

홍삼의 자기공명 특성과 영상 분석

Analysis of Magnetic Resonance Characteristics and Images of Korean Red Ginseng

임종국 김성민
정회원 정회원
J. G. Lim S. M. Kim

ABSTRACT

In this study, the feasibility of magnetic resonance techniques for nondestructive internal quality evaluation of Korean red ginseng was examined. Relaxation time constants were measured using various grades of red ginsengs. Solid state magnetic resonance imaging technique was applied to image dried red ginsengs which have low moisture contents (about 13%). A 7 tesla magnetic resonance imaging system operating at a proton resonant frequency of 300 MHz was used for acquiring MR images of dried Korean red ginseng. The comparison test of cross cut digital images and magnetic resonance images of heaven grade, good grade with cavity inside, and good grade with white part inside red ginseng suggested the feasibility of the internal quality evaluation of Korean red ginsengs using MRI techniques. A good grade red ginseng included abnormal tissues such as cavities or white parts inside was observed by the signal intensity of MR image based on magnetic resonance properties of proton nucleus. Analysis on an one dimensional profile of acquired MR image of Korean red ginseng showed easy discrimination of normal and abnormal tissues. MR techniques suggested ways to detect internal defects of red ginsengs effectively.

Keywords : Magnetic resonance imaging, Relaxation time constant, Korean red ginseng, Internal feature.

1. 서 론

수삼을 장기간 저장하기 위한 목적으로 제조된 홍삼은 수분 함량이 13% 이하로 가공하여 판매한다. 일반적으로 홍삼 제조용 인삼은 6년근 수삼을 사용하며, 국내에서 가장 큰 설비와 홍삼 제조 능력을 구비한 부여 고려 인삼제조장의 경우에 매년 2,800톤의 수삼을 가공하여 이중 302톤을 홍삼 제품으로 생산하고 있다. 홍삼의 원형은 품질에 따라 천삼(天蔘), 지삼(地蔘), 양삼(良蔘)의 3가지 등급으로 나뉘어 지는데, 이러한 직삼의 등급 선별의 기준은 머리, 몸통 및 다리의 체형을 보는 외관상의

분류와 조직의 치밀도, 색택, 표피, 수분 함량 등도 기준으로 포함되어 있다.

지금까지 홍삼의 선별은 전문화된 인력에 의해서 외부 및 내부 품질을 평가하였는데, 내부 품질 평가에 있어서 관행의 방법은 빛이 차단된 암실에서 홍삼의 밑면에 강한 빛을 비추어 투광되는 상태를 보고 판별하는 육안 검사에 의존하고 있다. 이러한 방법은 객관적인 검사 기준이 있지만 검사원의 주관적인 성향에 따라 상이함이 존재할 수 있다. 이에 보다 객관적이고 판별 기준을 제시할 수 있는 검사 방법의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 홍삼의 내부 품질 평가 요소에서 주요한 판별인자인 내공

(內空)이나 내백(內白)과 같은 부분은 조직의 치밀도에 관련이 깊다고 할 수 있다. 지금까지 홍삼의 내부 품질에 관한 연구로는 Park 등(1988)은 주사전 자현미경을 이용하여 정상 조직과 내백부 조직의 미세 구조를 비교 연구 하였으며, Jang과 Ruan(1998)은 홍삼의 용적밀도 및 내부 조직특성을 분별하기 위하여 핵 자기 공명(nuclear magnetic resonance, NMR)을 이용하였다. NMR에서 이완 상수인 스핀-격자 이완시간(T_1)과 스핀-스핀 이완 시간(T_2) 그리고 프로톤 밀도(ρ)는 대상물의 상태에 따라 변하는 중요한 인자들로써 T_1 , T_2 의 측정은 NMR 연구에 기초가 되는 것이다(Kim, 1999). 또한, 홍삼과 같이 수분 함량이 낮은 고체 상태의 식품은 매우 빠른 이완 시간상수(relaxation time constant)를 갖게 되어 새로운 영상기법의 도입이 시도되고 있다(Cornillon과 Salim, 2000).

