Check for updates

동력시스템공학회지 제25권 제3호 pp. 5-14 2021년 6월 ISSN 2713-8429(Print) ISSN 2713-8437(Online)
Journal of Power System Engineering https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.3.005
Vol. 25, No. 3, pp. 5-14, June 2021

증기발생기의 표준형 습분분리기 내부 유동 특성에 관한 수치해석
A Numerical Study on Flow Characteristics inside the Standard Type Moisture Separator of a Steam Generator

김우식*† · 최청열** · 김기환*
Woo-Shik Kim*†, Choengryul Choi** and Kihwan Kim*

(Received 28 October 2020, Revision received 14 June 2021, Accepted 14 June 2021)

Abstract : In the present study, a series of numerical analysis was performed to identify the flow characteristics inside the CE-type moisture separator applied to domestic steam generators. To investigate the similarity between normal operation condition of the prototype separator and experimental condition using air-water test facility with real scale and 1/2 scale test sections, single phase and two-phase calculations were carried out. The results of the single phase calculations showed that the outward flows through the flow holes on the wall turned out to be similar trend regardless of the working fluid and inlet conditions on real scale geometry. However, the pressure loss coefficient for the 1/2 scale geometry was relatively larger than that for the real scale geometry. In the two-phase calculation, Eulerian-Lagrangian method was adapted to investigate the behavior of the droplets. Two extreme conditions for the post impingement behavior of the droplet, which were escape and rebound conditions; were applied and the results between them were compared.

Key Words : Moisture separator, Steam generator, Numerical simulation, Two phase flow

— 기 호 설 명 —

A : 단면적 [m^2]
K : 압력손실계수 [-]
$\dot{m}$: 질량유량 [kg/s]
P : 압력 [Pa]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

inlet : 입구

*† 김우식(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3937-5662) : 선임연구원, 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부
E-mail : wooshik@kaeri.re.kr, Tel : 042-868-2366
**최청열(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5346-4149) : 대표이사, ㈜엘쏠텍
*김기환(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4217-0430) : 책임연구원, 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부

*† Woo-Shik Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3937-5662) : Senior Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute.
E-mail : wooshik@kaeri.re.kr, Tel : 042-868-2366
**Choengryul Choi(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5346-4149) : CEO, ELSOLTEC Inc.
*Kihwan Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4217-0430) : Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute.

g : 기체
outlet4 : outlet4

1. 서 론

1.1 개요

원자로에서의 핵분열에 의해 발생되는 고온고압의 1차 계통수는 증기발생기의 관다발을 통하여 터빈을 구동시키는 2차 계통수와 열교환을 하여, 이로 인해 관다발에서 증기가 생성된다. 관다발에서 생성된 증기는 증기발생기 상부에 설치된 2단계의 처리과정을 거치는 습분분리장치를 통과하면서 거의 완전한 건증기가 된다. 습분분리장치는 1단계로 관다발 상부에 위치한 슈라우드의 상부 덮개에 설치된 습분분리기를 통과한다. 습분분리기의 내부에는 소용돌이 날개(spinner blade)가 설치되어 있으며, 습분분리기 상단에는 다공망(mesh wire)이 설치되어 액적의 유출을 억제시키고, 분리된 습분은 하향유로로 유입되어 재순환된다. 이후 2단계로 건조기(dryer)를 통과하면 고건도의 증기가 생성되며 주증기 배관을 통하여 터빈을 구동시킨다. 이때, 터빈으로 유입되는 증기의 건도에 따라 전력생산 효율이 상당한 영향을 받을 뿐만 아니라, 다량의 습분이 유입되는 경우, 터빈 블레이드의 손상이 유발될 수 있다.

현재 국내에서는 유량 건도 등의 습분분리기 운전 조건에 따른 압력강하, 습분분리 효율 등과 같은 성능자료 부족으로 증기발생기 설계 및 유지·보수시에 필요한 정보를 해외 공급사에 전적으로 의존하고 있다. 국내에 적용되는 증기발생기에는 크게 CE(Combustion Engineering)사에서 제작되는 비침수형(또는 표준형) 습분분리기와 WH(Westinghouse)사에서 제작된 침수형 습분분리기가 주로 사용된다.

CE형 증기발생기의 경우, 증기발생기에 발생된 증기 내에 존재하는 액적의 제거는 주로 1단계 습분분리기에 설치되어 있는 소용돌이 날개로부터 기인되는 회전유동에 의해 발생된다. 습분분리의 습분 제거 측면에서만 볼 때에는 강한 회전유동을 발생시키는 소용돌이 날개의 구조가 유리하지만, 이런 경우 습분분리기를 통과하는 유체의 압력강하가 과도하게 발생할 수 있다. 따라서 적은 압력강하가 유발되면서도 충분한 습분이 제거될 수 있는 회전력을 가지도록 습분분리기 내부 유로를 설계하는 것이 필요하다.[1)]

