

## 증기발생기 습분분리기 습분동반율에 대한 물/공기 실험적 연구

김기환\*<sup>†</sup> · 김우식\* · 이재봉\* · 어동진\* · 최해섭\* · 전우진\* · 신용철\*

### An Air/water Experimental Study on the Moisture Carry Over for the Moisture Separator of a Steam Generator

Kihwan Kim\*<sup>†</sup>, Wooshik Kim\*, Jaebong Lee\*, Dong-Jin Euh\*, Hae-Seob Choi\*,  
Woo-Jin Jeon\*, Yong-Chul Shin\*

*Key Words* : Moisture Separator of a Steam Generator(증기발생기 습분분리기), Moisture Carry Over(습분동반율), Air/water experiment(물/공기 실험)

#### ABSTRACT

The separation efficiency of the moisture separator in a steam generator is the most important key parameter to ensure the safety of turbine and to obtain high efficiency in a nuclear power plant. The objective of this research is to investigate which experimental method can be used for evaluating the performance of the separator, namely moisture carry over (MCO), of the prototype separator. The air/water test facility based on the similarity law was constructed and developed an experimental method to quantify the MCO. For a various mass quality ranged from 0.277 to 0.382, several experiments were carried out to evaluate the MCO and to verify the experimental method. The obtained results were compared to data on the prototype condition and showed a good agreement with that of the prototype conditions.

#### 1. 서 론

가압수형 원자로 (PWR, Pressurized Water Reactor)는 핵연료에서 발생한 핵분열 (Nuclear Fission)을 통해 원자로 냉각수로 가열하는 원자로 냉각수 계통 (Primary Coolant System)과 터빈 (Turbine)을 구동하는 2차 계통 (Secondary Coolant System)이 분리되어 있어, 이를 혼용하는 비등수형 원자로 (BWR, Boiling Water Reactor)와 달리 증기발생기 (Steam Generator)가 필수적으로 필요하다. 원자로에서 핵분열 반응에 의해 발생한 열에너지가 가압상태의 물에 전달 되면 고온고압 상태의 1차 계통수가 증기발생기로 이동하게 된다. 증기발생기로 유입된 1차 계통수는 전열관 (Heat Transfer Tube)을 따라 이동하며 증기발생기 튜브 외부의 2차 계통수와 전열관을 통해 열 교환이 이루어지고, 가열된 증기발생기 2차 계통수는 비등하여 증기로 변화되고 이렇게 발생한 증기가 터빈을 돌려 전기를 생산한다.

하지만 이 과정에서 수분을 많이 포함한 고압의 증기가 바로 터빈으로 들어가게 되면 터빈의 부식(Corrosion)과 같은 발전 계통의 손상이 발생하거나 충격으로 인해 터빈 블레이드의 파손 가능성이 높기 때문에 증기발생기 내부에서 증기의 수분을 제거해주는 습분분리 시스템이 구비되어 있다. 습분분리기는 수직상승하던 습증기가 1차 습분분리기 (Primary Moisture Separator)에서 유발되는 회전운동을 통해 발생한 원심력을 이용하여 습분을 제거해주며, 2차 습분분리기 (Secondary Moisture Separator or Steam Dryer)는 증기 건조기로서 굴곡진 쉘브론 베인 (Chevron Vane)을 적층한 구조물로 흘러가던 증기가 쉘브론 베인 표면에 부딪혀서 습분을 제거하게 된다. 1차 및 2차에 습분분리과정을 통하여 약 99.75% 이상의 증기건도 (Steam Quality)를 갖는 증기가 터빈 쪽으로 빠져나가게 된다.

국내에 적용되는 증기발생기에는 크게 CE (Combustion Engineering)사와 WH (Westinghouse)사에서 제작된 습분분리기가 주로 사용된다. 본 연구에서는 국내 가압형 경수로

\* 한국원자력연구원 (Korea Atomic Energy Research Institute)

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail : kiwhankim@kaeri.re.kr

인 OPR, APR1400등의 노형에 적용된 CE SYSTEM 80 Separator 및 CE Standard Dryer를 그 대상으로 한다. CE형 습분분리기는 웨스팅하우스에서 두산중공업으로 기술 이전되어 제작되어 공급되며, 국내원전 상당수에 적용되어 있다. Fig. 1은 국내 적용된 증기발생기의 개략도와 내부에 설치된 습분분리기이며, Fig. 2는 CE(표준형)형 습분분리기의 개략도이다.

본 연구에서는 1차 습분분리기에 대하여 증기진도를 대변하는 측정지표인 습분동반율(MCO, Moisture Carry Over)에 대한 실험적 연구에 대하여 기술한다. 습분분리기의 압력강하, 습분동반율 및 습분하강율 등의 주요 성능지표 중에서 습분분리 본연의 성능을 평가할 수 있는 가장 중요한 지표이다.

