

제 출 문

본 보고서를 「우주전파환경관측정보의 상관성 연구」
과제의 최종보고서로 제출합니다.

2002. 1. 21.

연구책임자 : 통신사무관 김신겸
연 구 원 : 공업연구사 조경석
연 구 원 : 전송주사 박홍식
연 구 원 : 전송서기 정종일

요 약 문

1. 과제명 : 우주전파환경관측정보의 상관성 연구
2. 연구기간 : 2001. 1. 3 - 2001. 12. 31
3. 연구책임자 : 통신사무관 김신겸
4. 계획 대 진도
 - 가. 월별 추진내용

세부연구내용	연구자	월별 추진일정												비고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
○ 태양전파자료분석의 신뢰성검증 - 전파방출 메카니즘 분석 - 충격파 진행 속도 결정 - 외국분석결과와의 상관도산출 ○ 지자기 관측정보의 신뢰성검증 - 지자기 K 지수 산출 - 외국 분석결과와의 상관도산출 ○ 관측정보간 상관성 분석 - 우주환경예측모델(STOA) 분석 - STOA 모델의 개선 - 모델적용을 통한 관측정보 간의 상관성 분석 ○ 연구보고서 작성														
분기별 수행진도(%)		22			39			26			13			100

나. 세부 과제별 추진사항

1) 태양전파자료분석의 신뢰성 검증

- 전파방출 메카니즘 분석
- 태양전파 관측데이터로부터 충격파 속도 결정
- 미국, 호주, 일본 등의 분석결과와 상관성 분석

2) 지자기 관측자료분석의 신뢰성 검증

- 지자기 관측자료로부터 지자기 활동지수 결정
- 일본 Kakioka 지자기 관측소의 결과와 상관성 비교

3) 관측정보간의 상관성 분석

- 충격파지구도달예측모델(STOA) 분석
- STOA 모델개선을 통한 Revised STOA모델의 개발
- 관측자료 분석 결과의 STOA모델 적용과 적중률 분석

5. 연구 결과

- 1) 태양전파관측의 경우, 태양대기(코로나)에서 발생 분출되는 충격파의 속도를 관측자료의 자체분석을 통해 결정할 수 있었으며 그 결과는 미국, 호주, 일본의 분석결과와 유사하다. 특히 호주 Culgoora 관측소의 분석결과와는 0.81의 상관도를 보였다.
- 2) 지구자기장 관측자료분석을 통해 결정한 지자기 활동 K지수는 전지구 K지수(Kp)와는 0.895의 상관도를 보이면 지역적으로 유사한 일본의 KAKIOKA 관측소의 K 지수와는 0.93의 높은 상관도를 보였다.
- 4) 태양충격파의 지구도달모델(STOA)은 코로나 충격파의 속도에 따라 예측오차의 체계의존성(Systematic dependence)이 있음을 발견하였다. 이 의존성을 없애기 위해 STOA 모형이 가정하는 blast wave solution을 대신하는 선형모형을 고안 적용한 개선모델(Revised STOA)을 개발하였다.

- 5) 자체 관측한 34개의 태양전파폭발현상들을 분석하여 결정한 태양 코로나 충격파의 속도를 Revised STOA 모형에 적용한 결과, STOA모형이 갖는 예측오차의 체계의존성은 보이지 않았고 우주 전파환경변화 예측의 적중률도 개선되었다.

6. 기대효과

태양전파, 지자기 관측정보의 분석결과가 외국 주요관측소의 결과와 높은 상관성이 있고 태양활동과 태양-지구간 충격파, 자기폭풍간의 상호연관성이 있음을 자체 관측자료 분석을 통해 검증하였다. 이는 전파연구소가 우주전파환경 상태를 모니터하고 진단할 수 있는 관측 및 분석기술을 확보함을 의미한다. 또한 자체 개발한 태양충격파의 지구도달모델은 이상현상 발생시 각 현상간의 인과관계(태양전파폭발-지자기폭풍)의 분석뿐 아니라 신뢰성 있는 우주전파환경예보에 활용될수 있다.

7. 기자재 사용 내역

- 태양전파 관측시스템, 지자기 관측시스템, 전리층 관측시스템
- 우주전파환경 분석용 중형컴퓨터

SUMMARY

The shock wave from the solar coronal activity is crucial and closely related to the geomagnetic storm and ionospheric disturbance. The solar radio spectrograph, geomagnetic network, and ionosonde were installed in Radio Research Laboratory(RRL) to monitor these significant disturbances of space environment. Their test operations have been successfully performed to obtain the typical examples of solar radio bursts, rapid geomagnetic variations, and sudden ionospheric disturbances.

In this work, we derived coronal shock speeds from solar radio spectrograph and geomagnetic K-indices from magnetogram of RRL. By comparing the results with those of other observatory, we confirm the validity of our observational data. The derived shock velocity and associated flare's information are used as inputs in the STOA (Shock Time Of Arrival model) to predict the shock arrival times at the Earth. The results show that there is a weak dependence of the transit time difference on initial shock speed. The systematic dependence of transit time is removed by adopting a linear relationship between shock wave velocity and its exponent, i.e., $V_s \sim R^N$ with $N=0.05+4 \times 10^{-4} V_s$.

This kind of work is expected to play an important role in studying the connection between coronal shock and geomagnetic disturbances.

목 차

표 목 차	
그림목차	
제 1 장 서론	
제 2 장 태양전파관측자료분석의 신뢰성 검증	
제 1 절 태양전파관측	
제 2 절 전파폭발(Radio burst)과 코로나 충격파	
제 3 절 Type II burst 분석을 통한 충격파 속도결정	
제 4 절 관측정보의 상관성 조사	
제 3 장 지자기 관측자료분석의 신뢰성 검증	
제 1 절 지자기 폭풍과 지자기 활동 분석	
제 2 절 자료분석을 통한 지자기 활동지수 결정	
제 4 장 태양-지자기 관측정보간의 상관성 연구	
제 1 절 STOA 모형의 적용을 통한 자기폭풍예측	
제 2 절 STOA 모형의 개선	
제 3 절 Type II burst와 자기폭풍간의 상관성	
제 5 장 결론 및 향후과제	
참 고 문 헌	

표 목 차

표 1. 태양전파관측시스템 수신부의 특징
표 2. 관측데이터 파일(yymmddhh.spe)의 구조
표 3. 스펙트럼 분석기(R4131D)의 수신환경 설정
표 4. 전파연구소에서 관측한 Type II Burst와 태양활동 목록
표 5. 전파연구소 지자기 관측시스템의 특성
표 6. K 지수 환산표
표 7. 우주전파환경에 의한 2000년 위성 장애 내용
표 8. 전파연구소 Type II burst들의 모형적용 및 분석 결과

그 립 목 차

그림 1. 전파연구소 태양전파관측 안테나의 모습	
그림 2. 관측시스템 구성도	
그림 3. 30MHz~2500MHz 최소값 평탄화 알고리즘 적용결과	
그림 4-(a). 태양배경전파를 제거한 Dynamic Spectrum	
그림 4-(b). 태양배경전파와 인공신호를 제거한 동적스펙트럼	
그림 5. Type II burst 분석으로 결정한 충격파의 속도 비교	
그림 6. 코로나충격파, 코로나물질방출, 플레어 발생시각 비교	
그림 7. 전파연구소에서 관측한 자기폭풍	
그림 8. FMI 방법을 적용하여 결정한 K지수와 K_p 지수 비교	
그림 9. 전파연구소에서 결정한 K지수와 외국 지수의 비교	
그림 10. 전파연구소에서 관측한 Sudden Impulse	
그림 11. 1998년 5월 8일 Type II burst의 STOA모형 수행결과 ...	
그림 12. 코로나충격파 속도와 STOA모형의 예측오차와의 관계 ..	
그림 13. 코로나충격파의 속도와 Revised STOA모형의 예측오차 와의 관계	
그림 14. STOA 모형과 Revised STOA 모형의 충격파 지구도착 예측 오차	
그림 15. 행성간 충격파의 지구도착과 자기폭풍의 시작	
그림 16. 행성간 충격파 지구도착과 자기폭풍의 규모	

제 1 장 서 론

지구주변 우주환경은 태양으로부터 발생하는 복사, 입자 그리고 자기장 변화에 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 이러한 우주환경의 변화는 우주 공간 및 지상에 설치된 최첨단 기기의 성능과 신뢰성에 영향을 미친다. 따라서 우주환경을 모니터하고 신뢰성 있는 예보를 하는 것은 태양과 지구주변 우주환경의 상호작용(Sun-Earth connection)을 규명하는 것뿐만 아니라 급격한 우주환경에 의한 피해를 최소화하고 대비하는데 매우 중요하다.

특히 태양활동에 의해 발생한 행성간 충격파는 지구자기구(Earth magnetosphere)와의 상호작용을 통해 지자기폭풍을 일으키는 것으로 알려져 있는데 (cf. McPherron, 1995) 이러한 충격파의 지구도착은 지구자기장 폭풍의 시작을 의미하기 때문에 도착시각을 정확히 예측하는 것은 우주환경예보의 필수 조건이다. Smith 등(2000)은 Interplanetary Shock Propagation Model(ISPM, Smith and Dryer, 1990)과 Shock Time of Arrival Model (STOA, Smart and Shea, 1985)간의 비교를 통해 STOA 모델이 행성간 충격파의 지구도착을 보다 정확히 예측함을 알아냈다. 그런데 이들 모델들은 코로나 충격파가 태양-지구간 공간으로 진행하여 행성간 충격파가 된다는 가정(Dryer, 1994)을 근거로 충격파의 속도를 모델의 초기치로 사용하고 있다. 코로나 충격파의 속도는 Type II burst의 분석을 통해 결정되기 때문에 Type II burst의 관측과 정확한 분석은 이 모델들의 적용에 있어 필수적이며 결정된 속도는 모델 예측결과에 영향을 미칠 수도 있다. Type II burst는 동적스펙트럼(Dynamic spectrum)상에 특정주파수대역을 갖는 전파방출띠(emission stripes)가 높은 주파수에서 낮은 주파수로 완만히 흐르는(drift) 특징을 갖는다(Wild and Weiss, 1963). 이러한 특징은 플레어나 코로나물질방출(CME's)에 의한 충격파가 코로나 바깥으로 진행하여 나가는 것을 나타낸다. 진행충격파는 국부지역의 전자를 가속시키고 가속된 전자는 고주파 플라즈마파를 국부플라즈마주파수(local electron plasma frequency) 근처에서 복사되는 전파로 변환시키는 것으로 알려져 있다(Nelson and Melrose 1985; Bougeret 1985). 이러한 이유로 코로나 충격파의 속도는 동적스펙트럼 상에 보이는 Type II burst의 drift rate와 코로나 전자밀도모델을 사용하여 결정된다(Robinson et al., 1984).

우주환경예측모델인 STOA모델은 충격파진행단계를 등속도의 피스톤 유도 (Piston-driven)단계와 $V_s \sim R^{-N}$ (여기서 R은 shock의 heliocentric distance , N=0.5)의 관계를 갖는 blast wave 단계로 나누어 계산된다. STOA 모델에 대한 세부적인 내용은 많은 저자(Dryer and Smart 1984, Smart and Shea 1985, Smith et al., 2000)들에 의해 자세히 설명된 바 있다. Volkmer and Neubauer(1985)는 Helios-1,2에서 관측된 178개의 fast MHD-shock에 대한 통계분석을 통해 행성간 충격파 속도는 $V_s \sim R^{-0.54}$ 의 관계를 알아냈다. Smart and Shea(1985)는 이들의 결과를 근거로 N=0.5인 blast wave를 채택하였다. 한편 Vlasov(1988)는 전파원(radio source) 산란지수를 "radio-astronomical cartography" 방법에 적용하여 결정한 행성간 충격파 속력을 분석한 결과 멱지수(N)가 초기속도에 따라 0.25에서 1사이로 변하며 속력기울기($-\frac{\Delta V}{\Delta r}$)는 초기속도의 제곱에 비례함을 알아냈다. 이는 blast wave 단계에서의 멱지수(exponent) N은 상수가 아니며 초기속력에 따라 달라질 수 있음을 의미한다.

STOA모델을 사용하여 충격파의 지구도착이 예측되었어도 지자기폭풍이 실제 발생하였는지 그 규모는 어느 정도인지 아는 것은 매우 중요하다. 지자기 폭풍의 시작은 지상자력계의 자료에서 SC현상을 통해 확인할 수 있으며 그 규모는 지자기 활동지수들을 통해 정의된다. 지자기 활동지수들 중에 가장 기본이 되는 것은 개별 관측소에서 결정되는 활동지수 K이다. 각 관측소의 K값은 동서방향의 H 성분과 남북방향의 D 성분에 대해 배경자기장을 제거하고 3시간 평균한 값들 중에서 큰 값을 선택하여 결정한다. 실제 관측자료로부터 K값을 결정하기 위해서는 관측소 위치에서의 지구자기장의 최대변동폭을 알아야하고 적당한 산출알고리즘을 적용해야 한다(조경석, 1999).

2장에서는 전파연구소의 태양전파관측을 소개하고 Type II burst를 분석하여 결정한 충격파속도와 다른 관측소의 결과를 비교한다. 3장에서는 이천 지자기관측소 자료로부터 K지수를 결정하고 미국 우주환경예보센터와 일본 Kakioka 관측소의 결과와의 상관성을 살펴본다. 4장에서는 충격파속도가 STOA 모델의 결과에 미치는 영향과 blast wave의 지수상수(N=0.5)를 대신하여 고안한 선형관계식의 적용결과를 설명하고 STOA모델의 개선 가능성을 살펴본다. 최종 결과와 요약은 5장에 정리한다.

