

## Maunder 극소기와 태양의 활동

이은희  
연세대학교 천문대

### THE MAUNDER MINIMUM AND SOLAR ACTIVITY

Eun-Hee Lee

Yonsei University Observatory, Seoul 120-749, Korea  
E-mail: ehl77@obs.yonsei.ac.kr

(Received May 4, 2006; Accepted May 18, 2006)

#### 요 약

흑점수와 오로라의 관측 자료를 과거로 연장해 보면 dynamo 이론과 태양의 활동 그리고 기후 간에 상당한 관계가 있음을 알 수 있다. 특히 흑점이 거의 나타나지 않았던 Maunder 극소기가 이상 혹한기였던 유럽의 소빙하기와 일치하고, 흑점의 출현과 오로라 발생 사이에 밀접한 관계가 있다는 사실이 알려졌다. 이에 따라 Maunder 극소기 시기의 흑점과 오로라의 관측 자료들을 간접적 solar proxy 자료들과 함께 조사하고, 이 시기에 나타난 태양 활동의 모습과 특징을 기후 변화의 관계와 함께 알아보았다.

#### ABSTRACT

The extension of sunspot number series and auroral observations backward in time is of considerable interest for dynamo theory, solar activity and climate research. It was known that the Maunder minimum corresponded to a unusual cold so called little ice age in Europe and the appearance of sunspot had a close relation to the occurrence of aurora. Therefore we have examined ancient records of sunspots and aurorae with indirect solar proxies during this period and have studied for the features and peculiarities of solar activity with the relation of the climate variation.

*Keywords:* sunspot number, dynamo theory, solar activity, Maunder minimum

#### 1. 서론

태양활동의 통계적 성질을 연구하기 위해서는 태양 활동의 모습을 반영하는 수치학적 통계가 필요하다. 이러한 성질을 나타내는 것을 태양 활동의 지표들이라 하는데 태양활동의 지표들에는 백반(facule)과 플레어, 코로나 구멍과 여러 파장대의 전자기 복사에 근거하는 다른 지표들도 많지만 태양 원반 위에 나타나는 흑점수가 가장 널리 사용되어졌다. 태양의 정기적인 흑점 관측은 1610년 갈릴레오의 관측을 시작으로 거의 400년간 규칙적으로 이루어졌으며, 이로부터 얻은 흑점수는 태양활동의 연구에 가장 많이 사용되었다(Usoskin & Mursula 2003). 또한 흑점 관측에 이어 오로라의 육안 관측은 변화하는 태양풍이 원인이 된 지자기활동을 반영하는 규칙적인 계열을 형성하며, 흑점의

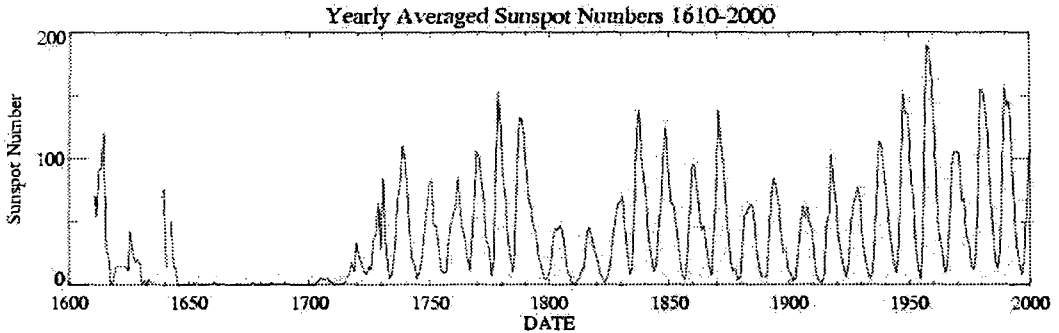


그림 1. 1610-2000년의 연평균 흑점수(<http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/sunspots.htm>).