따라서 본 연구에서는 최근 농산물의 내부 품질 평가 기술로 각광받고 있는 자기 공명 기술을 이용하여 홍삼의 자기 공명 특성 및 자기 공명(magnetic resonance, MR) 영상을 획득하여 홍삼의 내부 품질 평가에 적용하여 그 가능성을 구명하였다. 본 연구의 목적으로는 홍삼의 NMR 특성인자를 측정하여 특성을 분석하고 NMR 특성인자와 홍삼 등급간의 관계를 분석하는 것이다. 또한, 고체자기공명영상 기법중의 하나인 single-point imaging(SPI)을 적용하여 홍삼 내부의 3차원 영상을 비파괴적으로 획득하여 실제의 절단면 영상과 비교하여 내부 품질 평가 가능성을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

가. 홍삼 시료

실험에는 부여 고려인삼장에서 제조하고 홍삼 선

별 전문가에 의해서 천삼, 지삼, 양삼의 세 등급으로 분류된 52편의 홍삼을 사용하였으며, 양삼의 경우 조직 상태에 따라 내공삼, 내백삼, 생내백삼으로 분류되었다. 등급별 실험 시료 수는 천삼 10편, 지삼 13편, 양삼 29편(내공삼 12편, 내백삼 8편, 생내백삼 9편)이었다. 이들 시료 중에서 MR 영상을 획득하기 위해 천삼 1편과 내공삼, 내백삼인 양삼 2편을 사용하였다. 사용된 홍삼은 수분 함량이 13 % 이하로 가공된 것을 구입하였다.

나. NMR 및 MRI 장비

본 연구에서는 10 MHz pulsed NMR과 7 tesla 초전도 자기공명영상(magnetic resonance imaging, MRI) 시스템을 사용하였다. 10 MHz pulsed NMR의 주요 사양 및 특성은 표 1과 같으며, MR 영상을 얻기 위해 사용된 코일은 직경이 35 mm인 microimaging 용 코일을 사용하였다.(그림 1참조)

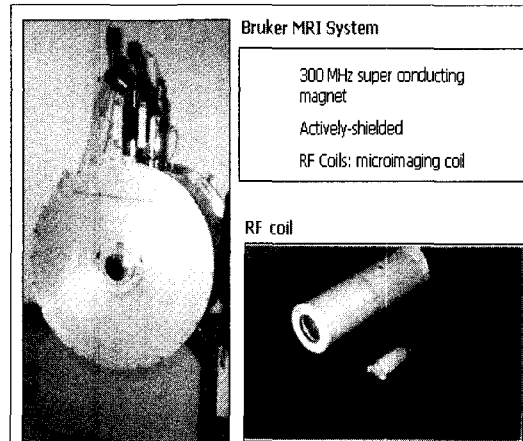


Fig. 1 Horizontal bore superconducting MRI system and RF microimaging coil.

Table 1 Specifications of NMR equipment

specifications		properties
Company	Bruker, Germany	- Measuring the quantity of hydrogen atoms in an area of interest - Fast - Three typical analysis; 1) Ratio → solid-state content of edible oil 2) Absolute → oil content in seeds 3) Relaxation → T_1 and T_2 measurement
Pulse	10 MHz	
Model	PC110	
Magnet	PC MAG 50x125	
Probe heads	PCPH 10/40 RTA	
Tube size	$\phi = 30\text{mm}, 40\text{mm}$	

다. NMR 펄스 열

홍삼 시료에 대한 T_1 값을 측정하기 위해 inversion recovery pulse sequence를 사용하였다. 180° pulse를 부여하고 반전 시간(inversion time)을 0.1 msec로 지연한 후 90° pulse를 주고 그 후 재 초점 pulse로 180° pulse를 사용하여 데이터를 획득하였다. 데이터 포인트 획득에 있어서 포인트 수는 20으로 했으며 pulse sequence를 5번 적용하여 그 평균값을 이용하였다. 또한 시간 간격은 최초 0.2 msec에 데이터 획득 후 매년 1.6 배를 하여 시간 간격을 넓혀 갔다. T_2 값을 측정하기 위하여 CPMG(Carr Purcell Meiboom Gill) pulse sequence(Davenel과 Marchal, 1992)를 사용하였다. 데이터 포인트 수는 30으로 했으며 TE = 0.1 msec로 하였다. T_2^* 값 측정에 있어서 사용한 FID(free induction decay) 신호 획득 간격은 0.03 msec로 하였고, 데이터 획득 포인트 수는 80으로 하였으며, 동일 샘플에 대해 3일간 1일 1회씩 반복 측정하였다.

라. MRI 관련 인자

3차원 MR 영상 획득에 사용된 펄스 파형은 single-point imaging pulse sequence를 이용하였으며, 영상 범위는 $40 \times 40 \times 80$ mm로 하였다. 데이터 포인트 수는 $128 \times 128 \times 32$ voxel로, 홍삼의 길이 방향을 기준으로 영상 두께(slice thickness)는 0.25mm로 하였다.

