

# 초전도 NMR-CT의 영상 원리 및 그 응용

## 조 장 회

### 1. 서 론

전자공학의 눈부신 발달은 최근 여러 분야에 응용됨으로 획기적인 결과를 얻어내고 있으며 이제 마침내 전자공학, 화학, 재료공학, 의학등의 학문의 융합으로 의학계의 인체 진단용으로 종래의 타영상기에 비해 월등히 우월한 NMR-CT가 등장하게 되었다.

인체 내부를 투사하여 질병을 진단하려는 의학적 요청은 X선을 인체내에 노출시킴으로서 수십년동안 충족되었다. 이와같은 방사능사건들은 1972년 Hounsfield의 X선 CT의 개발로 그 효능이 더욱 우수하게 되었으며 인체의 원하는 부위를 높은 해상도로 볼 수 있게 발전되었다.

그러나 X선 CT가 유용한 진단장치임이 인정되긴 하였지만 X선 CT로 얻어낸 정보는 근본적으로 해부학적 영상이다. 즉 그 영상으로 인체내의 기능적 또는 생리적인 상태는 알아낼 수가 없다.

더구나 일부 병리학적 장애는 주위조직과 X선흡수성질이 같아서 기관의 모양이나 크기를 변화시키지 않고는 X선 CT 영상에 나타나지 않는다. 또한 인체내에 X선의 방출로 생리적 장애를 일으킬 요소가 다분히 있다.

이와 반대로 과거 30여년동안 발전해 온 NMR(Nuclear Magnetic Resonance)현상을 이용한 NMR 영상법은 X선 CT와 비교될 수 있는 해부학적 영상외에도 정상조직과 비정상조직을 더 민감하게 구별할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 이것은 X선 CT가 외부에서 쬐준 입사(beam)의 감쇄와 산란에 의해 물체에 대한 신호를 받는 것에 반해 NMR-CT는 작은 주파수 범위에서 물체로부터 나오는 신호의 spin 밀도,  $T_1$ ,  $T_2$ , proton의 운동, chemical shift, diffusion constant에 의해 영상이 결정되므로 생리적, 기능적인 여러 경

보를 함유하고 있다.

이제 본문에는 이러한 NMR-CT의 원리에 대해 간단히 설명하고 최근 Field가 높아진 초전도 NMR-CT의 장점과 여러가지 임상학적 가능한 실험을 알아보기로 한다.

### 2. NMR의 원리와 영상법

다음은 NMR 현상을 이용하여 NMR-CT의 영상화까지의 과정을 간단히 서술한다.

#### (1) NMR의 원리

모든 물질은 원자로 구성되고 이 원자는 작은 원자핵들로 이루어져 있다. 이것은 각 운동량(angular momentum)을 가지고 있는데 이를 spin이라고 한다. 그리고 이 회전하는 원자핵은 전하를 가지고 있기 때문에 이 회전은 자기능률(magnetic moment),  $\mu$ 을 야기시킨다. 이 회전하는 각 spin들에게 정자계( $B_0$ )을 가하면 각 spin들은 정자계 방향으로 배열하려는 힘을 받게 된다. 이때 spin은 지구중력하에서 팽이가 세차운동을 하듯이 자계방향( $B_0$ )을 축으로 세차운동을 한다. 이때 받는 힘(torque;  $\tau$ )는 다음과 같이 규정된다.

$$\tau = B_0 \times \mu$$

외부자계  $B_0$ 에 의해 각 Spin은  $\omega_0$ 의 각주파수로 세차운동을 하는데 이때의 주파수를 Larmor 주파수라고 한다.

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

$\gamma$ : magnetogyric ratio

$\omega_0$ : Larmor 주파수

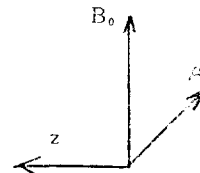


그림 1.

