

고출력 연속파 테라헤르츠(Terahertz) 기반의 동적 핵 분극(Dynamic Nuclear Polarization) 현상을 이용한 신기능 NMR 분광/이미징 기술

한 성 태
한국전기연구원

I. 머리말

미국과 일본을 비롯한 세계 여러 나라에서는 테라헤르츠 기술이 향후 세상을 변화시켜 나갈 주요 기술의 하나라는 인식 하에 국가적인 관심을 기울이고 있다. 국내에서도 지난 10여 년 간의 집중적인 연구 개발을 통하여 테라헤르츠 분광 및 이미징을 위한 다양한 시스템 및 기법들이 개발되고 있다. 그러나 아쉽게도, 국내의 연구 풍토 상 이종 기술 간의 적극적인 융합형 협력 연구를 통하여 새로운 테라헤르츠 응용 기법을 개척하려는 도전적 연구에 대한 관심과 지원, 그리고 참여가 다른 과학 선진국에 비해 한 발씩 뒤쳐지는 감이 없지 않다.

본고에서는, 고출력 연속파 테라헤르츠 기술과 핵 자기 공명(NMR) 기술의 융합을 통하여 다양한 잠재성을 입증해 나가고 있는, 동적 핵 분극(dynamic nuclear polarization) 기반의 신기능 NMR 분광/이미징 기술의 개념 및 연구 동향을 소개하고자 한다. 이를 통하여 테라헤르츠 연구의 다양성을 환기시키고, 국내에서도 이종 기술 전문가 간의 융합형 연구 협력 연구를 통하여 도전적인 신기술 개척 및 지원이 이루어지는 계기로 삼고자 한다.

II. NMR 분광/이미징 기술

외부 자기장 하에서 정렬된 핵 스핀의 세차 운동을 rf 에너지로 공진시키는 기법으로서 핵자기 공명 기술은 거대 분자의 동적 구조와 기능을 이해하기 위한 첨단 연구 장비로서 뿐만 아니라 생체의 해부

학적 구조 및 기능 영상을 구현하기 위한 의료 영상 장비로서 혁신적인 발전을 거듭하고 있다. 분광 장비로서 NMR은 기존의 X-선 분광 분야를 빠른 속도로 대체하면서 유전자 분석과 같은 생명과학 및 공학 분야의 고급 특수 분석 장비로 인식되고 있으며, 의료 영상 장비로서의 MRI는 이온화 복사선을 이용하는 X-ray, CT, PET 등과 차별화되어 누적 방사선에 의한 피해가 없는 안심 의료 기기로서, 고해상도 구조 영상 및 기능 영상의 신기원을 열고 있다.

그러나 기존의 핵자기 공명 기법은 신호의 세기가 매우 약하여 신호 대 잡음비가 낮다는 근본적인 한계가 있다. 스핀이 있는 핵종이 외부 자기장 하에 놓였을 때 중첩되어 있던 에너지 상태가 갈라지게 된다. 이때 외부 자기장에 대응하는 스핀 up과 down의 스핀의 수를 각각 N_+ , N_- 라고 하면, 두 상태 밀도의 비는 $\frac{N_-}{N_+} = \exp\left(-\frac{\gamma\hbar B_0}{kT}\right)$ 로 주어지게 된다. 열평형 상태에서 자기공명 신호는 두 상태 밀도 간의 차이를 이용하게 되며, 자기 공명 신호에 기여하는 분극(polarization) $P = \left| \frac{N_- - N_+}{N_- + N_+} \right|$ 로 주어지게 된다. 상온에서 1 T의 외부 자장이 인가되었다고 할 때, ^1H (proton)의 경우 N_- 가 1,000,000이라고 가정하면 N_+ 는 1,000,007 정도가 되므로 신호에 기여하는 알짜 분극은 10^{-4} % 정도로 매우 미약하다는 것을 알 수 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해서 획득되는 신호의 신호 대 잡음비를 증가시켜야 한다. 이를 위하여 신호 획득 장치의 감도를 높이거나 신호에 기여하는 자기화를 증가시키는 방법을 고려해 볼 수 있다. 전

