

KVN과 동아시아 VLBI 관측시설을 이용한 SiO 메이저 모델이미지 모의실험
IMAGE SIMULATIONS OF THE KVN AND EAST ASIA VLBI FACILITIES
WITH A SiO MASER MODEL IMAGE

이지윤¹, 정태현^{1, 2}

¹ 한국천문연구원

² 과학기술연합대학원대학교

JIYUNE YI¹ AND 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 30, 2009; Accepted March 03, 2010)

ABSTRACT

We report results of image simulations of the KVN and VLBI experiments of the KVN with several other East Asia VLBI facilities. To investigate their imaging capability a model-generated image of 7 mm SiO maser emission in Mira variables is used. The resulting simulations show that the joint VLBI experiments of the KVN with East Asia VLBI facilities can produce reasonably good images at 7 mm spectral line experiments. However, there are no apparent differences in peak flux densities and images themselves in the simulations among different combinations of these facilities. In addition, the simulated images of observations which include bigger antennas do not show any expected improvement to the image sensitivity. The small variations in the peak flux density and similar image sensitivity, irrespective of different antenna sizes or numbers of baselines used in the simulations, turn out due to a specific characteristic of the adopted model image. Test simulations using another SiO maser image from R Cas observations prove that the participation of bigger antennas in the VLBI experiments does improve image sensitivity. We confirm the need of additional longer baselines in the experiments of the East Asia VLBI facilities to study very compact maser clumps on sub-milliarcsecond scales.

key words: 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 2008년 3기의 안테나 건설을 완료하고(김봉규 등, 2008) 2009년 현재 각 안테나에 22 GHz 와 43 GHz 수신기를 장착하여 두 대역의 동시관측 및 VLBI 실험 등 다양한 시험관측과 내부관측이 진행 중에 있다. KVN은 세계 최초로 다과장 동시관측이 가능한 mm 대역의 VLBI 시설로서 기존의 VLBI 시설들이 구현할 수 없었던 관측을 가능하게 해 줄 것으로 기대되고 있는 반면에, 3개의 짧은 기선으로 구성된 VLBI 시설로서는 초정밀 구조에 대한 이미지 연구에 한계가 있고 이를 극복하기 위한 방안들도 함께 마련되어야 하는 실정이다.

이지윤과 정태현은(이지윤, 정태현, 2008, 이하 논문

1) KVN의 이미징 능력을 구체적으로 검토하고 그 한계에 대한 대안을 제시하기 위하여 1차적으로 미국의 초장기선 간섭계 어레이(Very Long Baseline Array, 이하 VLBA)로 관측된 SiO 메이저 이미지(Yi et al., 2005)를 이용한 모의실험을 수행하였다. 1차 모의실험에서는 KVN에 대한 가상이미징 실험과 함께, 미래의 확장된 KVN, KVN과 일본의 VLBI 시설들과의 공동관측 등에 대한 가상실험을 수행하였다. 다양한 크기와 형태의 메이저 덩어리들에 대한 각기 다른 기선수와 길이를 가진 가상의 VLBI 관측에 대한 모의실험을 통해 이들의 이미징 능력을 검토할 수 있었다. 그러나 모의실험에서 사용된 기본이미지가 VLBA라는 특정한 VLBI 시설로 관측하여 얻어진 결과이고 이를 이용한 이미징 모의실험은 VLBA의 관측적 특성이 잔존하기에 보다 객관적인 실험데이터를 이용한 모의실험에 대한 필요성이 제

표 1. 이미지 모의실험의 안테나 구성 및 이미징 파라미터

ID ⁺	안테나 구성 [#]	관측시설	안테나	최장기선	합성빔 크기 ^{**} (mas)			셀 크기
		이름 [*]	개수	(km)	bmaj	bmin	bpa	mas/pixel
1	VLBA(25)	VLBA	10	8611	0.26	0.17	-0.37	0.045
2	KVN(21)+ TRAO(14)	KT	4	480	2.90	1.86	-83.48	0.5
3	KVN(21)+ VERA(20)	KV	7	2300	0.56	0.52	-54.06	0.15
4	+ TRAO(14)	KVT	8	2300	0.57	0.55	-59.36	0.15
5	+ NOBEYAMA(45)+ KASHIMA(34)	KVNM	9	2300	0.65	0.55	-39.13	0.15
6	+ TRAO+ NOBEYAMA+ KASHIMA	KVTNM	10	2300	0.65	0.56	-35.81	0.15
7	+ TRAO+ SHANGHAI(65) ^{***}	KVTS	9	2300	0.59	0.52	-22.78	0.15
8	+ TRAO+ NOBEYAMA+ KASHIMA+ SHANGHAI	KVTNMS	11	2300	0.62	0.49	-24.49	0.15

⁺ ID 4 ~ 8은 KVN + VERA로 구성된 VLBI 시설을 기본 단위로 하여 이에 추가되는 동아시아 VLBI 관측시설의 구성을 나타낸다.