마. 데이터 분석 프로그램

NMR 및 MRI 장치로부터 획득된 데이터는 컴퓨터로 옮겨져 상용 프로그램(MATLAB, version 6.1 for Windows, Mathworks, USA)을 이용하여 분석하였다. NMR 특성값인 T_1 , T_2 및 T_2^* 값은 exponential curve fitting 알고리즘을 이용하여 추정하였다.

바. 홍삼의 건조중량 측정

NMR 측정 후 뇌두가 제거된 홍삼을 실포를 이용하여 뇌두 아랫부분에서 약 5~10mm 부분을 절단하여 절편을 만든 후 이를 건조중량 측정 시료로 사용하였다. 전체 52편의 홍삼을 절단하였고 절편의 두께는 3~5mm, 무게는 2.2~3.63g 사이의 범위였으며 시료당 2~3개를 만들었다. 홍삼 절편의 건조에는 진공오븐을 사용하였으며, 압력은 18.67kPa, 온도는 40°C 를 유지하여 48시간 동안 건조하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 홍삼의 자기 공명 특성

그림 2는 홍삼의 물성 값인 건조 중량과 NMR 특성인자들과의 상호관계를 나타낸 것으로 건조 중량이 가장 높은 지삼에서 T_1 은 14.60 msec, FID ratio는 3.83으로 가장 작은 값을 나타냈으며, T_2 는 0.26msec, T_2^* 는 0.11 msec로 가장 큰 값을 나타냈다. 또한, 건조중량이 가장 낮은 생내백삼의 경우 T_1 은 21.59 msec, FID ratio는 5.36으로 가장 큰 값을 나타냈고, T_2 는 0.16 msec, T_2^* 는 0.08 msec로 가장 작은 값을 나타냈다. 홍삼 시료의 수분 함량이 많을수록 자유수의 증가에 의해 T_2 값이 증가하는 것으로 보고되었으며(Jang과 Ruan, 1998), 실험 결과 T_2 의 경우 알려진 바와 일치하는 것을 볼 수 있다. T_1 의 경우 다른 NMR 특성인자들에 비해 편차가 크게 나타났다. 홍삼의 경우 내부 조직의 특성의 차이에 의해 넓은 범위의 T_1 을 가지는 것으로 보고되었고(Jang과 Ruan, 1998), 실험 결과 내백삼 등급이 편차가 가장 큰 T_1 을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 내백 조직이 홍삼에서 차지하는 비율의 차이에 의해 발생한 것으로 생각된다.

표 2는 각 등급별 홍삼의 세 차례 측정된 NMR 특성인자를 나타낸 것으로 T_1 의 경우 14.60~21.59 msec, T_2 는 0.16~0.26msec, T_2^* 는 0.08~0.13 msec 그리고 FID ratio는 3.47~5.36 msec 수준의 값을 나타내었다. 각 등급별로 T_1 , FID ratio 값은 일반적으로 양삼 > 지삼 > 천삼 순으로 높았으며, T_2 와 T_2^* 값은 지삼 > 천삼 > 양삼 순으로 높았다. 용적 밀도와 T_1 , T_2 와의 관계에서 용적밀도가 증가할수록 양성자가 흡수한 에너지를 주위 격자에 신속하게 공급하여 이완이 촉진되기 때문에 T_1 값은 감소하고, 양성자와 다른 원자와 결합력의 세기가 약한 물질의 함량이 많기 때문에 T_2 값은 증가하는 것으로 보고되었다(Jang과 Ruan, 1998). 홍삼의 경우 정상조직은 내백조직에 비해 치밀한 조직을 가지는 것으로 알려져 있으며(Do 등, 1985; Park 등, 1988), 내백조직은 정상조직에 비해 용적밀도가 낮은 것으로 보고되었다. 표 2에서 보듯이 내백삼과 생내백삼은 천삼, 지삼에 비해 T_1 , FID ratio 값은 작고 T_2 , T_2^* 값은 큰 것으로 나타나 T_1 , T_2 의 경우 알려진 바와 동일한 결과를 얻었으나, 표준편차를 고려해 볼 때 등급간에 뚜렷한 차이가 있다고 보기는 곤란하다(Jang과 Ruan, 1998). 그러나, 이는 실험에 사용된

