KISEP Clinical Research J Korean Neurosurg Soc 27 : 632-641, 1998

자기 공명 영상을 이용한 뇌척수액 순환의 역학 분석*

연세대학교 의과대학 신경외과학교실, 진단방사선과학교실**
김동석 · 최중언 · 윤평호** · 김동익** · 박승우

= Abstract =

Assessment of Flow Dynamics of Cerebrospinal Fluid with Phase-contrast Cine MR Image

Dong-Seok Kim, M.D., Joong-Uhn Choi, M.D., Pyeung-Ho Yun, M.D.,**
Dong-Ik Kim, M.D., Seoung-Woo Park, M.D.**

*Department of Neurosurgery & Neuroradiology,** Brain Research Institute, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea*

Phase contrast magnetic resonance imaging techniques can be used to evaluate the to - and - fro motion of cerebrospinal fluid(CSF) throughout CSF pathways between the ventricles and subarachnoid space of the brain and spine. This CSF motion is due to transmitted cardiac pulsation from systolic expansion of the cerebral he - mispheres. To cover the entire cardiac cycle, peripheral cardiac triggering was used. Using this technique, we analyzed quantitative CSF motion over a cardiac cycle to distinguish normal CSF flow from that seen in hydrocephalus.

We tested the reproducibility of the aqueductal CSF signal intensity on a phase contrast cine MR sequence in 28 patients with normal ventricle. Sixteen patients with obstructive hydrocephalus and 11 patients with normal pressure hydrocephalus(NPH) were investigated with the sequence before and after CSF diversion.

The peak CSF flow velocity in aqueduct was significantly increased in patients with NPH and significantly decreased in patients with obstructive hydrocephalus(NPH group : 6.71cm/sec, control group : 2.94cm/sec, obstructive group ; less than 1.0cm/sec). After LP shunting in NPH group, retrograde flow signal curves were anterogradely converted and the peak flow velocities were somewhat decreased(mean : 5.10cm/sec). The clinical diagnosis of NPH was well correlated with the results of cine MRI. After endoscopic third ventriculostomy in obstructive group, we could note increased CSF flow velocity both at prepontine cistern and precordal subarachnoid space with markedly increased flow at prepontine cistern.

Phase contrast cine MRI is useful in evaluatng the CSF dynamics in patients with hyperdynamic aqueductal CSF (NPH) or aqueductal obstruction(obstructive hydrocephalus).

KEY WORDS : Quantitative measurement · CSF flow dynamic · Phase contrast cine MR · Hydrocephalus · To - and - fro movement.

서 론

수두증의 진단 방법으로는 전산화 단층 촬영, 자기 공명 영상, 뇌파 검사, 초음파를 이용한 뇌혈류 검사 등의 비침습적인 방법과 동위 원소를 이용한 뇌조 촬영법, 뇌실 또는 요추부 천자를 통한 두개강 내압 추적 장치 등의 침습적인 방법이 이용되고 있다. 비침습적인 진단 방법들만으로는 단면적인 뇌실의 모습만 보여 줌으로 대뇌의 위축으로 인한 이차적인 뇌실 확장의 경우와 교통성 수두증을 감별하기 어려워 수술의 적응증을 정하기가 쉽지 않다. 반면 뇌실 또는 요추 천자를 통한 두개강 내압 측정은 감염의 위험이 있고 가

*본 논문의 요지는 1997년도 추계대한신경외과학회에서 구연 발표되었음.
*본 논문은 1997년 한국학술진흥재단 자유공모과제연구비의 지원으로 이루어졌음.

장 많이 사용되는 동위 원소를 이용한 방법은 요추 천자가 필요하고 감염 및 방사선에 노출되는 문제가 있다. 그럼에도 불구하고 기존의 방법으로 진단하고 치료한 교통성 수두증에서 션트술 후 증상의 호전은 30 90%로 보고되는 등 뇌척수액 순환에 대한 정확한 분석은 쉽지 않다.

한편 움직임에 대한 자기 공명 영상에서의 신호의 변화에 대한 Hahn 등[13]의 논문이 처음 발표한 이래 Grover와 Singer등[12]이 처음 Phase - sensitive 기술을 이용하여 인체에서 혈류를 측정함으로 인체에서 유발되는 움직임을 가시적으로 포착하는 방법을 제시하였고 그 후 많은 저자들이 뇌척수액 순환에 관한 연구에 자기 공명 영상을 이용하게 되었다[3)5)6)8)9)14)18)20)22)23)]. 저자 등은 자기 공명 영상을 이용하여 뇌척수액 순환을 분석하여 뇌척수액 순환을 이해하고 뇌척수액 순환 장애 질환에 대한 진단 방법으로서의 효용성을 알아 보고자 하였다.

대상 및 방법

1. 대 상

대조군은 뇌척수액 순환의 장애와 관계없는 뇌질환(긴장성 두통 등)의 진단을 위해 자기 공명 영상 촬영을 하는 28명의 환자를 대상으로 하였다. 대조군 환자의 나이는 38세에 72세로 평균 나이는 57.3세였다. 교통성 수두증군은 뇌전산화 단층 촬영 또는 자기 공명 영상상 뇌실 확장이 있고 요실금, 보행 장애, 정신 지체 등 임상 증상이 정상압 수두증 진단에 합당하며 동위원소 뇌조 조영술상 뇌척수액이 뇌실로의 역류가 중등도 이상 있다고 판단하여 요추강 – 복강간 션트술을 받은 환자 중 요실금과 보행 장애가 현저히 호전된 11명만을 대상으로 하였다. 교통성 수두증 환자군의 평균 나이는 50.1세로 20세에서 67세까지 분포하여 대조군과 차이가 없었다. 폐쇄성 수두증군은 방사선학적 검사 및 임상 증상으로 진단 받고 내시경적 제3뇌실 누공술을 시행받은 16명을 대상으로 하였다. 이들의 나이는 1세에서 48세로 평균 나이는 5.8세였다.