자의 경우, 신호 획득 장치에서 발생하는 유효 저항을 줄이는 것과 같은 다양한 방법이 이용된다. 최근에는 고온 초전도체 코일을 이용하여 코일의 잡음을 감소시키는 연구도 진행되고 있다. 또 다른 방법으로 높은 자기장을 이용하여 신호에 기여하는 분극의 세기를 증가시키거나 장시간에 걸쳐서 여러 번의 스캔을 평균하여 잡음으로부터 미약한 신호의 크기를 증강시키는 방법이 고려되고 있다. 그러나 자기장의 세기를 무작정 증가시킬 수는 없으며, 신호 획득(scan) 회수를 증가시키면 분광/영상 정보 획득 시간이 증가하게 되므로, 짧은 정보 획득 시간을 요구하는 경우나 시간에 따른 변화(시간 의존적인 확산 측정 등)를 관찰해야 하는 응용에서 근본적인 한계로 작용하게 된다. 따라서 생체 구성 단백질 등의 거대 분자의 분광 분석을 위해서 매우 오랜 시간이 소요된다거나 높은 대조도를 갖는 영상을 구현하기 위해 중금속 계열의 조영제를 사용해야 한다는 등의 문제가 발생한다.

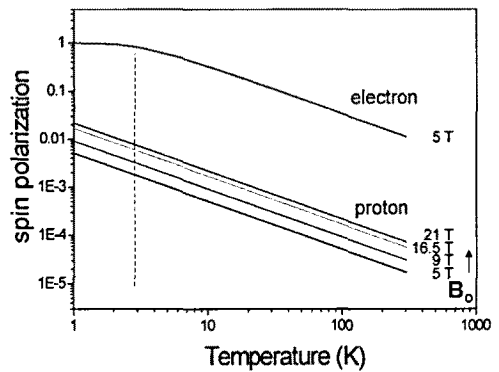
이러한 문제점을 원천적으로 극복하기 위하여 자기 공명 신호의 세기를 획기적으로 향상시키는 과분극(hyper-polarization) 기법들이 연구되고 있다. 레이저를 이용하여 헬륨(He)이나 제논(Xe) 등의 불활성 기체를 과분극(hyper-polarization)시키는 광 펌핑 기법은 기존의 MRI로는 불가능하던 폐의 영상화를 가능하게 하는 등 인체 진단과 관련하여 큰 가능성을 보이며 활발한 연구 개발이 진행되고 있으나, 적용 가능한 핵종이 제한된다는 단점이 있다. 스핀이 0인 수소 분자(para-hydrogen)를 이용하여 탄소(C) 이중 결합이나 삼중 결합에 포함된 탄소 동위원소(^{13}C)를 과분극시키는 PHIP(Para-Hydrogen Induced Polarization) 기법의 경우는 적용 가능한 핵종의 제약 및 촉매 금속의 독성 등의 이유로 학술 연구 이외의 분야에서는 연구 개발이 활발하지 않은 것으로 파악된다. 따라서 좀 더 일반적인 핵자기 공명 분광/영상 연구 분야에서 다양하게 활용할 수 있는 혁신적인 과분극

기법이 요구되고 있다.

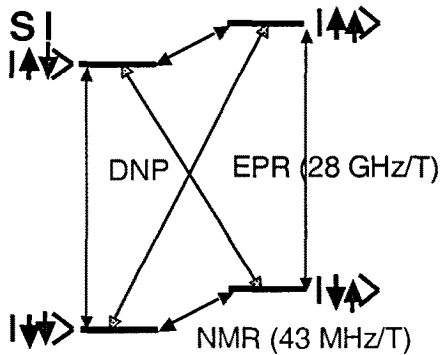
III. 동적 핵 분극(Dynamic Nuclear Polarization)

