

습분분리기 압력강하 상사법칙 개발에 대한 실험적 연구 An Experimental Study on the Development of Similarity Method for the Pressure Drop of Moisture Separator

김기환*† · 김우식* · 이재봉*
Kih-Wan Kim*† , Woo-Shik Kim* and Jae-Bong Lee*

(Received 28 September 2020, Revision received 9 December 2020, Accepted 10 December 2020)

Abstract : The pressure drop of the moisture separator in a steam generator is the important key parameter to design the moisture separator and ensure the efficiency of a nuclear power plant. In this research, the low pressure air/water test facility was constructed to simulate the steam/water condition for the full-scale moisture separator. The experimental method based on the similarity law was presented and the pressure drop was measured for a mass quality ranged from 0.269 to 0.538 using the air/water test facility. The obtained results were verified by comparing with the results of the prototype condition. It is discovered that the viscosity ratio and two-phase centrifugal force are the factors influencing the pressure drop.

Key Words : Moisture separator, Similarity method, Pressure drop

— 기 호 설 명 —

그리스 문자

C : 비례상수
Eu : 오일러수 [-]
Fc : 원심력 [N/m³]
g : 중력가속도 [m/s²]
m : 비례상수
J : 겉보기 속도 [m/s]
R : 습분분리기 반경 [m]
Re : 레이놀즈 수 [-]

α : 기공율 [-]
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 v : 속도 [m/s]
 μ : 점성계수 [Pa-s]
 x : 건도 [-]

*† 김기환(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4217-0430) : 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부 책임연구원
E-mail : kihwankim@kaeri.re.kr, Tel : 042-868-8743
*김우식(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3937-5662) : 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부 선임연구원
*이재봉(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2705-3412) : 한국원자력연구원 혁신계통안전연구부 선임연구원

*† Kih-Wan Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4217-0430) : Korea Atomic Energy Research Institute, Innovative system safety research division, Principal Researcher.
E-mail : kihwankim@kaeri.re.kr, Tel : 042-868-8743
*Woo-Shik Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3937-5662) : Korea Atomic Energy Research Institute, Innovative system safety research division, Senior Researcher.
*Jae-Bong Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2705-3412) : Korea Atomic Energy Research Institute, Innovative system safety research division, Senior Researcher.

상첨자

- * : 무차원 변수
- a, b : 비례상수
- m, n : 비례상수

하첨자

- g* : gas (steam or air)
- h* : homogeneous model
- l* : liquid
- m* : model
- p* : prototype

1. 서 론

1.1 습분분리기 개요

가압수형 원자로(PWR, Pressurized Water Reactor)는 증기발생기(Steam Generator)로 유입되는 2차 계통수는 원자로의 핵분열 반응에 의해 가열된 고온고압의 1차 계통수와 열교환을 통해 비등하여 증기로 변환되고, 이렇게 발생한 증기가 터빈을 돌려 전기를 생산한다. 이 과정에서 수분을 많이 포함한 고온고압의 증기가 바로 터빈으로 들어가게 되면 터빈의 부식(Corrosion)과 터빈 블레이드의 파손 가능성이 높기 때문에 증기발생기 내부에서 증기의 수분을 제거해주는 습분분리 시스템이 구비되어 있다.

습분분리 시스템은 원심력을 이용하여 습분을 제거하는 1차 습분분리기(Primary Moisture Separator)와 셰브론 베인(Chevron Vane)을 적용한 구조물로 습분을 제거하는 2차 습분분리기(Secondary Moisture Separator or Steam Dryer)로 구성되어 있다. 최종적으로 1차 및 2차에 습분분리과정을 통하여 약 99.75% 이상의 증기건도(Steam Quality)를 갖는 증기가 터빈 쪽으로 빠져나가게 된다.

국내에 적용되는 증기발생기 습분분리기는 크게 CE(Combustion Engineering)사와 WH (Westinghouse)사에서 제작된 습분분리기가 주로 사용된다. CE형 습분분리기는 웨스팅하우스에서 두산중공업으

로 기술 이전되어 제작되어 공급되며, 국내원전 상당수에 적용되어 있다. Fig. 1은 국내 적용된 증기발생기의 개략도이며, Fig. 2는 CE(표준형)형 1차 습분분리기의 개략도이다.

습분분리기의 압력강하, 습분동반율 및 습분하강을 등은 습분분리기의 본연의 성능을 평가할 수 있는 중요한 설계 지표들이다.¹⁾ 특히 2상 유동의 압력강하는 습분분리기의 성능과 배치, 재순환율에 따른 발전소 효율 결정하는 중요한 변수이나 활용할 수 있는 실증실험 데이터가 거의 없다. 본 연구에서는 국내 가압형 경수로인 OPR, APR1400 등의 노형에 적용된 CE SYSTEM 80 Separator 및 CE Standard Dryer를 그 대상으로 한다.

