

主 題

자기폭풍예보모델을 이용한 우주환경예보

¹경북대학교 사범대학 지구과학교육과, ²한국해양연구소 극지연구센터, ³경북대학교 자연과학대학 천문대기학과, ⁴전파연구소 전파과
안병호¹, 원영인², 이광목³, 성향숙⁴, 배석희⁴

차 례

- I. 서론
- II. 자기폭풍예보모델
- III. 자기폭풍의 실제
- IV. 결론

It is crucial to predict the variabilities of the near-earth space environment associated with the solar activity, which cause enormous socio-economic impacts on mankind. The geomagnetic storm prediction scheme adopted in this study is designed to predict such variabilities in terms of the geomagnetic indices, AE and Dst, the cross-polar cap potential difference, the energy dissipation rate over the polar ionosphere and associated temperature increase in the thermosphere. The prediction code consists of two parts: prediction of the solar wind and interplanetary magnetic field based upon actual flare observations and estimation of various electrodynamic quantities mentioned above from the solar wind-magnetosphere coupling function 'epsilon' which is derivable through the predicted solar wind parameters.

As a test run, the magnetic storm that occurred in early November, 1993, is simulated and the

results are compared with the solar wind and the interplanetary magnetic field measured by the Japanese satellite, Geotail, and the geomagnetic indices obtained from ground magnetic observatories. Although numerous aspects of the code are to be further improved, the comparison between the simulated results and the actual measurements encourages us to use this prediction scheme as the first approximation in forecasting the disturbances of the near-earth space environment associated with solar flares.

초 록

태양면의 교란으로 야기되는 지구근방 우주환경의 변화는 인류에게 막대한 사회경제적인 손실을 유발하므로 이를 예측하는 것은 매우 중요한 일이다. 본 연구에서 도입한 자기폭풍 예보코드는 이러한 변화양상을 지자기활동지수인 AE 및 Dst, 극관 횡단전위차, 극지방전리층에서 소모되는 에너지 그

리고 여기에 수반되는 열권의 온도상승 등의 형태로 예보하도록 고안되었다. 본 예보코드는 플레어 관측으로부터 태양풍 그리고 행성간자기장을 예측하는 부분과 추정된 태양풍파라미터로 표현되는 태양풍-자기권상호작용함수인 ϵ 로부터 상기 물리량들을 추정하는 부분으로 나누어져 있다.

1993년 11월 초에 발생한 자기폭풍에 이 예보코드를 적용하여 그 결과를 일본인공위성인 Geotail에 의한 태양풍관측결과와 지자기관측소에서 얻은 지자기활동지수들과 비교하였다. 비록 많은 부분에서 아직 개선되어야 할 여지가 발견되었지만 태양플레어로 야기되는 지구근방 우주환경의 교란상태를 예측하는데 근사적이지만 본 예보모델이 사용될 수 있음을 확인하였다.

제 1 절 서론

자기폭풍 기간동안 지구 주위 내부자기권에는 태양풍으로부터 유입된 하전입자로 인해 Van Allen 방사능대가 강화된다. 그리고 이 방사능대를 따라 수 백만 암페어 이상의 강한 전류가 흐르게 되는데 이를 환전류대 (ring current belt) 또는 storm-time Van Allen belt라 부른다. 이들 하전입자들은 이곳을 운행하는 인공위성에 지대한 영향을 미치게 된다. 환전류로 야기되는 자기장은 Dst지수라는 지자기활동지수로 수량화된다. 동시에 극지방 전리층에는 오로라타원체 (auroral oval)를 따라 한쌍의 매우 강한 전류대가 발생하는데 이것을 오로라제트전류 (auroral electrojets)라 부른다. 이 전류는 지자기변화의 원인이 되며 또한 지상에 설치된 송전선 및 송유관과 같은 거대한 도체에 유도전류를 발생시켜 막대한 재산상의 손실을 유발한다. 이 전류의 세기를 수량화한 것이 AE지수이다. 이와 같이 자기폭풍의 정도는 AE 및 Dst 두 지수로 수량화 될 수 있다. 한편 태양풍과 자기권의 상호작용으로 자기권 내에는 대규모의 플라즈마 대류현상이 발생되며 양극지방 전리층에는 전위분포의 형태로 나타난다. 이때 극관을 가로질러 형성되

는 전위차를 극단횡단전위차 (cross-polar cap potential difference)라 부른다. 그리고 오로라제트전류의 흐름으로 인해 발생하는 Joule열과 오로라입자가 극전리층으로 하강할 때 방출하는 에너지 등은 상층대기의 기온을 상승시키고 이로 인한 대기의 밀도증가는 그곳을 운행하는 인공위성에 과도한 마찰력을 행사하므로 인공위성의 수명을 단축시킨다.

