

## X-밴드 산란계를 이용한 하천 얼음 두께 측정에 관한 연구

한향선 · 김범준 · 이훈열 \*

강원대학교 지구물리학과

### A Study on the Measurement of River Ice Thickness by Using X-band Scatterometer

Hyangsun Han, Bumjun Kim, and Hoonyol Lee\*

Department of Geophysics, Kangwon National University

**요약:** 본 연구에서는 X-band 파장 대역에서 얼음의 두께를 측정하기 위해 중심주파수가 9.5 GHz (X-band)인 안테나를 사용하여 지상용 마이크로파 산란계를 구축하였고, 얼음에서의 후방산란을 측정하였다. 산란계로 측정된 얼음에서의 레이더 후방산란은 공기/얼음 경계면과 얼음/물 경계면에서 매우 강했으며, 두 경계면 사이의 거리와 얼음의 굴절률을 이용하여 두께 산출이 가능함을 확인하였다. 얼음 두께 측정을 위한 현장탐사는 춘천호의 유입지류인 지암천의 하류에서 수행되었다. 탐사 측선을 따라 얼음에서의 후방산란을 측정 후 얼음의 두께를 산출하였으며, 크리깅 보간법을 사용하여 지암천 하류의 얼음두께 지도를 제작하였다. 얼음의 두께는 대부분 50 cm로 나타났으며, 하천의 유속이 빠른 지점에서는 얼음의 두께가 30 ~ 40 cm로 얇았다. 유속이 일정한 곳에서 주변보다 얼음 두께가 얇은 지점이 관찰되었는데, 이는 얼음 내에 마이크로파 산란에 영향을 미치는 매개물이 존재하거나 낚시를 위해 인위적으로 얼음을 뚫은 후 다시 얼었기 때문인 것으로 판단되었다. 본 연구는 향후 X-band SAR 시스템과 항공기 탑재 산란계 시스템의 활용분야 확대에 기여할 것으로 기대된다.

**주요어:** 하천 얼음, 얼음 두께, 마이크로파 산란계, 후방산란, X-band, SAR

**Abstract:** In this study, we setup a ground-based scatterometer using an antenna of which the center frequency is 9.5 GHz (X-band), and measured radar backscatterings from air/ice and ice/water interfaces to extract ice thickness. Both of air/ice and ice/water interfaces make strong radar backscatterings and so we can clearly identify two peaks in measured data by scatterometer. By using the distance of two peaks and refractive index of ice, we confirmed that it is possible to measure ice thickness. Field survey was performed at the downstream of Jiam River flowing into Chuncheon Lake. We measured radar backscattering from river ice along a survey path and extracted ice thickness. The ice thickness map of the downstream of Jiam River was produced by using kriging which is one of well known interpolation methods. The ice thickness was about 50 cm along the mainstream while ice was thin as 30 ~ 40 cm at a fast-flowing meander. Ice thickness was particularly thinner at some locations than that of surrounding areas even in the mainstream region of constant flow. This was because of impurities in ice or artificially formed refrozen holes after fishing. We expect that this study helps to expand utilization field of X-band SAR and airborne scatterometer system.

**Keywords:** river ice, ice thickness, microwave scatterometer, backscattering, X-band, SAR

## 서 론

동절기에 하천이나 호수에서 형성되는 얼음의 두께는 물의 최저온도와 바람의 세기, 기온에 의해 결정되므로 국지적 기후 변화 관찰을 위한 중요한 인자로 사용되고 있으며, 수자원 및 수리구조물의 사용과 겨울철 관광산업에도 큰 영향을 미친다

(Fang and Stefan, 1998; Williams *et al.*, 2004; Gherboudj *et al.*, 2010). 따라서 하천 및 호수 얼음 두께에 대한 정확한 측정이 요구되며, 이를 위해 다양한 방법 및 장비가 사용되고 있다. 얼음의 두께를 측정하는 가장 전통적인 방법은 시추 코어를 획득하여 직접 측정하는 것이다. 이 방법은 매우 정확한 얼음 두께를 측정할 수 있으나, 얼음 코어 획득에 있어 시공간적인 제약이 따르는 단점이 있다(Galley *et al.*, 2009).