발생과 오로라 빈도수 사이의 강한 관계로부터 태양활동을 나타내는 또 다른 지표로 사용되었다. 흑점과 오로라의 역사적 기록은 단편적이고 관측 빈도에 의존하는 문제도 있지만 과거에 일어났던 태양활동의 실제 모습을 보여주는 중요한 자료로서 지구 대기에 유입된 cosmic ray에 의해 만들어지는 나무 태의  $^{14}\text{C}$  동위원소나 극지방 얼음 층 속에 있는  $^{10}\text{Be}$  동위원소 등, 간접적 solar proxies 자료들과 함께 과거 태양활동의 모습을 알려주는 유효한 정보가 된다.

이러한 지표들로부터 태양활동의 변화를 시간적으로 보았을 때, 가장 뚜렷이 나타나는 변화는 Schwabe 주기로 알려진 11년 주기의 변화이다. 이 주기의 변화는 다시 장주기적으로 Gleissberg 주기라 부르는 영년주기(secular cycle)의 변화와 이 보다 더 큰 초 영년주기(super-secular cycle)의 변화를 보이는데, 이러한 주기들 사이에는 때때로 태양활동이 거의 나타나지 않는 최대 극소기(great minimum)들이 끼어 나타난다(Vitinsky et al. 1987). 최대 극소기는 태양활동의 변화를 이론적으로 설명하는 dynamo 이론에 대한 수수께끼로, 가장 최근에 일어났던 최대 극소기는 1645-1715년 사이에 있었던 Maunder 극소기로 알려졌다(Eddy 1976, 1983). 흑점수의 관측이 정기적으로 이루어지지 않았던 Maunder 극소기 이전의 최대 극소기는  $^{14}\text{C}$  동위원소나  $^{10}\text{Be}$  동위원소 등의 간접적 solar proxies에 의해 알려졌는데 1410-1510년 사이에 있었던 Spörer 극소기와 12세기에 일어났던 Wolf 극소기 등을 그 예로 들 수 있다. Maunder 극소기가 유럽의 소빙하기와 일치하고 Spörer 극소기와 Wolf 극소기 모두 지구의 한랭한 시기와 일치함에 따라 태양의 활동과 기후의 변화 사이에 밀접한 관계가 논의되었다.

이 논문은 태양활동의 장기적 지표로 사용되는  $^{14}\text{C}$  동위원소나  $^{10}\text{Be}$  동위원소 등으로 분석된 태양활동의 변화를, 역사적 기록에서 조사한 흑점과 오로라 등 실제의 관측 자료와 함께 비교 분석하는 방법을 사용하여, 장주기적 변화(long-term variation)의 관점에서 Maunder 극소기의 모습과 특징을 알아보고, Maunder 극소기와 같은 최대 극소기와 기후의 변화 관계를 알아보았다.

## 2. Maunder 극소기와 태양의 활동

Maunder 극소기는 1645년에서 1715년 사이 흑점이 거의 나타나지 않았던 긴 기간을 말한다. 이렇게 오랫동안 흑점이 나타나지 않는 모습은 Spörer에 의해 처음으로 지적되었는데, 그 후 Maunder에 의해 다시 검토되어졌고, J. Eddy에 의해 좀더 상세하고 광범위하게 다루어졌다(Foukal 2004).

망원경에 의한 흑점 관측이 시작되던 1610년부터 2000년 사이 연평균 흑점수의 변화를 나타내는 그림 1은 Maunder 극소기 동안 흑점이 거의 나타나지 않았음을 보여준다. Maunder 극소기는 정상적인 태양 활동 상태에서 어떤 전조 없이 갑작스럽게 일어났으며(Kovaltsov et al. 2004), 이 기간 동안 흑점은 11년 주기의 징후 없이 산발적으로 나타났다(Letfus 2000). 그림 1에서 11년의 주기는 Maunder 극소기가 끝나는 무렵부터 보이기 시작해서 1700년 후에 지배적으로 나타나는데 Maunder 극소기의 끝 부분부터 11년 주기의 회복과 함께 흑점 주기 진폭의 상당한 영년 증가(secular increase)가 나타남에 따라 11년 주기의 회복은 태양 활동이 정상상태로 돌아가는 신호이자 극소기 이후 흑점활동의 회복을 의미하는 것으로 보인다.