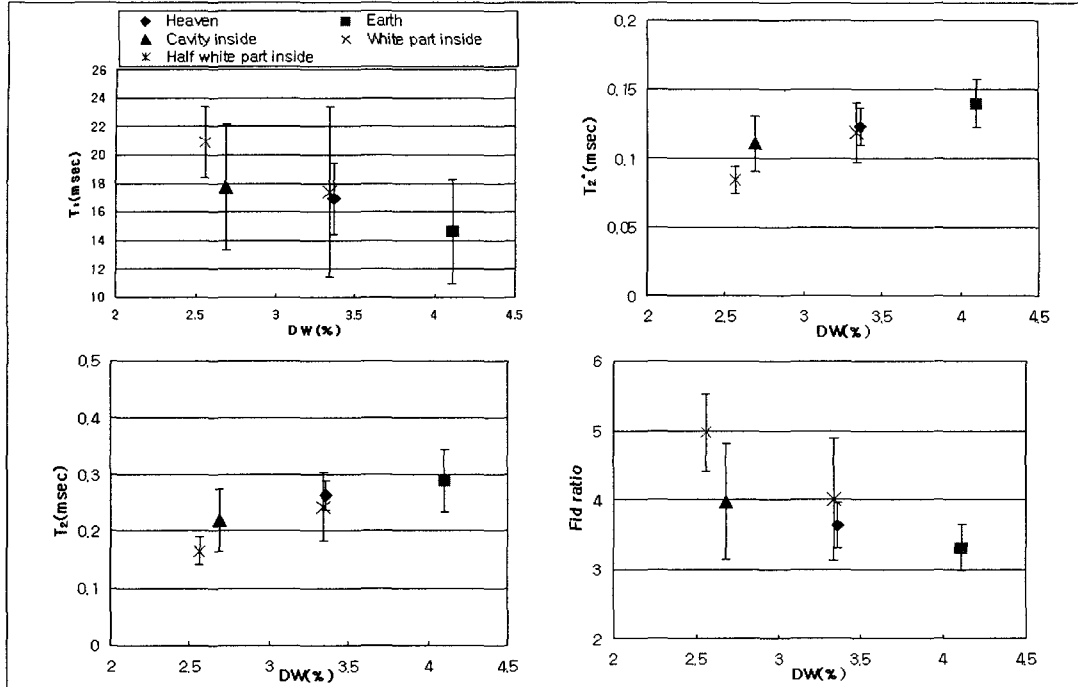


Fig. 2 Comparison of dry weight and calculated NMR parameters of each red ginseng grade.

Table 2 NMR parameters and dry weight of red ginsengs

Grade	Parameters	T ₁ (ms)			T ₂ (ms)			T ₂ * (ms)			FID ratio			Dry weight (%)	
		1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd		
Heaven	Mean	16.926	17.151	16.802	0.263	0.258	0.272	0.123	0.105	0.123	3.629	4.299	3.571	3.360	
	Std. dev.	2.743	2.555	2.469	0.026	0.027	0.025	0.019	0.014	0.011	0.411	0.552	0.132	0.839	
	Mean	14.603			0.265			0.118			3.833			-	
	Std. dev.	0.177			0.007			0.011			0.405			-	
Earth	Mean	14.603	14.594	14.617	0.289	0.284	0.285	0.140	0.124	0.138	3.307	3.794	3.336	4.019	
	Std. dev.	3.766	3.675	3.565	0.059	0.052	0.052	0.022	0.021	0.016	0.388	0.516	0.300	0.868	
	Mean	14.604			0.286			0.139			3.479			-	
	Std. dev.	0.011			0.003			0.008			0.273			-	
Good	Cavity inside	Mean	17.767	18.072	18.347	0.219	0.213	0.219	0.110	0.087	0.108	3.972	5.373	4.393	2.687
		Std. dev.	4.244	4.333	4.781	0.061	0.058	0.049	0.021	0.018	0.025	0.545	1.347	0.940	0.741
	White part inside	Mean	18.060			0.217			0.102			4.579			-
		Std. dev.	0.293			0.004			0.013			0.719			-
	Half white part inside	Mean	17.421	17.485	17.801	0.243	0.234	0.242	0.118	0.088	0.107	4.008	5.005	4.192	3.338
		Std. dev.	6.182	5.933	6.066	0.063	0.056	0.063	0.028	0.017	0.020	0.965	1.704	0.898	0.763
	Heaven	Mean	17.569			0.240			0.105			4.148			-
		Std. dev.	0.203			0.005			0.015			0.457			-
Earth	Mean	20.949	21.489	22.352	0.166	0.169	0.160	0.085	0.071	0.087	4.966	6.124	5.012	2.650	
	Std. dev.	2.539	2.742	2.735	0.030	0.022	0.025	0.010	0.010	0.013	0.517	0.920	0.756	0.575	
Cavity inside	Mean	21.597			0.165			0.080			5.368			-	
	Std. dev.	0.708			0.005			0.009			0.656			-	
Mean		17.532			0.234			0.108			4.335			3.145	
Std. dev.		2.274			0.047			0.020			0.728			0.718	

