

스마트 누룩 발효 제어기의 설계 및 개발연구: 온·습도/환기 제어를 중심으로

김지웅*, 정성철*, 이수경**
*전주대학교 농식품경영학과
**다른오름농업회사법인주식회사
remindforce@naver.com

Design and Development of a Smart Nuruk Fermentation Controller: Focusing on Temperature, Humidity, and Ventilation Control

Ji-Eung Kim*, Sung-Chul Jung*, Su-Kyoung Lee**
*Dept. of Agri-Food Management Jeonju University
**DaReunOReum Agricultural Corporation Co., Ltd.

요약

본 연구는 전통 누룩 발효의 품질 변동성과 재현성 문제를 해결하기 위해 온도, 습도, 환기를 통합 제어하는 스마트 누룩 발효 제어기를 설계·개발하는 것을 목적으로 하였다. 전통 누룩은 미생물 다양성으로 풍미의 장점을 가지지만 환경 변화에 민감하여 품질 균일성 확보가 어렵다. 이에 상용 냉동고를 기반으로 가열, 냉각, 가습, 환기 및 공기 순환을 통해 전통 누룩 발효의 자연적인 환경을 유사하게 재현하는 시스템을 구축하고, 단순 제어 로직을 적용하여 발효 조건을 자동 유지하도록 설계하였다. 설정 온도 30℃, 습도 70%, 80%, 90% 조건에서 실험한 결과, 온도는 $\pm 1^\circ\text{C}$, 습도는 $\pm 5\%$ 범위 내에서 안정적으로 유지되었으며 반복 실험에서도 재현성이 확보되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 스마트 누룩 발효 제어기는 전통 누룩 발효 환경의 변동성을 효과적으로 제어할 수 있는 실용적 장치로서, 다양한 발효 조건 실험과 데이터 축적을 가능하게 하며, 향후 전통 누룩 발효 공정의 표준화 및 품질 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서론

우리나라의 전통 누룩은 곰팡이, 효모, 세균 등 다양한 미생물이 자연적으로 공존하는 복합 발효 스타터로서[1], 이러한 미생물 군집의 상호작용을 통해 전분의 당화와 알코올 발효가 동시에 이루어지는 특징을 가지며[2], 이는 전통주의 향미 다양성과 지역성 형성의 핵심 요인으로 작용한다[3]. 그러나 이러한 미생물 다양성은 동시에 발효 품질의 불균일성과 재현성 부족이라는 문제를 야기한다[4]. 특히 제조 환경(온도, 습도, 공기 조건)에 따라 미생물 군집이 크게 달라지며, 이는 누룩의 품질 편차를 초래하는 주요 원인으로 지적된다[5]. 이러한 한계를 해결하기 위해서는 발효 환경(온도, 습도, 환기)을 정량적으로 제어하고 재현 가능한 조건을 유지할 수 있는 시스템이 필요하며 미생물 군집 변화에 민감한 누룩 발효에 환경 조건의 안정적 유지와 반복 재현이 가능한 제어 시스템은 필수적인 연구 기반으로 작용할 수 있다.

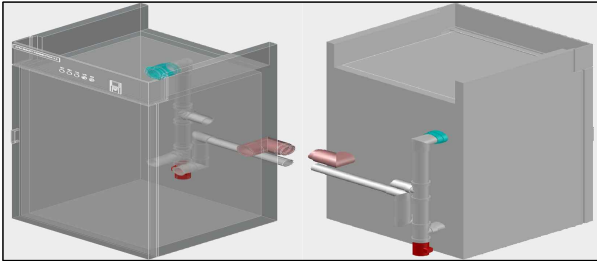
따라서 본 연구는, 온도, 습도, 환기 조건을 통합적으로 제어할 수 있는 스마트 누룩 발효 제어기를 설계하고, 이를 통해 전통 누룩 발효 환경을 안정적으로 유지할 수 있는지를 검증하는 것을

목적으로 하며, 이를 통해 전통 누룩 발효의 경험 의존적 한계를 보완하고, 다양한 발효 조건 실험이 가능한 데이터 기반 연구 환경을 구축함으로써 전통주 산업 및 학문적 연구에 기여하고자 한다.