<접수 : 1986년 8월 30일>

\*한국과학기술원 전기 및 전자공학과

\*\*Dept. of Electrical Eng. and Electronic Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology

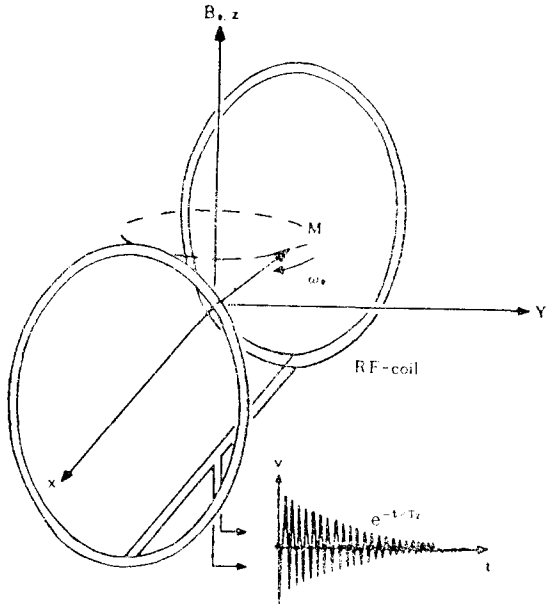


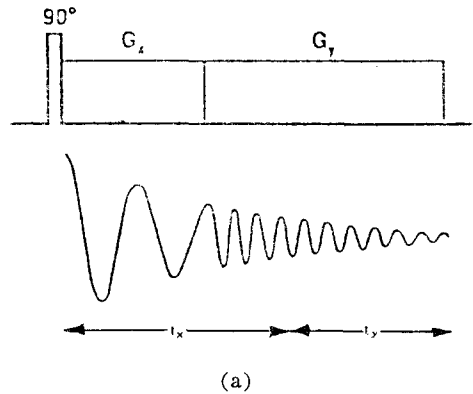
그림 2.

실제 영상화하고자 하는 수소원자들은 두 에너지 상태를 가지며 이 에너지상태를 변화시키는 에너지양은 외부자계의 세기 ( $B_0$ )에 비례한다. 전자파에너지와 주파수는 비례관계이므로 강한 자계에서 큰 에너지가 필요하나 이 큰 에너지는 고주파를 증가시키면 실현될 수 있다. 예를 들어 1.5 K 가우스의 정자계에서 Larmor 주파수는 6.4 MHz, 20 K 가우스에서는 85.22 MHz 이다. 외부자계내에 있는 원자핵들을 외부에서 Larmor 주파수의 고주파로 여기시키면 원자핵은 끊임없이 에너지흡수방출이 일어난다. 이 상태를 공명(resonance)이라하며 공명된 원자에 의해 발생된 에너지가 단층촬영에서 얻는 신호(FID)가 된다.

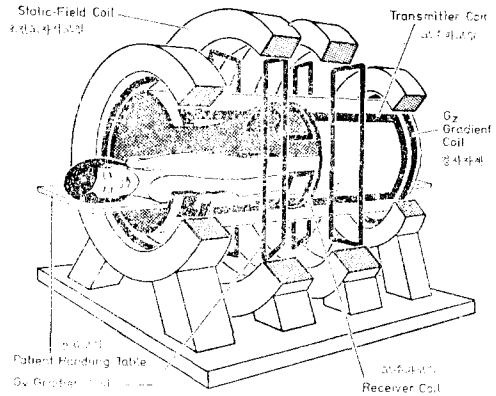
자화도  $\mu$ 와 외부자장( $B_0$ )과의 작은 외부에서 쏘주는 고주파 펄스(RF-pulse)의 power 비례한다. 그 각이  $90^\circ$ 가 되어 자화도가 X-Y 평면상에 있도록 하는 회전자장 pulse을  $90^\circ$  pulse라 한다.

이 pulse가 끝나면 그림 2와 같이 물체주위에 감긴 Coil에 기전력이 유기되는데 이것을 FID라 한다.

이 RF-pulse가 끝나면 자화도는 그림의 z방향과 평행한 원래의 상태로 돌아가는데 그 특성은  $T_1$ 과  $T_2$ 의 두 완화시간에 따른다.  $T_2$ 는 spin-spin 완화시간이라 하며 물체가 얼마나 오래 횡자계를 갖고 있는가에 따라 결정되며  $T_1$ 은 spin-lattice 완화시간이라 불리우지며 spin-system이 열 평형상태로 되돌아가는 시간정



(a)



(b)

그림 3. a) 위상 부호화 방법에서의 pulse 순서도  
b) NMR 영상에 필요한 코일 배치도

수이다. 이 과정에서 에너지전환이 일어나므로 에너지 전환이 없는  $T_2$ 보다  $T_1$ 은 일반적으로 길다. 이  $T_1$ ,  $T_2$ 의 parameter에 초점을 둔 영상방법은 여러가지가 있으며 그 parameter만 두드러지게 나타낸 영상을  $T_1$ ,  $T_2$  weighted image라 한다.

