

## VLBI 상관 서브시스템 본제품의 제작현장 성능시험 Performance Evaluation of VLBI Correlation Subsystem Main Product

오 세 진\*, 노 덕 규\*, 엄 제 환\*, Tomoaki Oyama\*\*\*, 박 선 업\*\*, 강 용 우\*  
Noriyuki Kawaguchi\*\*\*, Hideyuki Kobayashi\*\*\*, Kazuyuki Kawakami\*\*\*\*

Se-Jin Oh\*, Duk-Gyoo Roh\*, Jae-Hwan Yeom\*, Tomoaki Oyama\*\*\*, Sunyoup Park\*\*, YongWoo Kang\*  
Noriyuki Kawaguchi\*\*\*, Hideyuki Kobayashi\*\*\*, Kazuyuki Kawakami\*\*\*\*

### 요 약

본 논문에서는 한일공동VLBI상관기(Korea-Japan Joint VLBI Correlator, KJJVC)의 핵심 구성시스템인 VLBI상관서브시스템(VLBI Correlation Subsystem, VCS) 본제품의 1차 성능시험에 대해 기술한다. VCS 본제품의 1차 성능시험의 주요 목적은 현장에 설치하기 전에 제작사에서 다양한 시험항목을 대상으로 시험을 수행하여 문제점을 확인 후 전체 시스템의 완성도를 높이는 것이다. 이번 성능시험에서는 VCS 시작품에서 발견된 FFT 재양자화의 유효비트 부족으로 인한 오버플로어 문제점을 포함한 기능적인 시험을 수행하였다. 이번 VCS 본제품의 공장시험을 통하여 2008년 VCS 시작품의 성능시험에서 발견한 FFT의 재양자화 문제점이 완전히 해결되었으며, VCS 본제품에 지연추적, 지연보상, 주파수 묶음 등의 중요 기능도 추가되었다. 그리고 실제 관측 데이터(광대역/협대역)를 이용한 상관처리 시험에서도 예측되는 상관결과가 출력되는 것을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we introduce the 1st performance evaluation of VLBI Correlation Subsystem (VCS) main product, which is core system of Korea-Japan Joint VLBI Correlator (KJJVC). The main goal of the 1st performance evaluation of VCS main product is that the perfection of overall system will be enhanced after checking the unsolved part by performing the experiments towards various test items at the manufacturer before installation of field. The functional test was performed by including the overflow problem occurred in the FFT re-quantization module due to the insufficient of effective bit at the VCS trial product in this performance test of VCS main product. Through the performance test for VCS main product in the factory, the problem such as FFT re-quantization discovered at performance test of VCS trial product in 2008 was clearly solved and the important functions such as delay tracking, delay compensation, and frequency binning were added in this VCS main product. We also confirmed that the predicted correlation results (fringe) was obtained in the correlation test by using real astronomical observed data(wideband/narrow band).

**Keywords** : VLBI Correlation Subsystem (VCS) main product, Re-quantization, FPGA

### I. 서 론

한국천문연구원에서는 2008년 12월에 서울(연세대), 울산(울산대), 제주(탐라대) 등에 지름 21m의 전파망원경을 건설하는 한국우주전파관측망(Korean VLBI Network, KVN) 구축사업을 완성하였다[1]. 한국의 KVN, 일본의 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) 및 대학연합 관측망(JVN, Japanese VLBI Network), 그리고 중국의 CVN(Chinese VLBI Network)을 연결하는 동아시아VLBI

관측망(East Asian VLBI Network, EAVN)으로 관측한 VLBI 데이터를 상관처리하기 위해 한국천문연구원에서는 2006년부터 일본국립천문대와 국제공동으로 한일공동VLBI 상관기(Korea-Japan Joint VLBI Correlator, KJJVC) 개발을 진행하였다[2]. 이 KJJVC의 핵심 구성시스템인 VLBI상관서브시스템(VLBI Correlation Subsystem; VCS)의 설계제작을 2007년 7월부터 진행하였으며, 2008년 8월에 VCS 시작품(trial product)을 개발한 후 성능시험을 완료하였다[3]. VCS 시작품은 2 관측국, 1기선의 상관처리를 수행할 수 있다. 이 시작품 제작을 통하여 VCS 본제품(main product)을 제작할 때 발생할 수 있는 기능적인 측면과 설계과정에 발생할 수 있는 부분을 사전에 확인하였으며, 해결방법에 대한 논의와 검토를 거쳐 2009년 5월 VCS 본제품의 개발을 완료하였다[3]. VCS 본제품은 16 관측국,

\* 한국천문연구원      \*\*\* 일본국립천문대  
\*\* 충북대학교        \*\*\*\* 일본 Elecs Industry Co. Ltd.  
투고 일자 : 2011. 7. 7    수정완료일자 : 2011. 10. 25  
계재확정일자 : 2011. 11. 1

8192 출력 채널, 최대 8 Gbps의 입력 데이터를 상관처리할 수 있다. 본 연구에서는 VCS 본제품을 현장에 설치하기 전, 설계 규격서와 기능적인 측면을 확인하기 위해 시뮬레이션 데이터와 실제 관측 데이터를 대상으로 1차 성능 시험을 수행하였다. VCS 본제품의 성능검증을 위해 수행된 많은 시험결과들 중에서 VCS 시작품에서 수행한 여러 가지 항목을 다시 시험하였으며, 그 결과가 동일함을 따라서 이번 VCS 본제품의 제작현장 성능시험에서는 VCS 시작품에서 수행한 시험결과들 중에서 VCS 본제품에서도 동일한 결과를 보이는 시험항목은 제외하고, 지연보상(Delay compensation)과 스펙트럼 분석(Spectral analysis), 상관처리 등의 시험결과를 중심으로 기술하고자 한다. 특히 VCS 시작품에서 FFT 처리후 재양자화 단계에서의 유효비트 부족으로 발생한 문제점의 해결여부를 시험하고 그 결과를 기술한다.

II. VLBI상관서비스시스템(VCS)

그림 1은 동아시아VLBI관측망(EAVN)을 나타낸 것이다. 서론에서 소개한 것과 같이 동아시아VLBI관측망은 한·중·일 각 국에서 운용하고 있는 VLBI 관측망을 연결하여 총 기선길이 6000km에 해당하며, 이 기선길이만큼의 전파 망원경을 구축하는 분해능을 얻을 수 있다. 현재 개발하고 있는 한일공동VLBI상관기의 핵심인 VLBI상관서비스시스템은 동아시아VLBI관측망에서 총 16관측국, 8Gbps/관측국의 데이터를 상관처리할 수 있다.

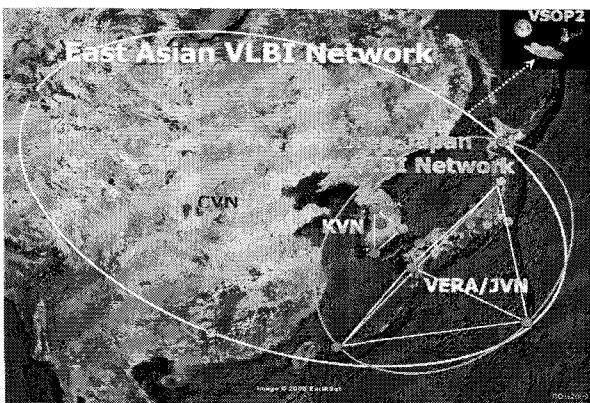


그림 1. 동아시아VLBI관측망(EAVN).  
Fig. 1. East Asian VLBI Network(EAVN).

