

超傳導 NMR-CT의 研究開發 및 原理

趙 長 熙

〈韓國科學技術院 教授·工博〉

1. 서 론

눈부시게 발달한 전자공학이 최근 여러 분야에 응용됨으로써 획기적인 결과를 얻어내고 있으며 마침내 전자공학, 화학, 재료공학, 의학 등의 학문 융합이 이루어져 의학계의 인체진단용으로 종래의 타영상기에 비해 월등히 우월한 NMR-CT가 등장하게 되었다.

인체 내부를 투시하려고 하는 의학적 필요성은 인체에서의 X-선 흡수를 조사함으로써 수십년 동안 충족되어 왔다. 그러나 이 방사선 사진술(radiography)의 가장 큰 단점은 중첩된 구조물을 구별해 낼 수 없다는 데 있다. 이러한 단점은 X-선 CT의 개발로 그 단점을 해결하게 되었으며 인체의 원하는 부위를 높은 해상도로 볼 수 있게 되었다. 그러나 X-선 CT가 유용한 진단장치임이 인정되기는 하지만 X-선 CT로 얻어낸 정보는 근본적으로 해부학적 영상이며 그 영상만으로는 내부 기관의 기능적 또는 생리적인 상태는 알아낼 수가 없다. 더구나 일부 병리학적 장애는 주위 조직과 X-선 흡수 성질이 같아서 기관의 크기나 모양을 변화시킬 정도로 심하지 않고는 CT영상에 나타나지 않으며 또한 인체내에 X-선의 방출로 생리적 장애를 일으킬 요소가 다분히 내포되어 있다.

이와 반대로 과거 40여년 동안 발전해온 NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 현상을 이용한 NMR 영상법은 X-선 CT와는 다른 해부학적 영상

외에도 정상 조직과 비정상 조직을 더 민감하게 구별할 수 있는 영상 인식 능력을 가지고 있으며 화학적인 변화까지 볼 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 이것은 X-선 CT가 외부에서 쏘 준 입사(Beam)의 감쇄와 산란에 의해 물체에 대한 신호를 받는 것에 반해 NMR-CT는 작은 주파수 범위에서 물체로부터 나오는 신호를 검출함으로써 원자핵(Spin)의 밀도, 완화계수(T1, T2), 양자의 운동, 화학전이 현상(Chemical Shift), 확산(Diffusion) 등에 의해 전반적인 영상이 결정되므로 생리적 또는 기능적인 정보 등도 얻을 수 있다. 이러한 여러가지 장점을 지닌 NMR-CT는 20세기의 마지막 진단 의료장치로서 각광을 받고 있으며 과학과 공학이 합쳐진 20세기의 걸작품의 하나로 손꼽히고 있다. 특히 한 대당 20억원을 호가하는 핵자기 공명기기는 현대 전자기기 산업의 종합작품이며 꽃이라고 할 수 있는 최첨단 기기로서, 산업계에서는 한 국가의 기술력을 과시하는 기기로서 세계적으로 경쟁의 불꽃이 튀고 있는 첨단산업이기도 하다.

2. NMR 원리와 영상법

다음은 NMR현상을 이용하여 NMR-CT에 영상화까지의 과정을 간단히 서술한다.