제 2 장 태양전파관측자료분석의 신뢰성 검증

정상상태의 태양은 열복사에 의한 배경전파를 연속적으로 방출한다. 그러나 플레어나 코로나물질방출(CME)등과 같이 태양활동이 발생하면 전파폭발(Radio Burst)과 같은 비열전파복사가 방출된다. 이러한 전파폭발은 특히 플레어 발생 직후 수 분내에 뒤따르며 메타파(30 MHz~300 MHz)에서 데시메타파(300 MHz~3000 MHz) 대역에 걸쳐 수초에서 수시간 동안 지속된다. 따라서 태양전파폭발 관측을 위해서는 비교적 넓은 주파수대역의 전파를 연속적으로 관측할 수 있는 시스템이 필요하다. 최초의 swept-frequency spectrograph(Wild and McCready, 1950) 이후, 최근에 이르기까지 시각-주파수 분해능이 향상된 관측기들이 개발되어 사용되고 있다(e.g., Mann et al., 1992; Prestage et al., 1994; Kondo et al., 1995; Shanmugaraju et al., 1999). 관측자료는 주로 시간에 따른 상대적 전파강도의 변화를 표현하는 동적스펙트럼(dynamic spectrum : 횡축은 시간, 종축은 주파수)으로 표시되며 전파방출 구조와 방출 주파수 의 변화 그리고 지속시간에 따라 5개 유형으로 나누어 분류하고 있다(Wild et al., 1963)

제 1 절 태양전파관측

1995년 이천분소에 30MHz에서 2500MHz의 태양전파를 연속으로 관측할 수 있는 전파분광시스템(그림1)을 설치하였다. 이 시스템은 광대역전파를 3개의 주파수 대역으로 나누어 동시에 수신할 수 있도록 구성되어 있다(그림 2). 수신부는 수신안테나와 혼합기(Hybrid-combiner), BPF(Band Pass Filter), LNA(Low Noise Amplifier), 그리고 스펙트럼 분석기(R4131D)들로 구성되어 있다. 각 대역의 전파는 대수주기 안테나에 의해 직선편파로 수신되며 90° 광대역 혼합기를 거치면서 좌·우 원편파로 분리된다. 이 원편파는 수신대역 밖에서 특히 저주파영역의 강한 잡음의 영향을 받지 않도록 BPF를 거치게 되고 LNA를 통해 증폭된 후 스펙트럼 분석기에 입력된다. 수신전파의 loss를 최대한 줄이기 위해 혼합기, BPF, LNA 등은 안테나 근처에 설치하였다.



Log-periodic and 6M parabolic antenna



10M parabolic antenna

그림 1. 전파연구소 태양전파관측 안테나의 모습

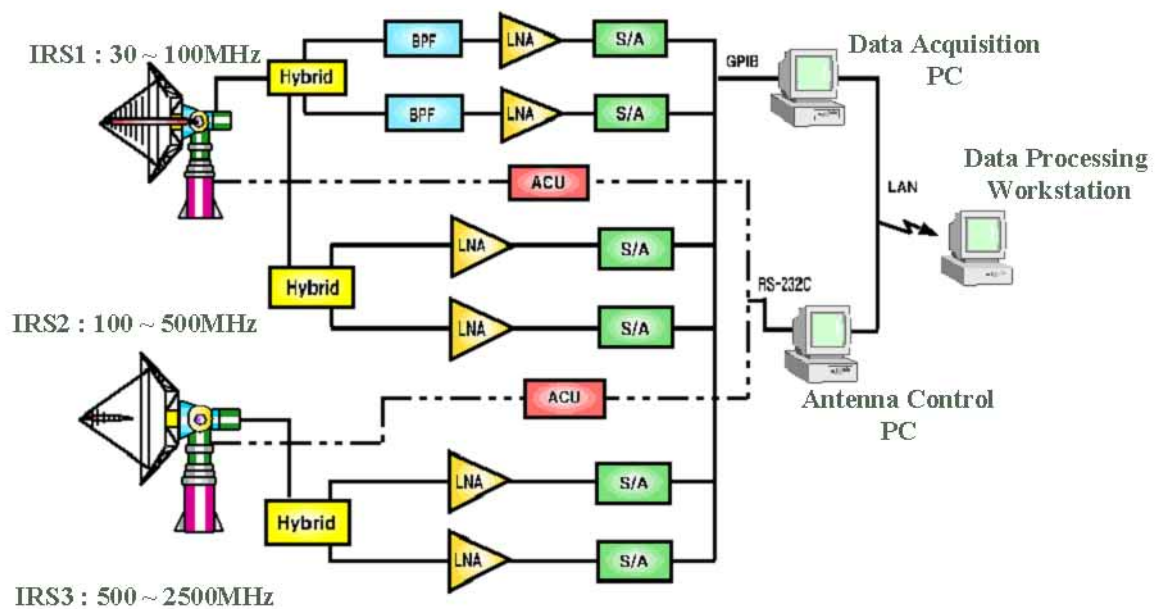


그림 2. 관측시스템 구성도

표 1. 태양전파관측시스템 수신부의 특징

Parameter	IRS-1	IRS-2	IRS-3
Frequency range	30~100MHz	100~500MHz	500~2500MHz
Channel bandwidth	0.14MHz	0.71MHz	2.85MHz
Antenna	Log-Periodic	10m parabola	6m parabola
Primary feed	crossed 15-element log-periodic Antenna	crossed 20-element log-periodic Antenna	crossed 23-element log-periodic Antenna
Antenna gain (dBi)	10.33	17.5(100MHz) 31.4(500MHz)	27.0(500MHz) 40.8(2500MHz)
Beam width	60°	20° (100MHz) 4.1° (500MHz)	6.8° (500MHz) 1.4° (2500MHz)
LNA	45dB(gain) 1.3dB(Noise figure)	45dB(gain) 1.6dB(Noise figure)	32dB(gain) 2.0dB(Noise figure)
BPF	30~100MHz	100~500MHz(325MHz Notch)	500~2500MHz
Polarization	RHCP and LHCP	RHCP and LHCP	RHCP and LHCP

표 2 관측데이터 파일(yymmddhh.spe)의 구조

header(word)	내 용
1~6	관측 시작 시간 : 년, 월, 일, 시간, 분, 초 (UT)
7~12	관측 종료 시간 : 년, 월, 일, 시간, 분, 초 (UT)
14	주파수 축의 형태(=1:선형, =2:대수(log))
15	시작 주파수(30MHz)
16	종료 주파수(2500MHz)
17	IRS-1과 IRS-2 사이의 경계 주파수(100MHz)
18	30MHz에서 500MHz 사이의 데이터 개수
19	IRS-2와 IRS-3 사이의 경계 주파수(500MHz)
20	100MHz에서 2500MHz 사이의 데이터 개수
21~512	사용안함
body(byte)	내 용
1~11	관측 시간 : 년, 월, 일, 시간, 분, 초 (UT)
13	태양의 방위각 좌표($\times 10$)
15	태양의 고도 좌표($\times 10$)
23~1775	우 원편광 데이터(RHCP)
1776~3528	좌 원편광 데이터(LHCP)

안테나를 비롯한 수신부의 특징은 표 1과 같다. 구동부는 안테나제어를 위한 ACU(Antenna Control Unit)와 제어시스템에 명령을 입력할 수 있는 OCU(Operation Control Unit)로 구성되어 있다. 안테나는 일출에서 일몰까지 천체 역학계산에 의해 결정된 방위각, 고도 좌표에 따라 태양을 자동으로 추적하며 그 정확도는 $\pm 0.005^\circ$ 이다. 관측데이터는 GPIB(General Purpose user Interface Bus)카드를 통해 취득된다. 6개의 스펙트럼 분석기로부터 전체대역(30MHz~2500MHz)의 좌·우 원편광 스펙트럼을 취득하는데 걸리는 시간은 약 3초 간격이며 데이터구조는 표 2와 같다. 스펙트럼 분석기의 수신환경은 표3과 같이 설정하였다.

데이터 처리는 FM, TV, Pager 등의 인공잡음과 태양배경전파를 제거하는 과정을 포함한다. 태양배경전파는 시간 도메인에서 각주파수의 전파세기를 비교하여 최소 값을 취하여 결정하였다. 그리고 인공잡음제거를 위해 최소값 평탄화(minimum smoothing) 기법을 적용하였다. 여기서 최소화 평탄화는 주파수 윈도우 크기 안에 있는 값들 중 가장 작은 값을 자신의 화소값으로 사용하는 것이다. 이를 위해 먼저 주파수대역별로 각각 잡음의 최대폭을 (a) 30~100MHz에서는 1MHz (10 pixel, $w=5$), (b) 100~500MHz에서는 약 4MHz (6 pixel, $w=3$), (c) 500~2500MHz에서는 약 10MHz (4pixel, $w=2$)로 결정하였다. 또한 인공잡음의 중첩에 의한 효과를 제거하기 위해 위에서 결정한 폭의 2배 정도의 윈도우크기를 가지고 최소값 평탄화를 수행하였다. 그 결과 그림 3과 같이 원시스펙트럼에서 인공잡음이 효과적으로 제거됨을 확인할 수 있었으며 종전보다 훨씬 뚜렷한 전파폭발자료의 모습을 얻을 수 있었다. 그림 4는 전파연구소에서 관측한 전형적인 Type II burst로서 태양배경전파가 제거된 원시 관측자료(a)와 태양배경전파와 인공잡음을 모두 제거한 관측자료(b)를 보여주고 있다.

제 2 절 전파폭발(Radio burst)과 코로나 충격파

1947년 5월8일에 Payne-Scott, Yabsley 그리고 Bolton은 200, 100, 그리고 60MHz에서 태양에서 강한 전파버스트가 방출되었으며 높은 주파수에 비해 낮은 주파수에서 늦게 전파방출이 된다는 사실을 발견하였다(Payne- Scott et al., 1947). 이들은 어떤 물리현상이 코로나의 하층(높은 플라즈마 주파수 level)에서

표 3. 스펙트럼 분석기(R4131D)의 수신환경 설정

설 정	IRS-1	IRS-2	IRS-3
Resolution bandwidth	100kHz	300kHz	1MHz
video bandwidth	3kHz	10kHz	10kHz
Sweep time	0.5sec	0.5sec	0.5sec
Frequency time	300 - 100 MHz	100 - 500 MHz	500 - 2500 MHz
Detector mode	sample	sample	sample

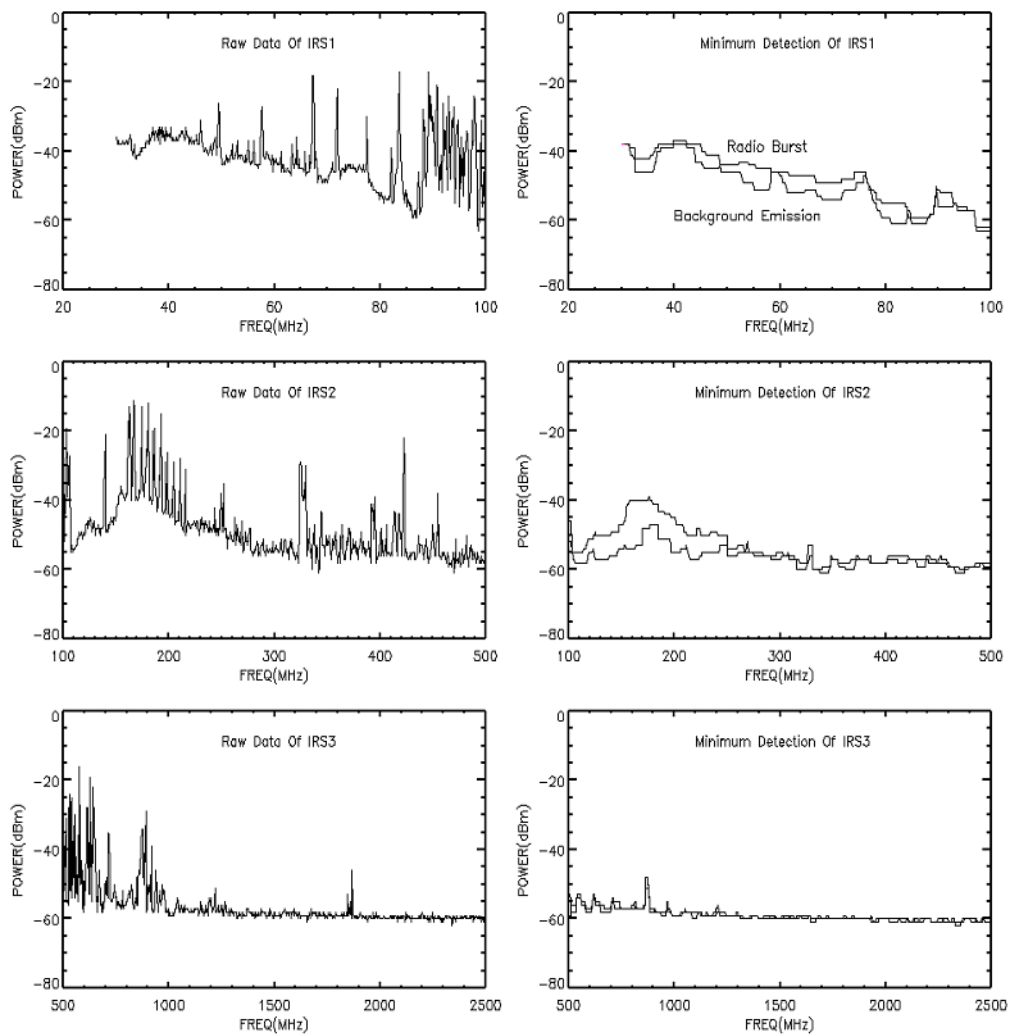


그림 3. 30MHz~2500MHz의 수신전파로부터 인공잡음을 제거를 위하여 개발한 최소값 평탄화(minimum smoothing)알고리즘의 적용결과