### (2) 영상화 과정

NMR 영상 system은 시스템구성에 따라서 신호가 물체의 한 점(point)에서 나올 수도 있고 한선(Line), 혹은 한 평면(plane)에서 나올 수도 있으며 또 입체(volume)전체에서도 나올 수 있다. 2-D, 혹은 3-D 영상을 구하기 위해서 각 point가 구분되는 신호를 얻어야하는데 이것은 경사자계를 사용하여 실현된다. 경사자계를 가한후 FID의 초기 값은 횡자하  $M_{xy}$ 에 비례하고 또 횡적자하는 여기된 원자핵의 수에 비례하므로 물체의 원자핵 분포를 알 수 있다.

일반적 영상 재구성방법에는 2가지가 있는데 첫째로 X선 CT와 같이 투영재구성방법을 이용하는 것인데 이 방법은 간단하지만 움직이는 물체에 민감하고 자체 불균일에 영향을 많이 받는 단점이 있다. 다음은 1975년 kumar, walti, Ernest에 의해 발표된 위상 부호화방법으로 우선 X-Y 평면상에 한 단면을 선택하는 RF pulse를 가하고 횡축 경사 자계  $G_x$ 을 가한다. 이 경사자계를  $t_x$ 시간동안 가하고 그후  $G_y$ 경사자 계를  $t_y$ 시간동안 가하면 물체내의 spin 들은 sample이 느끼는 자계에 의해 결정되는 주파수로 세차운동한다.

$$\omega_x = \gamma(B_0 + x \cdot G_x)$$

$$\omega_y = \gamma(B_0 + y \cdot G_y)$$

여기서  $\omega_y$ 는 y축으로 공명하는 spin들의 위치를 결정하며 x축으로는 축적된 위상각  $\phi_x$ 과표를 결정한다.

$$\phi_x = \omega_x t_x = \gamma(B_0 + x \cdot G_x) \cdot t_x$$

따라서  $t_x$ 을 0에서  $n \cdot dt_x$ 만큼 증가시키면서 FID을 받으면  $N \times N$  matrix을 얻을 수 있고 이를 2-D 푸리에 변환하면 원하는 영상이 얻어진다(그림 3).

### 3. 초전도 NMR-CT의 장점 및 그 응용

초전도를 이용한 NMR-CT의 개발에는 많은 자본과 하드웨어적 어려움이 있으나 선진각국(미국, 일본등)에서 앞을 다투어 연구에 열을 올리고 있으며 본 실험실에서도 자력이 지구자력에 비해 10만배나 강한 초전도(Super-Conducting Magnet: 20 K Gauss) NMR-CT을 개발, 성공함으로써 단층촬영 진단 의학재는 물론 의학계 전체를 흥분시키고 있다.

NMR-CT에서 화질은 여러가지 요소에 의해 결정되지만 특히 인체로부터의 원자핵 신호(FID 신호)의 신호대 잡음비(Signal-to-noise ratio: S/N 비)가 화상의 S/N 비는 물론 해상도까지 좌우한다. 일반적으로 인체로부터의 신호크기는 자장의 세기에 비례하고, 신호검출효율도 역시 자장의 세기에 비례하여 결국 자기장의 제곱에 비례한다. 따라서 20 K 가우스에서의 신호크기는 1.5 K 가우스에서 보다 무려 180배 가량 커진다.

반면에 신호 검출때의 잡음(Noise)은 고주파 코일 자체의 저항과 어느정도 전기 전도성을 가지고 있는 인체의 저항성분들 역시 자장이 커질수록 증가하므로 실제 20 K 가우스에서 FID 신호의 S/N 비는 1.5 K 가우스에서 보다 약 20배 가량의 향상을 보이게 된다.

S/N 비의 향상은 NMR 영상의 화질 특히 해상도를 거의 20배 가깝도록 개선시킬 수 있다(그림 4-(a), (b)).

이러한 매력으로 인해 NMR 연구계에서는 계속 더



그림 4-a. 1.5 K Gauss 상온자석 영상



그림 4-b. 20 K Gauss 초전도 자석 영상.