자기폭풍이나 오로라현상은 이렇게 다양한 사회·경제적인 손실을 유발하므로 이를 예보할 수 있는 우주환경(우주천기)예보모델 개발의 필요성이 절실하게 대두되었다 (National Space Weather Program, 1997). 현재까지 자기폭풍예보는 주로 오랜 기간에 걸쳐 관측된 통계자료를 이용하여 실시되었기 때문에 특정 태양현상에 대한 정량적인 예보를 제공하지 못했다. 이러한 이유로 인해 수치예보체계의 개발이 필요하며 본 연구에 도입된 예보코드도 궁극적으로 이러한 목표를 달성하기 위해서 고안된 것 중의 하나이다. 본 예보코드의 대체적인 실행과정은 제 2 절에 소개하였다. 그리고 1993년 11월 2일에서 11일에 걸쳐 일어난 자기폭풍에 본 예보코드를 적용하여 얻어진 결과를 인공위성에서 실제로 관측된 태양풍파라미터와 비교한 결과를 제 3 절에 수록하였다. 또한 본 예보코드의 또 다른 출력자료인 지자기활동지수들을 실제관측치와 비교하였다. 마지막으로 제 4 장 결론에서는 본 예보코드의 문제점과 개선점을 논의하였다.

제 2 절 자기폭풍 예보모델

본 연구에서 사용된 자기폭풍예보코드 (안병호 등, 1998)는 Alaska 대학 부설 지구물리학연구소 (Akasofu, 1996)가 개발한 것으로 다음과 같이 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 첫번째 부분은 태양면에서 발생한 플레어가 지구에 도달했을 때 태양풍과 관련된 물리량 즉, 태양풍의 속도 및 밀도 그리고 태양풍에 내재한 행성간자기장 (interplanetary

magnetic field: IMF)를 예측하는 것이다. 먼저 일면좌표계 (heliographic coordinate)에서 자기적도와 태양풍속도의 위도별 변화를 파악함으로써 배경태양풍을 결정한다. 이 두가지 모두 태양으로부터 태양반경의 약 2.5 Rs 인 원천면 (source surface)에서 수행한다. 원천면에서의 자기장 및 자극의 세기는 Stanford 대학 부설 Wilcox Solar Observatory에서 Carrington Rotation인 27일 주기로 제공된다.

플레어는 전세계적으로 분포하는 태양관측소에서 관측되며 그 결과는 미해양대기청 (NOAA) 산하 국립지구물리자료센터 (NGDC)에서 Solar-Geophysical Data (예, Coffey: 1994)의 형태로 정기적으로 제공된다. 본 예보모델에 적용하기 위해 특정 플레어는 다음과 같은 6개의 변수로 규정지운다: 시작시간, 위도, 경도, H α 선 방출면적, 중심에서의 속도, 지속시간. 이러한 입력자료로부터 상기 예보코드는 지구위치에서의 태양풍의 속도 및 밀도, 그리고 자기장의 3성분을 예측하게 된다.

예보의 두번째 부분에서 예측된 태양풍 파라미터를 이용하여 다음과 같이 정의되는 태양풍-자기권 다이나모 함수 (solar wind-magnetosphere coupling function: Akasofu, 1981)인 을 구한다. 이것은 태양풍으로부터 지구자기권 내부로 유입되는 에너지량을 추정하는 척도로 광범위하게 이용되고 있다.

$$\epsilon = V B^2 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right) l_0^2$$

여기서 V는 태양풍의 속도, B와 θ 는 각각 행성간자기장의 세기 및 지지각축과 이루는 극각도 (polar angle)를 나타내며, l_0 는 상수로서 지구반경의 약 7배에 해당된다. 일단 ϵ 함수가 결정되면 극관횡단전위차 (cross-polar cap potential difference), AE 및 Dst 지수, 극전리층으로 유입되는 총에너지량 그리고 오로라지역 열권의 온도상승 (ΔT_{∞}) 등을 다음과 같은 경험관계식을 통해서 추정

된다(Akasofu and Fry, 1986). 이들은 향후 연구진척에 따라 계속 수정보완될 수 있다.