2. Phase contrast cine MR imaging

GE signa horizon 1.5 - T MR 기기를 이용하여 aqueduct of Sylvius, 제4뇌실, 뇌교 앞, 경수 앞과 뒤에서 각각의 뇌척수액 순환에 의한 신호 변화를 측정하였다. 측정 시 자기 공명 영상의 조건은 repeated time을 20 40msec로 하며 echo time은 8 15msec, slice thickness는 5mm로 하였다. 자기 공명 영상의 sagittal 단면에서 뇌척수액 순환을 측정 할 부위를 결정하고 그 위치에서 뇌척수액이 흐르는 방향과 직각 되는 axial 단면을 결정하여 반복하여 신호 변화를 측정한다. 반복 측정 간격은 peripheral cardiac trigger를 이용하여 조정하고 심전도상의 R - R 간격을 16등분

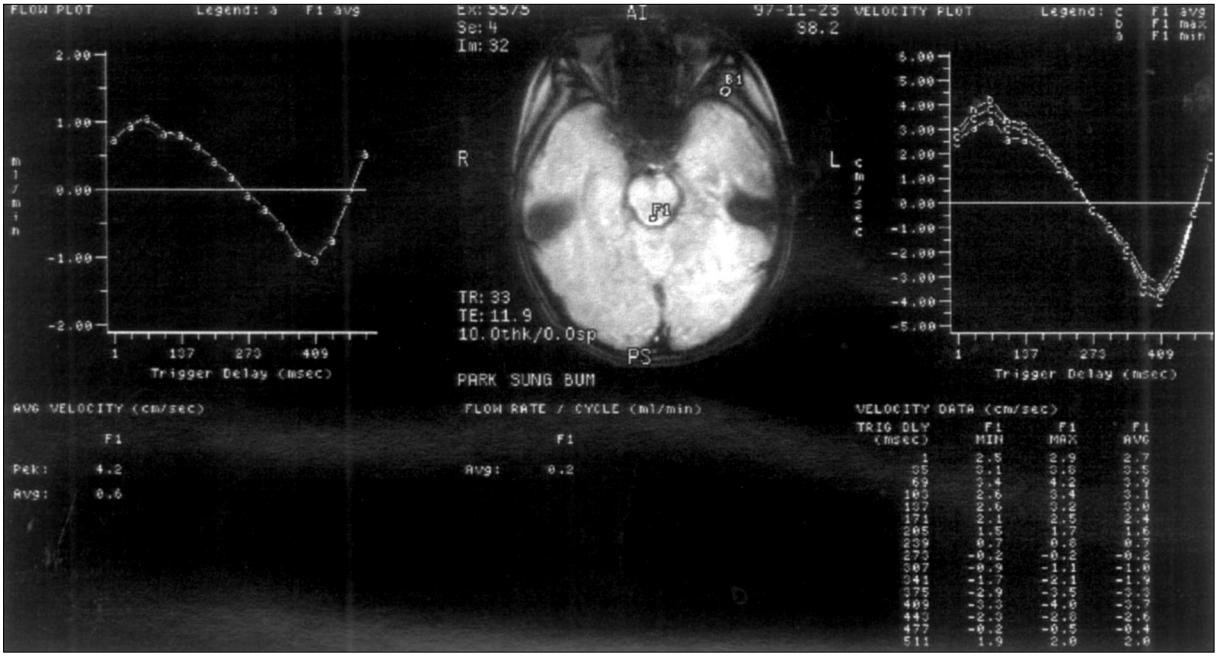

Fig. 1. CSF dynamics during one cardiac cycle. The left graph indicates CSF flow rates and the right graph indicates CSF flow velocities at the level of aqueduct of Sylvius during one cardiac cycle. We can measure CSF velocities(cm/sec), CSF flow rates(ml/sec), and net CSF flows.

한 시간으로 하였다. 측정된 신호 변화는 컴퓨터를 이용한 flow analysis program(General Electric Medical System, Signa Horizon 1.5T에 내장 된 software program임)으로 유속과 유량으로 환산하였다. 이 때의 velocity encoding gradient는 20cm/sec로 하고 region of interest(ROI)는 가능한 크게 하였으나 신호 측정을 하려는 부위에 따라 뇌척수액 이외의 것이 포함되지 않도록 하였다.

3. 뇌척수액 순환의 양적 측정

Fig. 1은 flow analysis program을 이용하여 뇌척수액 순환을 수치화한 한 것이다(Fig. 1). 각 위치에서 뇌척수액 순환을 도식화하면 Fig. 2와 같은 양상(to-and-fro movement)을 보이는데 R-R 간격은 정의한 바와 같이 심장이 한번 수축하고 이완하는 동안의 시간으로 하며 peripheral cardiac trigger를 이용하여 계산하였다(Fig. 2). +(positive)는 제3뇌실에서 제4뇌실 방향으로의 뇌척수액 움직임을 의미하고 -(negative)는 반대 방향의 뇌척수액 움직임을 의미한다. Vr은 심장의 수축기 동안의 최대 유속, Vc는 심장의 이완기 동안의 최대 유속을 의미하는데 Vmax는 Vr과 Vc의 절대치의 평균치로 정의하였다. flow rate은 일정한 ROI에서 한번의 심장 박동 동안의 뇌척수액 순환량으로 정의하고 분당 ml로 계산하였다. 평균 유속은 한번의 심장 박동 시간을 16등분하여 각각 측정한 유속의 평균으로 초당 cm으로 계산하였다. Vr-Vc interval은 Vr시의 시간(X)과 Vc시의 시간(Y) 사이의 간격을 R-R interval에 대한 비로 정의하였다. 각 대상 환자군에서의 뇌척수액의 순환 양상(to-and-fro movement), 유량(flow rate/cycle)(ml/min), mean velocity(cm/sec), Vr(cm/sec), Vr(cm/sec), Vmax(cm/sec), Vr-Vc interval을 비교하였다.

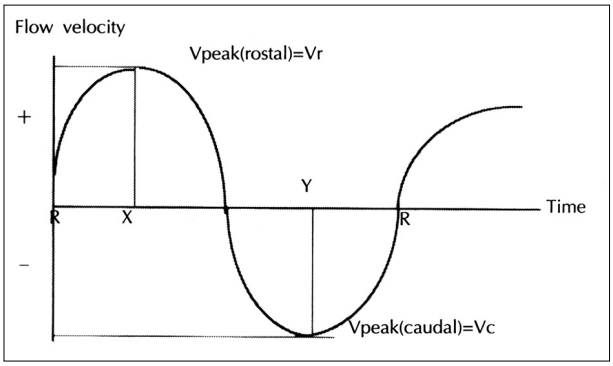

Fig. 2. Schematic drawing of CSF flow dynamics during one cardiac cycle. Vr means maximal velocity of CSF flow from 3rd ventricle to 4th ventricle during the systolic period and Vc means maximal velocity of contralateral flow during the diastolic period. Maximum flow velocity (Vmax)=(|Vrl+|Vcl)/2, Vr-Vc interval(with R-R correction)=(Y-X)/R-R interval.

결 과

1. Aqueduct of Sylvius에서의 뇌척수액 순환

대조군 28명 중 to-and-fro movement를 관찰 할 수 있었던 경우는 21명(75%)이였고 Vmax는 1.30 5.55cm/sec로 평균 Vmax는 2.94cm/sec로 표준 편차는 0.94cm/sec였다. 유량은 -0.03±1.98ml/min였고 평균 유속은 0.94±0.98cm/sec였다. Vr은 2.90±1.45cm/sec, Vc는 2.99±1.40cm/sec였다. Vr-Vc interval은 0.57±0.10이였다(Table 1).

