

활동홍염의 분광분석 연구
SPECTROSCOPIC STUDY OF 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 1, 1998)

ABSTRACT

A quantitative analysis has been made to estimate the horizontal variation of physical parameters in a loop type active prominence by analyzing CaII H & K and H_{α} spectra taken from such an active prominence (appeared on May 23, 1981 with position angle 251 degree) with Littrow type spectrograph attached to 25cm coronagraph at Norikura Coronal Station of National Astronomical Observatory of Japan. The spectral resolution is 1.12Å/mm and the spatial resolution is 25"/mm for CaII H&K lines. The present study shows that the turbulent velocity ranges from 10km/s to 20 km/s in the loop prominence, which are in good agreement with those of Hirayama (1989). It is also found that the temperature of the loop prominence is higher than that of quiescent prominences (~8,000 K) by about 4,000 K, whose temperature deviation seems very high.

1. 서론

홍염의 분광학적 분석은 홍염의 물리적 성질뿐만 아니라 그의 생성기구, 동역학적 특성 및 물질의 분포 등을 연구하는데 있어서 가장 강력한 도구가 되어왔다. 따라서 홍염의 연구에 분광선의 관측과 관측된 분광선의 분석은 항상 홍염 연구의 주축이 된다. 일반적으로 홍염은 정온홍염(Quiescent prominences)과 활동홍염(Active Prominences)으로 크게 분류하는데 대표적으로 Zirin(1988)의 분류기준을 많이 사용한다. Zirin(1988)은 들뜸 에너지가 낮은 스펙트럼들이 많이 나오는 홍염(cool matter prominences)과 들뜸 에너지가 높은 스펙트럼이 대량 검출되는 홍염(hot matter prominences)으로 분류하고 전자를 정온홍염(quiescent prominence), 후자를 활동홍염(active prominence)으로 구분하였다. 활동홍염은 플레어나 코로나의 물질분출 등을 수반

하고, 온도가 높고 수명이 짧은 것이 특징이며 고리형 홍염, 스프레이(spray), 서어지(surge)등이 여기에 속한다. 따라서 활동홍염은 기본 물리적 성질이 정온홍염과 뚜렷이 구별된다.

정온홍염의 기본 물리적 성질은 온도가 낮고 밀도가 높으며 코로나에서 매우 긴 시간 동안 그 형태를 유지하는 것으로 자기장의 세기가 모양을 따라 거의 변하지 않는다. 따라서 정온홍염에서는 이온화된 금속선들이 강하게 나오는 대신 난류 속도가 작기 때문에 분광선들의 선폭이 좁다. 반면에 활동성 홍염은 태양 활동영역에서 나타나는 여러 가지 물리적 성질이 반영되어 있기 때문에 홍염 내부의 물리적 구조나 복잡하고 빠르게 변하며, 그 성질을 명쾌하게 규정하기가 어렵다. 그러나 대체로 활동홍염은 정온홍염에 비하여 온도가 높고 난류 속도가 크기 때문에 선 폭이 넓고 홍염의 내부에서도 비열적 속도성분이 커서 선의 날개가 크게 발달하는 경우가 많다.

홍염의 분광분석 연구는 지금까지 많은 사람들에 의하여 수행되어 왔고(Hirayama 1971,1979; Engvold 1978,1981; Heasley et al. 1974; Landmann 1981,1985; Kim 1987,1990) 이제는 어느 정도 기본적인 물리량들에 대한 기준이 정립된 것 같은 인상을 준다(Hirayama 1989). 그러나 아직까지도 홍염의 분출 기구(mechanism), 장시간 코로나에 떠있는 홍염의 안정성 및 홍염의 발생 등에 대한 기본적인 문제는 만족스럽게 해결되어 있지 않고 있다. 따라서 이런 문제를 해결하기 위한 기본적인 연구 즉, 자기장의 측정이나 분광학적 분석의 연구, *Ha* 나 X선, EUV생성 등의 연구는 아직 초기 단계라 할 수 있다.

활동성 홍염의 분광선 특징중의 하나는 선폭이 넓고 금속선이 거의 나오지 않는 대신 천이 에너지 준위가 높은 He II선들이 강하게 관측된다. 이것은 온도가 높고 거대 난류 속도가 크기 때문에 나타나는 것으로 특히 서어지(surge)나 스프레이(spray)의 경우에는 거대 난류 속도가 커서 선폭이 매우 크게 발달(5~6배)하는 경향을 보인다. 활동홍염의 온도 분포는 7000 K 에서 약 20,000 K 까지 관측되며 플레어가 발생한 직후의 고리형 홍염일 경우에는 2×10^7 K까지 높은 온도가 관측되기도 하며(Hirayama 1985), 전자 밀도는 대체로 정온홍염보다 약간씩 낮게 측정된다.

홍염 관측의 최적의 상태인 개기 일식에서 관측된 활동홍염의 연구로는 Koutchmy et al.(1983)과 Vial(1986)의 것을 들 수 있다. Koutchmy et al. (1983)은 1981년 6월 31일 인도네시아 개기 일식에서 관측한 분출형 홍염의 *H β* 선 및 연속스펙트럼의 분석에서 $n_e = 10^9 \text{cm}^{-3}$ 의 값을 얻었으며, 한편 Vial(1986)은 활동영역 내에 있는 홍염의 *Ly α* , MgII h & k, CaII H & K 선의 분광 관측자료와 OSO-8 위성의 EUV 분광 관측자료의 분석에서 평균 난류 속도 22 ~ 23 km/s를 얻은 바 있다.

본 연구에서는 일본 노리쿠라 태양 관측소의 25cm 코로나그래프를 이용하여 1981년 5월 23일에 발생한 고리형(loop type) 홍염의 고분산 분광 사진 관측을 수행하고 그로부터 얻은 자료를 분석하여 활동홍염의 수평 방향에 대한 물리량을 계산하고 홍염 내부에서 이들이 변하는 양상을 살펴보았다. 2장에서는 홍염의 관측과 자료 처리과정을 설명하였고 3장에서는 자료 분석과 그 결과 및 연구의 결론, 그리고 앞으로의 연구 방향을 제시하였다.

