JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical paper

16(4) : 529-535 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.529

확산강조영상 검사 시 프로토콜 이해: 문헌연구 중심으로

구은회[1,*]

청주대학교 방사선학과

Understanding Protocols for Diffusion-weighted Imaging Testing: Focused on Literature Article

Eun Hoe Goo[1,*]

[1]Department of Radiological Science, Cheongju University, 298, Daeseong-Ro, Cheongwon-Gu, Cheongju-Si, Chungcheongbuk-Do 28503, Republic of Korea

Abstract This study was intended to provide an overview of how diffusion MR is applied in clinical practice and discuss its potential role. As a method, we compared the differences between FLAIR and DWI of acute infarction and T2WI and DWI of small acute infarct, and found differences in images according to the b-value of hepatocellular carcinoma. ADC changes were also observed. These results showed that when FLAIR and DWI were compared, Acute lesions were better in DWI and Multiple Embolic Infarcts were also clearly revealed. The diffusion of the brain was characterized by anisotropy, and gangrene tumors and abscesses could be easily distinguished by the distinct diffusion coefficient difference. In hepatocellular carcinoma disease, the lesion was more visible in the case of the low b-value than in the case of the high b-value. In transient disease, the slice thickness was thin, and the smaller the b-value, the more visible the lesion. In conclusion, based on this literature study, information was provided to understand the protocol for the overall DWI examination.

Key words: T2WI, DWI, FLAIR, b-value, ADC

1. 서 론

확산자기공명영상(Diffusion MR Image: DWI)은 병변에 의해 변화된 체내 조직의 특성을 비침습적으로 정량적인 값을 얻어 분석하여 영상화하여 병변의 확진에 정확히 표현하기에 임상에서 사용하고 있다[1]. DWI와 현성 확산 계수(Apparent Diffusion Coefficient: ADC)기법은 T2강조영상(T2 Weighted Image: T2W과 달리 수 시간 내로 Infarction 신호가 나타나 Acute Infarction 진단에 매우 유용하다[2]. 최근 뇌뿐만 아니라 간 종양 검사 시 적절한 b-value 값을 통해 악성 고형성 종양과 양성, 낭성 종양의 감별에 널리 이용하고 있다[3]. DWI와 ADC Map을 이용하여 임상에서 적용되는 경우와 b-value 값에 따라 DWI가 다르게 나타나므로 본 기법에 잠재적 역할에 대해 논의할 필요성이 있다[4]. 분자의 밀도나 농도 차이에 의해 일어나는 분자의 미세하고 불규칙적인 운동을 확산이라고 한다[5]. 확산은 두 가지로 나누어지는데 등방성 확산과 비등방성 확산으로 나뉜다. 등방성 확산은 어느 공간에서 아무 방향으로나 같은 확률을 가지고 움직이는 자유로운 브라운 운동의 경우 그 확률은 모든 방향으로 동일한 값을 가지는 것이고 비등방성 확산은 White Matter Tract처럼 일정한 방향을 가지고 있는 구조물 내에서 일

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

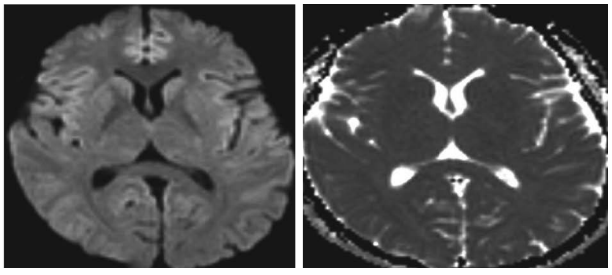
*Corresponding author. Eun-Hoe Goo
Tel. +82-43-229-7994 Fax. +82-43-229-7947 E-mail. gooeh@cju.ac.kr
Received 25 November 2022 Revised 12 December 2022 Accepted 13 December 2022

정한 한 방향으로 물 분자들이 움직이는 경우를 의미한다[6]. Diffusion의 원리는 인체 내 물 분자의 확산 현상을 이용하며 물 분자가 확산은 영상에서 신호 감소로 나타난다. 확산은 두 가지 형태로 거시적 확산 운동과 미시적 확산 운동이 있다. 거시적 확산 운동에는 Blood Flow, CSF motion이 있고 미시적 확산 운동에는 인체의 확산 현상(Diffusion)과 모세혈관에 대한 관류 현상(Capillary Perfusion)이 있다[7]. Fig. 1은 DWI로 확산이 잘 되면 검게 나타나고 확산이 잘되지 않으면 희게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반대로 ADC 영상은 DWI와 반대로 확산이 잘 되면 희게 나타나고 확산이 잘되지 않으면 검게 나타난 것을 확인할 수 있다[8].