CE 타입의 경우, 대략 140~160여개의 습분분리기가 설치되어 있고 증기발생기 전열관에서부터 습분분리기 입구까지 내부 구조물로 인하여 복잡한 물리적 현상을 수반한다. 또한 습분분리기는 대략 6.0~7.5 MPa, 290℃의 고온 고압 조건에서 운전되므로 실제 운전조건을 실험적으로 구현하는데 막대한 비용이 발생하므로 한계가 있다.

본 연구에서는 물/공기를 이용하여 습분분리기 입구에서 드라이어 입구까지의 차압을 측정할 수 있는 상사방법론을 제안하였고, 이를 바탕으로 다양한 크기를 가지는 습분분리기의 Full Scale까지 실험할 수 있는 실증장치를 구축하였다. 제안된 실험방법론을 활용, 물/공기를 이용한 실증 조건을 도출하고 건도 변화에 따른 압력강하 특성 실험을 수행하였다. 물/공기를 이용한 실험결과와 실증조건에서 수행한 물/증기의 실험결과를 비교 평가하여 공학적인 허용범위 내에서 동일한 관계에서 도출할 수 있는 Scale-Up 방법론의 가능성을 고찰하였다.

1.2 실험 방법론

일반적으로 단상유동에서 상사성을 고려하는 경우 대표적인 압력강하 무차원 수인 Eu 수로 압력강하 특성을 규명한다. 일례로 식 (1)과 같이 두 가지 서로 다른 모델의 경우 Eu 가 보존이 되면 서로의 압력강하 특성이 보존된다.

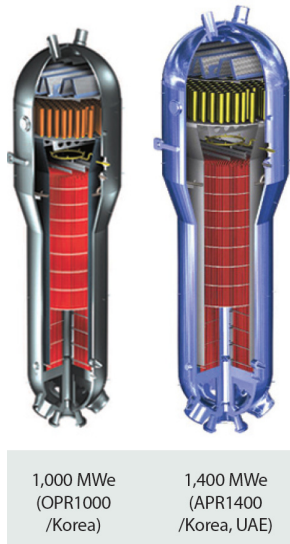


Fig. 1 Steam generator of PWR

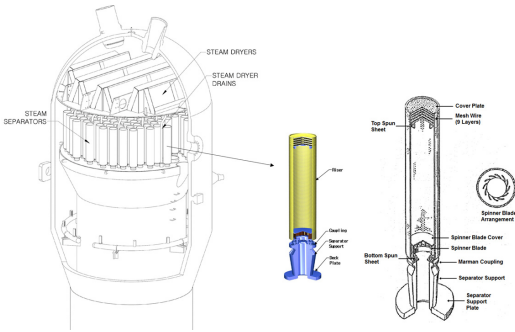


Fig. 2 Schematic of the moisture separator system

$$\frac{Eu_p}{Eu_m} = \left(\frac{\left| \frac{TRIANGLEP}{\rho v^2} \right|_p}{\left| \frac{TRIANGLEP}{\rho v^2} \right|_m} \right) \quad (1)$$

그러나 2상 유동이고, 특히 주요 대상이 습분분리기인 경우 작동 유량범위가 광범위 하므로 유동양식(Flow Regime)에 따라 압력강하 특성이 다르게 나타날 수 있다. 특히 습분분리기의 직경은 0.1 m가 넘는 대구경이므로 기존 문헌에서 알려진 대부분의 유동양식과는 상당히 다른 특성을 보인다.²⁾ 2상 유동일 경우, 상간의 영향으로 인하

여 모든 유동양식에 적용할 수 있는 대표적인 무차원 수인 Eu 를 명확히 정의하기 어려운 점이 있다.

실제 2상 유동에서 압력강하의 상사조건은 기하학적 상사, 운동학적 및 역학적 상사뿐만 아니라, 2상 유동 압력강하의 주요 특성을 나타내는 주요 변수인 액적의 체적분율, 액상 및 기상 of 겉보기 속도 등을 모두 동시에 만족시켜야 하나, 이는 이론적으로 불가능하므로³⁾ 대부분 기존 연구에서는 형상을 유지하는 조건에서 실험을 수행하고, 압력강하 특성을 경험적 상관식을 이용하여 결과를 도출하였다.

습분분리기의 종류가 다양하고 작동원리 또한 다양하므로 실험적 연구 또한 다양하게 이루어졌다. NUREG 보고서⁴⁾에서는 증기배관파단 사고 등의 천이상태에 적용할 수 있는 습분분리기 모델을 개발하기 위해 싸이클론 분리기, CE 정적 스윙 베인 분리기, WH 스윙 베인 분리기에 대하여 물-공기 실험을 수행한 연구가 정리되어 있다. 다만 상기의 실험에서는 실험의 목적에 따라 물/증기와 상사성과 척도비에 대한 심도깊은 고찰이 이루어지지 않았다. Sun⁵⁾은 WH 타입의 습분분리기의 원심안내깃을 포함하는 부분형상에 대하여 물/공기 상사 실험을 수행하였다. 습분분리기의 원심안내깃(Swirl Vane) 형상의 복잡성, 3D 2상 유동 수반 등으로 이론적 방법론이 불가하다고 판단하고 등가 스트레이트 튜브로 근사화하여 연구를 수행하였다. 기상의 체적유량과 압력강하의 상관식을 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$Eu = CRe_1^m Re_g^{-n} \quad (2)$$

이는 압력강하에 대한 지배적인 힘을 관성력과 점성력으로 정의하였다. 압력강하는 액상의 Re 수에는 비례, 기상의 Re 수와는 반비례 관계임을 보였고, 이를 통해 물/공기를 이용한 압력강하 상사가 가능하다고 보았다. 이는 액상의 유량이 클수록 유체와류, 마찰, 운동에너지 손실이 커지고 기상의 유량이 클수록 액적 분리 운동에너지 손실, 액막의 파동 마찰저항도 커지기 때문이다.