II. 사진 분광 관측과 자료처리

1. 고분산 사진 분광 관측

사진 관측 분석 자료는 일본의 노리쿠라 코로나 관측소에서 25cm 코로나그래프에 부착된 사진 분광 관측 시스템을 사용하여 활동 영역의 분광 사진 관측을 수행하여 얻은 것으로, 미타카에 있는 일본 국립천문대 자료실에 보관된 것에서 선별한 것이다. 사진 분광 관측에 사용한 필름은 일률적으로 천문 관측용 35mm Kodak TRI-X Pan 의 흑백 필름이다. 사진 분광 관측에서 장초점 분광기를 사용했을 때 한 컷의 길이는 35cm로, 관측 파장 영역(cover range)은 약 390Å이 된다. 따라서 CaII H & K 영역에서 분광 분해능은 1.12Å/mm가 되며 공간 분해능은 25"/mm이다. 이 사진 관측이 CCD 관측보다 유리한 점은 관측 파장 영역이 CCD 관측보다 약 20배 이상 넓기 때문에 CCD 관측에서 할 수 없는 이웃하는 분광선들을 동시에 관측할 수 있다는 것이다.

본 연구에서 선택한 관측 자료는 1981년 5월 23일 위치각 251°에 발생한 고리형(loop type) 홍염(그림 1)으로 공간 크기는 폭이 150", 높이가 100" 정도 되는 대단히 강하게 분출되는 활동 홍염중의 하나로 수명은 수분 이내로 추정된다. 관측 방법은 홍염의 아래쪽에서부터 위로 올라가면서 슬릿의 위치를 3단계 옮겨서 관측하였고 선택한 분광 영역은 CaII H & K와 He선으로 이들을 H α 로 동시 촬영한 홍염상과 함께 PDS로 읽은 후 분석하였다. 표 1은 사진 관측자료의 관측 인자를 수록한 것이며 그림 2는 선택한 스펙트럼 사진들이다.

앞에서 언급하였듯이 이 홍염은 대단히 빠른 속도의 물질 이동이 있는 것으로 추정되는 고리형 활동홍염이다. 전부 세 단계의 관측이 수행되었으나 맨 아래쪽 단계의 슬릿은 광구에 너무 접근하여 광구표면 활동 영역의 '서어지(surge)'가 관측되는 등(그림 2의 L1) 매우 복잡한 스펙트럼 구조를 보이고 있으므로 논의에서 제외하고 상층부 2개 단계의 관측자료만 분석하였다. 두 번째 슬릿은 광구에서 약 45", 세 번째 슬릿은 광구에서 약 60" 떨어진 곳에 위치하였으며 두 슬릿 사이의 간격은 정확하게 15"이다.

2. 관측 자료의 처리

(1) PDS 읽기와 주사 인자의 결정

분광 스펙트럼의 사진 관측 자료는 천문대의 PDS(Photometric Data System)로 농도를 측정하였다. PDS를 사용할 때에는 세심한 주의가 요구되며 특히 분광 사진의 경우 주행 방향이 정확하게 분광선 방향에 수직이 되어야하고 적절한 주행 속도와 최적의 주사 구경을 설정해야 한다. 태양 분광 사진에서 분광선이 나열되어 있는 가로축(X-방향)은 파장에 해당하고 세로축(Y-방향)은 곧 관측되는 지점의 각각의 다른 위치가 된다. 따라서, 분광 사진에서 PDS의 주행 방향은 관측 위치와 관련이 있게 되고 분광선에 대하여 정확하게 수직 방향으로 읽지 않게 되면 서로 다른 지역에서 나오는 복사 강도를 읽게 되므로 세심한 주의가 요구된다. 한편, 주행 속도

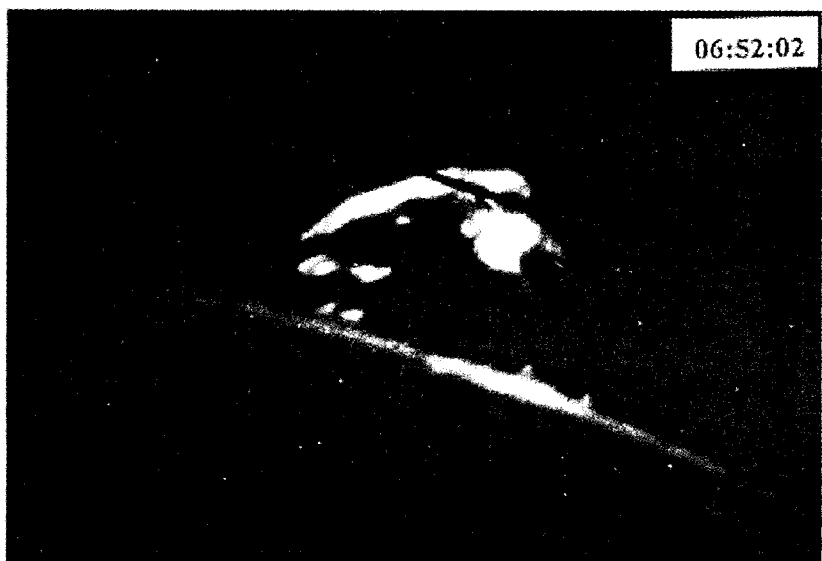
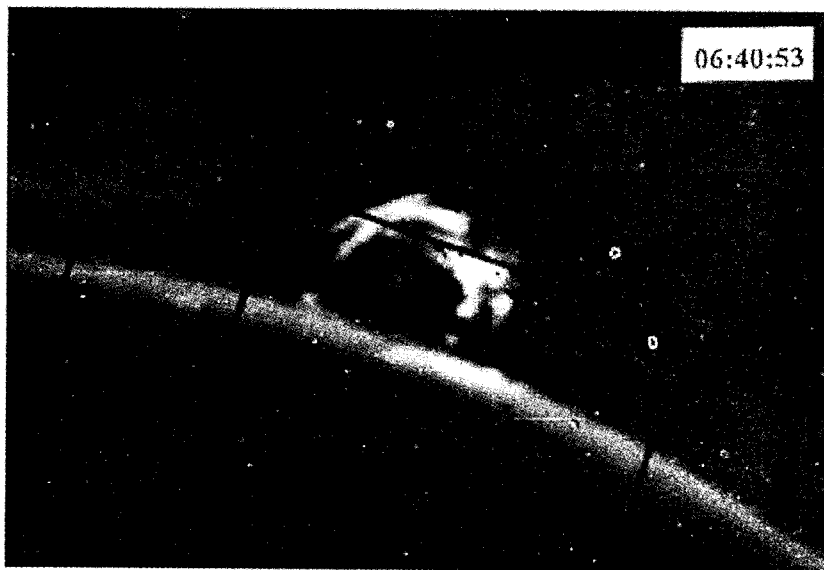


그림 1. 1981년 5월 23일에 관측된 활동성 고리형 홍염의 $H\alpha$ 상. 활동이 가장 강했을 때(위)와 소멸이 시작되었을 때(아래) 전체적인 모양이 크게 달라지고 있음을 볼 수 있다.

