

# CANDU형 원자력 발전소의 중수 증기 회수율 증대 방안에 관한 연구

A Study on the Improved Recovery Efficiency of Heavy  
Water Vapour for CANDU Reactor Systems

김윤제\*, 박이동, 황영규(성균관대), 이도영(성균관대 대학원)

## Abstract

In order to improve the recovery efficiency of heavy water vapour from the atmosphere inside a reactor building, and to recover and upgrade the heavy water which escape, special treatments, such as reducing the ingress of light water vapour, are studied in the design of the CANDU reactor systems. This is considered in controlled method of the humidity over drawing fresh air through a desiccant dehumidifier which dries the air by absorption. Comparing with the moisture loads between summer and winter operations, the moisture removal rates are calculated. Those are proportional to the difference between the controlled space and the surrounding environment. Installation of a new dehumidifier will be able to reduce the moisture loads from the cooling systems, improving overall system efficiency and saving operating costs.

## 1. 서론

오늘날 제습(dehumidification)은 지속적인 계통의 운영을 위한 필수적인 구성 요소로서 인식되고 있는데, 이는 외기로부터 유입되는 불필요한 습공기를 제거하여 계통의 효율 및 생산성을 향상시키는데 중요한 요소이기 때문이다. 우리가 살고 있는 대부분의 환경은 어떠한 공간에 대한 습분이나 온도제어를 할 수 있는 공조 시스템등을 필요로 한다. 이러한 환경제어는 수많은 산업과 제조과정, 발전소 그리고 다른 여러 분야에서 절대적으로 필수적인 것이다.

특히 CANDU (CANadian Deuterium Uranium)형 원자력 발전소는 감속재나 열수송계통의 냉각재로서 값비싼 중수(US \$ 235/kg-D<sub>2</sub>O)를 사용하기 때문에 소량의 중수 누출 및 누손량도 감지해야 하고 전체적인 재고량을 항상 검사해야

한다. 또한 중수(D<sub>2</sub>O)는 방사성 잔여물을 포함할 수 있기 때문에 액체 또는 증기 형태의 D<sub>2</sub>O 손실을 막도록 예방해야 하며, 특별한 환경제어를 필요로 한다. 참고로 Table 1에 중수(D<sub>2</sub>O)와 경수(H<sub>2</sub>O)의 물성치를 비교하였다<sup>(1)</sup>.

CANDU 원자력 발전소에는 세 부분으로 분리된 D<sub>2</sub>O 증기 회수계가통이 있는데,<sup>(2-3)</sup> 삼중수소(tritium)의 생성량이 서로 다른 열수송계통, 감속계통, 그리고 방호장구 착용이 필요치 않는 접근가능 영역으로 구별된다. 건조지역 내에서는 삼중수소 생성량이 감소되기 때문에, 원자로 건물내에 적절한 습도를 유지하게 되면 위 계통이나 인접영역의 오염정도는 감소하게 된다. Fig. 1 은 CANDU 원자력 발전소 D<sub>2</sub>O 관리계통의 개략도를 나타낸다.

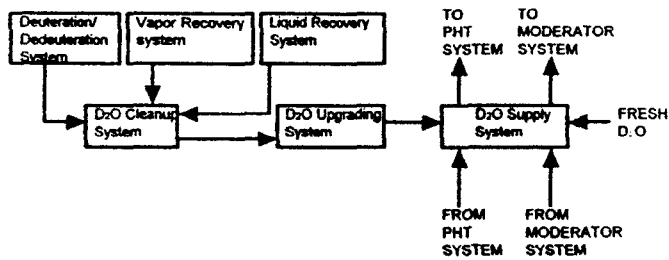


Fig. 1 Schematic diagram of CANDU D<sub>2</sub>O management systems

일반적으로 중수의 순도는 발전소 운전에 따라 저하되며, 또한 원자로 보조건물 밖으로부터 원자로 건물내로 유입되는 공기중의 습분 및 미립자에 의하여 오염된다. 누출로부터 회수된 중수는 미립자나 화합물, 또는 비용해성 불순물을 포함하게 된다. 경제적인 이유로 감속재로서의 중수는 높은 연료 연소를 위하여 고순도를 유지해야 하며, 발전소 운전 비용의 최소화를 위하여 회수된 중수는 승급(upgrading)을 통하여 높은 순도를 유지해야 한다.