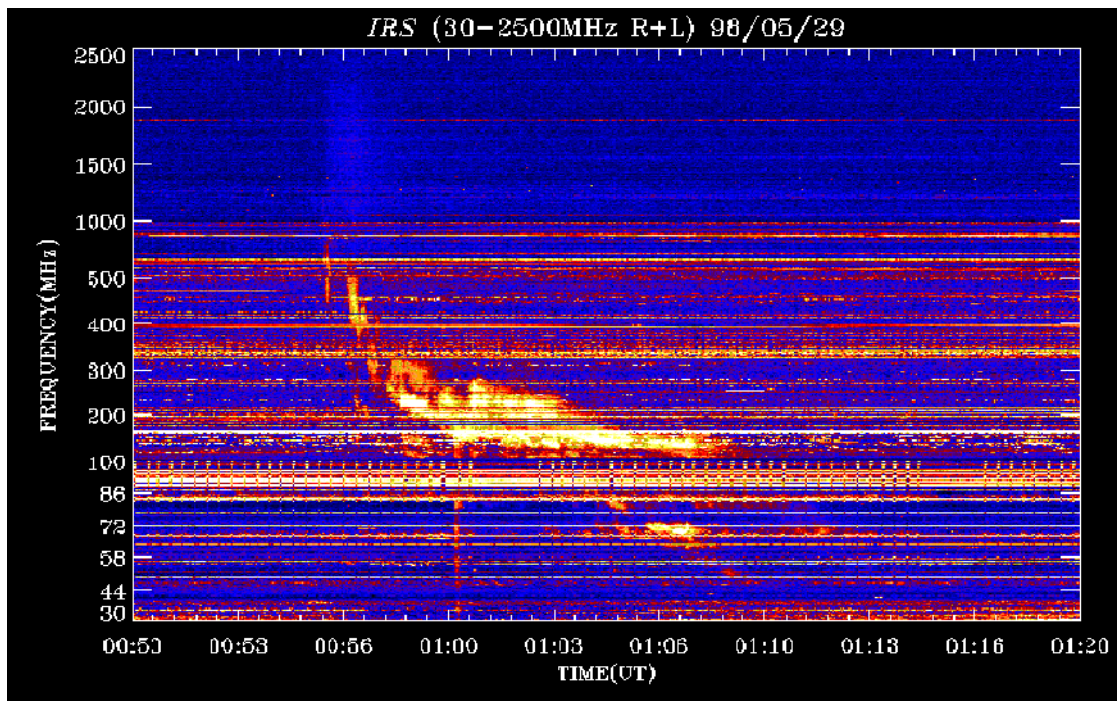


그림 4-(a). 태양 배경전파를 제거한 Dynamic Spectrum

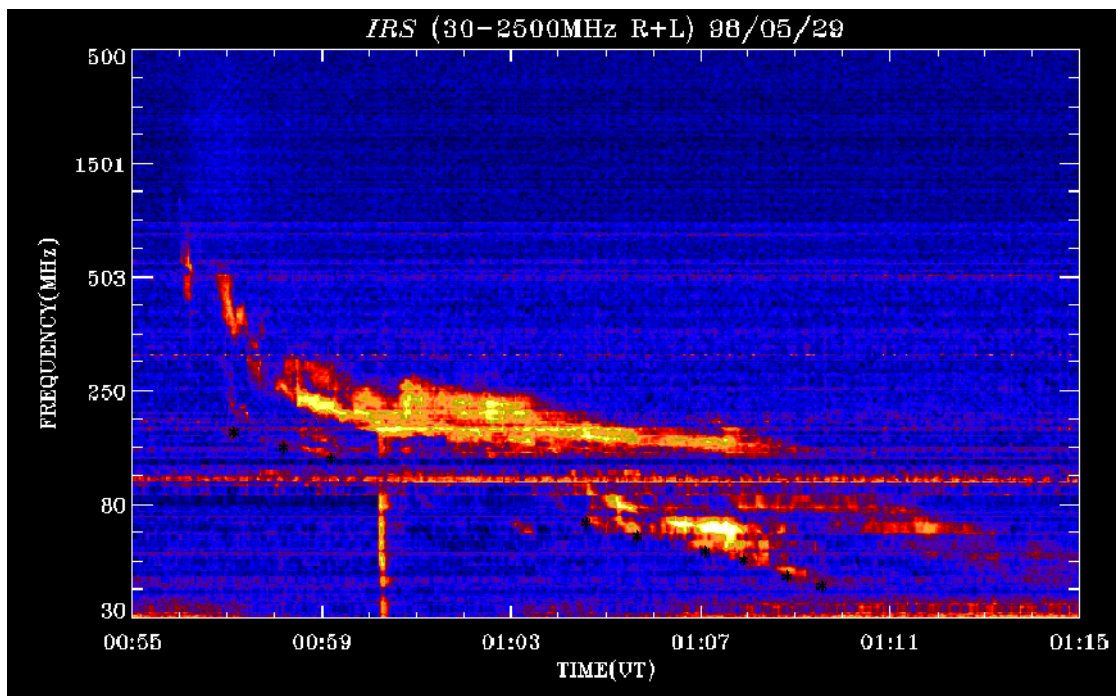


그림 4-(b). 태양 배경전파와 인공신호를 모두 제거한 Dynamic Spectrum

상층(낮은 주파수 level)으로 통과하여 지나갔으며 그 속도는 500~750km/s일 것이라고 추정하였다. 이후 이 물리 현상은 MHD shock으로 밝혀졌다(Uchida, 1960). Wild 와 McCready(1950)은 이러한 전파버스트를 Type II radio burst로 분류하였다. Type II burst는 태양-지구간 공간으로 진행되는 충격파를 발생시키는 급격한 태양분출현상(플레어, CME)과 관련이 있기 때문에 태양-지구간 Connection을 이해하는데 중요한 역할을 한다.

Type II radio burst의 emission 메카니즘은 다음 3단계의 플라즈마 emission과정으로 이해되고 있다. 첫째, 코로나를 지나는 충격파는 플라즈마 지역을 불안정하게 만들고 국부플라즈마 주파수(f_p) 근처의 진동수를 갖는 고주파 플라즈마파를 생성시킨다. 둘째, 이 플라즈마파(Langmuir wave)는 주변의 이온들에 의해 산란되어 전자기파로 변한다. 이 전자기파는 지상에서 Type II burst의 Fundamental emission으로 관측된다. 그리고 두개의 플라즈마파가 합쳐져 약 2배의 진동수($2f_p$)를 갖는 전자기파로 변환되기도 하는데 이는 동적스펙트럼 상에는 Harmonic emission으로 관측되기도 한다. Instability 상태는 충격파가 플라즈마 층을 지나는 동안 계속되고 충격파가 지나면 플라즈마파는 소멸되고 전자기파 방사도 멈춘다.

제 3 절 Type II burst 분석을 통한 충격파 속도결정

태양코로나의 높이에 따라 전자밀도는 감소하기 때문에 국부 플라즈마 주파수($f_p = 9000\sqrt{N_e}$ Hz)도 역시 감소한다. 만약 충격파가 하층에서 상층으로 진행하면서 전자기파를 발생시킨다면 그림 4-b의 동적스펙트럼 상에서 보이는 것과 같이 낮은 주파수에서 보다 늦게 전파세기가 증가하는 것을 예상할 수 있다. 따라서 코로나의 전자밀도의 변화를 알고 있다면 Type II burst의 drift rate로부터 충격파의 진행속도를 환산할 수 있다. Fundamental emission의 경우 관측된 주파수는 플라즈마 주파수와 거의 같으므로 전자밀도와 다음의 관계를 갖는다.

$$f^2 = \frac{n(r)e^2}{\pi m}, \quad (1)$$

여기서 e 와 m 은 전자의 전하량과 질량이며 \mathbf{r} 은 위치벡터이다. 이식의 미분형은 다음과 같이 표현된다.

$$2f \frac{df}{dt} = \frac{e^2}{\pi m} \frac{dn}{dr} \frac{dr}{dt} \quad (2)$$

만약 밀도 변화도(dn/dr)와 충격파의 속도($V = dr/dt$) 사이의 각이 θ 라면 위의 식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V \cos \theta = 2L_n \frac{1}{f} \frac{df}{dt}, \quad (3)$$

여기서

$$L_n = \left[\frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \right]^{-1} \quad (4)$$

은 전자밀도변화 scale height 이다. 따라서 정확한 충격파의 속도를 산출하기 위해서는 이 scale height와 충격파의 진행방향을 알아야 한다. 전자밀도의 scale height는 태양 코로나의 전자밀도분포모델을 가정하여 결정된다. 예를 들면, Newkirk 모델의 경우,

$$n(r) = 4.2 \times 10^{4+4.32/r} \quad (5)$$

결정되는 scale height $L_n = 0.23 r^2 (R_\odot)$ 이고 r 은 태양중심에서의 태양반경 단위(R_\odot)로 표시되는 거리이다. $r=1.5$ 인 경우 scale height는 $0.5R_\odot=3.6 \times 10^5$ km/s 이다. 만약 충격파가 전자밀도 변화도를 따라($\theta = 0$) 진행한다고 가정하고, 동적스펙트럼 상에서 방출 주파수 f 는 50MHz, drift rate가 0.1MHz/s로 결정되었다면 충격파의 속도는 약 1440km/s로 계산된다. 일반적으로 $r=1.5R_\odot$ 의 코로나 높이에서 Alfven speed는 약 500km/s이므로 이 충격파는 명확히 fast mode shock이다.

그 동안 전파연구소에서는 34개의 Type II burst를 관측하였다. 관측데이터를 앞에서 설명한 방법과 같이 분석하여 코로나 충격파의 속도를 결정하였다. 또한 Type II burst와 태양활동현상과의 상관성 규명을 위해 플레어, 코로나물질방출(CME)과 태양풍 정보를 조사하였다. 그 결과를 표4에 정리하였는데 처음 4월까지의 관측된 Type II burst에 관한 정보를 데이터번호, Type II burst 관측일, 시간, 충격파속도 순으로 표시하였다. 5월에서 7월까지의 Type II와 거의 동시에 발생한 플레어에 관한 정보를 미국우주환경예보센터의 SGD(Solar Geophysical Data)에서 조사하여 발생위치, 플레어의 규모 그리고 지속시각 순으로 표시하였다. 그리고 8월은 Type II burst와 플레어 발생시각의 차이를 분단위로 계산한 것이다. 9월, 10월은 Type II 발생시각 전 후에 관측 보고된 CME정보를 미 해군연구소의 SOHO/LASCO Catalog에서

표 4. 전파연구소에서 관측한 Type II Burst와 태양활동 목록

#	Date	Type II		X-ray Flare				CME at 1.1Rs		Vsw (km/s)
		UT	Speed (km/s)	Loc. (degree)	Mag	Tau (min)	TTxt (min)	Speed	TTct (min)	
1	1998.05.08	0200-0206	569	S15W85	M3.1	28	4	373	-16.8	500
2	1998.05.08	0601-0603	1100	S15W85	M1.4	33	7	1726	-3.4	500
3	1998.05.29	0058-0110	500	N18W81	M6.7	12	1	478	-17.4	400
4	1998.05.30	2248-2251	737	Backside	-	-	-	745	-9.8	-
5	1998.07.31	0533-0544	650	N28E31	C2.9	64	5	No Obs	No Obs	400
6	1999.05.26	0236-0239	700	N22E41	C2.3	7	-6	No Obs	No Obs	450
7	1999.05.29	0311-0323	612	N21E06	M1.6	23	4	730	-9.6	400
8	1999.06.11	0039-0041	1150	Backside	-	-	-	980	0.9	-
9	1999.06.11	0050-0056	546	Backside	-	-	-	-	-	-
10	1999.06.23	0545-0552	1083	Backside	-	-	-	836	-15.7	300
11	1999.07.11	0014-0016	772	N17E35	C3.0	18	5	473	7.9	350
12	1999.07.11	0021-0026	530	S19W23	C3.0	11	-2	473	7.9	350
13	1999.07.13	0602-0604	1093	N17E06	C2.9	47	-16	No Obs	-	300
14	1999.08.04	0552-0544	1027	S16W64	M6.0	42	5	402	-0.8	350
15	1999.08.17	0453-0456	422	Backside	-	-	-	818	-4.7	-
16	1999.08.20	2321-2325	474	S25E64	M9.8	7	-13	1029	-28.6	500
17	1999.10.27	0431-0433	1118	N08E34	C5.3	2	-1	No Obs	-	400
18	2000.02.12	0404-0406	778	N26W23	M1.7	41	6	1182	-2.9	550
19	2000.02.12	0412-0415	793	N26W23	M1.7	33	-2	1182	-2.9	550
20	2000.03.02	0827-0831	1321	S16W66	X1.1	10	1	766	-15.6	425
21	2000.03.24	0751-0757	617	N16W82	X1.8	31	1	No Obs	-	650
22	2000.03.25	2235-2245	650	S14W02	C7.4	9	8	496	14.12	400
23	2000.03.27	0646-0652	1130	S17E42	C2.3	29	8	687	-27.15	400
24	2000.03.27	0654-0701	364	S17E42	C2.3	21	0	687	-27.15	400
25	2000.04.06	0227-0232	1000	N15E53	M1.8	19	2	507	-12.4	400
26	2000.04.09	2338-2343	760	S14W01	M3.1	34	4	No Obs	-	500
27	2000.05.20	0555-0559	565	S15W08	C7.6	22	-20	597	-35.6	440
28	2000.06.05	0321-0325	560	S11W32	C4.5	31	4	541	4.52	455
29	2000.07.10	2123-2127	1229	N18E49	M5.7	157	19	No Obs	-	435
30	2000.07.25	0248-0252	934	N06W08	M8.0	10	1	578	0.52	352
31	2000.10.09	2339-2343	1100	N01W14	C6.7	80	4	903	-27.1	323
32	2000.10.09	2343-2352	743	N01W14	C6.7	76	0	903	-27.1	323
33	2000.11.24	0504-0508	1167	N23W05	X2.0	13	-2	1214	4.9	400
34	2000.11.29	0629-0644	480	S13E43	C9.1	16	0	No Obs	-	400

Tau : X-ray 플레어의 지속시간

TTxt : X-ray Peak와 Type II 시작 시각간의 차이

TTct : 1.1R_☉에서의 CME 발생과 Type II 시작 시각간의 차이

조사하고 외삽방법을 적용하여 계산한 태양전파방출시작지점($1.1R_{\odot}$)에서의 CME 속도와 Type II burst와 CME발생시각의 차이를 계산한 결과를 정리한 것이다. 마지막 열은 ACE나 Wind 위성의 관측자료로부터 얻은 태양풍의 속도이다.

제 4 절 관측정보의 상관성 조사

Type II burst 관측과 분석기술의 신뢰성을 검증하고 Type II burst를 동반하는 태양활동의 특징을 알아보기 위해서 전파연구소에서 관측하고 분석하여 결정한 충격파의 속도가 외국 관측소의 결과와 어느 정도의 상관관계를 보이는지, 그리고 Type II burst는 태양활동과 어떤 상관관계가 있는지를 조사하였다.

그림 5는 34개의 이벤트에 대해 결정한 충격파의 속도(표4)를 외국 관측소들에서 결정한 속도들과 비교한 결과(a)를 보여준다. 전파연구소에서 결정한 충격파의 속도는 500~1000km/s가 가장 많은 17개, 1000km/s 이상이 12개, 그리고 500km/s 이하가 5개로 분포하였으며 평균속도는 약 800km/s로 계산된다. 외국의 분석결과는 미국 우주환경예보센터의 SGD의 태양전파분광관측 목록을 인용하였다. 각 그림의 가로축은 전파연구소의 분석결과이며 세로축은 외국의 결과이다. 1200km/s 근처에서 약간의 차이를 보이는 것을 제외하고 대부분의 경우 1 : 1의 관계를 보여주고 있다. 호주 Culgoora 관측소(b), 일본 히라이소 관측소(c)의 결과와는 비교적 높은 상관관계가 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 그러나 미공군의 Learmonth 관측소의 결과(d)와는 속도 500km/s 근처에서 큰 차이를 보이기도 한다. 이는 Thompson 등(1996)이 지적하였듯이 Learmonth 관측소의 관측주파수 범위가 호주(18~1800MHz)에 비해 작아 Type II burst를 잘못 해석한 결과일 것이다. 전파연구소(30~2500MHz)의 관측주파수 범위는 호주, 일본(25~2500MHz)의 것과 비슷하다.

