PUBLICATIONS OF THE KOREAN ASTRONOMICAL SOCIETY
14: 91 ~ 102, 1999

통계 및 프리커서 방법을 이용한 제 23 주기 태양활동예보
PREDICTION OF 23RD SOLAR CYCLE USING THE STATISTICAL AND PRECURSOR METHOD

장세진, 김갑성
경희대학교 우주과학과
SE JIN JANG AND KAP-SUNG KIM
Department of Astronomy & Space Science, Kyung Hee University
Received Nov. 3 1999; Accepted Nov. 19, 1999

ABSTRACT

We have made intensive calculations on the maximum relative sunspot number and the date of solar maximum of 23rd solar cycle, by using the statistical and precursor methods to predict solar activity cycle. According to our results of solar data processing by statistical method, solar maximum comes at between February and July of 2000 year and at that time, the smoothed sunspot number will reach to 114.3 ~ 122.8. while precursor method gives rather dispersed value of 118 ~ 171 maximum sunspot number. It is found that prediction by statistical method using smoothed relative sunspot number is more accurate than by any method to use any data of 10.7cm radio fluxes and geomagnetic *aa, Ap* indexes, from the full analysis of solar cycle pattern of these data. In fact, current ascending pattern of 23rd solar cycle supports positively our predicted values. Predicted results by precursor method for Ap_{avg}, aa_{31-36} indexes show similar values to those by statistical method. Therefore, these indexes can be used as new precursors for the prediction of 23rd or next solar cycle.

Key words : prediction of solar activity cycle, statistical method, precursor method.

1. 서론

태양 표면의 흑점, 플레어, 코로나 질량 방출(CME), 폭발적 전파방출(radio burst) 등의 여러 가지 활동현상으로 막대한 에너지의 복사선과 입자들이 태양-지구 및 행성간 우주 공간으로 방출되어 지구 주변에는 지자기 교란, 양성자 사태, 고층 대기의 밀도 증가로 인한 위성의 끌림(drag) 현상, 전파 ㅏ 통신장애 현상 등이 나타난다. 특히 21세기 정보 통신 기술의 발달로 인한 정보화 사회를 앞두고 각종 목적으로 발사된 위성들의 작동 환경과 국가 기반 산업인 전자, 전기, 통신 시스템에 심각한 영향을 주고 있으며, 나아가 인류의 생존을 위협하고 있는 이상기후 현상도 태양 활동과 관계가 있음이 알려 지고 있다. 이렇듯 태양 활동은 지구 주변 환경뿐만 아니라 인간의 생활에 막대한 영향을 미치고 있다.

태양 활동 예보는 크게 세 가지로 나누어지는데 1 - 2일 단위로 X선 폭발과 프로톤 증가를 예보하는 단기 예보, 태양 자전 주기의 반에 상당하는 12 - 15일 단위로 발생하는 플레어와 태양 흑점 수를 예보 하는 중기 예보, 11년 태양 주기 단위로 흑점 발생 수를 예측하는 장기 예보가 있다. 장기 예보의 경우 전반적 태양 활동에 대한 평가를 내려, 중, 단기 예보에 도움을 주며, 중, 단기 예보의 경우 실질적인 우주 환경 및 우주 기상에 대한 예보 및 예상을 통한 각종 계획수립에 사용되어질 수 있다. 중, 단기 예보의 경우 국내 학자(이진이& 김갑성, 1996)들에 의해서도 연구가 되었지만 아직까지 국내의 장기 예보에 관한 논문은 발표되지 않고 있다.

태양 활동의 장기 예보는 태양활동 주기예보라 하며 해당 주기의 상대 흑점 수의 최대값과 그 최대값을 갖는 극대기를 결정해야 한다. 태양 주기 예보 방법으로는 세 가지가 있는데, 첫 번째 방법은 연속된 데이터의 파워 스펙트럼을 통한 주기 분석으로 다가오는 주기에 외삽하여 예보하는 방법으로서 태양 주기 자체가 매우 다양한 행동을 보여주고 있어 이 방법은 많은 한계를 가지는 것으로 나타나 지금은 거의 사용되지 않고 있다.

둘째 방법은 태양 활동의 장기간 경향을 분석하여 다가오는 주기에 외삽하는 장 주기 (Secular Cycle로서 약 80년 주기를 갖는 Gleissberg cycle)분석 방법으로서 1957년 최대치(19주기) 이후 태양 활동의 위축을 예보했으나 주기 21, 22를 포함한 지난 35년은 큰 주기가 계속되었다.

세번째 방법은 확장 주기의 개념을 사용한 프리커서 방

법(Precursor Method)이다. 확장 주기의 개념은 태양 주기의 시작은 전 주기가 끝나기 전에 시작한다는 것으로서 이 개념을 도입하여 전 주기의 쇠퇴기의 태양 활동에 직·간접적으로 관계되어진 여러 데이터를 이용하여 그 주기 태양 활동을 예보하는 것이 프리커서 방법이다. 이 방법은 현재 대다수 학자들에게 가장 효율적인 예보 방법으로 받아들여지고 있다.

현재 주기 23의 극대기를 앞둔 상태에서 그 동안 많은 학자들이 위와 같은 방법을 사용하여 다양한 결과의 예보를 하였다. Khaled H.와 동료들(1997)은 주기 22의 쇠퇴기 마지막 30주기 23의 최대 상대 흑점 수를 158(±18)로 예보했으며, Schatten, K. et al. (1996)은 SODA(SOlar Dynamo Amplitude) 지수와 태양 활동의 적도 방향 진행을 고려하여 평균 상대 흑점 수가 2000년 5월±9개월에 138(±30)개로 나타날 것이라 예보했다. S. Bravo, G. A. Stewart(1997)는 극 코로나 홀의 크기 변화와 흑점 주기가 태양활동 주기의 약 반 정도의 시간 차이를 가지고 상관관계가 상당히 좋음을 이용하여 주기 23을 2001년 초에 약 190개의 활동성을 보일 것으로 예보하고 있다. Zhang Quiqing(1997)은 주기 상승기 때의 흑점 변화율과 상대 흑점 수를 통계처리 하는 방법으로 주기 23의 최대흑점수를 평균 정도의 활동성인 128개로 예보했으며, Hanslmeier et al.(1999)은 통계적인 여러 방법을 조합하여 2000년 초에 160개의 활동성으로 예보했다. 그 밖에 Wilson(1988)은 상대 흑점 수 175±40, Kopecky(1991)는 1년 평균 흑점 수로 최대 208.3, Makarov와 Michailutsa(1992)는 1년 평균 흑점 수로 최대 210±10, Obridko et al(1992)는 1년 평균 흑점 수로 최대 200±25, Zhao(1991)는 100개 이상으로 예보했다.

정리하면, 통계적인 방법을 사용한 학자들은 진행 중인 주기 23을 상대 흑점 수 약 100개에서 200까지의 상당히 큰 폭으로 예보하고 있으며 프리커서 방법을 사용한 학자들은 역대 두 번째 정도의 큰 주기로 예보하고 있다.

본 논문에서는 미 국립지리자료센터(National Geographical Data Center, 이하 NGDC로 칭함)에서 구한 태양 상대 흑점 수와 흑점 지수 자료 센터(Sunspot Index Data Center, SIDC)의 각 주기 분류자료에 통계적인 방법과 프리커서 방법을 적용하여 현재 진행중인 주기 23의 상승 패턴을 분석하고 23주기의 최대값과 그 시기를 결정하였다. 또한 현재까지 진행된 23주기 상대 흑점 수 변화와 10.7cm 전파 플럭스 변화 데이터를 사용하여 나타난 결과를 고찰을 하였다. 2장에서는 통계적 방법과 프리커서 방법을 이용하여 지나간 주기 21, 22에 대한 수치예보를 수행하고 이를 실제 관측치와 비교하여 예보방법을 검증하였으며 이를 근거로 현재 진행 중인 주기 23의 예보 결과를 제시하였다. 3장에서는 주기 21, 22, 23 예보에 대한 결과 분석과 현재 33개월 이상 진행된 주기 23의 데이터를 비교하였으며 4장에서는 토의 및 결론을 기술하였다.