CE 타입의 경우 140여개의 습분분리기의 배치에 따라 혹은 발전소의 운전조건에 따라 운전조건의 범위가 상당히 넓으므로 익히 알려진 거의 대부분의 2상 유동 양식(Flow Regime)을 가지며, 증기발생기 전열관에서부터 습분분리기 입구까지 내부 구조물로 인하여 상당히 복잡한 물리적 현상을 수반한다. 그러므로 증기발생기의 액적생성부터 습분분리기를 거쳐 증기발생기 출구에 이르기까지 습분동반율을 해석적으로 구현하는 방법은 정확성을 보장하기에 한계가 있다. 습분분리기는 대략 6.0~7.5MPa, 290°C의 고온 고압 조건에서 운전되며, 습분분리에 유입되는 물/증기 혼합유체의 유량은 수~수십 kg/s로 상당량의 유량조건을 가진다. 이와 같은 실제 운전조건을 실험적으로 구현하기 위해서 장치의 대형화가 필요할 뿐만 아니라 막대한 비용이 발생하므로 활용하는데 한계가 있다.

그러므로 기존의 많은 연구에서는 물과 증기를 대신하여 물과 공기를 작동유체로 사용하거나 형상을 기하학적으로 축소한 Reduced Scale 모델을 사용하여 습분동반율을 실험적으로 확인하는 시도를 하였다. 이를 위해서는 고온/고압의 물/증기 유동과 저온/저압의 물/공기 유동간의 상사법칙 개발이 선행되어야 하나 2상유동의 양식 뿐만 아니라 액적의 거동, 분포, 습분분리기의 형상 등 무수히 많은 변수를 고려해야 함에도 불구하고 이에 대한 면밀한 분석은 부족한 실정이다.

습분분리기의 종류가 다양하고 작동원리 또한 다양하므로 실험적 연구 또한 다양하게 이루어졌다. NUREG 보고서<sup>1</sup>에서는 증기배관파단 사고 등의 천이상태에 적용할 수 있는 습분분리기 모델을 개발하기 위해 싸이클론 분리기, CE 정적 스월 베인 분리기, WH 스월 베인 분리기에 대하여 물-공기 실험을 수행한 연구가 정리되어 있다. 모든 실험은 축소 모델의 실험으로써 주로 파단조건등의 사고시나리오에 따라 각 상의 겹보기 속도, 강수부 수위, 차압등의 수력학적 거동에 대하여 실험을 수행하였다. 상기의 실험에서는 실험의 목적에 따라 물/증기와 상사성과 척도비에 대한 심도깊은 고찰이 이루어지지 않았다.

물/공기에 대한 상사성에 대한 고찰은 Maruo 등<sup>2</sup>이 대형 실험루프를 이용하여 이루어진 사례가 있다. 실증 스케일로 ARAMIS 실험루프를 구성하였으며 최대운전압력 0.3 MPa, 시험부는 높이 13.4 m 규모로 물은 195 kg/s, 공기는 4.5 kg/s까지 공급이 가능하도록 설계가 되었다. 상사시 고려사항으로는 2상 유동의 체적유속(Volumetric Two-Phase Flux)과 기상의 겹보기속도(Superficial Velocity)가 우선적으로 고려되었다. MCO를 측정하는데에  $Li^+$  이온농도를 이용하였다. 등속흡인노즐을 사용하여 기상의 겹보기 속도가 일정한 조건에서 실험을 수행하였으며, 실험결과 실증조건과 유사한 결과를 도출하였다고 보고하였다. 이들은 0.1 MPa의 운전압력에서 최대 165kg/s의 물과 저압의 공기를 이용하여 2상 혼합물을 구현하였으나 모든 주입된 물(액적)이 습분분리기 입구까지 도달하는 것은 물리적으로 불가능할 것으로 예상되므로 추가적인 공학적인 검토가 필요하다. PWR에 적용된 습분분리기는 아니지만 BWR의 습분분리기의 Swirler 설계 최적화를 위하여 1:3.5 척도비의 물-공기 실험장치를 구축하여 유동양식과 MCO를 측정한 연구가 수행되었다<sup>3</sup>. Swirler가 있는 일부의 형상만 구현하였으며, 미립화 기구를 이용하여 물과 공기를 혼합하여 액막이 액적크기에 미치는 영향을 최소화 하고자 하였다. 이들은 분리효율이 유동양식에 의해 지배적인 영향을 받는다는 연구결과를 도출하였다. Swirler의 성능 검증을 위해 1:2 척도비의 물-공기 축소실험을 수행하여 성능 개선을 평가한 연구가 수행되었다<sup>4</sup>. 기상의 겹보기 속도와 2상 유동 원심력(Centrifugal force)에 대한 상사성을 고찰하였고 기상의 겹보기 속도를 보존한 경우 MCO가 과대계상되는 경향이 있었다. Liu<sup>5</sup>는 MCO를 측정함에 있어 복잡 다양한 2상유동의 현상을 근사화하는 데 있어 액적의 거동, Swirl Intensity, 액적의 직경 등에 대하여 이론적인 연구를 수행하여 레이놀즈 수가 크면 액적의 분포에 따른 불확도가 상당히 줄어들음을 보였고, 습분분리기의 반경, Swirler 형상등에 대한 추가적인 영향에 대한 이론적 연구를 수행 하였다.

