

결찰로 유발한 신정맥폐색시 가토신장의 자기공명영상소견*

서울대학교 의과대학 방사선과학교실

변홍식** · 한준구 · 김승협 · 박재형 · 김주완

— Abstract —

Magnetic Resonance Imaging of Rabbit Kidney after Renal Vein Ligation

Hong Sik Byun, M.D., Joon Koo Han, M.D., Seung Hyup Kim, M.D.,
Jae Hyung Park, M.D., Chu Wan Kim, M.D.

Department of Radiology, Seoul National University College of Medicine

This study was designed to evaluate the potential applicability of magnetic resonance imaging (MRI) for the diagnosis of acute renal vein thrombosis. Renal vein thrombosis was experimentally induced by surgical ligation of the left renal vein in a total of 21 rabbits. MRI was performed with a 0.5 Tesla superconductive magnetic system. Spin echo technique was used with varying TR and TE parameters. Spin echo images of the rabbit kidney were analysed for morphology and signal intensity. T1 and T2 relaxation times of the renal cortex and medulla were calculated from the images. After venous ligation, kidneys became enlarged. Low signal band along the outer medulla in T2 weighted images were characteristically shown from 1 hour to 3 days after ligation. Changes of cortex to medulla contrast (CMC) values were significant ($p < 0.05$) in T1- and T2-weighted images of the ligated side. T1 and T2 relaxation times were significantly prolonged ($p < 0.05$) on the ligated side, both in the cortex and medulla from 1 hour to 2 weeks after the ligation, while T2 relaxation time on the contralateral side was significantly prolonged both in the cortex and medulla 2 weeks after venous ligation.

The most useful MRI criteria for the diagnosis of renal vein thrombosis were enlarged renal size, and the low signal band along the outer medulla of ligated kidney. The relative intensity difference between cortex and medulla (CMC) in T1- and T2-weighted images, and T1 and T2 relaxation times were suggested to be the useful MR parameters for the diagnosis of acute renal vein thrombosis.

Index Words: Renal vein thrombosis 81.751

MR Kidney, MR 81.1214

Experimental study

서론

신정맥혈전증은 급성과 만성으로 구분될 수 있으며, 혈

전의 형성속도 및 측부순환 정도에 따라 다양한 증상을 일으킬 수 있다. 급성 신정맥혈전증은 만성과는 달리 갑작스러운 통증을 호소하며 혈뇨를 동반할 수 있고, 때로는 펄노와 급성 신부전으로 이행될 수 있다.

* 이 연구는 91년도 한국과학재단연구비지원에 의한 결과임(과제번호: 91-0102-001-2)

** 원자력병원 진단방사선과

** Department of Diagnostic Radiology, Korea Cancer Center Hospital

이 논문은 1992년 8월 10일 접수하여 1993년 3월 31일에 채택되었음.

이러한 급성 신정맥혈전증에 대한 정확한 진단이 내려지면 항응고제나 혈전용해제를 사용한 적극적인 치료가 가능하므로 신속히 진단함이 임상적으로 중요하다(1). 급성 신정맥혈전증의 방사선학적 진단법으로는 경정맥신우조영술, 초음파검사, 전산화단층촬영술 등의 검사법이 있으나, 아직도 진단의 정확성 및 초기 소견 발견에는 문제점이 있다.

최근 등장한 자기공명영상(Magnetic resonance imaging, 이하 MRI로 약함)은 수소원자핵농도, T1 완화시간(relaxation time), T2 완화시간, 혈류 등 여러 가지의 관여된 요소가 있을 뿐 아니라 뛰어난 연부조직해상력을 가지고 있어 신장질환의 진단에 그 역할이 기대되고 있다.

연구자는 실험적으로 유발한 신정맥폐색의 병리조직학적 소견이 급성 신정맥혈전 형성을 나타내며, 신장실질의 부종 및 울혈과 출혈성 경색의 소견을 나타내는 점에 착안하여, 수분함량의 변화와 혈류 및 헤모글로빈부산물에 민감한 특성을 가지고 있는 초전도 0.5Tesla(이하 T로 약함) 기기와 스핀에코영상을 사용하여 급성 신정맥혈전증의 임상진단에 도움을 얻고자 신정맥결찰로 유발한 급성 신정맥폐색의 MRI소견의 시간별 변화, 각 영상방법에 있어서의 소견차이 및, 급성 신정맥혈전증의 진단에 유용한 MR parameter를 알아보고자 본 연구를 시행하였다.