1.2 기존 연구

습분분리기의 압력강하 특성 및 습분분리 효율을 가장 정확히 파악할 수 있는 방법은 원자로 운전조건에서 원형(Prototype) 습분분리기를 이용한 실험을 수행하는 것이다.[1)] 하지만 이와 같은 고온·고압 조건에서의 실험을 수행하는 데에는 고비용의 기반시설이 필수적이다. 따라서 상대적으로 수월한 물·공기를 이용한 저온·저압 조건에서의 실험이 일부 수행되었으며, 원형 습분분리기의 형상을 축소하여 사용한 실험 또한 수행된 바가 있다.[1-3)]

물·증기 유동 대신에 물·공기 유동을 이용하거나 축소된 실험대를 활용한 실험 데이터의 활용성을 재고하기 위해서는 기하학적 상사성 및 유동 상사성을 검증하는 것이 필수적이다. 습분분리기의 내부 유로는 일반적인 형상을 가지고 있지 않을 뿐만 아니라, 회전유동과 2상유동을 동반하기 때문에 이론적 방법을 통한 상사성 검증을 하는 데에는 어려움이 따른다. 또한 2상유동의 특성상 유동 가시화와 같은 기법의 활용이 제한적이므로 실험적으로 습분분리기 내부 유동 특성을 파악하는데에도 한계가 따른다. 이러한 경우 수치해석적 기법을 통해 유동 특성을 간접적으로 확인하는 방법이 활용된다.[2)]

1.3 연구의 방법 및 목적

원형로 운전조건에서의 습분분리기 성능 및 유동 특성과 원형 척도비 및 1/2 척도비를 가지는 시험대에 대한 물·공기 유동 실험의 상사성 검토를 위하여 다음과 같은 해석이 수행되었다.

1) 원형 척도비 및 1/2 척도비를 가지는 시험대에 대한 증기 유동 및 공기 유동 단상유동 해석

2) 원형 척도비 및 1/2 척도비를 가지는 시험대에 대한 물·증기 및 물·공기 2상유동 해석

본 연구에서는 CE형 습분분리기 내에 발생하는 물리적 특성을 평가하기 위하여 수치해석 방법론 수립하고, 이를 사용하여 CE형 습분분리기에 대하여 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과는 추후 원형 및 1/2 척도비를 가지는 실험대를 활용하여 수행되는 물·공기 실험의 보조 자료로 활용될 예정이다.

2. 단상 유동 해석

단상유동 해석은 원형 운전조건과 시험 조건 간의 압력강하 상사성 검토를 위하여 수행되었다. 2상유동 압력강하에 대한 수치해석은 유동 양식 및 해석 모델에 따라 상대적으로 큰 차이를 나타내기 때문에 유동이 정확히 정의되지 않는 경우 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 2상유동의 압력강하를 예측함에 있어서 단상유동의 압력강하에 2상유동 손실배수를 활용하여 보정하는 방법이 일반적으로 사용되므로,[4-7] 본 연구에서는 원형로 운전 조건인 물-증기 유동과 실험 운전 조건인 물-공기 유동의 상사성 및 원형 척도비와 1/2 척도비를 가지는 실험대 간의 압력강하 상사성을 확인하기 위한 기초 단계로 단상유동 CFD 해석이 수행되었다. 습분분리기 압력강하의 상사성 검증 위한 가장 기초적인 단계로써 단상유동의 압력강하를 평가하였다.

2.1 해석 모델 및 조건

단상유동 해석에는 유한체적법(finite volume method) 기반의 사용 CFD 코드인 ANSYS FLUENT version 18을 이용하였으며, 3차원 정상상태(steady state) 유동 해석이 수행되었다. 습분분리기 내 작동 유체(증기 또는 공기)의 유동장 해석을 위하여 연속방정식과 운동량 방정식이 사용되었다. 습분분리기 내 난류 유동 효과를 고려하기 위하여 standard k-ε모델을 난류 모델로 적용하였으며, 중력에 의한 영향을 고려하였다. CFD 해석 시 적용된 주요 모델은 Table 1과 같다.

해석에 사용된 CE형 습분분리기의 모델은 Fig. 1과 같다. 원형 습분분리기의 총 높이는 약 1,490 mm

Table 1 CFD Code and Main Model

CFD Code	FLUENT version 18
Geometry	3-Dimensional
Solver	Steady State
Turbulence Model	Standard k-ε Model
Gravity Effect	-Z Direction

이다. 1/2 척도비를 가지는 실험대의 경우, 작동유체가 유동홀을 통과할 때의 압력손실을 보존하기 위하여 벽면 두께와 유동홀의 크기는 원형과 동일하게 유지하면서 전체 면적에서 유동홀이 차지하는 총면적의 비를 유지하도록 하였다.