○ 극관횡단전위차

$$\Phi_{pc} = 30 + 0.006 \sqrt{\epsilon}$$

$$\text{여기서 } \epsilon' = V B^2 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\text{단위는 } (10^4 \text{ nT}^2 \text{ km s}^{-1})$$

○ AE 및 Dst 지수

$$AE(nT) = 600 [\tanh(\log_{10} \epsilon - 18.9)]^{2/3} + 650$$

$$4 \times 10^{20} (\partial Dst / \partial t + Dst / \tau_r) = 0.7 \epsilon$$

여기서 τ_r 는 환전류의 지속시간 (life time of ring current)

○ 극전리층으로 유입되는 총 에너지량

$$U_I(W) = 2.9 \times 10^8 AE(nT)$$

○ 열권의 온도상승폭

$$\Delta T_{\infty} = e^x - 300$$

$$\text{여기서 } x = 0.45 \ln(\epsilon(\text{erg}) / 10^{17} + 0.3) + 5.0$$

특히 극관횡단전위차는 미국 Rice 대학이 개발하여 현재 미공군에서 우주천기예보모델로 사용하고 있는 Magnetospheric Specification Model (Harel et al., 1981) 및 미국립대기과학연구소 (NCAR)가 개발한 열권과 전리층의 순환모델 (TIGCM: Richmond and Roble, 1987)의 기본적인 입력 파라미터로 사용되고 있다. 이 외에 황도면상에서의 행성간자기장의 단면에 관한 분포가 시간에 따라 어떻게 변화하는지도 아울러 나타낼 수 있으며 이러한 결과는 태양계 내의 임의의 위치에서 운행하는

우주비행체에 충격파가 도달하는 시간의 예측과 이에 대한 대비책을 설정하는데 유익한 정보를 제공한다.

제 3 절 자기폭풍의 실패

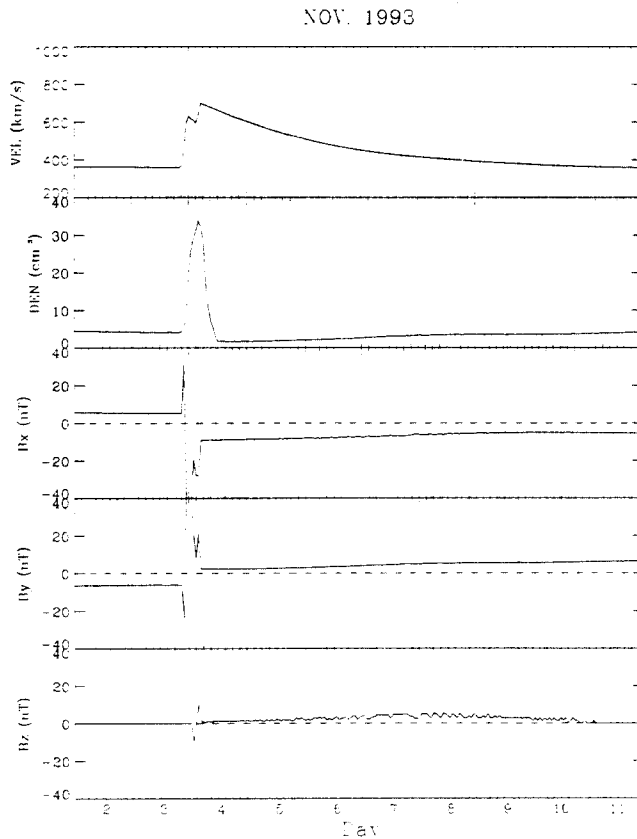
3-1 모의 수치실험결과

본 자기폭풍예보모델을 실무에 적용하기 위해서 1993년 11월 초에 발생한 자기폭풍을 상세히 조사하였다. 이 자기폭풍은 쇠퇴기에 접어든 태양주기 22 (solar cycle 22)에 나타난 전형적인 회귀성 자기폭풍 (recurrent storm) 중의 하나이다 (Knipp et al., 1998). 1993년 태양코로나는 4 섹타 (sector)에서 2 섹타로 그 형태가 현저하게 변화되었고, 하나의

거대한 코로나구멍 (coronal hole)이 저위도지방까지 확장되었다 (Crooker and McAllister, 1997). 일본의 태양관측 인공위성인 Yohkoh의 연 X-선 사진에 의하면 장수하는 코로나구멍이 1993년 8월부터 12월까지 연속적으로 나타났었다. 11월 초 4회 연속으로 관측되었을 때 태양의 북반구에서 발달한 코로나구멍이 태양적도를 가로질러 남반구까지 확장되는 동시에 경도방향으로도 최대로 발달하게 되었다. 북반구에 위치한 코로나구멍의 이러한 확장이 고속의 태양풍을 야기시켰으며 이것이 바로 11월초에 발생한 자기폭풍과 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 추정된다.