Liu⁶⁾는 Sun의 연구결과를 이론적으로 고찰하면서 속도비(J_l/J_g)는 액상의 부피 분율의 조건을 나타내고, 밀도비(ρ_l/ρ_g)는 압력조건에 따른 작동유체의 물성치를 대변하는 변수로 보았다. 물/증기의 실증조건과 물/공기의 밀도비의 차이가 대략 40배가 차이가 나고 Sun의 연구에서는 이러한 차이가 고려되지 않았으므로 추가적인 고찰이 필요하다는 결론을 도출하였다. Maruo⁷⁾는 작동압력이 증가함에 따라 압력손실계수가 증가하므로 물성치에 대한 영향이 필히 고려되어야 한다고 하였다. Liu는 Maruo의 연구결과로부터 식 (3)과 같이 Sun이 제안한 상관식에 밀도비를 추가한 수정 상관식을 제안하였다.

$$Eu = CRe_l^a Re_g^{-b} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^c \quad (3)$$

Sun과 Liu는 이론적, 실험적으로 물/공기, 물/증기 압력강하 상사법칙의 가이드를 제시하였지만, Liu의 결과 또한 Re 수에 반영되어 있는 밀도비를 독립적으로 상관식에 비례상수로 추가한 경우로써 그 결과는 크게 차이가 없으며, 이를 이용한 상사법칙을 습분분리기에 적용하기 위해서는 실험데이터를 이용한 검토가 필요하다.

한편, 습분분리기의 입구 및 주 유동이 발생하는 습분분리기 내부는 직경이 대략 0.3m 이고, 습분분리기의 운전조건이 저유량에서부터 고유량까지 다양하다. 상기의 연구결과처럼 2상 유동의 압력강하의 상관관계를 단순히 액상과 기상의 점성력과 관성력의 비로 지배적인 힘을 표현하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 습분분리기의 압력강하 상사를 위해 2상 혼합유체의 지배적인 구동력(Driving Force)을 각 상의 관성력의 비로 표현되는 기존 연구와는 달리 Katono⁸⁾가 BWR을 대상으로 제안한 방법과 유사하게 기상과 액상의 2상 유동 원심력(Centrifugal Force)로 정의한다. 이는 습분분리기 내부 유동은 수직 상향하는 2상 혼합 유체가 급격한 유로변경으로 강한 회전유동을 유발되고, 이로

인해 액적을 분리하는 과정을 거치므로 이에 상응하는 구동력이 압력강하에 지배적인 힘이 될 때 문이다. 또한 습분분리기의 입구에서는 물과 공기 혹은 증기가 혼합된 상태로 유입되므로 입구에서의 질량건도가 유지되어야 한다. 또한 시스템 압력에 따른 작동유체의 물성치가 달라지고 이에 대한 영향이 고려되어야 하므로, 본 연구에서는 액상의 질량분율, 원심력과 점성력을 고려한 방법론을 제안하며 이를 바탕으로 실험장치를 구성, 구축하였다.

질량 건도 및 2상 유동 원심력은 식 (4) 및 (5)와 같이 정의된다. 식 (6)은 균질밀도(Homogeneous Density), 식 (7)은 기공율(Void Fraction)의 정의이다. 식 (4)와 (5)에 대하여 건도와 2상유동 원심력이 1:1로 보존되어야 하므로 식 (5)에 대입하여 J_l 에 대해 정리하면 식 (8), (9)과 같이 각 상의 겉보기 속도의 향으로 표현된다. 본 연구에서는 각 상의 겉보기 속도를 독립변수로 하여 압력강하 측정 실험을 수행한다. 작동유체의 영향은 실험결과에서 후술한다.

$$x = \frac{\rho_g J_g}{\rho_g J_g + \rho_l J_l} \quad (4)$$

$$F_c = \frac{\rho_h (J_g + J_l)^2}{R} \quad (5)$$

$$\rho_h = \rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha) \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{x \rho_l}{x(\rho_l - \rho_g) + \rho_g} \quad (7)$$

$$J_{gm} = \left| \left(\frac{RF_c}{\rho_m} \right)^{0.5} \left(\frac{x \rho_l}{x \rho_g + (1-x) \rho_g} \right) \right|_p \quad (8)$$

$$J_{lm} = \left| \frac{1-x}{x} \frac{\rho_g J_g}{\rho_l} \right|_p \quad (9)$$

2. 물/공기 습분분리기 실험장치

$$J_{g\ or\ l}^* = \frac{J_{g\ or\ l}^* \rho_{g\ or\ l}^{0.5}}{(g2R(\rho_l - \rho_g))^{0.5}} \quad (11)$$

