

# 서브스톰 전류계와 BBF 사이의 관계에 대하여 ON THE RELATIONSHIP BETWEEN SUBSTORM CURRENT SYSTEM AND BURSTY BULK FLOWS AT NEAR TAIL

이대영, 민경욱  
한국과학기술원, 물리학과

DAE-YOUNG LEE AND KYOUNG WOOK MIN

Physics Department, Korea Advanced Institute of Science and Technology

E-mail: dylee@sorak.kaist.ac.kr

Received Dec. 4, 2000; Accepted Dec. 15, 2000

## ABSTRACT

We investigate the critical issue on how the BBF (bursty bulk flow) is related to the substorm current wedge formation. Observationally, after analysing data sets from Geotail spacecraft at near tail and many ground magnetic observatories for 9 months period of 1996, we find three BBF events that clearly occurred at the center of the wedge with region I type FAC (field-aligned current), and two other BBF events that were seen outside the wedge sector. Theoretically, we suggest that the substorm current wedge generation by BBF is most likely when the  $J_{\perp} \cdot \nabla B$  contribution is dominant in the well-known MHD  $J_{\parallel}$  expression (Vasyliunas, 1984) or when the divergence of the cross-tail current carried by the particle's gradient/curvature drift is predominantly sufficient at the moment of the BBF arrival at near tail.

*Keywords:* magnetosphere, ionosphere, substorm, geotail

## I. 서 론

자기권 서브스톰 발생시 나타나는 독특한 전류 체계는 서브스톰 연구의 핵심적 과제중 하나이며 지금까지 많은 연구자들의 주목을 받아왔다. 이 전류 체계는 서브스톰 전류체계 (current wedge)라고 부르는 것으로서 McPherron 등 (1973)에 의해 처음 제시되었다. 그 후 전류체계의 구조와 그 발생 원인에 대한 연구가 계속 되어왔으나 현재까지도 완전히 이해되지 않는 숙제로 남아있다. 전류체계는 영역 1 연자기력선 전류(field-aligned current)와 이온층에서의 서향 오로라 제트 전류(westward electrojet)로 구성된다. 이 전류체계는 지구근접꼬리 부근에서 최초 발생하는 것으로 생각되고 있고, 이 때 비슷한 시간 및 영역에서 소위 자기장의 쌍극자화(dipolarization)가 이루어지게 된다.

한편 지자기 꼬리의 자기재결합 모델은 몇 가지 단점에도 불구하고 아직까지 서브스톰 현상을 가장 그럴듯하게 설명하는 모델이다. 이 모델은 최근까지도 부분적으로 개량되어 왔는데 특히 주목 할 점은 다음과 같다. 자기재결합시 지구 쪽으로 수송되는 플라즈마 자기류들중 일부가 매우 빠른 속도로 지구쪽으로 수송 될 수 있는데, 이것들이 지구근접 꼬리에 이르러 감속과 함께 동서 양쪽으로 소용돌이를 만드는 식으로 우회하면서 전류체계와 쌍극자화를 설명 할 수 있다는 것이다 (Shiokawa et al. 1997; Birm & Hesse 1996).

이러한 유형의 빠른 플라즈마 흐름은 실제 관측을 통하여서도 많이 보고되고 있는데, 많은 사람들이 이들을 bursty bulk flow(이하 BBF라 칭하기로 함)라고 부른다 (Angelopoulos et al. 1992). 즉, BBF로서 전류체계와 쌍극자화를 설명하려는 시도인데, 본 연구 논문에서는 BBF가 구체적으로 어떻게 전류체계와 연관되어 있는지를 관측 데이터 분석과 더불어 이론적으로 재 고찰 하였다. 위에서 인용한 다른 연구자들의 주장과 달리, 본 연구에서는 BBF의 감속이나 소용돌이 흐름은 전류체계 발생의 주요 원인이 될 수 없다는 것을 보일 것이며 그 대안을 제시한다.

