



박 재 한

대구가톨릭대학교 의과대학 신경과학교실

Smooth Pursuit and Visual Fixation

Jae Han Park

Department of Neurology, Catholic University of Daegu School of Medicine, Daegu, Korea

Clear vision requires that images of our environment be held fairly still on the retina. If we detect an object of interest, we will make a saccade to point our central retina (fovea) at it and fix our attention and gaze on it. During such visual fixation, small eye movements occur, and an ocular following reflex counteracts drift of the fovea away from the target. If the object begins to move, we may choose to smoothly pursue it with our eyes. Such smooth-pursuit eye movements allow clear vision of the object as it moves within the visual environment. In this review article, we focus the smooth-pursuit eye movement and summarize functional properties, neural substrate underlying these movements, clinical and laboratory evaluation and major disturbances of smooth-pursuit movement.

Key Words: Smooth pursuit, Visual fixation

서론

영장류의 시각체계는 양안시야와 망막의 중심오목(fovea)이 가지고 있는 고해상도가 특징이며, 이는 보고자 하는 물체의 상(objects)을 세밀하게 분석하는데 도움을 준다. 따라서, 상을 중심오목에 정확히 위치시키기 위해 신속보기(saccades)와 원활추종운동(smooth pursuit) 같은 안구운동이 일어나게 되는데 신속보기는 빠른 속도의 안구 이동을 통해 보고자 하는 상을 중심오목으로 위치시키고 시고정(visual fixation)을 통해 위치한 상이 중심오목에서 벗어나지 않게 하는데, 시고정은 안구의 움직임이 없어지는 개념이라기 보다는 세밀한 조정작용에 가깝다고 할 수 있다. 또한 상은 대부분의 경우에 고정되어 있지 않고 움직임을 보이기 때문에 중심오목에서 벗어나는 상을 다시 제자리로 위치시키기 위해 원활추종운동이 나타나서 상이 중심오목에서 움

직이더라도 그 상을 자세히 볼 수 있도록 도와준다. 신속보기와 원활추종운동 외에도 머리를 움직일 때 상이 중심오목에서 벗어나는 것을 방지하기 위해 전정안구반사(vestibular-ocular reflex)가 작용한다. 이러한 안구운동들은 중심오목에 보고자 하는 상을 위치시켜 정확히 상을 인지하고 분석할 수 있게 한다는 점에서는 동일한 목적을 가지지만 발생계통학적으로 또한 기능적인 부분에서는 차이를 보이며, 어느 부분에서는 상호보완적인 작용을 하기도 하고 신경통로를 공유하기도 한다. 본문에서는 원활추종운동의 기능적인 특징들, 대뇌피질에서 소뇌에 이르기까지 원활추종운동과 관련된 신경 경로, 그리고 임상적인 소견에 대해 살펴보고자 한다.

원활추종운동의 기능적 특징

원활추종운동은 중심오목에 물체의 상을 유지하기 위해 이상적인 경로에 대한 정보를 안구운동으로 변화시키는 일종의 자동폐쇄회로(closed loop)라고 할 수 있다. 중심오목에서 상의 속도, 상의 가속(acceleration) 및 위치의 변화에 의해 상을 정확히 인지할 수 없게 되면 원활추종운동이 작동

Jae Han Park, MD

Department of Neurology, Catholic University of Daegu, School of Medicine, Daegu Catholic University Hospital, 33 Duryugongwon-ro 17-gil, Nam-gu, Daegu 705-718, Korea

Tel : 82-53-650-3626 Fax : 82-53-654-9786

E-mail: jaehanpark@cu.ac.kr

하게 된다. 중심오목에서 초당 3-5도(3-5 degree/second) 이상의 속도로 상이 이동하여 상의 정확도가 떨어지게 되면 약 100ms의 잠복기 후에 원활추종운동이 시작된다. 이러한 원활추종운동은 초기의 유도기(pursuit initiation)를 거쳐 100-300ms 후에 물체의 속도와 안구의 속도가 대략 일치하게 되고 안구의 가속이 끝나면 원활추종운동의 속도는 물체의 속도에 맞춰 일정하게 유지되는데, 이 시기는 유지기(pursuit maintenance)라 한다. 원활추종운동의 유도는 망막에서의 상의 움직임에 의해 발생하지만 원활추종운동의 유지는 명령복사(efference copy)와 같은 망막 외의 정보(extraretinal signal)에 의해 조절되는 것으로 생각된다.

