

SiO MASERS의 VLBA 이미지를 이용한 KVN 이미지 모의실험 IMAGE SIMULATIONS FOR THE KVN USING THE VLBA IMAGE OF SiO MASERS

이지윤¹, 정태현^{1, 2}

¹ 한국천문연구원

² 과학기술연합대학원대학교

JIYUNE YI¹ & TAE-HYUN JUNG^{1, 2}

¹ Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

² University of Science and Technology, Daejeon 305-333, Korea

E-mail: jiyune@kasi.re.kr

(Received November 12, 2008; Accepted December 8, 2008)

ABSTRACT

We present the results of image simulations of 43.1 GHz SiO maser emission toward a Mira variable using the KVN (Korean VLBI Network) and other facilities which can make joint VLBI experiments with the KVN. To test the imaging capability of the KVN we used the image of SiO masers in the simulation obtained by the VLBA, which is considered to be the optimum VLBI facility at present to study SiO masers toward evolved stars. The simulated images of SiO maser emission confirm that coordinate VLBI experiments of KVN with several more stations in Japan or in the neighborhood of Korean Peninsula are necessary to exert the functional benefit of the KVN as the first mm VLBI facility which can perform simultaneous observations at four different frequency bands.

key word: Korean VLBI Network; interferometer; image simulation; masers

1. 서론

한국우주전파관측망(Korean VLBI Network; 이하 KVN)은 국내 최초의 초장기선 간섭계 (Very Long Baseline Interferometry, 이하 VLBI) 시설로서 21 m 직경의 3기의 안테나를 서울, 울산, 제주에 설치하여 운영하는 시스템이다. KVN은 2008년에 3기의 안테나 건설을 완료하고 (김효령 외 2007) 2009년 시험관측을 거쳐 2011년 이후에는 본격적으로 정상적인 VLBI 관측을 시작할 예정이다. KVN은 세계 최초로 다파장 동시관측이 가능한 mm 대역의 간섭계 시설로서 기존의 VLBI 시설들이 구현할 수 없었던 관측을 가능하게 해줄 것으로 기대되고 있다.

만기형 항성의 대기과 외피(stellar envelope)에서 발생하는 MASER(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, 이하 메이저)선들은 다파장 동시관측이 가능한 KVN의 특성을 최대한 이용할 수 있는 핵심연구과제의 하나로 거론되고 있다. 일반적으로 항성형 메이저(stellar MASERS)선들은 주로 SiO, H₂O 와 OH 분자들에서 발생하는데, 이들을 이용한 VLBI 다파

장 동시관측은 별 사멸과정에서의 물질방출과정을 종합적으로 이해하는데 결정적인 정보들을 제공할 수 있을 것으로 기대 된다. 따라서 KVN 관측 대역에 들어오는 SiO 메이저선들과 H₂O 메이저선을 이용한 관측연구는 KVN의 핵심연구과제로서 논의되어 왔다. 특히 KVN 관측과장 대역 내에서 4개의 메이저 천이선들이 존재하는 SiO 메이저에 대한 관측연구는 핵심연구과제 중에서도 비중이 매우 큰 연구주제로 검토되고 있다.

SiO 메이저는 점근거성가지성(Asymptotic Giant Branch Stars) 들과 초거성이 주요 관측원으로 알려져 있다. 점근거성가지성에 해당하는 장주기변광성(Long Period Variable)은 맥동현상에 따른 결과로 매우 팽창된 대기층을 형성하게 되는데, SiO 메이저선들은 이러한 확장대기(extended atmosphere)의 외곽지역에서 일반적으로 발생하는 것으로 관측됨으로써(Greenhill et al. 1995; Kembell & Diamond 1997; Boboltz et al. 1997), 이 지역의 역학적 성질을 규명하는데 있어서 SiO 메이저의 VLBI 관측은 독보적인 연구수단으로 알려지고 있다(Yi et al. 2002; Diamond & Kembell 2003).

7 mm 와 3 mm 대역에서 강한 방출선들을 보이는 SiO 메이저선들은 그 발생과정이 비열적(nonthermal) 이기에, 메이저 발생지역의 물리적 특성을 파악하기 위해서는 여러 개의 SiO 메이저 천이선들에 대한 관측과 이들에 대한 발생기작(maser pumping mechanism) 연구가 선행되어야하고 그 결과는 다시 관측적으로 확인될 수 있어야 한다. 7 mm 대역에서는 두개의 강한 천이선들이 42.8 GHz 와 43.1 GHz에서 방출되는데 VLBI 관측으로 얻어지는 이 두 메이저 방출선들의 초정밀 구조 및 서로간의 위치 등은 메이저 발생기작을 연구하는데 결정적인 단서를 제공할 수 있는 것으로 알려지면서 이들에 대한 동시관측의 중요성이 강조되고 있다(Miyoshi et al. 1994; Humphreys 2002 and references therein). 유사한 경우로서 43.1 GHz 와 3 mm 대역의 86.2 GHz에서의 메이저 방출선들에 대한 VLBI 관측연구도 주목받고 있으나(Phillips et al. 2003) 관측연구결과는 매우 드문 실정이다.