[#] 안테나 구성에서 괄호안의 숫자는 안테나 직경(미터)이며, KVN은 3기, VERA는 4기 그리고 VLBA는 10기의 안테나로 구성된 VLBI 관측시설이다.

^{*} VLBA를 제외한 관측시설 이름은 KVN과 VLBI 국제공동관측에 참여하는 시설들의 영문이름 첫 자를 사용하여(Kashima는 KVN과의 구분을 위해 M으로 표기) 하나의 VLBI 관측망으로 나타내고 표기한 이름이다.

^{**} 합성빔은 장축(bmaj)과 단축(bmin)으로 나누어 milli-arcsecond(mas)의 단위로 나타내고, 합성빔의 위치각(bpa)은 각도 단위로 제시하였다.

^{***} 중국 상해천문대의 새롭게 건설되는 구경 65 m 망원경은 2012년 건설이 완공될 예정이다(Li, 2009).

기되었다.

이에 따라 본 연구에서는 VLBA와 같은 특정한 VLBI 시설의 관측으로부터 얻어진 이미지가 아닌 SiO 메이저 모델로부터 직접 합성된 이미지를 이용하여 uv 데이터를 추출하였고 이를 모의실험에 사용하였다. 이로써 모의실험에서 사용되는 기본이미지에 특정 관측시설의 특성이 내포되는 조건을 배제하였다. 본 연구에서 사용한 SiO 메이저 이미지는 가장 최근에 메이저 모델 연구 결과를 발표한 Gray et al. (2009)의 SiO 메이저 모델에서 합성된 이미지이다.

Gray et al. (2009)의 SiO 메이저 모델은 M-type Mira 변광성의 원형적 특성을 나타내는 R Leo 변광성과, 적외선과 라디오 파장의 간섭계 관측연구가 비교적 구체적으로 이루어진 S Ori 변광성에 대한 모델(Ireland et al., 2004; Wittkowski et al., 2007)을 기본으로 하고 있다. R Leo 모델에서는 332일의 변광주기, 1.2배의 태양 질량, 약 3,500배의 태양광도, 약 260배의 태양반경 등이 기본 특성으로 채택되었고, S Ori 모델에서는 R Leo 보다 약간은 더 차가워진 별로서, 약 100일 더 길어진 평균 변광 주기와 조금 더 증가한 질량과 반경 등이 대표적 특성을 이룬다. 특히 S Ori 변광성에 대한 적외선 간섭계 관측과 VLBA 관측을 사용한 최근의 연구결과(Wittkowski et al., 2007)는 SiO 메이저가 별의 반경의

약 2배 되는 곳에 위치하고 있음을 보이면서 메이저 모델의 실제적 근거를 마련하고 있다.

KVN과 VLBI 관측이 가능한 동아시아의 주요 관측 시설들은 VLBI 관측 전용시설로 건설된 VLBA와 다르게 각각 고유의 목적으로 운영되는 VLBI 전용시설, 또는 VLBI 관측참여가 가능한 개개의 관측시설 등으로 구성되어있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 각기 다른 특성의 망원경으로 구성된 VLBI 관측에 대한 이미징 능력을 검토하기 위하여 SiO 메이저 모델에서 합성된 이미지를 기본이미지로 도입하여 보다 객관적인 모의실험의 토대를 마련하고자 하였다. 또한 구경이 큰 망원경들의 VLBI 관측참여에 따른 집광력 향상과 이에 따른 약한 플럭스의 메이저 원들에 대한 플럭스 복원능력을 구체적으로 검토하고자한다. 중국 상해천문대의 65 m 망원경은 논문 1에서는 다루지 못한 새로운 VLBI 시설로서 KVN과의 VLBI 관측에 참여할 경우 상당한 집광력향상을 기대할 수 있을 것으로 예상된다. 이는 약한 플럭스로 퍼져있는 형태의 메이저 원들에 대한 이미징 연구에 좋은 결과를 줄 것으로 기대된다. 현재 건설이 추진 중인 상해천문대의 65 m 망원경은 4 ~ 5년 이내에 건설과 시험관측 등이 수행될 계획이어서(Li, 2009) 수년 내에 동아시아 VLBI 관측시설에 합류할 것으로 예상된다. 2장에서는 모의실험에 대한 소개

표 2. 이미지 모의실험의 입력 파라미터

항목	설정값
관측주파수 (ν)	43.122027 GHz ($\nu = 1, J = 1 - 0$)
관측천체의 적위 (δ)	56.1818°
최소 관측 시간각	-5 h
최대 관측 시간각	+5 h
최소 관측 고도	10°
적분시간	10 s
관측대역폭	128 MHz

를 다루고, 3장에서는 결과와 비교분석, 4장에서는 토의 및 결론을 제시한다.

