

Effective of Body Temperature Increasing during Brain MRI scan

Myeong Seong Kim,¹ Jongwoong Lee,² Jaeun, Jung^{3,*}

¹Department of Radiology National Cancer Center

²Department of Radiology Kyung Hee University Hospital at Gang-dong

³Department of Radiological Science, Daegu Health College

Received: February 10, 2017. Revised: February 20, 2017. Accepted: February 28, 2017

ABSTRACT

As the Radiofrequency(RF) increases with the magnetic field strength, the wavelength of the RF excitation field becomes smaller, which leads to more the thermal effect in the human-body placed in the electric field. MRI scanner used was GE signa 1.5T, HDx 3.0T and Philips 3.0T with same routine clinical sequence protocol. Therefore temperature was measured before and after each scan. Taken the temperatures in the ear with ear infra-red type thermometer(Braun co). 3.0T were temperature increases more than 0.15°C and GE 3.0T MRI equipment about 0.14 °C higher than the Philips 3.0T MRI(p<0.012). Psychogenic status was investigated by the survey respondents about their status can not just answer therefore, a little different from the expected. In our study of Thermal effect of clinical MRI with clinical protocol sequence, we found that the 3.0T in the body-temperature rise was greater than the 1.5T. Therefore, in clinical 3.0T examine the dangerous situation caused by the temperature rise occurred (burns, impaired thermoregulatory mechanism in patients with high-temperature damage, exhaustion occurs due to excessive sweating), not to appear the more watched the patient's condition with procedure.

Keyword: MRI, RF, Thermal effect, 1.5T, 3.0T

I. INTRODUCTION

Magnetic Resonance Image(MRI)는 높은 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio)와 해상도(Resolution)로 인해 뇌, 연조직, 신경을 비롯하여 거의 모든 신체부위에서 가장 우수한 질의 영상을 제공하고 있다.^[1] MRI 영상의 화질은 자기장의 세기와 비례하여 개선 가능하지만 radio frequency (RF) 에 의한 국소부위에서의 발열 문제로 (Specific Absorption Rate: SAR) 인하여 미국 Food and Drug Administration (FDA)과 International Electrotechnical Commission (IEC) 에서는 일정 자기장 세기 이상의 사용을 엄격히 제한하고 있다.^[2,3]

자기장이 생물체에 미치는 영향에 대한 연구는 1979년 Wertheimer and Leeper는 60Hz의 전자기장이 어린이의 각종 암 발생과 관련이 있다는 역학연구 결과를

보고한 이래 어린이는 물론 어른에서의 암 발생과도 연관성이 있다는 보고도 다수 있지만 여전히 뚜렷한 연구 결과는 없다.^[4,5] 일반적으로 MRI 자기장은 정자기장(Static Magnetic Fields), 경사자장과(Gradient Magnetic Fields) 전자기장 (Radiofrequency Electromagnetic fields) 3가지로 분류 한다.^[6] 이중 정자장에 의한 생물학적 영향은 급성 현기증과 혈액순환 감소 현상이 발생된다고 보고되고 있지만 연구 설계에 따라서 그 발생 정도의 차이를 보이고 있다. 경사자장에서의 생물학적 효과는 60Hz이상에서 말초신경자극(peripheral nerve stimulation)이 나타난다.^[7]

본 연구에서 설명하고자하는 전자기장의 주된 생물학적효과는 MHz수준의 펄스 사용으로 인한 열 효과이다. 인체가 MRI 장비 안에 놓이게 되면 주 자기장에 비례하는 수소의 세차주파수를(1 T: 42.6 MHz, 1.5 T:

63.6 MHz) 가지고 회전 운동을 하게 된다.^[8] 따라서 자기장 세기가 증가할수록 수소의 세차주파수도 증가하게 되어 전자기장의 주파수를 높게 되고, 이로 인해 체온이 비례적으로 상승하게 된다.^[9] 인위적으로 외부 환경에 의해 1°C 이상의 체온상승이 나타나게 되면 탈진이나 열사병을 일으킬 수 있고 화상을 초래하기도 한다.^[10] FDA에 따르면 보고된 MRI검사 관련사고 400여건 중 대다수가 화상 사고이고 10%정도만이 그 이외로 분류되는 사고라고 한다.^[11] FDA와 IEC(International Electro technical Commission)에서는 SAR(Specific Absorption Rate, W/Kg)수치로서 전자기장의 열 효과를 측정 하게 되는데, SAR는 전자기장에 의한 조직의 에너지 흡수율을 뜻하는 것으로, 인체가 받은 전자기장 에너지의 양을 간접적으로 나타내어준다.^[12] 따라서 본 연구에서는 1.5T와 3.0T MRI 장비에서 사람을 대상으로 온도 상승효과를 비교하고 사람의 심리적 상태가 체온 상승에 영향 요인이 되는지를 설문을 통하여 알아보고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 연구 대상

