstad, et al., “Multi-species turbulent mixing under supercritical-pressure conditions direct numerical simulation and analysis, revealing species decomposition”, *J. Fluid Mech.* Vol. 7, No. 21, pp.578-626, (2013).
- [5] S.K. Tyagi, A.K. Pandey, P.C. Pant and V.V. Tyagi, “Formation, potential and abatement of plume from wet cooling towers: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 16, pp.3409-3429, (2012).
- [6] ANSYS FLUENT User’s Guide, ANSYS Inc., (2021).