Type II burst는 태양활동과의 상관관계를 조사하기 위해서 Type II, 플레어, CME의 발생시각을 비교하였다. Type II burst의 시작은 동적스펙트럼에서 burst가 나타나기 시작하는 시각을 선택하였고 플레어의 발생시각은 GOES 위성의 X-ray emission이 가장 강하게 나타나는 시각으로 결정하였다. 그리고 태양표면($1.1R_{\odot}$) 가까이에서 CME가 시작된 것으로 보고 SOHO

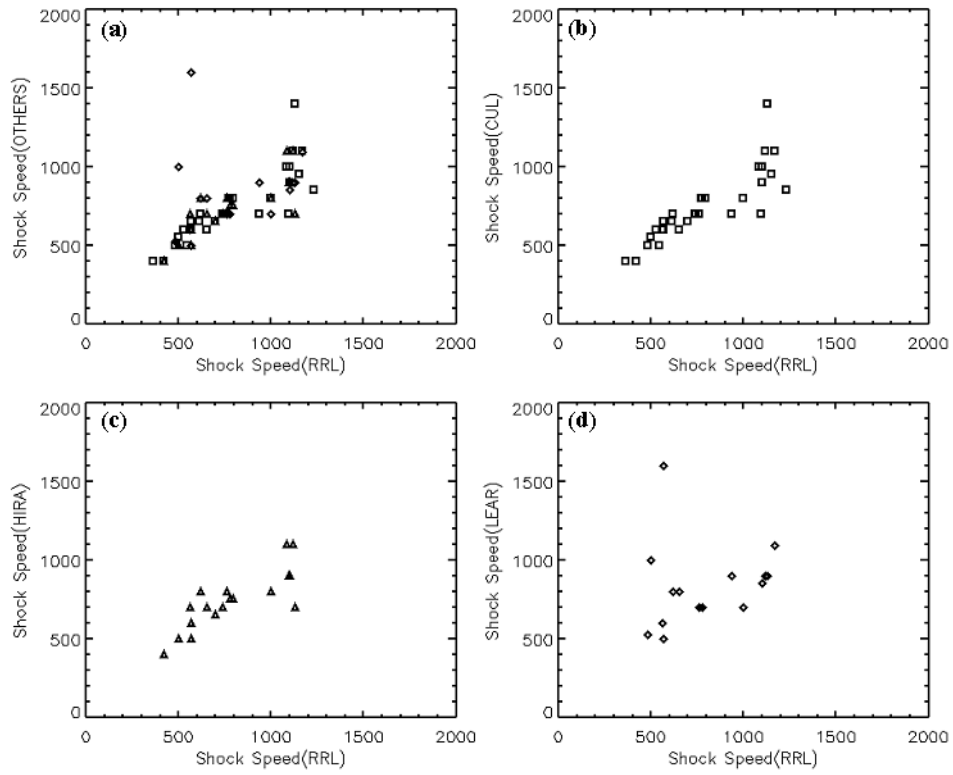


그림 5. Type II burst 분석을 통해 결정한 충격파의 속도의 비교

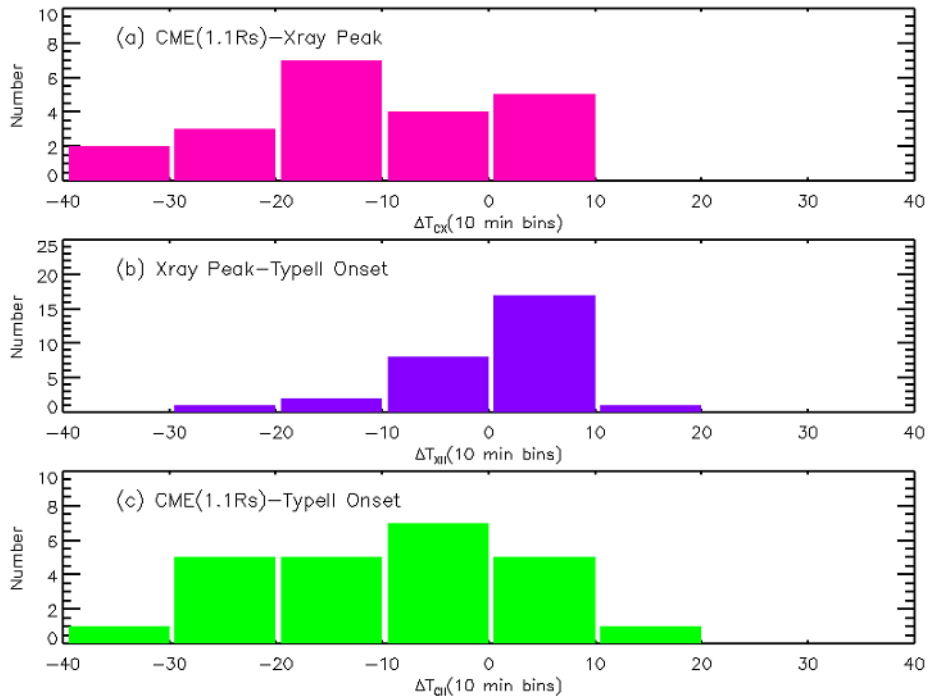


그림 6. 코로나 충격파, 코로나물질방출 그리고 플레어 발생시각 비교

위성에서 관측한 최초 관측한 위치와 시각, 속도 그리고 가속도 정보를 이용하여 CME 발생시각을 외삽하여 결정하였다. 그림 6은 표 4의 이벤트들에 대해 CME와 플레어의 발생 시각차이(a), 플레어와 Type II burst의 발생시각 차이(b), 그리고 CME와 Type II burst의 발생시각 차이(c)를 10분 간격(가로축)으로 표시한 것으로 0은 시각차이가 없는 경우에 해당한다. CME는 플레어 보다 먼저 발생(a)하였으며 Type II burst는 주로 플레어 발생 10분 전·후에, 그리고 CME 발생 후에 주로 시작됨을 알 수 있다

제 3 장 지자기 관측자료분석의 신뢰성 검증

태양 코로나 충격파와 태양-지구간 충격파는 행성간 자기장과 상호작용하고 자기폭풍을 일으킨다(Pinter & Dryer 1990). 자기폭풍은 자기권 내에 고에너지 입자들을 가속시켜 인공위성 표면의 대전현상, 위성통신 장애, 그리고 위성 고도 조절장애 등의 문제를 일으킨다(Rust 1980). 자기장의 변화를 모니터하고 자기폭풍, 지자기활동 등을 분석하기 위해 전파연구소는 1997년에 이천, 용인, 제주에 동일한 성능을 갖는 지자기 관측시스템을 구축하였다(최정림 등 1997). 관측시스템은 H(North-South), D(East-West), Z(Upward-downward)의 지구자기장 성분의 변화를 측정하는 자기장 3축센서(Fluxgate형)와 지자기 총변화량의 절대값을 측정하는 프로톤형 센서로 이루어져 있으며 시스템의 특성은 표 5와 같다.

제 1 절 지자기 폭풍과 지자기 활동 분석

자기폭풍은 급시형(SC)과 완시형(SG)으로 구분된다. 급시형 자기폭풍은 지자기의 수평성분의 급격한 증가(SSC)로 시작되고 1~3시간 정도의 자기장 증가가 계속된다(Initial phase). 그 후 크게 감소(Main phase)한 후 다시 원상태로 회복(Recovery phase)된다. 완시형 자기폭풍은 SSC를 수반하지 않는 것으로 시작이 분명하지 않은 것이 많지만 발달과정은 급시형과 동일하다. 자기폭풍의 시작에서부터 종료까지는 1일에서 수 일 정도 걸린다.

자기폭풍의 시작은 자기장 3축센서(Fluxgate)를 통해 측정하는 자기장 변화로부터 쉽게 결정할 수 있다. 급시형 폭풍의 경우에는 자기장의 수평성분으로부터 SSC를 확인함으로써 자기폭풍 시작시각을 정확히 알 수 있지만 완시형 폭풍은 대략적인 시각만을 알 수 있다. 그림 7은 자기장의 3축(H,D,Z)성분과 총변화량(F)의 변화를 측정한 것으로 1998년 8월 28일 07시(UT)경에 시작한 급시형 자기폭풍의 시작 시각과 지속 시간을 표시하였다.

자기장의 활동규모는 다양한 지자기지수를 사용하여 정의한다. 지자기 지수는 결정되는 시간간격과 사용하는 데이터에 따라 다양한데 가장 기본이 되는 것이 개별 관측소에서 결정되는 K 지수이다. 그 이유는 3 시간 동안의

표 5. 전파연구소 지자기 관측시스템의 특성

Fluxgate Sensor	Ring core Type 0.01 nT(Resolution) 1,2,4,8 times/sec 선택가능 0.22 nT/°C
Proton Sensor	0.1 nT(resolution) 1 time/10,20,30,60 sec
Data Logger	GPS Clock RS232C External output Flash Memory card Drive(10Mb)
Power Supply	220V/24V

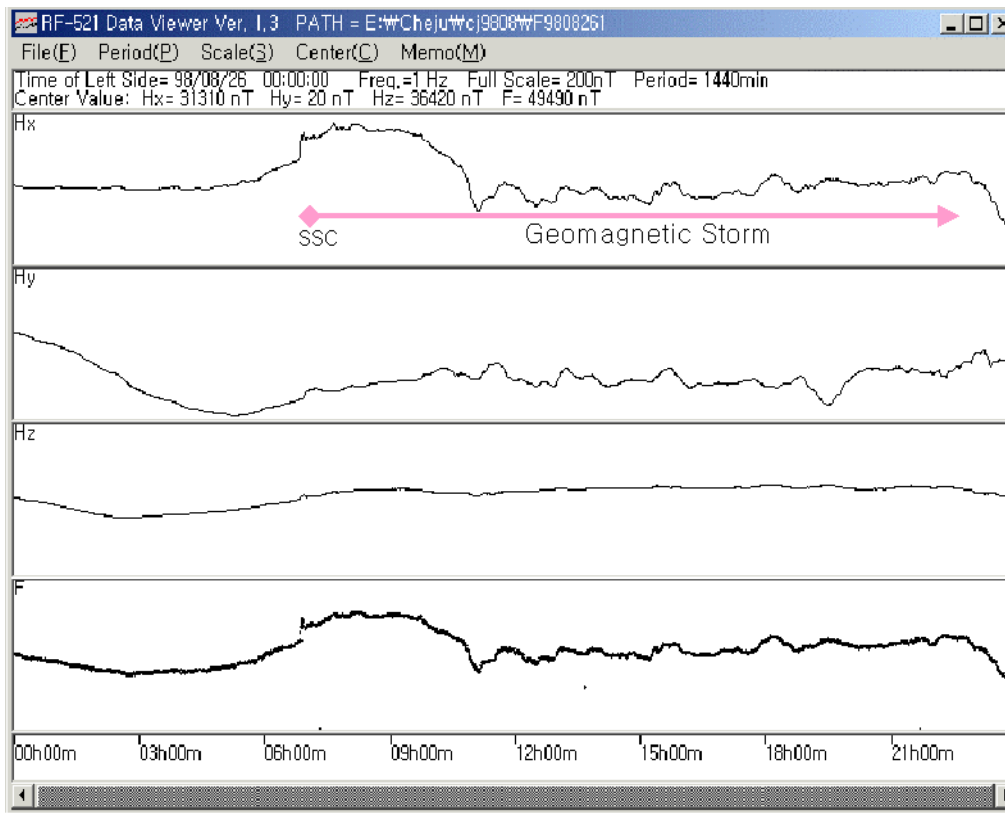


그림 7. 전파연구소에서 관측한 자기폭풍

표 6. K 지수 환산표

개별 최소값		해당 K 지수		개별 최대값
0	<	K0	<	$0.01 \times K9$
$0.01 \times K9$	<	K1	<	$0.02 \times K9$
$0.02 \times K9$	<	K2	<	$0.04 \times K9$
$0.04 \times K9$	<	K3	<	$0.08 \times K9$
$0.08 \times K9$	<	K4	<	$0.14 \times K9$
$0.14 \times K9$	<	K5	<	$0.24 \times K9$
$0.24 \times K9$	<	K6	<	$0.40 \times K9$
$0.40 \times K9$	<	K7	<	$0.66 \times K9$
$0.66 \times K9$	<	K8	<	K9

※ 이천, 용인 $K9 = 300\text{nT}$

제주 $K9 = 280\text{nT}$

지자기 변화를 나타내는 a , a_p , K_p , 그리고 24시간 동안의 변화를 의미하는 A , A_p 등의 지수들이 K 지수로부터 결정되기 때문이다. 일반적으로 K 는 일변화가 제거된 1일 자기장의 변화를 3시간 간격으로 $K0$ 에서 $K9$ 까지 10단계로 나누어 평균한 값으로 지자기 활동상태를 규정하는데 사용된다. 일본 히라이소 우주환경예보센터는 가끼오카 관측소에서 결정한 1일 8개의 K 값들 중에 최대값에 따라 지자기 활동상태를 다음과 같이 정의하고 있다. $K_{\max} < 3$ 인 경우 지자기활동이 조용하고 $K_{\max} = 4$ 인 경우에는 약간 활발, $K_{\max} = 5$ 는 활발, 그리고 $K_{\max} > 6$ 는 매우 활발한 것으로 정의한다. 미국 우주환경예보센터에서는 K 지수와 비슷한 K_p 지수가 5이상인 경우를 자기폭풍으로 규정하기도 한다. K_p 지수는 전세계 경도상에 분포한 여러 관측소의 K 지수를 평균한 지구전체의 자기 활동 지수이다.

제 2 절 자료분석을 통한 지자기 활동지수 결정

지자기 활동지수 K 는 일변화 자기장에 대해 변동하는 자기장의 평균값을 3시간 간격으로 평균하여 $K0$ 에서 $K9$ 까지 10단계(표 5)로 나누어 정의된 값이다.