본 연구의 대상자는 2014년 12월 21일부터 2015년 8월 14일까지 수도권 소재 일개 병원을 방문하여 MRI 검사를 목적으로 환자 153명(남자 85명, 여자 68명)이고 연령은 3세부터 82세 까지였다. 체온상승 비교를 위한 MRI 영상검사의 신체부위는 brain MRI 검사로 한정하였다.

체온측정은 MRI검사 직전과 직후에 측정하여 그 차이를 파악하였고 MRI검사를 끝마친 후에는 진행 중 심리적 상태, 소리에 대한 민감성 정도 그리고 어지러운 정도를 설문 하였다.

2. 연구장비 signa 1.5T: GE healthcare, Milwaukee, U.S.A)

본 연구에서 사용한 MRI장비로는 signa 1.5T (RF AMP Power:16Kw): HDx 3.0T (RF AMP Power: 35Kw) (GE health care, Milwaukee, U.S.A) 그리고 Achieva 3.0 T (RF AMP Power: 25Kw) (Philips Medical Systems, Best, the Netherlands)로 모두 수도권 소재 일개 병원에서 설치·운영되고 있는 MRI영상 장비로 하였다. MRI

영상실의 온습도는 Signa 1.5T가 21°C, 20%이고 HDX 3.0T가 19°C와 43% 그리고 Philips Achieva 3.0T가 19°C와 40%로 항온·항습기에 의해 설정 유지되고 있다.

체온측정을 위한 체온계로는 신속하고 자기장에 영향을 덜 받는 적외선 타입의 귀 체온계로 (IRT 4520: Braun, Germany) 모델의 정확도는 35.5 ~ 42.0°C(±0.2°C)를 가진다.

3. MRI 검사 프로토콜

본 연구에서 사용한 brain sequence 프로토콜은 Table 1과 같고 1.5T뿐만 아니라 3.0T에서 모든 sequence 펄스에서 SAR 수치가 FDA 기준치 3w/kg(10분)를 초과하지는 않았다. 일반적으로 뇌를 검사하는데 걸리는 시간은 GE signa 1.5T가 28분 정도이며 GE HDx 3.0T와 Philips Achieva 3.0T는 24분 정도 소요되었다. 검사한 환자의 SAR 값은 sequence 펄스가 끝날 때 나타나는 Estimated SAR로 같음하였다.

Table 1. Comparison of the SAR value on Routine Brain MRI protocol between the 1.5T and 3.0T MR systems.

pulse sequence	GE 1.5T a	GE 3.0T a
Axial T2 FSE	0.12	1.5
Axial T1 FSE	0.14	2.4
Axial T2 FLAIR	0.09	0.7
Axial Diffusion	0.012	0.2
Sagittal T1 FLAIR	0.15	2.1
Coronal T2 FSE	0.13	1.7
Axial T1 FLAIR	0.12	2.1
Sagittal T1 FLAIR	0.11	1.9
Coronal T1 FLAIR	0.12	2.1

a SAR value (W/kg)

* The mass of the filled phantom, 80kg, was the weight entered at registration to enable the MR systems to calculate the whole body averaged SARs.

4. 통계분석

통계분석은 SAS software version 8.1 for windows(SAS Institute, Inc, Cary, NC)과 엑셀을 사용하였다. MRI 검사 후 각 변수에 대한 체온 상승의 비교는 평균값으로 비교하였다. 체온상승을 일으킨 변수의 유의성 정도는 paired t-test를 이용하였고 p<0.05인 경우 유의하다고 보았다. 또한 체온상승과 변수와의 연관성 정도는 linear regression과 pearson's correlation coefficient를 통하여 알아보았다.