미국의 VLBI 전용 시설인 VLBA(Very Long Baseline Array)를 사용한 두 파장에서의 메이저선 동시관측 연구결과(Yi et al. 2005; Cotton et al. 2004, 2006) 또는 Diamond & Kemball (2003)에 의한 Mira 변광성 TX Cam에 대한 VLBA 모니터링 등은 SiO 메이저가 전체적으로 별을 중심으로 고리의 형태를 이루고 있음을 잘 보여주고 있는데, 이러한 메이저 고리(maser ring)구조는 별의 맥동주기에 따라 수축, 팽창, 소멸 등의 역학적 변화를 반복하고 있음을 잘 보여준다. 그러나 구체적으로 7 mm 와 3 mm 대역의 천이선들이 보이는 상대적인 위치 파악을 위한 관측연구는 개별적 천체를 대상으로 수행되었을 뿐 통계적인 자료를 바탕으로 하는 공통적 성질에 대한 연구는 미진한 상태이다. 또한, 관측되고 있는 메이저의 역학적 구조변화 역시 별의 동역학적 모델과는 차이가 있어(Humphreys et al. 2002 and references therein; Cotton et al. 2002, 2006) 계속적인 연구가 필요하다. 따라서 물질방출 현상에 따른 별의 사멸 과정에 대한 총체적인 이해를 도모하는 연구는 미개척 분야로 남아있다.

앞서 언급된 부분적인 연구결과들은 대부분 VLBA를 이용한 것인데 SiO 메이저선들을 이용한 다파장 동시관측연구는 여러 가지 제한이 따르고 있어 (Phillips et al. 2003; Yi et al. 2005) 7 mm 와 3 mm 대역의 천이선들에 대한 동시 관측이 가능한 KVN은 이들 연구에 대한 독보적인 시설로서의 가능성을 보이고 있다. 그러나 기존의 안정적인 VLBI 시설들이 1000 km 이상의 장기선과 여러 개의 기선을 보유한 시설인 반면에 기선 3개, 기선길이 300 km ~ 500 km로 한계가 있는 KVN으로서는 메이저 이미지의 질적 향상을 위해 장기선(long baseline)을 지닌 추가적인 VLBI 시설의 공동관측이 필

요하다. 일본의 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry)는 20 m 직경의 4기의 안테나로 구성된 1000 ~ 2000 km의 비교적 긴 기선을 지닌 VLBI 시설로서 짧은 기선으로 이루어진 KVN과는 상호보완적인 역할이 가능하여 공동관측 연구에 대한 협의가 꾸준히 진행되고 있다.

본 연구에서는 KVN의 이미징 능력을 검토하고 그 한계에 대한 대안으로써 VERA와 그 밖의 다른 시설들이 가상적으로 공동관측을 수행하는 경우들을 모의실험으로 다루어본다. 또한 미래에 KVN이 확장될 수 있는 경우에 대비하여 새로운 KVN (Expanded KVN)에 대한 이미지 모의실험도 수행한다. 모의실험에 사용되는 이미지는 Yi et al. (2005)에 의해 VLBA 관측을 통해 얻어진 Mira 변광성, TX Cam의 43.1 GHz SiO 메이저 방출선 이미지로 메이저 고리구조가 매우 선명하게 나타나며 메이저 덩어리 (clump) 들이 고리구조상에서 고르게 분포되어 있어 모의실험결과를 비교분석하는데 적합한 이미지로 판단된다. 2장에서는 모의실험에 대한 소개를 다루고, 3장에서는 결과와 비교분석, 4장에서는 결론을 제시한다.

2. 이미지 모의실험

2.1 모의실험 개요

VLBI 가상관측 이미지 모의실험은 최적의 성능을 구현할 수 있는 안테나 구성을 알아보거나, 다양한 안테나 구성에 따른 이미징 능력 및 특성을 파악하기 위한 사전 연구로서 적절하다(Jung et al. 2005).

모의실험은 전파간섭계의 보편적인 자료처리 프로그램인 AIPS(Astronomical Image Processing System)를 이용하였다. AIPS 패키지의 UVCON 태스크는 입력된 이미지나 클린 콤포넌트(Clean Component) 정보를 이용하여 사용자에게 의해 주어지는 각 안테나의 위치좌표로부터 가상의 UV 데이터를 만들고 이를 AIPS 표준 UV 데이터 파일형식으로 저장한다(Kogan, AIPS 매뉴얼). 이렇게 생성된 UV 데이터의 Dirty 이미지는 안테나 구성과 관측시간으로부터 얻어지는 UV 궤적(u-v coverage)에 따른 Dirty 빔과 관측 천체의 모델 정보를 콘볼루션(Convolution)하여 얻어진다. 이후, 전파간섭계의 일반적인 자료처리 과정으로 Dirty 이미지로부터 실제 천체의 플럭스를 deconvolution하는 과정인 CLEAN 작업을 수행하면서 클린 콤포넌트들을 찾아낸다. 이렇게 얻어낸 클린 콤포넌트 정보들을 이상적인 합성빔 형태인 클린 빔(clean beam)과 합성하여 잔여(residual) 이미지와 결합 시킴으로써 최종적으로 구하고자하는 클린 맵(clean map)을 얻을 수 있게 된다.