2. 시스템 설계 및 구성

2.1 시스템 구조

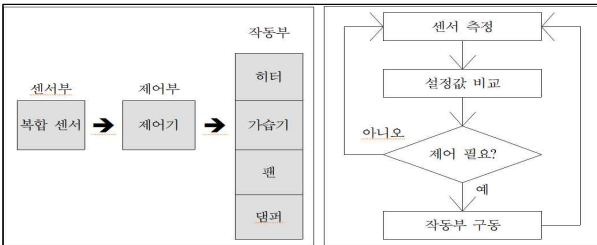
본 연구에서 설계된 시스템은 발효 챔버, 온·습도 센서, 제어기, 냉각기, 히터, 가습기, 팬, 전동댐퍼로 구성된다. 상용 냉동고를 기반으로 내부 환경을 통합 제어할 수 있도록 하였으며 온도 저감시 전동 댐퍼를 개방하여 [그림 1]과 같이 외기 유입과 공기 순환에 의한 온도 저하가 이루어지도록 설계하였다. 이는 전통 누룩 발효가 밀폐된 기계적 냉각 환경이 아닌 외기와의 자연스러운 공기 교환 및 순환에 기반하여 이루어지는 점을 고려한 것으로, 발효 환경을 인위적으로 급격히 변화시키기보다 완만하고 연속적인 외기 유입을 통해 온도를 조절함으로써 보다 자연 환경에 근접한 조건을 재현하고자 한 것이다.



[그림 1] 공기 순환 구조

[그림 2]는 스마트 누룩 발효 제어기의 구성 요소를 센서부, 제어부, 작동부로 구분하여 나타낸 것이다. 센서부에서는 온도와 습도를 동시에 측정하는 복합 센서를 통해 발효기 내부 환경 데이터를 실시간으로 수집하여 제어부로 전달하고, 제어부의 제어기는 설정된 목표값과 측정값을 비교하여 제어 여부를 판단한다. 제어 결과에 따라 작동부가 구동되며, 작동부는 히터, 가습기, 팬, 전동 댐퍼로 구성되어 발효기 내부 환경을 조절한다. 히터는 온도를 조절하고 가습기는 습도를 증가시키며, 팬과 댐퍼는 공기 순환 및 외기 유입을 통해 온·습도 균형을 유지하는 역할을 수행하게 하였다.

이와 같은 과정은 지속적으로 반복되는 피드백루프 제어 구조로, 발효 환경을 설정값 범위 내에서 안정적으로 유지하기 위한 역할을 한다.



[그림 2] 시스템 구조

2.2 제어 조건

[표 1] 온도 및 습도 ON/OFF 제어 조건

구분	설정값	제어 대상	ON 조건	OFF 조건
가열	30℃	히터	29℃ 이하 ON	30℃ 이상 OFF
냉각	30℃	전동 댐퍼	31℃ 이상 개방	30℃ 이하 닫힘
가습	80%	가습기	75% 이하 ON	80% 이상 OFF

[표 1]은 온도 및 습도 제어를 위한 ON/OFF 제어 조건 예시를 나타낸 것으로 온도 제어는 설정값 기준 1℃ 범위에서, 습도는 5% 범위에서 제어되도록 설정되었다. 온도 제어의 경우 설정값

30℃를 기준으로, 히터는 29℃ 이하에서 작동(ON)하고 30℃ 이상에서 정지(OFF)하도록 설정하였다. 반대로 전동 댐퍼는 내부 온도가 31℃ 이상일 때 개방되어 외부 공기를 유입함으로써 온도를 낮추고, 30℃ 이하에서는 닫힘 상태를 유지하도록 설계하였다.

습도 제어에서는 설정값을 80% 경우, 가습기는 설정값보다 5% 낮은 구간인 75% 이하에서 작동(ON)하고, 80% 이상에서는 정지(OFF)하도록 설정하였다. 이와 같은 제어 방식은 설정값을 기준으로 일정한 편차 범위를 두는 ON/OFF 제어 방식으로, 제어 장치의 과도한 반복 작동을 방지하고 발효기 내부 환경을 안정적으로 유지하기 위한 히스테리시스 제어 구조를 따른다.

