

Comparison of temperature measurements methods to investigate the causes of deformation of packaging materials during microwave heating

Chan Suk Yoon¹, Hwa Shin Lee², Thomas Pfeiffer³, Ah Reum Cho⁴,
Sang Kwon Moon⁴, Keun Taik Lee^{2,5*}

¹R&D team, Agency for Korea National Food Cluster, Iksan 54628, Korea

²Korea Branch Office, Fraunhofer Institute of Process Engineering and Packaging, Gangneung 25440, Korea

³Fraunhofer Institute of Process Engineering and Packaging, Freising 85354, Germany

⁴Packaging Center, CJ Cheiljedang Co., Ltd., Seoul 04560, Korea

⁵Department of Food Processing and Distribution, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 25457, Korea

전자레인지의 가열조리 시 포장재의 열변형 원인 규명을 위한 온도 측정 방법 비교

윤찬석¹ · 이화신² · 토마스파이퍼³ · 조아름⁴ · 문상권⁴ · 이근택^{2,5*}

¹국가식품클러스터지원센터 연구개발팀, ²독일 프라운호퍼 공정공학 및 포장연구소 한국지소,

³독일 프라운호퍼 공정공학 및 포장연구소, ⁴(주)CJ제일제당 패키징센터,

⁵강릉원주대학교 식품가공유통학과

Abstract

To investigate the causes of the thermal deformations of packaging materials when microwave-heating ready-to-eat sauce products packaged in stand-up pouches, patterns of temperature changes were determined using an infra-red thermal imaging camera, a thermo-sensitive tape, and a fiber-optic thermometer. The temperature distributions of spicy chicken sauce and Indian curry samples in a stand-up pouch were found to be uneven during microwave heating. A sharp increase in the temperature was detected, especially above the filling layers and in the corners of sealing layers of the package. The temperature measurements using an infra-red thermal imaging camera are restricted to the surface, and therefore might underestimate the actual temperature. Using a thermo-sensitive tape, temperature up to 200 °C were measured in the spicy chicken sauce sample showing package deformation. When the temperature is measured using a fiber-optic thermometer, it is crucial to have precise sensor performance to accurately measure the temperature in a narrow hot-spot area of the package. In this experiment, the fiber-optic thermometer was attached to a GaAs crystal sensor, which obtained more sensitive and accurate temperature measurements than those by a convectional sensor.

Key words : package deformation, microwave heating, RTE food

서 론

전자레인은 우리나라를 비롯한 선진국들의 경우 약

80% 이상의 높은 가정보급률을 나타내는 보편적인 주방조리기구로서, 식품을 신속하고 간편하게 가공 또는 조리할 수 있는 이점 때문에 가정뿐 아니라 식품산업에서도 다양하게 이용되고 있다(1,2). 그리고 맞벌이 부부 및 1인 가구의 증가와 주 5일 근무제 확산, 그리고 편리함을 추구하는 바쁜 현대인의 식생활 추세에 맞추어 즉석섭취(ready-to-eat, RTE)용 전자레인지 조리 식품류의 소비가 증가할 것으로 예상된다.

전자레인지로 식품을 가열하기 위해서는 포장재와 용기

*Corresponding author. E-mail : leekt@gwnu.ac.kr
Phone : 82-33-640-2333, Fax : 82-33-647-4559
Received 21 July 2015; Revised 3 March 2016; Accepted 26 April 2016.
Copyright © The Korean Society of Food Preservation. All rights reserved.

의 전자파 투과성이 확보되어야 한다. 포장재는 전자파에 대한 성질 차원에서 각각 투과체, 흡수체 및 반사체로 구분되며, 이에 따라 포장된 식품의 가열 특성이 달라진다. 시중에 유통되는 RTE 제품의 포장재에 알루미늄 층이 포함되었을 경우에는 전자파가 투과되지 못하므로 플라스틱, 자기나 유리용기에 들어낸 후 전자레인지로 가열하여야 하는 불편함이 있다. 그러나 현대인들은 조리가 간편하고 취식 후 설거지가 필요 없는 식품 소비 형태를 선호하는 추세이므로 포장된 채로 가열할 수 있는 가공 식품류의 생산이 요구되고 있다. 따라서 전자레인지 포장재는 우선적으로 내열성을 가져야 하고, 식품의 가공, 저장, 유통 및 조리 시 물리적 손상에 어느 정도 저항성을 유지할 수 있어야 하며, 아울러 식품의 이취에 영향을 받지 않으며 위생적이고 미생물학 안전성을 가져야 한다(3,4). 전자레인지 포장재의 구성 예를 들어 보면 기본적으로 트레이 형태는 폴리프로필렌(PP)이나 결정형 폴리에틸렌테레프탈레이트(crystalline PET)이 많이 사용되며, 필름 형태로는 무연신폴리프로필렌(CPP)나 고밀도폴리에틸렌(HDPE)의 봉합층에 유연성과 기체차단성을 부여하기 위하여 나일론(PA)이 사용되고 있다. 그러나 더 높은 기체차단성이 요구되는 경우 에틸렌비닐알코올(EVOH), 폴리비닐리덴클로라이드(PVDC)나 폴리비닐알코올(PVOH) 등의 재질이 중간층으로 사용되거나, 산화알루미늄(Al_2O_3)이나 산화규소(SiO_2)같은 물질이 코팅되기도 한다. 그 외 폴리메틸렌텐(PMP), 폴리페닐렌옥사이드(PPO)나 폴리페닐렌이미드(PEI) 등의 재질이 코팅이나 용기의 형태로 이용되고 있다(3-5).

전자레인지 가열의 단점은 전자파의 가열방식에 따라 식품의 표면에 갈변이나 카라멜화 반응이 일어나지 않고 눅눅한 상태(soggy texture)로 조리되는 것이다(6). 이를 개선하기 위하여 오븐겸용 전자레인지나 microwave susceptor 포장재가 개발되어 이용되고 있으나, 경비의 증가와 조리 가열 상 차이 등 범용적 사용에는 제약을 받고 있는 실정이다(7). 전자레인지 가열의 또 다른 문제점은 열 전달 과분포가 균일하지 않아 식품에서 hot spot이나 cold spot, 또는 run-away 현상 등이 일어남에 따라 조리된 식품의 품질이나 식미감이 저하되거나, 일부 제품류에서는 포장재가 변형되는 문제가 발생된다고 보고되었다(5,8). 이러한 현상은 전자레인지 가열용 RTE 식품의 내용물에 따라 차이가 있지만, 특히 높은 점도와 염분 함량을 갖는 매운 제품류에서 전자레인지 조리 시 전자파의 침투가 원활하지 못하여 발생된다고 보고되고 있다(5,9). 따라서 내용물의 불균일한 가열로 표면에 crust가 형성되고 급격한 과열에 의하여 내용물이 튀어 포장재에 부착된 후 이들이 전자파의 집중 가열로 탄화되어 국소적으로 또는 내용물의 액위선 부위 또는 상단에서 포장재의 열 변형이 관찰되고 있다(5). 이로 인하여 현재 국내외 전자레인지 가열 식품류 중 포장재의 변형이나

