

The Relationship between Image Parameters and SAR for Each Sequence of MRI

Seong-Ho Kim¹, Se-Jong Yoo^{2*}

¹Department of Radiological Technology, Daejeon Health Institute of Technology

²Department of Radiological, Science, Konyang University

Received: December 06, 2023. Revised: December 28, 2023. Accepted: December 31, 2023.

ABSTRACT

This study analyzed the relationship between image parameters and specific absorption rate (SAR) in various sequence environments to optimize SAR. For this purpose, image parameters were adjusted for T2, T1, STIR, T1 FLAIR, and T2 FLAIR sequences in a 3.0T MRI, and the whole body (WB) SAR and head SAR calculated by the device were measured. Then, the SAR was evaluated by adjusting the number of images and the flip angle (FA) of the refocusing RF. As a result, SAR increased as the number of image increased in all sequences. T1 and T1 FLAIR had correlation coefficients (r) of 0.876, 0.876 (WB SAR, head SAR), 0.867, 0.867 (WB SAR, head SAR), respectively, and STIR had the highest correlation with 0.898 and 0.899 (WB SAR, head SAR). showed (p<0.05). When applied by increasing the refocusing FA, WB SAR and head SAR increased overall in all sequences. The T1 and T2 sequences showed high correlation with correlation coefficients (r) of 0.897, 0.898 (WB SAR, head SAR) and 0.914, 0.915 (WB SAR, head SAR), respectively, while the sequences to which the inversion recovery technique was applied had relatively low FA, showed less sensitivity to increase. Therefore, in a sequence with a relatively low TR, minimizing the number of image and applying the fast spin echo to reduce the refocusing FA in a sequence with a high duty cycle are effective in reducing SAR.

Keywords: MRI sequence, SAR, number of image, refocusing FA

I. INTRODUCTION

MRI (magnetic resonance imaging)는 인체 내 수소 (proton)의 공명 현상을 통해 해부학적 정보뿐만 아니라 다양한 병리학적 정보를 제공하고 있다. 이때 수소의 공명은 사용하는 자기장의 환경에 따라 달라지지만 주로 라디오 주파수 대역을 사용하기 때문에 RF (radio-frequency)라고 부른다^[1]. RF는 대표적인 비 전리 방사선으로 감마선과 X-ray와 같은 전리 방사선과 비교하여 낮은 에너지를 지니기 때문에 상대적으로 안전한 검사로 인식되고 있다^[2,3]. 하지만 100 kHz 이상의 전자파로 인한 전기장 노출은 인체 내 하전 입자에 운동 에너지 발생을 유

발하고 운동 과정에서 발생하는 마찰은 열로 변환되어 체온 상승을 초래한다. RF로 인한 국부적인 체온 상승은 통증과 심각한 열 손상의 원인이 될 수 있다^[4-7]. 이러한 이유로 미국식품의약국 (united states food and drug administration, FDA)와 국제전기기술위원회(international electrotechnical commission, IEC)에서는 전자파로 인해 인체의 심부 온도 상승이 1°C 이내로 유지될 수 있도록 전자파 노출을 제한하고 있다^[8,9].

MRI에서는 전자파흡수율 (specific absorption rate, SAR)의 모니터링을 통해 전자파로 인한 부작용을 예방하고 있다. SAR는 전자기장에 노출되었을 때 인체에 의해 단위 질량당 에너지가 흡수되는 속도

* Corresponding Author: Se-Jong Yoo

E-mail: yysj016@konyang.ac.kr

Tel: +82-42-600-8423

를 측정된 값으로 단위는 W/kg을 사용한다^[10]. 일반적으로 SAR를 줄이는 방법은 영상 단면의 수를 감소, 에코 열 길이(echo train length, ETL) 단축, TR (repeat time) 증가, 숙임각 (flip angle, FA) 감소 등이 있다^[11]. 하지만 TR과 ETL과 같은 영상 변수들은 임상적으로 검사의 범위와 관련이 있거나 영상의 대조도, 검사 시간과 관련이 있어 제한적으로 사용된다^[12,13]. 따라서 검사의 환경 및 시퀀스(sequence)의 종류에 따라 SAR 감소를 위한 최적의 방법이 필요하지만, 관련 연구가 부족하여 마땅한 관리 기준이 없는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 임상에서 주로 사용하는 시퀀스 환경에서 영상의 대조도에 영향을 미치지 않는 영상 단면의 수 그리고 재위상화 (refocusing) RF의 숙임각과 SAR의 관계를 살펴보았다. 그리고 그 결과를 바탕으로 시퀀스에 따라 SAR를 최소화할 수 있는 영상 변수의 적용 기준으로 제시하고자 하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 검사 방법

실험을 위해 3.0T MRI (SIGNA Pioneer, GE HealthCare, Chicago, Illinois, U.S.)장치를 사용하였다.

