

## Type II 전파폭발이 관측된 행성간 충격파의 1AU 내에서의 전파 과정

오수연, 이유희<sup>†</sup>, 김용하  
충남대학교 천문우주학과

### TRANSIT OF THE INTERPLANETARY SHOCKS ASSOCIATED WITH TYPE II RADIO BURSTS WITHIN 1AU

Su Yeon Oh, Yu Yi<sup>†</sup>, and Yong Ha Kim

Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea  
E-mail:osy1999@cnu.ac.kr, euyiyu@cnu.ac.kr

(Received August 15, 2007; Accepted August 22, 2007)

#### 요 약

ACE 위성이 1997년부터 2000년까지 관측한 행성간 충격파들 중에서 WIND 위성에서 관측된 Type II 태양 전파 폭발에 의한 것으로 연관되어지는 행성간 충격파 31개를 선별하였다. 이들 행성간 충격파 발생과 관련된 Type II 전파 폭발이 관측된 후에 행성간 충격파가 인공위성들에 의해 관측될 때까지의 시간을 측정하여 행성간 충격파가 태양에서 지구까지 전달되는 전달속도를 구하였다. 이 속도와 ACE 위성에서 실제 관측된 행성간 충격파의 진행속도를 비교하여 행성간 충격파의 태양 지구간 전파과정은 평균 가속도가  $-1.02\text{m/sec}^2$ 로 감속되는 과정임을 규명하였다. 더 나아가, 이로부터 행성간 충격파의 특성에 따른 행성간 충격파 전달 과정의 감속을 결정하는 가속도 값이 행성간 충격파의 진행속도나 마하수 등과 상관관계가 없음을 밝혀내었다.

#### ABSTRACT

Among the interplanetary shock (IP shock)s observed by ACE spacecraft at 1AU during 1997 to 2000, we have selected 31 IP shocks which had triggered the interplanetary type II radio bursts detected by the WIND spacecraft while those shocks were leaving the Sun. We compared the observed IP shock propagation speeds and the IP shock transit speeds estimated by time difference between the interplanetary type II radio burst detection and the IP shock observation. Then, we found that the mean acceleration of the IP shocks between the Sun and the Earth is about  $-1.02\text{m/sec}^2$ , which means the deceleration contrary to the positive acceleration predicted by Parker solar wind model. It is also verified that the acceleration of the IP shock does not show any linear correlation with the shock propagation speed and the Mach number of the IP shock.

*Keywords:* interplanetary shock, type II radio burst, solar wind, ACE, WIND

---

<sup>†</sup>corresponding author

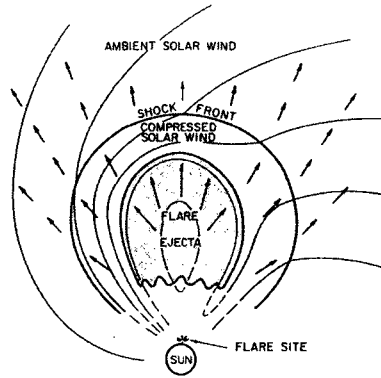


그림 1. 행성간 충격파의 형성 및 전달 과정(Hundhausen 1972).

## 1. 서론

### 1.1 연구 목적 및 필요성

태양풍은 지구를 비롯한 모든 행성들의 이온권 및 자기권과의 상호작용을 결정짓는 아주 중요한 요소이다. 특히, 지구의 지자기폭풍과 같은 격변현상은 정상상태(steady state)의 태양풍이 아니라, 행성간 충격파(Interplanetary shock; IP shock)와 같은 태양풍 내의 일시적으로 변하는 구조에 의해 발생한다. 지자기 폭풍과 같은 우주환경의 변화는 위성통신, GPS, 그리고 무선통신 등 전파통신의 교란을 발생시키기 때문에 요즘처럼 무선통신에 대한 의존도가 커지고 있는 상황에서 통신교란의 원인이 되는 전파 예보 및 경보에 필요한 관련 태양 및 태양풍 연구가 절대적으로 필요하다. 태양활동 광학 관측이나 태양전파 관측을 이용하여 지상의 전파통신 교란 시점과 세기 등을 정확히 예측할 수 있는 고도화된 예보기술이 완비되기 위해서는 매우 정교한 태양풍과 행성간 충격파의 전파 모델이 필요하다.

