

Analysis of Susceptibility Artifact Reduction in Titanium Alloy Implant Fixture with Bandwidth Variation in MRI Scans

Min-Ho Lee¹, Jun-Young Yoon¹, Young-Yun Jo¹, Chan-Woo Lee¹, Jae-Hu Byeon², Yeong-Cheol Heo^{1,*}

¹Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Eulji University

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

Received: October 15, 2024. Revised: November 22, 2024. Accepted: November 30, 2024.

ABSTRACT

The purpose of this study was to quantitatively analyze the effect of Bandwidth changes on susceptibility artifacts in MRI scans. A custom-made phantom was designed with an implanted dental fixture, and the examination was conducted using a 3.0 Tesla MRI and a Turbo Spin Echo sequence, with the Bandwidth increased incrementally from about 150 Hz/Px to 500 Hz/Px. The results demonstrated that as the Bandwidth increased, the length of the susceptibility artifact significantly decreased. This finding suggests that adjusting Bandwidth can effectively reduce susceptibility artifacts in MRI scans of patients with dental implants. Further research applying these findings to different implant materials is expected to broaden the clinical applicability of this method.

Keywords: Susceptibility artifact, Dental implant, Bandwidth, MRI, T2WI

I. INTRODUCTION

2014년 65세 이상 노인을 대상으로 임플란트 보형이 적용되면서 임플란트 시술 환자가 급격히 증가하고 있다^[1-3]. 대한민국 사회는 현재 고령화가 진행되고 있으며 2040년에는 65세 이상 인구가 전체 인구의 34.4%에 이를 것이라 전망됨에 따라 향후 임플란트 시술을 받은 환자는 계속해서 증가할 것으로 예상된다^[4]. 임플란트는 치아를 상실한 환자에게 뛰어난 기능적, 심미적 해결책을 제공하지만, 자기공명영상검사 시 자화율 인공물 문제를 유발할 수 있다^[5-7]. 일반적으로 임플란트 시술 과정에서 잇몸에 삽입되는 지대주(Fixture) 재질은 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)과 지르코니아, 폴리에테르에테르케톤(polyetheretherketone: PEEK)이 있다^[8]. 이 중 티타늄 합금은 생체 적합성이 뛰어나고 뼈와의 골융합이 잘 이루어지며 강도와 내구성이 우수하기 때문

에 가장 보편적으로 사용되고 있다^[9,10]. 티타늄 합금이 자화율이 낮아 다른 금속에 비해 자화율 인공물을 덜 일으킨다고 보고 되었지만 여전히 자기공명영상검사에서 자화율 인공물로 인한 영상의 왜곡은 줄여야 하는 과제이다^[11].

자화율 인공물에 대한 연구는 이미 활발히 진행되고 있으며, 다양한 파라미터가 자화율 인공물에 미치는 영향도 잘 알려져 있다. 연구자들은 자화율 인공물을 줄이기 위한 다양한 방법을 모색해 왔으며, 이 과정에서 여러 파라미터의 역할을 분석하고 있다. 그중에서도 수신대역폭은 자화율 인공물의 형성에 중요한 영향을 미치는 파라미터 중 하나로 알려져 있지만 수신대역폭 변화가 자화율 인공물에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 수신대역폭의 변화가 자화율 인공물에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 임플란트 삽입한 환자의 자기공명영

* Corresponding Author: Yeong-Cheol Heo E-mail: heoyc@eulji.ac.kr

Tel: +82-31-740-7134

상검사에서 발생할 수 있는 자화율 인공물 문제를 보다 정확히 이해하는 데 도움을 주고자 한다.

II. MATERIALS AND METHODS

1. 연구 재료

본 연구에 사용된 팬텀은 Fig. 1과 같이 1 mm 두께의 폴리메틸 메타크릴레이트(polymethyl-methacrylate : PMMA)를 이용하여 사각형 모양으로 제작하였으며 가로 5 cm, 세로 5 cm PMMA와 가로 1 cm, 세로 5 cm PMMA를 교차 하여 1 mm 간격으로 PMMA와 비어있는 공간이 생기도록 하였다.