대상 및 방법

대 상

실험동물은 암수 구별없이 2.5내지 3.0kg의 가토 21마리를 사용하였다. 신정맥 결찰을 위하여 펜토탈 35-50mg 정맥주사로 마취하였으며, 개복 후 후복막을 절개한 후 박리하여 최대한 신문(renal hilum)에 가까운 부위에서 좌신정맥만을 수술용건사로 2회 이상 결찰하였다. 시술 후 감염방지를 위하여 앰피시린 100mg을 정주하였다. MRI검사 중 가토의 호흡에 의한 신장이동을 줄이기 위해 펜토탈로 마취를 유지시켰으며, 가토를 목판에 밀착시킨 후 양측 신장부위를 넓은 포로 압박 고정하였다. 시술 전과 시술 후 1시간, 3시간, 24시간, 3일, 1주, 2주에 각각 6, 16, 9, 14, 7, 66회의 MRI추적영상을 얻었다.

방 법

0.5T 초전도자기를 사용하는 급성 Supertec 5000기기를 이용하였으며 30cm 직경의 두부코일을 사용하였다.

1mm×1.2mm pixel size의 256×200 pixels를 갖는 display matrix를 사용하여 5mm 단면두께, 2mm 단면갭으로 촬영하였다. 인체신장에 사용하는 것과 동일한 TR/TE가 각각 500/30msec(T1 weighted image, T1강조영상), 2500/30msec(proton density weighted image, 양자농도강조영상), 2500/100msec(T2 weighted image, T2강조영상)인 spin echo 방법을 신장부위에 적용하여 횡단촬영하였다.

얻어진 각 영상에서 좌우 신장이 가장 크게 촬영된 부위에서 각각의 장축과 단축의 길이를 측정하여, 그 곱인 면적(cm^2)을 각 시간별로 비교하였으며, MRI소견을 관찰하였다.

각 영상에서 내 피질(inner cortex)과 외수질(outer medulla)부위의 신호강도를 3회씩 측정하여 평균하였으며 제일 작은 크기의 cursor(5mm)를 사용하여 volume average에 의한 효과를 감소시키고자 하였다.

각 시간 별로 5-13개의 영상에서 측정한 피질과 수질의 신호강도를 아래와 같은 수식을 사용하여 피질수질대비(cortex to medulla contrast, CMC)를 산출하였다(2).

$$\text{CMC} = \frac{I_{\text{cortex}} - I_{\text{medulla}}}{I_{\text{cortex}} + I_{\text{medulla}}} \quad (I: \text{signal intensity})$$

또한 T1-T2완화시간을 다음 수식을 사용하여 자기공명영상으로 부터 산출하였다.

$$I = N(H) \exp(-TE/T2) [1 - \exp(-TR/T1)]$$

I : observed intensity

N(H) : proton density

위의 함수관계에 의하여 서로 다른 TR과 같은 TE의 두 영상으로부터 T1을, 서로 같은 TR과 다른 TE로부터 T2완화시간을 산출하였다.

계산된 좌우 신장의 CMC, 피질과 수질의 T1, T2 완화시간들을 각 영상방법에서 비교하였고 시간별 변화를 검토하였다.

좌신정맥결찰 후 1시간, 3시간 24시간, 3일, 1주, 2주에 각각 2마리씩 총 12마리를 과량의 펜토탈 정맥주사로 희생하였으며, 복부절개 후 양측 신장을 모두 적출하여 10% 중성포르말린에 고정하였으며, 그 후 Hematoxylin Eosin 염색을 하여 광학현미경으로 관찰하였다.

각 영상방법에서의 양측 신장의 크기, CMC, T1-, T2 완화시간측정치들의 평균값과 표준편차를 구하였고, 통계처리는 시간변화에 따른 전체적인 변화는 Kruskal-Wallis one way ANOVA test를 시행하였고, 각각의 시간대의 변화비교는 Mann-Whitney U test를 시행하였다.

통계적 유의성은 95%($p<0.05$) 유의수준에서 판단하였다.

결 과

자기공명영상소견 분석

신정맥결찰로 급성 신정맥폐색이 유발된 좌측신장의 크기는 시간경과에 따라 현저한 증가를 보였으며, 신정맥결찰 후 3일에 가장 큰 증가를 보이다가, 1주 후에는 감소하여 2주 후에는 정상 우측신장에 비하여 그 크기가 작아졌다(Fig. 1). MRI 소견으로는 T1강조영상에서는 결찰 직후부터 피질수질경계가 불분명해져 2주까지 계속되었