본 연구의 주목적은 원자로 건물내로 유입되는 외기중의 습분이 중수증기 회수율에 얼마나 많은 영향을 끼치는지 조사하고자 한다. 그리고, 제습기의 추가 설치를 위한 열역학적 배경을 검토한 후 습분 제거 가능량과 이에 따른 실질적인 중수증기 회수량을 계산하여 새로운 제습기의 사양과 설치에 따른 경제성을 검토하고자 한다. 또한, 기존의 중수로 발전소를 운전함에 있어, 우리의 기후조건과 실정에 맞게 설계 개선을 통한 계통의 성능 향상을 도모하고자 한다.

Tabal 1 Comparison of physical properties between H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O

물성치 (Properties)	경수 (H <sub>2</sub> O)	중수 (D <sub>2</sub> O)
Molecular Weight [kg/kmol]	18.015	20.028
Specific Gravity	1.0	1.105
Melting Point [°C]	0.00	3.81
Triple Point [°C]	0.01	3.82
Boiling Point [°C]	100	101.42
Critical Temp. [°C]	374.15	371.5
Specific Heat(at 25°C) [cal/°C · mol]	17.99	20.16
Viscosity(at 25°C) [cP]	0.895	1.113
Temp. of Max. Density [°C]	3.98	11.23
Surface Tension(25°C) [Dyne/cm]	71.97	71.93
Heat of Fusion [kcal/mol]	1.436	1.501
Heat of Evaporation(at 3.82°C) [kcal/mol]	10.70	11.11

## 2. 이론적 배경

공기중의 습분량은 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$\begin{aligned}
 M_w &= \frac{m_w \cdot P_w \cdot V}{RT} \\
 &= \frac{P_w V}{461.520 T} \\
 &= \frac{V \cdot \phi \cdot P_s}{461.520 T}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서

- $M_w$  : 공기중 습분량 [ kg ]
- $m_w$  : 물분자량 [ g/g · mol ]
- $R$  : 일반기체상수 [ J/(kmol · K) ]
- $P_w$  : 수증기 분압 [ Pa ]
- $P_s$  : 포화 증기압 [ Pa ]

$V$  : 공기의 체적 [  $m^3$  ]

$T$  : 절대온도 [ K ]

$\phi$  : 상대습도 ( $= P_w/P_s$ )

효율적인 제습 시스템을 설계하기 위해서 먼저 시스템에 의해 제거할 수 있는 습공기 부하를 계산해야 한다. 외기 및 건물내의 습공기 밀도 차가 크면 클수록 제어하려는 공간으로부터의 부하는 더 커질 것이다. 습공기 부하 산정을 위해서는 먼저 조절 공간 안·밖의 습도 및 온도등을 고려해야 하며, 습분 제거 가 능량은 다음 식으로 표기할 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$W = \rho G (x_i - x_o) \quad (2)$$

여기서

$W$  : 습분 제거량 [ kg/hr ]

$\rho$  : 공기밀도 [ kg/ $m^3$  ]

$G$  : 유입 공기량 [  $m^3/hr$  ]

$x_i$  : 제습전 외기의 습분

$x_o$  : 제습후 외기의 습분

공기의 온도는 일반적으로 포화 온도와 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 공기는 완전가스로 취급된다. 또한 증기 압력은 상대적으로 증기의 포화 압력보다 낮기 때문에 수증기도 완전가스로 취급할 수 있다.

식(2)의 습공기가 갖는 습도비  $x$  는 건공기 질량당 수증기 질량의 비로써 정의되며 다음과 같다.

$$x = 0.62198 \frac{P_w}{P - P_w} \quad (3)$$

위 식에서  $P$  는 전압을 나타낸다.

일반적으로 가장 큰 제습 부하 요인은 유입 공기중의 습분으로 인하여 제습 계통의 인입부에서 일어난다. 만약 외기를 직접적으로 원자로 건물내로 유입시킨다면 시스템의 부하는 매우 클 것이다. 따라서 유입 외기에 내포된 습분은 원자

로 건물로 유입되기 전에 미리 제거시켜야 한다.

현재 월성 원자력 발전소의 원자로 건물로 공급되는 총 유입 공기율(유량)은 17,000 [m<sup>3</sup>/h] 이다(Table 2 참조).<sup>(3)</sup> 원자로 건물내의 습분을 완전히 제거한다면, 운전원들에게 방사화학적 측면에서 건강상의 위험을 유발시킬 것이다. 따라서 본고에서는 하절기의 원자로 건물내 습도를 동절기의 운전조건과 비슷한 수준으로 유지한다고 가정하여 습분 제거 가능량을 계산하고자 한다. 부하계산에 필요한 수증기 압력은 습기상태를 표시하는 습공기 선도(psychrometrics chart)를 이용하여 구할 수 있다. Fig. 2 는 동절기와 하절기의 개략적인 습분 분리 과정을 보여준다. 부하량을 계산하기 위하여 외기의 설정온도는 동절기 -20℃( $\phi=100\%$ ), 하절기 35℃( $\phi=84\%$ )라 가정하였다. Fig. 3 은 하절기 운전시 상대습도의 변화와 건구 온도차(dry bulb temperature difference)에 따른 습분제거량을 도시하였다.

