



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

분리막이 부착된 열펌프 건조기의  
건조성능에 관한 연구

濟州大學校 大學院

機械工學科

金 孚 哲

2021年 12月 3日

# 분리막이 부착된 열펌프 건조기의 건조성능에 관한 연구

指導教授 朴潤鐵

金孚哲

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2021年 12月 3日

金孚哲의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長 \_\_\_\_\_ ①

委 員 \_\_\_\_\_ ①

委 員 \_\_\_\_\_ ①

濟州大學校 大學院

2021年 12月

# A study on the drying performance of a heat pump dryer with a membrane

Bu Chul Kim

(Supervised by professor Youn Cheol Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for  
the degree of master in mechanical engineering

2021. 12. 3.

Department of Mechanical Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| List of figures ..... | i   |
| List of tables .....  | iii |
| Nomenclature .....    | iv  |
| Summary .....         | v   |
| <br>                  |     |
| I. 서 론 .....          | 1   |
| 1.1 연구의 필요성 .....     | 1   |
| 1.2 연구동향 .....        | 3   |
| <br>                  |     |
| II. 이론적 연구방법 .....    | 5   |
| 2.1 함수율 .....         | 5   |
| 2.2 수분제거율 .....       | 5   |
| 2.3 건조에너지 .....       | 6   |
| <br>                  |     |
| III. 실험적 연구방법 .....   | 10  |
| 3.1 불확실성 분석 .....     | 10  |
| 3.2 실험장치 .....        | 10  |
| 3.3 실험방법 .....        | 21  |
| <br>                  |     |
| IV. 실험결과 및 고찰 .....   | 25  |
| 3.1 고추 건조 실험결과 .....  | 25  |
| 3.2 무 건조 실험결과 .....   | 33  |
| 3.3 건조성능 분석 .....     | 37  |
| <br>                  |     |
| V. 결 론 .....          | 41  |
| <br>                  |     |
| 참고문헌 .....            | 43  |

## List of Figures

|         |  |    |
|---------|--|----|
| Fig. 1  | The drying curve .....   | 8  |
| Fig. 2  | The conversion methodology of moisture content to moisture removal ratio .....   | 9  |
| Fig. 3  | Attached location of the temperature sensors(Thermocouple) .....   | 13 |
| Fig. 4  | Power meter and data acquisition .....   | 14 |
| Fig. 5  | Schematic diagram of the heat pump .....   | 15 |
| Fig. 6  | Schematic of the membrane separation .....   | 16 |
| Fig. 7  | Schematic diagram of the equipment for the water vapor permeation tests .....  | 17 |
| Fig. 8  | Schematic diagram of the heat pump dryer with a membrane .....   | 18 |
| Fig. 9  | The heat pump dryer with a membrane .....  | 19 |
| Fig. 10 | Duct for air flow rate measurement .....   | 23 |
| Fig. 11 | The radish sample .....  | 24 |
| Fig. 12 | Variations of moisture content according to drying time(Air flow rate: 49.7 CMH, Chili pepper, 20kg) .....             | 27 |
| Fig. 13 | Variations of moisture content according to drying time(Air flow rate: 61.2 CMH, Chili pepper, 20kg) .....             | 28 |
| Fig. 14 | Variations of moisture content according to drying time(Air flow rate: 91.8 CMH, Chili pepper, 20kg) .....             | 29 |
| Fig. 15 | Variations of moisture removal ratio according to drying time(Air flow rate: 49.7 CMH, Chili pepper, 20kg) .....       | 30 |
| Fig. 16 | Variations of moisture removal ratio according to drying time(Air flow rate: 61.2 CMH, Chili pepper, 20kg) .....       | 31 |
| Fig. 17 | Variations of moisture removal ratio according to drying time(Air flow rate: 91.8 CMH, Chili pepper, 20kg) .....       | 32 |
| Fig. 18 | Variations of moisture content according to drying time for each size of radish(Air flow rate: 91.8 CMH, Radish) ..... | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Fig. 19 Variations of moisture content according to drying time(Air flow rate: 91.8 CMH, Radish, 20kg) .....                | 35 |
| Fig. 20 Variations of moisture removal ratio according to drying time(Air flow rate: 91.8 CMH, Radish, 20kg) .....          | 36 |
| Fig. 21 Comparison of moisture content between with membrane and without membrane .....                                     | 38 |
| Fig. 22 Variations of drying energy utilization rate according to air flow rate (Chili pepper, 20kg) .....                  | 39 |
| Fig. 23 Variations of drying energy utilization rate according to drying time (Air flow rate: 91.8 CMH, Radish, 20kg) ..... | 40 |

## List of Tables

|         |   |    |
|---------|---|----|
| Table 1 | The causes of quality changes and prevention .....          | 2  |
| Table 2 | Specifications of the heat pump dryer with a membrane ..... | 20 |



## Nomenclature

|           |                                    |
|-----------|------------------------------------|
| $E_d$     | Drying energy [kWh]                |
| $E_t$     | Total energy [kWh]                 |
| $f$       | Final drying time [h]              |
| $m_i$     | Initial moisture content [%]       |
| $\bar{P}$ | Average power consumption [kW]     |
| $s$       | Starting time [h]                  |
| $u_{ran}$ | Random error [%]                   |
| $u_{sys}$ | System error [%]                   |
| $u_{tot}$ | Total uncertainty [%]              |
| $W$       | Mass [g]                           |
| $W_d$     | Dry mass [g]                       |
| $W_{d,j}$ | Dry mass of entering point [g]     |
| $W_j$     | Mass of measuring point [g]        |
| $\psi_d$  | Drying energy utilization rate [%] |
| $\omega$  | Moisture removal rate [-]          |

## SUMMARY

In this study, the concept of drying energy was used to quantify drying performance during the drying of chili pepper and radish via a heat pump dryer with a membrane. Moreover, out of the total energy consumed during the operation of the dryer, the energy consumed for drying was analyzed by using the ratio of total energy consumed and drying energy.

The heat pump dryer with the membrane is capable of effectively removing moisture as moisture is first removed in the evaporator of the heat pump, and the remaining moisture is additionally removed in the membrane.

In the experiment, the temperature of the dryer was set to be 60°C, and the air flow rate of the dryer was changed to 49.7 CMH, 61.2 CMH, and 91.8 CMH. Based on the experimental results, the drying time was shortened by increasing the air flow rate. With respect to radish, the drying time was shortened as the width and length of the radish decreased. The drying energy utilization rate increased as the drying time increased.

Consequentially, to increase the drying performance of the dryer, the drying energy utilization rate should be increased. Therefore, an appropriate temperature and air flow rate are required for drying.

# I. 서 론

## 1.1 연구의 필요성

농산물의 가공은 선사시대부터 시작되었을 것이라 알려져 있을 정도로 오랜 역사를 가진다. 당시에는 비록 수렵하여 잡은 고기를 기근에 대비하기 위한 용도로 이용하였지만 사회가 발전할수록 농산물의 수확이 증대되고, 생산지에서 소비지로 수송의 역할이 증대되면서 식품가공의 중요성이 더욱 대두되었다. 특히 최근에는 농산물의 안정적 재배와 생산 및 소비를 위하여 가공식품에 관심이 확대되고 있는 실정이다.

농산물의 품질변화의 원인으로는 Table 1과 같이 물리적 요인, 화학적 요인, 생물학적 요인 등이 있으며, 일반적으로 농산물의 품질변화에 많은 영향을 미치는 요인인 물리적 요인으로는 수분, 온도, 빛 등이 있다. 이러한 요인은 건조, 냉동, 냉장, 빛차단 등의 방법으로 방지할 수 있으며, 특히 농산물 건조방법은 간단하여 오래전부터 많이 이용되고 있는 방법 중 하나이다. 건조가공은 농산물의 무게와 부피를 줄여 수송과 취급을 편리하게 하고, 미생물 성장에 필요한 수분을 제거하므로 저장성을 높일 수 있으며, 화학반응에 의한 변질을 최소화하고, 성분농축에 의한 식품특성을 변화시킬 수 있는 장점이 있다[1]. 하지만 농산물의 건조 시 건조시간을 줄이기 위해서는 많은 에너지가 소비되거나 자연건조와 같이 에너지를 줄이기 위해서는 건조시간이 오래 걸리는 단점이 있다[2].

일반적으로 많이 이용되고 있는 열풍건조기는 건조과정에서 요구되는 건조온도와 건조시간이 농산물에 따라서 다양하게 나타난다. 농산물 건조과정에서 많은 건조시간이 소요되는 이유는 건조과정에서 습기를 제거하기 위한 배습과정으로 인해 건조시간의 장기화가 초래되므로 건조시간을 줄이기 위한 연구가 필요하다. 또한 배습과정에서 건조를 위하여 가열된 후 습기를 포함한 공기가 외부에 배출되고, 배출이 끝난 후 다시 공기를 가열하기 위하여 에너지가 투입되게 되므로 배습과정에는 필연적으로 고온의 에너지가 외부로 손실되는 현상을 수반하게 되므로 에너지를 절약하기 위한 노력이 필요하다. 또한 국내의 경우, 건조작물은 나물, 채소류 위주로 기술개발이 편중되어 있고, 고소득 작물에 대하여 농작물의 고유 특성유지를 위한 기술 개발이 필요하다.

Table 1 The causes of quality changes and prevention

| cause      | case                                    | prevention  |
|------------|---|---|
| physical   | moisture                                | dry   |
|            | temperature                             | freeze, refrigeration                               |
|            | light                                   | block out light                                     |
| chemical   | air(O <sub>2</sub> )                    | vacuum, antioxidant, water activity control         |
|            | pH(acid, alkali)                        | buffer solution                                     |
|            | ingredients of food reaction, metal ion | heat, water activity control                        |
| biological | microorganism                           | heat, freeze, preservatives, water activity control |
|            | enzyme                                  | heat, pH control, refrigeration                     |
|            | insect                                  | fumigation  |
|            | animals of small size                   | chemicals, mechanical prevention                    |

## 1.2 연구동향

농산물의 건조는 주로 간식·부식용으로 채소, 과일, 육류 등을 가공하는데 사용되며, 농가나 소규모 영농단체에서는 단순 열풍건조 중심으로 제품을 생산하고 있다. 채소의 경우, 무, 시래기, 호박, 나물 등을 건조시켜 PP필름에 밀봉 포장하여 유통하고 있으며, 과일류의 경우는 기호성과 보존성을 높이기 위해서 감, 사과, 감귤, 대추, 딸기 등을 건조시키고 있고, 육류는 주로 쇠고기, 돼지고기 등을 대상으로 단순 전처리(염지) 과정을 거친 후 열풍 또는 자연건조로 육포를 생산하고 있다[3]. 국내 농산물 건조기술은 영농현장에서의 보편적 활용을 위한 산업화단계로의 진행이 필요한 단계이며, 건조기계도 다양하게 개발되었으나 농가는 저렴한 기계를 선호함에 따라 열풍건조기가 가장 많이 보급되어 있다. 건조열원에 따라서는 전기식과 등유버너식으로 나뉘는데, 전기식 건조방법이 가장 많이 보급되어 있다.

농산물을 건조하기 위한 방법으로 건조기에 다양한 기술을 복합적으로 적용한 방법이 많이 연구되었다. 양원석 외 2인[4-6]은 공기열원 및 지열원 열펌프 방식을 이용한 농산물 열풍건조기의 사이클 해석 및 초기투자비, 에너지 성능을 비교하였으며, 김재원[7]은 농산물 건조를 위한 적외선 건조법의 활용 및 우수성에 대한 내용을 발표하였다. 또한, 정현철 외 3인[8]은 농수산물을 대상으로 열펌프 하이브리드 건조장치의 건조 특성에 관한 연구를 시행하였고, 고재곤 외 4인[9]은 열펌프를 이용한 건조기의 성능 실험을 실시하여 연구결과를 발표하였다.

농산물을 건조하기 위한 방법으로 자연건조 방식 중 태양열을 이용한 방법은 오래전부터 이용되어 왔다. 특히 자연건조 방식을 응용한 태양열 집열장치를 이용한 건조방법 또한 1980년대 이전부터 연구되었으며[10-12], 최근에는 복합형 농산물 건조기술로 원추형의 태양광-열 집광시스템을 이용한 농산물 건조장치[13]에 대한 연구도 시행되었다.