원활추종운동의 신경경로

원활추종운동의 신경경로는 발생계통학적으로 뇌간의 피개 tegmentum)에 있는 신속보기의 핵심중추를 우회하는 대뇌-교뇌-소뇌경로(cerebro-ponto-cerebellar pathway)와 밀접한 관련이 있다. 상이 망막에서 벗어나는 움직임이 감지되면 외측무릎체(lateral geniculate body, LGB)를 통하여 시각 피질(striate cortex, V1)로 신호가 전달되고, 중간측두엽(middle temporal, MT)과 안쪽위측두엽(medial superior temporal, MST)에서 움직임에 대한 신호를 분석하여 전두엽 눈영역(frontal eye field, FEF)과 보조눈영역(supplementary eye field, SEF)이 있는 전두엽으로 정보를 전달한다. 이러한 시각정보는 두 개의 경로를 통하여 원활추종운동을 발생시키는 데 첫 번째 경로는 FEF와 SEF에서 뇌간의 교뇌피개그물핵(nucleus reticularis tegmenti pontis, NRTP)을 거쳐 소뇌의 등쪽충부와 꼭지핵(fastigial nucleus)으로 내려가는 경로로 원활추종운동의 시작에 중요한 역할을 한다. 두 번째 경로는 MT/MST에서 뇌간의 등가쪽교뇌핵(dorsolateral pontine nucleus, DLPN), 소뇌의 결타래(parafoveolus)를 거쳐 다시 허밀신경앞핵(nucleus prepositus hypoglossi, NPH), 전정신경핵(vestibular nucleus)을 통하는 경로로 원활추종운동의 유지에 중요한 역할을 한다. 이 두 개의 경로 외에도 부시각경로(accessory optic pathway)가 있는데, 망막과 MT/MST로부터 상의 움직임에 대한 신호를 받는 중뇌에 위치한 부시각계(accessory optic system, AOS)의 종말핵(terminal nucleus)과 시신경로의 핵(nucleus of optic tract, NOT)을 포함하며 연수의 하부올리브핵(inferior olivary nu-

cleus)을 통하여 소뇌로 연결되어 원활추종운동의 적응(adaptation)에 있어 중요한 역할을 하며 DLPN, NPH, 내측 전정신경핵(medial vestibular nucleus, MVN)을 통하여 원활추종운동과 눈운동반응(optokinetic response)에 도움을 준다. NOT는 또한 전무릎핵(pregeniculate nucleus)과 상호연결을 하고 있으며 꼭지핵에서 연결되는 원심경로(efferent pathway)는 아직은 명확하지 않다(Fig. 1). 또한 원활추종운동을 발생시키는 두 개의 신경경로는 내려오면서 두 번의 교차(double-decussation)가 일어나게 되는데 한번은 뇌간의 NRTP와 DLPN에서 교차되며 그 다음은 소뇌의 꼭지핵과 전정신경핵에서 눈운동신경세포(ocular motoneurons)로 들어갈 때 교차가 일어난다. 따라서 내뇌반구로 병변이 있을 때 동측의 원활추종운동장애가 나타날 수 있다(Fig. 2).

원활추종운동의 검사

원활추종운동을 검사할 때는 고개를 바로 세운 상태에서 1 m 이상의 거리에서 상하좌우로 움직이는 작은 표적을 따라 보게 한다. 처음에는 낮은 속도로 일정하게 움직이면서 따라 잡기 단속운동(catch-up saccades)과 물러서기 단속운동(back-up saccades) 등이 발생하는 지를 관찰한다. 원활추종운동은 피검자의 시각적 집중능력에 영향을 받게 되고, 복용하는 약물에도 영향을 받는다. 또한 정상적인 원활추종운동