(1) NMR의 원리

모든 물질은 원자로 구성되고 이 원자는 작은 핵들로 이루어져 있다. 이것은 각운동량(Angular

Momentum) 을 가지고 있는데 이를 스핀(Spin) 이라고 한다. 그리고 이 회전하는 원자핵은 전하를 가지고 있기 때문에 이 회전은 자기능률(Magnetic Moment) 을 야기시키며, 회전하는 각 스핀들에게 자계(磁界) 를 가하면 각 스핀들은 자계방향으로 배열하려는 힘을 받게 된다. 이때 스핀은 지구 중력 하에서 팽이가 세차운동(歲差運動) 을 하듯이 자계 방향을 축으로 세차운동을 한다. 이때 받는 힘(Torque) 은 자계와 자기능률의 곱으로 나타내며 각 스핀은 외부자계에 의하여 일정한 주파수로 세차운동을 하는데 이때의 주파수를 Larmor 주파수라고 하며 이 역시 자계에 비례하게 된다. 이때에 실제 영상화하고자 하는 수소 원자들은 두 에너지 상태를 가지고, 이 에너지 상태를 변화시키는 에너지 양은 외부자계의 세기에 비례하며 이는 곧 강한 자계가 더 많은 스핀들을 정렬시켜 영상화하는데 쓰이게끔 신호의 크기를 크게 해준다. 전자파 에너지와 주파수는 비례관계이므로 강한 자계에서 큰 에너지가 필요하며 이는 곧 큰 에너지 방출로 이어져서 신호의 증가를 가져온다. 예를 들어 수소원자핵의 경우 자장이 1.5K 가우스(Gauss) 일 때 Larmor 주파수는 6.4MHz, 20K 가우스에서는 85.22MHz이다. 외부자계에 있는 원자핵들을 외부에서 Larmor 주파수와 똑같은 고주파로 여기(勵起)시키면 원자핵은 에너지의 흡수와 방출이 일어난다. 이 상태를 공명(Resonance)이라 하며 공명된 원자에 의해 발생된 에너지가 단층촬영에서 얻는 신호(FID)가 된다.

자화도와 외부자장과의 각은 외부에서 쏘 주는 고주파 펄스(RF Pulse) 조사시간과 Power에 비례한다. 그 각이 90도가 되어 자화도가 X-Y평면상

에 있도록 하는 회전자장펄스를 90도 펄스라 한다. 이 Pulse가 끝나면 자화도는 X-Y평면상에서 자유롭게 회전하여 물체 주위의 Coil에 기전력을 발생시키는데에 이것을 자유유도감쇄 신호(Free Induction Decay) 즉 FID 신호라 한다.

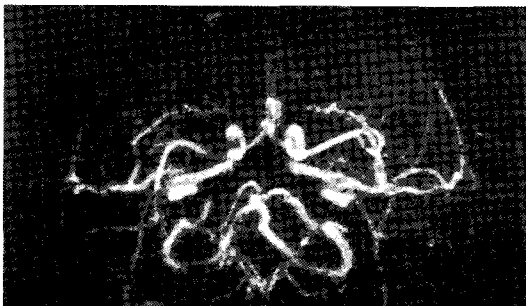
이 신호방출이 끝나면 자화도는 Z-방향과 평행한 원래의 상태로 돌아가는데 그때의 특성은 T1과 T2의 두 완화시간으로 표시할 수 있다. T2는 Spin-Spin 완화시간이라 하며 물체가 얼마나 오래 황자계를 갖고 있는가에 따라 결정되며, T1은 Spin-Lattice 완화시간이라 불리워지며 Spin-System이 열평형상태로 되돌아가는 시간정수이다. 이 과정에서 에너지 전환이 일어나므로 에너지 전환이 없는 T2보다 T1은 일반적으로 길다.

이 두 T1, T2의 Parameter에 초점을 둔 영상방법은 여러가지가 있으며 그 파라미터만 두드러지게 나타난 영상을 T1 또는 T2 영상이라 하여 핵자기 공명영상의 Contrast에 큰 도움을 주고 있다.

(2) 영상화 방법

NMR 영상 System은 그 구성에 따라서 신호가 물체의 한 점(Point)에서 나올 수도 있고 한 선(Line) 혹은 한 평면(Plane)에서 나올 수도 있으며 또는 이물체(Volume) 전체에서도 나올 수 있다. 그러므로 2-차원 혹은 3-차원 영상을 얻기 위해서 각 Point가 구분되는 신호를 얻어야 하는데 이것은 경사자계를 사용하여 실현된다. 경사자계를 가하게 되면 이때에 얻어지는 횡적자계에 비례하고 또 이때에 얻어지는 원자핵의 수는 횡적 위치에 비례하게 되므로 물체 원자핵의 횡적 분포를 알 수 있게 된다.