### 1.2 행성간 충격파의 전달과정

그림 1은 행성간 충격파가 형성되어 전달되어 오는 과정을 표현한 것으로 태양풍이 불어 나오면서 통과해 오는 코로나의 구조와 태양자기장의 상호작용으로 행성간 충격파가 형성되어 전달된다. 행성간 충격파 형성과 연관 있는 태양현상이 발생된 후 약 2-3일이 지나면 지구에 도달하게 된다.

행성간 충격파 전파 과정 연구는 주로 태양풍 관측 자료에 의거한 전파 과정을 유추하는 방법과 자기유체 모델을 통한 시뮬레이션을 이용한 연구 방법(Smith & Dryer 1990, Dryer 1994, Lee & Kim 1999)을 통해서 가능하나, 이 논문에서는 전자의 방법을 비교 활용하였다. Parker의 간단한 태양풍 모델에서는 태양풍이 외부로 불려나가면서 지속적으로 속도가 증가한다(Parker 1958). 그러나 이 이론은 우리가 두 개의 위성을 이용하여 태양을 출발할 때 속도를 재고 또 지구에 도달할 때 속도를 측정하여 비교하면 쉽게 판별할 수 있을 것처럼 보이지만, 현재 태양 코로나 외곽에 태양풍 관측 인공 위성을 보내서 관측을 하지 못하고 있고, 설사 위성 하나를 성공적으로 태양 코로나 밖 지구를 향하는 곳에 위치하게 한다 하여도 태양풍에 특정 표시를 해서 태양풍의 전달 과정을 연구할 수 없기 때문에 쉬운 일이 아니다. 그러므로 자연적인 표시를 이용하는 방법의 하나가 행성간 충격파를 이용하

는 것이다.

태양풍 관측 자료를 이용한 행성간 충격파의 전파 과정을 연구하는 기존 연구에서는 코로나 질량 방출(Coronal Mass Ejection; CME)이 행성간 충격파를 일으킨다는 연관성을 이용하여 태양관측 위성의 코로나그래프에서 관측된 코로나 질량방출과 태양풍 관측위성에서 관측한 행성간 충격파를 연관지어 행성간 충격파가 태양부터 지구까지의 1AU 거리를 통과하는데 필요한 행성간 충격파의 전달 시간(Transit time)을 계산하는 전파 과정을 연구하였다(Cane et al. 1987, Watari & Detman 1998). 1980년대 초반에는 관측되는 코로나 질량방출이 지구에 영향을 줄 확률이 적은 가장자리(limb) 코로나 질량방출이 대부분이었기 때문에 관련 있는 코로나 질량방출-행성간 충격파 쌍의 자료가 적었다. 행성간 충격파가 태양 플레어에 의해 발생할 수도 있다는 사실과 코로나 질량방출의 40% 미만이 플레어와 관련이 있다는 점(St. Cyr & Webb 1991) 밝혀졌다. 따라서, 코로나 질량방출과 관련됐다고 생각한 상당수의 행성간 충격파가 그 코로나 질량방출과는 무관한 플레어에 의해 폭발파(Blast wave)로 만들어지는 행성간 충격파일 수가 있으므로 기존 방법으로 통계처리를 통해 경험식을 유도하는 과정에서 많은 오차를 야기시킨다.

### 1.3 Type II 태양 전파폭발

태양에서 발생하는 전파폭발(Radio burst)은 관측된 스펙트럼의 유형, 구조, 지속시간을 기준으로 하여 5개의 종류로 분류된다. 그 중에서 Type II 전파폭발은 세기가 강한 주파수가 고주파수에서 저주파수로 천천히 변화하는 경향을 보인다.