ADC가 만들어지는 원리는 b-value 1000 영상에서 b-value 0의 영상을 뺀 것에서 적분한 영상으로 Fig. 2의 사진과 같다.

Diffusion 현상은 조직이 움직이면서 Phase Shift가 발생하고 물 분자가 움직이기 때문에 불완전하게 모아져 (Imperfect Refocusing) Signal Loss 2~3% 발생한다. 그러나 Fig. 3처럼 Diffusion Gradient를 주었을 때는 Signal Loss가 증폭되어 5~6%로 신호를 크게 만들 수 있다. 강한 Diffusion Gradient에 의한 Signal Loss는 b-value의 값이 커지면 커질수록 더 많은 Signal Loss를 형성하게 된다[9].

적용 분야는 크게 Infarction의 Early Detection of Acute Infarction, Detection of Small Acute Infarct, Differentiation of Infarct Stages, Ischemic Penumbra with Perfusion MR과 Necrotic Tumor와 Abscess Tumor, Epidermoid 그리고 Creutzfeldt-Jakob Disease가 있다[10]. 본 논문은 다양한 임상적 적용에 대한 개요(Survey)를 제공하고 잠재적 역할에 대한 논의(Discuss)를 하고자 한다.



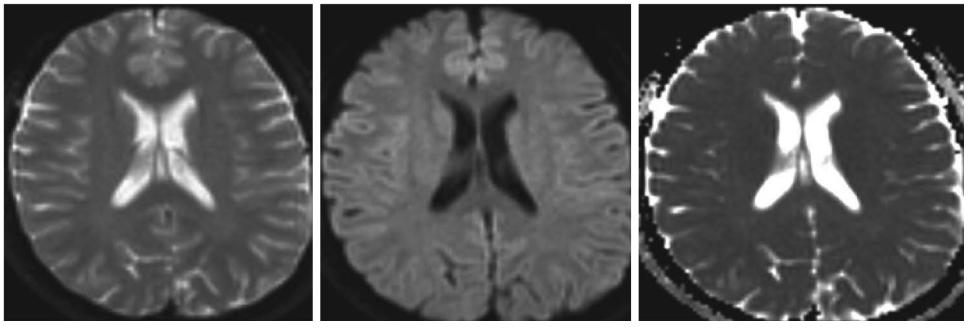
(a) Diffusion weighted image (b) Apparent diffusion coefficient

Fig. 1. Brain DWI (a) and ADC Map (b) difference.

2. 방 법

2.1. EPI

에코평면영상(Echo Planar Imaging: EPI)기법은 한 번의 RF Pulse를 가하고 한 번의 TR 동안에 영상 구성에 필요한 모든 공간 정보를 동시에 획득할 수 있는 초고속 영상 획득 기법이다. EPI Pulse Sequence Diagram은 양자를 여기시킬 수 있는 RF Pulse와 Positive (+), Negative (−) 극성이 신속하게 바뀔 수 있는 주파수 부호화 경사 자계(Frequency Encoding Gradient) 그리고 작고 크기가 안 변하는 여러 개의 위상부호화 경사 자계(Phase Encoding Gradient)로 구성되어 있다. 단면 선택 경사 자장에 의해 단면이 선택된 후 위상부호화 경사 자장을 인가하고 주파수 부호화 경사 자장을 인가한다. EPI 기법은 영상화 중에 발생하는 인체 내 움직임에 대해 강한 면을 가지고 있기 때문에 EPI 영상은 매우 짧은 검사 시간을 이용하여 불필요한 움직임을 최소화하는 확산 영상에 유용하게 이용되



(a) b-value 0 (b) b-value 1000 (c) ADC Map

Fig. 2. Comparison of apparent diffusion coefficient b-value 0 (a), b-value 1000 (b) and ADC Map (c).