격자의 품질을 최대한 확보하면서 사용되는 격자의 수를 최소화하기 위하여 복합격자계가 사용되었다. 소용돌이 날개나 홀 영역과 같이 복잡한 부분에는 사면체 요소를 사용하였으며, 그 외에 배관 또는 환형과 같이 단순한 영역에서는 sweep mesh가 사용되었다. 격자 생성 시 제일 작은 홀에도 반경방향으로 최소 7개 이상의 격자가 들어갈 수 있도록 격자의 크기를 조절하였다. 전체 해석 영역에 대하여 원형 모델의 경우, 약 19,000,000개의 격자가 사용되었으며, 1/2 척도비 시험대 모델의 경우 약 9,815,000개의 격자가 사용되었다.

CFD 해석 시 적용된 경계 조건을 Fig. 2에 나

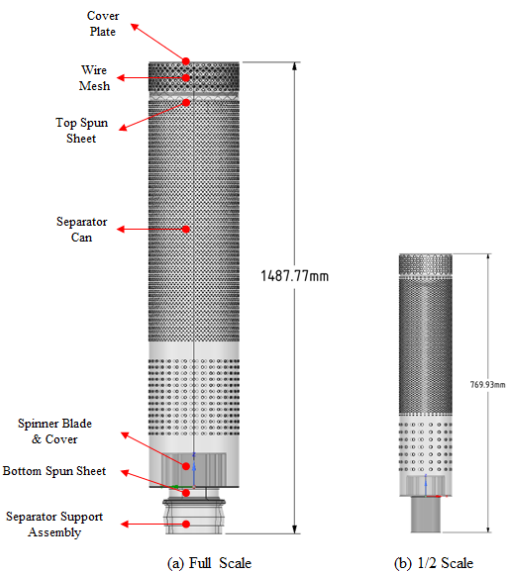


Fig. 1 Geometry for Calculation

습분분리기 입구에는 질량 유량 경계 조건을 적용하였으며, 각 출구에는 압력 경계 조건을 적용하였다. 각 출구의 압력은 0 Pa로 설정하였다.

해석 조건은 Table 2와 같다. TEST-1은 증기를 사용하는 원형로 운전 조건을 의미한다. TEST-2와 TEST-3는 원형과 같은 크기를 가지는 습분분리기에 공기를 작동유체로 사용한 경우로, TEST-2는 공기의 유속이 같은 경우, TEST-3는 2상유동 원심력[2]이 원형과 같은 경우를 의미한다.

TEST-4와 TEST-5는 1/2 척도비를 가지는 시험대에 공기를 작동유체로 사용하는 경우로, TEST-4는 공기 유속이 같은 경우, TEST-5는 2상 유동 원심력이 원형과 같은 경우를 의미한다.

2.2 해석 결과

Fig. 3는 습분분리기의 유동홀을 통하여 유출되는 유동 유속을 나타낸 것이다. 붉은색 점은 각 지점에서의 평균 유속을 의미하며, 오차막대는 최대 유속과 최소 유속을 의미한다. 척도비와 유속

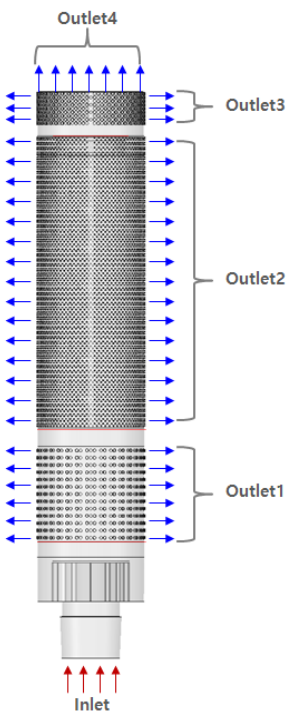


Fig. 2 Boundary Condition

Table 2 Test Conditions for Single Phase Calculation

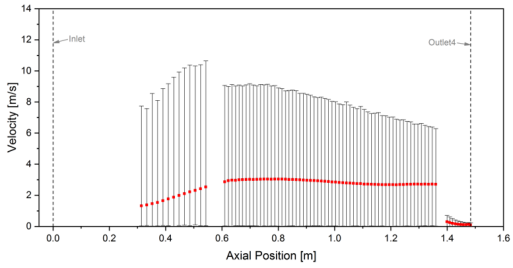
Test case	Scale	System Pressure [MPa]	Working Fluid	Flow Rate [kg/s]	Remark
TEST-1	Full	6.074	Steam	5.033	Prototype Condition
TEST-2	Full	0.101	Air	0.194	Velocity Preserved
TEST-3	Full	0.101	Air	1.056	Centrifugal Force Preserved
TEST-4	1/2	0.101	Air	0.049	Velocity Preserved
TEST-5	1/2	0.101	Air	0.185	Centrifugal Force Preserved

이 같고 유체의 종류가 다른 경우, Fig. 3(a)와 (b)에 나타낸 바와 같이 최대 유속은 다소 차이를 보이지만, 평균 유속이 유동 방향에 크게 다르지 않은 경향을 나타내었다. 입구 유속 조건이 달라지는 경우 Fig. 3(b)와 (c)를 비교하여 보면, 유속의 절대값은 차이를 나타내지만, 유동 방향에 따른 평균 유속 및 최대 유속의 변화 경향은 큰 차이를 나타내지 않았다.