Table 1. Sequence and parameters.

Sequence	T1	T2	STIR	T1 FLAIR	T2 FLAIR
TR (ms)	500	4000	2500	2000	9000
TE (ms)	8.7	102	30	24	90
TI (ms)			190	694	1786
FOV (mm ²)	20				
Slice thickness (mm)	5				
Gap (mm)	0				
Resolution	384/384				
NEX	1				
Bandwidth (kHz)	62.5				
Slice number	5				
Refocusing FA (°)	90				
ETL	3	20	4	7	20
Scan time	1:06	1:28	4:05	1:58	3:00

그리고 시퀀스는 T2 대조도 강조 영상, T1 대조도 강조 영상, STIR (short-TI inversion recovery), T1 FLAIR (fluid attenuated inversion recovery), T2 FLAIR를 대상으로 하였다. 각 시퀀스의 세부 영상 변수는 Table 1과 같다.

각 시퀀스 환경에서 영상 변수에 따른 SAR를 평가하기 위해 장비에서 미리 계산된 전신 (whole body, WB) SAR와 두부 (head) SAR를 분석하였고 SAR 계산을 위해 필요한 검사 대상의 체중은 50 kg으로 입력하였다. 이를 위해 각 시퀀스에서 나머지 변수는 고정하고 영상 단면의 개수를 1에서 10까지 1개씩 증가시키며 SAR를 평가하였다. 그리고 재위상화 RF의 숙임각은 90°에서 180°까지 10°씩 증가시키며 SAR를 비교 분석하였다.

2. 통계 분석

각각의 시퀀스의 영상 변수와 SAR의 상관관계를 평가하기 위해 Pearson 상관 분석을 시행하였다. Pearson 상관 분석은 영상의 단면의 수 그리고 재위상화 RF의 숙임각과 WB SAR 그리고 head SAR와의 상관계수를 구하여 비교 분석하였다. 이를 위해 SPSS 23 프로그램 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA)을 사용하였고 유의 수준은 0.05 미만으로 하였다.

III. RESULT

1. 영상 단면의 수 증가에 따른 SAR

영상 단면의 수를 1에서 10까지 1씩 증가시키며 적용하였을 때, WB SAR와 head SAR는 모든 시퀀스에서 전반적으로 Fig. 1과 같이 상승하였다. 특히, T1, STIR, T1 FLAIR의 경우 10개 단면 조건에서 WB SAR가 각각 0.75, 0.82, 0.73 W/kg 그리고 head가 각각 2.49, 2.74, 2.42 W/kg으로 나타나 비교적 높은 SAR를 보였다. 반면, T2, T2 FLAIR의 경우 WB SAR가 0.54, 0.42 W/kg 그리고 head가 1.79, 1.42 W/kg로 비교적 낮은 SAR를 보였다. 상관관계 분석 결과에서는 T2와 T2 FLAIR는 영상 단면의 수 그리고 SAR는 유의미한 상관관계를 보이지 않았다 ($p>0.05$). 반면, T1과 T1 FLAIR는 상관계수(r)가 각각 0.876, 0.876 (WB SAR, head SAR), 0.867, 0.867 (WB SAR, head SAR)로 높은 연관성을 보였다 ($p<0.05$). 특히, STIR는 상관계수가 0.898, 0.899 (WB SAR, head SAR)로 나타나 가장 높은 연관성이 있었다 ($p<0.05$).

