

〈원저〉

자기공명영상에서 ACR 팬텀을 이용한 잡음전력스펙트럼 평가

민정환¹⁾·정회원²⁾¹⁾신구대학교 방사선학과·²⁾백석문화대학교 방사선학과

Evaluation of the Noise Power Spectrum by Using American College of Radiology Phantom for Magnetic Resonance Imaging

Jung-Whan Min¹⁾·Hoi-Woun Jeong²⁾¹⁾Department of Radiological Science, Shingu University²⁾Department of Radiological Science, Baekseok Culture University

Abstract This study was purpose to quantitative evaluation of comparison of the image intensity uniformity and noise power spectrum (NPS) by using American college of radiology (ACR) phantom for magnetic resonance imaging (MRI). The MRI was used achiva 3.0T MRI and discovery MR 750, 3.0T, the head and neck matrix shim SENSE head coil were 32 channels receive MR coil. The MRI was used parameters of image sequence for ACR standard and general hospital. NPS value of the ACR standard T2 vertical image in GE equipment was 7.65E-06 when the frequency was 1.0 mm⁻¹. And the NPS value of the ACR hospital T1 region of interest (ROI) 9 over all vertical image in Philips equipment was 9E-08 when the frequency was 1.0 mm⁻¹ and the NPS value of the hospital T2 ROI 9 over all vertical image in Philips equipment was 1.06E-07 when the frequency was 1.0 mm⁻¹. NPS was used efficiently by using a general hospital vertical sequence more than the standard vertical sequence method by using the ACR phantom. Furthermore NPS was the quantitative quality assurance (QA) assessment method for noise and image intensity uniformity characteristics was applied mutatis mutandis, and the results values of the physical imaging NPS of the 3.0T MRI and ACR phantom were presented.

Key Words : Quality Assurance, ACR Magnetic Resonance Imaging Phantom, Noise Power Spectrum, Image Intensity Uniformity, International Electro-technical Commission

중심 단어 : 품질보증, ACR 자기공명영상 팬텀, 잡음전력스펙트럼, 영상 강도 균일성, 국제전기위원회

I. 서론

최근 의료기기의 발전과 더불어 의료영상은 매우 중요한 정보를 제공하면서, 빠른 움직임 속에서 기술 발전을 거듭해 오고 있다. 특히나, 의료영상을 진단하는 매우 중요한 부분이기도 하며 디지털화되는 과정에서 영상에 대한 평가 기준을 담고 있다. 그리고 의료영상에 대한 영상 화질 특성은 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI)에 있어서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다[1-3]. 또한, 품질보증(Quality

Assurance, QA)에 관련된 내용을 매우 중요시하고 있는 현재 입장이다[1-5].

MRI 영상은 영상의 강도 균일성(Image Intensity Uniformity)에 대해서 매우 중요시 평가하고 있는 항목이다[2,3]. 따라서, 일반적으로 임상병원에서는 7가지 영역에서 중요한 항목에 해당하는 것으로 미국방사선의학회(American College of Radiology, ACR)에서도 평가를 하고 있다[2,3]. 그리고, 영상 품질관리는 ACR 팬텀을 이용한 MRI 장비 자기공명영상 팬텀(ACR-PHIL, J.M. specialty parts Inc, USA)영상을 획득하여 평가하는 방

This study was supported by from the Shingu University Industry-Academic Cooperation Foundation Grant 2023.

Corresponding author: Jung-Whan Min, Department of Radiological Technology, Shingu University, 377 Gwangmyeong-ro, Jungwon-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13174, Republic of Korea / Tel: +82-31-740-1361 / E-mail: pmpmpm@shingu.ac.kr

Received 7 December 2023; Revised 3 January 2024; Accepted 10 January 2024

Copyright ©2024 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

법으로는 공간분해능 및 고 대조도 공간 분해능과 저 대조도 공간 분해능도 있다[2,3]. 공간분해능은 변조전달함수(Modulation Transfer Function, MTF)와 관련성이 있으며, 고 대조도 공간 분해능과 저 대조도 공간 분해능은 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR) 그리고, 대조도대 잡음비(Contrast to Noise Ratio, CNR)와 관련성이 있다[2,3,5-11]. 그리고, 품질관리에 대한 7가지의 팬텀 영상 검사는 주로 통계적인 방법과 정성적인 방법을 사용하고 있다[2,3]. 따라서, 특히 이번 연구에서 영상 강도 균일성은 매우 중요한 항목이다. 이유는 공간주파수에 대한 잡음전력스펙트럼(Noise Power Spectrum, NPS)측정 방법과 관련성이 있음을 시사한다[7,12]. 이렇듯 ACR팬텀을 이용하는 방법 내용 중 시퀀스의 정성적 평가 방법과 달리 NPS 방법으로는 균질성을 주파수대 별로 정량평가를 할 수 있다고 생각하였다[1,2,4,7,12].

