

고려시대의 흑점과 오로라 기록에 보이는 태양활동주기
EVIDENCE FOR THE SOLAR CYCLE IN THE SUNSPOT AND AURORA
RECORDS OF GORYER DYNASTY

양홍진¹, 박창범², 박명구¹

¹경북대학교 천문대기과학과

²서울대학교 천문학과

YANG, HONG JIN¹, PARK, CHANGBOM², PARK, MYUNG GOO¹

¹Department of Astronomy and Atmospheric Science, Kyungpook National University

²Department of Astronomy, Seoul National University

(Received March 11, 1998; Revised November 18, 1998)

ABSTRACT

We have analyzed the sunspot and aurora data recorded in Go-Ryer-Sa. We have collected 35 records of sunspot observations for 46 days, and 232 records of auroral observations. To objectively estimate the periods of the solar activity appearing in these records a method of calculating the one-dimensional power spectrum from inhomogeneous data is developed, and applied to the sunspot and auroral data. We have found statistically significant 10.5 and 10 year periodicities in the distributions of sunspot and aurora records, respectively. These periods are consistent with the well-known solar activity cycle. There are indications of the long-term variations, but the period is not certain.

We have also calculated the cross-correlations between the sunspot and auroral data. In particular, we have divided the aurora data into several subgroups to study their nature. We conclude that the historical records of strong auroral activity correspond to non-recurrent magnetic storms related to the sunspots. On the other hand, the records of weak auroral activity are thought to be related with the recurrent magnetic storms which occur frequently due to the coronal hole near the sunspot minimum.

I. 머리말

태양계 안에 있는 여러 천체들은 오랫동안의 진화로 말미암아 力學的으로 안정된 상태를 유지하고 있으며, 변화는 週期性을 보이고 있다. 그 가운데에서도 태양은 내부 대류층에서 유체의 거대 대류운동과 차동자전의 상호작용으로 말미암아 자기장을 주기적으로 생성시키면서 여러

가지 활동을 일으키고 있다. 태양표면에서 관측되는 흑점, 플레어, 프로미넌스, 태양계 공간과 지구에 영향을 주는 태양풍 등의 활동들은 태양 내부에서 일어나는 磁氣流體力學的 現象을 이해하는 데에 중요한 실마리를 제공한다.

그런데 현대적 장비(망원경)로 태양을 체계적으로 관측하기 시작한지는 최근 약 300년에 불과하므로 태양 활동의 매우 장기적인 변화를 수백 년에서 수천 년에 걸쳐 살펴보기 위해서는 고대 국가들이 육안으로 관측하여 남겨놓은 역사적 기록들을 이용해야 한다. 과거에 태양활동과 직접 관련되어 체계적으로 관측된 현상은 태양의 흑점과 오로라 현상이었다.

태양의 흑점은 동양에서는 중국과 한국에 長期 관측자료가 남아있다. 최초의 기록은 漢나라 成帝 河平 원년(서기전 28년)의 기록¹⁾이다 (북경천문대 1988). 우리 나라에서는 <三國史記>에 高句麗 營留王 23년(서기 640)과 新羅 憲德王 14년 (822)에 흑점과 유사한 표현이 있고²⁾, 흑점이 분명한 기록은 <高麗史>에 高麗 肅宗 10년(1105)부터 기록이 전해온다(표 1 참조). 서양에서는 1611년에 요한 파브리시우스(Johann Fabricius)와 갈릴레오 등이 태양흑점을 발견한 이래로 본격적인 관측이 시작되었으며, 그 이전에는 14세기에 러시아에서 관측한 자료가 2개 있을 뿐이다 (Pannekoek 1961; Thurston 1994).

동양에서 오로라 관측기록은 흑점보다도 더 일찍 시작되었고 수적으로도 훨씬 많다. 그러므로 태양활동의 지표로서 오로라 현상은 흑점보다는 간접적이지만 중요한 가치를 지닌다. 中國의 경우 오로라를 표현한 기록으로 보이는 것은 周나라 昭王 말년 (서기전 약 950년), 漢나라 文帝 14년 (서기전 166) 등부터 나오고³⁾, 서기 1747년까지 약 총 294개가 전해온다 (劉君燦 1988). 우리 나라의 경우 <三國史記>에 나오는 高句麗 東明聖王 3년 7월 (서기전 35)의 기록을 필두로 三國과 下代新羅 時代에 12개 정도 전해오고, 高麗와 朝鮮시대에는 成宗 11년(993)부터 서기 1747년까지 무려 700개 이상에 이르는 세계에서 가장 龍大한 記錄이 남아있다 (표2 참조). 日本에서는 推古 28년 (620), 貞觀 원년 (859) 등의 기록이 최초의 기록이며⁴⁾, 1747년까지 총 50개 기록이 전해온다 (劉君燦 1988).

서양에서도 서기전부터 오로라가 관측되었다. Link(1962, 1964)에 따르면 유럽에서는 서기전 626년을 최초로 서기 1700년까지 594회의 오로라 관측기록이 전해온다 (Siscoe 1980). 오로라 현상이 과학자들의 관심을 받기 시작한 때는 18세기 초 유럽 지역에 오로라 현상이 갑자기 빈번하게 나타나면서부터이다. 17세기 중엽에서 18세기 초까지 태양활동이 크게 둔화되었던 마운더 극소기 (Maunder Minimum)가 끝나며 1707년에 독일, 1716년에 영국, 1720년에 이태리 등 천문학자들이 많이 있었던 유럽지역에서 오로라가 자주 나타나기 시작했다. 이 당시 유럽의

1 漢書 五行志 卷27에 “漢成帝河平元年三月乙未 日出黃 有黑氣大如錢 居日中央”이란 기록이 나온다.

2 三國史記 高句麗 本紀를 보면 營留王 23년 9월 “日無光 經三日復明”이, 新羅 本紀 憲德王 14년 7월 12일에는 “日有黑彙指南北”이란 기록이 있다.

3 <竹書紀年>에 “周昭王末年 夜濤(深) 五色光貫紫微”가, 漢書 郊祀志에 “漢文帝十四年 長安東北有神氣 成五采”라는 기록이 있다.

4 神田茂 <日本天文史料>에 수록된 기록들로 “推古二十八年十二月庚寅朔 天有赤氣 長一丈餘 形似碓尾”와 “貞觀元年十月十五日丁酉 天東南有異雲 中有赤色 如電光激” 등이다.

표 1. 高麗時代に 관측된 太陽黑點 관련 기록. 出典에서 '高'는 <高麗史>를, '備考'는 <增補文獻備考>를 뜻한다.

기록	년월일	양력	원문 (출전; 비고)
肅宗	10년 정월 庚寅	1105 2 7	日正中無光 해의 한 가운데에 빛이 없었다 (高47天文,備考)
毅宗	5년 3월 癸酉	1151 3 21	日有黑子大如雞卵 (高47天文,備考) 해에 흑점이 있는데 크기는 계란만 했다
	癸未	1151 3 31	日中有黑子大如雞卵 (高47天文,備考) 해 가운데에 흑점이 있는데 크기는 계란만 했다
	甲申	1152 4 1	翌日亦如之 다음 날도 이와 같았다 (高47天文,備考)
	14년 정월 己亥	1160 2 28	日中有怪氣三日 (高47天文,備考) 해 가운데에 괴상한 기운이 사흘동안 있었다
	8월 癸酉	1160 9 29	日中有黑子 해 가운데에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)
明宗	원년 9월 辛卯	1171 10 20	日有黑子大如桃 (高47天文,備考) 해에 흑점이 있는데 크기는 복숭아만 했다
	10월 戊午	1171 11 16	日有黑子大如桃 (高47天文,備考) 해에 흑점이 있는데 크기는 복숭아만 했다
	13년 11월 己卯	1183 12 4-5	日有黑子二日 해에 흑점이 이틀 간 있었다 (高47天文,備考)
	15년 정월 甲午	1185 2 11	日有黑子大如梨 해에 흑점이 있는데 크기는 배만 했다 (高47天文,備考)
	2월 戊寅	1185 3 27	日有黑子大如梨 해에 흑점이 있는데 크기는 배만 했다 (高47天文,備考)
	3월 庚子	1185 4 18	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)
	辛丑	1185 4 19	亦如之 이와 같았다 (高47天文,備考)
	10월 庚午	1185 11 14	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)
神宗	3년 8월 癸巳	1200 9 19	日有黑子大如李 해에 흑점이 있는데 크기는 오얏만 했다(高47天文,備考)
	4년 3월 壬子	1201 4 6	日中有黑子大如李 (高47天文,備考) 해 가운데에 흑점이 있는데 크기는 오얏만 했다
	5년 8월 丙子	1202 8 23	日中有黑子大如梨 (高47天文,備考) 해 가운데에 흑점이 있는데 크기는 배만 했다
	7년 정월 乙丑	1204 2 3-5	日中有黑子大如李凡三日 (高47天文,備考) 해 가운데에 흑점이 있는데 크기는 오얏만 하고 무릇 사흘간 계속됐다
高宗	45년 8월 癸巳	1258 9 15	日中黑子大如雞子 (高47天文,備考) 해 가운데에 흑점이 있는데 크기는 계란만 했다
	甲午	1258 9 16	翌日又如人形 다음 날도 같은데 사람 모양과 같았다 (高47天文,備考)
忠烈王	4년 8월 癸亥	1278 8 31	日中有黑子大如雞卵 (高47天文,備考) 해에 흑점이 있는데 크기는 계란만 했다
恭愍王	5년 3월 甲申	1356 4 4	日無光中有黑子 해에 광채가 없고 안에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)
	乙酉	1356 4 5	亦如之 이와 같았다 (高47天文,備考)
	10년 2월 辛卯	1361 3 16-19	日有黑子四日 해에 흑점이 나흘간 있었다 (高47天文,備考)
	11년 9월 己未	1362 10 5	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)
恭愍王	19년 12월 庚午	1371 1 2	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)
	20년 9월 癸巳	1371 11 21?	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考; 9월에 癸巳가 없음)
		(10월 癸巳?)	
	21년 4월 壬午	1372 5 8	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)

기록 년월일	양력	원문 (출전; 비고)
22년 4월 乙亥	1373 4 26-27	日有黑子二日 해에 흑점이 이틀간 있었다 (高47天文,備考)
22년 10월 乙亥	1373 10 23	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)
辛禰 원년 2월 戊申	1375 3 20	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)
	己酉	1375 3 21
7년 2월 癸未	1381 3 23	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)
8년 2월 甲戌	1382 3 9-11	日有黑子大如雞卵凡三日 (高47天文,備考)
		해에 흑점이 있는데 크기는 계란만 하고 무릇 사흘간 계속되었다
13년 3월 丁丑	1387 4 15	日有黑子 해에 흑점이 있었다 (高47天文,備考)

학자들은 보다 과거의 오로라 기록을 조사함으로써 오로라의 출현 빈도가 장기간에 걸쳐 큰 변화를 보여왔다는 사실을 발견하였다. Hansteen은 1831년에 서기전 502년부터의 기록을 참고하여 오로라 현상이 96년의 장주기를 보인다고 주장하였다. 반면에 Olmsted은 1856년에 60 - 65년을, Loomis는 1873년에 58년을, Fritz는 1881년에 55.5년을 장주기라고 주장하였다 (Siscoe 1980). 1843년에 Schwabe(1844)는 태양흑점수가 11년 주기로 변한다는 사실을 발견하였는데 (Taylor 1997), Fritz와 Loomis는 오로라의 출현 빈도와 강도가 흑점수와 밀접한 관련이 있음을 지적하였다. 흑점의 11년 주기가 발견된 뒤로 오로라 현상의 11년 단주기도 곧 발견되었다. 그러나 장주기 변화는 그 존재는 분명하나 주기의 값은 지금까지도 불확실하여 약 80년으로 추정하고 있다 (Shove 1955; Gleissberg 1965; Link 1968). 더구나 200년 (Shove 1955)과 400년 (Link 1968) 등 보다 더 긴 주기도 주장되고 있는 실정이다. 흑점과 오로라 현상으로 드러나는 태양활동의 이러한 장주기 변화는 역사적 자료에 의한 연구로부터 밝혀야 하는 문제이다.

따라서 1960년경부터 동양과 서양의 역사적 자료를 모아 수천 년간의 자료 기반을 세워서 태양의 장주기 활동 변화를 보려는 시도들이 여럿 있었다 (Siscoe 1980에 논문 인용과 검토 수록). 앞서 Shove(1955)가 중국의 오로라 기록을 서양의 자료에 더해 분석에 이용하였지만, 동양의 오로라 자료는 Keimatsu(1976)가 서기전 687년에서 서기 1600년까지 한국, 중국, 일본의 고대기록 578개를 모은 것이 본격적이다 (이 가운데 오로라일 것이라고 분류된 것은 258개). 보다 최근에는 劉君燦(1988; 이후 新探), Yau, Stephenson 과 Willis(1995; 이후 YSW95) 등이 한중일 삼국의 오로라 기록을 모은 표를 발표하였다. 또 중국의 오로라 (極光) 기록은 <中國古代天象記錄總集>(1988)에도 실려 있다.

본 논문에서는 천문관측을 體系的으로 수행하여 세계에서 가장 많은 오로라 기록을 長期間에 걸쳐 남긴 한국의 옛 오로라 기록을 재수집하고, 오로라와 흑점의 출현 빈도와 강도를 科學的인 방법으로 분석함으로써 과거 태양 활동의 변화를 살펴보고자 한다. 삼국시대에는 흑점과 오로라 기록이 적고, 조선시대에는 조사할 자료가 너무 방대하므로 우선 高麗時代(918~1392)의 관측기록을 모아 분석하고자 한다. 태양활동의 장기적 변화를 알아보기 위하여 우리 나라의 고대 자료를 이용하려는 데에는 몇 가지 이유가 있다.

