바이오시스템공학 (*J. of Biosystems Eng.*)
Vol. 34, No. 5, pp. 371~376 (2009. 10)

농식품 시료 전처리를 위한 마이크로웨이브 분해기용 온도 제어장치 개발

모창연 김기영 김학진 김용훈 양길모 이강진

Development of a Temperature Controller for Microwave-assisted Digestion System for Agricultural Samples

C. Y. Mo G. Kim H. J. Kim Y. H. Kim K. M. Yang K. J. Lee

Abstract

Microwave digestion is a preferred pretreatment method for agricultural samples because of its quick chemical reaction and minimum loss of analytes. In this research, a feedback temperature controller was developed to control the temperature inside a vessel for the microwave-assisted digestion system. An existing industrial microwave oven was fitted with the temperature controller for controlling inside temperature of the vessel. Four control methods, On/Off, proportional (P), proportional integral (PI), and proportional integral derivative (PID) were used and compared. Experimental results showed that PID control produced best temperature control performance. The PID controller could maintain the temperature of water sample and rice sample in the digestion system with error range of -2.5 ~ 3.3℃ and -1.9 ~ 0.5℃ at set temperature of 170℃, respectively.

Keywords : Heavy metal, Microwave-assisted digestion, Temperature controller, PID control

1. 서 론

국민소득 증가로 인한 생활수준 향상 및 먹거리에 대한 인식 변화로 소비자의 고품질·안전 농산물에 대한 수요가 크게 증가하고 있다. 이에 따라, 중금속이나 잔류농약과 같은 유해물질의 오염을 사전에 방지하여 소비자에게 안전한 농식품을 공급하기 위한 노력이 계속되고 있다. 여러 가지 식품 유해물질 중 카드뮴, 납 등의 중금속은 높은 독성으로 인하여 인체에 축적될 경우 다양한 질병을 일으키거나 건강을 크게 해칠 수 있다. 이들 중금속은 농작물 재배 지역의 토양, 취출수 등에 과다하게 존재하는 경우 농산물에 축적될 가능성이 커진다(Jung, 2001).

중금속에 오염된 농산물의 유통을 사전에 예방하여 소비자에게 안전한 농식품을 공급하기 위해서는 최신 센서기술을 이용한 식중독균 신속검출(Kim and Choi., 2006)이나 농약 신속검출(Kim et al., 2009)과 같은 중금속 오염 여부를 신속하게 측정할 수 있는 기술이 필요하다. 농산물의 중금속 오염 분석은 대부분 실험실에서 이루어지며, 농산물에 존재하는 유기물을 분해하는 복잡한 전처리과정과 고가의 분석장비 사용으로 인하여 많은 비용과 시간이 소요된다(Kim et al., 2008). 중금속 분석을 위해 소요되는 시간의 대부분은 농산물을 구성하는 유기물을 분해하는 전처리과정이며, 이러한 전처리 시간을 줄일 수 있는 마이크로웨이브 오븐을 이용한 분해법이 관심을 받고 있다(Nóbrega et al., 2007).

마이크로웨이브 분해 방법은 빠른 가열, 높은 처리량, 적은 시약 소비 등 다양한 장점을 지니고 있어, 환경, 생물, 농산물 등과 같은 여러 분야의 시료 전처리를 위해 많이 사용되어져 왔다(Ko and Chen, 2001). 마이크로웨이브 분해 방법은 주로 밀폐된 용기에 시료와 용매를 넣고 시료를 용해하기 때문에 분석 대상물의 손실이 거의 없어 중금속과 같은 미량의

The article was submitted for publication on 2009-08-28, reviewed on 2009-09-24, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2009-10-12. The authors are Chang Yeon Mo, Junior Researcher, Giyoung Kim, Senior Researcher, KSAM Member, Yong Hun Kim, Junior Researcher, Gil-Mo Yang, Junior Researcher, Kang Jin Lee, Senior Researcher, National Academy of Agricultural Science, RDA, and Hak Jin Kim, Assistant Professor, Department of Bio-Industrial Machinery Engineering, Pusan National University. Corresponding author: G. Y. Kim, Senior Researcher, National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, 441-100, Korea; Fax: +82-31-290-1900; E-mail: <giyoung@korea.kr>.