## II. 위성 및 지상 자기장 데이터 분석 결과

우선 관측적 측면에서 BBF가 과연 서브스톰 전류체계와 어느 정도 연관 되어있는지 조사하기로 하였다. BBF를 조사하는데는 Geotail 위성의 9개월간 (1996년 3월부터 11월 사이의 기간) 데이터를 사용하였다. BBF를 선정하는 조건으로 (1)  $X_{GSE} > -15R_E$ ,  $-10 < Y_{GSE} < 10 R_E$ , (2) 쌍극자화 직전에 위성이 플라즈마관 내부에 충분히 깊숙이 위치할 것, (3) 플라즈마의 속도가 400 km/s 이상의 최대값을 갖을 것, 그리고 (4) 플라즈마 흐름중에 회전이나 소용돌이 같은 형태를 보이지 않을 것 등을 세웠다. 그 결과 위의 선정 조건을 만족하는 BBF를 15개 발견하였다. 이 15개 BBF 사

건에 대하여 지상의 자기장 데이터를 분석하였다. 먼저 오로라권 위도에서의 데이터를 분석하여 서브스톰에서 보통 나타나는 서향 오로라 제트전류가 형성됨을 확인하였다. 또한, 연자기력선 전류 형성에 대한 정보를 얻기 위해 중저위도 지역에서 지자기의 동서방향의 성분의 변화를 고찰하였다. 그 결과 최소 3개의 BBF 사건은 전류썰기의 중심에 위치함을 발견하였다. 물론, 이 전류썰기는 영역 1 연자기력선 전류로 구성된 것이다. 그러나 2개의 BBF 사건은 전류썰기의 중심 영역에서 분명히 벗어난 것으로 분석되었다. 따라서 최소한 이 2개의 BBF 사건들에 대해서는 BBF와 서브스톰 전류썰기 사이의 관련성에 대한 근본적인 재 고찰이 필요하다. 이 문제는 여기서는 다루지 않기로 한다. 나머지 10개의 BBF 사건에 대해서는 불행히도 지상자기장 데이터의 패턴이 분명치 않거나 혹은 존재하지 않는 등의 이유로 인하여 전류썰기와의 관련성 여부에 대한 확실한 결론을 내릴 수 없었다.

그림 1과 2는 1996년 8월 30일의 BBF 사건이 전류썰기의 중심에서 나타나는 대표적 예를 보여준다. 먼저, 그림 1은 Geotail이 관측한 자기장 및 플라스마 속도의 X-성분을 보여주고 있다. Geotail 위성은 06 UT경 X, Y 좌표가 각각  $-10.8, +1.7 R_E$  인 지점을 지나고 있었으며, 이 때 그림에서 보여 주듯이 자기장 쌍극자화를 관측하였다. 또한, 같은 시간에 플라스마 속도  $V_x$ 가 최고 500 km/s 정도까지 올라가는 BBF 패턴을 보이고 있다. 그러나 에너지 분광영상을 확인한 결과 06 UT 근방의 짧은 시간 간격 동안 플라스마 속도 계산이 다소 과소 평가되었음을 알았다. 따라서 실제  $V_x$ 는 500 km/s 이상일 것으로 추정된다.