먼저 新探, YSW95와 같이 최근에 정리되어 발표된 동양의 오로라 자료목록에까지도 한국의 오로라 기록은 매우 부실하게 조사되어 수록되어 있다는 사실이다. 예를 들면 고려사에 실린 오로라 기록은 본 논문의 조사에 따르면 약 232개에 이른다. 그러나 新探은 116개, YSW95는

110개를 수록하였다. 이렇게 절반에도 못 미치는 기록이 실려있는 까닭은 오로라가 아닌 듯한 기록을 제외했다거나 한 것이 아니라, 단순히 고려 후반기의 자료를 거의 조사하지 않았기 때문이다(II절 참고). 반면에 국내에서는 아직 한번도 우리 나라의 흑점과 오로라 기록을 수집하여 분석한 연구가 없었다.

둘째로 우리 나라에서는 다른 나라의 왕조에 비해서 각 왕조들이 오래 지속되었었고, 조정의一元화된 官廳에서 천문관측이 嚴格하고도 體系적으로 수행됐기 때문에 觀測資料의 信賴도가 어느 다른 나라보다도 높다고 생각된다. 따라서 우리 나라의 흑점과 오로라 기록은 太陽의 長週期 活動을 살펴보는 데에 매우 적합한 자료라고 생각한다. 특히 고려시대는 남아있는 천문관측자료의 방대함과 정확함으로 보아 觀測 天文學이 매우 발달했던 때라고 할 수 있으므로 이 시대의 기록은 신뢰도가 더욱 높으리라고 생각된다.

셋째로 지금까지 수행된 연구들에서는 흑점이나 오로라 기록의 횟수를 막대 그래프로 그린 뒤, 이를 눈으로 보고 주기를 찾았으므로 연구자들의 주관적 판단에 영향을 받았다. 더구나 自然과 政治社會的 環境과 같은 觀測 與件의 變化를 고려하지 않아서 이 연구들에서 추정된 태양활동의 변화주기는 많은 불확실성을 안고 있었다. 따라서 역사적 자료를 이용하는 데에는 보다 과학적이고 客觀的인 分析 方法을 도입할 필요가 있다.

다음절에서는 본 연구에서 분석할 고려시대의 흑점과 오로라 기록에 대하여 설명하였다. 또한 이 자료들의 성질들을 몇 가지 살펴보았다. III절에서는 흑점과 오로라 자료를 푸리에(Fourier) 변환을 하여 주기를 계산하는 방법을 제시하고, 이를 고려시대의 자료에 적용하였다. 또한 중국의 기록에도 적용하여 결과를 비교하였다. IV절에서는 흑점과 오로라 기록 분포의 상관관계를 살펴보았다. V절에서는 본 연구의 결과를 요약하고 이에 대해 논의하였다.

II. 흑점과 오로라 관측자료

1. 흑점 자료

한국과 중국과 일본의 고대 흑점기록을 살펴보면 흑점이 여러 가지 이름으로 기록되어 있음을 알 수 있다. 그 가운데에 가장 많이 쓰인 이름은 黑子이고, 그 외에도 黑氣, 黑雲, 怪氣 등으로 기록되어 있다. 우리 나라의 고대국가에서 태양의 흑점은 天變 중에서 日變으로 분류되어 관측되고 기록되었다. 앞서 말한 바와 같이 우리 나라에서는 <三國史記>에도 흑점과 유사한 표현이 있으나 분명한 흑점 기록은 <高麗史>⁵⁾ 天文志 肅宗 10년(1105), 의종(毅宗) 5년(1151) 등부

5 高麗王朝 475년간의 正史를 紀傳體로 기록한 高麗史는 조선초 太祖 원년(1392)에 착수되어, 1395년에 鄭道傳 등에 의해 편찬된 뒤 여러 번 改修되어 文宗 1년(1451)에 鄭麟趾, 鄭昌孫 등이 완성한, 총 139권으로 엮여져 만들어진 책이다. 권 제 1에서 제 46까지는 世家로서 太祖에서 恭讓王까지의 역사를 기록하였고, 권 제 47에서 제 85까지는 志로 분류하여 天文, 曆, 五行, 地理, 禮, 樂, 兵, 刑法 등등을 정리해 놓았다. 그 뒤에는 表와 列傳이 나온다. 일반적인 천문현상은 天文志에 분리되어 권 제 47, 48, 49에 수록되어 있으며, 氣나 隕石 등에 관한 기록은 권 제 53, 54, 55에 걸친 五行志에 포함되어 나온다.

터 기록이 전해온다. 고려사 천문지 권47에는 日食, 黑點, 해무리, 日薄 등과 같은 日變 기록이 먼저 나오는데 흑점기록은 46일에 걸쳐 관측된 35개가 실려있다. 이 가운데 黑子로 표현된 기록은 42일간 관측된 33개이다. 이 기록들 전부를 <增補文獻備考>⁶⁾ 권 7의 日月變 항에서도 확인할 수 있었다. 모두 표2에 원문과 함께 정리하였다. 西洋曆으로의 변환은 韓甫植 著 <韓國年曆大典>의 陰陽曆對照表를 따랐다. 이 환산표는 아직 완전하다고는 할 수 없으나 중국과는 약간 다른 역을 사용한 우리 나라 역대 왕조의 날짜를 환산하는 데에는 현재까지 유일한 것이다. 이렇게 환산한 결과와 중국 역법을 그대로 사용해 환산한 YSW95의 표를 비교했을 때 여러 날 차이가 나는 경우가 몇 개 있었다. 우리 나라의 고대 역법의 면밀한 연구와 이에 따른 검증된 정확한 환산표가 요청된다. 간혹 <고려사>에 기록된 日辰이 함께 기록된 달에 없는 경우는 앞 뒤 달이나 글자나 발음이 비슷한 일진을 사용하여 양력변환을 하고, 표 1의 陽曆란에 '?'표를 두었다 (예를 들면 공민왕 20년 9월의 기록).

<고려사>에서는 흑점을 크기에 따라 다섯 가지로 분류하여 기록하였다. 흑점이 있다는 사실만을 적거나, 크기가 오얏(자두; 李), 계란(雞), 복숭아(桃), 배(梨) 만하다고 표현하였다. 이 순서는 관측된 흑점의 크기를 이 물체들의 크기에 상대적으로 비유한 것으로 생각된다. 또한 흑점의 모양을 묘사하여 사람과 같다고 한 기록도 있다. 태양 안에서 흑점의 위치는 설명이 없는 경우와 가운데(中)에 있는 경우들이 있다. 본 연구에서는 定量的인 분석을 위해 표현된 물체들의 실물 크기를 고려하여 단순한 흑자와, 오얏, 계란, 복숭아, 배 만하다고 한 기록들에 각각 2, 3, 4, 5, 6의 定量化된 等級을 부여하였다. 이 정량화된 등급에 따라 막대의 높이를 달리하며 고려시대에 흑점이 기록된 시기를 표시한 것이 그림 1(a)이다. 흑점기록은 고려시대 초에는 없으며, 12, 13, 14세기의 후반부에 각각 무리 지어 나온다는 점을 알 수 있다.

2. 오로라 자료

오로라 관련기록으로는 <三國史記>와 <三國遺事>에 실린 삼국시대의 기록 12개와 <高麗史>와 <增補文獻備考>에 실린 고려시대의 기록 232개를 발견하였다 (誤記 제외). 수집한 기록을 표2에 원문과 함께 정리하여 실었다 (지면 관계상 속종 10년 2월 경자일까지만 실었다. 전체 표는 요청에 따라 제공할 것이다). 新探에는 삼국시대 기록 중에 5개가, YSW95에는 2개만이 실려 있으며, 고려시대 기록들은 각각 116개와 110개가 실려 있다. 이는 본 연구에서 정리한 삼국시대와 고려시대의 오로라 관련기록들의 절반에도 못 미치는 양이다. 고려시대의 기록들을 시기적으로 보면 1260년 이전의 총 131개 기록 중 新探에는 81개가, YSW95에는 79개가 실려 있어

6 <增補文獻備考>는 英祖 46년(1770)에 우리나라 역대 文物制度의 典故를 모아 <東國文獻備考> 100권 13考로 처음 편찬되었다가, 正祖 6년(1782)부터 다시 수정 보완되어 純祖 7년(1807)에 146권 20考로 <增補東國文獻備考>로 증보되었다. 이것이 다시 光武 7년(1903)에 高宗의 명으로 弘文館에 纂輯所를 두고 1904년까지의 사실을 250권 16考에 수록하여 1908년에 <增補文獻備考>로 간행된 것이다. 권 1에 12가지 첫부분이 象緯考로서 曆象沿革, 天地, 七政, 恒星, 恒星黃赤經緯表, 黃赤宿度, 黃赤宮界, 北極高度, 東西偏度, 中星, 儀象, 分野, 日食, 月掩犯五緯, 五緯犯掩, 五緯掩犯恒星, 星晝見, 客星, 彗字, 天變, 日月變 등등으로 엮여져 있다.

6할 이상이 알려져 있다. 그러나 1261년부터 1391년까지는 102개 기록 중 각각 35개와 31개만이 실려 있어 약 3할 정도만이 알려져 있다. 이 사실로 미루어보아 이들 연구에서 우리 나라의 오로라 기록이 매우 불성실하게 조사되었다는 것을 알 수 있다.

오로라는 古代에 氣, 靄, 雲 등으로 기록되어 있다. 오로라의 색깔은 대부분 赤色으로, 그리고 일부는 白色, 青色, 紫色, 黃色, 五色, 血色 등으로 표현하였다. 오로라의 색깔이 주로 적색으로 보였던 까닭은 <마>장에서 논의하였다. 한 기록에서도 오로라의 색깔이 여러 가지로 변하는 경우가 많다. <高麗史>에서 오로라는 “하늘의 문이 열렸다(天門開)” 또는 “하늘이 찢어졌다(天裂)”라는 표현으로 天文志에 몇 개가 있지만, 거의 대부분은 五行志에 실려 있다. 五行志에서는 땅의 五材인 水火木金土 중에 대부분 火에 속하는 赤氣로서 기록되었다 (이제부터 오로라 현상에 대한 여러 가지 표현을 赤氣로 통칭한다). 이외에도 일부는 水에 속하는 무지개(虹)나 우레(雷)와 黑氣와 관련되어 나오기도 하고, 靑赤氣나 白氣, 大風, 黃赤氣 기록에 나오기도 한다. 따라서 당시에 오로라는 천문현상이라기보다는 기상현상으로 여겨졌다고 생각된다. 실제로 기상현상인지 오로라 현상을 표현한 것인지 분명치 않은 기록도 있다. 우리는 기록을 수집하는 과정에서 赤氣 등으로 표현됐다 하더라도 분명히 기상현상이라고 생각되는 기록은 제외시켰다. 그러나 외국문헌에 이미 채택된 경우는 예외로 하였다.

<高麗史>의 기록들은 오로라 활동의 강도를 여러 가지 표현으로 구별하여 놓았다. 예를 들면 단순히 赤氣가 있었다는 경우와 밝기나 색 또는 분포범위를 설명하여 “불과 같았다(火, 火焰, 烈火)”, “하늘에 닿았다(竟天, 衝天, 連天)”, “하늘에 퍼졌다(亘天)”, “은 하늘에 가득했다(滿天, 漫天)” 등으로 표현한 경우 등이 있는데 대체로 오로라의 세기를 나타내었다고 생각된다. 역시 오로라의 強度를 나타내기 위해 크기를 묘사하기도 하였는데 주로 尺이나 丈으로 기술하고, 때로 배(梨)나 바리때(鉢)와 같다고 하여 물건과 비교하기도 하였다. 오로라의 모양은 불꽃, 노을, 무지개, 누각, 방패, 벼포, 용, 뱀, 새 등 다양하게 표현하고, 일부는 매우 실감나게 구체적으로 표현되어 있다. 즉 “은 하늘에 비단 폭을 펼친 듯 퍼졌다가 흩어졌다”나 “몽치고 엉켜 풀리지 않다가 광채를 내었는데 마치 새가 나래를 터는 것 같다가 흩어졌다” 와 같이 오로라의 변화를 생생히 표현하였다.

많은 기록에서 오로라가 관측된 방향이 적혀있다. 방향은 대개 팔방위로 표현되어 있으나 드물게 16방위로도 표현되어 있다. 또 별자리로 그 위치를 설명하기도 하였다. 하루밤 중에도 그 방향이 계속 바뀌는 상황을 자세히 설명한 기록들도 많다. 오로라가 관측된 시각은 단순히 밤이라고 한 경우가 대부분이고, 일부는 초경, 이경, 삼경 또는 해질녘, 밤새도록, 새벽 또는 잠시, 오랫동안, 사흘간 등으로 관측시각과 지속시간을 기록하였다.

흑점기록에서와 같이 오로라 기록의 경우에도 표현된 강도에 따라 각 기록을 2에서 6까지 다섯 등급으로 정량화 하였다. 단순히 赤氣가 보였다는 기록에는 2등급을, 여기에 赤氣가 나타난 방향이나 시각을 준 경우에는 3등급을, 赤氣의 밝기나 색이 불과 같았다는 기록에는 4등급을, 赤氣가 하늘에 퍼지거나 닿았다는 경우는 5등급을, 赤氣가 하늘에 가득 찼다는 기록에는 6등급을 주었다. 이 등급을 막대 높이로 하여 고려시대 오로라 기록의 시대적 분포를 표시한 것이 그림 1(b)이다. 그림에서 오로라는 흑점보다 더 일찍부터, 그리고 더 많은 관측 기록이 남아있음을 알 수 있다. 또 기록이 함께 나오는 시기를 비교하면 흑자기록과 적기 기록의 분포가 서로 비슷함을 볼 수 있다.

