김일성종합대학학보 JOURNAL OF KIM IL SUNG UNIVERSITY
(자연과학) (NATURAL SCIENCE)
주체106(2017)년 제63권 제3호 Vol. 63 No. 3 JUCHE106(2017).

태양흑점자기마당의 2차원구조에 관한 단순모형

황신철, 허건

위대한 령도자 **김정일**동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《지구우에 존재하는 모든 생명체와 자연현상은 태양의 영향을 크게 받고있습니다. 그러므로 인간생활과 직접 잇닿아있는 태양부터 잘 연구하여 태양의 변화를 미리 예견하고 그것을 사람들에게 알려주어야 합니다.》(《**김정일**전집》 제3권 380페지)

인민경제와 인간생활에 여러가지 영향을 주는 태양활동은 태양겉면과 대기에 존재하는 활동요소들의 변화, 구체적으로는 자기마당의 변화에 그 직접적근원을 두고있다. 가장 대표적인 태양활동요소인 흑점의 자기마당구조를 모형화하기 위한 많은 연구들[2, 4, 5]이 진행되였다.

우리는 흑점내부에서 자기마당의 근사적인 원기둥대칭평형상태에 대한 관측결과[1, 4]로부터 출발하여 흑점의 2차원자기마당구조를 매우 간단하게 서술하는 한가지 모형을 제기하고 일부 경우에 관하여 풀이하였으며 이 모형이 흑점자기마당구조를 원만히 설명할수 있는 보다 발전된 모형의 토대로 쓰일수 있다는것을 확증하였다.

1. 자기마당선의 수학적모형화

흑점내부에서 자기마당선들의 아래쪽 끝들은 광구면아래에 기본적으로 고정되여있고 힘선들의 웃부분들은 태양대기에로 부채살모양으로 뻗어나간다.[1, 3, 5]

원기둥자리표계를 흑점내부에 고정시킬 때 마당선의 가장 낮은 끝부분은 직선 $r=0$에 관한 점근선을 이루고 힘선들의 웃부분은 직선 $z=kr$에 관한 점근선을 형성한다고 가정하자.

이 조건을 만족시키는 곡선의 단순한 형태는 쌍곡선이므로 마당선(그림 1)은 다음과 같은 쌍곡선에 의해 표시할수 있다.

$$z=kr-\frac{c}{r} \tag{1}$$

여기서 $k(0\le k\le\infty)$는 흑점우의 코로나속에서 점근선들에 해당한 직선의 방향결수이며 c는 흑점내부에서 마당선이 얼마나 빨리 수직점근선에 다가가는가를 나타내는 정의 량이다.

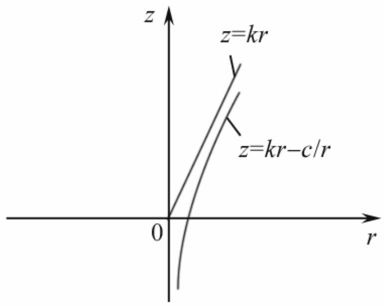

그림 1. 전형적인 마당선

매개 마당선들은 k값에 따라 특성이 달라진다. c값이 작을수록 해당한 마당선은 흑점중심에 더 가까이 놓인다.

c는 k의 함수이지만 마당선들이 사귀는 경우를 피하기 위하여 k의 증가함수로는

되지 말아야 한다.

만일 c가 k에 무관계하다면 자기마당은 흑점의 중심에서보다 변두리에서 더 강하게 되는데 이것은 관측결과와 모순된다.

이상과 같은 조건을 만족시키는 c는 다음과 같이 표시된다.

$$c = c_0 + \frac{c_1}{k} \tag{2}$$

결국 마당선은 다음과 같이 구체화된다.

$$z = kr - \frac{c_0}{r} - \frac{c_1}{kr} \tag{3}$$

식 (3)에서 k를 구하면 다음과 같다.

$$k = \frac{c_0}{2r^2} + \frac{z}{2r} + \frac{\sqrt{(zr + c_0)^2 + 4c_1 r^2}}{2r^2} \tag{4}$$

식 (4)는 $z < kr$의 조건에서 정의 2차뿌리만을 선택한것이다.

2. 자기마당을 기술하는 방정식의 작성과 풀이

2차원극자리표계에서 흑점자기마당의 꼬임성분은 $B_\theta = 0$이며 따라서 B_z와 B_r를 각각 유도하면 자기마당분포가 얻어진다.

r와 z방향에서 두 마당성분들의 상대적세기는 다음과 같다.

$$\frac{B_z}{B_r} = \frac{dz}{dr} = k + \frac{c}{r^2} \tag{5}$$

B_r는 자기흐름함수 $f(r, z)$에 의해 직접 주어지며 B_z는 식 (5)로부터 다음과 같다.

$$B_z = \left(k + \frac{c}{r^2}\right) f(r, z) = \left(\frac{z}{2r} + \frac{3c_0}{2r^2} + \frac{\sqrt{(rz + c_0)^2 + 4c_1 r^2}}{2r^2} + \chi\right) f(r, z) \tag{6}$$

여기서 χ는

$$\chi = \frac{2c_1 r}{[rz + c_0 + \sqrt{(rz + c_0)^2 + 4c_1 r^2}\,]^2}\,. \tag{7}$$