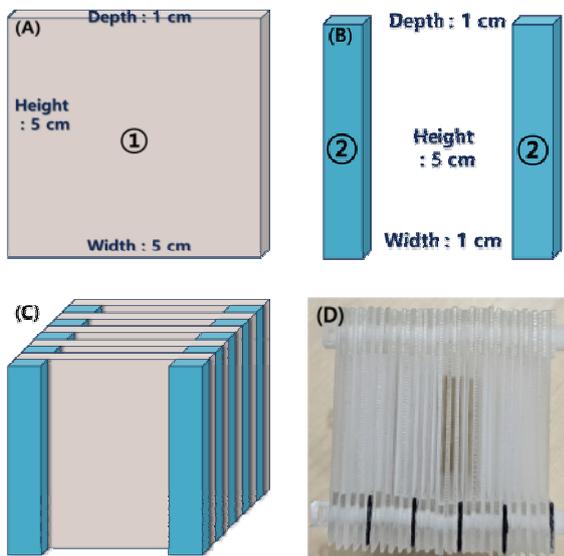


Fig. 1. A plate(A) made of PMMA with a thickness of 1 cm, height of 5 cm, and length of 5 cm, and another plate(B) made of PMMA with the same thickness and height but a width of 1 cm, are assembled together in a crossed manner. (① and ②) to form structure(C). When viewed from above, since plate ① and ② are alternately assembled (①, ②, ①, ②), spaces are created between them(D).

이 팬텀을 물이 담긴 수조에 넣으면 비어있는 공간은 물이 채워지게 되어 1 mm 간격으로 물과 PMMA가 교차한다. 이 팬텀은 T2 강조영상으로 검사하면 PMMA는 어두운 신호, 물 부분은 밝은 신호를 나타내기 때문에 1 mm 간격으로 밝고 어두운 신호가 교차하여 마치 자(Ruler)처럼 길이를 측정할 수 있다.

2. 연구 방법

영상 검사는 Fig. 2와 같이 자체 제작한 팬텀 위에 치과용 임플란트 지대주(Superline fixture, Dentium, Korea)를 PMMA가 쌓인 방향으로 길게 설치하였으며 3.0 Tesla 전신용 자기공명영상장치와 8 채널 센스 헤드코일을 이용하여 검사하였다.

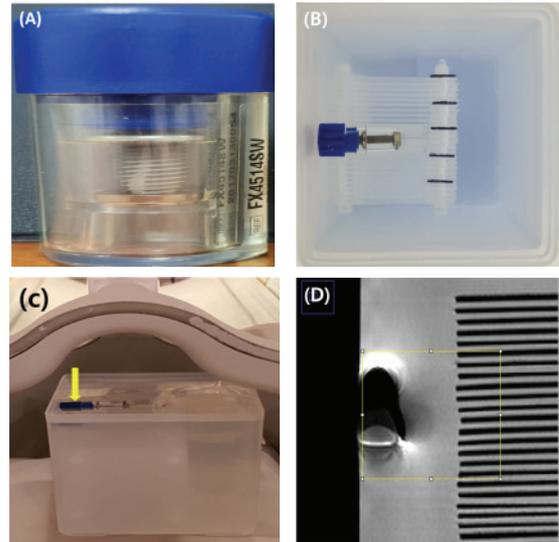


Fig. 2. The implant fixture(A) was placed on the custom-made phantom and positioned in the frequency encoding direction(B), after which it was centered within the 8-channel SENSE head coil for scanning, and the yellow arrow indicates the implant fixture(C). The area where the artifact occurred in the resulting images was highlighted with a yellow box, and the length of the artifact was measured by counting the alternating black and white signals at 10 mm intervals(D).

검사는 T2 TSE로 검사하였으며 TR/TE 3000/100 ms, ETL 10 Thickness/gap 3/0 mm, Slice scan order 는 interleaved, FOV 200 mm², Slice 15개, Pixel size 0.4 × 0.4 mm, Orientation Sagittal, SENSE factor는 사용하지 않았다. 파라미터의 조건을 고정시킨 상태에서 수신대역폭을 약 150 Hz/Px에서 50 Hz/Px씩 증가시켜 약 500 Hz/Px 까지 총 8가지 수신대역폭으로 검사하였다.