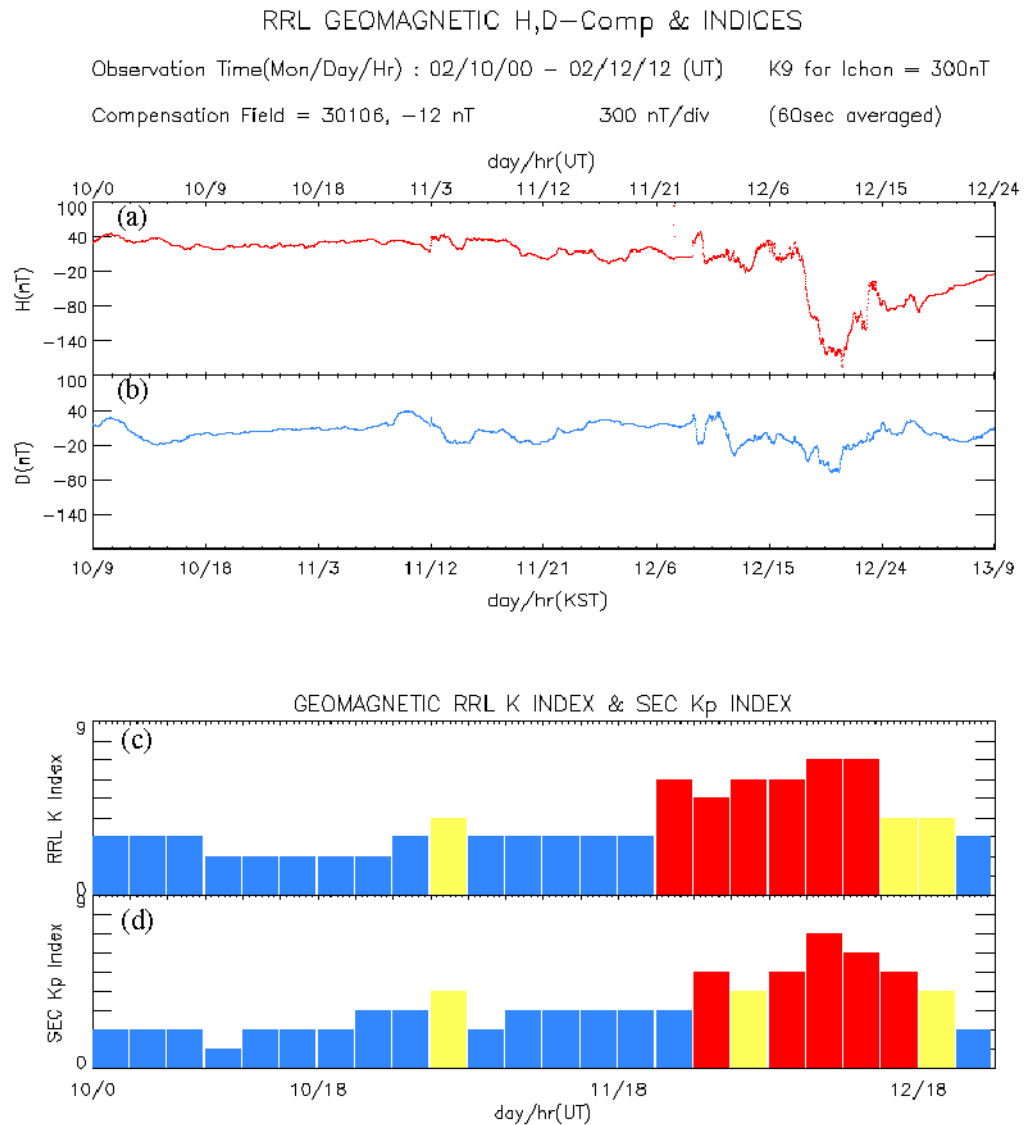


그림 8. FMI 방법을 적용하여 결정한 K 지수와 K_p 지수의 비교

따라서 K 지수를 결정하기 위해서는 각 관측소의 최대 지자기 변동량(K_9)과 자기장 일변화를 결정하여야 한다. 관측자료로부터 일변화를 결정하기 위해서는 적절한 계산 알고리즘이 필요하다. 프랑스 지구행성환경연구센터(CETP)에서 알려 준 이천, 용인 관측소의 K_9 은 300 nT이고 제주 관측소는 280 nT이다. 일반적으로 고위도의 경우에는 자기장이 밀집되어있기 때문에 K_9 값도 저위도 지방에 비해 매우 크다. 한반도의 경우에는 지자기 상의 위치가 저위도에 해당하므로 K_9 은 작을 수밖에 없다.

K 지수는 과거 아날로그 방식으로 자기장을 측정하였을 때에는

Bartels-Mayaud rule을 적용한 hand scale 방법으로 결정되었다(Menvielle 1995). 그러나 디지털 방식의 측정시스템이 출현하면서 핀란드 기상연구소의 FMI 외 11종의 K 지수 자동 산출 알고리즘들이 개발되어 사용되고 있다. 이들 알고리즘들은 일변화를 결정하는 방법이 서로 다르다. Menvielle등(1995)은 이들 알고리즘의 계산 결과를 hand scale 방법에 의한 결과와 비교함으로써 FMI 방법의 우수성을 입증하였다. 또한 이 방법은 지구상의 어떤 지역에서든 적용 가능하기 때문에 세계적으로 가장 널리 이용되고 있다. FMI 방법은 3축 지자기 성분 중 동서방향인 H와 남북방향인 D성분의 측정값을 사용하고 다음의 3단계 과정을 통해 최종적인 K 지수를 계산한다. 첫 번째 단계는 24시간의 측정값들에서 3시간 간격으로 최대값과 최소값의 차이를 계산하고 이를 각 관측소의 환산표(표5)에 맞춰 초기 K 지수를 결정한다. 두 번째 단계에서는 결정된 K 지수를 이용하여 3시간 동안의 평균값을 구하고 이 값을 5차 harmonic fitting하여 1단계 S_R (Solar Regular) 곡선을 구한다. 또한 측정된 H, D성분에서 1단계 S_R 곡선을 제거하고 다시 새로운 K 값을 결정한다. 여기서 S_R 곡선은 자기장 교란이 없는 조용한 상태의 일변화를 의미한다. 마지막 단계에서는 새로 결정된 K 값들로부터 각 시간동안의 평균값을 새로 구하고 이 값을 다시 5차 harmonic fitting하여 2차 S_R 곡선을 구해 낸다. 24시간동안 측정된 H, D성분에서 2차 S_R 곡선을 제거하고 최종적인 K 지수를 3시간 간격으로 계산한다.

그림 8은 FMI 알고리즘을 이천 지자기 관측자료에 적용한 결과이다. 관측 자료는 2000년 2월 10일 0시(UT)부터 12일 24시(UT)까지 이천 관측소에서 fluxgate 자력계에서 측정한 H, D성분의 1분 평균값을 사용하였다. 그림 8의 (a), (b)는 관측된 H, D성분 자기장의 변화를 보여주고 있다. 그림 8-(c)의 막대 그래프는 관측자료를 FMI방법에 적용하여 결정한 지자기 활동지수 K 값 표시한 것이다. 그림 8-(d)는 미국 우주환경예보센터에서 결정한 지구전체 자기활동지수(K_p)이다. 자기 폭풍은 11일 24시경에 시작되었으며 K 지수가 최대 8까지 올라갔던 강한 폭풍임을 알 수 있다. 전체적으로 자기장 변동에 따른 K 지수의 변화를 볼 수 있었으며 K_p 지수와도 유사한 결과를 보이고 있다. K 지수 산출의 신뢰성을 확보하기 위해, 97년 8월 1일부터 98년 7월 31일까지 이천관측소에서 측정한 자료를 FMI 방법에 적용하여 K 지수를 산출하고 일본 Kakioka 관측소의 K 지수 그리고 미국 우주환경예보센터의

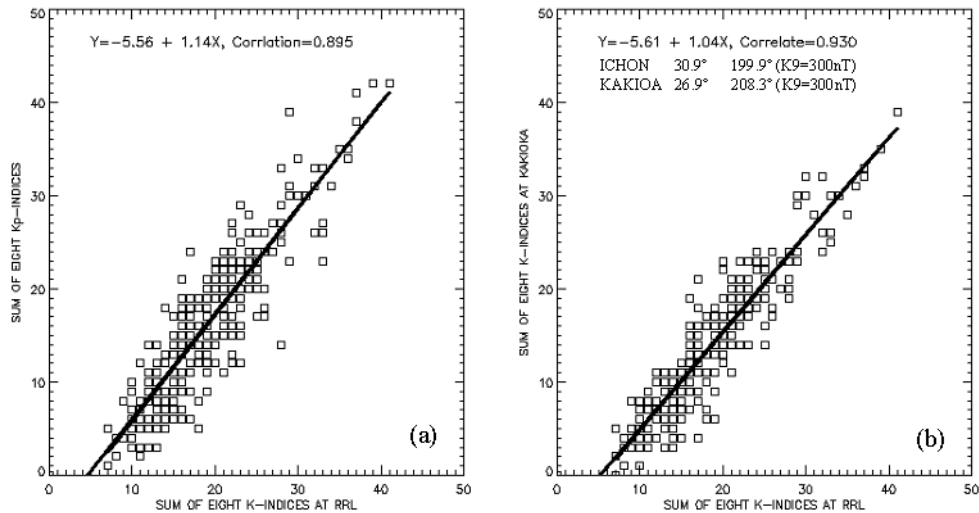


그림 9. 전파연구소에서 결정한 K 지수와 외국 지수와의 비교

지구전체 자기 활동지수(K_p)와 비교하였다. 일본 Kakioka 관측소의 지수를 선정한 이유는 지리적으로도 가깝고 최대자기장 변동량($K9=300\text{nT}$)이 이천 관측소와 같기 때문이다. 그리고 K_p 지수와 비교하는 이유는 K_p 가 자기폭풍의 규모를 규정하는데 사용되기 때문이다. 일단 상관도가 밝혀지면 히라이소 예보센터의 경우처럼 자체에서 결정한 K 지수를 자기폭풍의 규모를 규정하는데 활용할 수 있기 때문이다. Kakioka 관측소의 K 지수는 매년 발행하는 지자기관측 레포트(1997,1998)에서 인용하였고 K_p 지수는 태양지구물리데이터(SGD)의 자료를 인용하였다. 그림 9에서 보는 것과 같이 이천관측소의 1일 K 지수의 합을 1일 K_p 의 합(a)과 비교하고 Kakioka 관측소의 1일 K 지수의 합(b)과도 비교하여 이들간의 상관계수를 계산하였다. 상관계수 계산에는 선형 Pearson방법을 적용하였다. 그 결과, 이천의 K 지수는 K_p 와 0.895의 상관도를 보이며 Kakioka K 지수와는 0.93의 상관도를 보였다. 상관의 정도는 0에서 1까지의 수치로 나타낸다. 일반적으로 0.7~0.9까지는 상관이 높고 0.9~1.0은 아주 상관이 높은 것으로 해석된다. 따라서 전파연구소에서 결정한 K 지수는 일본 Kakioka 관측소와는 상관도가 매우 높고 K_p 지수와도 상관도가 높기 때문에 자기폭풍 규모를 규정하는데 적용할 수 있다.

제 4 장 태양-지자기 관측정보간의 상관성 연구

태양플레어는 전리층 내의 전자밀도를 증가시켜 단파통신 두절을 일으킨다. 또한 자기폭풍에 의한 자기권의 교란은 인공위성 궤도변화나 인공위성 표면의 대전현상 등을 일으키고 전리층을 통과하거나 반사를 이용하는 통신에 영향을 주게된다. 태양활동이 활발하였던 지난 2000년 한해 동안에도 일본 ASCA(과학위성) 분실을 비롯한 10여건의 위성장애가 있었다(표 7). 이러한 영향을 미치는 태양활동과 자기폭풍은 독립된 것이 아니라 긴밀하게 연결되어 있다. 대규모의 태양활동이 발생하면 태양-지구간을 진행하는 충격파(행성간 충격파)가 발생한다. 이 충격파가 지구에 도달하면 그림 10에서 보는 것과 같이 지구자기장 H성분의 갑작스러운 증가(Sudden Impulse)를 일으키고 만약 행성간 자기장의 남북성분인 Bz가 남쪽으로 향해 있다면 지구자기권과 상호 작용하여 자기폭풍(그림 7)을 일으킨다. 자기폭풍의 규모는 Bz의 남쪽방향의 크기와 지속시간에 관련이 있다. 이와 같은 이유로 행성간 충격파의 지구도착시각을 예측할 수 있다면 자기폭풍의 예측 정확도를 높일 수 있다.

태양플레어에 의해 발생한 충격파의 지구전달 예측모델에는 STOA 모형(Shock Time Of Arrival model)과 ISPM(Interplanetary Shock Propagation Model)이 있다. 이들 모형은 언제, 어느 정도의 강한 충격파가 지구에 도착하는지를 계산해 주는데 입력자료로 Type II burst 분석으로 결정되는 충격파의 속도를 사용한다. Type II burst가 태양활동에 의해 발생한 코로나충격파를 나타내는 관측현상이기 때문이다. Smith 등(2000)이 36개의 이벤트에 대해 위 모형들을 테스트한 결과 STOA 모형은 ± 12 시간 이내에 18개(50%)를 예측한 반면 ISPM은 21개(58%)를 예측하였고, ± 24 시간 이내에서는 STOA 모형이 25개(69%), ISPM이 22개(61%)를 예측하였다. 이로써 ISPM은 적은 수에 대한 예측정확도가 높은 반면 STOA 모형은 많은 수를 예측한 것으로 결론을 내렸다. 여기서는 미국 해양대기국(NOAA)의 Dryer 박사 등에 의해 개발된 STOA 모형에 대해 소개하고 STOA 모형이 갖고 있는 문제점을 분석한다. 그리고 이 문제점을 개선하기 위해 개발된 모형을 소개하고 전파연구소에서 결정한 코로나 충격파의 속도를 적용하여 STOA 모형의 결과와 비교한다. 마지막으로 비교결과를 통해 Type II burst 관측정보와 자기폭풍관측정보간의 상관성을 알아본다.