는 주사 길이와 관련이 있으며 주사 구경은 분해능과 직접 비례하므로 연구 목적에 따라 적절한 주행 속도와 주사 구경이 설정되어야 한다. 천문대 PDS는 PDS1010GMS로서 주사 구경과 주행 속도를 여러 차례의 시험 운영을 하여 가장 적절한 경우를 선택하였다.

이 PDS 시스템은 사용하기 전에 5시간 이상 예비가동(warming up)시켰으며 주사구경과 주사 속도가 결정된 스펙트럼과 농도 썰기(wedge)는 시스템을 정지시키지 않고 한번에 모두 읽었다. 다만 H_{α} 상의 주사는 농도-강도 환산 등의 작업을 필요로 하지 않으므로 필요할 때마다 수시로 읽었다. 그러나 주사 구경의 크기는 분광상에서의 위치와 직접 관계가 있으므로 분광상과 동일한 크기의 주사 구경을 사용하였다. PDS 운영에서 사용한 최적 주사 인자는 표 2에 수록된 바와 같다.

스펙트럼을 읽을 때에는 위치 이동을 최소화하기 위하여 주사 방법을 에지(edge)형으로 택하였다. 농도 썰기를 읽을 때에 플립(flip)형을 택한 이유는 사진 건판 특성곡선을 구할 때에 여러 개의 농도 썰기선의 평균을 취하게되고 농도 썰기의 특성이 경계선에서의 강도 변화를 정확하게 측정할 필요가 없으므로 읽는 시간을 단축시킬 수 있는 flip형을 택하였다. 주사 속도는 주사 구간이 1 cm 이상일 때는 최소 80 CSU 이상의 속도를 요구(백원근 1992)하고 있으나 고분산 분광 관측 사진에서는 주사 속도의 차이가 미치는 영향은 거의 찾을 수 없었다. 이러한 사실은 서울대 천문학과의 김정훈(1992)이 태양 흑점의 고분산 분광 사진을 천문대의 PDS로 읽으면서 확인되었다. 주사 구경은 사진 필름의 입자 크기보다 작은 구경은 의미가 없으므로 관측 필름의 입자 크기를 고려하여 10 μm , 25 μm , 50 μm 를 시험적으로 읽고 그중 농도 잡음이 가장 낮은 25 μm 를 택하였다.

(2) 사진 건판의 특성곡선과 복사 강도

노리쿠라 코로나 관측소의 농도 썰기는 모두 12단계로 되어 있으며 과장에 따른 표준 투과율이 주어져 있다(표 3). 그림 3은 CaII H & K 선의 농도 썰기를 나타낸 것으로 아래쪽에 수평

표 1. 노리쿠라 태양 관측소에서 1981년 5월 23일에 발생한 고리형 홍염의 사진 분광 관측을 수행한 관측 인자

NAOJ Plate #	Lines	Type	Exposure Time	Obs. Time	Level
57368	CaII H&K	spectrum	3 s	06:47:42	1
57358	CaII H&K	spectrum	6 s	06:38:35	2
57372	CaII H&K	spectrum	6 s	06:50:07	3
57415	CaII	step wedge	6 s	08:42:05	

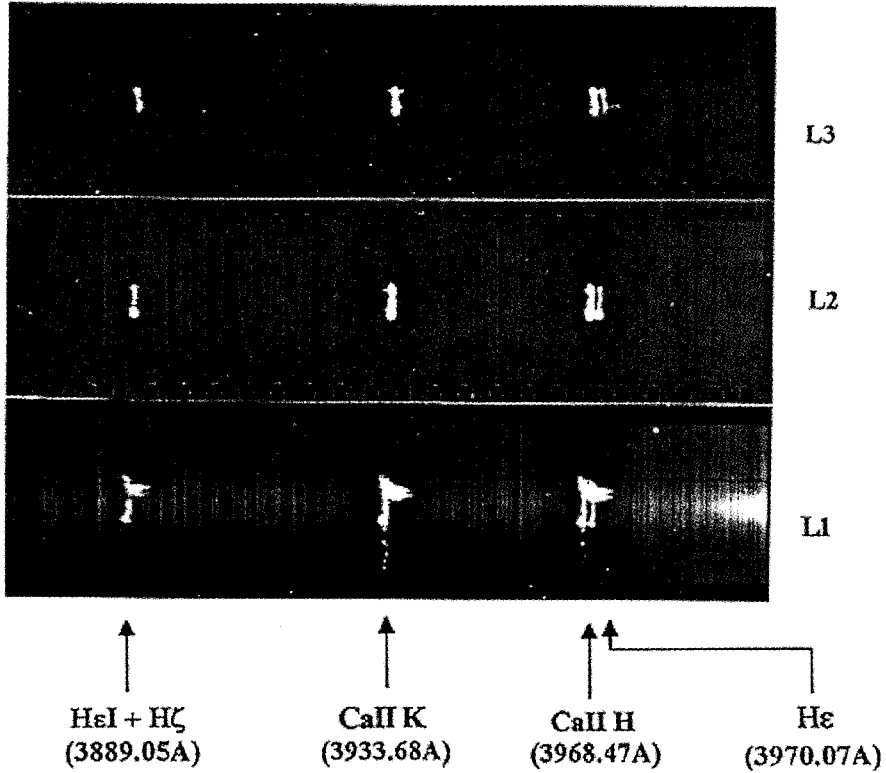


그림 2. 고리형 홍염에서 관측한 분광선들. 위의 사진에서 L1, L2, L3는 홍염의 서로 다른 높이에서 관측된 스펙트럼이다.