교통성 수두증 환자군 11명 중 to-and-fro movement를 관찰 할 수 있었던 경우는 9명(82%)였고 평균 Vmax는 6.71±2.84cm/sec로 대조군에 비해 현저히 증가해 있었다(Fig. 3). 유량은 -0.63±4.90ml/min으로 negative 방향으로의 뇌척수액 순환, 즉 제4뇌실에서 제3뇌실로의 뇌척수액의 역류가 있다는 것을 수치적으로 확인 할 수 있었다. 평균 유속은 1.26±1.20cm/sec, Vr은 7.55±4.56cm/sec, Vc는 5.87±3.29cm/sec로 대조군에 비해 증가해 있었다. Vr-Vc interval은 0.59±0.04로 약간 증가해 있으나 통계학적 의의는 없었다. 교통성 수두증 환자들은 모든 예에서 요추강-복강간 션트술을 시행하고 10일째 수술전과 같은 방법으로 뇌척수액 순환을 측정하였다. 11명 중 추적 자기공명 영상상 뇌실이 줄어든 경우는 2예에 불과하였으나 평균 Vmax는 5.16±3.84cm/sec로 수술 전에 비해 약간 감

Table 1. CSF flow analysis at the level of aqueduct of Sylvius

	Control group (N=28)	Normal pressure hydrocephalus (N=11)	Obstructive hydrocephalus (N=16)
To-and-fro movement	75%	82%	25%*
Flow rate/cycle (ml/min)	-0.03±1.98	-0.63±4.90	Not available
Average velocit (cm/sec)	0.94±0.98	1.26±1.20	Not available
Vmax(cm/sec)	2.94±0.94	6.71±2.84	Not available
Vr(cm/sec)	2.90±1.45	7.55±4.56	Not available
Vc(cm/sec)	2.99±1.40	5.87±3.29	Not available
Vr-Vc interval	0.56±0.10	0.59±0.04	Not available

*: aqueduct 아래 부위에서 폐쇄가 있어 수두증이 유발되었던 5예 중 4예에서는 폐쇄성 수두증인데도 aqueduct 부위에서 뇌척수액의 to-and-fro movement를 관찰 할 수 있었음.
+(positive) : 제3뇌실에서 제4뇌실 방향으로의 뇌척수액 움직임을 의미함, -(negative) : 제4뇌실에서 제3뇌실 방향으로의 뇌척수액 움직임을 의미함, Vr : 심장의 수축기 동안의 최대 유속, Vc : 심장의 이완기 동안의 최대 유속, Vmax : Vr과 Vc의 절대치의 평균치, flow rate/cycle : 한번의 심장 박동 동안의 뇌척수액 순환량으로 정의하고 분당 ml로 계산함, Vr-Vc interval : Vr시의 시간(X)과 Vc 시의 시간(Y) 사이의 간격을 R-R interval에 대한 비로 정의하였다.

소해 있었다(Fig. 4). 뇌척수액의 to - and - fro movement를 관찰 할 수 있었던 경우는 9명으로 차이가 없었다. 그러나 유량은 1.63±5.24ml/min으로 positive 뇌척수액 순환이 확인되었다. 이는 션트술로 수술 전 제4뇌실에서 제3뇌실로의 뇌척수액의 역류하던 뇌척수액이 반대 방향으로 역전 되었음을 의미한다. 다른 수치는 수술 전과 큰 차이가 없었다.

폐쇄성 수두증 환자군 중에서 congenital aqueduct stenosis 6명, Tectal tumor 2명, pineal germinoma 1명, su -

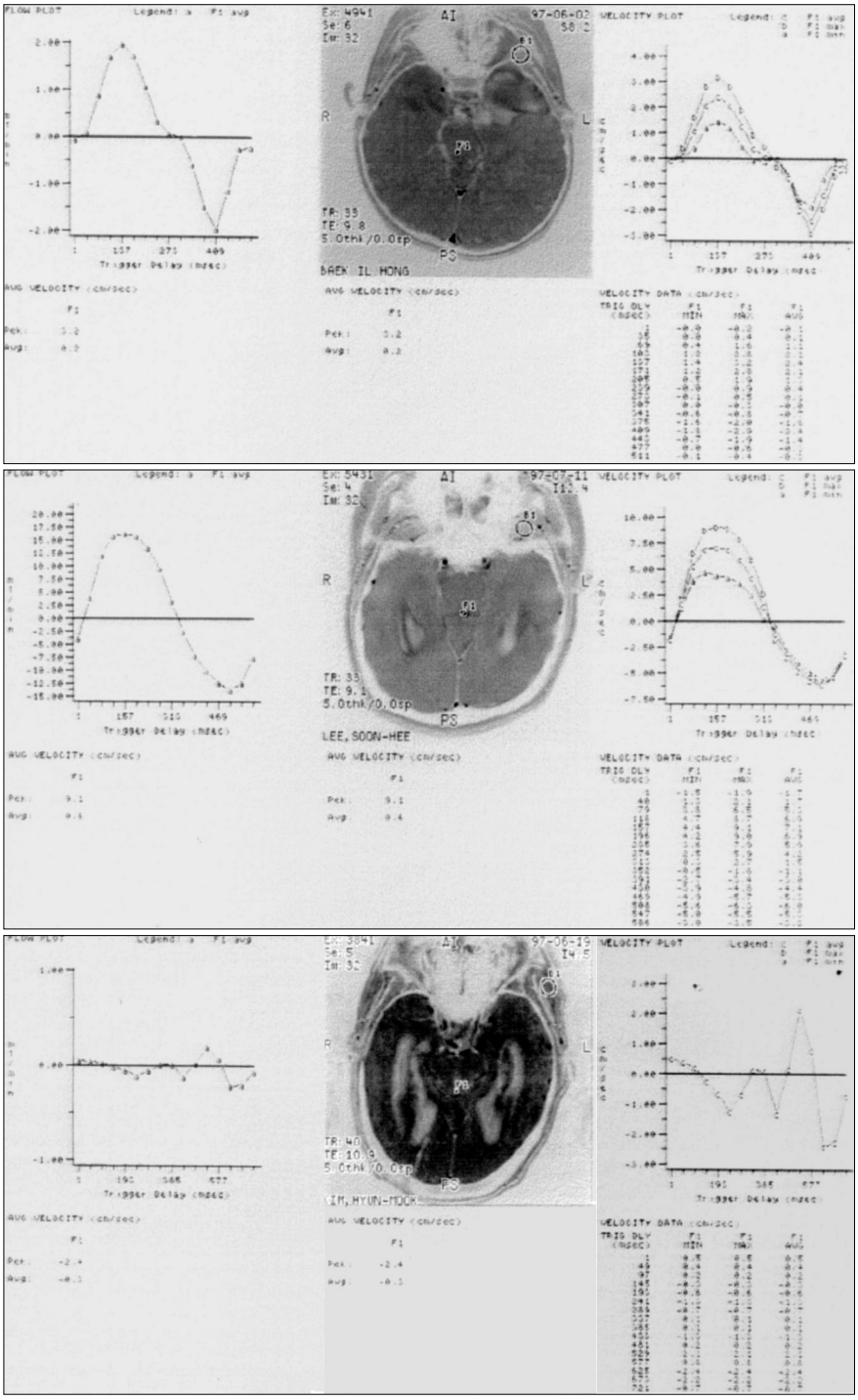

Fig. 3. Comparison of CSF flow dynamics during one cardiac cycle in between normal person(upper) and patients with abnormal CSF circulation(middle ; normal pressure hydrocephalus, lower ; obstructive hydrocephalus). The peak CSF flow velocity in aqueduct was significantly increased in patients with NPH and significantly decreased in patients with obstructive hydrocephalus.