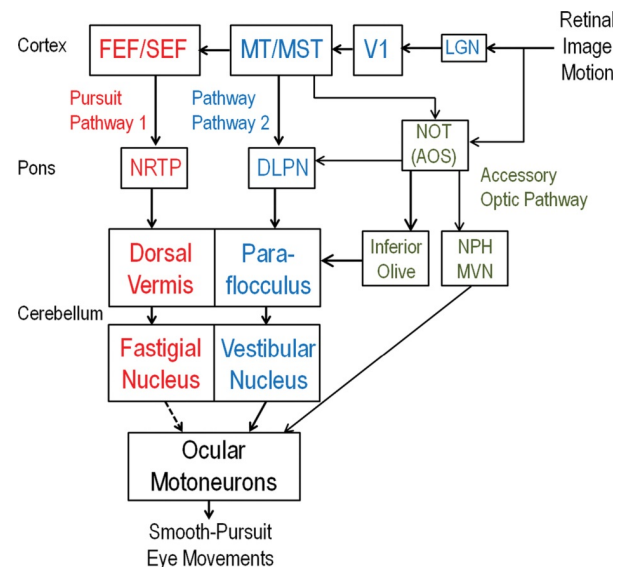


Figure 1. A schematic summary of descending smooth pursuit pathway

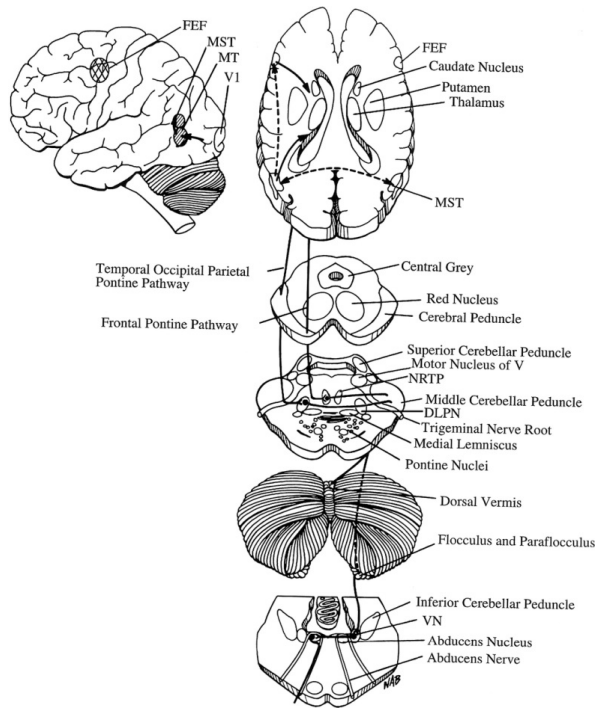


Figure 2. A hypothetical scheme for horizontal smooth pursuit.

은 나이에 따라 차이를 보이는데, 유아에서는 원활추종운동이 잘 형성되어 있지 않고, 소아에서는 다양하게 나타날 수 있으며 고령에서는 연령이 증가할수록 기능이 감소하게 된다. 정상에서도 비대칭을 보일 수 있는데, 특히 수직방향에서 뚜렷해 아래로 향하는 원활추종운동의 이상이 좀 더 흔하다. 원활추종운동을 검사할 때 자극은 검사의 목적, 즉 측정하고자 하는 지표에 따라 다양하게 줄 수 있다. 원활추종운동의 유도를 평가하기 위해서는 일정한 속도(ramp)로 움직이는 표적을 보게 하거나 순간적인 표적 이동 후에 일정한 속도(step-ramp)로 움직이게 하는 방식의 표적을 제시하는 것이 유용하다. 반면 원활추종운동의 유지기의 기능을 평가하기 위해서는 일정한 속도로 움직이는 표적을 보게 하거나, 부드럽게 왕복하는 표적(sinusoid)을 따라 보게 하여 평가한다.

1. 시계추운동 자극(Sinusoidal target stimuli)

일정한 속도의 표적이나 시계추운동 표적 자극과 같이 예측이 가능한 자극을 이용하여 원활추종운동의 유지기를 검사할 수 있다. 이 때 사용하는 지표로는 이득(gain), 위상(phase), 그리고 대칭성(symmetry)이 있다.

