

자기공명영상을 이용한 수삼의 이완상수(T_1 , T_2^*) 계산 Relaxation Time Constant(T_1 , T_2^*) Calculation of Fresh Ginseng(*Panax ginseng* C.A. Meyer) using Magnetic Resonance Imaging

김철수*	이승조	김성민*
정회원		정회원
CS Kim	SJ Lee	SM Kim

서론

NMR(Nuclear Magnetic Resonance: 핵자기공명)은 외부의 강한 자기장하에서 물질을 구성하고 있는 원자들이 각 원자의 구조에 따라 서로 다른 공명신호를 발생시키는 현상으로 이를 이용하여 분자단위에서 모든 물질의 성분, 구조, 대사상태등에 관한 정보를 알아내는 방법으로 이용되며, 농업, 화학, 생물등의 분야에서 NMR을 이용한 연구가 50년 넘게 널리 이루어져 왔다. NMR의 가장 큰 장점으로서는 대상물에 손상을 가하지 않고 화학적, 물리적 성분에 대한 정보를 정밀하고 정확하게 측정할 수 있으며, 시료에 특별한 제약이 없고, 생물체의 경우 거의 대부분에 활용이 가능하다. 또한 대상물의 특정 원소에 대한 정보를 선택적으로 얻을 수 있다는 것이다. MRI(magnetic Resonance Image: 자기공명영상)는 2차원 MRS(Magnetic Resonance Spectroscopy: 자기공명분광)의 진보된 기술로 시료로부터 공간 위치의 함수로서 NMR 특성을 측정하는 것을 말한다. 하지만, MRS에 비해 장비의 높은 가격과 사용의 어려움으로 인해 최근까지 의료등 한정된 분야에 이용되어 왔으나, 컴퓨터 기술의 발달과 저가의 장비개발로 인해 점차 그 활용분야가 넓어지고 있으며, 농산물을 대상으로 한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다.¹⁾

MRI에서 이완 상수인 스핀-격자 이완시간(T_1)과 스핀-스핀 이완 시간(T_2) 그리고 프로톤 밀도(ρ)는 대상물의 상태에 따라 변하는 중요한 영상농도변화 인자들로써 T_1 , T_2 의 측정은 NMR 연구에 기초가 되는 것이다. MRI 이용한 T_1 , T_2 의 계산에 대해서도 많은 연구가 이루어져왔으며, MRI를 이용할 경우 영상위치에 따라 선택적으로 T_1 , T_2 를 얻기가 용이하며, 공간적 변화에 따른 T_1 , T_2 의 변화를 파악하기 쉬운 장점이 있다. 김(1999)은 MRI를 이용 소고기의 각부위에 따라 T_1 , T_2^* 를 계산하여 부위별로 T_2^* 값의 차이가 있음을 보여주었다. (여기서 T_2^* 는 시료내의 국소적 자기장의 변화에 의한 T_2 로 일반적으로 $T_2 > T_2^*$ 이다.)

* 전북대학교 농과대학 생물자원시스템공학부 생물자원기계공학전공(농업과학기술연구소)

인삼류에 대해서도 NMR을 이용한 연구가 이루어지고 있어서 장등(1998)은 MRS로 홍삼의 T_1 , T_2^* 를 측정하여 용적밀도와 상호관계를 규명하고, 불량홍삼과 정상홍삼의 MRI를 이용 내부 조직등을 판별하였으나, 아직까지 인삼류를 대상으로 MRI를 이용한 연구는 초기단계이다.

수삼은 재배지에서 수확후 가공하지 않은 것으로 약 70 % 정도의 수분을 함유하고 있으며, 인삼제품(백삼, 홍삼, 태극삼)의 원료가 되거나, 직접 소비된다. 재배기간은 대략 4~6년이고 특히 6년근 수삼은 대부분 홍삼의 원료가 되며, 홍삼으로 가공시 국내에서 재배되는 어느 농산물 보다 높은 부가가치를 가진다. 이러한 홍삼의 정밀하고, 정확한 품질 판정을 위하여 최신기술인 NMR을 이용 홍삼 품질판정 기술의 개발을 최종목표로 하며, 본 연구에서는 홍삼의 원료인 6년근 수삼의 T_1 , T_2^* 를 계산하고, 수삼의 조직상태와 T_1 , T_2^* 의 연관성을 찾아 향후 홍삼 연구를 위한 기초자료를 얻고자 한다.