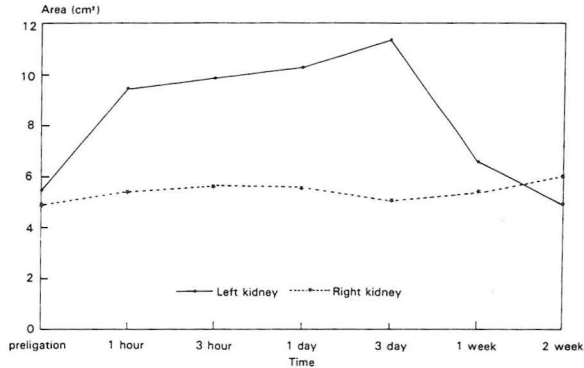


Fig. 1. Size comparison of both kidneys

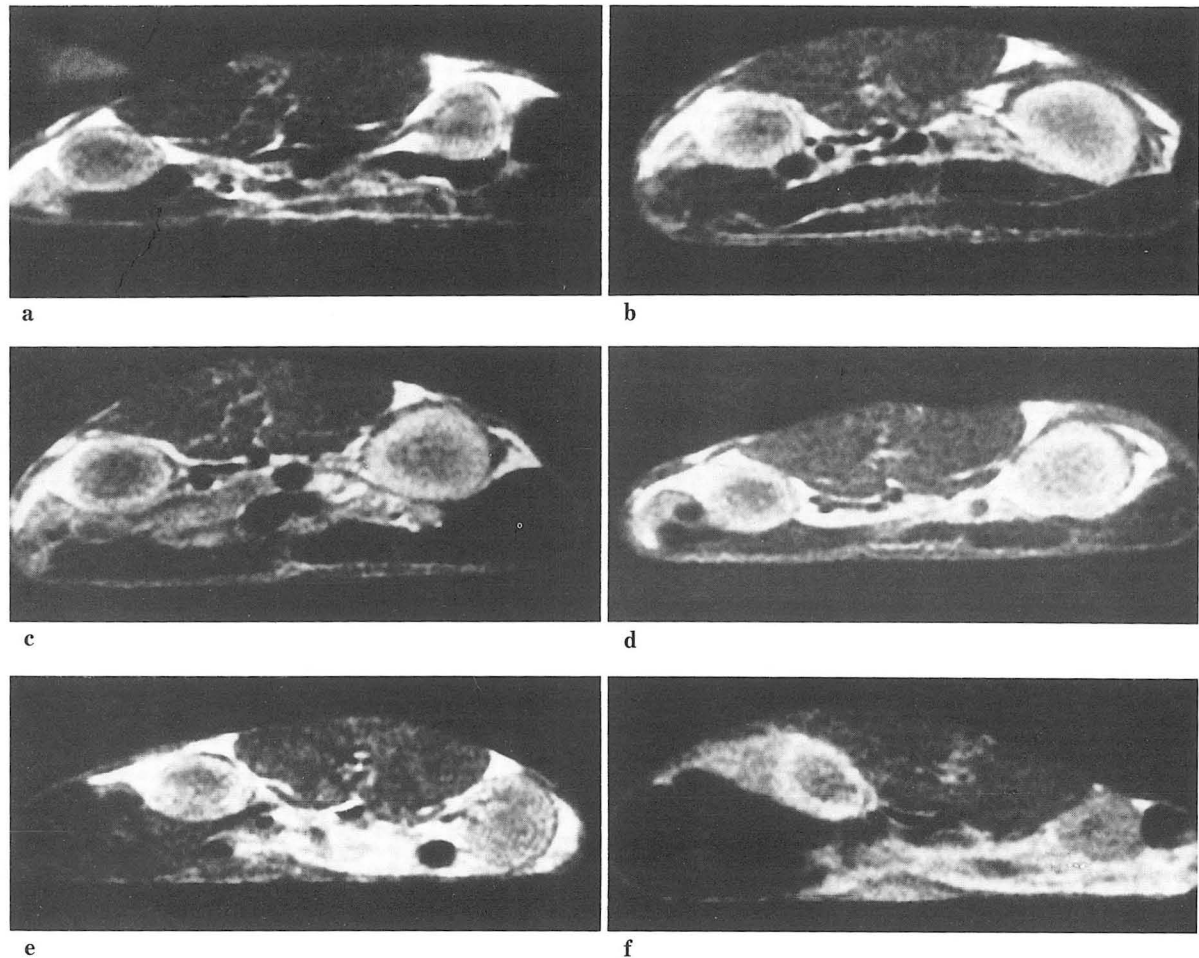


Fig. 2. T1 WI (SE 500/30).

a. An image before ligation shows good corticomedullary distinction of both kidneys. Renal cortex has higher signal intensity than medulla.

b,c,d. Images obtained 1 hour (b), 3 hours (c), and 24 hours (d) after renal vein ligation show markedly enlarged left kidney. Corticomedullary distinction of left kidney becomes indistinct.

e,f. Images obtained 1 week (e), and 2 weeks (f) after renal vein ligation. Left kidney becomes progressively smaller.

으며(Fig. 2), 양자농도강조영상은 피질과 수질의 구분이 없어 유용한 방사선학적 소견을 관찰할 수 없었다. T2강조영상에서는 결찰 직후부터 24시간에 걸쳐 수질부위의 팽창, 외수질의 저강도의 환상대(low signal band), 내피질의 고강도의 환상대(high signal band), 피막하 외피질의 저강도의 환상대의 4층으로 확실히 구분되었으며, 3일에는 외수질의 저강도의 환상대가 가늘어지며 경계가 분명하여졌고, 피질 내 외부는 구분없이 고강도로 변화하였다(Fig. 3).