탄화가 발생된 일부 카레나 덮밥 소스 제품들은 알루미늄이 포함된 복합재질의 포장재에 충전 후 레토르트로 살균하여 제조되고 있는데, 이러한 제품들은 가열시 별도의 용기에 넣어 내야 하는 불편함이 있다. 또한 이러한 알루미늄이 사용된 포장재는 재활용이 어려워 친환경포장 추세에 역행하고 있을 뿐 아니라 포장재 단가가 약 10%정도 상승하게 되므로 포장 원가 절감을 위해서라도 신기능 내열 포장시스템 개발이 필요한 실정이다. 최근 한류 붐을 타고 전 세계로 우리나라의 전통식품류의 수출이 증가되고 있는 추세이다. 특히 맵고 강한 향신료를 사용하는 우리나라 전통식품류의 시장 확대 및 수출 증대가 이루어지기 위해서는 전자레인지를 이용하여 간편하게 가열 조리될 수 있도록 내열성 포장시스템의 개발이 필요한 실정이다.

그러나 내열성 전자레인지용 식품포장시스템의 개발을 위해서는 전자레인지 가열시 정확한 온도 측정이 선결되어야 한다. 금속 센서가 부착된 thermocouple을 사용할 때는 시료와 thermocouple 사이에 아크나 열이 발생하거나 thermocouple의 작동이 안 되기도 한다고 보고된 바 있다(10,11). 이러한 문제를 해결하기 위하여 van de Voort 등(12)은 니켈을 도금한 구리 선(braid)을 알루미늄 튜브로 감싼 구리니켈 합금 thermocouple을 사용하여 340°C까지 온도를 측정할 수 있었다고 보고하였다. Bureau of Mines에서는 Inconel 702에 갈지 않은 tip을 씌운 type K thermocouple을 사용하였고, 아울러 산화물과 황화물의 온도 측정을 위해 스테인리스 440을 사용한 바 있다. 이러한 thermocouple data의 정확도는 약 2% 이내로 유지되었지만 전자파가 투과하는 시료들에서는 2% 이상의 오차가 발생하는 문제점이 보고되었다(13). 전자파를 조사한 시료의 온도를 전자레인지 전원을 끈 후 바로 뜨거운 상태에서 예열된 thermocouple을 삽입하여 온도를 측정하기도 하는데, 이러한 방법은 온도 측정 상 신뢰도가 낮아지는 단점이 있다(14). 액정이나 종이체의 온도 센서 등이 부착된 테이프나 라벨 형태의 온도계가 사용되기도 한다(15). 그리고 식품에서 매우 특정한 부위의 표면 온도를 측정하거나 식품의 온도 분포도를 확인하기 위해서는 적외선 열화상 온도 측정 장치가 사용되기도 한다(16,17). 그러나 적외선 열화상 카메라 같은 광온계(optical pyrometer)는 조리되는 식품의 표면 온도만 측정이 가능하기 때문에 실제 식품의 내부 온도는 파악하기 어려운 문제점이 있다. 최근에는 MRI(magnetic resonance imaging) 기술을 이용하여 전자레인지 가열시 온도 분포를 3차원으로 mapping하는 기술이 개발되었고, 또한 다양한 소프트웨어를 이용하여 전자레인지 가열시 온도 변화를 실측값과 거의 차이가 없는 simulation 측정 기술들이 활용되기도 하나 각 방법에는 장, 단점이 있는 상황이다(18-20). 또한 본 연구에서와 같이 전자레인지로 포장된 식품에서의 포장재의 온도 변화를 측정 보고한

결과는 거의 찾아보기 어렵다. 전자레인지로 가열 시 포장재의 온도를 측정하는 것은 식품의 온도를 측정하는 것보다 더 어렵고 측정 상 다양한 오류의 소지가 존재할 것으로 추측된다.

따라서 본 연구는 전자레인지 가열에 의한 포장재 변형의 원인과 기작을 규명하기 위한 선결 조건으로서, 전자레인지 가열 시 식품과 포장재의 온도 변화를 열화상 카메라, 광섬유 온도계 및 온도센서 테이프 등을 이용하여 측정함에 있어서 각 측정 방법의 정확성과 문제점을 파악함으로써 안정된 전자레인지 포장시스템 구축을 위한 기술 개발에 활용하고자 수행되었다.

재료 및 방법

재료

포장재의 열변형 패턴과 온도 측정을 위한 공시 시료로서 국내에서 시판되는 전자레인지 가열용 RTE 제품 중 매운 맛 닭 소스, 인도카레 및 자장 소스가 사용되었다. 이러한 제품에 사용된 포장재는 스탠딩 파우치(stand-up pouch) 형태로서 높이 155 mm, 폭 140 mm, 그리고 bottom gusset(BG)이 40 mm의 크기였다. 재질은 G-PET 12 μ m/PET 12 μ m/PET 12 μ m/PP 70 μ m로 구성되었다. 한편 유백색으로 착색된 스탠딩 파우치의 제조 시 약 3%의 이산화티타늄(titanium dioxide, TiO₂)이 첨가되었다.

매운 맛 닭 소스와 인도카레 제품의 내용물은 포장재에 약 160 g 정도 충전되었으며, 정치 시 내용물의 액위선 높이는 약 80 mm이었다. 전자레인지 가열용 외국 시료로서 spicy chorizo & pulled chicken with black bean(Campbell, USA)가 조사되었는데, 이 제품의 포장재는 스탠딩 파우치 형태로서 재질은 PET 12 μ m/PET 12 μ m/PA 15 μ m/PP 70 μ m로 구성되었다.