본 연구의 입력자료로 사용된 플레어는 1993년 10월 31일 23:43 UT에 발생하여 23:47 UT에 극대

(그림 1) 1993년 11월 초에 일어난 자기폭풍 기간동안 1AU의 위치에서 예측된 태양풍의 속도, 밀도 및 행성간자기장의 3성분(Bx, By 및 Bz)의 분포

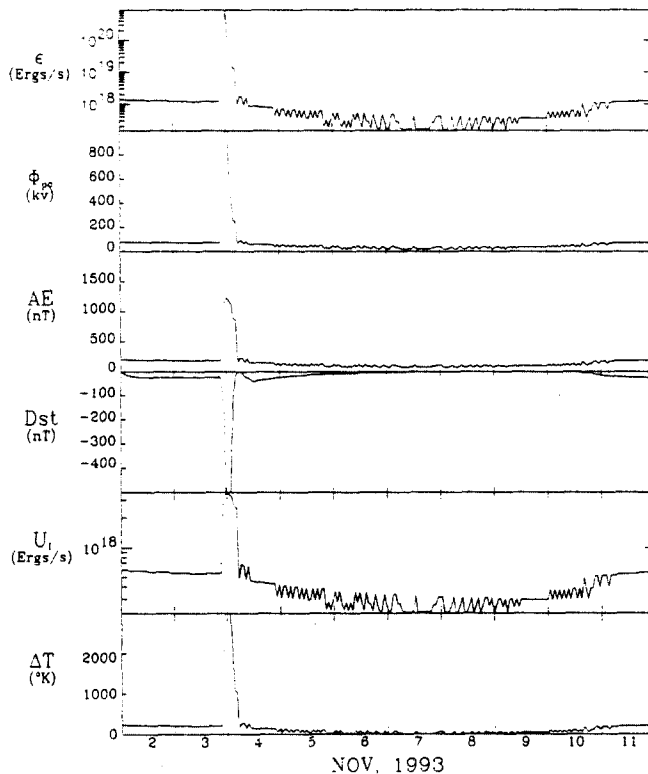


기에 도달하고 23:55 UT에 소멸되었다 (Coffey, 1994). 발생장소는 북위 11° 중심자오선에서 동쪽으로 49° 되는 지점이었으며 중요도는 1이고 밝기는 B 등급이었다. 모의실험의 첫째 단계는 H α 선에 의한 태양면의 플레어관측으로부터 그 교란상태가 지구에 도달했을 때 나타나게 될 행성간자기장, 태양풍의 속도 및 밀도를 구하는 것이다. 여기에는 Hakamada and Akasofu (1982)가 개발한 "kinematic method"를 이용한다 (source code: 안병호 등, 1998 참조). 그림 1은 1993년 11월초에 발생한 자기폭풍 기간중 본 예보모델을 통해 예측된 지구위치에서의 태양풍의 속도, 밀도 및 행성간자기장의 3성분의 변화를 보여주고 있다. 한 개의 플레어에 의한 결과이기 때문에 태양풍 파라미터들이 모두 델타함수와 같은 형태를 나타내고 있다. 만약

여러 개의 플레어에 의한 효과를 조사하려면 몇 개든지 추가할 수 있다.

다음 단계에서 태양풍과 자기권의 상호작용으로 인하여 지구자기권 내부로 유입되는 태양풍 에너지의 양을 추정한다. 이를 위해서 먼저 예측된 태양풍 파라미터로부터 태양풍 - 자기권 다이노모 출력값인 ϵ 함수를 구한다. 일단 ϵ 이 계산되면 제 2절에서 소개된 ϵ 과 지구-태양계의 우주환경에 관한 여러 물리량사이의 경험관계들을 이용해서 극단횡단전위차, AE 및 Dst지수, 극지방 상층대기로 유입되는 에너지량 그리고 여기에 수반되어 일어나는 열권의 기온상승 등을 추정한다. 이렇게 해서 구해진 물리량들을 그림 2에 나타냈다. 이들 역시 델타함수형의 변화를 보여 주고 있다. 태양플레어가 태

(그림 2) 1993년 11월 초 자기폭풍 기간중 지구의 위치에서 예측된 태양풍-자기권 다이노모 함수(ϵ), 극관횡단전위차, AE 및 Dst지수, 극권리층에서 소모되는 총에너지량과 열권의 온도증가를 시간의 함수로 나타냈다.