2. 이미지 모의실험

이미지 모의실험은 전파간섭계 자료처리의 보편적인 프로그램인 AIPS(Astronomical Image Processing System)를 이용하였다. 모델이미지를 이용하여 각각의 VLBI 안테나 구성에 대한 가상관측 uv 데이터를 생성하고 (UVCON 태스크; Kogan AIPS 매뉴얼), 이에 대하여 최종 CLEAN 이미지를 도출하였다. 자세한 설명은 논문 1, 또는 Jung et al. (2005)을 참조하도록 한다.

본 모의실험에서는 서론에서 언급된 Gray et al. (2009)의 만기형 별 대기에서 발생하는 SiO 메이저 방출에 대한 모델에서 합성된 이미지를 이용하였는데, 일반적으로 VLBI 관측결과들이 보이고 있는 특징을 가진 43 GHz $\nu = 1, J = 1 - 0$ SiO 메이저 이미지이다(그림 1). Gray et al. (2009)의 모델이미지는 모든 메이저 점광원(spot) 들이 태양의 260배의 반경을 갖는 별의 전파광구(Reid & Menten, 1997)상에 위치(모델 별 반경의 2.2 배 거리에 위치)하는 메이저 원들을 보여준다. 본 모의실험에서 사용한 모델이미지는 모델에서 속도성분에 따른 메이저 스펙트럼들을 단일 속도 성분으로 나타낸 1,024 x 1,024 픽셀의 이미지를 그리딩(griding)과 가중치(weighting)를 적용하여 512 x 512 픽셀 스케일로 축소하고, 메이저 고리구조가 보다 선명하게 나타날 수 있도록 배경 노이즈 값에 대한 메이저 방출 세기의 범위를 조정하였다.

표 1은 모의실험에서 사용한 VLBI 시설들의 안테나 구성, 합성빔의 크기 및 이미지에서의 셀 크기 (mas/pixel) 등을 나타낸다. 이미지 모의실험에 필요한 가상관측 입력 파라미터인 관측주파수(ν), 관측천체의

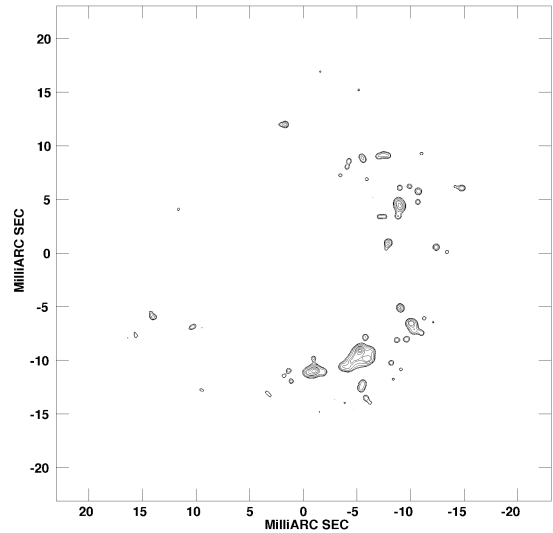


그림 1. SiO 메이저 모델 합성이미지.

적위(δ), 최소/최대 관측시간각, 최소 관측가능고도, 적분시간, 관측 대역폭 등은 표 2에 나타내었다. 실제 관측된 이미지가 아닌 메이저 모델 합성이미지를 사용하였기 때문에 관측천체의 적위 값은 논문 1에서 사용한 TX Cam과 같은 값을 설정하였다.

모의실험에서 사용된 관측시설들은 가까운 시일 내에 KVN과 VLBI 국제공동관측이 가능할 수 있는 동아시아의 VLBI 시설 또는 단일망원경으로 구성되었다. 모의실험은 또한 비교분석을 위해 그동안 SiO 메이저 관측연구에 좋은 결과들을 제공해온 VLBA에 대해서도 이루어졌다.

3. 결과분석

그림 1은 Gray et al. (2009) 모델에서 합성된 이미지로부터 2장에서 언급한 바와 같은 보정과정을 거친 이미지를 메이저 방출세기의 차이에 따라 등고선 이미지로 나타낸 결과이다. 합성이미지는 메이저 덩어리(clump)들이 이전의 VLBI 관측으로도 잘 알려진 메이저 고리(Boboltz et al., 1997; Cotton et al., 2004, 2006; Boboltz et al., 2005) 구조를 보이고 있으나 전체가 아닌 부분적인 고리를 형성하면서 각 덩어리들이 크고 작은 크기의 다소 균일한 구형으로 이루어진 것을 보인다. 반면에 논문 1에서 보인 TX Cam 이미지에서는 메이저 덩어리들이 원형이나 빗살무늬의 길고 경계가 명확한 구조 등을 보이거나 특정한 형태로는 규정할 수 없게 퍼져있기도 하는 등 다양한 크기와 모습으로 전체적으로는 고리구조상에 고르게 분포한 모습을 보였다. 이러한 차이점은 별의 맥동 주기에 따라 메이저 덩어리가 고리구조 전체 또는 일부분에만 분포하기도하고 때로는 거의 사