2. 재위상화 RF의 FA 증가에 따른 SAR

재위상화 RF의 FA를 90°에서 180°까지 10°씩 증가시키며 적용하였을 때, WB SAR와 head SAR는 모든 시퀀스에서 전반적으로 Fig. 2과 같이 상승하였다. 특히, T1과 T2는 FA이 90°에서 180°로 증가하였을 때, WB SAR가 각각 약 3.6배 (0.27-0.96 W/kg), 약 3.2배 (0.37-1.2 W/kg) 증가하였다. 그리고 head SAR는 각각 약 3.5배 (0.9-3.19 W/kg), 약 3.2배 (1.24-4 W/kg) 증가하여 비교적 높은 증가 폭을 보였다. 반면, STIR, T1 FLAIR, T2 FLAIR는 FA이 90°에서 180°로 증가하였을 때, WB SAR가 각각 약 1.5배 (0.41-0.61 W/kg), 약 2.5배 (0.25-0.62 W/kg),

약 1.3배 (0.36-0.46 W/kg)의 증가 폭을 보였다. 그리고 head SAR는 각각 약 1.5배 (1.37-2.04 W/kg), 약 2.4배 (0.85-2.07 W/kg), 약 1.3배 (1.21-1.54 W/kg)의 증가하여 비교적 낮은 증가 폭을 보였다. 상관관계분석 결과에서는 모든 시퀀스에서 재위상화 RF의 FA와 SAR가 연관성이 있었다 ($p < 0.05$). 특히, T1, T2의 경우는 상관계수(r)가 각각 0.897, 0.898 (WB SAR, head SAR)과 0.914, 0.915 (WB SAR, head SAR)로 높은 연관성을 보였다. 그리고 T2 FLAIR는 0.655, 0.602 (WB SAR, head SAR)로 나타났으며 STIR와 T1 FLAIR는 각각 0.416, 0.414 (WB SAR, head SAR)와 0.413, 0.411 (WB SAR, head SAR)로 나타났다.

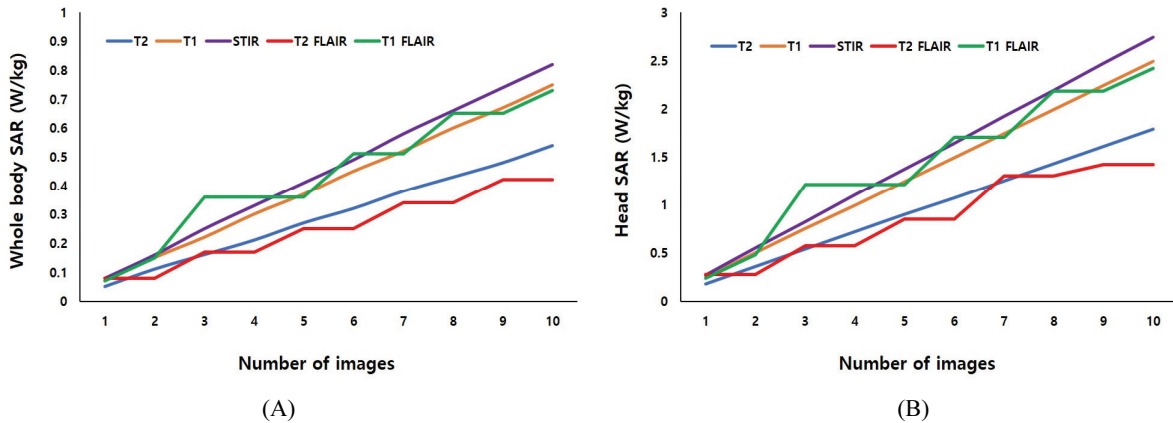


Fig. 1. SAR according to number of image. Both (A) whole body SAR and (B) head SAR increased overall as the number of images increased in all sequences. In particular, sequences with relatively low TR such as T1, STIR, and T1 FLAIR showed a high SAR increase rate. On the other hand, sequences with relatively long TR, such as T2 and T2 FLAIR, showed a relatively low SAR increase rate.

