

## 食品保藏과 水分活性에 관한 研究

### 제 2 보 : 말쥐치肉의 乾燥機構와 水分活性

한 봉호 · 최 수일\* · 이 종갑\* · 배 태진 · 박 호구  
부산수산대학 식품공학과, \*동원공업전문대학 식품공학과  
(1982년 8월 26일 수리)

## Studies on Food Preservation by Controlling Water Activity

### II. Dehydration Mechanism and Water Activity of Filefish Muscle

Bong-Ho Han, Soo-Il Choi\*, Jong-Gab Lee\*, Tae-Jin Bae and Ho-Gu Park

Department of Food Science and Technology, National Fisheries University of Busan, Busan 608

\*Department of Food Technology, Dongwon Technical Junior College, Busan 608

(Received August 26, 1982)

#### Abstract

Filefish muscle in the form of thin plate ( $5 \times 10 \times 0.4$  cm) was dried in a forced air dryer at  $47.5^\circ\text{C}$  to study the relation between dehydration mechanism and water activity. The dryer was designed in such a way that the temperature, relative humidity and velocity of air could be controlled. The whole dehydration process of the filefish muscle was divided into two different drying rate periods, constant and falling rate period. During the constant drying rate period, the drying rate was proportional to the square root of air velocity under the conditions of constant temperature and relative humidity of air. The falling rate period was further divided into two different falling drying rate periods, first and second falling rate period. The first falling rate period was an unsaturated surface drying period caused by partial unsaturation of the drying surface with capillary condensed free water diffused from the internal part of the filefish muscle. At this stage the drying rate was mainly dependent on the relative humidity at constant air temperature, and case-hardening phenomenon started at the end of this stage.

The moisture content and the water activity at which the second falling rate period started were not constant, because the drying rate of the first falling rate period was strongly dependent on the air humidity.

The second falling rate period was again divided into two drying rate periods, former and latter period. The drying rates of both of these periods were independent on the external air humidity. During the former period of the second falling rate period, the dehydration was proceeded by diffusion and vaporization of capillary condensed free water in filefish muscle. The diffusion coefficient of water was  $2.89 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$  at  $47.5^\circ\text{C}$ . At this stage, the case-hardening continued until the water activity reduced to 0.7. The latter period of the second falling rate period

started at the water activity of 0.45. The dedydration was proceeded by diffusion and vaporization of bound water, which adsorbed in multimolecular layers, through the hardened drying surface. The number of molecular layers was 4, and the diffusion coefficient of water during this stage was  $4.38 \times 10^{-11} m^2/sec$  at  $47.5^\circ C$ .

序 論

근년 말취치육 건제품은 우리나라 水産乾製品 중에서도 중요한 위치를 차지하고 있으며, 말취치육의 건조는 대부분이 天日乾燥나 送風乾燥에 의하여 행하여지고 있다. 그러나 이들 방법에 의한 건조중의 말취치육의 乾燥機構와 水分活性과의 관계에 대한 연구는 전혀 이루어진 바 없는 실정이다.

식품의 乾燥特性에 관하여는 Saravacos와 Charm<sup>(1)</sup>, Hansen<sup>(2)</sup>, Fornell 등<sup>(3)</sup>, Moyls<sup>(4)</sup> 등의 연구가 있으나 이들 모두가 농산물인 과일 및 채소류를 대상으로 하고 있으며, 어육의 乾燥機構에 대한 것으로는 대구육에 관한 Jason<sup>(5)</sup>의 보고 외에는 찾아보기 힘들다.

또, 식품과 같은 不均一物質의 乾燥機構와 水分活性과의 관계는 Kneule<sup>(6)</sup>, Loncin<sup>(7)</sup>, Toledo<sup>(8)</sup> 등이 자세히 밝히고 있으나, 이들 모두가 서로 조금씩 다른 이론을 제시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 말취치 건제품의 저장중의 水分活性과 품질과의 관계를 밝히기에 앞서서, 送風乾燥時 時 건조물의 乾燥機構에 영향을 미칠 수 있는 공기의 조건 중에서 온도와 기류의 방향을 일정하게 하고 풍속과 상대습도를 달리하였을 때의 말취치육의 乾燥機構와 水分活性과의 관계를 검토하였다.

材料 및 方法

試料魚

말취치, *Navodon modestus*,를 釜山共同魚市場에서 구입, 氷藏한 채 실험실로 옮겨 즉시 비닐로 이중 포장하여  $-30^\circ C$ 의 동결고에 저장하여 두고 실험에 사용하였다.