표 1은 VCS의 간략한 규격을 나타낸 것이다. VCS는 각 관측국당 4개의 입력(최대 2Gbps 지원)에 대해 최대 16관측국의 관측자료를 동시에 상관처리할 수 있다. 최대 처리할 수 있는 대역폭은 512 MHz이며, 표 1에 나타낸 것과 같이 FFT를 가변적으로 설정할 수 있다. 그리고 최대 상관출력속도는 25.6ms 적분시간에 대해 1.4GB/sec(Giga Byte per sec)이다. 이하에 VCS를 구성하는 안테나 유닛, 상관 유닛, 패치패널 및 기본클록 유닛에 대해 간략히 기술한다.

표 1. VCS 규격.

Table 1. VCS specification.

항목	내용
관측국수와 입력/관측국	16 관측국, 최대 4입력
상관횟수/입력	120 교차상관 + 16 자기상관
관측주파수	130/86/43/22 GHz
최대 기선길이	36,000 km(0.12 sec)
최대 출력속도	1.4 GBytes/sec
데이터 샘플링	1 Gbps by 2bit/sample
인터페이스	VSI-H
입력 데이터 속도	2 Gbps / 1 Gbps
FFT 처리 점수	256k/128k/64k/32k/16k/8k 가변
출력 인터페이스	10Gbit Ethernet

2.1 안테나 유닛(Antenna Unit)

그림 2는 VCS 본제품의 공장시험 모습을 나타낸 것이다. 그림 2에서 왼쪽과 오른쪽 부분이 안테나 유닛을 나타낸 것이며, 1대 1로 관측국의 역할을 수행한다. 그림 3에 나타낸 것과 같이 안테나 유닛은 4개의 VSI-H 입력 포트가 있으며, 1 Gbps 또는 2 Gbps 속도의 데이터를 입력할 수 있다. 4 포트의 입력 데이터는 4 Gbps × 1-stream으로 직렬화되며, Multi Data Stream의 경우에 대한 Substream도 마찬가지로 1개의 스트림으로 직렬화한다. 직렬화된 데이터는 지연제어(Delay control) 모듈을 통하여 보정되고 프린지 회전(Fringe rotation)을 수행한다. 프린지 회전은 일반적으로 수행하는 프린지 회전이 아니고 VCS 제작과정에서 처음 시도되는 16 레벨(4-bit) 프린지 회전을 수행한다[4][5]. 안테나 유닛은 프린지 회전 후 FFT 모듈에서 256k-FFT 처리를 수행하며 주파수 영역에서 재양자화 과정을 거친 후 잔차(residual) 지연보정인 ΔW 보정과정 후 상관유닛(Correlation & Accumulation Unit)으로 데이터를 전송한다[6].

2.2 상관유닛(Correlation & Accumulation Unit)

상관유닛은 그림 2의 가운데에 위치하고 있으며, 그림 3에 나타낸 것과 같이 2개의 136-상관 어레이 블록으로 구성된다. 136-상관 어레이는 120-교차상관과 16-자기상관을 16 관측국의 입력 데이터를 대상으로 수행한다. 상관결과는 25.6ms~10.24s의 시간으로 각각 적분된 후 TCP/IP 패킷으로 10 Gbit Ethernet 4 라인을 통하여 데이터 아카이브로 출력된다.

2.3 패치패널 및 기본 클록 유닛

패치패널 유닛은 그림 3의 가운데 부분에 나타낸 것과 같이 안테나 유닛과 상관유닛을 광케이블로 연결하는 것이다. 연결은 1대 1로 고정되어 있으며 광 스위치를 통하지 않고 단순히 연결된 형태이다.

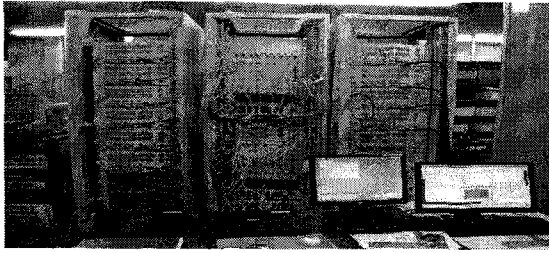


그림 2. VCS 본제품의 공장시험 사진.

Fig. 2. Factory test photo of VCS main product.

그리고 정확한 상관처리를 위해서 VCS 전체 시스템은 하나의 공통된 클럭으로 동기를 맞추어서 동작되어야 한다. 기본 클럭 유닛은 2가지 종류가 있는데, 각 안테나 유닛과 상관유닛에 공통의 클럭으로 1pps(pulse per second)와 광클럭을 전송하는 유닛이 있다. 1pps 신호의 경우 외부의 기준클럭을 발생하는 동기재생처리장치(RVDB)로부터 VSI-H 규격의 14핀 케이블을 통하여 기본 클럭 유닛이 기준클럭을 입력받으면 이 클럭을 공통 클럭으로 각 유닛에 분배하고 시스템의 동기를 맞춘다[7]. 그리고 공통 광클럭의 경우 자체적으로 기준 광신호를 만들어 클럭 유닛을 통하여 각 안테나유닛과 상관유닛으로 분배한다.

### III. 성능시험 및 결과

VCS 본제품의 성능평가를 위한 시스템 구성을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 RVDB는 평가 데이터의 재생을 위한 버퍼 시스템이며, D.A.는 VCS로부터의 상관결과를 저장하는 데이터 아카이브 시스템이다. 그리고 제어 및 운영 소프트웨어 사이의 VCS 제어 소프트웨어는 파라미터 설정하고 VCS의 시스템을 모니터링하는 역할을 담당한다.

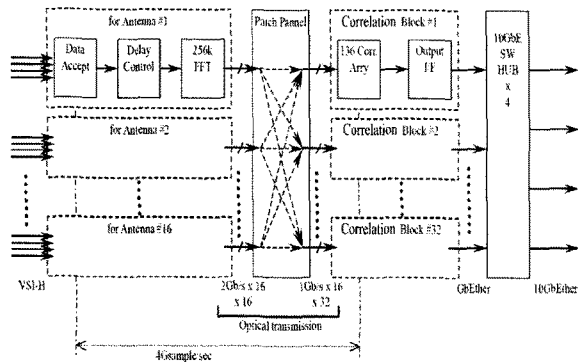


그림 3. VCS 구성.

Fig. 3. Configuration of VCS.

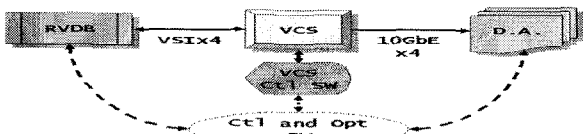


그림 4. VCS 본제품의 성능평가를 위한 전체 시스템 구성도.

Fig. 4. Test configuration for VCS main product performance evaluation.

VCS 본제품의 성능시험을 위해 사용한 실제 관측 데이터는 주로 일본 JNet에서 512 MHz 대역폭과 2 Gbps로 관측한 데이터와 일본국립천문대의 VERA 관측망에서 16 MHz 대역폭과 1 Gbps로 관측한 데이터이다. 그리고 시뮬레이션 데이터는 VCS 규격에서 정의한 다양한 형태의 데이터를 소프트웨어로 만든 데이터이다. 각 단계별 성능시험 과정에 사용된 데이터는 각 시험결과에서 다시 제시한다. VCS 본제품의 성능시험은 공장시험과 현장시험의 2단계로 수행하였는데, 본 논문에서는 공장시험결과에 대해서만 기술한다. 우선 공장시험에서는 현장에 반입하기 전에 제작현장에서 기능 및 성능을 점검하였다. 지연보상 처리에서 임의의 지연보정 값에 대해 VCS 본제품의 정상동작에 대한 시험을 수행하였으며, 실제 관측 데이터를 이용하여 상관처리 과정에서 지연 파라미터의 처리에 대한 시험도 함께 수행하였다. 그리고 특히 스펙트럼 분석에서 VCS 시작품에서 FFT 처리 후에 발생한 재양자화의 유효비트에 따른 문제점을 수정한 후에 대해 VCS 본제품의 성능시험을 수행하였다[3]. 그리고 시뮬레이션 데이터를 이용하여 VCS 본제품의 주파수 묶음 기능과 적분시간에 따른 상관결과의 처리에 대해서도 수행하였다. 전체 종합시험으로 4 관측국 모드에서 실제 관측 데이터를 이용하여 상관처리 시험을 수행하였다. 이하에 각 시험방법과 결과에 대해 기술한다.