일반적 영상구성 방법에는 2가지가 있는데 첫째로 X-선 CT와 같이 투영 재구성 방법을 이용하는 것으로 이 방법은 간단하지만 움직이는 물체에 민감하고 자계 불균일에 영향을 많이 받는 단점이 있다. 다음은 1975년에 A. Kumar, D. Welti 및 R. Ernst에 의해 연구 발표된 위상 부호 방법으로, 우선 X-Y 평면상에 한 단면을 선택하는 RF Pulse와 횡축 경사 자계 G_x 를 가하고 이 경사자계를 T_x 시간 동안 가하면 일단 1차원적 분포를 얻을 수 있고, 이때 이를 확대하여 G_y 경사자계를 T_y 시간 동



NMR-CT로 촬영한 腦血管動脈

안 가하면 2차원에서의 핵분포를 보게 된다. 이때에 Sample이 느끼는 자계에 의해 결정되는 주파수는 위치에 따라 변하므로 2차평면에서 완전히 고유한 주파수와 위상각의 분포를 갖게 된다. 예를 들면 Y축으로 공명하는 스핀들의 주파수로 위치를 결정하게 되는 한편 X축으로는 축적된 위상각을 통하여 좌표를 결정한다.

따라서 시간을 0에서 일정한 기간동안 증가시키면서 신호를 받으면 한 위상각에서의 주파수에 따른 위치에 있어서의 스핀 분포를 볼 수 있게 된다. 위상각까지 변화하여 얻은 2차원 data에 2차원 Fourier 변환을 하면 원하는 전체의 영상이 얻어진다.

3. 초전도 NMR-CT의 장점 및 그 응용

초전도를 이용한 NMR-CT의 개발에는 많은 자본과 함께 하드웨어적인 어려움이 있으나 선진 각국(미국, 일본 등)에서 앞을 다투어 연구에 열을 올리고 있으며, 본 실험실에서도 자력이 지구자력에 비해 10만배나 강한 초전도(Superconducting Magnet : 20K Gauss) NMR-CT를 개발하여 여러가지 연구를 해왔다.

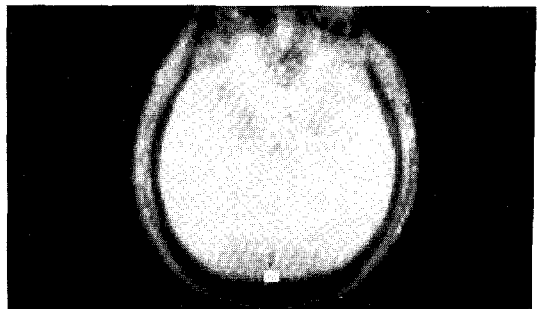
NMR-CT에서 화질은 여러가지 요소에 의해 결정되지만 특히 인체로부터의 원자핵 신호(FID 신호)의 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio : S/N비)가 화상의 S/N비는 물론 해상도까지 좌우한다. 일반적으로 인체로부터의 신호 크기는 자장의 세기에 비례하여 결국 자기장의 제곱에 비례한다. 따라서 20K 가우스에서의 신호 크기는 1.5K 가우스에서보다 무려 180배 가량 커진다. 반면에 신호 검출 때의 잡음은 고주파 코일 자체의 저항과, 어느 정도 전기전도성을 가지고 있는 인체의 저항 성분들 역시 자장이 커질수록 증가하므로 실제 20K 가우스에서 FID S/N 비는 1.5K 가우스에서보다 약 20배 가량의 향상을 보이게 된다. 다시 말하면 S/N 비의 향상은 NMR 영상의 화질 특히 해상도를 거의 20배 가량 가깝도록 개선시킬 수 있다.