피질수질대비(cortex to medulla contrast, CMC)
신정맥결찰 전의 정상 좌 우측 신장의 % CMC는 각각

T1강조영상에서 14.97 ± 4.78 , 14.79 ± 4.01 , 양자농도강조영상에서는 -2.29 ± 3.12 , -2.03 ± 5.72 , T2강조영상에서는 -11.99 ± 3.74 , -11.98 ± 4.40 이었다.

TR/TE=500/30msec인 T1강조영상에서는 신정맥결찰을 시행한 좌측신장의 CMC는 결찰 후 1시간부터 2주에 걸쳐 통계적으로 유의한 감소를 보였으며(Fig. 4), TR/TE=2500/100msec인 T2강조영상에서는 결찰 후 1시간부터 1주 후까지 유의한 증가를 관찰할 수 있었다(Fig. 5).

그러나, TR/TE=2500/30msec인 양자농도강조영상에서는 유의한 변화가 없었다. 신정맥결찰을 시행하지 않은 우측 신장의 CMC는 모든 pulse sequence에서 유의

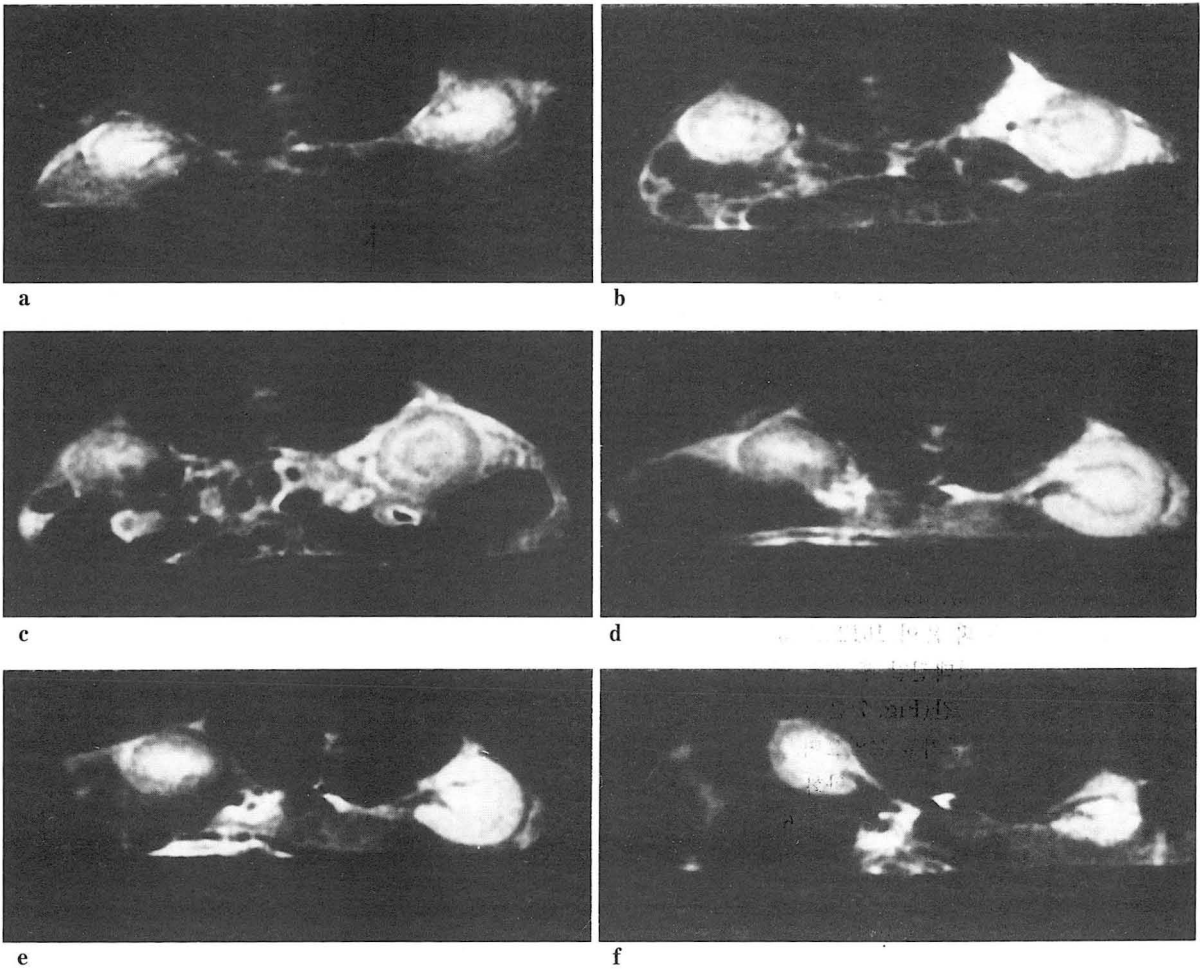


Fig. 3. T2WI (SE 2500/100).