분리막은 다양한 물질을 선택적으로 제거하기 위한 반투과성 막으로 기공 크기에 따라 정밀여과(micro-filtration, MF), 한외여과(ultra-filtration, UF), 나노여과(nano-filtration, NF) 및 역삼투(reverse osmosis, RO) 막 등으로 구분된다. 일반적으로 막 공극의 크기는 일정하지 않고 분포특성을 가지고 있으며, 이러한 분포특성은 막의 재질, 제조공정 등의 변수에 따라 다르다[14]. 특히 분리막은 최근 들어 수

처리, 백연제거, 제습, 각종 기체분리 등의 용도로 이용되고 있으며, 수분투과용 분리막은 상대적으로 산소 및 질소보다 빨리 분리되는 특성을 이용하여 제습 분야에 서 많이 연구되고 있다[15, 16].

## II. 이론적 연구방법

### 2.1 함수율

본 연구에서는 농산물의 초기함수율 측정은 식 (1)과 같이 KS B 7944[17]에 명시된 함수율 측정방법을 이용하였으며, 건조 진행 중의 함수율은 식 (2)와 같다. 질량법에 의거하였으며, 10g의 시료를 랜덤 샘플링하여 질량변화가 없을 때까지 건조하였고, 함수율분석기는 OHAUS 社의 MB23 모델을 이용하였다.

$$m_i = \frac{W - W_d}{W} \times 100 \quad (1)$$

$$m_j = \frac{W_j - W_{d,j}}{W_j} \times 100 \quad (2)$$

여기서  $m_i$ 는 시료의 초기함수율[%]이며,  $W$ 는 시료의 질량[g],  $W_d$ 는 시료의 건질량[g],  $m_j$ 는 측정시점의 함수율[%],  $W_j$ 는 측정 시점의 시험재료 총질량[g],  $W_{d,j}$ 는 투입 시험재료의 건질량[g]이다.

### 2.2 수분제거율

식품은 건조될 때 선행적으로 식품 외부 표면에서 수분이 증발되고, 이후에 내부 수분이 외부 표면으로 이동되며, 증발되면서 건조가 된다. 이러한 수분 이동이나 표면 상태에 따라 건조속도가 차이를 보이게 되는데, 건조 초기에는 함수율의 변화가 크지 않는 조절구간이 있으며, 이후 큰 표피에서의 저항 없이 건조가 빠르게 진행되는 항률건조구간이 존재하고, 최종적으로 식품 내부의 온도가 상승하며, 건조 속도가 떨어지는 감률건조구간이 존재한다.

Fig. 1은 식품건조 시 모든 건조구간을 나타낸 그림이며, A에서 B까지는 조절구간, B에서 C까지는 향료건조구간, C점을 임계수분함량점, C점부터 D까지는 감률건조구간이다. 일반적으로 조절구간은 건조품이 가온되는 예비단계이며, 건조방식에 따라 이 구간은 많은 차이를 보인다. 향료건조구간은 건조품 표면의 수분이 증발하는 단계로 함수율이 급격히 감소하는 구간이고, 감률건조구간은 표면수분이 제거되어 건조품 내부의 수분이 외부 표면으로 이동되면서 건조되는 구간이다. 수분함량이 동일하더라도 건조물의 품종, 형상, 크기, 위치 등에 따라 건조시간은 차이를 보이며, 특히 무와 같이 절단가공 후 건조하는 경우에는 절단 크기에 따라 건조속도는 많은 차이를 보이게 된다.

일반적인 건조과정은 건조시간이 증가할수록 반대로 건조물의 함수율은 감소한다. 이때, 함수율의 감소에 영향을 미치는 요인은 가열을 위해 소비되는 전력과 순환(또는 배습)을 위해 소비되는 전력의 합으로 나타낼 수 있다. 하지만 이 과정에서 소비되는 전력은 전부 함수율의 변화에 이용되는 것은 아니며, 외부로 방출되는 열손실과 건조물에서 수분을 추출하기 위한 에너지가 포함되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 2과 같이 함수율의 변화를 수분제거율로 변환하였으며, 식 (3)과 같이 수분제거율을 나타내었다[18].

$$\omega = \int_0^f (At+B)dt - \int_s^f (At+B)dt + \int_s^f (Ct^D)dt \quad (3)$$

여기서  $\omega$ 는 수분제거율[-]이며,  $f$ 는 최종 건조시간[h],  $s$ 는 향료건조 시작시간[h]이고, A, B, C, D 구간은 Fig. 2에 표현된 구간이다.

### 2.3 건조에너지

농산물의 건조를 위한 에너지소비량의 변환과정은 초기 함수율을 기준으로 각 건조시간마다 함수율의 비로 표현하였으며, 도출된 수분제거율은 식 (4)와 같이 각 건조시간마다 평균 소비전력의 곱으로 나타내어 건조에너지로 표현하였고, 실질적인



에너지 이용률을 비교하기 위하여 건조에너지 이용률 개념을 이용하여 식 (5)와 같이 총 사용된 에너지와 건조에너지의 비로 건조에너지 이용률을 나타내었다[19].

$$E_d = \omega \times \bar{P} \quad (4)$$

$$\psi_d = \frac{E_d}{E_t} \times 100 \quad (5)$$

여기서  $E_d$ 는 건조에너지[kWh] 즉, 농산물의 건조를 위한 에너지소비량을 나타내며,  $\bar{P}$ 는 건조과정에서의 평균 소비전력[kW],  $\psi_d$ 는 건조에너지 이용률[%],  $E_t$ 는 건조과정에서 소비된 총 에너지량[kWh]을 나타낸다.

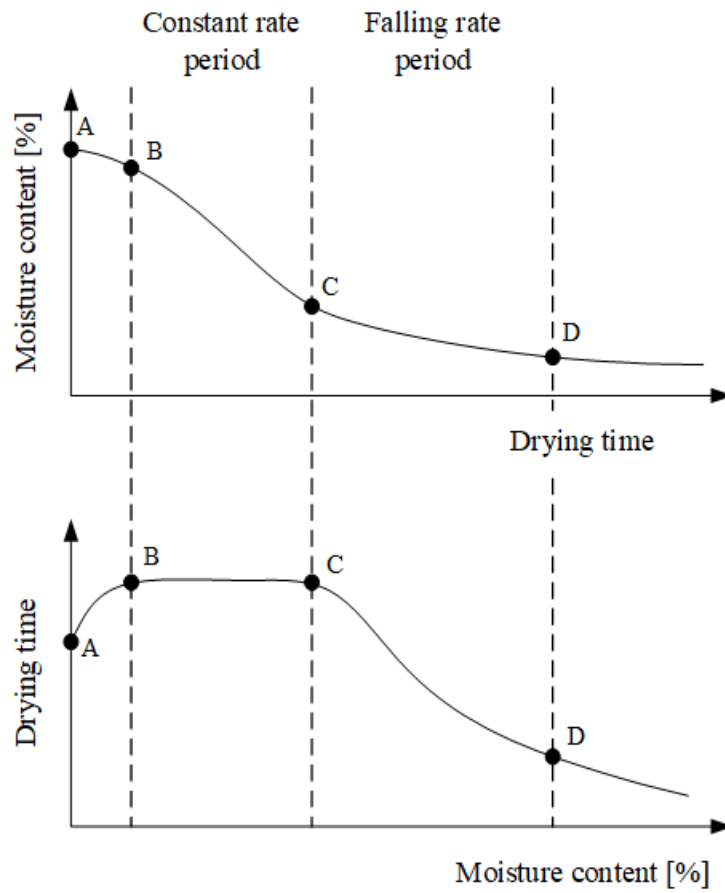


Fig. 1 The drying curve.

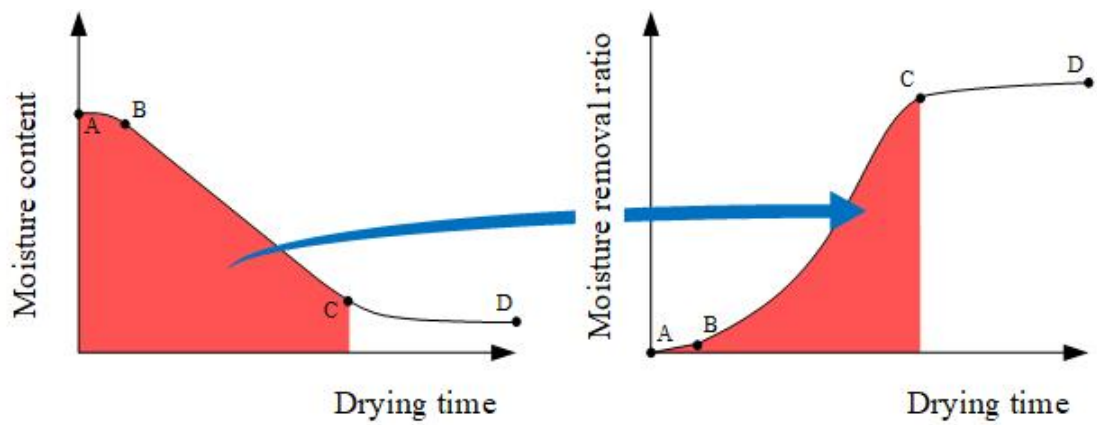


Fig. 2 The conversion methodology of moisture content to moisture removal ratio(Reproduced from Kim et al., KJACR, 2021, 33(10), p.488.).

### Ⅲ. 실험적 연구방법

#### 3.1 불확실성 분석

불확실성 분석은 측정과정에서 측정된 값의 오차를 추정하여 오차범위를 정량화하여 명확하게 하는 과정이다. 측정오차는 통계적으로 추정이 불가능한 오차인 바이어스 오차와 통계적 추정이 가능한 정밀오차가 있으며, 정확한 측정을 위해서는 바이어스 오차와 정밀오차가 적어야 한다. 불확실성 분석은 측정 시 선행되는 초기분석, 센서와 측정기법의 선정 및 측정된 데이터에 존재하는 불확실성을 포함해야 한다. 본 연구에서는 온도측정을 위하여 Fig. 3과 같이 T-type 열전대(Class 2)를 이용하였으며, 소비전력은 Fig. 4와 같이 Yokogawa 社の WT1030 모델을 이용하였고, 데이터 수집은 MX100을 이용하였다. 실험의 불확실성은 ASHRAE 가이드라인 2-2010(RA 2014)에 근거하여 식 (6)과 같이 산출하였다[20].

$$u_{tot} = u_{sys} + u_{ran} \quad (6)$$

여기서 총 불확실성( $u_{tot}$ )은 센서의 정확도와 관련된  $u_{sys}$ 과 데이터 편차에 따른 랜덤오차( $u_{ran}$ )로 구성된다[21]. 산출된 온도의 총 불확실성은  $\pm 0.33^{\circ}\text{C}$ , 소비전력의 불확실성은  $\pm 1.80\text{ W}$ 로 도출되었다.

#### 3.2 실험장치

##### 3.2.1 열펌프

열펌프는 열원에서 열을 추출하여 부하에 공급하는 장치로 여름에는 냉열을 부하에 공급하고, 겨울에는 온열을 부하에 공급하는 기기이다. 특히 열펌프는 사방밸브로 인해 응축기와 증발기의 역할 전환이 가능하여 기기의 이동이 없이 냉방과 난방이 절환되는 구조를 가진다. 구성요소로는 Fig. 5와 같이 압축기, 응축기, 증발기,

팽창장치, 사방밸브, 팬, 필터 등으로 구성되어 있으며, 1차 측에 해당하는 사이클 내부에는 냉매가 작동유체 역할을 하며, 냉매의 상변화에 따라 2차 측으로 냉열 및 온열이 배출된다[22]. 이렇게 배출된 냉열 및 온열은 일반적으로 부하에서 냉방 및 난방에 이용된다. 본 연구에서는 이러한 기능을 가진 열펌프를 이용하여 농산물 건조기의 내부 온도를 상승시키기 위한 용도로 이용하였으며, 응축기의 온열을 이용하여 건조기 내부의 온도를 상승시킴과 더불어 증발기에서는 습공기의 수분을 제거하기 위한 용도로도 이용하였다. 이때 건조기 내부온도는 60℃가 되도록 열펌프를 설계하였으며, 작동유체는 R134a 냉매를 이용하였다.