乾燥裝置

공기의 온도, 상대습도 및 풍속의 조절이 가능한 Fig. 1과 같은 건조기를 만들어 실험에 사용하였다. 공기압축기로부터의 공기는 여과기와 속도조절기를 지난 후 높은 온도의 첫 수조에서 加熱加濕되고, 나머지 두개의 수조를 지나면서 점차 냉각되도록 하였다. 이때 응축수는 애자층에 의하여 제거되도록 하고, 가열에 의하여 증발, 제거되는 수분은 加水器로 보충시켰다. 세개의 수조를 통과한 공기는 항온수조에 설치된

구리관을 지나면서 최종적으로 온도가 조절된 다음, 건조기 안에 설치된 tray면에 대하여 수평으로 흐르도록 하였다. Tray는 말취치육의 乾燥特性曲線 측정을 위하여서는 가로 17 cm, 세로 48 cm의 평판형 stainless-그물 tray를 사용하였고, 等溫脫濕曲線의 측정을 위하여서는 직경 8.5 cm의 원판형 stainless 그물 tray를 건조기의 천정에 고정시킨 고리에 매달아 사용하였다. 전체 장치는 유리습과 asbestos band로서 잘 防熱하였다.

等溫脫濕 및 乾燥特性曲線

解凍한 후 0.4 cm 두께의 fillet로 한 말취치육 10 g 정도를 원판형 tray에 얹고, 높은 상대습도에서부터 脫濕시켜 等溫脫濕曲線을 그렸다. 무게변화는 1시간마다 화학저울로 측정하였으며, 5~6시간동안 무게변화가 없을 때를 주어진 상대습도에서의 平衡點으로 하였다.

乾燥特性曲線을 위하여서는 解凍하여 fillet로 한 후 stainless 용기를 써서  $5 \times 10 \times 0.4$  cm의 평판형으로 만든 말취치육 여섯 조각(약 150 g)을 평판형 tray 위에 일정한 간격으로 얹어 건조기내의 중간층에 넣고 건조를 행하였다. 乾燥機構의 관찰에 방해가 될 수 있는 윗쪽 tray로부터의 말취치육의 drip, 아랫쪽 tray로부터의 증발수분의 영향을 피하기 위하여 윗쪽과 아랫쪽의 tray는 비워두었다. 1시간 마다 triple beam balance를 사용하여 무게를 달았으며, 상대습도는 Aspiration Psychrometer로, 풍속은 熱線風速計를 사용하여 측정하였다.

結果 및 考察

等溫脫濕曲線

온도  $47.5^\circ C$ , 풍속  $0.4 m/sec$ 일 때의 말취치육의 等溫脫濕曲線을 Fig. 2에 나타내었다. 等溫吸濕의 경우, 주어진 온도에서 상대습도와 平衡水分含量, 단분자층의 수분함량, 吸着水分의 分子層의 수의 관계는 BET式으로 나타내어지며<sup>(6,9,10,11)</sup>

$$n_{rel} = n_{im} \cdot \frac{c\phi}{1-\phi} \cdot \frac{1-(n+1)\phi^n + n\phi^{n+1}}{1+(c-1)\phi - c\phi^{n+1}} \dots\dots\dots(1)$$

단분자층의 수분함량은 式 (2) 또는 (3)으로부터 구할 수 있다.

$$n_{rel} = n_{im} \cdot \frac{c\phi}{(1-\phi)(1-\phi+c\phi)} \dots\dots\dots(2)$$