Table 2 Process Data

		summer	winter
Air Flowrate		17,000 [ m <sup>3</sup> /h ]	
Supply Air	Intake	35℃ ( $\phi=84\%$ )	-20℃ ( $\phi=100\%$ )
	Discharge	18℃ Dry Bulb 15℃ Wet Bulb 13℃ Dew Point $\phi=70\%$	24℃ Dry Bulb $\phi \leq 35\%$

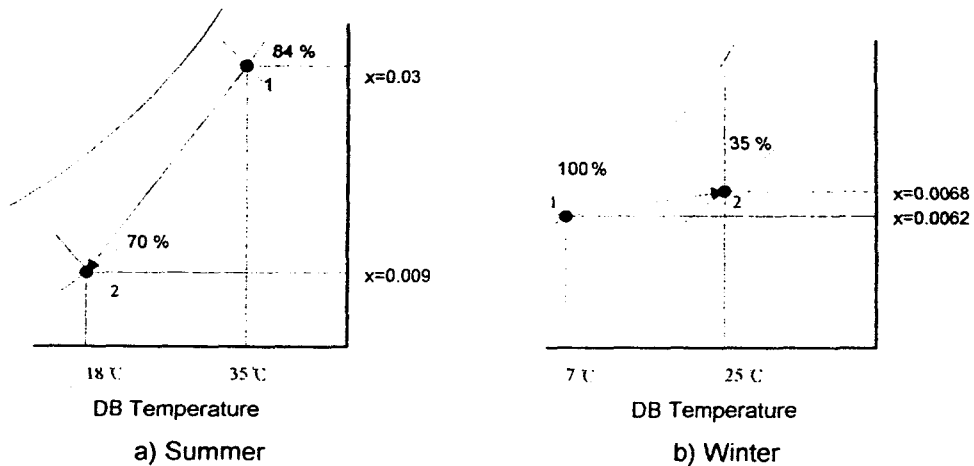


Fig. 2 Moisture removal process between summer & winter operations on the psychrometrics charts

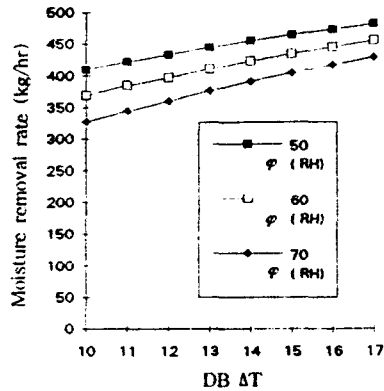


Fig. 3 Moisture removal rate based on the dry bulb temperature difference

### 3. 제습방법

공급되는 외기중의 습공기를 제거하기 위해서는

- 1) 수증기를 응축하기 위한 유입공기 냉방 방법,
- 2) 공기의 전 압력 증가에 의한 응축을 유발시키는 방법,
- 3) 건조제를 이용하여, 증기압차를 통해서 공기로부터 습공기를 제거하는 방법등이 있다.

본 연구에서는 습공기 제거 수단으로서 건조제를 이용하는 방법을 이용하고자 한다. 특히 운전조작이 간단하고 유지 비용이 저렴한 회전 벌집형 제습기 (rotating honeycombe type dehumidifier)의 작동원리를 고찰하고자 한다(Fig. 4 참조). 다공성 시트를 기초로 한 벌집구조 휠은 천천히 회전하면서 공정 및 재활기류를 휠 내부에 함침된 건조제에 의하여 제습을 유발하도록 하는데, 작동과정은 Fig. 5 에 도시하였다.

운전방법을 간단히 기술하면 공정 공기는 주름형태의 흡을 통하여 흐르고 장착된 건조제는 공기로부터 습분을 흡수한다. 건조제가 습분을 흡수할 때 포화되고 그 표면 증기압은 상승한다(1점→2점). 재활기류 속에서 휠이 회전할 때, 또는 건조제의 습분 제거를 고려할 때, 건조제는 고온 재활공기에 의해 가열되며, 이때 표면 증기압은 증가한다(2점→3점). 재활을 마친 고온 건조제는 역방향으로 공정기류속으로 다시 순환되는데, 공정 공기의 일부가 건조제를 냉각시킨다(3점→1점).

