

테라헤르츠파 기반 실시간 포장식품 비파괴검사 센싱기술

Non-Destructive Sensing Technology Using Terahertz Wave for *In-Situ* Leak Detection of Food Packaging

최성욱 (Sung-Wook Choi)

한국식품연구원 소비안전연구단

Research Group of Consumer Safety, Korea Food Research Institute(KFRI)

I. 서론

최근 코로나19(COVID-19)의 발생과 확산으로 국내외 산업 환경변화에 많은 영향을 끼치고 있다. 특히 비대면화에 따라 택배를 중심으로 온라인 유통 산업과 질병에 대한 면역력 증가를 위한 건강기능 식품 및 제약에 대한 소비는 긍정적으로 평가되고 있다.

‘비대면·비접촉’이라는 용어 또한 각종 센서 개발 분야에서도 많이 사용되고 있다. 비대면·비접촉이라는 용어 대신 원격(remote), 비침습(non-invasive) 또는 비파괴(non-destructive) 등으로 사용되고 있다. 식품이물사고의 대부분이 제조단계보다 유통 단계에서 발생하고 있어 이를 검사할 수 있는 비침습, 비파괴 검사 기술 개발이 필요한 실정이다.

비파괴 검사기술은 X선, 자외선, 가시선 및 적외선의 투과성을 이용하여 파장변화를 확인하는 분광기술 및 영상기술, 그리고 센서 표면에서 발생하는 전기적, 물리적 신호를 근거리 무선통신으로 전달하는 기술 등이 활용되고 소형화 추세에 있다.

본 연구에서는 광과 전파의 에너지 영역 가운데 존재하면서 광과 전파의 성질을 모두 가지고 있는 테라헤르츠파를 응용한 것으로 플라스틱 기반 필름재질의 포장을 투과해서 포장지 내에 위치한 센서 신호를 감지하는 기술개발이다.

테라헤르츠파(테라파)는 0.1-10 THz(1 THz = 300 μm = 41.4 meV = 33.3 cm^{-1})의 주파수 대역의 전자기파를 말한다. 광학에서 광자(photon)와 마이크로파(microwave) 영역의 중간 에너지대에 위치하며, 빛의 직진성과 마이크로파의 투과성을 모두 가지고 있다. 이러한 테라헤르츠파는 비금속성 재질 대부분을 투과할 수 있다. 포장지 내부에 위치한 센서는 포장지의 훼손 여부를 검사하기 위해 습도변화를 감지할 수 있는 습도센서를 개발하였으며, 습도센서의

*Corresponding author: Sung-Wook Choi
Research Group of Consumer Safety, Korea Food Research Institute(KFRI),
Jeollabuk-do, Wanju 55365, Korea
Tel: +82-63-219-9327
Fax: +82-63-219-9876
Email: swchoi@kfri.re.kr

굴절을 변화가 테라파의 파장변화를 유도하게끔 설계하였다. 최종 식품 포장용 가스치환된 돈육포장에 적용하였으며, 임의로 30과 300 μm 의 핀홀을 만들어 핀홀이 없는 것과 비교하였으며, 30 μm 핀홀도 확인할 수 있음을 알게 되었다.

II. 방법

테라파를 감지하여 습도변화를 측정하기 위해서는 도파 모드 공진센서 태그를 제작하였다. 지르코니아 입자(300 μm)의 배열은 크롬 포토마스크를 이용하여 PDMS 표면에 패턴을 만들고, 그 위에 지르코니아 입자를 배열하였다. 배열된 지르코니아 입자는 접착층이 있는 PET 위에 고정시켜 입자를 전이하였다. 지르코니아 입자가 배열된 PET 기판에 수분에 민감한 PVA를 30 μm 수준으로 코팅하였다(그림 1).

테라파 분광장치는 Teraview사의 TPS 3000 모델을 이용하였으며, 측정한 샘플은 반사형 모듈을 이용하여 측정하였다. 이때, 반사형 모듈은 개방되어 있어서 별도의 습도를 조절할 수 있는 챔버의 제작하였다. 이 챔버는 15×15×10 cm의 크기의 아크릴로 제작되었고, 바닥 면에는 샘플이 고정될 수 있도록 구멍을 내었다. 습

도를 조절할 수 있도록 상단 부분에 가스관을 연결하였으며, 이 관을 통해 건조 공기와 습도가 유입될 수 있도록 하였으며, 각각의 공기는 레귤레이터를 통하여 조절하여 내부 습도를 조절하였다. 내부 습도는 20℃에서 80% RH까지 조절되었다(그림 2).