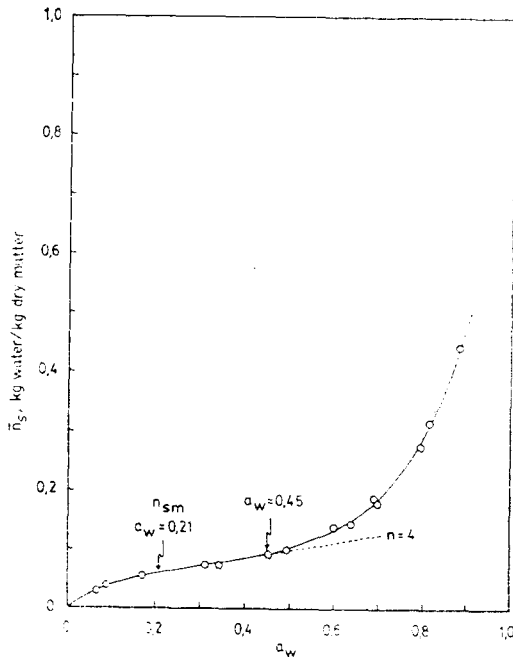


Fig. 2. Desorption isotherm of filefish muscle at 47.5°C

일 때의 실제 수분함량이 이론적으로는 단분자층의 형성시에 수분이 흡착되지 않은 위치까지도 수분으로 완전히 포화되었다고 가정했을 때의 수분함량과 같음을 의미하는 것으로 생각되었다. Rockland와 Nishi<sup>(12)</sup>는 식품의 수분은 일반적으로 水分活性 0.0부터 0.2~0.25까지에서는 이온결합 상태로, 0.2~0.25부터 0.7~0.75의 영역에서는 공유결합상태로 존재한다고 하였다. 그러나 Labuza<sup>(13)</sup>에 따르면 공유결합영역의 수분은 약하게 결합된 상태의 수분이고 이 영역 중 높은 水分活性 범위에서의 수분의 존재상태는 확실하지 않다고 하였다. 수분의 존재상태를 밝히기 위하여서는 NMR spectroscopy와 같은 방법을 이용하여야 하겠으나, 낮은 水分活性의 영역에서 유효성이 인정되는 BET 식에 따르면<sup>(12)</sup>, 말린치육의 수분은 水分活性 0.45 부근까지가 吸着水分인 결합수이고, 0.45 이상에서는 모세관응축수인 자유수로 존재하는 것으로 생각되었다.

**乾燥機構**

온도와 풍속이 일정하고 상대습도가 각각 다른 조건에서의 건조속도와 건조시간의 관계를 Fig.3 및 Fig. 4에, 건조속도와 평균수분함량의 관계를 Fig. 5와 Fig.6에 나타내었다. 말린치육의 건조과정은 크게 定速乾燥期和 減速乾燥期로 구분되었으며, 減速乾燥期는 다시 공기의 상대습도의 영향을 받는 구간과 그렇지 않은 구간으로 구분될 수 있었다.

定速乾燥期에는 모세관을 통한 내부 수분의 이동속

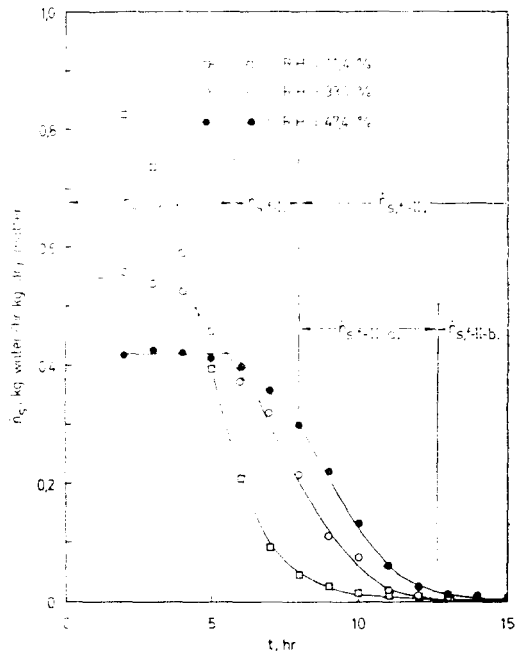


Fig. 3. Drying rate vs. time; dry bulb temperature, 47.5°C; air velocity, 0.4 m/sec

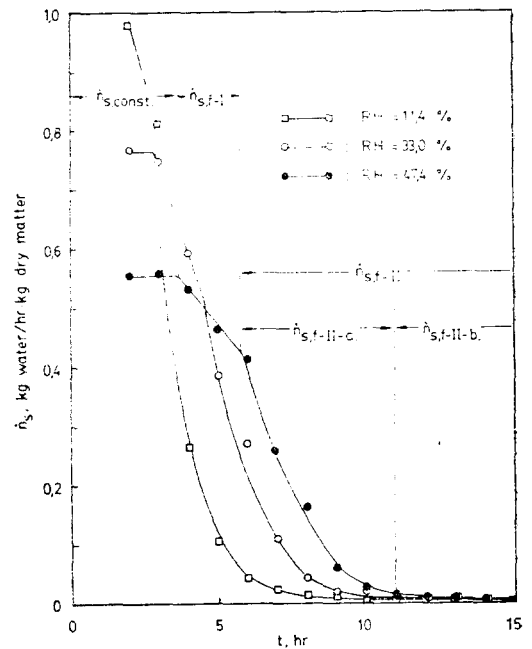


Fig. 4. Drying rate vs. time; dry bulb temperature, 47.5°C; air velocity, 0.65 m/sec

도가 乾燥表面의 포화상태를 유지시켜 줄만큼 빠르기 때문에, 건조속도는 순수한 물의 증발속도와 같아서

$$\dot{n}_{s, const.} = \frac{A\alpha}{JH_v} (\vartheta_d - \vartheta_e) \dots\dots\dots(4)$$