그림 2에서는 오로라가 나타난 방향이 주어진 기록들 가운데 北쪽 (N; 서북, 북, 동북방의 합), 東西쪽 (W-E; 서방과 동방의 합), 南쪽 (S; 동남, 남, 서남방의 합)에 나타난 기록의 비율을 오로라의 세기에 따라 나타내었다. 전반적으로 오로라의 발생 방향은 북쪽이 많고 남쪽이 적다는 사실을 알 수 있다. 또 그 경향은 강한 오로라 현상일수록 더 분명하다.

3. 고려시대 천문현상 관측기록의 시기적 분포

한편 그림 1에 보인 흑점과 오로라 기록의 시간적 분포로부터 태양활동변화의 주기성을 찾을 때 반드시 고려해야 할 내용이 있다. 이는 역사적 자료를 사용하여 천체 현상의 장기적 변화를 보고자 할 때 필수적으로 점검해야 하는 요소이다. 고려는 약 475년간이라는 장기간에 걸쳐 왕

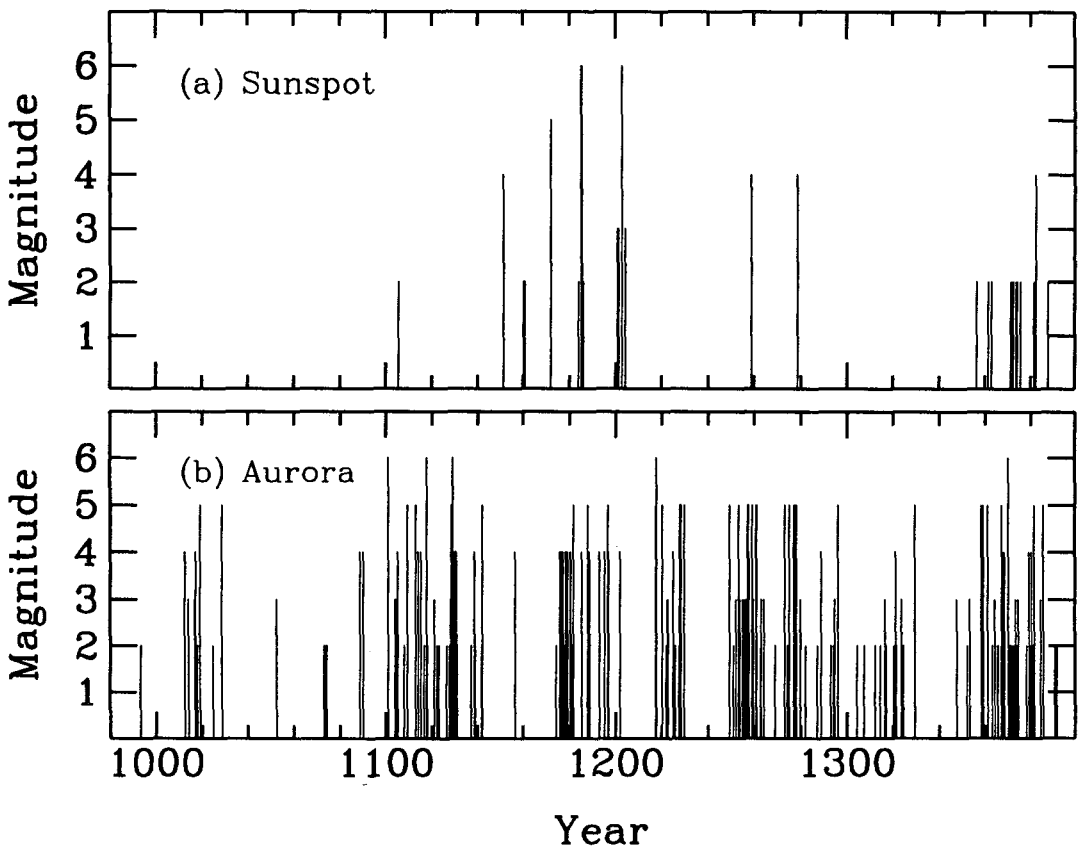


그림 1. 고려시대에 관측된 (a) 太陽 黑子와 (b) 赤氣와 같은 오로라 관련 현상 기록의 時代的 分布. 표1과 표2에 수록된 자료로서 흑점의 크기와 오로라 현상의 強度에 따라 막대의 높이를 다섯 단계로 구별하였다.

조를 지속하면서 체계적이고 지속적으로 천문기록을 남겼다. 그러나 일어난 천문현상 중 관측되어 기록된 비율이 고려시대 전 기간동안 항상 일정하다고 볼 수는 없다. 고려시대에 있었던 여러 外憂內亂과 기상학적 변화는 천문관측을 수행하는 데에 적지 않은 영향을 미쳤을 것이고, 이는 천문현상의 시간적 분포를 왜곡시킨다. 따라서 태양활동의 변화와 무관한 이러한 효과들을 제거해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 <高麗史>의 천문지에서 고려시대의 모든 천문현상 관측기록의 시간적 분포를 구하고, 이를 이용하여 흑점과 오로라 기록분포에 들어있는 환경적 요인에 의한 변화를 보정하였다. 사용된 천문기록들은 태양활동과 무관한 천문현상들인 日食, 月食, 行星의 운동, 流星, 행성과 달의 掩蔽, 彗星, 太白晝見(금성이 낮에 나타남) 등에 관한 기록들이다. 그림 3에 매 1년마다 기록된 총 천문현상 관측기록수를 가는 막대로 나타내고, 너비가 30년인 상자를 1년 단위로 미끄러뜨리며 세어나간 천문기록수를 굵은 선으로 그렸다. 그림3에 포함된 다양한 천문현상 기록들은 특별히 공통된 주기성을 갖지 않으므로, 이 굵은 선은 원칙적으로 거의 수평한 선이어야 한다. 그러나 굵은 선은 시기적으로 매우 큰 변화를 보이고 있다. 따라서 흑점과 오로라 기록의 주기성을 조사하는 데에 환경적 요인이 적지 않은 영향을 줄 가능성이 있으며, 그 효과를 반드시 보정해 보아야 할 것이다.

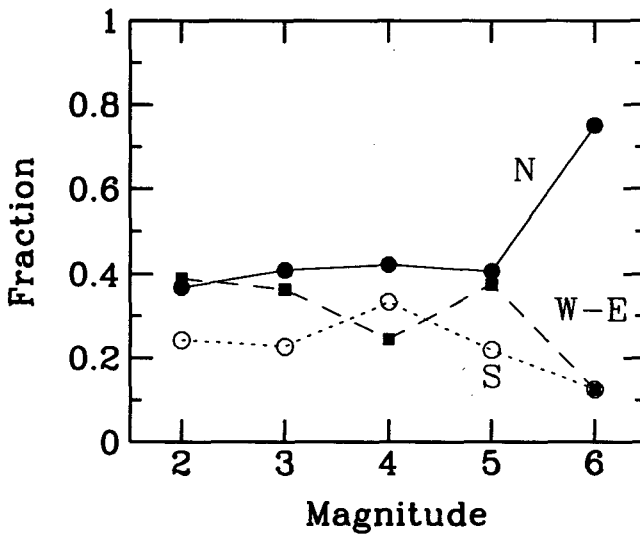


그림 2. 고려시대에 관측된 赤氣와 같은 오로라 관련 현상의 발생 빈도를 方向과 強度에 따라 비교한 그림. 그림에서 N은 北, 西北, 東北쪽을, W-E는 東쪽과 西쪽을, S는 南, 南西, 南東쪽에 나타난 赤氣를 포함한다. 가로축은 赤氣의 強度를, 세로축은 자료수의 比率이다.

III. 흑점과 오로라 주기 분석

태양의 자기장은 약 22년마다 주기적으로 변하며, 이에 따라 태양의 활동은 약 11년을 주기로 強度가 변한다는 사실이 잘 알려져 있다. 따라서 黒子나 赤氣와 같은 역사적 자료가 태양 활동과 관련이 있는지를 보려면 그 출현 빈도에 약 11년의 주기성이 있는가를 보는 것이 가장 중요하다. 또 태양활동과 같은 주기로 변화하는 성질이 확인된 역사적 자료로부터 태양활동의 장주기 변화를 보다 정확히 측정할 수 있을 것이다. 이에 대하여 기존의 연구들은 고대의 흑점과 오로라 관측기록을 막대그래프로 나타내고, 눈으로 기록수의 변화를 보고 주기성을 판단하였다. 이 방법은 매우 주관적이고 부정확한 방법이다. 또한 앞 절에서 지적한 바와 같이 주기를 측정하고자 하는 자료가 관측환경의 변화로부터 매우 큰 영향을 받을 수 있는데, 눈으로 주기성을 판단할 때는 환경적 요인에 의한 기록수의 변화 효과를 제거할 근거 있는 방법이 없다. 따라서 본 논문에서는 시간적으로 주어진 역사적 자료로부터 주기성을 구하는 일반적인 방법으로서 power spectrum을 구하는 방법을 제시하고자 한다. 또한 자료가 유한한 기간동안에만 있고, 각 자료의 중요성이 서로 다를 때 이를 보정하는 방법도 아울러 개발하였다. 삼차원 자료로부터 power spectrum을 측정하는 방법은 Park et al. (1994)에 설명되어 있다.

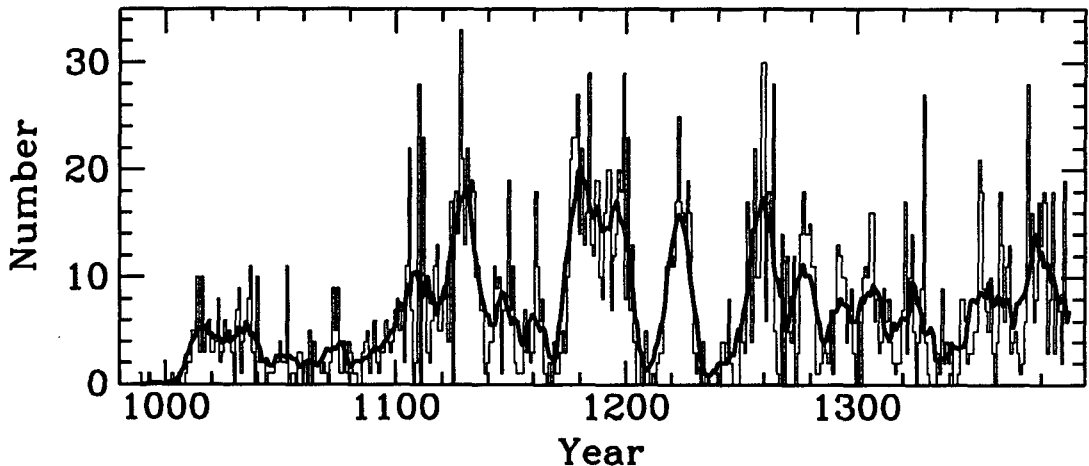


그림 3. 고려시대에 관측된 日食, 月食, 行星의 운동, 流星, 行星과 달의 掩蔽, 彗星, 太白晝見(금성이 낮에 나타남) 등에 관한 기록수의 時代的 分布. 가는 선은 이 분포를 1년 구간으로 나타낸 것이고, 굵은 선은 너비가 30년인 상자를 1년 단위로 미끄러뜨리며 그 기간에 나오는 기록들을 세어나간 수이다. 黒子와 赤氣 자료는 포함하지 않았다.

1. Power Spectrum 계산법

천체 현상들이 매우 장기간 T_p 에 걸쳐 보았을 때 거의 일정한 빈도로 나타나서 주기적으로 반복된다고 가정하자. 이제 실제 자료 N 개가 T_p 보다 훨씬 짧은 기간인 T 동안 주어졌다고 하자. 이 기간동안 나오는 천문기록의 분포를 점 과정(point process)으로 다루어, 천문기록의 수 밀도장(number density field) $\delta(t) = n(t)/\bar{n}$ 을 델타함수의 합으로 표현하겠다. 만약 천문현상이 기록된 기간 T 가 쏠 기간인 T_p 와 같다면, 이 밀도장은 푸리에 공간에서 평면 파동함수들로 분해된다. 즉

$$\delta(t) = \frac{1}{\sum w_j/T} \sum_j w_j \delta^{(1)}(t - t_j) = \sum_k \delta_k e^{-ik't} \quad (1)$$

이다. 여기에서 w_j 는 각 기록의 중요도를 나타내는加重值이고, $\delta^{(1)}$ 는 1차원 델타함수이다. 가운데 식은 수밀도장을 델타함수의 합으로서, 오른쪽 식은 푸리에 파동함수의 합으로서 나타낸 것이다. 만약 나타난 천문현상들이 일정한 비율로 관측됐다면, 모든 자료의 중요도가 같으므로 $w_j=1$ 이고 $\sum w_j=N$ 이 된다. 시기적으로 관측율이 변하는 자료에서 이 가중치 w_j 는 시간 t_j 에서 천문현상이 관측되어 기록될 상대적 확률의 변화를 보정한다. 본 연구에서는 그림3의 굵은 선의 최대값을 1로 규격화하여 다른 시기의 굵은 선 값의 역수를 그 때 기록의 頻度加重值로 사용했다. 예를 들면 1180년에 있는 기록은 빈도가중치 1을, 1100년에 있는 기록은 3.5를 갖는다. 또 고려시대의 흑점과 오로라 기록과 같이 현상의 크기나 強度가 (2에서 6까지) 상대적으로 주어졌던 경우, 이것도 가중치에 고려할 수 있다. 따라서 이 빈도가중치에 等級加重值를 곱한 값을 총가중치로 하였다.

