

CCD 분광 관측에 의한 활동홍염의 도플러 시선속도분포 연구
STUDY OF DOPPLER VELOCITY DISTRIBUTION IN AN ACTIVE
PROMINENCE

박영득¹, 윤홍식², 문용재¹

¹천문대, 보현산천문대

²서울대학교 천문학과

PARK, YOUNG DEUK¹, YUN, HONG SIK², MOON, YONG-JAE¹

¹Bohyunsan Optical Astronomy Observatory, Korea Astronomy Observatory

²Department of Astronomy, Seoul National University

(Received November 14, 1998; Accepted December 8, 1998)

ABSTRACT

To study kinematics of solar prominences, we have made *Ha* spectrographic study of an eruptive prominence which appeared on the 27th of August, 1992 with a position angle of 270 deg. The observation was carried out by a Littrow type spectrograph and a G1 CCD camera attached to the 25 cm coronagraph at Norikura Coronal Station. In taking the spectral data the slit was placed in parallel to the solar limb at 7 different heights, each being separated by 5 arcsec with a time step of 30 sec. The observed eruptive prominence shows a wide range of line of sight Doppler velocity, spanning from $V_{dopp} = -17.5 \text{ km/s}$ to $V_{dopp} = 58.2 \text{ km/s}$. It is also found that the velocity increases with height at the rate of $\Delta V = 0.86 \text{ km/s/arcsec}$.

1. 서론

홍염의 동역학적 연구는 홍염이 코로나에서 오래 동안 자신의 형태를 유지할 수 있는 원인과 강한 자기장에서 물질의 운동형태를 이해하는데 중요한 기초가 된다. 홍염의 운동 성분을 관측하고 이것을 분석하는 방법은 분광 관측을 통하여 분광선의 도플러 편이를 측정하는 것이 가장 보편적인 방법이다. 태양 홍염 내의 동역학적 특성에 관한 연구는 *Ha*나 UV선을 포함한 다양한 분광선을 이용하여 많은 사람들에 의해서 이루어졌다(Mein 1977; Malherbe 1986; Simon et al. 1986; Kubota et al. 1988, 1989; Mashnich and Bashkirtsev 1990). 이들은 필라멘트 구조의 상승이나 진동을 연구하고자 주로 광구 중앙에서 고분산 분광관측을 수행하여, 도플러 시선 속도를 측정하였으나, 최근에 이르러서는 가장자리에서 발생하는 홍염에 대한 도플러 시선 속도에

대한 분석과 연구가 다양하게 이루어지면서 (Engvold et al. 1978; Fontenla 1979; Kawaguchi et al. 1986; Mashnich and Bashkirtsev 1990; Yi and Engvold 1991; Molowny H. R. et al. 1997, 1998) 3차원적인 홍염의 운동학적 연구에 관심이 높아지고 있다. 그들은 홍염의 자기다발이나 미세구조의 운동 속도를 추정하였으며, 그 대부분의 연구는 정온홍염에 집중되었다. 가장 최근에 SOHO 위성의 관측 자료와 지상관측 자료를 종합하여 얻어진 연구 중의 하나로 Kejun et al.(1998)의 것을 들 수 있는데, 이들에 의하면 정온홍염에서 자기다발 내의 운동 속도는 흔히 2.5~4.0 km 로 분포하지만, Ha선의 비대칭 선윤곽을 보이는 영역에서는 -20~9.3 km 까지 폭 넓은 도플러 속도 분포를 보이고 있음을 밝힌 바 있다.

이와 같은 관측 사실들이 알려지고 있지만, 아직도 홍염을 구성하는 자기다발의 동역학적 기구에 대한 이론적 설명은 매우 불확실한 상태이다. 그 대표적인 예로 최근 정온홍염의 역학적 성질에 대한 보고에서 Engvold (1998)는 수직으로 끈게 서있는 정온홍염의 자기 다발에 관한 문제점을 제시하면서, 홍염 내의 운동학적 특성을 기술 할 수 있는 어떤 뚜렷한 이론도 없다고 조심스럽게 말하고 있다.

태양 관측은 그의 풍부한 광량 때문에 CCD 관측의 중요성이 크게 부각되지 않았다. 그러나 1980년대 후반부터 CCD가 태양 관측에도 도입되면서부터 사진 관측에서 문제되었던 짧은 시간 간격을 둔 관측이 가능하게 되었고, 또한 가시 영역 이외의 근적외선이나 근자외선 관측에서도 이러한 관측이 매우 편리하게 활용될 수 있었다. 그러나 홍염의 CCD 분광 관측이나 분광 관측 자료분석에 의한 결과가 그다지 많이 보고되어 있지 않은 것을 미루어 볼 때, CCD 관측에 의한 홍염의 연구는 현재 초보 단계에 있다고 볼 수 있다.

II. 관측과 자료의 분석

1. 활동성 홍염의 CCD 분광 관측

태양의 위치각 270도 부근에 발생한 분출형 홍염에 대한 Ha선의 CCD 분광 관측은 1992년 8월 27일 16시 4분부터 16시 15분까지(UT 8월 27일 07:04:26 - 07:07:15) 수행되었다. 이 홍염은 밝기가 약해서 모니터에서조차 보기가 어려울 정도로 희미하게 보였으며, 홍염이 발생하고 약 1시간 후에는 사라져버린 분출형 활동홍염이었다. 관측 방법은 1992년 8월 16일에 발생한 정온홍염의 분광 관측(Park et al. 1998)과 동일한 방법으로 광구의 가장자리 부분을 기준 단계(base level)로 택하고 그로부터 수직 방향으로 5" 씩 슬릿의 위치를 이동하면서 30" 까지 모두 7단계에 걸쳐 Ha선 분광관측을 수행하였다. 분광 분산차수는 2차를 택하였으며, 이때 분광 분해능은 0.023Å/pixel 이며 공간 분해능은 0.6 arcsec/pixel 이었다. 그림 1은 각 단계에서 얻은 홍염의 Ha 분광 스펙트럼으로, 플레어의 초기 단계인 분출형 홍염의 형태를 보여주고 있다. 이날 관측한 관측인자는 표 1에 수록되어 있다.

