

표고버섯의 熱風乾燥速度論에 관한 研究

조덕봉, 김동필, 최춘순

광주보건전문대학

Kinetics of Drying Shiitake Mushroom, *Lentinus edodes* sanryun No. 1

Duk-Bong Cho, Dong-Pil Kim,
Choon-Soon Choi

Gwangju Health Junior College

Abstract

Dehydration phenomena has been studied for the shiitake mushroom *Lentinus edodes* sanryun No.1, through which examine the effect of temperature and air velocity and derivation of its kinetics.

Temperature effect for the dehydration rate constant were examined under the constant air velocity (1.5m/sec) with the variation of temperature from 40°C to 55°C. Water content were reduced exponentially with the course of time and calculated dehydration rate constant values varies with temperature with an Arrhenius-type relationship, which had been expected in the chemical reaction kinetics.

Influence of air velocity for the dehydration rate constant under the constant temperature (45°C) showed interesting results. For the range 1.0m/sec to 2.0m/sec, dehydration rate constant values are increased with the air velocity, but for the 2.0 to 3.1m/sec, dehydration rate constant values are decreased which were caused by case hardening.

One of the selected conditions in the optimal dehydration range, temperature 50°C, air velocity 2m/sec, and its measured humidity 38-41%, mathematical model of dehydration curve and dehydration rate equations were developed and the resulting kinetic models were $X=6.94 e^{-0.345t}$ and $dx/dt = -2.39 e^{-0.345t}$

I. 서 론

표고버섯은 三大味の 하나로 잘 알려진 식품으로서 열풍건조를 해야 천일건조시에 생기는 포자의 비산, 버섯 세포조직의 교질화, 팽택 등 여러가지 품질의

저열화를 막을 수 있으므로 일본에서는 열풍 건조를 해야만 그 상품적 (商品的) 가치를 인정하고 있다.

표고버섯의 열풍건조에 관해서는 일본에서 경험적으로 양호한 건조결과를 얻을 수 있었던 건조방법이 平尾武司 등에 의하여 많이 알려져 있으며,¹⁾⁻³⁾ 에

비건조, 본건조, 본건조후기 및 마무리 건조의 4 단 계로 나누어서 행하는데 건조온도 범위는 보통 45 ~ 60 °C의 범위를 사용하고 이는 45 °C 보다 낮은 온도에서 건조시키는 경우에는 포자의 비산과 맛이 떨어져 끝이 말아지는 등 품질저하가 일어나고, 55 °C 이상의 고온에서 건조를 수행하면, 초기 수분 함량이 많으므로 익을 우려가 있기 때문이다.

한편, 식품의 열풍건조에 대한 Kinetics 연구는 사과절편,⁴⁾⁵⁾ 곡류,⁶⁾ 생선, 감자절편,⁷⁾ 콩단백⁸⁾ 등에 관하여 연구된 바 있으며, 식품의 건조는 일반 고체 (inert matter)의 건조와는 달리 일정한 건조 조건에서는 항률건조기간 (constant drying rate period)이 일반적으로 존재치 않고, 대부분 감속건조기간 (falling rate period)으로 진행되며, 감속건조기간은 초기의 모세관 현상에 의한 제 1 감속건조기간 (primary falling rate period)과 수분층의 확산에 기인하는 약간 더 느린 제 2 감속건조기간 (secondary falling rate period)이 있다.

열풍건조 과정 중 건조 속도를 좌우하는 중요한 인자는 온도 습도 풍속 등이 있으나, 실제 현장의 설비를 고려할 때 습도의 조절은 쉬운 문제가 아니므로, 습도는 38 ~ 41 %로 고정시킨 상태 (한국의 10월 하순에서 11월 상순)에서, 온도와 풍속의 변화에 따른 건조속도의 변화를 고찰하였다. 이때 온도의 선정은 건조속도가 빠른 것 만으로 결정될 수 없고, 표고버섯의 맛 성분인 Guanyl 산과 향기 성분인 Lenthionine⁹⁾이 버섯 내부에서 단백질이나 당류¹⁰⁾로부터 생성효소에 의하여 생성되는데, 최적 온도가

35 ~ 40 °C 라는 점을 고려하여 내부 온도가 35 ~ 40 °C가 될 수 있도록 외부 건조공기 온도를 45 ~ 50 °C로 선정했다.