3. 데이터 처리

영상에서 인공물이 관찰되는 영상은 7번에서 12 번 영상에 걸쳐 나타났다. 인공물이 나타난 길이 측정은 Image J (V-1.54d, NIH, USA)를 이용하였다.

인공물 길이 측정은 Fig. 2 - (D)와 같이 인공물이 나타난 영상에서 인공물의 경계라 판단하는 부분을 사각형의 노란 박스를 이용하여 인공물과 팬텀이 전체 포함되도록 표시하였다. 이후 박스에 포함된 팬텀은 T2 강조영상에서 흑백 선이 각 10 mm로 선의 총 개수를 통해 인공물의 길이를 측정할 수 있다. 이러한 방법으로 각 영상에서 30개의 데이터를 얻었고, 7번에서 11번 영상까지 각 30회씩 측정하여 총 150개, 같은 방법으로 8개의 수신대역폭 데이터를 측정하여 총 1,200개의 데이터를 획득하였다. 데이터는 수신대역폭 변화에 따른 측정값의 평균 변화를 확인하기 위해 SPSS (Ver 20.0, IMB, USA)를 이용하여 일원배치분산분석(ANOVA)으로 평균값을 비교하였고 Dunnett을 이용하여 사후분석하였다. 이때, p 값이 0.05 보다 작을 때 통계적으로 유의하다고 판단하였다.

III. RESULT

본 연구에서 검사한 영상은 Fig. 3와 같으며 7 번째 단면에서 인공물이 점차 심해지고 12번째 단면에서 인공물이 줄어들고 있는 모습을 육안으로 확인할 수 있었다. 따라서 인공물이 잘 보이는 단면으로 7번 단면부터 11번 단면까지를 설정하였고 각 단면에 대한 인공물 길이 측정을 하였다. 수신대역폭을 약 150 Hz/Px에서 500 Hz/Px로 변화시킬 때 각 단면의 자화율 인공물 평균 길이는 Table 1과 같이 7번째 단면은 약 150 Hz/Px에서 23.35 ± 1.05 mm로 가장 크게 측정되었고, 약 500 Hz/Px에서 18.54 ± 1.05 mm로 가장 작게 측정되었다($p < 0.05$). 8번째 단면은 약 150 Hz/Px에서 21.74 ± 1.54 mm로 가장 크게 측정되었고, 약 500 Hz/Px에서 14.62 ± 2.64 mm로 가장 작게 측정되었다($p < 0.05$). 9번째 단면은 약 150 Hz/Px에서 21.36 ± 1.87 mm로 가장 크게 측정되었고, 약 500 Hz/Px에서 14.58 ± 2.24 mm로 가장 작게 측정되었다($p < 0.05$). 10번째 단면은 약 150 Hz/Px에서 20.30 ± 1.67 mm로 가장 크게 측정되었고, 500 Hz/Px에서 16.18 ± 2.44 mm로 가장 작게 측정되었다($p < 0.05$). 11번째 단면은 약 150 Hz/Px에서 18.72 ± 1.35 mm로 가장 크게 측정되었고, 약 500 Hz/Px에서 13.84 ± 3.10 mm로 가장 작게 측정되었다($p < 0.05$).