### 3.2.2 분리막

공기중의 수분을 제거하기 위한 분리막 기술은 용액-확산(solution-diffusion) 메커니즘을 기반으로 하며, 다른 가스보다 kinetic diameter가 작고, 응축성이 높기 때문에 분리막에서 수분(water vapor)이 우선적으로 투과하는 원리를 가진다(Fig. 6). 또한, 공기흐름에서 접촉된 부분에서 상변화가 없고, 최소한의 에너지가 소비되므로 공기오염(또는 변질)의 우려가 낮다. 뿐만 아니라 분리막 시스템은 전체 시스템에서 차지하는 공간이 적고, 장치의 scale-up에 용이하며, 타 장치와의 적용성이 우수한 장점을 가진다[23].

따라서 본 연구에서는 열펌프의 증발기에서 1차적으로 제거된 수분을 포함하는 공기를 분리막을 이용하여 추가적으로 제거하여 수분이 제거된 공기를 건조공간에 투입하여 농산물의 건조가 용이하도록 하였다. 분리막의 수분제거 성능은 Fig. 7과 같은 장치를 이용하여 측정하였으며, 분리막의 사양은 Table 2와 같다.

### 3.2.3 분리막이 부착된 열펌프 건조기

분리막이 부착된 열펌프 건조기는 Fig. 8과 같은 구조이며, 1차 측(냉매 측)에서는 작동유체인 R134a 냉매가 순환되며, 2차 측(공기 측)에서는 건조공간을 통과한 공기가 증발기를 거쳐 1차적으로 수분이 제거되고, 응축기를 통과한 공기는 60℃ 이상의 공기로 분리막으로 들어가게 된다. 응축기를 통과한 고온의 공기는 분리막의 활성화에너지를 높여주어 수분 투과가 용이하도록 하게하며, 분리막에서 통과된 건조공기는 다시 건조공간으로 투입되어 농산물의 건조를 위해 순환하게 된다.

실제 건조기의 형상은 Fig. 9와 같으며, 열펌프는 건조공간의 하부에 위치하도록

구성하였고, 분리막은 건조공간의 후면에 설치하였다. 분리막은 중공사 형태의 Poly ether sulfone 재질을 이용하였으며, 하부에 진공펌프를 설치하여 분리막을 통과한 수분은 증발기에서 제거된 수분과 함께 외부로 배출되도록 설계하였다.

분리막이 부착된 열펌프 건조기의 자세한 사양은 Table 2와 같으며, 팽창장치는 건조공간을 60℃로 유지할 수 있도록 모세관을 이용하여 제작하였다.

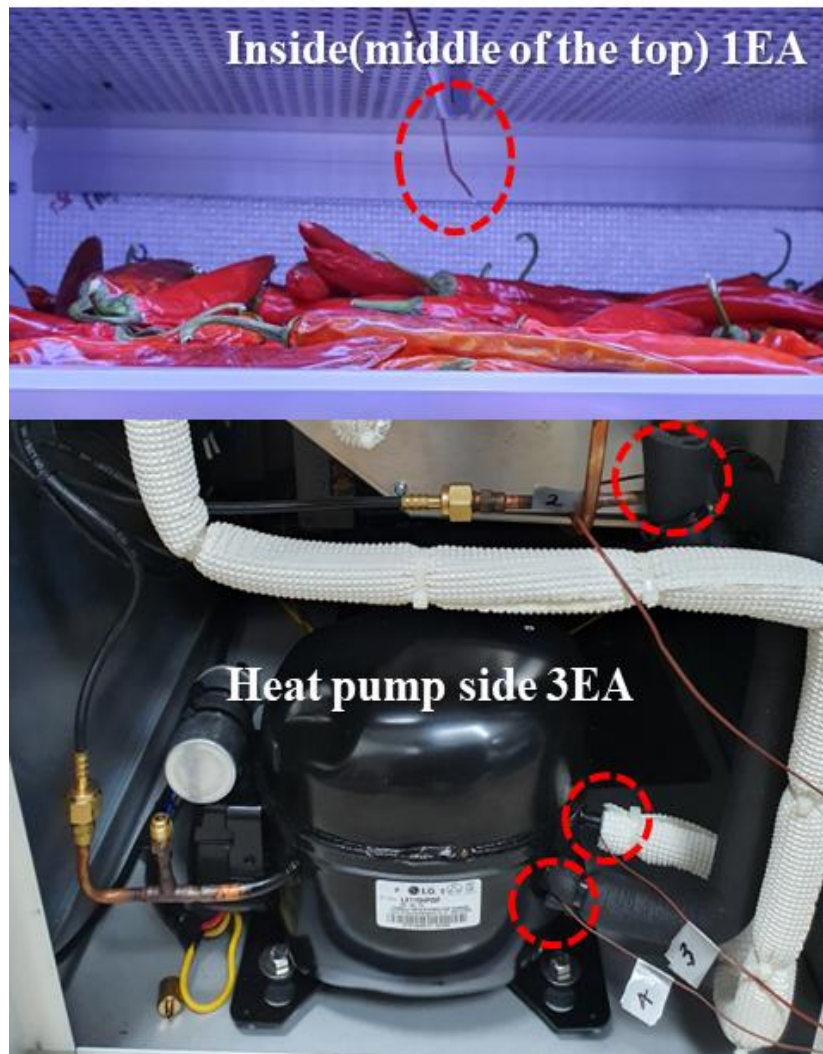


Fig. 3 Attached location of the temperature sensors(Thermocouple).

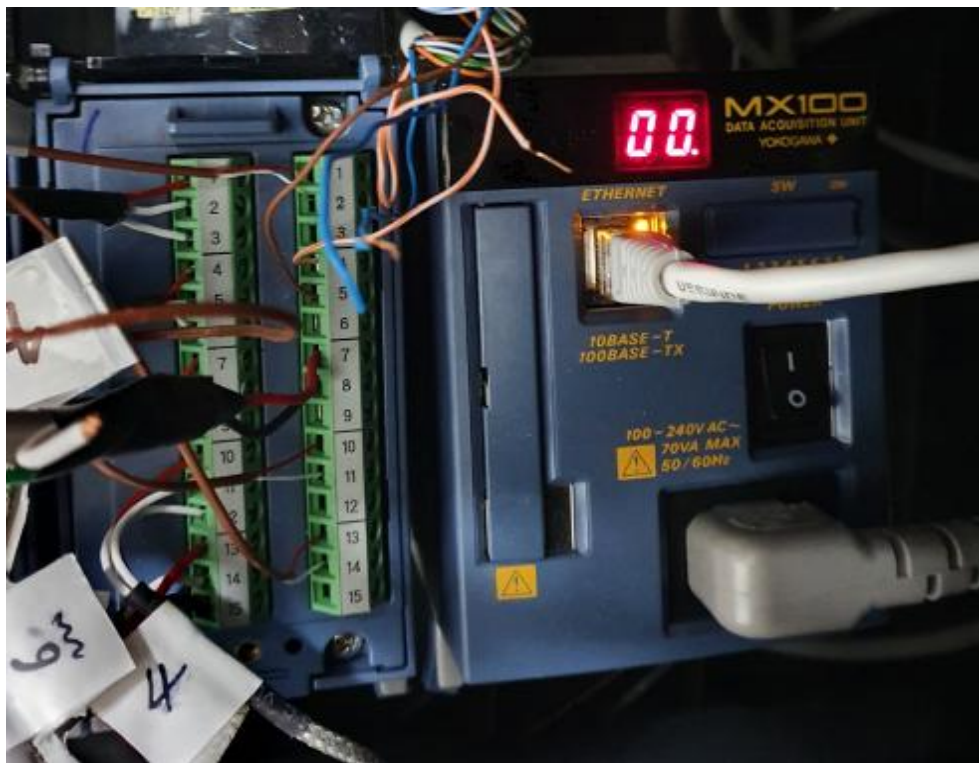
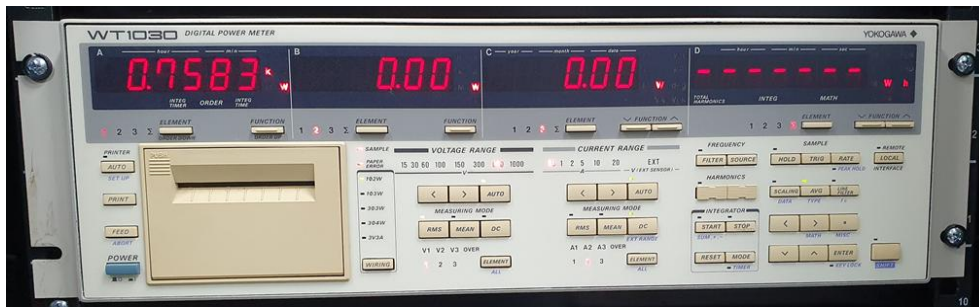


Fig. 4 Power meter(top) and data acquisition(bottom).



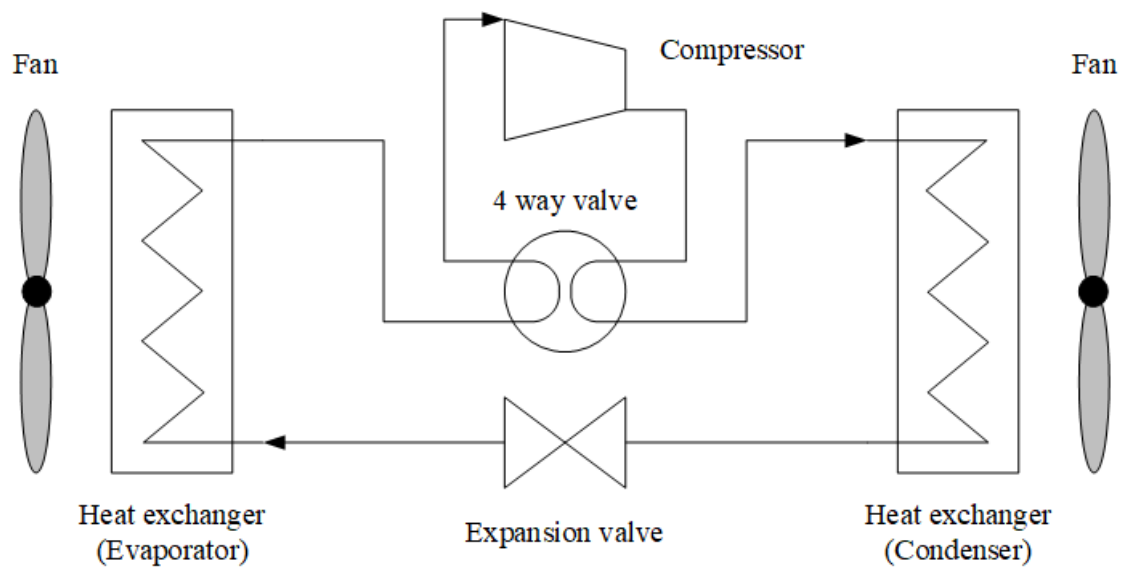


Fig. 5 Schematic diagram of the heat pump.