#### 3.1 VCS 본제품의 공장시험

##### 3.1.1 지연 제어/ 지연 오프셋 시험

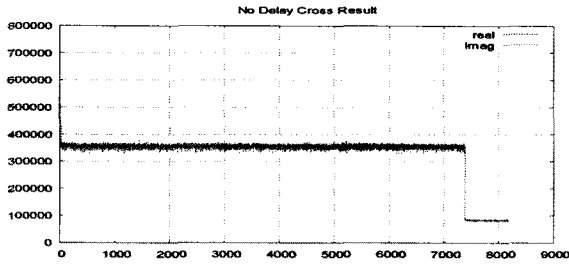
VCS에서 지연 추적(Delay tracking) 및 프린지 추적(Fringe tracking) 기능이 정상적으로 동작하는지 확인하는 방법은 지연 예측 파라미터를 적용한 후 처리 결과를 확인하는 것이다. 우선 성능시험에서는 지연 제어가 정상적으로 동작되는지 확인하기 위해 지연 예측 파라미터인  $\tau_g, \tau'_g, \tau''_g, \tau'''_g$  값을 이용하여 a-priori를 계산한다. a-priori를 계산하기 위해서는 다음 식 (1), (2), (3)을 각각 이용하여 성능시험에서는 각 수식의 한 항에만 값을 설정하였다. 그리고 지연 제어의 정상동작 여부를 확인하기 위해 프린지 추적의 경우, 90도 jump 기능은 동작하지 않도록 설정하였다.

$$\tau_g(t) = \tau_g + \tau'_g t + \frac{1}{2} \tau''_g t^2 + \frac{1}{6} \tau'''_g t^3 \quad (1)$$

$$\tau'_g(t) = \tau'_g + \tau''_g t + \frac{1}{2} \tau'''_g t^2 \quad (2)$$

$$\tau''_g(t) = \tau''_g + \tau'''_g t \quad (3)$$

지연 보정 기능의 확인에는 VCS 시작품의 성능평가에서 사용된 것과 동일한 평탄한 대역 특성을 가지는 시뮬레이션 데이터를 사용하였다. 그림 5는 지연 보정 및 프린지 회전이 없는 경우의 상관결과를 나타낸 것이다.

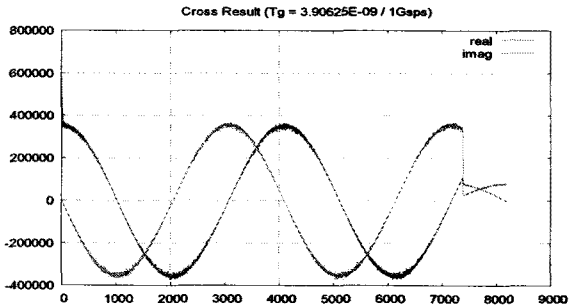


X-axis : Frequency CH / Y-axis : Amplitude

그림 5. 성능 확인을 위해 사용한 평탄한 대역을 갖는 시뮬레이션 데이터의 교차상관결과.

Fig. 5. Cross-correlation result of simulation data with flat bandwidth used for performance check.

우선 식 (1)에서 지연 예측 파라미터인  $\tau_g$ 에 3.90625E-09sec을 설정하고  $\tau_g$  이후는 0으로 설정한 후 1 Gbps-2bit로 샘플링한 시뮬레이션 데이터에 대한 VCS 본제품의 교차상관(Cross Correlation)결과를 그림 6에 나타내었다.

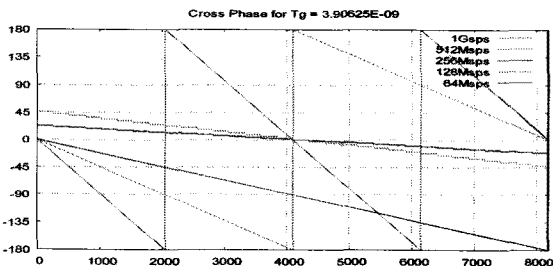


X-axis : Frequency CH / Y-axis : Integration Value

그림 6.  $\tau_g$ 의 값만 설정한 경우의 교차상관결과.

Fig. 6. Cross-correlation result for only setting  $\tau_g$  value.

여기서, 샘플링률(Sampling rate)을 1Gbps-2bit로 한 경우 3.90625E-09sec의 지연 예측 파라미터 값은 4-샘플에 해당한다. 그림 6에서 위상정보가 대역의 1/2로 2회전하고 있으며,  $\tau_g$ 에 의한 지연과 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그림 7은 각각의 샘플링률에 따른 Cross Phase를 나타낸 것이다.

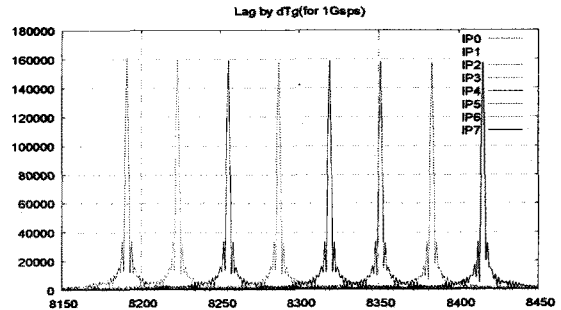


X-axis : Frequency CH / Y-axis : 위상(deg)

그림 7. 각 샘플링률에 따른 Cross Phase의 변화.

Fig. 7. Variation of Cross Phase according to sampling rates.

그림 7에서 128 Msps과 64 Msps은  $\Delta W$  보정에 의한 위상이 된다[6]. 이 때문에 대역 중심에서 0도가 되고 DC에서는 offset이 된다. 각각의 위상 기울기는 3.90625E-09sec에 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 다음은 1-IP(Integration Period)에서 32-샘플을 이동하는 것과 같이  $\tau_g$ 만을 설정하였다. 그림 8은 Lag 영역에서 상관 지연결과를 나타낸 것이다.



(X-axis : Lag, 8192가 Lag = 0에 해당한다.)

그림 8.  $\tau_g$  값의 설정에 따른 VCS의 lag 영역에서의 지연변화.

Fig. 8. Delay variation of VCS output in the lag domain according to  $\tau_g$  value setting.

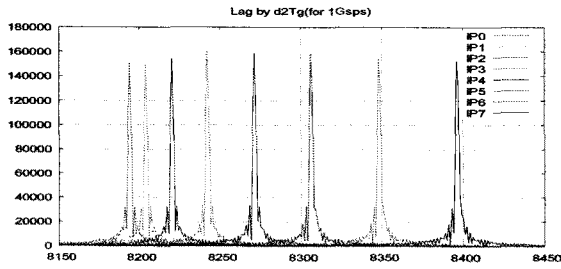
그림 8에서는 지연의 변화를 명확하게 표현하기 위해 8-IP 분량의 결과를 중첩하여 표시하였다. 그림 8의 그래프 중에 IP0~IP7은 임의로 부여한 번호이며, VCS가 출력하는 IP 번호와는 다르다. 그림 8에서 각 Lag 값은 표 2에 나타내었으며, 일정한 간격으로 지연되어 이동하는 것을 알 수 있다.

표 2. 1차 지연파라미터 적용 후 Lag의 변화와 차이.

Table 2. Difference and Lag variation after adopting 1st delay parameter.