임상 연구에서 의료영상 대한 정량적인 평가 방법이 많이 연구되고 있으며, 품질관리에 대한 MRI 영상 또한 품질보증 요구도가 필요할 것이라 생각한다[1-3]. 본 연구에서는 국제전기위원회(International Electro-technical Commission, IEC) 62220-1-1의 규격을 이용한 정량적 평가 방법 중 잡음전력스펙트럼을 이용하였다[2,3]. 또한, ACR 팬텀을 사용한 3.0T MRI 장비들에 대해서, 일반적인 사용 방법의 표준 시퀀스와 병원 내에서 검증해서 쓰이는 시퀀스를 사용하여 영상에 대한 잡음전력스펙트럼 특성을 평가하였다.

II. 대상 및 실험방법

1. 실험도구

실험에서 사용한 2개의 MRI 장비는 3.0T (achiva 3.0T MRI, Philips System, Netherlands)과, 3.0T (discovery

MR 750, GE Medical System, America)를 사용하였다[8], [Fig. 1]. 채널 수는 32 channel의 SENSE head 3.0T, 32 MR 코일 그리고, 32 channel의 MC 3003G-32R 32-CH head 코일을 사용하였다[8], [Fig. 1]. 실험 Setup 후에 검증된 ACR Phantom을 head 코일 내에 넣고 ACR에서 제시하는 일반적인 사용 방법의 표준 시퀀스와 병원 내에서 검증해서 쓰이는 병원 시퀀스를 사용하여, T1 영상 및 T2 영상 얻고 영상 분석하였다[8], [Fig. 1]. 영상분석은 MATLAB R2019a (MathWorks, USA) 프로그램이며, ImageJ (Ver. 1.53n, Wayne Rasband National Institutes of Health, USA)를 사용하여 정량적 평가를 하였다.

영상을 얻기 위해 Table 1과 같은 파라미터를 이용하여 ACR 자기공명영상 팬텀의 영상을 얻을 수 있었다. 팬텀 영상을 확인 후 NPS 영상을 선택하여 주파수대별로 NPS 측정을 하였다. 그리고 다수의 Spin Echo와 Inhomogeneity Echo에 대한 간섭 및 인공물 등에 의한 보정(Linear Gradient Component, Shimming)하였으며, Table 1과 같은 시퀀스별로 반복해서 영상을 얻었다[8].

2. 실험방법 및 영상분석 방법

실험을 위해서 사용한 ACR 자기공명영상 팬텀(ACR-PH1, J.M. specialty parts Inc., USA)은 내부 지름 190 mm이며, 내부 길이가 148 mm이다. 잡음전력스펙트럼(Noise Power Spectrum, NPS) 측정을 하기 위해서 DICOM 의료영상을 얻는 과정에서 수평 유지를 확인하고, 수평계를 사용하여 수평을 정확하게 맞추었다. 또한, Head 코일의 정 중앙에 위치하도록 하였다. 그리고, DICOM 파일로 된 384 × 384 size 2D 영상을 얻었다. 그리고, 잡음전력스펙트럼 평가측정을 하기 위해서 팬텀 영상 가운데 균일성이 있는 영상을 선택하였다[Fig. 1]. ACR에서 기준이 되는 표준 시퀀스와 병원 내에서 검증해서 쓰

Table 1. Parameters of imaging sequence of ACR standard and hospital

Parameters	ACR Standard T2	ACR Standard T1	Hospital T2	Hospital T1
No. slice	11	11	11	11
S.T (mm)	5	5	5	5
FOV (mm)	250 × 250	250 × 250	250 × 250	250 × 250
Matrix	384 × 384	384 × 384	384 × 384	384 × 384
TR (ms)	2,000	500	4,000	500
TE (ms)	20/80	20	84	20
G사 BW(Hx/px)	15.63	15.63	15.63	15.63
P사 BW(Hx/px)	82.1	144.8	164.8	81.9
G사 Acq. time	08:56	02:16	07:36	06:28
P사 Acq. time	08:34	02:10	05:08	06:26