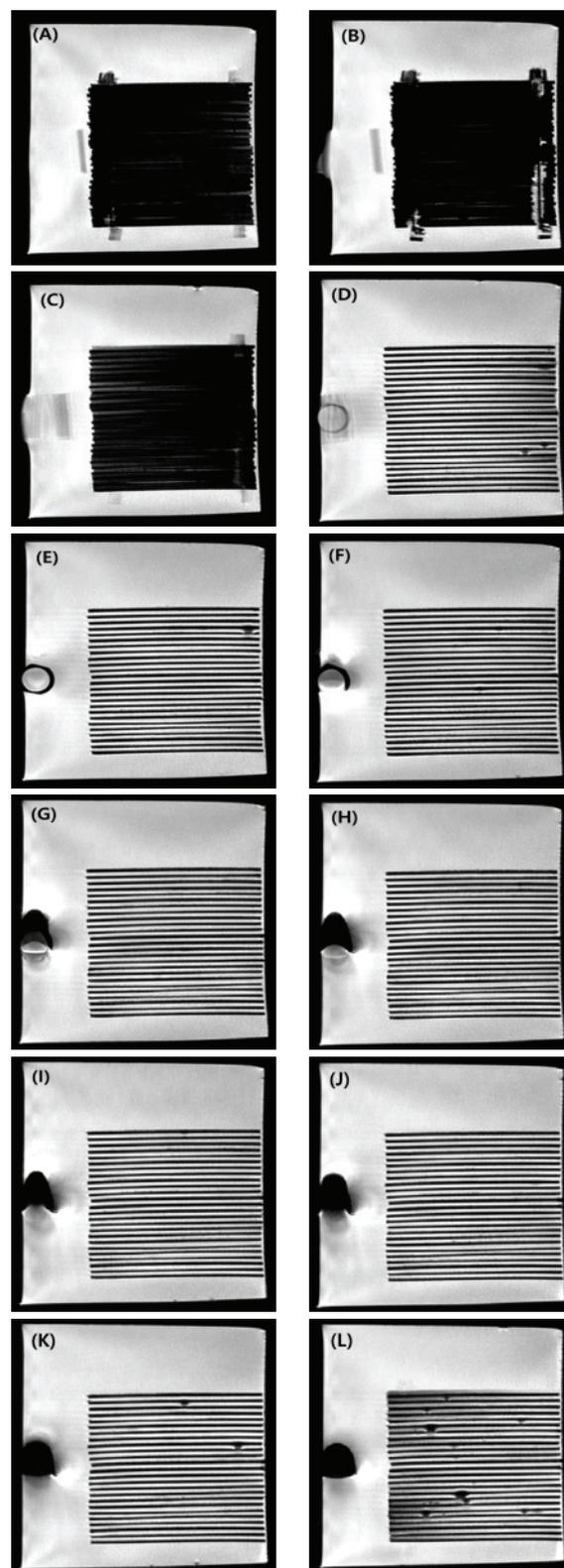


Fig. 3. The scanned images included the second slice(A), third slice(B), fourth slice(C), fifth slice(D), sixth slice(E), seventh slice(F), eighth slice(G), ninth slice(H), tenth slice(I), eleventh slice(J), twelfth slice(K), and thirteenth slice(L).

Table 1. Length of susceptibility artifacts measured in slice according to bandwidth changes (unit : mm)

Receive Bandwidth (Hz/Px)	Slice_7	Slice_8	Slice_9	Slice_10	Slice_11
150.5	23.35±1.05	21.74±1.54 ^{P†}	21.36±1.87 ^{P†}	20.30±1.67 ^{P†}	18.72±1.35 ^{P†}
201.1	22.21±0.79	20.61±0.71 ^{P†}	20.47±0.89 ^{P†}	19.61±0.95 ^{P†}	18.34±1.54 ^{P†}
250	21.26±0.90	18.90±1.16	18.39±3.95	18.20±3.83	16.77±2.41
301.7	20.62±0.86	18.14±1.03	18.52±1.96	18.51±1.58	16.11±2.48
350	20.34±1.12	17.99±1.72	17.99±1.92	18.50±1.85	15.87±2.63
397.7	19.85±1.26	17.08±2.28	16.92±2.13	17.82±2.00	15.52±2.76
448.7	19.22±1.02	15.18±2.64	15.29±1.87	16.66±2.14	14.29±2.86
500	18.54±1.05	14.62±2.64	14.58±2.24	16.18±2.44	13.84±3.10
p	.000	.000	.000	.000	.000

p is the ANOVA test and M±SD^{P†} is the post hoc test with dunnett, p>0.05.