	Lag	Difference
IP0	8191	
IP1	8223	32
IP2	8255	32
IP3	8287	32
IP4	8319	32
IP5	8351	32
IP6	8383	32
IP7	8415	32

다음은  $\tau_g$  값만을 설정한 경우 VCS 본제품의 Lag 영역에 있어서 상관 지연결과를 그림 9에 나타내었다.  $\tau_g$ 의 경우와 마찬가지로 지연 변화를 명확하게 하기 위해 8-IP분의 결과를 중첩하여 표시하였다. Lag 값의 변화는 표 3과 같고, IP4를 제외하고는 2차의 차분은 거의 일정한 간격으로 이동되는 것을 확인할 수 있다.



(X-axis : Lag, 8192이 Lag = 0에 해당한다.)

그림 9.  $\tau_g''$  값의 설정에 따른 VCS의 lag 영역에서의 지연변화.

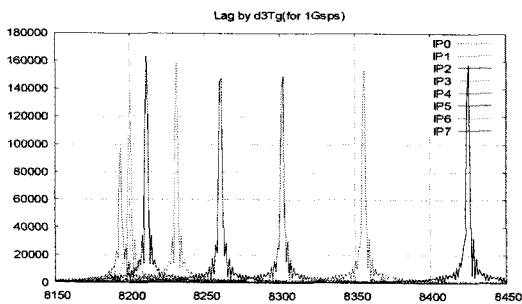
Fig. 9. Delay variation of VCS output in the lag domain according to  $\tau_g''$  value setting.

표 3. 2차 지연파라미터 적용 후 Lag의 변화와 차이.

Table 3. Difference and Lag variation after adopting 2nd delay parameter.

	Lag	Difference	
IP0	8194		
IP1	8204	10	
IP2	8220	16	6
IP3	8241	21	5
IP4	8271	30	9
IP5	8306	35	5
IP6	8348	42	7
IP7	8396	48	6

앞에서 수행한 것과 동일한 방법으로  $\tau_g'''$  값을 설정한 후 VCS의 상관 지연결과를 Lag 영역에 대해 그림 10에 나타내었다.



(X-axis : Lag, 8192가 Lag = 0에 해당한다.)

그림 10.  $\tau_g'''$  값의 설정에 따른 VCS의 lag 영역에서의 지연변화.

Fig. 10. Delay variation of VCS output in the lag domain according to  $\tau_g'''$  value setting.

$\tau_g'$ 의 경우와 마찬가지로 지연 변화를 명확하게 하기 위해 8-IP 분의 결과를 증첩하여 표시하였으며, Lag 값의 변화는 표 4에 나타내었다.

표 4. 3차 지연파라미터 적용 후 Lag의 변화와 차이.

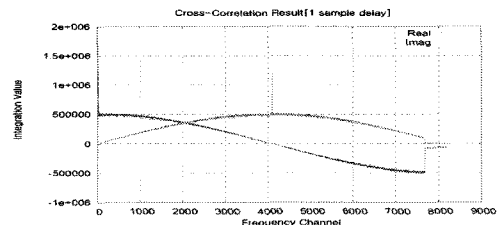
Table 4. Difference and Lag variation after adopting 3rd delay parameter.

	Lag	Difference		
IP0	8194			
IP1	8200	6		
IP2	8211	11	5	
IP3	8231	20	9	4
IP4	8261	30	10	1
IP5	8302	41	11	1
IP6	8356	54	13	2
IP7	8425	69	15	2

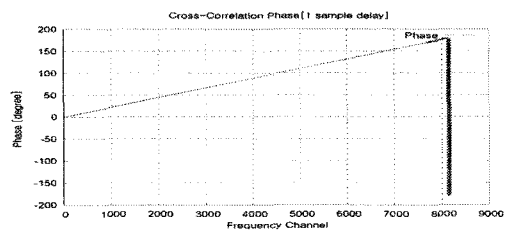
3차 차분의 경우 변화의 이동이 일정하게 되어야 하지만, 이번 시험결과에서는 명확하게 확인되지 않아서 향후 추가적인 시험을 수행할 예정이다.

### 3.1.2 제약자화 성능확인(지연 오프셋, 샘플이동)

VCS 시작품의 시험결과에서 소개한 문제점은 지연 오프셋(delay offset)을 확인하기 위해 샘플을 이동하여 얻은 상관결과에서 나타난 파도 (Waving) 모양으로 VCS 시작품의 FFT 연산 후에 수행하는 제약자화의 유효비트 처리에 문제가 있어서 오버플로어(overflow)가 발생하기 때문이다[3]. 이는 VCS 시작품의 시험결과에서 나타내었듯이 동일한 데이터에 대해 Correlation Simulator에서 수행한 경우에서도 동일하게 발생하는 것을 확인하였다[3][8]. 이 오버플로어 문제를 해결하기 위해서 Correlation Simulator의 시험결과 유효비트를 8-bit 이상으로 설정할 경우 문제가 해결되는 것을 시험으로 확인하였다. 따라서 제약자화 과정에서의 유효비트를 증설하는 것을 제작사와 논의한 결과 안테나 유닛의 FPGA에 VCS 시작품에서 제약자화 유효비트를 4-bit에서 8-bit로 증설하는 것이 가능하여 이를 적용하였다. 지연 오프셋을 확인하는 방법으로 샘플 데이터를 이동한(1, 2, 3, 7 샘플) 후 얻은 상관결과와 Cross Spectrum과 Cross Phase의 변화를 시뮬레이션 데이터에 대해 수행하였으며, 이하에 결과를 나타내었다.



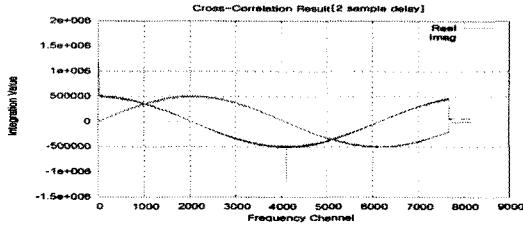
(a) Cross Spectrum.



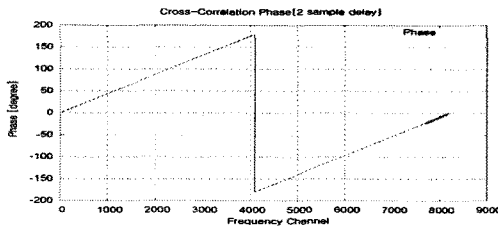
(b) Cross Phase.

그림 11. 1-sample 이동한 후의 Cross Spectrum과 Cross Phase.

Fig. 11. Cross Spectrum and cross phase after 1-sample shift.



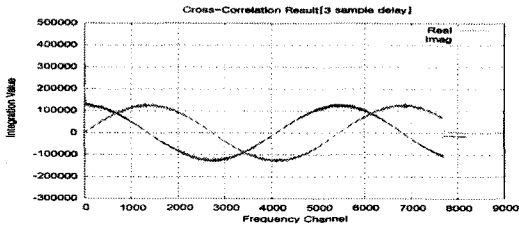
(a) Cross Spectrum.



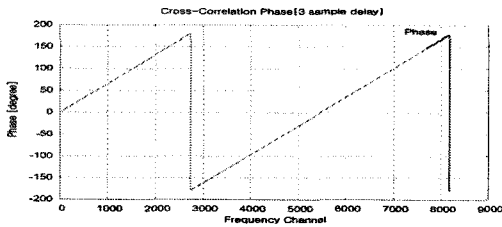
(b) Cross Phase.

그림 12. 2-sample 이동한 후의 Cross Spectrum과 Cross Phase.

Fig. 12. Cross Spectrum and cross phase after 2-sample shift.



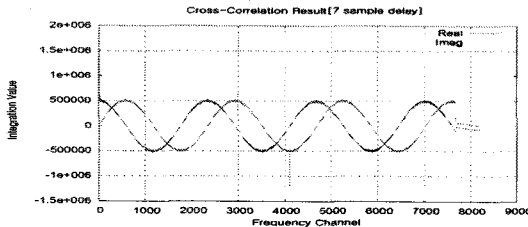
(a) Cross Spectrum.