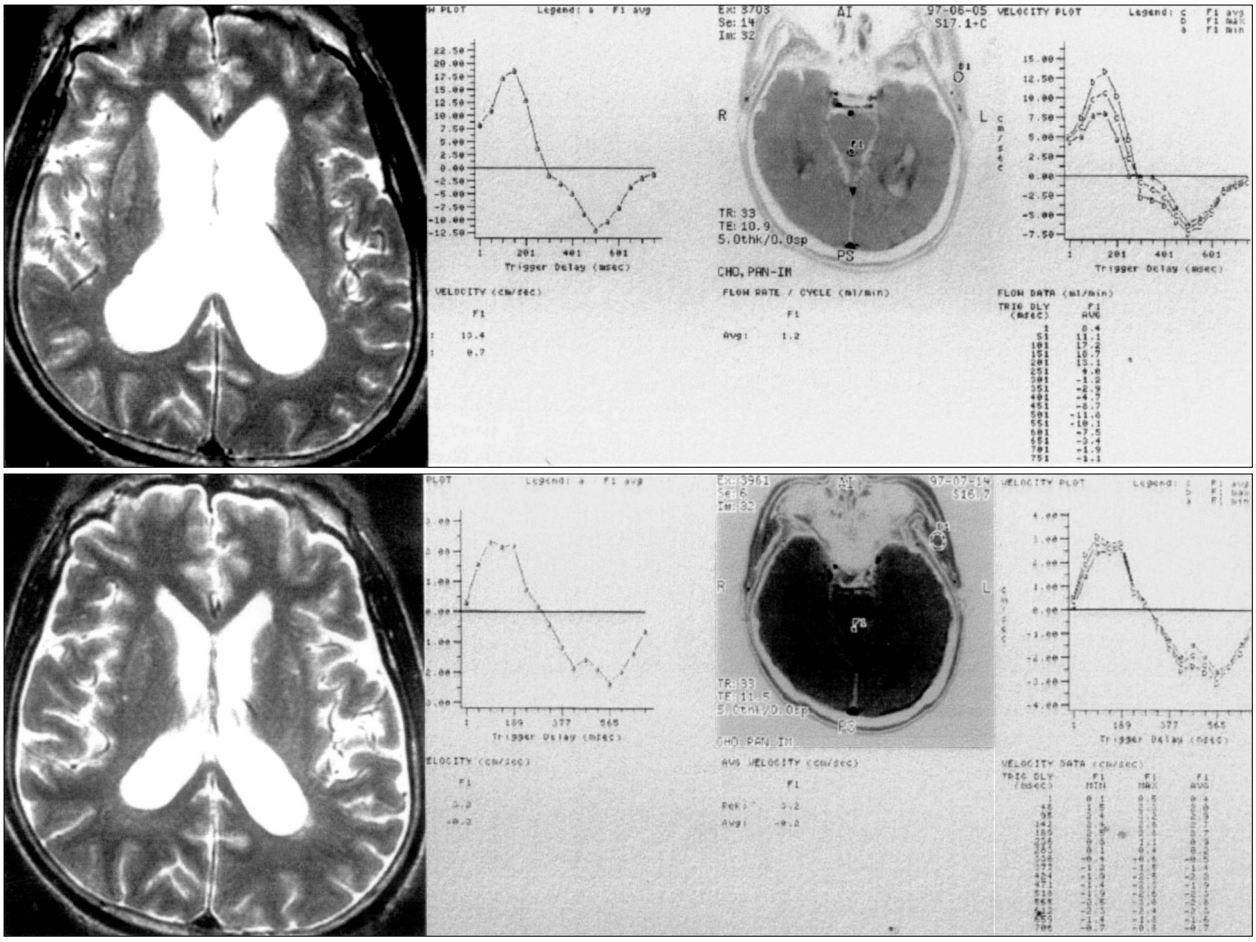

Fig. 4. Comparison of CSF flow dynamics before and after LP shunt in NPH. Post-operative T2 image showed that dilated ventricle size was some decreased. After LP shunting in NPH group, preoperative retrograde flow signal curves were antero-gradely converted and the peak flow velocities were definitely decreased.

prasellar arachnoid cyst 2명 등 aqueduct 주위에서의 병변에 의한 폐쇄성 수두증이었던 11명에서는 to - and - fro movement를 관찰 할 수 없었으며 Vmax, 유량, 평균 유속, Vr, Vc, Vr - Vc interval도 측정 할 수 없었다. 그러나 이들에서도 신호 변화를 관찰 할 수 있었는데 이는 뇌척수액의 흐름에 의한 신호 변화라고 생각하기 보다는 심장 박동에 의한 aqueduct 주위 뇌 조직의 움직임에 의한 신호 변화로 생각되고 이 경우에도 최고 유속이 2cm/sec를 넘는 경우는 없었다(Fig. 3). 후두와 종양에 의하거나 제4뇌실의 출구 부위에서 폐쇄가 있어 수두증이 유발된 5예 중 4예에서 to - and - fro movement를 관찰 할 수 있었으며 이들의 Vmax는 0.50 8.45cm/sec로 평균 Vmax는 2.79±2.21로 표준편차가 커 통계학적인 의미는 얻을 수 없었다. 그러나 유량은 - 4.83±9.23ml/min으로 측정 되었는데 이는 대조군의 유량에 비해 절대치가 크게 증가된 것인데 이는 aqueduct 아래 부위에서의 폐쇄로 인한 제4뇌실에서 제3뇌실로의 심한 역류가 있다는 것을 의미한다.

2. 제4뇌실에서의 뇌척수액 순환

대조군 28명 중 to - and - fro movement를 관찰 할 수 있었던 경우는 12명(43%)이였고 평균 Vmax는 1.16±0.46 cm/sec, 유량은 - 1.49±1.85ml/min, 평균 유속은 0.71±0.65cm/sec 였다. Vr은 0.60±0.37cm/sec, Vc는 1.72±0.81cm/sec 였다. Vr - Vc interval은 0.63±0.09이였다(Table 2).

교통성 수두증 환자군에서는 대조군에 비해 더 많은 예(91%)에서 to - and - fro movement를 관찰 할 수 있었고 Vmax, Vr, Vc, 평균 유속도 현저히 증가해 있는 것을 관찰할 수 있었다. 유량은 - 2.71±8.35ml/min으로 negative 방향으로의 뇌척수액 순환, 즉 제4뇌실에서 제3뇌실로의 뇌척수액의 역류가 있다는 것을 수치적으로 확인 할 수 있었다. Vr - Vc interval은 차이가 없었다.