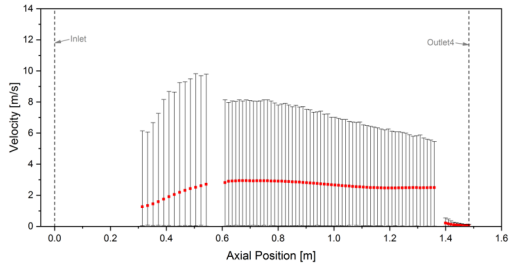
1/2 척도비를 가지는 경우, Fig. 3(d)와 (e)에 나타낸 바와 같이 조건에 따라 유속의 절대값은 차이를 보이지만, 변화의 경향을 서로 큰 차이를 보이지 않았다. 척도비에 따른 차이를 살펴보면, Outlet1 영역에서의 유속 변화가 원형 척도비를 가지는 조건들에 비하여 적게 나타나는 반면, Outlet2영역에서는 상대적으로 큰 변화폭을 가지면서 유속이 감소하는 경향을 보였다.

단상유동에서의 동적상사성을 분석하기 위하여 식 (1)에 나타낸 습분분리기의 압력 손실 계수 (K)를 평가하였다.

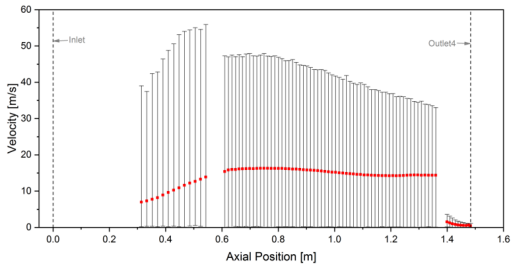
$$K = \frac{2\rho_g A_{inlet}^2 \left(P_{inlet} - P_{outlet4}\right)}{\dot{m}_{inlet}^2} \quad (1)$$



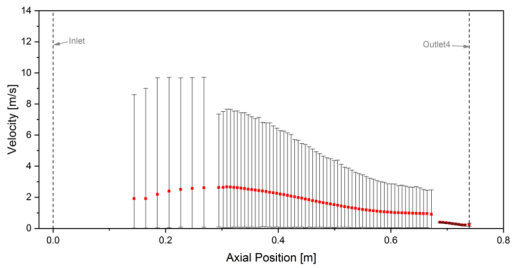
(a) TEST-01



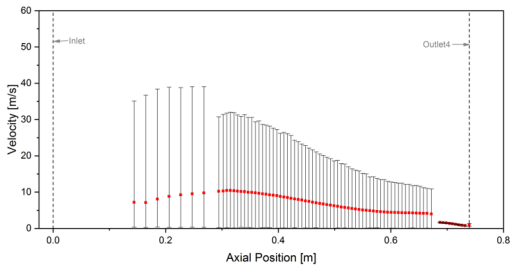
(b) TEST-02



(c) TEST-03



(d) TEST-04



(e) TEST-05

Fig. 3 Velocity through Flow Holes

Table 3 Pressure Loss Coefficient

Test case	Pressure Drop [Pa]	K [-]
TEST-01	2,866	2.35
TEST-02	110	2.35
TEST-03	3,212	2.35
TEST-04	138	2.94
TEST-05	1.987	2.91

여기서, $\dot{m}_{inlet}$은 입구에서의 질량 유량, ρ_g는 기체의 밀도, A_{inlet}은 입구의 면적, P_{inlet}은 입구에서의 전압, $P_{outlet4}$은 최상단 출구에서의 전압을 의미한다.

Table 3에 해석 결과를 통해 구해진 입구부터 outlet-4까지의 압력강하 및 압력 손실 계수를 정리하여 나타내었다. 실증 실험조건과 작동유체는 다르지만 형상이 같고, 같은 크기의 유속을 가지는 경우(TEST-02), 압력강하의 크기는 상대적으로 작지만 압력 손실 계수는 같은 결과를 나타내었다. 이 결과는 밀도 및 점도가 다른 유체가 공급되는 경우에도 충분한 난류 영역에 해당되고, 유속이 같다면 유동의 특성이 유사하다는 것을 간접적으로 보여준다. 기체 유속이 상대적으로 큰 원심력 일정조건(TEST-03)의 경우에도 압력손실계수의 크기는 차이를 나타내지 않았다. 하지만 1/2 척도비를 가지는 경우, 유속이 일정한 경우(TEST-04)와 원심력이 일정한 경우(TEST-05) 모두 실증 조건의 압력손실계수보다 큰 경향을 나타내었고, 두 조건 간에도 약간의 차이를 보였다. 이와 같은 차이는 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 유동 방향에 따른 유속 변화의 경향이 다름으로부터 기인하는 것으로 판단되며, 추후 1/2 척도비를 가지는 실험대를 이용한 실험 데이터를 활용하여 원형 운전조건의 성능을 예측하려는 경우 이와 같은 차이를 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3. 2상 유동 해석

전산유체역학에서는 다상유동의 수치해석에 대하여 ‘Eulerian-Lagrangian 접근법’과 ‘Eulerian-

Eulerian 접근법'으로 크게 두 가지의 방식이 사용된다.