Table 2. Linear Regression Analysis of artifact length changes in each slice according to bandwidth increase

Classification	$\beta \pm SE$	partial R ²	p value
Slice_7	-1.050 ± 0.048	.663	.000
Slice_8	-0.604 ± 0.032	.593	.000
Slice_9	-0.604 ± 0.034	.574	.000
Slice_10	-0.589 ± 0.055	.325	.000
Slice_11	-0.430 ± 0.043	.296	.000

수신대역폭의 증가에 따른 단면 별 자화율 인공물 감소는 Table 2와 같이 모든 단면에서 수신대역폭이 증가할수록 음의 상관성을 보이는 패턴을 확인할 수 있었다.

IV. DISCUSSION

본 연구에서는 수신대역폭 변화가 자기공명영상 검사에서 발생하는 자화율 인공물에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과, 수신대역폭을 증가시킬수록 자화율 인공물의 길이가 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 자기공명영상검사에서 금속 임플란트로 인한 자화율 인공물을 줄이기 위한 중요한 방법으로 수신대역폭 조정이 사용될 수 있음을 시사한다. 수신대역폭은 단순히 자화율 인공물뿐만 아니라 다른 자기공명영상 파라미터에도 영향을 미치므로, 이를 조정하는 과정에서 발생하는 상호작용에 대해 깊이 있는 이해가 필요하다. 수신대역폭

은 자화율 인공물에 직접적인 영향을 주는 파라미터 중 하나이지만 신호대잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)와 이미지 해상도에도 영향을 미친다^[12]. 수신대역폭을 넓히면 자화율 인공물은 감소하지만, 신호대잡음비는 감소하며, 이미지의 해상도 또한 낮아질 수 있다. 반대로, 수신대역폭을 좁히면 자화율 인공물이 커지지만, 이미지의 세부 사항이 더 선명해질 수 있다^[13]. 따라서 자화율 인공물을 줄이기 위해 수신대역폭을 조정할 때는, 이와 같은 상호작용을 고려해야 한다. 다양한 파라미터의 조정 없이 수신대역폭만 증가시키면 자화율 인공물은 감소하나, 이미지 품질 저하로 인한 진단의 어려움이 발생할 수 있다^[14]. 수신대역폭 외에도 자화율 인공물을 줄이기 위한 다양한 파라미터들이 존재한다. 예를 들어, Echo Train Length (ETL)와 단면 두께는 자화율 인공물의 크기와 형태에 영향을 미칠 수 있다. ETL을 짧게 설정하면 신호가 더 빨리 회복되어 인공물의 영향을 줄일 수 있으며, 얇은 단면 두께를 사용하면 자화율 인공물의 크기를 줄일 수 있다^[15,16]. MARS(Metal Artifact Reduction Sequence)와 같은 특수 시퀀스도 자화율 인공물 감소를 위한 효과적인 방법으로 많이 사용된다^[17].

조직의 자화율을 정량적으로 측정하는 방법 중 QSM(Quantitative Susceptibility Mapping)은 자기장 왜곡에 기초하여 신호 위상 데이터를 분석하고 이를 통해 조직 내 자화율 분포를 맵 형태로 시각화한다^[18]. 이는 조직 내 자화율 분포를 파악하여 혈

중 철 농도나 칼슘 침착을 정량적으로 분석하여 미세출혈 등의 결과를 특정 하는데 사용되거나 영상에서 자화율 분포에 의한 신호 왜곡을 시각적 수리적으로 정량화할 때 유용하다^[19]. 하지만 본 연구에서는 특정 파라미터들의 변화와 인공물의 길이 변화 패턴을 통해 파라미터와 인공물의 관련성을 확인하고, 인공물 길이 측정에서 image J를 이용한 객관화된 측정 법을 제시하고 있기 때문에 QSM 과는 차이가 있다.