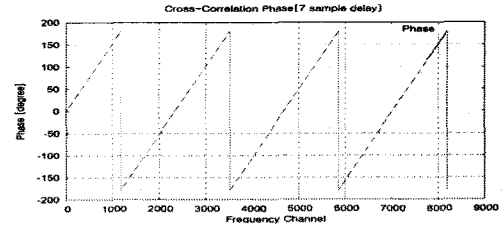
(b) Cross Phase.

그림 13. 3-sample 이동한 후의 Cross Spectrum과 Cross Phase.

Fig. 13. Cross Spectrum and cross phase after 3-sample shift.



(a) Cross Spectrum.



(b) Cross Phase.

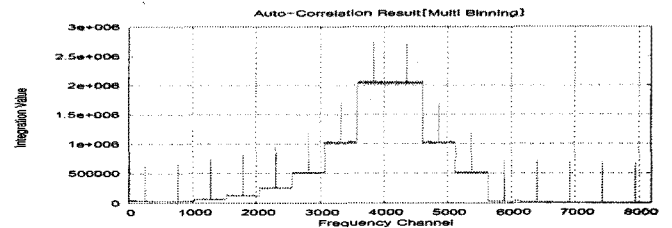
그림 14. 7-sample 이동한 후의 Cross Spectrum과 Cross Phase.

Fig. 14. Cross Spectrum and cross phase after 7-sample shift.

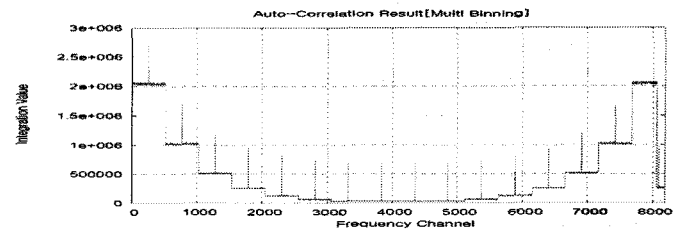
그림 11에서 14의 시험결과에서 Cross Phase의 경사가 VCS 시작품 시험결과[3]의 Correlation Simulator와 반대로 출력되는 것은 VCS를 구성하기 위한 연결배선이 다르기 때문으로 시험결과에는 영향이 없다. 즉, X와 Y 사이의 관계가 역전되어 있는 상관모듈을 사용하고 있기 때문이다. 이상의 시험을 통하여 VCS 시작품에서 재양자화 유효 비트 문제는 FPGA의 재양자화 모듈을 8-bit로 증설하여 지연 오프셋에서 발생한 오버플로 문제가 해결되었음을 확인하였다.

### 3.1.3 Frequency binning 기능 시험

VCS는 표1의 규격에 나타난 것과 같이 8192 채널의 상관결과가 출력된다. 이 많은 데이터 중에서 실제로 유효한 상관결과가 포함된 주파수 채널만 출력할 수 있는 기능이 필요하며, 이 기능이 Frequency binning(주파수 묶음)이다 [3]. 따라서 주파수 채널을 묶어서 출력할 수 있는 Frequency binning 기능에 대한 시험을 시뮬레이션 데이터를 이용하여 수행하였으며, 그 결과를 그림 15에 나타내었다. 각 binning block의 중앙에 CW (Continuous Wave) 신호가 설정되어 있다.



(a) Binning factor 1:1:2:4:8:16:32:64:64:32:16:8:4:2:1:1.



(b) Binning factor 64:32:16:8:4:2:1:1:1:2:4:8:16:32:64.

그림 15. Binning factor에 따른 상관결과의 변화.  
Fig. 15. Variation of correlation result according to the Binning factor.

그림 15의 결과에서 알 수 있듯이 어느 쪽에서도 binning factor와 noise 신호의 상관결과 적분값이 대응하고 있다. 그림 15(b)의 경우 마지막 block에서 CW 신호가 중앙에서 떨어져 있는 것은 상관출력에서 설정된 대로 출력되는지 확인하기 위해 시플레이션 데이터를 설정한 것이며, 이 결과를 바탕으로 Frequency binning 기능이 정상적으로 동작되는 것을 확인하였다.

3.1.4 4관측국 상관처리 시험

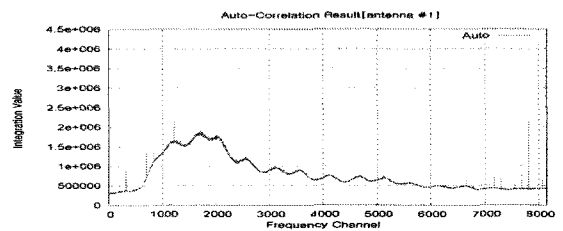
VCS 본제품의 공장시험에서 VCS를 16 관측국 모드로 설정하여 성능시험을 수행하기 위해서는 16 관측국 모드 설정에 따른 최대 상관출력(1.4GB/s(Giga Byte per second))을 저장할 수 있는 서버(데이터 아카이브)를 준비하는 것과 실제 관측 데이터 중에 최대 512 MHz 대역폭 또는 256 MHz 대역폭으로 설정하고 최대 2 Gbps 또는 1 Gbps 속도로 16 관측국에서 동시에 관측한 데이터를 준비하여야 한다. 데이터 아카이브 시스템의 경우 VCS의 제작이 시작된 후 향후 도입될 것을 대비하여 시스템의 성능시험을 수행하고 있었지만, 이 시스템을 제작사가 위치한 일본으로 임시 이전하여 VCS 본제품의 성능시험을 수행하는 것에 해결해야 할 문제가 많이 있으며, 실제 16 관측국으로 관측한 VLBI 데이터를 준비하는데도 어려움이 있기 때문에, 이번 VCS 본제품의 공장시험에서는 기존 VCS 시작품의 성능시험에서 사용한 일본 JNet에서 관측한 데이터를 이용하였다. VCS 본제품의 상관출력은 10Gbit Ethernet 4-포트를 갖추고 있는데, 4 관측국당 1-포트씩 담당하고 있다. 따라서 VCS 본제품의 공장검수에서는 4관측국 모드(6기선 x 4set)로 설정하였고, 데이터 아카이브 시스템은 10Gbit Ethernet 1-포트를 갖춘 임의의 서버 시스템을 준비하여 VCS 본제품의 상관결과를 저장하도록 설정하였다. 16관측국 모드에서의 VCS 본제품의 성능시험은 향후에 수행할 예정이며, 이번 공장시험에서는 4관측국 모드의 안테나 유닛과 상관유닛 사이에 있는 패치패널 광케이블 접속을 수정하여 전체 데이터 경로의 설정이 정상적으로 동작되는지 확인하였다. VCS 본제품의 4 관측국 모드에서 성능시험은 2003년 일본 JNet으로 관측한 관측명 "030126" wideband (512 MHz BW) 관측데이터를 사용하였다. 4 관측국 중에서 안테나 1번과 2번에 USUDA 데이터를 입력하고, 안테나 3번과 4번에 TSUKUBA 데이터를 입력하도록 설정하였다. 안테나 1번에는 이 기선에서의 실제 지연 예측 파라미터를 설정하였다. 이 경우 상관결과는 표 5와 같이 예측된다. 표 5에서 Cross #1은 안테나 1번에만 지연 파라미터가 설정되어 있으므로 상관결과가 출력되지 않을 것으로 예측된다. 그림 16에 각 관측국의 자기상관(Auto Correlation)결과를 나타내었으며, 상관처리 설정은 16k-points FFT, 적분시간은 1024ms, Binning factor는 모두 1로 설정하였다. 표 5의 예측 상관결과를 바탕으로 그림 17은 안테나 1과 3 기선의 교차상관결과이며, Cross Spectrum, Cross Phase, Lag 영역의 프린트를 각각 나타낸 것이다. 표 5의 예측 상관결과와 같이 안테나 1과 3, 안

테나 1과 4는 동일한 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 그래서 실제 시험결과에서도 동일한 상관결과가 출력되어 본 논문에서는 안테나 1과 3의 교차상관결과만을 기술한다.