2. 태양활동 예보

2.1. 태양활동 예보자료

일반적으로 통계적 방법을 이용한 태양 활동예보에는 태양 상대 흑점 수, 10.7cm 전파 플럭스 자료 등이 사용되고, 프리커서 방법에 의한 태양 활동예보에는 지자기 인덱스, 극 자기장 세기, 주기의 초기 흑점위도 등이 사용된다. 이들 데이터는 NGDC의 FTP 사이트에서 얻을 수 있다. NGDC의 경우 태양 흑점 데이터는 태양 활동 1 주기인 1755년 3월부터의 데이터를 일별(daily), 월별(monthly), 13개월 평균 (smoothed monthly)별로 각각 나누어서 제공하고 있으며 10.7cm 전파 플럭스는 1947년부터 하루, 한 달, 일년 평균으로 제공하고 있다.프리커서 방법에 사용되는 지자기 데이터는 aa 지수의 경우 주기 11에 해당하는 1868년부터, 그리고 Ap 지수의 경우 주기 17에 해당하는 1932부터 각각 한달 및 일년 평균 등으로 제공된다.

이 데이터들을 사용하여 태양 활동의 대표적 지수인 다음 주기의 태양 최대 상대 흑점 수를 예보하게된다. 다만 한 달 평균값으로 사용할 경우 데이터 자체의 다양한 변화 때문에 정확한 예보가 불가능하다. 따라서 일반적인 태양 활동 예보에서 사용되는 각 데이터의 형태는 12개월 또는 13개월 평균값을 사용하고 있다. 본 논문에서는 흑점 데이터의 경우 13개월 평균값을 그대로 사용하였고 나머지 다른 데이터들의 경우에는 한 달 평균값을 다음 식(1)에 따라 13개월치 흑점수가 평균된 값으로 변환하여 사용하였다.

$$R_i = \frac{1}{12}\left(\sum_{j=-5}^{5} r_{i+j} + \frac{r_{i-6}}{2} + \frac{r_{i+6}}{2}\right). \qquad (1)$$

여기서 R_i은 i 달의 13개월 평균값이고 r_i 는 i 달의 한 달 평균값이다.

2.2. 통계적 방법(*Statistical Method*)

주기 1에서 주기 22까지의 태양 활동 주기에 나타난 일반적인 경향을 찾아 분석하는 방법으로 역대 활동 주기에서 나타나는 일반적인 활동 경향은 첫째, 각 주기 최소 상대 흑점 수와 최대 상대 흑점 수 간의 상관 관계가 상당히 높으며, 둘째, 흑점 최대값에 도달하는 시간이 빠르면 최대 흑점 수가 크고, 느리면 최대 흑점 수가 작은 역관계가 있다는 것, 셋째, 홀수 주기는 그 앞의 짝수 주기보다 일반적으로 더 큰 활동을 보이는 것이다. 이런 세 가지 관계를 이용하여 많은 학자들은 각 주기를 예보해 왔고 또 한 23주기를 예보하고 있다. 본 논문에서는 처음 두 가지의 통계적 특성을 이용하여 다가오는 23주기의 활동 규모와 시기를 예보했다.

각 주기별로 나누어진 13개월 평균 상대 흑점 수를 가지고 각 주기의 최소 상대 흑점 수(R_{min}) 와 최대 상대 흑점 수(R_{max}) 그리고 상승기간(AD)를 구하여 표 1 과 같이 정리하였다. 여기서 상승기간이란 각 주기의 극소기인

시작점에서 극대기까지의 도달 기간을 말한다. 주의할 사실은 대부분 해당 주기의 최대값이 하나의 극대기에서 나타나지만 극대 값이 둘 또는 세 개 존재하는 경우가 있어 극대기를 정하기 어려운 경우가 있었다.

본 논문에서는 다른 보정을 가하지 않고 가장 큰 값을 갖는 그 시기까지를 상승기간으로 설정하여 프로그램을 구현하여 데이터를 만들었다. 또한 표 2는 극소기로부터 24개월, 33개월까지의 상대 흑점 수의 증가율(기울기)이다. 여기서 특별히 33개월을 택한 이유는 현재 23주기가 시작점에서 33개월이 진행 되었기 때문이다. 그림 1은 제 1주기에서 6주기, 19주기에서 23주기까지 주기별 상대 흑점 수 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

또한 각 주기의 상대적 활동성을 분석하기 위하여 주기 1에서 주기 22까지의 평균 그래프를 분석해야만 한다. 상대 흑점 수의 역대 평균 그래프를 분석하는데 있어 어려운 것은 모든 주기의 길이가 일정하지 않다는 것이다. 그림 2는 주기 1에서 22주기까지의 22개의 상대 흑점 수 변화 그래프를 하나의 그래 프에 나타낸 것이다.

여기에서 모든 주기의 시작점은 그 주기의 상대 흑점 수가 최소인 시점으로 설정하였는데 가장 긴 주기는 주기 4로서 164개월이었고 가장 짧은 주기는 주기 2로서 108개월이었다. 표 1에서 보는 바와 같이 가장 활동이 활발했던 주기는 주기 19로서 최대 상대 흑점 수는 201.3개이고, 가장 활동이 작았던 주기는 주기 6으로서 최대 상대 흑점 수가 48.7이다. 또한 역대 최고의 활동성을 보이는 주기들이 최근 19, 21, 22에 있음은 주목 할 부분이다.

22주기의 상대 흑점 수 변화의 평균 그래프를 작성하기 위하여 그림 2와 같이 중첩한 각각의 그래프에서 같은 달에 해당하는 각 주기 흑점 수의 합을 더해진 주기의 개수로 나누면 그림 3의 평균 그래프 곡선을 구할 수 있다. 이 그래프는 상대 흑점 개수에 대해서는 평균이라는 의미를 담고 있지만 각 주기의 지속 기간의 평균을 의미하지는 않는다. 따라서 평균 그래프의 주기는 지속기간이 가장 길었던 주기 4의 164개월이며 이 자체는 큰 의미를 갖지 않는다.

주기 1에서 22까지의 평균 그래프 분석을 통하여 태양 활동의 평균 수준에 대한 이해를 할 수 있다. 이 평균 그래프는 최대 상대 흑점 수 101.514, 상승기간 44개월을 갖는 것으로 분석되었다. 이 평균 그래프는 현재 23주기의 상대 흑점 수 변화량과 각 주기의 상대 흑점 수의 비교 과정에서 함께 비교 될 것이며 각 주기 및 주기 23의 예보치에 대한 상대적 활동성을 가름하는 기준이 될 것이다.

표 1과 2에서 구한 각 주기의 최소, 최대값 및 상승기간과 24개월, 33개월 기울기 값들로부터 식 (2)의 상관관계 계수식을 이용하여 태양 주기의 일반적 통계 특성인 최소값과 최대값, 기울기와 최대값 그리고 최대값과 상승기간 사이의 상관관계를 분석하였다.

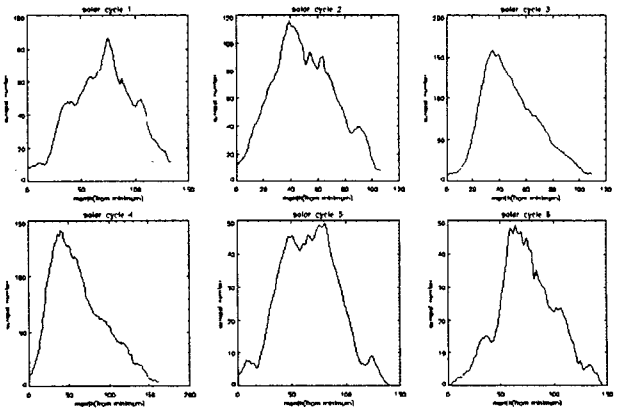

그림 1.— 제 1~6주기 및 19~23주기의 13달 평균 그래프.

$$r = \frac{\sum_{i=0}^{N-1}\left(x_i - \sum_{k=0}^{N-1}\frac{x_k}{N}\right)\left(y_i - \sum_{k=0}^{N-1}\frac{y_k}{N}\right)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1}\left(x_i - \sum_{k=0}^{N-1}\frac{x_k}{N}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1}\left(y_i - \sum_{k=0}^{N-1}\frac{y_k}{N}\right)^2}} \quad (2)$$

상관계수가 0.7이상이 되면, 두 데이터간의 회귀분석(regression analysis)을 통하여 상관함수를 구한 후 23주기의 최대값과 상승기간을 추정, 예보하였다.