풍속에 대해서는 품질에 미치는 영향이 크게 문제되고 있지 않으므로, 건조속도가 최대가 될 수 있는 풍속을 알기 위해 1.0 ~ 3.1 m/sec로 변화시켜 적합한 풍속을 선정코자 한 것이다. 선정된 조건에서 속도론적인 연구를 하기 위해서 건조 양상으로 부터 판단되는 mathematical model을 설정하여, Kinetic model을 유도하고자 한 것이며, 이러한 Kinetics는 항률건조 속도를 위한 온도상승 방법을 programming 하는 등 Simulation이나 건조의 최적화 (optimization)에 응용할 수 있다.

II. 실험재료 및 방법

1. 재 료

본 실험에 사용한 표고버섯은 산련 (山聯) 1호 품종을 참나무에 접종 재배하여 채취하였으며, 시료의 평균 무게는 25 ~ 35 g, 갓의 장경이 7 ~ 8 cm, 단경이 5 ~ 6 cm의 크기의 것으로 개화율 70 % 정도에 달했을 때 채취하였다. 채취시기는 9월 하순부터 10월 초순 경이고 품질면에서는 향신 (香辛)에 해당된다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용한 건조 장치의 개략도는 Fig. 1과 같고, 사용기기는 Table 1과 같다. 건조조건에 영향을 미치지 않는 상태로 건조에 따

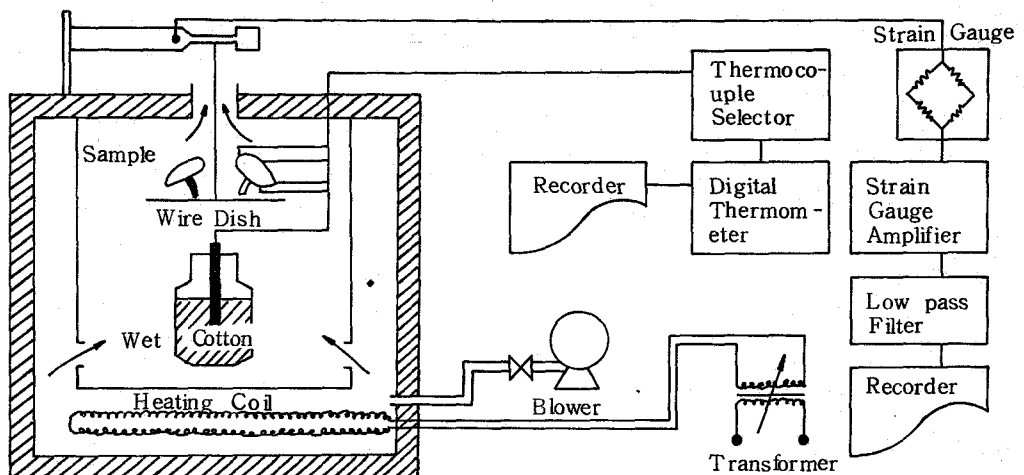


Fig. 1. Schematic Diagram of Dehydration Apparatus.

Table 1. Instruments Used .

Name of Apparatus	Specification	Manufacture	Remark
Drying Oven	45 × 40 × 40 cm	Dong Yang Korea	
Dynamic Strain Amplifier	Model DPM - 6 E 6 Channel	Kyowa Electronic Japan	
Low Pass Filter	5 ~ 25 Hz 6 Channel	Kyowa Electronic Japan	
Thermocouple Selector	Model Y 2001 10 Channel	FLUKE U.S.A.	
Digital Thermometer	Model 2190 A accuracy ± 0.05 °C	FLUKE U.S.A.	
Recorder	Model Servocorder inkless type 2 Channel	WATANABE Japan	
Slidac	40 amp 0 ~ 130 Volts	Japan	
Blower	1.15 amp 100 Volts	Dong Kyun Korea	
Thermocouple	Copper -Constantan gauge # 24. insulated with asbestos	U. S. A.	