III. 결과

일반적으로 도파 모드 공진은 회절발과 도파관으로 이루어진 특수한 구조체에서 발생하는 현상이다. 특정 유전체가 일정 간격으로 격자구조를 이루는 경우, 빛이 입사하여 회절현상이 나타난다. 회절된 빛은 직진하는 모드와 비스듬히 진행하는 고차 회절 모드 빔으로 나뉘지며, 회절모드와 유전체 도파관(waveguide) 모드 간에 위상 정합(phase-matching)이 일어나면서 공진(resonance)이 발생한다. 이를 도파 모드 공진이라 한다. 도파 모드 공진은 PVA의 굴절을 값 변화에 따라 공진 파장대를 변화시키며, 특정 테라파 대역에서의 세기를 변화시키는 요인이 된다. 표면 PVA의 굴절률 값 변화는 물 분자의 흡착에 기인하며, 습도가 높으면 PVA 굴절률을 높게 되며, 식품 포장지를 투과해서 반사되어 나오는 테라파 신호에 영향을 주게 된다. 그림 3

그림 1. 제작한 테라파 감응 습도센서(A:가스투과막, B:보호층, C:PVA 코팅 센싱막, D:입자가 없는 신호비교용 막)

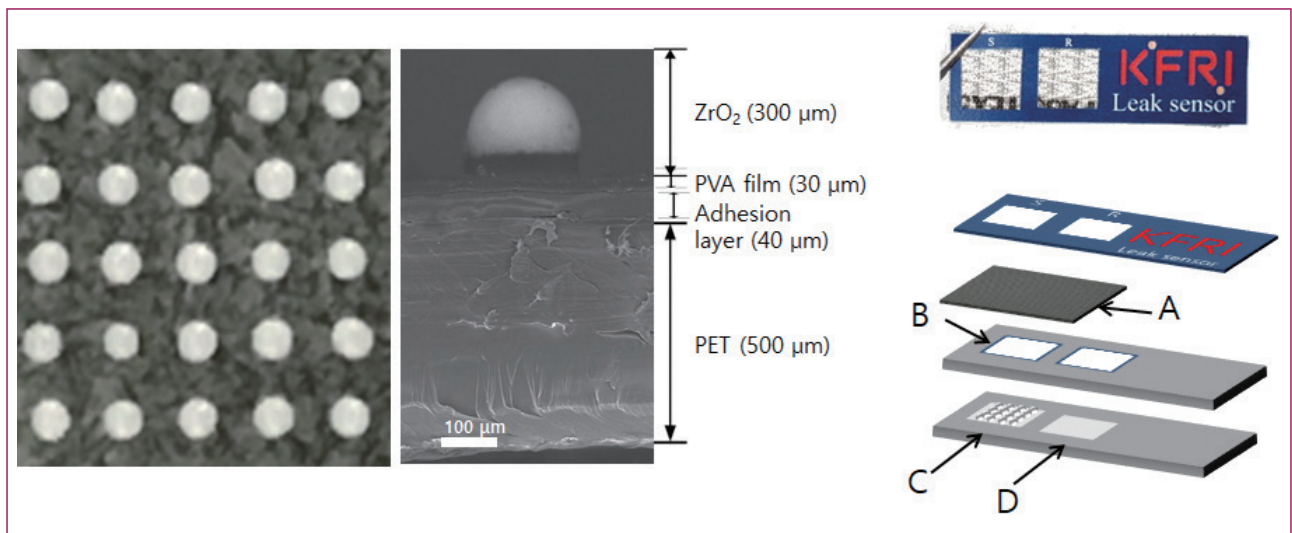
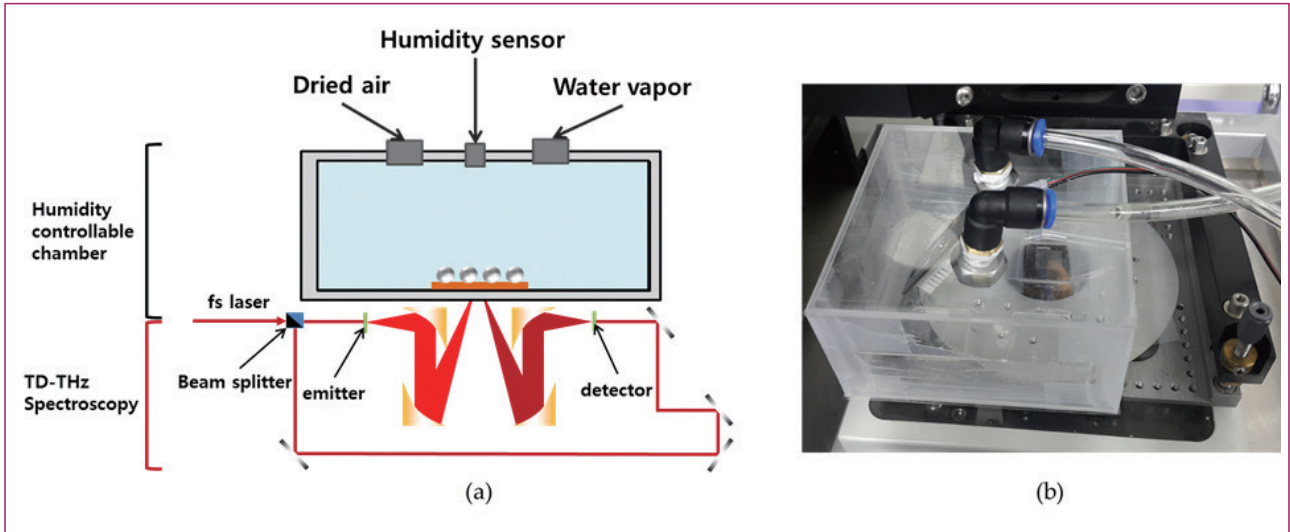