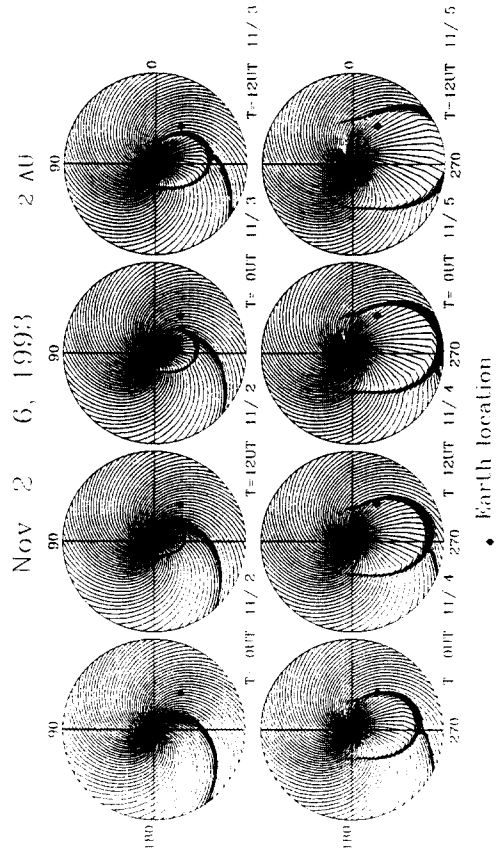


양전류판 (current sheet)을 변형시키는 과정도 본 모의수치모의실험을 통해서 재현할 수 있다. 여기에도 Hakamada and Akasofu (1982) 가 개발한 "kinematic method" (안병호 등, 1998)가 이용된다. 그림 3은 태양플레어에 의해 교란된 행성간 자기장 혹은 하전입자가 충격파의 형태로 황도면을 가로질러 전파해 나가는 모습을 나타낸 것이다. 각 패널의 원은 태양으로부터 2 천문단위가 되는 범위를 나타내며 별표는 지구의 위치를 나타낸다. 그리고 각 패널들은 플레어발생 후 매 12시간 마다 모의수치실험의 결과를 84시간이 될 때까지 보여주고 있다.

3-2 관측치와의 비교

그림 3은 상기 자기폭풍기간 중에 일본의 인공위성인 Geotail이 관측한 태양풍파라미터이다. 이 관측이 진행될 때 Geotail은 지구로부터 지구반경의 약 210 RE 정도 떨어진 태양과 정반대 방향인 지구의 자기권꼬리 속에 위치하고 있었다. 그림의 처음 3개 패널은 행성간자기장의 세 성분(B_x , B_y , B_z)의 변화를 보여주며 이하 3개 패널은 각각 태양풍의 속도, 밀도 및 압력을 나타내고 있다. 지구 자기권에 큰 영향을 미친 것으로 생각되는 요소는 11월 3일에서 4일 초에 걸쳐 관측된 -20 nT 이상의 남쪽으로 향한 B_z 성분이다. 한편 태양풍의 속도는 11월 3일까지는 400 km/sec 정도의 보통 수준을 유지하다가 4일부터 증가하기 시작하여 최고로 800 km/sec를 기록했다. 수일간 그러한 수준을 유지하다가 11일 이후에 마침내 정상속도를 회복하게 되었다. 태양풍의 밀도는 11월 3일 중반부터 갑자기 증가해서 3일 자정부근에는 $20\text{개}/\text{cm}^3$ 이상을 기록하고 곧 보통 수준 (수개/ cm^3)으로 회복되었다. 따라서 11월 3일과 4일에 걸쳐 지구근방에서 관측된 고밀도이며 남쪽을 향한 강력한 B_z 성분의 태양풍이 자기폭풍을 야기시킨 것으로 추정된다. 한편 모의실험의 경우 태양풍의 속도는 11월 3일 중반에 약 700 km/sec 정도로 증가했으므로 최대