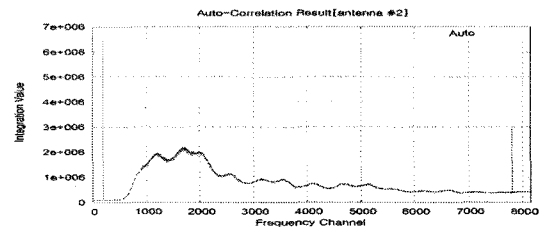
표 5. 예측 상관결과.

Table 5. Predicted correlation result.

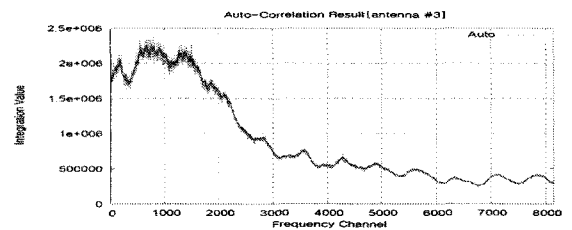
		Ant. #1	Ant. #2	Ant. #3	Ant. #4
		USUDA (/w delay)	USUDA	TSUKUBA	TSUKUBA
Ant. #1	USUDA (/w delay)	Auto #1			
Ant. #2	USUDA	Cross #1 (No fringe)*	Auto #2		
Ant. #3	TSUKUBA	Cross #2 (Get fringe)	Cross #4 (No fringe)	Auto #3	
Ant. #4	TSUKUBA	Cross #3 (Get fringe)	Cross #5 (No fringe)	Cross #6 (Get fringe)	Auto #4



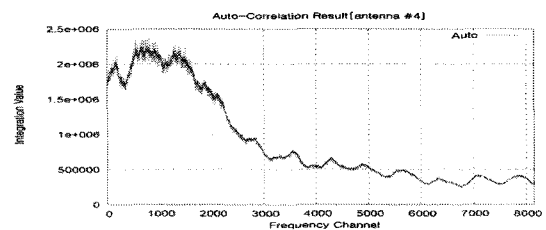
(a) antenna 1.



(b) antenna 2.



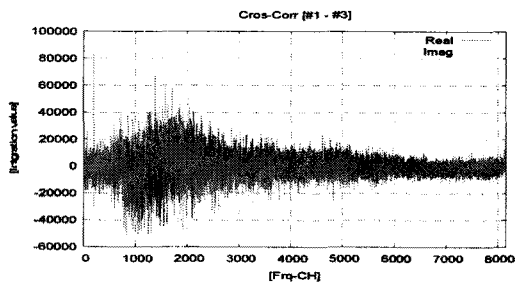
(c) antenna 3.



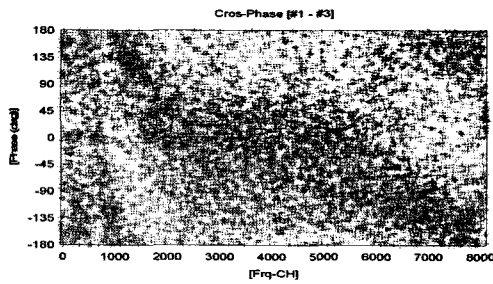
(d) antenna 4.

그림 16. 일본 JNet 각 관측국의 자기상관결과.

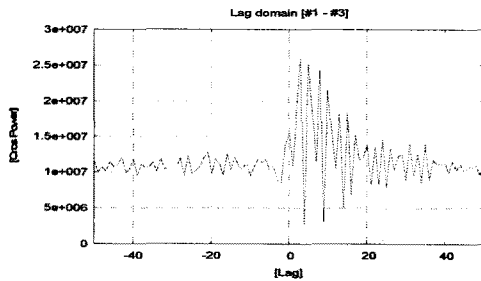
Fig. 16. Auto-correlation result for each station of Japanese JNet.



(a) Cross Spectrum.



(b) Cross Phase.



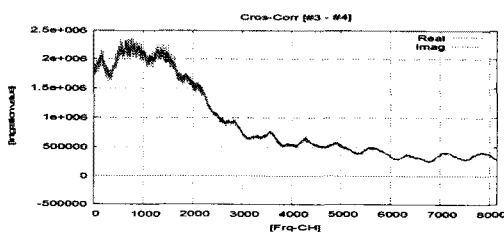
(c) Fringe of Lag domain.

그림 17. 안테나 1과 3 기선의 교차상관결과.

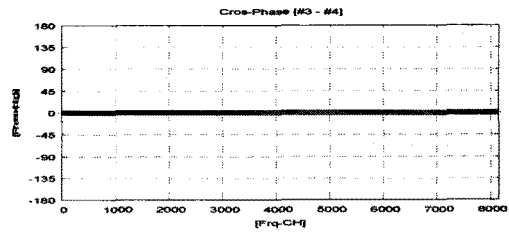
Fig. 17. Cross-correlation result between antenna 1 and 3 baseline.

그림 17의 상관결과를 통하여 실제 지연 파라미터를 적용하여 Cross Spectrum을 얻었으며, Cross Phase의 경우 위상의 변화가 명백하게 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 Lag 영역에서도 상관 프린지가 얻어지는 것을 확인하였다.

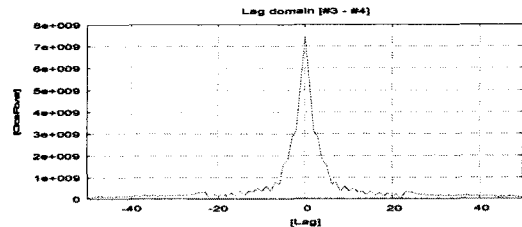
표 5의 예측 상관결과로부터 안테나 3과 4 기선에 대한 상관처리 결과를 그림 18에 각각 나타내었다. 표 5로부터 안테나 3과 4는 동일한 데이터가 입력되기 때문에 상관결과를 교차상관결과이지만, 자기상관결과와 동일하다는 것을 예측할 수 있다. 그리고 Cross Phase는 동일한 데이터이기 때문에 위상은 0이고, Lag 영역에서는 강한 프린지가 얻어지는 것을 확인하였다.



(a) Cross Spectrum.



(b) Cross Phase.



(c) Fringe of lag domain.

그림 18. 안테나 3과 4 기선의 교차상관결과.

Fig. 18. Cross-correlation result between antenna 3 and 4 baseline.

### 3.1.5 실제 관측 데이터를 이용한 상관처리 시험

표 6. 상관처리시험을 위한 실제 관측 데이터.

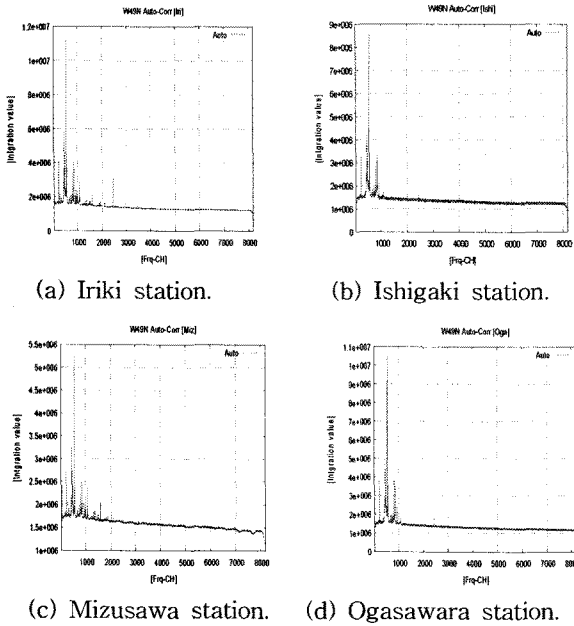
Table 6. Real observation data for correlation experiments.