분석 대상물을 처리하는데 유용하다. 유기물 분해 효율은 분해에 필요한 시약의 양이 많고, 시간이 길고, 온도가 높으면 증가하지만 용기내의 과도한 온도 상승과 불필요한 전력 소모 등의 문제로 인해 시료의 종류에 따른 적정한 온도와 반응 시간을 적용해 주는 것이 바람직하다. 시료의 분해 효율을 효과적으로 높이기 위해서는 분해용기 내부의 온도를 미리 설정된 값으로 조절해 주어야 하나, 상용의 마이크로웨이브 오븐은 몇 단계로 정해진 전력량에 따른 마이크로웨이브파의 강약 조절 기능 만이 있을 뿐 오븐 내부의 온도 조절 기능은 없어 이를 이용한 시료 분해에는 제약이 따른다.

마이크로웨이브 오븐의 온도 제어 장치는 주로 생물 시료의 건조를 위한 목적으로 개발되어져 왔다 (Li et al., 2009; Cheng et al., 2006; Li et al., 2006). 건조 이외에도 Huang and Sites(2007)는 쇠고기 소시지의 저온살균을 위해 마이크로웨이브 오븐의 온도 제어시스템을 개발하였고, Virtanen 등(1997)은 냉동식품의 해동을 위한 마이크로웨이브 오븐의 온도 제어시스템을 개발한 바 있다. Huang and Sites(2007)가 개발한 마이크로웨이브는 PID 제어방법을 사용하여 설정온도에서 ±1.7℃의 오차범위로 시료온도를 제어할 수 있었다. 마이크로웨이브 오븐을 이용한 유기물 시료의 분해에는 건조, 해동, 살균에서 보다 높은 설정 온도와 빠른 응답속도가 요구되기 때문에 보다 정밀한 온도제어가 필요하며, 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 온도 제어장치의 개발이 필요하다.

본 연구는 농산물에 함유된 중금속 신속 검출에 필요한 마이크로웨이브 유기물 분해기의 온도 제어장치를 개발하기 위하여 수행되었으며, 분해용기 내부의 온도제어 실험을 통하여 개발된 온도 제어장치의 성능을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

가. 마이크로웨이브 유기물 분해 장치

마이크로웨이브 유기물 분해장치는 2.4 GHz의 마이크로파를 발생시키는 1.2 kW 산업용 마이크로웨이브 오븐(TMW1100EK, Daewoo Electronics, Korea)을 이용하여 제작하였다. 마이크로웨이브 분해장치는 마이크로웨이브를 발생시키는 마이크로웨이브 오븐, 밀폐된 상태에서 고온-고압 환경을 제공하는 시료 분해용기, 분해용기 내의 온도를 측정하는 온도센서, 마이크로웨이브 전력을 조절하여 분해용기 내의 온도를 일정하게 유지하는 온도제어기, 그리고 측정된 온도 데이터를 수집하는 데이터 수집장치로 구성된다. 시료 분해용기는 테프론 재질로 만들어져 최대온도 200℃, 최고압력 300psi까지 견딜 수 있는 밀폐용기(Q45 vessel, Questron Technologies, Mississauga, Ontario, Canada) 상부에 온도센서를 장착할 수 있는 장착부를 설치하여 제작하였다. 시료 분해용기 내부에 설치되는 온도센서로는 1300℃까지 잴 수 있는 K-type의 열전쌍(Mega Science, Seoul, Korea)을 이용하였으며, 열전쌍의 센싱부분이 용기 바닥으로부터 0.5 cm 높이의 시료 중앙부에 담긴 상태로 온도 측정이 되도록 설치하였다. 시료와 시료주위 온도차에 의한 열전쌍의 열전달로 발생하는 온도 측정오차를 줄이기 위해, 열전쌍 설치부분은 단열재를 사용하며 설치부분과 측정대상의 온도차를 가능한 작게 하였다. 온도제어기는 PID 제어를 할 수 있는 온도 제어모듈(TZN4M, Autonics, Yangsan Korea)을 이용하였으며, 온도 센서의 전기적인 신호를 받아 설정 온도와 비교한 다음 마이크로웨이브 발생 장치의 전력을 조절하는 방식으로 시료 분해용기 내의 온도를 제어하였다. 온도 제어모듈은 비례제어시 설정치에 대한 비례대역을 가지며, 비례대역 내에서 설정치와 현재 온도의 편차에 비례하는 조작량을 출력하는 방식으로 동작한다. 또한, 온도 센서로 측정된 시료 분해용기 내부의 온도는 AD보드(cDAQ9172-NI9211, National Instrument Inc., Austin, TX, USA)와 측정 소프트웨어(Labview 8.2, National Instruments Inc., Austin, TX, USA)를 이용하여 컴퓨터로 저장된 다음, 추후 분석에 이용되었다. 그림 1에 마이크로웨이브 유기물 분해장치의 구성도를 나타내었다.