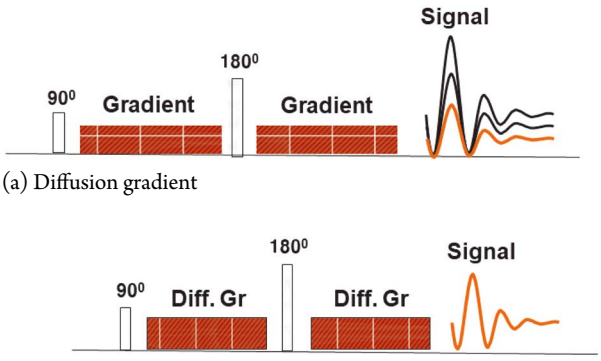


Fig. 3. Signal loss diffusion Gradient (a) and high b-value (b).

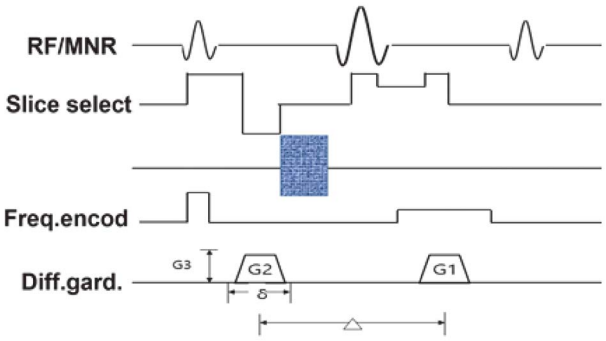


Fig. 4. EPI pulse diagram.

고 있다(Fig. 4).

2.2. 확산 계수

확산은 분자가 처해 있는 물리적인 환경(온도, 점도 등)에 따라 그 정도가 다르다. 이러한 주위 구조물에 의한 확산의 정도를 확산 계수로 표시한다. 확산 계수는 단위 시간당 분자가 움직인 거리인 mm^2 sec^{-1}로 나타내며 이것이 클수록 확산 계수도 커진다. 25°C에서 순수한 물의 확산 계수는 $2.3 \times 10\ mm^2$ sec^{-1}이고 이는 100 msec 동안 주어진 방향으로 대략 20 m 정도 이동한다는 뜻이다. 생체의 각 조직들은 고유하고 물리적인 환경에 의해 서로 다른 물 분자의 확산 계수를 가지고 있으며 확산 MR 영상은 이를 이용한다. 확산 계수는 순수한 물 분자의 확산 외에도 심장 박동에 의한 움직임, 미세혈관의 혈류 등 인체 내 여러 요소에 의해 영향을 받아 측정한 확산 계수가 있는데 이를 ADC라 부른다. 이는 순수한 물에서의 확산계수보다 굉장히 낮게 측정된다.

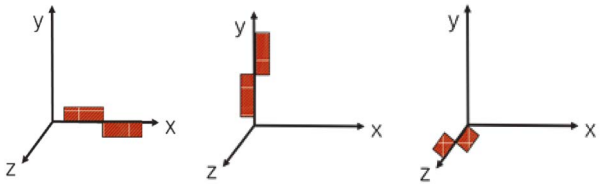


Fig. 5. DWI in 3-perpendicular gradients.

2.3. Trace Diffusion Image

Diffusion MR은 기본적인 방법 외에 굉장히 강한 한 쌍의 경사 자장을 추가적으로 인가해 주어야 하는데 이를 b-value라고 한다. b-value는 경사장의 세기(G), 경사자장간 시간(T), 경사장의 길이(D), 자기 회전율(Gyromagnetic Ratio)에 의하여 결정된다. 이러한 b-value는 확산의 방향성에 의해 나타나는 대조도 감쇄를 줄이기 위해 x, y, z 세 방향에 대해 확산 계수를 영상화한 후 이를 이용해 각 방향에 대한 확산 계수 영상을 계산하여 Trace 영상을 만든다(Fig. 5).