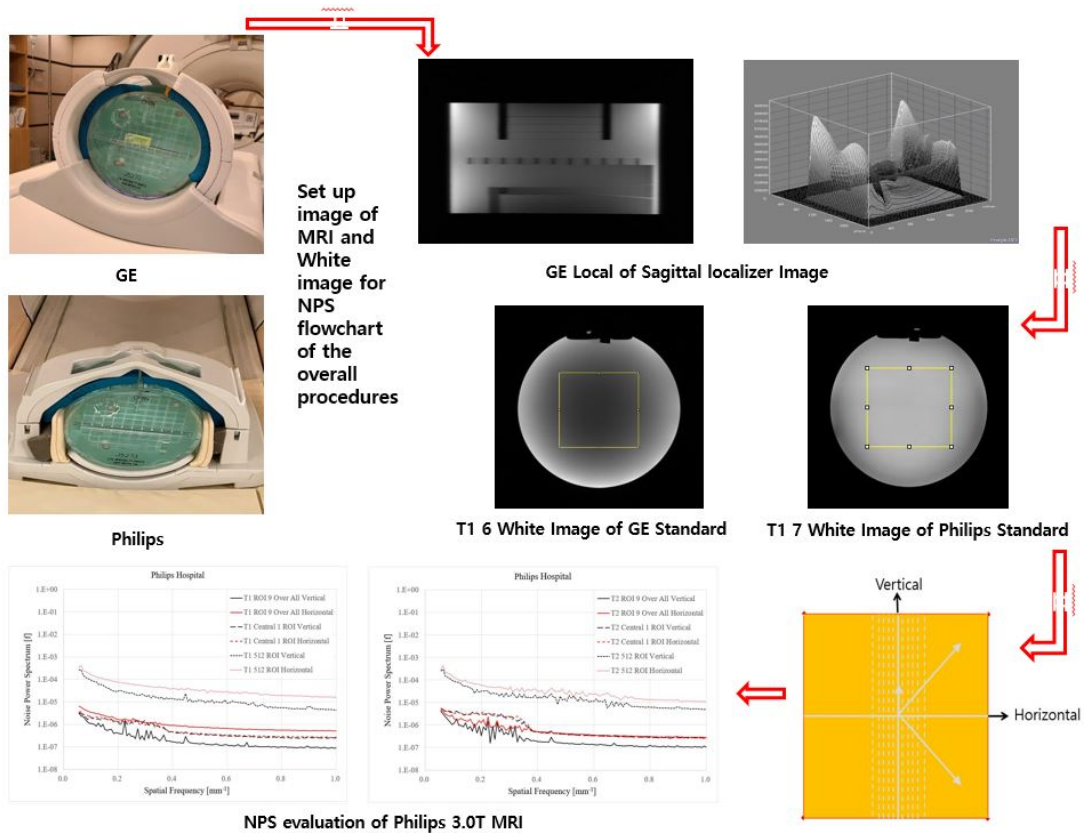


Fig. 1. Signal could be obtained the phantom image and white T1, T2 image of NPS flowchart for the overall procedures.

이는 시퀀스를 사용하여, T1 영상 및 T2 영상을 얻었다.

측정의 정확성 및 팬텀 영상의 위치 중심을 확인하였으며, 위치에 따라 달라질 수 있는 부분을 확인하면서, 측정을 위한, 가장 최적의 영상 위치를 확인하였다. 그리고 Fig.1과 같이 실험방법을 따라서, 순서에 맞게 잡음전력스펙트럼을 측정하기 위한 영상을 얻었다. 특히 측정된 팬텀 영상을 선택해서 확대하였고, 엷지 모양의 빗금처럼 보이는 부분이라든가 평균값들을 확인하면서 슬라이스 영상들을 확인 분석하는 테스트를 반복하였다[Fig. 1]. 특히 P사에서 얻은 영상에 대해서는 관심영역 (Region of Interest, ROI)별로 나누어서 주파수대별로해서 잡음전력스펙트럼을 측정 평가하였다. 이유는 T1 영상 및 T2 영상에 따라서 차이점이 있는지 확인을 먼저 하는 차별성 있는 과정이며, Fig. 1과 같이 순서에 맞게 프로세싱하였다.

III. 결과

1. 3.0T MRI 영상 G사 표준 시퀀스별 Vertical, Horizontal 잡음전력스펙트럼 비교

팬텀 영상은 중앙에 가장 근접한 영상 중 White 영상을 선

택해서 측정 비교하였다. ACR 팬텀을 이용한 잡음전력스펙트럼에 대한 G사 3.0T MRI 결과는 시퀀스별 T1 Vertical and Horizontal, T2 Vertical and Horizontal 값이다. 결과 값 주파수 1.0 mm⁻¹에서 표준 T1 Vertical 영상의 NPS 값은 1.03E-05이며, 표준 T1 Horizontal 영상의 NPS 값은 7.05E-05이다. 그리고, 주파수 1.0 mm⁻¹에서 표준 T2 Vertical 영상의 NPS 값은 7.65E-06이며, 표준 T2 Horizontal 영상의 NPS 값은 7.37E-05이다[Table 1, Fig. 2].