표 1. 모의실험에 사용된 전파망원경

전파망원경 이름 (가상위치)*	안테나 직경(m)	위도 (° ' " N)	경도 (° ' " E)	비고
Korean VLBI Network (KVN)				한국우주전파관측망
KVN Yonsei	21	37 33 44	126 56 35	KVN 연세천문대
KVN Ulsan	21	35 32 22	129 15 04	KVN 울산천문대
KVN Tamna	21	33 17 18	126 27 43	KVN 탐라천문대
VLBI Exploration of Radio Astrometry (VERA)				일본 VERA
VERA Mizusawa	20	39 08 06	141 08 00	"
VERA Iriki	20	31 44 52	130 26 24	"
VERA Ogasawara	20	27 05 30	142 13 00	"
VERA Ishigaki-jima	20	24 24 44	124 10 15	"
Taeduk Radio Astronomy Observatory (TRAO)	14	36 23 53	127 22 19	대덕전파천문대
Nobeyama Radio Observatory (NRO)	45	35 56 29	138 28 32	일본
Kashima Radio Telescope (KRT)	34	35 57 51	140 39 36	일본
UN World Peace Center (UNWPC)*	21	42 33 25	130 39 43	북한, 중국, 러시아 접경지역
중국 산둥 반도 장보고 기념비 (CHINA)*	21	36 54 53	122 21 13	중국 산둥 반도

* UNWPC와 CHINA는 모의실험을 위한 가상의 관측 시설로서 이들이 대표하는 이름으로 관측지점에 대한 정보를 나타내었다.

표 2. VLBI 가상관측 모의실험의 안테나 구성 및 이미지 파라미터

ID	안테나 네트워크 구성	안테나	최장기선	43GHz 합성빔 크기			셀 크기*
		개수	거리(km)	bmaj,	bmin,	bpa (mas)	(mas/pixel)
1	KVN	3	480	2.64	1.84	-82.24	0.5
2	KVN+ VERA	7	2300	0.69	0.62	-66.38	0.014
3	KVN+ TRAO	4	480	2.90	1.86	-83.48	0.5
4	KVN+ TRAO+ VERA	8	2300	0.71	0.64	-66.94	0.14
5	KVN+ VERA+ NRO+ KRT	9	2300	0.66	0.54	-42.79	0.15
6	KVN+ TRAO+ VERA+ NRO+ KRT	10	2300	0.66	0.56	-40.28	0.15
7	KVN+ TRAO+ VERA+ UNWPC+ CHINA	10	2300	0.59	0.54	84.78	0.15
8	KVN+ TRAO+ UNWPC+ CHINA	6	1100	1.53	1.10	-72.39	0.28

* 셀 크기는 이미지의 한 픽셀에 해당하는 분해능으로써 일반적으로 합성빔 크기의 1/4 ~ 1/6 정도로 설정한다.

본 모의실험에서는 3기의 KVN 안테나만을 사용하였을 경우와, 서론에서 언급되었던바와 같은 추가적인 VLBI 망원경들을 사용한 가상공동관측에 대한 실험이 이루어졌다. 또한 확장된 KVN (Expanded KVN)에 대한 가상관측 모의실험 및 참여가 가능한 모든 VLBI 관측 시설이 공동관측을 하는 경우에 대한 모의실험이 진행되었다. 모의실험에 사용된 망원경에 대한 기본적인 특징 및 위치는 표 1과 같다.

2.2 TX Cam에서 관측된 SiO 메이저의 VLBI 모의실험

Yi et al. (2005)의 TX Cam 43.1 GHz SiO 메이저선에 대한 관측이미지를 바탕으로 표 2와 같은 VLBI 관측 네트워크들에 대한 이미지 모의실험을 수행하였다. 7 mm 대역에서 VLBI 관측이 가능한 망원경으로서는 KVN과 향후 VLBI 관측 망원경으로서 전환이 가능한 대덕전파천문대(이하 TRA0), 그리고 일본의 VERA 및 노베야마 45 m 전파망원경, 카시마 34 m 전파망원경이 있다. 그리고 향후 확장된 KVN으로서의 가상천문대로는 유엔세계평화센터(이하 UNWPC, 3.2절 참조) 및 중국 산둥반도에 위치한 장보고 기념비 인근(이하 CHINA, 3.2절 참조)으로 그 위치를 설정하여 네트워크를 구성하였다 (표 2).

VLBI 모의실험을 위해 사용된 TX Cam의 SiO 이미지는 메이저 극대기에 관측된 $v=1, J=1-0$ 방출선의 이미지로서 많은 SiO 메이저 덩어리들이 고리의 형태로 분포된 구조를 보인다(그림 1). TX Cam의 관측일은 2001년 1월 6일, 관측시간은 2시 31분에서 7시 31분 (UT)이며, 이때 복원 빔(restoring beam)의 크기는 약 0.5×0.2 milli-arcsecond(이하 mas)이다. 모의실험을 위하여 사용된 입력 이미지는 각 속도성분에 해당하는 채널들의 메이저원들을 모두 합하여 단일 채널에 나타나도록 만든 스쿼시(squash)된 이미지를 이용하였다.

표 3에서는 TX Cam의 VLBI 모의실험에서 가상관측의 비지빌리티 데이터를 만들기위해 사용된 설정값을 나타내었다. 관측 파장은 SiO 메이저의 $v=1, J=1-0$ 천이선의 43.122027 GHz이며, 관측시간은 기준 안테나(reference antenna)의 자오선을 중심으로 -5시간 에서 +5시간의 총 10시간 동안 가상관측을 수행하도록 설정하였다. 이때 관측 가능한 천체의 최소 고도는 10도, 적분시간은 43 GHz에서 대략적인 코히어런스 시간(coherence interval)인 10초, 관측 대역폭은 128 MHz로 설정하였다.