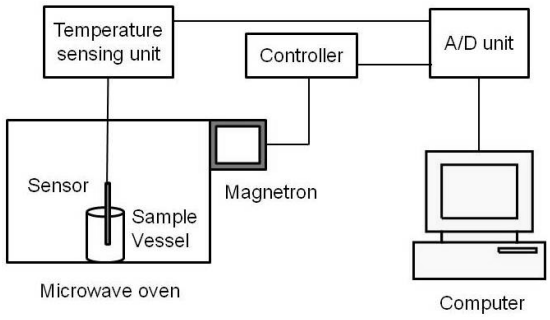

Fig. 1 Schematic diagram of a microwave temperature controller.

나. 시험 방법

유기물 분해기용 온도 제어장치의 성능시험은 마이크로웨이브 오븐에 증류수 10 mL가 들어있는 상용 유기물 분해용기를 넣고 오븐을 작동시킨 후 분해용기 내부의 온도를 측정하는 방식으로 수행하였다. 분해용기 내부 설정온도는 중금속 추출을 위한 EPA(Environmental protection agency, Washington, DC, USA) 3051 방법을 수정한 Nóbrega 등(2007)의 방법에 따라 170℃로 정하였다. 설정온도에 도달하는 시간은 시료 분해용기 내의 급격한 압력상승을 억제하면서 안전하게 온도가 상승할 수 있도록 2분 내외로 정하였다. 또한, 유기물에서 중금속이 충분히 추출될 수 있도록 설정온도에 도달한 다음 10분 이상 그 온도를 유지하였다.

온도 제어장치의 제어는 On/Off 제어, 비례제어, 비례적분제어, PID 제어의 네 가지 방법을 사용하여 수행한 뒤, 각 방

법을 사용했을 때 설정온도와 측정온도 사이의 오차를 계산하여 성능을 분석하였다.

다. 제어변수

온도 제어장치를 이용한 비례제어, 비례적분제어, PID 제어 시 제어변수는 Ziegler-Nichols의 주파수 응답 방법(Vaishnav and Khan, 2007)을 이용하여 정하였다. 그 과정을 간략히 살펴보면, 우선 적분 및 미분 제어에 관련된 변수를 0으로 설정하고 비례제어 변수만을 서서히 변화시켜 온도가 일정한 진폭으로 연속적으로 진동하는 값 K_u를 찾는다. 이때의 진동주기를 T_u라 하면, 비례제어 변수 K_u와 주기 T_u를 이용하여 표 1과 같이 각 제어방법에 따른 제어변수를 구할 수 있다.