Table 1. Gain abnormality of smooth pursuit

Decreased gain	Advanced age
	Parkinson's disease, progressive supranuclear palsy
	Cerebellar or brainstem disorders
	Cerebral cortical disturbance
	Drug ingestion
	Inattention
Increased gain	Visual disorder
	Congenital nystagmus
	Cerebellar disorders
	Pursuit adaptation

(1) 이득

이득은 표적의 이동속도에 대한 안구의 속도 비를 말하는데 표적의 크기, 밝기, 가속, 이동 속도 및 궤적 등에 영향을 받는다. 일반적으로 물체의 속도가 100°/s에 도달할 때까지는 이득이 잘 유지되지만 이를 넘어서면 이득이 급격하게 감소한다. 이득의 이상을 보일 수 있는 경우는 다음과 같다 (Table 1).

(2) 대칭성

수평 방향의 원활추종운동은 대칭적이나, 수직 운동에서는 아래쪽을 향하는 원활추종운동의 이득이 위를 향할 때보다 작은 것이 일반적이다. 한쪽으로의 마비(unidirectional pursuit paresis)는 후두-두정엽(occipito-parietal lobe) 접합부의 일측성 병변에서 병변을 향하는 방향으로 발생한다 (Table 2). 이 부위는 원숭이의 MT/MST에 해당되며 물체 운동의 인식에 관여한다. 이 부위의 병변은 보통 반대편 반맹과 동반되나, 원활추종운동장애는 시야장애와 상관없이 발생되며, 가쪽무릎체 이전의 병변이나 시피질에 국한된 병변에 의한 반맹에서는 발생되지 않는다. 병변 반대쪽의 마비는 경미하며, 주로 열성반구의 급성병변에서 관찰된다. FEF는 MT/MST로부터 정보를 받으며, FEF 및 SEF의 일측성 병변도 병변쪽으로 원활추종운동마비를 일으킨다. 대뇌에서 DLPN으로 향하는 경로가 손상을 입어도 병변쪽으로 마비가 생길 수 있으며, 뒤쪽시상(posterior thalamus), 속섬유막 후각(posterior limb of internal capsule), 덮개앞(pretecum) 영역 및 중뇌 피개(tegmentum) 부위에서도 발생될 수 있다. 모든 방향으로의 마비(omnidirectional pursuit paresis)는 대뇌, 소뇌 또는 뇌간의 미만성 병변이나 다양한 약제, 피로, 노화에 의해서 발생될 수 있으며 다음과 같이 요약할 수 있다 (Table 2).

Table 2. Impairment of smooth pursuit

Ipsilateral impairment	Parieto-temporo-occipital lobe (MT/MST)
	Frontal eye field
	Internal capsule
	Midbrain tegmentum
	Basis pontis
Contralateral impairment	Cerebella-flocculus
	Caudal pontine tegmentum
	Lateral medullary syndrome
Omnidirectional impairment	Fastigial nucleus
	Degenerative: AIDS, alzheimer dementia, parkinson disease, progressive supranuclear palsy, spinocerebellar ataxia, schizophrenia
	Drugs: ethanol, barbiturate, benzodiazepine, carbamazepine, chloral hydrate, methadone, phenytoin,
	Others: senescence, inattention

(3) 위상

자극과 안구의 시간적 일치성을 측정하는 것으로 이상적인 원활추종운동에서는 뒤처지지 않고 거의 일치하게 된다. 그러나 자극의 가속도가 증가할수록 뒤처짐(phase lag)이 자주 관찰된다.

2. 순간적인 표적 이동 후에 일정한 속도로 움직이는 자극 (step-ramp stimuli)

원활추종운동의 개시(onset of pursuit)는 step-ramp 또는 ramp 자극을 주어 안구의 위치, 속도, 그리고 가속도를 측정하여 평가한다. 평가지표는 잠복기(onset latency), 초기가속도(initial acceleration), 그리고 방향성의 이상(directional deficit) 등이 있다.

(1) 잠복기

원활추종운동 자극의 시작 시간과 안구운동의 시작 시간의 차이로, ramp 자극에서는 100 ms 정도의 잠복기가 있다. 그러나 ramp에 앞서 반대방향으로의 순간적으로 표적이 이동(step)하는 step-ramp 자극에서는 잠복기가 150 ms까지 길어진다.

