

이탈리안 라이그라스 종자의 방습 평형함수율 모델 개발

김훈¹, 이효재², 한재웅^{3*}

¹한국식품연구원 소비안전연구단, ²한국폴리텍대학 스마트자동차과, ³공주대학교 스마트팜공학과

Development of Desorption Equilibrium Moisture Content Model of Italian Ryegrass Seeds

Hoon Kim¹, Hyo-Jai Lee², Jae-Woong Han^{3*}

¹Research Group of Consumer Safety, Korea Food Research Institute

²Department of Smart Automation, Korea Polytechnic

³Department of SmartFarm Engineering, Kongju National University

요약 본 연구의 목적은 국내에서 IRG종자의 건조시 온도 및 상대습도에 따른 적정 건조조건을 찾기 위한 방습평형함수율모델을 구하는 것이다. 평형함수율 측정방법 중 동적 측정방법을 이용하여 건조온도 3수준 및 상대습도 4수준에 따른 평형함수율 측정하고 평형함수율을 예측할 수 있는 4개의 모델을 결정하고 모델의 적합성을 검증하는데 하였다. 건조온도 변화보다 습도의 변화에 따라 평형함수율의 변화 폭이 크게 나타났다. 4개의 평형함수율 모델 즉, Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey 및 Modified Oswin모델의 회귀계수(실험상수)와 RMSE 및 R^2 는 4개 모델 중 평형함수율의 실험 측정값과 예측값 사이의 RMSE의 경우 Modified Oswin모델의 경우가 0.480%, d.b.으로 가장 낮은 값을 나타내었다. 평형함수율모델의 결정계수(R^2)는 Chung-Pfost모델의 경우 0.97이상의 높은 값을 나타내었으며, 그 외 모델들도 0.95%이상으로 나타났다. Halsey 및 Modified-Henderson 모델의 경우 상대습도 50%이상 건조온도가 고온일수록 예측값과의 차이가 크게 나타났으며, Chung-Pfost모델의 저온 및 상대습도가 낮은 경우 예측값과 큰 차이가 나타났다. Modified-Oswin모델의 경우 건조온도 및 상대습도 변화에 따라 예측값과 잘 일치하였다. 따라서 IRG종자의 방습평형함수율의 모델로는 Modified-Oswin 모델이 적합할 것으로 판단된다.

Abstract The purpose of this study is to obtain a desorption equilibrium moisture content (EMC) model for finding the appropriate drying conditions for IRG seeds in Korea according to temperature and relative humidity. From the various EMC measurement methods, the dynamic measurement method was used to measure the EMC according to 3 levels of drying temperature and 4 levels of relative humidity. Apart from this, 4 models were developed to predict the EMC and the suitability of these models was also verified. The change in the EMC was larger with a change in humidity than with a change in drying temperature. The RMSE of the Modified Oswin model was 0.480% d.b., and shows the lowest value. The coefficient of determination of the Chung-Pfost model was over 0.97, and for the other models, it was over 0.95%. In the case of the Halsey and Modified-Henderson models, when the relative humidity was over 50% and the drying temperature was higher, the difference from the predicted value was greater, and the Chung-Pfost model showed a large difference from the predicted value when the drying temperature and the relative humidity were low. The Modified-Oswin model fitted well to the predicted values according to the change in drying temperature and relative humidity. Therefore, the Modified-Oswin model was chosen as a suitable prediction model for the desorption EMC of IRG seeds.

Keywords : Desorption, Drying, Drying Model, Equilibrium Moisture Content, Italian Ryegrass Seeds

본 논문은 2021년도 과학기술정보통신부 재원으로 한국식품연구원의 지원(E0210901)을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Jae-Woong Han(Kongju National Univ.)