그림 2. 테라파 습도센서를 측정하기 위한 테라파 분광장치(a) 및 습도 변화장치(b)



은 습도 증가에 따른 테라파 신호변화를 나타내었다. 20%–80% RH 구간에서 도파 모드 공진의 공명 주파수는 약 5 GHz 정도 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 공명 주파수는 습도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 30% RH 이상에서는 지수 함수를 따라 움직이는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향성은 PVA의 굴절을 변화에 의한 공명 주파수의 변화는 같은 굴절을 변화라도 초기에 더 크게 변한다는 것을 알 수 있다.

제작한 센서태그는 습도에 따라 테라파 신호변화를 확인할 수 있었으며, 이를 이용하여 가스치환된 돈육포장 내부에 센서태그를 넣고 외부에서 신호변화를 확인하였다. 돈육의 수분활성도(0.9)와 수분 함량(75%)가 높기 때문에 포장 내부에 위치한 습도센서는 충분히 수분을 함유하고 있는 상태에서 포장지 핀홀 발생 시 외부 습도 상태에 따라 센서의 신호변화가 발생한다. 그림 4는 각각의 습도에서 1시간 노출시킨 후 측정된 실험 결과이다. 실험 결과, 20%와 50% 외부 습도 조건에서는 -73%와 -75%의 반사율 감소 변화를 나타내었고, 65%에서 -10%, 90% 습도조건에서는 25% 반사율 증가의 변화를 나타내었다. 이 결과는 내부 습도보다 높은 습도 환경에서는 반사율의 변화량이 감소하며, 그 경향성은 50%–90% 사이 습도환경에서 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이들 포장지에 30, 300 μm 크기의 구멍을 내어 외