본 연구에서 적용된 상사방법론은 기존 연구결과를 토대로 습분분리기 질량분율인 질량진도(Mass Quality)를 보존하고 습분분리기 내부에서 액상과 기상의 모멘텀을 보존하기 위해 2상 유동 원심력이 보존되는 방법론을 적용하였고 이를 바탕으로 실험장치를 설계 및 구축하였다. 질량 진도 및 2상 유동 원심력은 식(1) 및 (2)와 같이 정의된다. 여기서,  $\rho$ 는 밀도  $U$ 는 겹보기 속도,  $R$ 은 습분분리기의 반경을 나타내며, 아래첨자  $m$ ,  $p$  각각 model과 prototype을 나타낸다. 또한 아래첨자  $l$ ,  $g$  는 각각 액상과 기상을 나타내며,  $h$ 는 균질모델을 뜻한다. 균질밀도  $\rho_h$ 는 기공율( $\alpha$ )에 대한 함수이므로 식 (4)를 이용하여 식 (3)을 계산한다. 식 (3)과 (4)를 식 (1)과 (2)에 대입하여 균질밀도에 대한 항을 소거하고 진도( $x_m/x_p = 1/1$ )와 2상 유동 원심력( $|F_{c,m}|/|F_{c,p}| = 1/1$ )이

일정한 조건으로 수식화하여 정리하면 실험모델에서 각 상의 겉보기 속도의 향으로  $J_g$ 와  $J_l$ 가 식(5)와 같이 도출된다. 본 연구에서는 식(5)와 (6)에서 계산된 조건을 근거로 습분 동반율 측정 실험을 수행하고 방법론의 타당성을 평가하고자 하였다.

$$x = \frac{\rho_g J_g}{\rho_g J_g + \rho_l J_l} \quad (1)$$

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

$$\rho_h = \rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{x \rho_l}{x(\rho_l - \rho_g) + \rho_g} \quad (4)$$

$$J_{gm} = \left| \left( \frac{R \times F_c}{\rho_m} \right)^{0.5} \left( \frac{x \rho_l}{x \rho_g + (1-x) \rho_g} \right) \right|_p \quad (5)$$

$$J_m = \left| \frac{1-x}{x} \frac{\rho_g J_g}{\rho_l} \right|_p \quad (6)$$

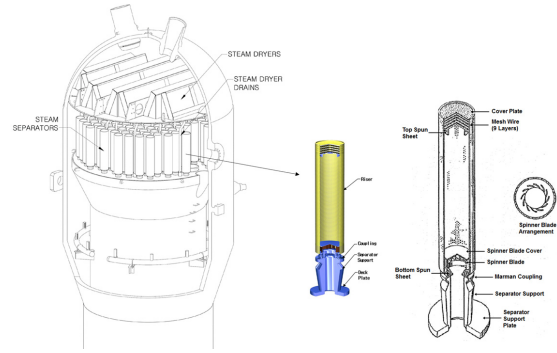


Fig. 2 Schematic of the moisture separator system

## 2. 물/공기 습분분리기 성능평가 실험장치

### 2.1 장치개요

증기발생기 습분분리기의 성능을 정량적으로 평가하기 위하여 물/공기 습분분리기 성능평가 (PEMS, Performance Evaluation of a Moisture Separator) 실험장치를 구축하였다. PEMS는 증기발생기 상단의 습분분리기가 설치된 습분분리기 입구로부터 2차 습분분리기인 드라이어(Dryer) 하부까지 모의할 수 있도록 설계가 되었다. 습분분리기 입구에 유입되는 물과 증기의 혼합유체는 상사법칙에 따라 물과 공기로 모사한다. PEMS의 설계압력 및 온도는 대략적으로 5 bar, 60 °C 이다(Table 1). Fig. 3은 전체 실험장치의 개략도를 나타내며, 최대 높이는 대략적으로 13m이다.

본 실험장치는 기계계통과 계측제어 계통으로 나누어지며, 기계계통은 장치운전에 필수적인 유체계통과 습분분리기를 장착하는 주요 실험대로 구분된다.