email: hanwoong@kongju.ac.kr

Received July 27, 2021

Accepted September 3, 2021

Revised August 19, 2021

Published September 30, 2021

1. 서론

이탈리안 라이그라스(IRG, Italian Ryegrass)는 줄기와 잎이 부드러워 가축의 기호도가 높아 2010년 56,000 ha에서 2019년 165,000 ha로 재배면적이 증가했다. 현재 연간 국내 종자 소요량은 6,000 톤으로 대부분 수입에 의존하여 사용하고 있다[1]. 따라서 IRG의 국산 자급 확대를 위한 국내 종자의 생산체계 구축이 필요하며 안정적인 공급방안을 확보해야 한다[2]. 국내에서 생산되는 IRG 채종 시기는 6월 중순으로 벼 모내기과 종자 수확시기가 중복되어 조기 수확으로 인한 높은 수분의 종자 채종으로 인하여 높은 함수율 및 까락 등의 원인이 되고 이는 건조 및 정선과정을 어렵게 한다[3,4]. 국내 생산된 채종 후 종자의 건조 및 선별은 IRG종자용 건조시스템이 전문하여 기존 곡물용 건조시설을 이용하기 때문에 건조 속도 저하 및 품질 저하가 증가하고 있다.

IRG종자가 일정한 조건의 온도 및 상대습도에 장시간 노출될 경우 내부의 수증기압과 주위 공기의 수증기 분압이 평형을 이루게 되어 일정한 함수율에 도달하게 되는데 이때를 평형함수율(Equilibrium Moisture Content, EMC)이라 하며 건조 과정 중 수분을 방출하면서 평형함수율을 유지할 경우 방습 평형함수율이라 한다. 방습평형함수율은 건조온도와 상대습도의 수식으로 표현이 가능하며 이를 평형함수율 모델이라 한다. 평형함수율 모델은 Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin, Guggenheim-Anderson-deBoer[5] 등이 제시한 모델이 대표적으로 이용되고 있으나, 넓은 상대습도 범위에서 실험치와 잘 일치하고, 이용상의 편의성 때문에 Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin 모델 등이 널리 이용되고 있다[6].

평형함수율 측정방법에는 공기조성 방법에 따라 동적 방법과 정적방법이 있으며 동적 측정방법은 기계적으로 유동시킨 공기 중에 곡물을 노출시켜 평형함수율에 이르게 하여 측정하고 정적 측정방법은 정지된 공기 중에 곡물을 노출시켜 평형상태에 이르게 하는 방법이다. 정적 측정방법은 장치가 비교적 간단하지만 측정시간이 긴 단점이 있으며, 동적 측정방법은 정온·정습의 공기 발생과정이 복잡한 반면 짧은 시간에 측정이 가능하다[7-12].

본 연구의 목적은 국내에서 채종된 IRG종자의 건조에 필요한 건조온도 및 상대습도에 따른 적정조건을 찾기 위한 방습평형함수율 모델을 구하는 것이며, 평형함수율 측정방법 중 동적 측정방법을 이용하여 건조온도 및 상

대습도에 따른 평형함수율을 측정하고, 기존에 사용된 4개의 예측 모델(Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey 및 Modified Oswin)을 상수를 결정하고 모델의 적합성을 검증하는데 있다.

2. 본론

2.1 실험재료

본 실험에 사용한 IRG종자는 2020년 6월 전남 장흥에서 수확되었으며, 콤바인으로 수확된 고수분의 IRG종자를 약 3kg씩 실링백을 이용하여 소분하고 밀봉하여 포장한 후 영하 10℃에서 저온저장고에 보관하여 포장열을 제거하였다. 실험에 사용하기 전에 상온에서 24시간 이상 방치한 후 실험에 사용하였으며 초기함수율은 51.51%, d.b.이었다[13].

2.2 실험방법

동적 측정방법 실험장치는 Fig. 1과 같이 구성하였으며, 정온·정습발생장치(MTH4100, SANYO, UK)는 공기조화장치, 공기충만실, 송풍기, 온·습도측정장치 및 시료대 등으로 구성되어 있다. 정온·정습발생장치는 온도 -45~105℃(±0.3℃), 상대습도 0~99%(±2.5%) 범위의 공기 발생이 가능하며, 설정된 건조 온도 및 상대습도는 송풍기에 의해 공기충만실과 시료대로 이송되어 건조가 되고 건조에 사용된 공기는 다시 공기조화장치로 순환되어 설정된 건조온도 및 상대습도를 지속적으로 유지되도록 하였다[7]. 시료대는 정온·정습된 공기의 유동이 원활하도록 하부 타공망을 사용하였다. 공기충만실내에 온도·상대습도센서(0572 6172, Testo, Germany) 및 데이터 로거(176P1, Testo, Germany)를 설치하였다. 평형함수율건조실 내의 풍속은 하부 10지점에 대하여 풍속계(9555-P, TSI Incorporated, USA)를 이용하여 측정하였으며, 평균 0.50m/s이하로 나타났다(Kim 등 2004, Han 등 2006). 시료대는 하단에 메쉬로 구성된 가로×세로(19×19 cm)의 정사각형 시료대에 약 60g의 IRG종자를 박층으로 퇴적하고, 실험 시작 후 1분 간격으로 온도 및 상대습도를 데이터로그에 기록하였다. 건조 종료는 1시간 간격으로 전자저울(LC4200, SARTORIUS, Germany)을 이용하여 무게 변화가 0.1g 이하의 변화를 보일 때를 평형함수율에 도달한 것으로 간주하고 실험을 종료하였다. 건조온도 및 상대습도는 IRG종자의 건조 후