3. 실험 조건 및 방법

[표 2] 실험 조건 및 방법

구분	내용
제어 변수	온도 30℃
	습도 70%, 80%, 90%
실험 조건	설정값 도달 이후 측정 시작
	온도 제어 작동 1℃, 습도 제어 작동 5%
	수동 댐퍼 모두 닫힘
	외부 실내 온도 18℃
측정 방법	1분 간격 20분
측정 항목	온도(℃), 습도(%)
데이터 수집	수동 관측, 기록
반복 횟수	3 반복

[표 2]는 스마트 누룩 발효 제어기의 온도 및 습도 제어 성능을 평가하기 위한 실험 조건 및 방법을 나타낸 것이다.

제어 변수의 실험 온도는 국내 발효 스타터 및 제곡 관련 선행 연구에서 반복적으로 적용된 30℃를 기준으로 설정하였다. 상대 습도는 선행연구에서 확인된 75~85% 수준의 중·고습 조건을 포함하면서 제어 범위를 확장하여 비교하기 위해 70%, 80%, 90%로 구분하였다[6].

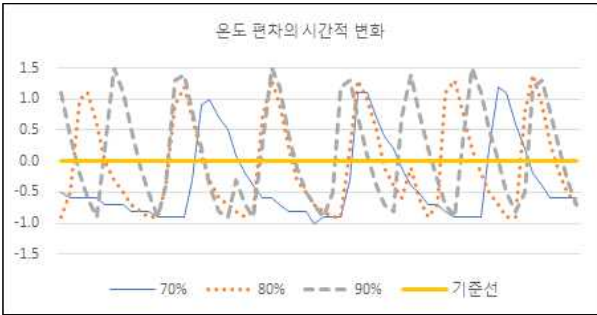
실험 조건으로 온도 제어 작동은 1℃, 습도 제어 작동은 5%로 설정하였다. 이는 제어 장치의 과도한 빈번 작동을 방지하면서도 안정적인 환경 유지를 확보하기 위한 범위로 설정한 것이다. 또한, 외부 환경의 영향을 최소화하기 위하여 수동 댐퍼를 모두 닫은 상태에서 실험을 수행하였으며, 외부 실내 온도는 18℃로 유지하여 일정한 외부 조건을 확보하였다. 측정은 발효기 내부 환경이 설정값에 도달한 이후부터 시작하였다. 이는 초기 과도 상태의 영향을 배제하고 안정화된 상태에서의 제어 성능을 평가하기 위함이다.

데이터 측정은 1분 간격으로 총 20분 동안 수행하였으며, 측정 항목은 발효기 내부의 온도(℃)와 습도(%)로 구성하였다. 데이터는 수동 관측 및 기록 방식으로 수집하였으며 실험의 재현성과

신뢰성을 확보하기 위하여 각 조건별로 총 3회 반복 실험을 수행하였다.

4. 검증 및 성능 평가

4.1 온도 제어 성능

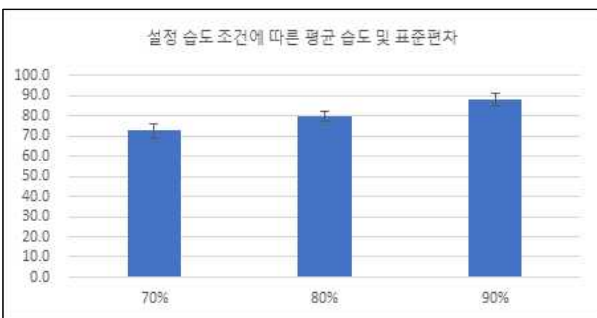


[그림 3] 설정 습도 조건에 따른 온도 편차 변화

[그림 3]은 설정 습도 조건(70%, 80%, 90%)에 따른 온도 편차의 시간적 변화를 나타낸 것이다.