III. RESULT

1. 자기장 세기와 체온 상승 비교

다른 인체 생리학적 변수는 고려하지 않고 자기장(1.5T vs 3.0T)세기 차이에 따른 온도 결과는 1.5T에서 보다 3.0T에서 체온상승이 더 높았다 [Table 2]. 3.0T가 1.5T에서보다 평균 약 0.153℃ 정도 높았고 최고 상승 체온 또한 3.0T가 1.3℃로 1.5T에서 보다 0.4℃ 더 상승하였다. 표준편차(S.D)와 범위(Range) 값에서도 3.0T가 1.5T에서 보다 약 0.08℃와 0.1 ~ 1.3℃ 정도 더 넓은 분포를 보였다.

Table 2. Comparison of the change in temperature after Routine Brain MRI scan between the 1.5T and 3.0T MR systems.

Magnet strength	No. of population	MEAN(℃)	S.D(℃)	Range(℃)
3.0T	99	0.6979798	0.249072	0.1 to 1.3
1.5T	54	0.5444444	0.168978	0.2 to 0.9

*Statistically significant difference (at p<0.0001) between 3.0T and 1.5T.

동일 자기장의 3.0T 중 다른 MRI 제조회사 차이에 따른 체온 상승 정도는 Table 3과 같다.

Table 3. Comparison of the change in temperature after Routine Brain and Liver MRI scan within 3.0T(Philips 3.0T vs GE 3.0T) MR systems.

MRI Equipment	No. of population	MEAN(℃)	S.D(℃)	Range(℃)
Philips	72	0.6597	0.272295	0.1 to 1.3
GE	27	0.8	0.163755	0.6 to 1.1

* Statistically significant difference (at p<0.012) between Philips 3.0T and GE 3.0T.

2. 심인성 상태와 체온 상승 결과

MRI검사 중 대상자의 긴장도와 답답한 정도에 따른 체온 상승 결과는 Table 4와 같다. RI검사 중 답답한 정도의 단계를 수면, 매우 안정, 안정, 긴장, 폐쇄공포증으로 나누어 구분하였을 때 3.0T MRI 대상자 중 매우안정 상태(relieve, n=6)와 긴장 상태(tension, n=31)와의 비교 결과는 p< 0.195로 나타나 통계적 유의성 정도는 높지 않았다. 마찬가지로 1.5T 대상자들에서도 안정 상태(stable, n=38)와 긴장 상태(tension, n=13)와

의 비교 결과에서도 p< 0.408로 유의성이 매우 낮았다.

Table 4. Comparison of the change in temperature according to psychogenic status during MRI scan.

Magnet strength	psychogenic status	No. of population	MEAN (℃)	S.D (℃)	Range (℃)
3.0T	sleeping	1	0.5	.	0.5 to 0.5
	relieve	6	0.55	0.2429	0.3 to 0.8
	stable	61	0.711	0.2457	0.1 to 1.3
	tension	31	0.706	0.25682	0.1 to 1.2
1.5T	stable	38	0.532	0.17874	0.2 to 0.9
	tension	13	0.577	0.13634	0.4 to 0.8
	claustrophobia	1	0.8	.	0.8 to 0.8

*Pearson's correlation coefficient between psychogenic status and differences in body temperature rise was 0.105 at 3.0T, 0.202 at 1.5T. paired T-test between relieve and tension in body temperature rise was p<0.195 at 3.0T, stable and tension was p<0.408 at 1.5T.

3. 자기장 세기와 현기증 발생

1.5T에서 보다는 3.0T에서 현기증 발생 빈도가 높았고 3.0T 내에서도 자기장이 상대적으로 안정성 높은 GE社 3.0T가 philips社 3.0T에서보다 더 높게 나타났다 [Table 5]. 또한 자기장 세기 순서를 GE社 1.5T, Philips社p 3.0T 그리고 GE社 3.0T로 나열 했을 때 이에 따른 현기증 발생과의 pearson's correlation coefficient 가 0.328로 나타나 자기장과 현기증 발생은 어느 정도 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

Table 5. percentile of vertigo symptom according to MRI manufacture.

MRI equipment	No. of population	Vertigo symptom	
		Yes (%)	No (%)
Philips 3.0T	70	15(21.43)	55(78.57)
GE 3.0T	27	12(44.44)	15(55.56)
GE 1.5T	52	4(7.69)	48(92.31)

* Pearson's correlation coefficient between vertigo symptom and differences in magnet field strengths was 0.328.