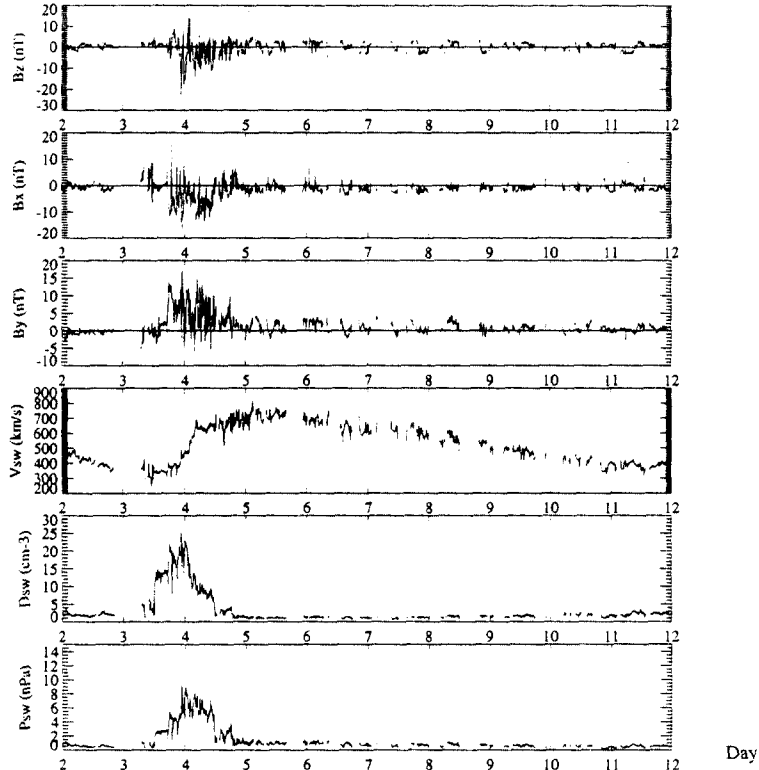
(그림 3) 태양플레어에 의해 교란된 행성간자기장이 황도면을 가로질러 전파해 나가는 모습. 원은 태양에서 2 천문단위(AU)의 범위를 그리고 별표는 지구의 위치를 나타낸다. 각 패널은 매 12시간마다의 모의실험결과를 보여주고 있다.



치 도달시간이 약 하루정도나 빨리 예측된 셈이다. 밀도변화의 경우 최대치는 모의실험의 경우 $\sim 30\text{개}/\text{cm}^3$ 로 실측치 $\sim 120\text{개}/\text{cm}^3$ 보다 다소 높은 수준이었으나 최대치는 3일과 4일에 걸쳐 비슷한 시간대에 기록되었다. 밀도의 시간적인 변화모습은 예측치가 관측치보다 훨씬 급격한 변화를 나타냈다. 그러나 예측된 행성간자기장 모습은 실제 관측치와 다소 차이가 있음을 알 수 있다. B_x 성분의 경우 3일 후반부터 상당한 크기의 변화를 보이고 있다. 그러나 전체적으로 특히 11월 4일은 음의 값으로 대표시킬 수 있다. 모의실험의 경우 3일 자정부근에서 큰 진폭의 변화가 일어난 후 4일 이후 음의 값을 유지하게 되었다. B_y 성분은 3일 자정 이후부

(그림 4) 1993년 11월에 발생한 자기폭풍기간 중 태양 반대쪽으로 지구로부터 약 120 R_s 떨어진 자기권표리 영역에서 일본의 인공위성 Geotail이 관측한 행성간자기장의 3성분과 태양풍의 속도, 밀도 및 압력의 변화(Knipp et al., 1998)

November 2-11, 1993



터 양의 값을 나타냈다. Bz 성분은 관측치의 경우 3일 자정 무렵 남쪽을 향한 후 다소의 등락을 거듭 하지만 4일은 남쪽을 향하는 경우가 많았다. 모의 실험의 경우 역시 Bz 성분은 짧은 시간이나마 남쪽을 향한 후 다시 북쪽으로 방향을 바꾸었다. 그러나 그 크기와 방향이 관측치와는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

(그림 5) 북반구 고위도지방에 위치한 78개 이상 지자기관측소에서 관측된 지자기의 수평성분의 변화로 작성된 AE 지수인 AE AMIE(78)와 중위도지방에 위치한 27개 관측소의 관측결과로 추정된 Dst지수 AMIE(27), 일본 Kyoto 대학부설 세계자료센터에서 작성된 공식 Dst(4)지수는 점선으로 표시됨 (Knipp et al., 1998)

그림 5는 북반구에 위치한 78개 지자기관측소에서 관측된 지자기의 수평성분의 변화량으로 구한 오로라제트 전류지수인 AE(78)를 나타내며 아랫쪽 패널은 중위도지방에 위치한 지자기관측소에서 관측된 지자기의 수평성분의 변화량으로부터 구한 환전류지수인 Dst지수이다. AE지수의 경우 11월 4일 (308일)을 시작으로 1500 nT를 상회하는 급격한 증가를 보여준다. 이것은 극지방 전리층에 강력

한 오로라제트전류가 발달하고 있음을 의미한다. 비록 여러 차례에 걸쳐 간헐적인 감소가 일어나지만 그 후 10여일간 꾸준히 큰 값을 유지하였다. 예측치 AE 지수는 실제 측정치보다 약간 과소평가되었음을 알 수 있다. 반면 환전류지수 Dst 지수는 실측치보다 4배 정도로 과장되었다. 최근 Sun et al. (1998)는 AE 지수로부터 Dst 지수를 추정할 수 있는 방법을 발표한 바 있다. 따라서 ϵ 과 AE 지수 사이의 관계가 개선되면 Dst 지수 예측에도 큰 진전이 있을 것으로 기대된다.