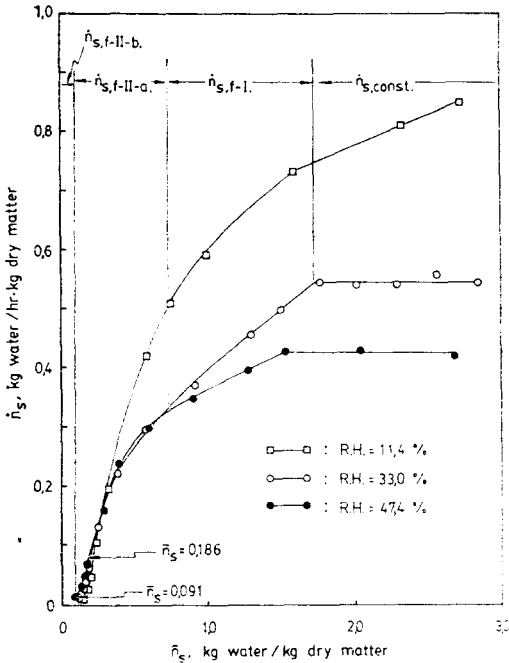


Fig. 5. Drying rate vs. moisture content; dry-bulb temperature, 47.5°C; air velocity, 0.4 m/sec

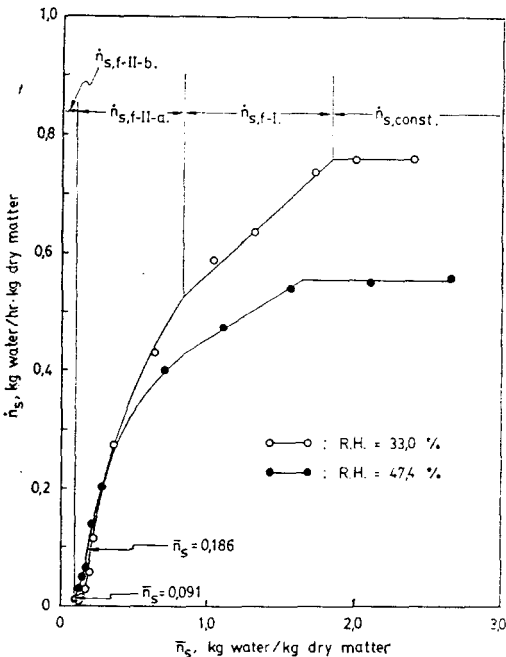


Fig. 6. Drying rate vs. moisture content; dry-bulb temperature, 47.5°C; air velocity, 0.65 m/sec

$$n_{s, const.} = A\beta_p(P_s - \varphi \cdot P_0) \dots\dots\dots(5)$$

로 나타내어진 다<sup>(7)</sup>. Perry와 Chilton<sup>(14)</sup>은 物質傳達係數보다는 熱傳達係數가 더 신빙성이 있으므로 式 (4)의 적용이 더 적합하다고 하였으며,  $\alpha/\Delta H_s$ 와 풍속의 관계에서 Loncin<sup>(15)</sup>은 定速乾燥速度가  $v^{0.5}$ 에 비례한다고 하였다. 즉,

$$n_{s, const.} = kv^{0.5}(\vartheta_d - \vartheta_s) \dots\dots\dots(6)$$

그러나 대구육의 건조에서 Jason<sup>(6)</sup>은 定速乾燥速度가  $v^{0.77}$ 에 비례한다고 하였다. 즉,

$$n_{s, const.} = kv^{0.77}(\vartheta_d - \vartheta_s); k = 1.65 \cdot 10^{-8} \dots\dots\dots(7)$$

말쥐치육의 定速乾燥速度는 Table 1에 나타난 것과 같은데, 온도와 상대습도가 일정하고 풍속이 다를 때의 定速乾燥速度는 式 (6)과 같이  $v^{0.5}$ 에 비례하였다.

Table 1. Comparison between air velocity and constant drying rate under different air conditions at 45.5°C

R.H.	$v$	$\dot{n}_{s, const.}$	$v_1^{0.5}/v_2^{0.5}$	$\dot{n}_{s, const.1}/\dot{n}_{s, const.2}$
33.0	0.40	0.555	1.3	1.4
	0.65	0.760		
47.4	0.40	0.425	1.3	1.3
	0.65	0.545		