이제 식 (1)의 양변에 e^{ikt} 를 곱하고 시간에 대해 적분하면, 수밀도장의 푸리에 변환을 얻는다. 즉

$$\delta_k = \frac{1}{\sum w_j} \sum_{j=1}^N w_j e^{ikt_j} \quad (2)$$

이다. 이 푸리에 변환의 기대값은 $\langle \delta_k \rangle = \delta_{k0}^D$ (Kronecker delta)이고, 분산은

$$\langle |\delta_k|^2 \rangle = \delta_{k0}^D + \frac{\sum w_j^2}{(\sum w_j)^2} + P(k) \quad (3)$$

이다. 여기에서 첫째 항은 수밀도 요동장의 평균이 1로 정의됐기 때문이고, 둘째 항은 자료의 수가 유한하기 때문에 있는 포아송 잡음으로서 가중치가 모두 같으면 단순히 $1/N$ 이 된다. 마지막 항이 파수 k , 또는 주기 $\lambda=2\pi/k$ 인 파동의 power spectrum이다.

현실적으로 자료는 무한한 기간동안 주어지지 않으므로 이 같은 자료의 불완전성을 보정하기 위하여 표본함수 $W(t)$ 를 도입하자. $W(t)$ 는 자료가 주어지 있는 기간에는 $1/T$, 그 외에는 0인 함수이다. 본 연구에서 $W(t)$ 는 고려시대의 흑점 자료의 경우 1151년에서 1382까지, 그리고 오로라 자료의 경우 992년에서 1392년까지 $1/T$ 의 값을, 그 외 기간에는 0의 값을 갖는다. 표본함수의 푸리에 변환 W_k 를

$$W(t) = \frac{T}{T_P} \sum_k W_k e^{-ik't} \quad (4)$$

로 정의하고, 일정기간 동안의 불완전한 표본자료에 대해 다음과 같은 양을 고려해 보자.

$$\tilde{\delta}_k = \frac{1}{\sum w_j} \sum_{j \in T} w_j e^{ikt_j} = \frac{1}{\sum w_j} \sum_{j \in T_P} w_j W(t_j) e^{ikt_j} \quad (5)$$

자료가 있는 기간을 극히 짧은 소구간으로 나누면, 각 소구간 안에 속한 기록의 수는 1 또는 0 일 것인데 이를 n_j 라고 하자. n_j 와 식(4)를 사용하여 식(5)를 다시 쓰면

$$\tilde{\delta}_k = \frac{1}{\sum w_j} \sum_{j \in T} w_j W(t_j) n_j e^{ikt_j} = \sum_k W_k \frac{T}{T_P} \sum_{j \in T} w_j n_j e^{i(k-k')t_j} = \sum_k W_{k-k'} \delta_k \quad (6)$$

이다. 마지막 단계에서 식(2)가 사용되었다. 그러므로 특정기간 동안에 추출된 표본자료에서 식(5)를 이용하여 구한 푸리에 변환 $\tilde{\delta}_k$ 은 실제 푸리에 변환 δ_k 와 표본함수의 푸리에 변환 W_k 을 convolution한 것이다. 일반적으로 기대값 $\langle \tilde{\delta}_k \rangle = W_k$ 는 0이 아니므로, 기대값이 0인 새로운 요동변수

$$\hat{\delta}_k = \frac{1}{\sum w_j} \sum_{j \in T} w_j e^{ikt_j} - W_k = \sum_{k \neq 0} W_{k-k'} \delta_k \quad (7)$$

를 정의하면 이 요동변수의 분산은

$$\langle |\hat{\delta}_k|^2 \rangle = \sum_{k \neq 0} |W_{k-k'}|^2 \langle |\delta_k|^2 \rangle \quad (8)$$

이다. 만약 표본의 기간 T 가 측정하고자 하는 흑점과 오로라의 활동주기보다 훨씬 길다면 표본함수의 푸리에 변환 $W_{k-k'}$ 은 $k=k'$ 에서 상대적으로 큰 값을 갖게 된다 ($T=T_P$ 이면 W_k 는 델타함수). 이런 경우 $\langle |\delta_k|^2 \rangle$ 가 k 에 대해 천천히 변하는 함수이면, 식(8)은

$$\langle |\hat{\delta}_k|^2 \rangle \approx \langle |\delta_k|^2 \rangle \sum_k |W_k|^2 \quad (9)$$

으로 간단하게 쓸 수 있다. 식(3)과(9)를 사용하면 power spectrum 추정값은 최종적으로 다음과 같이 표현된다:

$$\hat{P}(k) = (\langle |\hat{\delta}_k|^2 \rangle - \frac{\sum w_j^2}{(\sum w_j)^2}) / \sum_k |W_k|^2 \quad (10)$$

본 연구에서 다루는 경우처럼 자료가 일차원일 때 (즉 시간의 함수로 기록이 분포), 표본함수 W_k 는 해석학적으로 구할 수 있다. 즉 일차원 상자 표본함수 $W(t)$ 가 $-T/2 \leq t \leq T/2$ 구간에서 $1/T$ 이고 그 외에는 0일 때, 푸리에 변환은 실수함수인

$$W(k) = \frac{\sin(Tk/2)}{Tk/2} \quad (11)$$

로 주어진다. 이제 <高麗史>에 수록된 흑점과 오로라 자료로부터 이 관측기록수 분포의 power spectrum을 구하여 기록의 주기성을 구해보자.

2. 흑점 기록의 주기 분석

표 1에는 총 46일간 관측된 35개의 고려시대 흑점 기록이 $T=230.2$ 년간에 걸쳐 있다. 이 가운데 黑子로 표현된 42일간의 33개 기록으로부터 식 (10)과 (11)을 이용하여 power spectrum을 구하였다. 먼저 각 기록의 가중치를 모두 1로 똑같이 주고 power spectrum을 구한 결과가 그림 4(b)이다. 주기 10.5년과 98년에 power spectrum이 솟아올라 주변의 잡음과 구별된다 (여기에서 power spectrum의 절대값, 즉 단위는 중요하지 않다). 단주기 10.5년은 알려진 태양활동주기 약 11년과 일치하여 고려시대의 흑자기록이 과거 태양 활동의 변화를 분명히 대변해주고 있음을 알 수 있다. 또한 장주기 98년은 알려진 장주기 약 80년과 얼추 일치하고 있다. 이 장주기는 그림 1의 위쪽을 보면 약 100년마다 흑점 기록이 무리 지어 나타나는 양상이 정량적으로 표현된 것이다.

두 번째로, 관측된 흑점의 크기가 다르다는 점과 고려시대에 천문관측이 일정한 빈도로 이루어지지 않고 그림 3과 같이 큰 변동을 보였다는 사실을 고려해 보았다. 각 기록에 그림 1에 보인 흑점의 상대적 크기를 고려한 등급가중치에 그림 3의 굵은 실선으로부터 구한 빈도가중치를 곱한 총 가중치를 주고 계산한 결과가 그림 4(a)이다. 10.5년의 단주기는 보다 강해진 반면 100년에 있는 장주기는 약해져서 주변의 잡음에 비해 두드러지지 않는다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 흑점 기록이 많이 나오는 12, 13, 14세기 후반기는 천문현상이 원래 많이 관측되어 기록된

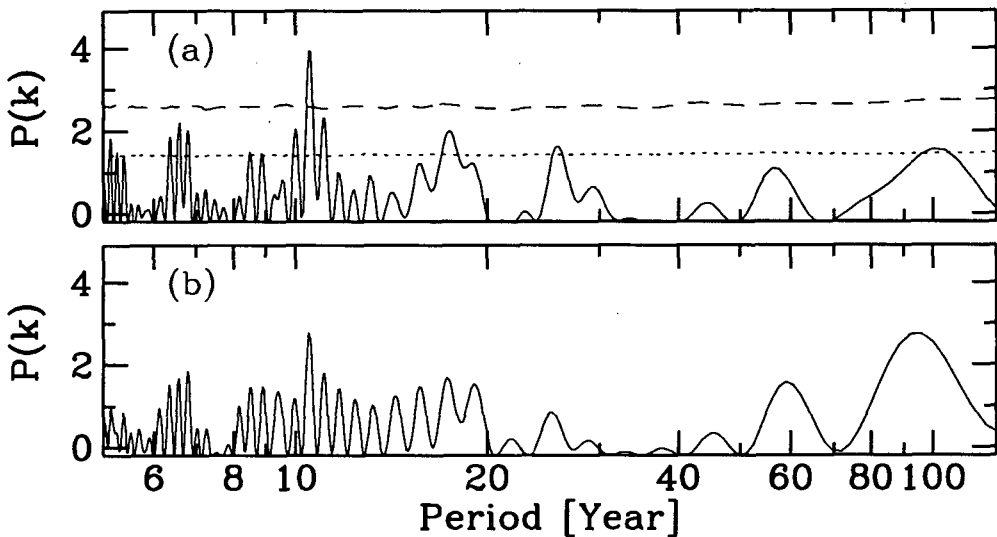


그림 4. 고려시대에 관측된 흑점 기록 분포의 power spectrum. (a)는 흑점의 크기에 따른 등급가중치와 천문현상 기록의 시대적 변화에 따른 빈도가중치를 고려한 결과이고, (b)는 가중치를 모두 1로 고정한 결과이다. (a)에서 점선과 파선은 각각 무작위 흑점자료의 상위 2.3%와 0.14% power 높이를 나타낸다. 주기 10.5년에 발견된 週期性 搖動은 상위 0.023% 현상이다.

시기이기 때문에 그 효과를 제거하면 흑점자료의 장주기는 그리 신뢰할만한 정도가 아니라는 사실을 알 수 있다. 단주기가 더 두드러지게 된 것은 주로 흑점의 상대적 크기를 가중치에 넣은 결과이다.

여기에서 구한 power spectrum으로부터 발견한 고려시대의 흑점주기 10.5년이 통계적으로 얼마나 의미 있는가를 알아보았다. 즉 흑점의 관측이 무작위로 기록되었는데도 주기 10.5년에 그림 4의 (a)에서와 같은 높이를 지닌 숫대가 실 확률을 조사하였다. 표 1의 흑점 자료에서 연이은 날에 관측된 기록들을 한 개 흑점에 관한 기록으로 보면 총 28개의 서로 다른 흑점에 관한 기록이 있다고 할 수 있다. 흑점기록이 나오는 1151년부터 1381년까지 230.2년간에 28개의 자료를 무작위로 분포시키고, 이 무작위 자료로부터 power spectrum을 구하는 과정을 20,000번 수행하였다. 무작위 자료는 균일하게 뿌리지 않고 그림 3의 굵은 실선과 확률적으로 같은 분포를 같도록 제약하였다. 그리고 power spectrum을 계산할 때 자료분포의 이 불균일성을 다시 보정하였다. 그림 4(a)의 점선은 이런 무작위 자료에서 얻어지는 power spectrum의 상위 2.3% 수준을 나타내고, 파선은 상위 0.14% 수준을 나타낸다. 10.5년에 있는 숫대의 진폭은 무작위 자료로부터 상위 0.023% 현상임이 밝혀졌다. 이로써 <高麗史>의 흑점기록에 나타나는 약 10.5년의 주기성이 통계적으로 매우 높은 신뢰성을 지닌다는 사실이 증명되었다.

3. 오로라 기록의 주기 분석

誤記를 제외하면 표 2 전체에는 고려시대의 오로라 기록 232개가 수록되어 있다. 이 기록에 오로라의 세기에 따라 등급가중치를 2에서 5까지 주고, 여기에 고려시대 천문관측의 상대적 빈도를 보정하는 빈도가중치를 곱하여 얻은 총가중치를 이용하여 식(10)과 (11)로부터 계산한 power spectrum이 그림 5(a)이다. 자료 전체를 사용한 이 경우 power spectrum은 많은 잡음을 보이고 특별히 강한 주기성을 보이지 않는다. 이번에는 표2에 수록된 <高麗史> 자료 중에서 五行志의 赤氣 부분에 나오는 156개의 赤氣, 赤靄, 紫氣 기록만을 사용하여 구한 power spectrum이 그림 5(b)이다. 자료 전체를 사용한 결과에 비해서 9.9년의 주기가 약간 두드러져 보인다.

다음은 전체 오로라 기록을 오로라의 세기에 따라 소단위로 나누어 분석해 보았다. 強度가 2와 3으로 분류된 기록만을 사용한 기록분포의 power spectrum도 역시 전체 주기에 걸쳐 잡음에 비해서 주목할 만한 숫대가 보이지 않았다. 그러나 그림 5(c)에 보인 power spectrum은 등급이 4, 5, 6으로 주어진 기록들에 10년 주기를 갖는 강한 요동이 있음을 보여준다. 그림 5(d)에 보인 바와 같이 이 10년 주기는 세기가 5와 6인 기록만을 사용하여 구한 power spectrum에도 강하게 나타난다.

활발한 오로라 현상을 관측한 기록들의 분포에 나타난 10년 주기가 통계적으로 의미가 있는지 역시 무작위 표본을 만들어 조사하였다. 등급이 5와 6으로 주어진 오로라 자료와 같은 수 (45개)의 자료를 992년에서 1391년 사이의 1192년간에 무작위로 분포시켰다. 단 흑점자료 분석에서처럼 무작위 자료도 통계적으로 그림 3의 굵은 선과 같이 고려시대의 천문현상기록의 분포를 따르도록 제약하였다. 이렇게 무작위 표본을 20,000번 만들고, 각 표본마다 power spectrum을 구한 결과 그림 5(d)의 점선과 파선과 같은 무작위 자료의 상위 2.3%와 상위 0.14% 수준을 얻

표 2. 三國時代와 高麗時代에 관측된 오로라 관련 기록. 出典에서 ‘史記’는 <三國史記>, ‘遺事’는 <三國遺事>, ‘高’는 <高麗史>를, ‘備考’는 <增補文獻備考>를, ‘新探’은 劉君燦(1988)의 <中國天文學史新探>을, ‘Y’는 Yau, Stephenson, & Willis(1995)의 목록을 뜻한다.