동적 핵 분극(dynamic nuclear polarization) 기법은 기존의 핵자기 공명 기술의 한계를 극복하고 다양한 응용 가능성을 열어주는 과분극 기법의 일종이다. 앞서 간략히 소개한 과분극 기법들과 달리 ^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{17}O , ^{19}F , ^{23}Na , ^{29}Si , ^{31}P 등의 다양한 핵종에 적용이 가능하다는 장점이 있으며, 기존에 잘 알려진 전자 스핀 공명(electron spin resonance) 원리를 활용하기 때문에 instrumentation 문제가 해결되면 비교적 손쉽게 분광/영상 연구에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 이 장에서는 그 원리 및 연속파 테라헤르츠 기술과의 관련성에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

앞서 약속한 수식에 의하여 상대적인 분극의 세기를 계산하여 보면, 회전 자기비(gyromagnetic ratio)의 차이에 의하여 [그림 1]에서 보는 바와 같이, 동



[그림 1] 자기장 세기와 온도에 따른 분극의 상대적인 세기(낮은 자기장에서도 전자의 분극이 상대적으로 높으므로, 고출력 연속파 테라헤르츠를 이용하여 전자의 분극을 원자핵의 분극으로 전이시키게 되면 NMR 신호를 극대화시킬 수 있다. 전자의 경우 이론적으로 극저온 환경에서 99% 이상의 분극이 이루어질 수 있다.)



[그림 2] DNP/NMR 개념도 및 분극 전이 개념(S는 전자의 스핀을 의미하며, I는 원자핵의 스핀을 의미한다.)

일한 자기장 아래에 노출되었을 때, 열평형 상태에서 전자 스핀의 분극은 핵 스핀의 분극에 비해 매우 높다는 것을 알 수 있다. 반면, 자기장을 5 T에서 21 T로 증가시키더라도 ^1H 분극의 변화는 그다지 크지 않음을 확인할 수 있다. 이것이 의미하는 바는, 핵 자기 공명 신호의 세기를 증가시키기 위해 자기장의 세기를 증가시키기 보다는 전자 스핀 공명(ESR 혹은 EPR)에 해당하는 연속파 테라헤르츠를 조사함으로써 열평형 상태에서 상대적으로 풍부한 전자 스핀의 분극을 핵 스핀으로 전이시키는 방식이 보다 효율적일 수 있다는 것이다.

이러한 동적 핵 분극(DNP) 기법은 1951년 A. W. Overhauser의 박사 학위 논문에서 처음으로 제안되었으며, 1953년 C. P. Slichter에 의해 낮은 자기장 영역에서 실험적으로 증명되었다. 그러나 전자 스핀 공명(ESR)에 해당하는 주파수가 28 GHz/T로서 고자장 영역에서 요구되는 고출력 연속파 테라헤르츠 소자 기술의 부재로 잠재적 가능성에도 불구하고 실제적인 연구는 오랜 기간 동안 미루어져 왔다.

1990년대에 핵 융합 연구를 위해 플라즈마 가열 기술을 연구하던 과학자들과 NMR 연구자들의 만남은 새로운 융합 기술의 시대를 열게 된다. MIT(Massa-

chusetts Institute of Technology) PSFC(Plasma Science and Fusion Center)에서 핵융합 플라즈마 가열을 위해 개발하던 0.14 THz 고출력 연속파 소자 기술을 FBML(Francis Bitter Magnet Lab)의 200 MHz NMR에 적용하여 NMR 신호가 100배 이상 증폭되는 것을 실험적으로 증명하면서 DNP-NMR이라는 새로운 연구 분야가 탄생하게 되었다.