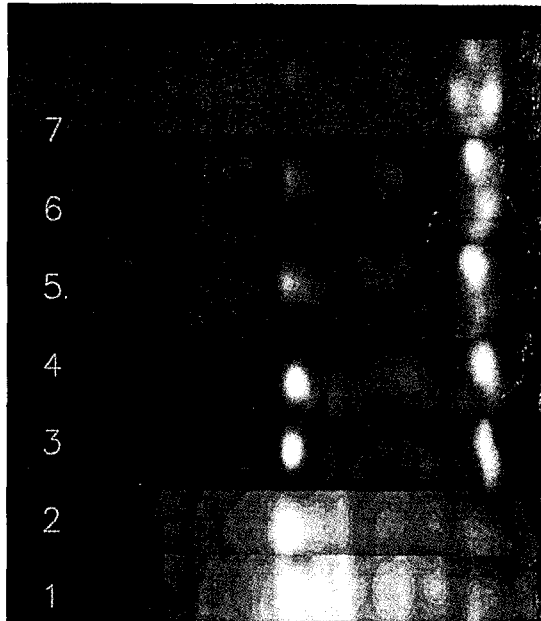


그림 1. 1992년 8월 27일에 발생한 활동홍염의 $H\alpha$ 선 스펙트럼. 모두 6단계 7회 관측하였으며 각 단계의 높이차이는 5 arcsec이다.

표 1. 1992년 8월 27에 관측한 분출형 활동홍염의 CCD 관측 인자

Spectral line : $H\alpha(6562.82\text{\AA})$					
Obs. Level	Time	ND filter	Exp. time	Obs Position	S/N
Disk center	15:56:27	0.3%	1초	광구중심	
1	16:04:26	20%	1초	0	284.5
2	16:05:02	20%	1초	5	238.4
3	16:05:33	20%	1초	10	291.0
4	16:05:54	20%	1초	15	223.1
5	16:06:18	20%	1초	20	162.9
6	16:06:52	20%	1초	25	73.2
7	16:07:15	20%	1초	30	22.3

2. 관측 자료의 보정과 산란광의 처리

기본적으로 CCD로 관측한 분광자료의 보정은 관측과 자료의 특성에 따라 다소의 차이가 있겠지만, 우선 암상과 플랫폼의 기본 보정이 수행되어야 할 것이다. 일반적으로 암상과 플랫폼의 기본 보정은 식 1과 같이 주어진다.

$$I_{ij} = \frac{S_{ij} - D_{ij}}{(F_{ij} / \langle F_{ij} \rangle) - D_{ij}} \cdot factor \quad (1)$$

식 (1)에서 I_{ij} 는 보정 된 강도값이고 S_{ij} 는 관측된 신호 강도, D_{ij} 는 암잡음이며 F_{ij} 는 플랫폼의 강도값이다. 식 (1)에서 factor는 관측에 사용된 ND필터의 투과율의 역수에 비례하는 상수이다. 본 연구에서는 태양 분광 관측시 수행되는 기본 보정 이외에 분광선에 영향을 미치는 산란광과 방출 분광선 날개가 시작되는 부근의 잉여 산란광 보정이 추가로 수행되었다.

관측시스템과 사용한 필터 등에 대한 관측 오차 보정은 본 연구에서 사용하는 강도를 상대 강도로 환산하는 과정에서 상쇄되므로 고려하지 않았다. 한편, CCD 화소의 암전하 발생 율은 파장에 무관하다고 가정하였으며, 그 대신에 선중심 강도의 신호 잡음비(S/N)가 100미만인 선윤곽은 최종 자료 분석에서 제외시켰다.

각 CCD 화상 중 분석에 활용한 선윤곽들의 신호 잡음비의 평균값은 표 1에 제시하였으며 관측 과정에서 암수준은 노출시간에 무관하게 평균 화소값이 200 ADU(Analog to Digital Unit)이고 이때 표준편차는 2.8 ± 0.1 ADU이었다. 태양의 분광 관측에서 가장 문제가 되는 것은 광구로부터 나오는 산란광의 영향이다. 이 잉여산란광은 관측하고자 하는 파장대와 슬릿 폭, 노출시간에 따라 직접적인 영향을 준다. 일반적으로 별의 CCD상을 관측할 때에는 암상과 플랫폼에 대한 보정을 수행한 후, 하늘 밝기의 보정을 해줌으로써 잉여산란광(stray light)에 대한 보정을 보상할 수 있다. 그러나 태양의 경우에는 잉여산란광에 대한 처리는 단순히 하늘 밝기로 처리할 수는 없다. 그것은 태양 분광 관측의 경우에도 주변산란광이 상당히 강해서 CCD화소가 기본적으로 갖는 전하량이 상대적으로 크게 높아지기 때문이다. 특히 강한 분광선의 경우에는 산란광에 의한 기본 전하량이 분광선에 미치는 영향을 무시할 수 없으므로, 이에 대한 보정은 반드시 수행되어야 한다. 특히 광구상의 활동 영역을 관측할 때, 고분산 분광 관측의 경우에는 이러한 산란광의 문제가 매우 심각하므로 각 파장 별로 산란광이 각 분광선의 강도 분포에 미치는 영향을 따로 계산해 주어야 한다.

