

X-밴드 마이크로파 산란계를 이용한 하천의 얼음 두께 측정

김범준 · 이훈열[†]

강원대학교 지구물리학과

jun@kangwon.ac.kr, hoonyol@kangwon.ac.kr

Measurement of River Ice Thickness by Using X-band Microwave Scatterometer

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 측정한 후 얼음의 두께를 산출하였으며, 크리깅 보간법을 사용하여 지암천 하류의 얼음두께 지도를 제작하였다. 지암천 하류의 얼음 두께는 대부분 50 cm로 나타났으며, 하천의 유속이 빠른 곳의 얼음 두께는 30 ~ 40 cm로 얇았다. 유속이 일정한 곳에서 주변보다 얼음 두께가 얇은 지점이 일부 관찰되었는데, 이는 얼음 내에 마이크로파 산란에 영향을 미치는 매개물이 존재하거나 낚시를 위해 인위적으로 뚫린 얼음이 다시 얼었으나 주변의 얼음 두께만큼 얼지 못했기 때문인 것으로 판단되었다. 본 연구는 향후 X-band SAR 시스템과 항공기 탑재 산란계 시스템의 활용분야 확대에 기여할 것으로 기대된다.

1. 서론

동절기에 하천 및 호수에 형성되는 얼음의 두께는 국지적 기후변화 분석을 위한 중요한 인자로 사용되고 있으며, 겨울철 관광산업과도 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 얼음 두께의 정확한 측정이 필요하다. 얼음의 두께는 얼음코어 획득을 통해 가장 정확하게 측정될 수 있으나, 시공

간적인 제약이 수반되어 넓은 범위의 얼음 두께 측정에는 한계가 있다.

최근에는 전자기파를 이용하는 장비를 통해 정밀한 얼음 두께가 측정되고 있다. 지하투과레이더(ground penetrating radar, GPR)는 수십 ~ 수백 MHz 대역의 주파수를 사용하는 지구물리탐사 장비로 유전율이 작은 얼음에서 투과율이 높아 얼음의 두께 측정에 많이 사용되고 있다. 위성 및 항공 레이더 영상의 검보정 용으

[†] 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

로 널리 사용되는 지상용 마이크로파 산란계는 GPR과 유사한 원리로 지표면에서의 후방산란을 측정한다(Lee *et al.*, 2011; 황지환 외, 2009). 그러나 마이크로파 산란계는 GPR에 비해 고주파 영역인 수 ~ 수십 GHz 대역의 안테나를 사용하는 차이점이 있다.

본 연구에서는 중심주파수가 9.5 GHz인 안테나를 이용하여 지상용 마이크로파 산란계를 구축하였고, X-band 파장 대역에서 마이크로파의 얼음 투과 및 두께 측정 가능성을 검토하였다. 그리고 하천 얼음에 대한 후방산란 측정을 통해 얼음의 두께를 산출하였으며, 얼음 두께 지도(ice thickness map)를 제작하여 얼음 두께의 공간적인 변화를 관찰하였다.

2. 마이크로파 산란계 구성 및 현장탐사

본 연구에 사용된 지상용 X-band 마이크로파 산란계는 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer, VNA), 안테나, 마이크로파 케이블, 노트북 컴퓨터 등으로 구성된다. 안테나는 중심주파수가 9.5GHz인 dual-polarized square horn 안테나를 사용하였으며, VNA는 Agilent Technologies사의 8720D 모델을 사용하였다(Table 1). 노트북 컴퓨터는 산란계 시스템 전체를 제어하는 역할을 수행한다.

안테나의 대역폭(bandwidth)은 1 GHz로 설정하였으며, 이로부터 산란계의 시간해상도(time resolution) δ_t 와 거리해상도(range resolution) δ_r 은 각각 1 ns와 15 cm로 정의된다.

얼음은 해빙기를 제외하면 수분이 적은 건조한 표면을 가지며, 얼음 내부에서는 유전을 변화가 매우 작기 때문에 마이크로파의 투과율이 높다(Dierking *et al.*,

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

1999). 투과된 마이크로파는 얼음과 물의 경계면(ice/water interface)까지 도달하여 산란된 후 안테나에 수신된다. 따라서 얼음의 굴절률을 이용하면 산란계 측정결과로부터 얼음 두께 측정이 가능하다. Sadiku (1985)의 연구에 의하면, 9.5 GHz에서 순수한 얼음의 굴절률은 1.78이며, 얼음 내부에서 본 연구에 사용된 안테나의 거리해상도 δ_r^{ice} 는 8.4 cm로 계산된다. 얼음의 두께는 공기/얼음 경계면(air/ice interface)과 얼음/물 경계면에서의 후방산란이 기록된 거리(range) 차이를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d = \frac{\Delta R}{n} \quad (1)$$

X-band 파장 대역에서 얼음두께 측정의 가능성을 검토하기 위해 강원도 춘천시 강원대학교 학내에 위치한 연적지에서 산란계 실험을 수행하였다. 마이크로파의 입사각은 후방산란 측정손실을 최소화하기 위해 0°로 설정하였다. Fig. 1은 안테나에서 송신된 마이크로파가 공기/얼음의 경계면과 얼음/물의 경계면에서 후방산란되어 다시 안테나로 수신되는 모식도로써, h는