표 1은 Eddy(1976)가 1610-1715년 동안 연평균 흑점수와 흑점이 최대와 최소가 되는 해 그리고 예상되는 각 주기의 흑점 최대치를 조사한 값들을, 조선의 오로라 관측일수(Lee et al. 2004)와  $\Delta^{14}\text{C}$ 의 양(Stuiver et al. 1998)과 비교하여 작성한 것이다. 표 1에서 Maunder 극소기 동안 흑점이 산발적으로 나타나긴 하지만 주로 1652-1662년과 1672-1689년의 두 집단에서 모이는 것을 볼 수 있다. 조선에서 관측된 오로라의 관측 기록 역시 이 두 집단 안에 분포되어 있는 것을 알 수 있는데 이는 흑점과 오로라 간에 밀접한 관계가 서로 다른 관측으로 검증되는 것이라 하겠다. Usoskin et. al.(2000)은 흑점이 이 두 집단에서 모이는 것과 드문드문 일어나는 흑점의 분석 개발 방법을 이용하여 Maunder 극소기를 통해서 흑점 활동의 22년 주기가 지배적임을 알아냈다. Maunder 극소기 동안, 22년 주기가 지배적이고 약한 11년 주기가 부지배적이라는 결론은 간접적 solar proxy 자료들을 통해서도 일치하는 결과로, 이에 대해서는 나무 테에 축적되어있는  $^{14}\text{C}$  동위원소 양의 변화(Miyahara et al. 2004)와 같은 시기의 오로라 현상에서도 22년 주기가 지배적임이 드러났다.

한편 Lee et al.(2004)은 고려사와 조선왕조실록, 그리고 증보문헌비고와 승정원일기 등에 있는 기록 중, 흑점과 오로라의 기록들을 조사하여 태양 활동의 11년 주기와 88년 주기를 검증한 바 있는데, 그림 2는 이들이 조사한 기록 중 오로라의 기록을 시간적 분포로 나타낸 것이다. 약 800년간에 이르는 오로라의 기록을 나타내고 있는 그림 2는 오로라의 기록이 거의 없거나 적게 분포하고 있는 부분들이 모두 태양활동이 극히 저조했던 것으로 알려진 각 최대 극소기의 시기와 일치함을 보인다. 이는 당시 기록을 하지 않았거나 빠뜨린 것이 아니라 오히려 관측한 결과를 사실 그대로 기록한 것임을 증명하고 있다. 위의 기간 중 Maunder 극소기 동안에 관측된 조선의 흑점과 오로라의 기록을 조사해 보면 다른 최대극소기와 마찬가지로 그 기록이 아주 적음을 알 수 있다. 특히 1648년과 1660년, 단 두 번의 관측 기록만 전하는 흑점의 기록은 어떠한 분석도 가능하지 않게 한다. 하지만 다른 자료들과의 비교를 나타낸 표 1을 보면 1648년과 1660년 모두 Maunder 극소기 중 흑점의 극대기에 해당하고 오로라도 함께 관측된 점이 주목된다. 더구나 Maunder 극소기 이전 1620년대에 집중적으로 나타난 오로라의 기록 중 연간 총 32회의 관측 기록을 보이는 1626년은 흑점이 극대기에 해당할 뿐만 아니라 흑점수와 반비례 관계에 있는  $\Delta^{14}\text{C}$ 의 양 역시 최저치(-6.4 per mil)를 나타내고 있어, Maunder 극소기 이전 태양이 최고의 활동 상태에 있던 해라는 사실과 동시에 다른 지표와도 일치된 결과를 보이는 조선의 오로라 기록이 얼마나 믿을만하고 정확한 것인가를 알 수 있게 한다.