높은 자장을 추구하여 왔고, 종래의 수냉식 자석으로는 불가능했던 3 K 가우스 이상의 고자장은 초전도자석 기술의 발달로 실현되고 있다.

초전도 자석이란 1911년 네덜란드의 물리학자 온네스에 의해 처음 발견된 초전도 현상을 이용한 자석으로서 한번 전류를 공급하면 외부의 전원없이 그 전류가 영원히 흘러 자계를 유지할 수 있다.

일반적으로 도체는 온도가 떨어지면 저항이 감소하는데 초전도 현상이란 어떤종류의 도체가(니오브(Nb)와 티타늄(Ti)의 합금) 임계온도인 약  $-264^{\circ}\text{C}$  즉  $9^{\circ}\text{K}$  이하에서 급격히 저항성분을 상실하여 거의 제로에 가깝게 되는 것을 말한다. 이때를 초전도 상태라고 하는데 이 상태에서 가는 초전도체에 전류를 흘리면 저항성분이 거의 없으므로 열발생없이 고전류를 흘릴 수 있으며, 외부전원을 차단하여도 손실없이 극히 안정된 전류를 유지하며 강하고 안정된 자장을 만들 수 있는

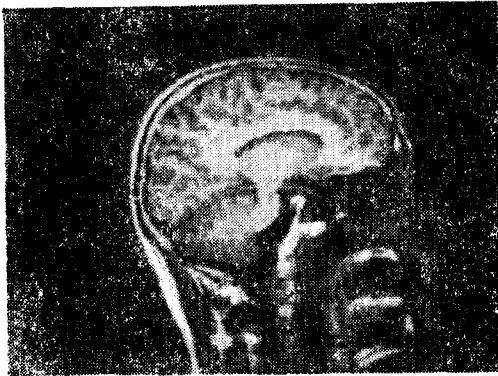


그림 4-c.  $T_1$ 완화시간을 이용한 영상.



그림 4-d.  $T_2$ 완화시간을 이용한 영상.

것이다. 초전도체 도선은 수냉식 자석의 도선에 비해 매우 가늘게 되어 같은 부피에서 많은 도선을 중첩할 수 있으므로 호전도 자석은 고자장을 만들 수 있는 것이다.

현재 세계적으로 이 초전도체를 이용한 몸진체를 image 할 수 있는 자석으로는 20 K 가우스까지 나와 있으며, 그 이상의 자장을 만들어 낼 수 있는 연구가 진행중이나 아직 결과가 보고되어 있지는 않다. 따라서 한국과학기술원의 20 K 가우스자석은 세계에서 가장 자계가 강한 초전도 자석이라 할 수 있다.

그러면 과연 초전도 NMR-CT 로는 어떤 연구가 가능한가를 알아보기로 한다.

우선 첫째, 고해상도 화질의 실현이다. 종래의 수냉식 자석에서처럼 신호의 S/N 비가 낮은 상태에서 해상도를 높이려면 영상전체의 S/N 비가 떨어져서 깨끗한 영상을 얻을 수 없었으나 초전도자석으로 높은 S/

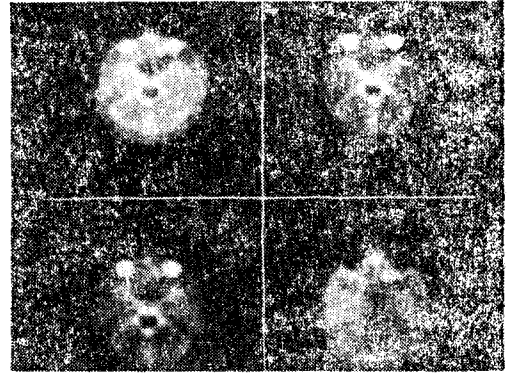


그림 5. Sodium 영상.

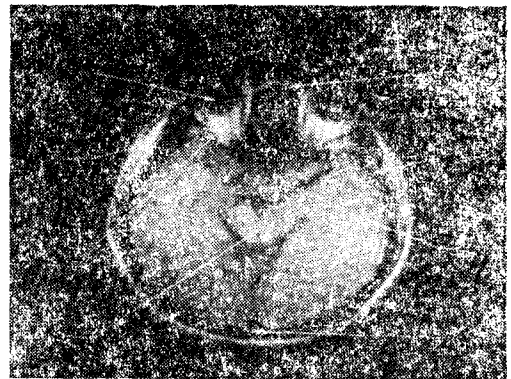


그림 6. 화학분광영상. 각 부위의 물과 지방의 스펙트럼은 임상학적으로 중요한 정보를 제공한다.