표 2. PDS 주사 인자

	spectrum	wedge
주사 방법	edge	flip
주사 속도	150CSU	150CSU
주사 구경	25 μ m	25 μ m
농도 잡음	0.018	0.020

방향으로 표시한 점선은 사진 건판의 기본 농도값(fog value)을 나타내고 x축의 숫자는 농도 췌기의 농도가 높은 값에서 낮은 값으로 주사할 때의 화소값이다. 사진 농도값 D와 투과율 T 사이에는 $D = -\log T$ 의 관계가 성립하므로 상대 복사강도값이 표준투과율과 농도 췌기의 농도값의 최소자승법에 의한 관계식(식 (1))에 의하여 얻어진다. 즉, 투과율이 곧 강도이므로 표 3의 파장에 해당하는 영역의 log(T)값(그림 4의 y축에 해당하는 값)과 농도 췌기의 값 사이에 그림 4와 같은 관계가 만들어진다.

여기서 최소자승법에 의하여 식 (1)과 같은 식의 상수 값을 구하면 그림 4의 농도-강도의 상관 관계를 얻게되므로 사진 건판의 농도를 강도 값으로 환산 할 수 있다.

$$\log I = C_0 + C_1(\log T) + C_2(\log T)^2 + \dots + C_n(\log T)^n \quad (1)$$

식에서 I는 상대 강도값으로 당연히 잉여산란광이 보정되지 않은 값이며 C_0, C_1, \dots, C_n 은 n차 최소자승법의 상수항이다. 위 식에서 주의해야하는 것은 농도 췌기의 관측인자이다. 일반적으로 농도 췌기는 CCD관측에서 비교 광원으로 광구 중앙부의 조용한 영역을 택하는 것과 마찬가지로, 홍염의 분광사진에서도 광구 중앙부에서 농도 췌기 촬영을 하게 된다. 이때 광구면의 강도가 강하기 때문에 농도 췌기 촬영시 ND 필터를 더 추가하여 사용하게 되는데, 홍염의 분

표 3. 노리쿠라 관측소 농도 췌기의 표준 투과표

step λ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3600	0.26	0.60	0.78	1.06	1.20	1.57	1.76	2.16	2.27	2.42	2.80	3.07
3641	0.26	0.60	0.78	1.06	1.21	1.56	1.74	2.14	2.26	2.42	2.79	3.06
3700	0.26	0.60	0.76	1.05	1.18	1.54	1.73	2.12	2.24	2.40	2.78	3.06
3811	0.26	0.58	0.74	1.04	1.16	1.50	1.70	2.08	2.21	2.38	2.76	3.05
3884	0.26	0.58	0.74	1.04	1.16	1.49	1.68	2.07	2.19	2.37	2.74	3.04
3991	0.27	0.58	0.74	1.04	1.16	1.48	1.68	2.06	2.18	2.36	2.74	3.04
4117	0.27	0.58	0.75	1.05	1.18	1.50	1.70	2.06	2.20	2.37	2.73	3.02
4322	0.26	0.60	0.80	1.09	1.23	1.54	1.75	2.09	2.24	2.41	2.74	2.98
4500	0.26	0.62	0.84	1.13	1.27	1.58	1.80	2.12	2.28	2.45	2.75	2.92
4700	0.26	0.63	0.88	1.17	1.31	1.62	1.84	2.14	2.32	2.48	2.75	2.85
5190	0.24	0.59	0.87	1.15	1.31	1.61	1.85	2.08	2.28	2.46	2.66	2.74
5303	0.23	0.58	0.80	1.14	1.30	1.60	1.84	2.06	2.26	2.45	2.63	2.71
6563	0.23	0.58	0.84	1.12	1.28	1.59	1.82	1.93	2.15	2.38	2.45	

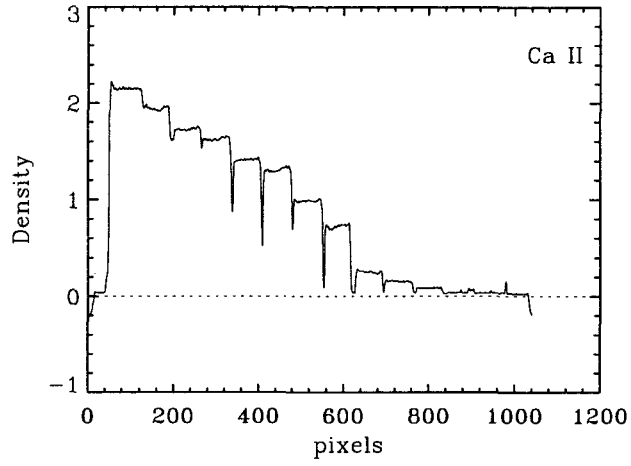


그림 3. 노리쿠라 관측소 Ca II 선의 표준 농도 썩기

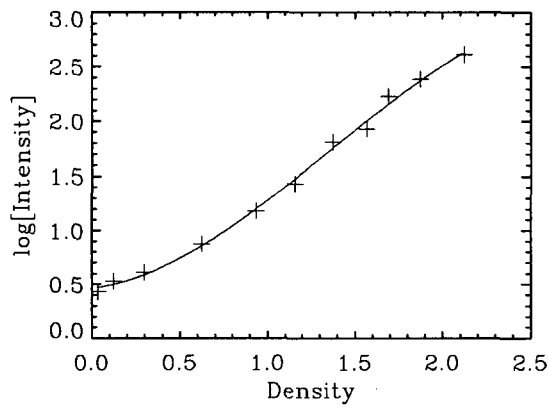


그림 4. 관측한 분광사진 건판의 밀도와 강도 보정 곡선

광상과 비교하기 위해서 관측한 농도 썩기의 강도에 ND 필터에 의한 차단된 강도만큼을 고려해 주어야 한다. 표 4는 노리쿠라 코로나 관측소 ND 필터 셋트의 표준 농도값을 나타낸 것이다.