온도 측정

전자레인지 가열 시 수증기가 배출될 수 있도록 소스 제품의 포장재 오른 쪽 상단에서 약 1 cm 아래 측면 부분을 약 3 cm 가량 자른 후, 제품 포장지에 제시된 조리법에 따라 회전 테이블형 전자레인지(M-M270FP, LG Electronics Inc., Seoul, Korea)를 이용하여 700 W로 2분간 가열하였다. 온도 변화는 적외선 열화상 카메라(TH7102MV, NEC, Tokyo, Japan)를 이용하여 측정하였는데, 이 때 전자레인지 문에 설치된 강화유리로 인하여 적외선이 일부 반사됨에 따라 온도가 낮게 측정되는 경향이 있어 유리를 제거한 후 측정하였다. 한편 전자레인지 가열 후 꺼내지 않은 상태에서 문을 열자마자 식품 시료의 표면온도를 열화상 카메라의 capture 기능을 이용하여 1.5초 간격으로 15초간 측정하

였다. 경과 시간에 따른 측정 온도는 Excel program (Microsoft Office Excel 2007, Microsoft Corp., Washington DC, NW, USA)을 이용하여 변화를 추정하였다. 그리고 온도센서 테이프(Thermo Label 5E, Nichiyu Giken Kogyo Co., Ltd., Kawagoe, Japan)를 포장재 외면에 접촉시킨 후 온도 변화를 측정하였다. 온도센서 테이프 재질의 성분 분석을 위하여 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope) (Inspect F, FEI, Hillsboro, OR, USA)과 에너지분산형 X선 분석장치(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) (TEAMTM, EDAX Inc., Mahwah, USA)를 사용하였다. 분석을 위해 센서 부분을 칼로 끊어낸 입자를 코팅기(Leica EM SCD005, Leica Microsystems, Wetzlar, Germany)를 사용하여 백금(Pt)으로 증착한 후 SEM으로 10 kV의 가속전압 하에서 2,000 배율로 관찰하였고, EDS 분석은 live time 60 sec에서 실시하였다.

TiO₂ 첨가 스탠딩 파우치의 전자레인지 가열시 온도 측정은 다음과 같은 방법으로 이루어졌다. 즉, TiO₂가 첨가되거나 무첨가 스탠딩 파우치(약 160 g)를 각각 전자레인지에 넣었다. 이 때 전자레인지 회전테이블과 내부의 가열된 공기로부터 열이 전달되는 것을 막기 위하여 폴리테트라플루오로에틸렌(PTFE) slab을 시료더미 맨 위와 아래에 끼워 넣었다. 그리고 파우치 중간에 thermocouple 온도계(306 data logger, Conrad Electronics, Hirschau, Germany)를 삽입한 다음 800 W 출력의 전자레인지(RE-C20YW, Samsung Electronics Co., Ltd., Seoul, Korea)로 2분간 가열하면서 온도를 측정하였다.

또한 광섬유 온도계(OSR-8, FISO Technologies Inc., Quebec, Canada)의 probe를 포장재 내 소스의 중앙, 가장자리와 액위선 위치에 꽂고 1,350 W 출력을 갖는 전자레인지(NN-S763WF, Panasonic, Osaka, Japan)에서 2분간 가열하면서 온도 변화를 측정하였다.

한편, 광섬유 온도계의 개선된 측정 방법으로서, 4개의 광섬유 센서(Fotemp TS 5, Optocon AG, Dresden, Germany) 중 T1, T2과 T3는 hot-spot으로 예상되는 액위선 상단 부위의 포장재 내면에 내열성 접착테이프로, 그리고 T4는 cold spot으로 예상되는 중심 부위에 파우치 하단으로 찢어 넣은 후 실리콘-고무 접착제로 고정시켰다. 그 후 출력 800 W의 전자레인지(R-651, Sharp, Osaka, Japan)를 이용하여 2분간 가열하였으며 이 때 온도는 센서 fiber 끝에 GaAs(gallium arsenide) crystal의 광학적 반사/투과도에 따른 온도 차이를 분광분석 방법으로 측정하는 센서(Fotemp TS 5, Optocon AG, Dresden, Germany)가 장착된 다채널 광섬유 온도계(Fotemp MK, Lambda Photometrics Ltd., Batford Mill, UK)로 측정되었다. 이와 같은 crystal sensor tip의 위치와 사이즈 등이 표시된 광섬유 온도 센서는 Fig. 1에 제시된 바와 같다.

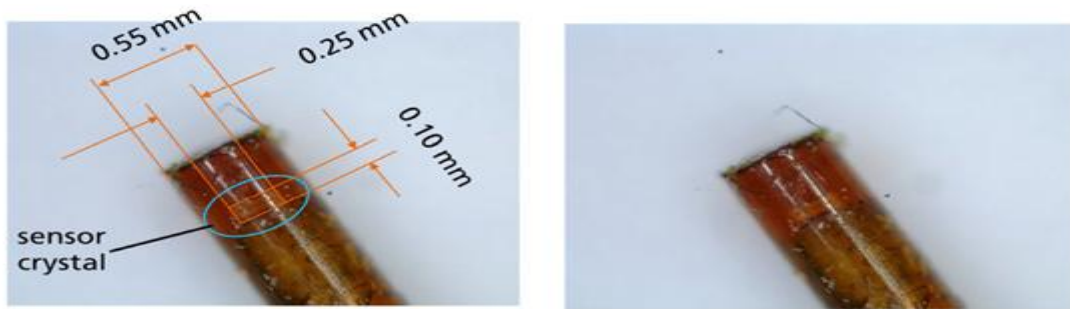


Fig. 1. A fiber-optic temperature sensor (Fotemp TS 5) attached with a GaAs crystal sensor tip with a very small temperature sensitive zone developed by Fraunhofer Institute of Process Engineering and Packaging (IVV).

결과 및 고찰

열화상 카메라를 이용한 온도 측정

Fig. 2와 3에서 보는 바와 같이 스탠딩 파우치에 포장된 매운 맛 닭 소스를 전자레인지로 가열 중 열화상 카메라를

이용하여 point 1~9의 다양한 부위에서의 온도 변화를 측정 한 결과, 포장재 내 headspace 부분의 온도가 가장 먼저 상승하였다. 최종적으로는 밀봉 면 모서리(sealing edge) 부분과 소스 액위선 윗부분의 온도가 가장 높았고, 소스가 담겨있는 중심부의 온도가 가장 천천히 상승하였던 것으로

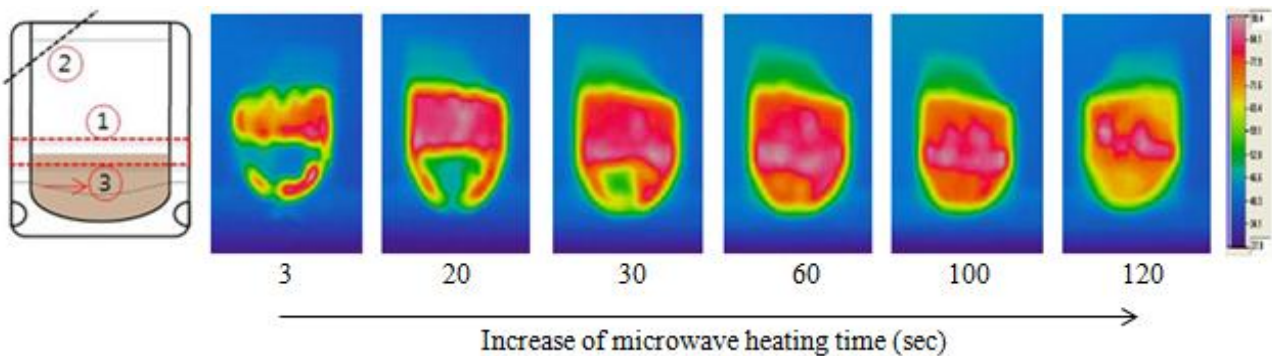


Fig. 2. Changes in the temperature distribution of the Indian curry sample packaged in a stand-up pouch during microwave heating at 700 W for 2 min measured using an infra-red thermal-imaging camera.