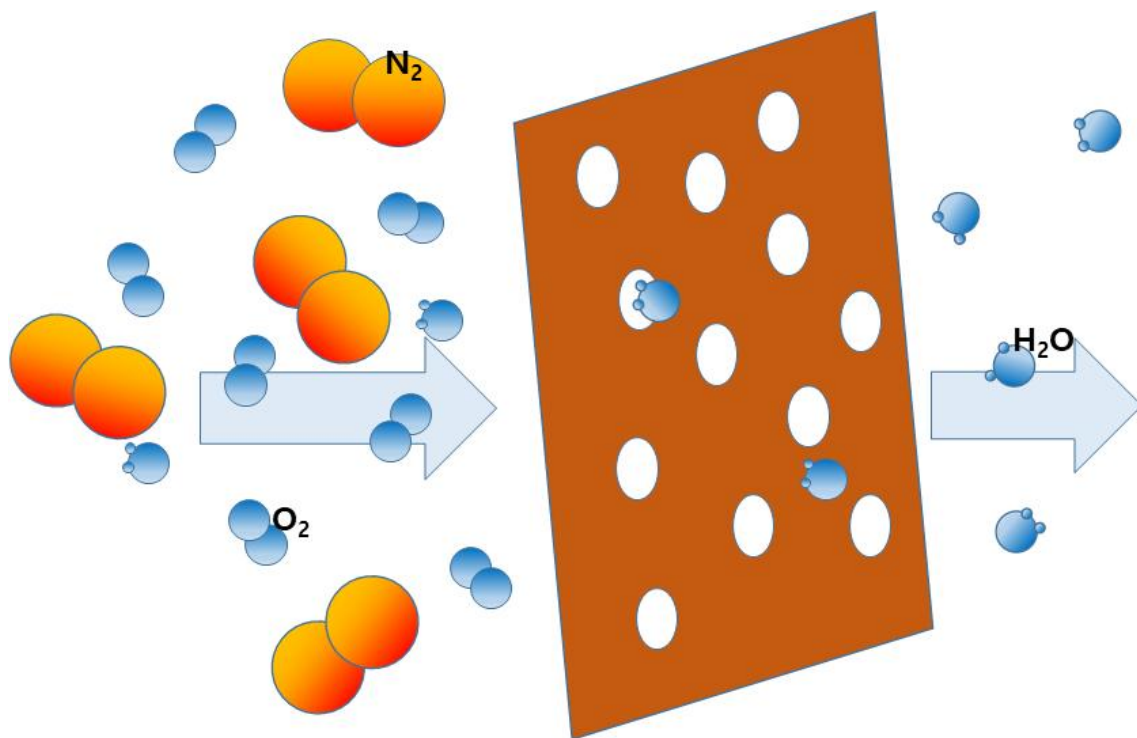


Fig. 6 Schematic of the membrane separation.

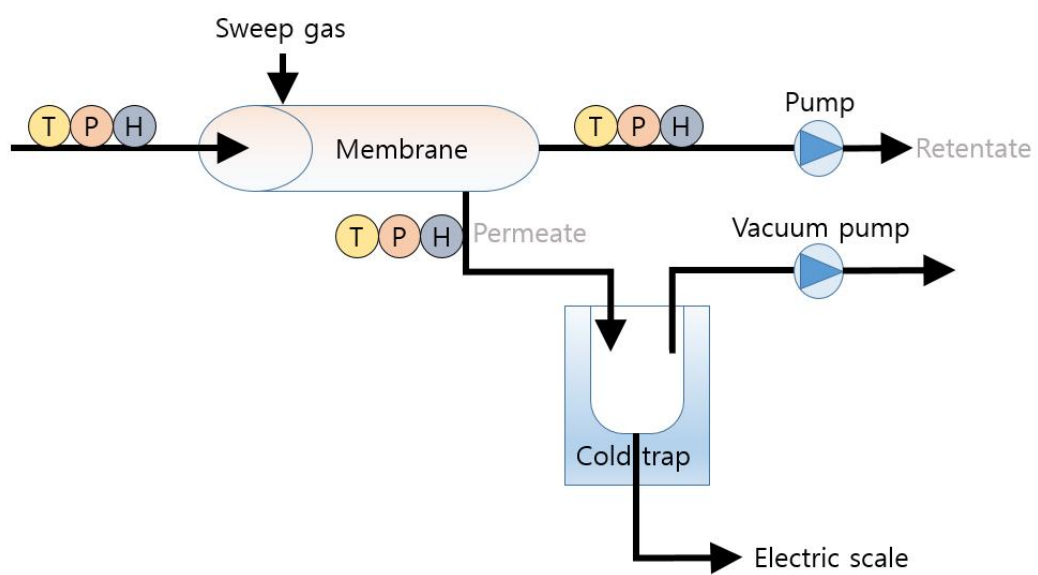


Fig. 7 Schematic diagram of the equipment for the water vapor permeation tests.

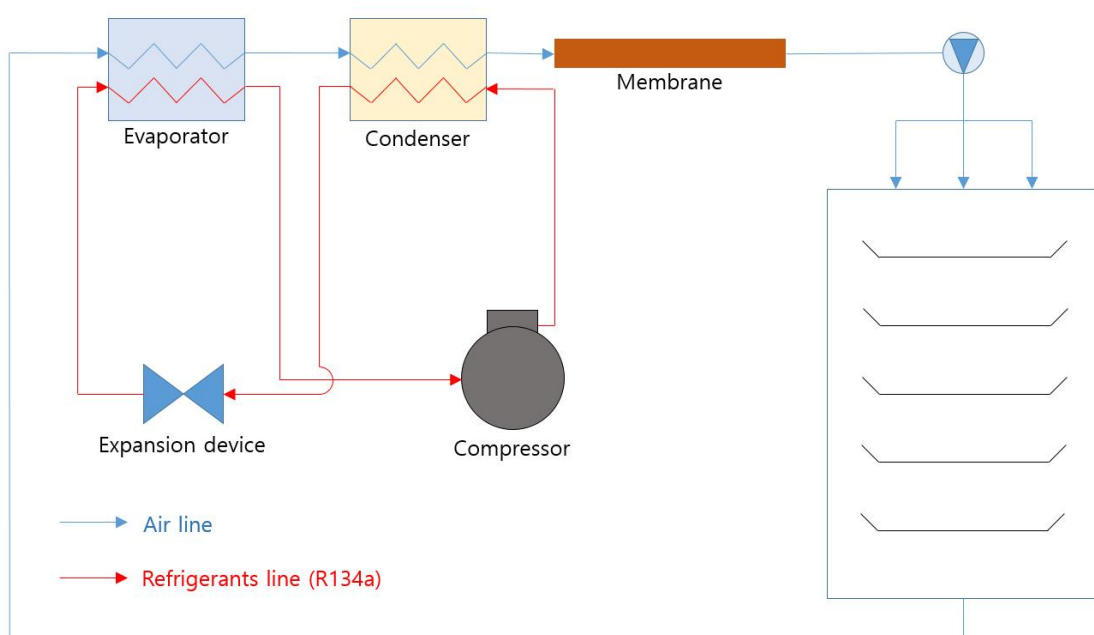


Fig. 8 Schematic diagram of the heat pump dryer with a membrane.



Fig. 9 The heat pump dryer with a membrane.

Table 2 Specifications of the heat pump dryer with a membrane

| Component      |                | Specification      | Unit              |
|----------------|----------------|--------------------|-------------------|
| Compressor     | Power          | 0.54               | kW                |
|                | Refrigerant    | R-134a             | -                 |
| Heat exchanger | Condenser      | 1.51               | kW                |
|                | Evaporator     | 1.16               | kW                |
| Fan            | Max. power     | 0.054              | kW                |
|                | Max. flow rate | 207.3              | m <sup>3</sup> /h |
| Membrane       | Available area | 0.24               | m <sup>2</sup>    |
|                | Outer diameter | 2.4                | mm                |
|                | Length         | 230                | mm                |
|                | Material       | Poly ether sulfone | -                 |
| Vacuum pump    | Max. power     | 0.25               | kW                |
|                | Max. flow rate | 40                 | LPM               |

### 3.3 실험방법

#### 3.3.1 건조기 내부 풍량

건조기의 내부 풍량에 따른 농산물 건조성능 변화를 관찰하기 위하여 내부 풍량을 측정하여 실험에 반영하였다. 건조기 내부 풍량은 농산물의 배치나 종류 등에 따라 변화하기 때문에 초기에 풍량을 측정하여 BLDC 팬을 이용하여 속도를 맞춘 후 실험에 반영하였다. 이때 초기 풍량 측정을 위하여 Fig. 10과 같은 내부 덕트를 이용하였으며, 순환되는 공간의 모든 부위에 기밀을 유지하도록 하였다. 풍량은 덕트 단면의 4개소에서 측정된 풍량의 평균값을 이용하였으며, 실험에 이용된 풍량은 49.7 CMH, 61.2 CMH, 91.8 CMH이다. 측정위치의 단면적은 0.085m<sup>2</sup>이다.

#### 3.3.2 농산물 함수율 변화

건조기의 건조에너지를 산출하기 위하여 농산물의 함수율 변화를 측정하였다. 측정에 이용된 농산물은 홍고추와 무이며, 일반적으로 홍고추는 건조 후 고춧가루로 이용되고, 무는 건조 후 무말랭이로 이용된다.

본 연구에 이용한 고추의 품종은 녹광 홍고추이며, 녹광은 착과 및 비대가 좋으며, 과형 변화가 적고, 광택이 우수한 특징을 가진다. 또한 일반적으로 풋고추로 이용되고 있으며, 홍고추 출하도 가능하다. 본 연구에서는 건조품질의 안정화를 위해 녹광을 이용하였고, 일반적인 홍고추 및 고춧가루는 가격경쟁력이 우수한 품종이 이용되고 있으며, 건양홍, 홍초왕, 고은, 완대박, 부자, 정일품 등의 품종이 이용된다.

실험 시 홍고추는 20 kg을 건조공간에 고르게 배치하여 건조하였으며, 함수율 측정에는 줄기(꼭지)를 제외한 10g의 임의의 시료를 이용하였다. 무는 사이즈별 건조 시간 및 함수율변화를 관찰하였다. 무의 경우, Fig. 11과 같이 임의의 사이즈 10개를 표본으로 가장 큰 사이즈와 가장 작은 사이즈를 제외한 8개의 시료를 평균(Root Mean Square)한 값을 이용하였으며, 평균값의 차이에 따른 건조성능을 관찰하였다. 측정은 온도센서(T-type 열전대), 전력량계 등을 이용하였고, 데이터는 Yokogawa社의 MX100 모델을 이용하여 수집하였다.

### 3.3.3 분리막 성능실험

건조기에 이용되는 분리막의 성능을 측정하기 위해 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였고, 분리막에서 Feed 측과 Retentate 측, Permeate 측에 건구온도, 상대습도, 압력을 측정하였다. Feed 측과 Permeate 측의 압력차는 0.3 bar가 유지되도록 하였고, Permeate 측의 유량은 40.4 LPM이 되도록 설정하였다. 실험결과, 분리막의 시간당 수분제거 플럭스는 약 1.1 kg/m<sup>2</sup>h로 도출되었다.



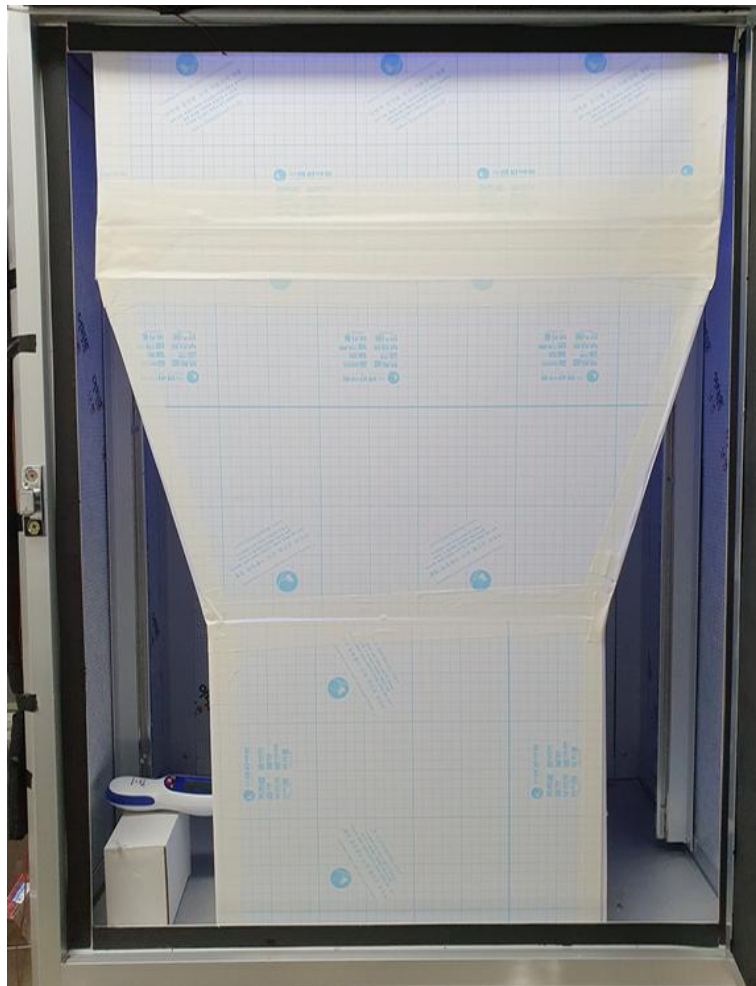


Fig. 10 Duct for air flow rate measurement.