른 시료의 무게 감량을 측정하기 위하여 Fig. 1에 보이 바와 같이, Cantilever type strain gauge load cell 을 제작하여 연속적으로 무게 감량을 측정할 수 있게 하였으며, 이 load cell 은 두께 2 mm 폭 20 mm, 길이 200 mm, Aluminum 재료로 만들어 졌으며, load cell 의 output 은 dynamic strain gauge amplifier 로 증폭한 다음 풍속의 영향에 따른 noise 를 제거하기 위하여 low pass filter 를 통과시켜 기록계에 기록하였다. 이 Cantilever type load cell 의 무게에 따른 output voltage 변화량은 검량곡선 Fig. 2에 보는 바와 같으며, 0 ~ 30 g 까지는 Sensitivity 가 0.028 volt/g 으로 거의 선형적으로 변화하여 30 g 이상에서는 약간 Sensitivity 가 둔화되는 미소용량 load cell 이다.

한편 투입 열풍은 Blower 의 Valve 를 조절하여 풍량을 변화시켰고, 풍속을 풍속계 (Anemometer) 로 측정하여 원하는 풍속으로 일정하게 유지시켰으며 온도의 조절은 Ni - Cr 선에 공급되는 전력량을 Transformer 로 변화시켜 건조실 열풍온도가 필요한 온도가 되도록 조성하였다. 이때 온도의 측정

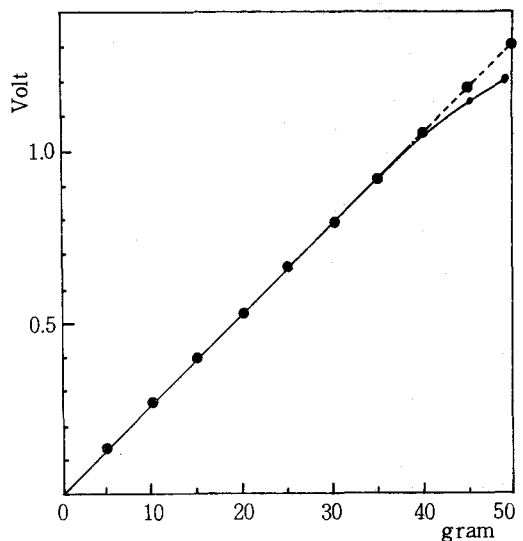


Fig. 2. Calibration Curve for the Cantilever Type Strain Gauge Load Cell

은 열풍온도와 시료의 여러 부분의 온도를 측정하기 위하여 T - type (copper - constantan gauge No. # 24. made in U.S.A) thermocouple 로 측정하였으며, 버섯의 외부 (버섯과 접촉하지 않음), 버섯의 표면, 내부, 뒷표면 및 증발접시의 십지 등에 5 개의 thermocouple 을 심어 두었으며 이들 thermocouple output 은 thermocouple selector 를 통하여 Digital thermometer 와 recorder 에 동시 연결하여 시간에 따른 온도를 연속적으로 기록 감시할 수 있도록 하였다. 습도는 증발접시의 Wet cotton 십지에서 켄 Wet bulb temperature 로 부터 Psy-

chrometric chart 에 의해 계산해 낸다.

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

건조현상은 수분증발로 인하여 Sample 의 무게가 감소되는 것이 특징이므로 무게감량으로 표현되는 건조양상은 Cantilever type strain gauge load cell 로 측정된 결과 시간의 경과에 대해 Fig. 3 과 같았다. Fig. 3 의 data 를 일정시간 간격으로 무게를 계산한 후, 105 °C 건조법으로 측정된 초기수분함량 (87.4 %, Wet base) 으로부터 각 시간에서