VLBI 가상관측 모의실험은 AIPS 패키지에서 다음과 같은 6 단계의 과정을 거친다. 괄호 안은 입력파일 및 해당 자료처리 과정에서의 AIPS 태스크이다.

표 3. 가상관측 설정 파라미터

항목	설정값
관측파장 (λ)	$V=1$ 43.122027 GHz
관측천체의 적위(δ)	56.1818 도
최소 관측 시간각*	-5 시간
최대 관측 시간각*	+5 시간
관측 최소 고도	10 도
적분시간	10 초
관측 대역폭	128 MHz

* 관측 시간각은 각 관측 네트워크의 기준 안테나를 중심으로 천체를 관측하는 시간각이다.

1. VLBI 관측 안테나 구성 (입력 텍스트 파일)
2. 관측 대상 이미지 불러오기 (FITLD)
3. 가상관측 UV 데이터 생성 (UVCON)
4. Dirty 맵 만들기 (IMAGR)
5. CLEAN - 클린 콤포넌트 찾기 (IMAGR)
6. Clean 맵 만들기 (IMAGR)

안테나 구성에 관한 입력 파일에서는 전체 가상관측에 사용되는 안테나의 개수, 기준안테나의 좌표 및 좌표변환 계수, 각 안테나의 좌표(X, Y, Z) 및 안테나 직경, 안테나 효율, 시스템온도(Tsys), 아날로그 신호의 디지털 변환 레벨 등의 정보를 입력한다. 본 모의실험에서는 일관성 유지를 위하여 시스템 온도 및 대기에 의한 영향을 고려하지 않았다.

UVCON에서는 안테나 입력파일과 관측 대상 이미지로부터 가상의 비지빌리티 데이터를 만들어내고, 이에 위의 4~6 단계에 해당하는 이미징 과정을 거쳐서 최종적 이미지가 만들어진다. 본 VLBI 모의실험에서는 모두 동일한 이미지크기 1024x1024 픽셀을 설정하였으며, 이미징 과정에서 사용한 각 관측 네트워크에 따른 합성 빔의 크기 및 셀 크기는 표 2에 정리된 바와 같다.

3. 결과분석

VLBA 관측으로 얻어진 $v=1, J=1-0$ SiO 메이저선의 총 강도(total intensity)를 등고선의 형태로 나타낸 이미지(contour map)가 그림 1에 제시되어 있다. VLBA는 25 m 직경으로 이루어진 10대의 안테나들이 하와이(Mauna Kea, Hawaii)에서 북미대륙을 거쳐 버진 군도 (St. Croix, Virgin Islands)까지 분포하며 기선길이가 236 km ~ 8611 km가 되는 VLBI 전용 관측시설이다. 만기형 별의 SiO 메이저는 1990년대 초반에 유럽의 VLBI 시설을

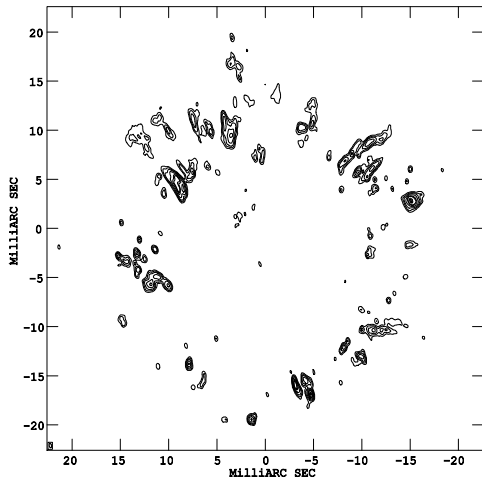


그림 1. VLBA 관측 이미지

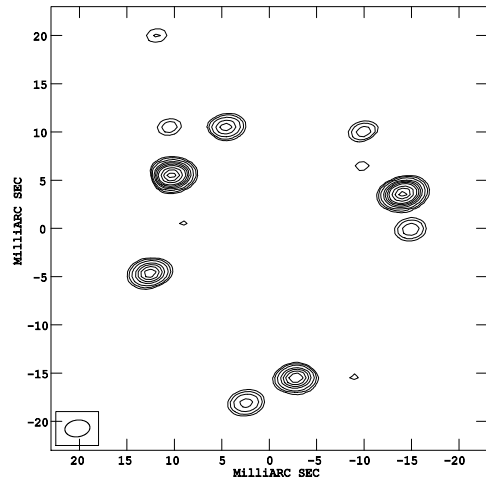


그림 2. KVN 관측에 대한 가상이미지

이용한 관측을 통해 조밀한(compact) 구조를 보이는 것으로 알려지면서(Colomer et al. 1991) 본격적인 VLBI 관측대상이 되었다. 현재까지는 VLBA가 만기형 별들의 SiO 메이저를 관측하는데 최적화된 시설로 사용되고 있다.