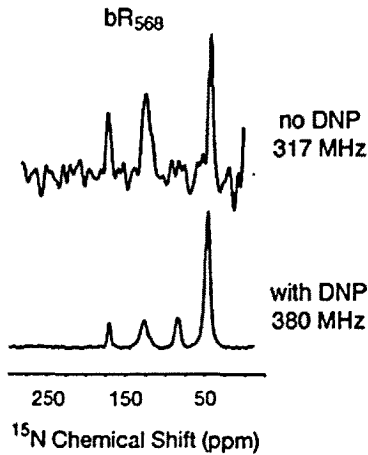
IV. 초고감도 THz-NMR 분광기술

DNP 기법에 의한 NMR 신호 향상은 이론적으로 $10^4 \sim 10^5$ 배까지 가능할 것으로 예상되고 있다. 일반적으로 생체분자와 같이 결정화가 어려운 거대 분자의 동력학적 구조를 분석하기 위하여 기존의 NMR 분광 기법을 적용할 경우, 전체적인 구조 해석에 수십일이 소요될 수 있다. 이러한 비효율성 때문에 NMR 분광을 이용한 생명 현상 및 재료 물성 연구에 많은 제약이 따르게 된다. 그러나 NMR 감도가 1,000배 가량 향상되었다고 했을 때, 90일 걸리던 data를 5초 만에 처리할 수 있게 되어, 생물학적 시스템의 근본적인 작용들을 더욱 잘 이해할 수 있는 가능성을 열게 될 것으로 기대되고 있다.

전통적으로 수 일이 걸리던 data 수집 시간을 단지 수 초 내로 단축시킴으로써, 생화학적인 process에 대해 *in vivo*, *in vitro* 상태에서 이해할 수 있는 수단을 제공하게 되므로, 효소와 같은 상호작용 매개체를 확인하고, 이러한 매개 작용의 동력학을 매우 효율적으로 탐지할 수 있게 될 것으로 예상된다.

이러한 DNP 기술 응용의 한 예로, 빛 에너지를 활용하여 세포 밖으로 양성자를 펌핑하는 membrane protein의 일종인 bacteriorhodopsin에 대한 연구를 살펴보기로 하자.

[그림 3]은 380 MHz NMR 장비에 0.25 THz 연속파 ESR 신호를 조사하여 bacteriorhodopsin이라는 생체 분자에 포함된 active site resonances를 확인하기



[그림 3] 빛이 조사된 bacteriorhodopsin의 1차원 분광 지문 비교(일반적인 NMR 기법을 적용하여 3.5일 동안 10,000번 scan을 평균하여 잡음을 제거하고 얻은 분광 데이터(위), 0.25 THz 연속파 ESR 신호를 조사하여 384 번의 scan을 통하여 30분 만에 얻은 분광 지문 데이터(아래) [V. S. Bajaj *et al.*, *JMR* 189, 251, 2007.]

위하여 ^{15}N 의 chemical shift를 측정된 결과이다. 기존의 NMR 분광 기법을 적용하여 측정된 경우 스캔 회수만 10,000번이 넘고 소요 시간은 3.5일이 걸렸음에도 불구하고 잡음에서 신호를 간신히 추출할 수 있는 수준임을 확인할 수 있다. 그러나 THz 기반의 DNP 기법을 적용한 경우, 30분 이내에 단지 384번의 스캔만으로도 잡음 수준을 더욱 낮추고 선명한 분광 정보를 획득할 수 있음을 확인할 수 있다.

MIT FBML의 R. G. Griffin 그룹에서는 이러한 기법을 적용하여 bacteriorhodopsin의 양성자 펌프 사이클의 매개체를 분석하는 연구를 진행하고 있다. 이러한 성공적인 연구 성과에 힘입어 Texas A&M Univ.의 C. Hilty 그룹에서는 효소 반응의 동역학과 매개체에 대한 연구를 진행하여 성과를 거두고 있으며, Univ. of California at Santa Barbara의 S. I. Han 그룹에서는 DNP 시약을 표면 활성 물질이나 단백질에

묶어서 생체 분자와 거대 분자 사이의 상호 작용을 연구하고, 실시간으로 단백질의 접힘을 관찰하기 위한 기법 등을 의욕적으로 개발해 나가고 있다. 이러한 생체 응용 연구뿐만 아니라, DNP 기법을 적용하여 과분극된 ^{29}Si 을 이용하여 기존의 반도체 공정에 최적화된 양자 컴퓨터를 구현하기 위한 연구도 진행되고 있다. 이밖에도 Univ. of Warwick 등 유럽 각국에서도 DNP-NMR 연구 시설을 확보하고, 구조 생물학, 연료 전지, 전기 화학 분야에 활용하기 위한 연구 개발을 진행하고 있다.