표 7. 우주전파환경에 의한 2000년 위성 장애 내용(Joe H. Allen, 2000)

발생일	장애 위성	장애 내용
3월 3일	Satmex 5	84 분간 운용정지, 지상 통제 시스템의 허위명령
3월 21일	Hotbird 2	9시간동안 서비스 중단
3월 31일	Echostar IV	22개 전송시설 장애 50% 성능 감소
4월 28일	Turksat 1C	위성체 정전기 방전으로 55분간 서비스 중단
7월 15일	ASCA (Astro-D)	태양활동기간동안 위성 회전, 위성 분실 선언
8월 27일	Solidaridad 1	위성 콘트롤 프로세서 장애로 위성 분실 선언
9월 28일	Galaxy VIII-i	이온 추진 시스템 장애 위성 수명 10년 단축
10월 26일	Terra	16개 텔레메트리 모니터 중단으로 관측중단
10월 31일	Echostar IV	44개 중 26개의 통신 전송 시스템 장애
11월 4일	Insat 2B	위성 고도 이상
11월 22일	Galaxy VII	보조 위성 콘트롤 프로세서 장애, 위성 운용 중단

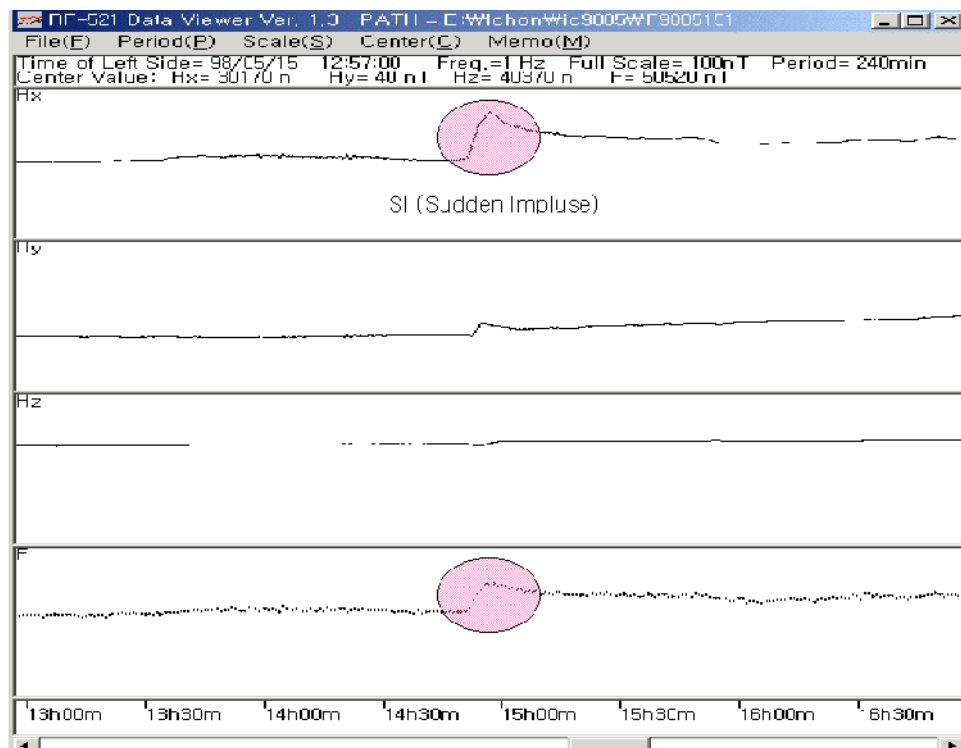


그림 10. 전파연구소에서 관측한 Sudden Impulse

제 1 절 STOA 모형의 적용을 통한 자기폭풍예측

STOA 모형은 크게 두 단계로 구분된다. 첫 번째 단계는 Piston driven 단계로서, 코로나 충격파가 X-ray 플레어에 의해 발생하는 동안 등속도 운동을 한다. 두 번째 단계는 blast wave 단계로서 플레어 발생지점에 대해 시선 방향으로의 충격파의 속도가 태양중심에서 멀어지면서 감소하게 된다.

$$V_s \sim R^{-N}, \quad N=0.5 \quad (5)$$

그리고 이 시선방향에 대한 태양 경도를 따라서는 충격파의 속도가 다음의 코사인 함수를 갖는다.

$$V_\theta = V_s (\cos \theta + 1)/2 \quad (6)$$

충격파의 모양은 초기에 태양경도에 따라 코사인 모양을 가지며, 곧 준구형(quasi-spherical)의 모양을 가지게 된다(그림11). 이 때 태양풍의 속도가 충격파의 배경속도로 사용되며, 충격파의 가장 빠른 부분은 플레어 위치벡터와 일치하는 것으로 가정한다. 이 모형의 대표적인 입력인자는 (1) Type II burst로부터 구한 초기 충격파 속도, (2) Piston Phase 지속시간 (Type II burst와 관련된 soft X-ray 플레어의 지속시간), (3) Shock 발생장소 (광학플레어의 위치), (4) 태양풍 속도 (Wind나 ACE 태양풍자료)이다(표4). STOA 모형의 계산과정은 다음과 같다.

- (1) Type II burst를 분석하여 태양 근처의 초기 충격파 속도를 결정한다.
- (2) 충격파가 blast wave 단계로 변환되기 전까지 진행한 거리를 결정한다.
충격파는 등속도 운동을 가정하고 진행시간은 Type II burst 시작부터 soft X-ray 플럭스의 세기가 1/2 만큼 감소하는 시간 간격을 측정하여 결정한다.
- (3) 플레어의 시선 방향에 대한 평균 blast wave speed를 구하기 위해 blast wave 식을 적분한다.
- (4) 식(6)의 blast wave speed 함수를 사용하여 플레어 시선 방향의 속도를 태양-지구(관측자) 방향의 속도로 환산한다.
- (5) 태양-지구간 방향의 blast wave 평균 속도를 관측지점의 태양풍 속도와 합쳐 태양-지구방향 교란의 평균속도를 구한다.
- (6) 충격파가 drive 되는 시간과 행성간 공간으로 진행하는 시간을 합하여 태양에서 지구까지 충격파 전달 시간을 구한다.
- (7) Type II burst 발생시각에 지구 전달시간을 합쳐 도달시간을 예측한다.

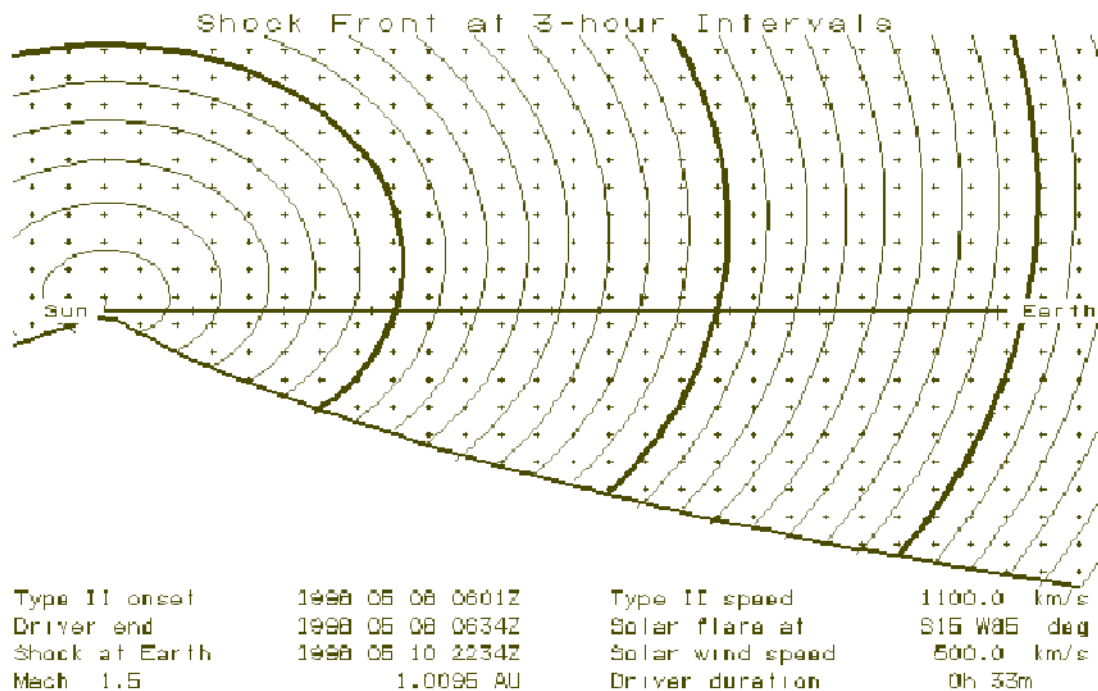


그림 11. 1998년 5월 8일 06시(UT)경 관측한 Type II burst에 대한 STOA 모형의 수행결과

STOA 모형의 출력인자는 충격파가 지구에 도착할 것인가의 유무와 예상 도착시각 그리고 충격파가 지구에 도착했을 때의 충격파 세기이다. 우리는 전파연구소에서 관측한 36개의 Type II burst 자료를 STOA 모형에 적용하였다. 그림 11은 1998년 5월 8일 6시(UT) 경 발생한 Type II burst에 대한 STOA 모형을 수행한 결과를 보여준다. 표 8의 8~10번째 열은 36개의 관측 현상에 대해 정리한 표 4의 입력자료를 STOA 모형에 적용한 결과를 보여주는 것으로, STOA 모형이 예측한 시간에서 실제 충격파의 지구도착을 관측한 시각과의 차이($TT_s - TT_i$)와 Dst 지수를 통해 확인한 자기 폭풍의 발생 시각과의 차이($TT_s - TT_g$)를 각각 정리한 것이다. 실제 지구에 도착한 충격파의 종류와 지구도착시각은 Wind(W)나 ACE(A) 위성의 행성간 자기장, 전자밀도, 태양풍 속도로부터 확인하였다. 그리고 자기폭풍의 발생은 Dst지수의 최소값이 -20 이상인 경우만 선택하여 규정하였으며 자기폭풍의 시작은 Dst 지수값이 음의 값을 갖기 시작하는 시각이나 음의 값을 갖고 급격히 감소하기 시작하는 시각을 선택하였다.

표8. 전파연구소 Type II burst들의 모형적용 및 분석 결과

#	Date	IP Shock (hour)			Geomagnetic Storm (hour)		STOA Model(hour)			Revised STOA Model(hour)			Model Dif (hour)
		TTi	S/C	Type	TTg	Dst _{min}	TTs	△Tsi	△Tsg	TTp	△Tpi	△Tpg	△Tps
1	1998.05.08	-	-	-	-	-	Mhd	-	-	Mhd	-	-	-
2	1998.05.08	34.6	W	Fast	*	-62	64.6	30	*	67.5	32.9	*	2.9
3	1998.05.29	-	-	-	-	-	Mhd	-	-	Mhd	-	-	-
4	1998.05.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1998.07.31	76.9	W	Slow	Nh	Nh	77.1	0.2	Nh	67.3	-9.6	Nh	-9.8
6	1999.05.26	-	-	-	-	-	Mhd	-	-	Mhd	-	-	-
7	1999.05.29	92.4	W	Slow	Nh	-	81.8	-10.6	-	72.5	-19.9	Nh	-9.3
8	1999.06.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	1999.06.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1999.06.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	1999.07.11	82.5	W	Slow	Nh	Nh	87.7	5.2	Nh	83.5	1	Nh	-4.2
12	1999.07.11			-	-	-	Mhd			Mhd			
13	1999.07.13	84.2	A	Slow	Nh	Nh	72.3	-11.9	Nh	75.5	-8.7	Nh	3.2
14	1999.08.04	107.7	A	Fast	97.3	-45	78.3	-29.4	-19	80.4	-27.3	-16.9	2.1
15	1999.08.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1999.08.20	-	-	-	-	-	Mhd	-	-	Mhd	-	-	-
17	1999.10.27	101.6	A	Fast	Nh		74.2	-27.4		92	-9.6	Nh	17.8
18	2000.02.12	50.8	A	Fast	54.9	-90	56.8	6.	1.9	53	2.2	-1.9	-3.8
19	2000.02.12	50.7	A	Fast	54.8	-90	57.3	6.6	2.5	54	3.3	-0.8	-3.3
20	2000.03.02	89.4	A	Fast	103	-32	68.6	-20.8	-34.4	80.5	-8.9	-22.5	11.9
21	2000.03.24	-	-	-	-	-	Mhd	-	-	Mhd	-	-	-
22	2000.03.25	92.0	A	Slow	Nh		81.4	-10.6		76.6	-15.4	Nh	-4.8
23	2000.03.27	91.9	A	Slow	94.2	-58	60.9	-31	-33.3	70.4	-21.5	-23.8	9.5
24	2000.03.27	-	-	-	-	-	Mhd	-	-	Mhd	-	-	-
25	2000.04.06	63.7	A	Slow	79	-64	73.9	10.2	-5.1	76.6	12.9	-2.4	2.7
26	2000.04.09	58.9	A	Slow	70.4	-23	62.3	3.4	-8.1	57.9	-1	-12.5	-4.4
27	2000.05.20	84	A	Fast	92	-150	77.0	-7.0	-15	68.4	-15.6	-23.6	-8.6
28	2000.06.05	77.3	A	Fast	80.7	-90	75.2	-2.1	-5.5	67	-10.3	-13.7	-8.2
29	2000.07.10	59.7	A	Fast	62.6	-35	48.2	-11.5	-14.4	51.4	-8.3	-11.2	3.2
30	2000.07.25	74.9	A	Fast	78.7	-50	82.1	7.2	3.4	86.6	-11.7	7.9	4.5
31	2000.10.09	70.1	A	Fast	72.7	-60	61.2	-8.9	-11.2	63.6	-6.5	-8.8	2.4
32	2000.10.09	84.3	A	Fast	86.8	-110	78.4	-5.9	-8.4	69.7	-14.6	-17.1	-8.7
33	2000.11.24	54.3	A	Fast	64.9	-70	66.5	12.2	1.6	75.6	21.3	10.7	9.1
34	2000.11.29	-	-	-	-	-	Mhd	-	-	Mhd	-	-	-

TTs : STOA Model predicted transit time

TTp : Revised STOA model predicted transit time

TTg : Time difference of Geomagnetic Storm and Type II onset

TTi : Time difference between IP shock and Type II onset

Dst_{min} : minimum value of Dst index

△Tsg : Time difference between STOA predicted and Geomagnetic Storm onset

△Tsi : Time difference between STOA predicted and IP shock onset

△Tpi : Time difference between Revised STOA model and Observed IP shock onset

△Tpg : Time difference between Revised STOA model and Observed Geomagnetic Storm

△Tps : Predicted time difference between Revised STOA model and STOA model

제 2 절 STOA 모형의 개선

Volkmer and Neubauer (1985)는 178개의 빠른 자기동력학 충격파에 대한 관측으로부터 충격파의 속도에 대한 평균적인 관계($V_s \sim R^{-0.54}$)를 얻었다. 이러한 관측적 사실의 기반 위에 Smart and Shea (1985)는 태양 코로나 충격파의 지구 전달 시간을 계산하기 위하여 blast wave solution ($V_s \sim R^{-0.5}$)을 사용하였다. 한편 Vlasov (1988)는 태양 지구간 공간의 전파원에 대한 scintillation 지수로부터 행성간 공간의 충격파 속도를 검사함으로써 충격파의 속도 경사가 초기 충격파 속도의 제곱에 비례하며 식(5)에서 N이 상수가 아니라 0.25에서 1사이의 값을 가진다는 것을 보였다.