한편 1989년형 Tsyganenko 자기장 모델(Tsyganenko 1989)을 사용하여 계산한 결과 Geotail의 지상에서의 발자국

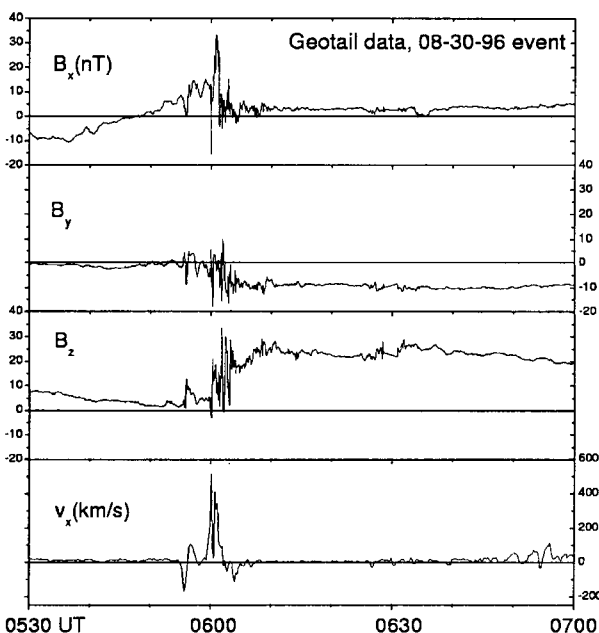


그림 1. 1996년 8월 30일에 Geotail 위성이 관측한 지구근접 꼬리에서의 자기장 및 플라스마 유체 속도의 X-성분

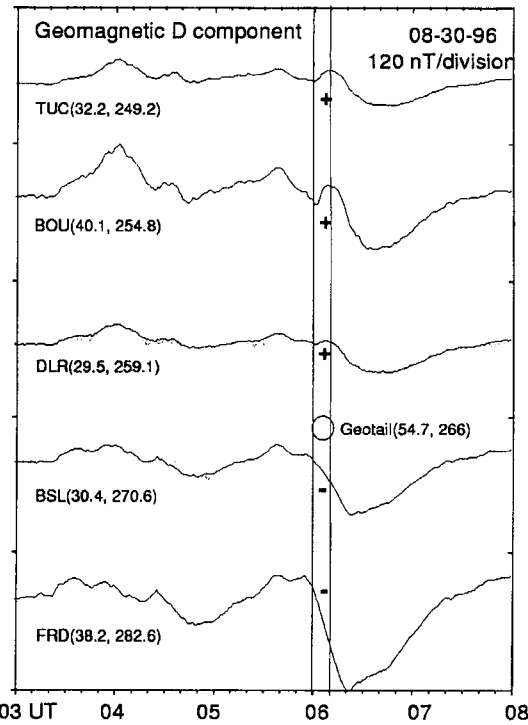


그림 2. 1996년 8월 30일에 북미주 지역 지자기관측소에서 측정된 D-성분의 변화. 플러스 및 마이너스 사인은 D 성분의 증감을 각각 표시한 것이며, Geotail의 경도는 원으로 표시됨.

(footpoint) 경도는 06 UT에 약 266도에 해당한다. 이 경도를 중심으로 근방의 자기관측소 데이터를 확인해 본 결과를 그림 2에 나타내 보였다. 이 그림은 중위도 지방의 일부 관측소에서 측정된 D-성분의 변화를 보이고 있다. 그림에서 두 수직 실선에 의해 보였듯이 06 UT 후로 약 10분간 TUC, BOU와 DLR 관측 지점에서는 D 성분이 증가하는 반면, BSL과 FRD에서는 감소하고 있다. 이 패턴은 영역 1 연자기력선 전류 형성과 일치하며 이 연자기력선 전류는 서브스톰 전류썰기를 구성하는 것임에 틀림이 없다. 또한, 전류썰기의 중심은 경도상 DLR과 BSL 사이인데, DLR에서의 D 성분의 변화가 매우 약한 것으로 보아 전류썰기의 중심은 DLR에 가까운 것으로 해석된다. 같은 시간에 자기권 꼬리에서 BBF 사건을 관측한 Geotail 위성의 발자국 경도(그림에서 원으로 표시된 것)는 이보다 약간, 약 5-6도 정도, 동쪽에 위치하여 다소의 차이가 있다. 이는 자기권 플라스마판 적도면에 투영하였을 때 약  $0.85 R_E$ 의 차이를 의미한다. 따라서, 보통 BBF의 동서 방향 사이즈가 2-3  $R_E$  정도는 된다는 최근의 관측사실로 미루어 볼 때  $0.85 R_E$ 의 차이는 무시할 수 있다고 판단되며, 이 오차 내에서 Geotail은 전류썰기의 중심에 위치해 있었다고 할 수 있겠다.

### III. 자기유체역학 방정식에 근거한 이론적 해석

BBF가 전류썰기의 중심 영역에서 관측되는 경우에 대한 이론적 해석을 해보자. 먼저 자기유체역학적 물리구조에서 고찰해 본다. 자기유체역학의 운동량에 대한 방정식은 다음

과 같다.

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{J} \times \vec{B} - \nabla P \quad (1)$$

위에서  $\rho, \vec{V}, \vec{J}, \vec{B}$  와  $P$ 는 각각 플라즈마 유체의 질량 밀도, 유체 속도, 전류 밀도, 자기장, 그리고 플라즈마 압력을 나타낸다. 식 (1)로 부터 자기장에 대해 수직 방향의 전류 밀도인  $J_{\perp}$ 에 대한 식을 유도 할 수 있다. 이때 얻어진  $J_{\perp}$ 을 이용하여 전류밀도의 연속성 조건인  $\nabla \cdot \vec{J}_{\perp} = -\nabla \cdot \vec{J}_{\parallel}$ 을 계산 할 수 있고 마지막으로 그 결과 식을 자기력선을 따라 적분하면 다음과 같이 이미 잘 알려진 연자기력선 전류,  $J_{\parallel}$ 에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$J_{\parallel}^i = B_i \int_{eq}^i \frac{ds}{B} \left[ \frac{2\vec{J}_{\perp} \cdot \nabla B}{B} - \nabla \rho \cdot \frac{\vec{B}}{B^2} \times \frac{d\vec{V}}{dt} + \rho \frac{d}{dt} \left( \frac{\Omega_{\parallel}}{B} \right) \right] \quad (2)$$

여기서  $J_{\parallel}^i$ 는 이온층 경계부근에서의 연자기력선 전류를 나타내며, 식 (2)에서 적분구간은 적도면에서부터 자기력선을 따라 이온층 경계면 까지 이다. 또한,  $\Omega_{\parallel} = \vec{B}/B \cdot \nabla \times \vec{V}$ 는 자기력선 방향의 유체의 소용돌이를 나타낸다 (Vasyliunas 1984).