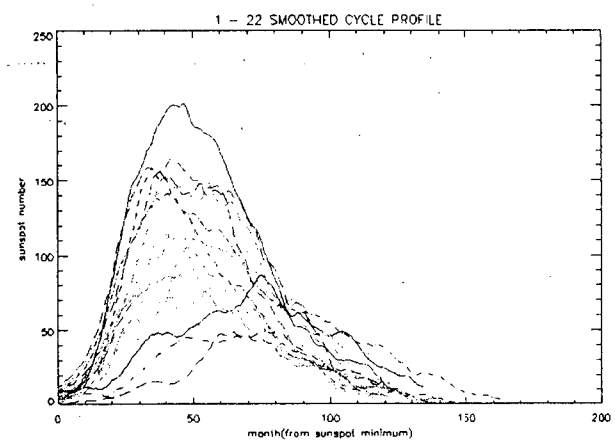

그림 2.— 주기 1 - 22의 13달 평균 흑점 수 그래프.

2.2.1. 태양 주기 *21*, *22*의 예보

본 연구에서 사용한 통계적 방법의 정확성을 점검하기 위해 이미 지나간 주기 21, 22에 적용, 그 활동성의 예보치와 실제 관측치를 비교, 분석하였다. 사용한 자료는 최소 상대 흑점 수, 24개월 기울기, 33개월 기울기 값이며 이것으로 주기 21과 22의 활동성을 예보하는 방법은 다음과 같다. 먼저 주기 1에서 20까지의 활동성을 알고 있다 가정하

표 1.— 각 주기의 최소, 최대값과 상승기간

CYCLE	R_{min}	R_{max}	AD	CYCLE	R_{min}	R_{max}	AD
1	8.4	86.5	76	13	5.0	87.9	47
2	11.2	115.8	40	14	2.7	64.2	49
3	7.2	158.5	36	15	1.5	105.4	49
4	9.5	141.2	42	16	5.6	78.1	57
5	3.2	49.2	82	17	3.5	119.2	44
6	0	48.7	66	18	7.7	151.8	40
7	0.1	71.5	79	19	3.4	201.3	48
8	7.3	146.9	41	20	9.6	110.6	50
9	10.6	132.0	56	21	12.2	164.5	43
10	3.2	98.0	51	22	12.3	158.5	35
11	5.2	140.3	42	23	8.0	?	?
12	2.2	74.6	61				

표 2.— 각 주기별 24개월, 33개월 상대 흑점 수 변화율

CYCLE	24개월기울기	33개월기울기	CYCLE	24개월기울기	33개월기울기
1	0.5125	1.03939	13	2.375	2.16061
2	2.17917	2.27273	14	1.36667	1.44545
3	2.95417	4.27879	15	1.95	1.58182
4	3.495383	3.52727	16	1.72917	1.80606
5	0.320833	0.66667	17	1.60417	2.08788
6	0.266667	0.42727	18	2.20417	3.09394
7	0.591667	0.75152	19	4.4125	4.87576
8	3.05	3.58485	20	2.22917	2.47576
9	1.1625	1.33939	21	2.95833	3.59697
10	1.29583	1.74242	22	4.225	4.38182
11	2.4875	2.92121	23	2.02083	2.26061
12	1.64167	1.62121			

고 20개 주기의 자료로 상관계수를 구하고 회귀분석방법으로 상관 함수를 결정한 후 주기 21의 최소 상대 흑점 수를 넣어 주기 21의 극대기와 최대 흑점수를 예보하였다. 주기 22의 경우도 동일한 방법으로 주기 1~21까지의 21개 데이터를 이용하여 예보하고 실제 관측치와 비교해 보았다. 또한 역대 최고의 예외적 활동성을 보인 주기 19를 제외한 나머지 자료를 이용하여 주기 21과 22를 예보해 보았는데 그 결과는 표 3과 같다.

표 3에서 보는 바와 같이 전체적으로 실제 관측값보다 7 - 18개정도 작은 값을 예보하고 있다. 주기 19를 제외한 경우가 상대적으로 더욱 정확한 예보를 했으며, 데이터가 1개 더 많은 주기 22의 예보가 더 정확했다. 주기 22의 예보가 더욱 정확했다는 것은 사용한 데이터 개수가 한 개 더 증가하는 주기 23의 예보가 더 정확할 수 있다는 것을 뜻한다.

2.2.2. 태양 주기 *23*의 예보

표 1에서 예외적이었던 주기 19를 제외하면, R_{min} 과 R_{max} 사이의 상관 계수는 $\gamma = 0.724$ 이고 이들 자료를 이용하여 최소자승법으로 구한 상관 함수는 식 (3)과 같다.

$$R_{max} = 6.93 \times R_{min} + 67.4 \qquad (3)$$

또한 AD와 R_{max} 의 상관 계수도 주기 19를 제외하면, $\gamma = -0.789$ 로 구해지고 여기서 얻어진 함수는

$$R_{max} = -2.1 \times AD + 218.4 \qquad (4)$$

와 같다. 여기에서 $-$ 부호의 의미는 역관계가 성립한다는 것이다. 위에서 얻어진 함수를 사용하여 주기 23의 태양 활동을 예보할 수 있다. 이미 진행중인 주기 23의 시작점의 최소흑점수가 $R_{min} = 8.0$로 이를 (3)식에 대입하면 최

표 3.— 상대 흑점 수 최소값과 최대값과의 상관관계 분석을 통한 주기 21, 22 예보치와 관측치 비교

		CYCLE 21	CYCLE 22
CYCLE19 포함	r	0.46	0.521
	Fitting function	$R_{max} = 5.4R_{min} + 80.195$	$R_{max} = 5.84R_{min} + 78.524$
	Prediction	146	150.4
	Observation	164.5	158.5
CYCLE19 제외	r	0.638	0.692
	Fitting function	$R_{max} = 6.36R_{min} + 69.533$	$R_{max} = 6.78R_{min} + 67.95$
	Prediction	147.1	151.4
	Observation	164.5	158.5

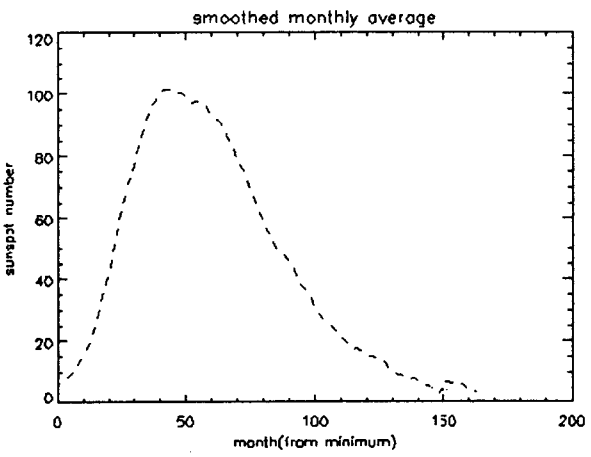

그림 3.— 전체 주기의 13달 평균 흑점 수 그래프.

대 흑점수 값을 $R_{max} = 122.8$개로 구할 수 있고 이 R_{max} 값을 (4)식에 넣어 극대기 도달기간을 AD = 45.5개월로 결정할 수 있다.

마찬가지로 표 5에서 24개월, 33개월 기울기와 최대 상대흑점수 간의 상관계수는 각각 r=0.852 , r=0.912 이며 여기서 얻어진 함수는 각각

$$R_{max} = 32.3435 \times (24개월기울기) + 48.9042 \quad (5)$$

$$R_{max} = 30.6534 \times (33개월기울기) + 42.685 \quad (6)$$

이며 주기 23의 24개월 기울기, 33개월 기울기는 각각 2.02083, 2.26061이므로 주기 23의 흑점상대수 최대값과 극대기 도달기간은 각각

$$R_{max} = 114.3, AD = 49.6(24개월기울기) \quad (7)$$

$$R_{max} = 120.0, AD = 50.7(33개월기울기) \quad (8)$$

로 결정되었다.