유체계통의 주요 구성기기는 실험대, 물주입부, 공기주입부, 2상유체혼합 기구 등으로 구성된다. 펌프를 이용하여 주입되는 물과 블로워를 통해 주입되는 공기는 실험대 하단의 혼합기구를 통하여 이상유체로 혼합된다. 2상유체 혼합기구는 물이 주입펌프를 통해 1-fluid 스프레이 노즐로 분사되는 상황에서 블로워로 공기가 인가되어 혼합되도록 구성함으로써, 액막이 액적에 미치는 영향을 최소화할 수 있도록 하였다. 또한 블로워의 유량이 고용량 7000m<sup>3</sup>/hr 이나 토출공압이 1.2 kgf/cm<sup>2</sup>이므로 액상의 충분한 견인력을 위해서는 스프레이 형태가 유리하기 때문이다. 이상유체로 혼합된 물/공기 유체는 상당길이의 발달구간(대략 3m)을 거쳐 실험대로 유입되고 2상유체의 혼합유체 발달구간은 대략 1m 이내 이므로 습분분리기 입구에서는 충분히 혼합된 상태로 유입된다고 유추된다. ARAMIS의 대형 실험장치처럼 낮은 공압에서는 액적을 습분분리기 입구까지 견인할 수 없으므로, 최대 공급 가능한 물의 용량은 식(7)~(8)에 나타난 Wallis<sup>6</sup>의 액적견인 상관식에 의거 기상에 의해 수직방향으로 견인되

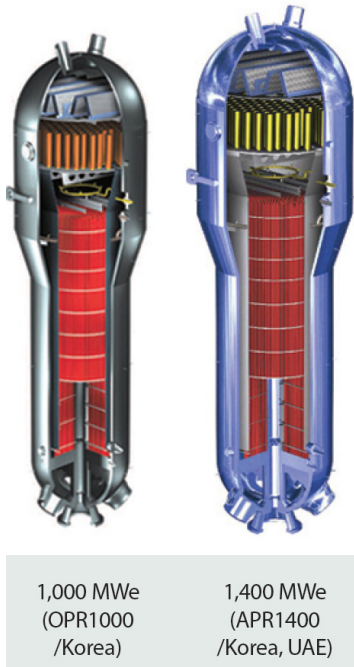


Fig. 1 Steam generator of PWR

Table 1 Design specifications of PEMS

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	up to 36 m <sup>3</sup> /hr (ref. 1 bar)
Air mass flow rate	up to 7000 m <sup>3</sup> /hr (ref. 1 bar)

는 최대 허용량을 계산하여 블로워의 100% 출력대비 최대 10 kg/s로 선정하였다<sup>6</sup>. 여기서, 기준이 되는 직관부 파이프는 최대 직경을 가지는 습분분리기 상승부를 기준(KS 300A S.S 10S)으로 하고, 표준기압 및 온도에서 블로워의 최대용량인 2.43kg/s를 이용하여 계산을 수행하였으며,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다.

$$J_g^{*1/2} + J_l^{*1/2} = 1 \quad (7)$$

$$J_{g\ or\ l}^* = \frac{J_{g\ or\ l} \rho_{g\ or\ l}^{0.5}}{(g2R(\rho_l - \rho_g))^{0.5}} \quad (8)$$

실험대는 국내에 적용된 다양한 형태의 습분분리기를 실험할 수 있도록 0.79~3.4m 크기의 습분분리기가 장착이 가능하도록 설계가 되었으며 입구와 출구 영역의 배관은 교환이 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 자료취득계통으로 나누어진다.

PEMS는 준정상상태(Quasi-Steady State) 조건에서 실험이 수행된다. 정압, 차압, 수위, 유량, 온도 등의 계측변수(Fig. 4)의 sampling rate는 1khz이며, engineering unit으로 변환되어 저장된다. 본 실험에서는 물과 공기가 각각 독립적으로 제어되어야 하고, 실험조건을 유지하기 위해서는 이를 실시간(Real time)으로 확인할 수 있어야 한다. 물과 공기의 주입 유로에 설치된 유량계, 정압계, 열전대를 기초로 하여 2차 변수인 건도, 기공율(void fraction), 균질밀도(homogeneous density), 원심력 등의 계산되는 변수와 점도(viscosity), 밀도(density), 표면장력(surface tension) 등이 모니터링과 저장이 동시에 수행된다.

## 2.2 주요 실험대

본 연구에서는 (주)두산중공업의 지원으로 실제 국내에 적용중인 표준형 가압경수로에 사용되는 CE Full Scale 습분분리기를 실험대로 사용하였다(Fig. 5).