CaII H & K영역의 농도 썩기에서는 ND=0.9를 사용하였으므로 표 4에서 이중 선형 내삽법(double linear interpolation)방법으로 3900A에서의 ND 0.9에 해당하는 값인 1.065만큼을 표3의 3900A에 해당하는 농도 썩기의 표준 농도값에서 빼 주었다.

III. 자료의 분석과 결과

일반적으로 활동 태양의 물리량을 구하는 계산에서는 비열적 평형상태(nonLTE)의 대기 모델을 많이 쓰고 있으나 홍염의 물리량 계산에서는 Engvold(1976)의 방법이 자주 사용되고 있다. 이 모델은 대기가 열적 평형상태를 만족하는 조건에서 두 개 이상의 분광선 강도와 반치폭의 값을 알고 있을 때 홍염 내부의 선 형성 지역의 온도와 비열적 난류속도, 전자밀도, 광학적 두께 등 기본적인 물리량을 계산할 수 있다.

우리는 표 1에서 동시 관측된 두 개의 분광선 즉, CaII H & K 선과 He 선을 분석하여 홍염의 온도, 난류 속도 및 전자밀도의 수평 분포를 구하였다. 즉, II장에서 설명한 관측 지역에 대하여 공간 분해능 0.6 arcsec로 CaII H, CaII K 그리고 He선의 강도와 분광선 반치폭을 구한 다음 CaII H - He와 CaII K - He의 관계로부터 Engvold(1976)의 모델을 적용하여 각각

표 4. 노리쿠라 ND 필터의 투과 강도 표

ND λ	0.100	0.300	0.600	0.900	2.000	3.000	4.000	5.000
4000	0.106	0.324	0.686	1.062	2.316	3.396	4.446	5.663
4300	0.093	0.308	0.637	0.991	2.106	3.089	4.046	5.167
4700	0.083	0.274	0.602	0.944	2.032	2.998	3.921	4.967
5000	0.085	0.282	0.588	0.944	2.022	2.996	3.903	4.970
5303	0.084	0.271	0.590	0.927	2.019	2.990	3.902	4.961
5500	0.084	0.266	0.586	0.915	2.015	2.992	3.901	4.956
5800	0.092	0.276	0.584	0.940	2.029	3.013	3.917	4.972
6000	0.093	0.282	0.589	0.950	2.032	3.027	3.932	4.998
6200	0.096	0.282	0.586	0.947	2.019	3.004	3.905	4.969
6400	0.095	0.288	0.575	0.955	2.007	2.998	3.868	4.922
6563	0.093	0.299	0.559	0.935	1.945	2.915	3.774	4.801

물리량들을 계산하였으며, 여기서 얻은 활동홍염의 물리인자들의 평균값은 표 5에 수록된 바와 같다.

본 연구에서는 II장에서 언급한 바와 같이 상층부 2개 단계의 관측자료 분석의 결과만 논의하고자 한다. 분석한 분광선 CaII H & K선과 He선은 한 장의 스펙트럼 사진에 모두 기록되어 있으므로 동시 관측이 이루어진 것이다. 그러나 관측한 활동홍염은 수명이 짧고 형태적 변화와 물질의 이동 속도가 매우 크고, 두 번째 단계와 세 번째 단계를 측정할 시간 간격이 12분인 점을 미루어 보아(표 1) 두 단계의 상호비교는 의미가 없는 것으로 보아진다. 예를 들면 그림 5a와 5b는 각각 두 번째 단계와 세 번째 단계의 규격화 된 세 개 분광선의 선중심 상대 강도 분포를 나타낸 것인데 이들의 분포가 전혀 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각 단계에서 분광선의 특징만 비교하고 강도가 강한 부분과 극히 약한 몇 개의 부분을 선택하여 지역별로 물리적 특성을 찾은 다음 그 값들을 비교 분석하였다.

그림 6은 두 번째 단계에서 관측한 CaII H선과 He선의 분광 스펙트럼을 나타낸 것이다. 여기서 He선이 대단히 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 박영득(1994)이 관측한 정온홍염의 CCD 관측에 의하면 분광선 중심의 상대 강도비 $I_{CaII H}/I_{He}$ 은 약 15 ~ 25인 반면에, 고리형 홍염의 경우에는 그 비가 2.5 ~ 6.2 범위에 속했다. 이것은 활동홍염의 온도가 높아서 Balmer 선의 강도가 강화된 것으로 생각된다.

그림 7은 분광선 반치폭의 분포를 나타낸 것으로 고리형 홍염의 경우 분광선 반치폭의 값은

표 5. 고리형 활동홍염 물리인자들의 평균값

Physical parameters	Mean Values
< FWHM (CaII H) >	0.25 ± 0.01
< FWHM (CaII K) >	0.27 ± 0.01
< FWHM (He) >	0.27 ± 0.02
< V_{ξ} >	13 km/s ± 5
< T >	13000 K ± 2000
log N(CaII)	12.7 ± 1.05
log N(H)	18.4 ± 1.05
τ_K	1.0 ± 0.06
I_K/I_H	1.63 ± 0.05

전체적으로 정은홍염에서보다 약 2배 가량 넓다. 이것은 내부 난류속도가 클 뿐만 아니라 자체 흡수의 효과가 커서 이들이 모두 선폭 증대의 중요한 원인으로 작용하는 것으로 생각된다. 왜냐하면 그림 5에서 강도비가 급격히 증가하는 영역에서는 CaII H & K선 모두가 선운곽의 가우스 맞춤에서 선 중심 부분이 평평하거나 넓게 분포하는 경우를 볼 수 있는데 이것은 일반적으로 정은홍염에서 CaII H & K선의 선중심 반치폭이 0.1A(Zirker and Koutchmy 1990, 1991) 미만인데 비하여 표 5에서 보여주는 평균 반치폭이 0.25A인 것이 좋은 보기가 된다. 그러나 실제로 대부분의 선운곽에서는 모두 이와같은 선폭 증가 현상을 보이는 것은 아니고 일부 제한된 영역에서만 이와 같은 현상을 볼 수 있다. 실제로 그림 7의 분광선 반치폭의 수평분포를 보면 일부 영역에서 반치폭이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 관측한 홍염에서 이처럼 분광선의 선중심 반치폭이 상당히 넓은 영역은 광학적 두께가 두껍고 분광선의 자체흡수효과도 크기 때문에 실제로 본 연구에서 분석한 방법으로는 논의하기 어려운 부분이다. 이런 영역을 제외하면 전체적으로 CaII K선에 대하여 관측한 홍염은 광학적으로 얇은 분포를 보이고 있다. 그 증거로서 그림 8에 도시한 CaII K의 광학적 깊이의 분포를 제시하였는데 이때 CaII K 선의 평균 광학적 깊이는 정은홍염의 경우와 마찬가지로 $\langle \tau_{\lambda} \rangle \cong 1.0$ 에 지나지 않는다. 이것은 고리형 홍염이 CaII H & K선에 대하여 광학적으로 얇은 성질을 갖는다는 것을 의미한다. 관측한 활동홍염에서는 CaII H & K선의 선폭과 H ϵ 선의 강도가 크게 강화되었기 때문에 비록 동시 관측이