먼저 우리는 전파연구소에서 관측한 21개의 Type II burst 자료와 Smith et al(2000)등이 사용한 20개의 Type II burst 자료를 사용하여 STOA 모형의 개선 가능성을 알아보았다. 전파연구소에서 관측한 Type II burst의 발생 시각, 3장의 방법으로 결정한 코로나 충격파의 속도, SGD에서 확인한 X-ray flare의 위치, 규모, 지속시간 그리고 Wind나 ACE 위성관측을 통해 얻어진 태양풍 속도 등을 정리한 표4의 자료를 STOA 모형에 입력하여 충격파의 지구 도착시각(표8의 TTs) 및 세기를 예측하였다. STOA 모형에 의해 예측된 시각은 Wind(W)나 ACE(A) 위성의 행성간 자기장, 전자밀도, 태양풍 속도 자료로부터 결정한 실제 충격파의 지구 도착시각(표 8의 TTi)과 비교하였다. 그림 12는 STOA 모형이 예측한 시각과 충격파의 실제 지구도착시각의 차이를 초기 충격파속도의 함수로 그린 것이다. 그림12에서 보는 바와 같이 시각 차이는 충격파의 속도가 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 보여 준다. 우리는 이 그림에서 약간의 체계적인 의존성을 확인하였다.

이러한 체계적인 오차에 대한 가능성으로 우리는 두 가지를 생각하였다. 한가지는 Type II 태양 전파 폭발 자료로부터 충격파의 속도를 측정하는 오차이다. 특히 높은 속도를 가지는 충격파들이 체계적으로 높이 산출되었을 가능성이다. Thompson et al. (1996)은 사용된 분광 밴드에 따라 산출된 충격파의 속도가 3배까지 차이가 날 수 있음을 보였다. 또한 충격파의 속도는 사용된 코로나 밀도 모형에 따라 수백 km까지 차이를 보여 준다. 2장에서 설명하였듯이 본 연구에서 결정한 코로나 속도는 다른 관측소와 유사한 결과 (그림 5)를 가져왔기에 현재 널리 사용되고 있는 속도 결정방법의 적용은 문제가

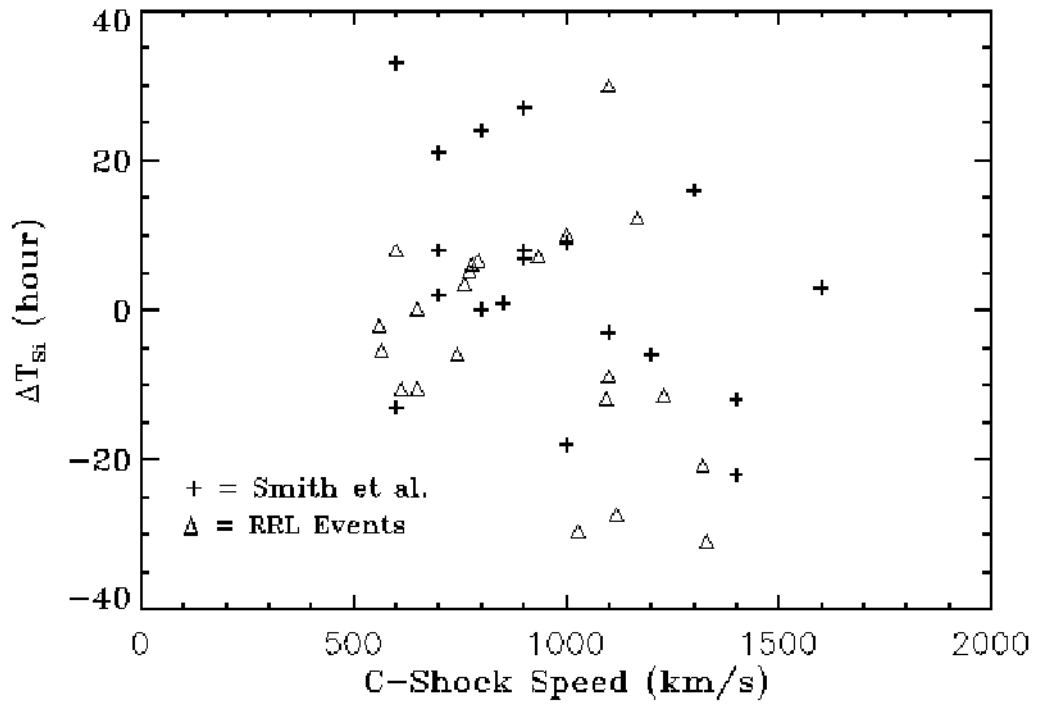


그림 12. 코로나 충격파의 속도와 STOA 모형의 예측오차와의 관계

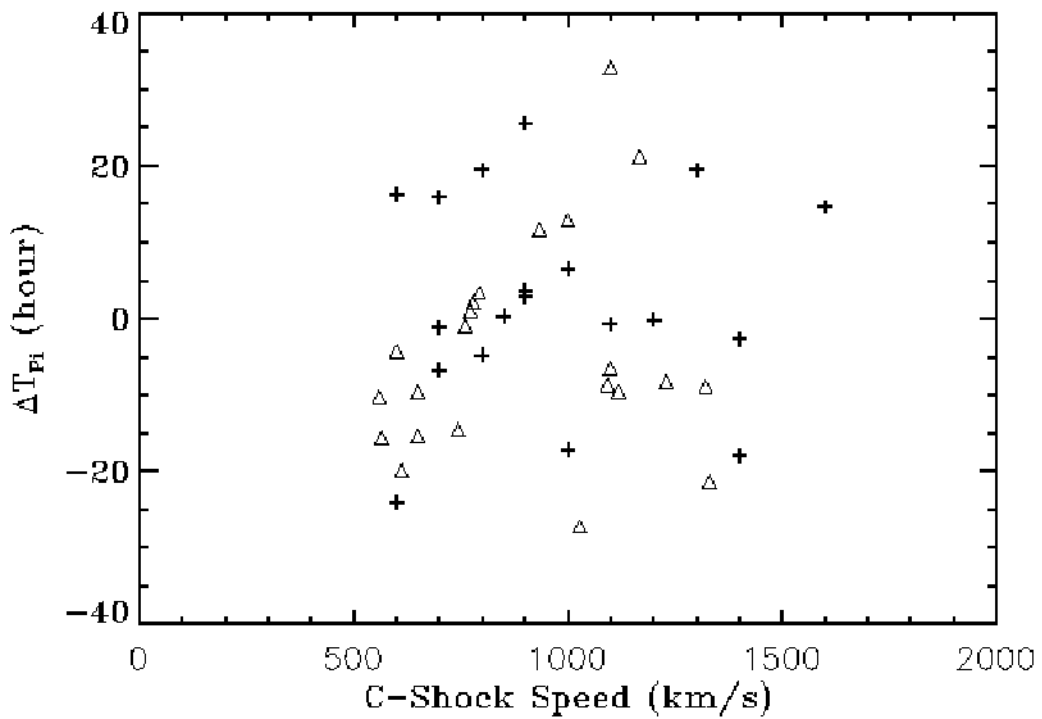


그림 13. 코로나 충격파의 속도와 Revised STOA 모형의 예측오차와의 관계

없다. 그러나 2장 3절에 언급하였듯이 Type II burst 분석을 통한 코로나 충격파의 속도결정은 충격파의 진행방향을 알지 못한다는 것과 단순한 전자밀도 분포모델을 사용해야하다는 측면에서 현재의 결정방법은 문제가 있다. 특히 일식관측이나 코로나그래프 그리고 X-ray 이미지를 통해 태양코로나는 급격히 변화하고 있기 때문에 단순한 전자밀도모델을 고려한 계산은 실질적인 충격파의 속도를 결정해 주지 못한다. 그러나 이러한 오차 원인이 그림 12에 나타난 체계적인 의존성에 어떻게 영향을 주는지를 확인하기는 쉽지 않다.

다른 하나의 가능성은 태양 지구 공간에서 전파되는 충격파 속도의 거리의 의존성이다. 우리는 다음의 두 가지 관측적 사실에 주목하였다. 첫째는 Volkmar and Neubauer (1985)가 발견한 관계식($V_s \sim R^{-0.54}$)이 178개의 충격파에 대한 평균적인 관계식이고, 그 상관관계 값이 0.55에 불과하다는 것이다. 둘째는 Vlasov (1988)의 관측 결과에 따르면 초기 속도가 빠를수록 식(5)에서 사용한 지수(N)가 크다는 것이다. 이러한 사실을 STOA 모형에 적용하기 위하여 간단한 1차원 STOA 프로그램을 개발하였다. 여기서 식(5)의 지수값 N을 변수로 두었으며, 프로그램의 검증을 위해서 N=0.5에 대해 Dryer 박사의 2차원 STOA 프로그램과 비교하였다. 식 (5)의 N을 0.2에서 0.7까지 변화시켜 가면서 그림 12가 어떻게 변하는지를 알아본 결과 주어진 초기 충격파 속도에 대하여 가장 잘 맞는 N은 속도가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있었다. 이러한 사실을 이용하여 N이 속도에 의존하는 선형 모형 ($N=0.05+4 \times 10^{-4} V_s$)을 적용한 Revised STOA모형을 전파연구소의 관측자료와 Smith et al(2000)등이 사용한 20개의 자료에 대해 적용하고 충격파의 지구 도착 예정 시간을 계산하였다. 표8의 11~13번째 열은 전파연구소에서 관측한 36개의 관측자료에 대해 개선 모형에 적용한 결과를 보여주는 것으로, 개선 모형이 예측한 시각과 실제 충격파의 지구도착을 관측한 시각과의 차이($TT_p - TT_i$)와 Dst 지수를 통해 확인한 자기 폭풍의 발생 시각과의 차이($TT_s - TT_g$)를 각각 정리한 것이다. 그림 13은 우리 모형과 관측된 시간 지연 차이 (ΔT_{pi})를 초기 충격파 속도의 함수로 보여준다. 그림에서 \triangle 은 전파연구소 자료의 적용결과이며 +는 Smith 등이 사용한 자료의 적용결과이다. 이 그림에서는 그림 12에서 보였던 체계적인 의존성이 보이지 않을 뿐만 아니라, 시간 지연 차이의 RMS 오차는 13.4시간으로 감소하였다.

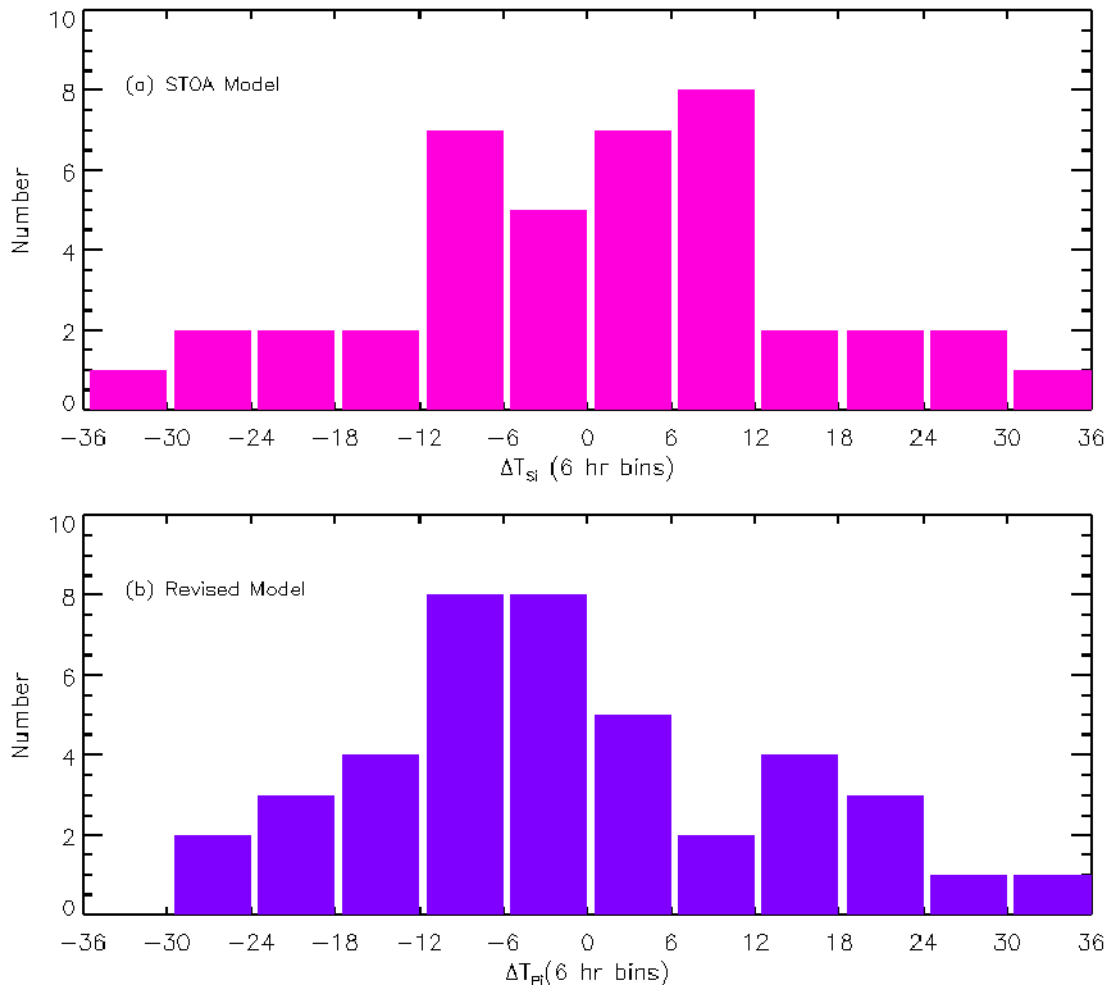


그림 14. STOA 모형과 Revised STOA 모형의 충격과 지구도착예측 오차

모형을 사용하여 예측한 충격파의 지구도착시각과 관측된 실제 도착시각과의 차이를 비교함으로써 모형의 신뢰도를 확인하였다. 그림 14는 충격파가 진행도중에 소실된 경우를 제외한 41개 이벤트를 각 모형에 대해 적용하고 예측과 관측의 시간차이(표8)를 6시간 간격으로 표시한 것이다. 이 히스토그램을 통해 우리는 STOA 모형의 예측오차(a)는 -12시에서 +12시간 사이에서 고르게 분포함을 알 수 있고 Revised STOA 모형의 경우(b)에는 실제 충격파가 지구에 도착한 시각 전 12시간 이내의 예측수가 매우 높음을 알 수 있다. 그리고 STOA 모형은 41개 이벤트 중에 27개(66%)를 ± 12 시간 내에서 예측하였고 ± 24 시간 내에는 35개(85%)를 예측하였다. Revised STOA 모형의 경우에는 ± 12 시간 이내에는 23(56%)개를 예측하였고 ± 24 시간 이내에는 37(90%)를 예측함으로써 1일 이내의 예측률은 Revised STOA 모형이 높음을 알 수 있다.