N 비를 유지하면서 1 mm 이하의 고해상도를 보통 임상연구에 활용할 수 있으며 특히  $T_1$ ,  $T_2$ 완화시간의 차이분 더욱 확실하게 할 수 있다는 잇점을 이용한 고선경도 영상을 얻을 수 있다.  $T_1$ ,  $T_2$ 완화시간은 병리, 특히 종양등에 민감하여 암진단에 중요한 척도가 된다 (그림 4-(c), (d)).

핵자기 공명 영상이 가능한 물질은 Proton 과 Neutron 의 갯수의 합이 홀수인 것만 영상이 가능하고, 합이 짝수인 물질에 대해서는 NMR 영상을 얻을 수 없다. NMR 영상이 가능한 핵의 종류로는 지금까지 100여 종류가 가능하다고 알려져 있다. proton 과 다른 종류의 핵에 대한 영상은 그 각각의 의학적으로 다른 정보를 줄 것이므로 proton 이외의 핵에 대한 영상을 얻고자 하는 욕망과 기대는 증대되어 왔다. 그렇지만 proton 이외의 핵에서 나오는 신호는 그 크기가 굉장히 작으므로, 과거 자계의 세기가 약한 수냉식 자석으로는 proton 이외의 핵에 대한 영상을 얻는다는 것은 힘든 일이었다. 그러나 자계의 세기가 큰 초전도 자석이 도입됨에 따라서 과거에는 힘들었던 Sodium

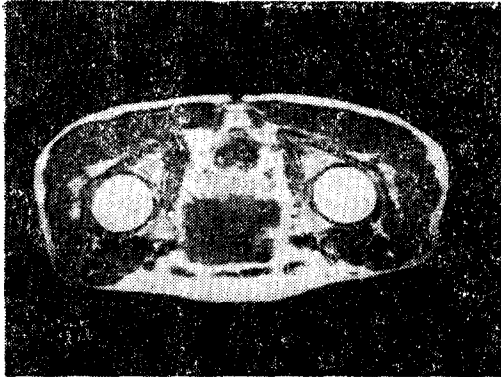


그림 7-a. 물, 지방이 합해져 있는 영상.

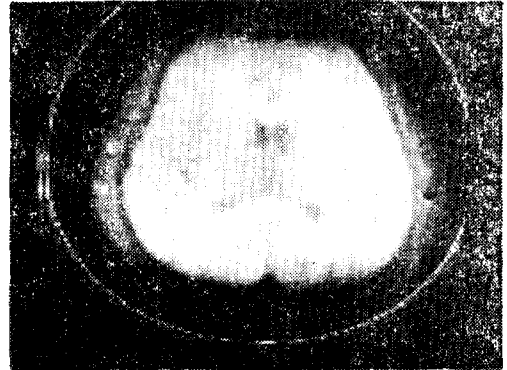


그림 8. 초고속 영상(영상시간 : 6.4초)

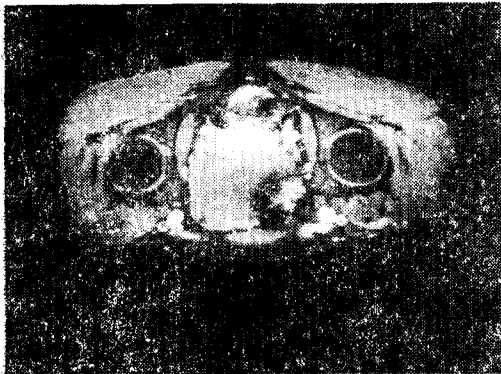


그림 7-b. a)에서 물만 분리해낸 영상.



그림 9. ECG을 이용한 심장영상.

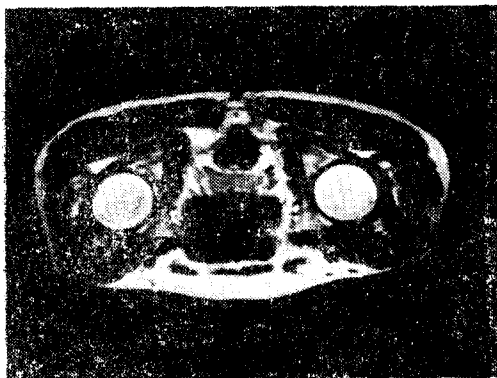


그림 7-c. a)에서 지방만 분리해낸 영상.