- a. An image before ligation. In contrast to T1WI, renal medulla has higher signal intensity than cortex.
- b,c. Images obtained 1 hour (b), and 3 hours (c) after left renal vein ligation demonstrate alternating low and high signal bands lining cortex and medulla of left kidney.
- d. An image obtained 3 days after left renal vein ligation shows well defined low signal band in outer medulla while low signal band lining outer cortex disappeared.
- e,f. Images obtained 1 week (e), and 2 weeks (f) after ligation. Left kidney becomes progressively smaller.

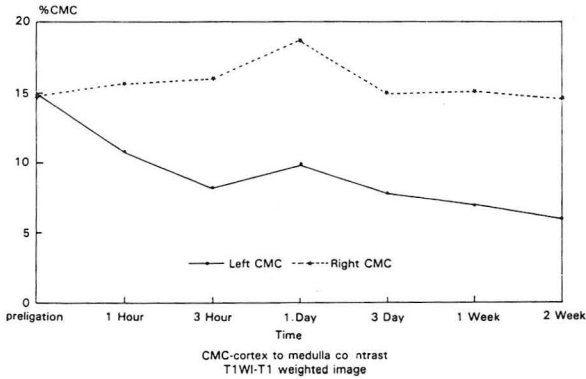


Fig. 4. CMC of both kidneys in T1WI

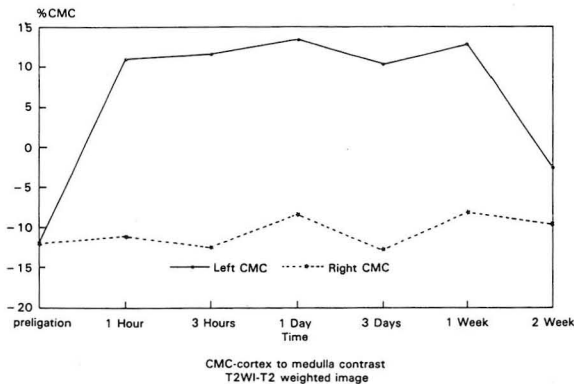


Fig. 5. CMC of both kidneys in T2WI

한 변화를 보이지 않았다.

T1 완화시간(T1 relaxation time)

정상 좌측 신장의 T1완화시간은 피질이 872 ± 308 msec, 수질이 1436 ± 461 msec이었으며, 정상 우측 신장의 T1완화시간은 피질이 1012 ± 143 msec, 수질이 1607 ± 564 msec이었다. 신장맥결찰 후 좌측 신장의 피질(Fig. 6) 및 수질의 T1완화시간(Fig. 7)은 3시간부터 2주에 걸쳐 통계적으로 유의한 증가를 보였으며, 신장맥결찰을 시행치 않은 우측 신장의 피질은 T1완화시간이 3일 후부터 2주에 걸쳐 유의한 감소를 보였다(Fig. 6).

T2 완화시간(T2 relaxation time)

정상 좌 우신장의 T2완화시간은 각각 피질이 61.5 ± 13.1 msec, 86.3 ± 8.4 msec, 수질이 72.3 ± 4.4 msec, 108 ± 9.6 msec이었으며, 좌측 신장의 피질의 T2완화시간은 결찰 후 1, 3시간사이에서 유의한 증가가 있었고(Fig. 8), 수질의 T2완화시간은 1시간에서 유의한 증가가 있었다(Fig. 9). 우측 신장의 T2완화시간은 피질, 수질 모두가 2주 후에 유의한 증가를 보였다(Fig. 8,9).