재료 및 방법

가. 인삼 재료

부여 고려인삼장에서 전문가에 의해 분류된 6년근 불량수삼(내공삼) 1편(片)과 6년근 정상삼 3편(片)(정상삼 1~정상삼 3)을 시료로 사용하였다.

나. MRI 장비

(주) 카이에서 보유하고 있는 의료용 전신 촬영 1.5Tesla MRI(ISAAC 1.5T, CHI, korea)를 사용하였으며, 내공삼의 촬영에는 무릎(knee) 코일, 정상삼의 촬영에는 머리(head) 코일이 사용되었다. MRI 장비에 대한 자세한 재원은 표 1에 나와있다. 촬영시 시료대를 별도로 제

표 1. MRI 장비의 재원

System	ISAAC 1.5T
Magnet	actively-shielded oxford super conducting magnet
Field strength	1.5 Tesla
Shim	active shim coil(8 channel) & passive shim(iron) 2 nd order shim for MR spectroscopy
Dimension	2324(H) × 1585(L) × 1970(W) mm
Patient gap	60 cm

작하여 수삼이 코일의 중앙에 위치하도록 했다. 자기공명영상을 얻기 위해 스핀-에코 펄스 파형(spin-echo pulse sequence)를 사용하였으며, 영상영역(Field Of View, FOV)은 70mm × 70mm, 슬라이스 두께(slice thickness)는 5mm, 영상면(image direction)은 횡단면(axial), 여기횟수(average)는 3회(내공삼), 6회(정상삼), 이미지 크기(image size)는 256 x 256 픽셀(pixel), 해상도(resolution)는 0.27(^{mm}/pixel)이었다. 그림 1에서 보듯이 슬라이스 위치는 뇌두로부터 약 1.5cm 떨어진 부분으로부터 시작했으며, 슬라이스 간격(slice gap)은 5mm 로 하였다.

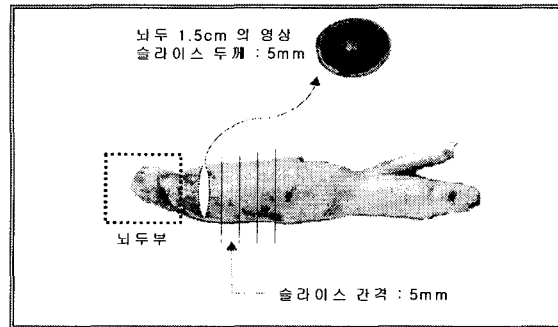


그림 1. 내공삼의 슬라이스 두께 및 간격

Imaging Average : 6 FOVx/ FOVy : 70/70				
Resolution : 0.27(mm/pix) Total Slices : 7 Scaler : 0.3 TE : 12 고정				
TR : 50	120	200	400	700
Imaging Average : 6 FOVx/ FOVy : 70/70				
Resolution : 0.27(mm/pix) Total Slices : 7 Scaler : 0.3 TR : 700 고정				
TE : 12	25	40	70	100

그림 2. 정상삼의 TR, TE 변화에 따른 영상

다. T_1 , T_2^* 계산방법

스핀-에코 펄스파형 이용하여 얻은 MRI 신호 $S(t)$ 는 T_1 , T_2^* 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(t) = \sum_i (\rho_i \exp(-TE/T_{2i}^*) (1 - \exp(-TR/T_{1i}))) \text{-----(1)}$$

여기서 i 는 화학성분을 나타내는 지수이고, ρ_i 는 프로톤 밀도를 나타낸다. 또한, TE(echo time, 에코시간)는 스핀에코파형에서 90° 펄스의 중앙과 에코의 중앙 사이의 시간간격이고, TR(repetition time, 반복시간)은 특정 조직 부위에서 펄스파형의 시작에서 다음 펄스파형의 시작까지의 기간으로 TR과 TE를 변경하여 MR 영상의 영상농도를 변화시킬 수 있다. $i=1$ 이라 하고 TE가 상수라고 하면 식 (1)을 식 (2)으로 다시 나타낼 수 있으며 TR이 상수라고 하면 식 (3)를 얻을 수 있다.

$$S(t) = M_0(1 - \exp(-TR/T_1)) \text{-----} (2)$$

$$S(t) = M_0(\exp(-TE/T_2^*)) \text{-----} (3)$$

여기서 M_0 는 총자화를 나타내는 상수이다.

TE, TR 변화에 따른 $S(t)$ 값을 이용, 곡선의 근사(curve fitting)를 통해 T_1 과 T_2^* 를 계산하였다.