시추 코어 획득에 의한 얼음 두께 측정의 시공간적 문제는 전자기파를 이용하는 지구물리탐사 장비에 의해 보완되어 왔다. 지하투과레이더(ground penetration radar, GPR)는 수십 MHz에서 수백 MHz 대역의 주파수를 사용하는 지구물리탐사

2012년 1월 5일 접수; 2012년 2월 14일 수정; 2012년 2월 23일 채택;  
\*Corresponding author

E-mail: hoonyol@kangwon.ac.kr

Address: Dept. of Geophysics, Kangwon National University,  
Hyoja-2-dong, Chuncheon, Kangwon-do 200-710, Korea

장비로 상대유전율(relative permittivity)이 작은 얼음에서 투과율이 높아 얼음의 두께와 전자기적 특성, 얼음 하부의 퇴적층에 대한 지질학적 정보까지 함께 제공해준다(이주한 외, 2005; 김기영 외, 2006a; 김기영 외, 2006b; Arcone *et al.*, 2006; Stevens *et al.*, 2009). 원격탐사 분야에서 널리 사용되고 있는 지상용 마이크로파 산란계(ground-based microwave scatterometer)는 GPR과 비슷한 원리로 지표면에서의 레이더 산란을 측정한다(Lee *et al.*, 2011; 황지환 외, 2009). 그러나 산란계는 GPR에 비해 고주파 영역인 수 GHz ~ 수십 GHz 대역의 지향성이 높은 안테나를 사용하며, 이를 통해 인공위성 SAR 영상의 검보정 용으로 많이 사용되고 있다. 원격탐사 분야에서는 이와 같은 차별성으로 인해 마이크로파 산란계라는 명칭으로 GPR과 구분하여 사용하고 있다.

지상용 마이크로파 산란계는 장비의 운용이 편리하고 다양한 편파(polarization)와 파장, 마이크로파의 입사각에 대해 지표면에서의 레이더 반응 특성을 관측할 수 있다(Isleifson *et al.*, 2009; Geldsetzer *et al.*, 2007). 이러한 장점으로 인해 지상용 마이크로파 산란계는 위성 및 항공 레이더 영상의 검증을 위한 장비로 많이 사용되고 있다. 우리나라의 경우 X-band 합성구경레이더(synthetic aperture radar, SAR) 시스템을 탑재할 KOMPSAT-5 (Korean Multi-Purpose SATellite-5)가 발사 예정에 있다. 이에 따라 X-band SAR 시스템에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이의 검보정 및 활용분야 개발에 대한 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 X-band SAR 시스템과의 연계성을 고려해 9.5 GHz의 중심주파수를 사용하는 안테나를 이용하여 지상용 마이크로파 산란계를 구축하였다. 안테나는 향후 항공기 탑재 시스템으로의 발전을 도모하기 위해 높은 이득(gain)을 얻기 위한 고지향성 안테나로 설계되었으며, 이로 인해 안테나의 대역폭(bandwidth)은 중심주파수의 약 10%에 해당하는 1 GHz를 갖는다. 구축된 산란계를 이용하여 X-band 파장 대역에서 마이크로파의 얼음 투과 및 두께 측정이 가능한지 검토하였고, 하천 얼음에서 레이더 후방산란을 측정하여 얼음의 두께를 산출하였다. 그리고 산란계 탐사자료로부터 얼음 두께 지도(ice thickness map)를 제작하여 얼음 두께의 공간적 변화를 관찰하였다.

## 마이크로파 산란계 구성

마이크로파 산란계는 지표면의 정규화된 radar cross section (RCS)을 측정하는 능동 원격탐사(active remote sensing) 시스템이다. 본 연구에 사용된 지상용 마이크로파 산란계는 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer, VNA), 안테나, 마이크로파 케이블, 노트북 컴퓨터 등으로 구성된다(Fig. 1). 안테나는 9.5 GHz (X-band)의 중심주파수( $f_c$ )를 사용하는 dual-polarized square horn 안테나를 사용하였으며, VNA는 Agilent

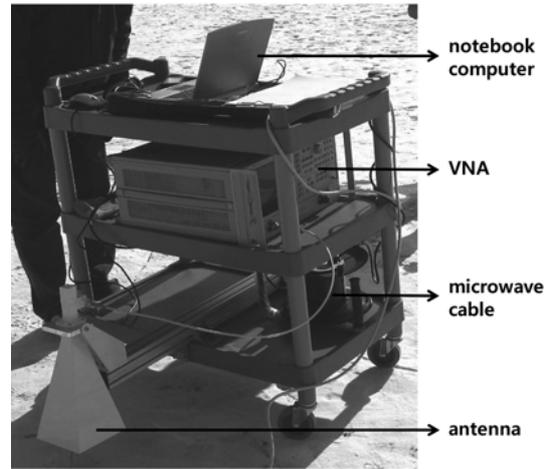


Fig. 1. Ground-based microwave scatterometer used in this study.