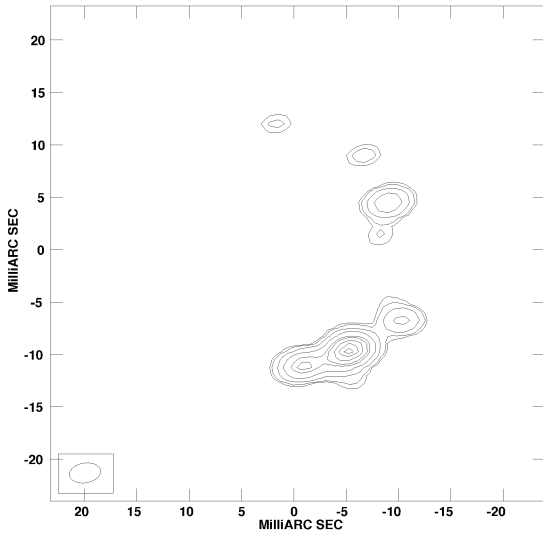


그림 2. KVN과 TRAO의 VLBI 관측(KT 관측, 표 1, ID 2)모의실험에 대한 가상이미지.

라지기도 하는 주기적 특성(Humphreys et al., 2002; Diamond & Kembal, 2003; Yi et al., 2005)을 대표적으로 보여주는 각각의 좋은 예이다. 실제 논문 1의 TX Cam 이미지는 메이저가 강한 시기에 관측된 결과이고, 그림 1의 모델이미지는 메이저가 비교적 약한 시기에 형성되는 메이저 고리 이미지이다(Gray et al., 2009). 따라서 본 모의실험에서는 논문 1과는 대조적으로 메이저가 약한 시기의 SiO 메이저 이미지에 대한 모의실험이 가능해진 반면에 합성이미지의 특성상 플럭스가 약하고 넓게 퍼져 분포하는 메이저 원들이 부재함에 따라 이들에 대한 플럭스 복원력을 검토하기에는 한계를 보였다.

3.1 KVN과 대덕전파망원경의 관측

논문 1에서 이미 살펴본 바와 같이 KVN만을 사용한 관측은 안테나 3기로 구성된 300 km ~ 500 km의 짧은 기선 3개로 이루어진 매우 제한된 관측조건을 제공하고 이로 인하여 이미징을 통한 새로운 과학적 결과를 보기에는 어려움이 있다.

그림 2는 KVN과 대덕전파망원경(Taedeuk Radio Astronomy Observatory, 이하 TRAO)이 함께 관측할 경우에 대한 모의실험 결과이다. 예상된 바와 같이 각각의 메이저 덩어리에 대한 자세한 구조나 합성비 크기 (~ 2.9 x 1.9 mas) 이하의 조밀하고 작은 크기의 메이저 덩어리들에 대한 이미지 복원은 불가능했고 몇 개의 밝은 메이저 덩어리들을 중심으로 빔 형태로 구성된 메이저 고리구조의 큰 윤곽을 볼 수 있는 정도의 이미지를 얻을 수 있었다. KVN만의 관측에 비해 TRAO가 관측에

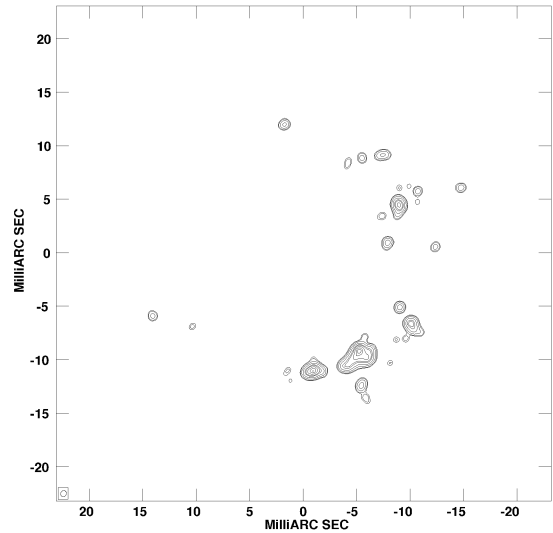


그림 3. KVN, VERA, TRAO, SHANGHAI 망원경의 VLBI 관측(KVTS 관측, 표 1, ID 7) 모의실험에 대한 가상이미지.