그러면 과연 초전도 NMR-CT로는 어떤 연구가

가능한가를 알아보기로 한다.

첫째 고해상도 화질의 실현이다. 종래의 수냉식 자석에서는 신호의 S/N비가 떨어져서, 낮은 상태에서 해상도를 높이려면 영상 전체의 S/N비가 떨어져서 깨끗한 영상을 얻을 수 없었으나 초전도 자석으로는 높은 S/N비를 유지하면서 1mm 이하의 고해상도로 보통 임상 연구에 활용할 수 있으며 특히 T1, T2 완화 시간의 차이를 더욱 확실하게 할 수 있다는 이점을 이용하여 고선명도 영상을 얻을 수 있다. T1, T2 완화 시간은 병리 특히 종양 등에 민감하여 암 진단의 중요한 척도가 된다. 이밖에도 수소핵(Proton) 외에 핵자기 공명 영상이 가능한 물질은, Proton과 Neutron 개수의 합이 홀수인 것만 얻을 수 있다. NMR 영상이 가능한 핵의 종류로는 지금까지 100여 종류가 가능하다고 알려져 있다. Proton과 다른 종류의 핵에 대한 영상은 그 각각이 의학적으로 다른 정보를 제공하므로 Proton 이외의 핵에 대한 영상을 얻고자 여러 연구가 활발히 진행되고 있다. 자계의 세기가 큰 초전도 자석이 도입됨에 따라서 과거에는 힘들었던 나트륨 또는 염분(Sodium)에 대해서도 고해상도를 가진 영상을 얻을 수 있고 보다 고해상도의 영상을 얻고자 연구를 계속 중이다. Sodium Image를 이용해서 암의 조기 진단에 사용할 수 있는 것은 인체의 세포가 죽으면 그 부위에 염분이 집중되기 때문이다. 또한 인(Phosphorous)은 Sodium과 달리 화학적 친이 현상이 생기기 때문에 스펙트럼을 비교함으로써 병든 세포와 정상세포 등을 구별할 수 있는 중요한 척도이므로 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

즉 그것은 초전도 자석의 도입으로 인해 증대되는 화학적 분리방법에 대한 연구이다. NMR에서



NMR-CT로 axial 촬영한 頭腦

화학적 천이(Cheical Shift)라는 용어는 같은 원소라도 그 결합된 상태에 따라 공진 주파수가 약간씩 달라지는 현상을 말하는 것인데, 일례를 들면 같은 수소 원자핵도 물(H₂O)의 수소와 지방질(-CH₂)의 수소는 미소한 차이로 그 공진 주파수를 달리한다. 이 차이 역시 자장의 세기에 비례하므로 종래 저자장에서 어려웠던 물, 지방, 그외의 각종 생리 물질의 분광 실험이 고자장에서는 가능하게 되었으며 더 나아가서 각 물질을 따로 분리하여 영상화할 수도 있게 되었다.

또한 가능해진 영상분야로는 모세관 혈류이동(Perfusion)과 확산(Diffusion)의 영상기법 발달이다. Perfusion이란 모세혈관을 따라 흐르는 피의 흐름(Flow)을 의미하는 것으로, 그것에 관한 영상은 모세혈관에 있어서의 피의 흐름에 대한 정보를 제공해 줄 것이며 또한 몸을 이루는 각 부분의 확산계수(Diffusion Constant) 등을 영상화하는 것은 인체의 생리적, 기능적 역할을 알려주게 된다. 이에 따라 신체의 신진대사 같은 생리화학적 측정에도 큰 도움이 될 것이다.