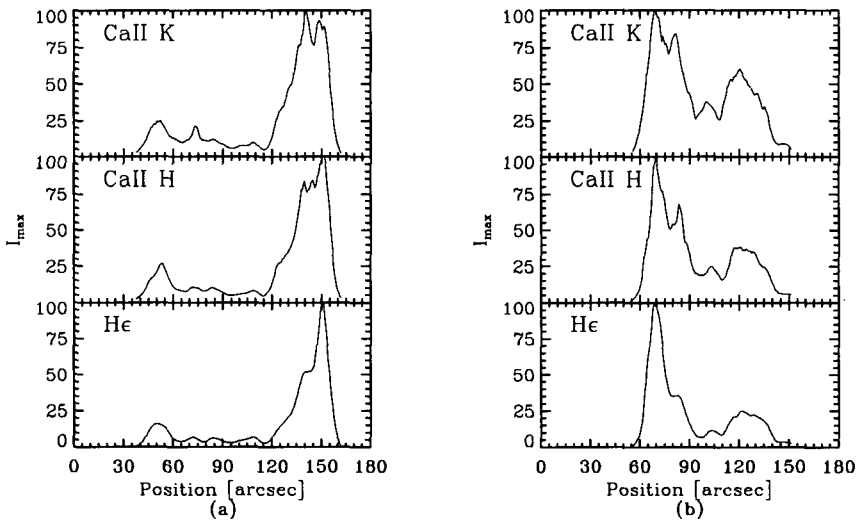


그림 5. 고리형 홍염의 두 번째 단계((a) : 45 arcsec)와 세 번째 단계((b) : 60 arcsec)에서 각 분광선의 강도 분포. 관측 시간 차이가 약 12분으로 두 단계의 강도 분포에 큰 차이를 보인다.

긴 하지만 이들의 선폭을 비교할 경우에는 조심스럽게 다루어야 한다. 특히, CaII H & K 선의 자체흡수 효과는 단일 가우스 선운곽 맞춤을 어렵게 하고 있으므로 $H\epsilon$ 선강도가 물리량의 도출에 미치는 영향도 함께 고려하여 자세히 분석해야 할 것이다.

CaII H & K선의 선중심 강도비를 이용하여 고리형 홍염의 CaII 이온과 수소의 기둥밀도를(그림 9a,b) 계산하였다. 전체적으로 Park et al.(1998)이 연구한 정온홍염과 매우 유사한 밀도 분포를 보이고 있으나 평균값은 다소 낮게 얻어지며 앞에서 언급하였듯이 상부층에서 밀도가 더 크다. 여기서 구한 기둥밀도 값을 그림 5의 강도분포와 비교해 보면 CaII선의 강도는 수소의 기둥 밀도와 매우 깊은 연관되어 있음을 알 수 있다. 고리형 홍염의 온도와 비열적 속도 성분의 수평 분포를 계산하였는데 그 결과는 그림 10과 그림 11에 도시되어있다. 이때 산출한 난류 속도값은 Hirayama (1989)가 보고한 활동성 홍염의 평균 난류 속도 분포 (10 - 20 km/s)와 일치하고 있음을 알 수 있다. 온도는 정온홍염보다 약 4000 K정도 더 높게 측정되었으며, 특히 홍염 내부에서 온도가 큰 폭으로 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있다. 그러나 홍염 내부에서 온도와 난류의 계산에서 주의해야 하는 것은 이들 선폭의 자체 흡수 효과를 조심스럽게 고려하여야 한다는 것이다. 본 연구에서는 한 개의 가우스 맞춤만 적용하였으므로 자체 흡수 효과를 배제하였다. Kubota(1980)는 CaII 선에서 자체 흡수 효과를 신중히 고려하지 않으면 CaII 선의 광학적 두께 τ_k 값이 순식간에 증가한다고 경고하였다.