T_1 을 계산하기 위해 TE를 고정하고, TR을 변화시켰으며, T_2^* 를 계산하기 위해 TR은 고정하고 TE를 변화시켜 값을 계산하였다. 그림 2는 정상삼의 TR, TE 변화에 따른 자기공명 영상을 나타낸 것으로 시각적 편의를 위해 이미지를 반전시킨 것이다. TR이 증가함에 따라 노이즈는 점차 감소하고 영상농도, 해상도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 대상체의 모든 부분의 영상농도가 동일하게 증가하지 않고, 조직에 따라 영상농도 변화의 차이가 발생하며, TE 변화의 경우 TR 변화와는 반대의 효과가 발생한다. 정상삼, 내공삼 슬라이스 2, 3은 인삼 내부의 자기공명영상을 명암의 차이가 보이는 세 그룹(중심층, 중간층, 표피층)으로 나누었고, 내공삼 슬라이스 1, 4, 5 경우 내공주위 조직이 다른 부위와 구분이 되어 네 그룹(내공주위 영역, 중심층, 중간층, 표피층)으로 나누었다. 각 그룹 별로 2~12개의 계산 영역을 설정하였다. 그림 3은 정상삼과 내공삼의 각 그룹과 그룹내 계산영역의 예를 보여주는 것이다. 이때 계산 영역은 9×9 픽셀로 하였으며, 이 계산 영역 내에서 3×3 이동평균법을 이용하여 49 세트(set)의 값을 얻었다. 1세트 당 TR 변화에 따른 영상농도 데이터(intensity data)와 TE 변화에 따른 영상농도 데이터를 이용하여 T_1 , T_2^* 를 계산하였으며, T_2^* 가 T_1 보다 큰 경우는 없으므로 계산된 T_2^* 가 T_1 보다 큰 경우를 제외한 값들의 평균값을 계산 영역의 T_1 , T_2^* 값으로 하였다. 사용한 소프트웨어는 Matlab(version 5.0 for window, Matworks)를 이용하였으며, 그림 4와 그림 5는 Matlab을 이용하여 T_1 과 T_2^* 를 계산하는 과정을 나타내는 GUI의 예를 보여주고 있는 것으로 시각적 편의를 위해 이미지를 반전시킨 것이다.