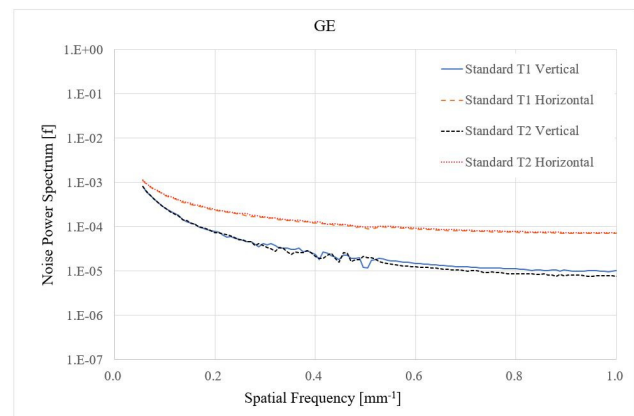


Fig. 2. Comparison of NPS graphs of the T1 standard images and T2 standard images by using GE 3.0T MRI

2. 3.0T MRI 영상 G사 병원 시퀀스별 Vertical, Horizontal 잡음전력스펙트럼 비교

팬텀 영상은 중앙에 가장 근접한 영상 중 White 영상을 선택해서 측정 비교하였다. ACR 팬텀을 이용한 잡음전력스펙트럼에 대한 G사 3.0T MRI 결과는 시퀀스별 T1 Vertical and Horizontal, T2 Vertical and Horizontal 값이다. 결과값 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T1 Vertical 영상의 NPS 값은 $7.62\text{E}-06$ 이며, 병원 T1 Horizontal 영상의 NPS 값은 $6.58\text{E}-05$ 이다. 그리고, 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T2 Vertical 영상의 NPS 값은 $2.67\text{E}-05$ 이며, 병원 T2 Horizontal 영상의 NPS 값은 $4.51\text{E}-05$ 이다[Table 1, Fig. 3].

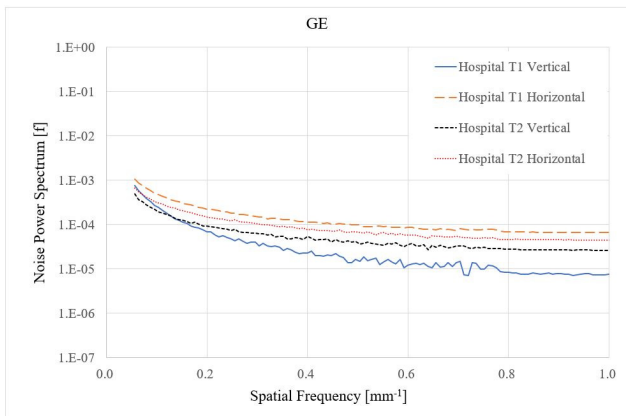


Fig. 3. Comparison of NPS graphs of the T1 hospital images and T2 hospital images by using GE 3.0T MRI

3. 3.0T MRI 영상 P사 표준 시퀀스별 Vertical, Horizontal 잡음전력스펙트럼 비교

팬텀 영상은 중앙에 가장 근접한 영상 중 White 영상을 선택해서 측정 비교하였다. ACR 팬텀을 이용한 잡음전력스펙트럼에 대한 P사 3.0T MRI 결과는 시퀀스별 T1 Vertical and Horizontal, T2 Vertical and Horizontal 값이다. 결과값 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 표준 T1 Vertical 영상의 NPS 값은 $9.18\text{E}-07$ 이며, 표준 T1 Horizontal 영상의 NPS 값은 $2.21\text{E}-06$ 이다. 그리고, 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 표준 T2 Vertical 영상의 NPS 값은 $1.02\text{E}-06$ 이며, 표준 T2 Horizontal 영상의 NPS 값은 $3.39\text{E}-06$ 이다[Table 1, Fig. 4].

4. 3.0T MRI 영상 P사 병원 시퀀스별 Vertical, Horizontal 잡음전력스펙트럼 비교

팬텀 영상은 중앙에 가장 근접한 영상 중 White 영상을 선택해서 측정 비교하였다. ACR 팬텀을 이용한 잡음전력스펙트럼에 대한 P사 3.0T MRI 결과는 시퀀스별 T1 Vertical and Horizontal, T2 Vertical and Horizontal 값이다. 결과값 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T1 Vertical 영상의 NPS 값은 $9\text{E}-08$ 이며, 병원 T1 Horizontal 영상의 NPS 값은 $5.21\text{E}-07$ 이다. 그리고, 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T2 Vertical 영상의 NPS 값은 $1.06\text{E}-07$ 이며, 병원 T2 Horizontal 영상의 NPS 값은 $2.82\text{E}-07$ 이다[Table 1, Fig. 5].

팬텀 영상은 중앙에 가장 근접한 영상 중 White 영상을 선택해서 측정 비교하였다. ACR 팬텀을 이용한 잡음전력스펙트럼에 대한 P사 3.0T MRI 결과는 시퀀스별 T1 Vertical and Horizontal, T2 Vertical and Horizontal 값이다. 결과값 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T1 Vertical 영상의 NPS 값은 $9\text{E}-08$ 이며, 병원 T1 Horizontal 영상의 NPS 값은 $5.21\text{E}-07$ 이다. 그리고, 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T2 Vertical 영상의 NPS 값은 $1.06\text{E}-07$ 이며, 병원 T2 Horizontal 영상의 NPS 값은 $2.82\text{E}-07$ 이다[Table 1, Fig. 5].