기록	년월일	양력	원문 (출전; 비고)
東明聖王	3년 7월	BC35 7/8	慶雲見鶻嶺南其色青赤 (史記13高句麗,備考,新探) 상서러운 구름이 골령의 남쪽에 나타났는데 그 빛이 푸르고 붉었다
多婁王	7년 4월	34 4/5	東方有赤氣 동방에 적기가 있었다 (史記23百濟,備考,新探)
故國川王	4년 3월 甲寅	182 4 18	夜赤氣貫於太微如蛇 (史記16高句麗,備考,新探,Y) 밤에 적기가 태미 별자리를 꿰어 뚫었는데 마치 뱀과 같았다
助賁尼師今	17년 10월	246 10/11	東南有白氣如匹練 (史記2新羅,備考) 동남쪽에 백기가 있었는데 비단과 같이 퍼졌다
古尔王	26년 9월	259 9/10	靑紫雲起宮東如樓閣 (史記24百濟,備考) 푸르고 붉은 구름이 궁성의 동쪽에서 일어났는데 누각과 같았다
奈勿尼師今	3년 2월	358 2/3	紫雲盤旋廟上 시조묘 위에 자주빛 구름이 떠돌았다 (史記3新羅,備考)
阿莘王	14년 3월	405 3/4	白氣自王宮西起如匹練 (史記25百濟,備考) 백기가 왕궁의 서쪽에서 일어났는데 필연을 퍼 놓은 것 같았다
慈悲麻立干	21년 2월	478 2/3	夜赤光如匹練自地至天 (史記3新羅,備考,新探,Y) 밤에 붉은 빛이 비단과 같이 땅으로부터 하늘에 뻗었다
眞平王	39년	617	有五色雲覆地 오색구름이 온 땅을 덮었다 (遺事4元曉不羅)
文武大王	13년 봄	673 봄	妖星見 요사스런 별이 나타났다 (史記43金庾信,新探)
孝昭王	2년 3월	693 3/4	有瑞雲覆天尊庫 상서러운 구름이 천존고를 덮었다 (遺事3栢栗寺)
	8년 2월	699 2/3	白氣竟天星孛于東 (史記8新羅,備考) 흰 기운이 하늘에 뻗고 별이 동쪽에 나타났다
成宗	11년 12월	992 12/993 1	夜天門開 밤에 하늘의 문이 열렸다 (高47天文,備考,新探,Y)
顯宗	3년 5월 丁亥	1012 6 12	赤氣如火見于南方 (高53赤氣,備考,新探,Y) 불같은 적기가 남방에 나타났다
	5년 3월 庚寅	1014 4 6	夜四方赤綬 밤에 사방에 붉은 요기가 나타났다 (高53赤氣,備考,新探,Y)
	7년 12월 丁酉	1017 1 27	四方赤綬 사방에 붉은 요기가 나타났다 (高53赤氣,備考,新探,Y)
	8년 2월 癸酉	1017 3 4	赤綬如火彌天 (高53赤氣,備考,新探,Y) 불같은 붉은 요기가 하늘에 충만하였다
	11월 己未	1017 12 15	夜白氣如練竟天俄變爲赤綬 (高54白氣,備考,新探,Y) 밤에 비단같은 백기가 하늘까지 닿았다가 갑자기 붉은 요기로 변했다
	10년 정월 乙酉	1019 3 6	赤氣竟天 적기가 하늘에 닿았다 (高53赤氣,新探,Y)
	15년 11월	1024 12/1025 1	天門開 하늘의 문이 열렸다 (高47天文,備考,新探,Y)
	19년 9월 丙申	1028 9 25	夜赤氣竟天 밤에 적기가 하늘까지 닿았다 (高53赤氣,備考,新探,Y)
文宗	6년 6월 癸巳	1052 7 18	白氣竟天狀如魚鬣有靑紫氣貫於其間良久乃散 (高54白氣,備考,新探,Y) 백기가 하늘까지 닿았는데 모양이 자라갈고 또 청자색기가 그 사이를 관통하더니 얼마 뒤에 흩어졌다

기록	년월일	양력	원문 (출전; 비고)
	26년 12월 丙子	1073 1 12	白氣自乾抵巽連坤變爲赤氣 (高54白氣,備考,新探,Y) 백기가 서북에서 생겨나 동남쪽을 거쳐 서남방에 이르러 적기로 변했다
	27년 9월 庚戌	1073 10 13	夜天苑星南天裂廣可五六寸中有赤色 (高47天文,備考,新探,Y) 밤에 천원성 남쪽 하늘이 찢어졌는데 넓이가 5-6촌쯤 되고 속이 붉었다
	11월 丙寅	1073 12 28	夜文昌西天裂長十五尺廣三尺色青赤 (高47天文,備考,新探,Y) 밤에 문창 서쪽 하늘이 찢어졌는데 길이 15척, 넓이 3척, 청적색이었다
宣宗	5년 7월 己巳	1088 8 14	赤氣如火 불같은 적기가 나타났다 (高53赤氣,備考,新探,Y)
	7년 정월 乙丑	1090 2 25?	有紫氣散如火焰至曉乃滅 (高53赤氣,備考,新探,Y; 정월에 乙丑이 없음) (己丑?) 자색기가 불꽃처럼 흩어졌는데 새벽에 이르러 없어졌다
肅宗	6년 정월 壬戌朔	1101 1 31	夜赤氣自北指西紛布漫天白氣間作良久乃散 밤에 적기가 북에서 서로 흩어져 하늘에 퍼지고 백기가 그 사이에 뒤섞여 일어났다 잠시만에 흩어졌다 (高53赤氣,備考,Y; 宋史에도 같은 날 기록)
	9년 정월 甲申	1104 2 7	夜赤氣見于東南長十餘丈 (高53赤氣,備考,Y) 밤에 적기가 동남쪽에 나타났다 길이가 십여장이다
	戊戌	1104 2 21	赤氣見東方 적기가 동방에 나타났다 (高53赤氣,備考)
10년 정월 辛未	1105 1 19	夜赤白氣見于東南至曉乃滅 (高53赤氣,新探,Y) 밤에 적백기가 동남에 나타났다 새벽에 이르러 없어졌다	
	2월 庚子朔	1105 2 17	夜有光發於乾巽方如月始出 (高53光,備考,新探,Y) 밤에 서북과 동남방에 빛이 있어 달이 처음 떠올랐을 때와 같았다
(以下 省略)			

었다. 따라서 활발한 오로라의 기록에 보이는 10년 주기성은 상위 0.14% 이상의 신뢰도를 갖는다는 사실을 알 수 있다. 그림 5에 보인 오로라의 power spectrum들은 각 기록의 빈도가증치를 적용하지 않았을 때와 별로 차이가 없었다.

한편 오로라 기록에서는 약하지만 흑점 기록에서보다는 더 분명한 장주기 요동을 검출할 수 있었다. 그림 5의 (b)와 (d)에는 125년 주기에 약한 요동이 검출되었다. 그림 1(b)를 보면 오로라 기록도 약 100년의 주기로 무리 지어 있다고 생각할 수 있으나, 이는 주로 그림 3에서처럼 고려시대의 천문현상 기록들의 분포자체가 그런 성질을 지니고 있기 때문이다. 또 1150년 이전 오로라 자료의 두번의 장주기 극대기와 그 이후 세 번의 장주기 극대기가 서로 위상이 맞지 않기 때문에 장주기는 그림 1(b)에 보이는 것처럼 확실한 것은 아니다. 눈으로 주기를 찾아낼 때는 이러한 사실을 무시하게 된다. 오로라 기록에서 검출된 장주기를 확인하기 위해서는 보다 긴 기간동안의 다양한 자료를 사용해야 할 것이다.

오로라 기록을 활동세기에 따라 나누는 대신 북쪽, 동서쪽, 남쪽 등으로 방향에 따라 소단위로 나누어서 분석해 보았다 (그림 2 참조). 우리 나라의 지자기 위도상 오로라는 주로 북쪽에 나타나리라고 기대되기 때문이다. 그러나 power spectrum 분석 결과는 오로라가 출현한 방향에 대해서는 별로 차이를 보이지 않았다.

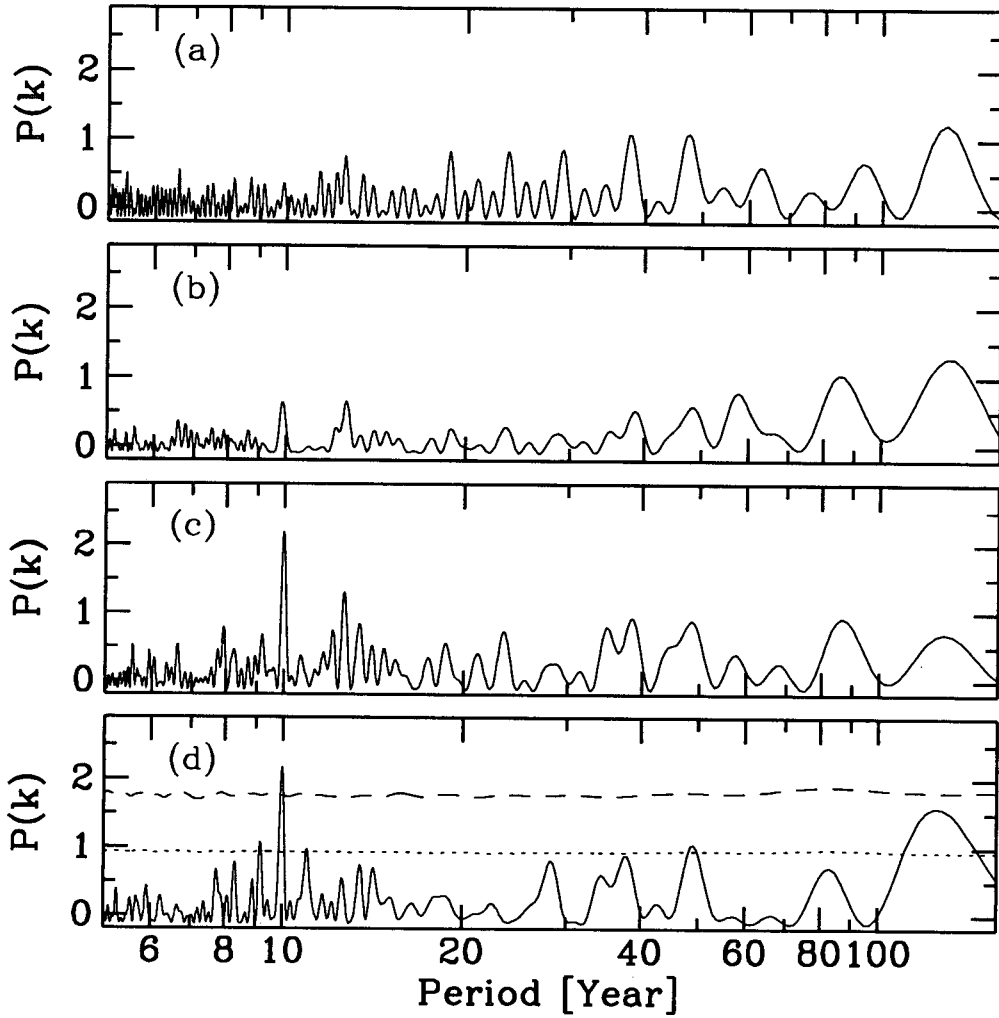


그림 5. 고려시대에 관측된 오로라 관련 기록 분포의 power spectrum. (a)는 표2에 실린 모든 자료(232개)를 이용한 결과이고, (b)는 이 가운데 赤氣와 紫氣 기록 156개를, (c)는 強度를 나타내는 등급이 4, 5, 6으로 주어진 기록 93개를, (d)는 등급이 5 또는 6으로 주어진 기록 45개를 이용하여 계산한 power spectrum들이다. 강도에 따른 등급가중치와 천문현상 기록횟수에 따른 빈도加重値를 모두 고려하였다. 그림(d)에서 점선과 파선은 각각 등급이 5 또는 6인 자료를 模擬하는 무작위 자료의 상위 2.3%와 0.14%의 power 높이를 나타낸다.

4. 주변국의 흑점과 오로라 기록의 주기 분석

이상에서부터 우리는 고려시대의 黑子와 赤氣 등의 기록들이 각각 태양흑점과 오로라(極光) 현상과 분명한 관련이 있음을 입증하였다. 고려시대 이전의 삼국시대와 이후의 조선시대의 기록들은 앞으로의 연구에서 분석할 예정이다. 여기에서는 周邊國의 자료를 함께 분석해 봄으로써 고려시대에 동북아시아 지역에서 관측한 천문현상기록의 성질을 비교해 보고자 한다. 특히 中國의 기록들은 일찍부터 서양에서 古天文學 연구에 사용되었으므로 高麗의 자료와 비교할 가치가 있다.

중국의 역대 왕조들이 남긴 흑점과 오로라 기록은 다른 천문현상기록과 함께 중국천상기록총집에 실려있다. 고려시대의 흑점기록이 나오는 같은 기간을 보면 이 목록에는 1151년에서 1387까지 中國의 宋, 滿洲의 金, 蒙古의 元나라가 남긴 흑점기록이 36개가 실려있다. <高麗史>의 기록과 내용상 다른 점은 이 왕조들의 흑점 기록은 흑점의 크기를 거의 구별하지 않았다는 점이다. 宋, 金, 元의 흑점 기록에 모두 같은 가중치를 주고 계산한 power spectrum이 그림 6(a)이다. 장주기에 power의 바닥이 다소 높은 까닭은 중국측 천문현상기록 빈도에 정치, 사회적인 변화에 따라 야기된 천문기록의 시기적 변화를 제거하지 않았기 때문이다. 어느 주기에서도 주변의 잡음보다도 두드러지게 진폭이 큰 요동이 존재하지 않는다. 흑자기록은 분명히 태양흑점을 관측한 것이라고 생각되므로 宋, 金, 元의 흑자기록이 약 11년의 주기를 보이지 않는다는 사실은 의외의 결과이다.

