

테라헤르츠 분광학을 이용한 중수(D₂O)와 경수(H₂O) 혼합물의 특성연구

정중건 · 손주혁[†]

서울시립대학교 물리학과

Ⓣ 130-743 서울특별시 동대문구 전농3동

(2008년 11월 20일 받음, 2008년 12월 19일 수정본 받음, 2008년 12월 19일 게재 확정)

중수(D₂O, 산화중수소)는 수소원자(H)보다 중성자 한 개가 더 많은 수소원자 동위원소(D)로 이루어진 물이다. 중수는 자연 상태의 물 가운데 5만분의 1정도 존재하며 경수(H₂O)와 매우 비슷한 성질을 가지고 있으나 경수보다 11%정도 무겁고, 특이점은 235 K로 228 K인 경수와 약간의 차이를 가진다. 중수는 중성자를 흡수하여 원자로의 중성자 감속재로 쓰이고 최근 중수 농도에 따라 세포에 미치는 독성효과가 다르게 나타나는 현상이 발견 되어 암 치료에 사용하려는 연구가 진행되고 있다. 우리는 테라헤르츠 시간축 분광학을 이용하여 경수와 중수 혼합물의 농도별 굴절률과 흡수율 변화를 거대 분자간 결합에너지 영역을 포함하는 테라헤르츠 영역(0~2.5 THz)에서 측정하여 중수의 비율이 높을수록 굴절률은 감소하고 흡수율 또한 감소하는 결과를 얻었다.

주제어: Terahertz, D₂O, H₂O, Refractive index, Absorption coefficient

I. 서 론

원자력 발전에서 중성자 감속재나 냉각제로 사용되는 중수(D₂O)는 자연 상태의 물에 0.0015%정도 포함되어 있고 경수(H₂O)와 화학적 물리적 성질이 거의 비슷하다. 중수와 경수의 Debye relaxation time은 300 K에서 7.5 ps로 동일하다.^[1] 하지만 중수를 구성하는 D(deuterium)는 중성자 한 개를 포함하는 H의 동위원소이므로 경수보다 약 11% 더 무겁다. 액체 상태에서 중수는 284 K일 때 가장 큰 밀도를 가지고 경수는 277 K에서 가장 큰 밀도를 가진다.^[2] 중수에는 점성이 있으며 비열도 경수보다 높다. 중수는 녹는점이 3.81℃, 끓는점이 101.42℃로 경수와 차이를 가진다. 그 외에도 중수는 경수보다 염류의 용해도가 낮고 온도별 유전상수도 다르다.^[1]

중수는 생물학적으로 고혈압 예방, 평활근으로 칼슘 흡수 기전의 정상화와 정상 심근세포 수축 축진의 효과가 있는 것으로 알려져 있는데, 농도가 25%이상으로 높아지면 여러 세포와 조직에 독성을 지닌다는 보고가 있다.^[3-4] 또한 정상세포 보다 악성세포에 독성이 더 강하게 나타나는 것으로 보고된 바 있다.^[5] 정상세포에는 독성이 나타나지 않고 악성세포에만 독성이 나타나는 농도와 생물학적 작용기전을 밝히는 것이 매우 중요한 연구가 된다.

경수와 중수에 관한 연구는 생물학적으로나 화학적으로 많이 이루어지고 있다. 특히 생물학적으로는 중수가 인체에 미치는 영향에 대한 연구는 중수가 암 치료의 가능성을 가지고 있어 그 중요성이 강조되고 있지만 중수의 농도에 따른 연구는 아직 미흡하다. 세포에 독성을 가지는 중수는 그 농도가 매우 중요한 요소이므로 테라헤르츠 분광학을 이용한 중수의 농도에 따른 광학상수 특성 연구는 중수를 이용한 악성세

포 치료에 근간을 마련할 수 있을 것이다.

거대분자들의 결합에너지, 수소결합에너지 등이 테라헤르츠 영역(0.2~2 THz)에 존재한다.^[6] 테라헤르츠를 이용한 분광학 연구는 극성분자와 반응성이 좋고 위상(phase)과 진폭(amplitude)을 동시에 측정이 가능하여 유전상수(dielectric constant), 굴절률(refractive index) 및 흡수율(absorption)을 직접적으로 구할 수 있어 많은 연구가 이루어 지고 있다.^[7] 따라서 본 연구의 대상이 되는 대표적인 극성분자 경수에 관한 연구도 많이 이루어지고 있다. 테라헤르츠 시간축 분광학을 이용한 본 연구를 통해 경수와 중수의 혼합물 농도에 따른 특성 변화를 관찰 할 수 있다.

