

3T MRI에서 흡수영역의 변화에 따른 Birdcage Resonator의 개발

*가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, †서울대학교 의과대학 방사선종양학교실

이정우* · 최보영* · 윤성익* · 이형구* · 서태석* · 허순녕†

목적: 인체에 비해 크기가 작은 동물의 자기공명영상을 획득하기 위하여 현재 사용되고 있는 Head 코일보다 원통 반지름이 작은 Low-pass Filter 형태의 Birdcage Resonator를 제작하여 보다 큰 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)를 획득함으로써 고해상도의 영상을 얻고자 하였다.

방법: 원통형의 아크릴과 구리테이프를 사용하여 각각 내경 지름이 13 cm, 15 cm이고, 길이 30 cm, 12개의 element를 가진 동물용 Low-pass Filter 형태의 Birdcage Resonator를 각각 제작하였고, 자기공명영상을 얻기 위하여 Spin Echo Pulse Sequence와 Fast Spin Echo Pulse Sequence를 사용하였다. 제작된 Birdcage Resonator는 실험적 수치와 팬텀과 동물에 대한 MR영상으로 그 가치를 평가하였다.

결과: 대상물의 크기에 따른 SNR을 비교하기 위하여 다양한 크기의 코일을 이용하여 각각의 팬텀 영상을 획득하였다. 팬텀 영상으로부터 측정된 SNR의 값을 통해 코일의 크기에 대한 대상물의 크기를 알 수 있었다.

토의 및 결론: 본 연구를 통하여 같은 형태의 Birdcage Resonator일 경우 대상물의 크기에 따라 SNR이 다르며, 특히 대상물의 크기가 코일 크기의 40~80% 정도일 때 SNR이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서 코일의 크기에 비해 촬영하고자 하는 대상물의 부피가 작은 경우 대상물의 부피에 맞추어 코일을 제작하면 SNR이 보다 뛰어난 영상을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

중심단어: 새장형 공명장치, 3테슬러, 신호대잡음비

서 론

고자장 3T 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging: MRI) 시스템에서 기존의 1.5T MRI에 비하여 작은 Field-of-view (FOV)에서 보다 향상된 해상도와 높은 Signal-to-Noise Ratio (SNR)를 이용하여 고해상도의 영상을 얻어낼 수 있다. 이러한 장점을 이용하여 인체에 비해 크기가 작은 동물의 고해상도 MR 영상을 획득하기 위해서는 적절한 크기의 RF Resonator를 사용하는 것이 중요하다.

MRI 장비의 주요 구성요소 중 Radio Frequency (RF) Resonator는 자기공명현상을 직접 일으키고 인체 내에서 감지되는 자기공명신호를 받아들이는 역할을 하는 일종의 안테나 장치이다. 인덕턴스(L)와 커패시턴스(C), LC 공진 현상을 이용하는 RF 코일은 현재까지 용도와 기능에 따라 여

러 가지 형태로 개발되어 오고 있다.

그 중에서 특히 인체 Head용으로 쓰이고 있는 RF 코일로서 Birdcage Resonator 형태가 주종을 이루고 있다. Birdcage Resonator는 자장 균질성이 뛰어나고 SNR이 좋아 MRI에 유용하게 사용되고 있다.¹⁻³⁾ 원하는 주파수(127.73 MHz, 3T)에서 공명을 일으키는 코일을 제작하기 위해서는 주파수에 해당하는 값을 가지는 L, C가 필수성분이며 LC 공진 회로를 통해 코일을 설계한다. 공명주파수의 조절은 인덕턴스 값의 조절이 어렵기 때문에 대부분 커패시터 값의 조절로써 이루어진다. 즉, 원하는 주파수에 해당하는 커패시터가 반드시 코일에 장착되어야만 자기공명신호를 보내고 받게(Two way system)되는 것이다.⁴⁻⁸⁾ 따라서 RF field homogeneity와 코일 filling factor는 SNR에 직접적인 영향을 주기 때문에 Resolution의 제한요인이 된다. 높은 Quality (Q) factor 역시 SNR을 최대화하는데 아주 중요한 역할을 한다. 즉 Q factor가 높으면 높을수록 높은 SNR을 얻을 수 있다. 또한 SNR을 높이고 공간 해상도의 향상을 위하여 모든 자기공명 연구는 고자장을 선호하고 있다. 그러나 고자장으로 갈수록 Susceptibility의 문제가 더욱 대두된다.^{9,10)}