Fig. 11 The radish sample.

## IV. 실험결과 및 고찰

### 4.1 고추 건조 실험결과

분리막이 부착된 열펌프 건조기를 이용하여 홍고추 건조를 실시하였다. 건조에 이용된 홍고추는 총 20kg이며, 약 10시간 간격으로 시료 10g을 대상으로 함수율을 측정하였다. 홍고추 건조 시 함수율의 변화가 조절구간 및 항률건조구간의 구분이 명확하지 않는 실험에서는 동일한 시간 간격을 적용하였으며, 예비 테스트 과정을 통해 도출된 시간 범위에서 구간을 구분하였고, 추가 실험이 필요한 구간에서는 5시간 간격으로 실험을 추가하였다.

건조시간에 따른 홍고추의 함수율 변화 실험결과는 Fig. 12에서 Fig. 14와 같다. Fig. 12는 건조기 내부 풍량이 49.7 CMH일 때 건조시간에 따른 함수율 변화를 나타낸 그래프이며, 풍량이 49.7 CMH일 때 함수율은 건조시간이 약 50시간일 때 변곡점을 가짐을 알 수 있었으며, 약 60시간 이후부터 함수율이 20%를 나타내었다. Fig. 13은 건조기 내부 풍량이 61.2 CMH일 때 건조시간에 따른 함수율의 변화를 나타내는 그래프이며, 결과에서와 같이 건조시간 약 35시간에서 변곡점을 나타내었으며, 약 55시간 이후부터 함수율이 20%를 나타내었다. Fig. 14는 건조기 내부 풍량이 91.8 CMH일 때 건조시간에 따른 함수율의 변화를 나타낸 그래프이며, 전체적으로 완만하게 건조가 이루어짐을 알 수 있었다. 반면, 실험 중 최대 풍량인 91.8 CMH 실험에서는 함수율의 변화가 변곡점을 가지지 않는 결과를 나타내었는데, 이는 건조대에 배치된 홍고추가 풍량에 의해 이동한 결과가 반영되었기 때문이다.

건조시간에 따른 함수율의 변화를 식 (4)를 이용하여 Fig. 15에서 Fig. 17과 같이 변환하여 수분제거율을 나타내었다. 수분제거율은 조절구간에서는 1차식으로 표현되며, 항률건조구간에서는 지수식 또는 2차식으로 표현된다. 이는 조절구간에서는 온도변화가 일정하고, 항률건조구간에서는 온도변화가 급격하게 일어나는 현상을 반영한 것이다.

Fig. 15는 건조기 내부 풍량이 49.7 CMH일 때 수분제거율을 나타내는 그래프이며, 변곡점은 건조시간이 약 33.9시간일 때로 나타났고, Fig. 16은 건조기 내부 풍량이 61.2 CMH일 때의 수분제거율을 나타내는 그래프로 변곡점은 건조시간이 약

28.6시간일 때 발생하였다. 또한 Fig. 17은 건조기 내부 풍량이 91.8 CMH일 때의 수분제거율을 나타내고 있으며, 변곡점은 건조시간이 약 13.2시간일 때 발생하였다. 결과적으로 건조기 내부 풍량이 증가할수록 건조시간의 변곡점은 빨리 발생하였으며, 즉, 건조기 내부의 풍량이 증가할수록 조절기간이 감소하여 농산물의 건조가 빠르게 이루어짐을 알 수 있었다.

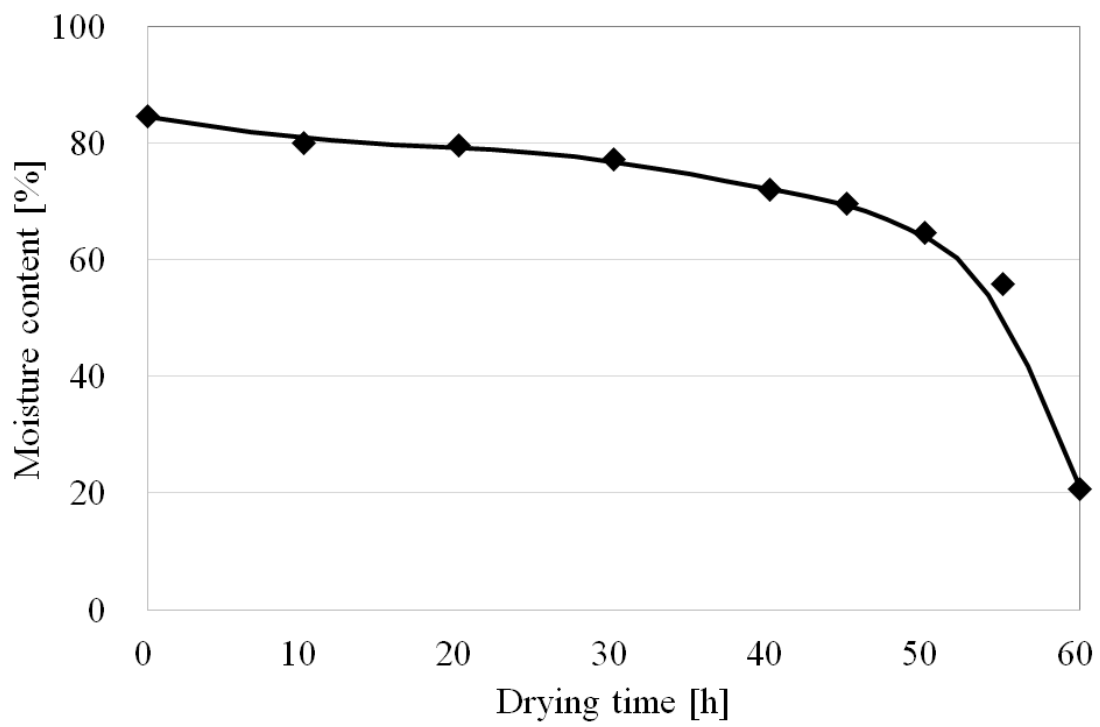


Fig. 12 Variations of moisture content according to drying time  
 (Air flow rate: 49.7 CMH, Chili pepper, 20kg).

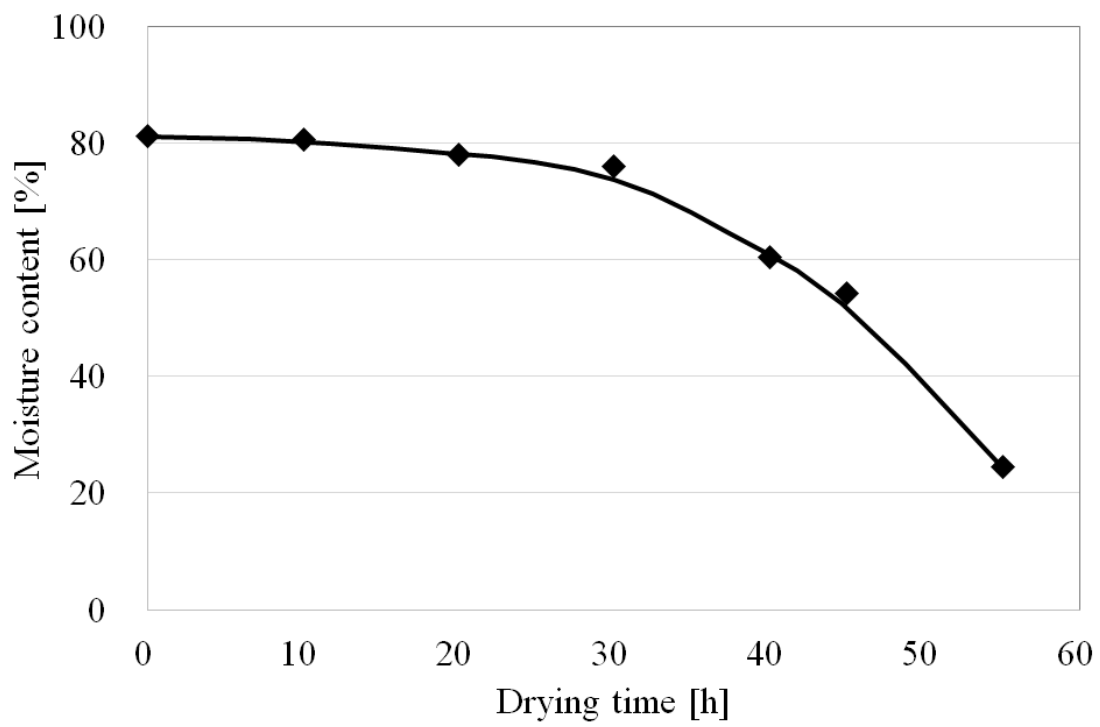


Fig. 13 Variations of moisture content according to drying time  
 (Air flow rate: 61.2 CMH, Chili pepper, 20kg).

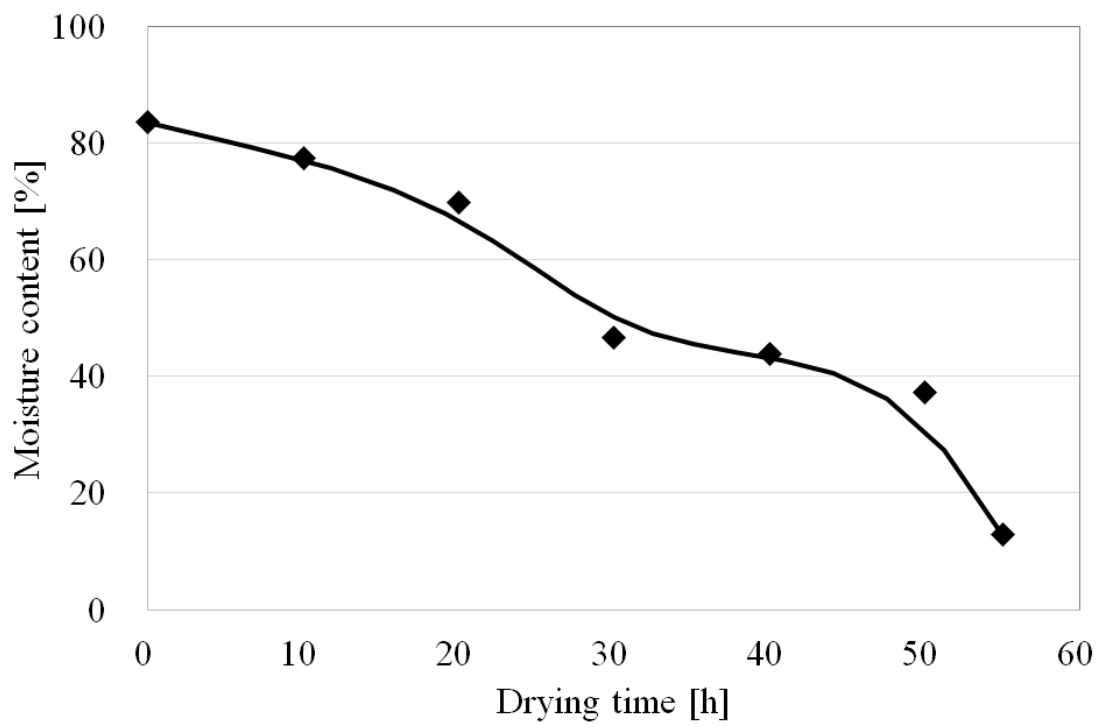


Fig. 14 Variations of moisture content according to drying time  
 (Air flow rate: 91.8 CMH, Chili pepper, 20kg).