그림 1의 이미지에서 가상이미지 실험결과에 대한 비교분석에 기준이 되는 특성들을 살펴보면, 먼저 전체적인 구조로서 SiO 메이저가 고리형태(maser ring)를 선명히 보이고 고리 전체에 메이저 덩어리들이 고르게 분포되어있음을 볼 수 있다. 고리의 두께는 대부분(25% ~ 75%)의 메이저 플럭스를 보이는 영역이 약 3 mas 정도이며 고리의 전체 크기는 (총 플럭스의 약 90%를 포함하는) 최대 ~ 34 mas로 측정되었다(Yi et al. 2005). 각각의 메이저 덩어리들의 특성으로는 대체적으로 조밀한 구조를 지니면서도 고리의 북쪽 바깥쪽 영역으로 플럭스가 약하며 다소 넓게 퍼져있는(extended features) 모습을 보이는 것이다. 고리의 북쪽 영역, 특히 2시 방향 쪽에서 두드러진 수레바퀴살 모양(spoke like features)의 구조를 가진 메이저 덩어리들이 특징적이다.

3.1 KVN 및 KVN과 대덕전파망원경의 관측

그림 2는 KVN을 이용한 모의실험 결과이다. 7 mm 대역에서 최대분해능이 약 3 mas 정도가 되는 KVN으로서는 VLBA 관측 이미지에서 보였던 1~2 mas 또는 그보다 작은 메이저 덩어리들의 초정밀구조를 복원할 수 없었으나 밝은 메이저 덩어리들로 구성된 전체적인 고리구조를 선명히 보여주고 있다. VLBA에서 밝고 비교적 조밀(compact)한 구조를 보인 메이저 덩어리들은 합성빔과 유사한 형태로 보이는 수준으로 복원되었고 플

럭스가 약하면서 수 mas 영역에 퍼져있는 메이저 구조들은(메이저 고리구조의 북쪽 영역) 복원되지 않았다.

그림 3은 KVN과 대덕전파천문대(이하 TRA0)의 14 m 망원경을 함께 사용하는 경우의 모의실험결과이다. A로 표시된 메이저 덩어리는 그림 2에서는 보이지 않았던 구조로서 VLBA에서 보인 2시 방향의 수레바퀴살 모양의 구조가 뺀 방향과 일치하면서 그 흔적을 보이기 시작한다. B로 표시된 메이저 덩어리는 KVN 단독 관측에서는 (그림 2) 복원되지 않았던 플럭스가 복원되면서 합성빔 크기 정도의 넓게 퍼진 하나의 메이저 덩어리로 보이는 것을 알 수 있다. 이 메이저 덩어리가 보이는 지역에 대한 VLBA 관측 이미지는 (그림 1) 따로 떨어져 있는 하나의 밝은 메이저 덩어리와 여러 개의 작은 메이저원 들이 모인 군락을 보이고 있다.

이상에서 보듯이 VLBA 이미지에서 볼 수 있는 것과 같은 초정밀구조를 보기에는 KVN이 매우 제한적임을 알 수 있다. TRA0가 KVN과 함께 관측하는 경우에는 전체적인 이미지 구조는 큰 변화가 없으나, 부분적으로는 메이저 덩어리 구조에서 구체적인 윤곽을 조금씩 보이기 시작하면서 향상된 이미징 능력을 볼 수 있었다. 특히 넓게 퍼진 약한 플럭스의 메이저 구조는 VLBA의 최단기선 (236 km)으로도 분해되어버려서 그보다 짧은 기선을 필요로 하는데 (Yi et al. 2005), TRA0의 합류로 최단기선이 약 135 km까지 줄어들게 되어 KVN이 다른 시설들과 공동관측을 할 경우 단기선 확보에 필수적인 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 KVN과 국제공동관측