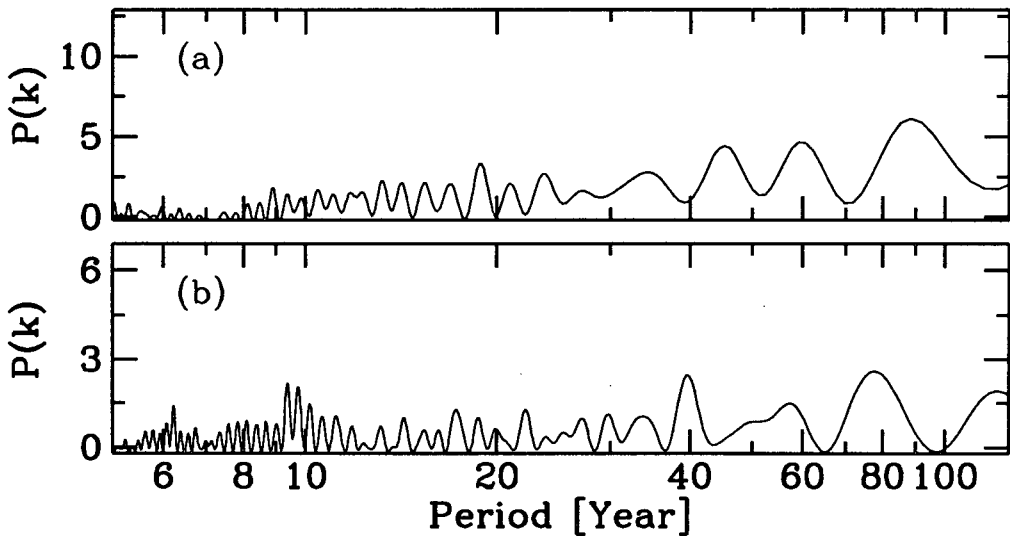


그림 6. 고려시대에 中國(宋), 滿洲(金), 蒙古(元) 등 주변국에서 관측한 (a) 흑점과 (b) 오로라 관련 기록 분포의 power spectrum. 흑점 관련 기록은 36개가, 오로라 관련 기록은 69개가 사용됐다. power spectrum 계산에서 흑점에 대해서는 加重值를 모두 1로 고정하였고, 오로라에 대해서는 強度에 따라 가중치를 달리 주었다.

고려시대의 오로라 기록이 존재하는 같은 기간에 宋, 金, 元의 사료에는 993년에서 1391년까지 赤氣 기록이 69개가 있다. 이 기록들의 특징으로서 적기가 관측된 방향이 압도적으로 北쪽이 많다는 점을 들 수 있다. 이 왕조들의 지자기 위도를 고려할 때 예상되는 특성이다. 둘째로 <高麗史>는 赤氣의 세기를 여러 단계로 분류하고 모양을 다양하게 비유하여 기록하였으나, 중국 측 기록은 赤氣의 세기를 묘사한 기록은 매우 드물고 주로 출현한 방향과 크기만을 설명하였다. 그러나 일부나마 세기가 주어진 경우를 구별하여 각 기록에 가중치를 주어서 赤氣 기록분포의 power spectrum을 계산하고 이를 그림 6(b)에 그렸다. 주기 10년 근처에 진폭이 다소 큰 솟대가 몇 개 있지만 그중 특별히 두드러진 것이 없이 흑자기록의 경우처럼 잡음만이 존재한다. 40년과 80년 근처에 있는 약한 주기성도 흑자기록과는 전혀 일치하지 않기 때문에 역시 잡음으로 생각된다. 주변국의 적기 기록은 대부분 북쪽 방향에서 관측된 것이므로 방향에 따라 나눈 소단위 표본은 별 의미가 없고, 대부분의 기록에 적기의 세기를 세분하지 않았기 때문에 적기의 강도에 따라 소단위로 나누기도 부적합하다. 고대 오로라 자료는 그것이 약 11년 주기를 갖는다는 사실로부터 입증되기 때문에 고려시대에 기록된 중국의 적기 자료는 오로라 현상과 관련이 있는지 의심스럽다. 지금까지 눈으로 자료의 분포를 보고 고대 흑점과 오로라 기록의 정제와 주기를 추정하던 방법에 근본적인 문제가 있음을 알 수 있다. 따라서 앞으로 다른 시기의 주변국 기록을 더 분석해야 할 필요가 있다고 생각한다.

IV. 赤氣의 출현시기와 黑子와의 상관관계

1. 赤氣의 출현시기

앞에서는 고려시대에 관측된 흑점과 오로라 기록들에서 각각의 주기성을 찾아보았다. 이 절에서는 각기 10.5년과 10년의 주기를 갖고 強度가 변하는 이 두 현상들이 서로 어떤 상관관계를 지니는지를 알아보고자 한다.

지상에서 오로라 현상을 관측하기 위해서는 여러 가지 조건이 요구된다. 먼저 磁極에 가까운 고위도 지방에서 관측이 가능하고, 밤에 보이므로 겨울이 유리하다. 기상 상태에도 제약을 받는다. 또 달빛의 영향을 크게 받지 않는 때, 즉 보름을 피한 때가 관측하기 좋다. 고려시대의 적기 등의 기록이 실제로 오로라를 현상을 관측한 것이라면, 이 기록들은 이와 같은 오로라 관측 조건의 특성을 보일 것이다.

먼저 고려시대 赤氣 기록이 달의 位相과 관련이 있는지 알아보자. 그림 7에 달의 위상에 따라 오로라가 기록된 날의 수를 막대 그래프로 나타냈다. 왼쪽 끝은 初生, 달의 위상이 1인 때는 보름, 오른쪽 끝은 그믐 때이다. 전체 자료(위 막대 그래프)나 強度가 5나 6인 자료(빛금 친 그래프)나 모두 보름 근처에는 많이 나타나지 않고, 초생 때와 하현에서 그믐에 이르는 때에 주로 관측되었음을 알 수 있다. 보름 이후에 오로라 관측일이 많은 까닭은 야간 관측을 대개 자정 이전에 하였고, 보름 이후에는 초저녁 밤이 어둡기 때문에 오로라를 쉽게 볼 수 있었기 때문이라고 생각된다. 그림 7로부터 우리는 고려시대 赤氣 등의 자료가 달빛에 크게 영향을 받는 미약한 빛임을 알 수 있다.

둘째로 고려시대의 赤氣 기록이 季節에 따른 變化를 보이는지 살펴보자. 그림 8은 일년 중 각

(陽曆) 달에 오로라가 관측된 날의 수를 보인 것이다. <高麗史>의 오로라 기록은 대부분 12월에서 4월 사이에 나타나며, 5월에서 11월까지의 드물게 나타난다. 특히 2월과 3월에 오로라가 가장 빈번히 관측됐고, 5, 6, 7월에 가장 드물게 관측됐다. 빗금을 친 막대들은 오로라의 세기가 5와 6으로 분류된 기록들의 월별 분포인데, 전체 기록의 분포와 다르지 않다. 예상한대로 여름보다는 겨울에 관측수가 많다. 그러나 적기 기록의 빈도는 가장 높은 때가 冬至 아닌 春分 근처이고, 계절에 이렇게까지 큰 영향을 받고 있다는 사실은 밤의 길이로만 설명할 수 없다고 생각된다. 地磁氣上 低緯度에 있는 우리 나라에서 관측된 오로라의 정체와 관련이 있을 것 같고, 기상조건의 계절적 변화 등과도 관련이 있을 듯하다.

2. 黑子와 赤氣 기록분포의 상관관계

Ⅲ절에서 <高麗史>에 수록된 黑子와 赤氣 기록이 약 11년의 주기를 갖는다는 사실과 앞에서 보인 赤氣 기록이 오로라 관측의 특성을 지닌다는 사실은 이 기록들 모두가 실제로 태양흑점과 오로라를 관측한 기록임을 보이는 근거이다. 強度가 낮은 赤氣 기록도 그러하다. 그렇다면 黑子와 赤氣 기록의 분포 사이에는 어떤 상관관계가 있을까? 이들의 상관관계를 보기 위하여 교차상관함수(cross-correlation function)를 구하였다. 교차상관함수는

$$\xi_{cc}(t) = D_1 D_2 / R_1 R_2 - 1 \quad (12)$$

으로 정의하였다. 여기에서 $D_1 D_2$ 는 흑자와 적기 기록의 시간차가 t 인 쌍의 수이고, $R_1 R_2$ 는 통

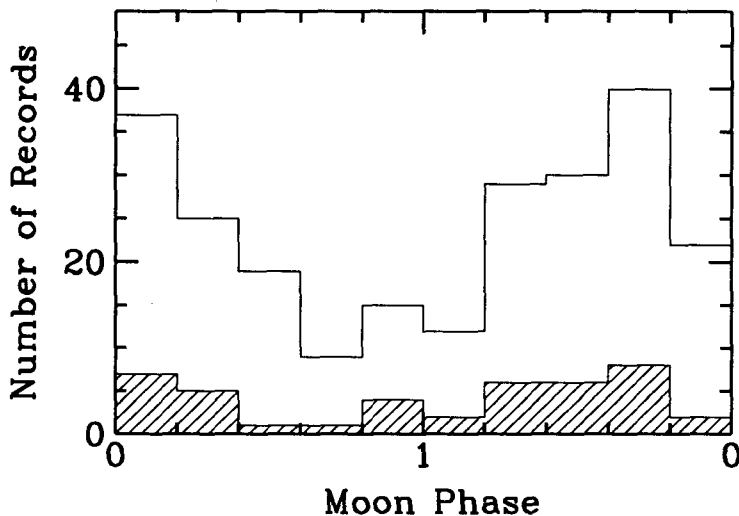


그림 7. 달의 位相과 고려시대 오로라 관측 기록수와의 관계. 왼쪽 끝은 초생달, 가운데 (위상이 1)는 보름, 오른쪽 끝은 그믐 때이다. 아래에 빗금을 친 막대 그래프는 強度를 나타내는 등급이 5나 6인 기록의 분포이다.

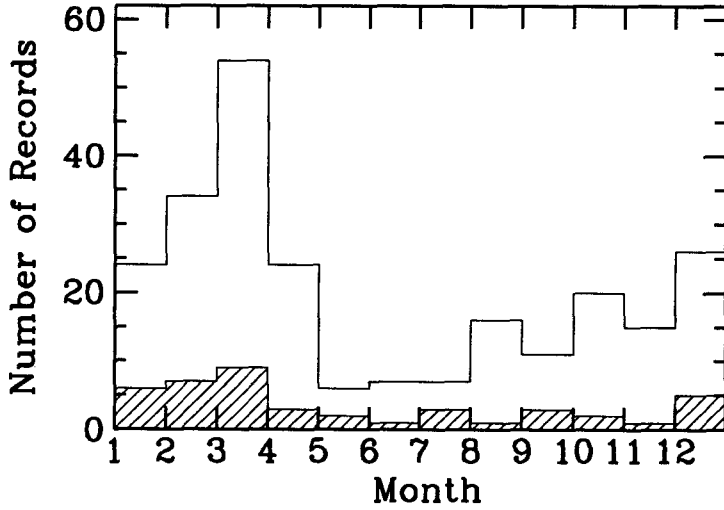


그림 8. 고려시대에 관측된 오로라 관련 기록의 陽曆 달에 따른 분포. 아래에 빗금을 친 막대 그래프는 強度를 나타내는 등급이 5나 6인 기록의 분포이다.

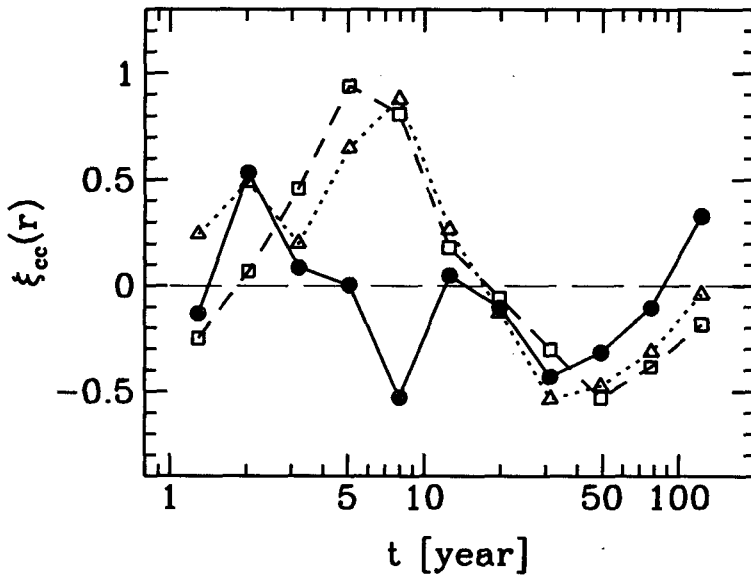


그림 9. 고려시대에 관측된 黑子와 赤氣 기록 분포의 交叉 相關函數(cross-correlation function). 비교시기는 黑子와 赤氣 기록이 동시에 나오는 1151년에서 1391년 사이로 제한하였다. 實線은 等級이 5나 6인 오로라 기록을, 破線은 등급이 4, 5, 6인 오로라 기록을, 點線은 등급이 2나 3인 오로라 기록을 사용한 교차 상관함수이다.