본 연구의 제한점으로는 첫째, 다양한 금속 재질을 실험에 포함하지 못한 점이 있다. 티타늄 합금 외에도 지르코니아나 PEEK와 같은 비금속 임플란트 재질이 존재하므로, 향후 연구에서는 다양한 금속과 비금속 재질을 포함한 실험이 필요하다. 둘째, 본 연구에서는 고속스핀에코(Turbo Spin Echo: TSE) 시퀀스를 사용하였지만, 다양한 시퀀스를 사용하지 못한 한계가 있다. MARS, STIR 등 다양한 시퀀스에서 자화율 인공물의 발생을 분석함으로써 다양한 금속 물질과 시퀀스에서도 동일한 결과를 얻을 수 있는지에 대한 추가적인 검증이 필요하다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 수신대역폭 변화가 자기공명영상 검사에서 발생하는 자화율 인공물의 길이에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 연구 결과, 수신대역폭을 증가시킬수록 자화율 인공물의 길이가 유의미하게 감소하였으며, 이는 자화율 인공물의 발생을 줄이기 위한 중요한 파라미터로 수신대역폭이 작용할 수 있음을 시사한다. 본 연구는 임플란트가 삽입된 환자의 자기공명영상검사서 자화율 인공물을 줄이는 데 있어 수신대역폭 조정이 효과적임을 확인하였으며, 이는 향후 진단 영상 품질 향상에 기여할 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 2024 을지대학교 대학혁신지원사업 지원을 받아 진행된 연구임

Reference

- [1] J. I. Ryu, J. E. Jeon, "Utilization rate of dental implant for elderly in National Health Insurance in Korea", *The Journal of the Korean Dental Association*, Vol. 57, No. 9, pp. 496-503, 2019. <https://doi.org/10.22974/jkda.2019.57.9.001>
- [2] J. S. Hong, H. J. Lee, "Change of oral health education and working environment after national health insurance coverage of dental implant in dental hygienist", *Journal of Korean society of oral health science*, Vol. 9, No. 2, pp. 1-8, 2021. <https://doi.org/10.33615/jkohs.2021.9.2.1>
- [3] J. S. Choi, D. S. Ma, "The financial estimate of dental implant treatment about the National Health Insurance coverage for the Korean young adults", *Journal of Korean Academy Oral Health*, Vol. 44, No. 2, pp. 91-96, 2020. <https://doi.org/10.11149/jkaoh.2020.44.2.91>
- [4] S. H. Suk, "The importance of geriatric neurology in Korea becoming a super-aged society", *Journal of Geriatric Neurology*, Vol. 1, No. 1, pp. 2-10, 2022. <https://doi.org/10.53991/jgn.2022.00045>
- [5] H. M. Song, J. W. Kim, H. W. Yoon, S. T. Lee, "Vertical alveolar ridge augmentation using fixture-supported titanium-mesh: case series", *The journal of the Korean dental association*, Vol. 62, No. 7, pp. 422-431, 2024. <https://doi.org/10.22974/jkda.2024.62.7.001>
- [6] L. Bohner, D. Dirksen, M. Hanisch, N. Sesma, J. Kleinheinz, N. Meier, "Artifacts in magnetic resonance imaging of the head and neck: Unwanted effects caused by implant-supported restorations fabricated with different alloys", *Journal of Prosthetic Dentistry*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2023.08.018>
- [7] G. Xiaomeng, W. Qianbing, G. Qingping, "Susceptibility artifacts induced by crowns of different materials with prepared teeth and titanium implants in magnetic resonance imaging", *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 1, pp. 428-438, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03962-w>
- [8] S. M. Kim, "Stress distribution in implant abutment components made of titanium alloy, zirconia, and polyetheretherketone: a comparative study using finite