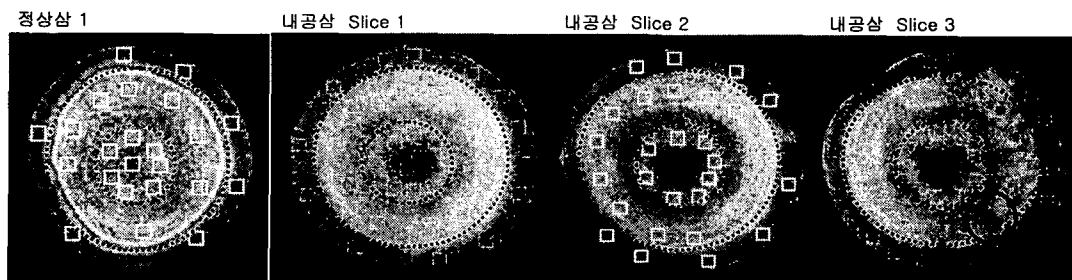


그림 3. 정상삼과 내공삼의 T_1 , T_2^* 를 계산하기 위한 선택영역

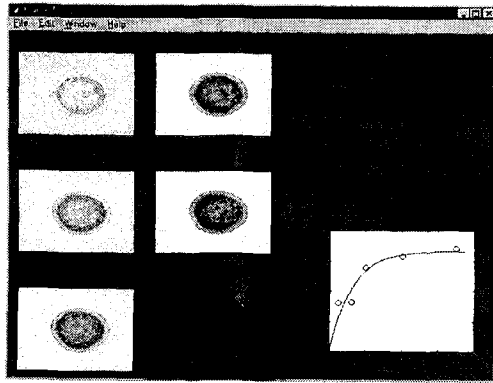


그림 4. T₁ 계산의 예

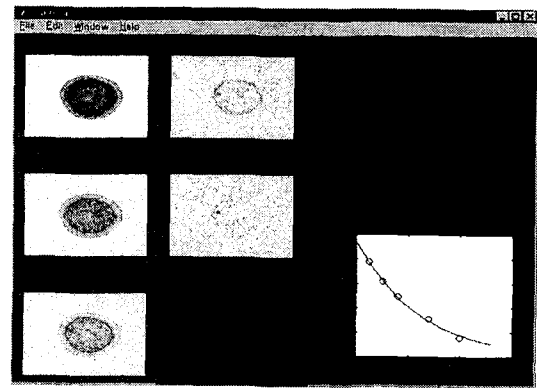


그림 5. T₂* 계산의 예

결과 및 고찰

표 2와 그림 6에서 보듯이 내공삼의 T₁ 값은 내공주위 영역 > 표피층, 중심층 > 중간층 순으로 높았으며, 그림 7에서 보듯이 T₂* 값의 경우 그룹간의 경향을 파악하기 어려우나, 내공주위 영역의 T₂*는 T₁과 동일하게 다른 그룹들에 비해 가장 높았다. 본 실험에 사용된 내공삼의 내공 주위 영역은 육안확인 결과 멍(bruise)은 확인되지 않았으나, 내공 주위로 조직이 스펀지 같았다. 내공삼 슬라이스 3의 조직이상이 뚜렷이 보이는 부분(그림 3의 슬라이스 3의 실선부분)의 T₁값은 143.83(ms)(표준편차: 13.39), T₂*값은 132.16(ms)(표준편차: 9.68)으로 나타났으나, T₁, T₂* 계산시 49개의 데이터중 유효한 데이터가 2개에 불과하여 T₁, T₂* 값을 다른 그룹과 비교하여 특성을 결론 내리기는 어렵다. 그러나, 정상조직에 비하여 유효한 데이터가 적다는 것은 영상농도의 변화가 비정상적인 것으로 생각할 수 있으며, 향후 다른 샘플을 대상으로 유사한 조직상태에서 이와 동일한 결과를 나타내는지에 대해서는 앞으로 연구를 계속 하고자 한다.

표 2. 내공삼의 그룹별 및 슬라이스 별 T₁, T₂* 계산 결과

		내공주위 영역		중심층		중간층		표피층	
		mean	S.D	mean	S.D	mean	S.D	mean	S.D
slice 1	T ₂ *	149.71	4.54	135.43	7.83	109.17	9.05	108.87	6.54
	T ₁	229.08	1.08	168.89	12.86	122.99	8.24	177.96	16.34
slice 2	T ₂ *			136.69	8.59	109.54	5.60	117.14	13.46
	T ₁			168.74	14.66	122.66	6.34	185.13	14.38
slice 3	T ₂ *			117.15	9.83	112.23	10.92	135.62	23.29
	T ₁			155.77	17.69	132.85	13.14	177.09	21.68
slice 4	T ₂ *	168.08	9.14	118.80	5.73	115.23	5.51	112.99	8.56
	T ₁	221.76	0.27	159.78	8.61	127.39	8.03	170.30	24.74
slice 5	T ₂ *	160.63	21.93	120.72	3.27	114.39	9.86	114.41	7.78
	T ₁	218.61	31.56	165.52	10.89	129.77	14.46	172.01	22.65
total	T ₂ *	159.47	9.23	125.75	9.49	112.11	2.74	117.80	10.39
	T ₁	223.14	5.37	163.74	5.78	127.13	4.38	176.49	5.82

표 3. 정상삼의 그룹별 T_1 , T_2^* 계산 결과

		중심층		중간층		표피층	
		mean	S.D	mean	S.D	mean	S.D
정상삼 1	T_2^*	74.10	4.53	64.89	4.10	81.35	9.79
	T_1	117.05	16.18	93.52	10.48	128.21	12.52
정상삼 2	T_2^*	75.14	3.33	73.12	4.34	71.72	5.30
	T_1	129.75	7.54	94.11	7.41	120.18	12.33
정상삼 3	T_2^*	77.64	6.19	72.98	2.32	74.37	4.90
	T_1	126.93	18.81	107.83	17.58	109.45	17.72
total	T_2^*	75.62	1.81	70.33	4.71	75.81	4.97
	T_1	124.57	6.66	98.48	8.09	119.28	9.41

표 3과 그림 8, 그림 9는 정상삼 1~정상삼 3의 T_1 , T_2^* 를 나타낸 것으로 T_2^* 의 경우 내공삼과 유사하게 각 그룹 별로 경향을 파악하기는 힘들며, T_1 값은 내공삼과 마찬가지로 중간층의 경우 중심층과 표피층에 비해 작은 값을 가지나 그 차이는 내공삼에 비해 적었다.