Coronal type II 전파폭발은 코로나를 통과하는 충격파와, Interplanetary(IP) type II 전파폭발은 행성간 물질을 통과해 오는 충격파와 관계가 있으며, 특히 IP type II 전파폭발은 SA event(Solar Activity event; 행성간 충격파 형성 기원)와 큰 상관관계를 가지고 있음이 알려져 있다. 이 전파폭발은 우주환경변화의 주요 징후와 지자기 폭풍과 깊은 관계가 있다. Coronal type II 전파폭발은 그 복사 범위가 100MHz이고 IP type II 전파폭발은 1MHz 범위 내에서 강한 복사를 방출한다. WIND 위성의 관측장비 중에서 WAVES는 관측 주파수 영역이 1-14MHz으로 태양반경의 2-10배 거리 범위 내에서 전파폭발을 측정할 수가 있다. 코로나 질량방출, Coronal type II 전파폭발 및 IP type II 전파폭발의 발생영역 및 그에 대응하는 충격파 진행속도가 그림 2에 표시되어 있다.

그림 3에 소개된 개략적인 코로나 질량방출, 플레어(Flare), 전파폭발 간의 상관관계를 살펴보면 비교적 긴 시간동안 지속되는 플레어는 코로나 질량방출과 관련되고 짧은 시간동안 유지되는 플레어는 Coronal type II 전파폭발과 관계 있는 것으로 알려져 있다. 한편, 코로나 질량방출, Coronal type II 전파폭발 양쪽 모두 IP type II 전파폭발과 연관성이 있는 것으로 추정되나 아직까지 분명한 그 상관관계가 밝혀지지 않았기에 이 연구에서는 IP type II 전파폭발과 행성간 충격파의 관계에 초점을 맞추었다.

미국 NASA의 큰 연구주제 중의 하나인 “Living with a Star(LWS)” 프로그램의 궁극적인 목표는 태양표면에서의 코로나 질량방출이나 태양 플레어 같은 태양활동이 지구 우주환경에 미치는 영향을 정확히 예측하려는 것이다. 장기적으로 볼 때, 코로나 질량방출이나 플레어가 관측된 후, 이들이 지구에 도달해 지자기 폭풍을 일으키리라 예상되는 시각을 현재 예보처럼 2-3일 후 정도(즉, 오차 범위 1일)로 예측하는 수준이 아니라, 1시간 이내 오차로 예견할 수 있을 정도로 정확성을 갖는 태양풍과 행성간 충격파 전파 모델을 완성하는 것이다. 이러한 연구의 수행과정으로서 이 논문에서 태

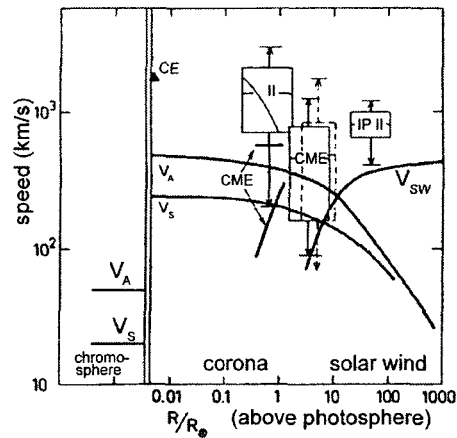


그림 2. 코로나 질량방출, Coronal type II, IP type II 전파폭발의 발생영역 및 그에 대응하는 충격파 진행 속도(Bougeret 1985).

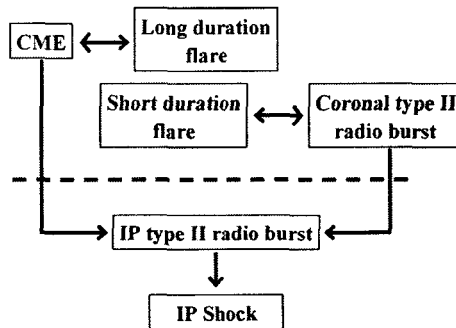


그림 3. 개략적인 코로나 질량방출, 플레어, 전파 폭발 간의 상관관계.

양에서 발생한 Type II 전파폭발이 관측된 행성간 충격파의 태양-지구간 전달과정에서의 가/감속을 규명하고 이를 결정하는 물리적 조건들을 찾아내고자 한다.