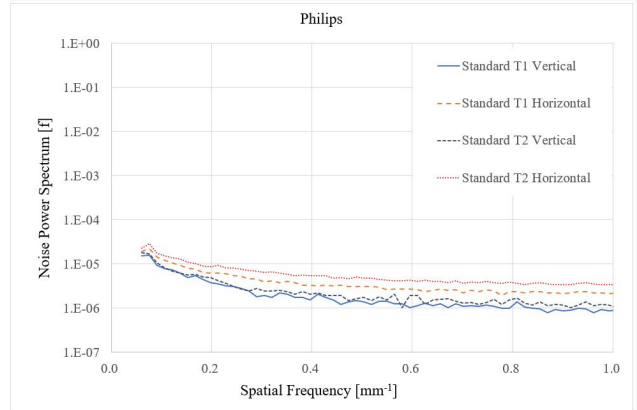


Fig. 4. Comparison of NPS graphs of the T1 standard images and T2 standard images by using Philips 3.0T MRI

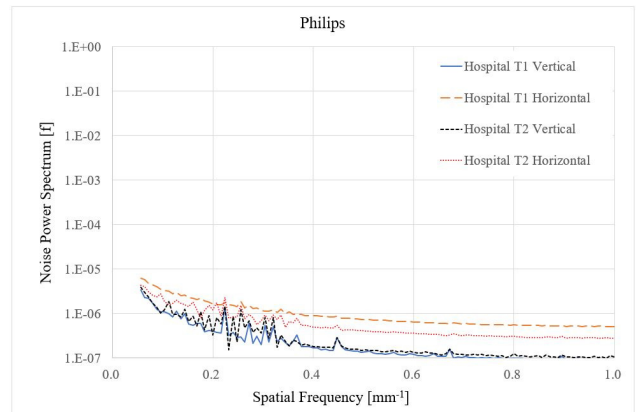


Fig. 5. Comparison of NPS graphs of the T1 hospital images and T2 hospital images by using Philips 3.0T MRI

5. 3.0T MRI 영상 P사 병원 T1 시퀀스별 Vertical, Horizontal ROI에 따르는 잡음전력스펙트럼 비교

팬텀 영상은 중앙에 가장 근접한 영상 중 White 영상을 선택해서 측정 비교하였다. ACR 팬텀을 이용한 잡음전력스펙트럼에 대한 P사 3.0T T1 MRI 결과는 시퀀스별 T1 Vertical ROI 9 and Horizontal ROI 9, Vertical ROI Central and Horizontal ROI Central, Vertical ROI 512 and Horizontal ROI 512 값이다. 결과값 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T1 Vertical

ROI 9 영상의 NPS 값은 $9E-08$ 이며, 병원 T1 Horizontal ROI 9 영상의 NPS 값은 $5.21E-07$ 이다. 그리고, 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T1 Vertical ROI Central 영상의 NPS 값은 $2.49E-07$ 이며, 병원 T1 Horizontal ROI Central 영상의 NPS 값은 $2.69E-07$ 이다. 마지막으로 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T1 Vertical ROI 512 영상의 NPS 값은 $4.3E-06$ 이며, 병원 T1 Horizontal ROI 512 영상의 NPS 값은 $1.61E-05$ 이다 [Table 1, Fig. 6].

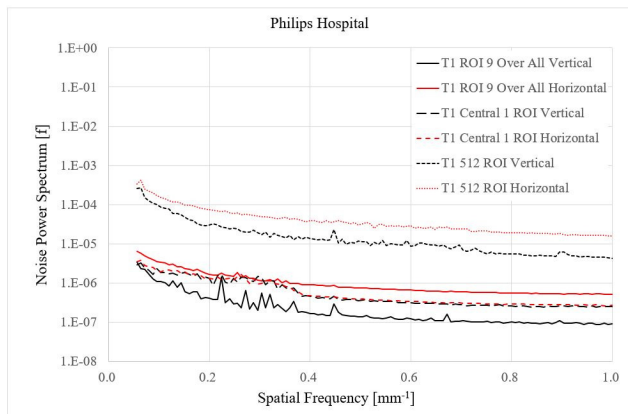


Fig. 6. Comparison of according of ROI for NPS graphs of the T1 hospital images by using Philips 3.0T MRI