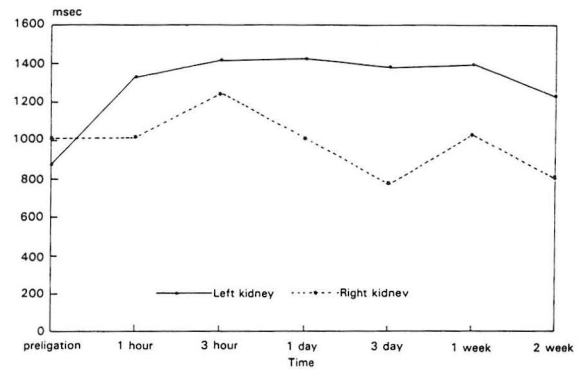


Fig. 6. T1 relaxation time of cortex

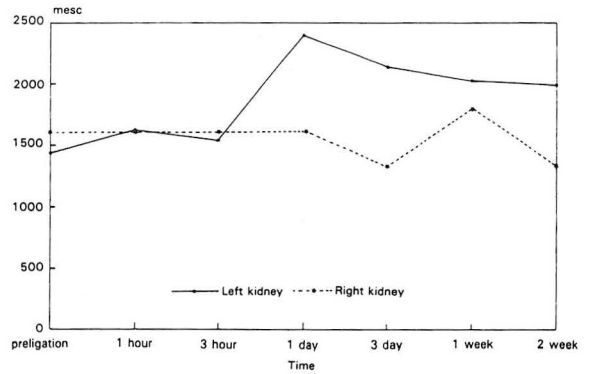


Fig. 7. T1 relaxation time of medulla

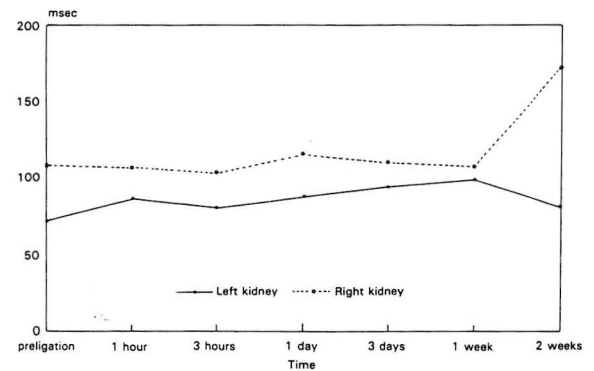


Fig. 8. T2 relaxation time of medulla

병리조직학적 소견

각 시간대에서 적절한 신장은 시간별로 변화되는 병리 소견을 보였다. 신장맥결찰 후 1시간 후에 적절한 신장에서는 피질 및 수질의 심한 울혈 및 출혈의 소견을 보였으며, 수질의 출혈의 정도가 피질에 비하여 심하였으며, 3시간 후에도 거의 동일한 소견이었다.

24시간 후에는 염증세포의 경미한 침윤이 나타났으며, 울혈 및 출혈의 정도는 1, 3시간 후에 비하여 감소하였

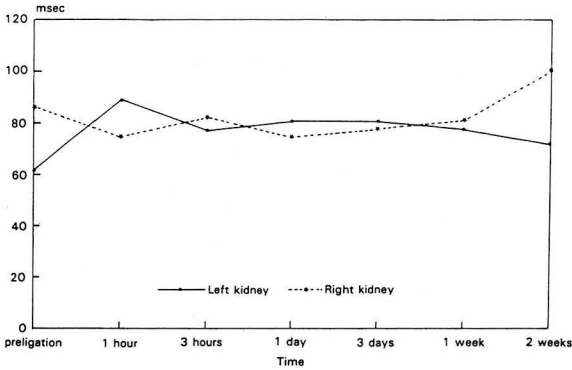


Fig. 9. T2 relaxation time of cortex

다.

3일 후에는 피질-수질경계에 출혈이 가장 심하였고, 또한 피질의 외부와 피막의 사이에 피막하 출혈이 있었다.

1주 후에는 약간의 간질성 섬유화가 진행되면서 염증세포의 침윤이 있었고 곡세뇨관 내 적혈구 cast가 관찰되었으며, 출혈은 관찰되지 않았다. 2주 후에는 섬유화가 더욱 진행되었다. 또한 신정맥결찰 후 적출한 신장의 전례에서 신정맥내의 혈전 형성을 관찰할 수 있었다.

고 찰

본 연구에서 실험결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 신정맥결찰 전후의 영상을 모두 동일한 가토에서 촬영하여 비교하는 것이 바람직하다. 그러나 장시간의 촬영소요시간, 장시간마취의 어려움, 현실적으로 영상기기의 계속적 사용이 불가능한 점, 가토의 갑작스런 상태변화, 시간별 병리표본채취 등으로 인하여, 5마리에서는 각 시간별 추적관찰이 가능하였고, 나머지 16마리에서는 각 시간별로 촬영할 수밖에 없었던 것이 측정치의 신뢰도가 낮은 원인의 하나로 사료된다. 그러나 특정한 한 시간대의 측정치를 구하는 것이 아니고, 시간별 변화를 알아보기 위해서는 현 실험여건상 불가피하였다.

Hricak 등(3, 4)에 의하면 정상 신장의 T1강조영상(T1 weighted image)에서는 피질-수질구분(cortical-medullary distinction)이 뚜렷하고, 신장질환의 경우 피질-수질구분이 불분명해지며, 이는 수분함량의 변화에 기인한다고 하였으며, Terrier 등(2)은 동일 신장 내의 피질과 수질의 신호강도를 비교한 피질수질대비(cortex to medulla contrast. 이하 CMC로 약함)를 신장질환 진단의 주요측정치로 이용하였는데, 이때 CMC는 주로

T1-, T2 완화시간의 차이를 의미하게 되고 이는 피질과 수질의 수분함량의 상대적 차이를 말한다.