추가된 경우(KT 관측, 표 1, ID 2) 복원된 이미지에서 최대플럭스 값이 KVN만의 관측과 비교하여 24% 증가하였음을 볼 수 있었다. 이로써 TRAO의 VLBI 관측참가는 KVN만의 관측에 비해 기선수를 두 배 증가시키고 기선길이를 135 km로 단축시킴으로써 매우 향상된 uv coverage를 제공해 줄 수 있고 이에 따라 플럭스 복원력을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 KVN과 국제공동관측

1 ~ 2 milli-arcsecond(이하 mas) 이하의 조밀한 구조를 지닌 SiO 메이저를 관측연구하기 위해서는 긴 기선을 지닌 VLBI 시설이 필수적이다. 논문 1에서는 KVN 이미징 능력의 한계를 극복하기 위한 대안으로 KVN과 일본의 VLBI 시설을 이용한 공동관측 및 미래의 확장된 KVN 관측을 제시하였다. 그러나 KVN 사업 기획당시에 논의가 있었던 미래의 확장된 KVN 관측은 현실적으로 가까운 시일 내에 실현 가능성이 희박한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 현재 또는 가까운 시일 내에 KVN과 VLBI 관측 추진이 가능할 수 있는 동아시아의 시설을 중심으로 모의실험을 수행하였다. 그림 3은 KVN과 일본의 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry)에 추가적으로 TRAO와 중국의 상해천문대 65 m 망원경을 사용한 VLBI 국제공동관측(KVTS 관측, 표 1, ID 7)에 대한 모의실험결과를 보여준다.

중국 상해천문대의 65 m 망원경은 중국내의 VLBI 시설로도 활용 될 예정으로서 2012년에 망원경 건설을 마치고 2014년에 43 GHz 시험관측을 수행할 예정으로

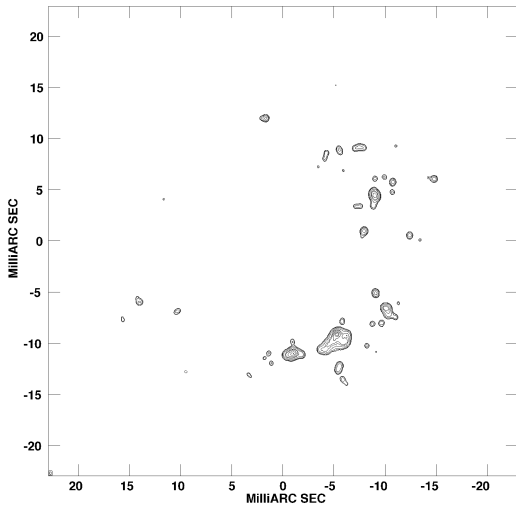


그림 4. VLBA 관측(표 1, ID 1) 모의실험에 대한 가상이미지.

알려져 있다(Li, 2009). 모의실험 이미징은 전반적으로 좋은 결과를 보이고 있으나 최장기선이 2,300 km인 KVTS 관측의 공간 분해능으로는 모델이미지(그림 1)에서 보이는 0.5 mas 이하의 매우 작은 메이저 원들까지 복원할 수 없음을 볼 수 있다. 그러나 0.1 ~ 0.2 mas 정도의 매우 작은 크기의 메이저 원들의 경우 기존의 VLBI 관측연구로 알려진 메이저 이미지에서 일반적으로 심도 깊게 논의되는 특징이 아님을 볼 때 이들이 미치는 과학적 결과에 대한 영향은 현재로서는 논외로 한다.

KVN과의 VLBI 국제공동관측은 KVTS 관측에 대한 모의실험 이외에도, KVN과 매우 가까운 시일 내에 현실적으로 공동관측이 가능한 일본의 VERA만이 공동으로 VLBI 관측을 하는 경우(KV 관측, 표 1, ID 3), KV에 TRA0가 추가된 경우(KVT 관측, 표 1, ID 4), 일본에서 비정규적으로 VLBI 관측에 참여하는 직경 45 m의 노베야마(Nobeyama) 망원경과, 34 m의 카시마(Kashima) 망원경이 KV 관측에 추가적으로 참여하는 경우(KVNM 관측, 표 1, ID 5), KVNM에 TRA0가 추가된 경우(KVTNM 관측, 표 1, ID 6), KVTNM에 상해천문대의 65 m 망원경이 추가되어 가능한 모든 시설이 VLBI 관측에 참여하는 경우(KVTNMS 관측, 표 1, ID 8)에 대하여 모의실험을 실행하였다.