6. 3.0T MRI 영상 P사 병원 T2 시퀀스별 Vertical, Horizontal ROI에 따르는 잡음전력스펙트럼 비교

팬텀 영상은 중앙에 가장 근접한 영상 중 White 영상을 선택해서 측정 비교하였다. ACR 팬텀을 이용한 잡음전력스펙트럼에 대한 P사 3.0T T2 MRI 결과는 시퀀스별 T2 Vertical ROI 9 and Horizontal ROI 9, Vertical ROI Central and Horizontal ROI Central, Vertical ROI 512 and Horizontal ROI 512 값이다. 결과값 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T1 Vertical ROI 9 영상의 NPS 값은 $1.06E-07$ 이며, 병원 T1 Horizontal ROI 9 영상의 NPS 값은 $2.82E-07$ 이다. 그리고, 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T1 Vertical ROI Central 영상의 NPS 값은 $2.81E-07$ 이며, 병원 T1 Horizontal ROI Central 영상의 NPS 값은 $2.68E-07$ 이다. 마지막으로 주파수 1.0 mm^{-1} 에서 병원 T1 Vertical ROI 512 영상의 NPS 값은 $5.14E-06$ 이며, 병원 T1 Horizontal ROI 512 영상의 NPS 값은 $1.09E-05$ 이다 [Table 1, Fig. 7].

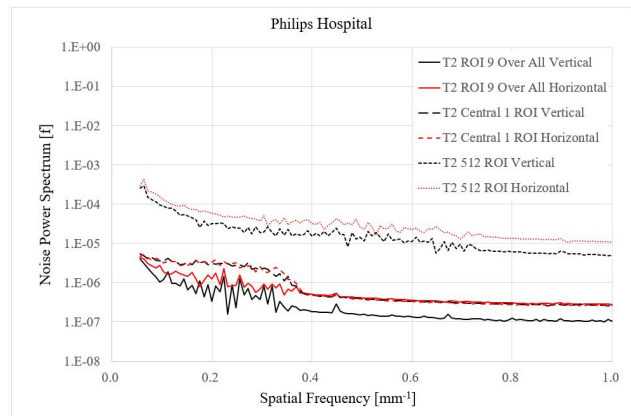


Fig. 7. Comparison of according of ROI for NPS graphs of the T2 hospital images by using Philips 3.0T MRI

IV. 고 찰

자기공명영상에서 ACR 팬텀은 임상병원에서 7가지 항목 형태로 엄격한 영상 검사 기준을 가지고 있다[3]. 그중에 특히 이번 연구에서 영상 강도 균일성 (Image Intensity Uniformity) 은 매우 중요함을 인지할 수 있다[2,3]. 이유는 잡음전력스펙트럼(Noise Power Spectrum, NPS) 측정 방법과 관련성이 있음을 시사한다[7,12]. 관련된 내용 중 임상병원에서는 팬텀 측정으로 3.0T 미만 장비에서 87.5%, 그리고 3.0T 이상 장비에서 82% 이상이어야 하는 정성평가에 확인을 둘 수 있다[3,7,8]. 또 다른 이유로는 기존의 1990년대부터 2000년 초반에는 AAPM 팬텀을 사용해서 MRI 영상들에 대한 주파수 신호에 대해서 평가 방법들을 확인하였으며, 이를 평가 대상으로 하였다 [3,14]. 하지만 검사방법이 어렵고, 기술 발전과 더불어 새로운 방법이 고안되어야 한다고 생각하였다. 따라서, ACR 팬텀을 이용한 정성적인 평가로 확인하는 방법으로 발전하였다. 이후 기술적 발전은 움직임 인공물(Motion Artifact) 감소를 적용하기 위해 절반 스캔(Half Scan)을 사용하고 있다[15]. 이유는 검사 시간의 단축과 완전한 스캔(Non Half Scan)에서 데이터는 대칭이면서도 데이터에 대한 값들이 동일하기에 가능하였으며, 절반 스캔을 하는 이유 또한 데이터값들을 신뢰할 수 있어야 하기 때문이다[8,15]. 하지만 주파수 신호에 대한 정량평가에 대해서는 정확성이 필요 이상으로 장비 정도관리에 대한 대상이 되었다. 그러므로 주파수 신호와 관련성 있는 K-space의 대칭성에 대해서 생각해 볼 필요가 있었으며, 전체 해상도가 유지될 수 있으면서도 검사 시간을 단축할 수 있다는 가능성을 시사하였다[8,9,15]. 결과적으로 대칭적이면서도 해상도가 유지되면서 영상 강도 균일성이 유지되는 영상을 얻기 위해서는 임상병원에서 정기적으로 ACR 팬텀을 사용하여 7가지 형태로 평가

결과에 따른 합격 여부를 가능하였다[2,3]. 연구에서는 전체적으로 주파수대별로 평가하는, 공간분해능에 대한 정량평가는 MTF로 영상 강도 균일성에 대한 정량평가는 NPS로 측정되어야 한다고 저자들은 생각하였다[16-20]. 그리고 이를 바탕으로 일반적이면서, 실용적인 정량평가에 의해서 장비별로 NPS를 측정하게 되었다[1,7,12].