본 연구의 관측 대상이 다행히 가장자리의 홍염이었고, 코로나그래프의 차단판(occulting disk)을 이용하여 광구를 차단하였으므로 광구의 필라멘트나 흑점 관측만큼 산란광의 문제가 심각하지는 않지만 암상과 플랫폼만 보정한 선윤곽을 살펴보면 산란광의 효과가 명백하게 나타난다. 이것은 비록 코로나그래프가 광구면을 차단하더라도 광구로부터 오는 강한 산란광을 완전히 제거할 수는 없기 때문이다. 특히 광구면에 가까운 영역에서 관측된 분광상에는 이러한 산란광 때문에 태양 대기의 흡수선이 함께 나타나기도 한다. 따라서 이러한 산란광은 방출선의 세기를 약화시키는 현상을 초래한다. 즉, 선 강도가 약한 방출선에서는 주변의 강한 흡수선 때문에 상대적으로 선 강도가 약화되는 효과가 많이 나타난다. 다행히 우리가 분석한 CCD 자료에서는 이러한 현상을 찾을 수 없었다.

이와 같은 산란광의 보정을 위하여 우리는 두 번의 과정을 거쳤다. 먼저 분광상에서 관측의 위치가 홍염이 아닌 영역의 스펙트럼 즉, 잉여산란광을 취하여 이 값을 전체 분광상에서 빼 준다. 이때 잉여산란

광은 분광상에서 방출선이 전혀 나타나지 않는 영역의 일부를 취하게 되는데 어느 정도의 잉여산란광에 대한 보정이 이루어지기는 하지만 완전한 보정이 아니다. 그 이유는 태양의 광구는 곡면이고 분광슬릿은 직선이어서 산란광 보정치가 슬릿의 위치에 따라 다름에도 불구하고 분광슬릿의 한 지점에서 얻어지는 잉여산란광 값을 모든 지점에 대하여 일률적으로 적용하고 있기 때문이다. 따라서 CCD화상의 가장자리 부분과 중간부분 즉 직선거리로 광구에서 가장 멀리 떨어진 부분과 광구에서 가장 가까운 지점의 산란광 차이는 보정 되지 않은 상태로 남아 있게 된다. 실제로는 잉여산란광 값으로 슬릿의 가장자리에서 얻어지는 산란광을 취하기 때문에 광구에서 가장 멀리 떨어진 지점의 잉여산란광 값을 취하는 것과 같은 결과가 되고, 이 값은 슬릿의 전체가 갖는 잉여산란광의 최소값에 해당한다. 따라서, CCD 분광상의 중심 부근에서 얻어지는 선속도는 이러한 잉여산란광의 보정이 이루어지더라도 방출선의 연속선 기준이 0보다 높은 값을 갖게 된다. 그림 2는 광구 가까이에서 관측한 홍염의 $H\alpha$ 분광상에서 잉여산란광을 보정한 후에 슬릿이 놓인 방향에 따른 화소값의 분포를 나타낸 것이다. 여기서 우리는 슬릿의 중심부 즉 광구에 가장 가까운 부분의 강도값이 높게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 우리는 여분의 잉여산란광 량을

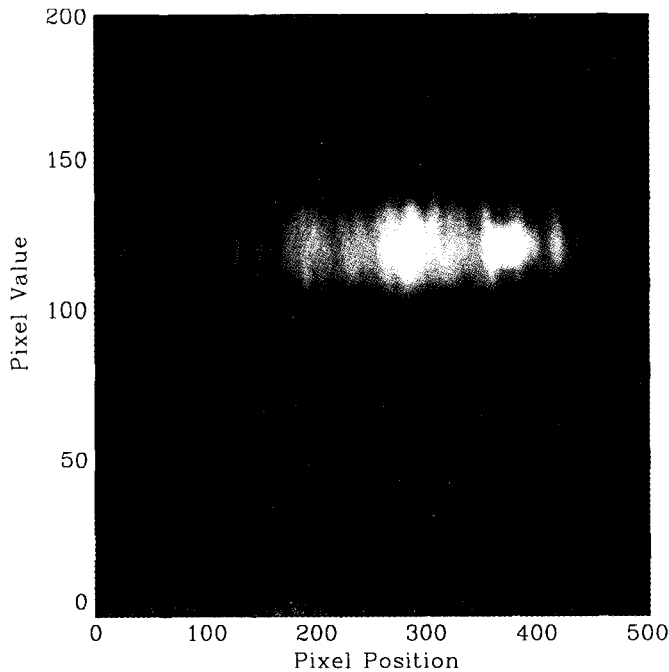


그림 2. 광구 가까이에서 관측한 홍염의 $H\alpha$ 분광 사진에 나타나는 잉여산란광의 분포. 점선으로 표시된 부분의 산란광 값을 아래의 실선으로 나타낸 것이다.

제거하기 위하여 모든 방출선 선윤펍의 날개(line wing)가 시작되는 부근의 평균 잉여산란광 값을 찾아서 이를 제거함으로써 자료를 처리하였다.