$\nabla B = 0$이라고 가정함으로써 함수 $f(r, z)$에 대한 조건은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} f_r + \left[\frac{z}{2r} + \frac{3c_0}{2r^2} + \frac{2c_1}{[rz + c_0 + \sqrt{(rz + c_0)^2 + 4c_1 r^2}\,]^2} + \frac{\sqrt{(rz + c_0)^2 + 4c_1 r^2}}{2r^2}\right] f_z = \\ = -\left[\frac{3}{2r} - \chi + \frac{(rz + c_0)}{\sqrt{(rz + c_0)^2 + 4c_1 r^2}}\left(\frac{1}{2r} + \chi\right)\right] f(r, z) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 f_r와 f_z는 각각 r와 z에 관한 $f(r, z)$의 도함수들이다.

흑점중심으로부터 각이한 거리들에서 또는 각이한 수직높이들에서의 상대적마당세기는 c_0과 c_1의 특수값들에 의존한다.

그러나 식 (8)을 풀기 위한 가장 단순한 경우는 $c_1 = 0$인 경우이며 이때 자기마당은

흑점중심에서보다 변두리에서 더 강하다.

이 경우에 식 (8)은 다음과 같이 간소화된다.

$$f_r+\left(\frac{z}{r}+\frac{2c_0}{r^2}\right)f_z=-2\frac{f(r,z)}{r} \tag{9}$$

식 (9)는 미정함수 $g(x)$를 도입할 때 다음과 같은 풀이를 가진다.

$$f(r,z)=\frac{1}{r^2}g\left[\frac{r}{z/c_0+1/r}\right] \tag{10}$$

식 (9)의 풀이의 한가지 특수형태는 다음과 같다.

$$f(r,0)=\frac{r^{2n}}{1+r^{2n+2}}\ (n\geq 1) \tag{11}$$

즉 r가 보다 클 때 마당세기는 r^2에 관해 감소하며 r가 령일 때 마당세기와 그 공간도함수들은 둘 다 령이다.

이 경우에 함수 $g(x)$는 다음과 같이 주어진다.

$$g(x)=\frac{1}{1+x^{-n-1}} \tag{12}$$

식 (12)에 자연수 n의 값을 차례로 넣으면 식 (9), (10)으로부터 자기마당선들이 분포된다.

실례로 n=1일 때 $\left(\frac{r}{z/c_0+1/r}\right)=\frac{r^2}{r^2+(z/c_0+1/r)^2}$ 이므로

$$f_1(r,z)=\frac{1}{r^2+(z/c_0+1/r)^2}.$$

따라서 자기마당 (B_r, B_θ, B_z)는 다음과 같이 표시된다.

$$\left(\frac{1}{r^2+(z/c_0+1/r)^2},\ 0,\ \frac{z/r+2c_0/r^2}{r^2+(z/c_0+1/r)^2}\right) \tag{13}$$

n=2일 때 자기마당은

$$\left(\frac{1}{r^2+(1/r)(z/c_0+1/r)^3},\ 0,\ \frac{z/r+2c_0/r^2}{r^2+(1/r)(z/c_0+1/r)^3}\right). \tag{14}$$

이와 같은 방법으로 얻어지는 자기마당분포는 그림 2와 같다.

흑점중심으로부터 먼 곳에서 특히 흑점변두리에서 자기마당구조는 흑점광구면에 대한 자기마당선들의 경사각을 측정한 관측결과[3]와 잘 일치한다.

이 단순한 자기마당모형을 리용하여 자기류체정력학적평형방정식을 풀이함으로써 흑점대기에서의 기체압력을 계산할수 있다.

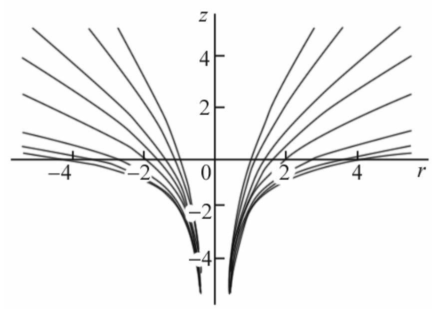

그림 2. 자기마당분포

맺 는 말

원기둥대칭평형상태에 있는 흑점의 2차원자기마당구조를 간단히 서술하는 한가지 모형을 제기하였다.

$c_1 \neq 0$ 인 경우에 대한 제기된 모형의 풀이는 흑점중심에 실제로 존재하는 매우 강한 자기마당을 설명할수 있게 할것이다.

참 고 문 헌

[1] M. Solanki et al.; Astron. Astrophysics, 234, 519, 2006.

[2] J. O. Stenflo; Solar Phys., 138, 4, 41, 2003.

[3] D. Steele et al.; Solar Phys., 145, 1, 197, 2010.

[4] B. C. Low; Astrophys. J., 212, 234, 1998.

[5] S. Chandra et al.; Solar Phys., 146, 7, 201, 2011.

주체105(2016)년 11월 5일 원고접수

A Simple Model about the 2D Structure of Magnetic Field in Sunspot

Hwang Sin Chol, Ho Gon

We suggested a model that simply described the 2D structure of magnetic field in sunspot at state of cylindrical symmetric equilibrium.

Key words: sunspot, magnetic field