

## 원형레일 기반 지상 SAR 시스템에서의 안테나 위치 정밀 제어 기술 개발

김광은<sup>†</sup> · 조성준 · 성낙훈 · 이재희 · 강문경

한국지질자원연구원

### Precise Control of Antenna Position in Arc-Rail Based GB-SAR System

Kwang-Eun Kim<sup>†</sup>, Seong-Jun Cho, Nak-Hoon Sung, Jae-Hee Lee, and Moon-Kyung Kang

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

**Abstract** : Precise control of antenna position is very critical in ArcSAR system which uses an arc-rail as a platform for the antenna movement instead of linear rail. In order to minimize the antenna positional error, we improved the motion driving system and applied a newly developed motion control S/W which utilizes the real time antenna position information from magnetic linear scale and encoder. The experimental results showed that the rotational RMS error was reduced to  $0.0062^\circ$  from  $0.0432^\circ$ . In terms of antenna positional RMS error for the arm length of 3m, it was reduced to 0.324mm from 2.262mm. It is expected that the ArcSAR system can be used to monitor the sub-millimetric displacement of terrain and structural targets.

**Key Words** : GB-SAR, Arc-Rail, Simulation, SAR Processing.

**요약** : 원형레일을 기반으로 하는 지상 SAR 시스템인 ArcSAR 시스템에서 간섭(interferometry)기법의 적용이 가능한 정밀한 지상 SAR 영상을 획득하기 위해서는 안테나 위치의 정밀한 제어가 요구된다. 본 연구에서는 자력 선형 스케일(Magnetic Linear Scale)을 이용하여 기존 ArcSAR 시스템에서의 안테나 위치 값의 정확도를 분석하였으며, 자력 엔코더(Encoder) 값을 이용하여 안테나 위치를 정밀하게 제어할 수 있는 기술을 개발하였다. 기존의 ArcSAR 시스템의 제어 체계에서는 안테나 회전 각도에 대한 평균 RMS 오차가  $0.043^\circ$  였으나, 본 기술을 통해  $0.006^\circ$ 로 감소시킬 수 있었다. 이는 3미터 길이의 arm을 기준으로 할 때, 안테나 위치 정확도에 대한 평균 RMS 오차가 2.262mm에서 0.324mm로 감소된 것에 해당한다. 본 기술을 통해 매우 정밀한 지상 SAR 영상자료의 획득이 가능하게 되었으며, 향후 간섭기법의 적용을 통해 지반 및 대형 구조물의 미세변위에 대한 초정밀 모니터링에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 1. 서론

지상 SAR(GB-SAR, Ground Based Synthetic Aperture Radar) 시스템에서는 지상에 설치된 선형 레일(Linear Rail)을 따라 안테나를 이동시켜 합성구경을 이룬다. 합성구경 레이더 기법 고유의 장점을 그대로 가지면서, 지상에서 편리하게 운용될 수 있다는 장점을 가지고 있어 지반이나 각종 구조물의 미세변위를 정밀하게 모니터링할 수 있는 기술로 주목받고 있다(Tarchi *et al.*, 2000; Alba *et al.*, 2008; Pieraccini *et al.*, 2005; 이훈열 등, 2007).

그러나, 지상 SAR 시스템을 운용하기 위해서는 지상에 레일을 설치해야 하는데, 고정밀로 제작된 레일의 운반 및 설치가 용이하지 않아서 현장 적용성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 국내에서 이러한 단점을 극복하고자 차량에 원형의 레일(Arc Rail)을 탑재함으로써 신속한 이동성을 확보함과 동시에 합성구경의 길이를 확대함으로써 영상 영역을 확장할 수 있는 기술이 개발되고 있다(조성준 등, 2008; 김광은 등, 2009; 이훈열 등, 2010).

고해상도 지상 SAR 영상의 획득과 간섭기법(Interferometry)의 적용을 위해서는 안테나 위치를 매우 정밀하게 제어할 수 있어야 한다. 지금까지의 지상 SAR 시스템과 관련된 문헌에서 안테나 위치의 정밀 제어에 대한 내용은 보고된 바 없으나, 영상화 처리 결과나 생성된 interferogram 결과 등을 통해 볼 때(Alba *et al.*, 2008), 기존의 선형 레일을 이용하는 경우에는, 스텝모터만을 사용하여도 안테나 위치의 정밀제어가 가능했던 것으로 판단된다.