CMC의 감소는 신장의 부종, 염증, 반흔, 종양 또는 출혈에 의하여 유발되고, 이러한 CMC변화는 신장질환 유무의 판단에 상당히 민감하지만, 특정한 질환이나 조직 상태와는 특이적인 연관이 있지 않은 비특이적인 소견으로 알려져 있다(5).

MRI의 절대적 신호강도는 서로 다른 영상간에는 절대적인 비교를 할 수 없으므로 상대적 신호강도의 비교인 CMC를 사용하는 반면, T1, T2완화시간은 이러한 기계적인 조건에 영향을 덜 받을 것으로 생각되어 여러조직의 고유특성이나, 질환으로 인한 변화 및 특성을 밝히는데 이용되고 있어 T1, T2완화시간을 계측하여 진단의 지표로 삼고자 하였다(6-12).

얻어진 영상으로부터 양측신장의 피질과 수질의 절대적 신호강도를 측정한 뒤, 앞에서 열거한 수식으로부터 피질수질대비(CMC) 및 T1-, T2완화시간을 산출하였는데, 절대적 신호강도는 사용장자의 세기, 코일의 종류, 펄스 시퀀스방법, 반복시간(TR), 에코시간(TE)등의 기계적인 조건에 의하여 각 영상마다 달라질 수 있으므로, 상대적인 측정치인 양측 신장의 피질수질대비를 사용하였다. 또한 피질수질대비는 육안적으로는 구분이 어려울 정도의 미세한 신호강도의 계측에도 유용하다.

본 실험의 결과에 의하면 신정맥결찰을 시행한 좌측 신장의 크기가 결찰 직후부터 심한 증가를 보여 3일 후에 가장 커졌다가, 서서히 감소하여 2주 후에는 우측 신장에 비하여 그 크기가 오히려 감소하는 소견을 보였으며, 병리조직학적으로도 결찰 직후에는 부종, 출혈 및 출혈로 인하여 신장의 크기가 증가했다가, 1주 이후에는 섬유화가 진행되어 신실질이 위축되는 소견과 일치함을 알 수 있었다. 가장 특이한 MR영상소견으로는 T2강조영상에서 신정맥 결찰 후 1-24시간사이에 좌측 신장의 외수질에 비교적 넓고 경계가 불분명한 저강도의 환상대(low signal band)가 관찰되었으며, 시간경과에 따라 이 저강도의 환상대는 범위가 축소되며 경계가 분명하여지다가 2주에는 관찰할 수 없었다. 또한 결찰 후 초기에는 피막하 피질(subcapsular cortex)이 저강도의 환상대로, 외수질에 접해있는 내피질은 고강도의 환상대(high signal band)로 나타나, 저강도와 고강도의 환상대가 교대로 나타나는 양상을 보이다가, 3일 이후에는 피질의 내 외부 구분없이 고강도로 변화하였다. 가토 정상 신장의 T2강조영상에서는 피질이 저강도로, 수질이 고강도로 나타남에 비하여 신정맥결찰을 시행한 신장의 피질과 수질의 강도가 역전되는 양상은 심한 부종으로 인한 수분함량의 증

가로 T2완화시간의 연장이 초래되어 피질의 강도가 증가한 것으로 생각되며, 외수질의 저장도의 환상대는 울혈 및 출혈에 의한 T2완화시간의 감소로 수질의 강도가 감소한 것이라 추측되며, 실제로 적출한 신장의 병리조직소견상 결찰 후 초기에는 수질의 출혈정도가 가장 심하였으며, 3일 후에는 수질외부에 가장 심한 출혈이 있었다. 김등(13)은 한국형출혈열의 특징적인 MRI소견으로 T2강조영상에서 외수질의 저장도의 환상대를 보고하며, 이는 울혈 및 출혈로 인하여 생긴 deoxyhemoglobin과 적혈구 내의 methemoglobin이 T2완화시간의 감소를 초래하여 생기게 된 것이라고 추측하고 있다. 이러한 점들로 미루어 보아, 본 실험에서도 외수질의 저장도의 환상대는 울혈 및 출혈로 인한 결과로 생각된다.

피막 바로 아래의 외피질의 신호강도가 신장맥 결찰후 초기에 정상 신장의 피질과 같이 저장도로 나타나다가 3일 후부터 피질의 내부와 같이 고강도로 변화하는 소견을 관찰할 수 있었는데 이는 피막정맥을 통한 측부혈행으로 인하여 외피질이 결찰 직후에는 손상을 덜 받아 수분함량의 증가가 내피질에 비하여 적음에 기인한다고 생각된다.

이외에도 T1강조영상에서는 피질과 수질의 구분이 불분명해지는 소견을 관찰할 수 있었다.