Table 1 Controller parameters determined by Ziegler-Nichols frequency based method

Control method	Gain	Reset	Derivative
P	$0.5\times K_u$	-	-
PI	$0.45\times K_u$	$0.8\times T_u$	-
PID	$0.6\times K_u$	$0.5\times T_u$	$0.125\times T_u$

라. 시료량에 따른 온도 반응 특성

분석 효율을 높이기 위해서는 많은 양의 시료를 한번에 처리하는 것이 바람직하다. 하지만, 너무 많은 양의 시료를 처리할 경우, 분해용기 내부의 증기압이 증가하여 용기가 파열될 가능성이 있다. 처리 가능한 시료량을 구명하기 위하여 용기 제조업체에서 제시한 최대 시료량 이내에서 시료량을 변화시켜 가면서 온도 제어 실험을 수행하였다. 시료량은 10, 20, 30 mL로 하였으며, 제어방법 및 제어변수는 위의 실험방법에 따라 구명된 최적의 방법 및 변수들을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. On/Off 온도 제어

온도 제어장치의 성능을 조사하기 위하여, 마이크로웨이브 오븐의 최대 전력량을 오븐의 수동 설정 가능값인 400 W, 800 W, 1200 W의 3단계로 조절한 다음 각각에 대해 On/Off 온도제어를 수행하였다. 최대 전력량에 따른 On/Off 온도제어의 반응 곡선은 그림 2와 같다. 최대 전력량 400 및 800 W에서는 마이크로웨이브의 세기가 충분치 않아 설정온도인 170℃에 도달하지 못하였다. 최대 전력량이 400 W 일 때 분해용기 내부의 최고온도는 94.7℃, 800 W 일 때 분해용기 내부 최고온도는 152.7℃였다. 최대 전력량 1200 W 일 때 설정온도인 170℃에 도달하는데 걸린 시간은 1분 37초로 온도 상승속도는 90℃/min 였으며, 오차 범위는 -1.8～18.7℃로 크게 나타났다. 설정온도에 도달할 수 있는 충분한 전력을 공급하기 위하여 이후 실험에서는 최대 전력량을 1200 W로 설정하여 실험을 수행하였다.

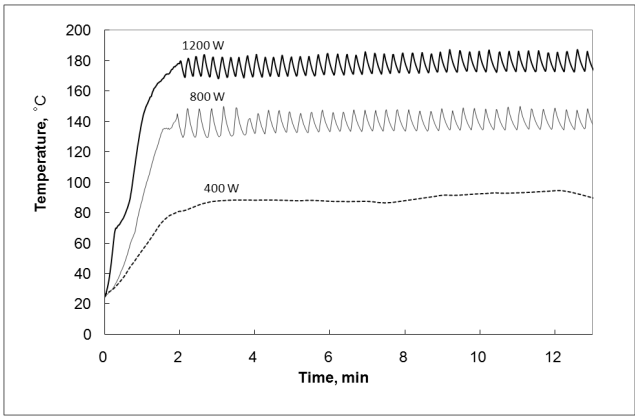

Fig. 2 Time-temperature relationship of a water sample in a microwave-assisted digestion system operated by On/Off control mode.

나. 비례 온도 제어

온도 제어장치의 적정 제어변수를 찾기 위하여 Ziegler-Nichols의 주파수 응답 방법에 따라, 비례제어 만을 수행하면서 온도가 일정한 진폭으로 설정값 근처에서 연속적으로 진동하는 임계비례상수 K_u를 구하였다. 비례상수를 조금씩 변화시키면서 실험적으로 찾은 K_u의 값은 3.5 였다. 그림 3에 나타난 바와 같이 비례상수 3.5에서 분해용기 내부의 온도는 설정값 170℃ 근방에서 평균 진폭 3.2℃로 진동하였다. 이때의 온도 진동주기 T_u는 16초로서 이 값을 이용하여 PID 온도 제어에 필요한 적정 제어변수들을 구하였다.