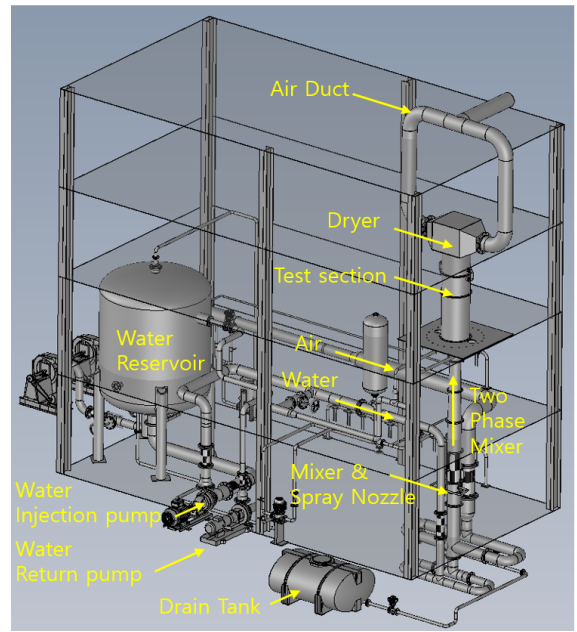


Fig. 3 Schematic of PEMS test facility

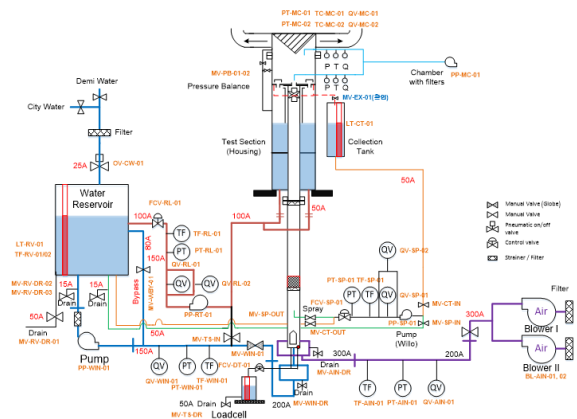


Fig. 4 Instrumentation of PEMS test facility

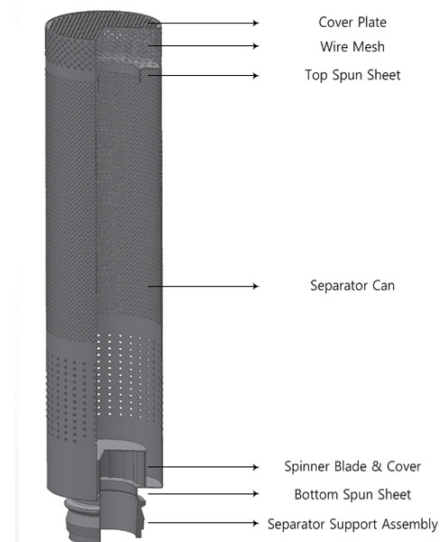


Fig. 5 Schematic of the flow holes of the Moisture Separator

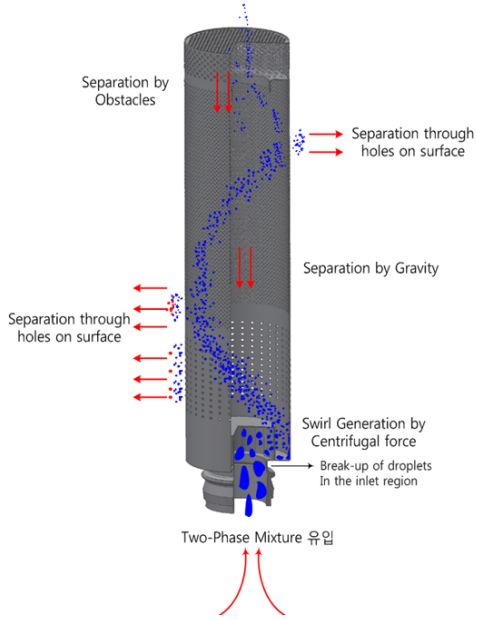


Fig. 6 Schematic of the flow path inside the moisture separator

증기발생기 관다발을 이탈하는 2상(증기/물) 혼합물은 단지 30%의 증기건도를 가질 수 있지만, 증기발생기 출구단의 증기건도는 99.75%가 되어야 하므로 2단계로 습분분리가 이루어진다.

Fig. 6과 같이 CE 타입의 습분분리기는 입구에서 유입되는 2상유체 혼합물이 지지판 (Can Deck)에 장착된 분리날개 (Spinner Blade)로 유입되면서 회전유동이 발생하며, 이를 통하여 발현되는 회전유동은 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 개수는 상당한 차이가 있다. 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. 분리된 물은 습분분리기 지지판으로 배수되는 구조를 이룬다.

### 2.3 습분동반율 측정방법

증기발생기 습분분리기의 주요 성능 지표인 습분동반율 (MCO)은 아래와 같이 정의된다.

$$MCO(\%) = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f + \dot{m}_g} \times 100 \quad (9)$$

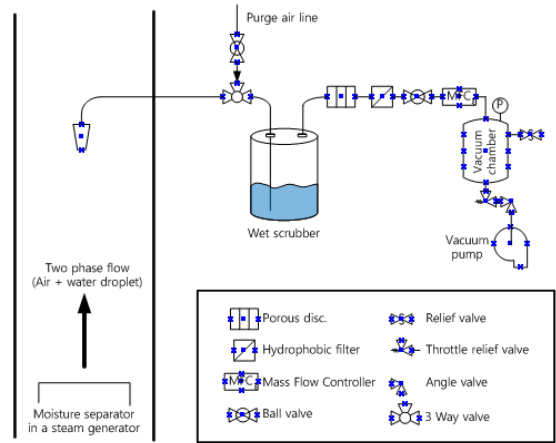


Fig. 7 Schematic of isokinetic system

여기서,  $\dot{m}_{f,org}$ 는 습분분리기 출구에서의 각 상의 질량유량이다. 이를 산정하기 위해서는 습분분리기 출구에서의 일정 유체 부피 내 공기 질량과 액적(물)의 정확한 질량 측정이 요구된다. 또한 습분분리기 출구에서는 각 상이 혼재하여 존재하므로 전체 유량을 각 상별로 측정하기는 현실적으로 불가능하다. 그러므로 1차 습분분리기 출구를 지나 드라이어 입구에서 출구단의 유량을 샘플링하는 방법을 적용하고자 하였다. 여기서 MCO를 산정하기 위해서는 샘플링 된 각 상의 유량 측정을 위해 각 상이 독립적으로 분리가 되어야 한다.