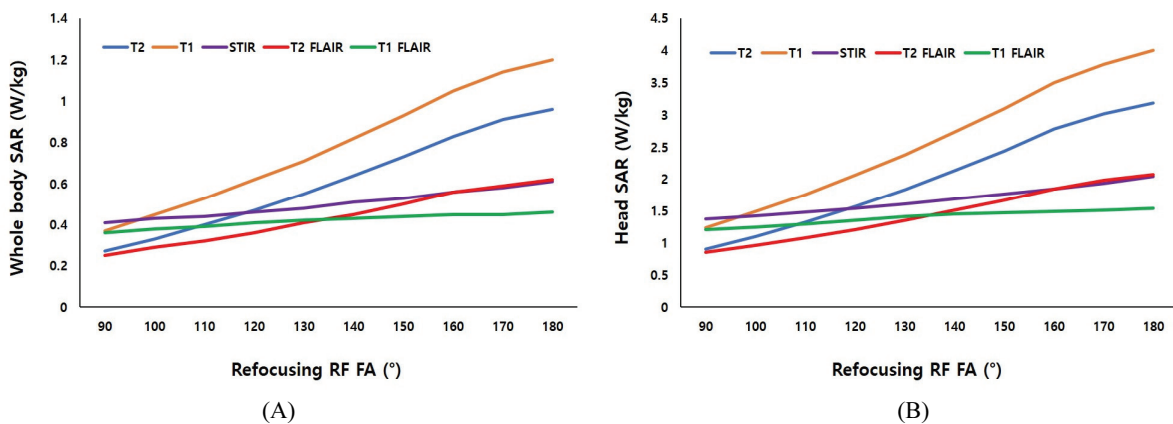


Fig. 2. SAR according to FA of refocusing RF. Both (A) whole body SAR and (B) head SAR increased overall as the FA of the refocusing RF increased in all sequences. In particular, in the fast spin echo sequence where the duty cycle of RF is high, the increase in SAR was high when the RF energy increased. On the other hand, STIR, T1 FLAIR, and T2 FLAIR, which have relatively low duty cycle, showed less sensitive SAR as RF energy increased.

IV. DISCUSSION

본 연구는 각각의 시퀀스 환경에서 영상 변수와 SAR의 관계를 분석함으로써 SAR를 최소화할 수 있는 영상 변수의 적용 기준을 제시하고자 하였다. 그 결과, 영상 단면의 수는 증가함에 따라 모든 시퀀스에서 전반적으로 SAR가 증가하는 양상을 보였다. 특히, T1, T1 FLAIR, STIR에서는 영상 단면의 수와 SAR가 높은 연관성이 있는 것으로 나타났는데, 이는 T2와 같이 긴 TR의 환경보다 상대적으로 낮은 TR의 환경에서 SAR 증가에 더 민감한 것을 알 수 있다. 결국, TR이 비교적 낮은 시퀀스의 환경에서 SAR 증가를 최소화하기 위해서는 영상 단면의 수를 최소화하는 것이 효과적이다. 또한, 재위상화 RF의 FA 증가는 모든 시퀀스 환경에서 SAR를 증가시키는 원인이 되었다. 특히, 반전 기법 (inversion recovery, IR)이 적용되지 않은 고속 스핀 에코 (fast spin echo, FSE)에서 FA 증가에 따라 SAR의 매우 큰 상승이 발생하였는데, 이는 전자파의 동작 비율 (duty cycle)이 높은 시퀀스에서 RF의 에너지가 높아지면 SAR 증가에 민감하다는 것을 알 수 있다[14]. 실제 T2는 ETL이 20으로 매우 높고 T1은 ETL이 3으로 낮았지만, TR이 500 ms로 매우 짧아 높은 전자파의 동작 비율을 보인다. 반면, 반전 기법이 적용된 시퀀스는 반전 시간 (inversion time, TI)로 인해 비교적 긴 TR이 적용되어 전자파의 낮은 동작 비율을 보이기 때문에 상대적으로 FA 증가에 따른 SAR 증가가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 임상에서 FSE 기법을 적용한 시퀀스의 비중이 높은 검사에서 재위상화 RF의 FA를 최소화하여 검사하는 것이 SAR를 줄이는 데 큰 도움이 될 수 있다. 물론, 재위상화 RF의 FA를 줄이는 것은 영상의 화질과 대조도에 영향을 미칠 수 있다. Subhendra 등은 고자기장 환경에서 180° FA와 비교하여 120° FA를 적용하였을 때, 영상의 T1 대조도가 크게 훼손될 수 있다고 하였다. 이는 RF로 인한 횡축 자화 (transverse magnetization)의 재위상화가 불완전하게 이루어졌기 때문이라고 주장하였다[15]. T2 대조도 역시 낮은 FA를 적용하면 문제가 생길 수 있다. Matthias 등은 FSE 기법을 적용한 T2 대조도 강조 영상에서 FA를 180°에서 120°

로 낮출 경우, 약 13% T2 대조도 감소 효과가 발생할 수 있다고 말하였다[16]. 이는 FA를 조절할 때, SAR뿐만 아니라 영상의 화질 요소까지 고려한 기준이 필요하며 추후 관련된 연구를 통해 증명되어야 한다.