폐쇄성 수두증 환자군 16명중 7예에서 제4뇌실에서의 뇌척수액 순환을 측정 할 수 있었는데 5예(71%)에서 to - and - fro movement를 관찰 할 수 있었다. Vmax, Vr, Vc,

Table 2. CSF flow analysis at the level of the fourth ventricle

	Control group	Normal pressure hydrocephalus	Obstructive hydrocephalus
To-and-fro movement	44%	91%	71%
Flow rate/cycle (ml/min)	- 1.49±1.85	- 2.71±8.35	- 1.26±1.96
Average velocity (cm/sec)	0.71±0.65	1.03±0.73	1.49±1.51
Vmax(cm/sec)	1.16±0.46	4.19±3.25	2.46±1.73
Vr(cm/sec)	0.60±0.37	5.13±5.40	2.48±3.80
Vc(cm/sec)	1.72±0.81	3.24±1.50	2.45±1.99
Vr-Vc interval	0.63±0.09	0.58±0.11	4.19±3.25

Table 3. CSF flow analysis at the prepontine level

	Control group	Normal pressure hydrocephalus	Obstructive hydrocephalus
To-and-fro movement	80%	50%	50%
Flow rate/cycle (ml/min)	0.12±1.11	- 2.25±1.91	- 0.58±2.63
Average velocity (cm/sec)	0.80±0.48	0.85±0.07	0.85±0.47
Vmax(cm/sec)	2.99±1.82	1.88±1.10	3.36±2.70
Vr(cm/sec)	3.18±2.33	0.95±1.06	3.38±3.82
Vc(cm/sec)	2.80±1.98	2.80±1.13	3.35±1.73
Vr-Vc interval	0.59±0.09	0.50±0.10	0.63±0.06

평균 유속도 대조군에 비해 증가해 있었으나 통계학적인 의의는 없었다.

3. 뇌교 앞 부위에서의 뇌척수액 순환

대조군 28명 중 20명(71%)에서 to - and - fro movement를 관찰 할 수 있었다. 대조군의 유량은 0.12±1.11ml/min으로 교통성 수두증 환자군과 폐쇄성 수두증 환자군의 유량인 - 2.25±1.91ml/min과 - 0.58±2.63ml/min에 비해 분명한 positive 순환, 즉 머리 쪽에서 요추강쪽으로 순환을 보였다. 평균 유속, Vmax, Vc, Vr - Vc interval은 각 환자군 사이에 유의한 차이는 없었으나 교통성 수두증의 환자군에서 Vr이 0.95±1.06cm/sec으로 감소해 있었다(Table 3).

폐쇄성 수두증 환자군에서 내시경적 제3뇌실 천공술을 시행하기 전과 수술 후의 뇌척수액 순환을 분석 하였을 때 수술 전 Vmax는 1.25 5.26cm/sec로 평균 Vmax는 3.78 cm/sec, 표준 편차는 2.56cm/sec였으나 수술 후 Vmax는 5.66 8.59cm/sec로 평균 Vmax는 5.29cm/sec, 표준 편차는 1.56cm/sec로 증가하였다. 유량은 수술 전 0.85±0.47 cm/sec에서 수술 후 1.69±0.97cm/sec로 증가하였다. 이러한 결과는 aqueductal stenosis, tectal tumor, posterior fossa tumor 등 제3뇌실 아래에서의 폐쇄에 의한 수두증은 내시경적 제3뇌실 천공술로 제3뇌실에서 prepontine cistern으로의 뇌척수액 순환이 생겼다는 것을 의미한다. 수술 전후의 Vr - Vc interval은 0.56±0.079과 0.56±0.079로 동일하였다(Fig. 5).

4. 경수 앞과 뒤 부위에서의 뇌척수액 순환

대조군에서 교통성 수두증 환자군과 폐쇄성 수두증 환자군에 비해 더 많은 to - and - fro movement를 나타낸 것을 제외하고는 환자군 사이의 유의한 차이를 보이는 인자는 없었다(Table 4, 5).

경수 앞과 뒤의 뇌척수액 순환을 분석하면 경수 앞에서의 유량은 0.03±0.98ml/min으로 positive 뇌척수액 순환을 보이나 경수 뒤에서는 - 0.07±0.34ml/min으로 negative 뇌척수액 순환을 나타내었다. 이는 제4뇌실에서 나온 뇌척수액이 경수 앞을 경유하여 요추강으로 순환 후 경수 뒤를 통해서 흐른다고 유추할 수 있다(Table 4, 5).

고 찰

움직임에 대한 자기 공명 영상에서의 신호의 변화는 Hahn 등[13]이 해수의 운동에 관한 논문에서 처음 발표한 이래 Gr - over와 Singer 등[12]이 처음으로 phasesensitive 기술을 이용하여 혈류를 측정함으로 인체에서 유발되는 움직임을 비침습적인 방법으로 가시적으로 포착하는 방법을 제시하였다. 중추 신경계에서 뇌척수액의 흐름에 대한 역학적인 연구는 1940년대부터 있어 왔다. 1943년 O′Connell 등[21]은 수축기 혈압과 호흡에 의한 뇌실 내 압력의 상승이 뇌실 주변 뇌조직의 손상을 가져오고 뇌실 확장의 원인이 될 수 있다고 하였다. 이러한 심장 활동과 호흡으로 인한 뇌실 내 압력의 변화는 수두증 진행의 중요한 변수가 될 수 있으며 뇌척수액 흐름의 차단이 없이 정상 또는 정상 이하의 뇌압에서도 뇌실 확장 또는 수두증의 원인이 될 수 있다고 하였다. 실제 교통성 수두증에서 뇌척수액의 흐름에 장애가 되는 요인이 없고 흡수에도 장애가 없으면서도 심장 수축기에 상대적으로 높은 뇌실압을 보인다. Bering 등[1)2)]은 심장 박동에 인한 측뇌실 맥락총의 반복되는 수축과 이완이 뇌척수액 운동의 원동력이 된다고 보고하였고 DuBoulay 등[7)]도 심장 박동에 의한 제3뇌실의 수축 운동이 뇌척수액 순환에서 펌프 역할을 한다고 추측하였다. 뇌 자체의 부피, 혈류량, 뇌척수액량의 합으로 항상 일정하다는 Monro - Kellie - Burrows 원리와 뇌 자체의 부피는 일정하다는 가정하에 뇌척수액의 운동은 혈류량에 따라 결정되고 혈류량은 유입되는 동맥혈량과 유출되는 정맥혈량의 차이에 따라 결정된다[11)15)].