## 2. 자료분석

이 연구는 미국 NASA의 우주과학자료센터(National Space Science Data Center, NSSDC)에 보관된 ACE(Advanced Composition Explorer) 위성의 태양풍 자기장, 속도, 밀도 고분해능(1분 평균) 자료와 WIND 위성의 태양전파 관측자료를 이용하였다.

ACE 위성은 1997년 8월 이후 줄곧 태양과 지구의 중력이 평형을 이루는 라그랑지안 L1점에서 태양풍을 관측해 오고 있다. 지구 자기권 앞쪽 지구 반경의 230배 거리에 있는 ACE 위성이 행성간 충격파를 관측한 이후에 대략 50분 정도 후에 행성간 충격파가 지구에 도달하게 된다. WIND 위성은 1994년 말부터 공전 궤도의 장축 끝을 L1 점에 두고 지구 주위를 공전하는 궤도 상에서 태양풍 관측 이외에도, WAVES 탑재체가 1-14 MHz 주파수 영역에서 태양 전파 관측을 하고 있다(Bougeret

et al. 1995). 이 전파 관측은 전자 밀도가  $10^6 \text{cm}^{-3}$ 에서  $10^5 \text{cm}^{-3}$ 으로 떨어지는 태양 중심에서 태양 반경의 2-10배 거리에 떨어진 코로나 외곽이나 행성간 공간에서 방출되는 전파 발생을 측정한다. 이 주파수 영역에서 전파폭발은 행성간 충격파가 발생하여 이제 막 행성간 공간으로 파급되고 있음을 의미한다(Gopalswamy et al. 2001).

서론에서 기술한 바와 같이, 기존 행성간 충격파 전파 과정 연구의 문제점은 행성간 충격파의 태양에서 발생기원이 코로나 질량방출인지 플레어 인지를 구분하지 않았다. 발생한 모든 행성간 충격파가 막 코로나 영역에서 행성간으로 벗어나는 과정에서 나타나는 IP type II 전파폭발과 태양풍 관측위성에서 관측된 행성간 충격파 간의 관련 쌍을 이용하여 행성간 충격파의 태양에서 지구간의 전파과정을 연구하였다. 이렇게 IP type II 전파 폭발과 행성간 충격파 쌍을 잡는 경우는 관측된 행성간 충격파와 그의 원인을 연결하는 과정에서 잘못 연결하는 오류 발생 확률이 매우 적을 것이기 때문이다. 연구 방법을 과정의 순서대로 정리하면 아래와 같다.

1. ACE 위성의 태양풍 플라즈마 물리량 자료에서 행성간 충격파를 찾는다. 태양풍 자기장과 플라즈마의 관측자료로부터 Rankine-Hugoniot 관계식을 이용하면 행성간 충격파가 지나감을 알아낼 수가 있다(Vinas & Scudder 1986, Szabo 1994). 정확한 행성간 충격파 속도( $V_s$ )와 Magnetosonic Mach number( $M_s$ ) 계산에는 엄밀한 물리량 계산을 요구하지만 태양풍 속도와 밀도의 급격한 변화하는 행성간 충격파 통과 시각은 태양풍 자료 그래프의 시각적 분석으로 찾았다.
2. WIND 위성 자료를 이용하여 IP type II 전파폭발 자료를 찾는다. IP type II 전파폭발 발생 시점을 알아내고, IP type II 전파폭발 후 2-4일 내에 관측된 행성간 충격파 자료와 쌍을 정한다. 이 과정에서 행성간 충격파 발생 2일 이내에 둘 이상의 IP type II 전파폭발이 발생된 경우에는 쌍을 정하기에 어려움이 있어서 자료에서 제외하였다.
3. 행성간 충격파가 태양에서 지구까지 전달되는 전달속도(Transit Speed,  $V_t$ )를 구한다. Type II 전파폭발이 관측된 후에 행성간 충격파가 인공위성들에 의해 관측될 때까지의 시간(Transit time)을 구하여, 행성간 충격파가 태양에서 지구까지 전달되는 전달속도를 구하였다.
4. 행성간 충격파의 태양 지구간 전파 과정에서 가/감속 과정을 규명한다. 행성간 충격파 전달속도( $V_t$ )와 행성간 충격파 속도( $V_s$ )를 비교한다. 이때  $V_s < V_t$ 인 경우는 감속에 해당하며,  $M_s$ 나  $V_s$  값의 변화에 따른 감속율을 구한다. 이 때 감속도(음의 가속도)를 구하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 행성간 충격파의 1AU 전파과정의 감속