이러한 다양한 요소와 함께 RF resonator 내 흡수영역의 변화, 즉 대상물의 크기에 따른 요인도 해상도에 중요한 영

본 연구는 2002년도 한국과학재단 목적기초연구사업(과제번호: R01-2002-000-00294-0 (2002)) 지원아래 수행되었다.
이 논문은 2004년 2월 27일 접수하여 2004년 3월 10일 채택되었음.
책임저자 : 최보영, (137-701) 서울시 서초구 반포동 505번지
가톨릭대학교 의과대학 의공학교실
Tel: 02)590-2427, Fax: 02)590-2425
E-mail: bychoe@catholic.ac.kr

향을 미친다. 대상물이 RF resonator에 비해 너무 크거나 작으면 자장균일도나 SNR, Q factor가 일정하지 못하기 때문에 고해상도를 얻을 수 없다. 따라서 대상물의 크기에 따라 자장균일도와 높은 Q factor를 유지하면서 특정 주파수에서 작동하는 RF resonator를 만드는 것이 중요하다.

본 연구에서 실험대상에 따른 다양한 크기의 Birdcage Resonator 제작 시 Low-pass Filter 형태를 적용하였고, Lumped Element Circuit 분석을 통해 capacitor 값, inductor 값 등을 구하여 적용함으로써 고해상도의 영상을 획득할 수 있는 코일을 개발하고자 하였다.

재료 및 방법

Magnum 3.0T (Madinus Co, Korea) MRI scanner를 사용하였고, 실질적인 개발에 앞서 Simulation (MRIEM)을 통한 1차적인 예비과정을 통해 분석 후 직접 제작하였다. 제작된 Birdcage Resonator의 종류는 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 기본적으로 Low-Pass Filter를 적용한 12-element 구조이며 Transceive type이다.

원통형 아크릴에 구리테이프를 부착시켜 RF 신호를 주고 받을 수 있도록 가변 커패시터를 이용하여 channel별로 matching시켰다. Network Analyzer (HP 4195A, USA)를 이용하여 Tuning과 matching을 끝낸 후 return loss의 실험적인 데이터 수치를 구하였다(Table 1).^{10,11)}

직접 제작한 Birdcage Resonator는 Fig. 1에 보이는 구조와 같이 반경이 7.5 cm의 원통형 아크릴을 사용하였고, 원통의 두께는 5 mm이다. 총 12개의 element로 이루어져 있으며, 두께 0.05 mm, 폭 10 mm, 길이 22 cm의 구리테이프를 사용하였다. Elements의 양쪽 끝을 둘러싼 Ring 역시 폭 10 mm의 동일한 구리테이프를 사용하였다. 제작된 모든 Birdcage Resonator의 모양은 이러한 형태를 이룬다.

실험에 사용된 팬텀으로는 지름이 8 cm인 오렌지와 지름이 4 cm인 꿀을 사용하였고, 팬텀과 동물의 영상을 얻기 위해 사용된 Sequence는 다음과 같다. 오렌지의 영상은 Spin echo pulse sequence를 사용하여 T1 Weighted Image를 얻었으며, 매개변수는 TR/TE=500/17 ms, Matrix size=256×256, Field of view (FOV)=100×100 mm, Thickness=6 mm, Ave=3이었고, 꿀의 영상은 Fast spin echo pulse sequence를 사용하여 T2 Weighted Image를 얻었으며, TR/TE=3500/96 ms, Matrix size=192×256, FOV=67×90 mm, Thickness=4 mm, Ave=3를 사용하였다.

Birdcage Resonator의 각각의 직경과 element의 길이는 다음과 같다. 1) 직경 13 cm, element의 길이 22 cm, 2) 직경 15 cm, element의 길이 22 cm, 3) 직경 17 cm, element의 길이 25 cm의 3가지 형태로 제작하였다.