온도 편차는 설정 온도 30°C를 기준으로 실제 측정 온도의 차이를 나타내며, 그래프의 기준선(0°C)을 중심으로 편차가 형성된다. 습도 70% 조건에서는 온도 편차가 상대적으로 완만하게 변화하며 변동 폭이 비교적 안정적인 형태를 보인다. 반면 습도 80% 및 90% 조건에서는 편차의 진폭이 다소 증가하고, 주기적인 상승과 하강 패턴이 증가하는 경향이 나타난다. 특히 90% 조건에서는 가장 큰 변동 폭을 보이며, 온도 편차의 진동성이 가장 크게 나타나는 경향이 보이나 전체적으로 모든 조건에서 온도 편차는 약 ±1°C 범위 내에서 유지되는 것으로 나타나, 본 시스템이 설정 온도를 비교적 안정적으로 제어하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 습도 제어 성능



[그림 4] 설정 습도 조건에 따른 평균 습도 및 표준편차

[그림 4]는 평균 습도와 표준편차를 같이 나타낸 오차 그래프이다. 각 조건에서 측정된 평균 습도는 설정 습도 70%, 80%, 90%조건에서 각각 72.7%, 79.75%, 87.8%로 설정값에 근접한

수준으로 나타났으며, 설정 습도 80%에서 가장 근접한 값을 보였다. 표준 편차 또한, 70% 조건에서는 3.5%, 80% 조건에서는 2.5%, 90% 조건에서는 3.1%로 나타났다. 이 중 80% 조건에서 가장 낮은 표준편차를 보이며 가장 안정적인 제어 특성을 나타냈다. 반면 90% 조건에서는 상대적으로 높은 표준편차를 보여 습도 변동성이 다소 증가하는 경향이 확인되었다. 특히 고습 조건(90%)에서는 공기 중 수분량 증가로 인해 가습 및 환기 과정에서의 과도한 스위칭이 발생하여 변동성이 증가한 것으로 보인다.

그럼에도 불구하고 전체 표준편차가 2.5~3.5% 범위에서 유지되고 있어, 본 시스템은 다양한 습도 조건에서 안정적인 제어 성능을 보이고 있는 것으로 판단된다.

4.3 온도와 습도의 상호 영향 분석

온도와 습도는 물리적으로 상호 의존적인 변수이므로, 개별 제어 성능만으로는 시스템의 실제 안정성을 평가하기 어렵다. 따라서 다음의 분석은 두 변수 간 상호작용을 규명하여 스마트 누룩 발효 제어기의 통합 제어 적합성과 한계를 검증하기 위해 수행되었다.

[표 3] 변수 간 Pearson 상관계수 분석 결과

변수	Humidity	Temp	Set_Humidity
Humidity	-	-0.152*	0.896***
Temp		-	0.254***
Set_Humid			-

*p<.05, ***p<.001, N=180

[표 3]은 온도와 습도 간의 상관관계를 분석한 결과를 나타낸 것으로, 설정 습도(Set_Humid)와 실제 습도(Humidity) 간에는 매우 강한 양의 상관관계($r = 0.896, p < .001$)가 나타났다. 이는 제어기가 설정된 습도 값을 기준으로 내부 환경을 효과적으로 유지하고 있음을 의미하며, 습도 제어 성능이 높은 수준으로 구현되었음을 시사한다. 한편, 온도(Temp)와 실제 습도(Humidity) 간에는 약한 음의 상관관계($r = -0.152, p < .05$)가 나타났다. 이는 온도가 상승할 경우 상대습도가 감소하는 일반적인 물리적 특성이 반영된 결과로 해석된다. 다만, 그 상관 강도가 낮은 수준에 머무르고 있어 온도 변화가 습도에 미치는 영향은 제한적인 것으로 판단된다.

[표 4] 습도에 영향을 미치는 요인에 대한 회귀분석 결과

변수	B	표준오차	β	t	p-value
(상수)	122.884	4.207	-	29.209	<0.001***
Temp	-3.681	0.145	-0.406	-25.322	<0.001***
Set_Humid	0.841	0.013	0.999	62.359	<0.001***

Dependent variable: Humidity
 $R^2 = 0.957$, Adjusted $R^2 = 0.957$, $F = 1992.257$ ($p < 0.001$)
 *** $p < .001$