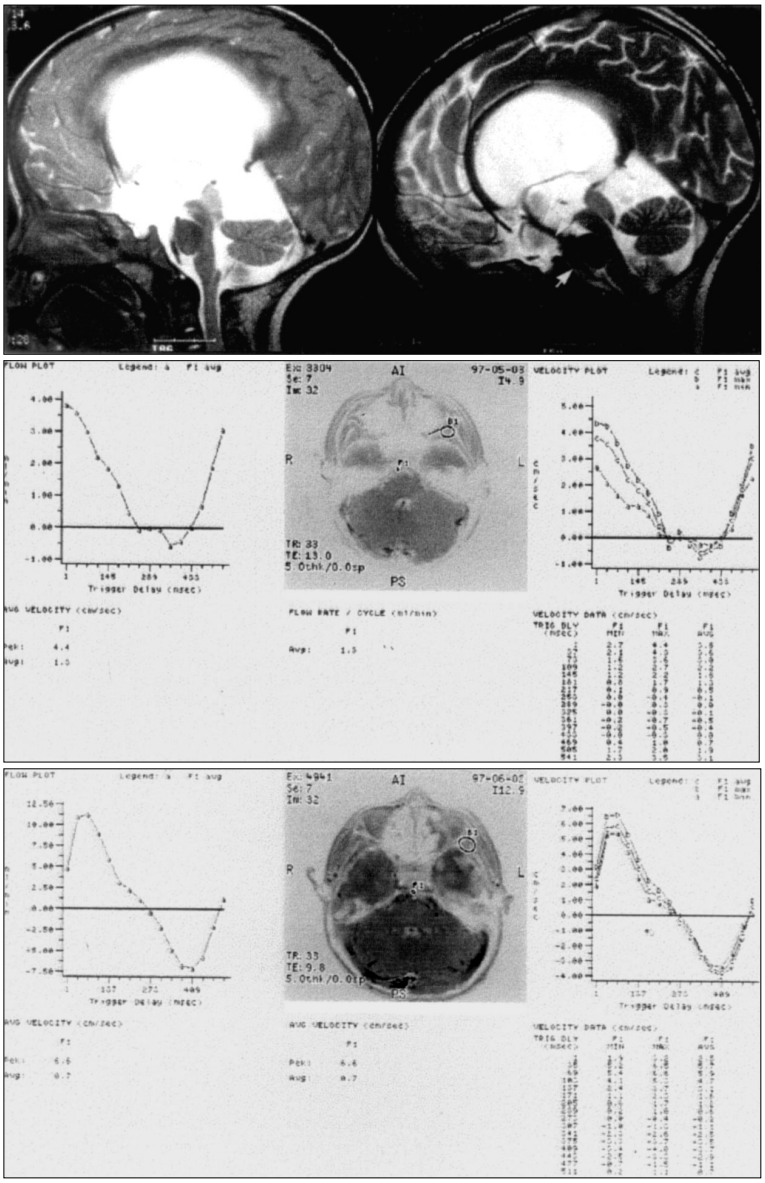

Fig. 5. Upper left : Preoperative brain MR image shows aqueductal stenosis due to tectal tumor and dilated lateral ventricle. Upper right : After endoscopic third ventriculostomy, flow void is clearly seen between the third ventricle and interpeduncular cistern(arrow). Middle : Preoperative CSF flow dynamics. Lower : Postoperative CSF flow dynamics. Postoperative CSF flow study revealed definitely increased Vmax and flow rate/cycle at the prepontine cistern than those of preoperative study.

Table 4. CSF flow analysis at the precordal level

	Control group	Normal pressure hydrocephalus	Obstructive hydrocephalus
To-and-fro movement	75%	33%	44%
Flow rate/cycle (ml/min)	0.03±0.98	- 0.50±0.77	- 0.96±2.87
Average velocity (cm/sec)	0.64±0.78	0.37±0.14	0.97±1.80
Vmax(cm/sec)	3.42±1.46	2.84±1.44	3.01±1.78
Vr(cm/sec)	3.35±2.12	2.60±1.80	2.79±1.54
Vc(cm/sec)	3.49±1.64	3.08±1.82	3.23±3.15
Vr-Vc interval	0.64±0.05	0.65±0.14	0.57±0.07

Table 5. CSF flow analysis at the postcordal level

	Control group	Normal pressure hydrocephalus	Obstructive hydrocephalus
To-and-fro movement	60%	33%	38%
Flow rate/cycle (ml/min)	- 0.07±0.34	- 1.50±2.18	- 0.08±1.10
Average velocity (cm/sec)	0.54±0.60	0.93±0.52	0.74±1.03
Vmax(cm/sec)	2.02±1.12	2.87±2.02	3.43±3.44
Vr(cm/sec)	1.88±1.55	2.42±1.66	3.70±5.03
Vc(cm/sec)	2.16±1.02	3.32±2.53	3.16±2.25
Vr-Vc interval	0.62±0.10	0.58±0.15	0.63±0.06

또한 혈류량은 전신적 혈압과 동맥혈관의 탄성에 의해 결정된다[14]. 또한 여러 연구 결과로 대뇌는 심장 수축기 동안에 안쪽으로는 뇌실을 압박하고 동시에 밖으로 지주막하 공간으로 팽창하여 aqueduct를 통한 뇌척수액의 흐름이 심장 수축기에는 제4뇌실 방향으로, 심장 이완기에는 제3뇌실 방향으로 향한다고 알려졌다[4)10)]. 교통성 수두증 환자에서는 지주막하 공간에서 압력의 흡수력이 현저히 감소해 있는 상태, 즉 뇌의 compliance가 감소해 있는 상태 또는 뇌의 elastance가 증가해 있는 상태이기 때문에 심장 수축기의 압력이 대뇌에서 보다 직접적으로 뇌실 쪽으로 전달되어 측뇌실을 압박하고 그 압력이 제3뇌실을 거쳐 aqueduct를 통한 뇌척수액의 흐름을 증가시킨다[6]. 이런 흐름은 교통성 수두증 환자에서 뇌척수액의 과순환(hyperdynamic flow)으로 나타난다. 반대로 이러한 hyperdynamic flow를 나타내는 환자는 뇌의 compliance는 감소해 있고 elastance는 증가해 있다는 것을 의미하므로 션트술의 좋은 적응증이 될 수 있다[5)6)].

이러한 이론적인 배경에도 불구하고 뇌의 compliance를 직접 측정하고 이를 임상에 직접 이용할 수 있는 방법은 없다. 실제 임상에서는 임상 증상, 방사선학적 소견, 뇌압 측정, 척추강 내로 생리 식염수를 주입하였을 때의 압력 변화(spinal infusion test), 동위 원소를 이용한 뇌조 조영술(radioisotope cisternogram) 등 여러 가지의 방법으로 교통성 수두증을 진단하여 션트술을 하는데 그 성공률은 50 90%로 만족스러운 결과는 아니다. 이러한 결과는 예시한 진단 방법이 뇌척수액의 순환이나 뇌의 compliance, elastance를 정확히 예측하지 못하였다는 것을 의미한다. Sherman 등[24)25)]이 처음 pulsatile하는 뇌척수액 순환 양상을 보고한 이래 Phasesensitive 기술을 이용하여 뇌척수액 순환을 분석하려는 많은 시도가 있었다[8)9)18)20)22)23)]. 최근 T2-weighted sagittal image나 proton-density-weighted MR image로 aqueduct of Sylvius에서의 signal void를 쉽게 관찰 할 수 있으며 signal void가 증가한 경우 션트술의 예후가 좋다는 보고가 있다[3)6)14)].