이들이 복원한 이미지는 예상과는 다르게 그림 3에 나타난 KVTS 관측 결과와 비교하였을 때 거의 동일한 모습으로 나타났다. 이는 모의실험에 참가한 시설들이 기선수와 망원경의 구경은 달라도 최장기선이 같아 모두 유사한 공간분해능을 가짐으로 인해 합성빔 크기 이

하의 작은 메이저 원들을 복원하지 못한 것에서 비롯된 결과로 보인다. 이미징 복원력에 대한 이와 같은 예상 밖의 결과는 모의실험에 사용된 이미지의 특징과 연관이 있는 것으로 분석되었고, 자세한 논의는 4장에서 다룬다. 각각의 시설들이 복원한 이미지의 최대플럭스 값도 기선수와 망원경의 구성에 따라 약 50 Jy/beam에서 10% 이내로 그다지 큰 차이를 보이지 않았다.

3.3 VLBA 관측

그림 4는 모델이미지를 VLBA로 관측하는 경우에 대한 모의실험결과이다. 7 mm 대역에서 관측이 가능한 동아시아 VLBI 시설들은 최장기선의 길이가 일본 VERA의 최장기선 길이, 즉 2,300 km에 의해 한정되는 반면에 VLBA의 최장기선은 약 8,600 km로서 공간분해능에서 다소 큰 차이를 갖는다. 또한 수백 km의 짧은 기선부터 수천 km의 긴 기선으로 이루어진 조밀한 uv coverage를 갖는 VLBA는 수 mas에서 0.5 mas 이하의 매우 작은 덩어리까지 다양한 크기와 형태로 나타나는 SiO 메이저 덩어리들을 관측하는데 현재까지는 최적화된 VLBI 시설로서 모의실험결과에서도 거의 모델이미지와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 토의 및 결론

4.1 토의

본 연구에서는 최장기선의 길이와 기선수의 변화 이외에도 구경이 큰 망원경이 VLBI 관측에 참가할 경우 나타날 수 있는 이미징 능력의 변화를 보고자 하였다. 20 m 급인 KVN과 VERA 망원경들에 비해 3배 이상 큰 상해천문대 망원경, 2배 이상의 노베야마 망원경, 1.5배 크기의 카시마 망원경이 관측에 합류할 경우 기선수의 증가 뿐 아니라 집광력의 향상으로 약한 플럭스의 메이저 원을 더욱 효과적으로 복원할 수 있을 것으로 기대하였다. 이는 논문 1의 모의실험에서 노베야마 망원경과 카시마 망원경이 추가됨에 따라 매우 뚜렷이 향상된 이미지 결과에서 잘 확인할 수 있었다. 그러나 3.2절에서 보인 바와 같이 본 모의실험에서는 큰 구경의 망원경들이 VLBI 관측에 추가됨에 상관없이 거의 유사한 이미지를 얻게 되었는데 이는 모델이미지의 특성에 의한 제한적인 결과인 것으로 분석되었다.

이와 같은 분석을 검증하기 위하여 모델이미지와 유사하게 동쪽이 트인 부분적인 고리구조를 갖으면서도 각각의 메이저 덩어리는 모델이미지와는 다르게 다양한 크기와 형태의 메이저 덩어리들을 가진 Mira 변광성 R Cas의 SiO 메이저 이미지를 이용하여 모의실험을 추가 수행하였다. 논문 1에서와 같은 방법으로, 기본이미지는 VLBA 관측 연구로 얻어진 R Cas의 SiO 메이저 이미지

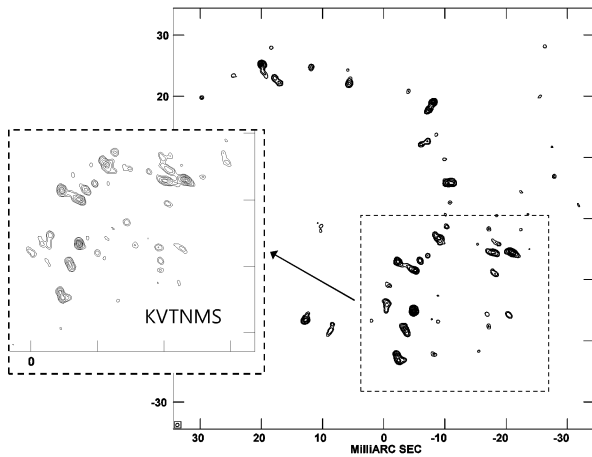


그림 5. R Cas의 SiO 메이저 이미지를 이용한 KV 관측 모의실험에 대한 가상 이미지(메이저 고리구조가 전체적으로 나온 이미지)와 KVTNMS 관측 모의실험의 부분 이미지(굵은 점선의 테두리로 표시되어 KV 이미지 위에 부분적으로 겹쳐놓은 이미지).

(Yi., 2005)에서 추출한 uv 데이터를 사용하였다.

그림 5는 R Cas 이미지를 사용한 이미징 모의실험 결과로서 KVN과 VERA를 사용한 VLBI 관측(KV 관측)에 대한 이미지이다.