IV. DISCUSSION & CONCLUSION

본 연구 결과 MRI 영상검사 후 체온이 상승하는 것을 확인하였고 저자장에서 (1.5T) 보다 고자장에서(3.0 T) 체온 상승은 더 컸다. 이는 Hiroyuki Muranaka가^[13] phantom 대상으로 시행한 결과 [Figure 1.]와도 유사한 결과를 보인 것이다. 즉, RF에 노출될 때에는 온도가 계속해서 상승했다가 RF가 멈추게 되면 급격하게 떨어졌다. 체온상승은 자기장(1.5T vs 3.0T)세기가 높을수록 더 높았다. 1.5T에서보다 3.0T에서 평균 0.15°C 체온이 상승하였고 최고 상승 체온 비교에서도 1.5T의 경우 54명 대상자 중에서 0.9°C 까지 상승 차이가 1명이었지만 3.0T에서는 100명 대상자 중에서 0.9°C 이상 상승 차이가 25명이었고 최고 상승 체온 또한 1.3°C까지 상승 차이를 보였다. 현재 임상에서 통상적으로 사용하고 있는 1.5T와 3.0T의 자장세기와 SAR의 관계를 예로 들면 자장의 세기는 두 배이지만 SAR 수치는 네 배의 차이를 보이게 된다. 즉, SAR 수치가 높아진다는 것은 그만큼 체온상승을 증가시킨다고 할 수가 있다.

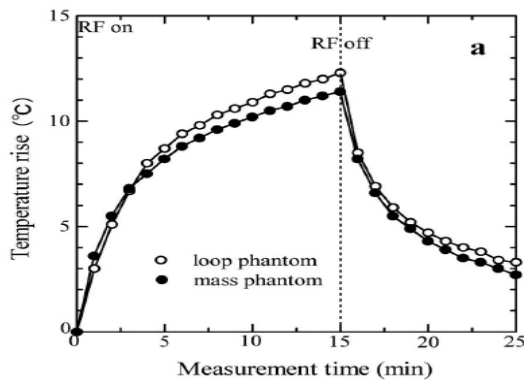


Fig. 1. Temporal temperature changes from the start of RF irradiation with semi-solid gel phantom at a 1.5T MRI.^[13]

RF pulse를 전신에 노출 시켰을 때를 가정한 시뮬레이션 연구 결과에 따르면 64MHz, 128MHz, 213MHz에서 각각 최대 0.3°C, 1.3°C, 5.0°C까지 온도 상승하는 것으로 나타났다.^[14] 이처럼 1.5T와 비교했을 때 3.0T에서 평균 상승 체온과 최고 상승 체온이 더 높은 연구결과를 보였으므로 RF에 의한 열 발생에 고 위험군으로 분류 되는 체온조절 중추 손상 환자, 임신부, 진정제 투여 환자 그리고 노령인 경우에는 고 자기장에서 MRI검사 시 높은 체온상승으로 인하여 위험을 초래 할

가능성이 있다. 실제로 본 연구 진행 중에 임신부(2명)와 진정제 투여된 영아(3명)를 3.0T MRI에서 검사를 시행 하였다. 그 결과 임신 8개월째 된 환자의 경우 40분 검사시간을 다 채우지 못하고 20분 정도에서 답답하고 답다는 이유로 중간에 검사를 포기한 일이 있었고 진정제 투여 환자와 노령 환자의 경우에는는 평균 이상의 체온상승을 보였다. MRI 제조회사가 다르면서 동일한 3.0T 자기장 (Philips 3.0T vs GE 3.0T) 체온 상승 비교 결과 GE社 3.0T가 약 0.1403°C 정도 더 높았다. 그 원인으로서는 RF 펄스를 인가해주는 증폭기의 출력이 Philips는 25Kw이지만 GE 3.0T에서는 35Kw로 10Kw정도 차이를 보이고 있고 초전도 자성을 만들기 위한 도선의 감긴 회수 또한 GE社가 더욱 많았기 때문으로 판단된다. 이러한 차이로 인하여 같은 3.0T MRI장비 내에서도 제조회사에 따라서 인체가 받게 되는 전자기장이 다를 수 있다.