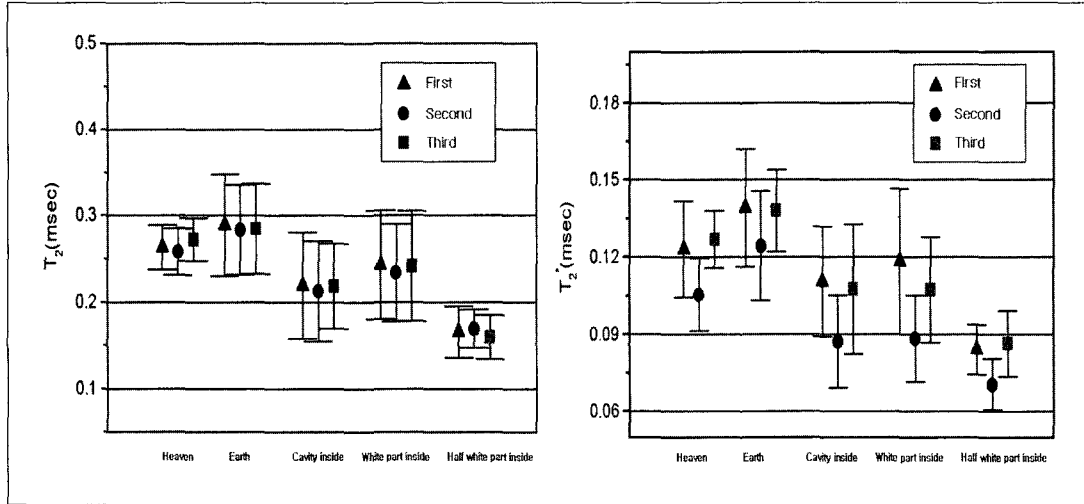


Fig. 3 Comparison of T_2 and T_2^* of each ginseng grade.

각 등급별 샘플수가 적기 때문에 발생한 오차일 것으로 생각되며 향후 더 많은 샘플을 대상으로 실험하면, 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

T_2 와 T_2^* 를 비교해 보면 표 2와 그림 3에서 보듯이 T_2 의 경우 세 차례의 측정 결과값이 비슷한 값을 가지나 T_2^* 의 경우 반복간에 차이를 보였다. 이는 T_1 , T_2 값이 시료의 고유값을 나타내는데 반해 T_2^* 의 경우는 NMR 장비의 자장의 불균일에 의해 발생한 시료 내의 국소적 자기장의 변화에 의한 T_2 값을 나타내기 때문으로 동일한 장비를 사용할 경우에도 주위 환경의 변화 등에 의해 다른 값이 나올 수 있는 가능성이 높다. 그러므로, 홍삼의 등급 판정에 있어 T_2^* 값을 이용할 경우 측정 NMR 장비의 안정성이 우선 되어야 할 것으로 생각된다. 또한 일반적으로 $T_2 > T_2^*$ 이며 본 실험에서 T_2^* 는 T_2 에 약 50% 수준의 값을 나타내었다.

나. 홍삼의 자기 공명 영상

(1) 홍삼의 실제 단면 영상과 MR 영상과의 비교
 그림 4, 그림 5 및 그림 6은 MR 영상을 획득하기 위해 사용된 홍삼의 외형, 절단면의 실제 영상 및 MR 영상을 비교해 놓은 것이다. 여기에서 MR 영상은 실제 영상에 대하여 시각적으로 선명한 영상을 획득하기 위하여 흑백이 서로 반전되어 있음을 밝혀둔다.

각각의 그림에서 보듯이 상단에는 홍삼 전체의 외형이며 하단에는 MR 측정이 완료된 홍삼을 직접

절단하여 실제 영상을 CCD 카메라로 촬영한 것과 그 부위에 해당하는 MR 영상을 배치해 놓은 것이다. 각각의 실제 단면 영상과 MR 영상에서 관찰할 수 있듯이 측정된 홍삼의 뇌두 부근에서는 조직이 치밀하지 못하였으며, 하단 부로 내려갈수록 상태가 호전됨을 알 수 있다.