2.1 장치개요

증기발생기 습분분리기의 성능을 정량적으로 평가하기 위하여 물/공기 습분분리기 성능평가 (PEMS, Performance Evaluation of a Moisture Separator) 실험장치를 구축하였다. PEMS는 습분분리기의 입구로부터 2차 습분분리기인 드라이어 (Dryer) 하부까지 모의할 수 있도록 설계가 되었고, 압력강하 실험을 위해 유동저항을 고려 설계 발전소와 동일한 형상을 유지하였다. 습분분리기 입구에 유입되는 물과 증기의 혼합유체는 물과 공기로 모사한다. PEMS의 설계압력 및 온도는 대략적으로 5 bar, 60°C이다(Table 1). Fig. 3은 전체 실험장치의 개략도를 나타내며, 최대 높이는 대략적으로 13 m이다.

본 실험장치는 기계계통과 계측제어 계통으로 나누어지며, 기계계통은 장치운전에 필수적인 유체계통과 습분분리기를 장착하는 주요 실험대로 구분된다. 유체계통의 주요 구성기기는 실험대, 물주입부, 공기주입부, 이상유체혼합 기구 등으로 구성된다. 펌프를 이용하여 주입되는 물과 블로워를 통해 주입되는 공기는 실험대 하단의 혼합기구를 통하여 이상유체로 혼합된다. 혼합기구는 액막이 액적에 미치는 영향을 최소화할 수 있도록⁹⁾ 1-fluid 스프레이 노즐로 분사되도록 설계하였다. 이상유체로 혼합된 물/공기 유체는 상당길이의 발달구간(대략 3 m)을 거쳐 실험대로 유입되고 이상유체의 혼합유체 발달구간은 대략 1 m 이내이므로 습분분리기 입구에서는 충분히 혼합된 상태로 유입된다고 유추된다. 본 실험장치의 블로워의 성능을 기초로 하여 다음식과 같이 최대 공급 가능한 물의 용량은 Wallis¹⁰⁾의 액적적인 상관식인 식 (10)과 무차원화된 걸보기속도(식 (11))를 이용하였고, 기상에 의해 수직방향으로 견인되는 최대 허용양을 계산하여 물주입 펌프의 용량을 선정하였다.

$$J_g^{*1/2} + mJ_l^{*1/2} = C \quad (10)$$

실험대는 국내에 적용된 다양한 형태의 습분분리기를 실험할 수 있도록 0.14 m에서 최대직경 0.6 m, 높이 3.4 m의 습분분리기가 장착이 가능하도록 분리형 설계를 하였으며, 유동발달 구역은 습분분리기의 크기에 따라 실험이 가능하도록 다양한 직경으로 제작하였다.

계측제어 계통은 장치운전에 필수적인 계측기와 습분분리기의 효율 및 압력강하를 정량적으로 측정할 수 있는 계측제어 시스템으로 구성되며, 측정된 데이터의 취득 및 처리를 위한 자료취득 계통으로 나누어진다.

PEMS는 정상상태(Steady State) 조건에서 실험이 수행되었다. 정압, 차압, 수위, 유량, 온도 등의 계측변수(Fig. 4)의 Sampling Rate는 1 khz이며, Engineering Unit으로 변환되어 저장된다. 물과 공기의 주입 유로에 설치된 유량계, 정압계, 열전대를 기초로 하여 건도, 기공율(void fraction), 균질 밀도(homogeneous density), 원심력 등이 실시간으로 산정되어 모니터링과 데이터 저장이 동시에 수행될 수 있도록 구성하였다.