남서쪽의 가는 점선으로 표시된 영역을 보면 다소 길쭉한 모양의 밀집된 구조를 가진 메이저 덩어리들이 전체 고리구조의 중심으로부터 바깥으로 퍼져나가는 방향으로 정렬되어 있는 것을 볼 수 있다. 한편 KVN과 VERA에 TRA0와 함께 큰 구경의 망원경들인 노베야마, 카시마, 상해천문대 망원경을 모두 포함시킨 VLBI 관측(KVTNMS 관측)에 대한 모의실험 결과를 보면 북쪽에서는 KV 관측 모의실험 이미지와 거의 유사하게 나타나는 반면에 점선으로 표시된 영역에서는 뚜렷한 차이를 보인다. 그림 5에서는 이 영역만 확대하여 KV 관측 모의실험 이미지에서 메이저 덩어리들이 분포하지 않은 동쪽 영역에 굵은 점선으로 표시하여 중첩하였다. 부분적으로 삽입된 KVTNMS 관측 모의실험 이미지는 KV 관측 모의실험에서 밀집된 형태로만 나타났던 메이저 덩어리들이 더욱 넓게 퍼져있는 형태로 드러났고 약한 플럭스의 작은 덩어리들도 추가적으로 새롭게 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 이는 기선수가 증가함에 따라 uv coverage가 향상되기도 하였으나 구경이 큰 3기의 망원경이 추가됨에 따라 약한 플럭스를 더욱 효과적으로 복원한 결과이다.

이와 같이 R Cas 이미지를 이용한 비교 모의실험은 본 연구에서 사용한 모델이미지가 그 특성으로 인하여

제한적인 연구결과를 도출하였음을 보였다. 메이저 모델의 합성이미지는 메이저 점광원들을 가우시안 빔으로 합성하여 얻은 결과로서 배경노이즈와는 뚜렷이 구별되는 크고 작은 구형의 밀집된 형태의 덩어리들로 구성되어 있다. 반면에 실제 관측에서 보이는 메이저 덩어리들은 TX Cam 이미지나 R Cas의 이미지에서 보이는 바와 같이 플럭스가 강하며 밀집된 형태의 메이저 덩어리들 뿐 만아니라 약한 플럭스가 넓게 퍼져있는 조밀하지 않은 구조로도 분포함으로써 합성된 모델이미지와는 다른 특징을 보인다. 이러한 이미지의 특징적 차이는 집광력이 큰 망원경이 VLBI 관측에 포함될 경우 약하게 퍼져있는 메이저 플럭스에 대한 복원력에서 뚜렷한 차이로 드러났다. 따라서 큰 구경의 망원경 추가로 약하게 퍼져있는 메이저 플럭스가 잘 복원된 R Cas의 이미징 모의실험은 본 연구에서 사용한 SiO 모델의 합성이미지가 관측시설의 추가와 관련 없이 유사한 결과를 보인 원인이 모델이미지의 특성상 드러난 한정적인 결과임을 보여주었다.

4.2 결론

만기형 별의 대기상층부에서 형성되는 SiO 메이저에 대한 연구는 KVN의 주요 연구 과제 중 하나이다. 본 연구는 SiO 메이저 모델에서 합성된 이미지로부터 보다 객관적인 모의실험 기본이미지를 마련하고 이를 사용하여 KVN의 이미징 능력 및, KVN과 동아시아의 주요 VLBI 관측시설이 함께 관측할 경우에 대한 이미징 능력을 검토하기 위한 모의실험이었다. 특히 구경이 큰 망원경이 관측에 참여할 경우 기대되는 집광력 향상에 따른 플럭스 복원력을 검토하기 위하여 중국 상해천문대의 65 m 망원경을 추가한 VLBI 관측을 모의실험 하여보았다. 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. KVN의 단독관측으로는 SiO 메이저의 고리구조에 대한 전체 윤곽을 파악할 수 있는 정도의 이미지를 얻는 것이 가능하고 이는 논문 1과 유사한 결과임을 보였다. KVN 관측에 TRA0가 추가될 경우에는 기선수가 두 배로 증가하고 짧은 기선이 보완됨으로써 이미지의 최대플럭스 값이 24% 증가함을 볼 수 있었다. 그러나 KVN을 이용하여 SiO 메이저 연구에 새로운 과학적 연구결과를 획득하기 위해서는 기선 수와 길이의 증가가 필수적임을 재확인하였다.
2. KVN만의 관측에서 오는 이미징 능력의 한계를 극복하기 위한 대안으로는 TRA0를 포함한 KVN과 동아시아 VLBI 관측시설의 공동관측이 제안되었다. 이들에 대한 모의실험에는 일본의 VLBI 시설인 VERA, 단일일이지만 VLBI 실험에 참여할 수 있는 일본의 노베야마와 카시마 망원경, 중국 상해천문대의 65 m