이를 위해 본 연구에서는 등속흡인노즐을 활용한 계측시스템을 구축하였다. 계측시스템의 구성도는 Fig. 7과 같다. 등속흡인노즐은 습분분리기의 운전범위와 예상 포집 액적을 force balance로 계산/예측하여 1/2인치로 설계가 되었다. 본 연구에서 적용한 시스템의 작동원리는 개략적으로 아래와 같다.

등속흡인노즐은 특정영역에서 노즐부를 이용하여 일정 부피의 유체를 포집한 후 그 분율을 측정하는 기법으로 포집되는 노즐 주위의 유선이 일정하게 유지되어야 신뢰성이 높은 결과를 도출할 수 있다. PEMS 실험장치의 작동압력범위가 대략적으로 1~2 bar 이내이므로 등속흡인노즐이 구동되기 위해서는 기상의 모멘텀에 의해 측정부에서 발생하는 차압만큼 노즐부 측정부에서 노즐부 후단까지 동일한 음압(진공)이 발생되어야 한다. 이를 위해 진공시스템을 별도로 구축하였다. 노즐부 후단의 진공펌프가 가동되면 진공챔버에서 0.1bar를 유지하고 실험장치에서 실시간으로 측정된 차압과 유속의 정보가 MFC(Mass Flow Controller)를 통해 전송되어 실험조건에 해당하는 만큼의 유량을 흡인한다.

측정부에서 등속흡인노즐을 통해 흡인 전에는 삼방밸브 정렬을 이용해 포집라인 내 액적이 유입되지 않도록 압축공기를 내보내며 크리닝을 한다. 측정이 시작되면 밸브정렬이 바뀌면서 진공펌프가 가동되어 흡인이 시작된다. 노즐을 통



해 들어온 혼합기체는 챔버에서 일정수위로 유지되는 습식 스크러빙 장치에서 1차적으로 큰 액적을 제거한다. 이후 용기내 잔류할 수 있는 재부유하는 액적을 발수성 다공성 매질을 통해 1차적으로 걸러 주며( $40\mu\text{m}$ ), 발수성 멤브레인 여과지( $0.45\mu\text{m}$ )를 이용해 2차적으로 습분을 제거 한다. 실험 측정된 습식 스크러빙 장치가 포함된 챔버 일체의 무게를 측정하여 습분분리기 출구에서 물의 질량을 환산하고, MFC를 통해 기상의 유량을 측정하여 최종적으로 MCO를 산정한다.

### 3. 습분동반율 측정 실험

#### 3.1 실험조건 및 절차

본 실험에서는 최대압력 2 bar, 작동온도  $60^\circ\text{C}$  이내의 저온/저압의 물/공기 조건으로 수행하였다. 기존 실증 실험데이터와 비교/검증하기 위해 아래와 같이 활용 가능한 실증 운전의 4가지 조건에 대하여 실험을 수행하였다. 실증조건에 대한 습분분리기의 각 유량과 건도는 식(3)~(4)를 이용하여 물/공기의 조건으로 계산 가능하며, 계산된 물/공기 실험조건은 Table 2와 같다. Table 2의 Test Matrix에 따라 정상상태인 조건에서 습분동반율을 측정하였다.

#### 3.2 실험결과

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

- 압력 및 유량 :  $\pm 3\%$  (Max.  $\pm 5\%$ )
- 온도 :  $3\%$  (Max.  $\pm 5\%$ )
- 수위 :  $\pm 2\%$  (Max.  $\pm 5\%$ )

PEMS 실험장치는 블로워와 물펌프의 성능곡선에 따라 시스템의 압력이 변한다. 시스템의 압력과 온도가 변하면 그에 따른 유체의 물성치도 변하므로 이에 맞는 조건식이 실시간으로 계산되어야 한다. 제어화면에서 실시간으로 계산되는 건도와 계측되는 온도 및 압력은 조건식에 입력되어 실시간으로 계산이 수행되며, 상기 조건이 만족할 때까지 실험장치는 정상상태를 유지하면서 Iteration으로 목표값을 찾아가는다. 목표값에 도달하면 데이터가 취득이 되고, MCO 측정기구에서 포집이 시작됨과 동시에 공기의 시간에 따른 적산유량이 계측/계산된다. 정상상태의 판단여부는 압력, 온도, 유