조직상태와 T_1 , T_2^* 와의 관계는 조직이 치밀할수록 T_1 값은 증가하고 T_2^* 값은 감소하게 된다.²⁾ 그러므로, 실험의 결과에 따르면 내공삼, 정상삼 모두 표피층과 중심층 보다 중간층이 조직이 치밀하며, 각 그룹간 치밀한 정도의 차이는 정상삼에 비해 내공삼이 큰 것으로 생각된다. 또한, 내공삼의 내공 주위 영역에서 높은 T_1 값을 가지는 것으로 보아 이 부분의 조직은 특히 치밀하지 못한 것으로 생각된다. 그러나, T_2^* 의 경우 그룹간의 뚜렷한 경향이 없고, 특히 내공삼의 내공주위영역의 T_2^* 값은 다른 그룹에 비해 큰 것으로 나타나 알려진 바와 다른 결과를 얻었다. 이것이 수삼의 조직인자, MRI 촬영인자 혹은 노이즈에 의한 오류에 의한 결과인지에 대해서는 밝혀내지 못했으며 앞으로 이에 대한 연구 또한 계속 하고자 한다.

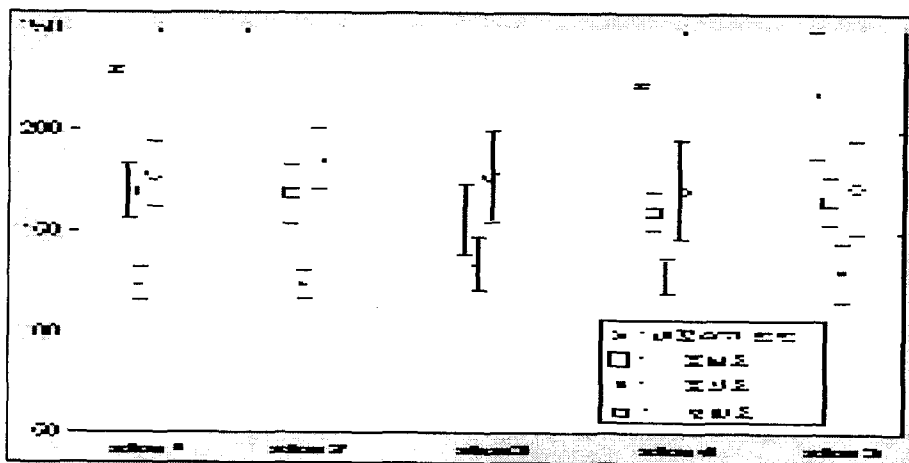


그림 6. 내공삼의 각 그룹별 T_1

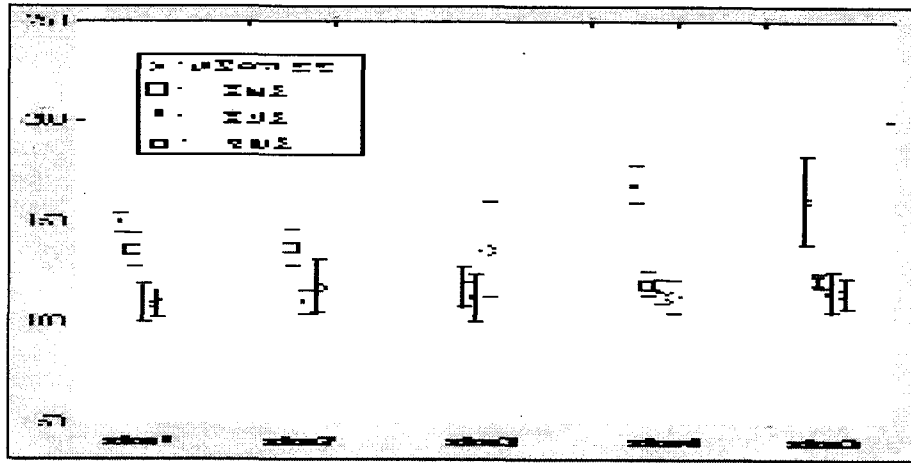


그림 7. 내공삼의 각 그룹별 T₂*

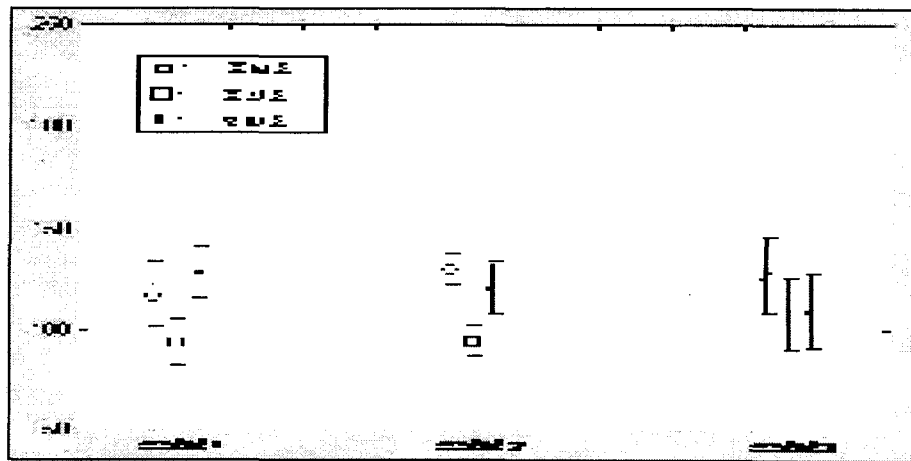


그림 8. 정상삼의 각 그룹별 T₁

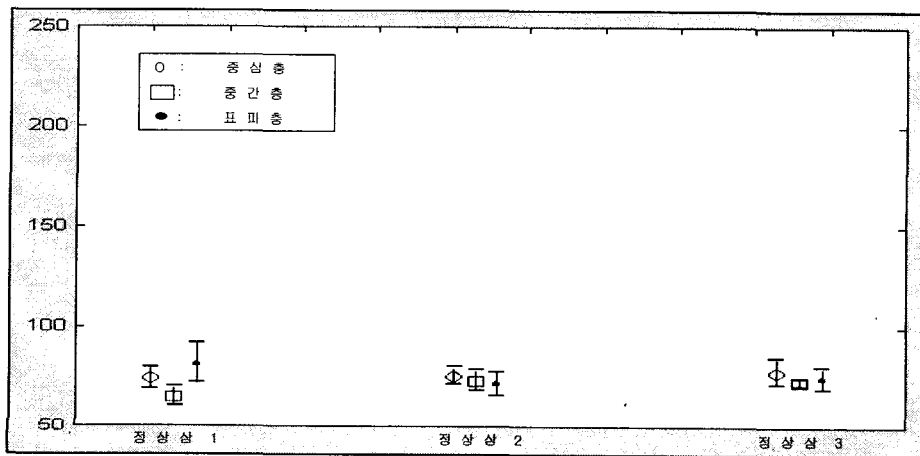


그림 9. 정상삼의 각 그룹별 T₂*

요약

1.5T의 자기공명 영상 장치를 이용하여 6년근 내공수삼, 정상수삼의 내부 조직을 촬영하였다. TR, TE 값을 변화시켜 얻은 영상을 이용하여, 각 그룹별로 수삼의 T_1 , T_2^* 값을 계산하였다. 