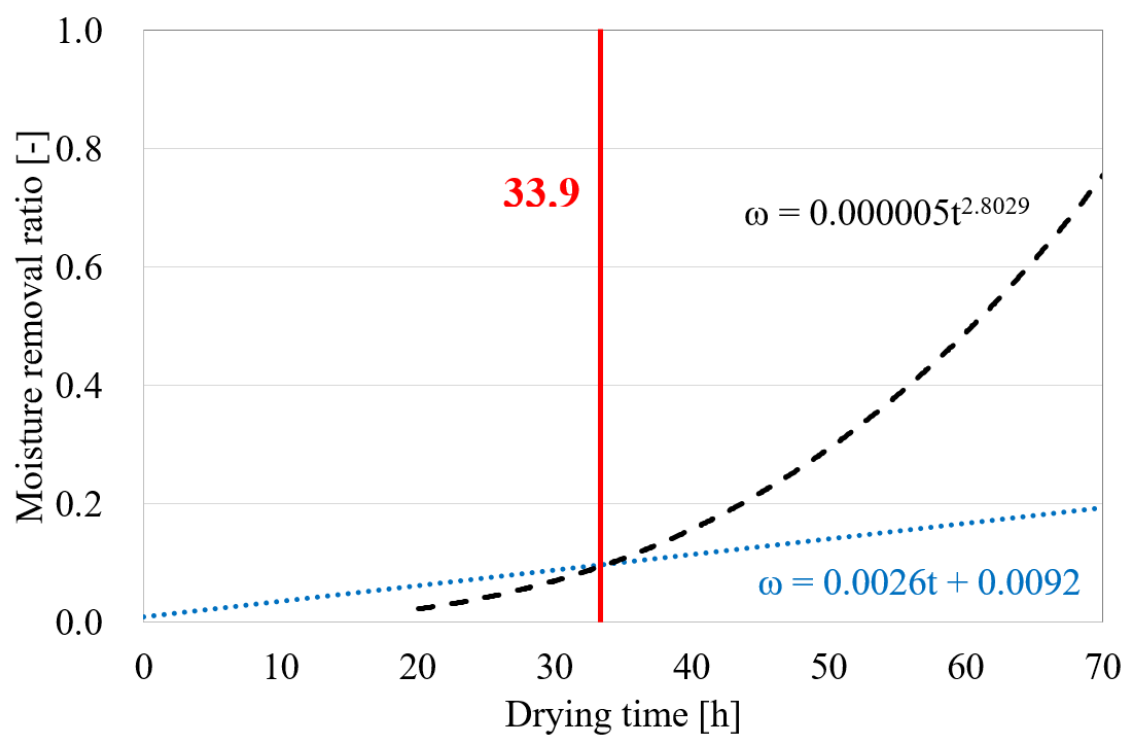


Fig. 15 Variations of moisture removal ratio according to drying time (Air flow rate: 49.7 CMH, Chili pepper, 20kg).



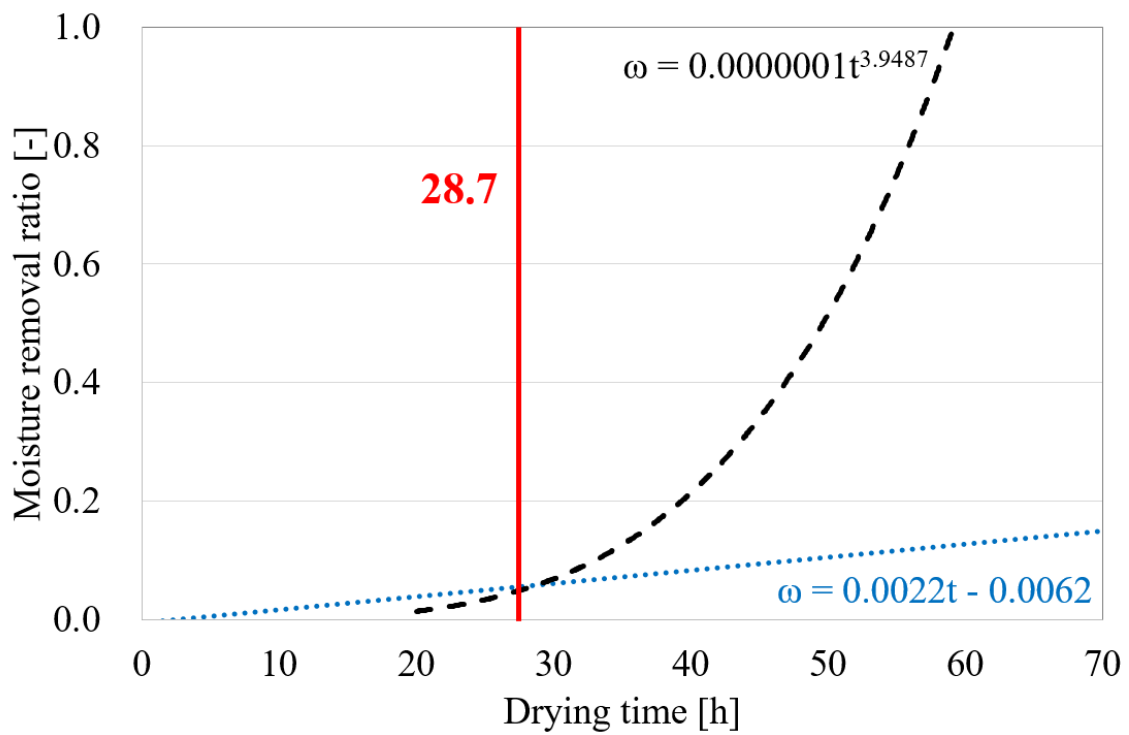


Fig. 16 Variations of moisture removal ratio according to drying time (Air flow rate: 61.2 CMH, Chili pepper, 20kg).

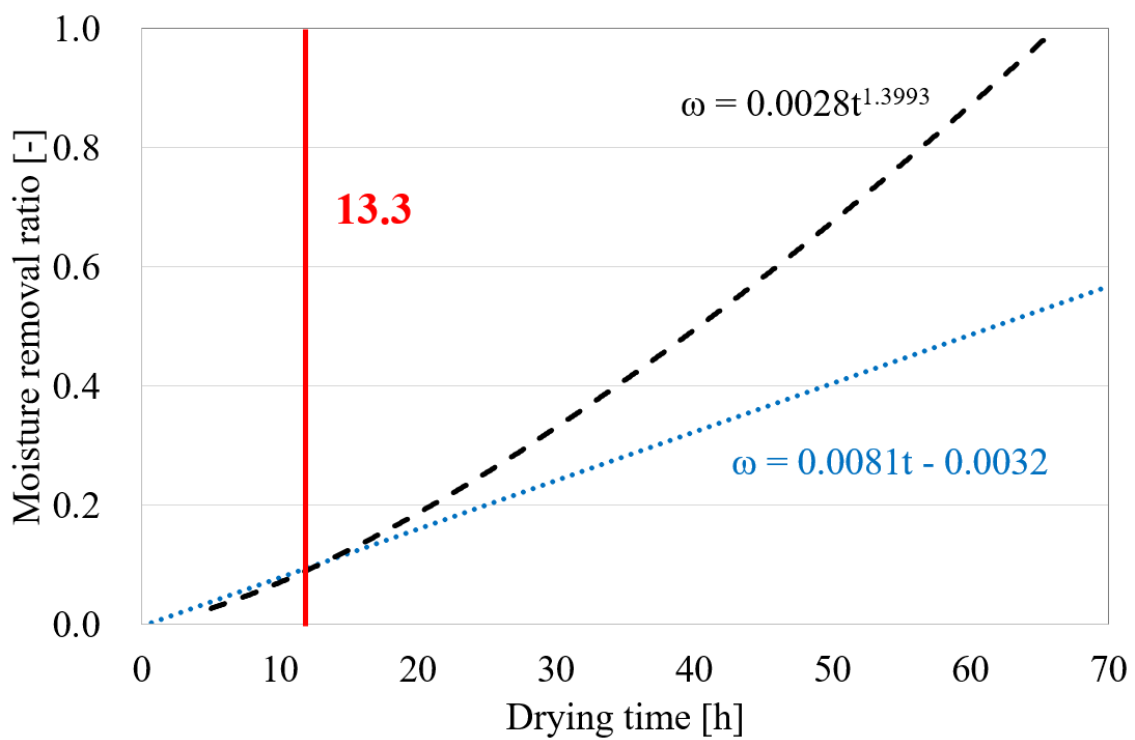


Fig. 17 Variations of moisture removal ratio according to drying time (Air flow rate: 91.8 CMH, Chili pepper, 20kg).

## 4.2 무 건조 실험결과

무 건조는 가로와 세로 크기에 따라 건조시간이 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서는 무 20kg을 건조하기 전에 가로와 세로 크기에 따른 건조시간을 측정하였으며, 결과는 Fig. 18과 같다. 실험에 이용된 무는 초기 함수율이 약 95%였으며, 완전 건조되기까지 가로와 세로 길이가 약 10mm, 8mm, 6mm, 4mm인 경우를 비교하였으며, 가로와 세로의 길이가 작을 때 건조시간이 단축되었음을 알 수 있었다. 하지만 가로와 세로의 길이가 4mm, 6mm인 무는 건조 후 상품성이 매우 낮다고 판단되었으며, 따라서 본 연구에서는 8mm간격의 무를 이용하여 20kg 건조 실험을 실시하였다. 실험에 이용한 온도는 60℃로 고추실험과 동일하게 하였으며, 실험결과는 Fig. 19와 같이 나타났다.

건조시간에 따른 무의 함수율변화는 건조기 내부의 풍량이 91.8 CMH일 때 Fig. 19와 같이 나타났으며, 수분이 2/3이상(94.5%→30.2%) 제거되는데 32시간정도가 소요됨을 알 수 있었다. 무의 함수율 측정은 6시간 간격으로 30시간까지 측정하였고, 30시간 이후부터는 2시간씩 측정하였다. 무는 홍고추에 비해 건조시간이 적게 걸리기 때문에 빠른 측정이 필요하였고, 특히 20~30시간부터 항률건조구간에 들어가서 완만한 건조가 이루어졌다. 특히 무는 주성분의 94%정도가 수분으로 이루어져있기 때문에 결과에서와 같이 시간이 지남에 따라 함수율은 완만한 2차 곡선 형태로 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 20은 무의 건조시간에 따른 수분제거율을 나타내는 그래프이다. 조절구간에서 항률건조구간으로 전환되는 변곡점은 건조시간 17.3825에서 나타났으며, 무의 함수율 20%에 해당하는 건조시간 약 34시간 중 절반가량의 시간이 조절구간으로 나타났다. 이는 무의 특성상 주성분의 대부분(일반적으로 약 94%)이 수분에 해당하고, 수분이 농산물의 표피를 투과(표피 피막경화 현상, Case hardening of hard casing)하는데 걸리는 시간에 해당한다.

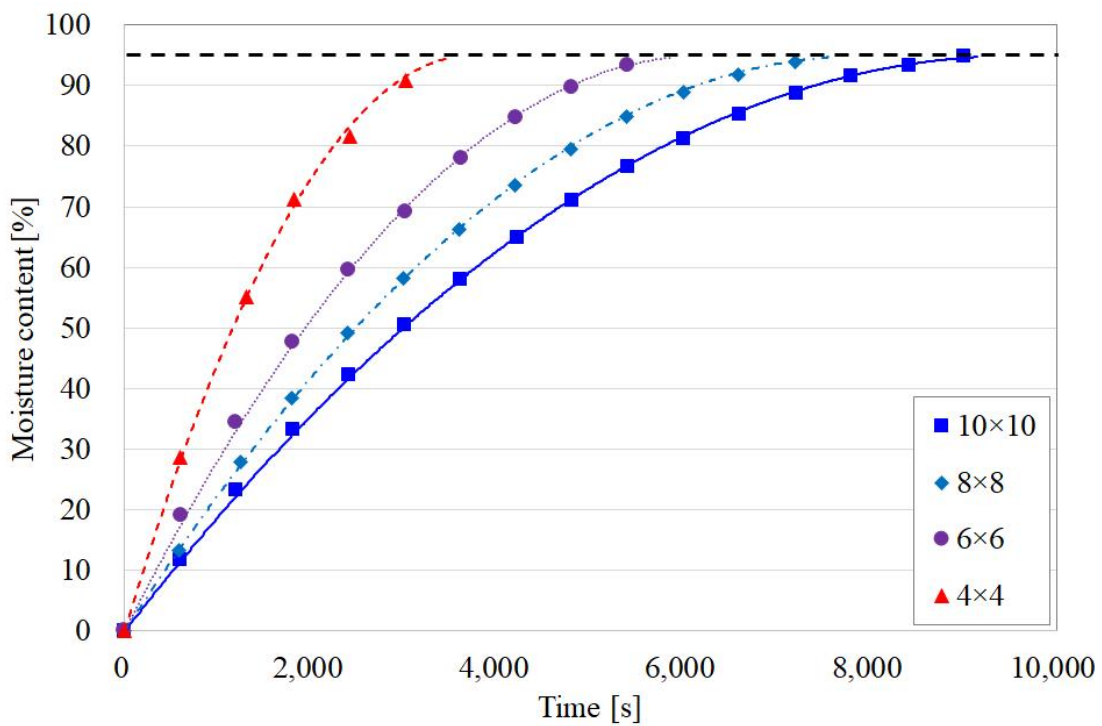


Fig. 18 Variations of moisture content according to drying time for each size of radish(Air flow rate: 91.8 CMH, Radish).