이러한 연구는 연속파 고출력 THz 신호를 활용하는 DNP 기법을 통한 신호 향상 없이는 불가능한 것으로서, 이종 기술 간의 융합형 협력 연구를 통하여 생명 현상 및 재료 물성 연구에 새로운 문이 열린 것으로 평가되고 있다.

V. THz-MRI 기반의 실시간 분자영상 기술

과거의 MRI 연구는 보다 선명한 해상도를 제공하고, 빠르게 신호를 획득하기 위한 하드웨어와 소프트웨어 연구에 집중되어왔다. 그러나 최근 들어 해부학적 구조에 대한 영상 이외에 기능적인 정보를 제공할 수 있는 분자 영상에 대한 관심이 증대되면서 PET 등과 결합하여 생체 내에서 분자의 확산이나 혈류의 운동 등을 영상화하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

MRI에서도 NMR 분광 연구와 마찬가지로 과분극 기법을 이용하여 핵 스핀 분극의 세기를 열평형 상태에서 얻을 수 있는 값보다 크게 증가시켜 감도를 높이기 위한 연구가 진행되고 있으며, 이를 통하여 기존에는 영상화에 활용하기 어려웠던 다양한 핵종을 기반으로 생체 대사 작용의 경로를 시각화하기 위한 연구가 진행되고 있다.

이중에서 특히 대부분의 신진대사 물질에 포함되어 있는 ^{13}C 과 관련된 acetate, glucose, glutamin, taurin

등의 작은 생체 분자들은 chemical shift의 폭이 매우 넓기 때문에, 생체 구조 내에서 이러한 chemical shift를 측정하면 특정 조직에서 대사 작용에 의한 조성 변화를 영상화 할 수 있다. 하지만 핵자기 공명 영상에서 ^{13}C 는 ^1H 에 비하여 약 4배 정도 감도가 떨어지며, ^1H 영상에서 80 M 정도의 물을 이용한다고 할 때 대사 물질은 mM 수준이고, 거기에 포함된 ^{13}C 의 양도 1 % 가량의 소량이기 때문에 일반적으로 ^{13}C 을 영상화 하는 것은 매우 어렵다고 알려져 있다.

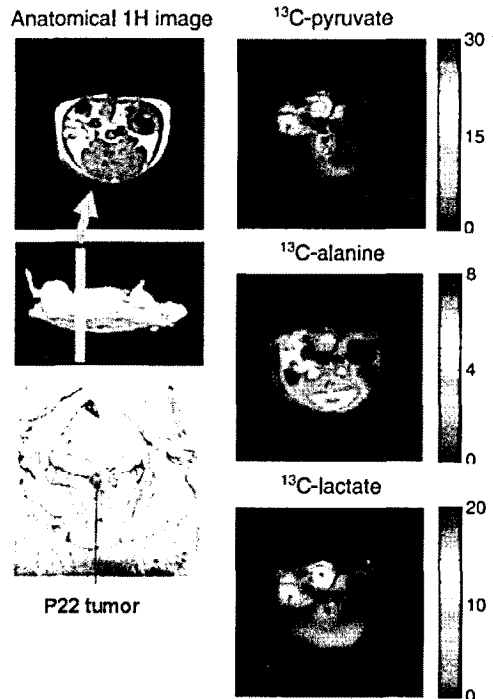
이러한 문제를 극복하기 위하여 일본, 미국, 독일, 프랑스 등에서는 super-MRI라고 하는 초고자장 MRI 기술을 개발하기 위한 노력을 기울이고 있다. 그러나 3장에서 살펴본 바와 같이 자기장의 세기를 증가시켜서 얻을 수 있는 분극의 증가는 매우 제한적이며, 인체에 적용 가능한 17 T 이상의 MRI용 초고자장 설비의 가격이 천문학적인 수준이기 때문에 특수 목적의 연구 이외에 병원 등의 현장에서 환자를 상대로 적용되기에는 기본적인 한계가 따른다.