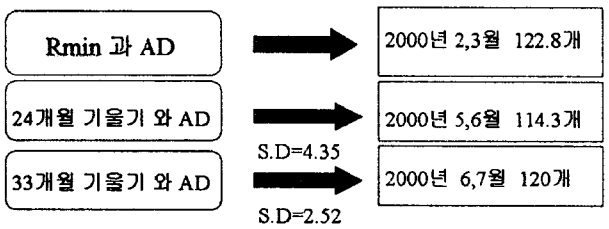

그림 4.— 통계적 방법에 의한 제 23 주기의 태양활동예보 결과.

이상과 같이 최소 상대 흑점 수와 24, 33개월 상대 흑점 수 증가율을 이용한 통계적 방법으로 주기 23의 활동성을 예보한 결과, 그림 4에 나타난 바와 같이 극대기는 2000년 2월 - 7월 사이에 도달되며 그때의 최대 흑점수가 114.3 - 122.8개로 예보되었다.

2.3. 프리커서 방법(*Precursor Method*)

통계적 방법과 마찬가지로 태양활동의 프리커서로 사용할 수 있는 물리량을 주기적인 지자기 *aa*, *Ap* 지수 값에서 추출하였다. *Ap*와 *aa* 지수 를 사용한 이유는 이들이 지자기 활동의 대표적 1일 활동 지수이고 측정기간이 오래되어 데이터 수가 많기 때문이다.

본 논문에서는 일반적으로 자주 사용 되는 *aa*, *Ap* 지수의 주기 시작값(aa_{min}, Ap_{min})과 *aa*의 각 주기 마지막 최대값(aa^*_{max}) 및 주기 종료전 3년간의 *aa*, *Ap* 지수 평균값(aa_36, Ap_{36})을 기본적으로 사용하여 다른 학자들의 예보치와 비교하였다.

또한 새로운 프리커서로서 각 주기 시작 전후 18개월의 *Ap* 지수 평균값 (Ap_{avg}) 과 해당 주기의 Ap 지수 최소값(Ap_{36min}) 및 주기 종료 31개월에서 36개월 전까지 6개월간의 *aa* 지수 평균값(aa_{31-36})을 사용하였다. 그림 5는 프리커서 방법에 사용되어질 각 프리커서의 위치를 주기 11에서 22까지의 평균 *aa* 그래프에 나타낸 것이다.

표 4.— 주기별 각각의 프리커서 값

CYCLE	aa_{min}	Ap_{min}	aa^*_{max}	aa_{36}	Ap_{36}	Ap_{avg}	Ap_{36min}	aa_{31-36}
11			24.4375	7.0124				9.2333
12	6.7542		20.7167	11.4655				15.8000
13	11.2458		15.3917	6.3166				14.6670
14	6.1042		19.2458	9.3646				20.3170
15	8.2417		19.4125	13.3735				16.8330
16	10.3875		21.3375	15.0201				20.3170
17	15.6417	9.2917	26.5333	19.4244	15.4248	13.2974	10.2083	26.0000
18	23.1708	15.2500	31.6625	20.6293	18.9919	13.2951	10.8333	29.9170
19	17.8792	11.6250	22.3292	17.2332	12.1296	10.0324	7.70833	18.1670
20	15.1708	8.5417	30.7625	21.8353	16.2350	13.4097	10.8333	23.3330
21	22.2958	13.0833	27.6958	20.4683	15.6748	12.5347	9.9583	27.1830
22	18.2708	10.5417	29.5542	20.2948	14.5058	10.4155	5.0000	21.6170
23	18.8042	9.5417						

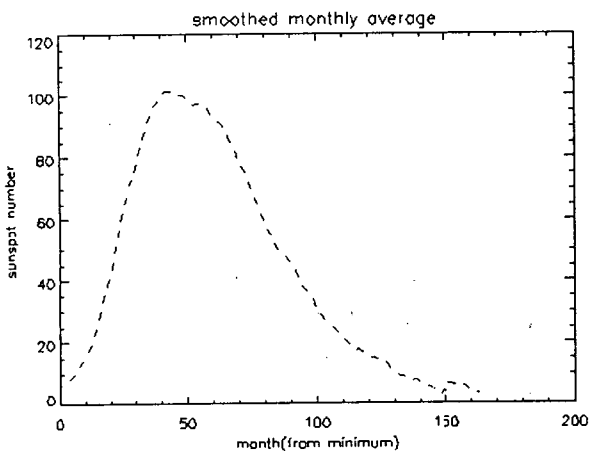

그림 5.— 각 프리커서(Precursor)의 위치.

이 그래프도 위의 흑점 평균 그래프와 마찬가지 방법으로 구해 주기 23 및 각 주기의 aa 그래프와 비교하였다.

주기별 각각의 프리커서는 표 4에 정리하였다. 이들 각각의 프리커서 값과 최대 상대흑점수 사이의 상관관계로 상관함수를 구해 다음 주기의 최대 상대 흑점 수를 계산하였고 이 최대 상대 흑점 수와 극대기 도달기간 사이의 상관함수 관계식에서 극대기를 결정하였다.

2.3.1. 태양 주기 21, 22의 예보

앞에서 설명한 바와 같이 aa_{min}, Ap_{min} ,aa^*_{max}, aa_{36}, Ap_{36}, Ap_{avg}, aa_{31-36} 지수자료를 프리커서로 사용하였고 이 프리커서 방법을 검증하기 위해 aa_{min}, aa^*_{max}, aa_{36}, Ap_{avg} 값을 이용하여 통계적 방법과 동일하게 주기 21, 22를 예보하고 관측치와 비교하였다. 그 결과는 표 5와 같다.

위의 결과에서 보듯 aa_{min}을 제외하고 나머지 프리커서들은 주기 22를 거의 정확하게 예보하고 있다. 주기 21의 경우는 aa^*_{max} 를 제외하고 상당히 유사하게 예보하고 있음을 보여준다.

2.3.2. 태양 주기 23의 예보

표 4에서 나타난 각 주기별 프리커서와 최대 상대 흑점 수간의 상관계수, 상관 함수, 최대값 및 상승 기간은 표 6과 같다. 여기에서 각 프리커서에 대한 회귀분석 과정에는 aa 지수의 경우 통계적 예외로 인정되는 주기 19를 제외했고 Ap 지수의 경우 데이터 개수가 많지 않아 모두 사용하였다. 특히 aa^*_{max} 의 경우는 주기 11을 제외하고 분석하였는데 그 이유는 주기 11의 경우 마지막 최대 영역이 존재하지 않은 경향을 보였기 때문이다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이 프리커서 방법에 의한 주기 23의 예보는 어떤 데이터를 프리커서로 사용하느냐에 따라 상당히 넓은 범위의 예보를 하고 있다.

표 5에서 보는 바와 같이 Ap_{min} 지수의 경우는 상관계수가 작아 적당한 프리커서 역할을 수행하기 어려우며, Ap_{36min}은 상당히 작은 활동성을 예보되었는데 이 예보치는 이미 주기 23이 넘겼으므로 유효하지 않다. 이들을 제외한 나머지 6가지 프리커서에 대한 예보 결과가 그림 6에 나타나 있다. aa^*_{max}, aa_36를 프리커서로 사용한 경우, 상당히 높은 활동성이 예보되었고 이미 1998년에 극대기가 지나갔다는 분석 결과가 나왔다. 그러나 현재까지도 주기 23의 상대 흑점수가 계속 상승하고 있는 것으로 보아 틀린 결과로 해석된다.

sloppy

표 5.— 프리커서 인덱스를 이용한 주기 21, 22의 예보치와 관측치 비교

Precursor		CYCLE 21	CYCLE 22
aa_{min}	r	0.802	0.833
	Fitting function	$R_{max} = 6.13aa_{min} + 32.289$	$R_{max} = 6.02aa_{min} + 33.392$
	Prediction	168.97	143.4
	Observation	164.5	158.5
aa^*_{max}	r	0.968	0.963
	Fitting function	$R_{max} = 8.57aa^*_{max} - 74.11$	$R_{max} = 7.77aa^*_{max} - 58.68$
	Prediction	189	156.5
	Observation	164.5	158.5
aa_{36}	r	0.842	0.864
	Fitting function	$R_{max} = 7.49aa_{36} + 9.23$	$R_{max} = 7.24aa_{36} + 12.06$
	Prediction	172.7	160.2
	Observation	164.5	158.5
Ap_{avg}	r	0.838	0.822
	Fitting function	$R_{max} = 20.2Ap_{avg} - 92.017$	$R_{max} = 18.62Ap_{avg} - 75.862$
	Prediction	178.8	157.5
	Observation	164.5	158.5