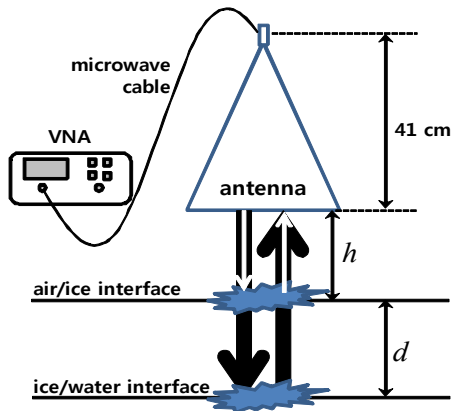


Fig. 1. Schematic diagram of radar backscattering measured by scatterometer from river ice. h and d are antenna height and ice thickness, respectively.

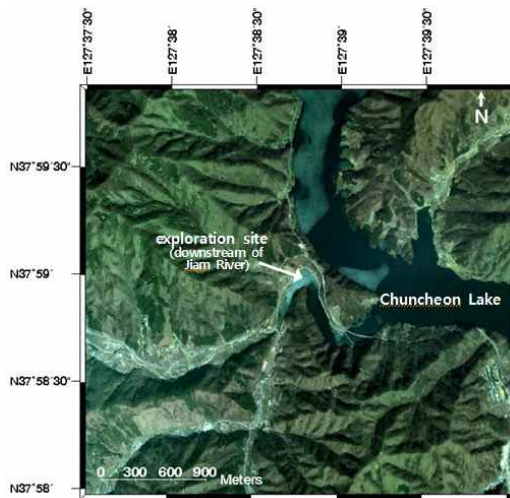


Fig. 2. Location of field exploration site of ground-based scatterometer.

안테나의 높이, d 는 얼음의 두께를 의미한다.

본 연구에서는 안테나의 높이 h 를 13 cm로 설정하여 얼음에서의 후방산란을 측정하였고, 두 개의 강한 후방산란을 확인할 수 있었다. 안테나의 높이와 현장에서 실측된 얼음의 두께(16 cm)를 고려할 때,

두 개의 강한 산란은 공기/얼음과 얼음/물 경계면에서 발생하였으며 이를 통해 X-band 마이크로파 산란계를 이용한 얼음 두께 측정이 가능함을 알 수 있었다.

얼음 두께 측정을 위한 마이크로파 산란계 현장탐사는 춘천호의 유입지류인 지암천의 하류(강원도 춘천시 서면 오월리)에서 2011년 1월 25일에 수행되었다(Fig. 2). 얼음의 표면에는 눈이 존재하였으나 건조한 상태였다. 얼음에서의 후방산란은 144×80 m 영역에 대해 설정한 측선 상에서 측정되었으며, 눈이 두껍게 쌓인 지역과 얼음의 두께가 얇아 안정성이 미확보된 지역은 제외하였다.

3. 자료처리 및 결과

약 1시간 동안 탐사를 수행하여 총 1398개의 마이크로파 산란계 측정 자료를 획득하였다. Fig. 3은 산란계로부터 측정된 자료의 일부를 나타낸 것이다. Fig 3(a)는 공기/얼음과 얼음/물 경계면에서의 후방산란이 잘 구분되는 자료로서 얼음 두께 측정에 사용하였다. 하지만 Fig. 3(b)의 경우 두 경계면에서의 후방산란을 명확히 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 유효자료를 이용하여 얼음의 두께를 산출하였다. 산란계로부터 후방산란이 측정된 지점 중 세 지점에서 얼음의 두께를 실측하였고, 이를 산란계로 측정된 얼음 두께와 비교하였다. 세 지점에서 마이크로파 산란계로 측정된 얼음의 두께는 실측 두께와 비교하여 각각 2.9 cm, 3.4 cm, 그리고 0.9 cm의 차이를 나타냈다(Table. 2).

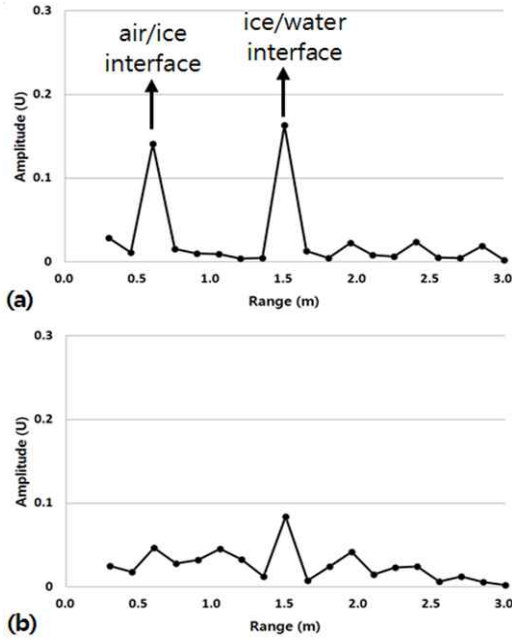


Fig. 3. The examples of radar backscattering from ice of Jiam River. Scatterometer exploration data that clearly shows backscattering from air/ice and ice/water interface such as (a) is used to extract ice thickness, while data like (b) is filtered out due to indistinctness of the backscattering from two interfaces.