따라서 상술한 바와 같이 고출력 연속파 THz 기반의 DNP 기법을 적용하여, 100 % ^{13}C 으로 치환된 생체 대사물질에 과분극을 유도하게 되면 $10^4 \sim 10^5$ 배의 신호 향상을 얻을 수 있으므로 생리적 병리적으로 기본이 되는 생체 내 생화학적 현상을 비 침습적으로 영상화 할 수 있는 가능성이 열리게 된다.

대표적인 실증 연구 사례로서 GE Healthcare를 중심으로 진행되고 있는 두 가지 암 조기 진단을 위한 영상 기법을 소개하고자 한다. 두 가지 기법 모두 기본적으로 ^{13}C 을 포함하는 생체 대사물질에 DNP 기법을 적용하여 과분극을 유도한다. *In vivo* 상태로 영상을 얻어야 하기 때문에 대상 물질은 독성이 없어야 하며, 과분극 상태가 사라지기 이전에 목표로 하는 조직에 도달해야 하므로 충분히 긴 T_1 이완 시간을 지녀야 한다. 또한 분자량이 적은 생체물질에 집중해서 영상 정보를 얻어야 하기 때문에 충분히 긴 T_2 이완 시간을 필요로 한다. 영상화에 이용할 대사

물질을 unpaired electron이 풍부한 자유 라디칼과 섞어서 극저온 고자장 환경에서 해당 ESR 주파수의 연속파 THz를 조사하여 Overhauser 효과에 의해 전자의 분극 상태를 ^{13}C 에 전이시킨 뒤, 해당 물질을 상온으로 급속하게 해동시켜 생체에 주사하는 과정을 거치게 된다.

첫 번째 대사 물질로 고려된 피루브산염(pyruvate)은 생체 조직의 필요에 따라 alanine이나 lactate, acetyl-CoA 등으로 변환되게 된다. ^{13}C 을 포함한 분자가 다른 분자로 변환될 때 발생하는 chemical shift를 검출하여 분광 영상을 구성하게 되면 세포 내에서 대사 작용의 경로에 따라 특이하게 나타나는 대사 작용



[그림 4] P22 종양이 이식된 쥐의 MRI 영상(일반적인 ^1H 기반의 해부학적 영상(우측 상단)과 분자 영상(우측 3개). lactate 신호가 강하게 검출되는 부위가 P22종양이 이식된 부분임. [K. Golman et al., *Cancer Res.* 66, 10855 (2008)])

부산물을 검출하여 병리적 특성을 파악할 수 있다. [그림 4]에서 보는 바와 같이 pyruvate가 활발하게 lactate로 변환된 지점에서 종양의 존재를 확인할 수 있다.

마지막으로 DNP 기법을 적용하여 ^{13}C -과분극 된 중탄산염(bicarbonate)과 이산화탄소의 화학적 변화를 추적하여 조직의 pH 차이를 *in vivo* 상태로 검출하고, 이를 기반으로 종양을 탐지하는 기술을 소개하고자 한다.

Henderson-Hasselbalch 관계식에 의하여 조직의 pH는 $\text{pK}_a + \log_{10}([\text{HCO}_3^-]/[\text{CO}_2])$ 로 주어지게 된다. pK_a 값은 *in vivo* 상태에서 알려져 있다고 가정하면 $\text{H}^{13}\text{CO}_3^-$ 와 $^{13}\text{CO}_2$ 의 비로부터 생체 조직의 pH 분포를 영상화 할 수 있다. [그림 5]에서 보이는 바와 같이 조직의 pH 분포로부터 종양의 실제적인 위치를 파악할 수 있다.

이 밖에도 핵자기 공명 이완 시간을 연장하기 위하

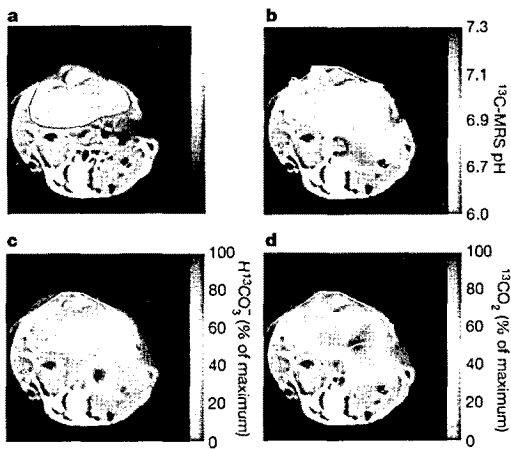
여 ^{29}Si 나노 입자를 포함한 질환 표적 물질에 DNP 과분극 기술을 적용하여 질병 부위를 탐지하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다.