그림 3. 습도 증가에 따른 테라파 공명 주파수 변화

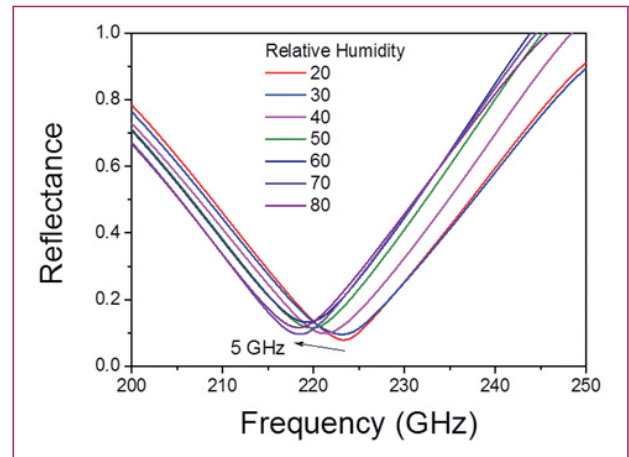
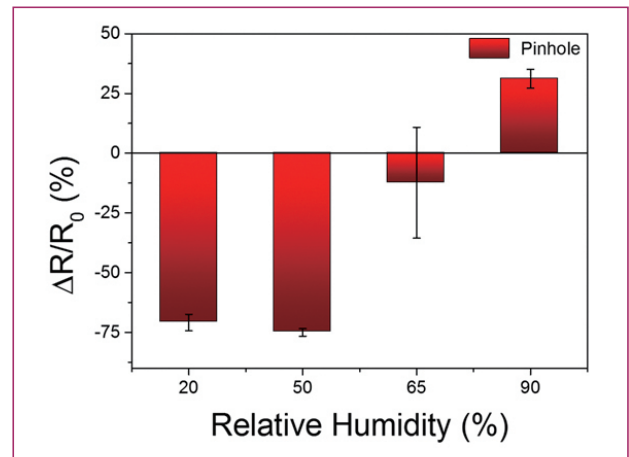
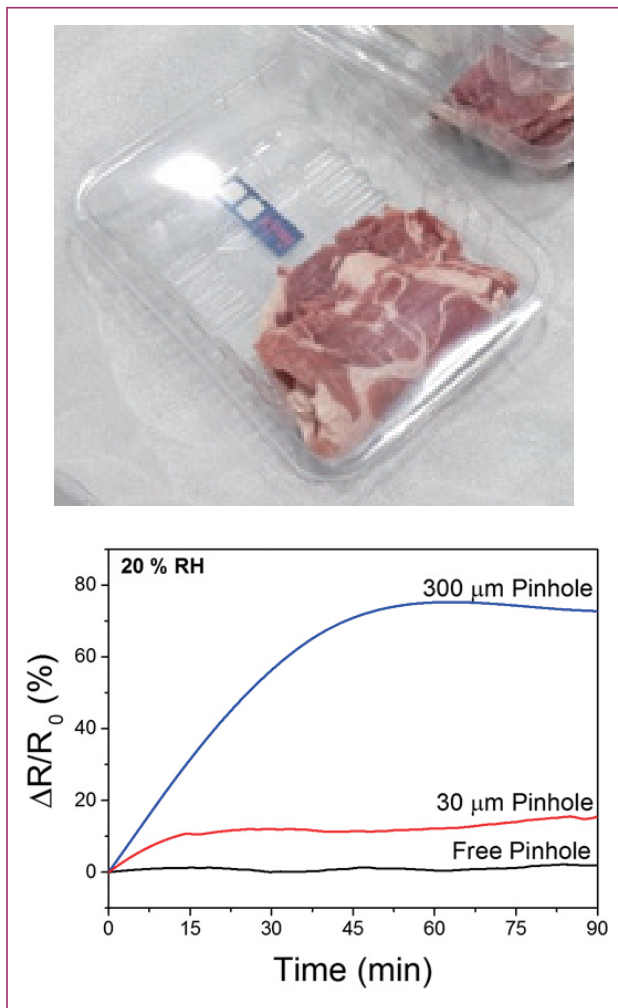


그림 4. 돈육 가스 치환 포장의 핀홀에 의한 반사율 변화



부 20% 수준의 습도환경에서 실시간 변화를 확인하였다 (그림 5). 그림 5에서 사용한 돈육포장과 내부 위치한 센서이며, 이는 그림 2의 테라파 분광장치로 포장을 유지한 채 측정된 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 핀홀이 없는 포장지는 90분 동안 5%이내의 변화를 보인 반면, 30 μm 크기의 핀홀 1개는 15분 이내 15% 정도의 공명 주파수 변화를 보였으며, 15분 이후 포화상태를 유지하였다. 300 μm 크기의 핀홀 1개 포장식품은 1시간 정도 지속적으로 주파수 변화를 보였으며, 최대 65%까지 변화가 나타났다.