그림 4는 천삼의 단면 영상으로서 실제 내부 품질 검사가 이루어지는 (b) 및 (c) 부분의 내공 및 내백부가 점차 사라짐을 관찰할 수 있었다. 이는 MR 영상에서도 보듯이 (a) 및 (b) 단면의 영상에서는 정상적인 조직의 중심부가 같은 세기의 MR 신호를 발생하여 농도가 일정함을 알 수 있다. 그림 5는 내공이 존재하는 양삼의 단면 영상으로서 (c) 부분의 실제 단면 영상과 MR 영상에서 내공이 존재함을 발견할 수 있었다. 특히, (c) 부분의 MR 영상에 있어서 내공으로 판단되는 부분의 영상 농도가 정상 조직과 상이함을 관찰할 수 있는데 이러한 영상농도의 차이는 등급 선별의 기초 자료가 될 것으로 사료된다. 그림 6은 내백이 존재하는 양삼의 단면 영상으로서 (a), (b) 및 (c)의 MR 영상 단면의 중심부에서 신호의 세기가 약하여 농도의 변화가 있는 부분이 내백으로 추정되며 실제 단면에서도 조직이 치밀하지 못함을 관찰할 수 있었다. 내백부는 내공부분과 달리 기존의 등급 선별 과정에서도 난해한 과정으로서 실제 단면 영상에서도 보듯이 중심부의 색상이 타 부분에 비해서 희미한 것을 알 수 있다. 즉, 기존의 검사 방법인 빛의 투광으로서 홍삼을 절단하지 않은 채로, 이러한 내부의 상태를 짐작하여 판별하기에는 무리가 있다고 생각되

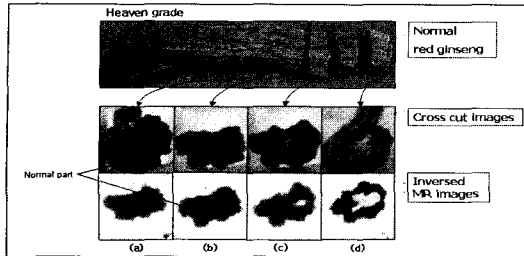


Fig. 4 Comparison of cross cut images and MR images of heaven grade red ginseng.

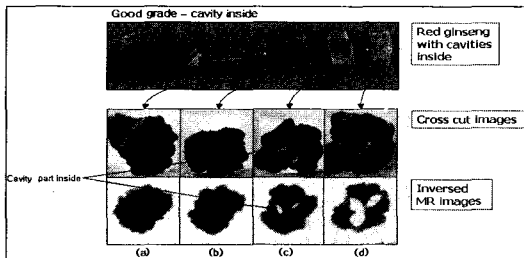


Fig. 5 Comparison of cross cut images and MR images of good grade red ginseng with cavity inside.

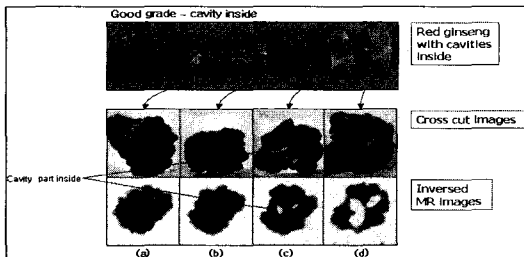


Fig. 6 Comparison of cross cut images and MR images of good grade red ginseng with white part inside.

어진다. 반면에 MR 영상을 이용하였을 경우에는, MR 신호와 조직 치밀도와의 연관성을 도출하여 내백과 같은 이상조직을 검출하는 데 있어서 이상적이라고 할 수 있을 것이다. 즉, 홍삼 제품에 외상을 가하지 않은 채로 내부 상태를 관찰할 수 있음을 시사하고 있는 것이다.