품질을 고려하여 저온 20, 30 및 40°C의 3수준, 상대습도는 30, 40, 50 및 60%의 4수준으로 총 12수준에 대하여 3회 반복 실험하여 2회는 평균값을 이용하여 모델 분석에 이용하였으며, 1회는 모델과 비교검증용으로 사용하였다[9]. 종료된 IRG종자는 상온정압건조법으로 10g-130°C-4h 건조법으로 측정하였다[5].

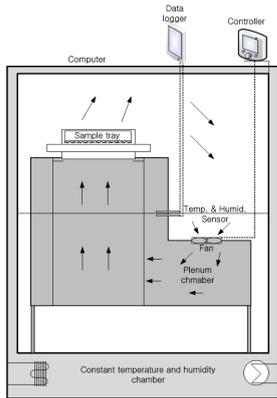


Fig. 1. Schematic diagram of equilibrium moisture content measuring device

2.3 분석방법

건조 온도 및 상대습도에 따른 IRG종자의 평형함수를 측정결과를 적용하기 위해서 4개의 모델이 가장 많이 이용되고 있으며 사용하는 모델은 3개 이상의 매개 변수를 포함하고 있어 적합성이 높고, 함수율을 온도와 상대습도의 양함수 또는 상대습도를 온도와 함수율의 양함수로 쉽게 표현할 수 있는 특성을 지닌 Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey 및 Modified Oswin 모델을 선택하였다. 4개의 모델은 다음과 같다.

Chung-Pfost Equation

$$RH = \exp\left[-\frac{A}{(T+C)} \exp(-BM)\right]$$

$$M = E - F \ln[-(T+C)\ln(RH)]$$

Halsey Equation

$$RH = \exp(-\exp(A+BT)M^{-C})$$

$$M = [\exp(A+BT)]^{\frac{1}{C}} (-\ln RH)^{-\frac{1}{C}}$$

Modified-Henderson Equation

$$RH = 1 - \exp[-K(T+C)(100M)^{-N}]$$

$$M = 0.01 \left[\frac{\ln(1-RH)}{-K(T+C)} \right]^{\frac{1}{N}}$$

Modified-Oswin Equation

$$RH = \frac{1}{(A+BT/M)^{\frac{1}{N}} + 1}$$

$$M = (A+BT) \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^N$$

Where, M = Equilibrium moisture content(dec., d.b.)

RH = Relative Humidity(dec.)

T = Temperature(°C)

A, B, C, E, F, K, N = Regression coefficients

SAS 9.4(SAS Institute Inc., USA)의 비선형회귀분석 프로그램을 이용하여 4개의 모델에 포함된 실험상수를 결정하였으며, 결정계수 R^2 및 RMSE(Root Mean Square Error)를 모델의 비교 검증에 이용하였다[14].

3. 결과 및 고찰

3.1 방습평형함수율

설정된 온습도를 이용하여 평형함수율에 도달한 IRG종자의 함수율은 Table 1과 같으며, 측정된 방습평형함수율은 건조온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 낮게 나타났다. 건조온도 변화보다 습도의 변화에 따라 평형함수율의 변화 값이 크게 나타났다.