기존의 선형 레일을 사용하는 지상 SAR 시스템과는 달리, 원형 레일을 이용하는 지상 SAR 시스템에서는 안테나의 이동과 위치 제어가 선형 이동이 아닌 회전 운동의 제어를 통해 이루어져야 한다.

현재 국내에서 개발 중인 원형 레일 기반 지상 SAR 시스템인 ArcSAR 시스템은 모터의 회전 동력을 벨트를 이용하여 회전 구동부에 전달하고 있으며, 구동 모터의 회전 스텝 수를 통해 안테나 위치를 제어하고 있다(조성준 등, 2008). 따라서 현재의 ArcSAR 시스템에서 실제 자료가 획득되는 안테나의 위치가 정밀하게 제어되고 있는지 확인이 불가능하다.

본 연구에서는 자력 선형 스케일(Magnetic Linear Scale)를 이용하여 기존 ArcSAR 시스템의 안테나 위치값의 정확도를 분석하였으며, 나아가 자력 엔코더(Magnetic Encoder)로부터 측정되는 현재의 안테나 위치값을 실시간으로 피드백하여 안테나 위치를 정밀 제어할 수 있는 제어 알고리즘을 개발하였다.

## 2. 기존 ArcSAR 시스템의 안테나 위치 정확도 분석

Fig. 1은 ArcSAR 시스템의 탑재체의 사진(a)과 차량에 탑재되어 지상 SAR 자료를 획득하고 있는 사진(b)을 보여주고 있다. Fig. 2는 ArcSAR 시스템을 이용하여 획득된 영상자료의 예를 보여주고 있다. 좌하단의 작은 그림은 실험을 위해 사용된 Tetra-head 인공반사체를 보여주고 있는데, 이 인공반사체는 ArcSAR 영상에서 하나의 점으로 나타나야 한다. Fig. 2의 붉은 색 원으로 표시된 지점들이 이 인공반사체들이 위치한 지점들인데, Azimuth 방향의 Focusing이 제대로 이루어지지

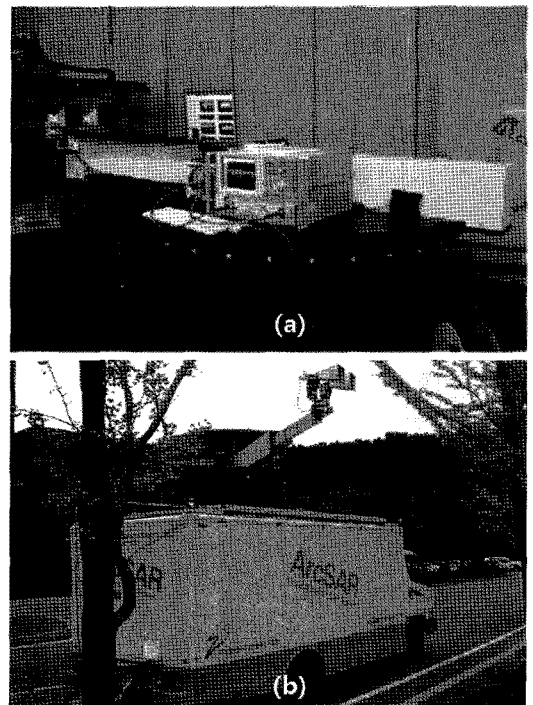


Fig. 1. ArcSAR sensing system(a), and ArcSAR vehicle on which sensing system is loaded(b).

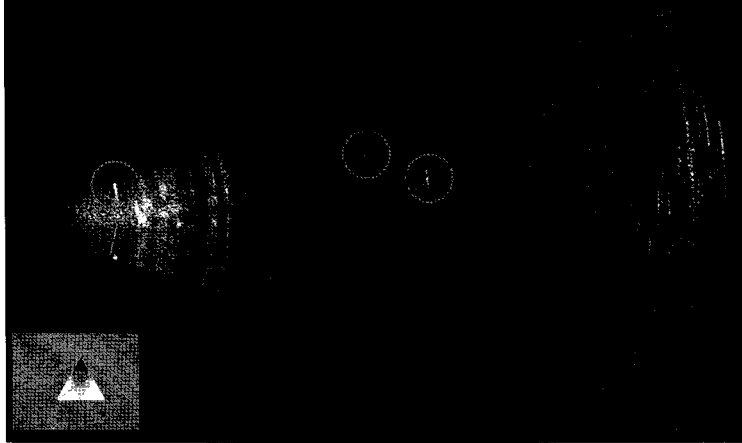


Fig. 2. ArcSAR test image. The artificial tetra-head scatterer shown in lower left corner of the image should be appeared as a point in ArcSAR image.