분광선이 강한 고분산 분광 관측에서는 선윤펍의 상대 강도 보정의 마지막 과정으로 선윤펍에서 나타나는 잡음(noise)의 처리가 있다. 전반적으로 고분산 분광 관측에서는 일부 강도 분포가 약한 선윤펍의 경우 잡음이 그대로 선윤펍에 반영되어 나타난다. 자료의 분석 과정에서 활용할 자료를 선택할 때에 신호 잡음비가 100 이상인 선윤펍들만 선택하였지만 신호잡음비가 200이상으로 높은 분광선이라 하더라도 선윤펍에서 잡음 그 자체가 없어지는 것은 아니므로 적절한 처리가 필요하다. 본 연구에서는 고려되는 한 점을 포함하여 양쪽으로 각각 2개씩, 모두 5개의 data point가 만드는 최소 자승법에 의한 spline 곡선 맞춤 방법을 사용하여 이 문제를 해결하였다.

3. 분광선의 동정

관측 자료로부터 임의의 물리량을 유도하기 위하여서는 무엇보다도 정확한 선윤펍 분포의 환산과 함께 분광선의 동정이 요구된다. 우리는 분광선의 동정을 위하여 관측 대상의 분광선과 동일한 분광 영역의 분광상을 태양 광구면 중심에서 관측하여 얻은 다음, 분광선 주변의 몇 개의 대기 분자선을 기준으로 관측 분광선 동정을 하였다. 그림 3은 광구 중앙부의 분광상으로부터 얻은 CaII K선을 AFGL(Air Force Geophysics Laboratory, Becker et al. 1976)이 제시하는 윤펍과 비교한 것으로 AFGL과 선의 위치가 일치하고 있음을 볼 수 있는데 이것은 본 연구에서 수행한 분광선 동정이 정확하다는 것을 의미한다.

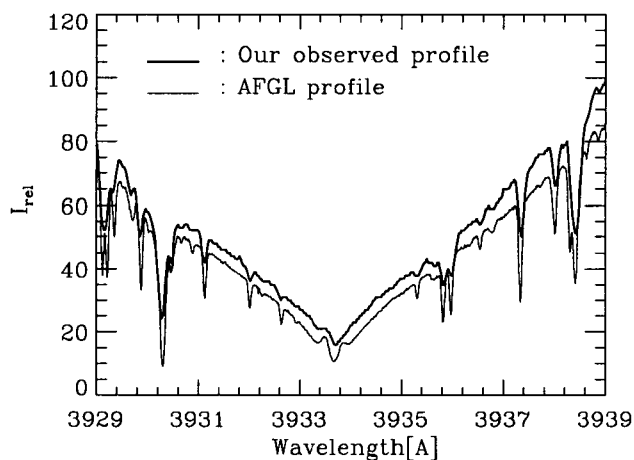


그림 3. 분광선의 동정을 위하여 광구 중앙에서 관측한 CaII K 선과 AFGL (Beckers et al, 1976) 의 CaII K선을 비교하였다.

한편, 그림 4는 앞에서 서술한 잉여 산란광 보정과 분광선 동정을 마치고 실제로 선 윤곽 분석을 수행할 준비가 완료된 $H\alpha$ 분광상의 윤곽을 나타낸 것이며, 우리는 각 단계에서 이와 같은 분광선을 약 150 개씩 분석하였다.

4. 선윤곽의 가우스 맞춤식

일반적으로 LTE 대기에서 만들어지는 분광선의 선윤곽 분포는 식 (2)와 같이 가우스 분포를 따른다.

$$G(x) = a_1 e^{\left(\frac{-x^2}{2}\right)} + a_4 \tag{2}$$

$$Z = \left(\frac{x - a_2}{a_3}\right)$$

식에서 각 상수항은 선윤곽이 완전히 가우스 분포와 일치할 경우에 a_1 은 선중심에서의 상대 강도값이며 a_2 는 선중심의 위치, a_3 는 선윤곽 반치폭과 관련이 있는 값들이다.

홍염에서 관측한 대부분의 분광선들도 가우스 분포와 일치하는 경향을 보인다. 그러나 태양 광구면 가까이에서 관측되는 $H\alpha$ 선과 같이 강도가 강한 분광선에서는 선중심에서 가우스 분포와 일치하지 않는 경우가 많이 나타나는데(그림 5) 이것은 홍염의 자체흡수(self-absorption)효과 때문이다. 자체흡수 효과는 홍염의 고분산 관측에서 나타나는 공간적 기본 단위인 미세관(threads)들로부터 나오는 복사가 시선