에 대해서도 고해상도를 가진 영상을 얻을 수 있고(그림 5) 보다 고해상도의 영상을 얻으려는 연구가 계속적이다. sodium image 을 이용해서 암의 조기진단에 사용할 수 있는 것은 인체의 세포가 죽으면 그 부위에 소금이 집중되기 때문이다. 또한 phosphorus 는 Sod-

ium 과 달리 화학적 천이 현상이 생기는 이유로 스펙트럼을 비교함으로써 병든 세포와 정상 세포를 구별할 수 있는 중요한 척도로서 이에 대한 연구도 가능해졌다. 초전도 자석의 도입으로 인해 기대되는 또 하나의 가능성은 화학적 분광방법에 대한 연구이다. NMR에서 화학적 천이(chemical shift)라는 용어는 같은 원소라도 그 결합된 양태에 따라 공진주파수가 약간 달라지는 현상을 말하는 것인데 일례를 들면 같은 수소 원자핵도 물( $H_2O$ )의 수소와 지방질( $-CH_2$ )의 수소는 미소한 차이로 그 공진주파수를 달리한다. 이 차이 역시 자장의 세기에 비례하므로 종래 저자장에서 불가능하던 물, 지방 그외의 각종 생리물질의 분광실험을 고자장에서 가능하며(그림 6) 더 나아가서 각 물질을 따로 분리하여 영상화할 수도 있다(그림 7).

초전도 자석으로 신호의 S/N 비가 좋아지면, 영상시간을 줄이는 방법, 즉 초고속 영상법의 개발도 가능하게 된다.

해상도는 약간 떨어지더라도 영상시간을 수 초 이내



그림 10-a. 간부위의 영상.



그림 10-b. a)와 같은 위치에서 대동맥, 대정맥에 대한 피속도 영상. 흰부분은 +방향의 피의 유속을 검은 부분은 -방향의 피의 유속을 상대적으로 나타낸다.

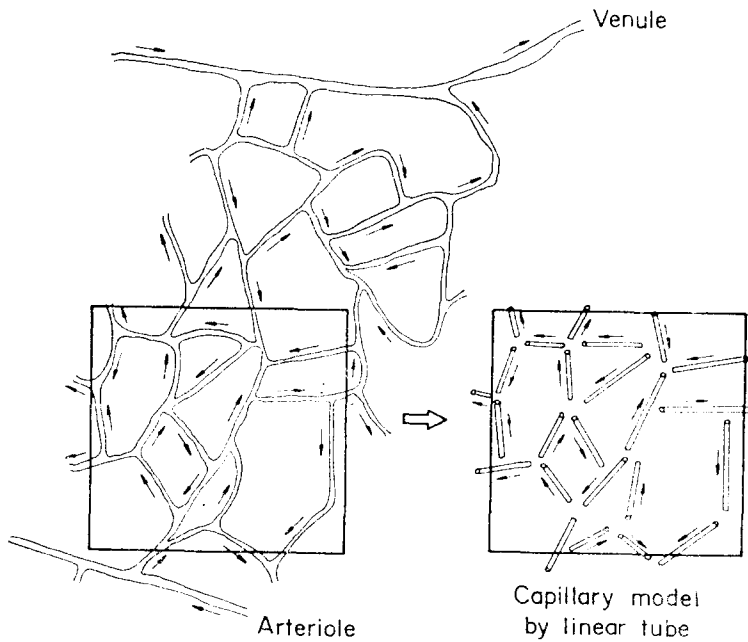


그림 11.



그림 12. Perfusion 영상.  
 심장부분의 모세혈관 분포를 알 수 있다.

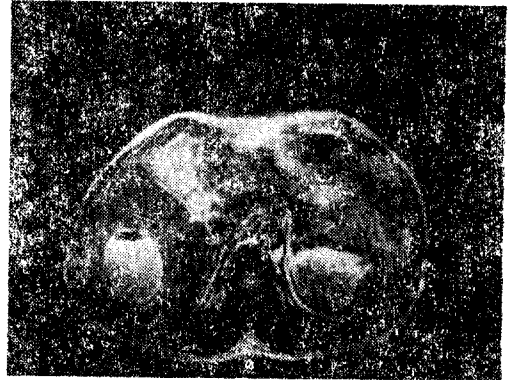


그림 14-a. 간 환자 영상.  
 왼쪽 등근 흰부위는 간암세포의 분포를 의미한다.