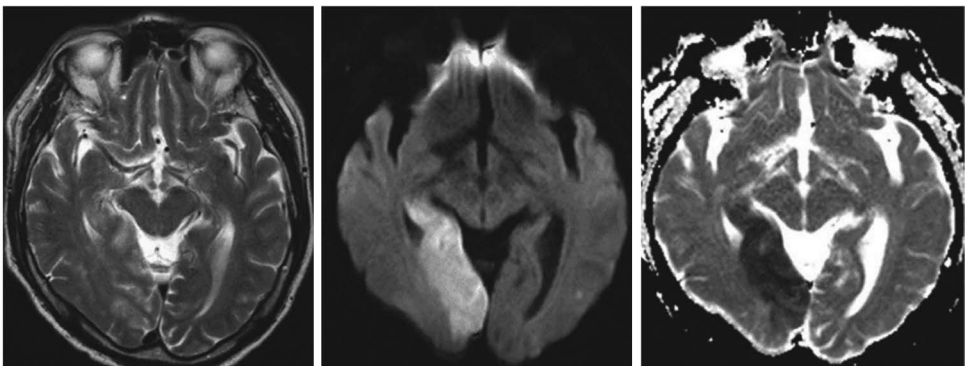
2.4. 등방성과 비등방성

일반적으로 회백질(Gray Matter)은 등방성이며 비등방도가 낮고 저신호강도이다. 반면 백질(White Matter)은 비등방성이며 비등방도가 높고 고신호강도를 나타낸다. 분할비등방도(Fractional Anisotropy: FA)는 비등방성의 확산 정도를 0에서 1사이의 수치로 표시한다. 수치가 0에 가까울수록 물과 같은 자유 운동을 나타내는 등방성 확산을 의미하고, 1에 가까울수록 한 방향으로 움직이는 성질인 비등방성 확산을 의미한다. FA의 신호 강도는 각 부위에서 방향성을 가지고 있는 섬유로 존재하는 부위는 높은 신호, 백질은 중등도의 신호, 뇌 피질은 비교적 낮은 신호로 표현된다. 경색 부위 같은 경우에는 비등방성 확산이 감소하여 백질보다 저 신호로 나타나기 때문에 Internal Capsule 및 그 주위에서 발생하는 작은 뇌경색의 위치를 잘 구분할 수 있다.

3. 결 과

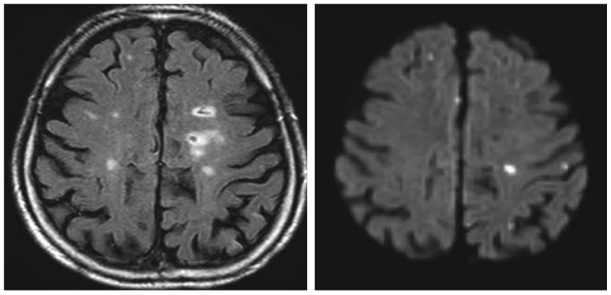
3.1. Acute Infarction에 대한 결과

Fig. 6의 Acute Infarction 영상에서 DWI와 FLAIR 영상과 비교하였을 때, FLAIR는 Acute가 잘 안보이고, DWI 영



(a) T2WI (b) DWI (c) ADC

Fig. 6. Difference of acute infarction (a), (b) and (c).



(a) FLAIR (b) DWI

Fig. 7. Comparison of multiple embolic infarcts, FLAIR (a) and DWI (b).

상이 Acute병변이 선명하게 드러났다. Acute infarction이 T2에서 보이지 않기 때문에 CNR을 높이기 위해서 절대적으로 ADC가 필요하다.

Multiple Embolic Infarcts는 Small Acute Infarction 형태로 다발적으로 발생하는 병변으로 Fig. 7의 Multiple Embolic Infarcts 영상을 보면, FLAIR는 Infarction 신호에 정확도가 떨어지는 반면, DWI는 잘 보이는 결과를 보였다.

Fig. 7과 Fig. 8의 영상을 보아 DWI가 Acute 병변을 높은 정확도로 고신호강도를 나타낸다는 걸 알 수 있다.

3.2. Tumor에 대한 결과

Fig. 9는 농양성 종양과 괴저성 종양의 영상이다. 기존에 T1WI에서는 유사한 신호로 인해농양성과 괴저성의 감별이 어려웠다. DWI를 통해 Necrotic Tumor의 Wall Thickness가 Abscess Tumor의 Wall보다 두껍다는 점을 알 수 있다.