Table 2 Test Matrix

Test ID / Condition	T1	T2	T3	T4
mass quality [-]	0.277	0.315	0.350	0.382
Centrifugal Force [ $N/m^3$ ]	7020.1	7352.5	8885.2	11002.0
$J_g$ [ $m/s$ ]	14.8	13.48	16.19	21.39
$J_t$ [ $m/s$ ]	0.049	0.044	0.044	0.045
Centrifugal Force [ $N/m^3$ ]	7020.1	7352.5	8885.2	11002.0
Operating temperature	60 $^\circ\text{C}$ 이하			
Operating Pressure	2 bar 이내			

Table 3 Summary of Test Condition

Test ID / Condition	T1	T2	T3	T4
mass quality [-]	0.276	0.315	0.349	0.385
Centrifugal Force [ $N/m^3$ ]	7097.3	7358.4	8812.3	11012.6
Relative Error [%]	1.01	0.08	0.83	0.01
Operating temperature	60 $^\circ\text{C}$ 이하			
Operating Pressure	2 bar 이내			

량, 건도, 걸보기 속도 등의 변수가 활용되며, 최소 데이터 취득시간은 Random Error를 고려 최소 600초 이상이다. Table 3는 건도 및 2상 유동 원심력의 결과를 나타낸다. 건도 및 원심력의 목표값에 대한 상대오차는 최대 1% 이내로 계산된 실험조건과 동일하게 실험이 수행되었다.

습분분리기의 실험대는 습분분리기와 하우징으로 구성된다. 인접 습분분리기와와 상호작용을 보상하기 위해 습분분리기간의 Pitch를 고려하여 수력지름을 설정하였다. 그러나 실제 조건에서는 습분분리기 CAN에서 방출되는 액적과 상당량의 기체는 DECK 하부와 증기발생기 전열관 사이의 공간과 습분분리기가 설치된 DECK 상부공간으로 유입된다. 그러므로 상승유동에 기인한 압력강하만이 주로 발생할 것으로 예상되며, 습분분리기 CAN 외부에서 압력과 유동교란의 영향이 거의 없을 것으로 유추된다. 본 실험에서는 실험대의 경계를 정하기 위한 하우징이 존재하므로 습분분리기와 하우징 사이의 Secondary Flow로 인한 Vortex가 생성될 수 있고 과도하게 압력이 인가될 수 있으므로 상부 드라이어 영역과 압력평형이 이루어져야 한다. 본 실험에서는 압력평형 밸브 개도에 따라 실험을 수행하였고, 각각의 결과를 비교/평가하여 확인하였다(Fig. 9).

Fig. 9는 본 연구에서 수행한 MCO 측정결과이다. 가로축은 습분분리기의 정상운전조건 유량을 기준으로 무차원화하여 도시하였다. 이탈리아 SIET사에서 실증조건으로 실험한 Steam/Water의 결과<sup>7</sup>는 사각형 Symbol로 표현이 되며, 질량유량과 건도가 동일한 조건에서도 실증실험에서는 상당한 불확도를 보이고 데이터 산포도가 큰 것을 확인할 수 있다. 본 실험에서 수행한 결과는 각각 원형과 삼각형의 Symbol로