Paris 천문대의 측정과 Ribes & Nesme-Ribes(1993)의 조사에 따르면 1666-1712년 사이 흑점은 거의 대부분 태양의 남반구와 적도 가까이에서 나타났으며 이때의 평균 위도는 남위  $\sim 10$ 도였다고 한다. 특히 Maunder 극소기가 끝나는 무렵에는 오직 태양의 남반구 표면에만 나타나 흑점이 태양의

표 1. 연평균 흑점수와 오로라의 연간 관측일수 및  $^{14}\text{C}$  양의 변화.

| YEAR | R  | W   | S   | KAN | Stuiver | YEAR | R  | W   | S  | KAN | Stuiver |
|------|----|-----|-----|-----|---------|------|----|-----|----|-----|---------|
| 1610 |    |     |     | 2   | -2.7    | 1663 | 0  |     |    |     | 8.7     |
| 1611 | 30 | Min |     | 2   | -6.4    | 1664 | 0  |     |    |     | 6.1     |
| 1612 | 53 |     |     |     | -1.5    | 1665 | 0  |     |    |     | 6.7     |
| 1613 | 28 |     |     | 1   | -5.2    | 1666 | 0  | Min |    |     | 8.3     |
| 1614 |    |     |     |     | -1.3    | 1667 | 0  |     |    |     | 10.2    |
| 1615 |    |     |     |     | -4.5    | 1668 | 0  |     |    |     | 12      |
| 1616 |    | Max | 90  |     | -5.4    | 1669 | 0  |     |    | 1   | 11.2    |
| 1617 |    |     |     | 3   | -4.1    | 1670 | 0  |     |    |     | 9.8     |
| 1618 |    |     |     | 2   | -1.5    | 1671 | 6  |     |    |     | 15.1    |
| 1619 |    | Min |     | 3   | -0.3    | 1672 | 4  |     |    |     | 10.9    |
| 1620 |    |     |     |     | -0.6    | 1673 | 0  |     |    |     | 15.4    |
| 1621 |    |     |     |     | -2.3    | 1674 | 2  |     |    |     | 9.3     |
| 1622 |    |     |     |     | -2.6    | 1675 | 0  | Max | 60 | 1   | 12      |
| 1623 |    |     |     | 1   | 2       | 1676 | 10 |     |    |     | 11.3    |
| 1624 |    |     |     | 11  | -4      | 1677 | 2  |     |    |     | 9.9     |
| 1625 | 41 |     |     | 21  | -0.8    | 1678 | 6  |     |    |     | 8.5     |
| 1626 | 40 | Max | 100 | 32  | -6.4    | 1679 | 0  |     |    | 2   |         |
| 1627 | 22 |     |     | 5   | -0.4    | 1680 | 4  | Min |    | 1   | 12.9    |
| 1628 |    |     |     | 2   | -4.7    | 1681 | 2  |     |    | 3   | 12      |
| 1629 |    |     |     | 1   | -1      | 1682 | 0  |     |    | 5   | 12.2    |
| 1630 |    |     |     |     | -4      | 1683 | 0  |     |    |     | 11.5    |
| 1631 |    |     |     |     | -3.3    | 1684 | 11 |     |    |     | 13.2    |
| 1632 |    |     |     |     | -3.6    | 1685 | 0  | Max | 50 |     | 13.5    |
| 1633 |    |     |     | 3   | -0.2    | 1686 | 4  |     |    |     | 17.6    |
| 1634 |    | Min |     |     | -3.4    | 1687 | 0  |     |    |     | 14.1    |
| 1635 |    |     |     |     | 1.3     | 1688 | 5  |     |    |     | 16.6    |
| 1636 |    |     |     |     | 1.5     | 1689 | 4  |     |    |     | 15.7    |
| 1637 |    |     |     |     | 0.6     | 1690 | 0  |     |    |     | 13.9    |
| 1638 |    |     |     | 3   | -2.6    | 1691 | 0  |     |    |     | 14.7    |
| 1639 |    |     |     | 1   | 0.6     | 1692 | 0  |     |    |     | 16.3    |
| 1640 |    | Max | 70  |     | -2.5    | 1693 | 0  | Max | 30 | 1   | 15.7    |
| 1641 |    |     |     |     | 2.1     | 1694 | 0  |     |    |     | 16.3    |
| 1642 | 6  |     |     |     | 1.5     | 1695 | 6  |     |    |     | 15.8    |
| 1643 | 16 |     |     |     | 3.8     | 1696 | 0  |     |    |     | 16.6    |
| 1644 | 15 |     |     |     | 2.2     | 1697 | 0  |     |    |     | 18.2    |
| 1645 | 0  | Min |     |     | 2.2     | 1698 | 0  | Min |    |     | 17.4    |
| 1646 |    |     |     |     | 2.6     | 1699 | 0  |     |    |     | 18      |
| 1647 |    |     |     |     | 4       | 1700 | 2  |     |    |     | 17.5    |
| 1648 |    |     |     | 1   | 3.3     | 1701 | 4  |     |    |     | 19      |
| 1649 |    | Max | 40  | 1   | 4       | 1702 | 6  |     |    |     | 15.2    |
| 1650 | 0  |     |     |     | 5.7     | 1703 | 8  |     |    | 2   | 17.7    |
| 1651 | 0  |     |     |     | 4.9     | 1704 | 9  |     |    |     | 19.1    |
| 1652 | 3  |     |     |     |         | 1705 | 18 | Max | 50 |     | 16.5    |
| 1653 | 0  |     |     |     | 4       | 1706 | 15 |     |    |     | 14.4    |
| 1654 | 2  |     |     |     | 7.1     | 1707 | 18 |     |    |     | 15      |
| 1655 | 1  | Min |     |     | 6.3     | 1708 | 8  |     |    |     | 15.4    |
| 1656 | 2  |     |     |     | 4.6     | 1709 | 3  |     |    |     | 16.9    |
| 1657 | 0  |     |     |     | 4.4     | 1710 | 2  |     |    |     | 17.5    |
| 1658 | 0  |     |     |     | 9.4     | 1711 | 0  |     |    |     | 18.5    |
| 1659 | 0  |     |     |     | 6.2     | 1712 | 0  |     |    | 1   | 13.9    |
| 1660 | 4  | Max | 50  | 4   | 3.9     | 1713 | 2  |     |    | 1   | 17.6    |
| 1661 | 4  |     |     |     | 9       | 1714 | 3  |     |    |     | 17.9    |
| 1662 | 0  |     |     |     | 7.5     | 1715 | 10 |     |    |     | 16.7    |