ACE 위성의 1997년부터 2000년까지 SWEPAM(Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor)의 관측치를 이용하여 찾은 행성간 충격파들을 대상으로 이 행성간 충격파들의 물리적 요소값을 구하였다. 또 이들 행성간 충격파와 관련된 IP type II 전파 폭발 관측은 WIND 위성의 WAVES의 자료를 활용하여 구였다. WIND 위성에 의해 IP type II 전파폭발이 관측된 행성간 충격파의 경우는 모두 31개 발견하였다.

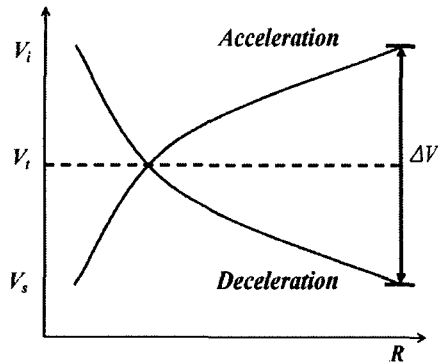


그림 4.  $V_i$ (IP type II 전파폭발 발생순간의 충격파 속도),  $V_s$ (1AU에서 관측된 행성간 충격파의 속도)와  $V_t$ (행성간 충격파의 1AU 통과속도)의 정의와 이를 이용한 가/감속의 정의.

표 1. 지상관측에서 Coronal type II 전파폭발, WIND 위성이 IP type II 전파폭발, 그리고 ACE가 행성간 충격파를 관측한 특별한 예.

	Date (UT)	Speed (km/s)	Observation
Coronal type II burst	2000. 11. 24. 05:02	$V_c = 1167\text{SH}$	RRL
IP type II burst	2000. 11. 24. 05:04	$V_i = 874.60$	WIND
IP shock	2000. 11. 26. 11:24	$V_s = 659.13$	ACE

원래 Parker 태양풍 이론에 의하면 태양풍은 가속되어 전파된다. 그림 4에 제시된 행성간 충격파의 태양에서 지구까지 1AU 구간에서 가속 또는 감속을 규명하기 위해서는 IP type II 전파폭발의 초기속도 추정이 필요하나 그 방법과 자료획득이 어려워 대신에 행성간 충격파 속도와 통과속도의 비(속도지수),  $V_t$ (행성간 충격파의 1AU 전달속도),  $V_s$ (1AU에서 관측된 행성간 충격파의 속도),  $T$ (행성간 충격파의 1AU 통과시간),  $\Delta S = 1\text{AU}$ 를 정의하여 식 (1)을 이용하여  $a$ (평균가속도)를 구하였다.

$$V_t = \frac{\Delta S}{T}, \quad a = 2 \frac{V_s - V_t}{T} \tag{1}$$

한 예로 전파연구소(RRL)에서 관측한 Coronal type II 전파폭발 목록 중 WIND의 IP type II 전파폭발, ACE가 관측한 행성간 충격파를 관측한 경우를 살펴보면(표 1), coronal type II 전파폭발 발생 shock의 속도와 local shock 속도( $V_s$ )와 관측된 IP type II 전파폭발의 초기 속도( $V_i$ )를 대입하면  $T = 2.264\text{days}$ 로 주어진 경우에 가속도 값은  $a = -1.10\text{m/s}^2$ 으로 계산되어 행성간 충격파가 태양에서 지구까지 전파하는 과정에서 감속함을 확인할 수 있다.

분석한 행성간 충격파의 자료를 살펴보면, 표 2와 같이 평균적으로 통과속도가 행성간 충격파 속도보다 커서 속도지수 값은 1보다 작으며 가속도 값은 음의 값을 갖는 것으로 나타난다.