3.3. HCC에 대한 결과

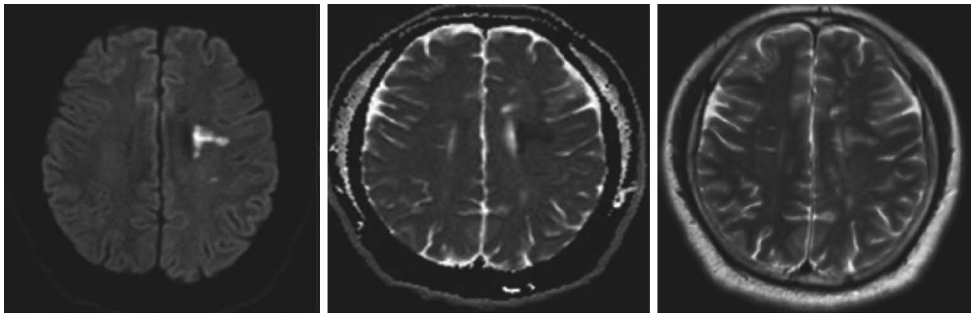
간(Liver)은 뇌(Brain)와 다른 확산자기경사(b-value)를 가지게 된다. 대표적으로 Fig. 10 의 Hepatocellular Carcinoma 영상에서 Carcinoma의 위치를 보면 T1 영상에서 보다 확산 경사 자장(b-value)이 인가된 영상과 ADC 영상이 두드러지게 보이는 것을 알 수 있으며, 뇌에 인가하는 900 이상 b-value를 인가한 영상과 100~150의 b-value를 인가한 영상을 비교하면 낮은 확산 경사 자장을 인가한 영상이 종양의 위치와 형태가 잘 나타나 있는 것을 확인할 수 있다.

3.4. TGA에 대한 결과

Transient 질환은 Brain 영상으로 높은 b-value가 요구된다. 그러나 Fig. 11의 Transient Global Amnesia영상을 보면 Slice thickness와 b-value에 따라 병변 부위의 신호가 다른 것을 확인할 수 있다, Slice Thickness가 5 mm, b-value가 100인 경우와 Slice Thickness 3 mm, b-value가 200인 경우를 비교하였을 때, 절편 두께가 얇은 영상이 고신호로 병변의 위치가 뚜렷하게 관찰되었다. 또한 동일한 절편 두께(3 mm)를 고정하고 b-value 1000값인 영상과 200인 영상을 비교하였을 때 b-value 1000인 값의 병변의 신호가 더 높게 나타났다. 고로 Slice Thickness가 얇고 b-value가 낮을수록 일과성건망증(Transient Global Amnesia) 진단에 유용하다는 것을 알 수 있다.

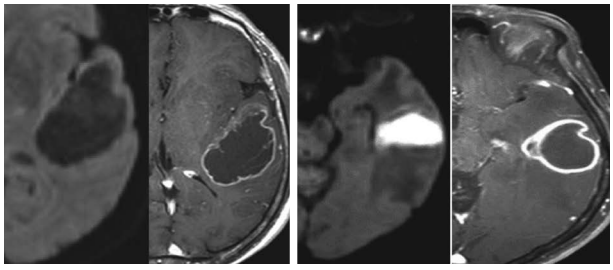
4. 고 찰

Fig. 12는 Survey 한 시간별 DWI와 ADC의 Signal이



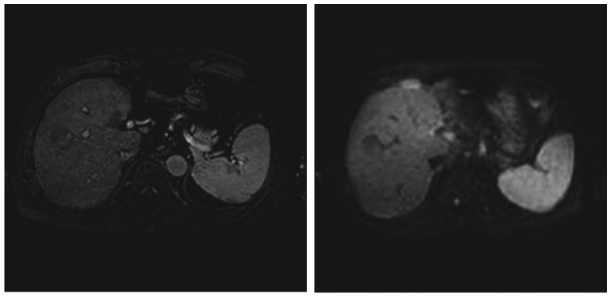
(a) DWI (b) ADC Map (c) FLAIR

Fig. 8. Comparison of acute infarction DWI (a), ADC Map (b) and FLAIR (c).



(a) Abscess (b) Necrotic tumor

Fig. 9. Difference of abscess tumor wall thickness (a) and necrotic tumor wall thickness (b).