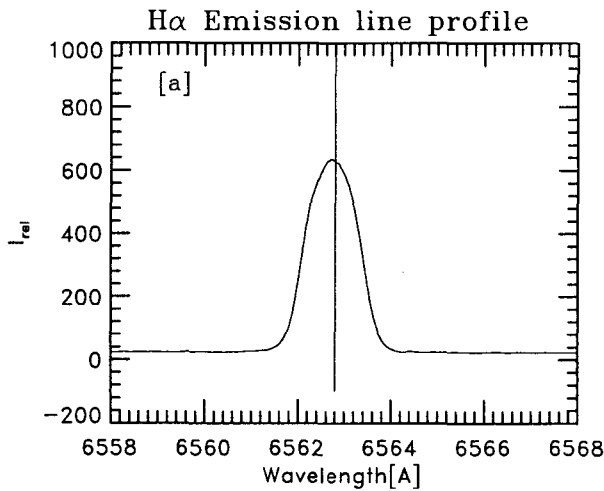


그림 4. 관측한 분광선의 산란광 보정을 마친 자료 분석용 $H\alpha$ 선윤곽

방향에서 일부 앞쪽에 있는 다른 미세관들에 의하여 흡수가 일어나는 현상으로 $H\alpha$ 선처럼 광학적 두께가 두껍고 강도가 강한 분광선에서는 이 효과가 상당히 크게 나타날 수 있다. 그러나 우리가 관측한 활동성 홍염은 광학적 두께가 얇고 $H\alpha$ 선 강도도 약한 경향을 보이고 있다. 그림 6은 관측한 분출형 홍염의 $H\alpha$ 선윤곽 중의 하나로서 선폭이 대단히 넓으면서 여러 개의 봉우리(peak)가 보인다. 그럼에도 불구하고 선중심 부근에 아무런 자체 흡수의 흔적을 찾을 수 없다. 선윤곽의 이런 모양은 시선 방향에 따른 홍염 전체의 도플러 속도 차이로 해석할 수 있다. 즉, 미세관들이 뭉쳐서 만들어진 두개 이상의 밀도가 낮은 자기다발들(flux tubes)이 - 자기다발의 수는 봉우리의 수와 일치할 것이다 - 시선 방향에 대하여 서로 다른 속도로 분출되면서 강한 도플러 이동을 보이는 것으로 분석된다. 이러한 선윤곽은 고리형 홍염의 $CaII$ H & K선에서도 일부 보이고 있다(박영득, 1994).

Kawaguchi(1966)는 분광선이 가우스 분포와 맞지 않는 이유중의 하나로 중복되는 자기 다발의 자체 흡수 효과와 미세관들이 시선 방향에 대하여 서로 다른 속도성분으로 움직이는 도플러효과가 겹쳐진 결과라고 해석하였다. 또 그는 시선 방향에 대한 미세관들의 수가 통계적으로 Maxwell 정규 분포를 이룰 수 있을 만큼 많지 않으므로 가우스 분포에 몇 가지 항을 첨가하여 선윤곽을 맞추었다. 그 결과 11개의 선윤곽 중에서 한 개의 선윤곽에 대해서만 만족스러운 해를 얻었으나 가우스 선윤곽에 지수항이나 선형항을 첨가함으로써 다소 특이성을 띠는 선윤곽의 해를 제시하였다는 점에서 자체 흡수에 의한 선윤곽이나 비대칭 선윤곽에 대한 가우스 맞춤식은 약간씩 그 방법은 다르나 많은 사람들에 의하여 시도되었고 몇 개의 가우스 분포를 가미하여 거의 정확하게 선윤곽을 맞추었다 (Engvold et al. 1978; Fontenla 1979; Kawaguchi et al. 1986). 그러나 김갑성의(1992)는 이와 같은 "비대칭 선윤곽의 가우스 맞춤이 선윤곽을

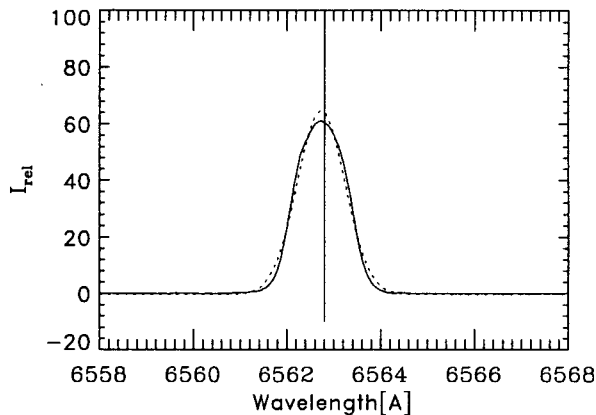


그림 5. 관측한 분광선의 선윤곽을 가우스 맞춤과 비교하면 선윤곽의 날개 부분과 선 중심 부분에 자체 흡수 효과가 있음을 알 수 있다.

정확히 맞추어 주더라도 관측 오차와 가우스 속도성분의 갯수에 대한 물리적 근거가 없이 정확하게 선 윤곽 맞춤을 하는 것은 의미가 없음”을 지적한 바 있다.

본 연구에서는 홍염의 선윤곽을 분석하여 그들로부터 도플러 시선속도를 구하고자 한다. 따라서 우리는 관측된 방출선의 선중심 이동량($\Delta\lambda$)과 선 반치폭(full width at half maximum)을 구하고, 가우스 맞춤식에서 얻은 가우스 분포곡선이 선중심 부근이나 날개 쪽에서 보다 선 반치폭 부근에서 더 잘 맞도록 선윤곽의 분포값을 유도하였다. 그 방법은 식(2)의 가우스 분포식에서 얻어진 윤곽을 다시 선중심과 양 쪽 날개사이의 선 강도값에 잘맞는 다항식 곡선 맞춤을 추가한 것이다. 따라서 일부 선 중심 부근에서 가우스 분포를 벗어나는 관측치는 다음과 같이 기존의 가우스 분포를 하면서 선윤곽의 중심부근에서 강제로 곡선 맞춤에 잘 맞도록 선형항과 제곱항을 포함시켰다.

$$G(x) = a_1 e^{-\frac{x^2}{2}} + a_4 + a_5 x^2 + a_6 x \tag{3}$$

이 방법은 일반적으로 잘 알려진 비선형 가우스 맞춤식(Press et al. 1986)을 우리가 요구하는 선폭 중심 부분에서만 잘 맞도록 약간 변형시킨 것으로 비대칭인 선윤곽에서는 적합하지 않지만 비선형 가우스 맞춤식보다 계산 속도가 상당히 빨라 대량의 자료처리에 매우 유리하다.