않아서 Azimuth 방향으로 길게 퍼진 모습으로 나타나고 있다. 이러한 결과에 대해 여러 가지 원인이 있을 수 있는데, 본 논문에서는 자력 선형 스케일(Magnetic Linear Scale)을 이용하여 SAR raw signal을 획득하는 과정에서의 안테나 위치의 오차 정도를 정밀하게 분석하고, 구동 장치 개선 및 피드백 제어를 통해 이를 개선한 결과를 제시한다.

ArcSAR 시스템에서는 기존의 지상 SAR 시스템과는 달리 안테나가 선형 운동이 아닌 arc-rail을 따른 원형운동을 하며, 따라서 raw signal을 획득하는 안테나의 위치는 회전 각도의 제어를 통해 결정된다. Fig. 3은

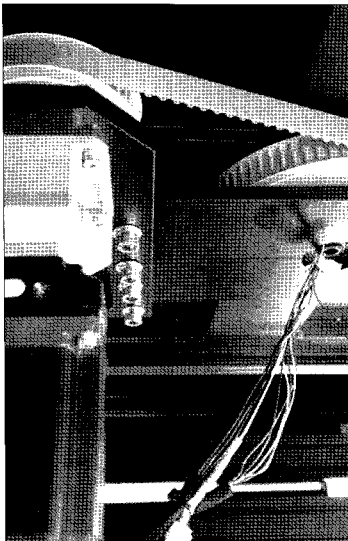


Fig. 3. Belt driven rotational motion system of ArcSAR.

기존 ArcSAR 시스템의 회전 구동부의 모습을 보여주고 있다. 모터의 회전 동력은 벨트를 통해 원형레일판에 전달된다. 모터는 스텝모터로서  $360^\circ$ 의 회전각도에 대해 500,000 스텝으로 제어된다. 따라서 이론적으로는 모터의 스텝 제어를 통해  $0.00072^\circ$ 의 회전각 조절이 가능하며,  $0.5^\circ$ 의 회전각 간격으로 SAR 영상을 획득하고자 한다면, 모터를 694 스텝씩 회전시키면 된다.

그러나 실제로는, 구동 장치의 유격과 벨트의 장력에 따른 오차가 발생하게 되며, 이러한 오차는 회전이 계속됨에 따라 누적될 것으로 예상된다. 이러한 안테나 위치 오차에 대한 분석과 함께 보다 정밀한 안테나 위치 제어를 위하여 자력 선형 스케일을 원형레일에 장착하고, 자력 엔코더를 회전원판에 부착하여 원형레일 끝단에서의 이동 거리를 측정할 수 있도록 하였다. Fig. 4는 자력 선형 스케일이 적용된 ArcSAR 시스템의 모식도와 함께 회전원판에 부착된 자력 엔코더의 사진을 보여주고 있다.

Table 1에는 자력 선형 스케일과 엔코더의 사양을 나타냈으며, 본 연구에서는  $1^\circ$ 의 회전에 대해 1,444 count로 측정되도록 설정되어 있으며, 따라서 자력 선형 스케일은 회전 각도를 기준으로 약  $0.005^\circ$ 의 해상도를 가지게 된다.