계적으로 그림 3과 같이 분포하는 무작위 자료들 사이에 시간차가 t 인 쌍의 수이다. 그림 9는 식 (12)를 이용하여 구한 黑子 기록과 赤氣 기록간의 교차 상관함수이다. 실선은 赤氣 기록 중에 1151년 이후에 관측되었고, 強度가 5나 6인 것 35개 기록을, 破線은 강도가 4, 5, 6인 71개 기록을, 점선은 강도가 2나 3인 110개 기록을 사용한 것이다. 강도가 큰 赤氣의 경우 黑子 기록과 약 2년 정도 位相 차이가 날 때 가장 상관관계가 좋다. 즉 시간차가 2년과 12.5년경에 상관함수는 양수가 된다. 이런 양상은 태양풍에 의한 강력한 地磁氣 폭풍이 가장 빈번한 때가 태양 흑점의 감소기에 있다는 최근의 관측결과와 일치한다 (Remesh 1996; Gonzalez, Tsurutani and Tang 1996; 아래의 논의 참조). 강도가 약한 赤氣 기록을 포함한 뒤의 두 경우는 거의 비슷한 상관함수를 보이는데, 黑자와 赤氣 관측기록은 시간차가 대체로 10년 이내에서 양의 상관관계를 지니고, 시간차 20년 이상에서는 상관함수의 적분 제약조건 때문에 음의 값을 갖게 되었다. 이 자료들의 상관함수에서 시간차가 5 - 8년인 때에 상관함수는 최대값을 갖는다. 즉 강도가 약한 오로라 현상은 흑점이 많이 관측되는 극대기보다는 이때로부터 약 5 - 6년 뒤인 흑점 극소기에 주로 나타난다는 것이다. 이 사실은 약간 의외의 결과로 생각할지 모르나, 이 결과를 뒷받침할 수 있는 최근의 연구들이 있다.

오로라 현상은 흑점이 많이 나타나는 태양흑점 極大期에 활발히 일어나리라고 생각할 수 있다. 그러나 최근의 연구에 따르면 오로라 활동은 태양 흑점 극대기보다 몇 년 뒤인 減少期에 가장 활발하다 (Gonzalez, Tsurutani & Tang 1996). 지구 자기권에 일어나는 거의 모든 대규모 자기폭풍은 태양 코로라 구멍으로부터의 질량 분출에 의해 야기된다. 그런데 태양 코로나를 좌우하는 쌍극 자기장 (dipole magnetic field)의 강도주기는 흑점 수 극대기보다 5 - 6년 앞선다 (Simon & Legrand 1993). 결과적으로 지자기 폭풍이 빈번히 일어나는 시기는 태양의 極磁氣場이 거의 소멸하는 흑점 극대기와 일치하지 않는다. 그림 10은 1966년에서 1994년까지 일어난 강한 자기폭풍의 연간 횟수(破線)와 흑점수(實線)의 변화를 보인 것이다 (Ramesh 1996). 자기폭풍이 빈번히 일어나는 시기가 흑점 극대기와 일치하지 않고, 태양의 극자기장 구멍이 저위도까지 확대되는 흑점 감소기에 있다는 사실을 볼 수 있다. 그림 10에 있는 자기 폭풍들을 비반복성(non-recurrent, transient) 폭풍과 27일 후에 다시 일어나는 반복성(recurrent) 폭풍으로 다시 나누어 보면⁷⁾, 흑점 극소기 가까이 반복성 폭풍의 극대기가 뚜렷하게 나타난다 (Ramesh 1996). 반면에 비반복성 폭풍은 흑점 극대기로부터 1-2년 뒤에 자주 일어난다. 일반적으로 비반복성 폭풍은 강력하며 태양의 플레어, 필라멘트의 소멸, 短期 코로나 구멍 등과 같은 太陽風源과 관계가 깊다. 반복성 폭풍은 상대적으로 약하고 코로나 구멍과 관련되어 있다.

이상에서 살펴보면 고려시대의 黑자와 시기적으로 약 2년의 위상차를 보이는 강도 5와 6의 赤氣 기록은 비반복성 폭풍과, 그리고 5-6년의 위상차를 보이는 강도 2와 3과 4의 赤氣 기록은 반복성 폭풍의 성질과 잘 일치하고 있다. 따라서 <高麗史>에 실린 強度가 높게 묘사된 赤氣나, 강도가 낮게 묘사된 적기 기록이 대부분 오로라 현상을 관측한 것임을 강하게 암시하고 있다.

7 태양 흑점 極小期에는 극자기장의 코로나 구멍이 적도까지 내려가 몇 달간 고정되어 머문다. 이 때 高速 태양풍이 코로나 구멍으로부터 연속적으로 방출되는데 태양의 자전에 따라 태양풍도 함께 돈다. 이 코로나 구멍이 黃道面에 이어지면 27일 마다 태양풍이 地磁氣圈을 휩쓸게 되는 것이다.

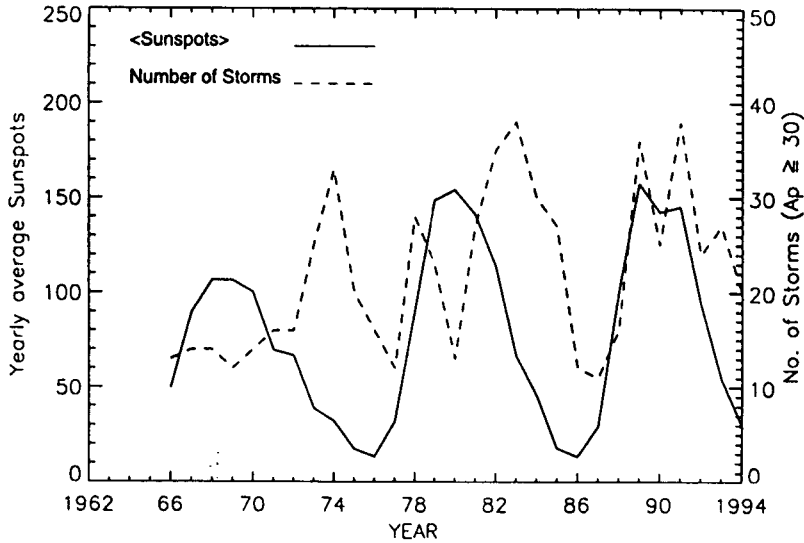


그림 10. 1966년에서 1994년까지 태양 黑點數 平均과 강한 地磁氣 暴風數의 시기적 변화 (Ramesh 1996). 여기서 자기폭풍수에는 비반복성과 반복성 폭풍이 모두 포함되었다.

V. 논의 및 결론

태양활동의 장기적 변화에 관련하여 흑점과 오로라를 관측한 역사적 기록을 이용한 기존의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 흑점수와 오로라 관측일수는 모두 11년 단주기와 약 80년 장주기를 보인다. 장주기 변화는 분명히 존재하나 주기값은 부정확하다. 또 80년보다 훨씬 긴 장주기는 그 존재와 주기값이 모두 불확실하다.
2. 지난 2000여 년간의 흑점과 오로라 기록은 나무의 나이테에 있는 ^{14}C 변이 (anomalies)와 그 변화가 일치하며, 태양활동변화 (Eddy 1976a,b)에 보다 즉각적인 변화를 보인다.
3. 地磁氣 低緯度 지역에서 관측되는 오로라의 횡수와 강도는 高緯度에서 관측되는 오로라 현상보다 태양활동의 변화를 더 민감하게 나타낸다.

^{14}C 의 양으로 태양활동의 세기를 잴 수 있는 까닭은 은하 속을 떠도는 우주선(cosmic ray)들이 지구 대기층으로 떨어져 들어오며 방사능 동위원소 ^{14}C 나 ^{10}Be 등을 만드는데, 흑점이 많이 나타나는 태양활동 극대기에는 태양의 자기장이 강해져서 우주선이 지구 대기에 덜 유입되기 때문이다. 이 양은 地磁氣 세기의 장주기 변화에도 영향을 받는다 (Cain 1987).

이와 같은 지금까지의 연구를 참고하면서 본 연구의 결과에 대하여 몇 가지 논의를 하여보자. 고려시대의 赤氣 등의 기록이 오로라 현상이라는 사실은 한 가지 의문점을 던져준다. 오로라는 지구 磁氣의 極地方에서 일어나는 현상인데 한반도를 비롯한 중국과 일본에서 어떻게 관측될 수 있었을까? 또 이들은 왜 대부분 붉은 색을 띄고 있다고 표현되었을까? 이 문제를 이해하기 위해 먼저 오로라의 발생 원리와 성질을 살펴보자.

오로라 현상은 地磁氣極 가까운 대기층에서 가시광으로 보이는 현상이다 (Akasofu & Kamide 1987). 북반구에서는 aurora borealis, 남반구에서는 aurora australis라고 부른다. 태양 표면에서는 플레어나 코로나 구멍과 관련된 활동이 일어날 때 많은 양성자와 전자가 태양풍으로 방출된다. 이 초음속 태양풍은 지구 자기장에 압력을 주어서 혜성 끝의 자기구(magnetosphere)를 만들고, 태양풍 입자의 운동에너지는 지자기권과 상호작용을 하며 최고 10^6 MW에 이르는 전기 에너지를 발생시킨다. 이 에너지는 이온층(ionosphere) 등에서 방전되며 흩어진다. 오로라 현상은 바로 이 방전과 관련된 에너지의 소진과정에서 일어난다. 극지방의 자기력선을 타고 들어오는 전자들이 일차적인 또는 여러 번의 충돌을 통해 대기층의 원자나 분자들을 흥분시키거나 이온화시키면, 이들에게서 일련의 화학반응이 일어나며 많은 방출선들이 나오는 것이다. 마치 전자들이 TV 영사막에 부딪히면 빛을 내듯이 대기층이 영사막 구실을 하는 것이다. 지상 120km에서 100km 상공에서 가시광을 내는 현상이 대개 일어나는데 (때로 1000km 높이까지 뻗는다), 그보다 높으면 중성 원자가 부족하고, 그보다 낮은 고도에서는 대기 밀도가 급격히 높아져서 에너지가 높은 전자가 고갈되기 때문이다. 예를 들면 산소원자에서는 5577Å과 6300-6364Å 파장에서 밝은 초록색과 붉은색 금지선(forbidden line)이 나온다. 강한 磁氣 폭풍이 일어날 때는 특히 6300-6364Å 다중선이 높은 高度에서 장관을 이루며 방출되는 "A형 붉은 오로라"가 일어난다. 또 오로라 장막의 밑부분은 산소원자의 초록빛이 약해지고, 저고도까지 투과해 들어 온 에너지가 큰 전자에 의해 질소 분자 방출띠가 나와 진홍색 또는 포도주 빛으로 보인다 ("B형 붉은 오로라")⁸⁾.

오로라는 남북 방향으로 두께는 1km 이하에 불과하고 동서 방향 길이는 3000 - 6000 km에 이르는 얇은 장막과 같은 모양을 한다. 가속되는 전자들이 얇은 면 속에 갇혀 있기 때문이다. 오로라를 지구 밖에서 가시광으로 보면 지자기극을 에워싸며 어두운 밤 쪽으로 치우친 고리로 보이는데 이를 오로라 고리 (auroral oval)라고 부른다. 오로라 고리는 장막처럼 보이는 "끊어진 오로라(discrete aurora; 또는 오로라호 aurora arc)"와 그 주위에 보이는 "퍼진 오로라(diffuse aurora)"로 이루어져 있다. 지자기극으로부터 밤쪽으로는 약 23도 떨어진 곳에서 가장 밝다 (낮 쪽으로는 약 13도 떨어진 곳). 오로라 고리의 極쪽이나 赤道쪽 경계의 위치는 오로라 활동의 강도와 시각에 따라 변한다. 태양활동이 매우 심할 때 상층대기가 매우 뜨거워지며 팽창하면 오로라는 地磁氣 위도 50도 이하까지 내려오기도 하고 (그림 11 참조), 흥분된 산소원자로 인해

8 이외에도 오로라의 분광띠는 많은 원자와 분자들의 기저상태와 흥분상태 사이의 천이 때문에 X선에서 전파에 이르기까지 모든 전자기파 대에서 매우 복잡한 방출선을 보인다. 오로라 분광띠에서 발견되는 원자와 분자들은 O, O*, N, N*, N₂, N₂*, O₂, O₂*, NO, NO₂, H, OH 등으로 대기층 입자들과 전자의 상호작용으로부터 간단히 만들어질 수 있는 물질들이 모두 관여하고 있다.

적도쪽 경계에 "안정된 붉은 오로라호(stable auroral red arc; SAR arc)"가 생기기도 한다.

따라서 태양활동이 강할 때 저위도 지방에 붉은 색의 퍼진 오로라가 보일 가능성이 크고, 한반도나 중국, 만주, 일본 지역에서 오로라가 주로 붉은 색으로 보일 수 있음을 이해할 수 있다. 또 저위도 지방의 오로라 현상은 태양활동이 심할 때 나타나기 때문에 위에 언급한 바처럼 저위도 지방의 오로라 관측자료가 고위도 지방에서의 관측자료보다 태양 활동 주기를 더욱 민감하게 나타내는 까닭이 여기 있다.