이와같은 MRI소견의 변화는 이를 수치상으로 표시한 CMC가 T2강조영상과 T1강조영상에서 통계학적으로 유의한 변화를 보임으로써 증명할 수 있었다.

T1완화시간은 결찰을 시행한 좌측 신장의 피질과 수질 모두에서 통계학적으로 유의한 증가를 보였으며, T2완화시간도 피질, 수질 모두에서 증가를 보였으나 통계학적 유의성은 초기에만 있었다. Yuasa등(14)에 의하면 실험적인 신장맥 결찰 후 정맥성 울혈의 결과로 증가한 free water때문에, 피질과 외수질의 T1, T2완화시간이 길어진다고 보고하였으며 이는 본 실험의 결과와도 일치한다. 따라서 in vivo 상태에서 조직의 혈액함량의 변화를 측정하는 것은 어려움이 있기 때문에 본 실험의 결과와 같이 자기완화시간의 유용한 지표라 할 수 있겠다.

이외에도 2주 후에는 신장맥 결찰을 시행치 않은 우측 신장의 T2완화시간이 유의한 증가를 보였으며 이는 좌측 신장의 기능저하로 인한 우측 신장의 보상성 변화로 인한 것이라 추측된다.

본 연구에서 실험결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 신장맥결찰 전후의 영상을 모두 동일한 가토에서 촬영하여 비교하는 것이 바람직하다.

얻어진 MR영상과 동일한 가토의 신장을 적출하여 피질 및 외수질의 in vitro T1, T2완화시간과 수분 및 헤모글로빈부산물 함량의 정량적 측정을 하여, MR영상과 in

vivo T1, T2완화시간과의 비교 관찰을 함으로써 바람직한 상관관계를 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

결론적으로 본 실험에서는 신장의 크기의 증가와 T2강조영상에서 외수질의 저장도의 환상대를 관찰 할 수 있었던 소견이 급성 신장맥 폐색의 중요한 MRI소견임을 알 수 있었으며, T1강조영상과 T2강조영상에서의 CMC치와 T1, T2완화시간이 유용한 지표가 됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Brenner BM, Rector FC. The kidney. 3rd ed, W. B. Saunders, Philadelphia, 1986; 920-921, 961-963, 1180-1185
2. Terrier F, Hricak H, Justich E, et al. The diagnostic value of renal cortex to medulla contrast on magnetic resonance image. Eur J Radiol. 1986; 6:121-126
3. Hricak H, Crooks L, Sheldon P, et al. Nuclear magnetic resonance imaging of the kidney. Radiology. 1983; 146:425-432
4. Hricak H, Bydder GM, Steiner RE, et al. Magnetic resonance imaging of the kidneys. AJR. 1984; 143:1215-1227
5. Terrier F, Hricak H, Revel D, et al. Magnetic resonance imaging in the diagnosis of acute renal allograft rejection and its differentiation from acute tubular necrosis: Experimental study in the dog. Invest Radiol. 1985; 20:617-625
6. Brant-Zawadski M, Bartkowski HM, Ortedahl, et al. NMR in experimental cerebral edema: value of T1 and T2 calculations. AJNR. 1984; 5:125-129
7. Mills CM, Crooks LE, Kaufman L, et al. Cerebral abnormalities: use of calculated T1 and T2 magnetic resonance images of diagnosis. Radiology. 1984; 150:87-94
8. Kjos BO, Ehman RL, Brant-Zawadski M, et al. Reproducibility of relaxation times and spin density calculated from routine MR imaging sequences: clinical study of the CNS. AJNR. 1985; 6:271-276
9. Kjos BO, Ehman RL, Brant-Zawadski M, et al. Reproducibility of T1 and T2 relaxation times calculated from routine MR imaging sequence: phantom study. AJNR. 1985; 6:277-283
10. 장기현, 이기재, 한문희 등. 초전도형 자기공명영상장

- 치를 이용한 각종 장기 및 체액의 자기완화에 관한 연구. 대한방사선의학회지. 1988 ; 24 : 942-948
11. Posin JP, Arakawa M, Crooks LE, et al. Hydrogen MR imaging of the head at 0.35T and 0.7T: effects of magnetic field strength. Radiology. 1985; 157:679-683
 12. Bottomley PA, Foster TH, Argersinger RA, et al. A review of normal tissue hydrogen NMR relaxation times and relaxation mechanisms from 1-100 MHz: Dependence on tissue type, NMR frequency, temperature, species, excision, and age. Med Phys. 1984; 11:425
 13. Kim SH, Kim, S, Lee JS, et al. Hemorrhagic fever with renal syndrome: MR imaging of the kidney. Radiology; 1990, 175:823-825
 14. Yuasa Y, Kundel HL. Magnetic resonance imaging following unilateral occlusion of renal circulation in rabbits. Radiology. 1985; 154:151-156