활동성 홍염의 선윤곽에서 보여주는 여러 개의 봉우리(multi peaks)는 두개 이상의 자기다발이 시선 방향에 대하여 서로 다른 속도로 운동하는 것이므로 각각의 봉우리를 선윤곽 중심으로 보아 식(3)을 이용하여 각 선중심의 위치를 찾아서 선중심 이동량과 선폭을 구하였다. 선중심의 이동이 일어나는 원인을 태양의 자전과 물질의 운동 성분에만 기인한다고 가정하고 우리는 이들 각 선윤곽으로부터 시선 방향에

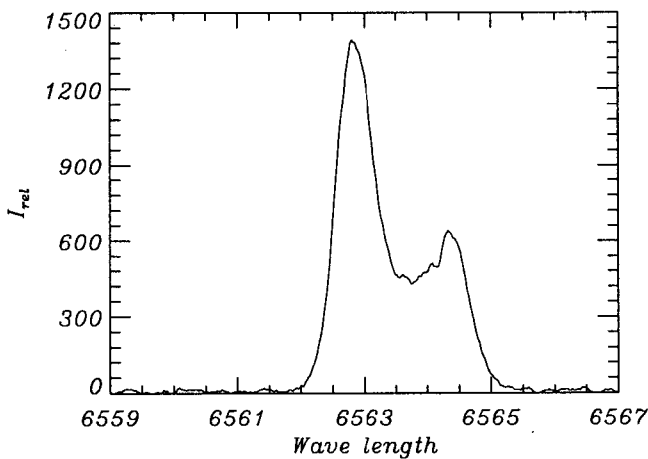


그림 6. 여러 개의 봉우리가 나타나는 H α 선윤곽. 이들은 일반적으로 매우 강한 도플러 편이를 보이고 있다.

대한 도플러 운동 속도를 구하고 홍염의 위치에 따라 태양 자전속도에 대한 보정을 하였다. 태양 자전효과를 보정하는 값으로는 관측 영역이 코로나 영역이므로 코로나의 플라즈마를 관측하여 태양의 차등 자전 속도를 구한 Simon and Noyes(1972)의 자료를 이용하였다.

III. 결과 및 토의

8월 27일 발생한 분출형 활동홍염을 $H\alpha$ 선으로 관측하였으며, 그 결과 얻어진 선윤곽은 앞에서 설명한 바와 같이 방출선의 봉우리 부분에 대하여서만 가우스 맞춤을 하였다. 그 결과로 얻어진 선중심 값으로부터 우리는 활동홍염의 각 영역에 대한 선 중심 이동을 계산하였다.

분광선의 도플러 속도는 식(3)에 의하여 계산되었으며 이때 태양의 자전에 대하여 보정된 속도 값은 $\Delta V_D = -1.93 \text{ km/s}$ 을 적용하였다. 그림 7은 분광선에 대한 가우스 맞춤을 적용한 예로서 모든 선윤곽에 대하여 그림 7과 같은 방법으로 선의 봉우리 수만큼의 가우스 맞춤을 적용하였다. 이와 같이 두개 또는 그 이상의 가우스 함수 분포로 선윤곽 맞춤을 하게 되면, 보다 정확한 각각의 자기 다발의 도플러 시선 속도는 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 전체적으로 도플러 시선속도의 차이는 2차 가우스 맞춤으로 구한 도플러 편이 값보다 더 크게 나타날 것이다. 그 결과 우리가 얻은 속도의 변화폭은 각 단계에 따라 약간씩의 차이가 있었으며, 홍염의 전체에서 측정된 수평방향의 시선 속도값은 $V_{dop} = -17.5 \text{ km}$ 에서 $V_{dop} = 58.2 \text{ km}$ 까지 매우 넓은 속도 분포를 보이고 있는데, 이는 Kejun et al.(1998)이 계산한

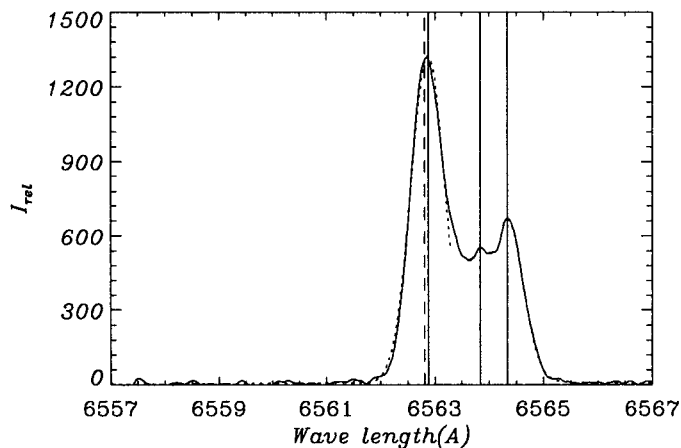


그림 7. 분출형 활동홍염의 $H\alpha$ 분광선의 가우스 맞춤. 각각의 봉우리에 대하여 가우스 1차 맞춤을 적용하였다. 점선은 $H\alpha$ 선중심 파장이다.