실험에 사용된 동물은 가톨릭의과대학 연구원 동물실험실에서 사육한 Otsuka Long-Evans Tokushima Fatty (OLETF) Rat으로서 Abdominal Fat 측정을 위해 사육되었으며, MRI

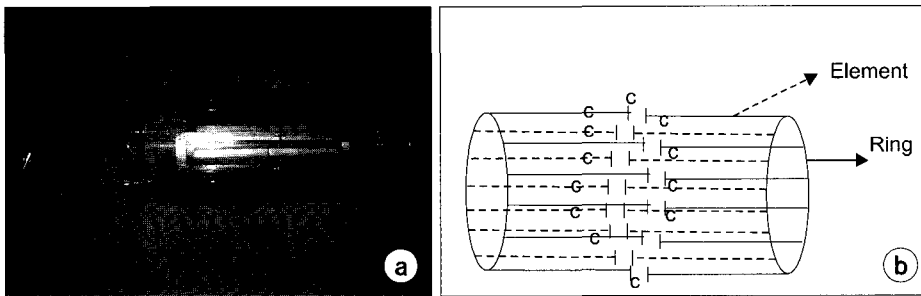


Fig. 1. (a) Picture of birdcage resonator, (b) Illustration of birdcage resonator.

Table 1. Measurements of return loss in birdcage resonator of diameter 15 cm. The phantoms were used diameter 11.84 cm (79%) and 9.23 cm (61%) respectively. The solutions were made with NaCl.

	None		11.84 cm		9.23 cm	
	S11	S22	S11	S22	S11	S22
Unload	-15.948	-16.592	-	-	-	-
Load	-	-	-8.0713	-7.5635	-11.295	-10.553

촬영을 위하여 마취를 하였다. 마취할 때 사용된 약품은 ketamin hydrochloride였으며 용량은 80 mg/kg이었다.

결 과

제작된 12 Elements를 가진 Birdcage Resonator는 7개의 공명 Mode가 나타남을 볼 수 있다(Fig. 2). 7개의 Mode 가운데 가장 균일한 B1 자기장을 형성하는 두 번째 Mode (Mode 1)를 3T 공명주파수(127.73 MHz)에 Tuning시켰다.¹¹⁻¹³⁾

이러한 작업을 마친 Birdcage Resonator에서 먼저 꿀을 대상으로 하여 획득한 영상이 Fig. 3에서 보여진다. Birdcage Resonator의 지름이 15 cm이므로 Birdcage Resonator 내에서 꿀이 차지하는 비율은 27% 정도가 된다. 획득한 영상에 나

타나듯이 artifact가 생기는 것을 볼 수 있다. 이때의 Q값은 53.2, SNR은 150.7이었다.¹⁴⁾

다음에 Orange를 대상으로 하여 획득한 영상이 Fig. 4에서 보여진다. Birdcage Resonator의 지름이 15 cm이므로 Orange가 차지하는 비율은 53% 정도가 된다. 꿀의 영상에서 나타나던 artifact가 사라짐을 볼 수 있고 높은 SNR과 Q값으로 인해 고해상도의 영상을 획득할 수 있었다. 이때의 Q값은 91.2, SNR은 212.8이었다.

이와 같이 Birdcage Resonator에서 대상물질이 차지하는 비율이 40~80% 정도일 때 SNR, Q값 등이 최적의 상태를 알수 있었으며, OLETF Rat의 T1 Weighted Image (Fig. 5)에서 보이는 바와 같이 높은 SNR, Q값으로 인해 복강장치에 대한 해부학적 정보를 명확히 얻을 수 있으며, Rat의 비만을 측정하는데 보다 정확한 data를 얻을 수 있다.