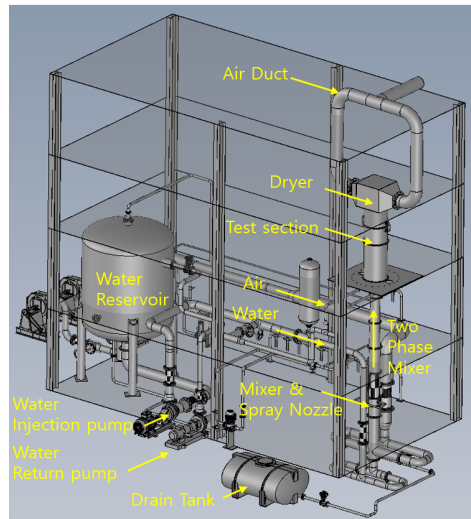


Fig. 3 Schematic of PEMS test facility

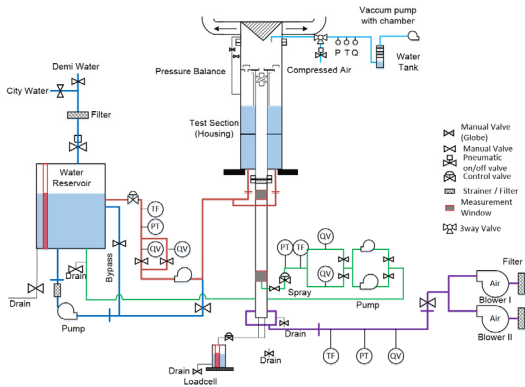


Fig. 4 Instrumentation of PEMS test facility

Table 1 Design specifications of PEMS

Parameter	Value of Range
Separator Diameter	0.14 ~ 0.6m
Separator Length	0.79 ~ 3.4m
Operating Pressure	up to 0.5 MPa
Operating temperature	up to 60 °C
Water mass flow rate	36 m ³ /hr (ref. 1 bar)
Air mass flow rate	7000 m ³ /hr (ref. 1 bar)

2.2 실험대

본 연구에서는 실제 국내에 적용중인 표준형 가압경수로에 사용되는 CE Full Scale 습분분리기를 실험대로 사용하였다.

Fig. 5와 같이 CE 타입의 습분분리기는 입구에서 유입되는 2상유체 혼합물이 지지판(Can Deck)에 장착된 분리날개(Spinner Blade)로 유입되면서 회전유동이 발생하며, 이를 통하여 발현되는 회전 유동은 Can을 통해 수직으로 상승한다. 습분분리기 외벽에는 무수히 많은 유동홀이 존재하므로 기류에 의해 견인되는 액적은 원심력에 의하여 유동홀을 통해 외부로 방출되며 습분을 제거한다. 습분분리기의 유동홀은 하단부에서 가장 크며 상부 영역에 위치한 유동홀은 상대적으로 작지만 유동홀의 개수가 많다. 유동홀로 배출되지 못한 나머지 2상 혼합물은 계속 상향 이동하게 된다. 습분분리기 최상단에는 원심력으로 분리되지 않고 상승/견인되는 액적을 분리하기 위해 8개 층의

강선격자판(Wire Mesh)과 덮개판(Perforated Cover Plate)이 설치되어 있으며, 유동저항으로 작용하여 잔류하는 액적의 충돌로 액적이 분리되도록 되어 있다. 최종적으로 습분분리기 출구에서 상승하는 2상 유체 혼합물의 건도는 대부분 습분분리기의 종류에 따라 다르지만 표준형의 경우, 최소 97% 이상으로 상당량의 기상이 대부분이다. 본 연구에서는 습분분리기 입구에서 2차 습분분리기 입구까지의 차압을 측정하며, 드라이어는 형상만으로 모의하였다. Fig. 6의 습분분리기 입구에서 출구까지의 측정지점을 개략도로 나타내었으며, 정압과, 열전대, 수위계등이 도시되어 있다.

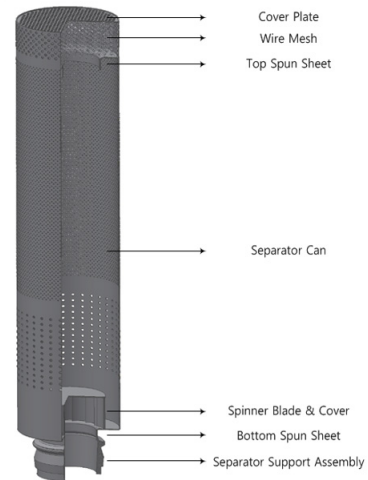


Fig. 5 Schematic of the Moisture Separator

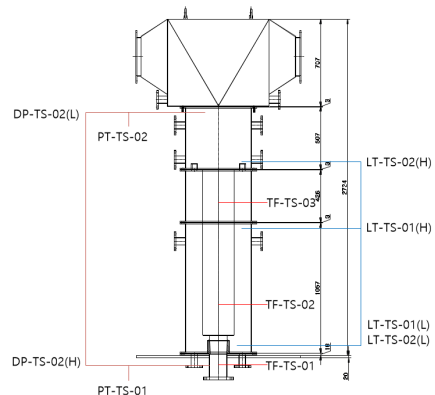


Fig. 6 Instrumentation of the Moisture Separator

3. 압력강하 실험

3.1 실험조건

본 실험에서는 최대압력 2 bar, 작동온도 60°C 이내에서 시스템의 온도, 압력, 유량이 일정한 정상상태 실험을 수행하였다. CE타입의 습분분리기의 경우 습분분리기 CAN 외부의 수위는 실제로 액적이 분리되어 하강하므로 별도로 모의하지 않는다.

Fig. 7은 실증 조건에서 1차 습분분리기의 입구에서부터 드라이어 입구사이까지의 차압을 건도와 액상의 Mass Flux에 따른 압력강하를 로그 스케일로 도시한 그림이다. 액상의 Mass Flux는 최대유량조건을 기준으로 무차원화하여 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 건도가 증가, 액상의 Mass Flux가 증가함에 따라 다소 데이터의 산포도가 존재하지만 일정한 경향을 나타낸다.