모의수치실험으로부터 예측된 태양풍자료를 이용하여 계산된 ϵ 값이 그림 2에 나타나 있다. 강력한 태양풍에 수반되어 11월 3일 후반부에 ϵ 값이 10^{31} ergs/sec 이상으로 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. Akasofu (1981)는 ϵ 값이 $\sim 10^{30}$ ergs/sec 이상으로 증가하면 자기폭풍이 예상된다고 했다. 극관황단전 위치(ϕ) 역시 ϵ 값과 더불어 증가함을 알 수 있다. 그러나 본 모의수치실험의 경우 최고치가 800 kV (Knipp et al., 1998)를 기록했는데 이 값은 AMIE 방법 (Richmond and Kamide, 1988)에 의한 추정치인 ~ 150 kV 혹은 KRM 방법 (Kamide et al., 1981)에 의한 ~ 120 kV (안병호 등, 1998)보다 월등히 큰 값이다. 이것은 ϵ 과 ϕ 사이의 관계를 규정한 제 2 절의 경험관계식에 문제가 있음을 의미한다. 이것은 향후 Ahn et al. (1984)가 발표한 경험관계식으로 대체할 예정이다. Joule열과 오로라입자의 유입에 의한 에너지의 합인 U_i (ergs/sec)는 ϵ 값이 최대가 되었을 때 약 4×10^{18} ergs/sec 혹은 400 GW 로 추정된다. AMIE 방법에 의한 추정치의 경우 약 500 GW 정도로 두 경우 비슷한 결과 (Knipp et al., 1998)에 도달했다고 볼 수 있다. 열권의 온도 증가 역시 통상의 관측치 수준을 훨씬 상회하고 있다. 따라서 이 문제 역시 좀 더 연구가 필요한 부분으로 생각된다.

제4절 결론

Alaska대학 부설 지구물리학연구소가 개발한 모

의수치실험코드인 자기폭풍예보모델을 도입하여 1993년 11월초에 발생한 자기폭풍에 적용하였다. 모의수치 실험결과 예측된 태양풍파라미터를 이용해서 태양풍-자기권 다이내모함수 ϵ 을 계산하고 이를 바탕으로 이제까지 발표된 경험관계식들을 이용하여 다시 AE 및 Dst 지수, 극관황단전위차, 극전리층에서의 에너지소모량 그리고 여기에 수반된 열권의 기온상승 등을 계산했다. 예측된 태양풍파라미터들은 실제 인공위성 관측결과와 비교해 본 바 많은 부분에서 개선되어야 할 점들이 발견되었다. 한편 태양활동이 증가하면 다수의 플레어가 발생하고 지구주변에서는 이들의 효과가 증첩되어 나타나게 될 것이다. 하지만 실제 본 예보코드에 여러 개의 플레어를 적용해 본 경우 합당한 결과를 얻지 못했다. 이 문제도 계속 연구되어야 할 과제 중의 하나이다. 뿐만아니라 ϵ 을 입력으로 해서 추정된 여러 물리량 역시 관측치와 비교했을 때 만족할 만한 결과를 제공해주지 못했다. 이것은 이제까지 발표된 ϵ 과 이들 물리량 사이의 경험관계식들이 더욱 개선되어야 할 필요성이 있음을 의미한다. 그러나 신뢰할 수 있는 우주천기예보코드란 태양, 행성 간공간, 자기권, 이온권 및 열권 그리고 이들 영역 간의 상호작용에 관한 확실한 이해를 바탕으로 완성될 수 있다. 이러한 점을 고려한다면 본 예보모델은 비록 초보적인 수준이지만 실제 우주환경예보에 적용할 수 있도록 개발된 최초의 수치모델 중의 하나라는 점이 본 연구를 통해서 확인되었다.

[참고 문헌]

안병호, 이광목, 원영인, 성향숙 및 배석희, 우주환경예보모델개발 및 시스템구축방안연구, 연구보고서, 283 pp., 전파연구소, 한국통신학회, 1998.

Ahn, B.-H., S.-I. Akasofu, Y. Kamide, and J.H. King, Cross-polar cap potential drop and the energy coupling function, J. Geophys. Res., 89, 11028, 1984.

Akasofu, S.-I., Prediction of development of

geomagnetic storms using the solar wind-magnetosphere energy coupling function ϵ , *Planet. Space Sci.*, 29, 1151, 1981.

Akasofu, S.-I., New scheme provides a first step toward geomagnetic storm prediction, *EOS, Trans. AGU*, Vol. 77, No. 24, 225, 1996.