(a) T1 Dynamic artery phase image (b) b-value 100~150

(c) b-value > 900 (d) ADC Image

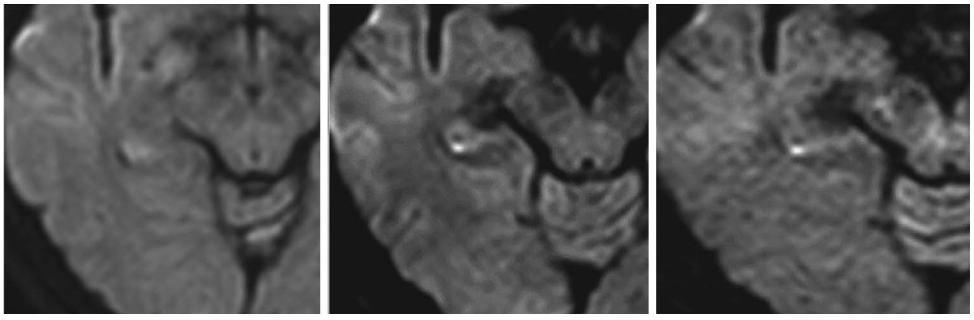
Fig. 10. Hepatocellular carcinoma.

다. DWI는 초기에 높은 신호를 보여주고 ADC는 초기에 낮은 신호를 보여주었으며, 시간이 흘러 Pseudo-Normalization이 나타났다[11]. 결과적으로 DWI는 초기에는 높은 신호로 하얗게 보이다가 시간이 지날수록 점차 검게 나오는 것을 그래프를 통해서 확인할 수 있고, 반면에 ADC는 초기에 검게 보이다가 시간이 지날수록 점차 하얗게 나오는 것을 확인할 수 있다[12]. 또한 Diffusion MR 영상은 세포 독성 부종(Cytotoxic Edema)으로 인해 세포 내부공간이 늘어나고 반대로, 세포 외부 공간은 감소하여 물 분자 확산이 어려워 높은 신호를 보이고, 아급성기(5~10일)가 되면서 혈관성 부종(Vasogenic Edema)에 의해 신호가 정상 조직과 비슷한 정도가 되었다가 만성기에는 뇌연화증(Encephalomalacia)으로 정상조직보다 높은 확산 계수를 갖게 되었다[13]. 이를 토대로, 시간이 흐름에 따라서 병소가 달라지는 것을 알 수 있다.

Infarction에 대해 Stroke Volume이 감소하게 된다. Table 1은 Infarction Stroke Volume을 나타내고 있으며 초기에 높은 Volume을 보이다 점차 Volume이 감소하는 것을 확인할 수 있다[14].

Fig. 13는 Stroke Volume의 감소를 그래프로 나타낸 것이다. 이와 같이 연속적으로 신호 감소 이후 특정 구간(약 6 hr 부근)에서 세포독성 고착화 혈관부종으로 진행하는 것을 알 수 있다[15].

시간이 흐름에 따라 T2 Shine Through가 발생하였다. T2 Shine Through는 일부 정상 조직에서 긴 T2 붕괴 시간으로 인해 발생하는 Artifact로[16], 혈관성 부종에 의한 아급성 경색에서 가장 많이 볼 수 있으나 표피성 낭종 등 다른 병리학적 이상에서도 보였다. True Restricted Diffusion을 확인하기 위해 항상 DWI 영상을 ADC Map



(a) 5 mm/b = 100 (b) 3 mm/b = 1000 (c) 3 mm/b = 200

Fig. 11. Transient global amnesia.

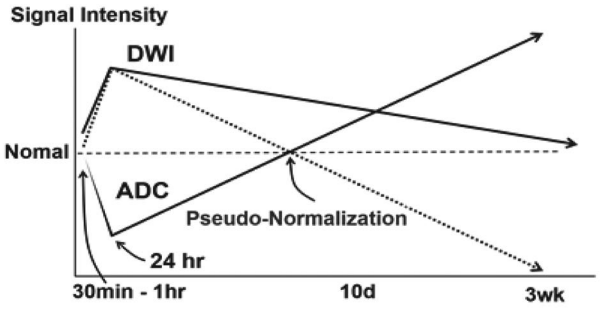


Fig. 12. DWI &ADC at different infarct dtages.