자력 선형 스케일을 장착한 후, 우선 기존의 ArcSAR 시스템에서의 안테나 위치의 정확도를 분석하였다. ArcSAR 시스템에서 안테나 회전각의 간격을  $0.5^\circ$ 로 설정하여  $180^\circ$ 회전시키며 자력 선형 스케일을 통해 읽혀

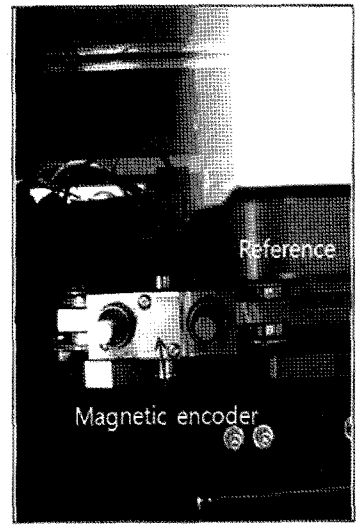
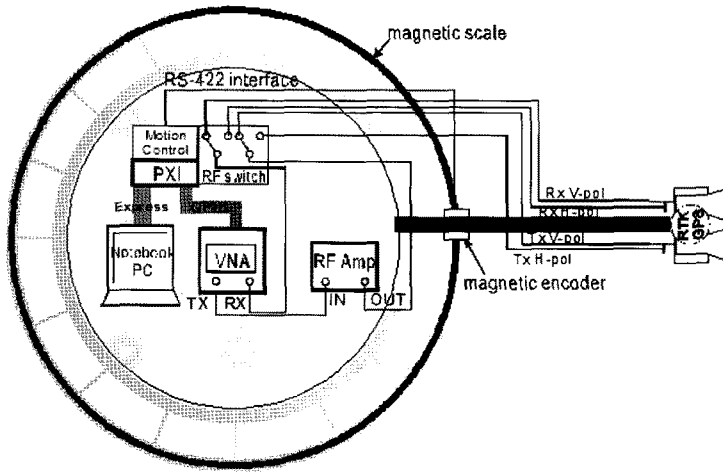


Fig. 4. Schematic diagram of ArcSAR system with magnetic linear scale mounted on the arc-rail(left), the picture of magnetic encoder(right).

Table 1. Specification of magnetic linear scale and encoder

Available resolution	1, 2, 4, 5, 10, 20, 25, 50, 125, 250
Maximum speed for digital outputs	0.13 m/s to 25 m/s
Power supply	4.6V to 7V
Output signals	Digital-Differential RS422
Temperature	Operating -10°C to +80°C, Storage -40°C to +85°C

80° 구간에서는 200 count 이상의 매우 큰 오차들이 나타나고 있다. 비교적 안정된 결과를 보이는 2, 3차 실험 결과에서도 100 count 이상의 큰 오차가 발생하고 있다. 1, 2, 3, 4차 실험 결과의 자력 선형 스케일의 평균 count 값은 각각 683.94, 717.18, 715.73, 716.37로서, 이를 회전 각도로 표현하면 각각 0.490°, 0.497°, 0.496°, 0.4965°에 해당하며, RMS 오차는 각각 0.0641°, 0.0264°, 0.0364°, 0.0457°로 나타났다.

진 회전각의 간격을 Fig. 5에 나타냈다. 총 4차에 걸친 실험이 이루어졌으며, 1차 실험과 4차 실험의 45° ~

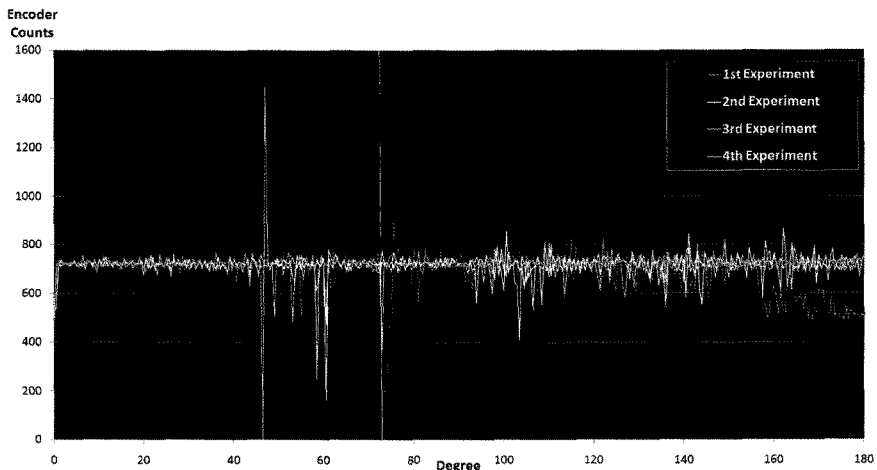


Fig. 5. Measured antenna position space as the count value of magnetic linear scale.