(2) 홍삼 MR 영상에 대한 영상 농도 그래프

그림 7, 그림 8 및 그림 9는 측정된 홍삼의 MR 영상에 대하여 홍삼의 중심부를 지나는 x축과 y축

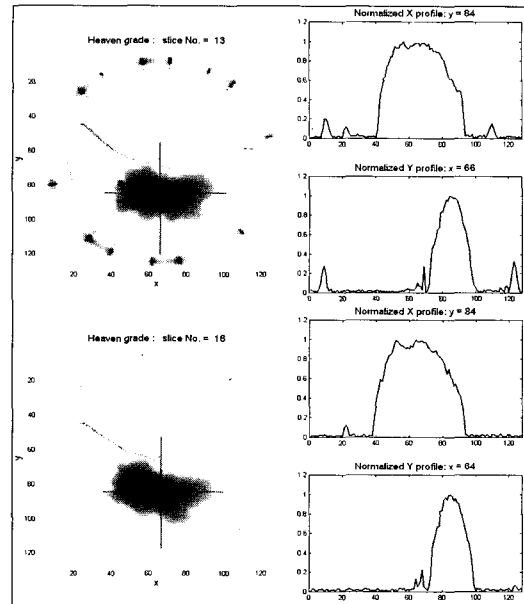


Fig. 7 2D MR images and their selected 1D profiles of heaven grade red ginseng.

의 한 라인을 영상농도 그래프(one dimensional profile, 1D profile)로 나타낸 것이다.

그림 7은 천삼, 그림 8은 내공이 포함된 양삼, 그림 9는 내백이 포함된 양삼으로서 각 그림에서 좌측의 MRI는 $128 \times 128 \times 32$ 화소의 데이터 포인트로 획득되어졌으며, 화면 중심부의 어두운 부분이 촬영된 홍삼의 MRI이다. 또한 각각의 그림에서 우측 상단은 y축에 대한 x값의 1D profile이며 하단은 x축에 대한 y값의 1D profile을 표현한 것이다. 1D profile의 그래프에서 y축의 영상 농도의 값은 0에서 1사이의 값으로 표준화된 것이다. 즉, y축에 있어서 최소값 0은 MRI에 있어서 아무런 신호가 나오지 않는 부분으로서 보이는 영상에서는 백색으로 나타났으며, 최대값 1은 MR 신호가 가장 높음으로서 신호가 강할수록 흑색에 가까워짐을 알 수 있다. 홍삼에 있어서 조직의 치밀도가 높고 정상 조직인 경우에는 각각의 x축 및 y축의 1D profile의 값이 1에 가깝다고 말할 수 있다. 그림 7은 천삼에 대한 1D profile을 분석한 것이다. 천삼의 MR 영상 중심부를 지나는 1D profile의 경우에 조직이 전체적으로 치밀하여 영상 농도의 변화가 완만함을 관찰할 수 있다. 이는 내부 조직에 있어서 정상적으로 제조된 홍삼이며 천삼으로서의 가치가 있다고 예측하는데 중요한 근거 자료가 될 수 있을 것이다. 그림 8은 내공이 존재하는 양삼의 1D profile을

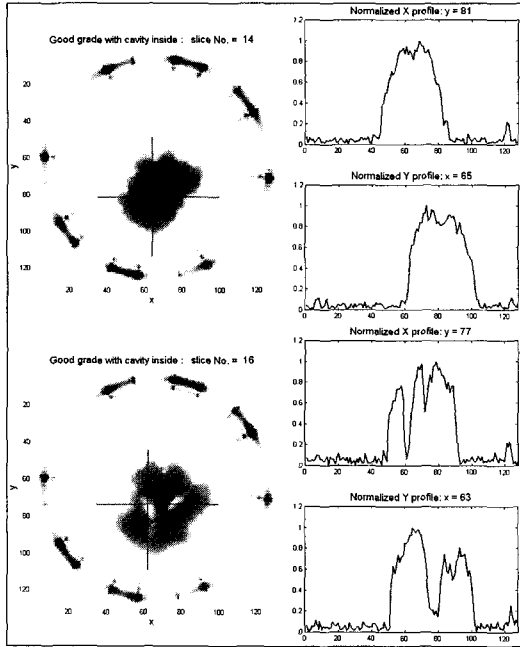


Fig. 8 2D MR images and their selected 1D profiles of good grade red ginseng with cavity inside.