- element analysis", *Journal of Technologic Dentistry*, Vol. 46, No. 2, pp. 21-27, 2024.
<https://doi.org/10.14347/jtd.2024.46.2.21>
- [9] M. H. Hong, "Comparison of stress distribution in bone and implant-supported dental prosthesis with zirconia and titanium implants: a 3-dimensional finite element analysis", *Journal of Technologic Dentistry*, Vol. 42, No. 4, pp. 348-354, 2020.
<https://doi.org/10.14347/jtd.2020.42.4.348>
- [10] J. J. Woo, M. S. Kim, B. H. Koo, "Comparison of PEO Coating Layer of AZ31 Alloy Surface according to EDTA Contained in Electrolytic Solution", *Composites Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 185-190, 2020.
<https://doi.org/10.7234/composres.2020.33.4.185>
- [11] L. N. Carter, O. Addison, Na. Naji, P. Seres, A. H. Wilman, D. E. T. Shepherd, L. Grover, S. Cox, "Reducing MRI susceptibility artefacts in implants using additively manufactured porous Ti-6Al-4V structures", *Acta biomaterialia*, Vol. 107, pp. 338-348, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.02.038>
- [12] T. W. Redpath, "Signal-to-noise ratio in MRI", *The British Journal of Radiology*, Vol. 71, No. 847, pp.704-707, 1998.
- [13] B. L. Schmitz, A. J. Aschoff, M. H. K. Hoffmann, G. Grön, "Advantages and pitfalls in 3T MR brain imaging: a pictorial review", *American journal of Neuroradiology*, Vol. 26, No. 9, pp. 2229-2237, 2005.
- [14] G. C. Feuerriegel, R. Sutter, "Managing hardware-related metal artifacts in MRI: current and evolving techniques", *Skeletal Radiology*, Vol. 53, No. 9, pp. 1737-1750, 2024.
<https://doi.org/10.1007/s00256-024-04624-4>
- [15] T. Allkemper, P. Reimer, G. Schuierer, P. E. Peters. "Study of susceptibility-induced artefacts in GRASE with different echo train length", *European Radiology*, Vol. 8, No. 5, pp. 834-838, 1998.
<https://doi.org/10.1007/s003300050481>
- [16] S. H. Kolind, A. L. Mackay, P. L. Munk, Q. S. Xiang, "Quantitative evaluation of metal artifact reduction techniques", *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 20, No. 3, pp. 487-495, 2004. <https://doi.org/10.1002/jmri.20144>
- [17] S. Ahlawat, S. E. Stern, A. J. Belzberg, J. Fritz. "High-resolution metal artifact reduction MR imaging of the lumbosacral plexus in patients with metallic implants", *Skeletal Radiology*, Vol. 46, No. 7, pp. 897-908, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s00256-017-2630-9>
- [18] D. Andreas, S. Ferdinand, R. R. Jürgen, "Overview of quantitative susceptibility mapping", *NMR in Biomedicine*, Vol. 30, No. 4, pp. e3569, 2017.
<https://doi.org/10.1002/nbm.3569>
- [19] E. M. Haacke, S. Liu, S. Buch, et al, "Quantitative susceptibility mapping: current status and future directions", *Magnetic resonance imaging*, Vol. 33, No. 1, pp. 1-25, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.mri.2014.09.004>

자기공명영상검사에서 수신대역폭 변화에 따른 티타늄 합금 임플란트 지대주의 자화율 인공물 감소 분석

이민호¹, 윤준영¹, 조영운¹, 이찬우¹, 변재후², 허영철^{1,*}

¹을지대학교 보건과학대학 방사선학과

²강동경희대학교병원 영상의학과

요약

본 연구에서는 수신대역폭의 변화가 자화율 인공물에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 자체 제작한 팬텀에 임플란트 지대주를 설치하고 3.0 Tesla MRI와 고속스핀에코 시퀀스를 이용하여 수신대역폭을 약 150 Hz/Px에서 500 Hz/Px까지 증가시켜 검사하였다. 연구 결과 수신대역폭을 증가할수록 자화율 인공물의 길이가 유의미하게 감소하는 경향을 보였다. 따라서 임플란트가 삽입된 환자의 MRI 검사에서 수신대역폭 조정이 자화율 인공물을 줄여줄 수 있음을 의미하며 추후 다양한 임플란트 재질에 적용하는 추가 연구를 통해 더 넓은 임상적 적용 가능성을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

중심단어: 자화율 인공물, 임플란트, 수신대역폭, 자기공명영상검사, T2 강조영상

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	이민호	을지대학교 보건과학대학 방사선학과	학부생
(공동저자)	윤준영	을지대학교 보건과학대학 방사선학과	학부생
	조영운	을지대학교 보건과학대학 방사선학과	학부생
	이찬우	을지대학교 보건과학대학 방사선학과	학부생
	변재후	강동경희대학교병원 영상의학과	방사선사
(교신저자)	허영철	을지대학교 보건과학대학 방사선학과	교수