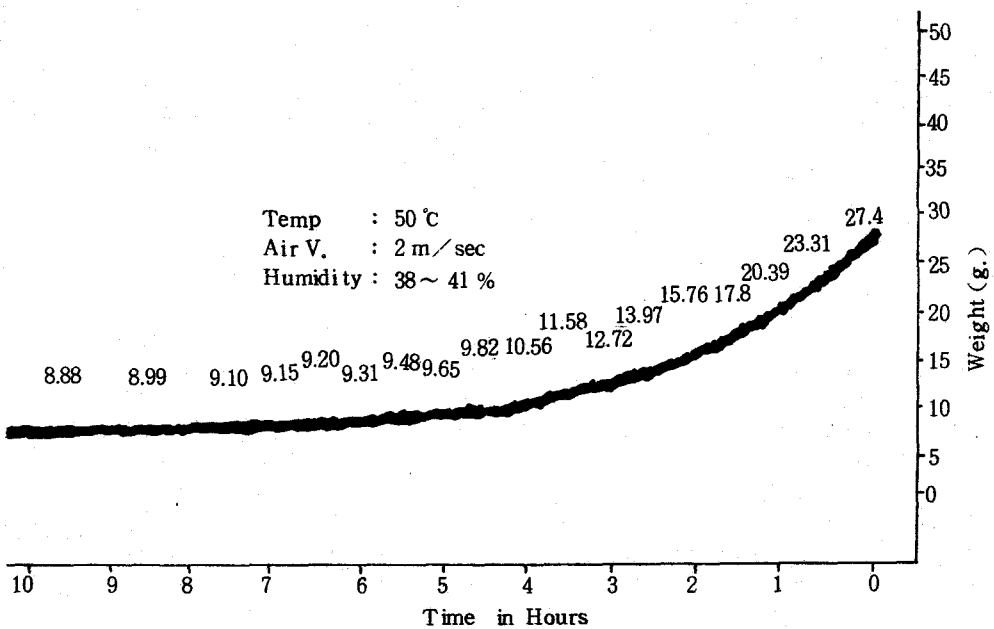


Fig. 3. Dehydration Phenomena Represented as Weight Reduction at 50 °C, 2m/sec

의 무게를 건물기준 수분함량 (water content, dry weight base) X로 환산한다.

건물기준 수분함량을 사용한 이유는 건물 (dry matter) 은 건조의 전 과정을 통하여 변하지 않는 양이므로 이 값을 이용하여 표준화 (normalize) 하면 실험에 사용한 버섯 Sample 의 양 혹은 무게가 다르더라도 초기 수분함량에 따라 같은 값으로 표현되기 때문에 비교하기가 쉬워지고 또한 X에 대해서 유도한 식이면, 양이나 무게에 상관없이 적용될 수

있게 되기 때문이다. Fig. 4는 대표적인 실험에로서 열풍온도 50 °C, 풍속 2m/sec, humidity, 38 ~ 41 %의 조건에서 건조한 시간의 경과에 대한 수분함량의 변화와 각 위치의 온도 변화를 나타내었다.

수분함량의 변화는 건조시간의 경과에 따라 지수함수적으로 감소량을 볼 수 있으며, 건조속도는 이 함수를 시간에 대해 미분한 값으로 표현되므로 또한 지수함수적으로 감소될 것이다. 따라서 건조곡선 방

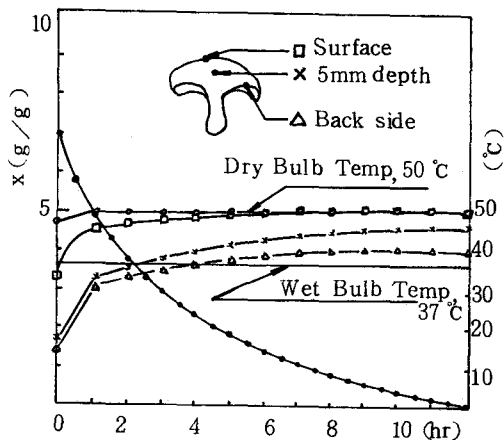


Fig. 4. Water Content Variation and Temperature Change during the Dehydration Period

정식 및 건조속도에 관한 mathematical model 을 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$X = A e^{-kt} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = -A k e^{-kt} = B \cdot e^{-kt} \dots\dots\dots (2)$$

단, X는 수분함량 (water content, g of water/g of dry matter), A, B는 상수(constants), k는 건조속도 정수 (dehydration rate constant hr⁻¹)이다. 상수 A, B는 t = 0일 때에 해당되는 초기 조건 (initial condition)으로 A는 초기 수분함량 (g · H₂O/g · dry matter) B는 초기 건조속도 (g · H₂O/g · dry matter, hr)를 의미하고 있다.

Mathematical model (1), (2)에 대해서 A, B, k 등의 상수값을 구하기 위해서 (1)식의 양변에 자연대수 (natural log)를 취하면,

$$\ln X = -kt + \ln A \dots\dots\dots (1)$$

$$\therefore X = -\frac{k}{2,303} t + \log A \dots\dots\dots (1)''$$

가 된다. 그러므로 log X와 t를 일반 모눈종이 (common momograph)에 그리거나, 또는 X와 t를 반대수용지 (Semi-log paper)에 그리면 직선이 얻어지고 이 직선의 Slope는,

$$\text{Slope} = -\frac{k}{2,303}$$

∴ k = -2,303 × slope 가 된다.