그러나 flow void는 자기 공영 영상 촬영 기술 특히 gradient strength에 의해 많이 좌우 되고 signal void의 증가 정도를 객관적으로 비교 하기가 쉽지 않은 문제가 있다. 본 연구에서는 뇌척수액 순환에 장애가 있는 환자들에서 뇌척수액 순환 양상을 수치화 함으로 정상인과 비교할 수 있었다. Nitz 등[19)]은 phase contrast velocity MR을 이용하여 뇌척수액 순환을 양적으로 측정하여 보고하였다. 그들은 보고에서 정상에서 aqueduct of Sylvius에서의 평균 유속은 2.15 cm/sec이며 최고 유속도 5.2cm/sec를 넘지 않다고 하였다. 위 저자들은 각각의 유속을 종단면에서 측정하거나 심장 박동 시기를 조정하는 방법, 자기 공명 영상 촬영 시의 slice thickness 등 측정 방법이 달랐지만 이들의 결과는 본 연구의 결과와 비슷하였다. 이러한 결과로 보아 정상인에서 aqueduct of Sylvius에서의 평균 유속은 5cm/sec를 넘지 않는다는 점과 교통성 수두증 환자의 경우 aqueduct of Sylvius에서의 최고 유속은 현저히 증가해 있다는 점을 확인 할 수 있었다. 1993년 Katayama 등[16)]도 12명의 정상인과 교통성 수두증이 있는 20명의 환자에서 phase contrast cine MR을 이용하여 제2 3경수 부위에서 뇌척수액의 유속을 측정하였는데 정상에서 평균 최고 유속은 4.66±0.13cm/sec이며 모든 경우에 9.0cm/sec를 넘지 않았다고 하고 교통성 수두증에서는 정상인에 비해 유속이 증가해 있는 것을 보고하였다.

특히 Katayama 등의 보고는 각 환자의 증상의 정도에 따라 유속에 차이가 있으며 이러한 유속의 차이는 션트술 후의 환자 예후를 짐작하는데 도움이 될 수 있을 것으로 보고하였다. 본 연구의 교통성 수두증 환자는 모든 예에서 요추강-복강간 션트술을 하고 임상 증상이 호전된 경우만으로 한정 하였기 때문에 비교적 일정한 결과를 얻을 수 있었던 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 precordal과 post-cordal 위치에서의 뇌척수액 순환 양상은 aqueduct of Sylvius에서 보다 to-and-fro movement를 보이는 경우가 적어 다른 저자들과 다른 양상을 보였는데 이는 측정 방법의 차이에서 오는 문제로 생각된다. 지적한 바와 같이 심장 운동에 의한 혈류량의 변화에 의해 뇌척수액의 흐름은 to-and-fro movement를 보이게 된다. 폐쇄성 수두증 환자에서 to-and-fro movement가 나타나지 않는 것은 당연한 것으로 생각되고 폐쇄성 수두증 환자를 제외한 대부분 정상인과 교통성 수두증 환자에서 이러한 뇌척수액 순환 양상을 보였다.

그러나 일부 정상에서도 to-and-fro movement의 소실을 보이고 있는데 이는 본 연구 결과를 일반화 시키는데 문제가 있음을 시사한다. 이런 문제의 원인은 측정 가능한 velocity encoding의 설정을 모든 환자에 일률적으로 적용 할 수 없다는 것이다. 본 연구에서는 측정 가능한 velocity encoding를 20cm/sec로 설정하였다. 이는 20cm/sec 이상의 유속이나 1cm/sec 이하의 유속은 정확히 표시 할 수 없다는 의미이다. 물론 정상이거나 과순환을 보이는 교통성 수두증 환자에서도 뇌척수액 유속이 20cm/sec 이하인 경우가 대부분이지만 일부 그 이상의 유속을 가진 경우, 특히 측정하고자 하는 부위가 좁은 경우 상대적으로 높은 유속을 가지기 때문에 측정된 값을 절대화 할 수 없는 문제가 있다. 본 연구와 기존의 연구 보고를 토대로 정상인 경우 velocity encoding을 5cm/sec, 교통성 수두증 환자에서는 20 30

cm/sec, 폐쇄성 수두증 환자에서는 2 3cm/sec로 설정한다면 더 정확한 수치를 얻을 수 있을 것이다. 또 다른 원인은 와류(eddy current)로 본 연구 결과가 뇌척수액은 상하로 움직인다는 가정하에 positive, negative로만 표시되기 때문에 다양한 방향으로의 뇌척수액 움직임에 대해 정확히 평가 할 수 없는 약점이 있다.

이러한 문제는 ROI를 적게 하면 상당 부분 해소되기는 하나 ROI를 적게 하면 전체 뇌척수액 유량을 측정하는데 문제가 있게 된다. 특히 본 연구에서 precordal과 post - cordal 위치에서 뇌척수액의 유량 측정을 위해 가능한 큰 ROI를 설정하였기 때문에 to - and - fro movement가 적게 나타난 것으로 생각된다. 또 하나의 문제는 각 개인간의 뇌실의 형태학적 차이인데 뇌척수액 흐름에 대한 저항은 이들의 직경과 4배로 반비례한다[5]. 일반적으로 교통성 수두증 환자에서 aqueduct와 모든 뇌실이 정상보다 약간 커져 있는 상태이다[4]. 그래서 같은 유량이라고 하여도 이들의 직경에 따라 뇌척수액의 유속은 큰 차이를 나타내기 때문에 본 연구의 결과를 단순 비교하는 것은 어려움이 있다.

본 연구에서는 ROI를 가능한 크게 하여 net flow rate를 측정하였는데 이는 한번의 심장 수축으로 유발되는 뇌척수액의 순환량이므로 각 개인마다 심장 박동수, 측정한 ROI의 크기 등이 다르고 뇌척수액의 생성량에 대한 분석이 없기 때문에 일률적인 상대적 평가는 어렵지만 전체적인 순환의 방향을 이해하는데 의미가 있을 것으로 생각된다. 특히 한 환자에서 수술 전후의 비교를 통해 수술의 효과, 추적 관찰에 도움이 될 수 있을 것으로 생각한다. 정상적으로 뇌척수액은 제3뇌실에서 제4뇌실로 순환한다. 본 연구 결과도 정상에서의 절대 유량(net flow rate/cycle)은 대부분의 경우 positive, 즉 뇌척수액이 제3뇌실에서 제4뇌실로 흐른다는 것을 확인 할 수 있었다.