앞서 언급된바와 같이 기선수와 기선길이에 있어서 한계가 있는 KVN이 VERA와 공동관측을 할 경우, 기선

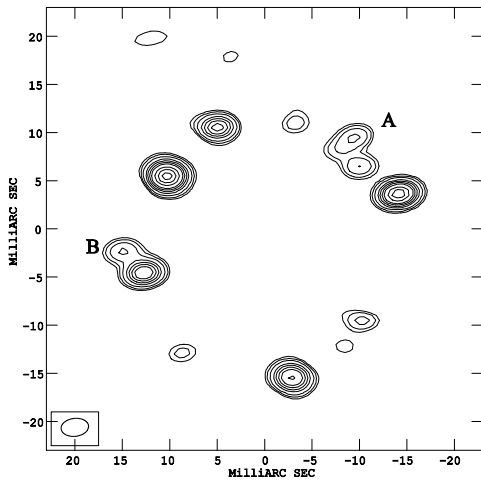


그림 3. KVN과 TRAO의 공동관측에 대한 가상이미지

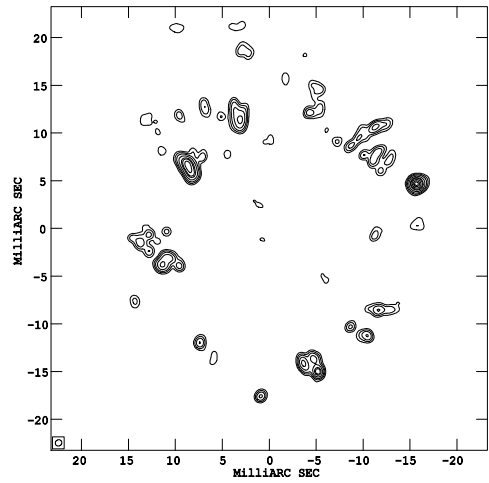


그림 5. KVN, VERA, TRAO의 공동관측에 대한 가상이미지

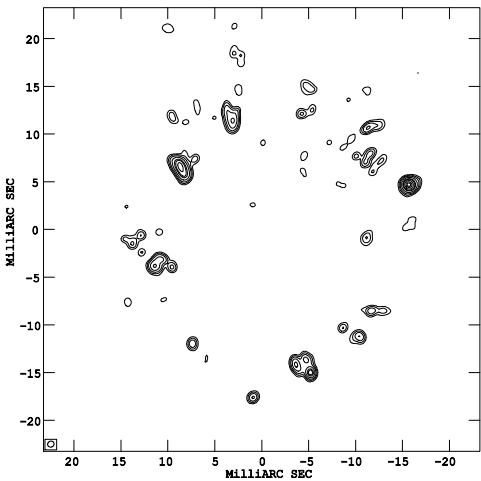


그림 4. KVN과 VERA의 공동관측에 대한 가상이미지

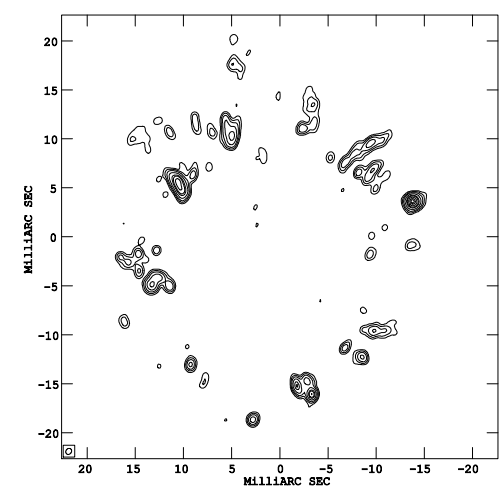


그림 6. KVN, TRAO, VERA, Nobeyama, Kashima의 공동관측에 대한 가상이미지

21개, 최장기선 ~2300 km로 확장이 가능해짐으로써 이미지의 질적 향상을 크게 기대할 수 있다. 그림 4는 공동관측에 대한 모의실험결과를 보이는데 KVN 단독 또는 KVN과 TRAO의 관측에 비해 매우 향상된 이미지를 볼 수 있다. VLBA 이미지와 비교하였을 때 VLBA의 자세하고 조밀한 구조까지 복원되지는 않았으나 KVN 단독관측에서는 볼 수 없었던 플럭스가 약한 메이저 덩어리들이 많이 나타나기 시작하였고 수레바퀴살 구조의 메이저 덩어리도 그 윤곽을 더 잘 보이고 있다.

그림 5는 KVN과 VERA의 공동관측에 TRAO가 함께 참여하는 경우의 결과이다. 300 km 이하 단기선의 추

가와 기선 수 28개로의 증가로 VLBA 이미지에서 보이는 초정밀 구조의 대부분을 유사하게 재현하고 있다. 약한 플럭스의 넓게 퍼진 구조를(메이저 고리의 북쪽 영역) 제외한 대부분의 메이저 덩어리들이 선명하고 자세한 구조를 보이고 있다.

단일경인 TRAO의 VLBI 관측참여로 이미징 능력의 향상을 볼 수 있었는데, 일본에서 비정규적으로 VLBI 관측 참여가 가능한 직경 45 m의 노베야마(Nobeyama) 망원경과 직경 34 m의 카시마(Kashima) 망원경이 VLBI 관측에 합류할 경우 집광력 및 UV 궤적 향상으로 더욱 향상된 이미징 능력을 기대할 수 있다. 그림 6은 KVN,

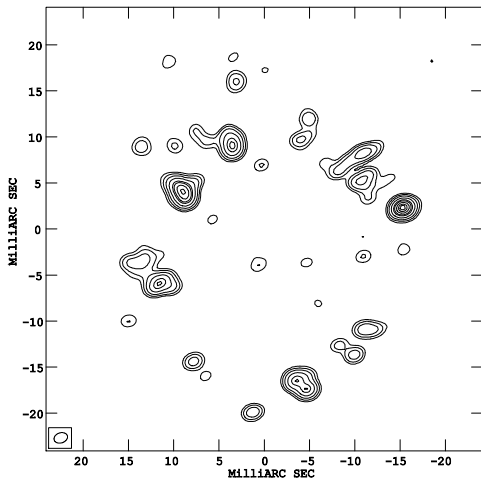


그림 7. E-KVN 에 대한 가상이미지

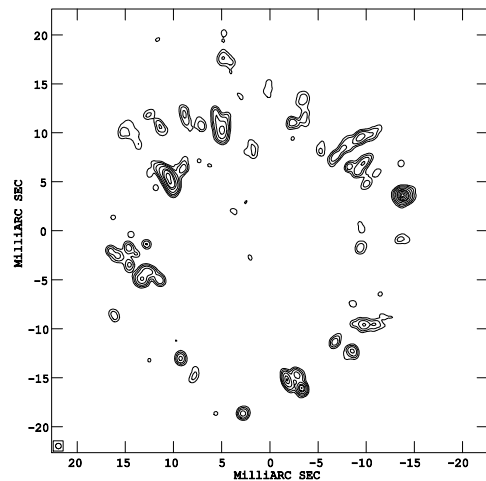


그림 8. E-KVN, TRA0, VERA의 공동관측에 대한 가상이미지

TRA0, VERA와 함께 노베야마와 카시마 망원경이 공동관측에 참가할 경우의 이미지 모의실험결과를 보여준다. 이 경우 총 10개의 안테나가 VLBI에 참여하게 됨으로써 VLBA와 같은 45개의 기선과 2000 km이상의 장기선을 확보할 수 있게 되고, 앞서 언급된 바와 같이 UV 궤적 및 집광력의 향상으로 가상이미지 역시 VLBA로 관측하였을 경우와 비교하여 거의 차이가 없는 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