표 6.— 각 주기 프리커서에 대한 상관계수, 상관함수, 최대값, 상승기간

	r	상관함수	R_{max}	AD
aa_{min}	0.927615	$R_{max} = 5.48812\ aa_{min} + 36.1373$	139.3	39.7
Ap_{min}	0.520007	$R_{max} = 6.86482\ Ap_{min} + 72.8006$	138.3	38.1
aa_{36}	0.887520	$R_{max} = 6.91973\ aa_{36} + 17.6467$	158.1	28.7
Ap_{36}	0.999263	$R_{max} = 13.2344\ Ap_{36} - 50.3240$	141.7	36.5
aa^*_{max}	0.962521	$R_{max} = 7.80106\ aa^*_{max} - 59.2431$	171.3	22.4
Ap_{avg}	0.822057	$R_{max} = 18.6225\ Ap_{avg} - 75.6988$	118.3	47.7
Ap_{36min}	0.889003	$R_{max} = 22.3535\ Ap_{36min} - 64.1450$	47.6	81.3
aa_{31-36}	0.958870	$R_{max} = 8.07987\ aa_{31-36} - 47.5747$	127.1	43.5

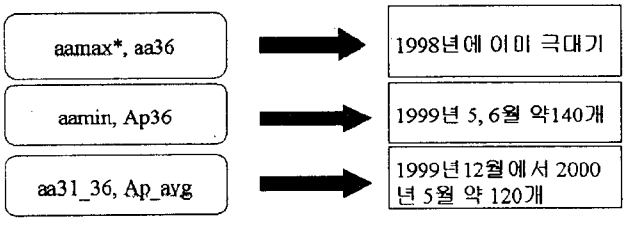

그림 6. — 프리커서 방법을 이용한 주기 23 예보 결과.

aa_{min}, Ap_{36} 의 경우 1999년 5, 6월에 최대 상대 흑점수 약 140개 정도의 활동성을 보일 것으로 예보되었는데 13개월 평균 흑점 수를 사용하였기 때문에 2000년 1, 2월이 지나야 예보 결과의 정확성을 알 수 있을 것이다. 또한 통계적 방법과 매우 비슷한 예보를 하고 있는 aa_{31-36}, Ap_{avg}의 경우, 1999년 12월에서 2000년 5월에 약 최대 흑점수가 120개 정도 될 것으로 예보했다.

3. 결과 및 분석

3.1. 주기 21, 22의 분석 결과

통계적 방법을 이용한 주기 21, 22의 분석 결과는 실제 관측치보다 7 - 18개 정도 작은 값을 예보하고 있다. 주기 21에 비해 주기 22의 예보치가 실제 관측치에 가까운데, 이는 데이터 개수가 증가하면 그만큼 더 정확한 예보가 가능하기 때문으로 분석된다. 다만 최대 상대흑점 수와 상승기간의 상관관계 분석시 흑점수 최대값을 보정한다면 더 좋은 상관계수가 나올 것으로 예상되며 보다 정확한 극대기 결정이 가능할 것으로 여겨진다.

프리커서 방법에 의한 주기 21, 22의 분석 결과, 프리커서의 종류에 따라 분산이 매우 큰 수치가 예보되었으며 특

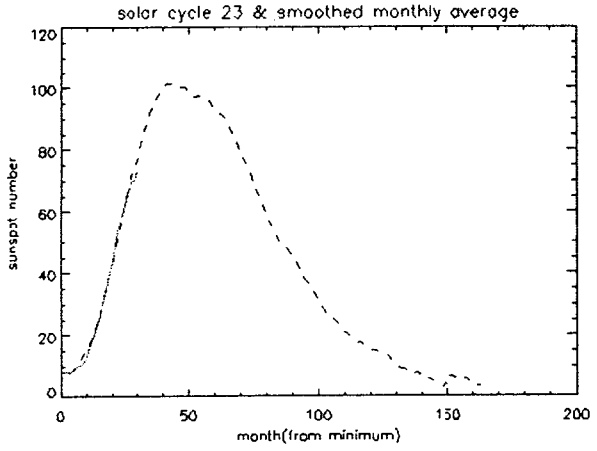

그림 7.— 주기 1~22의 상대흑점수를 모두 평균한 역대 평균그래프(점선)와 1999년 1월까지 나타낸 제 23 주기의 그래프(실선).

히 주기 22의 경우는 통계적인 방법보다 더 정확한 예보치가 도출되었다.

3.2. 태양 주기 23의 분석 결과

그림 4과 6은 각각 통계적 방법과 프리커서 방법을 이용하여 예측한 주기 23의 극대기와 그때의 최대 상대 흑점 수를 나타내고 있다. 통계적인 방법에 따르면 2000년 2월 - 7월에 114.3 - 122.8개로 예보되었으며 프리커서 방법에 의하면 aa^*_{max}, aa_{36} 지수의 경우, 이미 1998년에 극대기가 지나간 분석 결과가 나와 주기 23의 예보로는 부정확하고 aa_{min}, Ap_{36}의 경우 , 1999년 5, 6월에 최대 상대 흑점 수 약 140개 정도의 활동성을 보일 것으로 예보되었다. 통계적 방법과 매우 비슷한 결과를 보이는 aa_{31-36}, Ap_{avg}의 경우, 1999년 12월에서 2000년 5월 사이에 극대기가 오고 그때 최대 약 120개 정도의 흑점이 나타날 것으로 예보되었다.

3.3. 현재 태양 활동성과 예보 결과와의 관계

3.3.1. 평균 그래프와의 비교

그림 7은 주기 1에서 22까지의 평균 그래프와 현재 주기 23의 상대 흑점 수 변화 모습을 비교한 것이다. 이 그림을 통하여 알 수 있는 것은 주기 23의 흑점 수 증가율이 평균 그래프와 상당히 유사하게 진행되고 있다는 것이다. 평균 패턴의 활동성은 앞에서 언급한 바와 같이 R_{max}가 101.514이고 AD가 44개월이다

3.3.2. 각 주기 13달 평균 상대 흑점 수와의 비교

그림 8a과 8b는 각 주기별 상대흑점수의 프로파일, 전체 평균 프로파일 그리고 현재 1999년 1월까지의 주기 23 데이터를 주기별로 나누어 나타낸 것이다. 주목할만한 것은 주기 23의 현재까지의 패턴이 평균 태양활동 그래프를 거의 그대로 따라가고 있다는 사실이다. 물론 비슷한 패턴을 보이고 있던 주기 2, 11, 13, 15, 16, 17, 18, 20의 경우가 모두 평균과 같은 크기를 가졌던 것은 아니므로 이에 대한 해석은 요구되나 전반적으로 주기 13, 17, 20과 거의 비슷한 증가를 보여주고 있다.

3.3.3. 파장 10.7cm 전파 플럭스(F10.7)와의 비교

태양 활동의 또 다른 요소로서 F10.7 데이터를 분석하기도 하나, 본 논문에서는 흑점 데이터의 23주기 패턴에 대한 보조 자료로서 분석하였다. 태양 흑점 자료와 마찬가지로 각 주기별 전파자료를 13개월 평균값으로 변환한 후, 주기 시작점을 원점으로 하여 중첩시킨 각 주기별 자료를 모두 더해, 이를 자료수로 나누면 평균 프로파일이 구해지는데, 이것과 현재 주기 23의 패턴과 비교하고 흑점 데이터로 계산한 예보결과와 비교 분석하였다. 그림 9는 주기 18부터 22까지의 각 주기별 F10.7의 각 주기 그래프, 평균 그래프와 주기 23의 그래프를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 현재 주기 23의 F10.7은 평균에도 못 미치는 플럭스 세기를 나타내고 있으며 특이한 것은 주기 20의 흑점자료와 마찬가지로 F10.7의 데이터를 사용하더라도 제 20주기와 23주기의 상승 패턴이 매우 비슷한 것이다.