특히 최근에 연구가 활발히 진행되고 있는 분야로는 기능영상(Functional Imaging)으로 세계 각 연구소에서 관심을 갖고 연구에 박차를 가하고 있는 중이다. 기능영상이란 인간의 언어, 시각, 청각, 행동 등에 대한 뇌의 기능을 영상화한 것이다. 지금까지는 양전자 단층촬영장치(PET : Positron Emission Tomography)를 이용해 왔는데 이 PET은 정맥, 동맥 등에 어떤 물질(방사선 물질, 포도당)을 넣어 뇌의 작용에 따라 소모되는 포도당의 양과 이와함께 주입한 양전자 방출 동위원소에서 방출되는 감마선 신호를 검출해서 기능영상을 검출해 왔는데 여기에는 여러가지 문제가 있었다. 따라서 PET은 인체에 유해한 방사선 물질의 주입과 영상화질의 불균형한 점 등의 이유로 널리 쓰이지 못하였다. NMR-CT에 의한 기능영상 기술의 개발로 인하여 뇌의 기능 연구와 이와 연결된 컴퓨터 구조관계 등의 연구가 본격화되기 시작했다. NMR을 이용한 기능영상의 방법은 눈에 빛의 자극을 가하여 이 자극을 인지하는 뇌의 부위에 피가 공급되어 피의 양과 산화율(Oxygenation)이 변화하는 양을 검출함으로써 NMR을 이용한 기능영상을 가능하게 한 것

이다. 특히 Volume의 변화보다는 Oxygenation의 변화에 기인한 자화율 현상(Susceptibility Effect)을 이용해서 기능영상을 얻는 방법은 기존의 다른 방법으로는 할 수 없었던 새로운 기법으로 21세기에 인간의 뇌와 컴퓨터의 기능 등을 연구하는데 혁신적인 역할을 할 것으로 기대된다.

4. 결 론

NMR-CT의 기술은 물리, 수학, 컴퓨터, 전자공학, 의학 등의 첨단지식이 얽힌 고급과학기술의 집합체로서 앞으로 많은 연구과제가 있을 것이며 특히 NMR을 이용한 기능영상기법 등은 20세기 말까지는 물론 21세기에 가서도 이에 대한 연구와 개발이 확대될 것으로 기대되므로 이에 대응하여 우리나라 과학계와 산업계는 의학연구라는 부분적인 시각에서 벗어나 첨단과학 기술이며 21세기 복지사회에 필요 불가결한 의료 과학기술의 기본이라는 개념을 가지고 과학분야는 학문으로서, 기술분야는 산업발전 및 21세기 첨단의료기기 연구개발의 기초를 다진다는 의미에서 적절한 관계분야 협조와 적극적인 지원을 해야 할 것이다. 현 미국 국민소득(GNP)의 20% 이상이 국민복지 특히 의료분야의 투자로 이루어져 있는 점을 고려할 때 미래의 우리나라는 물론 전세계적인 추세로 볼 때도 NMR-CT와 같이 20세기의 대표적인 종합 첨단의료기기의 연구개발 및 산업화는 근대 산업국가를 이루는 기본과학이자 산업이 될 것이기 때문이다. 현재 상품화된 NMR-CT의 가격은 20억원을 호가하는 거대한 첨단 기술의 집합체이며 이의 연구개발은 많은 과학기술 분야의 발달을 끌어올 뿐만 아니라 21세기 한국의 독자적인 의학연구를 위해서도 필수적인 과학기술이다.

미래의 첨단의료기기는 NMR-CT에 그치지 않고 NMR-CT를 기본으로 진단, 치료, 치료후 진단 등 종합진단치료 시스템으로 변화·발전함으로써 거대한 시스템을 이루게 될 것이고 20억(200만 달러)원 정도의 시스템에서 수십배에 달하는(2,000만달러~1억 달러) 거대한 시스템으로 발전하여 첨단의학의 새로운 장을 열어 기존 의료시스템의 개념을 바꾸어 놓을 것이므로 국가적인 차원에서 관심을 가져야 할 것으로 생각된다.