R: 연평균 흑점 관측일수, W(Waldmeier): 흑점 최대와 최소의 해, S(Schöve' values): the maxima of each supposed cycle, KAN: 오로라 관측일수(조선) Stuiver:  $\Delta^{14}\text{C}$ 의 양(per mil)

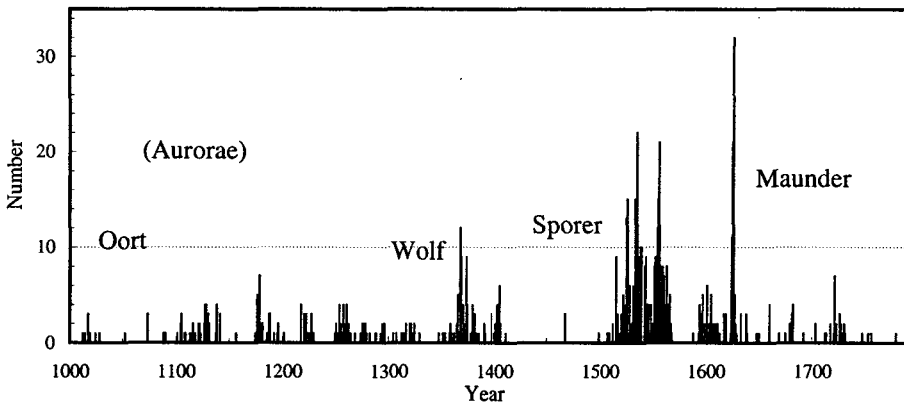


그림 2. 고려와 조선의 오로라 관측기록 분포와 최대극소기(Lee et al. 2004).