본 연구에서는 테라헤르츠 시간축 분광학을 이용하여 경수와 중수 혼합물의 중수 농도에 따른 광학상수들을 측정하고 각각의 결과들을 비교하였다.

II. 실험방법

본 실험에서 시료는 경수(DI water)와 중수의 혼합물을 중수의 농도 별로 0%, 25%, 50%, 75%, 100% 준비하였다. 홀더 셀은 홀더 안에 두께가 100 μm인 스페이서를 두께가 3 mm인 두 개의 실리콘 윈도우 사이에 두고, 이 홀더셀을 그림 1과 같이 시료의 위치인 두 개의 paraboloidal mirrors 사이에 두고 시료들을 실리콘 윈도우 사이에 주사하여 실험을 진행하였다. 결과 도출을 위해 실리콘 윈도우 사이에 시료를 주사하지 않고 공기로 채워진 홀더를 투과한 신호를 레퍼런스 신호로 측정하였고, 각 농도의 시료가 실리콘 윈도우 사이에 주사된 홀더를 투과한 신호를 레퍼런스 신호와 비교하였다.

실험 장치는 InAs에 반치폭이 80 fs이고 중심 파장이 800 nm인 초고속 펄스 레이저를 입사시켜 테라헤르츠 전자기파를 발생시켰고, 다이폴 간격이 5 μm인 광전도 안테나를 이

[†]E-mail: joohiuk@uos.ac.kr

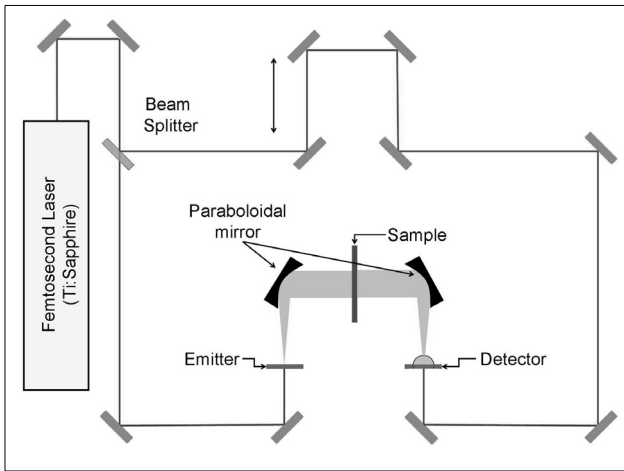


그림 1. mode-locked Ti:sapphire 레이저를 이용한 테라헤르츠 분광학 실험장치.

용해 신호를 추출하였다. mode-locked Ti:sapphire 레이저에서 나온 빛을 beam splitter을 이용하여 pump beam과 probe beam으로 나누어, pump beam은 InAs에 입사되어 테라헤르츠 전자기파(0~2.5 THz)를 발생하고, probe beam은 LT-GaAs 위에 Ti/Au로 증착된 광전도 안테나(Photoconductive antenna) 검출기에 입사된다. InAs에서 발생된 테라헤르츠 전자기파를 그림 1과 같이 paraboloidal mirror를 이용하여 guiding 하고 실리콘 홀더셀을 두 paraboloidal mirror 사이에 설치하여 실험을 진행하였다. paraboloidal mirror와 시료 셀을 투과한 테라헤르츠 전자기파는 광전도 안테나 검출기에서 probe beam과 만나 발생하는 신호를 lock-in amplifier를 이용한 광전도 추출방법을 통해 신호를 검출하였다. 실험은 온도 21°C, 습도 6%인 환경에서 진행하였다.

III. 결 과

그림 2는 농도가 0%, 25%, 50%, 75%, 100%인 시료를 홀더셀에 주사한 후 측정된 시간축 신호 중 0%, 25%, 100%를 나타낸 것이다. 각 시료를 투과한 신호의 차이를 보기 위해 시료 없이 측정된 레퍼런스 신호와 50%, 75%의 신호는 그 그래프에서 생략하였고 각 농도의 최고지점의 진폭을 삽입된 그림으로 나타내었다. 그림 2(a)의 삽입된 그림과 같이 중수의 농도가 증가할수록 최고 지점의 진폭은 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 이것들을 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transformation) 하여 그림 2(b)에 주파수축에서 진폭과 위상을 나타내었다.