3.3 E-KVN (Expanded KVN)

안테나 3기라는 작은 규모로 시작된 KVN은 프로젝트 기획당시부터 확장건설에 대한 논의가 있었는데 (Minh et al. 2003), 추가 건설지역으로 북한 함경북도과 황해도 지역 등이 검토되었다. 그러나 확장시설의 건설을 한반도 이내로 한정할 경우 UV 궤적을 최적화하는 장기선 확보에 여전히 한계가 있고, 북한지역에 망원경을 건설하고 운영해야하는 어려움이 따른다. 따라서 본 모의실험에서는 향상된 UV 궤적 형성이 가능한 장기선을 확보할 수 있고, 현실적으로 접근 가능성 또한 크다고 판단되는 두 지역(표 1. UNWPC와 CHINA 참조)을 가상의 안테나 위치로 설정하였다. UN 세계평화센터 (UNWPC)는 두만강 하류, 북한, 중국, 러시아 3국의 접경 지역에 정치적으로 독립적인 부지를 토대로 그 조성이 진행 중인 프로젝트(최민자 2007; <http://www.unwpc.net>)로서, UNWPC 내의 교육지구로 예정된 지역을 함경북도 지역을 대신하는 E-KVN의 한 사이트로 설정하였다. 황해도 지역을 대신하여서는 중국 산둥 반도에 건립된 장보고 기념비(최민자 2003)가 위치한 인근 지

역을 설정하였다.

그림 7은 이들 두 지역을 가상의 E-KVN 사이트로 설정하여 모의실험 한 결과이다. KVN과 TRA0가 관측하였을 경우(그림 3)와 비교하였을 때 E-KVN (5기의 E-KVN 안테나와 TRA0의 관측참여)의 가상이미지는 메이저 덩어리 각각의 구조적 특징을 볼 수 있는 매우 향상된 이미징 능력을 보여준다. 복원되지 못한 조밀한 구조의 작은 메이저 덩어리들은 추가적인 장기선의 보완이 필요함을 나타낸다.

마지막으로 그림 8은 TRA0를 포함한 E-KVN과 VERA가 모두 관측에 참여했을 경우에 대한 모의실험 결과를 나타내는데 VLBA의 이미징 능력과 차이를 거의 볼 수 없는 매우 만족스러운 결과를 보여준다.

4. 결론

본 연구는 만기형 별의 대기외곽에서 방출되는 7 mm 대역의 SiO 메이저에 대한 KVN의 이미징 능력을 구체적으로 검토하기위한 모의실험이었다. 가상이미지 모의실험에서는 VLBA를 이용한 Mira 변광성, TX Cam의 43.1 GHz SiO 메이저 이미지를 사용하였다. KVN 단독 관측으로 진행되었을 경우와, KVN의 한계를 극복하기 위한 대안으로서 다른 시설들과 공동관측을 수행하였을 경우에 대하여 모의실험을 수행하였고, 그 결과를 아래와 같이 요약하였다.

1. KVN의 단독관측으로는 기본적인 SiO 메이저 고리구조의 전체적인 윤곽에 대한 복원이 가능하였으나 각각의 메이저 덩어리들이 보이는 정밀구조나 약한 방출을 보인 메이저원들은 복원되지 않았다.

2. KVN과 TRAO의 공동관측은 KVN 단독관측에서 볼 수 없었던 수레바퀴살 구조의 메이저 덩어리가 그 모양을 드러내기 시작하였다.
3. KVN과 VERA가 공동관측을 하는 경우에는 각각의 메이저 덩어리들이 VLBA 관측 이미지 수준으로 그 형태를 보이기 시작했으나 약한 플럭스의 메이저 원들은 흔적만이 나타나는 정도로 복원되었다. 이들에 TRAO가 더해진 경우에는 약한 플럭스의 넓게 퍼진 메이저 덩어리들이 그 모습을 드러내기 시작함을 볼 수 있었다.
4. 구경이 큰 일본의 단일경인 노베야마 망원경과 카시마 망원경이 TRAO를 포함한 KVN과 VERA의 공동관측에 참여하는 경우에는 VLBA와 유사한 이미징 수준을 낼 수 있을 것으로 예측되는 결과를 얻었다.
5. KVN의 확대 네트워크인 E-KVN과 TRAO로 이루어진 6기의 안테나가 관측에 참여할 경우, 메이저 덩어리들의 자세한 구조들을 볼 수 있었으나 VLBA에 버금가는 이미징 능력을 얻기 위해서는 VERA의 참여가 필요함을 보였다.