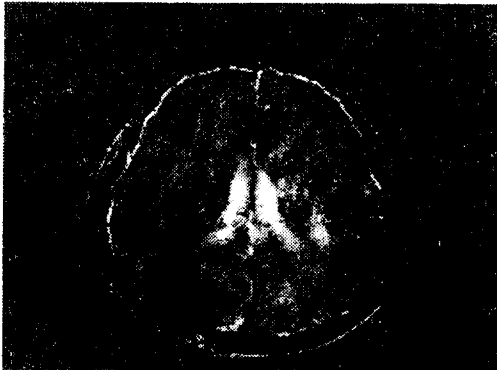


그림 13. Diffusion 영상.  
 머리부분의 확산계수의 분포가 선명하다.  
 밝은 부분은 확산계수가 큼을, 어두운 부분은 확산계수가 작음을 의미한다.



그림 14-b. 척추 환자 영상.  
 척추가 흰부분에 척추 결핵의 진척 상태를 볼 수 있다.

로 출입으로서 NMR-CT의 단점을 보완하고 움직이는 부분(심장, 호흡기)의 영상에 획기적인 계기가 마련되리라 생각된다(그림 8).

또한 심장이나 호흡기 부분등의 움직이는 부분에는 초고속 영상법 이외에 심전기(ECG)을 사용한 고해상도 영상을 얻는 것도 기대된다(그림 9).

인체내의 유속 즉 혈류속도를 측정하여 영상화하는 방법은 그동안 본 연구실에서 획기적인 개발이 거듭되어 동맥의 빠른 유속도 영상시간의 연장없이 측정할 수 있는 방법이 이미 수명식 자석에서도 실험되어 발표된 바 있다. 이 방법은 초전도 NMR-CT에 확장하면 심장 근처의 빠른 피의 속도를 보다 정확히 영상화할 수 있다(그림 10). NMR-CT 유속 영상법은 단순히 어느 특정부분의 유속 특징에 그치지 않고 전체적인

유속을 영상화하는 것이므로 유속역학 연구에도 새로운 방법으로 활용될 수 있으며 현재 과학기술원 기계공학과 관련 연구실과 함께 활발한 연구가 진행중이다. 또한 초전도 자석의 도입으로 가능해진 영상분야는 perfusion Diffusion Mapping이다. perfusion이란 그림(11)과 같이 모세혈관을 따라 흐르는 피의 random flow을 의미하는데 모세혈관에 대한 정보를 제공해 줄 것이며(그림 12), 몸을 이루는 각 부분의 확산 계수(Diffusion Constant)을 영상화함으로써 인체의 생리적 기능적 역할을 알려줌으로서 신체의 상태를 측정하는데 큰 도움이 되리라 생각한다(그림 13).

얻을 수 있다는 점 때문에 NMR-CT에서 많은 각광을 받고 있다.

#### 4. 결 론

이외에도 초전도 자석의 잇점을 이용하기 위한 여러 가지 영상기법에 대한 연구가 진행되고 있고 본 연구실의 꾸준한 노력으로 지금까지 생각지 못하던 다량의 정보를 얻을 수 있으리라 생각하며 실제 업무를 담당하고 있는 의사들과의 임상학적인 공동 연구가 필수적인 관계로 본 연구팀은 서울대, 한양대학등과 임상학적인 실험을 통해 여러 정보들에 대한 교류가 이루어지고 있다(그림 14).

초전도 자석을 이용한 핵자기 공명 CT는 수냉식 자석을 이용한 CT와 비교해 영상의 고해상 능력뿐만 아니라 다량의 임상학적인 정보를 훨씬 더 선명하게

#### 참 고 문 헌

- 1) Derek Shaw: "Fourier Transform N.M.R. Spectroscopy"
- 2) P. Mansfield "NMR Imaging in Biomedicine"
- 3) Chang Beom Ahn: "A study on perfusion and Diffusion Process By NMR Imaging Techniques"
- 4) P. Lauterbur: "Image function by Induced Local Interaction: Examples Employing" Nature, Vol. 242, pp.190, 1973