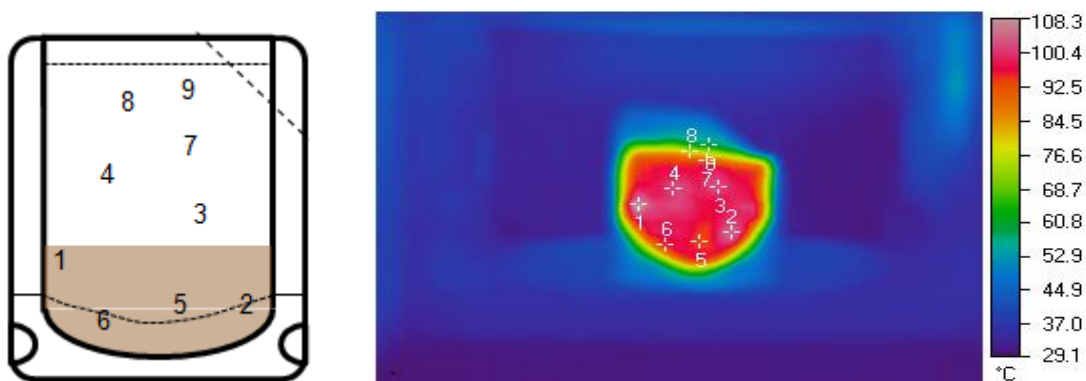


Fig. 3. Temperatures distribution in the spicy chicken sauce sample packaged in a stand-up pouch measured at different spots after 2 min of microwave heating at 700 W using an infra-red thermal imaging camera.

Point	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temp. (°C)	108.2	104.3	101.4	101.0	93.3	94.6	89.4	75.9	59.3

확인되었다. 전자레인지 가열시 포장재의 기하학적 구조와 오븐 cavity내에서의 전자파의 주사 방향에 따라 온도 상승이 영향을 받으며, 특히 포장 내부의 모서리와 구석진 부위에 전자파가 집중됨으로 인해 과열의 개연성이 있다(21). 전자레인지 가열시 식품의 표면 온도는 전자레인지 cavity 내 온도가 전자파가 침투하는 깊이, 즉, 표면에서 수 mm ~ 수 cm 부위보다 상대적으로 낮게 나타날 수 있다. 이와 관련하여 Campanone와 Zaritzki(22)에 따르면 제품의 모양에 따라 hot 또는 cold points가 달라진다고 하였으며, Jeong 등(23)은 햄버거 패티의 경우 중심 부위보다 모서리 부위의 온도가 더 높게 나타난다고 하였다. 즉, 전자레인지 가열시 전자파의 침투 깊이와 식품의 두께나 크기 등이 가열 균일성과 온도 분포에 영향을 미치게 된다. 만약 침투깊이가 시료크기보다 클 경우 식품표면으로부터 내부로 가열열의 편차는 거의 없이 균일한 가열이 일어난다(24). 그러나 반대로 침투 깊이가 식품크기보다 훨씬 작을 경우 가열은 표면에 가까운 부분에 제한됨에 따라 불균일 가열이 일어난다. 따라서 본 실험에서 스탠딩 파우치로 포장된 시료와 같이 아랫면이 넓고 상대적으로 윗면이 좁아지는 포장 형태뿐 아니라 측면 및 하부 실링 면과 같이 각진 모서리 부분이 많은 경우 국소적 hot spot이 일어날 가능성이 상대적으로 높아졌을 것으로 예상된다.

본 실험에서는 전자레인지 가열 후 포장재의 액위선 윗 부분과 소스가 튀는 포장재의 headspace 부분에서 온도가 가장 높았고 열 변형이 주로 발생된 것으로 확인되었는데, 이때 열화상 카메라로 측정된 온도는 최고 90.4°C이었다 (Fig. 2). 한편 매운 맛 닭 소스 제품 및 포장재 부위별 온도를 측정된 결과(Fig. 3), 소스가 담겨져 있지 않은 포장재 headspace 상단 부위인 point 9의 온도가 59.3°C로 가장 낮았고 그 다음으로 point 8의 온도가 75.9°C로 낮게 측정되었다. 이에 반하여 소스의 액위선 상단 부위인 point 1에서 108.2°C로 가장 높았고, 다음으로 point 2에서 104.3°C로 측정되었다. 한편 소스 아래쪽 부위인 point 5와 6의 온도는 각각 93.3과 94.6°C로 액위선 부위보다는 낮게 측정되었다.

한편 조사된 시료에서 포장재의 열 변형이 육안으로 확인되었음에도 불구하고 포장재 실링 면인 CPP 재질의 내열성이 140°C 내외인 점을 감안하면 포장재 부위의 실제 온도가 정확히 측정되지 않은 것으로 추측된다. 전자레인지 가열 시 시료의 온도를 적외선 열화상 카메라로 측정하는 것은 포장시료의 부위별 온도 분포도를 파악하는 용도로는 의의가 있으나 식품 내부의 정확한 실제 온도를 측정하는 데는 문제가 있는 것으로 판단된다. 그리고 열 변형된 포장재 부위가 국소적이고 포장재 내면에 위치하고 있기 때문에 외부로부터 주사되는 적외선 열화상 카메라로 측정하기에는 한계가 있어 실제 온도와 차이를 나타낸 것으로 추측된다(25). 이와 관련하여 Nuechter등(26)은 500 mL의 물을 실온에서 100°C까지 전자레인지로 가열하면서 금속 센서

(MS), IR 센서(IR) 및 광섬유 센서(FO)로 온도 측정을 한 결과 IR이 가장 낮게 측정되었다고 보고하였다. 또한 IR 센서는 표면의 온도를 측정하기 때문에 측정 오차가 큰 것이 단점이라고 보고하였다.