본 연구는 몇 가지 제한점이 존재한다. 먼저, 영상 단면의 개수 증가 시 T1, T2 FLAIR의 경우, 다른 시퀀스와 비교하여 명확한 직선성을 보이지 않았는데 이에 대한 원인을 파악하지 못한 점이다. 이는 추후 인체를 대상으로 실제 측정된 SAR와 비교함으로써 정확한 관계성을 평가할 필요가 있다. 또한 영상 변수와 SAR의 관계성만을 평가하여 최적화에 대한 기준을 제시하지 못한 점이라 할 수 있다. 임상에서 환자에게 적용되는 전자파의 노출 기준은 전신을 기준으로 6분 동안 1 kg당 4 W 이하의 전자파 흡수가 이루어져야 한다[11]. 이는 결국, 단일 시퀀스로 인한 전자파 노출뿐만 아니라 전체 검사 시간 동안 노출되는 전자파의 양이 중요하며 시퀀스의 순서 및 특징이 SAR 관리에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 따라서 추후 단일 시퀀스뿐만 아니라 조합까지 고려한 최적화를 위해 다양한 시도와 연구가 이루어질 필요가 있다.

V. CONCLUSIONS

본 연구는 다양한 시퀀스 환경에서 영상 변수와 SAR의 관계를 분석함으로써 SAR를 최소화 할 수 있는 방안에 대해 제시하고자 하였다. 그 결과, 비교적 TR이 낮은 시퀀스에서는 단면의 개수를 최소화하고 동작 비율이 높은 시퀀스는 재위상화 RF의 FA를 줄이는 것이 SAR를 줄이는 데 효과적이다.

Reference

- [1] J. C. Sharp, S. B. King, "MRI using radiofrequency magnetic field phase gradients", *Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, Vol. 63, No. 1, pp. 151-161, 2010. <http://dx.doi.org/10.1002/mrm.22188>
- [2] E. Herremans, A. Melado-Herreros, T. Defraeye, B. Verlinden, M. Hertog, P. Verboven, J. Va, M. E. Fernández-Valle, E. Bongaers, P. Estrade, M. Wevers,