Fig. 5는 수분함량 X와 시간 t를 Semi log paper에 plot한 것이고, 이 그림으로부터 초기 수분함량 A는,

A = 6.94 (g · H₂O / g · dry matter) 이고,

$$\text{Slope} = \frac{\log 0.85 - \log 3.0}{6 - 2.34} = -0.15$$

$$\therefore k = -2,303 \times (-0.15) = 0.345 \text{ (hr}^{-1}\text{)}$$

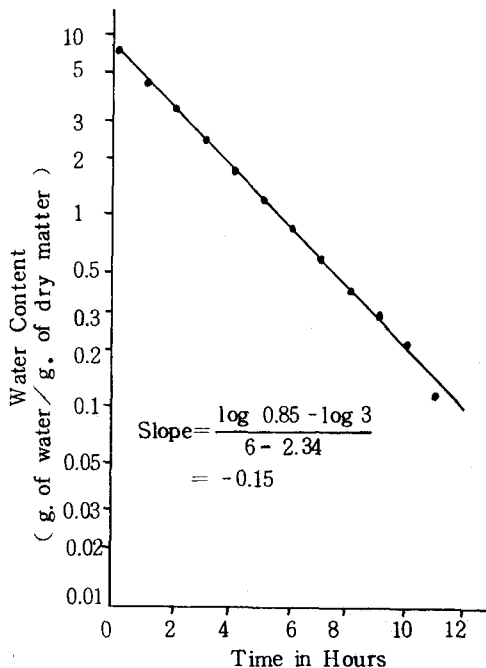


Fig. 5. Water Content Variation Curve Plotted in Semi-log Scale

따라서, 초기 건조속도 상수 B는, B = -Ak = -6.94 × 0.345 = -2.34 (g · H₂O / g · drymatter, hr)가 된다.

그러므로 열풍온도 50 °C, 풍속 2 m/sec, humidity 38 ~ 41 %에서 건조곡선식 X는,

$$X = 6.94 e^{-0.345 t} \dots\dots\dots (3)$$

건조속도식, dX/dt는,

$$dX/dt = -2,39 e^{-0.345 t} \dots\dots\dots (4)$$

라는 Kinetic model 이 얻어졌다.

한편 열풍온도 50 °C ± 1 °C, 풍속 2 m/sec로 건조시킬 때 버섯의 표면온도, 뒷면온도 및 심층부의 온도는 Fig. 4에 나타난 바와 같았다. 심층부는 생 버섯의 두께를 측정할 때 두터운 중앙부가 10 mm정도 이므로 중앙부 stem 바로 윗부분 깊이 5 mm 에

서 측정되었는데, 건조가 진행됨에 따라 심층부의 온도가 점점 상승함을 알 수 있었다. 버섯의 표면 온도 및 뒷면의 온도도 건조가 진행됨에 따라 서서히 상승하였다. 건조시간의 경과에 따라 건조속도가 느려지는 반면에 심층부의 온도가 점점 상승하여 표면 온도와와의 차이가 점점 줄어드는 것으로 판단할 때 표면에서 일어나는 수분 증발이 점점 버섯 내부로 이동함을 알 수 있었고, 또 건조속도는 표면과 심층부의 온도차에 비례함을 알 수 있었다.

버섯 뒷면의 온도가 때로는 심층부의 온도보다 낮은 경우를 볼 수 있었던 것은, 뒷면은 주름이 많으므로, thermocouple의 위치가 주름과 주름이 맞닿는 가장 깊은 주름속에 놓이면 이런 현상이 나타나는 것으로, 이러한 곳은 뒷면 쪽으로 이동한 수분이 열풍과 반대 방향으로 역류하여 증발하기가 쉽지 않기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 곳이 아닌 뒷면의 온도는 일반적으로 심층부의 온도보다 높았다.