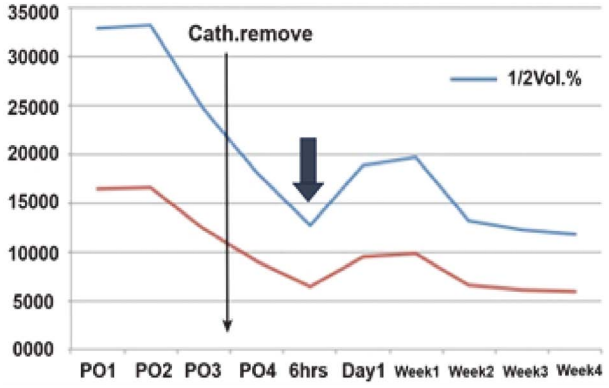


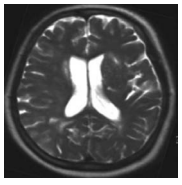
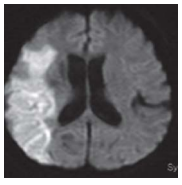
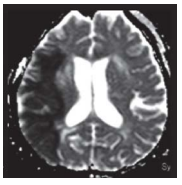
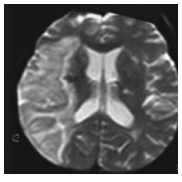
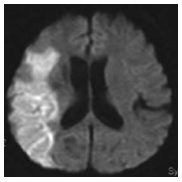
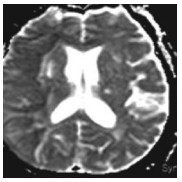
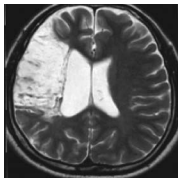
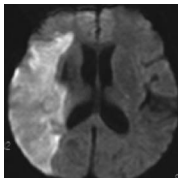
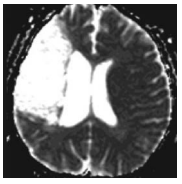
Fig. 13. Stroke volume graph.

과 비교가 필요하다는 걸 알 수 있다[17]. True Restricted Diffusion의 경우 증가된 DWI 신호 영역은 ADC Map에서 낮은 신호를 나타냈으며, T2 Shine Through의 경우 ADC Map은 정상 신호 또는 높은 신호를 나타낸다는 것을 알 수 있다[18]. Table 2는 Infarction에 대한 Different Stage다. 시간이 흐를수록 높을 수도 정상으로 보일 수 있는 현상인 T2 Shine Through는 보통 8일에서 10일 사이에 Diffusion 단계별에 따라 나타나는 Artifact이므로 판독 시

Table 1. Stroke volume in infarction

Infarction	PO1	PO2	PO3	6hr	D1	W1	W2
1/2 Vol%	32.9	33.2	24.7	12.7	18.8	19.5	13.1
Vol%	16.4	16.6	12.3	6.3	9.4	9.7	6.5

Table 2. Different stages in infarction

	T2WI	DWI	ADC
6 h			
8 d			
3 m			

주의가 필요하다[19].

5. 결 론

결론적으로 적용분야에 있는 질환에 대한 영상 기법에

추가로 질환의 정보를 최대한 제공할 수 있었다. DWI를 통해 초기 급성 뇌허혈증 진단 시 DWI와 ADC Map을 같이 비교해 T2 Shine Through를 최소화하여 정확한 진단이 가능하며, 몇 가지 특징적인 질환에 대해 추가적인 연구도 필요할 것이라는 결론을 얻었다. 또한 질환에 따라 b-value가 각각 다르다는 것을 확인할 수 있었다. Diffusion MR은 Brown Motion에 의해 물에 작은 변위에 민감하며, 뇌는 비등방성 확산을 한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 향후 임상적 기초자료가 될 것 이라고 생각한다.