Table 1. Specification of ground-based scatterometer.

antenna type	square horn antenna
center frequency	9.5 GHz (X-band)
bandwidth	1 GHz
beam width	15°
antenna gain	21.7 dBi
time resolution	1 ns
range resolution	15 cm
incidence angle	0°
VNA	Agilent 8720D

Technologies사의 8720D 모델을 사용하였다(Table 1). VNA는 마이크로파 케이블로 안테나와 연결되어 마이크로파의 송출 및 안테나에 수신된 관측대상의 산란 특성을 측정하게 된다. VNA는 주파수 영역에서 frequency sweep을 통해 자료를 획득하고 이를 시간 영역으로 역푸리에 변환(Inverse Fourier Transform)을 한다. 이는 시간적으로 짧은 sinc 소스를 송수신하는 레이더 효과를 구현한다. 안테나는 VNA가 만든 주파수  $f$ 의 신호를 continuous wave로 송신하고, 관측 대상에서 산란된 신호를 수신한다. 노트북 컴퓨터는 산란계 시스템 전체를 제어하는 역할을 수행한다. 이와 같은 산란계 시스템은 얼음 표면에서 이동이 용이한 플랫폼에 탑재되어 얼음 두께 측정에 사용되었다.

VNA로 측정된 후방산란 신호의 크기  $U$  (unit)는 송신 마이크로파의 전압  $V_t$ 에 대한 수신 마이크로파의 전압  $V_r$ 의 비로써 레이더 방정식은 다음과 같은 관계를 가진다(Fung, 1994).

$$U^2 = \frac{V_r^2}{V_t^2} = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \quad (1)$$

식 (1)에서  $G$ 는 안테나의 이득,  $\lambda$ 는 마이크로파의 파장,  $R$ 은 안테나로부터 마이크로파가 산란된 관측대상까지의 거리, 그리고  $\sigma$ 는 RCS이다. 연구에 사용된 X-band 안테나의  $G$ 는 21.7 dBi이다(Table 1). 일반적으로 마이크로파 영역에서 관측

되는 지표면의 산란은 유전율과 거칠기(roughness)가 클수록 큰 특성을 가진다.

본 연구에 사용된 안테나는 높은 이득을 얻기 위한 고지향성의 안테나로 설계되었다. 따라서 빔 폭은 15°로 좁고, 안테나 return loss가 10 dB 이상으로 정의되는 대역폭( $B$ )은 중심 주파수에 비해 좁은 1 GHz이다. 이 때 시간 해상도(time resolution)  $\delta_t$ 는 다음과 같이 정의되며

$$\delta_t = \frac{1}{B} \quad (2)$$

1 GHz를 대입하면 1 ns가 된다. 그리고 거리 해상도(slant range resolution)  $\delta_r$ 은

$$\delta_r = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

로  $c$ 는 빛의 속도이다. 식 (3)에 의해 안테나의  $\delta_r$ 은 15 cm로 정의된다.

얼음의 표면은 해빙기(thawing season)를 제외하면 수분이 적은 건조한 특성을 가지기 때문에 유전율이 매우 작고, 마이크로파의 투과율이 높다(한향선과 이훈열, 2010; Dierking *et al.*, 1999). 얼음 내부에서는 유전율의 변화가 크지 않으므로 투과된 마이크로파는 얼음과 물의 경계면(ice/water interface)까지 도달할 수 있으며, 얼음/물 경계면에서 산란된 후 안테나에 수신된다. 얼음 내부에서는 체적산란을 일으키고 얼음/물 경계면에서의 후방산란 신호를 감쇠시키는 기포(air bubble)가 존재하지만 그 영향은 무시할 수 있을 정도로 매우 작다(Gherboudj *et al.*, 2010). 따라서 얼음의 굴절률을 알고 있을 경우 얼음의 두께 측정이 가능하다. Sadiku (1985)의 연구에 의하면, 9.5 GHz에서 순수한 얼음의 굴절률( $n$ )은 1.78이며, 얼음 내부에서 안테나의 거리 해상도  $\delta_r^{ice}$ 은 얼음의 굴절률로 인해 8.4 cm로 계산된다. 얼음의 두께  $d$ 는 공기/얼음 경계면(air/ice interface)과 얼음/물 경계면에서의 후방산란이 기록된 거리(range) 차이( $\Delta R$ )를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d = \frac{\Delta R}{n} \quad (4)$$

### 산란계 자료획득

산란계로부터 얼음 두께 측정을 위한 현장탐사를 수행하기 전에 X-band 파장 대역에서 얼음 두께 측정의 가능성을 검토하기 위한 예비탐사를 수행하였다. 예비탐사는 2011년 1월 6일 강원대학교 학내에 위치한 저수지인 연적지에서 수행하였다. 얼음으로부터 후방산란을 측정하기 전에 얼음의 두께가 16 cm임을 실측을 통해 확인하였다. Dierking *et al.* (1999)에 의하면 40° 이내의 마이크로파 입사각에서 얼음/물 경계면에서의 산란신호가 잘 측정될 수 있다. 본 연구에서는 후방산란