천체명	관측 모드	대역 및 채널
W49N	VERA1	128MHz-2ch A beam
OH43	VERA1	128MHz-2ch B beam
3C446	VERA1	128MHz-2ch A beam
J2218-03	VERA1	128MHz-2ch B beam

앞에서 수행한 512 MHz의 광대역 관측 데이터를 이용한 상관처리와 마찬가지로 협대역(최대 256 MHz) 관측 데이터를 이용한 VCS 성능시험을 수행하였다. 협대역 관측 데이터는 일본국립천문대 VERA 관측망(Mizusawa, Iriki, Ishigaki, Ogasawara)으로 관측한 데이터이며 표 6에 나타낸 것을 사용하였다. 관측 데이터의 관측모드는 VERA1 모드이고 이는 128 MHz, 2 channel의 구성을 가지며 VERA의 특징인 A-beam에는 W49N이 B-beam에는 OH43을 동시에 관측한 것을 말한다[9]. 표 6의 관측 천체 중에서 실제 VCS의 성능시험에서는 W49N 천체를 제외한 다른 천체에 대한 교차상관처리 결과를 얻지 못하였다. 그 이유는 지연 파라미터를 계산하는 모듈의 로직 오류로 인해 신호대잡음비(SNR)가 낮은 천체의 경우 적분시간에서 프린지를 검출하는 어려움이 있음을 확인하였다. 따라서 이번 성능시험 결과에서는 W49N에 대해서만 이하에 기술하였다. W49N 천체는 강한 스펙트럼 라인(Spectral line) 천체로서 그림 19에 나타낸 것과 같이 대역에서 스펙트럼 라인을 관측할 수 있다. 그리고 VERA 관측망으로 관측한 W49N 천체에 대한 VCS의 교차상관처리시험을 수행하였다. 교차상관결과는 모두 조합에 의해 6개가 출력되지만, 본 시험에서는 실제 지연 파라미터를 Iriki, Ishigaki 관측



국 기선과 Mizusawa, Ogasawara 관측국 기선에 대해 기선기반(Baseline base)으로 설정하였으며, 그 결과를 그림 20, 21에 Cross Spectrum과 Cross Phase를 각각 나타내었다.



(a) Iriki station.

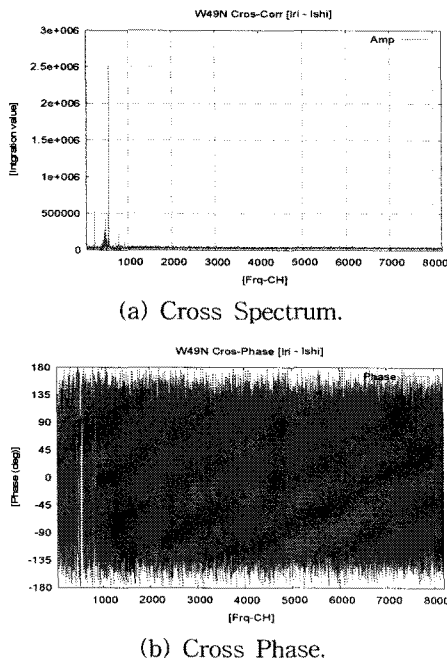
(b) Ishigaki station.

(c) Mizusawa station.

(d) Ogasawara station.

그림 19. VERA 4 관측국의 자기상관결과.

Fig. 19. Auto correlation result of VERA 4 stations.

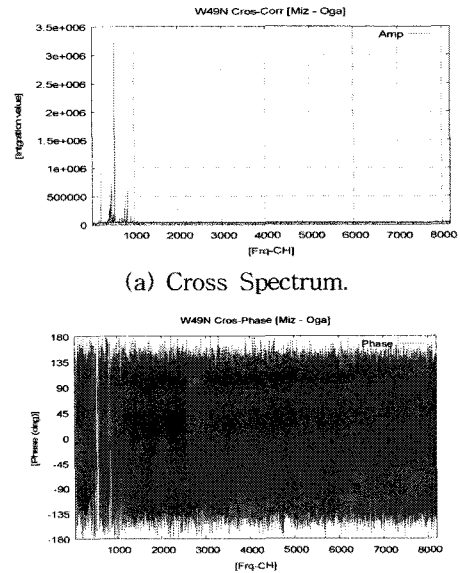


(a) Cross Spectrum.

(b) Cross Phase.

그림 20. VERA Iriki, Ishigaki 관측국 기선에 대한 VCS 본제품의 교차상관결과.

Fig. 20. Cross correlation result of VCS main product according to the VERA Iriki, Ishigaki stations baseline.



(a) Cross Spectrum.

(b) Cross Phase.

그림 21. VERA Mizusawa, Ogasawara 관측국 기선에 대한 VCS 본제품의 교차상관결과.

Fig. 21. Cross correlation result of VCS main product according to the VERA Mizusawa, Ogasawara station baseline.

### 3.1.6 성능시험 결과고찰

이상에서 기술한 VCS 본제품의 성능시험에서는 VCS의 지연제어, 지연 오프셋, 안테나 유닛의 FPGA 제약자화 유효비트 문제, 주파수 묶음 기능, 광대역 및 협대역 관측 데이터의 상관처리 등을 수행하였으며, VCS의 규격을 만족하고 있음을 확인하였다. 특히 VCS 시작품에서 문제가 된 제약자화 과정에서 오버플로 문제가 해결되어 VCS의 성능에는 문제가 없음을 확인하였다. 그러나 이번 성능시험에서 새롭게 발견한 문제로서 지연 파라미터의 계산 로직 오류로 인하여 SNR이 낮은 천체의 경우 상관결과에서 프린지를 정상적으로 검출하지 못하는 것을 확인하였다. 그리고 VCS 본제품의 공장시험에서 출력된 상관 스펙트럼에 오류가 있음을 확인하였으며, 그림 22에 나타내었다. 그림 22에 나타난 상관결과 DC 부근에 "sinc" 패턴을 갖는 스펙트럼 오류가 존재하는 것을 알 수 있다. Scaling과 제약자화 모듈을 조정 후 신호의 레벨이 감소한 것을 확인할 수 있지만, 완전히 없어진 것이 아니라 그림과 같이 상관결과 DC 부근에 sinc 패턴이 있음을 확인하였다. sinc 패턴의 주기는 FFT points 수의 1/512이므로 데이터 처리의 어딘가에서 512 샘플 분량의 손실이 있는 것으로 판단된다. 이 부분은 FFT 처리과정의 모듈에 문제가 있기 때문에 위의 2가지 문제를 최우선으로 제작사에서 수정하여 프린지 검출과 정상동작 여부를 확인한 후 현장으로 운송하기로 하였다.

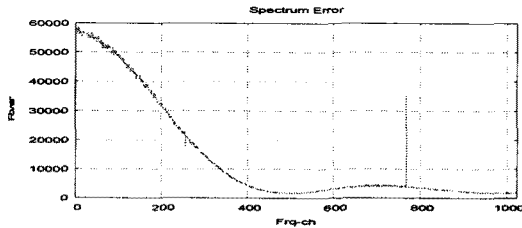


그림 22. VCS 본제품의 상관결과에서 스펙트럼 오류.

Fig. 22. Spectrum error of VCS main product.