건조속도에 미치는 열풍온도의 영향을 고찰하기 위해서 풍속을 일정하게 고정 시키고 (1.5 m/sec), 열풍온도를 변화시키면서 각각의 열풍온도에 대해서

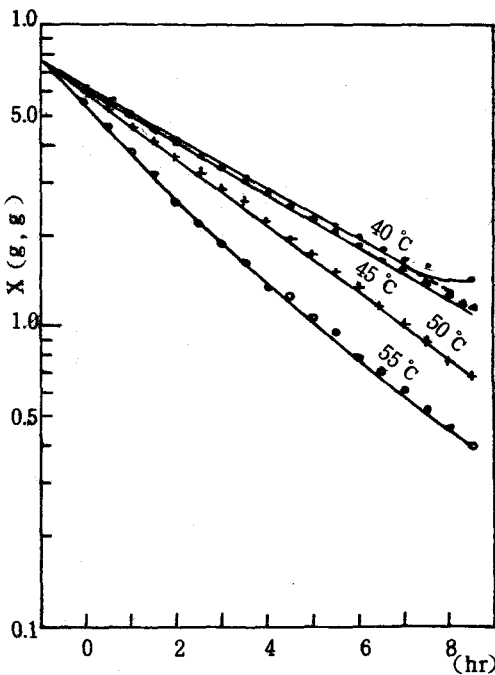


Fig. 6. Effect of Temperature on Water Content in Relation to Time at Constant Air Velocity (1.5 m/sec)

건조실험을 하였다. 실험결과는 예측한 대로 건조곡선이 지수함수적으로 감소하였으므로 감소율을 나타내는 건조속도 정수 k 값은 Fig. 6의 각각의 Slope에서 구할 수 있고 온도를 상승시킬수록 직선의 기울기는 증가하므로, 건조속도가 빨라짐을 알 수 있었다.

온도 상승에 대해 건조 속도가 증가하는 것은 일반적인 반응 속도론에서는 Arrhenius relationship으로 설명하고 있으므로 Fig. 7에 건조

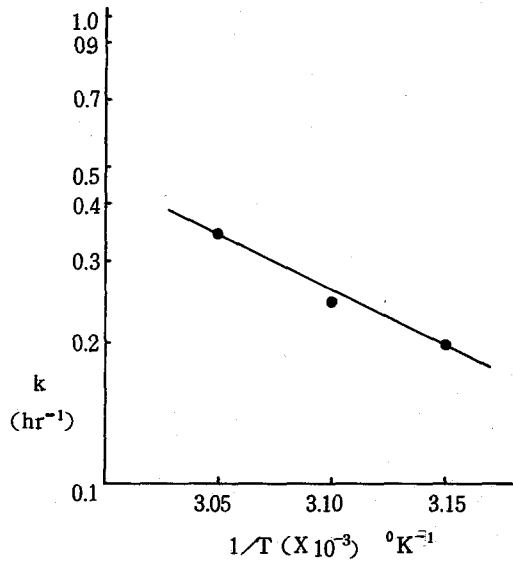


Fig. 7. Arrhenius Plot for the Dehydration Constant

속도정수 k 에 대한 Arrhenius plot을 시도해 보았고, 그 결과 건조 속도는 Arrhenius 관계에 따라 온도에 대해서 지수함수적으로 빨라진다는 것을 확인할 수 있었다. 건조속도가 열풍온도에 대해서 Arrhenius 관계에 있다는 의미는 온도를 상승시키면 증기압이 상승되고 따라서 건조속도가 빨라지기 때문이다.

건조속도에 미치는 풍속의 영향을 검토하기 위해서 온도를 일정하게 45 °C로 고정하고 풍속을 1.0 m/sec에서부터 점차 높혀 3.0 m/sec까지 변화시켜 앞의 실험과 같은 방법으로 실험한 후, 계산된 실험 결과를 Semilog paper에 plot 하면, Fig. 8과