이상의 분자 영상 기법은 모두 기본적으로 ^{13}C 을 포함하는 생체 대사물질에 고출력 연속파의 THz를 조사하는 DNP 기법을 적용하여 기존의 MRI가 지니는 한계를 극복하고 새로운 연구 영역을 창출한 좋은 사례이다. 이러한 신개념 영상 기법을 활용하여 질병으로 인한 형태학적 변화가 오기 이전 단계에서 분자과학적인 변화를 관찰하여 각종 질환의 조기 진단이 가능할 것으로 예상된다.

다만, 앞서 예시한 신기능 DNP-MRI 기법들은 GE Healthcare가 이미 원천 및 개념 특허를 확보하고 있는 방법들로서, 향후 열리게 될 의료가 신 시장에서 대등한 경쟁력을 확보하기 위해서는 이를 우회하기 위한 핵심 요소 기술에 대한 차별화 전략 개발이 필요할 것으로 판단된다. 또한 현재의 THz 기반 DNP-MRI 기술이 실험용 쥐 수준을 벗어나 인체에 적용 가능한 실용 의료 영상 기술로 발전시키기 위해서는 인체에 무해하면서도 충분히 긴 이완 시간을 갖는 대사 관련 물질에 대한 연구 개발이 선행 되어야 한다. 아울러, 대사 관련 물질에 unpaired electron을 공급하여 DNP 효율을 증대시키기 위한 과분극 재제에 대한 연구 개발 및 인체 유해성에 관한 검증이 우선적으로 진행되어야 한다. 따라서 이러한 제한 조건들을 효율적으로 극복하고 궁극적인 목표를 성취하기 위해서는, THz 기반 DNP-NMR 분광에 대한 연구 인프라를 우선적으로 구축하고 이를 바탕으로 영상 응용을 위한 선결 조건들에 대한 다양한 해법을 검토해 나갈 수 있는, 단계적이고 순차적인 접근이 필요할 것으로 판단된다.

VI. 맺음말

동적 핵 분극 현상을 이용한 핵 자기 공명 신호



[그림 5] 종양의 pH에 대한 *in vivo* 영상(a. ^1H 기반의 쥐 영상 (표시된 부분이 이식된 EL4 종양임), b. 조직의 pH map, c. 중탄산염 분포, d. 이산화탄소 분포. 조직의 pH map에서 pH가 낮은 부분이 EL4 종양의 위치와 일치함을 확인할 수 있다.[F.A. Gallagher *et al.*, *Nature* 453, 940 (2008)])

향상 기술은 전자 스핀 공명에 해당하는 연속파 고출력 테라헤르츠 신호원을 이용하여, 상대적으로 풍부하게 여기(excited)된 전자의 분극을 원자핵의 분극상태로 전이시킴으로써, 해당 핵종의 신호 대 잡음비를 획기적으로 증폭시키는 기법이다.

따라서 기존의 핵자기 공명 분광/이미징에서 기술적 한계로 간주되었던 계측의 정밀도와 속도를 혁신적으로 향상시킬 수 있음이 밝혀졌다. 또한, ^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{17}O , ^{19}F , ^{23}Na , ^{29}Si , ^{31}P 등의 다양한 핵종을 포함한 생체 대사물질을 고출력 연속파 테라헤르츠를 이용하여 과분극시킨 뒤, 이를 MRI 영상화제(agent)로 활용하면, 기존의 MRI 장치가 지닌 한계(미약한 신호)를 극복하고, 다양한 핵종에 대한 기능성 분광 영상을 구현할 수 있음이 보고되었다. 이는 고출력 연속파 테라헤르츠를 이용하여 생체 대사 영상과 같은 기능성 MRI를 구현할 수 있음을 의미하는 것으로서, 각종 질병 및 생체 대사 과정에 대한 인간의 이해를 획기적으로 확장하고, 향후 의료 산업 발전에 결정적인 역할을 하게 될 것으로 기대되고 있다.