다음은 지연 제어에서 VCS가 상관처리를 수행하는 과정에 입력된 지연파라미터의 값이 상관처리 후 적용된 파라미터의 값이 부정확한 것을 확인하였다. 그 원인으로는 지연 파라미터를 계산하는 부분과 적용된 파라미터가 출력되는 시각의 비동기로 판단된다. 이 부분도 VCS 상관처리 과정의 시퀀스를 수정할 예정이다. 앞에서 소개한 것과 같이 이번 공장시험에서 준비한 협대역 관측데이터 중에 W49N을 제외한 다른 관측 데이터에 대해서는 프린지를 얻지 못했다. W49N 천체에서도 noise부분의 위상에 의문점이 남아 있는 상태이다. 일본국립천문대 미타카 상관센터의 소프트웨어 상관기로 확인한 결과, 데이터에는 문제가 없음이 판명되었다. 프린지 검출이 잘 되지 않는 이유는 앞에서 설명한 지연 파라미터를 계산하는 FPGA의 로직오류로 인해 SNR이 낮은 천체에서 적분시간에 따라 프린지 검출이 어려운 것으로 판단된다. 현재 자기상관결과는 정상적으로 얻어지기 때문에 향후 지연 파라미터 전개를 위한 FPGA 로직을 수정한다면 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 VCS 본제품의 기능시험에 대해 기술하였다. VCS 본제품은 2008년 시제품의 개발과 성능시험에서 발견된 문제점을 해결하면서 시작품에서 구현하지 못한 기능을 추가하면서 진행되었다. 그리고 VCS 본제품에 대한 성능시험은 2008년 수행된 VCS 시작품의 성능시험을 바탕으로 성능개선 여부를 확인하고 현장에 설치하기 전에 다양한 시험항목에 대해 성능시험을 수행하여 미완성된 부분을 사전에 확인하였으며, VCS 시작품에 비하여 완성도가 향상되었음을 시험을 통하여 확인하였다. 특히 VCS 시작품에서 핵심적인 문제가 된 FFT의 제약자화 부분에 대해 시험을 통하여 문제가 해결된 것을 확인하였다. 그리고 SNR이 낮은 천체에 대한 프린지 검출이 어렵고, 상관출력의 스펙트럼 오류, 지연 파라미터의 처리 비동기 문제 등이 발견되어 VCS 본제품을 한국의 현장에 설치하기 전에 확인할 수 있어서 이번 시험이 성공적으로 수행되었다고 판단된다. 이 문제점들의 원인이 무엇인지 알고 있기 때문에 현장에서 운송하기 전에 FPGA 로직 등은 제작사에 의해 수정될 예정이다. 이상과 같은 문제점이 있었지만, VCS 본제품의 지연제어/지연 오프셋, FFT 제약자화 문제 해결, 광대역/협대역 실제 관측 데이터를 이용한 상관처리 시험

등에서 프린지 등을 확인할 수 있었다.

향후, VCS 본제품의 2차 현장시험에서는 앞에서 기술한 문제점의 해결여부와 실제 관측 데이터를 이용한 상관처리 시험, 관련 소프트웨어와의 동작시험, 전체 한일공동VLBI 상관기를 구성하는 시스템 간의 연결성 시험 등을 수행할 예정이다.

#### 참고 문헌

- [1] 김봉규 외 20명, "2008년도 한국우주전파관측망 구축사업 결과보고서," 한국천문연구원, pp. 45-80, 2009.
- [2] 노덕규 외 15명, "2008년도 한일공동VLBI상관기 및 수신기 개발 결과보고서," 한국천문연구원, pp. 3-5, 2008.
- [3] 오세진, 노덕규, 염재환, 정현수, 이창훈, Hideyuki Kobayashi, Noriyuki Kawaguchi, Kazuyuki Kawakami, "VLBI상관서비스시스템 시작품의 개발에 관한 연구," 천문학논총, 제24권, pp. 1-17, 2009.
- [4] Takahashi F., Kondo T., and Koyama Y., *Very Long Baseline Interferometer*, Ohmsha, pp. 35-55, 2000.
- [5] 한국천문연구원, "VLBI상관서비스시스템 설계규격서," pp. 1-47, 2009.
- [6] Satoru Iguchi, Takeshi Okuda, "The FFX Correlator," Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 60, pp. 857-869, 2008. August 25.
- [7] Tomoaki Oyama 외 7명, "The development and performance of a new 4Gbps disk recorder and eVLBI systems using a 10GbE network," 2008 General Meeting of IVS, pp. 68, 2008. 3.
- [8] 염재환, 오세진, 노덕규, 강용우, 박선엽, 이창훈, 정현수, "한일공동VLBI상관기를 위한 소프트웨어 상관기 개발," 한국우주과학회지 제26권, 제4호, pp. 1-22, 2009.
- [9] Hideyuki Kobayashi 외 18명. "VERA: A New Instrument Free from the Atmosphere," in ASP Conf. Ser., 306, in New Technologies in VLBI, ed. Y.C. Minh (San Francisco: ASP), pp. 367-371, 2003.



**오 세 진(Se-Jin Oh)**

**正會員**

1996년 2월 영남대 전자공학과(학사)  
1998년 2월 영남대 전자공학과(석사)  
2002년 2월 영남대 전자공학과(박사)  
2001년 9월 ~ 2002년 12월 대구과학대학 교수  
2010년 6월 ~ 2011년 5월 한국천문연구원 그룹장

2002년 12월 ~ 현재 한국천문연구원 선임연구원

※주관심분야 : 디지털신호처리, 천문관측기기개발



**노 덕 규(Duk-Gyoo Roh)**

1985년 2월 서울대 천문학과(이학사)  
1994년 8월 동경대 천문학과(이학석사)  
1997년 8월 동경대 천문학과(박사수료)  
1985년 4월 ~ 현재 한국천문연구원 책임연구원  
2005년 11월 ~ 2009년 3월 한국천문연구원 그룹장

※주관심분야 : 전파천문, VLBI상관처리



**염 재 환(Jae-Hwan Yeom)**

2005년 8월 한양대 정밀기계공(석사)  
2005년~현재 한국천문연구원 선임연구원  
※주관심분야 : 디지털신호처리, DSP & FPGA  
응용



**Tomoaki Oyama**

1995년 3월 치바대학 전자공학(공학사)  
2001년 3월 동경대 천문학과(이학석사)  
2005년 3월 동경대 천문학과(이학박사)  
1995년-2005년 일본국립천문대 VERA 연구원  
2005년 4월 ~ 현재 일본국립천문대 연구원

※주관심분야 : 전파천문, VLBI상관처리



**박 선 엽(SunYeop Park)**

1996년 2월 연세대 물리학과(학사)  
2001년 2월 연세대 천문우주학과(석사)  
2011년 3월 ~ 현재 충북대학교 연구원  
※주관심분야 : 관측천문학, 탐사망원경, 소프트  
웨어 개발



**강 용 우(Yong-Woo Kang)**

1988년 2월 부산대 기계설계과(학사)  
1990년 2월 부산대 지구과학과(석사)  
2000년 2월 부산대 지구과학과(박사)  
2006년 12월 ~ 현재 한국천문연구원 선임연구원  
※주관심분야 : 관측기기개발, 성단연구



**Noriyuki Kawaguchi**

1997년 3월 일본전기통신대(공학박사)  
종합연구대학원대(SOKENDAI) 교수  
2010년 4월~현재 일본국립천문대 VERA 관측소 소장  
※주관심분야 : 전파천문, VLBI관측기기 개발



**Hideyuki Kobayashi**

일본나고야 대학 천문우주학과(이학박사)  
일본국립천문대 VERA 관측소 소장 역임  
동경대학교 천문학과 교수  
2010년 4월~현재 일본국립천문대 부대장  
※주관심분야 : 전파천문, Astrometry



**Kazuyuki Kawakami**

Elecs Industry Co. Ltd. 기술부장  
※주관심분야 : 전파천문 관측기기개발,  
VLBI상관기