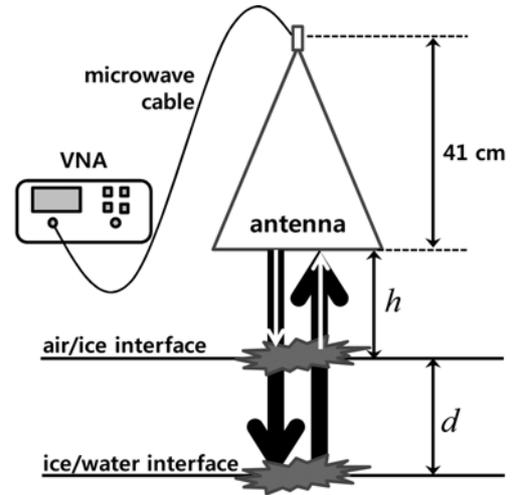
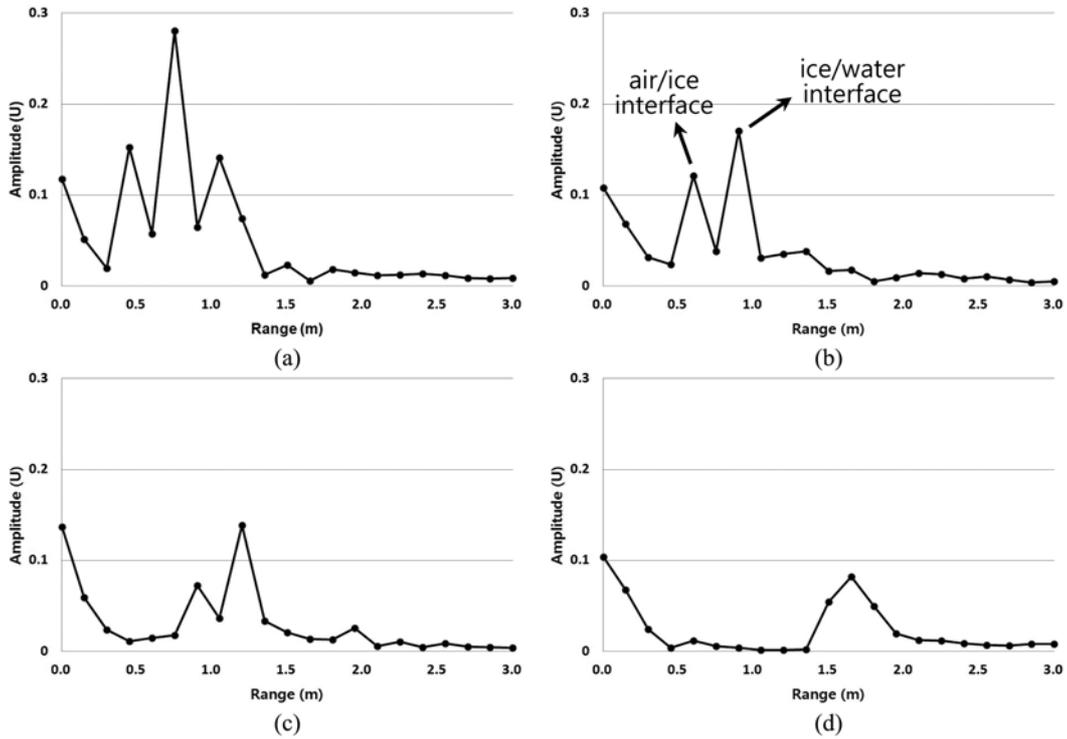


Fig. 2. Schematic diagram of radar backscattering measured by scatterometer from river ice.  $h$  and  $d$  are antenna height and ice thickness, respectively.

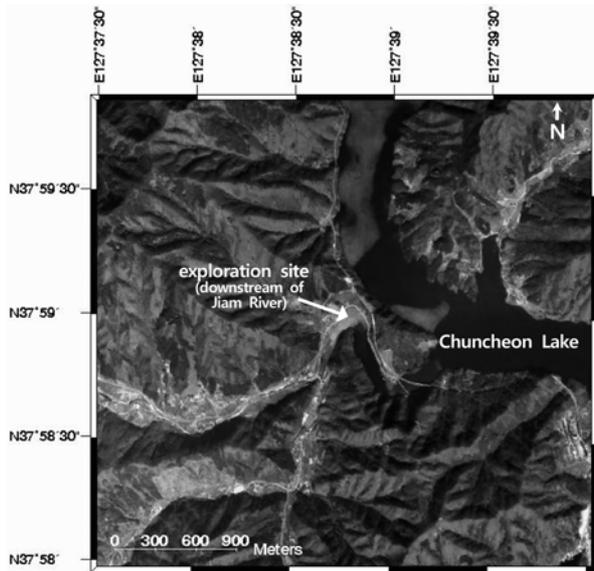
신호의 손실을 가정 적게 하기 위하여 안테나의 마이크로파 입사각을 0°로 설정하였다. Fig. 2는 마이크로파의 입사각이 0°일 때 산란계가 관측할 수 있는 공기/얼음 경계면과 얼음/물 경계면에서의 후방산란 모식도를 나타낸다. 모식도에서  $d$ 는 얼음의 두께,  $h$ 는 안테나와 얼음 표면 사이의 거리이다. 안테나의 개구면에서 마이크로파의 송신부까지의 거리는 41 cm이다.