### 3. 회전 구동장치 개선

이와 같이 안테나 회전각 간격에 큰 오차가 나타나는 원인은 크게 회전 구동 장치의 유격에 의한 오차와, 자료획득시 회전과 정지를 반복하는 ArcSAR 자료획득 체계의 특성에 따른 자력 선형 스케일의 측정 오류(정지시 반동에 의한 미세한 역방향 운동)에 의한 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 우선 회전 구동 장치의 유격에 의한 오차를 최소화하기 위해, Fig. 6에 나타난 것과 같

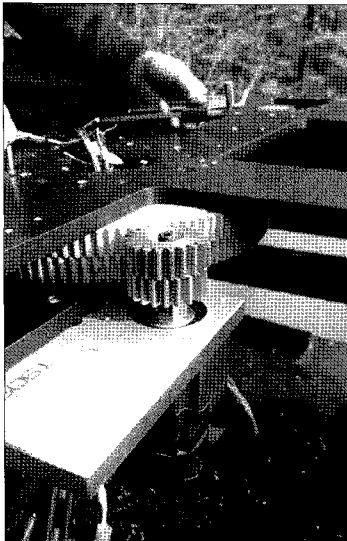


Fig. 6. Metal gear driven rotational motion system.

이 회전 구동 동력을 벨트가 아닌 이중 기어(Gear)를 통해 전달되도록 시스템 회전 구동 장치를 개선하였다.

벨트 구동 시에는  $360^\circ$  회전 당 모터의 총 스텝수가 500,000이었으나, 이중 기어로 교체하면서 총 1,500,000 스텝이 되도록 기어 회전비율을 설정하였다. 따라서, 모터의 한 스텝 동작은 안테나를  $0.0024^\circ$  회전 시키게 되며, ArcSAR 시스템의 회전 운동에 대한 해상도는 3배 향상되었다고 할 수 있다.

회전 구동 장치의 개선 이후, 회전각 간격을  $0.72^\circ$ 로 설정하여 총 3회의 실험이 이루어졌으며 그 결과를 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 5에 나타냈던 기존 시스템의 결과와 비교해서 오차의 발생 빈도와 크기가 대폭 줄어들었음을 알 수 있으며, 총 회전각이 커짐에 따라 오차의 크기가 커지는 것은 누적오차에 의한 것으로 분석된다. 1, 2, 3차 실험 결과의 자력 선형 스케일의 평균 count 값은 963.12, 968.36, 968.60으로서 회전 각도로 표현하면 각각  $0.6938^\circ$ ,  $0.6976^\circ$ ,  $0.6978^\circ$ 에 해당한다. 한편, RMS 오차는 회전 각도를 기준으로 각각의 실험에서  $0.02785^\circ$ ,  $0.01917^\circ$ ,  $0.02019^\circ$ 로 나타났다.

$0.72^\circ$  간격으로 획득되어야 할 자료가 실제로는  $0.697^\circ \sim 0.7^\circ$  정도의 간격으로 측정된 것은 개선된 기어 구동부의 회전비율이 오차가 있기 때문인 것으로 판단되며, 기어 회전 비율에 대한 정밀한 재분석이 필요함을 확인하였다.