습분분리기 내부의 유동 특성을 파악하기 위해서는 소용돌이 날개를 지난 이후 생성되는 액적의 거동을 분석하는 것이 필요하므로 'Eulerian-Lagrangian 접근법'을 사용하였다.

습분분리기 내부에서는 회전유동에 의해 다수의 액적이 벽면에 충돌하게 되고, 이로 인해 벽면에 액막이 형성된다. 수치해석의 한계로 인해 액적의 거동과 액막의 거동을 동시에 계산하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 액적의 벽면 충돌 후 거동의 극한 조건인 액적 이탈 조건(escape 조건)과 탄성 조건(rebound 조건)을 적용하여 두 조건에 대한 해석 결과를 비교하였다.

3.1 해석 모델 및 조건

습분분리기 입구에서부터 출구까지의 내부 유동은 특정한 2상 유동 양식을 가지지는 않을 것으로 판단된다. 습분분리기 입구로는 상당량의 액체가 유입되기 때문에 액막류(Annular Flow)나 슬러그류(Slug Flow) 또는 천류(Churn Flow)가 형성될 것으로 예상된다. 소용돌이 날개를 지나면서 많은 양의 액적이 생성될 것이며, 이 중 대부분은 습분분리기 내부 유로를 통과하면서 회전력에 의해 벽면에 존재하는 유동홀로 빠져나갈 것이며, 기체의 유동을 따라 상승하는 액적들에 의해 중심부는 액적류(Droplet Flow)가 형성될 것으로 예상할 수 있다.

습분분리기 내 액적 거동 해석 시, 비산되는 액적의 양과 직경을 정확히 파악할 수 없기 때문에 다양한 크기의 액적을 임의로 생성시킨 뒤 각 액적의 거동을 평가하는 방식을 활용하였다. 습분분리기 입구로 공급되는 액적의 시작 위치를 통일하기 위하여, 습분분리기 입구에 parcel을 임의의 위치에 생성하고, 동일한 위치에 직경이 다른 5개(10 μm, 23 μm, 51 μm, 115 μm, 260 μm)의 액적을 모델링하였다. 각각의 크기에 대하여 2,000개의 parcel을 공급하였다. 모든 액적은 구형으로 간주되어 항력이 계산되었으며(Spherical Drag Law), 분산상의 유동이 연속상 유동에 영향을 미치지 않는 one-way coupling 기법이 적용되었다.