### 3.2 행성간 충격파의 물리량들간의 상관관계

행성간 충격파 속도와 마하수의 관계를 나타낸 그림 5a에서 예상과는 다르게 행성간 충격파 속도 크기와 마하수는 어떤 중요한 비례관계가 없이 분포한다. 행성간 충격파 속도와 가속도도 역시 비례하는 관련성이 없음을 그림 5b를 통해서 확인할 수 있다. 그림 5b에서 행성간 충격파 속도와 가속

표 2. 관측된 31개의 행성간 충격파의 마하수, 1AU 전달속도, 행성간 충격파의 속도, 속도지수, 가속도, 1AU 통과 시간의 각 물리량의 최대값, 최소값 및 평균값.

	Mean	Maximum	Minimum
Mach number	4.18	10.81	1.18
Transit speed (km/s)	610.11	986.92	346.24
Shock speed (km/s)	514.35	879.31	365.52
$V_s/V_t$	0.87	1.50	0.59
$a$ ( $m/s^2$ )	-1.02	1.01	-4.48
Travel time (day)	2.85	4.74	1.51

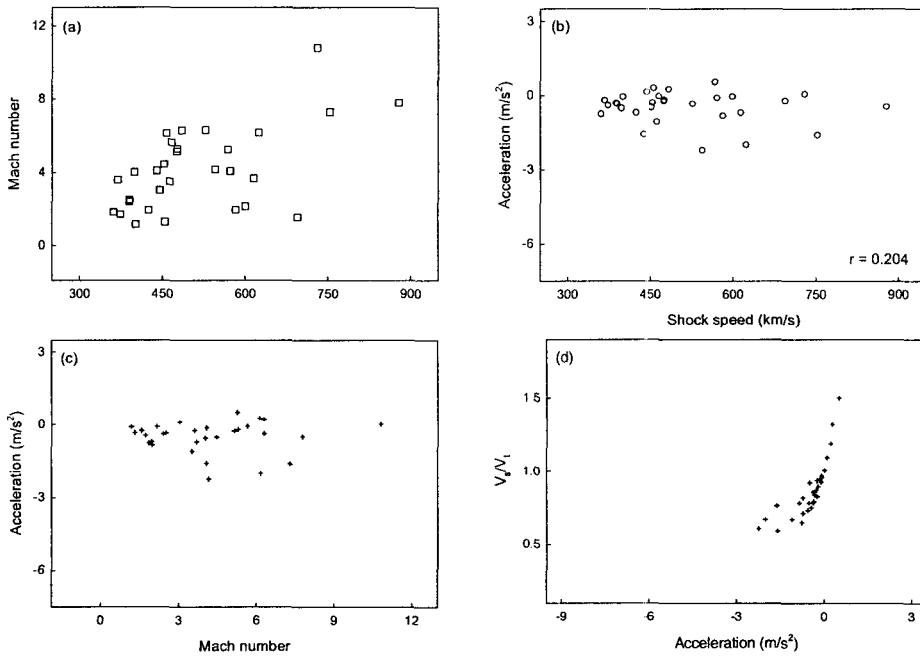


그림 5. (a) 행성간 충격파의 속도와 마하수의 관계, (b) 행성간 충격파의 속도와 가속도의 관계, (c) 가속도와 마하수의 관계, (d) 가속도와 속도 지수( $V_s/V_t$ )의 관계.

도는 상관계수( $r$ )는 0.204의 값을 가지며,  $t$  테스트한 결과  $t = 1.121$ 는  $t_{\alpha} = (30, 0.025) = 2.042$ 보다 작기 때문에 95% 신뢰도로 두 요소 사이에 상관이 없다고 할 수 있다.

그림 5c는 행성간 충격파의 마하수와 가속도의 관계를 보여주는 결과로서 행성간 충격파 속도와 같이 마하수 역시 가속도와 어떤 상관관계를 보여주지 않음을 알 수 있다. 그림 5d는 상대적인 속도 지수 비에서 가속도 값을 쉽게 구해낼 수 있는 추정자 역할을 함을 보여주고 있다. 가속도 값의 증가는 곧 속도지수( $V_s/V_t$ ) 값의 증가로 가속이 일어나며, 반대로 값의 감소는 감속을 지시해 준다.