(2) 초기가속

원활추종운동 시작 후 초기 40 ms 동안 일어나는데, 이는 자극의 속도, 밝기, 그리고 시야에서의 위치에 영향을 받지

않는다. 초기가속도의 범위는 40 °/s부터 100 °/s까지로, 개인에 따라 다양하게 나타난다. 수평방향의 원활추종운동에서 보다 수직방향에서 초기가속도가 크다. 수평방향에서는 표적이 중앙을 향해 움직일 때 초기가속도가 증가 되고, 수직방향에서는 아래 시야에서 자극 시에 증가된다.

시고정(visual fixation)

정지해 있는 물체를 정확하게 보기 위해서는 물체의 상이 중심오목에 잘 머물러 있어야 한다. 즉, 선명한 시력을 얻기 위해서는 물체의 움직임이 5 °/s보다 적어야 하고, 중심오목의 중앙 0.5° 이내에 상이 위치 해야 한다. 상이 완벽하게 중심오목에 머물게 되면 시력은 점차 흐려지게 되는 현상이 발생하는데, 이는 다른 감각계와 마찬가지로 지속적인 자극에 대한 시각계의 습관화 때문이다. 실제 일상생활 동안 머리의 움직임에 의해 시고정이 방해받게 되는데, bite-bar를 이용해 머리를 고정된 상태에서도 불수의적 안구운동이 나타나 주시 불안정을 일으킨다. 이들 불수의적인 안구운동에는 고주파수-낮은 진폭의 눈떨림(high-frequency low-amplitude tremor), 작은크기의 신속보기(small saccade), 그리고 느린 벗어남(slow drift)이 있다. 이러한 불수의적인 움직임도 실을 바늘에 꿰매는 것처럼 지속적인 시고정이 필요한 상황에서는 억제된다. 원숭이를 이용한 다양한 실험들에서 시고정과 원활추종운동이 다르다는 것을 보여준다. 두정엽의 특정 세포는 원활추종운동 동안에는 반응이 없지만, 시고정 동안에는 흥분하는 것을 보여 두정엽이 시고정에 있어 중요한 부위를 시사한다. 원활추종운동 경로를 자극하게 되면, 원활추종운동의 속도 변화 등을 초래하지만, 시고정 상태에서 원활추종운동을 일으키지는 않는다. 이는 시고정 상태에서 원활추종운동과 단속운동이 억제되는 기전이 있음을 보여준다. FEF와 위둔덕(superior colliculus)의 위쪽에 미세 자극을 가하면 시자극에 의해 유발되는 단속운동의 시작이 억제되거나 늦어지게 된다. 특히 위둔덕의 위쪽은 시고정에 있어 중요한 곳으로 이 부위를 자극하면 동측으로의 원활추종운동이 억제되고, 이 부위를 약물로 비활성화시키게 되면 동측으로의 원활추종운동이 강해지게 된다.

References

1. Leigh RJ, Zee DS. The neurology of eye movement. 5th ed.

- New York : *Oxford University Press* 2015, 836-915.
2. The Korean Society of Neuro-ophthalmology. Neuro-ophthalmology. 1st ed, Seoul: *Shinheung edscience* 2013, 148-159.
3. Their P, Ilq UJ. The neural basis of smooth-pursuit eye movements. *Curr Opin Neurobiol* 2005;15:645-652.
4. Kim SH. Smooth pursuit and visual fixation. *Clin Neuroophthalmol* 2011;1:22-28.
5. Choi KD, Choi JH, Kim JS. Ocular-motor test: saccades, smooth pursuit, optokinetic system. *Clin Neuroophthalmol* 2012;2:86-95.
6. Lee HS. Smooth pursuit and visual fixation. *Clin Neuroophthalmol* 2015;5:8-14.
7. Krauzlis RJ. The control of voluntary eye movements: new perspectives. *Neuroscientist* 2005;11:124-137.
8. Krauzlis RJ. Recasting the smooth pursuit eye movement system. *J Neurophysiol* 2004;91:591-603.