- P. Barreiro, B. M. Nicolai, "Comparison of X-ray CT and MRI of watercore disorder of different apple cultivars", *Postharvest Biology and Technology*, Vol. 87, pp. 42-50, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.008>
- [3] F. J. Wippold "Head and neck imaging: the role of CT and MRI", *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 25, No. 3, pp. 453-465, 2007.
<http://dx.doi.org/10.1002/jmri.20838>
- [4] O. Coskun, "Magnetic resonance imaging and safety aspects", *Toxicology and Industrial Health*, Vol. 27, No. 4, pp. 307-313, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1177/0748233710386413>
- [5] M. W. Carr, M. L. Grey, "Magnetic Resonance Imaging: Overview, risks, and safety measures", *American Journal of Nursing*, Vol. 102, No. 12, pp. 26-33, 2002.
- [6] M. Tang, T. Yamamoto, "Progress in Understanding Radiofrequency Heating and Burn Injuries for Safer MR Imaging", *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, Vol. 22, No. 1, pp. 7-25, 2023.
<http://dx.doi.org/10.2463/mrms.rev.2021-0047>
- [7] M. F. Dempsey, B. Condon, "Thermal injuries associated with MRI", *Clinical Radiology*, Vol. 56, No. 6, pp. 457-465, 2001.
<https://doi.org/10.1053/crad.2000.0688>
- [8] Z. Wang, J. C. Lin, W. Mao, W. Liu, M. B. Smith, C. M. Collins, "SAR and temperature: simulations and comparison to regulatory limits for MRI", *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 26, No. 2, pp. 437-441, 2007.
<http://dx.doi.org/10.1002/jmri.20977>
- [9] S. H. Oh, Y. C. Ryu, G. Carluccio, C. T. Sica, C. M. Collins, "Measurement of SAR-induced temperature increase in a phantom and in vivo with comparison to numerical simulation", *Magnetic resonance in medicine : official journal of the Society of Magnetic Resonance in Medicine*, Vol. 71, No. 5, pp. 1923-1931, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1002/mrm.24820>
- [10] J. Jin, F. Liu, E. Weber, S. Crozier, "Improving SAR estimations in MRI using subject-specific models", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 57, No. 24, pp. 8153, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/57/24/8153>
- [11] J. Allison, N. Yanasak, "What MRI Sequences Produce the Highest Specific Absorption Rate (SAR), and Is There Something We Should Be Doing to Reduce the SAR During Standard Examinations?", *American Journal of Roentgenology*, Vol. 205, No. 2, pp. W140-W140, 2015.
<http://dx.doi.org/10.2214/AJR.14.14173>
- [12] T. R. Nelson, R. E. Hendrick, W. R. Hendee, "Selection of pulse sequences producing maximum tissue contrast in magnetic resonance imaging", *Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 2, No. 4, pp. 285-294, 1984.
[http://dx.doi.org/10.1016/0730-725x\(84\)90194-2](http://dx.doi.org/10.1016/0730-725x(84)90194-2)
- [13] W. R. Nitz, P. Reimer, "Contrast mechanisms in MR imaging", *European Radiology*, Vol. 9, No. 6, pp. 1032-1046, 1999.
<http://dx.doi.org/10.1007/s003300050789>
- [14] Purchase, Aaron R., et al. "A high duty-cycle, multi-channel, power amplifier for high-resolution radiofrequency encoded magnetic resonance imaging." *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine* Vol. 32, pp. 679-692, 2019.
- [15] S. N. Sarkar, J. L. Mangosing, P. R. Sarkar, "Effect of Low Refocusing Angle in T1-Weighted Spin Echo and Fast Spin Echo MRI on Low-Contrast Detectability: A Comparative Phantom Study at 1.5 and 3 Tesla", *BioMed Research International* 2013, 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/680292>
- [16] M. Weigel, J. Hennig, "Development and optimization of [formula omitted] weighted methods with reduced RF power deposition (Hyperecho-TSE) for magnetic resonance imaging", *Zeitschrift für Medizinische Physik*, Vol. 18, No. 3, pp. 151-161, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.zemedi.2008.01.008>

MRI 검사의 시퀀스 별 영상 변수와 SAR의 관계

김성호¹, 유세종^{2*}

¹대전보건대학교 방사선(학)과

²건양대학교 방사선(학)과

요 약

본 연구는 SAR의 최적화를 위해 다양한 시퀀스 환경에서 영상 변수와 전자과흡수율 (SAR)의 관계를 분석하였다. 이를 위해 T2, T1, STIR, T1 FLAIR 그리고 T2 FLAIR 시퀀스를 대상으로 장비에서 계산된 전신 (whole body, WB) SAR와 두부 (head) SAR을 측정하였다. 그리고 영상 단면의 수와 재위상화 RF의 숙임각 (FA)을 조절하며 SAR를 평가하였다. 그 결과, 모든 시퀀스에서 영상 단면의 수가 증가할수록 SAR는 증가하였다. T1과 T1 FLAIR는 상관계수(r)가 각각 0.876, 0.876 (WB SAR, head SAR), 0.867, 0.867 (WB SAR, head SAR)이었고 STIR는 0.898, 0.899 (WB SAR, head SAR)로 가장 높은 연관성을 보였다 ($p < 0.05$). 재위상화 RF의 FA을 증가시키며 적용하였을 때, WB SAR와 head SAR는 모든 시퀀스에서 전반적으로 상승하였다. T1, T2 시퀀스에서 상관계수(r)가 각각 0.897, 0.898 (WB SAR, head SAR)과 0.914, 0.915 (WB SAR, head SAR)로 높은 연관성을 보인 반면, 반전회복기법을 적용된 시퀀스에서는 상대적으로 FA 증가에 덜 민감한 양상을 보였다. 따라서 비교적 TR이 낮은 시퀀스 환경에서는 단면의 개수를 최소화하고 고속스핀에코기법을 적용하여 동작 비율이 높은 시퀀스 환경에서는 재위상화 RF의 FA을 줄이는 것이 SAR를 줄이는 데 효과적이다.

중심단어: MRI 시퀀스, 전자과흡수율, 영상 단면의 수, 재위상화 RF의 숙임각

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김성호	대전보건대학교 방사선(학)과	교수
(교신저자)	유세종	건양대학교 방사선(학)과	교수