Fig. 3은 얼음 표면으로부터 안테나의 높이  $h$ 를 0 cm, 13 cm, 45 cm, 그리고 100 cm로 설정한 후 측정한 얼음의 후방산란으로 가로축은 range, 세로축은 후방산란의 세기이다. 안테나를 얼음 표면에 밀착시킨 경우( $h=0$  cm), 산란계는 공기/얼음과 얼음/물 경계면에서의 후방산란을 정확히 구분할 수 없었다(Fig. 3(a)). 이는 안테나가 얼음 표면에 밀착된 상태에서 송수신 마이크로파가 서로 심한 간섭을 일으키기 때문으로 판단된다. 그러나 안테나를 얼음 표면으로부터 13 cm 높이에 위치시킨 경우 산란계 시스템은 두 개의 강한 후방산란을 측정하였다(Fig. 3(b)). Fig. 3(b)에서  $\Delta R$ 은 30 cm이며, 이를 식 (4)에 적용하면 얼음의 두께는 16.8 cm로 계산된다. 현장에서 실측된 얼음의 두께(16 cm)를 고려할 때 두 개의 강한 후방산란은 각각 공기/얼음과 얼음/물 경계면에서의 후방산란임을 확인할 수 있으며, 이를 통해 산란계를 이용한 얼음 두께 측정이 가능함을 알 수 있었다.

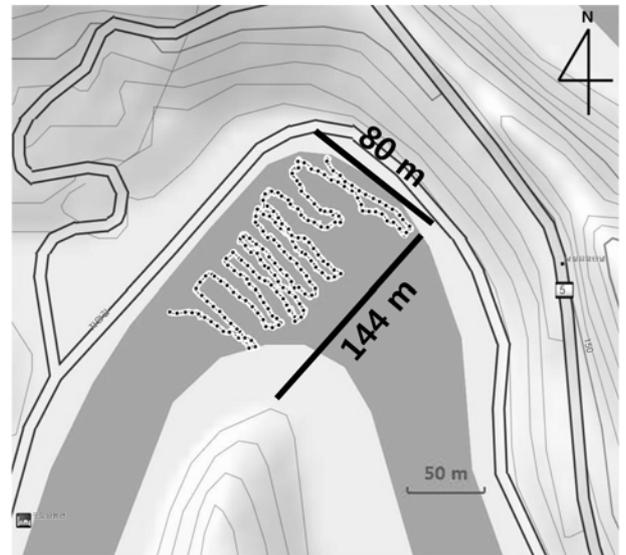
Fig. 3(c)는  $h$ 가 45 cm인 경우 관측된 얼음의 후방산란으로 두 개의 산란 신호가 확인되며, 이는 안테나의 높이와 얼음의 두께를 고려하면 각각 공기/얼음 경계면과 얼음/물 경계면에서 발생한 것이다. 그러나 후방산란 신호의 세기는  $h$ 가 13 cm인 경우와 비교했을 때 매우 작음을 알 수 있다. 안테나의 높이가 얼음표면으로부터 100 cm인 경우 산란계는 공기/얼음 경계면에서의 산란은 관측하였으나, 얼음/물 경계면에서의 산란은 관



**Fig. 3.** The radar backscattering from ice measured by scatterometer in test exploration when height of antenna ( $h$  in Fig. 2) was set to (a) 0 cm, (b) 13 cm, (c) 45 cm and (d) 100 cm. Strong radar backscattering from air/ice and ice/water interface is observed in (b), while they can not be identified in (a) and (d). Radar backscattering from air/ice and ice/water interface is also observed in (c) but the backscattering signal is weak.