第1減速乾燥期는 시간에 따른 건조속도의 변화로 미루어 보아 공기의 상대습도의 영향을 받는 減速乾燥期로 생각되었으며(Fig. 3과 Fig. 4), break point에서의 臨界水分含量은 공기의 온도와 풍속이 같을 때 상대습도가 낮을수록 그 값이 컸다(Fig. 5와 Fig. 6). Fig. 5 및 Fig. 6에서 第1減速乾燥期의 건조속도는 定速乾燥速度와 臨界水分含量, 平衡水分含量으로부터

$$n_{s, f-I} = \frac{\alpha(\vartheta_d - \vartheta_s)}{\rho_s \Delta H_v \cdot d} \cdot \frac{(n_s - n_{s,e})}{(n_{s,c} - n_{s,e})} \dots\dots\dots(8)$$

또는

$$\frac{n_s - n_{s,e}}{n_{s,c} - n_{s,e}} = e^{-bt} \dots\dots\dots(9)$$

로 표시될 수 있다. 온도와 상대습도가 같고 풍속이 다르면, 被乾燥物이 평형에 이르는 시간에는 차이가 있으나 平衡水分含量은 같다<sup>(16)</sup>. 따라서 Fig. 2의 等溫脫濕曲線에서 平衡水分含量을 취하고 건조시간과 수분함량과의 관계를 Fig. 7과 같이 나타내면, 式 (9)의 第1減速乾燥期는 상대습도에 따라서 서로 다른 기울기를 보였다. 이는 말쥐치육의 모세관 중에서 구멍이 큰 모세관에 있는 수분부터 먼저 증발, 제거되고 그 자리에 공기가 대체되면서 蒸發表面이 감소하는 과정에서, 외부 공기의 상대습도가 높을수록 式 (5)에서의 증기압차( $P_s - \varphi \cdot P_0$ )가 작아짐으로 건조속도에 차이가 생기기 때문으로 보였다. 또 모세관을 통한 내부 수분의

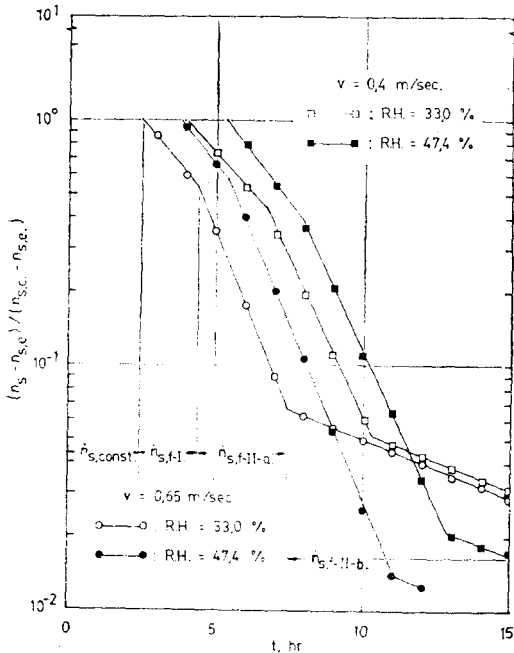


Fig. 7. Semilogarithmic plot of  $(n_s - n_{s,e}) / (n_{s,c} - n_{s,e})$  vs. time; dry bulb temperature, 47.5°C

乾燥表面으로의 이동이 불충분하므로, 第1減速乾燥期는 乾燥表面이 충분히 포화되지 못한 상태에서의 不飽和表面乾燥期로 생각되었다.

第2減速乾燥期에서의 건조속도( $\dot{n}_{s,f-1}$ )는 공기의 상대습도에 전혀 영향을 받지 않았으며(Fig. 3과 Fig. 4) 이 구간은 건조속도의 감소가 비교적 급격한 구간( $n_{s,f-1-a}$ )과 극히 완만한 구간( $n_{s,f-1-b}$ )으로 다시 구분될 수 있었다. 이 구간에서는 수분의 蒸發面이 被乾燥物의 내부로 이동하며 건조속도는 내부 수분의 확산속도에 좌우된다<sup>(7)</sup>. 내부의 수분 혹은 증기의 乾燥表面으로의 확산은 Fick's second law,

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 n_s}{\partial d^2} \dots \dots \dots (10)$$

로 표시된다. 말취치육을 양쪽면에서 건조가 진행되는 微分平板으로 보면, 건조시간이 길고  $(n_s - n_{s,e}) / (n_{s,c} - n_{s,e}) < 0.6$ 인 경우 式 (10)의 해로부터 구한 건조시간은 式 (11)과 같이 나타내어진다.

$$t = \frac{4d^2}{\pi^2 D} \left[ \ln \frac{n_s - n_{s,e}}{n_{s,c} - n_{s,e}} - \ln \frac{8}{\pi^2} \right] \dots \dots \dots (11)$$