그러나, 회전각 간격에 대한 RMS 오차는 회전 구동

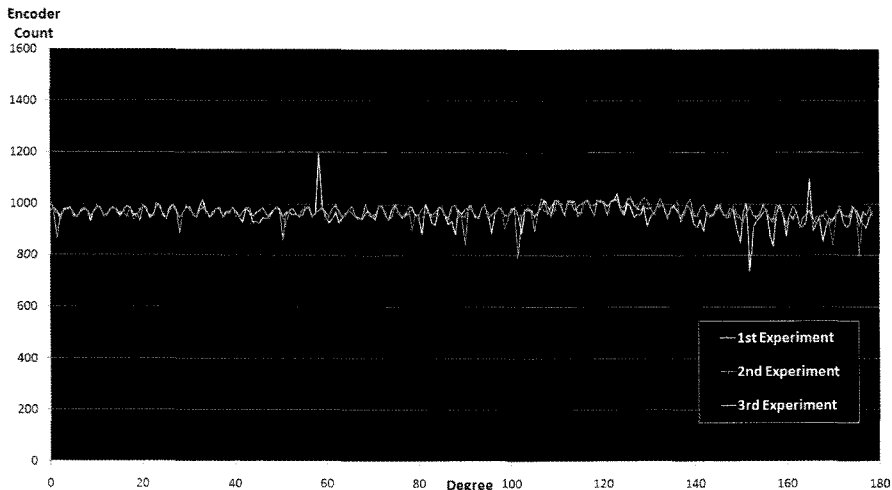


Fig. 7. Measured antenna position space as the count value of magnetic linear scale after the belt driven system is changed into gear driven system.

부의 개선 이후 크게 감소하여, 기계 장치의 유격에 의한 안테나 위치 오차는 획기적으로 감소된 것으로 판단된다.

#### 4. 회전 구동 제어 알고리즘 개선

지금까지의 ArcSAR 시스템에서는 안테나 회전 구동의 제어는 모터의 스텝 수를 통하여 이루어졌다. 즉, 사용자가 설정한 회전각 간격에 해당하는 모터 스텝 수만큼 모터의 회전과 정지를 반복하며 SAR raw signal을 획득하는 체계였다.

본 연구에서는 구동장치의 개선과 함께, 자력 선형 스케일을 통해 측정된 안테나 위치값을 피드백하여 모터를 제어함으로써 안테나 위치 오차를 최소화할 수 있도록 자료획득 운용체계를 개선하였다

Fig. 8은 개선된 회전 구동 제어 체계를 통해 수행된 실험 결과를 안테나 회전각의 간격을 통해 보여주고 있는데, 이전의 실험 결과들에 비하여 매우 안정되게 위치 제어가 되고 있음을 알 수 있다. 자료획득을 위해 설정된 안테나 회전각 간격 0.5°였는데, 총 180°를 회전하는 동안 평균 회전각 간격이 0.500023°이고, RMS 오차가 0.006256°로서 매우 정밀하게 회전각이 제어되고 있음을 알 수 있다.

Table 2에는 기존 ArcSAR 시스템의 안테나 위치 정확도, 구동장치 개선 이후의 정확도, 그리고 자력 선형 스케일을 이용한 회전 구동 알고리즘 개선 이후의 정확도를 회전각도 간격의 평균값과 RMS 오차 값, 그리고 안테나 위치 값으로 환산된 RMS 오차 값으로서 나타냈다. ArcSAR 시스템의 안테나가 부착되는 붐대는 회전 중심으로부터 최대 4미터까지 확장된다. 3미터까지 확장된 상태를 기준으로 최종적으로 개선된 이후의 회전

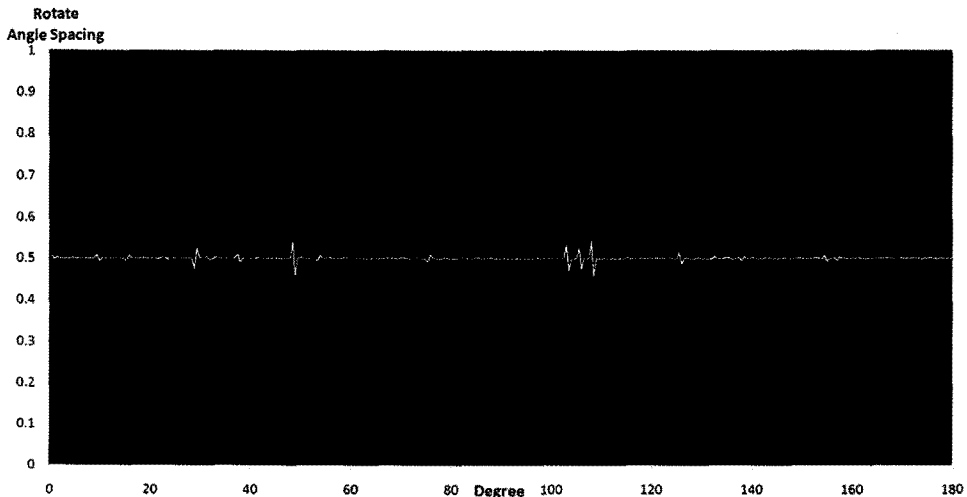


Fig. 8. Measured antenna position space as the rotation degree after the motion control system is improved where the count values of magnetic linear scale are used as a feed back value for the motion control of ArcSAR.