각 그룹별로 T_2^* 값은 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. T_1 의 경우 중간층의 T_1 값은 중심층과 표피층보다 작은 값을 가졌다. T_1 을 이용하여 수삼을 그룹별로 비교가 가능하였으며, 조직상태 또한 추정할 수 있었다. 내공 주위와 정상부위와의 T_1 값은 서로 큰 차이를 보여 T_1 을 이용하여 조직 이상유무를 찾아낼 수 있는 가능성도 확인하였다.

참고 문헌

1. 김성민 : 농업분야의 자기공명기술 활용, 농업기계학회지 24(3): 275~288
2. 장기철, R. Ruan : NMR을 이용한 홍삼의 용적밀도 측정 및 내부 조직 판별, 고려인삼학회지 21(2):96~101
3. 김성민 : 자기공명영상을 이용한 소고기의 내부 구조 평가, 한국농업기계학회지 24(3): 523~530
4. 김성민 : 자기공명영상을 이용한 농축산물의 비파괴 내부품질 평가, 한국농업기계학회지 24(6):523~530
5. 박명규 : 최신고려인삼(재배편), 한국인삼연초연구원:33~40(1996)
6. P. Chen, M. J. McCarthy, R. Kauten : NMR for Internal Quality Evaluation of Fruits and Vegetables, American Society of Agricultural Engineers 32(5):1747~1753
7. 이성우, 은충기, 문치웅, 박수성 : 최신 자기 공명 영상학, 여문각:32~80(1998)
8. Seong-Min Kim, M. J. McCarthy, P. Chen. 1994. Feasibility of Tomato Quality Grading and Sorting using Magnetic Resonance. ASAE No. 946519. ASAE, St. Joseph, MI 49085