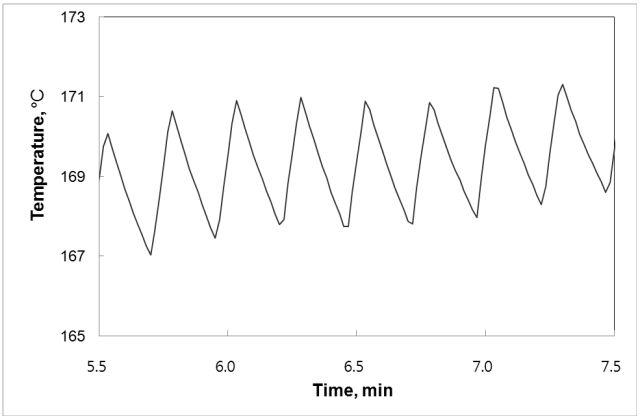

Fig. 3 Time-temperature relationship of a water sample in a microwave-assisted digestion system operated by proportional control. (P = 3.5.)

Ziegler-Nichols의 주파수 응답 방법에 따라 계산된 비례상수는 1.8 였으며, 이 값과 다른 비례상수를 이용하여 비례제어를 수행했을 때의 온도 반응 곡선을 그림 4에 나타내었다. 비례제어 방법에서는 시료가 과열되지 않으면서도 설정온도에 빠르게 도달시키기 위해, 제어기는 초기에 설정된 오븐의 최대출력으로 작동하다가 온도가 비례대역에 도달하면 설정온도와의 차이에 비례하여 출력을 감소시킨다. 비례대역은 비례상수에 따라 변하며, 비례상수가 크면 보다 일찍 제어기를 작동시킨다. 비례상수(P)가 5일 때에는 20분이 되도록 설정온도인 170℃에 다다르지 못했으며, 비례상수 3.5에서는 용기 내부 온도가 설정온도인 170℃에 이른 후에도 계속해서 증가하는 경향을 보였다(그림 4). 이론적인 최적 비례상수인 1.8로 비례제어를 수행했을 때 설정온도인 170℃에 도달하는데 걸린 시간은 3분 17초로 온도 상승속도는 43.3℃/min 였으며, 오차 범위는 -3.5～6.6℃로 On/Off 제어 방법에 비해 크게 줄어들었다.

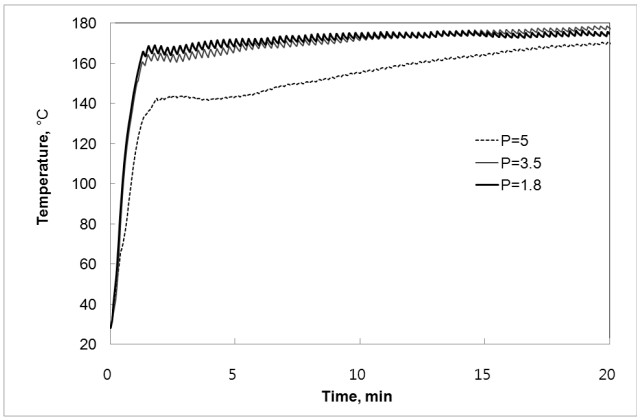

Fig. 4 Time-temperature relationship of a water sample in a microwave-assisted digestion system operated by proportional control with different P values.

다. 비례적분 온도 제어

비례제어 시에 발생하는 오프셋(offset)을 줄여주는 비례적분을 위한 최적 제어변수는 표 1에 따라 P와 I가 각각 1.6과 13으로 구해졌다. 이 값들을 이용하여 비례적분제어를 수행하였을 때의 온도 특성 곡선은 그림 5와 같다. 그림에서 보듯이 설정온도에 도달한 시간은 3분 6초로 빨라졌으나, 과도응답이 발생하였고 제어 온도가 안정될 때까지의 시간은 1분 17초로 비교적 많이 소요되었다. 비례적분제어에 따른 오차 범위는 -3.3～3.3℃로 비례제어에 비해 36% 정도 줄어들었다.