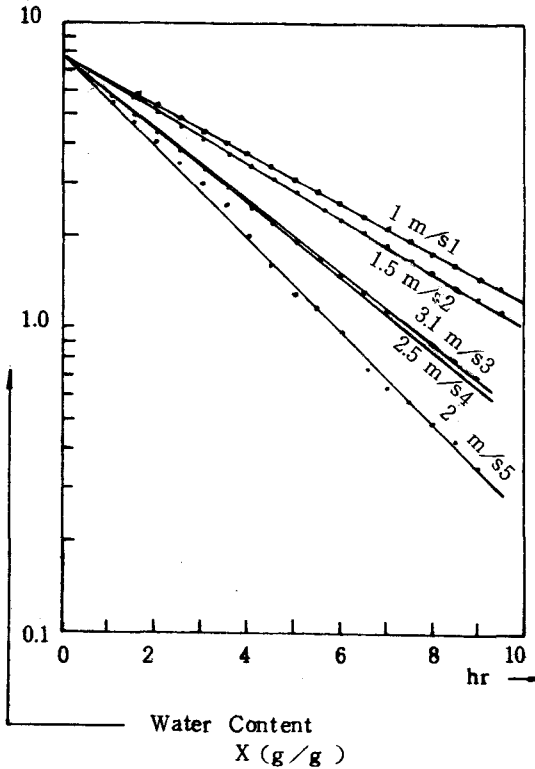


Fig. 8. Effect of Air Velocity on Water Content in Relation to Time at Constant Temperature 45 °C

같으며, Fig.8에서 구한 직선의 기울기인 건조속도정수 k 값을 풍속에 대해서 plot 하면 Fig.9와 같이 표현된다.

그런데 Fig. 9 에 의하면 1.0 m/sec 에서부터 2.0 m/sec 까지는 풍속의 증가에 따라 반응속도 정수 k 값이 상승함을 볼 수 있으나 2.0 m/sec 이상으로 풍속을 더욱 높여 주면, k 값이 오히려 감소하는 현상을 볼 수 있다. 풍속에 따라 k 값이 상승하는 범위에서는 풍속이 빨라짐에 따라 수분증발이 촉진되어 k 값이 상승되었으나, k 값이 감소하는 범위에서는 버섯의 표면온도나 내부온도가 동시에 떨어지는 실험결과를 나타내고 있어서, 표면경화현상(Case-hardening)이 일어나서 내부의 수분이동이 표면의 경화된 부분을 통과하기가 더욱 어려워진 것으로 판단된다.

따라서 건조속도를 좌우하는 인자로서는 온도풍속 외에도 표면경화현상을 막을 수 있는 다른 중요한 인

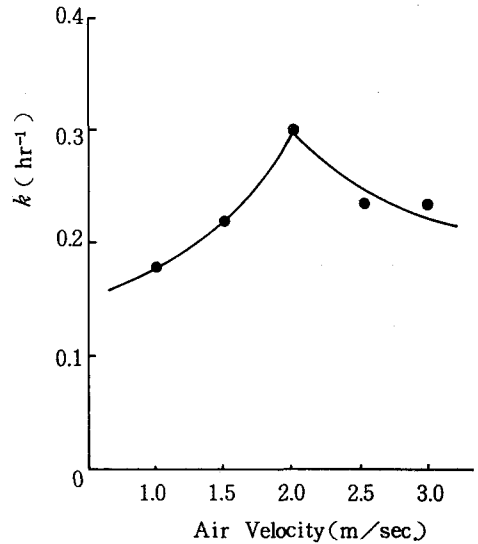


Fig. 9. Effect of Air Velocity on the Dehydration Rate Constant k , at constant Temperature 45 °C

자를 조절해야 할 것으로 생각된다. 이상의 실험으로부터는 풍속은 2 m/sec 가 적합한 건조 조건에 해당된다고 판단할 수 있다.

위의 실험고찰에 의하면, 온도는 높을수록 건조속도가 빠르고 풍속은 2 m/sec 가 최적상태라고 판단할 수 있었는데, 버섯의 맛과 품질면에서 50 °C를 넘으면, 품질 저하가 예측되므로, 가장 적합한 건조 조건이란, 열풍온도 50 °C, 풍속 2 m/sec 일 때라고 볼 수 있다. 이 조건에서 건조 실험을 행한 후 mathematical model 을 설정하여 Kinetic model 을 유도하면, 건조곡선식은,

$$X = 6.94 e^{-0.345 t}$$

건조속도식, dx/dt 는,

$$\frac{dx}{dt} = -2.39 e^{-0.345 t}$$

로 얻어진다.

IV. 결 론

표고버섯의 열풍건조에 있어서 건조속도를 좌우하는 인자로서 열풍온도, 풍속의 영향을 고찰해 보았더니 다음과 같은 결과가 얻어진다.