한편 본 실험에 사용된 전자레인지 문에 장착된 철망의 메쉬 사이즈는 약 2.4 mm로서 열화상 카메라에 사용되는 수 μm 파장의 적외선은 철망을 투과할 것으로 판단되었으나, 유리가 있을 경우 열화상 카메라에서 주사된 적외선이 반사되어 온도가 실제보다 낮게 측정되는 경향이 관찰되어 유리를 제거하고 온도를 측정하였다. 그럼에도 불구하고 전자레인지 가열 과정 중 열화상 카메라를 이용한 온도 측정치가 예상보다 다소 낮은 것으로 판단되어 가열이 끝나자마자 전자레인지 문을 열고 열화상 카메라로 측정된 결과, 2분 동안 전자레인지로 가열한 후 1.5초 경과한 시점의 온도는 111.2°C이었으나 15초가 지난 후에는 100.6°C로 하강하였다(Fig. 4). 이 때 매운 맛 닭 소스 제품의 전자레인지 가열 완료 후 경과 시간에 따른 온도 하강식은 $y=0.0618x^2-1.7217x+112.99$ 로 표시되었다. 이 식을 이용할 경우 2분 가열 완료 시점($x=0 \text{ sec}$)의 온도(y °C)는 약 113°C로 추정할 수 있었지만 이러한 방법에 의하여도 실제 포장재의 hot spot 부분의 온도를 정확히 측정하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

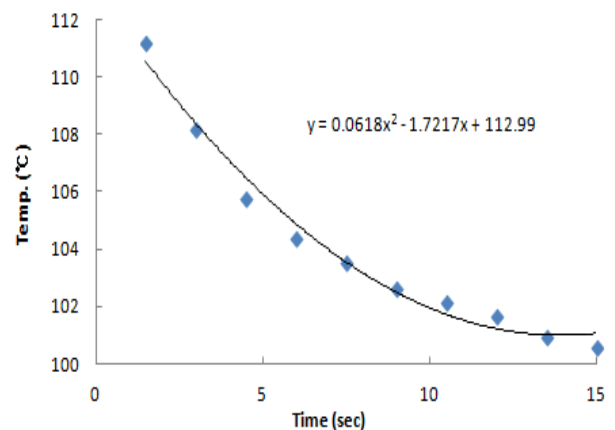


Fig. 4. Temperature changes of a spicy chicken sauce sample packaged in a stand-up pouch after microwave heating at 700 W for 15 sec.

온도센서 테이프를 이용한 온도 측정

접착식 온도센서 테이프를 이용하여 전자레인지 가열시 포장재의 온도 변화를 측정된 결과, 조사된 매운 맛 닭 소스, 인도카레 및 자장 소스 등 3가지 제품 모두에서 최고 200°C 이상의 온도까지 측정되었다(data not shown). 이 중에서 Fig. 5는 상기 3가지 제품 중 열 변형이 가장 많이, 그리고 크게 일어난 매운 맛 닭 소스 제품에 사용된 포장재 내 소스의 액위선 상단의 여러 부위별 온도 측정 결과의 예를

보여 주고 있다. 그리고 우측 그림은 매운 맛 닭 소스 포장재의 열 변형 상태를 보여준다. 이러한 현상은 국내 일부 점도와 염도가 높거나 매운 제품류에서 특히 많이 발견되었는데, 외국 제품의 경우에도 정도가 덜 하지만 일부 발견되었다. 예를 들어 Fig. 6에서 보는 바와 같이 검은 콩을 함유하는

매운 닭고기 스튜 제품(spicy chicken stew with black bean)의 경우 전자레인지 가열시 포장재내 최고 온도는 160°C까지 상승한 것으로 측정되었다.

온도 측정에 사용된 온도센서 테이프의 성분은 제조 회사에서 밝히지 않아 정확히 파악할 수는 없었으나 금속계

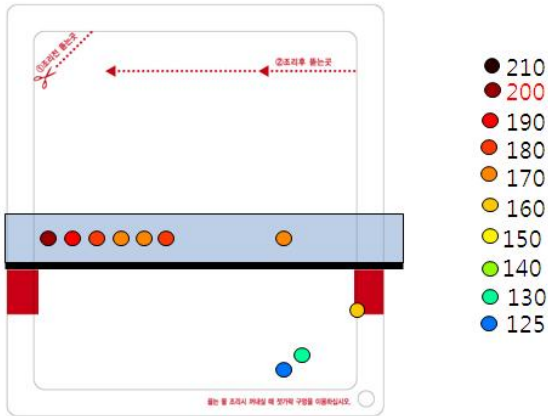


Fig. 5. Temperature measurement using a thermo-sensitive tape (left), and deformation of the package (right) used for a spicy chicken sauce sample after microwave heating at 700 W for 2 min.



Fig. 6. Temperature measurement using a thermo-sensitive tape (left), and deformation of the package (right) used for a spicy chicken stew with black bean sample after microwave heating at 700 W for 2 min.

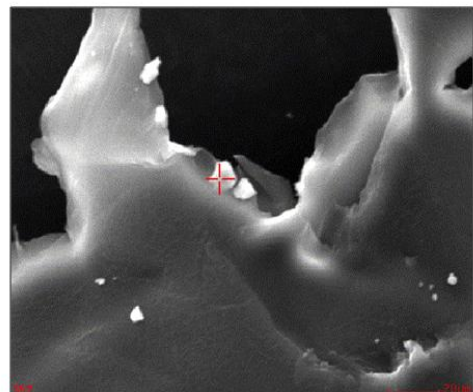
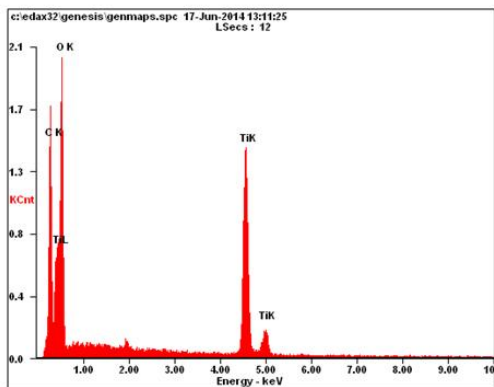


Fig. 7. Composition analysis of the sensor of a thermo-sensitive tape using a scanning electron microscopy (SEM).

Left, EDS chromatogram; right, SEM image.

물질, 염류 또는 색소 성분이 혼합된 것으로 추정된다. 금속류는 전자파를 반사하고 열을 발생시킬 수 있으므로 온도센서 테이프 자체가 부정확한 온도 측정을 야기할 수 있을 것으로 판단되어 아래와 같은 추가 조사를 수행하였다. 온도센서 테이프의 색이 변하는 부위를 칼로 긁어낸 후 SEM으로 측정된 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 티타늄 성분이 검출되었다.