Table 1. Experimental value of desorption equilibrium moisture content of IRG seeds

Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Equilibrium moisture content (%d.b.)
20.5	28.2	13.36
20.8	41.6	15.39
20.9	52.7	17.15
21.1	61.1	18.63
30.4	31.1	11.98
30.7	39.3	12.62
30.4	47.0	14.90
30.5	63.9	16.41
41.1	29.8	9.17
40.7	36.0	11.28
40.1	47.9	12.04
40.7	59.0	14.62

3.2 모델의 적합성 검정

4개의 평형함수용 모델 즉, Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey 및 Modified Oswin 모델의 회귀계수(실험상수)와 RMSE 및 R^2 는 Table 2와 같이 나타났다. 4개의 모델 평형함수용의 실험 측정값과 예측값 사이의 RMSE의 경우 Modified Oswin 모델의 경우가 0.480%, d.b.으로 가장 낮은 값을 나타내었다. 평형함수용의 측정정도를 고려하여 실측 및 예측 함수용 사이의 RMSE의 허용수준을 0.5%로 설정할 경우 Modified Henderson, Chung-Pfost 및 Modified Oswin 모델은 허용수준을 벗어났다. 또한 평형함수용 모델의 결정계수(R^2)는 Chung-Pfost 모델의 경우 0.97이상의 높은 값을 나타내었으며, 그 외 모델들도 0.95%이상으로 나타났다.

Table 2. Estimated regression coefficients and root mean square error for Chung-Pfost, Halsey, Modified-Henderson, and Modified-Oswin equation

Equation	Regression coefficients					RMSE (%d.b.)	R^2
	A	B	C	E	F		
Chung-Pfost	281.28	18.21	-1.579	0.3096	0.0549	0.00692	0.9733
Modified Halsey	A		B		C	0.00593	0.9584
	-3.794	-0.0342	2.3231				
Modified Henderson	K		C	N		0.00510	0.9633
	0.000025		-0.8742	2.5583			
Modified Oswin	A		B	N		0.00480	0.9661
	0.2099		-0.00207	0.26			

Fig. 2~4는 상대습도에 따른 평형함수용값과 4개의 모델의 방습평형함수용 예측값을 온도별로 비교한 것이며 건조온도 20℃는 상대습도 30~70%구간 4개의 모델 예측값이 잘 일치하였다. 건조온도 30℃에서는 상대습도 30~50%까지는 잘 일치 하였으나 60%이상의 상대습도에서는 Halsey 모델 및 다른 모델들도 평형함수용이 높게 예측되었다. 건조온도 40℃는 낮은 낮은 건조온도에 비하여 측정값과 예측값의 차이가 나타났지만 모든 모델이 전체 측정된 상대습도 범위에서 비교적 잘 일치하였다.

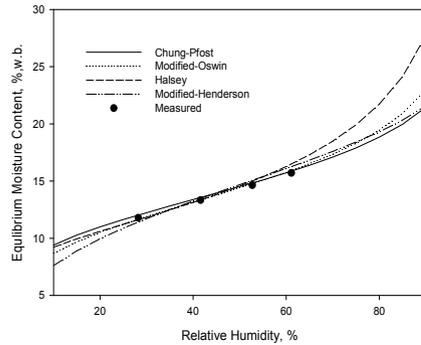


Fig. 2. Comparison of measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content using 4-equations for temperature 20℃

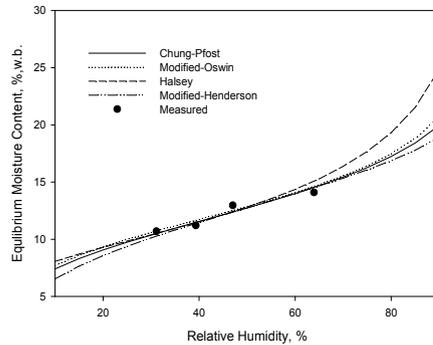


Fig. 3. Comparison of measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content using 4-equations for temperature 30℃

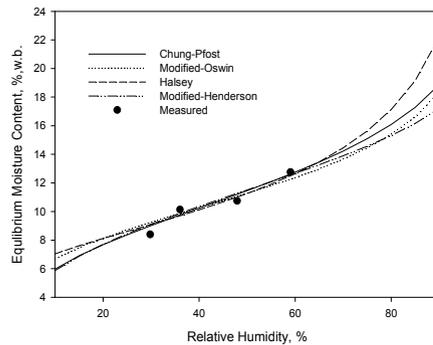


Fig. 4. Comparison of measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content using 4-equations for temperature 40℃