3.3.4. 지자기 데이터(aa, Ap)와의 비교

그림 10과 11에서는 지자기 데이터 aa 지수와 Ap 지수를 사용하여 상대 흑점 수와 F10.7과 동일한 방법으로 평균 그래프를 구하고 각 주기 그래프와 주기 23 그래프를 함께 비교하여 보았다. 두 그림에서 알 수 있는 것은 주기 23의 aa 지수의 경우 역대 주기 중에서 13, 18, 20과 유사하며, Ap 지수의 경우 주기 20과 상당히 유사하다는 것이다.

4. 토의 및 결론

실제로 통계적인 방법이나 프리커서 방법에서 가장 중요한 것은 각 방법에 사용된 각종 지수들이다. 서론에서 여러 다른 학자들이 사용한 지수들과 그로 인한 23주기 예보를 살펴보았다. 같은 종류의 지수를 사용하더라도 데이터를 처리하는데 있어 의미를 조금이라도 다르게 부여한다면 그 결과는 크게 달라질 수 있다. 본 논문에서는 통계적 방법에서 이미 다른 학자들이 사용해 본 R_{min}, AD를 사용하여 예보를 해 보았고 또한 23주기의 24개월, 33개월의 흑점 변화율인 기울기를 이용하여도 예보를 해 보았다. 통계적인 방법에서 태양 흑점 변화 자체의 지수를 사용한 다른 학자들과 상당 부분 비슷하게 예보되었다. 프리커서 방법에 있어서도 다른 학자들이 22주기나 23주기 예보에 사용하였던 aa_{min}, Ap_{min}, aa_{36}, Ap_{36}, aa^*_{max}을 지수로 사용해 보았고 독창적으로 태양 주기 22의 쇠퇴기 때 주기 23의 활동성에 영향을 줄만한 Ap_{avg}, Ap_{36min}, aa_{31-36} 지수

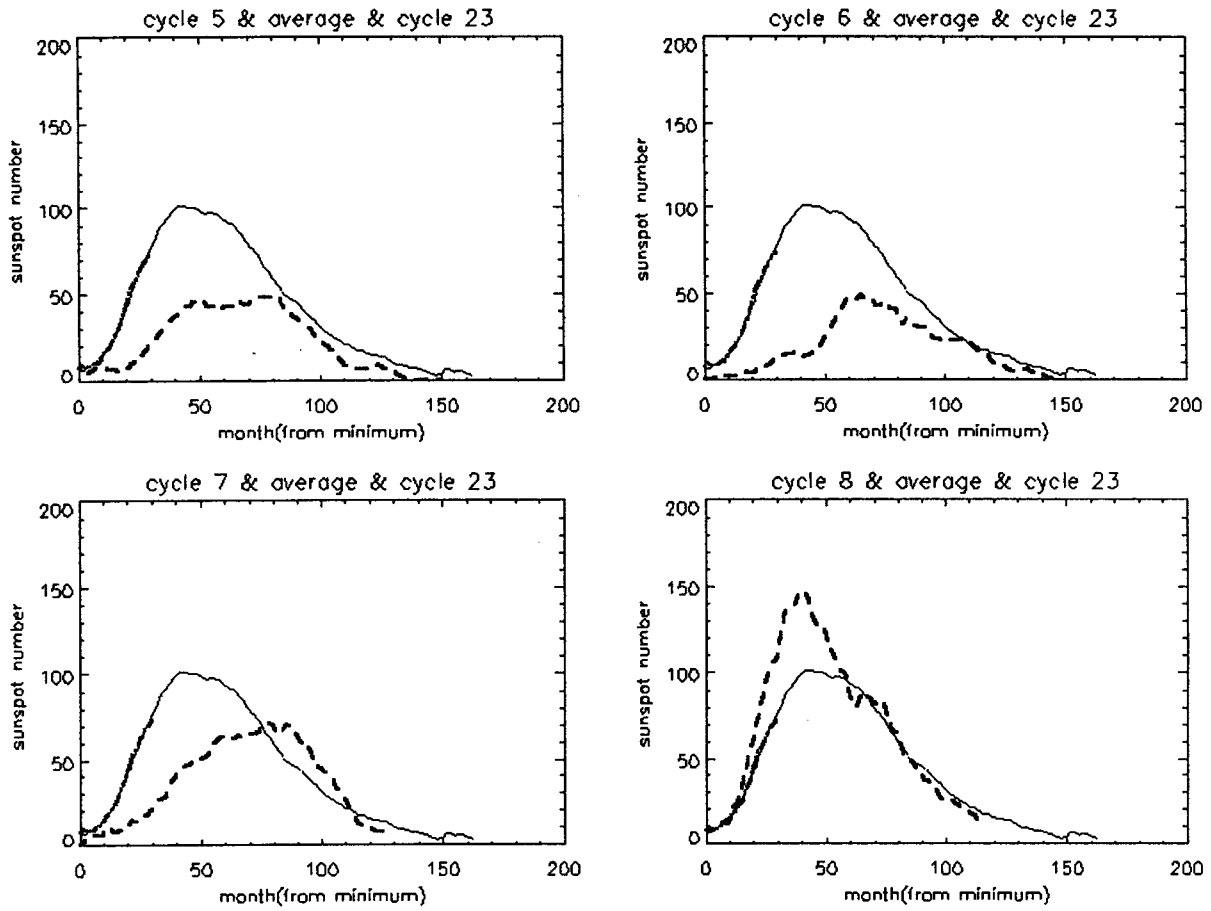

그림 8a.— 제 5~8 주기별 및 역대평균, 주기 23의 상대흑점수. 여기에서 가는 실선은 역대평균, 굵은 실선은 주기23, 점선은 해당주기를 나타낸다.

를 사용해 보았다. 전자의 지수들은 다른 학자들과 마찬가지로 태양 활동 주기 23을 상당히 높은 주기로 예보를 하고 있다. 그러나 본 논문에서 중요하게 여기는 것은 지수 Ap_{avg}, aa_{31-36}를 프리커서로 사용하여 현재까지의 23주기 상승 패턴을 분석한 결과, 보다 정확한 예보로 인정되는 통계적 방법에 의한 예보와 매우 유사한 결과를 보였다.

$aa_{36}, Ap_{36}, aa^*_{max}$ 을 지수로 사용해 보았고 독창적으로 태양 주기 22의 쇠퇴기 때 주기 23의 활동성에 영향을 줄 만한 $Ap_{avg}, Ap_{36min}, aa_{31-36}$ 지수를 사용해 보았다. 전자의 지수들은 다른 학자들과 마찬가지로 태양 활동 주기 23을 상당히 높은 주기로 예보를 하고 있다. 그러나 본 논문에서 중요하게 여기는 것은 지수 Ap_{avg}, aa_{31-36}를 프리커서로 사용하여 현재까지의 23주기 상승 패턴을 분석한 결과, 보다 정확한 예보로 인정되는 통계적 방법에 의한 예보와 매우 유사한 결과를 보였다.

따라서 태양 활동 주기 23을 예보하기 위해서 이전의 학자들이 사용한 프리커서 지수들은 부적당하며 새로운 지수로서 Ap_{avg}, aa_{31-36} 두가지를 제시하는 바이다.

예보의 정확성을 기하기 위해 R_{min} 과 R_{max} 간의 상관관계를 높여 최대 상대 흑점 수가 발생할 시기를 정확히 예측하기 위한 보완작업이 요구된다. 즉, 태양활동 주기 중에 두 개 이상의 정점값(peak value)을 갖는 경우가 몇 주기 있는데 이에 대한 보정으로 중간값 또는 이차 함수의 최소자승법으로 최대치를 결정해야 할 것으로 본다.

본 논문에서와 같이 보다 큰 값으로만 할 경우 주기 다른 하나의 정점값에 대해 고려하지 않았기 때문에 AD 같은 경우도 일반적으로 하나의 최대치를 가진 경우와 차이가 많이 나고 있다. 이런 부분을 보완해 나아간다면 보다 나은 주기 23의 태양 활동 예보가 될 것이다. 또한 역대 통계적 특성을 살펴보면 홀수 주기가 앞의 짝수 주기보다 작은 활동을 보였던 적은 단 한 번도 없었기에 이런 일반적인 특성을 이용하여 태양 활동을 예보하는 학자도 있었지만 위 결과와 같다면 역사상 처음으로 앞의 짝수 주기보다 작은 홀수 주기로의 결과를 남길 것이며 이에 대한 연구가 계속 되어야 한다.