Table 2. Measured antenna rotation angle and RMS error before and after improvement

		Conventional System	After Improving the Rotation Driving System	After Improving the Motion Control System	
Set Value		0.5°	0.72°	0.5°	
Measured Value(Average)		0.4948°	0.6964°	0.50002°	
RMS Error	Degree	0.0432°	0.0224°	0.0062°	
	Antenna Position	4m	3.016mm	1.564mm	0.432mm
		3m	2.262mm	1.173mm	0.324mm
		2m	1.508mm	0.782mm	0.216mm

각도 RMS 오차  $0.0062^\circ$ 는 안테나 위치 값에 대한 오차로 환산할 경우  $0.324\text{mm}$ 에 해당된다. 이는 당초의 안테나 위치 값에 대한 RMS 오차가  $2.262\text{mm}$ 이었던 것에 비교하면 위치 정확도가 약 7배 정도 향상된 것이다.

## 5. 결론

원형레일을 기반으로 하는 ArcSAR 시스템에서는 안테나가 선형이 아닌 회전 운동을 하게 되므로 안테나 위치의 정밀 제어가 매우 중요하다. 자력 선형 스케일(Magnetic Linear Scale)을 이용하여 기존 ArcSAR 시스템에서의 안테나 위치값의 정확도를 분석한 결과, 안테나 회전 각도에 대한 RMS 오차는 평균  $0.043^\circ$ 로 나타났다. 본 연구를 통해 회전 구동장치를 벨트에서 이중 기어(Gear)로 교체한 이후, RMS 오차는  $0.0224^\circ$ 로 감소하였고, 자력 선형 스케일과 엔코더(Encoder)를 통해 실시간으로 현재의 안테나 위치값을 피드백하여 안테나 위치를 제어할 수 있는 제어체계를 적용한 결과, RMS 오차를  $0.006^\circ$ 로 감소시킬 수 있었다. 이를 회전 원판 중심으로 부터  $3\text{m}$  떨어져 있는 안테나 위치에서의 거리 값으로 환산할 경우, RMS 오차가 당초  $2.262\text{mm}$ 에서  $0.324\text{mm}$ 로 크게 감소된 것이다. 본 기술을 통해 보다 정밀한 지상 SAR 영상자료의 획득이 가능하게 되었으며, 향후 ArcSAR 영상자료를 이용한 간섭(interferometry)기법의 적용을 통해 지반 및 대형 구조물의 미세변위에 대한 초정밀 모니터링이 가능할 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신사업 과제의 연구비지원(07국토정보CO3)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 김광은, 조성준, 이훈열, 2009. 원형레일 기반의 지상 SAR 시스템 시뮬레이션 기법 개발, 대한원격탐사학회지, 25(2): 107-112.
- 이훈열, 조성준, 성낙훈, 김정호, 2007. GB-SAR의 개발(I): 시스템 구성과 간섭기법, 대한원격탐사학회지, 23(4): 237-245.
- 조성준, 이훈열, 김광은, 2008. 차량 탑재형 Arc-SAR 시스템 개념 설계, 대한원격탐사학회 2008 춘계 학술대회 논문 초록집, 3-6.
- Alba, M., Bernardini, G., Giussani, A., Paolo P., Roncorono, F., Scaion, M., Valgoi, P., and Zhang, K., 2008. Measurement of Dam Deformations By Terrestrial Interferometric Techniques, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 17, Part B1: 133-139.
- Pieraccini, M., Fratini M., Parrini, F., Pinelli, G., and Atzeni, C., 2005. Dynamic Survey of Architectural Heritage by High-Speed Microwave Interferometry, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 2(1): 28-30.
- Tarchi, D., Rudolf, H., Pieraccini, M., and Atzeni, C., 2000. Remote Monitoring of Buildings Using a Ground-Based SAR : Application to Cultural Heritage Survey, 2000, Int. J. Remote Sensing, 21(18): 3545-3551.