식 (2)의 오른쪽 적분 안의 세 항을 BBF와 연관하여 각각 분석해 보면 어떠한 물리적 환경에서 영역 1의 연자기력선 전류가 형성 될 수 있는지 알 수 있다. 먼저 첫 번째 항을 살펴보자. BBF는 자기권 꼬리의 주변 자기장 보다 강한 자기장 세기를 가지고 있고 자기권꼬리 전류  $J_{\perp}$ 은 서쪽방향으로 흐르므로, 첫 번째항은 BBF의 동쪽 측면에서는 양의 값을 서쪽 측면에서는 음의 값을 갖게된다. 따라서 첫 번째 항은 영역 1의 연자기력선 전류를 만들 수 있다. 다음으로 두 번째 항에서, BBF 내부의 질량 밀도는 자기권 꼬리 주변 보다 더 낮기 때문에  $\nabla \rho$ 는 BBF의 동쪽 측면에서는 동쪽으로, 서쪽 측면에서는 서쪽으로 향하게 된다. 또한 BBF는 지구에 근접하면서 감속하게 되므로 결과적으로 두 번째 항은 첫 번째 항과 반대로 영역 2의 연자기력선 전류를 만드는데 기여하게 된다. 마지막으로 세 번째 항은 유체의 소용돌이 효과에 의한 연자기력선 전류의 형성 가능성을 나타낸다. 구체적으로 BBF 유체의 흐름은 지구로 근접하면서 동서 방향 좌우로 우회하여 소용돌이 식 흐름을 형성 할 수 있다. 이때 위에서 봤을 때 BBF 영역의 동쪽 지역에서는 시계방향으로 서쪽 지역에서는 시계 반대 방향으로 소용돌이가 생길 것이다. 이런식의 소용돌이는 Bim & Hesse (1996)의 MHD 시뮬레이션 및 Pritchett & Coroniti (2000)의 대전입자 시뮬레이션에서도 나타난 결과이다. 그러나 이러한 방향성을 갖는 소용돌이는 영역 2의 연자기력선 전류를 만들게 된다. 이 해석은 Bim & Hesse의 해석과 반대이나 Pritchett & Coroniti의 해석과는 일치한다.

식 (2)의 세 항에 대한 위의 분석을 종합하면 BBF가 서브스톰 전류쇄기를 만들 수 있는 상황은 첫 번째 항의  $J_{\perp} \cdot \nabla B$ 에 의한 영역 1 연자기력선 전류 형성이 다른 두 항의 효과에 의한 영역 2의 연자기력선 전류를 압도 할 수 있을 때만 가능 할 것이다. 따라서 BBF가 동서 방향으로 소용

돌이식 회전으로 우회하기 전에, 그리고 동시에 자기권 꼬리 전류가 매우 강한 지역에 BBF가 도달했을 때 영역 1 연자기력선 전류가 유도 될 가능성이 높다고 하겠다.

#### IV. 하전입자 운동 관점에서 본 해석

입자의 운동관점에서 볼 때  $J_{\perp}$ 은 자화(magnetization)전류의 수직성분  $J_{m\perp}$ , 관성에 의한 전류  $J_i$ , 그리고 입자의 구배(gradient) 및 곡률(curvature) 표류운동이 만드는 전류  $J_{GC}$ 로 구성된다. 즉,