정온홍염에서의 수평속도 분포보다 상당히 크게 나타나고 있다. 이러한 차이는 속도의 변화 폭을 구할 때 가우스 맞춤식을 1차 가우스 분포식에 맞추었기 때문에 다소 오차가 있을 것으로 보지만. 그것보다는 분출형 활동 홍염이 정온홍염보다 빠르고 강하게 움직이는 특성 때문으로 생각된다. 평균적으로 도플러 속도편이는 접근속도와 후퇴속도가 비슷한 값을 가지게 될 것이다. 그러나 홍염에서 자기력선의 방향에 따라 미세구조가 운동을 한다고 가정하면 시선 방향에 대한 도플러 속도편이는 각각의 홍염마다 다르게 분포할 것이다. 본 연구에서 관측된 홍염은 시선방향에 대하여 접근속도보다 후퇴속도가 훨씬 크게 나오는데 이는 미세구조가 관측자와 반대 방향으로 휘어 있기 때문인 것으로 판단된다.

그림 7에서 점선으로 표시된 수선은 $H\alpha$ 선중심 파장인 $\lambda 6562.81\text{\AA}$ 이고, 실선으로 표시된 수선은 가우스 선윤곽에 의하여 얻어지는 각 선윤곽의 봉우리에 대한 선중심 위치이다. 실선의 선윤곽을 따라서 1차 가우스 맞춤의 결과가 점선으로 함께 표시되어 있다. 이와 같은 봉우리는 가장 많은 경우가 3개였으며 광구로부터 높이 $15''$ (약 10000km)에서부터 봉우리가 분리되기 시작하여 $20''$ (약 15000km)에서 뚜렷한 세 개의 정점을 보인다. 계산 결과 얻어진 각 단계별 도플러 시선 속도의 분포는 그림 8에 도시된 바와 같다.

그림 9는 계산한 도플러 속도 분포 중에서 선윤곽의 봉우리가 여러 개 나타나는 영역만을 선택하여(그림 8에서 $240 - 270 \text{ arcsec}$ 사이) 그 속도 분포를 살펴보았다. 여기서 세 개의 뚜렷한 시선 속도군(群)을 확인할 수 있는데 이것은 세 개의 자기 다발이 시선 방향에 대하여 서로 다른 속도로 움직이는 것으로 해석된다. 그림 9를 통하여 우리는 홍염의 뿌리 부분에서는 하나로 구성되어 있는 자기다발이 위로

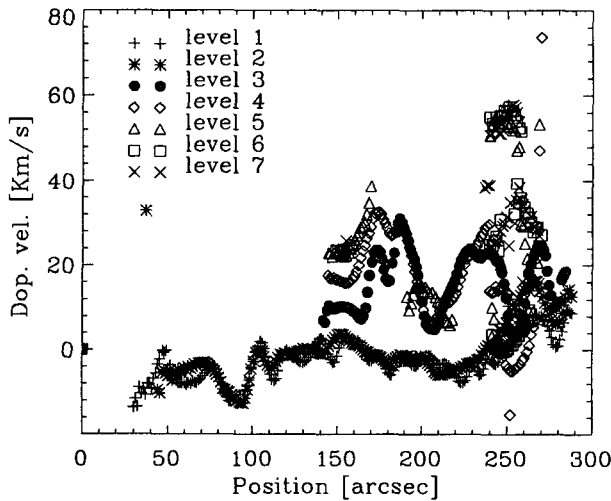


그림 8. 관측한 분출형 홍염의 높이에 따른 각 단계별 도플러 속도 편이. 각 단계별 높이의 차이는 5 arcsec 이다.

상승하면서 분리되고 있는 것 같이 보이지만, 사실은 개개의 자기 다발이 뭉쳐진 뿌리 부분에서는 시선 속도 성분이 같기 때문에 동일한 자기 다발로 보이다가 상승하는 과정에서 도플러 속도 성분이 달라지면서 분리된 분광상을 보이는 것으로 해석된다. 그 증거로 이들은 $H\alpha$ 선 중심을 기준으로 약간 이동된 상태에서 좌우 대칭을 이루고 있는 반면에, 위로 올라갈수록 밝은 점들 사이의 간격이 증가하다가 사라진다. 이것은 자기다발이 분리되고 분리된 자기다발들은 서로 다른 방향으로 확산되고 있음을 보여주고 있다.

마지막으로 우리는 홍염이 상승하면서 보여지는 도플러 속도 편이의 변화를 보기 위하여 각 단계의 평균 시선속도를 구하고 이것을 그림 10에 나타내었다. 그림에서 보여주듯이 시선속도 값은 위로 올라갈수록 증가하고 있으며 이때 시선 속도의 증가율은 $\Delta V = 0.86 \text{ km/s/arcsec}$ 이었다. 이것은 물질이 위로 올라 갈수록 분출속도가 증가하는 것으로 해석하기보다는 자기다발이 위로 올라가면서 휘어지고 있음을 의미하는 것으로 풀이된다. 이것은 홍염을 유지하는 자기다발 상호간의 동역학적인 문제로서 이 문제를 좀더 상세하게 알기 위해서는 더 많은 관측자료와 고분산 분광관측이 요구된다.

활동홍염의 운동학적 분석이나 연구는 정온홍염의 연구에 비교하면 매우 초기 단계라고 할 수 있다. 특히 짧은 수명을 가진 분출형 홍염의 운동 연구는 발생에서 소멸까지의 빠른 물리적인 변화 때문에 관측이나 이론 연구의 바탕이 매우 약하다. 이와 같은 짧은 수명의 분출형 홍염은 서어지(Surge)나 스프레이(Spray)와 달리 또 다른 코로나 가열의 원인으로 연구되어야 하는 대상이라고 생각된다. 뿐만 아니라 활동홍염의 연구는 플레어와 함께 지구 상층대기에 직접 영향을 미치는 중요한 태양 활동 현상 중의 하나이다. 그러므로 소규모의 활동홍염에 대한 고분산 분광 관측이 좀더 많이 수행되어 그들의 동역학적 연구가 수행되어야 할 것이다.