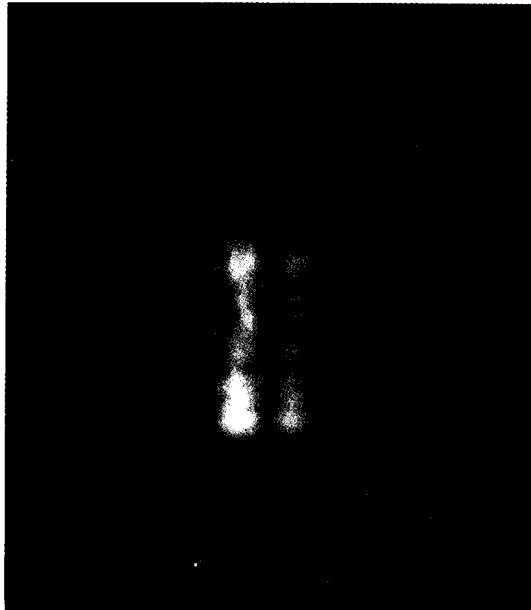


그림 6. CaII H(왼쪽 : λ 3868.47Å) 선과 $H\epsilon$ (오른쪽 : λ 3970.07Å)선의 분광 스펙트럼

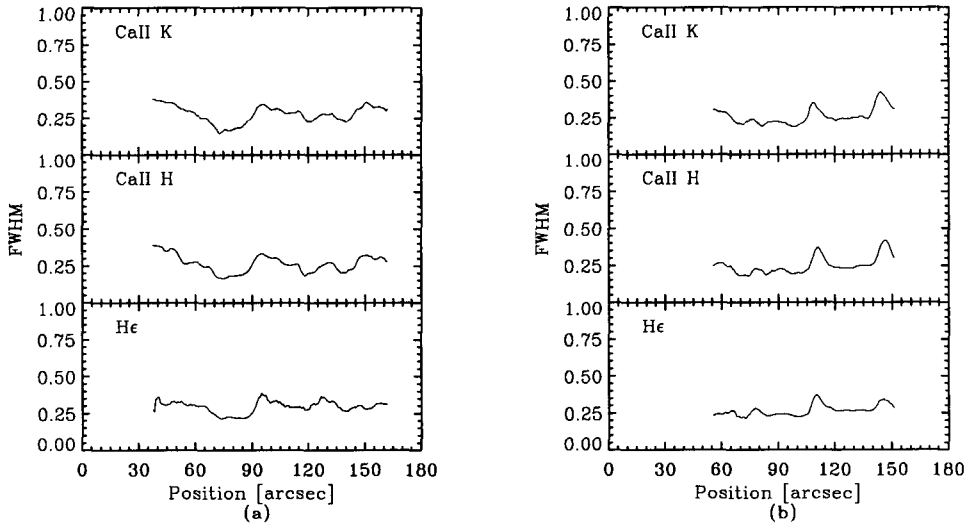


그림 7. 고리형 항성에서 관측한 각 분광선의 선중심 반치폭 분포. 정온항성의 값 (0.1)과 비교할 때 상당히 낮은 값으로 나타난다.

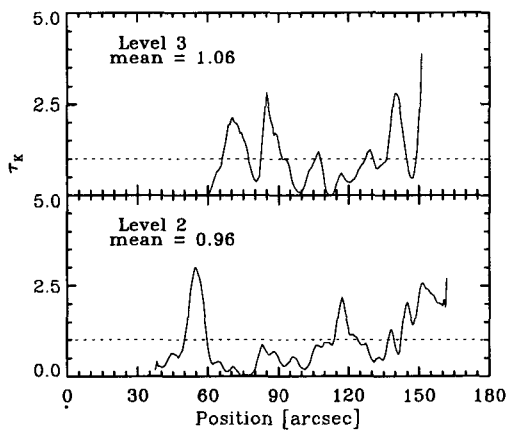


그림 8. 관측한 고리형 활동항성의 CaII K 선의 광학적 두께 분포. 점선은 $\tau = 1$ 인 선으로 전체 광학적 두께의 평균값이다.

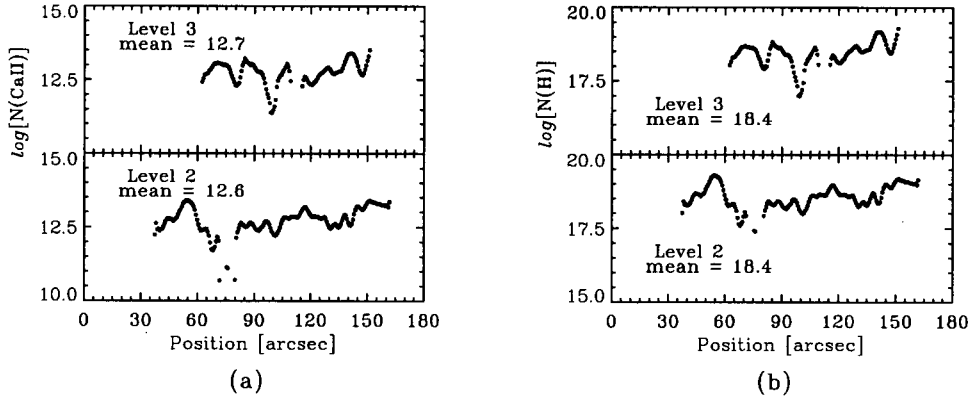


그림 9. 고리형 활동홍염에서 계산한 CaII와 H 밀도의 수평 분포. 같은 높이에서 수평 방향에 대한 밀도의 변화폭이 다소 주기성을 가지고 있다.

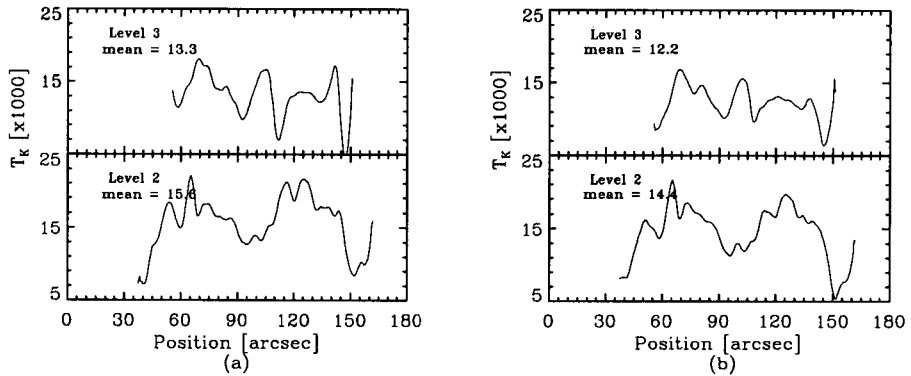


그림 10. 활동홍염의 서로 다른 높이에서 계산한 온도의 수평 분포. (a)는 CaII H 선과 He선으로부터 구한 온도 분포이고 (b)는 CaII K선과 He선으로부터 구한 것이다.

표 5에 주어진 고리형 활동홍염의 평균적인 물리량은 모든 활동홍염의 대표 값이라고 단정하기에는 좀더 많은 관측 자료를 이용한 분석이 있어야 하겠다. 그러나 앞서도 언급한 바와 같이 두개의 level을 관측한 시간 차이가 길어서 두 level 사이의 물리적 특성을 비교하는데 무리가 있지만, 여기서는 개개의 독립적인 물리량들의 특성이 두 level 사이의 물리적 특성 보다 더 중요하다고 생각된다. 표 5에서 온도와 난류 속도의 평균값은 크게 중요한 의미를 갖지 않는다. 그 이유는 그림 10과 그림 11에 제시한 각 높이의 평균값이 더욱 의미가 있는 것으로 생각되기 때문이다.