式 (11)의 시간과 수분함량의 관계는 Fig. 7에서 第2減速乾燥期의 서로 다른 수분확산구간 즉,  $\dot{n}_{s,f-1-a}$ 와  $\dot{n}_{s,f-1-b}$ 로 뚜렷이 구분되었다. Jason<sup>(5)</sup>은 白色肉魚의 경우 第2減速乾燥期에서의 두 구간에서의 수분의 확산계수는 魚種에 관계없이 각각  $2 \sim 4 \cdot 10^{-10} m^2/sec$  및

$1 \sim 10 \cdot 10^{-11} m^2/sec$ 의 값을 갖는다고 하였다. 말취치육의 第2減速乾燥期에서의 수분확산계수는 Fig. 7과 式 (11)로부터 구한 결과 Table 2에서와 같이 Jason<sup>(5)</sup>의 보고와 잘 일치하였다.

Table 2. Diffusion coefficients during second falling rate period

D during the former term ( $\times 10^{-10} m^2/sec$ )		D during the latter term ( $\times 10^{-11} m^2/sec$ )	
E-value	L-value	E-value	L-value
2.89	2.0~4.0	4.38	1.0~10.0

E-value: experimental value

L-value: literature value cited from Jason<sup>(5)</sup>

水分活性价 乾燥機構

Loncin<sup>(7)</sup>은 被乾燥物이 水分活性 1.0을 유지하면 定速乾燥期가 계속되나, 그렇지 않을 때는 減速乾燥期가 시작된다고 하였다. Fig. 5와 Fig. 6의 break point를 비교하여 보면, 말취치육의 臨界水分含量은 공기의 조건에 따라 서로 다른 값을 보이고 있다. 이는 減速乾燥期가 被乾燥物의 乾燥表面이 水分活性 1.0을 유지할 수 없을 때 시작되며, 그러한 점의 臨界水分含量은 공기의 상대습도의 영향을 받기 때문인 것으로 생각되었다.

Toledo<sup>(8)</sup>는 사과 절편의 건조에서 第2減速乾燥期가 水分活性 1.0에서 시작된다고 하였다. Fig. 5와 Fig. 6의 평균수분함량과 건조속도의 관계를 Fig. 2의 평균수분함량 및 水分活性价와 비교하여 보면, 말취치육의 第2減速乾燥期는 공기의 상대습도가 33.0% 및 47.4%일 때는 대개 水分活性 1.0 부근에서 시작되는 것으로 추측되었다. 그러나 상대습도가 11.4%일 때는 상대습도 33.0% 및 47.4%일 때의 臨界水分含量보다도 오히려 높은 평균수분함량에서 第2減速乾燥期가 시작되었다. 따라서 第2減速乾燥期가 시작되는 水分活性영역을 일률적으로 결정할 수가 없었다. 이는 第1減速乾燥期가 공기의 상대습도의 영향을 받음으로서 第1減速乾燥期가 끝나는 시기에 表面硬化現象이 일어나기 때문인 것으로 생각되었다. 第2減速乾燥期의 건조속도는 공기의 상대습도와 관계없이 말취치육의 평균수분함량이 0.186 kg water/kg dry matter에 이를 때까지 평균수분함량에 대하여 위로 심하게 偏倚하였다. 이러한 현상은 공기의 상대습도가 낮을수록 빨리 일어났으며, 이는 말취치육의 평균수분함량이 높더라도 공기의 상대습도가 낮을수록 乾燥表面이 빨리 平衡水分含量에 이르기 때문으로 생각되었다<sup>(17)</sup>. 또 평균수분함량 0.186 kg water/kg dry matter는 Fig. 2에서 水分

活性 0.7에 해당하였으며, 그 이하의 평균수분함량에서는 건조속도가 오히려 아래쪽으로 偏倚하였다(Fig. 5와 Fig. 6). 이는 表面硬化가 끝나고 내부 수분은 전체적으로 균일한 상태에서 건조가 진행되기 때문으로 생각되었다<sup>(17)</sup>.

第2減速乾燥期の 두번째 구간( $\bar{n}_s, 1 \rightarrow 0$ )은 평균수분함량 0.091 kg water/kg dry matter에서 시작되었으며(Fig. 5와 Fig. 6), 이 때의 해당 水分活性은 0.45였다(Fig. 2). Kneule<sup>(6)</sup>는 이 구간이 水分活性 1.0에서 시작된다고 하였으나, Toledo<sup>(8)</sup>는 단분자층 수분의 증발이 시작되는 구간이라 하였다. 그러나 말린치육의 경우 BET式에 따르면 이 구간은 吸着水分의 分子層의 수가 4인 수분 층, 水分活性 0.45 이하의 結合水가 증발, 확산됨으로서 건조가 진행되는 구간으로 생각되었다.