본 연구에서는 실증 실험데이터와 비교/검증하기 위해 실험조건이 상세히 명시되어 있는 활용 가능한 6개의 실증조건은 Table 2와 같다. 실증조건에 대응하는 실험조건을 식 (4), 식 (8)~(9)를 이용하여 계산하며 Table 3에 제시하였다. 단 여기서 물과 공기의 밀도는 1기압, 20°C 조건이며, PEMS 장치에서 독립제어 변수는 물과 공기의 유량이므로, Table 2와 같은 건도와 원심력을 가지도록 주요 운전 변수인 물과 공기의 걸보기 속도에 대하여 표기하였다.

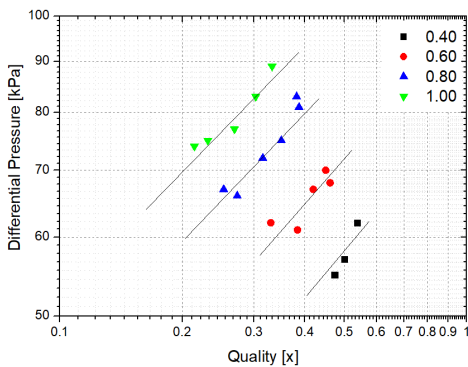


Fig. 7 Differential Pressure under Steam/Water Conditions

Table 2 Test Martix

No.	Non-Dimensional Water Mass Flux [-]	Quality [-]	Two-Phase Centrifugal Force [N/m ³]
1	0.40	0.538	6509.3
2	0.40	0.501	5271.7
3	0.41	0.474	4595.2
4	0.60	0.420	7264.4
5	0.80	0.315	7352.5
6	0.99	0.269	8628.0

Table 3 PEMS Test Conditions (1atm, 20°C)

No.	J_f [m/s]	J_g [m/s]	α [-]	ρ_m [kg/m ³]
1	0.0210	20.41	0.9990	2.23
2	0.0212	17.72	0.9988	2.39
3	0.0215	16.09	0.9987	2.53
4	0.0316	19.04	0.9983	2.86
5	0.0432	16.59	0.9974	3.80
6	0.0542	16.59	0.9967	4.45

3.2 실험결과

습분분리기 실증실험의 운전조건에 대하여 운전기간동안 조건의 적합성 여부를 확인하기 위해 다음과 같이 주요 측정변수의 정상상태 허용범위를 정의하였다. 각 측정된 변수들의 건전성은 시간에 따른 평균값 대비 표준편차의 비인 변동계수(Coefficient of Variation)의 범위로 정의되며 실제 운전조건의 실증시험의 허용조건을 준용하여 결정하였다. 실험결과 모든 조건에서 허용변동범위 내에서 실험이 수행이 되었다.

- 압력 및 유량 : ± 3% (Max. ±5%)
- 온도 : 3% (Max. ±5%)

PEMS 실험장치는 Table 3의 조건에 부합하기 위하여 운전되며, 블로워와 물펌프의 성능곡선에 따라 시스템의 압력이 변한다. 시스템의 압력과 온도가 변하면 그에 따른 유체의 물성치도 변하므로 Table 3에서 도시된 실험조건은 건도와 원심력은 일정하지만 이에 대응하는 액상과 기상의

조건표는 계속 변한다. 제어화면에서 실시간으로 계측되는 온도 및 압력은 조건식에 입력되어 실시간으로 계산이 수행되며, 상기 조건이 만족할 때까지 실험장치는 정상상태를 유지하면서 겉보기 속도를 맞추기 위해 Iteration으로 목표값을 찾아간다. Table 4는 물/공기 실험결과이다. Table 1의 실제 운전조건대비 건도를 일정하게 유지하였으며, 2상유동 원심력의 경우 상대오차가 0.51~2.07%로 실증조건과 거의 동일한 실험조건을 재현하였다. 시스템의 압력과 온도가 서로 상이하므로 반복해로 구한 균질밀도와 속도값은 다소 차이가 있다.

Table 4의 실증실험데이터와 비교하기 위한 실험외에 추가적으로 압력강하 특성을 살펴보기 위해 실험을 수행하였다. PEMS의 블로워와 물주입 펌프의 가용범위 중 20~90% 범위 내에서 임의의 조건에서 34 case에 대하여 실험을 수행하였다. 실험결과는 Fig. 8에 로그스케일로 도시하였고, 실증조건과 유사한 일반적인 압력강하 경향성을 보임을 확인할 수 있었다. 2상유동 압력강하에서 각 상간의 영향과 기존 연구에서 제안한 상사법칙의 적용성을 살펴보기 위해, Fig. 7과 8의 데이터를 이용하여 도시를 해보면 Fig. 9와 10과 같다. 여기서 기존 Sun의 방법론을 데이터를 근거로 상관식을 도시하였으며, 적용수식은 다음과 같이 식 (12)는 물/증기, 식 (13)은 물공기 결과이다. Fig. 9에서 낮은 Re수에서는 기존 Sun의 상관식으로 충분한 근사를 할 수 없다. 이는 낮은 기상이 Re수에서는 유동양식이 달라지고 Sun 상관식에는 작동 유체의 물성치가 고려되지 않았기 때문이다. 반면 물공기는 원심력 일정조건으로 기상의 겉보기 속도가 실증조건 3~4배에 달하므로 일정한 경향성을 가진다.