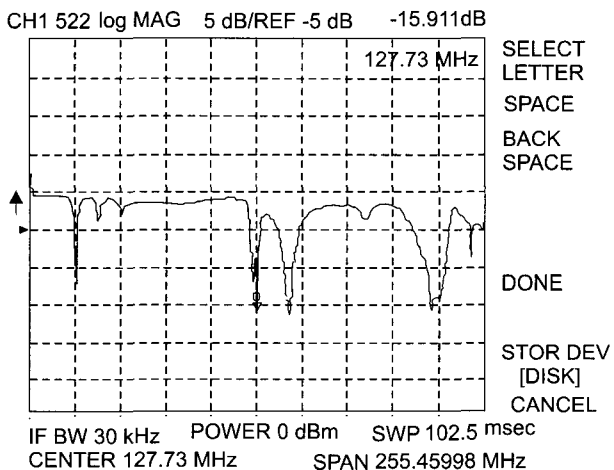


Fig. 2. 7-mode were demonstrated in unloaded and unmatched.

결 론

실제 제작 전에 Simulation을 통해 여러 Parameter들을 이론적으로 계산할 수 있었으며, Birdcage Resonator를 제작하여 실험적인 분석을 다시 한 결과 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 그 이유는 이론적인 계산에서는 생각되지 않았던 요인들이 실제 제작에 있어서는 많은 영향을 주었기 때문인 것이다. Network Analyzer를 통한 실험적인 분석 후에도 실제의 Magnet Field 내에서 또 다시 차이가 나는 것 또한 같은 이유에서이다. 그러므로 Birdcage Resonator 제작에 있어서 구리테이프의 유전율이나 회로상의 Coupling 문제, Magnet Field 내에서 코일 부품의 Suceptability, Channel간의 Isolation 등 많은 요인들을 충분히 고려하여야 할 것이다.

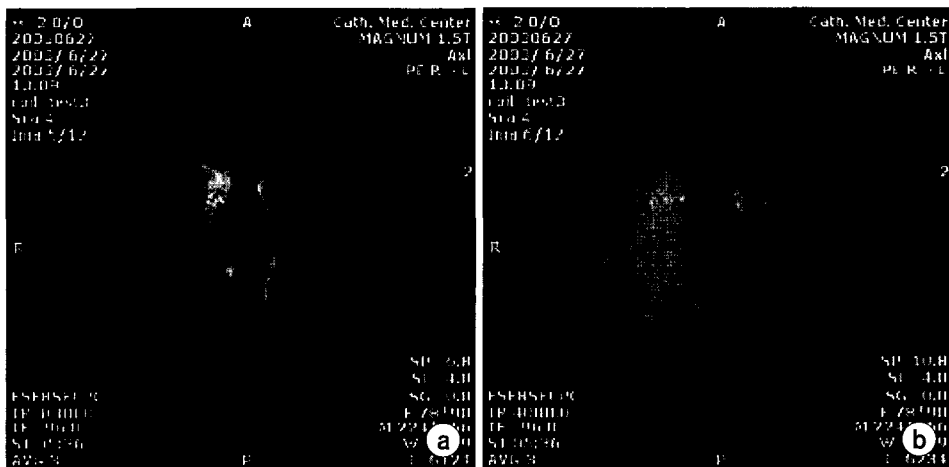


Fig. 3. Oriental orange (Diameter 4 cm), T2 Weighted image, TR=4,000 ms, TE=96 ms, Ave=3. (a) Artifact on the top and signal diminution on the edge in the image. (b) Artifact on the top and signal diminution on the left side in the image.

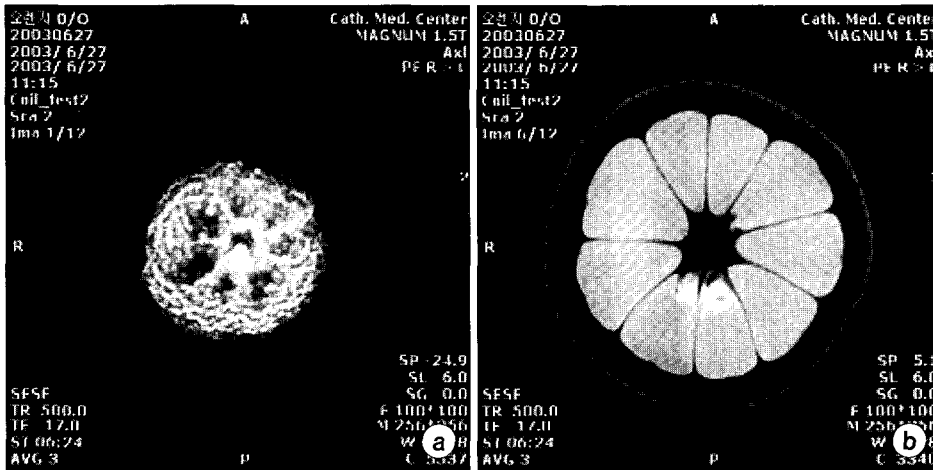


Fig. 4. Orange (Diameter 8 cm), T1 Weighted Image, TR=500 ms, TE=17 ms, Ave=3. (a) A slice of the orange peel. (b) A slice of the orange with seed.