자기장에 심각한 비대칭이 있었던 것으로 나타났는데, 이러한 현상은 극소기 이후 다시 흑점이 북위 ~25도에서 남위 ~25도 사이에 분포함에 따라 정상으로 회복된 것으로 알려졌다. 따라서 Maunder 극소기 동안 흑점 활동의 특징은 자기장의 심각한 비대칭 현상과 11년 주기의 부재 그리고 22년 주기가 지배적이었음을 알 수 있다.

한편 탄소 동위원소인  $^{14}\text{C}$ 는 태양활동이 극히 적은 시기에 아주 강한 전하 입자를 띤 galactic cosmic ray의 양성자들이 지구 대기에 대량 유입되어 대기의 질소와 충돌할 때 생성된다. 따라서 흑점수와  $^{14}\text{C}$ 의 양은 서로 역 상관관계에 있다. 이와 같은 이유로 Maunder 극소기 동안 태양의 활동이 갑자기 약해짐에 따라 태양풍의 지구에 대한 영향력이 줄어들었고 그 여파로 지구대기에 유입되는 galactic cosmic rays의 양이 급격히 증가하면서 지상에서 발견되는  $^{14}\text{C}$  동위원소나  $^{10}\text{Be}$  동위원소의 양이 증가하였다. 이러한 변화는 표 1에서 흑점이 거의 나타나지 않는 기간 동안  $\Delta^{14}\text{C}$ 의 값이 크게 증가한 사실과  $\Delta^{14}\text{C}$  양의 변화를 나타내는 그림 3에서도 알 수 있다.

그림 3은 Miyahara et al.(2004)이 382년 수령의 삼나무를 이용하여 1631-1739년 동안 나무 테에 있는  $\Delta^{14}\text{C}$ 의 양을 조사한 결과이다. 이들은 Maunder 극소기 동안 태양 활동이 13-15년과 24-29년의 주기 변화를 나타내고 있음을 지적하면서, 이를 Maunder 극소기 동안에도 11년의 주기와 22년의 주기 변화를 나타내는 자기극 역전의 존재가 지속된 증거로 보았다. 그리고 11년의 주기가 11년 보다 좀 더 길어진 것에 대해서는 11년 주기의 길이가 태양활동의 강도와 역비례 관계에 있는 것으로 보았다.

또한 Beer et al.(1998)은 Greenland 얼음 층 속에 있는  $^{10}\text{Be}$  농도의 최대 값과 최소 값들을 사용해서 태양 활동의 최대와 최소가 되는 날들을 추론하였다. 이때  $^{10}\text{Be}$  동위원소로 유도된 주기들은 흑점 주기로 유도된 것들과 위상이 잘 일치하지는 않았지만 1649년과 1714년 사이 9년에서 13년의 범위를 갖는 6개의 주기를 찾아냈다.

이러한 결과들을 고려하여 볼 때, Maunder 극소기 동안 흑점 활동의 주기는 뚜렷한 변화를 보이지 않지만  $^{10}\text{Be}$ 의 농도(Beer et al. 1998)와  $^{14}\text{C}$  양의 변화(Miyahara et al. 2004, Raspopov et al. 2004) 그리고 나비모형(Ribes & Nesme-Ribes 1993) 등의 측정은 극소기 동안에도 태양의 활동이 끊이지 않고 지속되었음을 나타냈다고 할 수 있다.

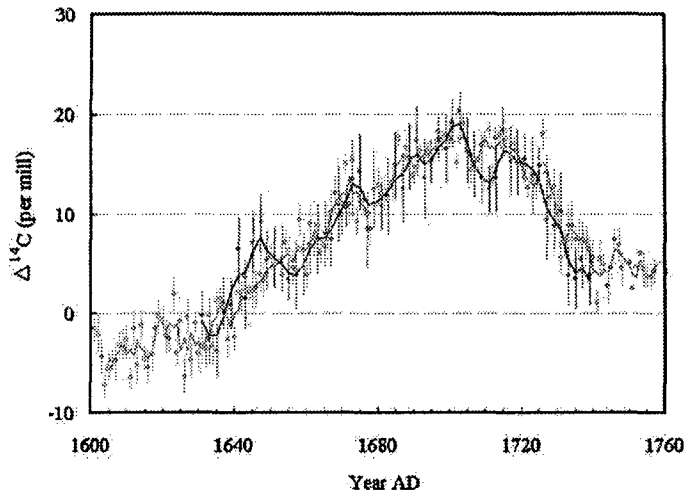


그림 3. Maunder 극소기 동안  $\Delta^{14}\text{C}$  양의 변화(Miyahara et al. 2004).