Rockland와 Nishi<sup>(12)</sup>에 따르면, 여러가지 식품의 等溫吸濕 또는 脫濕曲線은 대개 세개의 구간으로 구분되며, 이들 구간은 partial molal free energy

$$-\Delta\bar{F} = RT \ln(P/P_0) \dots\dots\dots (12)$$

로 표시되고, 式 (12)는 수분함량에 대하여 다음과 같이 표시된다.

$$\log(-\Delta\bar{F}) = \eta n_s + K \dots\dots\dots (13)$$

47.5°C에서의 말린치육의 脫濕과정과 partial molal free energy의 관계는 Fig. 8에 나타내었다. 수분함량 0.186 kg water/kg dry matter(水分活性 0.7)를 전후

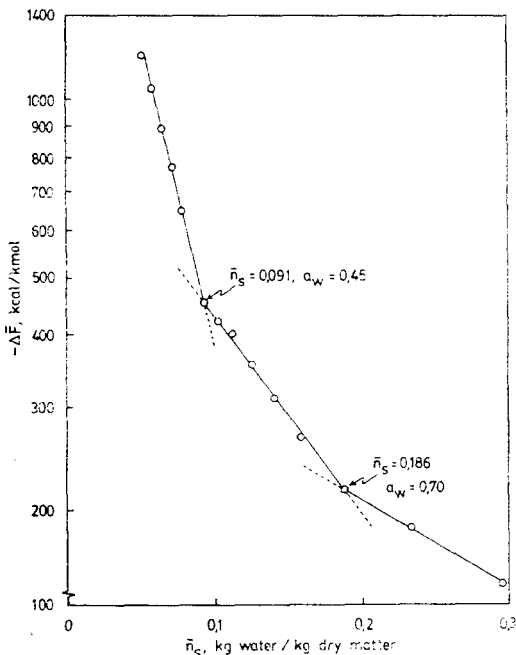


Fig. 8. Partial molal free energy vs. moisture content at 47.5°C

하여 기울기가 변하였으며, 이는 乾燥特性曲線(Fig. 5와 Fig. 6)에서 본 바와 같이 말린치육의 表面硬化現象을 전후한 수분확산의 차이 때문으로 생각되었다. 또 수분함량 0.091 kg water/kg dry matter(水分活性0.45)에서 다시 기울기가 변하였으며, 水分活性 0.45 이하에서는 수분의 증발에 훨씬 많은 열량이 필요하였다. 이는 結合水의 분리에, 또는 BET式에 따르면 吸着水分의 증발에는 自由水의 증발열 외에도 吸着熱만큼의 열량이 더 필요하기 때문인 것으로 생각되었다.

要 約

送風式乾燥過程 중의 말린치육의 乾燥機構와 水分活性과의 관계를 검토하기 위하여 47.5°C에서 풍속과 공기의 상대습도를 달리하여 실험한 결과를 요약하면 다음과 같다.

전체 건조과정은 定速乾燥期和 減速乾燥期로 구분되었다.

定速乾燥期는 乾燥表面이 水分活性 1.0을 유지하는 한 계속되었으며, 온도와 상대습도가 일정할 때 定速乾燥速度는 공기의 速度의 제곱근에 비례하였다.

減速乾燥期는 乾燥機構가 서로 다른 第1 및 第2減速乾燥期로 구분되었다.

第1減速乾燥期는 모세관 응축수의 乾燥表面으로의 이동이 불충분한 不飽和表面乾燥期였으며, 이 때의 乾燥速度는 공기의 온도가 일정할 때 상대습도에 크게 좌우되었다.

第1減速乾燥期和 第2減速乾燥期の 전환점에서 表面硬化現象이 시작되었다. 상대습도의 변화에 따라 第2減速乾燥期가 시작될 때의 水分活性和 水分含量은 각각 다른 값을 나타내었다.

第2減速乾燥期는 다시 乾燥機構를 달리하는 두개의 乾燥期로 구분되었다.

第2減速乾燥期の 1단계는 말린치육 내부의 모세관 응축수가 乾燥表面으로 확산, 증발하여 건조가 진행되었으며, 이때의 수분의 확산계수는 47.5°C에서  $2.89 \cdot 10^{-10} m^2/sec$ 였다. 表面硬化現象은 말린치육의 水分活性이 0.7에 이를때까지 계속되었다.

第2減速乾燥期の 2단계는 水分活性 0.45에서 시작되었다. 이 때의 건조는 말린치육 내부에 多分子層으로 吸着한 結合水의 乾燥表面으로의 확산, 증발에 의하여 진행되었다. 吸着水分의 分子層의 수는 4였으며, 47.5°C에서의 확산계수는  $4.38 \cdot 10^{-11} m^2/sec$ 였다.