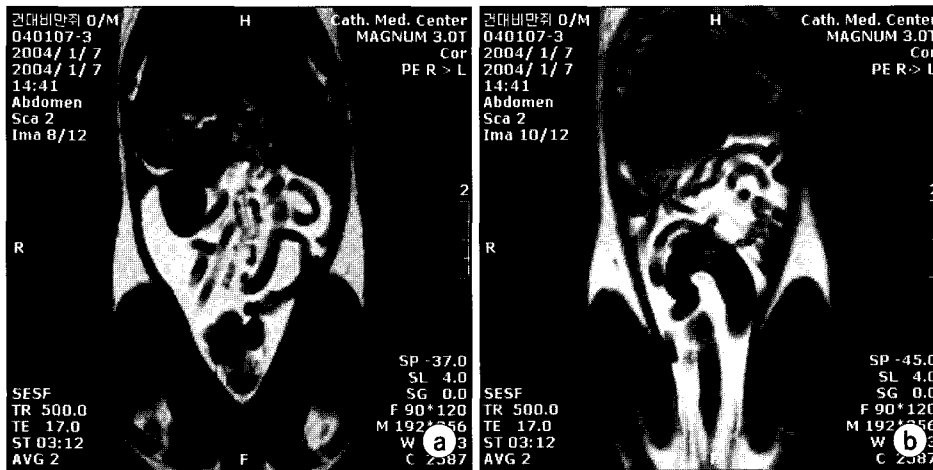


Fig. 5. OLETf rat, T1 weighted image, TR=500 ms, TE=17 ms, Ave=2. (a) Internal organs (liver, lung, paunch, etc.) can be seen, (b) Internal organs and bladder etc. can be seen.

다양한 Birdcage Resonator를 제작하여 흡수영역에 따른 영상들을 비교하여 본 결과 코일 내에 대상물이 차지하는 비율에 따라 SNR과 Q값이 차이 난다는 것을 알 수 있다. 코일 내에 대상물이 일정 비율을 차지할 때 높은 SNR과 Q값을 가지며 고해상도의 영상을 획득할 수 있음을 알 수 있다.

최근 동물 임상분야에서 새로운 진단 Modality로써 MRI가 대두되고 있다. 새로운 약물, 치료 방법의 연구 개발에 있어서 동물실험을 통해 그것들의 효용성이나 연구의 신뢰도를 사람에게 적용하기 전에 안전도를 점검하는 것은 필수적으로 수반되는 과정이다. 이때, 높은 SNR을 갖는 고자장의 MRI를 이용한 동물영상을 이용한다면 연구에 큰 도움이 될 것이다. 그러나 사람에 비해 부피가 훨씬 작은 동물임에도 불구하고 대상물에 비해 지나치게 큰 인체용 코

일을 그대로 사용해 왔다. 이로 인해 대상물이 차지한 공간 이외의 배경 공간에서 잡음이 발생하여 영상의 질에 많은 영향을 끼치게 되었다. 따라서 고해상도의 동물영상을 얻기 위해서는 다양한 크기의 동물용 코일을 개발하는 것이 절실히 요구되고 있는 상황이다.