$$\vec{J}_{\perp} = \vec{J}_{m\perp} + \vec{J}_i + \vec{J}_{GC} \quad (3)$$

연자기력선 전류는 기본적으로 자기장에 수직 방향의 전류가 발산 할 때 만들어지는데, 위의 자화전류는 무발산이므로 연자기력선 전류 형성에 기여하지 않는다. 한편, 관성에 의한 전류는 BBF가 지구근접 영역으로 접근하면서 감속할 때 만들어진다. 구체적으로, BBF 감속에 맞춰 BBF 내의 이온들은 동쪽으로 전자들은 서쪽으로 관성표류운동을 함으로써 결과적으로 동쪽방향의 관성 전류를 만든다. 이는 본래 서쪽 방향으로 흐르는 자기꼬리전류에 반대 방향으로 서 자기꼬리전류 감쇠를 일으키며 BBF의 서쪽 측면에서 지구 쪽으로 향하는 연자기력선 전류를 동쪽 측면에서는 그 반대 방향의 연자기력선 전류를 생성시키게 된다. 이것은 곧 영역 1 연자기력선 전류에 해당한다. 그러나, 이미 Shiokawa 등 (1997)이 지적한 대로 관성 전류의 발산에 의해 형성되는 연자기력선 전류의 크기는  $10^5$  A 정도로서 이는 관측에서 밝혀진  $10^6$  A 보다 훨씬 작아 충분치 않다. 따라서, 하전입자 입자 운동의 관점에서 볼 때 서브스톰 발생 시 나타나는 영역 1 연자기력선 전류의 형성은  $J_{GC}$ 의 발산에 의한 기여가 충분히 클 때만 가능한 것으로 볼 수 있겠다. 이 가능성에 대해 살펴보면, BBF 내부의 자기장은 지자기꼬리의 주변 자기장 세기보다 그 크기가 더 크며 그 곡률은 작다. 따라서 하전입자의 구배 및 곡률에 의한 동쪽에서 서쪽방향으로의 표류운동은 BBF 외부에 비해 내부에서 상대적으로 현저히 작아질 것이다. 이는 곧 서쪽방향으로 흐르는 자기장에 수직방향인  $J_{GC}$ 가 BBF의 외부에 비해 내부에서 작아진다는 것을 의미하며, 따라서 전류의 연속성에 의해 수직방향 전류의 발산이 있어야 한다. 이 발산은 곧 영역 1 연자기력선 전류를 유도하게된다. 이러한 효과는 BBF가 매우 심하게 늘어진 모양의 꼬리 영역에서 감속하여 정지 할 때 극대화 될 것이다.

#### V. 결 론

본 연구의 주요 목적은 서브스톰 전류쇄기와 BBF와의 관련성을 관측 및 이론적으로 이해하려는 데 있었다. 먼저 Geotail 위성관측과 해당 지자기 자료를 분석한 결과, BBF가 전류쇄기의 중심에 위치한 3개의 BBF 사건을 찾았고, 또한 그렇지 않은 2개의 BBF 사건도 또한 존재하였다. 후자의 두 사건에 대한 이해는 차후의 연구를 통해 밝혀져야

할 것이나, 앞선 세 사건에 대해서는 이론적 분석이 가능했다. 그 분석 내용을 정리하면 다음과 같다. 보통 지자기 근접 꼬리는 서브스톰 확장기 전까지 더욱 심한 꼬리모양으로 늘어지게 되는 것으로 잘 알려져 있다. 그러한 지역에서의 꼬리 전류는 하전입자의 자기장 구배 및 곡률에 의한 강한 표류운동에 의해 크게 증가 할 것이다. 이 때 지구 쪽으로 빠르게 유입되어 오던 BBF가 이 지역 근처에서 감속하여 정지한다고 가정하자. 그러면 자기유체역학적 관점에서 볼 때는 BBF와 그 배경 사이의  $\vec{J}_\perp \cdot \nabla B$ 에 의한 효과가, 하전입자 운동 관점에서는 BBF 양 측면에서  $J_{GC}$ 의 발산에 의한 효과가 극대화되므로 영역 1 연자기력선 전류의 형성에 최적의 물리적 조건이 될 것이다. 반면, BBF 감속에 의해 생기는 관성 전류의 발산이나, BBF 흐름이 동서 양 측면으로 소용돌이식으로 우회하면서 생기는 효과는 서브스톰 전류 썩기를 설명하는데 적합하지 않다고 하겠다.

## 참고문헌

- Angelopoulos, V., Baumjohann, W., Kennel, C. F., Coroniti, F. V., Kivelson, M. G., Pellat, R., Walker, R. J., Luhr, H., & Paschmann, G. 1992, *J. Geophys. Res.*, 97, 4027
- Birn, J., & Hesse, M. 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 15345
- McPherron, R. L., Russell, C. T., & Aubry, M. A. 1973, *J. Geophys. Res.*, 78, 3131
- Pritchett, P. L., & Coroniti, F. V. 2000, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3161
- Shiokawa, K., Baumjohann, W., & Haerendel, G. 1997, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1179
- Tsyganenko, N. A. 1989, *Planet. Space Sci.*, 37, 5
- Vasyliunas, V. M. 1984, in *Magnetospheric Currents*, *Geophys. Monogr., Ser.*, Vol 28, ed. Potemra, T. A. (AGU), 63