$$Eu = 87.62Re_l^{1.034}Re_g^{-0.914} \quad (12)$$

$$Eu = 8.49Re_l^{0.413}Re_g^{-0.252} \quad (13)$$

식 (12)와 같이 물/증기 실증조건에서는 액상과 기상의 Re 수 상관식의 비례상수는 거의 유사한

값으로 나타난다. 반면, 물/공기의 경우 액상의 Re 수의 비례상수가 기상보다 대략 2배 차이가 남을 알 수 있다. 이는 물/공기와 물/증기의 작동유체와

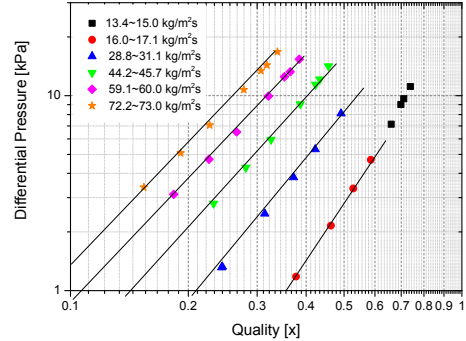


Fig. 8 Differential Pressure under Air/Water Conditions

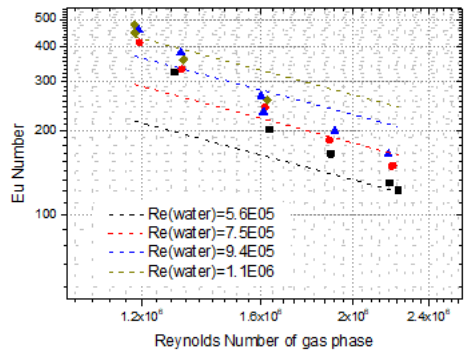


Fig. 9 Differential Pressure and Correlations for the Steam/Water Conditions

압력강하 특성이 서로 다르므로 물/공기의 실험 결과를 Scale-Up 하기에는 한계가 있다. 기존 연구에서는 각 상의 점성력과 관성력의 비인 Re 수로 대변하였지만, 본 연구에서 적용된 방법론은 작동 유체의 속도의 제곱으로 유동의 모멘텀이 표현되는 원심력 일정조건을 제안하였다. 다만, 이는 점성력에 대한 영향이 고려되지 않았으므로 Sun과 Liu의 연구를 바탕으로 다음과 같이 점성력에 대한 비를 비례상수로 추가하였다.

$$\frac{TRIANGLEP_p}{TRIANGLEP_m} \sim f\left(\left(\frac{\mu_{lm}}{\mu_{lp}}\right)^a \left(\frac{\mu_{gp}}{\mu_{gm}}\right)^b\right) \quad (14)$$

실험조건에 따라 수행된 결과를 무차원화된 측정된 차압비와 점성비에 대하여 도시를 하면 Fig. 11과 같다. 각 상의 점성력의 비로 표현되는 비례상수는 특별한 물리적 근거가 없이는 모두 unity로 도시하여 결과를 비교하였고, 두 점성비의 곱은 대략 10~11 사이 값을 가진다. 원심력이 가장 낮은 T3(17.8%)을 제외하고는 두 무차원 수의 차이가 최대 11% 이내로 확인됨을 알 수 있다. 원심력이 작은 경우, 상대적으로 점성력과 액상과 기상에 의한 계면에 의한 영향의 중요도가 높을 것으로 유추된다. 물/공기 실험에서 측정된 차압을 점성비의 곱으로 산정하여 Scale-Up한 결과는 Fig. 12와 같다. 활용가능한 비교데이터가 한정되었지만, 건도 및 액상의 Mass Flux에 따라 전반적으로 기존 실증실험데이터의 산포도를 고려할 때 공학적으로 유사한 결과를 도출하였음을 알 수 있었다.