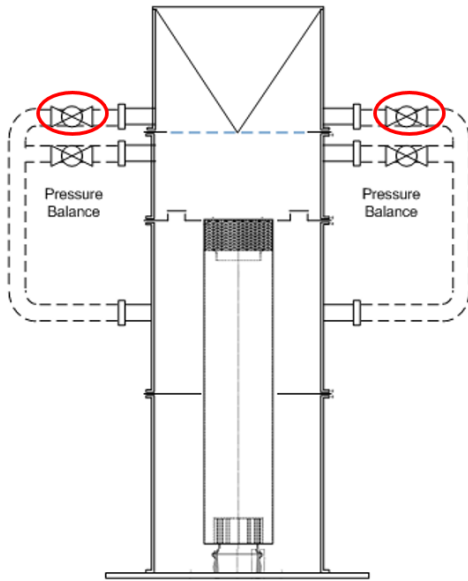


Fig. 8 Test section with a pressure balance

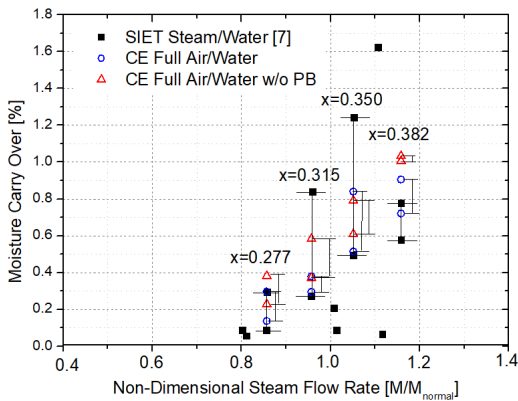


Fig. 9 Test results of MCO

표기하였으며 Fig. 8의 밸브 개도의 작동유무에 따라 구분하여 도시하였다. 실험결과 압력평형 밸브가 닫혀있는 경우 T1과 T4는 과대 계상되는 결과를 보인다. 반면 T2~T3의 경향성은 불확도 범위내에서 측정되었음을 알 수 있다. 실증 데이터 중 T4는 T3의 결과에 비하여 급격히 MCO가 감소하는 경향을 보이니 이는 물리적으로 T1~T3의 경향성을 볼 때 SIET사의 데이터의 신뢰성이 추가로 검토되어야 할 것으로 보인다. 상기의 압력평형 밸브가 닫혀있는 경우에는 하우징과 습분분리기 사이에서 발생한 상향방향의 Secondary Vortex로부터 수직방향으로 견인되는 액적이 상부 측정부에 영향을 미칠 수 있으므로 전체적으로 MCO 측정결과가 높게 예측이 되었을 것으로 유추된다. 반면 압력평형 밸브가 개방이 되었을 경우는 실제 습분분리기의 외곽 경계가 없는(분리된 액적이 상부에 영향을 미치지 않는, 그림 2 참조) 것을 모사하였으므로 전체적으로 MCO의 측정값이 낮게 예측이 되었다. T1~T3의 조건에서는 불확도 범위내에서 측정되었으

며, T4의 경우 일부 데이터만 불확도 범위 밖에서 측정이 되었다. 한편 전체적인 경향성은 실증/실험데이터와 비교할 때 모든 건도에 대하여 압력평형 밸브가 닫혀있는 경우는 보수적인 결과를 도출하였고, 압력평형 밸브가 열려있는 경우는 비교적 불확도 범위내에서 일치한다. 실제 형상을 고려할 때 압력평형 밸브가 열려있는 경우가 타당할 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내에 적용되는 가압경수로의 증기발생기 습분분리기의 습분동반율을 측정하기 위한 실증실험장치를 구축하였다. 습분분리기의 고온/고압에서 작동하는 실험조건을 습분분리기 입구에서의 질량분율인 건도와 습분분리기 내부유동의 주요 모멘텀인 원심력을 유지하는 상사법칙을 이용하여 저온/저압의 물/공기를 이용한 실험방법론을 적용하였다. 실제 실험데이터 중 비교 가능한 영역에서 기상의 유량 및 건도에 따른 운전조건에 대하여 습분분리 효율 측정실험을 수행하였다. 온도, 압력, 유량이 일정한 정상상태 조건에서 변동허용범위 내에서 실험을 수행하였으며, 습분분리효율은 본 연구에서 개발된 습식스크러빙 장치와 필터로 구성된 등속흡인노즐 시스템을 이용하여 액상과 기상의 질량유량을 측정하여 습분동반율을 산정하였다. 본 연구에서 수행한 실험결과와 실제 조건에서 수행한 실험데이터와 비교/평가해 본 결과 불확도 범위 내에서 실제 실험결과와 거의 동일한 습분동반율의 예측할 수 있는 경향성을 확인하고 물/공기를 활용한 습분동반율을 예측하는 실험방법론의 타당성을 검증하였다. 본 연구결과를 활용하여 다양한 습분분리기에 대하여 습분동반율을 정량화함으로써 운전조건별 습분분리기의 성능을 평가하고 모든 운전조건에 대하여 성능곡선을 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 보다 정확한 습분분리기의 습분동반율을 측정하기 위해서는 습분분리기 입구에서의 액적의 분포(질량 및 수)와 물/증기 및 물/공기의 상사성에 대한 추가 연구가 필요하며 현재 진행 중이다.

#### 후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2018151-0102390, 웨스팅하우스형 증기발생기 습분분리기 국산화).

#### References

- (1) U.S. NRC, 1987, "Steam Separator Modeling for Various Nuclear Reactor Transients", NUREG/CR-4922, EPRI NP-5272.
- (2) Mauro, G., Sala, M., and Hetsroni, G., 1990, "Improved

- Italian Moisture Separators (IIMS)", Nuclear Engineering and Design, Vol. 118, pp. 179-192.
- (3) Xiong, Z., Lu, M., Wang, M., Gu, H., and Chen, X., 2014, "Study on Flow Pattern and Separation Performance of Air-water Swirlvan Separator", Annals of Nuclear Energy, Vol. 63, pp 138-145.
- (4) Katono, K., Ishida, N., Sumikawa, T., and Yasuda, K., 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.
- (5) Li Liu, and Bofeng Bai, 2016, "Scaling laws for gas-liquid flow in swirl vane separators", Nuclear Engineering and Design, Vol. 298, pp. 229-239.
- (6) Graham B. Wallis, 1969, "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw Hill.
- (7) Jong-In Kim, and etc., 2006, "An Experimental Investigation for the Moisture Separation System of a Steam Generator for Nuclear Power Generation", Proceedings of ICAPP, Reno, USA, June 4-8, Paper 6103.