사 사

본 논문은 2022. 09. 01.~2024. 08. 31에 청주대학교 보건의료과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Goo EH. 2020. A Study of Image Quality in Diffusion MRI of Abdominal Diagnosis: A Technical Comparison of 1, 4NEX, NT and RT Methods. *J. Radiat. Ind.* **51**(48):43-49.
2. Singh TB, Zhang L, Huo X, Liu G, Ni H, Zhang S, Zhu W and Yin J. 2018. The Diagnostic Ability of rs-DWI to Detect Subtle Acute Infarction Lesion in the Different Regions of the Brain and the Comparison between Different b-Values. *Biomed. Res. Int*. 7069192. https://doi.org/10.1155/2018/7069192
3. Woo IS, Lee AR, Jung SC, Lee HA, Kim NK, Cho SJ, Kim DH, Lee JB, Lee SW, Kang, DW. 2019. Fully Automatic Segmentation of Acute Ischemic Lesions on Diffusion-Weighted Imaging Using Convolutional Neural Networks: Comparison with Conventional Algorithms. *KJR* **20**(8):1275-1284.
4. Seo HS, Chang KH, Na DG, Kwon BJ and Lee DH. 2008. High b-value diffusion (b = 3000 s/mm^2) MR imaging in cerebral gliomas at 3T: visual and quantitative comparisons with b = 1000 s/mm^2. *AJNR* **29**(3):458-463.
5. Kim SH, Eun SJ and Rim CP. 2012. The functional imaging to Diagnose Acute Cerebral infarction Comparing between CT Perfusion and MR Diffusion Imaging. *JKSR* **6**(1):19-26.
6. Kim SG and Eun SJ. 2010. Fractional Anisotropy of Diffusion Tensor Imaging as a Predict Factor in Patient with Acute Cerebral Infarction. *JKSR* **4**(3):13-18.
7. Choi DS. 2006. Bright Intracranial Lesions on Diffusion-weighted Images: A Pictorial Review. *J. Korean Radiol. Soc.* **55**(1):21-32.
8. Choi HS, Kim AH, Ahn SS, Shin NY, Kim J and Lee SK. 2013. Glioma grading capability: comparisons among parameters from dynamic contrast-enhanced MRI and ADC value on DWI. *KJR* **14**(3):487-492.
9. Choi SI, Kang JW, Chun EJ, Choi SH and Lim TH. 2010. High-resolution diffusion tensor MR imaging for evaluating myocardial anisotropy and fiber tracking at 3T: the effect of the number of diffusion-sensitizing gradient directions. *KJR* **11**(1):54-59. https://doi.org/10.3348/kjr.2010.11.1.54
10. Choi HC, Lee SW and Ji C. 2007. Preoperative Assessment of Cystic Brain Lesion : Significance of Diffusion-Weighted Image and ADC (Apparent Diffusion Coefficiency) Values. *JKNS* **41**(6):371-376.
11. Zhang H, Pan J, Shen Y, Bai X, Wang Y, Wang H and Ye H. 2019. High signal renal tumors on DWI: the diagnostic value of morphological characteristics. *Abdom. Radiol. (NY)* **44**(1):239-246.
12. Kim KM, Jang JH, Lee HJ, Lee MJ and Kim DY. 2019. Usefulness Study of Computed High b-value Diffusion Weighted Image in Comparison to Acquired High b-value Diffusion Weighted Image in Brain Diffusion Image. *JKSMRT* **29**(1):1-10.
13. Kim HJ, Choi CG, Lee DH, Lee JH, Kim SJ and Suh DC. 2005. High-b-value diffusion-weighted MR imaging of hyperacute ischemic stroke at 1.5T. *AJNR* **26**(2):208-215.
14. Kim Y, Lee HB, An SA, Yim BS, Kim JU, Kim OJ, Kim WC, Kim HS, Oh SH and Kim JK. 2016. The Effect of Pulsatility Index on Infarct Volume in Acute Lacunar Stroke. *Yonsei Med. J.* **57**(4):950-955.
15. Sah RG, d'Esterre CD, Hill MD, Hafeez M, Tariq S, Forkert ND, Demchuk AM, Goyal M and Barber PA. 2019. Diffusion-Weighted MRI Stroke Volume Following Recanalization Treatment is Threshold-Dependent. *Clin. Neuroradiol.* **29**(1):135-141.
16. Lee YC, Seo JJ, Jeong GW, Kang HK, Kim YH, Kim JK, Park JG and Moon JD. 2000. Diffusion-Weighted MR Imaging of the Brain Tumors: The Clinical Usefulness. *J. Korean Soc. Magn. Reson. Med.* **4**(1):34-41.
17. Yoon YC. 2020. [Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging of Spine]. Taehan Yongsang Uihakhoe Chi, **81**(1):58-69.
18. Duran R, Ronot M, Kerbaol A, Van Beers B and Vilgrain V. 2014. Hepatic hemangiomas: factors associated with T2 shine-through effect on diffusion-weighted MR sequences. *EJR* **83**(3):468-478.
19. Burdette JH, Elster AD and Ricci PE. 1999. Acute cerebral infarction: quantification of spin-density and T2 shine-through phenomena on diffusion-weighted MR images. *Radiology* **212**(2):333-339.