Table 4 Test Conditions for Two Phase Calculation

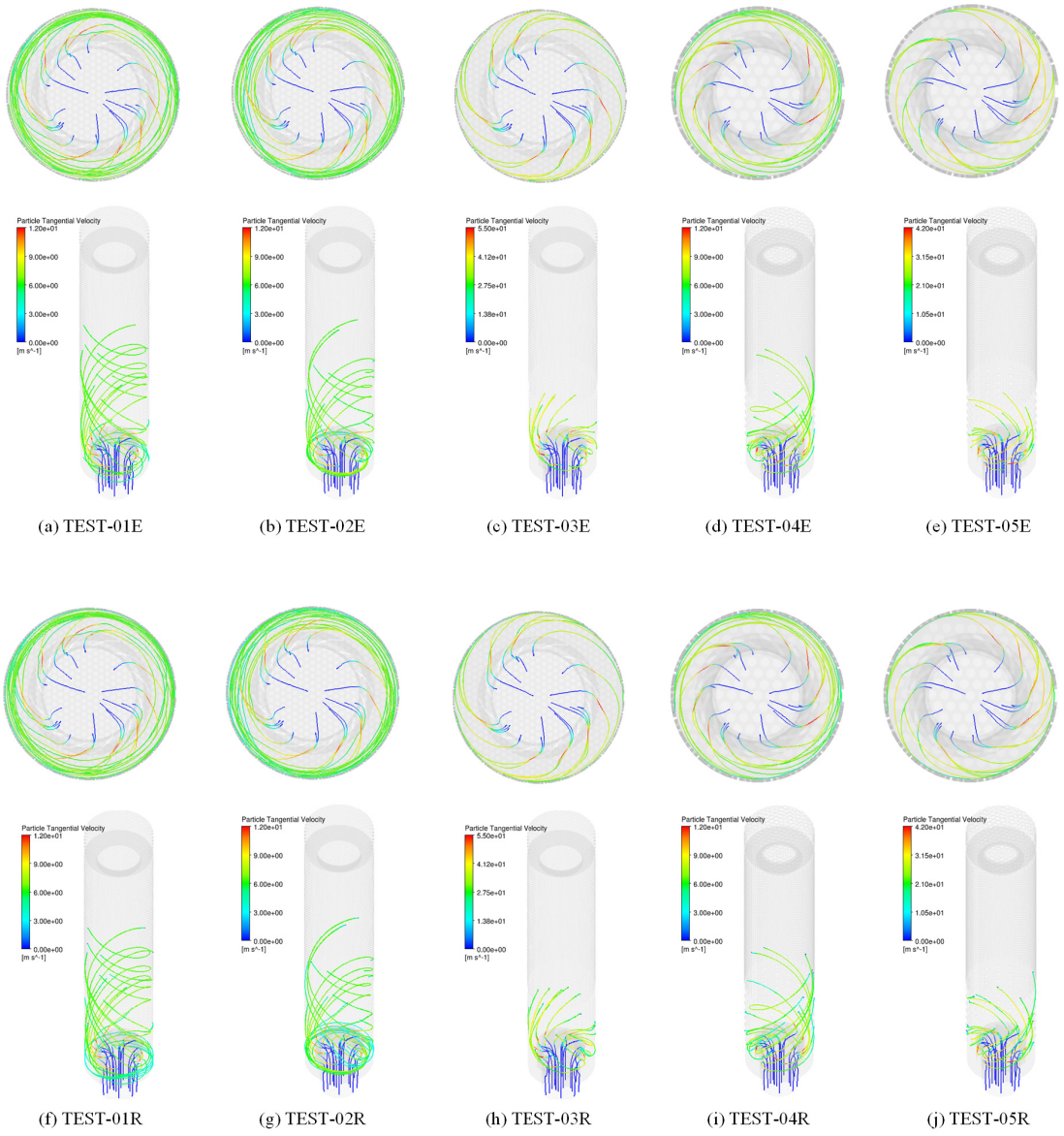
Test case	Scale	Continuous Phase (Flow Rate) [kg/s]	Dispersed Phase (Flow Rate) [kg/s]	Remark	Wall-impi-ngement Condition
TEST-1E	Full	Steam 5.044	Water 15.028	Prototype Condition	Escape
TEST-2E	Full	Air 0.194	Water 19.824	Velocity Preserved	
TEST-3E	Full	Air 1.056	Water 3.123	Centrifugal Force Preserved	
TEST-4E	1/2	Air 0.049	Water 4.956	Velocity Preserved	
TEST-5E	1/2	Air 0.185	Water 0.552	Centrifugal Force Preserved	
TEST-1R	Full	Steam 5.044	Water 15.028	Prototype Condition	Rebound
TEST-2R	Full	Air 0.194	Water 19.824	Velocity Preserved	
TEST-3R	Full	Air 1.056	Water 3.123	Centrifugal Force Preserved	
TEST-4R	1/2	Air 0.049	Water 4.956	Velocity Preserved	
TEST-5R	1/2	Air 0.185	Water 0.552	Centrifugal Force Preserved	

2상 유동 해석 조건은 Table 4와 같다. 벽면 충돌 조건이 이탈 조건의 경우, 회전 소용돌이 및 커버(Spinner Blade & Cover)에는 탄성 조건을 적용하고, 이외의 벽면에만 이탈 조건을 적용하였다. 탄성 조건의 경우 반발 계수(restitution coefficient)는 1로 설정하였다.

3.2 해석 결과

모든 계산 조건 하에서 Outlet4로 배출되는 액적의 양은 모두 0%로, 습분분리기 내부로 유입되는 모든 습분이 벽면에 위치한 유동홀로 분리되는 결과가 도출되었다.

Fig. 4 (a) ~ (e)는 10 μm 크기를 가지는 액적의 이탈조건에 대한 계산 결과로, 액적들이 소용돌이 날개 이후에 기류를 따라 Outlet1 유동홀 영역 및 Outlet2 유동홀 영역에 도달한 후에 일부는 유동홀을 통해 빠져나가고, 나머지 대부분의 액적은



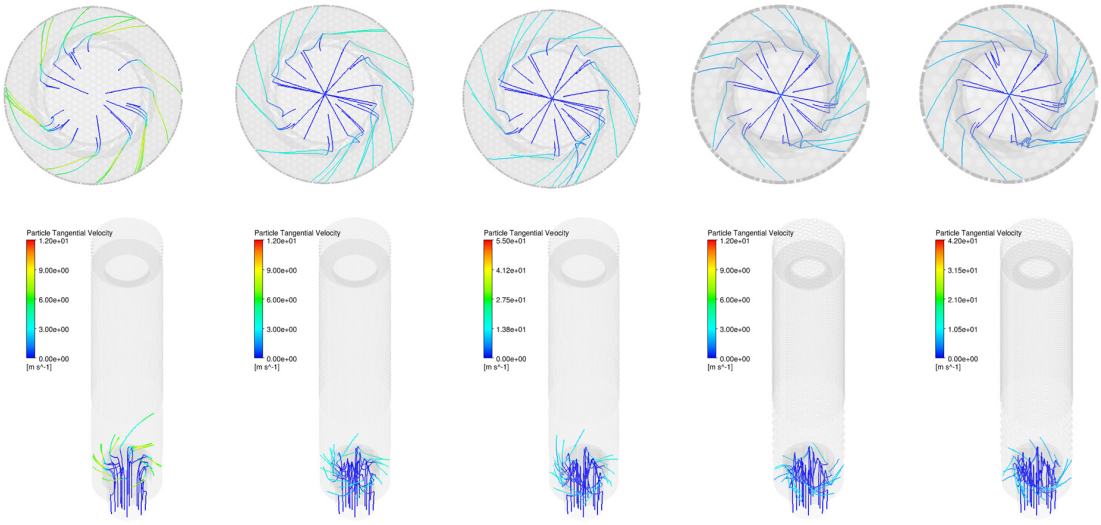
(a) TEST-01E (b) TEST-02E (c) TEST-03E (d) TEST-04E (e) TEST-05E