망원경이 포함되었다. SiO 메이저를 관측할 수 있는 동아시아의 VLBI 관측시설은 약 0.5 mas 정도의 최대 공간분해능을 갖고 조밀한 uv coverage를 제공할 수 있으므로 일반적인 SiO 메이저 이미지의 특성을 연구하기에 적합한 시설임을 알 수 있었다. 그러나 모델이미지를 이용한 KVN과 동아시아 VLBI 관측 모의실험 결과, 기선 수나 망원경 구경의 차이에 따른 플럭스 복원력이나 이미지의 차이는 뚜렷하게 볼 수 없었다. 이는 토의에서 R Cas의 이미지에 대한 모의실험 과정에서 보았듯이, 구경이 큰 망원경들의 관측참여로 기대되는 집광력 향상이 모의실험에 사용된 이미지의 특성에 따라 다르게 반응한 결과이다. R Cas의 이미지를 이용한 모의실험은 약하게 퍼져있는 메이저 플럭스에 대한 복원력이 구경이 큰 망원경들이 관측에 참여할 경우 뚜렷하게 향상될 수 있음을 보여주었다.

3. VLBA는 현존하는 VLBI 시설로서는 만기형 별에서 발생하는 SiO 메이저를 관측연구하기에 최적화된 VLBI 관측시설임을 재확인하였다. 현재 동아시아 VLBI 관측으로는 0.5 mas 이하의 작은 크기의 조밀한 메이저 구조를 연구하기에 약간의 제한이 있고, 이는 2,500 km 이상의 긴 기선을 제공해줄 수 있는 VLBI 관측시설에 대한 필요성을 제시한다.
4. 결과적으로 본 연구에서 채택한 SiO 메이저 모델의 합성이미지는 이미지 자체의 특성상 다양한 동아시아 VLBI 관측시설들에 대한 이미징 복원력을 검토하기에 최적화되지 못한 한계를 드러내었다. 그러나 R Cas 이미지를 이용한 모의실험결과와의 비교를 통하여 메이저 원들의 다양한 크기와 형태에 따라 같은 VLBI 시설에 대한 이미징 복원력이 다르게 나타날 수 있음을 새롭게 알 수 있었다. 이는 장차 동아시아 VLBI 관측연구들의 결과 해석에 구체적인 비교자료로 활용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- 김봉규 등, 2008, 한국우주전파관측망 건설사업(최종년도), 한국천문연구원
- 이지윤, 정태현, 2008, SiO MASERS의 VLBA 이미지를 이용한 KVN 이미지 모의실험, 천문학논총, 23, 37 (논문 1)
- Boboltz, D. A., Diamond, P. J., & Kemball, A. J., 1997, R Aquarii: First Detection of Circumstellar SiO Maser Proper Motions, ApJ, 487, L147
- Boboltz, D. A. & Wittkowski, M., 2005, Joint VLBA/VLTI Observations of the Mira Variable S Orionis, ApJ, 618, 953
- Cotton, W. D., Mennesson, B., Diamond, P. J., et al., 2004, VLBA Observations of SiO Masers towards Mira Variable Stars, A&A, 414, 275
- Cotton, W. D., Vlemmings, W., Mennesson, B., et al., 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
- Gray, M. D., Wittkowski, M., Scholz, M., Humphreys, E. M. L., & Ohnaka, K., 2009, SiO Maser Emission in Miras, MNRAS, 394, 51
- Humphreys, E. M. L., Gray, M. D., Yates, J. A., Field, D., Bowen, G. H., & Diamond, P. J., 2002, Numerical Simulations of Stellar SiO Maser Variability. Investigation of the Effect of Shocks, A&A, 386, 256
- Jung, T. -H., Rhee, M. -H., Roh, D. -G., Kim, H. -G., & Sohn, B. -W., 2005, Imaging Simulations for the Korean VLBI Network(KVN), JASS, 22, 1
- Li, B., 2009, Status of Shanghai 65 m Radio Telescope, 2009 East Asia VLBI Workshop, Seoul/Korea, <http://kvn-web.kasi.re.kr/eavw/program.shtml>
- Reid, M. J. & Menten, K. M., 1997, Radio Photospheres of Long-Period Variable Stars, ApJ, 476, 327
- Wittkowski, M., Boboltz, D. A., Ohnaka, K., Driebe, T., & Scholz, M., 2007, The Mira Variable S Orionis: Relationships between the Photosphere, Molecular Layer, Dust Shell, and SiO Maser Shell at 4 Epochs, A&A, 470, 191
- Yi, Jiyune, 2005, High Resolution Observations of Masers in Star Formation Regions and Evolved Stars, Ph. D. Thesis, Chalmers University of Technology
- 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