한편 RF의 열 효과에 민감한 기관으로는 비교적 물 함량이 많으면서 순환이 원활치 않은 중추신경계, 고환 그리고 눈의 수정체부위를 들 수 있고 MRI 검사로 인한 체온 상승은 온도상승 정도와 지속시간 그리고 체온조절중추 능력에 따라 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.^[15] SAR수치는 MRI검사 시 환자의 몸무게와 펄스 sequence에 따라 간접적으로 계산하여 알 수가 있고 RF 파워와 노출 시간이 증가할수록 SAR수치는 높아짐을 본 연구 결과에서 확인할 수 있었다. FDA와 IEC는 RF에 의해 발생 가능한 생물학적 역 작용의 가능성을 예방하고자 SAR 상한 값을 머리: 3W/kg(10분), 전신: 4w/kg(15분)로 정해 놓았다. 따라서 FDA는 위 기준치 이상의 SAR에 노출될 때 MRI 검사가 정지하는 설계가 있을 경우만이 임상 사용 승인을 해주고 있다. 대체적으로 SAR 수치가 높을수록 체온상승도 오르는 경향을 보이나 반드시 비례적 상승관계를 나타내지는 않는다. 즉, SAR 수치가 높은 3.0T에서 검사를 한 경우가 낮은 SAR 수치를 가진 1.5T에서보다 체온이 더 상승하는 경우를 보이곤 하지만 반드시 비례적 관계를 갖지 않기 때문에 1.5T에서도 더 높은 체온상승을 보이기도 하였다. Table 4의 결과와 같이 긴장이 될수록 체온상승이 증가하는 것처럼 보이지만 대상자들이 MRI검사 중 답답했다는 표현보다는 안정 상태였다는 답변도 적지 않아서 예상했던 것과는 사뭇 다른 설문결과를 보였고 자기장에 따른 수면과 폐쇄공포증 대상자

수가 적다보니 통계적 관련성을 찾을 수가 없었다. 그렇다보니 긴장도와 체온상승과는 연관성이 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만 대상자들의 설문 결과가 정확한 자신의 심리상태를 반영한 것이었다면 긴장 정도와는 무관한 것이 맞을 수도 있을 것이다.

현재 연구용으로 사용 중에 있는 7.0T와 동물 연구용으로 사용 중에 있는 12T 등은 임상에서 사용되고 있는 1.5T나 3.0T와는 비교되지 않을 정도로 높은 수준임을 감안했을 때 고자장의 MRI 장비를 사용할수록 환자의 발열 상태를 세심히 확인할 필요가 있겠다.

Reference

- [1] MRI AND THE PHYSICAL AGENTS(EMF) DIRECTIVE: AN INSTITUTE OF PHYSICS REPORT. 2008. https://www.iop.org/publications/iop/2008/file_38215.pdf
- [2] M. G. Restivo, C. A. van den Berg, A. L. van Lier, D. L. Polders, A. J. Raaijmakers, P. R. Luijten, H. Hooqduin. "Local specific absorption rate in brain tumors at 7 tesla". *Magnetic Resonance Medicine*. Vol. 7., No. 1. pp. 381-389. 2016.
- [3] Z. Wang, J. C. Lin. "Partial-Body SAR Calculations in Magnetic-Resonance Image (MRI) Scanning Systems [Telecommunications Health and Safety]". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. Vol. 54. No. 2. pp. 230-237. 2012.
- [4] N. Wertheimer and E. Leeper. "Electrical wiring configurations and childhood cancer". *American Journal of Epidemiology*. Vol. 109, No. 3. pp. 273-284. 1979.
- [5] S. X. Xin, Q. Huang, Y. Gao, B. Li, Y. Xu, W. Chen. "Fetus MRI at 7 T: B1 Shimming strategy and SAR safety implications". *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 61, No. 5. pp. 2146-2152. 2013.
- [6] S. Romeo, A. Sannino, O. Zeni, M. R. Scarfi, R. Massa, V. Cerciello, R. d'Angelo. "Induced electric fields and currents in the body by movements in a MRI facility: A numerical analysis". *IEEE*. Vol. 2015.
- [7] B. A. Chronik and M. Ramachandran. "Simple anatomical measurements do not correlate significantly to individual peripheral nerve stimulation thresholds as measured in MRI gradient coils". *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. Vol. 17. No. 6, pp. 716-721. 2003.
- [8] M. S. Kim. "Investigation of Factors Affecting Body Temperature Changes During Routine Clinical Head Magnetic Resonance Imaging". *Iran Journal of Radiology*. Vol. 13, No. 4. e34016. 2016.
- [9] H. A. Sharma. "MRI physics-basic principles". *Acta Neuropsychiatrica*. Vol. 21. No. 4. pp. 200-201. 2009.
- [10] A. Hirata and O. Fujiwara. "The correlation between mass-averaged SAR and temperature elevation in the human head model exposed to RF near-fields from 1 to 6 GHz". *Physics in medicine and biology*, Vol. 54. No. 23. 2009.
- [11] J. Jerrolds and Shane. Keene. "MRI safety at 3T versus 1.5T". *The internet journal of world health and societal politics*. Vol. 6. No. 1. 2009.
- [12] K. B. Baker, J. A. Tkach, J. A. Nyenhuis, M. Phillips, F. G. Shellock, J. Gonzalez-Martinez, A. R. Rezaei. "Evaluation of specific absorption rate as a dosimeter of MRI-related implant heating". *Journal of Magnetic Resonance of Imaging*. Vol. 20, No. 2. pp. 315-320. 2004.
- [13] H. Muranaka, T. Horiguchi, S. Usui, Y. Ueda, O. Nakamura, F. Ikeda. "Dependence of RF heating on SAR and implant position in a 1.5T MR system". *Magnetic Resonance in medical sciences*. Vol. 6. No. 4. pp. 199-209. 2007.
- [14] A. Kangarlu, F. G. Shellock, D. W. Chakeres. "8.0-Tesla human MR system: Temperature changes associated with radiofrequency-induced heating of a head phantom". *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. Vol. 17. No. 2. pp. 220-226. 2003.
- [15] A. Ahlbom, A. Green, L. Kheifets, D. Savitz, A. Swerdlow. "Epidemiology of health effects of radiofrequency exposure". *Environmental health perspectives*. Vol. 112. No. 17. pp. 1741-175. 2004.