시료를 투과한 신호와 시료를 투과하지 않은 신호는 전자기학적으로 다음의 관계식을 통해 굴절률과 흡수율을 나타낼 수 있다.

$$E_{out}(\omega) = E_{in}(\omega) \exp\left(-\frac{d\alpha(\omega)}{2}\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} n_r(\omega)d\right) FP(\omega) \quad (1)$$

$$n_r(\omega) = 1 + \frac{\phi_{in} - \phi_{out}}{2\pi d} \lambda \quad (2)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (3)$$

$E_{in}(\omega)$ 은 reference 신호이고 E_{out} 은 시료를 투과한 신호이다. $\alpha(\omega)$ 는 흡수율이고 $n_r(\omega)$ 은 굴절률이다. $FP(\omega)$ 는 Fabry-Pérot 효과를 나타낸 것이다. λ 는 파장, ϕ_{in} 은 reference 신호의 위상, ϕ_{out} 은 시료를 투과한 신호의 위상 정보, 그리고 d 는 시료의 두께이다. 흡수율 $\alpha(\omega) = n_i 4\pi/\lambda$ 로써 $n_i(\omega)$ 는 복소굴절률 $n(\omega) = n_r(\omega) + in_i(\omega)$ 의 허수부이다.

그림 3은 그림 2의 데이터와 위의 수식을 이용하여 얻은 중수의 농도별 굴절률과 흡수율 중 0%, 25%, 100% 나타낸

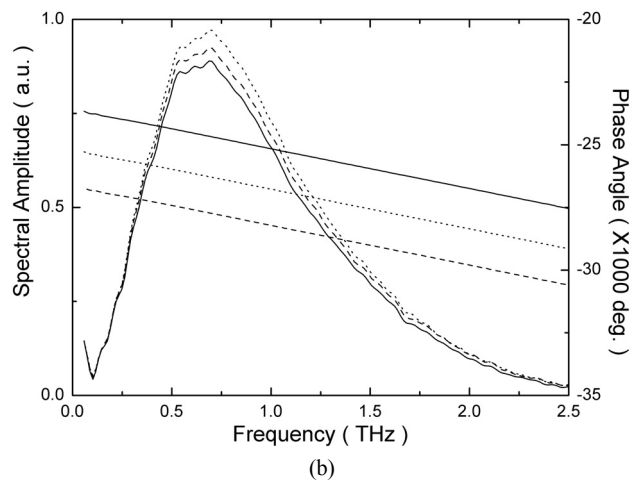
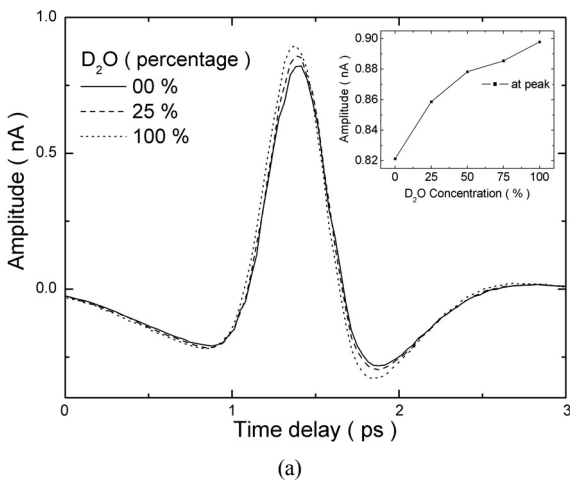


그림 2. (a) 시간축에서 측정된 시료를 투과한 신호. 결과값의 식별이 용이하도록 50, 75%의 결과는 생략하였음. 삽입된 그래프는 농도에 따른 최고점에서의 amplitude 값을 나타냄. (b) FFT를 통해 주파수축에서 amplitude와 phase를 나타냄.