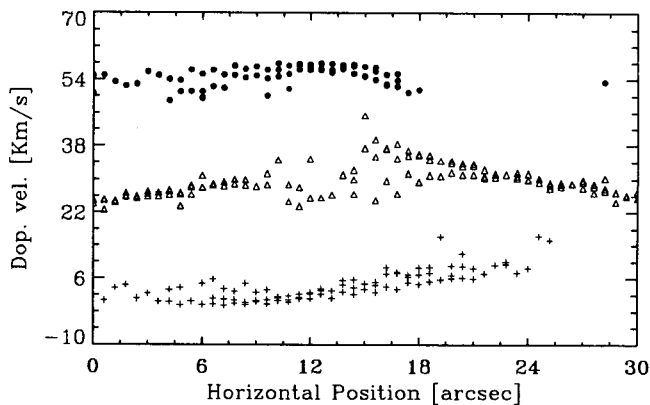


그림 9. 그림 8의 240-270 arcsec 사이의 $H\alpha$ 선윤곽에서 세 개의 봉우리를 보이는 선윤곽에 대한 도플러 속도 편이 분포. 세 개의 속도군으로 뚜렷하게 나뉘어 지고 있는데 이것은 각각의 자기 다발의 도플러 속도 편이로 보여진다.

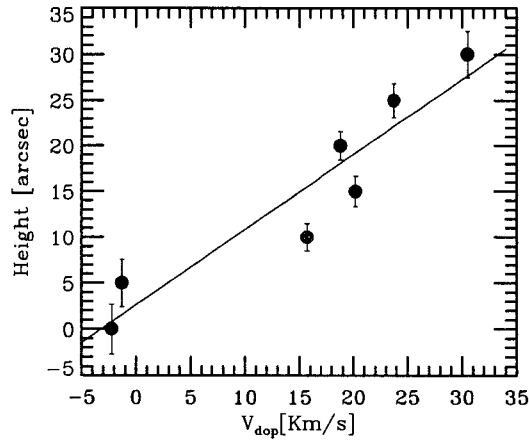


그림 10. 분출형 홍염의 단계별 높이에 따른 평균 시선 속도. 높이에 따른 시선속도의 증가율은 $\Delta V = 0.86 \text{ km/s/arcsec}$ 이었다.

본 연구를 위하여 관측 시간을 허락해주신 일본 국립천문대의 Hirayama 박사님과 Sakurai 박사님께 감사 드립니다. 아울러 관측을 수행하는 동안 수고해주신 노리쿠라 태양관측소의 Ichimoto 박사님과 Okamoto 씨를 비롯한 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 김갑성, 심경진, 박영득, & 윤홍식 1992, 한국천문학회논문, 6, 16
- 박영득 1994, 태양 정온홍염의 분광학적 연구, 서울대학교 천문학과 이학박사 학위 논문.
- Beckers, J.M., Bridges, C.A., & Gillman, L.B. 1976, A High Resolution Spectral Atlas of the Solar Irradiance from 380 to 700 Nanometers, Vol.1.
- Engvold, O. 1978, Solar Phys. 56, 87
- Engvold, O. 1998, IAU Colloquium 167 ASP Conference Series, Vol. 150, 23
- Engvold, O., Malville, J.M., & Livingston, W. 1978, Solar Phys, 60, 57
- Fontenla, J. M. 1979, Solar Phys. 64, 177
- Kawaguchi, I. 1966, PASJ, 18, 362
- Kawaguchi, I., Kim, K. S., & Nakai, Y. 1986, Solar Phys, 106, 47
- Kejun, L., Malherbe, J.-M., Wiik, J. E., Schmieder, B., Roudier, T., Kucera, T., & Poland, A. I. 1998, IAU Colloquium 167 ASP Conference Series, Vol. 150, 32
- Kubota, J., Tohumura, I., & Uesugi, A. 1988, Vistas Astron. 31, 39
- Kubota, J., Tohumura, I., & Uesugi, A. 1989, Hvar Obs. Bull. 13, 187

- Malherbe, J. M., Schmieder, B., & Mein, P. 1986, *A&A*, **102**, 124
- Mashnich, G. P., & Bashkirtsev, V. S. 1990, *A&A*, **235**, 428
- Molowny H. R. 1997, *Solar Phys.* **172**, 181
- Molowny H. R., Oliver, R., Ballester, J. L., & Baudin, F. 1998, *IAU Colloquium 167 ASP Conference Series*, Vol. 150, 139
- Mein, P. 1977, *Solar Phys.* **54**, 45
- Park, Y .D., Yun, H. S., Ichimoto, K., Sim, K. J., & Moon, Y .J. 1998, *IAU Colloquium 167 ASP Conference Series*, Vol. 150, 217
- Press, W. H., Flannerg, P. B., Teukalsky, S. A. & Vetterling, W. T. 1986, *Numerical Recipes*, Cambridge University Press
- Simon, G. W., & Noyes, R. W. 1972, *Solar Phys.*, **26**, 8
- Simon, G., Schmieder, B., Demoulin, P., & Poland, A. I. 1986, *A&A*, **166**, 319
- Yi, Z., & Engvold, O. 1991, *Solar Phys.* **134**, 275