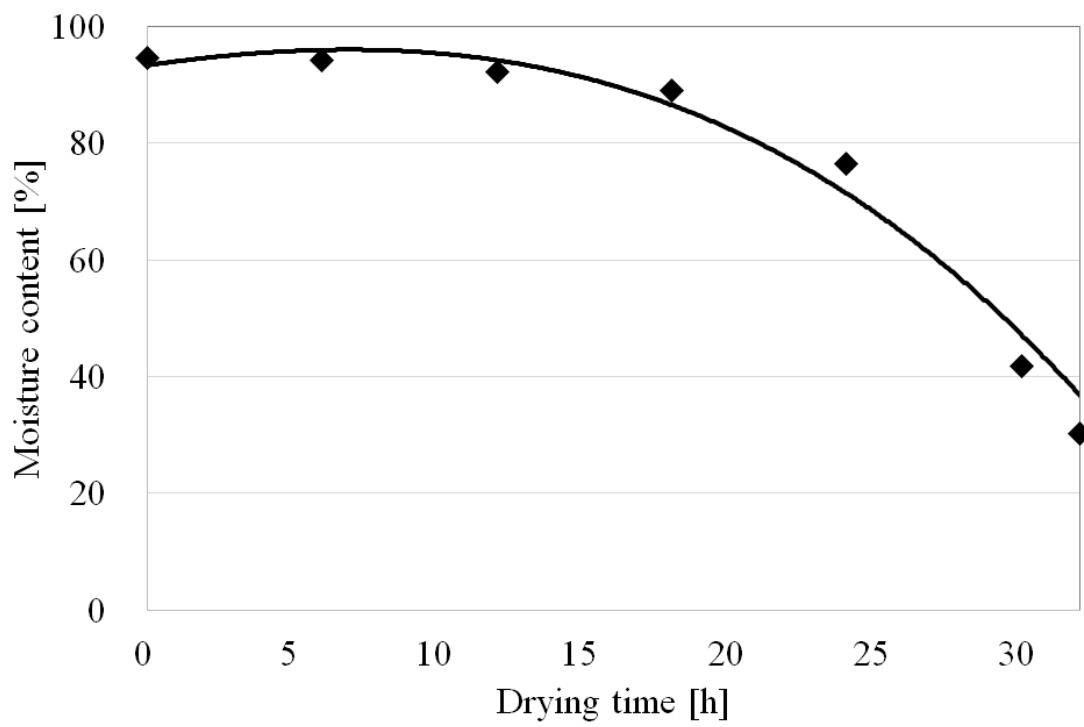


Fig. 19 Variations of moisture content according to drying time  
(Air flow rate: 91.8 CMH, Radish, 20kg).

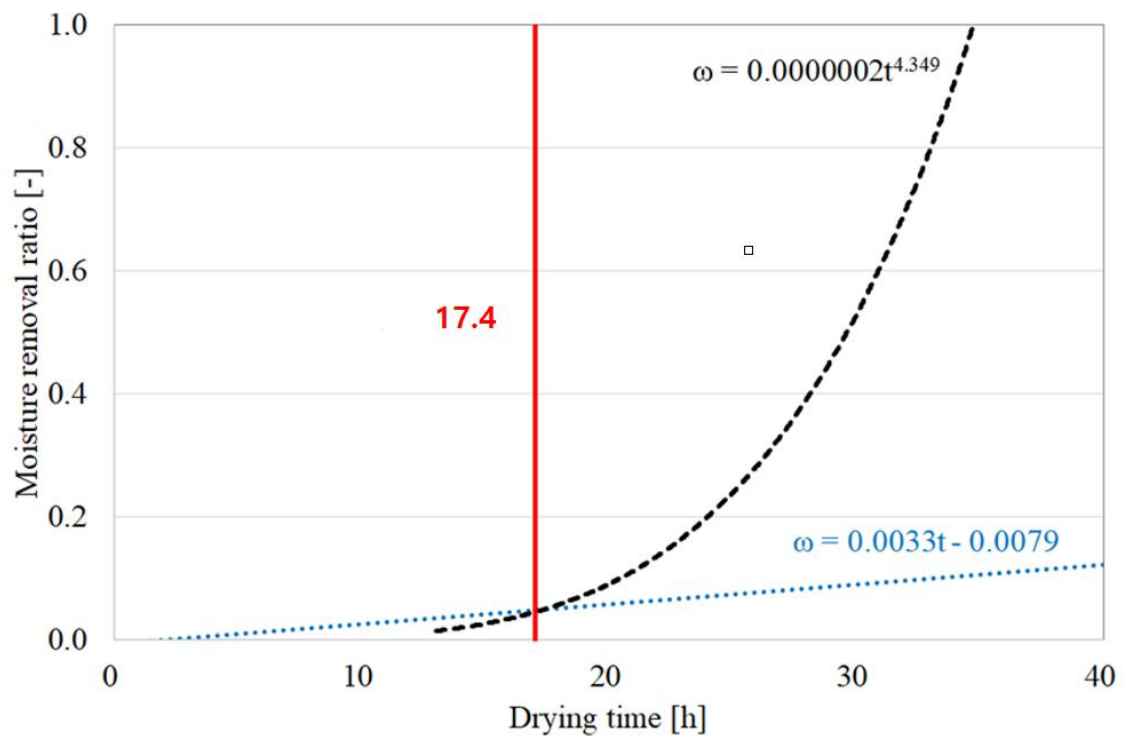


Fig. 20 Variations of moisture removal ratio according to drying time (Air flow rate: 91.8 CMH, Radish, 20kg).

### 4.3 건조성능 분석

건조성능 분석을 위해 열펌프로만 구성된 건조기와 분리막이 부착된 열펌프 건조기의 건조성능을 비교하였다. Fig. 21은 비교한 결과이며 열펌프로만 구성된 건조기의 경우 건조공간에서 추출된 수분이 증발기에서만 외부로 방출되지만 분리막이 부착된 열펌프 건조기의 경우 분리막과 증발기가 같이 수분을 외부로 방출하게 된다. 비교한 결과 함수율 20% 이상의 범위에서 열펌프로만 구성된 건조기에 비해 6.6% 낮게 나타났다. 또한 건조기의 건조성능은 건조대상을 목표로 하는 함수율까지 빠른 시간동안 최소한의 에너지를 이용하여 건조하는 능력을 나타낸다.

본 연구에서는 건조대상인 농산물을 목표로 하는 함수율까지 최소한의 에너지를 이용하여 건조시간을 단축시키고자 분리막이 부착된 열펌프 건조기를 착안하였으며, 건조대상인 농산물이 최소한의 에너지를 이용함을 나타내는 지표로 건조에너지 이용률 개념을 도입하였다. 즉, 건조에너지 이용률은 동일한 투입에너지(소비전력) 대비 건조에 많은 에너지를 이용한다면 건조에너지 이용률은 높게 나타나고, 투입되는 에너지가 많거나 건조에 이용되는 에너지가 적을 때는 건조에너지 이용률이 낮게 도출된다.

Fig. 22는 홍고추 건조 시 풍량에 따른 건조에너지 이용률을 나타낸 결과이며, 건조시간 50시간일 때 모든 풍량에서 높은 건조에너지 이용률을 보임을 알 수 있었다. 또한 전체적으로 건조시간이 많을수록 건조에너지 이용률은 높게 나타났으며, 이는 농산물 건조에 이용되는 에너지가 축적되어 시간이 지날수록 축적된 에너지가 보다 원활하게 건조에 이용된 결과이다. 또한, 건조시간 30시간 및 40시간 구간에서 풍량 49.7 CMH일 때가 풍량 61.2 CMH일 때보다 건조에너지 이용률이 높게 도출되었는데, 이는 40시간 이전 구간이 조절구간으로 결국 건조를 위해 많은 에너지를 불필요하게 이용하였음을 알 수 있었다.

Fig. 23은 무 건조 시 건조시간에 따른 건조에너지 이용률을 나타낸 결과이다. 전체적으로 무는 조절구간(17.3825 시간) 이후부터 선형적으로 건조에너지 이용률이 증가함을 알 수 있었다.

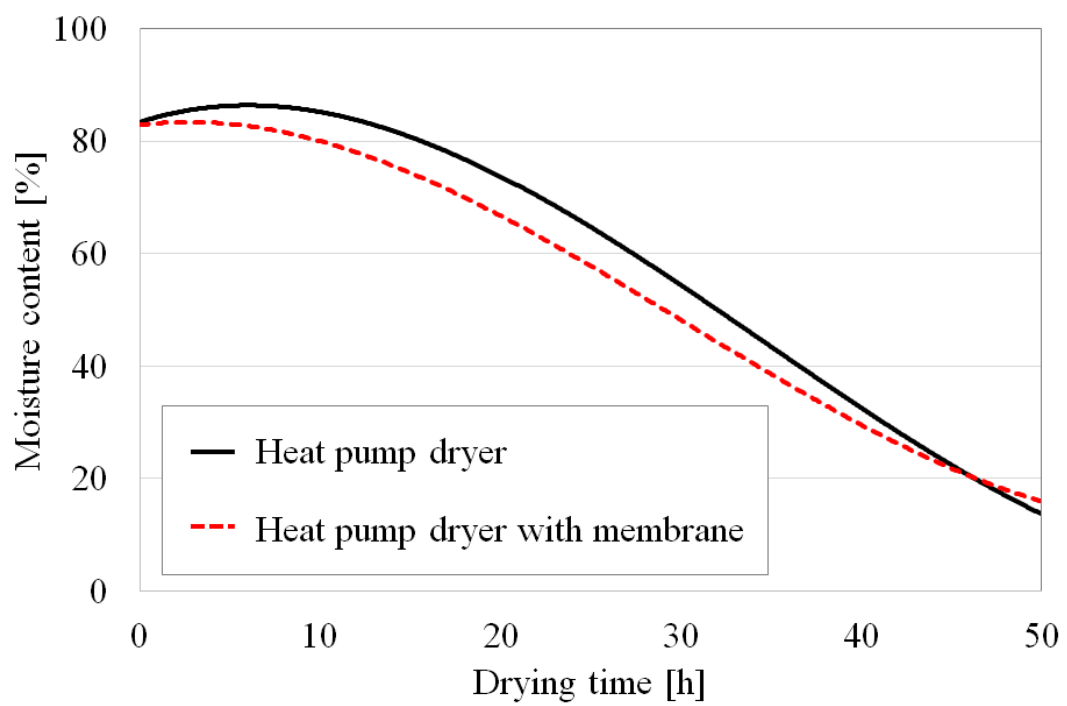


Fig. 21 Comparison of moisture content between with membrane and without membrane.