제 3 절 Type II burst와 자기폭풍간의 상관성

일반적으로 플레어나 코로나 물질방출과 같은 태양활동은 태양 대기를 뚫고 나오는 충격파를 생성하며 충분히 강한 충격파는 태양-지구간 공간을 진행하여 지구에 도달하고 지구자기장과 상호작용을 하여 Sudden Impulse 현상이나 자기폭풍을 일으키는 것으로 알려져 있다. 특히 자기폭풍이 발생하기 위해서는 Bz가 강하게 남쪽으로 향해 있고 오랫동안 그 상태를 유지하여야 한다.

자기폭풍의 발생은 Dst지수의 최소값으로 확인할 수 있는데 본 연구에서는 최소값이 -20이상인 경우를 자기폭풍으로 정의하였다. 그리고 자기폭풍의 시작은 양의 값을 갖고 있던 Dst 지수가 음으로 되기 시작하는 시각이나 음의 값을 갖던 Dst 지수의 경우에는 급격히 감소하기 시작하는 시각을 선택하여 결정하였다. 표 8의 6, 7열에는 이렇게 결정된 자기폭풍의 발생시각(TTg)과 자기폭풍의 규모를 나타내는 Dst 지수의 최소값($|Dst_{min}|$)을 기록한 것이다. $|Dst_{min}|$ 이 클수록 자기폭풍의 규모는 크다. 그리고 표 8의 8~10열에는 STOA 모형이 예측한 충격파지구 도착시각과 자기폭풍 발생시각의 차이(ΔT_{sg})를 정리하였고 표 8의 11~13열에는 Revised STOA모형이 예측한 충격파지구 도착시각과 자기폭풍 발생시각의 차이(ΔT_{pg})를 정리하였다. 이를 토대로 자기폭풍 발생과 충격파와의 관계를 알아보았다. 그림 15는 충격파의 지구도착 지연시간(TT_i)에 대한 자기폭풍 시작시각과 행성간 충격파의 도착시각의 차이를 보여주는 것으로 대부분의 경우 충격파 도착 후 20시간 내에 자기폭풍이 발생하였으며 이 시간 차이는 충격파의 지구도착 지연시간(TT_i)과는 무관함을 알 수 있다. 또 충격파가 도착 전에 시작된 자기폭풍은 무관한 것으로 생각하면 태양-지구간 충격파를 일으킨 총 41개의 Type II burst 중 25개(61%)가 자기폭풍을 일으킨 것으로 보인다. 다시 말해 Smith 등(2000)에서 인용한 20개의 Type II burst중에 13개가 자기폭풍을 일으켰고 전파연구소에서 관측한 21개의 Type II 중에 12개가 자기폭풍이 연관되어 있다. 그림 16은 충격파의 지구도착 지연시간(TT_i)과 자기폭풍 규모와의 관계를 보여주는데 행성간 충격파의 속도가 빠를수록 강한 자기폭풍이 발생함을 알 수 있다. 따라서 Type II burst는 자기폭풍과 긴밀한 연관성이 있음을 확인하였다.

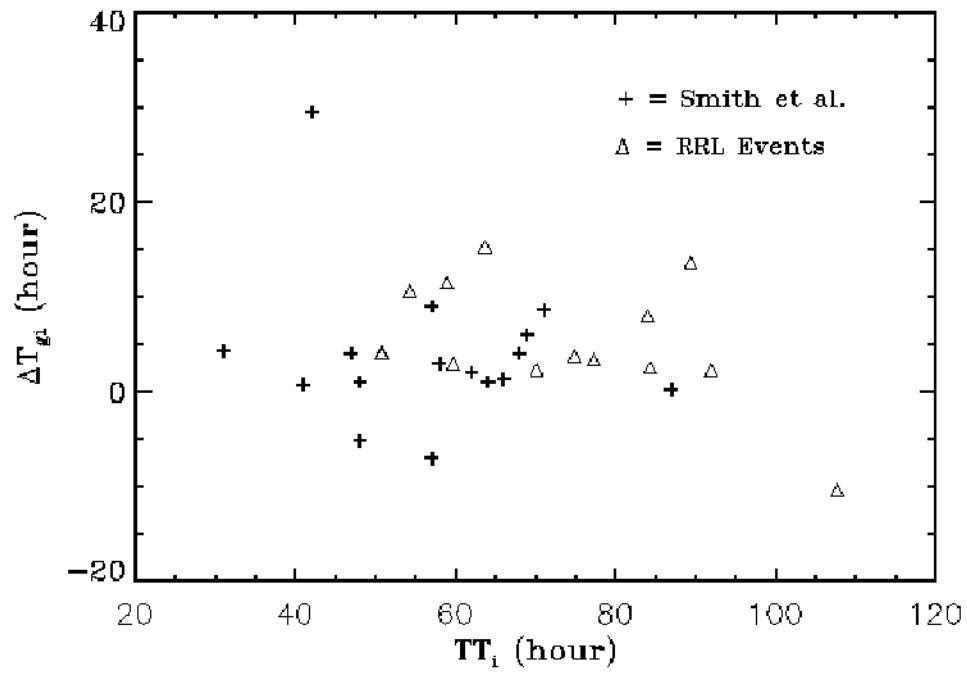


그림 15. 행성간 충격파의 지구도착과 자기폭풍의 시작

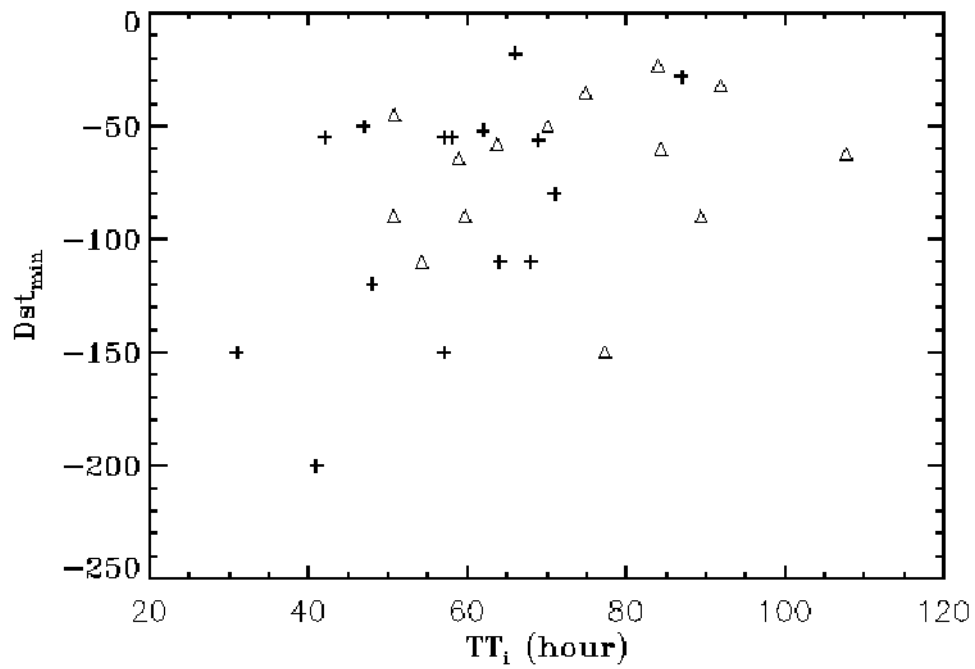


그림 16. 행성간 충격파 지구도착과 자기폭풍의 규모

제 5 장 결론 및 향후과제

전파연구소 태양전파와 지자기관측 자료의 분석결과를 외국의 결과와 비교하여 각 관측결과의 상관성을 알아보았다. 그리고 관측정보와 모형을 적용하여 태양활동, 행성간 충격파 그리고 자기폭풍간의 상관관계를 분석하였다.

태양전파관측자료를 분석하여 결정한 코로나의 충격파 속도는 미국, 일본, 호주에서 결정한 충격파 속도와 높은 상관도가 있음을 확인하였다. 지자기관측자료의 분석을 통해 산출한 활동지수 K는 일본 Kakioka 관측소의 K지수와는 0.93의 상관도를 보였으며 Kp 지수와는 0.9의 상관도가 있음을 확인하였다. Type II burst와 행성간 충격파의 상관관계는 지구도달예측(STOA) 모형을 적용하여 분석하였다. 분석 과정에서 기존의 STOA 모형이 초기속도에 체계적인 의존성을 갖고 있음을 발견하고 새로운 선형관계식($N=0.05+4\times 10^{-4}V_s$)을 적용한 Revised STOA 모형을 개발하였다. 새로운 모형을 관측자료에 적용한 결과 STOA 모형이 갖고 있는 체계적인 의존성과 충격파의 지구도달 예측율을 개선할 수 있었다. 이 모형을 사용하고 예측결과 및 관측자료를 분석하여 41개의 코로나 충격파(Type II burst)들 중에 4개는 진행도중 소실되고 37개(90%)가 지구에 도달함을 확인하였다. 25개(61%)의 충격파는 지구에 도달한 후 주로 5시간 이내에 자기폭풍을 일으켰고 그 속도가 빠를수록 강한 자기폭풍이 발생하였다. 이러한 자기폭풍은 통신장애와 위성운용장애를 일으키는 주요 원인이다.

결과적으로 전파연구소의 태양전파, 지자기 관측정보가 외국 주요관측소의 결과와 높은 상관도가 있음이 확인되었고 태양활동과 행성간 충격파, 그리고 자기폭풍은 깊은 연관성이 있음을 자체 개발한 분석기술과 모형을 통해 검증하였다.

참 고 문 헌

1. 조경석, 박홍식 & 정종일, 태양 및 우주환경관측연구 논문집, 105, 1999.
2. 최정립, 조경석 & 이동훈, 한국우주과학회지, 14, 126, 1997
3. Bougeret, J.-L., "Observations of shock formation and evolution in solar atmosphere, in Collisionless Shocks in the Heliosphere : Reviews of Current Research", Geophys. Monogr. Ser., Vol. 35. edited by B. T. Tsurutani and R.G. Stone, P. 13, AGU, Washington, D.C., 1985
4. Dryer, M and Smart, D.F., Adv. Space Res., 4, 291-301, 1984
5. Dryer, M., "Interplanetary studies: Propagation of disturbances between the Sun and the magnetosphere", Space Sci. Rev., 67, 363, 1994
6. Joe, H. A., "Satellite anomalies, Recent Events, and Possible Causes", Preceedings of the S-RAMP Symposium, Sapporo, Japan, 2000
7. Kondo, T., Isobe, T., Watari, S. and Tokumaru, M., J.Communi. Res. Lab. 42, 111, 1995
8. Mann, G., Aurass, H., Voigt, W., and Paschke, J., Preceeding of the First SOHO Workshop, Maryland, ESA SP-348, 129, 1992
9. McPherron, R.L., "Magnetospheric dynamics. : Introduction to Space physics", Cambridge University Press, Cambridge, 400-457, 1995
10. Menvielle, M., Papitashvili, N., Hakkinen, L., and Sucksdorff, C., Geophys. J. Int, 123, 866, 1995.
11. Nelson, G. J., and D. B. Melrose, in Solar Radio Physics, edited by D. J. McLean and N. R. Labrum, Cambridge, New York, P. 333, 1985.
12. Payne-Scott, R., D. E. Yabsley and J. G. Bolton, "Relative times of arrival of bursts of solar noise on different radio frequencies", Nature, 160, 256, 1947.
13. Pinter, S. and Dryer, M., Bull. Astron. Inst. Czechosol, 41, 137, 1990.
14. Prestage, N. P., Luckhurst, R. G., Peterson, B. R., Bevins, C. S., and Yuile, C. G., Solar Phys., 150, 393, 1994.
15. Robinson, R. D., Solar Phys., 95, 343-357, 1985.
16. Shanmugaraju, A., Umapathy, S., Balasubramanian, V., Selvanayagam,

- A. J. and Manoharan, P. K., *Solar Phys.*, *188*, 155–162, 1999
17. Rust, D. M., *Science* *216*, 939, 1982
 18. Smart, D. F and Shea, M. A., *J. Geophys. Res.*, *90*, 183–190, 1985
 19. Smith, Z., and M. Dryer, *Solar Phys.*, *129*, 387–405, 1990.
 20. Smith, Z., M. Dryer, E. Ort, W. Murtagh, *J. of Atm. and Solar Terr. Phys.* *497*, 972–993, 2000.
 21. Thompson, R., Kennewell, J. and Prestage, N., *Solar Phys.* *166*, 371, 1996.
 22. Uchida, Y., On the excitation of type II and type II solar radio bursts, publ. *Astron. Soc. Jpn.*, *12*, 376, 1960.
 23. Vlasov, V. I., *Geomagnetizm and Aeronomy*, *28*, 1–8, 1988.
 24. Volkmer, P. M. and Neubauer, F. M., *Ann. Geophysics*, *3*, 1–12, 1985.
 25. Wild, J. P., Smerd, S. F. & Weiss, A. A., *ARA&A*, *1*, 291, 1963.
 26. Wild, J. P. and McCready, L. L., *Australian J. Sci. Res.*, *A3*, 387, 1950.