마지막으로 보다 정확한 예보를 하기 위한 분석방법으

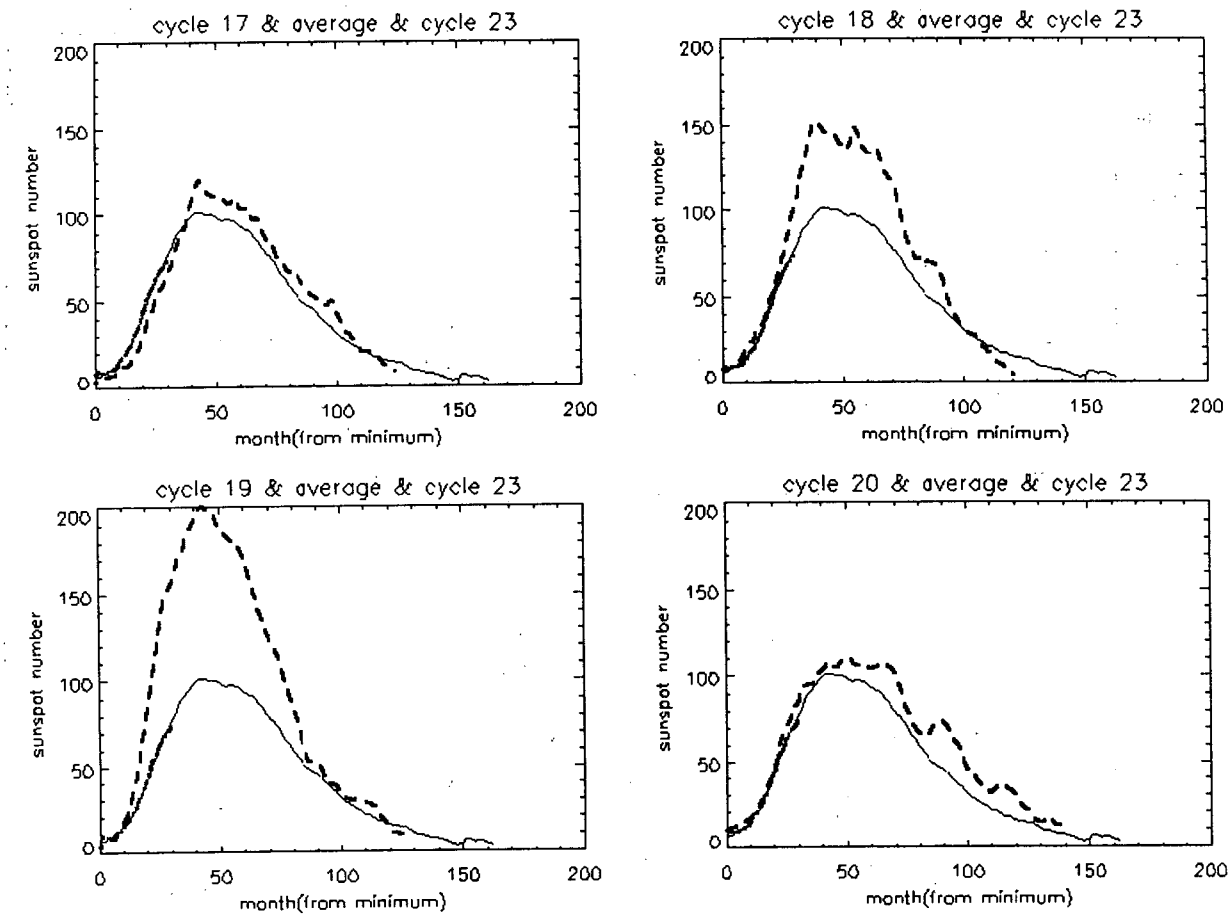

그림 8b.— 제 17~20 주기별 상대흑점수(굵은 점선)와 역대(주기1~22)평균 흑점수(가는 실선) 및 주기 23의 상대흑점수(진한 실선).

로 통계적 방법과 프리커서 방법에 사용될 새로운 지수들을 연구하여야 하며, 통계적 방법과 프리커서 방법 양쪽에 사용된 지수 모두를 이용하는 bivariate 및 multi-variate regression 방법을 사용하여 다가오는 태양 활동 주기 23을 예보하는 것이다. 이런 예보 방법의 다양화로 인하여 좀 더 정확한 예보가 가능할 것이다.

참고문헌

이진이, 김갑성, 1996, 천문학논총, 11, 263

Bambang Setiahadi et al. 1997, Proceeding of the 5th Solar-Terrestrial Prediction Workshop, CRL, Japan, 89

Bounar, K. H et al., 1997, Solar Physics, 176, 211

Bravo, S., G. A. Stewart, 1997, Solar Physics, 173, 193

Das, T. K., T. N. Chatterjee, A. K. SEN, 1993, Solar Physics, 148, 61

Guiqing Zhang, 1997, Proceeding of the 5th Solar-Terrestrial Prediction Workshop, CRL, Japan, 103

Hanslmeier, A. et al, 1999, Solar Physics, 184, 213

Kane, R. P., 1992, Solar Physics, 140, 171

Kopecky, Miloslav, 1991, Astronomical Institutes of Czechoslovakia, Bulletin, 42, No 3, 157.

Kurths, J., A. A. Ruzmaikin, 1990, Solar Physics, 126, 407

Lantos P., O. Richard, 1998, Solar Physics, 182, 231

Letfus, V. 1994, Solar Physics, 149, 405

Makarov, V. I., V. P. Mikhailutsa, 1992, Solar Physics, 137, 385.