뿐만 아니라 초고감도 THz-NMR 분광 기술을 바탕으로 바이오, 반도체, 소재 산업 등의 기초과학 연구를 위한 혁신적인 수단을 제공하여 새로운 연구생태계를 형성하고 향후 신산업 영역의 견인차 역할을 하게 될 것으로 기대된다.

이러한 연구는 연속파 고출력 THz 신호를 활용하는 DNP 기법을 통한 신호 향상 없이는 불가능한 것으로서, 국내에서도 고출력 연속파 테라헤르츠 기술과 핵자기 공명(NMR) 기술이라는 이종 기술 간의 융합형 협력 연구를 통하여 생명 현상 및 재료 물성 연구에 새로운 문을 열 수 있는 도전적인 신기술 개척이 이루어지기를 기대해 본다.

참 고 문 헌

[1] W. Happer, "Optical pumping", *Rev. Mod. Phys.*,

44, 169, 1972.

- [2] M. Goldman, H. Johannesson, O. Axelsson, M. Karlsson, "Design and implementation of ^{13}C hyper polarization from para-hydrogen, for new MRI contrast agents", *C. R. Chime*, 9, 357, 2006.
- [3] D. A. Hall *et al.*, "Polarization-enhanced NMR spectroscopy of biomolecules in frozen solution", *Science*, 276, 930, 1997.
- [4] V. S. Bajaj *et al.*, "250 GHz CW gyrotron oscillator for dynamic nuclear polarization in biological solid state NMR", *J. Magn. Reson.*, 189, 251, 2007.
- [5] L. Melody *et al.*, "Energy transformations early in the bacteriorhodopsin photocycle revealed by DNP-enhanced solid-state NMR", *Proc. Nat. Acad. Sci.* 105, 883, 2008.
- [6] S. Bowen, C. Hilty, "Time-resolved dynamic nuclear polarization enhanced NMR spectroscopy", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 47, 5235, 2008.
- [7] E. R. McCarney *et al.*, "Dynamic nuclear polarization enhanced nuclear magnetic resonance and electron spin resonance studies of hydration and local water dynamics in micelle and vesicle assemblies", *Langmuir*, 24, 10062, 2008.
- [8] T. D. Ladd *et al.*, "All-silicon quantum computer", *Phys. Rev. Lett.*, 89, 017901, 2002.
- [9] K. Golman, R. Zandt, M. Thaning, "Real-time metabolic imaging," *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 103, 11270, 2006.
- [10] K. Golman *et al.*, "Metabolic imaging by hyperpolarized ^{13}C magnetic resonance imaging for *in vivo* tumor diagnosis", *Cancer Res.* 66, 10855, 2006.
- [11] F. A. Gallagher *et al.*, "Magnetic resonance imaging of pH *in vivo* using hyperpolarized ^{13}C -la-

belled bicarbonate", *Nature* 453, 940, 2008.

[12] J. W. Aptekar *et al.*, "Silicon nanoparticles as hy-

perpolarized magnetic resonance imaging agents",

ACS Nano, 3, 4003, 2009.

≡ 필자소개 ≡

한 성 태



1999년 2월: 서울대학교 물리교육과 (이
학사)

2001년 2월: 서울대학교 물리학부 (이학
석사)

2005년 2월: 서울대학교 물리학부 (이학
박사)

2005년 8월: 서울대학교 기초과학연구원

연구원

2008년 2월: Massachusetts Institute of Technology, Plasma
Science and Fusion Center (Postdoctoral Research Associate)

2008년 3월~현재: 한국전기연구원, 의료-IT 융합기술 연구본
부 선임연구원

[주 관심분야] 고출력 연속파 THz 발생 및 응용