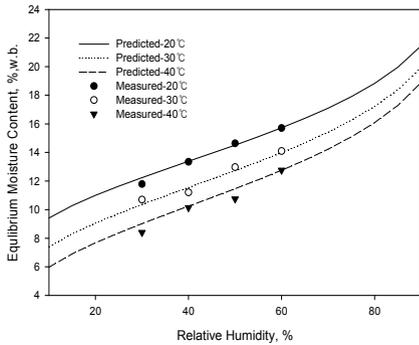


Fig. 5. Comparison of measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content using Chung-Pfost equation for IRG seeds.

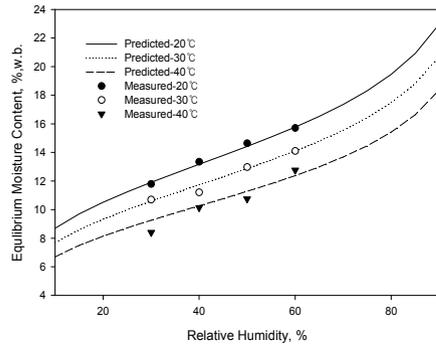


Fig. 8. Comparison of measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content using Modified-Oswin for IRG seeds.

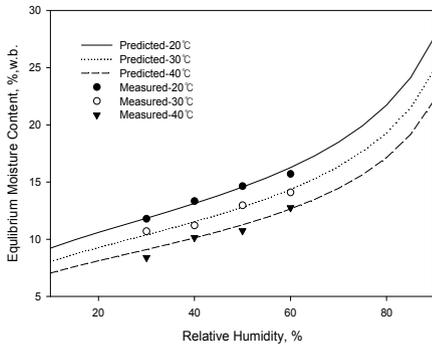


Fig. 6. Comparison of measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content using Halsey equation for IRG seeds.

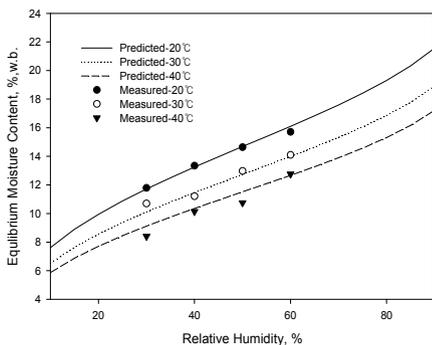


Fig. 7. Comparison of measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content using Modified-Henderson for IRG seeds.

Fig. 5~8은 4개의 모델별 측정값과 예측값의 비교한 것이며, Chung-Pfost 모델의 상대습도가 낮은 30%이하에서는 측정값과 예측값이 차이가 높게 나타났다. Halsey 및 Modified-Henderson 모델의 경우 상대습도 50%이상 건조온도가 고온일수록 예측값과의 차이가 크게 나타났으며, Modified-Oswin 모델의 경우 Halsey 및 Modified-Henderson 모델과 비슷하게 상대습도가 높을 때 차이가 다른 모델 건조온도 및 상대습도 변화 보다 예측값과 잘 일치하였다.

4. 결론

국내에서 채종된 IRG종자 건조에 외기조건 중 건조온도 및 상대습도의 적정 건조조건을 찾기 위한 방습평형 함수를 모델을 구하기 위하여 연구하였다.

1. 평형함수를 측정방법 중 등적 측정방법을 이용하여 건조온도 3수준(20, 30, 40°C) 및 상대습도 4수준(30, 40, 50, 60%)에 따른 평형함수를 측정하고 4개의 예측 모델을 결정하고 모델의 적합성을 검증하였다.
2. 측정된 방습평형함수들은 건조온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 낮게 나타으며, 건조온도 변화보다 습도의 변화에 따라 평형함수 값이 큰 차이가 나타났다.
3. Chung-Pfost 모델은 상대습도가 낮은 30%이하에서 측정값과 예측값이 차이가 크게 나타났으며, Halsey 및 Modified-Henderson 모델은 상대습

도 50%이상에서 건조온도가 고온일수록 예측값과의 차이가 크게 나타났다.