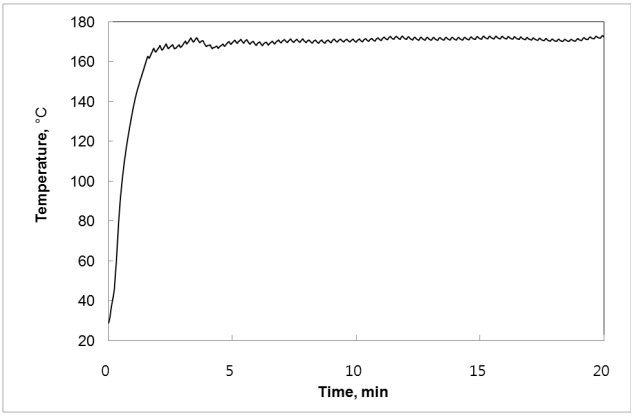

Fig. 5 Time-temperature relationship of a water sample in a microwave-assisted digestion system operated by proportional integral control mode.

라. PID 온도 제어

비례제어 만을 사용하여 구한 K_u와 T_u를 이용하여 Ziegler-Nichols의 주파수 응답 방법에 따라 계산한 비례상수, 적분상수, 미분상수는 각각 2.1, 8, 2였으며, 이들 제어변수를 바탕으로 한 PID 온도제어 특성 곡선은 그림 6과 같다.

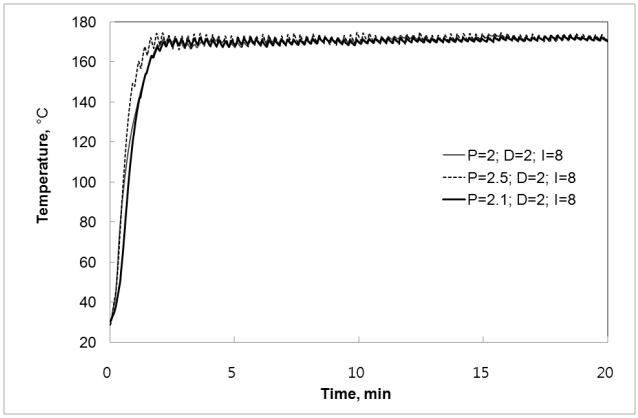

Fig. 6 Time-temperature relationship of a water sample in a microwave-assisted digestion system operated by PID control mode with different P values.

PID 제어 방법을 사용했을 때 설정온도인 170℃에 도달하는데 걸린 시간은 2분 9초로 온도 상승속도는 65℃/min 였으며, 오차 범위는 -2.4～3.3℃로 비례적분제어에 비해 줄어들었다. PID제어의 경우 온도 진동 범위가 표준편차 1.1℃로 비례적분제어 1.2℃보다 적은 오차 범위 내에서 제어되었다.

온도 제어 성능을 향상시키고자, 비례상수를 조금씩 조정하여 PID 제어를 수행한 결과 비례상수 2.0과 2.5에 대해 오차 범위가 각각 -3.3～4.1과 -6.7～4.8℃로 이론적인 비례상

수를 이용한 제어에 비해 온도 변동 폭이 크게 나타났다. 그림 6을 보면, 최적의 제어변수를 사용한 가장 제어 성능이 좋은 경우에도 작은 진폭으로 온도가 계속하여 변하는 것을 볼 수 있는데, 이는 마이크로웨이브 오븐의 작동 특성 때문인 것으로 판단된다. 마이크로웨이브 오븐은 전력이 공급된 다음에도 마그네트론의 필라멘트를 충분히 예열해 주어야만 마이크로파를 방사할 수 있으며, 수 초에 이르는 이 지연시간으로 인해 보다 정밀한 온도제어가 어려웠던 것으로 보인다.

마. 시료량에 따른 제어성능

시료량에 따른 온도 제어 특성을 구명하고자, 분해용기 내에 증류수를 각각 10, 20, 30 mL씩 넣은 다음 온도제어 실험을 수행하였다(그림 7). 그림 7에서 보듯이 시료량이 증가할수록 온도 제어 성능은 떨어지는 것으로 나타났다. 설정온도에 대한 오차 범위는 20 mL와 30 mL 각각에 대해 -11.3～4.3℃와 -10.4～4.4℃로 증가하였다. 시료량 20 mL일 경우 초기의 오버슈트 이후에 진동이 줄어들어 8분 이후에 시료량 10 mL의 결과와 유사하게 온도가 제어되었으나, 시료량 30 mL에서는 20분 이후까지 큰 진폭으로 온도가 계속 진동하였다. 시료량 증가에 따라 진폭이 커지는 이유는 시료량의 증가에 따라 열관성이 증가하여 시료의 온도 변화가 마이크로파의 변화에 미처 따라가지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