회전 벌집형 제습기의 장점은 다른 종류의 건조제를 벌집형 구조물 속에 적재할 수 있고, 특별한 경우에는 재단된 휠을 사용할 수 있다. 구조물의 홈이 특이한 선으로 구성된 공기 덕트이기 때문에 건조제의 흡착 면적은 공기 흐름이 작아도 최대가 된다. 또한, 동일한 휠에서 성분이 다른 건조제를 사용할 수 있으므로 낮은 이슬점과 많은 제습 용량을 얻을 수 있다.

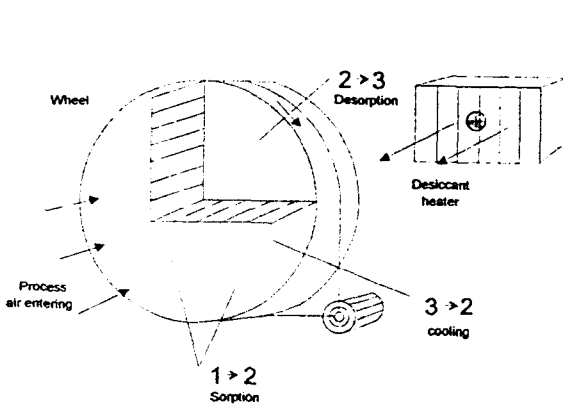


Fig. 4 Rotating honeycombe type dehumidifier

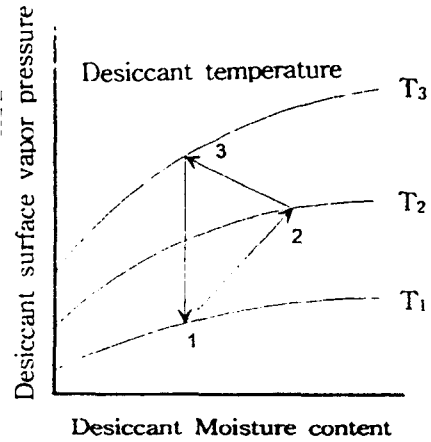


Fig. 5 Desiccant moisture removal process

#### 4. 증수증기의 회수

감속재 및 열수송계통의 냉각재로부터 유출된 증수증기의 삼중수소 농도는 다음 식으로 산정할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$C_{tot} = \alpha C_p + (1-\alpha) C_M \quad (4)$$

여기서

$C_{tot}$  : 유출 증수증기의 삼중수소 농도 [ Ci/kg-D<sub>2</sub>O ]

$\alpha$  : 냉각재 증수 누출율

$1-\alpha$  : 감속재 증수 누출율

$C_p$  : 냉각재중 삼중수소 농도 [ Ci/kg-D<sub>2</sub>O ]

$C_M$  : 감속재중 삼중수소 농도 [ Ci/kg-D<sub>2</sub>O ]

만약 유출된 증수증 증발된 양이  $m_v$  라 하면, 그때 공기중의 삼중수소 양은 다음과 같다.

$$M_{exp} = C_{tot} \cdot m_v \quad (5)$$

따라서, 공기중의 삼중수소 농도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{T_2} = \frac{M_{exp}}{V} = \frac{C_{tot} \cdot m_v}{V} \quad (6)$$

위 식으로부터 유출된 증수증 증발된 양은 다음과 같다.

$$m_v = \frac{V \cdot C_{T_2}}{C_{tot}} \quad (7)$$

회수된 증수의 질(quality)은 승급 여부를 고려하는데 가장 중요한 요소이며 식 (1) 과 (7) 로부터 다음 식으로 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_g &= \frac{m_v}{M_w} = 461.520 \frac{TC_{T_2}}{C_{tot} P_w} \\ &= 461.520 \frac{TC_{T_2}}{C_M [ a(\beta-1)+1 ] \phi P_S} \quad (8) \end{aligned}$$

위 식에서  $\beta$  는 냉각재와 감속재중의 삼중수소 농도비를 나타낸다. 따라서 회수된 습분중의 증수 질은 원자로 건물내의 상대습도에 따라 변함을 알 수 있다. Fig. 6 은 회수 습분중의 증수 함유율을 나타내는데, a) 는 상대습도( $\phi$ ) 와 냉각재 증수 누출율( $a$ )의 영향을 고려하였고, b) 는  $a=1$  일 때 상대습도의 변화가 미치는 영향을, 그리고 c) 는 상대습도 50% 일 때  $a$  와  $\beta$  에 따른 변화를 도시하였다.