G사의 표준 시퀀스와 병원 시퀀스는 비슷한 NPS 결과값을 보이고 있다. 여기서 주로 표준시퀀스와 병원시퀀스에서 결과는 Vertical로 측정된 NPS 결과값이 정량적으로 더 좋다고 볼 수 있다[Fig. 2, Fig. 3]. P사의 표준시퀀스와 병원시퀀스 중 확실하게 병원시퀀스가 정량적으로 우수한 NPS 결과값을 보이고 있다. 여기에서 주로 표준시퀀스와 병원시퀀스에서 특이할 만한 결과는 G사와 마찬가지로 Vertical로 측정된 NPS 결과값이 정량적으로 더 좋다고 볼 수 있다[Fig. 4, Fig. 5]. 따라서, 결과값에서 보듯이 Vertical 방향이 Horizontal 방향보다는 우수한 정량값을 볼 수 있다. 그래서 정량적인 값은 비교가 되지만, 임상에서나 기존 연구에서는 주파수 부호화와 위상부호화 방향에서 얻는 영상은 큰 차이가 없다는 것은 일반적인 내용이다[2,3]. 그래서 저자들은 P사의 시퀀스 T1, T2별로 해서 좀 더 디테일한 방법을 이용하여 실험하였다. 그림 Fig. 6, Fig. 7에서는 ROI별로 시퀀스별 차이점을 보여주고 있다. 결과값에 대한 내용은 Vertical 이면서도 ROIs를 여러개로 나누어서 팬텀 영상을 측정하면 좀 더 자세한 측정값으로 확인할 수 있었으며, T1, T2에서도 Vertical이 우수함을 볼 수 있다. 결론적으로 Vertical 방향이 우수한 정량평가에 따라서 ROI를 세분해서 측정한다면 7항목 중의 하나인 영상 강도 균일성검사와 대등하게 NPS 검사로 측정해도 무방하다는 결론에 이르렀다[7,8].

결론적으로, 저자들은 팬텀의 정확한 위치 확인 및 중앙 위치에 따라서 달라질 수 있다는 생각하였으며, 일정 부분의 팬텀 위치는 매우 중요하며, 영상 강도 균일성검사에 따르는 평가방법을 응용해도 된다는 결론을 얻게 되었다. 따라서, MRI 영상에서 주파수 신호에 대한 NPS 값에 대해서 정량적으로 확보하려 했고, 영상에 표현되는 영상 강도 균일성은 진단에 도움을 줄 수 있다고 생각하였다. 그리고, 주기적으로 ACR 팬텀을 사용하여, 임상 영상에 대한 품질관리를 한다면 장비의 효율성 및 영상 진단에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

V. 결론

ACR 팬텀을 사용하여 병원시퀀스 그리고 표준시퀀스를 사용하여 결론에 이르렀다. 보다 효율적으로 팬텀을 사용하여 얻은 임상 영상에 대해서 정량적인 품질보증 방법을 준용하고,

3.0T MRI 영상장치의 NPS 특성 결과값을 제시하였다. 결론적으로 MRI 장비의 품질에 대해서 영상 강도 균일성에 대한 항목을 ACR 팬텀 촬영 영상으로 주파수 신호에 대한 주파수대별로 NPS를 측정하여 정량적 평가 방법으로 제시하였고, 특성을 연구하였다.

REFERENCES

- [1] Miyati T, Fujita H, Kasuga T, et al. Measurements of MTF and SNR(f) using a subtraction method in MRI. *Physics in Medicine and Biology*. 2002;47:2961-72. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12222859/>
- [2] Hahm HK. The study on the subject development of MRI image quality evaluation. Department of Radiology, Graduate school of Public Health Eulji University; 2008. Retrieved from <https://lib.eulji.ac.kr/eul/data/data/DataSearchList.csp?New=C0&SrchCondi01=%E2%96%B2&QSrchType01=&SrchType01=T0&SrchKey01=The+study+on+the+subject+development+of+MRI+image+quality+evaluation+Department+of+Radiology&type=&SrchTarget=B>
- [3] Lee JW, Ahn KJ, Lee SK, Na DG, Oh CH, Chang YM, et al. Usefulness of ACR MRI phantom for quality assurance of MRI instruments. *Journal Korean Society Radiology*. 2006;54(1):47-55. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/292951275_Usefulness_of_ACR_MRI_Phantom_for_Quality_Assurance_of_MRI_Instruments
- [4] American College of Radiology. Phantom test guidance for the ACR MRI accreditation program. Reston: American College of Radiology; 2000. Retrieved from <https://www.acraccreditation.org/-/media/ACRAccreditation/Documents/MRI/LargePhantomGuidance.pdf>
- [5] American College of Radiology. MRI quality control manual. American College of Radiology, Reston; 2004. Retrieved from https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Clinical-Resources/QC-Manuals/MR_QCManual.pdf
- [6] Min JW, Jeong HW, Kim KW, et al. Study on the resolution characteristics by using magnetic resonance