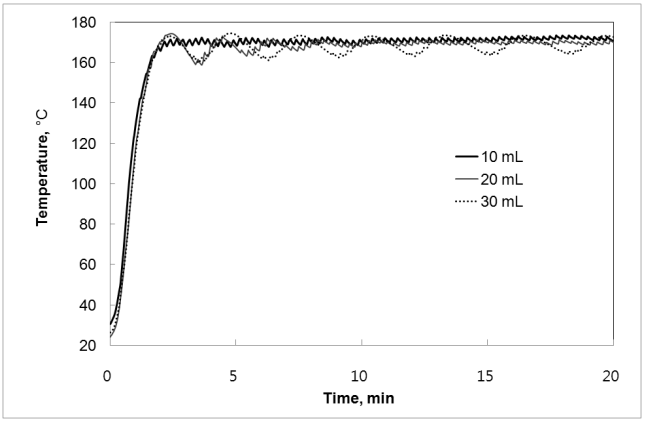

Fig. 7 Time-temperature relationship of different amount of water samples in a microwave-assisted digestion system operated by PID control mode.

바. 농산물 시료의 제어성능

개발된 온도 제어장치의 농산물 시료의 온도 제어성능을 검증하기 위하여, 중금속 검출연구에 사용되는 방법대로 쌀가루와 질산용액의 혼합액 10 mL를 분해용기에 넣고 온도제어 실험을 수행한 결과를 그림 8에 나타내었다. 온도제어는 증류수를 시료로 사용하였을 때 가장 성능이 좋았던 PID 제어방법을 이용하였으며, 이론적으로 계산된 최적의 제어변수를 사용하였다. 쌀 시료의 온도제어 특성은 증류수 20 mL에 대한 온도제어 특성과 유사하게 큰 진폭으로 진동하였다. 오차범위는 4.1℃로 크게 나타났으며, 20분이 경과할 때까지 온도가 일정한 주기로 계속 진동하였다. 보다 안정된 제어를 위하여 적분상수를 각각 10과 12로 조정한 결과, 오차범위를 1.7℃와 0.7℃로 줄일 수 있었다. 적분상수 12의 경우 7분 이후부터는 온도가 안정되어 오차범위가 -1.9～0.5℃로 우수한 제어성능을 나타내었다.

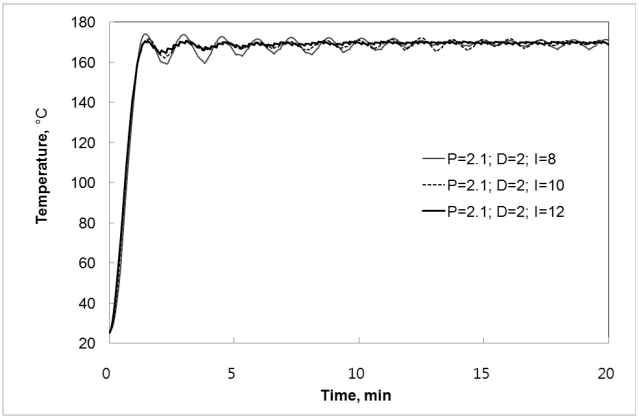

Fig. 8 Time-temperature relationship of rice samples in a microwave-assisted digestion system operated by PID control mode.

4. 요약 및 결론

본 연구는 농산물에 함유된 중금속 신속 검출에 필요한 마이크로웨이브 유기물 분해기의 온도 제어장치를 개발하기 위하여 수행되었다. 개발된 온도 제어장치의 성능은 분해용기 내부의 온도제어 실험을 통하여 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 마이크로웨이브 오븐의 최대 전력량을 400 W, 800 W, 1200 W의 3단계로 조절한 다음 각각에 대해 On/Off 온도제어를 수행한 결과, 분해용기 내부의 온도를 설정값인 170℃로 제어하기 위한 최대 전력량은 1200 W로 조사되었다.