TiO₂는 포장재를 유백색 처리할 때 첨가되는데 온도센서 테이프에 티타늄이 사용된 것으로 보아 일정 부분 측정된 센서의 온도에도 영향을 미쳤을 가능성을 완전히 배제할 수 없었을 것으로 사료되었다. 따라서 티타늄의 온도 상승 효과 여부를 간접적으로 확인하기 위하여 TiO₂가 3% 첨가된 유백색 포장재와 무첨가 포장재를 전자레인지로 각각 2분간 가열 후 최초와 종료 시점의 온도를 비교한 결과는 다음 Table 1과 같았다. 즉, TiO₂ 무첨가 포장재의 경우 최초 22.5°C에서 종료 시점에는 44.1°C로 약 21.6°C 상승한 반면, 무첨가 포장재의 경우에는 최초 23.0°C에서 종료 시점에는 41.6°C로 18.6°C 상승함으로써 TiO₂가 첨가된 포장재의 경우 온도 상승이 약 3°C 정도 높게 이루어진 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 보면 유백색 처리된 포장재의 경우 전자레인지 가열시 무처리 제품보다 온도 상승 효과가 다소 발생될 수 있을 것으로 추측된다. 그러나 본 실험에서와 같이 전자레인지 가열 시 포장재 내면에 내용물이 건조 고화되고 온도가 100°C 이상으로 가열되는 상황에서 온도센서 테이프를 포장재 외면에 부착하였을 경우 실제 포장재 내면의 온도가 얼마나 정확히 측정되었는지 그리고 티타늄이 포장재의 온도 상승에 얼마나 더 직접적으로 기여하였는지에 대한 연구는 추가적으로 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Temperature changes of stand-up pouches depending on the addition of titanium dioxide by microwave heating at 800 W for 2 min

Pouch type	Start temperature (°C)	End temperature (°C)	Δ T (°C)
With 3% TiO ₂	22.5	44.1	21.6
Without TiO ₂	23.0	41.6	18.6

광섬유 온도계를 이용한 온도 측정

열화상 카메라로 측정된 결과를 바탕으로 온도가 높게 상승하는 액위선 상단 부분과 온도 상승이 천천히 이루어지는 소스 중심부에 대하여 광섬유 온도계로 측정하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 FISO sensor가 부착된 광섬유 센서를 열 변형이 주로 발생하는 매운 맛 닭 소스 시료의 포장재 내 액위선 또는 상단 부위에 부착 고정된 후 전자레인지로 2분간 온도를 측정된 결과, 최고 온도는 1번 센서 110.8°C, 2번 센서 124.3°C, 3번 센서 112.7°C, 그리고 4번 센서 120.

4°C로 각각 측정되었다. 광섬유 온도계로 측정된 온도는 열화상 카메라에서보다 높았으며, 가열이 시작된 지 약 30초 동안 온도가 급격히 상승하여 약 2분 후 최고 온도에 도달하였으나 그 이후로는 큰 온도 변화가 일어나지 않았다.

한편, FISO 센서가 부착된 광섬유 온도계로 인도카레의 온도를 측정된 결과(Fig. 9) 포장 내 소스 시료 중심부의 온도(1번)는 다른 부위에 비해 온도가 가장 천천히 상승하여, 2분 동안 최고 88.8°C까지 상승하였다. 이에 반하여 각 부분의 최고 온도는 소스 가장자리 부분(2번)은 114초 후 114.7°C, 소스 액위선 아랫부분(3번)은 118초 후 106.8°C, 소스 액위선 윗부분(4번)은 116초 후 111.6°C까지 상승한 것으로 기록되었다. 소스 중심부의 온도는 가열된 2분간 100°C를 넘지 못했으나, 소스 가장자리 부분(2번)은 전자레인지 가열 15초 만에 100°C에 도달하였으며, 소스 액위선 아랫부분(3번)과 윗부분(4번)은 각각 59초와 38초 후 100°C에 도달하였다. 따라서 전자레인지로 소스를 가열시 포장재 가장자리 부분의 온도가 가장 빨리 상승하고 소스 중심부의 온도가 천천히 상승하여 제품 내 온도 편차가 발생하는 것을 확인하였다.

PP의 내열성은 일반적으로 약 140°C 정도로 알려져 있는데 포장재의 변형이 심하게 일어난 부분의 최고 온도는 약 120°C 정도로 측정되었다. 이와 같이 전자레인지로 가열시 PP의 용융점까지 온도가 상승하지 않았음에도 불구하고 포장재 열 변형이 발생된 것은 FISO 광섬유 온도계를 이용한 측정 시 센서를 포장재에 밀착하여 접촉시키는 것이 용이하지 않아 온도계 센서와 포장재간의 유격으로 인한 온도 편차, 일부 접착테이프에 의한 열 차단, 그리고 소스가 포장재 내면에 비등하여 부착됨에 따라 건조되고 열이 집중되는 현상 감소 등 여러 요인들로 인하여 온도 측정이 부정확하게 이루어진 때문으로 판단된다.

이와 같은 광섬유 온도계로 측정 시 오류 원인을 파악하기 위하여 독일 프라운호퍼 공정공학 및 포장 연구소에서 개발된 Fig. 2와 같이 GaAs crystal이 장착된 Fotemp 센서를 사용하여 인도카레를 전자레인지로 가열 중 온도 변화를 측정된 결과는 Fig. 10과 같다. 이 센서는 온도 감지부위가 0.1 mm로 매우 좁아 전자레인지와 같이 미세한 온도 변화를 민감하게 측정할 수 있었다.

전자레인지를 작동한 후 10초 이내에 제품은 끓기 시작하였는데, 특히 액위선 모서리와 파우치 측면에서 심하게 일어났다. 내용물의 비등은 전자레인지 가열이 중단될 때까지 지속되었는데, 이 과정에서 상당한 수분이 포장재 절단면을 통하여 기화 손실되고 소스의 액위선 표면에서의 crust가 형성됨이 관찰되었다. 전자레인지 가열이 지속되는 동안 소스의 건조로 인하여 내용물의 온도는 100°C 이상으로 상승하기 시작하였고, 20여초 후에는 140°C 가까이 상승하는 부위도 발견되었다.

전자레인지로 매운 맛 닭 소스와 인도카레 제품을 포장한 스탠딩 파우치 제품 내에서 온도가 가장 빨리 상승한 부위와 가장 천천히 상승한 부위에서의 온도를 thermocouple data logger를 이용하여 비교 측정하였다(Table 2). 그 결과 인도카레와 매운 맛 닭 소스 시료들의 액위선에 가까운 측면 모서리 부위에서의 온도 상승률은 22°C/sec와 31°C/sec로서 내용물의 중심 부위에서의 0.15°C/sec와 0.11°C/sec 보다 각각 147배 및 282배 정도 빨리 일어난 것으로 확인되었다.