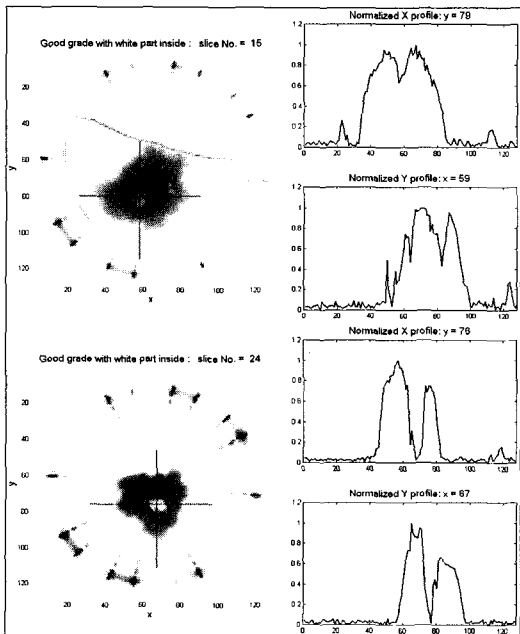


Fig. 9 2D MR images and their selected 1D profiles of good grade red ginseng with white part inside.

나타낸 것으로서 우하단의 x축과 y축에 대한 1D profile에서 보듯이 내공이 존재하는 부분에서의 값이 거의 0에 근접함을 알 수 있다. 또한 그림 7의 천삼의 완전한 1D profile과 달리 내공이 존재하는 양삼의 경우에는 그래프의 형태가 내공부분에서 급격히 하락함을 관찰할 수 있다. 그림 9는 내백이 존재하는 양삼의 1D profile로서, 좌상단의 MR 영상 내백으로 판단할 수 있는 영상이고 좌하단의 MR 영상은 내공이 존재하는 것으로 판단할 수 있는 영상이다. 즉, 내백이 존재하는 부분에서의 영상 농도는 정상 조직에 비하여 낮으며, 완전한 곡선의 천삼에 비하여 1D profile 자체가 불규칙함을 관찰할 수 있었다.

4. 요약 및 결론

NMR을 이용하여 홍삼의 각 등급별 T_1 , T_2 , T_2^* 및 FID ratio를 측정하여 NMR 특성을 분석하였고, 홍삼 등급과 NMR 특성인자의 상호관계를 구명하였다. 내부 조직에 결함이 있는 홍삼(내백삼, 생내백삼)은 정상적인 홍삼(천삼, 지삼)에 비해 T_1 과 FID ratio 값은 작았고, T_2 와 T_2^* 값은 컸으며, 건조 중량이 높을수록 T_2 와 T_2^* 값은 커지고, T_1 과 FID ratio 값은 작아지는 것으로 나타나 홍삼의 내부조직상태와 수분 함량에 따라 NMR 특성인자 값의 차이가 있음이 구명되었고, 이를 이용한 홍삼의 객관적인 등급 판정 가능성을 확인하였다.

천삼, 내공이 존재하는 양삼 및 내백이 존재하는 양삼에 대하여 실제 단면 영상과 MR 영상을 비교 검토해 본 결과, 비파괴적으로 홍삼 내부의 영상을 확인할 수 있었다. 또한 획득된 MR 영상의 중심부를 지나는 부분에 대하여 1D profile을 실시하여 분석해 본 결과, 정상 조직과 비정상 조직인 내공이나 내백부의 구분이 용이하게 관찰됨을 관찰할 수 있었다. 즉, 홍삼의 내부 품질 평가에 있어서 비교적 용이하게 진행될 수 있는 1D profile을 적용한다면, 전체의 MR 영상을 획득하는데 있어 소요되는 시간과 절차를 줄이는 등 효과적인 판별이 가능한 것으로 판단되었다.

참고 문헌

1. Cornillon, P. and L. C. Salim. 2000. Characterization of water mobility and distribution in low- and intermediate-moisture food systems. *Magnetic Resonance Imaging* 18: 335-341.

2. Davenel, A. and P. Marchal. 1992. Discrimination Analysis Applied To Moisture Determination in Raw Materials For Animal Feed By Pulsed NMR. Transactions of the ASAE 35(6): 1891-1897.
3. Do, J. H., S. D. Kim and H. S. Sung. 1985. Biochemical and Histological Characteristics of Inferior Red Ginseng. Korean J. Ginseng Sci. 9(2): 256-263.
4. Jang, G. C. and R. Ruan. 1998. Determination of Bulk Density and Internal Structure of Red Ginseng Root Using NMR. Korean J. Ginseng Sci. 22(2): 96-101.
5. Kim, S. M. 1999. Applications of Magnetic Resonance Techniques in Agriculture. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 24(3): 275-288.
6. Park, H., B. G. Cho and J. S. Lee. 1988. Ultrastructure of Normal and Inside White Part in Korea Red Ginseng. Korean J. Ginseng Sci. 12(2): 153-157.