(2) On/Off 제어 방법을 사용하였을 때, 설정온도인 170℃에 도달하는데 걸린 시간은 1분 37초로 빠르게 응답했으나 오차 범위는 -1.8～18.7℃로 크게 나타났다.

(3) 비례 제어만을 수행했을 때 오차 범위는 -3.5～6.6℃, 비례적분 제어 방법에 따른 오차 범위는 -3.3～3.3℃로 On/Off 제어 방법에 비해 크게 줄어들었다.

(4) PID 제어 방법을 사용했을 때 오차 범위는 -2.4～3.3℃로 비례 적분제어의 경우와 같았으나, 비례적분 제어보다 온도 진동범위가 감소되어 보다 가장 안정적인 제어

성능을 나타내었다.

(5) 시료량에 따른 온도 제어 특성을 구명한 결과, 시료량이 증가할수록 온도 제어 성능은 떨어졌으며, 시료량이 10 mL일 때의 제어 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

(6) 쌀 시료에 대한 온도 제어 결과, 적분상수를 12로 변화시켰을 때 제어 성능이 가장 우수하였으며, 제어 장치 작동 후 7분 후부터 오차범위 -1.9～0.5℃로 안정된 제어가 가능하였다.

참 고 문 헌

1. Cheng, W. M., G. S. V. Raghavan, M. Ngadi and N. Wang. 2006. Microwave power control strategies on the drying process I: Development and evaluation of new microwave drying system. Journal of Food Engineering 76:188-194.
2. Huang, L. and J. Sites. 2007. Automatic control of a microwave heating process for in-package pasteurization of beef frankfurters. Journal of Food Engineering 80:226-233.
3. Jung, M. C. 2001. Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. Applied Geochemistry 16(11-12):1369-1375. (In Korean)
4. Kim, E. H., H. K. Cho, K. S. Kyung and G. Kim. 2009. Detection of the fungicide iprovalicarb residues using a surface plasmon resonance biosensor. Journal of Biosystems Engineering 34(1):50-56. (In Korean)
5. Kim, G. and K. H. Choi. 2006. Development of a fiber-optic biosensor for the detection of Listeria monocytogenes. Journal of Biosystems Engineering 31(2):128-134. (In Korean)
6. Kim, H. J., G. Y. Kim, C. Y. Moh and H. K. Cho. 2008. Study on electrode selection for electrochemical detection of cadmium and lead. Journal of Biosystems Engineering 33(6): 404-409. (In Korean)
7. Ko, F. H. and H. L. Chen. 2001. Study of microwave digestion kinetics and establishment of a model for digestion efficiency prediction. Journal of Analytical Atomic Spectrometry 16:1337-1340.
8. Li, Z., G. S. V. Raghavan, J. McGill and V. Orsat. 2009. Optical Temperature and Power Control in Microwave Drying. ASABE Paper No. 090019. ASABE, St. Joseph, MI, USA.
9. Li, Z., N. Wang, G. S. V. Raghavan and W. Cheng. 2006. A microcontroller-based feedback power control system for microwave drying processes. Applied Engineering in Agriculture 22(2):309-314.
10. Nóbrega, J. A., C. C. Nascentes, G. C. L. Araújo, A. R. A. Nogueira and C. Pirola. 2007. High-throughput microwave-assisted digestion and extraction procedures for agricultural materials. Communications in Soil Science and Plant Analysis 38:2333-2345.
11. Vaishnav, S. R. and Z. J. Khan. 2007. Design and performance of PID and fuzzy logic controller with smaller rule set for higher order system. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2007 WCECS 2007, October 24-26, 2007, San Francisco, USA.
12. Virtanen, A. J., D. L. Goedeken and C. H. Tong. 1997. Microwave assisted thawing of model frozen foods using feed-back temperature control and surface cooling. Journal of Food Science 62(1):150-154.