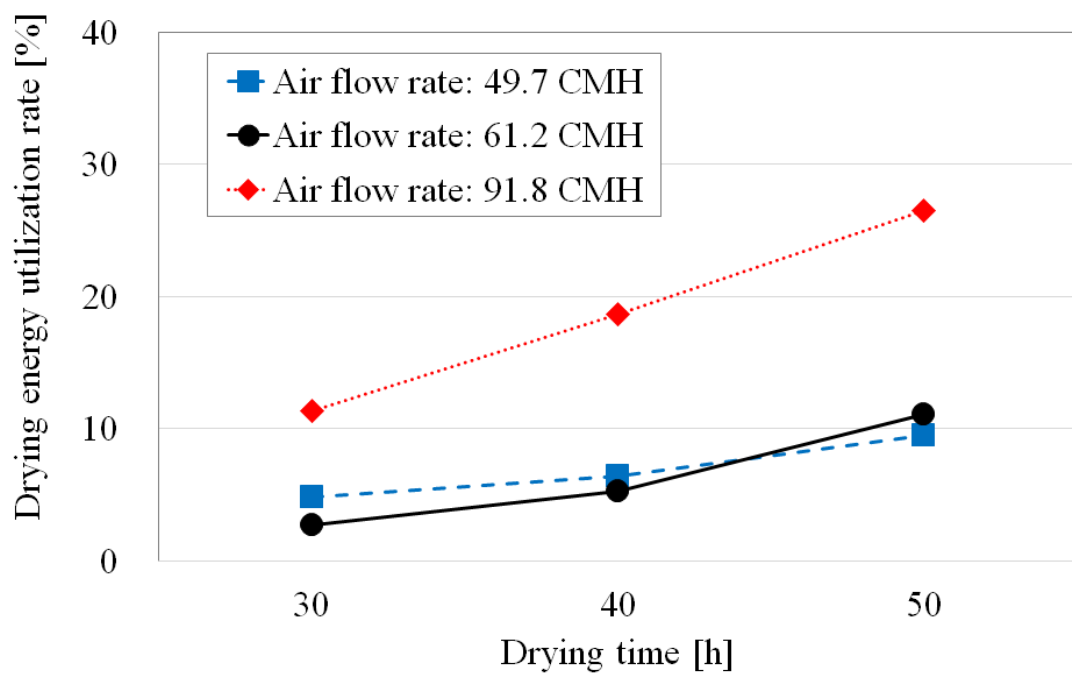


Fig. 22 Variations of drying energy utilization rate according to air flow rate (Chili pepper, 20kg).

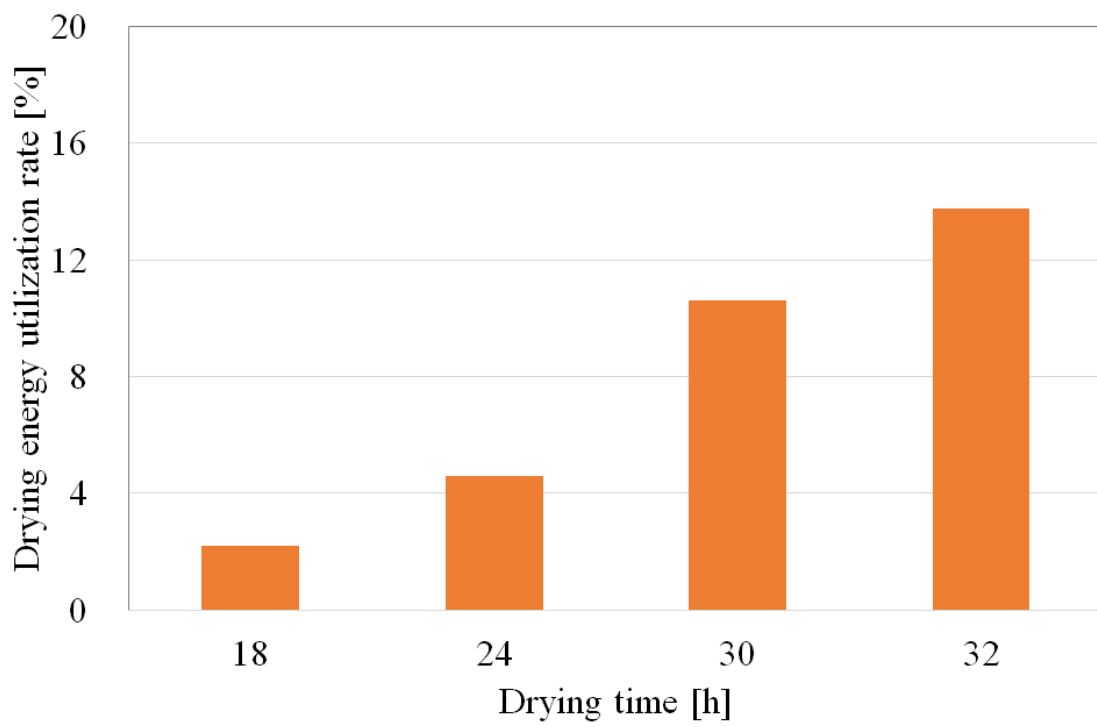


Fig. 23 Variations of drying energy utilization rate according to drying time (Air flow rate: 91.8 CMH, Radish, 20kg).

## V. 결 론

본 연구에서는 분리막이 부착된 열펌프 건조기를 이용하여 홍고추 및 무 건조 시 건조성능의 정량화를 위해 각 건조시간마다 평균 소비전력을 곱한 건조에너지 개념을 도입하였으며, 총에너지 사용량과 건조에너지의 비를 이용하여 건조기 가동 시 소비되는 총에너지 중 건조를 위해 소비되는 에너지를 파악하고자 하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 건조기 내부의 풍량은 농산물 건조에 영향을 미치는 인자로 풍량이 증가할수록 건조시간이 단축됨을 알 수 있었다. 풍량이 49.7 CMH 일 때 건조시간의 변곡점은 33.9시간으로 나타났고, 61.2 CMH 일 때 28.6시간, 91.8 CMH 일 때 13.2시간으로 풍량이 10% 증가할수록 건조시간은 약 7.9% 감소함을 알 수 있었다.
- 2) 무는 가로와 세로 길이가 50% 감소하면 건조시간은 61.4% 단축되는 결과를 나타내었다. 또한 홍고추에 비해 건조시간에 따른 함수율변화가 완만한 결과를 나타내었는데, 이는 무의 주성분이 수분(약 94%)이기 때문이다.
- 3) 건조성능 비교를 위해 열펌프만 가동했을 때와 분리막이 부착된 열펌프를 가동했을 경우를 비교한 결과 건조물(홍고추)의 함수율은 20%의 범위에서 열펌프만 이용했을 경우에 비해 분리막이 부착된 열펌프의 건조실험 시 함수율은 6.6% 낮게 나타났다. 이는 순환되는 공기의 수분이 열펌프의 증발기와 분리막에서 동시에 수분을 제거하기 때문이며, 6.6%의 함수율만큼 분리막이 수분제거에 영향을 끼친 것으로 나타났다.
- 4) 건조에너지 이용률은 건조시간이 증가할수록 높게 나타냄을 알 수 있었다. 이는 건조를 위해 투입된 에너지가 시간이 지날수록 누적되어 최종건조시간에 도달할수록 많은 에너지가 효율적으로 이용되기 때문이며, 결과적으로 건조에너지 이용률을 높이기 위해서는 건조시간에 따른 수분제거율의 변곡점을 최소화하여 단시간에 최대의 에너지를 투입할 필요가 있음을 알 수 있었다.

결과적으로 건조기의 건조성능을 증가시키기 위해서는 건조에너지 이용률을 증가시켜야하는데, 이는 단시간에 향률건조구간을 형성하여야 하고, 이를 위해 건조에 적절한 온도 및 풍량 형성이 필요함을 알 수 있다.

## 참고문헌

- [1] 제주특별자치도농업기술원, “2021년 농산물가공·천연염색”, 제주특별자치도농업기술원 농업기술 e-book, 발간등록번호: 79-6500073-000194-01, pp.17-23, 2020.
- [2] 농림축산식품부, “위생향상과 에너지절감을 위한 멤브레인-열펌프 융합형 농산물 건조기 개발”, 농축산자재산업화기술개발사업 2021년도 최종보고서, 발간등록번호: 11-1543000-003642-01, pp.2-9, 2021.
- [3] 성제훈, “농산물 건조기술의 현재와 미래”, 농축산기계신문, 2018.
- [4] 양원석, 김영일, 박승태, “전기히터식, 공기열원 및 지열원 열펌프식 농산물 열풍 건조기의 사이클 해석에 의한 성능 비교”, 한국지열·수열에너지학회논문집, Vol.14, No.4, pp.7-12, 2018.
- [5] 양원석, 김영일, 박승태, “전기히터식, 공기열원 및 지열원 열펌프식 농산물 열풍 건조기의 초기투자비 분석”, 설비공학논문집, Vol.31, No.8, pp.380-390, 2019.
- [6] 양원석, 김영일, 박승태, “전기히터식, 공기열원 및 지열원 열펌프식 농산물 열풍 건조기의 사이클 해석에 의한 성능 비교”, 설비공학논문집, Vol.32, No.3, pp.135-145, 2020.
- [7] 김재원, “농산물의 건조방법과 건조에 따른 품질변화, 적외선 건조법의 활용과 우수성”, 식품저장과 가공산업, Vol.18, No.2, pp.7-15, 2019.
- [8] 정현철, 김상열, 이상로, 송효남, “열펌프 하이브리드 건조장치의 난건조 농수산물 건조 특성에 관한 연구”, 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2017년 한국유체기계학회 하계학술대회, pp.47-48, 2017.
- [9] 고재곤, 유성연, 김명호, 김태호, 김홍범, “열펌프 건조기의 성능에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회 춘추학술대회, pp.3712-3714, 2015.
- [10] 고학균, “태양열과 농산물 건조”, 대한설비공학회 강연회 및 기타간행물, pp.39-50, 1986.
- [11] 고학균, “태양열과 농산물 건조”, 설비저널, Vol.16, No.1, pp.25-33, 1987.
- [12] 이태규, 조서현, 최영희, 오정무, “고추건조를 통한 태양열 건조기의 열성분석”, 한국태양에너지학회 학술대회논문집, p.41, 1989.
- [13] 농림축산식품부, “원추형 태양광-열(CPV/T)복합 집광시스템을 이용한 에너지

- 자립형 농산물 건조장치 개발”, 첨단생산기술개발사업 2017년도 최종보고서, 발간등록번호: 11-1543000-002140-01, pp.7-116, 2017.
- [14] 차봉준, 김효석, “수처리용 멤브레인 기술개발 동향 및 시장전망”, NEWS & INFORMATION FOR CHEMICAL ENGINEERS, Vol.30, No.4, pp.417-420, 2012.
- [15] 김태현, 정중채, 박종만, 우창화, “기체분리용 고분자 멤브레인의 최근 개발 동향”, Membrane Journal, Vol.20, No. 4, pp.267-277, 2010.
- [16] 고희철, 이충섭, 하성용, 최희문, 임지원, 남상용, “제습용 기체분리막 개발동향”, KIC News, Vol.14, No.3, pp.25-36, 2011.
- [17] 산업표준심의회, “KS B 7944:2020, 농산물 건조기 시험방법”, pp.1-11, 2020.
- [18] 김부철, 장재철, 이임경, 박윤철, “홍고추 건조 시 건조기의 건조 에너지에 관한 연구”, 설비공학논문집, Vol.33, No.10, pp.485-493, 2021.
- [19] 김부철, 장재철, 이임경, 고광수, 박윤철, “멤브레인-열펌프 하이브리드 건조기 이용 고추 건조성능 비교 연구”, 대한기계학회 열공학부문 2021년 춘계학술대회, p237, 2021.
- [20] ASHRAE Guideline 2-2010 (RA 2014), “Engineering Analysis of Experimental Data”, Atlanta, 2014.
- [21] Dong Chan Lee, Kang Sub Song, Sungho Yun and Yongchan Kim, “Experimental evaluation of single- and two-phase pressure drops through inlet and outlet ports in a plate heat exchanger”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.158, pp.120009(1-18), 2020.
- [22] Shan K. Wang, “Handbook of air conditioning and refrigeration”, McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> edition, New York, pp.579-608, 2000.
- [23] Baiwang Zhao, Na Peng, Canzeng Liang, Wai Fen Yong and Tai-Shung Chung, “Hollow Fiber Membrane Dehumidification Device for Air Conditioning System”, Membranes, Vol.5, pp.722-738, 2015.