#### 4. 결론 및 토론

행성간 충격파의 전파 과정의 분석결과를 정리해 보면, 행성간 충격파의 마하수, 속도지수, 가속

도의 분포는 행성간 충격파 속도와 어떤 상관관계가 없이 random하게 분포하며 31개의 행성간 충격파 가운데 대부분(83% 정도) 행성간 충격파가 속도지수( $V_s/V_t$ ) 값이 1보다 작고 가속도 값이 0보다 작아 감속하고 있음이 밝혀졌다. 속도지수 평균값은 0.87, 평균가속도는  $-1.02\text{m/s}^2$  정도의 값을 갖는다. 즉, 행성간 충격파의 세기라 표현되는 마하수나 shock 속도는 행성간 충격파의 가/감속과 어떤 상관관계가 존재하지 않는다고 말할 수 있다.

지구를 둘러싼 우주환경 중에서 지구에 가장 큰 영향을 주는 천체는 태양이고, 태양의 활동으로 인해 많은 물질이 방출되고 그로 인한 충격파의 전달로 지구우주환경에 큰 변화를 만들어 낸다. 행성간 충격파의 물리량 중 전파속도의 변화경향을 연구함으로써 지구도달시간을 보다 정확히 예측하여 우주환경예보, 대비책을 수립하는데 수월함을 더해 줄 수 있을 것이다.

태양풍 자료를 이용하여 행성간 충격파를 뒤따라오는 행성간 충격파들의 유도체(driver)를 규명하여, ACE 위성에서 관측된 행성간 충격파가 관측된 이후 이를 후까지의 태양풍 자료를 분석하여 간접적으로 행성간 충격파들의 기원이 코로나 질량방출에 의한 것인지, 고속 태양풍(High Speed Stream, HSS)에 의한 것인지, 아니면 태양 플레어에 의한 폭발파에 의한 것인지 특성에 따른 분류작업이 필요하다. 또, 행성간 충격파의 유도체 특성에 따른 또는 행성간 충격파의  $M_s$ 나  $V_s$  값의 변화에 따른 행성간 충격파 전달 과정의 가/감속량 변화의 관계식을 찾아내고, 이를 결정하는 모든 물리적 조건들을 찾는 연구가 요청된다.

**감사의 글:** 이 연구는 한국학술진흥재단의 기초과학지원사업(KRF-2002-015-CP0154)의 지원을 받아 수행되었습니다. 김용하는 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(R01-2006-000-11003-0)을 받았습니다.

### 참고문헌

- Bougeret, J.-L. 1985, in *Geophys. Monogr.*, vol.35, Collisionless shocks in the heliosphere, eds. B. T. Tsurutani & R. G. Stone (Washington, D.C.: AGU), p.13
- Bougeret, J.-L., Kaiser, M. L., Kellogg, P. J., Manning, R., Goetz, K., Monson, S. J., Monge, N., Friel, L., Meetre, C. A., Perche, C., Sitruk, L., & Hoang, S. 1995, *Space Sci. Rev.*, 71, 231
- Cane, H. V., Sheeley, N. R., Jr., & Howard, R. A. 1987, *JGR*, 92, 9869
- Dryer, M. 1994, *Space Sci. Rev.*, 67, 363
- Gopalswamy, N., Yashiro, S., Kaiser, M. L., Howard, R. A., & Bougeret, J.-L. 2001, *JGR*, 106, 29219
- Hundhausen, A. 1972, *Coronal Expansion and Solar Wind* (N.Y.: Springer-Verlag), p.238
- Lee, D.-H. & Kim, K. 1999, *JGR*, 104, 12379
- Parker, E. N. 1958, *ApJ*, 128, 664
- Smith, Z. & Dryer, M. 1990, *Solar Physics*, 129, 387
- St. Cyr, O. C. & Webb, D. F. 1991, *Solar Physics*, 136, 379
- Szabo, A. 1994, *JGR*, 99, 14737
- Vinas, A. F. & Scudder, J. D. 1986, *JGR*, 91, 39
- Watari, S. & Detman, T. 1998, *Ann. Geophysicae*, 16, 370