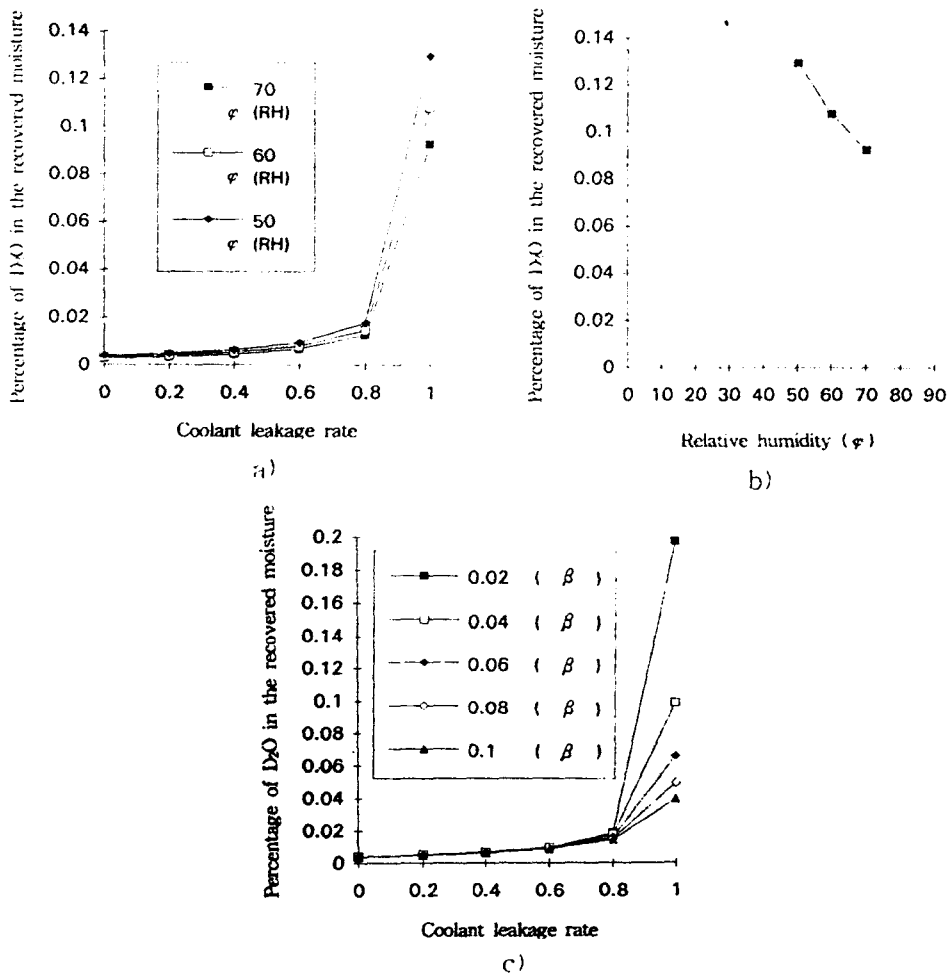


Fig. 6 Percentage of D<sub>2</sub>O in the recovered moisture from PHT coolant leakage rate with various relative humidity

## 5. 결론

본고에서는 현존하는 또는 건설중인 원자력 발전소 뿐만 아니라 앞으로 건설될 CANDU형 중수로 발전소의 운전비용 절감 및 계통의 성능 향상을 위한 새로운 제습기의 설치문제를 고찰하였다. 특히 우리나라와 같이 하절기와 동절기의

구분이 뚜렷한 나라에서는 고가의 중수관리 측면에서 제습기 설치를 적극적으로 검토해야 할 것이다. 원자로 건물내로 유입되는 불필요한 습공기를 줄일 수 있다면 승급비용의 절감으로 인하여 다른 분야의 승급 가용도(upgrading availability)는 증가될 것이다.

## 참고문헌

1. The Merck Index-An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals, 10th ed., Merck & Co., Inc., Rahway, NJ, 1983
2. AECL Proprietary, Reactor Building D<sub>2</sub>O Vapour Recovery System, 59-38310/63831-DM-000
3. AECL Proprietary, Reactor Building Ventilation System, 59-73120/67312-DM-000
4. Stoecker, W. F. & Jones, J. W., " Refrigeration & Air Conditioning ", McGraw-Hill, 1982
5. ASHRAE Handbooks, Fundamentals, Chapter 6 Psychrometrics, 1989
6. 월성 원자력 1호기 삼중수소 제거방안연구, KRC-87N-J04, 한국전력공사 기술연구원, 1989