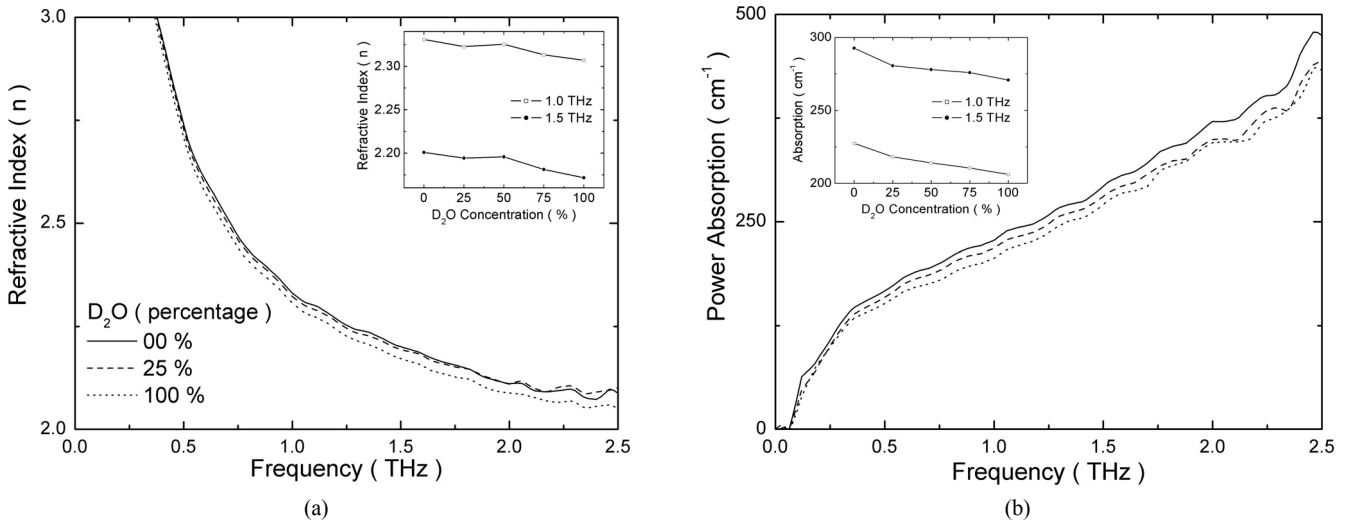


그림 3. (a) 00%, 25%, 100% 시료의 농도별 굴절률. (b) 00%, 25%, 100% 시료의 농도별 흡수율. 결과값의 식별이 용이하도록 50, 75%의 결과는 생략하였음. (a), (b)에 삽입된 그래프는 1.0, 1.5 THz에서의 농도별 굴절률과 흡수율을 나타냄.

그래프이다. 각각의 굴절률과 흡수율의 차이의 식별이 용이하도록 50, 75%의 결과는 생략하였고 농도에 따른 주파수별 그림 3(a)의 굴절률은 동일 농도에서는 주파수가 커질수록 굴절률은 감소하고 농도에 따라서는 그림 3(a)의 삽입된 그림에서와 같이 중수의 농도가 증가함에 따라 굴절률이 감소함을 알 수 있다. 주파수가 2 THz 이상 커지게 되면 굴절률은 2.1에 수렴하고 그림 3(a)의 삽입된 그림에서와 같이 각각의 농도에서 1.5 THz와 1.0 THz의 굴절률 차는 0.13으로 일정한 차이를 가진다. 그림 3(b)과 같이 중수의 농도가 증가할수록 흡수율 또한 감소하고 그림 3(b)의 삽입된 그림과 같이 1.5 THz와 1.0 THz의 흡수율은 62.45~65.40 cm⁻¹의 차이를 가진다. 그림 3에서 보듯 경수와 중수의 혼합물에서 중수의 비율이 높아짐에 따라 굴절률과 흡수율 모두 감소하는 것을 볼 수 있다.

IV. 결 론

중수와 경수의 혼합물의 농도에 따른 굴절률과 흡수율을 테라헤르츠 시간축 분광학을 이용하여 측정하였다. 농도에 따른 5개의 시료를 홀더셀을 이용하여 100 μm 두께로 측정하였고, 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transformation)을 이용하여 굴절률과 흡수율을 추출하였다. 주파수가 증가하면서 혼합물에서 중수의 비중이 높아짐에 따라 굴절률과 흡수율 모두 감소하였다.