### 3. Maunder 극소기와 기후 변화

Maunder 극소기 동안 galactic cosmic rays의 급격한 증가로  $^{14}\text{C}$  동위원소나  $^{10}\text{Be}$  동위원소의 양이 증가하였으며 지구의 기후는 상대적으로 추워졌다.  $^{14}\text{C}$  동위원소는 cosmic ray에 의해 대기 상층에서 만들어진 중성자와 질소  $^{14}\text{N}$ 과의 핵반응으로 생성되며 빠른 속도로 대기 중에 퍼지는데, 이렇게 생성되어 대기 중에 퍼진  $^{14}\text{C}$ 는 곧 공기 중에 있는  $\text{O}_2$  분자와 결합하여 탄소 화합물  $^{14}\text{CO}_2$ 를 만들고, 탄소동화 작용을 통해 나무의 가장자리에 퇴적된다. 이때 나무는 대기 중의 탄소를 받아들여 광합성을 하는 것이므로 살아있는 나무 테에 퇴적된 탄소 동위원소의 조성은 대기 중의 조성과 같게 되고, 광합성에 의해 합성된 시간은 나무 테의 나이로 그 시기를 알 수 있게 된다. 따라서 나무 테와 같이 살아있는 식물 세포 안에 있는  $^{14}\text{C}$  양의 변화는 자연의 기록물에 남겨진 기후 변화의 흔적이자 태양 활동의 변화를 나타내는 간접적 지표가 된다.

이러한 사실과 관련하여, 러시아 극 연안 해변의 북쪽 수목 한계선 가까이에 있는 지역에 대하여 나무 테 연대 분석(analyzing of the tree-ring chronologies)에 의한 기후 변화의 주기를 연구하던 Raspopov et al.(2004)은 1458년-1975년 사이 침엽수의 나무 테 wavelet 분석으로 기후 변화가 20-25년 주기를 나타낸다는 사실을 알아냈다. 이 지역 기후변화(Climature Oscillation)의 진폭과 주기는 시간에 따라 상당한 변화가 있었음이 드러났는데 최근과 비교하여 특별히 강한 기후 변화가 Maunder 극소기에 일어난 것이 발견되었다. Maunder 극소기 동안 기후 변화의 주기는 15년 주기의 출현과 함께 22-23년 주기에서 24-29년 주기로 증가한 것이 나타났으며 극소기 이후 이러한 변화는 다시 줄어들 것으로 확인되었다. 이와 같이 Maunder 극소기 동안 태양활동의 주기가 늘어난 것에 대해서는, 나무 테에 축적된  $\Delta^{14}\text{C}$  양의 측정으로부터 얻은 Miyahara et al.(2004)의 결과와도 일치하는 것으로, 기후 변화에 의한 나무 테 사이의 넓이 변화와 방사성 탄소의 기록 모두 Maunder 극소기 동안 태양의 활동은 급격하게 줄어들면서 기후 변화의 주기는 늘어난 것을 보임으로 태양 활동과 기후 간의 밀접한 관계가 확인되었다.