고려시대에 한반도에서 오로라가 관측될 수 있었던 보다 중요한 까닭은 地磁氣極의 이동에 있다. 지자기극은 매우 복잡하게 이동하지만 대체로 5년에 서쪽으로 1° 씩 옮겨가고 있다(Cain 1987). 오늘날 지자기 북극은 캐나다 북쪽인 서경 105.1°, 북위 79.0° 에 있지만 (이시우와 안

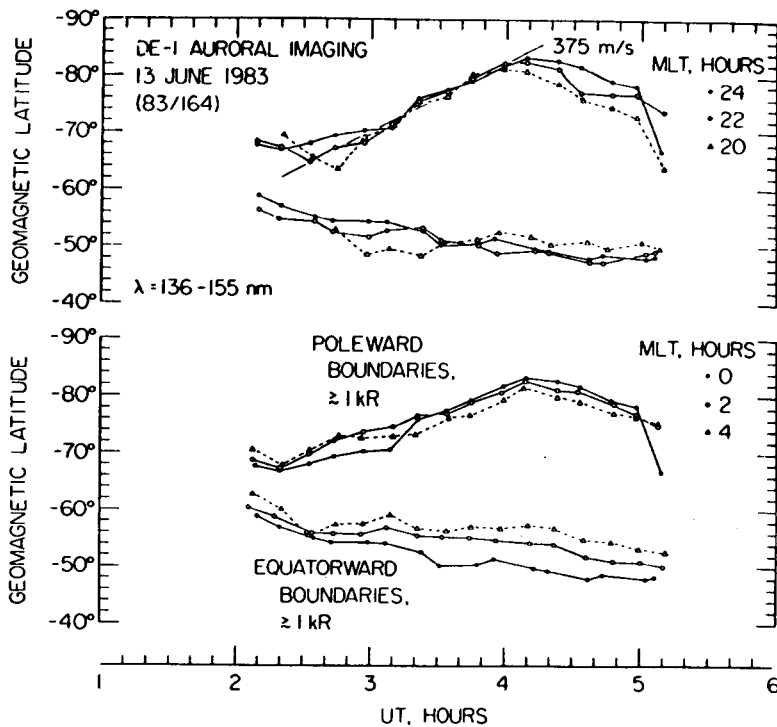


그림 11. 1983년 6월 13일 0202-0517 UT 사이에 南極 부근에서 발생한 오로라의 極쪽과 赤道쪽 경계의 변화를 시간에 따라 보인 그림 (Craven & Frank 1991). 오로라 활동이 나타난 뒤, 급격히 膨脹하여 마지막에서는 -50도까지 오로라 활동 영역이 확대되었다.

병호 1997)⁹⁾, 고려시대의 오로라 기록이 집중적으로 나오는 11에서 15세기 사이에는 동경 90°에서 180° 사이에 있었으며, 위도는 약 70°에서 80° 사이에 있었다 (Kawai et al. 1967). 따라서 고려의 수도인 개성의 地磁氣 위도는 대략 48°에서 58° 사이였으므로 오로라 활동이 심할 때 오로라를 충분히 관측할 수 있는 위치였다. 또 고려의 북방 한계는 이보다 약 2° 더 고위도이었다.

태양의 흑점과 오로라 현상은 태양활동을 지구에서 직접 볼 수 있는 천체 현상이지만 또 다른 관측을 통하여 태양활동의 장기적 변화를 알아 볼 수 있다. 태양은 활동 주기에 따라 지름이 달라지고 빛에너지 방출도 변화하여 지구의 기온에 영향을 미친다 (Bromage and Butler 1996; Smirnov and Kononovich 1996; Rozelot 1996). 따라서 고대의 역사적 기록에서 흑점이나 오로라 기록과 기상이나 해양학적 기록간의 상관관계를 보는 것도 흥미로운 일이다. 본 연구 결과에 따르면 고려시대에 흑점과 오로라 기록을 통해 본 태양활동 변화의 단주기는 각각 10.5년과 10년이었다. 이는 최근에 측정된 약 11년 주기와 매우 가까운 값이다. 그러나 태양활동 주기가 실제로 조금씩 느려지고 있다는 추정도 할 수 있다. 다른 시대의 자료, 독립적인 다른 나라의 자료나 다른 자연현상 자료를 이용하여 검증할 필요가 있다.

한편 태양활동 변화의 비선형성을 지적하고자 한다. 본 연구에서는 태양활동의 지표가 되는 흑점수와 오로라 발생일수로부터 태양활동 변화의 주기들을 추출하고자 하였다. 여기에는 태양활동의 변화가 여러 선형적 주기들의 합으로 표현될 수 있다는 가정이 전제되어 있다. 그러나 태양활동의 원동력인 자기장 발생은 비선형적 과정에 의해 조절된다. 태양과 같은 별에서 자기장의 발생과 진화는 별 내부에서 차등자전과 거대 대류가 자기장을 변형시키면서 자기장이 성장한다는 다이나모(dynamo) 이론으로 설명한다. 이렇게 성장하는 자기장은 거꾸로 대류와 차등자전을 억제 또는 변형시키고, 결과적으로 다이나모 작용이 약해지게 된다. 이 되먹임 작용(feedback)은 비선형적 현상이고, 태양 자기장의 최대 강도와 주기는 바로 이 되먹임 작용에 의해 결정된다. 태양활동의 장주기 변화는 이 되먹임 작용의 실제 상황에 따라 좌우되기 때문에 태양활동의 장주기 변화는 고정된 주기가 없이 매우 불규칙 할 수 있다. 따라서 고대의 태양활동 변화를 살펴보기 위해서는 흑점과 오로라 기록뿐만 아니라, ¹⁴C, 기상 및 해양학적 자료 등과 서로 상관관계를 확인하여 비선형적 효과에 의한 변화도 이해하여야 할 것이다.

다음으로 표2에 수록한 赤氣 등의 기록 일부가 오로라 현상을 기술한 것이 아닐 가능성을 생각해 보자. <高麗史>와 조선시대의 天文書인 <天文類抄>에는 靑赤氣와 靑白氣, 黃(赤)氣 등은 태양과 밀접한 기상현상으로 설명되고 있다. 따라서 氣의 색깔이 청색이나 황색을 띤 경우는 오로라가 아닐 가능성이 있다. 또 <高麗史> 五行志에 '火'로 분류되어 집중적으로 나오는 赤氣 기사는 強度에 상관없이 오로라일 가능성이 매우 높으나, 같은 五行志에 黑氣나 白氣, 雷, 大風 부분에 나오는 赤氣 기록은 먹구름이나 안개 같은 기상현상과 관련된 태양이나 달빛일 가능성이 있다고 본다. 표 2에 실은 232개 '오로라' 기록 모두를 사용하여 구한 power spectrum이 그림 5(a)이고, 이렇게 의심이 가는 기록들을 모두 제외한, <高麗史> 五行志에서 赤氣로 따로 분류된 기록 156개만을 사용하여 구한 power spectrum이 그림 5(b)이다. 이들을 비교하면 큰 차

9 쌍극자 (dipole)만을 보면 지자기 북극은 1995년 현재 북위 79.3°, 서경 71.5° 인 그린란드에 있다.

이는 없으나 後者에 약 10년 주기가 약하게 나타난다. 이 사실은 前者의 일부가 오로라 현상이 아니거나 특별한 주기성을 갖지 않는 오로라 현상이라는 생각을 하게 한다.

마지막으로 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 본 연구에서는 불완전한 일차원 자료를 이용하여 power spectrum을 계산하는 방법을 개발하였다. 또 이 방법을 고려시대의 黑子와 赤氣 자료에 적용해 power spectrum과 교차 상관함수를 구해 봄으로써 이 기록들의 분포에 약 11년의 주기성이 있고, 따라서 이 기록들이 대부분 각각 흑점과 오로라 현상을 관측한 자료임을 증명하였다. 앞으로 연구할 조선시대의 흑점과 오로라 기록과 함께 태양활동의 장기적 변화를 연구하는 데에 매우 귀중한 자료라고 생각한다. 고려시대의 다른 모든 천문현상기록수의 변화에 의한 효과를 제거한 결과 이 기간동안의 흑점과 오로라 기록에서는 통계적으로 신뢰도가 높은 장주기를 발견하지 못하였다. 한편 같은 시대에 중국의 왕조가 남긴 흑자와 적기 자료를 수집하여 power spectrum을 분석한 결과, 그 특성들이 고려의 기록과는 다르며, 이 기록들에는 기대되는 약 11년 주기가 존재하지 않음을 발견하였다.

향후 더욱 완전하게 보완되고, 장기간에 걸친 흑점과 오로라 자료목록을 만들어 태양활동의 장기적 변화에 대한 조사를 할 필요가 있다. 우선 중국과 일본의 오로라 기록들에 대하여 자료의 신뢰도 등을 조사하고, 한중일 삼국의 흑점과 오로라 기록을 종합하여 위에서 수행한 것과 같은 분석을 통하여 태양활동의 장기적 변화를 살펴보아야 할 것이다. 한편 중국과 일본에서는 각국의 역사적 천문현상기록을 모두 정리해 놓았다. 그러나 우리 나라에서는 삼국시대의 천문현상기록(朴昌範과 羅大一 1994)만이 정리되어 있다. 고려시대의 기록은 현재 정리가 완성되어 교정 중에 있다(梁洪鎭과 朴昌範 1998). 그러나 방대한 조선시대의 천문기록은 금세기 초에 정리된 <增補文獻備考> 이후에는 몇 가지 파편적인 조사 이외에는 전혀 정리가 되어 있지 않은 실정이다. 천문학과 관련된 우리 나라의 옛 기록들을 시급히 정리해야 할 단계에 있다고 생각한다.

참고문헌

- 金宗瑞, 鄭麟趾 등 편저, 한영길, 김교식 譯, <高麗史> - 天文志, 五行志 (신서원: 서울)
 金富軾 著, 김중권 譯, <三國史記> (명문당: 서울)
 劉君燦 編著, 1988, <中國天文學史新探> (明文書局: 台北)
 朴昌範과 羅大一, 1994, 韓國科學史學會誌, 제 16권, 제 2호, 167
 北京天文臺, 1988, <中國古代天象記錄總集>, 江蘇 科學技術 出版社
 梁洪鎭, 朴昌範, 1998, <한국의 고대 천문현상 관측기록>, 준비중
 李純之 著, <天文類抄>
 이시우, 안병호, 1997, <태양계 천문학> (서울대학교 출판부: 서울)
 一然 著, 박성봉, 고경식 譯, <三國遺事> (서문문화사: 서울)
 이은성, 유경로 역, <국역 增補文獻備考> - 象緯考(日月變, 雲氣)
 韓甫植, 1978, <韓國年曆大典>, 제 2판 수정본
 Akasofu, S.-I., & Kamide, Y. 1987, in The Solar Wind and the Earth, ed. S.-I. Akasofu & Kamide, Geophysics and Astrophysics Monographs (Reidel Pub. Comp.: Dordrecht), p143
 Bromage, B. J., & Butler, C. J. 1996, in Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial

- Disturbances, ASP Conference Series, v. 95, ed. K. S. Balasubramaniam, S. L. Keil & R. N. Smartt, p472
- Cain, J. C. 1987, in *The Solar Wind and the Earth*, ed. S.-I. Akasofu & Kamide, Geophysics and Astrophysics Monographs (Reidel Pub. Comp.: Dordrecht), p57
- Craven, J. D., & Frank, L. A. 1991, in *Auroral Physics*, ed. C.-I. Meng, M. J. Rycroft, and L. A. Frank (Cambridge UP: Cambridge), p273
- Eddy, J. A. 1976a, *Science*, 192, 1189
- Eddy, J. A. 1976b, in *Physics of Solar Planetary Environments*, ed. D. J. Williams (AGU; Washington D. C.), p958
- Gleissberg, W. 1965, *J. Brit. Astron. Ass.*, 75, 227
- Gonzalez, W. D., Tsurutani, B. T., & Tang, F. 1996, in *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances*, ASP Conference Series, v. 95, ed. K. S. Balasubramaniam, S. L. Keil & R. N. Smartt
- Hansteen, C. 1831, *Poggendorff's Ann.*, XXII, 536
- Kawai, N., et al. 1967, *J. Geomagnetism and Geoelectricity*, 19, no. 3
- Keimatsu, M. 1976, *Ann. Sci.*, 13, 1
- Link, F. 1962, *Geofys. Sb.*, X, 297
- Link, F. 1964, *Geofys. Sb.*, XII, 501
- Link, F. 1968, *J. Brit. Astron. Ass.*, 78, 195
- Pannekoek, A. 1961, *A History of Astronomy* (Dover: New York)
- Park, C., Vogeley, M. S., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1994, *ApJ*, 431, 569
- Ramesh, K. B. 1996, in *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances*, ASP Conference Series, v. 95, ed. K. S. Balasubramaniam, S. L. Keil & R. N. Smartt, p462
- Rozelot, J. P. 1996, in *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances*, ASP Conference Series, v. 95, ed. K. S. Balasubramaniam, S. L. Keil & R. N. Smartt, p568
- Schwabe, H. 1844, *Astron. Nachrichten*, 21, 233
- Shove, D. J. 1955, *J. Geophys. Res.*, 60, 127
- Simon, P. A., & Legrand, J. P. 1993, in *The Cosmic Dynamo*, ed. F. Krause et al., IAU Sym. No. 157 (Kluwer: Dordrecht), p97
- Siscoe, G. K. 1980, *Rev. of Geophys. and Space Phys.*, 18, 647
- Smirnov, R. V., and Kononovich, E. V. 1996, in *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances*, ASP Conference Series, v. 95, ed. K. S. Balasubramaniam, S. L. Keil & R. N. Smartt, p481
- Taylor, R. J. 1997, *The Sun as a Star* (Cambridge University Press: Cambridge)
- Thurston, H. 1994, *Early Astronomy* (Springer-Verlag: New York)
- Yau, Stephenson, & Willis 1995, *A Catalogue of Auroral Observations from China, Korea, & Japan (193BC - AD1770)*, Council for the Central Laboratory of the Research Councils, Technical Report RAL-TR-95-073