(f) TEST-01R (g) TEST-02R (h) TEST-03R (i) TEST-04R (j) TEST-05R

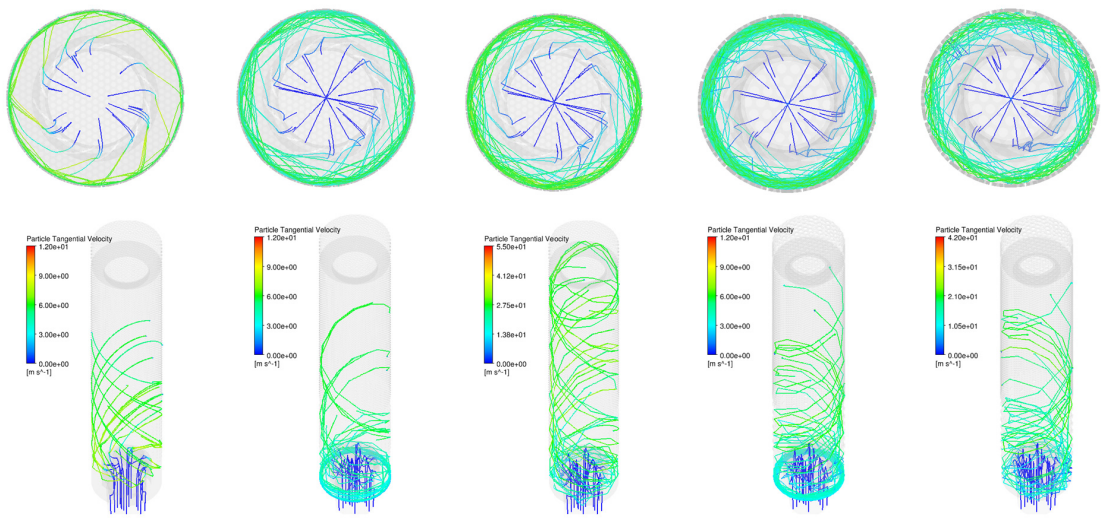
Fig. 4 Tangential Velocity Distribution of Droplets (10 μm)

벽면에 충돌 후 이탈하였다. 액적의 크기가 클수록 회전 유동에 의해 외곽으로 이동할 가능성이 커지게 된다. Fig. 5(a) ~ (e)는 260 μm의 크기를 가지는 액적의 이탈 조건에 대한 결과로, 소용돌이 날개에서 회전 유동이 형성된 이후 바로 주변의 벽면에 충돌한 이후 모든 액적이 이탈되는 것을 알 수 있다. 액적의 크기가 큰 경우, 액적의 회전관성력이 상대적으로 크기 때문에 상승하는 기류를 따라가지 않고 소용돌이 날개 근처의 외벽에 충돌하게 된다.

벽면에 탄성 조건을 설정한 경우, 액적의 크기가 작을 때에는 Fig. 4 (f) ~ (j)에서와 같이 이탈조건과 큰 차이를 나타내지 않았다. 작은 액적의 경우, 소용돌이 날개에서 외벽 쪽으로 이동된 액적



(a) TEST-01E (b) TEST-02E (c) TEST-03E (d) TEST-04E (e) TEST-05E



(f) TEST-01R (g) TEST-02R (h) TEST-03R (i) TEST-04R (j) TEST-05R

Fig. 5 Tangential Velocity Distribution of Droplets (260 μm)

이 벽면에 충돌하고 튕겨 나온 직후 외벽 근처의 연속상의 기류를 따라 이동한다. 외벽 부근의 기상의 유동은 대부분 유동홀을 통해 외부로 빠져나가게 되며, 기류를 따라가는 작은 액적 역시 기류와 함께 외부로 빠져나간다. 반면 액적의 크기가 커질수록 벽면 충돌 이후 기류를 따르지 않을 가능성이 커진다. Fig. 5(a) ~ (e)에 나타낸 바와 같이 액적이 큰 경우, 충돌한 이후에 기류를 바로 따라가지 않고 입사각과 같은 크기의 반사각을 형성하며 이동한다. 이후 수차례 벽면을 충돌한 이후 기류를 따라 유동홀을 통해 외부로 빠져나간다. Fig. 5(f) ~ (j)와 같이 완전 탄성을 설정한 극한 조건인 경우에도 모든 액적은 Outlet1과 Outlet2를 통해 외부로 배출되었으며, 최상단의

Outlet4로 빠져나가는 액적은 발생하지 않았다.