그러나 교통성 수두증 환자에서는 negative 방향으로의 뇌척수액 순환이 많아 제4뇌실에서 제3뇌실로의 뇌척수액의 역류가 있다는 것을 수치적으로 확인 할 수 있었다. 이러한 교통성 수두증 환자에서 요추강 - 복강간 션트술 후 같은 방법으로 뇌척수액 순환을 관찰하였을 때 임상 증상의 호전과 함께 aqueduct of Sylvius에서의 유속은 현저히 감소하였으나 유량은 조금 감소하였다. 그러나 션트술 후 제4뇌실에서 제3뇌실로 역류하던 뇌척수액 순환의 방향이 역전 된 것과 와류로 인해 관찰하기 어려웠던 to - and - fro movement를 쉽게 관찰 할 수 있었다.

본 연구 결과는 뇌척수액 순환에 이상이 있을 것으로 생각되는 환자에서 뇌척수액 순환 장애의 정도를 수치적으로 보여 줌으로 치료 계획에 도움이 되었으며 수술 후 환자의 수술 효과의 판단에 도움이 되었다. 결론적으로 자기 공명 영상을 이용한 뇌척수액 순환 연구는 뇌척수액 순환의 가시적이고 양적인 측정으로 역동적인 역학을 이해하고 임상에서 쉽게 뇌척수액 순환 장애를 진단하는 유용한 방법으로 생각된다.

결 론

자기 공명 영상을 이용한 뇌척수액 순환 연구는 뇌척수액 순환의 가시적인 관찰로 역동적인 역학을 이해하고 임상에서 쉽게 뇌척수액 순환 장애를 진단하는 유용한 방법이다. 특히 교통성 수두증 환자에서 수술의 적응증 및 수술의 효과를 판단 할 수 있는 효과적이고 비침습적인 진단 방법으로 생각된다.

● 논문접수일 : 1998년 2월 12일
● 심사완료일 : 1998년 2월 20일
● 교신저자 : 김 동 석
120 - 752 서울 서대문구 신촌동 134 번지
연세대학교 의과대학 신경외과학교실
전화 : 02) 361 - 5620, 전송 : 02) 393 - 9979

References

1) Bering EA Jr : *Choroid plexus and arterial pulsations of cerebrospinal fluid : demonstration of the choroid plexus as a cerebrospinal fluid pump. Arch Neurol Psychiatr 73 : 165-173, 1955*
2) Bering EA Jr : *Circulation of the cerebrospinal fluid : demonstration of the choroid plexus as the generator of the force for flow of fluid and ventricular enlargement. J Neurosurg 19 : 405-413, 1962*
3) Bradley WG Jr, Kortman KE, Burgoyne B : *Flowing cerebrospinal fluid in normal and hydrocephalic states : appearance on MR images. Radiology 159 : 611-616, 1986*
4) Bradley WG, Quencer RM : *Hydrocephalus, atrophy, and CSF flow. In Stark DD, Bradley WG (eds). Magnetic resonance imaging. 2nd ed. St. Louis : Mosby-Year Book, 1991*
5) Bradley WG, Whittemore A, Jinkins JR, et al : *Cerebrospinal fluid flow patterns in hydrocephalus : correlation of clinical and phantom studies using MR imaging (abstr). Radiology 165 : 78-79, 1987*
6) Bradley WG Jr, Whittemore AR, Kortman KE, et al : *Marked cerebrospinal fluid void : indicator of successful shunt in patients with suspected normal-pressure hydrocephalus. Radiology 178 : 459-466, 1991*
7) Du Boulay GR : *Pulsatile movements in the CSF pathways. Br j Radiol 39 : 255-262, 1966*
8) Edelman RR, Wedeen Vj, Davis KR, et al : *Multiphasic MR imaging : a new method for direct imaging of pulsatile CSF*

flow. Radiology 161 : 779-783, 1986

9) Enzmann DR, Pelc NJ : *Normal flow Patterns of intracranial and spinal cerebrospinal fluid defined with phase-contrast cine MR imaging. Radiology 178 : 467474, 1991*
10) Feinberg DA, Mark AS : *Human brain motion and cerebrospinal fluid circulation demonstrated with MR velocity imaging. Radiology 163 : 793-799, 1987*
11) Greitz D, Wirestam R, Franck A, et al : *Pulsatile brain movement and associated hydrodynamics studied by magnetic resonance phase imaging. The Monro-Kellie doctrine revisited. Neuroradiology 34 : 370-380, 1992*
12) Grover T, Singer JR : *NMR spin echo flow measurements. J Appl Phys 42 : 938-940, 1971*
13) Hahn EL : *Detection of sea-water motion by nuclear precession. J Geophys Res 65 : 776-777, 1960*
14) Harris GJ, Rhew EH, Noga T, et al : *User-friendly method for rapid brain and CSF volume calculation using trans-axial MR images. Psychiatry-Res 40 : 61-68, 1991*
15) Hoffmann O : *Integration of pulsatory components and autoregulation into a mathematical model. In Ishii S, Nagai H, Brock M(eds) CSF dynamics. Vol 5 Intracranial pressure. Berlin : Springer, 1983 ; 169-173*
16) Katayama S, Asari S, Ohmoto T : *Quantitative measurement of normal and hydrocephalic CSF flow using phase contrast cine MR imaging. Acta Med Okayama 47 : 157-168, 1993*
17) Martin AJ, Drake JM, Lemaire C, et al : *Cerebrospinal fluid shunts : flow measurements with MR imaging. Radiology 173 : 243-247, 1989*
18) Maschalchi M, Ciraolo L, Tanfani G, et al : *Cardiac-gated phase MR imaging of aqueductal CSF flow. J Comput Assist Tomogr 12 : 923-926, 1988*
19) Nitz WR, Bradley WG, Watanabe AS, et al : *Flow dynamics of cerebrospinal fluid : Assessment with phase-contrast velocity MR imaging performed with retrospective cardiac gating. Radiology 183 : 395-405, 1992*
20) Njemanze PC, Beck OJ : *MR-gated intracranial CSF dynamics : evaluation of CSF pulsatile flow. AJNR 10 : 77-80, 1989*
21) O'Conn'el JEA : *Vascular factor in intracranial pressure and maintenance of cerebrospinal fluid circulation. Brain 66 : 204-228, 1943*
22) Quencer RM, Post MJD, Hinks RS : *Cine MR in the evaluation of normal and abnormal CSF flow : intracranial and intraspinal studies. Neuroradiology 32 : 371-391, 1990*
23) Ridgway JP, Turnbull LW, Smith MA : *Demonstration of pulsatile cerebrospinalfluid flow using magnetic resonance phase imaging. Br J Radiol 60 : 423-427, 1987*
24) Sherman JL, Citrin CM, Bowen Bj, et al : *MR demonstration of altered cerebrospinal fluid flow by obstructive lesions. AJNR 7 : 879-894, 1986*
25) Sherman JL, Citrin CM, Cangarosa RE, et al : *The MR appearance of CSF flow in patients with ventriculomegaly. AJR 148 : 193-199, 1987*