**Fig. 4.** Location of field exploration site of ground-based scatterometer.

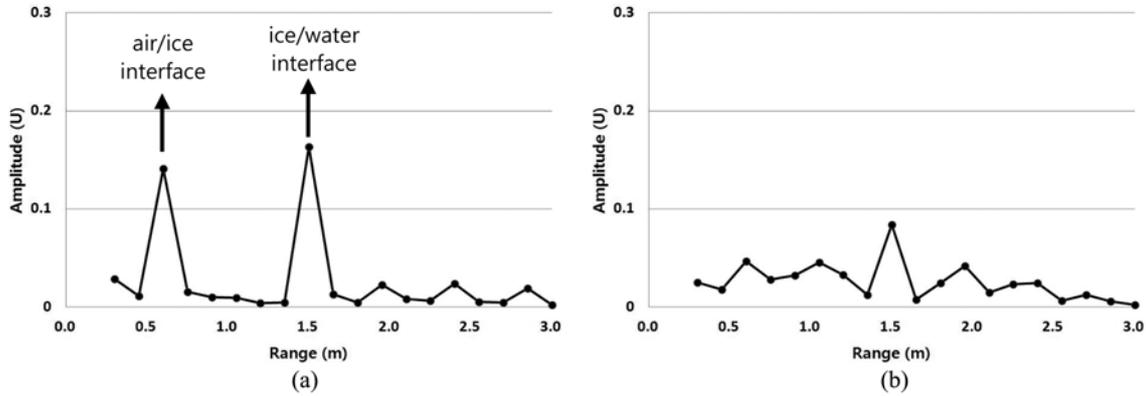


**Fig. 5.** Scatterometer exploration path over river ice.

측하지 못하였다(Fig. 3(d)). 이는 VNA의 제한된 파워가 영향을 준 것으로 판단된다. 본 연구에서는 얼음 두께 측정을 위한 안테나의 적절한 높이로 13 cm를 선택하였고, 이를 현장탐사에 적용하였다.

산란계 현장탐사는 춘천호의 유입지류인 지암천의 하류(강

원도 춘천시 서면 오월리)에서 수행되었다(Fig. 4). 지암천의 하류는 유속이 비교적 빠르며, 동절기에는 낮은 기온과 강한 바람으로 인해 수십 cm 두께의 얼음이 형성된다. 현장탐사는 2011년 1월 25일에 수행되었으며, 얼음 표면에 눈이 존재하였으나 수분이 적은 건조한 상태였다. Fig. 5는 탐사 측선의 모습으로 144 × 80 m 영역에 대해 산란계 탐사를 수행하였다.



**Fig. 6.** The examples of radar backscattering from ice of Jiam River. Scatterometer exploration data that clearly shows backscattering from air/ice and ice/water interface such as (a) is used to extract ice thickness, while data like (b) is filtered out due to indistinctness of the backscattering from two interfaces.

측선을 따라 수행된 탐사에서 얼음의 후방산란은 동일한 지점에서 최소 2회 이상 측정되도록 하였다. 이는 후방산란 측정 중에 플랫폼의 이동 및 바람과 같은 외부요인에 의한 흔들림으로 산란계 시스템의 안정성이 확보되지 않을 경우 잘못된 자료가 획득될 수 있기 때문이다. 탐사는 인위적으로 치워진 눈이 두껍게 쌓여 플랫폼의 이동성이 확보되지 못한 곳과 얼음의 두께가 매우 얇아 안전에 우려가 있는 지역은 제외하고 수행하였다.