Datta와 Rakesh(27)도 전자레인지에서 식품을 가열시 위치별로 온도 분포가 상당히 불균일하다는 것을 확인한 바

있다. 전자레인지 가열시 여러 가지 요인에 의하여 식품의 온도가 영향을 받는데, 예를 들면, 식품의 성분, 형태, 유전 특성, 오븐 내 식품의 위치, 회전가열여부 등을 들 수 있다(28-31). 특히 본 실험에 사용된 염류와 점도 농도가 높은 소스류 제품들의 경우 전자파의 침투 깊이가 제한함으로써 스탠딩 파우치같이 폭이 다소 넓은 식품류의 가열 시 열 분포가 불균일해 지는 요인이 발생하고 있다(5,30). 식품 내의 염은 전기장(electrical field)의 상호 작용으로 인해 추가적으로 열을 발생하며, 이 열은 극성 분자의 분자간 마찰과 염에 존재하는 전기전도도의 증가 때문이라고 보고된

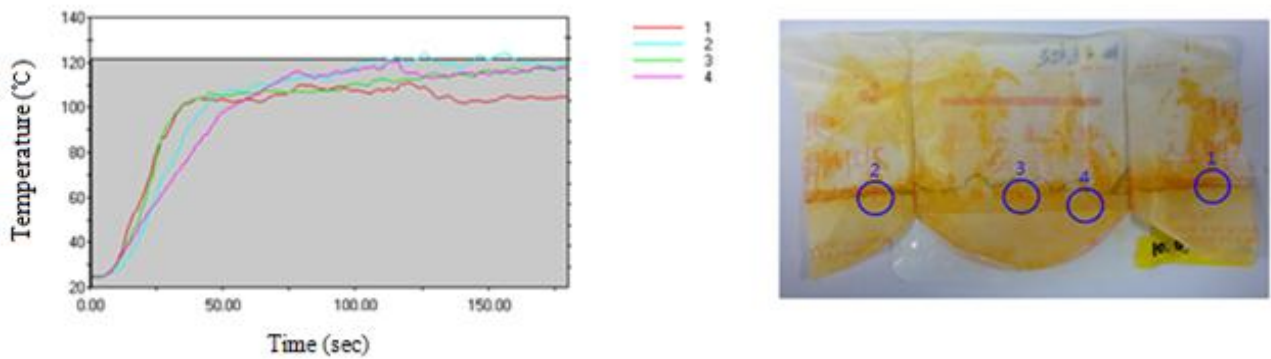


Fig. 8. Changes in the temperature distribution of a spicy chicken sauce sample packaged in a stand-up pouch during microwave heating at 700 W for 3 min measured using a fiber-optic thermometer.

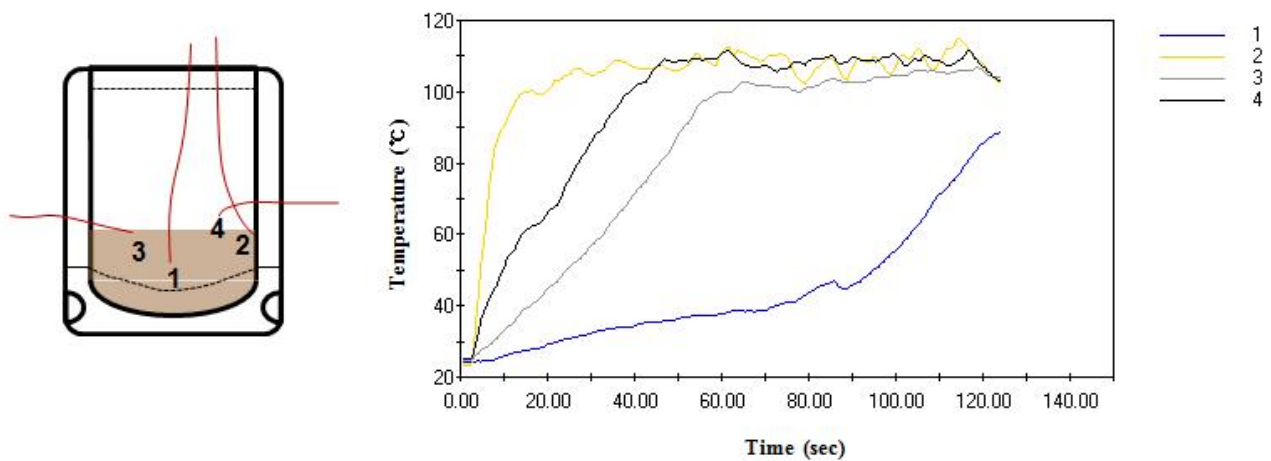


Fig. 9. Temperature change of an Indian curry in a stand-up pouch during microwave heating at 1,350 W for 2 min measured using a fiber-optic thermometer attached with a FISO sensor.

Location of sensor within a pouch; sensor 1 (core of the sauce), 2 (sealing edge), 3 (bottom of liquid level), 4 (top of liquid level).

Table 2. Temperature increase at the starting point of microwave heating near the hot and cold spots in a stand-up pouch measured using a thermocouple data logger

Product	Hot spot (°C/sec)	Cold spot (°C/sec)	Relation
Indian curry	22	0.15	147
Spicy chicken sauce	31	0.11	180

바 있다(9).

한편 본 실험에서 사용된 광섬유 온도 센서 중 FISO 센서의 온도 감지존은 IVV에서 사용된 GaAs crystal Fotemp 센서에서보다 훨씬 넓었다. 측정된 온도는 감지존의 평균 값으로 표시되므로 작은 hot spots의 온도는 FISO 센서에서 측정된 전체 온도 증가치를 나타내지는 못 할 것으로 판단

된다. 따라서 전자레인지 가열 과정 중 식품 및 포장재의 본래 온도는 본 실험에서 측정된 온도보다 더 높았을 것으로 추측된다. 이러한 온도 대에서는 식품 성분의 건조 및 탄화, 그리고 포장재 내면 CPP층의 변형이 충분히 야기될 수 있는 조건이었다고 판단된다.

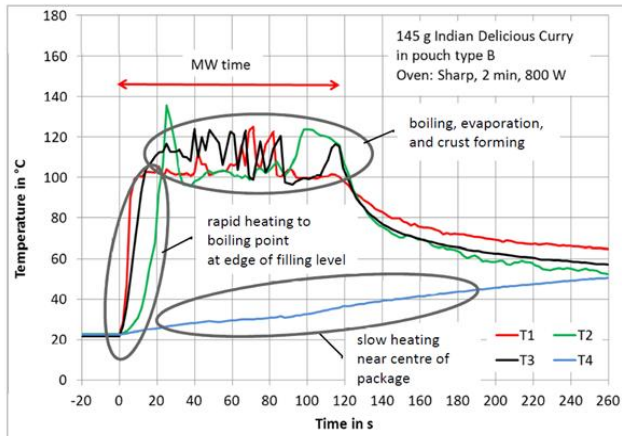


Fig. 10. Temperature measurement in a stand-up pouch filled with an Indian curry sample during microwave heating at 800 W for 2 min measured using a FoTemp fiber-optic thermometer attached with a GaAs crystal sensor.

T1, corner side of the package near the filling level; T2, front side of the packaging film near the edge of the filling surface; T3, front side of the packaging film near the edge of the filling surface; T4, near the core of the filling. The sensor was inserted through a septum at the bottom of the pouch.