현재 고자장 Whole body scanner는 높아진 SNR, 향상된 공간 해상도와 영상대조도를 통해 중추신경계나 fMRI 연구에 주로 사용되고 있다. 또한 이 연구의 결과를 이용하여 고자장의 높은 SNR을 이용한 동물용 코일의 개발은 부피가 작은 대상물에 대한 MRA, MRS 연구에도 유용하게 사용됨으로써 수의임상진단의 영역을 획기적으로 확대시키는 결정적 역할을 할 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

1. Harpen MD: Equivalent circuit for birdcage resonators. *Magn Reson Med* 29:263-268 (1993)
2. Harpen MD: Cylindrical coils near self-resonance. *Magn Reson Med* 30:489-493 (1993)
3. Wen H, Ghesnick AS, Balaban RS: The design and test of a new volume coil for high field imaging. *Magn Reson Med* 32:492-498 (1994)
4. Jin J: Electromagnetic analysis and design in magnetic resonance imaging. 1st ed. CRC, press 24:243-252 (1999)
5. Leifer MC: Resonant modes of the birdcage coil. *J Magn Reson* 124:51-60 (1997)
6. Jin J, Shen G, Porkins T: On the field inhomogeneity of a birdcage coil. *Magn Reson Med* 32:418-422 (1994)
7. Leifer MC: Theory of the quadrature elliptic birdcage coil. *Magn Reson Med* 38:726-732 (1992)
8. Pascone RJ, Garcia BJ, Fitzgerald TM, Vullo T, Zipagan R, Cahill PT: Generalized electrical analysis of low-pass and high-pass birdcage resonators. *Magn Reson Imaging* 9:395-408 (1991)
9. Bowtell RW, Peters A, Sharp JC, et al: NMR microscopy of single neurons using spin echo and line narrowed 2DFT imaging. *Magn Reson Med* 33:790-794 (1995)
10. Callaghan PT: Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy. Clarendon Press, Oxford (1991)
11. Pascone R, Vullo T, Farrelly J, Mancuso R, Cahill PT: Use of transmission line analysis for multi-tuning of birdcage resonators. *Magn Reson Imaging* 11:705-715 (1993)
12. Hoult DI, Richards RE: Department of biochemistry, university of oxford. The signal-to-noise ratio of the nuclear magnetic resonance experiment. *Magn Reson* 24:71-85 (1976)
13. Vaughan JT, Hetherington HP, Otu JO, Pan JW, Pohost GM: High frequency volume coils for clinical NMR imaging and spectroscopy. *Magn Reson Med* 1994 32:206-18 (1993)
14. Harpen MD: Radiative losses of a birdcage resonator. *Magn Reson Med* 29:713-716 (1993)

Development of Birdcage Resonator for Various Absorption Regions at 3T

Jung-Woo Lee*, Bo-Young Choe*, Sung-Ik Yoon*, Hyung-Koo Lee*,
Tae-Suk Suh*, and Soon-Nyoung Huh†

*Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, The Catholic University of Korea,

†Department of Radiation Oncology, Seoul National University Hospital

The aim of this study was to develop special birdcage resonators for small objects including the human wrist, hand and small animals, using 3T MRI/MRS. Before substantial development, different types of parameters were arranged, based on theoretical analysis, through lumped element transmission line theory. The primary analysis was performed with a network analyzer (HP 4195A) and the final experimental analysis was carried out with 3T MRI (Medinus, Korea). The manufactured birdcage resonator is typically composed of 12-element structures to which a low-pass filter is fundamentally applied. The diameter and length of each element of the birdcage resonator were as follows: (1) diameter 13 cm, length of element 22 cm, (2) diameter 15 cm, length of element 22 cm, and (3) diameter 17 cm, length of element 25 cm. Copper tape with a width of 1 cm was used for the coils. MRI acquisition parameters were TR=500 ms, TE=17 ms, and Ave=2 for T1-WT images, and TR=4,000 ms, TE=96 ms, and Ave=2 for T2-WT images. The ratio of the samples diameter to the birdcage resonators diameter was approximately 55%, 63% and 70%, respectively, for the three elements. This study determined that the best image quality and S/N ratio were obtained when the ratio of the object's diameter was approximately 50~80%. A general theoretical analysis of the birdcage coil differs in many respects from the experimental results which were influenced by many factors that were not considering when the general theoretical analysis of the birdcage coil was performed. The induced resistance may be considered as part of the resistive loss if the quantitative value can be determined using a radiation resistance approach.

Key Words: Birdcage resonator, 3T, Signal-to-Noise Ratio (SNR)