Obridko, V. N. B. D. Shelting, 1992, Solar Physics, 137, 167

Oliver, R., J. L. Ballester, 1995, Solar Physics, 156, 145

Schatten, K. H., 1989, Solar Physics, 125, 185

Schatten, K. H. et al., 1996, Geophysical Research Letters, 23, No6, 605

Thompson, R. J., 1993, Solar Physics, 148, 383

Wilson, R. M., 1988, J. Geophys. Res., 93, 10011

Wilson, R. M., 1988b, Solar Physics, 117, 179

Wilson, R. M., 1990, Solar Physics, 125, 133

Wilson, R. M., 1990, Solar Physics, 125, 143

Wilson, R. M., 1990, Solar Physics, 127, 199

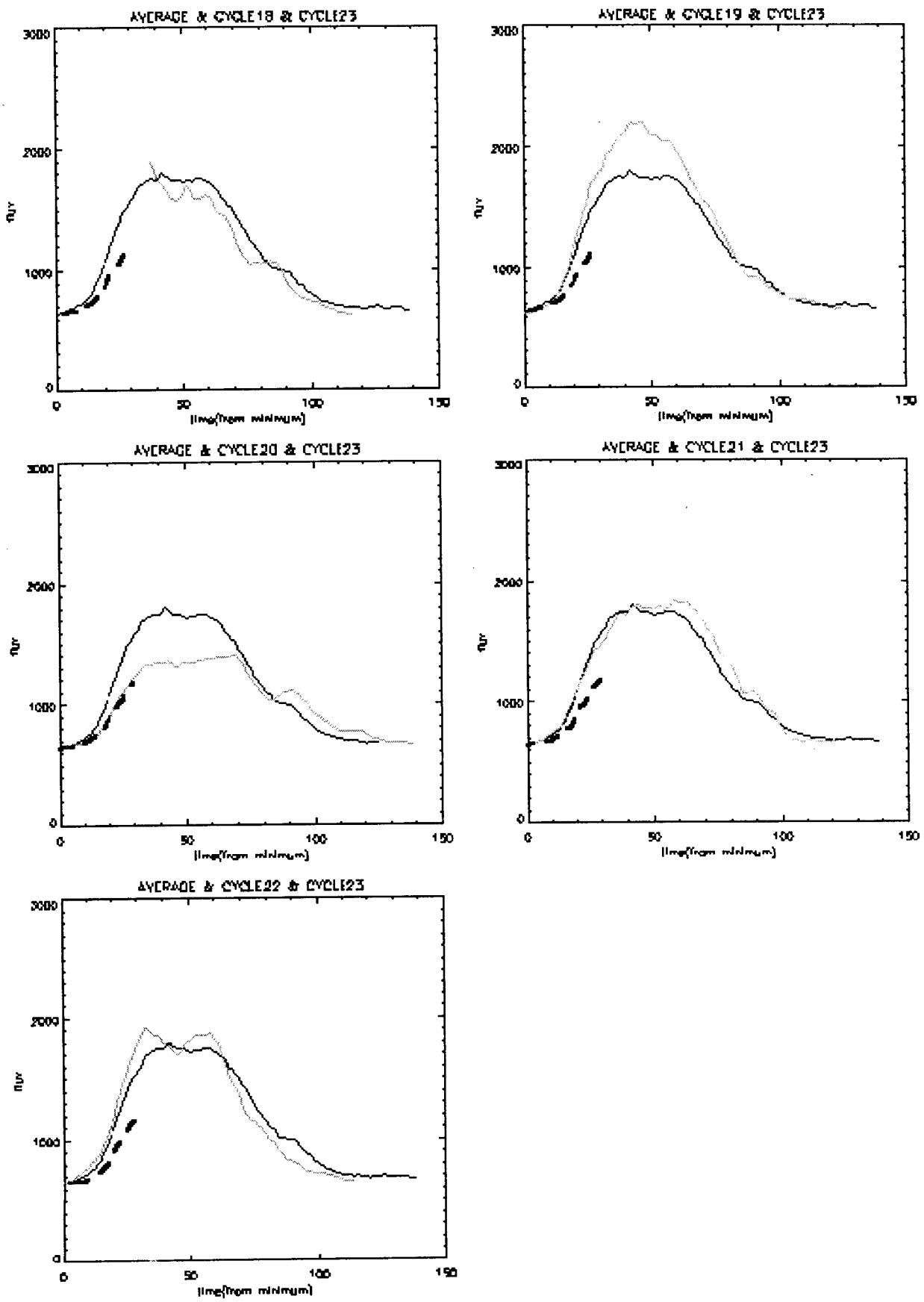

그림 9.— 파장 10.7cm의 전파플럭스양에 대한 제 18~22 주기별 변화와, 역대 평균플럭스, 현재의 태양활동 주기 23의 관측치. 여기에서 짙은 실선은 평균, 가는 실선은 각 주기, 점선은 주기23의 그래프를 나타낸다.

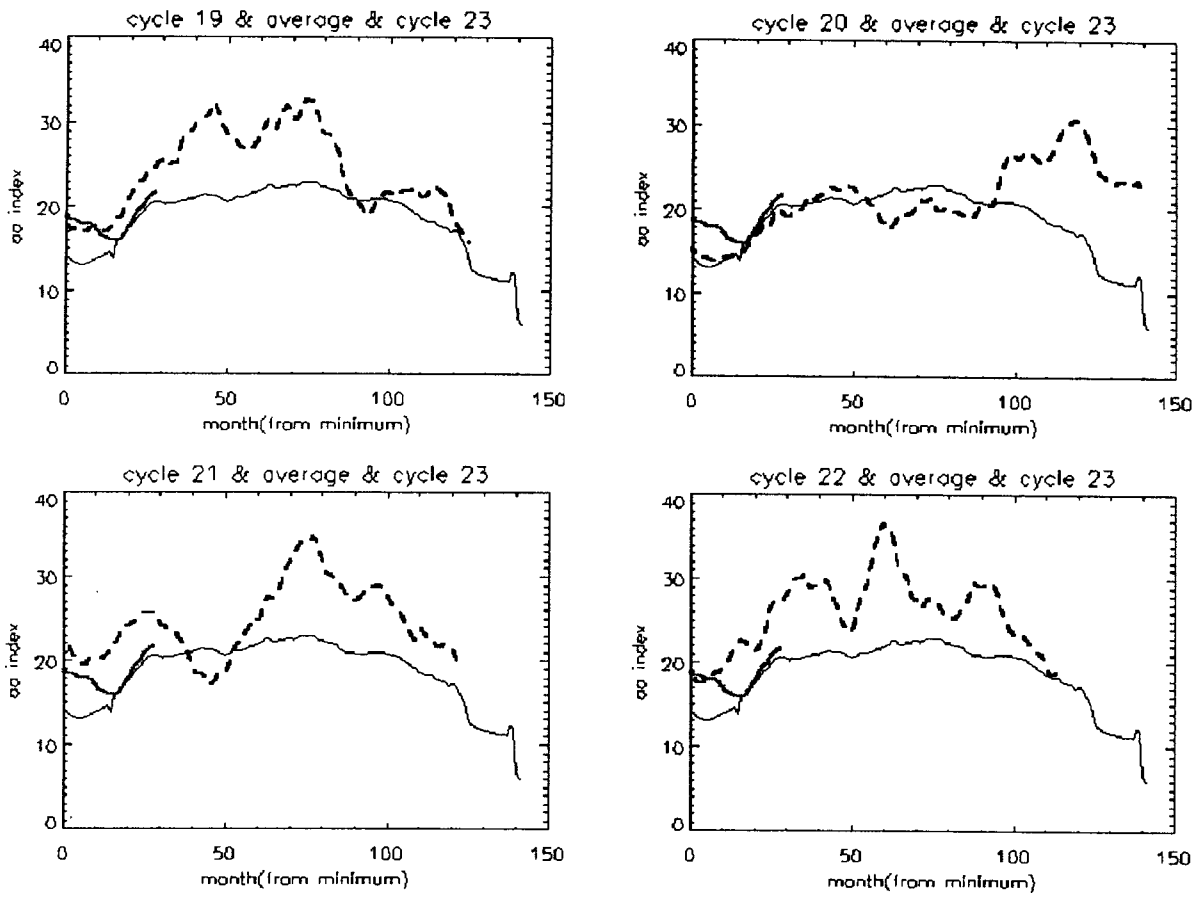

그림 10.— 제 15~20 주기의 개별 *aa* 지자기 지수(굵은 점선)와 전체 평균지수(가는 실선) 및 주기 23의 지수(진한 실선) 그래프.

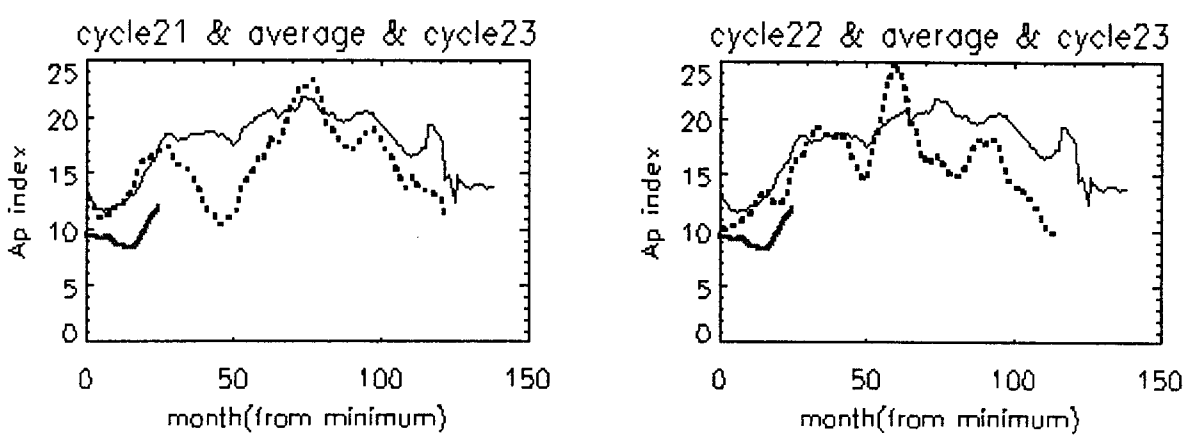

그림 11.— *Ap* 지자기 데이터의 각 주기, 평균, 주기 23의 비교 그래프. 굵은 점선은 개별 주기, 가는 실선은 평균값, 진한 실선은 주기 23의 그래프를 나타낸다.