실제 원형 습분분리기의 운전 조건 하에서 생성되는 액적의 크기는 본 연구의 계산 조건에 비하여 다양할 것으로 예상된다. 다만, 본 계산 결과를 토대로 하였을 때, 다른 크기를 가지는 액적의 경우에도 대부분 벽면에 위치한 유동홀을 통하여 분리가 될 것으로 예상된다. 습분분리기 내벽에 액막이 생성되는 경우에는 본 계산의 조건과 같은 이상적인 충돌 후 거동을 보이지는 않겠지만, 두 극한 조건인 이탈(또는 stick) 및 완전 탄성(또는 rebound) 조건의 계산결과를 벗어나는 습분 분리 현상이 나타나지는 않을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 원전 증기발생기에 적용되는 CE형 습분분리기 내부 유동의 물리적 특성을 파악하기 위하여 수치해석이 수행되었다.

단상유동 해석 결과 원형과 같은 크기를 가지는 습분분리기의 경우, 증기 유동과 공기 유동 사이에 측면 유동홀을 통해 빠져나가는 기체의 유동 특성 및 압력강하 특성이 큰 차이를 나타내지 않았다. 1/2 척도비를 가지는 시험대에 대한 계산 결과 유동홀을 빠져나가는 유속은 원형과 큰 차이를 나타내지 않았지만, 압력 손실 계수가 상대적으로 크게 나타났다. 1/2 척도비를 가지는 실험대를 사용하는 경우 이와 같은 차이를 보상하기 위한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

2상유동 해석 결과, 모든 조건에서 습분분리기 최상단 출구로 배출되는 액적은 나타나지 않았다. 액적의 크기가 작은 경우 액적은 기류를 따라 이동하였으며, 이탈 조건과 탄성 조건간에 거동의 차이가 크게 나타나지 않았다. 액적의 크기가 큰 경우에는 소용돌이 날개를 지난 이후 액적이 기류를 따라가지 않고, 외벽으로 빠르게 이동하였다. 이탈조건의 경우 최하단 유동홀 영역에 다다르기 이전에 대부분의 액적이 벽면에 충돌하여 이탈되는 것으로 계산되었다. 반면, 탄성 조건을 부여한 경우 액적이 벽면과 충돌한 이후 내부로 이동하여 상승하는 특성을 보였다. 이 경우에도 모든 액적은 습분분리기의 최상단에 다다르기 전에 측면 유동홀을 통해 외부로 배출되었다.

본 연구의 결과는 추후 원형 및 1/2 척도비를 가지는 실험대를 활용하여 수행되는 물·공기 실험의 실험 조건 설정, 상사성 분석 등의 기초자료로 활용될 예정이다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20181510102390, 웨스팅하우스형 증기발생기 습분분리기 국산화).

Author contributions

W. S. Kim; Writing-original draft, Methodology. C Choi; Investigation. K. Kim; Project administration, Writing-review & editing.

References

1. G. Mauro, M. Sala and G. Hetsroni, 1990, "Improved Italian Moisture Separators (IIMS)", Nuclear Engineering and Design, Vol. 118, pp. 179-192. (https://doi.org/10.1016/0029-5493(90)90056-4)
2. K. Katono, N. Ishida, T. Sumikawa and K. Yasuda, 2014, "Air-water Downscaled Experiments and Three-dimensional Two-phase Flow Simulation of Improved Steam Separator for Boiling Water Reactor", Nuclear Engineering and Design, Vol. 278, pp. 465-471. (https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.08.006)
3. Z. Xiong, M. Lu, M. Wang, H. Gu and X. Cheng, 2014, "Study on Flow Pattern and Separation Performance of Air-water Swirl-vane Separator", Annals of Nuclear Engineering, Vol. 63, pp. 138-145. (https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.07.026)

4. G. B. Wallis, 1969, "One-dimensional Two-phase Flow", McGraw-Hill, Inc., United States of America, pp. 43-80.
5. D. Chisholm, 1983, "Two-phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers", G. Godwin in Associatioin with Instutute of Chemical Engineers, London and New York, pp. 120-140. (https://doi.org/10.1080/01457638508939624)
6. S. Y. Lee, B. J. Kim and M. H. Kim, 1993, "Two-phase Heat Transfer", DaeYangSa, pp. 71-96.
7. A. Zeghloul, A. Azzi, F. Saidj, A. Messilem and B. J. Azzopardi, 2017, "Pressure Drop Through Orifices for Single- and Two-phase Vertically Upward Flow – Implication for Metering", Journal of Fluids Engineering, Vol. 139, 031302-1. (https://doi.org/10.1115/1.4034758)