요 약

일부 소스류 제품에 사용된 스탠딩 파우치에서 전자레인지 가열조리 시 열변형이 발견되어 이의 원인을 규명하고자 온도 변화 패턴을 조사하였다. 전자레인지로 포장된 식품을 가열 시 포장재의 온도 변화는 식품 자체의 온도보다 높고 국소적인 온도 측정 기술을 요한다. 공시 시료로 매운 맛 닭 소스와 인도카레의 전자레인지 가열 시 포장재와 시료의 온도를 열화상 카메라, 온도센서 테이프 및 광섬유 온도계를 이용하여 측정하였다. 스탠딩 파우치 형태의 포장은 전자레인지 가열 조리 시 내용물의 불균일한 가열이 관찰되어 특정 부위, 특히 액위선 상단과 측면 sealing layer에 열이 집중되는 현상이 발생하였다. 열화상 카메라를 이용한 온도 측정 방법은 식품의 표면 온도를 측정하는 제약이 있고 실제 식품의 온도보다 낮게 측정되는 경향을 보였다. 온도센서 테이프를 이용할 경우 200°C까지 온도까지 측정되어 전자레인지 가열 과정 중 포장재 변형 현상이 야기될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 그리고 전자레인지 가열 시 포장재 표면의 온도 변화를 기존 광섬유 온도계로 측정할 경우 실제 온도보다 낮게 측정되는 결과가 초래되므로, 좁은 범위에서의 hot spot의 온도 변화를 감지

할 수 있는 방법으로 GaAs crystal 센서를 사용함으로써 기존 센서보다 더 민감하고 정확한 온도 측정이 가능하였다.

References

1. Ohlsson T, Bengtsson N (2001) Microwave Technology and Foods. *Adv Food Nutr Res*, 43, 65-140
2. Sumnu G (2001) A review on microwave baking of foods. *Int J Food Sci Technol*, 36, 117-127
3. Schiffmann RF (1997) Microwave Technology; A Half-century of Progress. http://www.foodproductdesign.com/articles/462/462_0597CS.html. Accessed 10. Sept. 2014. *Food Product Design*, 7, 32-56
4. Lee KT (2002) Microwave packaging technology. In: *Encyclopedia of Packaging Technology*, Lee MH et al (Editor), Korea Society of Packaging Science and Technology, Seoul, Korea, p 1069-1082
5. Yoon CS, Hong SI, Cho AR, Lee HS, Park HW, Lee KT (2015) Analysis of the causes of deformation of packaging materials for ready-to-eat foods after microwave heating. *Korean J Food Sci Technol*, 47, 63-69
6. Bell DA, Steinke LW (1991) Evaluating structure and texture effects of methylcellulose gums in microwave baked cakes. *Cereal Foods World*, 36, 941-944
7. Lee DS, Yam KL, Piergiovanni L (2008) Microwavable packaging, In: *Food Packaging Science and Technology*. CRC Press, Boca Raton, USA, p 425-444
8. Chandrasekaran S, Ramanathan S, Basak T (2011) Microwave material processing-A Review. *AIChE J*, 58, 330-363
9. Rozzi NL, Singh RK (2000) The effect of selected salts on the microwave heating of starch solutions. *J Food Proc Preserv*, 24, 265-273
10. Mullin J, Bows J (1993) Temperature measurement during microwave cooking. *Food Addit Contam*, 10, 663-672
11. Kingston HM, Jassie LB (1986) Microwave energy for acid decomposition at elevated temperatures and pressures using biological and botanical samples. *Anal Chem*, 58, 2534-2541
12. van de Voort FR, Laureano M, Smith JP, Raghavan GSV (1987) A practical thermocouple for temperature measurement in microwave ovens. *Can Inst Food Sci Technol J*, 20, 279-284
13. Walkiewicz JW, McGill SL, Moyer LA (1988) Improved grindability of iron ores using microwave energy.

- Materials Research Society Symposium Proceedings, 124, 297-302
14. Haque KE (1999) Microwave energy for mineral treatment processes-a brief review. *Int J Miner Process*, 57, 1-24
 15. Knoerzer K, Regier M, Schubert H (2005) Measuring temperature distributions during microwave processing. In: *The Microwave Processing of Foods*. Schubert H and Regier M (Editor), Woodhead Publishing, Cambridge, UK, p 243-263
 16. Bows J, Joshi K (1992) Infrared imaging feels the heat in microwave ovens. *Physics World*. Institute of Physics Publishing Ltd., Bristol and Philadelphia, p 21-22
 17. Bengtsson NE, Lycke E (1969) Experiments with a heat camera for recording temperature distribution in foods during microwave heating. *J Microwave Power*, 4, 48-54
 18. Knoerzer K, Regier M, Hardy EH, Schuchmann HP, Schubert H (2009) Simultaneous microwave heating and three-dimensional MRI temperature mapping. *Innovative Food Sci and Emerging Technol*, 10, 537-544
 19. Byon C, Choo K, Kim SJ (2011) Experimental and analytical study on chip hot spot temperature. *Int J Heat and Mass Transfer*, 54, 2066-2072
 20. Farag S, Sobhy A, Akyel C, Doucet J, Chaouki J (2012) Temperature profile prediction within selected materials heated by microwaves at 2.45 GHz. *Appl Thermal Eng*, 36, 360-369
 21. Chandrasekaran S, Ramanathan S, Basak T (2013) Microwave food processing—A review. *Food Res Int*, 52, 243-261
 22. Campanone LA, Zaritzky NE (2005) Mathematical analysis of microwave heating process. *J Food Eng*, 69, 359-368
 23. Jeong JY, Lee ES, Choi JH, Choi YS, Yu LH, Lee SK, Lee CH, Kim CJ (2009) Cooking pattern and quality properties of ground pork patties as affected by microwave power levels. *Korean J Food Sci Ani Resour*, 29, 82-90
 24. Datta AK (1990) Heat and mass transfer in the microwave processing of food. *Chemical Eng Prog*, 86, 47-53
 25. Cuccurullo G, Berardi PG, Carfagna R, Pierro V (2002) IR temperature measurements in microwave heating. *Infrared Phys Techn*, 43, 145-150
 26. Nuechter M, Ondruschka B, Bonrath W, Gum A (2004) Microwave assisted synthesis-a critical technology overview. *Green Chem*, 6, 128-141
 27. Datta AK, Rakesh V (2013) Principles of Microwave Combination Heating. *Compr Rev Food Sci F*, 12, 24-39
 28. Geedipalli SSR, Rakesh V, Datta AK (2007) Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. *J Food Eng*, 82, 359-368
 29. James SJ (1993) Factors affecting the microwave heating of chilled foods. *Food Sci Technol Today*, 7, 28-36
 30. Koskiniemi CB, Truong VD, Simunovic J, McFeeters RF (2011) Improvement of heating uniformity in packaged acidified vegetables pasteurized with a 915 MHz continuous microwave system. *J Food Eng*, 105, 149-160
 31. Venkatesh MS, Raghavan GSV (2004) An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosys Eng*, 88, 1-18