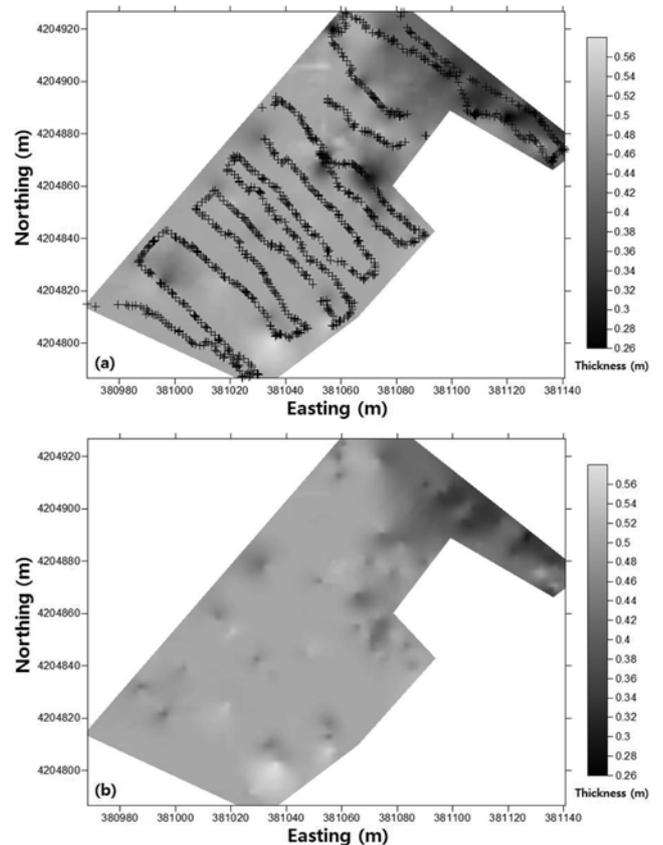
**자료처리 및 결과**

약 1시간 동안 탐사를 수행하여 총 1398개의 마이크로파 산란계 측정 자료를 획득하였다. Fig. 6은 마이크로파 산란계로부터 측정된 자료의 일부를 도시한 것이다. Fig. 6(a)는 공기/얼음과 얼음/물 경계면에서의 후방산란이 잘 구분되는 자료로써 얼음 두께 측정에 사용하였다. 그러나 Fig. 6(b)의 경우 두 경계면에서의 후방산란을 뚜렷하게 구분할 수 없다. 이는 마이크로파의 송수신 과정에서 플랫폼의 이동이나 바람에 의해 산란계 시스템의 안정성이 확보되지 못했기 때문이다. 이러한 자료는 136개이며, 얼음 두께 측정에서 제외하였다. 총 1262개의 유효자료에 식 (4)를 적용하여 얼음의 두께를 산출하였다. 마이크로파 산란계 탐사가 수행된 지점 중 세 지점에서 얼음의 두께를 실측하였고, 이를 산란계로 측정된 얼음 두께와 비교하였다(Table 2). 세 지점에서 마이크로파 산란계로 측정된 얼음의 두께는 실측 두께와 비교하여 각각 2.9 cm, 3.4 cm, 그리고 0.9 cm의 차이를 나타냈다.

마이크로파 산란계 측정 결과로부터 산출된 얼음의 두께는 점 자료(point data)이므로 후방산란이 측정되지 않은 지점에서의 얼음 두께 추정을 위해 산란계 측정 자료를 바탕으로 크리깅(kriging) 보간법을 수행하였다. Fig. 7(a)는 모든 유효자료로부터 산출된 얼음 두께를 이용하여 크리깅 보간법을 수행한 결과이다. 검정색의 ‘+’ 문양으로 나타낸 것은 얼음으로부터

**Table 2.** Ice thickness from *in-situ* measurement and scatterometer exploration.

	point 1	point 2	point 3
<i>in-situ</i> ice thickness	45 cm	45.5 cm	43 cm
ice thickness measured by scatterometer	42.1 cm	42.1 cm	42.1 cm
difference of ice thickness ( <i>in-situ</i> - measured)	2.9 cm	3.4 cm	0.9 cm



**Fig. 7.** Ice thickness map (a) by using all of the ice thickness measured by scatterometer and (b) after removing outliers.

후방산란이 측정된 지점(탐사 측선)이다. 일반적으로 하천 및 호수의 얼음 두께는 급격하게 변화하지 않는데, 크리깅 보간법을 통해 산출된 지암천 얼음 두께는 일부 영역에서 급격한 변화를 나타냈다. 마이크로파 산란계 탐사로부터 측정된 얼음 두께를 검토한 결과 일부 지역에서 인접한 측정 지점에 비해 얼음 두께의 차이가 큰 측정 지점이 있음을 확인할 수 있었다. 이는 마이크로파 산란계 시스템의 후방산란 측정 오류 때문에 발생한 이상값(outlier)으로써 크리깅 보간법을 수행할 때 제거해 줄 필요가 있다. 본 연구에서는 산란계 시스템으로 측정된 얼음의 두께가 인접한 측정 지점의 두께보다  $\delta_r^{ice}$  (8.4 cm)의 2배 이상 차이가 있을 경우 이를 이상값으로써 제거하였다.

Fig. 7(b)는 이상값을 제거한 후 수행한 크리깅 보간법의 결과이다. 얼음의 두께는 하천의 흐름방향이 급격히 바뀌는 북동쪽 영역을 제외하면 평균 50 cm로 비교적 균일하였다. 하천의 흐름방향이 바뀌는 영역에서 관찰된 얼음의 두께는 30 ~ 40 cm로 얇았으며, 이는 이 부분의 유속이 다른 지역에 비해 매우 빠르기 때문이다. 그리고 얼음의 두께가 비교적 균일한 영역에서 국지적으로 두께가 얇은 지역이 일부 관찰되는데, 이는 해당 위치의 얼음 내에 식물의 잎과 같이 마이크로파의 산란에 영향을 미치는 매개물이 존재하거나, 낚시를 위해 뚫린 구멍이 다시 얼었으나 주변의 얼음 두께만큼 얼지 않았기 때문으로 판단된다.