일본의 단일경인 노베야마와 카시마 망원경은 정기적인 VLBI 관측참여가 불가능한 반면에 VERA는 한국과의 정기적인 VLBI 공동관측 운영이 논의되고 있어서 앞으로 TRAO를 포함한 E-KVN과 VERA의 공동관측시스템은 만기형 별들에서의 SiO 메이저 관측연구 분야에서 최적화된 VLBI 시설로 그 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 VLBA보다 뛰어난 위상보정 능력이 특징인 KVN의 다파장 동시관측 위상보정(multi-frequency phase referencing) (Han et al. 2008) 시스템과 VERA의 듀얼 빔 위상보정(dual-beam phase referencing) (Honma et al. 2005) 시스템은 위상 흔들림(atmospheric phase fluctuation) 현상을 효과적으로 보정할 수 있을 것으로 예상되고 따라서 모의실험결과에서 보인 가상이미지 이상의 좋은 이미지를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김효령 외, 2007, 2007년도 한국우주전파관측망 구축사업결과보고서, 한국천문연구원
- 최민자, 2003, 世界人 張保阜와 地球村 經營, 도서출판 범한
- 최민자, 2007, 생태정치학: 근대의 초극을 위한 생태정치학적 대응, 도서출판 모시는 사람들
- Boboltz, D. A., Diamond, P. J., & Kemball, A. J., 1997, R Aquarii: First Detection of Circumstellar SiO Maser Proper Motions, *ApJ*, 487L, 147
- Colomer, F., Graham, D. A., Krichbaum, T. P., Ronnang, B. O., de Vicente, P., Witzel, A., Barcia, A., Baudry, A., Booth, R. S., Gomez-Gonzalez, J., Alcolea, J., & Daigne, G., 1992, Detection of Compact SiO Maser Emission at 43-GHZ Using a European Very Long Baseline Interferometer / VLBI, *A&A*, 254L, 17
- Cotton, W. D., Mennesson, B., Diamond, P. J., Perrin, G., Coudé du Foresto, V., Chagnon, G., van Langevelde, H. J., Ridgway, S., Waters, R., Vlemmings, W., Morel, S., Traub, W., Carleton, N., & Lacasse, M., 2004, VLBA observations of SiO masers towards Mira variable stars, *A&A*, 414, 275
- Cotton, W. D., Vlemmings, W., Mennesson, B., Perrin, G., Coudé Du Foresto, V., Chagnon, G., Diamond, P. J., van Langevelde, H. J., Bakker, E., Ridgway, S., McAllister, H., Traub, W., & Ragland, S., 2006, Further VLBA observations of SiO masers toward Mira variable stars, *A&A*, 456, 339
- Diamond, P. J. & Kemball, A. J., 2003, A Movie of a Star: Multiepoch Very Long Baseline Array Imaging of the SiO Masers toward the Mira Variable TX Cam, *ApJ*, 599, 1372
- Greenhill, L. J., Colomer, F., Moran, J. M., Backer, D. C., Danchi, W. C., Bester, M., 1995, Interferometric Observations of the SiO Masers and Dust Shell of VX Sagittarii, *ApJ*, 449, 365
- Han, S.-T., Lee, J.-W., Kang, J., Je, D.-H., Chung, M.-H., Wi, S.-O., Sasao, T., & Wylde, R., 2008, Millimeter-wave Receiver Optics for Korean VLBI Network, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 29, 69
- Honma, M., et al. 2003, First Fringe Detection with VERA's Dual-Beam System and Its Phase-Referencing Capability, *PASJ* 55, L57
- Humphreys, E. M. L., 2002, Cosmic Masers: From Proto-Stars to Black Holes, in *Proc. IAU Symp.*, SiO masers in red giants, 206, 266
- Jung, Tae-Hyun, Rhee, Myung-Hyun, Roh, Duk-Gyoo, Kim, Hyun-Goo, Sohn, & Bong-Won, 2005, Imaging Simulations for the Korean VLBI Network (KVN), *JASS* 22,1
- Kemball, A. J., Diamond, P. J., 1997, Imaging the Magnetic Field in the Atmosphere of TX Cam, *ApJ*, 481, 111

- Minh, Y. C., Roh, D.-G., Han, S.-T., & Kim, H.-G., 2003, New technologies in VLBI, ASP Conf. Ser. Vol., Construction of the Korean VLBI Network (KVN), 306, 373
- Miyoshi, M., Matsumoto, K., Kamenno, S., Takaba, H., Iwata, T., 1994, Collisional Pumping of SiO Masers in Evolved Stars, *Nature*, 371, 395
- Phillips, R. B., Straughn, A. H., Doeleman, S. S., Lonsdale, C. J., 2003, R Cassiopeiae: Relative Strengths of SiO Masers at 43 and 86 GHz, *ApJ*, 588L, 105
- Yi, Jiyune, Booth, R. S., Conway, J. E., Winnberg, A., & Diamond, P. J., 2002, Cosmic Masers: From Proto-Stars to Black Holes, in Proc. IAU Symp., VLBA observations of the 7mm SiO masers in TX Cam and R Cas, 206, 274
- Yi, Jiyune, Booth, R. S., Conway, J. E., & Diamond, P. J. 2005, SiO masers in TX Cam. Simultaneous VLBA observations of two 43 GHz masers at four epochs, *A&A*, 432, 531