MRI 검사 시 체온상승 효과: 1.5 T vs 3.0 T

김명성,¹ 이종웅,² 정재은^{3,*}

¹국립암센터 영상의학과

²강동경희대병원 영상의학과

³대구보건대학교 방사선과

요약

MRI장비에서 자장의 세기가 증가 하게 되면 사용하는 RF(Radiofrequency) pulse 또한 증가 하게 되고 이는 MRI 장비 안에 놓인 인체의 체온 상승을 증가 시키게 하는 역할을 하게 된다. 이에 국소부위에서의 열 발생을 알아보려고 젤라틴과 pork sample 이용하여 측정하였다. 본 연구는 2014년 12월 21일부터 2015년 8월 14일까지 153명의 환자를 대상으로 실시하였다. 3대의 MRI(1.5T- 1대, 3.0T- 2대)장비를 사용하여 뇌 또는 간 부위에서 일상적으로 쓰이는 sequence 프로토콜을 동일하게 적용하여 검사하였다. 검사 전·후 체온 측정은 적외선 타입의 귀 체온계(Braun社)를 사용하였으며 대상자의 심리적 상태는 직접 설문을 통하여 파악했다. 임상 환자를 대상으로 한 체온 상승 결과를 보면 3.0T가 1.5T에서보다 평균 0.15°C 정도 높았고(p<0.012) 3.0T내 에서도 Philips제조회사에서 보다 GE社 MRI장비에서 0.14°C 정도 더 높았다. 심인성 상태에 따른 결과를 살펴보면 MRI검사 진행 중 나는 소리에 대한 민감성 정도와 체온상승과의 관계는 무관하였고, 폐쇄성에 대한 응답이 긴장감으로 느꼈다고 대답하는 사람일수록 체온이 더 상승하는 경향을 보였다. 자장의 세기가 높은 MRI장비일수록 RF 반응물질(물, 금속물질)에 의한 화상이나 체온상승으로 인한 위험한 상황발생(체온조절 장애 환자의 경우 고온 손상, 과다 땀 발생으로 인한 탈진)이 나타나지 않도록 환자의 상태를 좀 더 예의 주시하며 MRI검사를 진행할 필요가 있겠다.

높은 자기장을 기반으로 한 MRI장비는 인체에 흡수되는 전자파 흡수율인 SAR를 비례적으로 증가시키므로 앞으로는 RF 코일 성능을 향상하거나 영상의 질을 향상시키기 위한 이미지 프로그램을 개발하는 등 자기장 이외의 방법을 강구하는 것이 필요하다.

중심단어: MRI, RF, 체온상승, thermal sensation, 자기장, 3.0Tesla