4. 국내에서 채종된 IRG종자 건조할 때 적절한 건조 조건을 찾기 위한 방습평형함수율 예측 모델은 Modified- Oswin 모델이 적합한 것으로 나타났다.

References

[1] Rural Development Administration[Internet]: Wanju: National Institute of Animal Science, 2011.

[2] C. H. Kang, I. S. Lee, S. J. Kwon, "Identification of Ideal Seed Harvest Time for Italian Ryegrass (IRG) 'Kowinearly'" Korean Journal of Crop Science, Vol. 65 No. 2, pp. 142-150, 2020.
DOI : <http://dx.doi.org/10.7740/kjcs.2020.65.2.142>

[3] B. G. Kim, J. G. Lim, A. Y. Lee, Y. W. Seo, "Physical properties of Italian ryegrass seeds immediately after harvest" *Proceedings of the KSAM & ARCS 2020 Spring Conference*, Vol. 26, No. 1, pp. 158-158, 2020.

[4] H. J. Lee, J. E. Byeon, S. G. Hwang, J. W. Ryoo, "Change of Dry Matter Yield and Feed Values According to Different Growth Stages of Italian Ryegrass and Triticale Cultivated in the Central Northern Region" Journal of the Korean Society of Grassland and Forage Science, Vol. 40, No. 1, pp. 50-56, 2020.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5333/KGFS.2020.40.1.50>

[5] American Society of Agricultural and Biological Engineers Stadar 2016, "Moisture Measurement-Unground Grain and Seeds" S352.2.

[6] Y. H. Kim, J. W. Han, D. H. Keum, "Desorption EMC Models for Rapeseed" Journal of Biosystems Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 403-407, 2007.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5307/JBE.2007.32.6.403>

[7] D. H. Keum, "Post-harvest process engineering", p948, CIR, 2008, pp.173-177.

[8] B. M. Choi, "EMC/ERH of rough rice and brown rice" Journal of Biosystems Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 95-101, 2005.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5307/JBE.2005.30.2.095>

[9] D. H. Keum, H. Kim, Y. G. Cho, "Desorption Equilibrium Moisture Content of Rough Rice, Brown Rice, White Rice and Rice Hull" Journal of Biosystems Engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 47-54, 2000.

[10] D. H. Keum, H. Kim, "Adsorption Equilibrium Moisture Content of Rough Rice, Brown Rice, White Rice and Rice Hull" Journal of Biosystems Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 57-66, 2001.

[11] D. W. Sun, C. Byrne, "Selection of EMC/ERH isotherm equations for rapeseed" Journal of Agriculture Engineering Research, Vol. 69, pp. 307-315, 1998.

DOI : <http://dx.doi.org/10.1006/jaer.1997.0249>

- [12] L. Greenspan, "Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions" Journal of Research National Bureau of Standards, Vol. 81, No. 1, pp. 89-96, 1977.
- [13] J. W. Han, H. Kim, W. Kim, H. J. Lee, "Empirical study of high quality solar salt production system" Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol. 21, No. 9, pp. 128-133, 2020.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.9.128>
- [14] H. Kim H, J. W. Han, "Performance Evaluation of Rough Rice Low Temperature Drying Using Heat Pump" Food Engineering Progress, Vol. 13, No. 4, pp. 308-313, 2009.

김 훈(Hoon Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 성균관대학교 농업 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (공학박사)
- 2000년 4월 ~ 2003년 3월 : 성균관대학교 전임연구원
- 2010년 4월 ~ 현재 : 한국식품연구원 책임연구원

<관심분야>

식품 및 농산가공

이 효 재(Hyo-Jai Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : 성균관대학교 대학원 바이오메카트로닉스학과 (공학석사)
- 2013년 8월 : 충북대학교 대학원 바이오시스템공학과 (공학박사)
- 2020년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 생물산업공학부 (연구교수)

<관심분야>

스마트팜, ICT 융합기술, 농식품 가공시스템

한 재 웅(Jae-Woong Han)

[정회원]



- 2003년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스학과 (공학박사)
- 2007년 9월 ~ 2010년 2월 : 성균관대학교 연구조교수
- 2010년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 스마트팜공학과 교수

〈관심분야〉

바이오공정공학, 바이오에너지