활동홍염의 사진 관측 자료 분석에서 우리는 몇 가지 흥미 있는 사실을 발견할 수 있다. 앞에서 잠시 언급하였지만 전체적으로 온도나 난류속도의 증가는 도플러 선폭증대의 원인이 되었으며 선폭의 전반적인 분포가 정온홍염에서보다 넓게 나타난다. 한편 그림 8에 주어진 CaII K선의 광학적 깊이는 홍염 내부에서 증가와 감소를 반복하고 있다. 이것은 홍염내부의 물질이 균일하지 않음을 의미한다. 그리고 이것은 그림 9a,b에서 보여주는 수소와 CaII 이온의 기동밀도가 수평적으로 증가와 감소를 반복하는 것으로도 확인할 수 있다. 홍염 내부에서 밀도의 이와 같은 변화는 자기다발 구조와 관계가 있는 것으로 생각된다.

활동홍염은 짧은 시간에 형태학적으로 많은 변화를 일으키기 때문에 내부의 운동학적 변화가 상당할 것으로 추정된다. 따라서 활동홍염 관측은 짧은 시간 분해능으로 많은 관측 자료를 얻어야 한다고 생각된다. 활동홍염은 지구상층대기에 직접적으로 영향을 미치는 태양풍이나 코로나 물질 분출(CME)과 같은 태양활동현상과 깊은 관련성을 가지고 있다. 그러므로 광학적 두께가 얇은 분광선을 선택하여 그들의 물리량을 정확하게 계산하고 홍염 내부의 수직, 수평적 분포를 연구하는 것은 매우 중요하다고 생각된다.

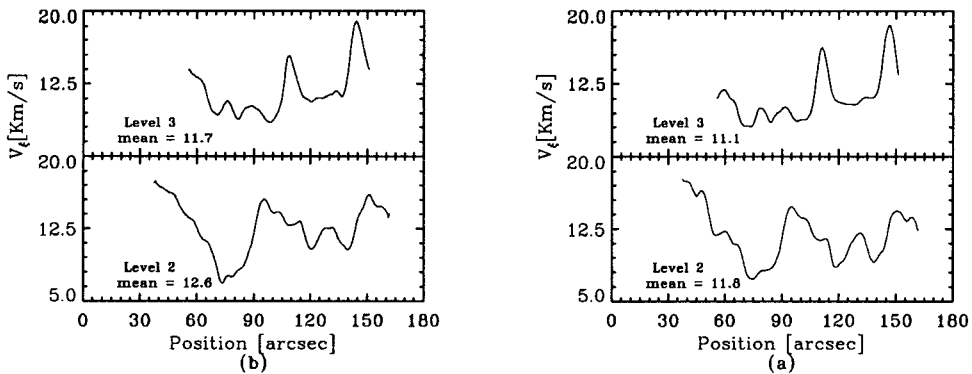


그림 11. 활동홍염의 서로 다른 높이에서 계산한 비 열적 난류 속도의 수평 분포. (a)는 CaII H선과 He 선으로부터 구한 속도 분포이고 (b)는 CaII K선과 He 선으로부터 구한 것이다.

관측 자료를 이용한 홍염의 물리량 계산에서 일반적으로 많이 적용되는 Engvold(1976)의 LTE 모델은 관측 분광선의 광학적 두께가 매우 얇은 경우에 잘 맞으며, 분광선의 자체흡수효과가 전혀 고려되지 않은 상태에서 수행한 계산이므로 자체흡수효과가 크다고 판단되는 일부 영역에서 얻어진 물리량들은 결과에 오차가 클 것이다. 따라서 우리는 활동홍염에서 광학적 두께가 얇고, 자체흡수 효과가 전체 선운곽에 미치는 영향이 적은 분광선을 선별하여 짧은 시간 분해능으로 활동홍염의 다양한 높이에서 동시 관측을 수행하면 훨씬 좋은 결과를 기대할 수 있다고 생각된다.

본 연구를 위하여 자료를 한국에 가져올 수 있도록 도와주신 일본 국립천문대 태양물리학부의 Hirayama 박사님과 Okamoto 씨에게 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 김정훈 1992, "CaII H, K 그리고 IR triplet을 이용한 흑점 본영 채층의 시간에 따른 구조 변화", 서울대학교 이학석사 학위 논문
- 박영득 1994, "태양 정온홍염의 분광학적 연구", 서울대학교 천문학과 이학박사 학위 논문
- 백원근 1992, "천체 사진 측광을 위한 PDS 주사인자의 최적화", 서울대학교 이학석사학위논문
- Engvold, O. 1976, *Solar Phys.*, 49, 283
- Engvold, O. 1978, *Solar Phys.*, 56, 87
- Engvold, O. 1981, *Solar Phys.*, 70, 315
- Heasley, J. N., Mihalas, D., & Poland, A. I. 1974, *ApJ.*, 192, 181
- Hirayama, T. 1971, *Solar Phys.*, 19, 384
- Hirayama, T. 1979, *IAU Colloq.*, 44, 4.
- Hirayama, T. 1985, *Solar Phys.*, 100, 415.
- Hirayama, T. 1989, *IAU Colloq. Vol. 117.*
- Kim, Kap-Sung 1987, *Solar Phys.*, 114, 47
- Kim, Kap-Sung 1990, *JKAS*, 22, 71.
- Koutchmy, S., Lebecqz, C., & Stellmacher, G. 1983, *A&A*, 119, 261.
- Kubota, J. 1980, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 32, 359.
- Landman, D. A. 1981, *ApJ.*, 251, 768
- Landman, D. A. 1985, *ApJ.*, 290, 369
- Park, Y. D., Yun, H. S., Ichimoto, K., Sim, K. J., & Moon, Y. J., 1998, *IAU Colloquium 167 ASP Conference Series, Vol. 150*, 217.
- Vial, J. C. 1986, *Coronal and Prominences Plasma, NASA conference Pub. 2422*(ed A. Poland), 89.
- Zirker, J. B. & Kouchmy, S. 1989, *Hvar. Obs. Bull.*, 13, 41
- Zirker, J. B. & Kouchmy, S. 1990, *Solar Phys.*, 127, 109
- Zirker, J. B. & Kouchmy, S. 1991, *Solar Phys.*, 131, 107