Akasofu, S.-I., and C.D. Fry, A first generation numerical geomagnetic storm prediction scheme, *Planet. Space Sci.*, 34, 77, 1986.

Coffey, H., *Solar-Geophysical Data, Comprehensive Reports*, No. 596, Part II, NOAA/NGDC, Boulder, Colorado, April, 1994.

Crooker, N.U. and A.H. McAllister, Transients associated with recurrent storms, *J. Geophys. Res.*, 102, 14041, 1997.

Hakamada, K., and S.-I. Akasofu, Simulation of three-dimensional solar wind disturbances and resulting geomagnetic storms, *Space Sci. Rev.*, 31, 3, 1982.

Harel, M.A., R.A. Wolf, P.H. Reiff, R.W. Spiro, W.J. Burke, F.J. Rich, and M. Smiddy, Quantitative simulation of a magnetospheric substorm, 1. Model logic and overview, *J. Geophys. Res.*, 86, 2242, 1981.

Kamide, Y., A.D. Richmond, and S. Matsushita, Estimation of ionospheric electric field, ionospheric currents, and field-aligned currents from ground magnetic records, *J. Geophys. Res.*, 86, 801, 1981.

Knipp, D.J. et al., An overview of the early November 1993 geomagnetic storm, *J. Geophys. Res.*, in press, 1998.

National Space Weather Program - The implementation Plan, Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, Silver Spring, Maryland, 1997.

Richmond, A.D., and Y. Kamide, Mapping electrodynamic features of the high-latitude ionosphere from localized observations: Technique, *J. Geophys. Res.*, 93, 5741, 1988.

Richmond, A.D., and R.G. Roble, Electrodynamic effects of thermospheric winds from the NCAR Thermospheric General Circulation Model, *J. Geophys. Res.*, 92, 12365, 1987.

Sun, W., B.-H. Ahn, S.-I. Akasofu, and D.J. Knipp, The relationship between the auroral electrojets, field-aligned current and the ring currents, submitted to *J. Geophys. Res.*, 1998.

사사: 본 연구는 정통부산하 전파연구소와 한국통신학회가 1997년도에 수행한 공동연구과제인 "우주환경예보 모델개발 및 시스템 구축방안 연구"에 지원된 연구비에 의해 수행되었음. 자기폭풍예보코드를 제공해 주신 미국 Alaska대학 지구물리연구소 소장인 Akasofu 박사와 예보코드운영상의 문제점을 자문해 주신 동대학의 Sun Wei 박사님께 감사드립니다.

본 연구는 1997년도 전파연구소의 연구비 지원을 받아 수행된 연구과제입니다.



안 병호

- 1969.2 경북대학교 사범대학 지구과학교육과 졸업
- 1971.2 경북대학교 대학원 물리학과 석사과정 수료
- 1983.5 미국 알래스카대학 졸업 (Ph.D.)
- 1986.9-1988.8 미국 콜로라도대학교(Boulder) 연구원
- 현재 경북대학교 사범대학 교수



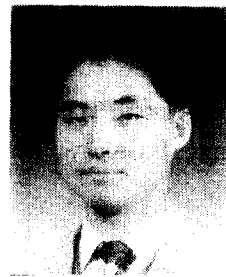
성 향 숙

- 1985. 2 연세대학교 물리학과 이학사
- 1987. 2 서울대학교 대학원 물리학과 이학석사
- 1993. 8 미국 미시건 주립대학교 물리학과 이학박사
- 1993 11 - 1996. 2 캐나다 몬트리올대학교 연구원
- 1996. 3 - 1996. 8 연세대학교 자연과학연구소 연구원
- 1996. 9 - 1996. 11 서울대학교 자연과학 종합연구소 연구원
- 1996. 11 - 현재 전파연구소 공업연구관



원 영 인

- 1988.2 서울대학교 자연과학대학 대기과학과 졸업
- 1991.12 미국 미쉬간대학교 석사과정 수료
- 1994.4 미국 미쉬간대학 졸업 (Ph.D.)
- 현재 한국해양연구소 극지지원센터 선임연구원



배 석 희

- 1989. 2 연세대학교 천문기상학과 이학사
- 1991. 2 연세대학교 대학원 천문기상학과 이학석사
- 1991. 6 전파연구소 공업연구사



이 광 목

- 1980.2 경북대학교 사범대학 지구과학교육과 졸업
- 1982.2 서울대학교 대학원 대기과학과 석사과정 수료
- 1989.4 미국 미쉬간대학 졸업 (Ph.D.)
- 1990.3-1992.2 기상연구소 연구관
- 현재 경북대학교 자연과학대학 부교수