## 결 론

본 논문에서는 X-band 파장 대역에서 얼음의 두께를 측정하기 위해 9.5 GHz의 중심주파수를 사용하는 안테나를 이용하여 지상용 마이크로파 산란계를 구축하였고, 현장탐사를 수행하였다. 산란계 탐사 결과 X-band 파장 대역에서 마이크로파는 얼음을 투과하여 얼음/물 경계면에서 산란됨을 확인할 수 있었고, 이로부터 얼음의 두께를 산출할 수 있었다. 마이크로파 산란계로 측정된 지암천 하류의 얼음 두께는 대부분 50 cm로 균일하였으며, 하천의 유속이 빨라지는 지점에서 얼음은 30 ~ 40 cm의 얇은 두께를 나타냈다. 유속의 변화율이 거의 일정한 곳에서 국지적으로 얼음 두께가 얇은 지점이 관찰되었는데, 이는 얼음 내에 마이크로파 산란에 영향을 미치는 매개물이 존재하거나 인위적으로 얼음이 뚫린 후 다시 얼었기 때문인 것으로 판단되었다.

본 연구를 통하여 X-band 파장 대역에서 얼음의 두께 측정이 가능함을 확인하였고, 하천 얼음 두께의 공간적 변화를 분석할 수 있었다. 이 연구는 향후 X-band SAR 시스템과 항공기 탑재 산란계 시스템의 활용분야 확대에 기여할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 보다 넓은 대역폭을 사용할 수 있는 안테나를 이용하여 얼음에서의 거리 해상도를 높인다면 얼음 두께 측정을 위한 마이크로파 산란계의 독자적인 활용분야가 형성될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업-지능형국토정보기술혁신사업 과제의 연구비지원(06국토정보B01)에 의해 수행되었습니다. 추운 겨울 산란계 현장탐사 자료 획득에 도움을 주신 강원대학교 지구물리학과 조혜련 학생과 장효선 학생에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김기영, 홍명호, 손호웅, 이주한, 2006a, 동결된 소양호에서의 지하투과레이더 시험탐사, *지질학회지*, **42**, 273-282.
- 김기영, 홍명호, 손호웅, 이주한, 2006b, 신호파형 역대합을 통한 지중레이더 자료의 수직해상도 향상, *지구물리*, **9**, 1-6.
- 이주한, 진영근, 홍종국, 홍성민, 김예동, 2005, GPR을 이용한 리빙스턴섬 빙하층 탐사, *지구물리*, **8**, 63-66.
- 한향선, 이훈열, 2010, 호수 얼음의 상변화에 따른 마이크로파 산란특성 연구, 2010 한국지구물리물리탐사학회 학술대회 초록집, 한국지구물리물리탐사학회, 강원대학교, 2010년 10월 7-8일, 춘천, 53-54.
- 황지환, 이경엽, 박성민, 오이석, 2009, X-밴드용 완전 편파 scatterometer 설계, *한국전자파학회논문지*, **20**, 1308-1315.
- Arcone, S. A., Finnegan, D. C., and Liu, L., 2006, Target interaction with stratigraphy beneath shallow, frozen lakes: Quater-wave resonances within GPR profiles, *Geophysics*, **71**, K119-K131.
- Dierking, W., Pettersson, M. I., and Askne, J., 1999, Multi-frequency scatterometer measurements of Baltic Sea ice during EMAC-95, *International Journal of Remote Sensing*, **20**, 349-372.
- Fang, X., and Stefan, H. G., 1998, Potential climate warming effects on ice covers of small lakes in the contiguous U.S., *Cold Regions Science and Technology*, **27**, 119-140.
- Fung, A. K., 1994, *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*, Artech House, Inc.
- Galley, R. J., Trachtenberg, M., Langlois, A., Barber, D. G., and Shafai, L., 2009, Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness, *Cold Regions Science and Technology*, **57**, 29-38.
- Geldsetzer, T., Mead, J. B., Yackel, J. J., Scharien, R. K., and Howell, E. L., 2007, Surface-based polarimetric C-band scatterometer for field measurements of sea ice, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45**, 3405-3416.
- Gherboudj, I., Bernier, M., and Leconte, R., 2010, A backscatter modeling for river ice: Analysis and numerical results, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **48**, 1788-1798.
- Isleifson, D., Langlois, A., Barber, D. G., and Shafai, L., 2009, C-band scatterometer measurements of multiyear sea ice before fall freeze-up in the Canadian Arctic, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47**, 1651-1661.
- Lee, H., Chae, H., and Cho, S.-J., 2011, Radar backscattering of

- intertidal mudflats observed by Radarsat-1 SAR images and ground-based scatterometer experiments, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **49**, 1701-1711.
- Sadiku, M. N. O., 1985, Refractive index of snow at microwave frequencies, *Applied Optics*, **24**, 572-575.
- Stevens, C. W., Moorman, B. J., Solomon, S. M., and Hugenholtz, C. H., 2009, Mapping subsurface conditions within the near-zone of an Arctic delta using grounding penetrating radar, *Cold Regions Science and Technology*, **56**, 30-38.
- Williams, G, Layman, K. L., and Stefan, H. G., 2004, Dependence of lake ice covers on climatic, geographic and bathymetric variables, *Cold Regions Science and Technology*, **40**, 145-164.