[표 4]는 스마트 누룩 발효 제어기에서 측정된 온도(Temp)와 설정 습도(Set_Humid)가 실제 습도에 미치는 영향을 분석하기 위해 수행한 다중회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 분석 결과, 본 회귀모형은 통계적으로 매우 유의한 것으로 나타났으며($F = 1992.257$, $p < .001$), 결정계수(R^2)는 0.957로 나타나 독립변수들이 종속변수인 습도의 변동을 약 95.7% 설명하는 것으로 확인되었다. 각 독립변수의 영향을 살펴보면, 설정 습도(Set_Humidity)는 표준화 계수($\beta = 0.999$, $p < .001$)로 나타나 실제 습도에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 확인되었다. 이는 제어기가 설정값을 기준으로 습도를 거의 직접적으로 반영하고 있음을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 전통 누룩 발효 과정에서 발생하는 품질 변동성과 재현성 부족 문제를 해결하기 위하여 온도, 습도, 환기 조건을 통합적으로 제어할 수 있는 스마트 누룩 발효 제어기를 설계하고, 그 성능을 실험적으로 검증하였다.

실험 결과, 설정 온도 30°C 조건에서 발효기 내부 온도는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 내에서 안정적으로 유지되었으며, 설정 습도 70%, 80%, 90% 조건에서도 상대습도는 $\pm 5\%$ 범위 내에서 제어되어 전반적으로 안정적인 제어 성능을 나타냈다. 또한 반복 실험에서도 유사한 결과가 확인되어 제어기의 재현성이 확보된 것으로 판단된다. 통계 분석 결과에서도, 제어기가 설정값을 기준으로 발효기 내부 환경을 효과적으로 유지하고 있음을 의미하였다. 온도 저감 시 기계적 냉각 방식 대신 전동 댐퍼 개방을 통한 외부 공기 유입과 내부 공기 순환 구조를 적용하였음에도 불구하고 설정 온도 범위 내에서 안정적인 발효 환경을 유지할 수 있었다. 이는 전통 누룩 발효가 자연적인 외기 유동에 기반하여 이루어진다는 점을 고려할 때, 본 시스템의 냉각 방식이 전통 발효 환경의 특성에 부합하는 적절한 접근임을 시사한다.

따라서 본 연구에서 개발된 스마트 누룩 발효 제어기는 전통 누룩 발효 환경을 정량적으로 제어할 수 있는 실용적 장치로서,

다양한 발효 조건 실험과 데이터 축적을 가능하게 하며, 향후 전통 누룩 발효 공정의 표준화 및 품질 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 본 연구는 온도와 습도, 환기 제어 중심의 제어에 국한되어 있고 습도 제어 또한 가습 중심의 단방향 제어 방식으로 구성되어 있어 정밀 제어 측면에서 한계를 가진다. 향후 연구에서는 다변수 센서 기반 제어 및 정밀 제어 알고리즘을 적용하고, 실제 누룩 발효를 대상으로 한 품질 평가 연구가 추가적으로 수행될 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 이장은, 이애란, 김혜련, 이은정, 김태완, 신우창, 김재호, “Restoration of traditional Korean nuruk and analysis of the brewing characteristics”, *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 제27권5호, pp. 896-908, 2017년.
- [2] 송상훈, 이정희, 이설희, 박정민, 이형주, 배동훈, 윤성식, 최중봉, 박영서, “Analysis of Microflora Profile in Korean Traditional Nuruk”, *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 제23권1호, pp. 40-46, 2013년.
- [3] 이상훈, “조선시대 누룩과 양조법의 변화—누룩 제조법의 변화를 통해본 양조법의 변천”, *불교문예연구소*, 제16권, pp. 375-404, 2020년.
- [4] 남강, 이남근, 염은지, 김용식, 김대혁, 여수환, 정용섭, “온도를 달리한 누룩 발효 기간별 배양 유산균 변화 및 분리 유산균들의 효소 활성”, *한국식품저장유통학회*, 제22권6호, pp. 920-925, 2015년.
- [5] 강지은, 김하은, 임보라, 최한식, 정석태, “누룩별 약주의 품질특성”, *한국지역사회생활과학회지*, 제31권1호, pp. 15-24, 2020년.
- [6] 정의현, 문지영, 김소영, 여수환, “Aspergillus luchuensis 34-1을 접종한 펠렛누룩의 품질특성”, *Journal of Biomedical Translational Research*, 제19권4호, pp. 103-109, 2018년.