#### 4. 결과와 논의

Maunder 극소기 동안 나타난 태양 활동의 특징과 기후 변화와의 관계를 흑점과 오로라 그리고  $^{14}\text{C}$  동위원소와  $^{10}\text{Be}$  동위원소의 측정과 비교하여 보았다. 흑점과 오로라의 활동으로 드러난 Maunder 극소기의 특징은 이 기간 동안 흑점이 거의 나타나지 않았으며, 오로라 활동 역시 다른 시기와는 비교할 수 없을 정도로 줄어든 것이 나타났다. 그러나 이 기간 동안 오로라가 흑점보다 훨씬 더 빈번하게 관측되었으며, 흑점이 나타나지 않는 시기에도 오로라가 관측된 점등은 Letfus(2000)의 지적과 일치하는 결과이다. 이 시기에 흑점은 11년 주기의 징후 없이 산발적으로 나타났으나, 드문 드문 일어나는 흑점의 분석 개발 방법을 통하여 11년의 주기보다 22년의 주기가 지배적이었음이 알려졌다. 그리고 Maunder 극소기가 끝나는 무렵부터 흑점의 11년 주기가 보이기 시작해서 1700년 후에는 지배적으로 나타남에 따라 11년 주기의 회복이 극소기 이후 태양 활동이 정상으로 돌아가는 신호로 해석되었다. 또한 Maunder 극소기 전후에 나타난 조선의 오로라 기록으로부터 극소기가 시작되기 바로 전까지 아주 활발한 오로라 활동이 있었으며, Maunder 극소기는 이렇게 태양활동이 활발한 상태에서 예고 없이 시작되었다는 것을 알 수 있었는데, 이는 앞으로 일어날 최대극소기도 태양 활동이 아주 활발한 상태에서 갑자기 일어날 가능성을 시사하는 것으로 보인다.

한편 Maunder 극소기 동안 흑점의 활동은 뚜렷한 주기 변화를 보이지 않지만  $^{14}\text{C}$  동위원소와  $^{10}\text{Be}$  동위원소 그리고 나비모형 등의 측정은 이 기간에도 11년의 주기가 나타나 태양활동이 지속되고 있었음을 보였다. 특히 나무 테의 wavelet 분석과  $^{14}\text{C}$  양에 의한 측정은 Maunder 극소기 동안 태양의 활동이 11년보다 긴 13-15년의 주기와 22년보다 긴 24-29년의 주기 변화를 보임에 따라 주기의 길이와 태양활동의 강도 사이에 역비례 관계가 있음이 알려졌다. 즉 Maunder 극소기와 같이 태양 활동이 거의 일어나지 않는 기간에는 11년 주기의 길이는 길어지고 주기의 진폭은 짧아지는 관계가 있는 것으로 나타났다. 또한 나무 테 사이의 넓이 변화와  $^{14}\text{C}$  방사성 탄소의 기록으로 Maunder 극소기 동안 태양의 활동이 급격하게 줄어든 사실이 증명됨으로서 태양의 활동과 기후 변화 사이에 밀접한 관계가 드러났다.

**감사의 글:** 이 논문은 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(과제번호: R03-2003-000-10076-0))을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Ber, J., Tobias, S., & Weiss, N. 1998, *Solar Physics*, 181, 237
- Eddy, J. A. 1976, *Science*, 192, 1189
- Eddy, J. A. 1983, *Solar Physics*, 89, 195
- Foukal, P. V. 2004, *Solar Astrophysics* (Darmstadt: WILEY-VCH Verlag GmbH & KGaA), pp.365-367
- Kovaltsov, G. A., Usoskin, I. G., & Mursula, K. 2004, *Solar Physics*, 224, 95
- Lee, E. H., Ahn, Y. S., Yang, H. J., & Chen, K. Y. 2004, *Solar physics*, 224, 373
- Letfus, V. 2000, *Solar Physics*, 194, 175
- Miyahara, H., Masuda, K., Muraki, Y., Furuzawa, H., Menjo, H., & Nakamura, T. 2004, *Solar*

Physics, 224, 317

Raspopov, O. M., Dergachev, V. A., & Kolstrom, T. 2004, *Solar Physics*, 224, 455

Ribes, J. C. & Nesme-Ribes, E. 1993, *Astron. Astrophys.*, 276, 549

Stuiver, M., Reimer, P. J., & Braziunas, T. F. 1998, *Radio Carbon*, 40, 1127

Usoskin, I. G. & Mursula, K. 2003, *Solar Physics*, 218, 319

Usoskin, I. G., Mursula, K., & Kovaltsov, G. A. 2000, *Astron. Astrophys.*, 354, L33

Vitinsky, Y. I., Kopecky, M., & Kuklin, G. V. 1987, *Solar physics*, 109, 199