간, 체장, 위의 암세포에 대한 중수의 세포증식억제와 세포독성효과가 이미 보고된바 있고^[8,9] 각 세포와 조직이 가지는 중수의 내성과 독성의 정도는 각각이 다를 수 있다는 연구 결과도 있다.^[5] 하지만 이러한 중수의 효과에 대한 정확한 기전은 밝혀지지 않았다. 이번 연구를 통해 미지의 혼합물에서 중수의 농도를 측정할 수 있고 중수의 농도별 굴절률 흡수율

등의 광학 전기적 상수를 측정함으로써 중수의 위와 같은 효과의 기전을 파악하는 시발점을 제시할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단이 주관하는 나노 입자 조영제를 이용한 테라헤르츠 영상 기술 개발(R01-2007-000-11933-0(2008))과 한국학술진흥재단의 테라헤르츠 시간축 분광학을 이용한 양자점의 초고속 전하동력학(KRF-2006-312-CC00175) 연구비 지원으로 연구 되었습니다.

참고문헌

- [1] C. Rønne, P. O. Åstrand, and S. R. Keiding, "Thz Spectroscopy of Liquid H₂O and D₂O," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, no. 12, pp. 2888-2891, 1999.
- [2] G. S. Kell, "Precise Representation of Volume Properties of Water at One Atmosphere," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 12, no. 1, pp. 66-69, Jan. 1967.
- [3] S. Vasdev, C. A. Sampson, A. Liepins, and J. Hypertens, "Effects of Deuterium Oxide (D₂O) on the Development of Hypertension and Ca²⁺ Homeostasis in Spontaneously Hypertensive Rats," *J. Hypertens.*, vol. 8, no. 2, pp. 185-189, Feb. 1990.
- [4] A. Hodel, J. O. Gebbers, H. Cottier, and J. A. Laissue, "Effects of Prolonged Moderate Body Deuteration on Proliferative Activity in Major Cell Renewal Systems in Mice," *Life Sci.*, vol. 30, no. 23, pp. 1987-1996, 1982.
- [5] D. J. Kushner, A. Baker, and T. G. Dunstall, "Pharmacological Uses and Perspectives of Heavy Water and Deuterated Compounds," *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, vol. 77, no. 2,

- pp. 79-88, 1999.
- [6] S. J. Oh, C. Kang, I. Maeng, and J-H. Son, "Measurement of carrier concentration captured by InAs/GaAs quantum dots using terahertz time-domain spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 13, pp. 131906-1~131906-3, 2007.
- [7] U. W. Kim, S. J. Oh, I. Maeng, C. Kang, and J. H. Son, "Terahertz electrical characteristics of heavily doped n-GaAs thin films," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 50, no. 3, pp. 789-792, 2007.
- [8] H. Takeda, Y. Nio, H. Omori, K. Uegaki, N. Hirahara, S. Sakaki, K. Tamura, and H. Ohtani, "Mechanisms of Cytotoxic Effects of Heavy Water (Deuterium Oxide: D₂O) on Cancer Cells," *Anticancer Drugs*, vol. 9, no. 8, pp. 715-725, Sep. 1998.
- [9] T. Uemura, K. Moritake, Y. Akiyama, Y. Kimura, T. Shingu, and T. Yamasaki, "Experimental validation of deuterium oxide-mediated antitumoral activity as it relates to apoptosis in murine malignant astrocytoma cells," *J. Neurosurg.*, vol. 96, no. 5, pp. 900-908, 2002.

Terahertz Characteristics of D₂O and H₂O Mixtures

Joonggun Chong and Joo-Hiuk Son[†]

Department of Physics, University of Seoul, Jeonnon 3 Dong, Dongdaemun-Gu, Seoul, 130-743, Korea

[†]*E-mail: joohiuk@uos.ac.kr*

(Received November 20, 2008; Revised manuscript December 19, 2008; Accepted December 19, 2008)

D₂O, which is used in nuclear power generation, is slightly different from H₂O. D₂O consists of deuterium (D), which is an isotope of hydrogen (H) and has one more neutron than H. D₂O is heavier by about 11% than H₂O, and D₂O is present in water in nature at about 0.002%. Its melting point and boiling point are 3.81°C and 101.42°C, respectively. D₂O is harmful to the human body if it replaces water in the human body by more than 25% ~ 50%. We have measured the index of refractive and power absorption of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% of D₂O in H₂O using terahertz time-domain spectroscopy, and we have found that the refractive index decreases and power absorption also decreases as the concentration of D₂O increases.

OCIS codes: (300.0300) Spectroscopy; (160.4760) Optical properties; (320.7150) Ultrafast spectroscopy.