그림 5. 핀홀의 크기에 의한 반사율 변화의 차이



IV. 결론

본 연구에서는 포장지내 습도 변화를 이용하여 포장지 훼손 유무를 실시간 확인할 수 있는 비파괴 검사방법을 개발하였으며, 테라파의 전파특성과 광학특성을 이용하여 외부에서 포장지 내부 환경변화를 감지하는데 활용하였다. 포장 내 습도변화를 감지하기 위해 테라파와 공명하는 센서태그를 제작하고, 물분자와 흡착하는 PVA를 도포하여 PVA 굴절을 변화에 따른 테라파 공명주파수 변화를 유도하게 하였다. 실제 식품포장에서의 활용을 위해 가스치환된 돈육포장에 제작한 센서태그를 넣고, 그 변화를 외부습도에 따라 포장지 미세 핀홀에 따라 그리고 시간변화에 따라 측정하였으며, 전체 포장에 30 μm 핀홀 1개만 존재하여도 시간에 따른 내부 습도가 변화되어 테라파 신호변화를 1분 이내에 확인할 수 있음을 알게 되었다. 제작한 센서태그는 3개의 층으로 된 필름을 적층한 것으로 A4 사이즈 크기로 제작하여 2 \times 2 cm 크기로 절단하여 사용하였으며, 제작한 들어간 비용은 1천원 이내로 센싱막 하나에 수 원 이내로 제작할 수 있다. 일반적으로 가시광 영역에서 도파 모드 공진 센서는 나노미터 스케일로 제작되기 때문에 제작 단가가 비싸 활용성이 떨어지지만, 테라파 영역에서는 저가의 센서태그를 만들 수 있는 장점이 있다. 그러나 이를 측정하는 테라파 시스템이 현재 수 천만원 이상의 고가 장비이기 때문에 범용적 활용을 위해서는 저가의 장비개발이 필요한 실정이다.

사사

이 결과물은 한국식품연구원의 지원(E0152200-03, E0192102-02)을 받아 수행된 연구성과입니다.

참고문헌

1. Traversa E. 1995. Ceramic sensors for humidity detection: The state-of-the-art and future developments. *Sensors Actuators B Chem* 23:135-156.
2. Blank TA, Eksperiandova LP, Belikov KN. 2016. Recent trends of ceramic humidity sensors development: A review. *Sensors Actuators B Chem* 228:416-442.
3. Ferguson B, Zhang XC. 2002. Materials for terahertz science and technology. *Nat Mater* 1:26-33.
4. Tonouchi M. 2007. Cutting-edge terahertz technology. *Nat Photonics* 1:97-105.
5. Van Exter M, Fattinger C, Grischkowsky D. 1989. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor. *Opt Lett* 14:1128-1130.
6. Kafka JD, Watts ML, Pieterse JW. 1992. Picosecond and femtosecond pulse generation in a regeneratively mode-locked Ti: Sapphire laser. *IEEE J Quantum Electron* 28:2151-2162.
7. Cole BE, Williams JB, King BT, Sherwin MS, Stanley CR. 2001. Coherent manipulation of semiconductor quantum bits with terahertz radiation. *Nature* 410:60-63.
8. Xiao-li Z, Jiu-sheng L. 2011. Detection of pesticides residues in rapeseed oil by terahertz time domain spectroscopy. In *Journal of Physics: Conference Series* 276:12231. IOP Publishing.
9. Lee YK, Choi SW, Han ST, Woo DH, Chun HS. 2012. Detection of foreign bodies in foods using continuous wave terahertz imaging. *J Food Prot* 75:179-183.
10. Huang S, Ashworth PC, Kan KWC, Chen Y, Wallace VP, Zhang Y, Pickwell-MacPherson E. 2009. Improved sample characterization in terahertz reflection imaging and spectroscopy. *Opt Express* 17:3848-3854.
11. Kohen S, Williams BS, Hu Q. 2005. Electromagnetic modeling of terahertz quantum cascade laser waveguides and resonators. *J Appl Phys* 97:053106.
12. Gaylord TK, MoharamMG. 1985. Analysis and applications of optical diffraction by gratings. *Proceedings of the IEEE*, 73:894-937.
13. Fan S, Joannopoulos JD. 2002. Analysis of guided resonances in photonic crystal slabs. *Phys Rev B* 65:235112.
14. Wawro D, Tibuleac S, Magnusson R. 2006. Optical waveguide-mode resonant biosensors, In *Optical imaging sensors and systems for homeland security applications*. pp. 367-384.
15. Wang SS, Magnusson R. 1993. Theory and applications of guided-mode resonance filters. *Appl Opt* 32:2606-2613.
16. Murphy DM, Koop T. 2005. Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications, Q. J. R. Meteorol Soc 131:1539-1565.
17. Wang SS, Magnusson R, Bagby JS, Moharam MG. 1990. Guided-mode resonances in planar dielectric-layer diffraction gratings. *J Opt Soc Am A* 7:1470.
18. Wang WC. 1986. *Electromagnetic wave theory*. John Wiley & Sons, New York, NY.
19. Liu W, Lai Z, Guo H, Liu Y. 2010. Guided-mode resonance filters with shallow grating. *Opt Lett* 35:865-867.
20. Jin Y, Kim G, Jeon S. 2006. Terahertz dielectric properties of polymers. *J Korean Phys Soc* 49:513-517.