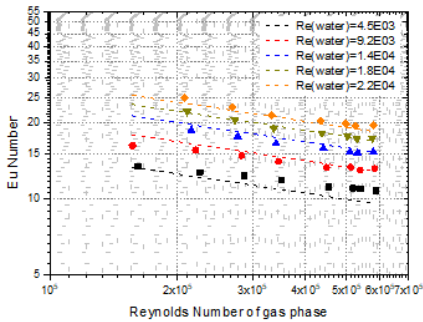


Fig. 10 Differential Pressure and Correlations for the Air/Water Conditions

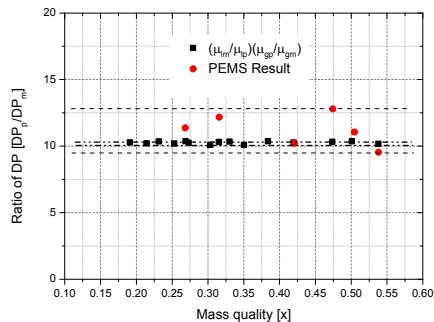


Fig. 11 Comparison of the Pressure Ratio and Viscosity Ratio

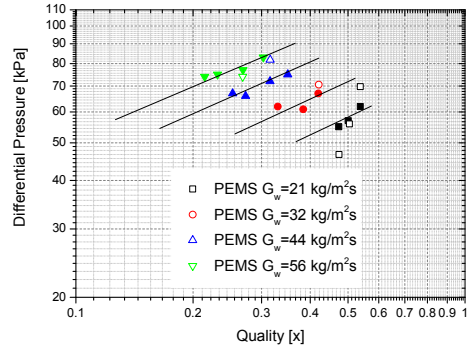


Fig. 12 Differential Pressure under Air/Water Conditions

Table 4 PEMS Test Results

No.	Quality [-]	Two-Phase Centrifugal Force [N/m ³]	J_f [m/s]	J_g [m/s]	ρ_m [kg/m ³]
1	0.538	6476.0	0.0218	19.62	2.40
2	0.505	5380.2	0.0219	17.41	2.53
3	0.474	4598.0	0.0221	15.66	2.67
4	0.421	7221.3	0.0327	18.31	3.07
5	0.316	7408.2	0.0450	16.09	4.06
6	0.268	8806.3	0.0571	16.10	4.82

5. 결론

본 연구에서는 국내에 적용되는 가압경수로의 증기발생기 습분분리기의 압력강하를 측정하기 위한 실증실험장치를 구축하였다. 습분분리기의 고온/고압에서 작동하는 실험조건을 습분분리기 입구에서의 질량분율인 건도와 습분분리기 내부 유동의 주요 모멘텀인 원심력을 유지하는 상사법칙을 이용하여 저온/저압의 물/공기를 이용한 실험방법론을 적용하였다. 온도, 압력, 유량이 일정한 정상상태 조건에서 변동허용범위 내에서 실험을 수행하였으며, 실제 실험데이터 중 비교 가능한 영역에서 압력강하 측정실험을 수행하였다. 동시에 압력강하 특성을 구명하기 위해 추가 실험을 수행하여 기존 문헌에서 제안된 상사법칙의 적용성을 살펴보았다. 본 연구에서 수행한 실험결과와 실증 실험데이터를 비교/평가한 결과, 본 연

구의 제안된 상사방법론으로 실증 조건의 압력강하를 예측할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 이는 향후 다양한 습분분리기에 대하여 압력강하 특성에 대한 성능 평가가 가능할 것으로 기대된다. 다만 상사법칙 적용에 따른 왜곡 현상에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

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

Author contributions

K. W. Kim; Project administration, Writing-original draft, Formal analysis and Investigation, W. S. Kim; Methodology, J. B. Lee; Investigation.

References

1. J. I. Kim, M. Y. Kim and H. S. Bae, 2006, "An Experimental Investigation for the Moisture Separation System of a Steam Generator for Nuclear Power Generation", Proceedings of ICAPP, Reno, USA, paper 6103.
2. J. P. Schlegel, P. Sawant, S. Paranjape, B. Ozar, T. Hibiki and M. Ishii, 2009, "Void Fraction and Flow Regime in Adiabatic Upward Two-Phase Flow in Large Diameter Vertical Pipe", Nuclear Engineering and Design, Vol. 41, No. 29, pp. 2864-2874. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.08.004>)
3. S. J. Green and G. Hetsroni, 1995, "PWR steam generators", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 21, pp. 1-97. ([https://doi.org/10.1016/0301-9322\(95\)00016](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00016))
4. U.S. NRC, 1987, "Steam Separator Modeling for Various Nuclear Reactor Transients", NUREG/CR-4922, EPRI NP-5272.
5. F. T. Sun et al., 1995, "The investigation on performance of steam generator stationary vane separator". Chin. J. Nucl. Sci. Eng, Vol. 15, No. 3, pp. 213-219.
6. L. Liu and B. Bai, 2016, "Scaling law for gas-liquid flow in swirl vane separator", Nuclear Engineering and Design, Vol. 298, pp. 229-239. (<http://dx.doi.org/10.9726/kspsc.2016.20.2.066>)
7. 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](https://doi.org/10.1016/0029-5493(90)90056-4))
8. K. Katono, N. Ishida, T. Sumikawa and K. Yasuda, 2014, "Air-water Downscaled Experiments and Three-dimensional Two-phase Flow Simulations of Improved Steam Separator for Boiling Water Reactor", Nuclear Engineering and Design, Vol. 278, pp. 465-471. (<http://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.08.006>)
9. Z. Xiong, M. Lu, M. Wang, H. Gu and X. Chen, 2014, "Study on Flow Pattern and Separation Performance of Air-water Swirlvan Separator", Annals of Nuclear Energy, Vol. 63, pp. 138-145. (<http://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.07>)
10. G. B. Wallis, 1969, "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw Hill. (<https://doi.org/10.1002/aic.690160603>)