Nomenclature

- A : drying surface area, m<sup>2</sup>
- a<sub>w</sub> : water activity

$b : (\vartheta_d - \vartheta_s) / \rho_s \Delta H_v (n_{i,c} - n_{i,s}), \text{kg dry matter/hr} \cdot \text{kg water}$

C : constant related to the heat of adsorption

D : diffusion coefficient,  $\text{m}^2/\text{sec}$

$\Delta \bar{F}$  : partial molal free energy, kcal/kmol

$\Delta H_v$  : latent heat of vaporization, J/kg

k : constant in equation (6)

K : intercept in equation (13)

n : number of water molecule layers

$n_s$  : moisture content, kg water/kg dry matter

$\bar{n}_s$  : mean moisture content, kg Water/kg dry matter

$n_{i,c}$  : critical moisture content, kg water/kg dry matter

$n_{i,e}$  : equilibrium moisture content, kg water/kg dry matter

$n_{i,m}$  : moisture content for monolayer, kg water/kg dry matter

$\dot{n}_{i, const.}$  : drying rate during constant rate period, kg water/hr. kg dry matter

$\dot{n}_{i, f-1.}$  : drying rate during first falling rate period, kg water/hr. kg dry matter

$\dot{n}_{i, f-2.}$  : drying rate during second falling rate period, kg water/hr. kg dry matter

$\dot{n}_{i, f-2a.}$  : drying rate during former term of second falling rate period, kg water/hr. kg dry matter

$\dot{n}_{i, f-2b.}$  : drying rate during latter term of second falling rate period, kg water/hr. kg dry matter

P : water vapor pressure, Pa

$P_s$  : water vapor pressure at wetbulb temperature, Pa

$P_0$  : saturated water vapor pressure, Pa

R : gas constant

$R.H_0$  : relative humidity, %

T : absolute temperature, K

t : drying time, hr

v : air velocity, m/sec

$\alpha$  : heat transfer coefficient,  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

$\beta_p$  : mass transfer coefficient,  $\text{kg}/\text{hr} \cdot \text{m}^2 \text{ Pa}$

$\vartheta_d$  : dry bulb temperature, °C

$\vartheta_s$  : wet bulb temperature, °C

$\eta$  : slope in equation (13)

$\rho_s$  : bulk density of the dry matter,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\zeta$  : R. H./100

## 文 獻

1. Saravacos, G.D. and Charm, S.E.: *Food Technol.* **16**, 78(1962)
2. Hansen, R.: *J. Agric. Food Chem.* **26**, 297(1978)
3. Fornell, A., Bimbenet, J.J. and Almin, Y.: *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* **14**, 96(1980)
4. Moys, A.L.: *J. Food Sci.* **46**, 939(1980)
5. Jason, A.C.: *Fundamental Aspects of the Drying of Foodstuffs*. Society of Chemical Ind. London, p.103 (1959)
6. Kneule, K.: *Das Trocken. Verl. Sauerländer Aarau u. Frankfurt am Main*, p.87 (1968)
7. Loncin, M.: *Grundlagen der Verfahrenstechnik in der Lebensmittelindustrie. Verl. Sauerländer Aarau u. Frankfurt am Main* p.600 (1969)
8. Toledo, R.T.: *Fundamentals of Food Process Engineering*. AVI, p.363 (1980)
9. Brunauer, S., Emmet, B.H. and Teller, E.: *J. Amer. Chem. Soc.* **60**, 309(1938)
10. Görling, P.: *Diss. TH Darmstadt* (1954)
11. Gregg, S.J. and Sing, K.S.: *Adsorption Surface Area and Porosity*. Academic Press. p.35 (1967)
12. Rockland, L.B. and Nishi, S.K.: *Food Technol.* **34**, 42(1980)
13. Labuza, T.P.: *Water Relations of Foods*(Duckworth, R.B. ed.), Academic press, p.155. (1975)
14. Perry, R.H. and Chilton, C.H.: *Chemical Engineers Handbook*. Section 20 McGraw-Hill, (1963)
15. Loncin, M.: *Genie industriel alimentaire-Aspects fondamentaux* Masson, (1976), cited from Fornell, A., Bimbenet, J.J. and Almin, Y.: *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* **14**, 96(1980)
16. Kuprianoff, J.: *De Ingenieur, Chemische Technik.* **10**(4), 39(1957)
17. Leniger, H.A. and Beverloo, W.A.: *Food Process Engineering*. D. Reidel Publ. Co., p.398 (1975)