- imaging 3.0T. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2020;43(4):251–7. Retrieved from [http://ocean.kisti.re.kr/IS_mvpopo212L.do?method=list&poid=ksrs1&kojic=BSSGBL&sVnc=v43n4&sFree=](http://ocean.kisti.re.kr/IS_mvpopo212L.do?method=list&poid=ksrs1&kojic=BSSGBL&sVnc=v43n4&sFree=SSGBL&sVnc=v41n5&sFree=)
- [7] Min JW, Jeong HW, Kim SC. Evaluation of noise power spectrum characteristics by using magnetic resonance imaging 3.0T. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2021;44(1):279–88. Retrieved from http://ocean.kisti.re.kr/IS_mvpopo212L.do?method=list&poid=ksrs1&kojic=BSSGBL&sVnc=v44n1&sFree=
- [8] Min JW, Jeong HW, Han JH, et al. Evaluation of the resolution characteristics by using American college of radiology phantom for magnetic resonance imaging. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2022;45(1):11–7. DOI: <http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2022.45.1.11>
- [9] Jeong HW, Min JW, Kim JM, et al. Performance characteristic of a CsI(Tl) flat panel detector radiography system. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2012;35(2):109–17. Retrieved from http://ocean.kisti.re.kr/IS_mvpopo212L.do?method=list&poid=ksrs1&kojic=BSSGBL&sVnc=v35n2&sFree=
- [10] Min JW, Jeong HW, Kang HK. Evaluation of the resolution characteristics by using ATS 535H phantom for ultrasound medical imaging. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2023;46(1) 15–21. DOI: <http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2023.46.1.15>
- [11] Kim KW, Jeong HW, Min JW, et al. Measurement of image quality according to the time of computed radiography system. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2015;38(4):365–74. Retrieved from http://ocean.kisti.re.kr/IS_mvpopo212L.do?method=list&poid=ksrs1&kojic=BSSGBL&sVnc=v38n4&sFree=
- [12] Min JW, Jeong HW, Kim KW, et al. Comparison of noise power spectrum in measurements by using international electrotechnical commission standard devices in indirect digital radiography. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2018;41(5): 457–62. Retrieved from http://ocean.kisti.re.kr/IS_mvpopo212L.do?method=list&poid=ksrs1&kojic=BSSGBL&sVnc=v41n5&sFree=
- [13] IEC(International Electrotechnical Commission) 62220–1. Medical electrical equipment Characteristics of digital X-ray imaging devices Part 1: Determination of the detective quantum efficiency. Geneva; 2003. Retrieved from http://websites.umich.edu/~ners580/ners-bioe_481/lectures/pdfs/2003-10-IEC_62220-DQE.pdf
- [14] Och JG, Clarke GD, Sobol WT, Rosen CW, Mun SK. Acceptance testing of magnetic resonance imaging systems: Report of AAPM nuclear magnetic resonance task group No. 6. *Med Phys*. 1992;19:217–29. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1620053/>
- [15] Choi YJ, Kweon DC. Evaluation of TOF MR angiography and imaging for the half scan factor of cerebral artery. *Journal of the Korean Magnetics Society*. 2016;26(3):92–8. Retrieved from https://www.magnetics.or.kr/submission/journal/pages/archives.vm?isrc=tkms.allforone21.com/tkms/service/article_list.do&vol=26&no=3&year=2016&month=06
- [16] Mohapatra SM, Turley JD, Prince JR, et al. Transfer function measurement and analysis for magnetic resonance imager. *Med. Phys*. 1991;18(6):1141–4. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1753895/>
- [17] Fujita H, Tasai DY, Itoh T, et al. A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography. *IEEE Trans Med Imaging*. 1992; 11(1):34–9. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18218354/>
- [18] Samei E, Flynn MJ, Reimann DA, et al. A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic systems using an edge test device. *Medical Physics*. 1998;25(1):102–13. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9472832/>
- [19] Greer PB, Van Doorn T. Evaluation of an algorithm for the assessment of the MTF using an edge method. *Medical Physics*. 2000;27(9):2048–59. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11011732/>
- [20] Steckner MC, Drost DJ, Prato FS. Computing the modulation transfer function of a magnetic resonance imager. *Med. Phys*. 1994;21(3):483–9. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8208224/>

구분	성명	소속	직위
제저자/교신저자	민정환	신구대학교	부교수
공동저자	정회원	백석문화대학교	부교수