풍속을 1.5 m/sec 로 일정하게 유지하면서 온도를 40 °C에서부터 55 °C까지 변화시키면, 온도가 높을수록, 건조속도는 빨라졌다. 또 건조속도 정수는 온도상승에 대해 Arrhenius relationship 을 따른다.

온도를 45 °C로 고정시킨 상태에서 풍속을 변화시키면, 1.0 m/sec 에서부터 2 m/sec 까지는 풍속을 증가시킬수록, 건조속도가 빨라졌으나, 3.1 m/sec 까지는 풍속을 높이면 오히려 건조속도가 감소하였다.

적합한 건조조건의 일례로서 50 °C, 2 m/sec 에 대해서, 건조현상을 속도론적인 입장에서 규명하기 위해서 건조곡선 및 건조속도식을 유도하였더니, 각각 $X = 6.94 e^{-0.345 t}$ $dx/dt = -2.39 e^{-0.345 t}$ 되는 Kinetic model 이 얻어졌다.

V. 요 약

열풍에 의한 표고버섯의 건조현상을 속도론적으로 규명하기 위해서 건조속도를 좌우하는 두 가지 인자에 대해서 그 영향을 고찰한 후 선정된 조건에서 건조곡선 및 건조속도식을 유도하였다.

일정 풍속(1.5 m/sec)하에서 온도의 변화(40 °C ~ 55 °C)를 주었을 때 수분의 감소는 지수함수적으로 감소하였으며 감소율은 온도가 높을수록 더욱 높았다. 온도를 45 °C로 고정시키고 풍속의 변화(1.0 ~ 3.1 m/sec)를 주었을 때 2 m/sec 까지는 풍속이 빠를수록 건조속도가 높아졌으나, 그 이상의 풍속에서는 오히려 건조속도가 감소하였다. 따라서 풍속은 2 m/sec 에서 가장 건조속도가 높았다.

선정된 온도 50 °C, 풍속 2 m/sec, 습도 38 - 41%의 조건에서 건조곡선 및 건조속도식을 유도하여 본 결과 $X = 6.94 e^{-0.345 t}$ 와, $dx/dt = -2.39 e^{-0.345 t}$ 라는 Kinetic model 이 얻어졌다.

謝 辭

본 연구실험을 하는 동안, 실험을 도와 주셨던 광주보건전문대학 식품제조과 정영화 조교님과 전남대

학교 공과대학 기계공학과 조규종 교수님께 깊은 감사를 드리고, 아울러 본 연구를 위하여 학술연구 조성비를 하사하시어 독려해 주신 광주보건전문대학정부 학장님께 심심한 감사를 드립니다.

References

1. 平尾武司. シイタケ乾燥法, 農山漁村文化協會, 東京昭和 53 年.
2. 河合晃, シイタケの熱風乾燥における適正排氣量および溫度, 菌蕈研究所研究報告 5.56(1966).
3. 河合晃, 乾燥によるシイタケの光澤 芳香および亂糟, 菌蕈研究所研究報告 5.56(1966).
4. Sykes, S.M., F.H.C. Kelly, Kinetics of Drying Apple Slice., J. Sci. Fd. Agric., 20.644 (1969).
5. Roman, G.N., E. Rostein & M.J. Urbicain. Kinetics of Water Vapor Desorption from Apples, J. Fd. Sci., 44(1), 193 (1979).
6. 中馬 豊, 村田 敏, 岩元 陸夫, 菌類の乾燥に関する基礎的 實驗, 農業機械學會誌, 31(3), 250.
7. Brennan, J.G., J.R. Butters, N.D. Cowell, A.E.V. Lilly, Ed. Food Engineering Operations 2nd ed. (Applied Science 1976).
8. Hansen, J.R., Dehydration and Hydration Kinetics of Soybean Proteins, J. Agric. Food. Chem., 26(2), 297 (1978).
9. Ito, Y., M. Toyoda, H. Suzuki, M. Iwaida, Gas-liquid Chromatographic Determination with Special Reference to the relation between Carbon Disulfide and Lenthionine, J. of Fd. Sci., 43(4) 1287. (1978).
10. 古田 博, 菅原龍幸, 林 淳三, 干シイタケ 各種柄の遊離糖, 遊離糖フルユールおよび有機酸含量について, 日本食品工業學會誌, 26(8), 356 (1979)
11. Earle, R.L., Unit Operations in Food Processing (Pergamon, 1966).