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

마이크로파 산란계 측정 결과로부터 산출된 얼음의 두께는 점 자료(point data)이므로 후방산란이 측정되지 않은 지점에

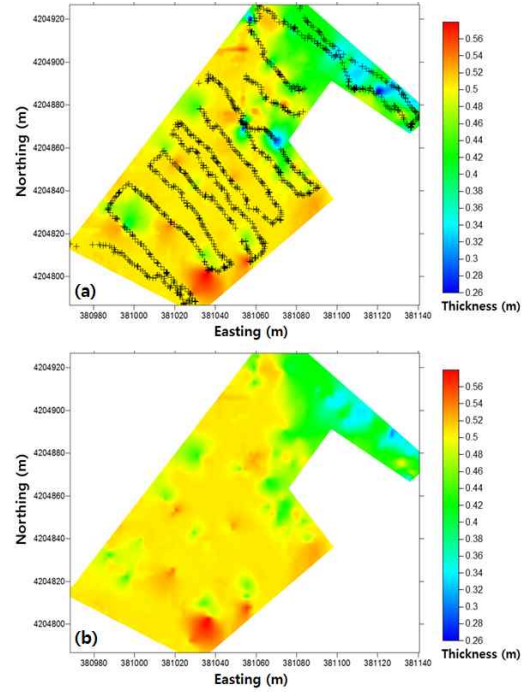


Fig. 4. Ice thickness map (a) by using all of the ice thickness measured by scatterometer and (b) after removing outliers.

서의 얼음 두께 추정을 위해 산란계 측정 자료를 바탕으로 크리깅(kriging) 보간법을 수행하였다. Fig. 4(a)는 모든 유효자료로부터 산출된 얼음 두께를 이용하여 크리깅 보간법을 수행한 결과이다. 검정색의 '+' 문양으로 나타낸 것은 얼음으로부터 후방산란이 측정된 지점이다. 일반적으로 하천 및 호수의 얼음 두께는 급격하게 변화하지 않는데, Fig. 4(a)의 일부 영역에서는 얼음 두께의 급격한 변화가 관찰되었다. 산란계로부터 측정된 얼음 두께를 검토한 결과 일부 지역에서 인접한 측정 지점에 비해 얼음 두께의 차이가 큰 측정 지점이 있음을 확인할 수 있었다. 이는 산란계 시스템의 후방산란 측정 오류 때문에 발생한 이상값(outlier)으로, 크리깅을 수행할 때 제거해 줄 필요가 있다. 본 연구에서는 산란계로 측정된 얼음의 두께가

인접한 측정 지점의 두께보다 δ_r^{ice} (8.4 cm)의 2배 이상 차이가 있을 경우 이를 이상값으로써 제거하였다.

Fig. 4(b)는 이상값을 제거한 후 수행한 크리깅 보간법의 결과이다. 전반적인 얼음의 두께는 50 cm로 균일 하였으며, 물의 흐름 방향이 바뀌는 북동쪽 영역의 얼음 두께는 30~40 cm로 얇게 나타났다. 이는 이 부분의 유속이 다른 지역에 비해 매우 빠르기 때문이다. 그리고 얼음의 두께가 비교적 균일한 영역에서 국지적으로 두께가 얇은 지역이 관찰되었다. 이는 얼음 내에 식물의 잎과 같이 마이크로파의 산란에 영향을 미치는 매개물이 존재하거나, 낚시를 위해 뚫린 구멍이 다시 얼었으나 주변의 얼음 두께만큼 얼지 않았기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 X-band 파장 대역에서 얼음의 두께를 측정하기 위해 9.5 GHz의 중심주파수를 사용하는 안테나를 이용하여 지상용 마이크로파 산란계를 구축하였다. 현장에서 수행한 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. 유속이 거의 일정한 곳에서 국지적으로 얼음 두께가 얇은 지점이 관찰되었는데, 이는 해당 지점의 얼음 내에 식물의 잎과 같은 매개물이 존재하거나, 인위적으로 뚫은 구멍이 주위 얼음 두께만큼 다시 얼지 못한 것으로 판단되었다.

본 연구를 통하여 X-band 파장 대역에

서 얼음의 두께 측정이 가능함을 확인하였고, 하천 얼음 두께의 공간적 변화를 분석할 수 있었다. 연구에서 사용한 산란계 시스템의 해상도는 얼음에서 8.4 cm로서 세밀한 얼음 두께 파악에는 어려움이 있었다. 향후 더 높은 대역폭을 사용할 수 있는 안테나를 사용하여 얼음에서의 거리 해상도를 높인다면 얼음 두께 측정을 위한 마이크로파 산란계의 독자적인 활용분야가 형성될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 황지환, 이경엽, 박성민, 오이석, 2009. X-밴드용 완전 편파 scatterometer 설계, 한국전자파학회논문지, 20: 1308-1315.
- Dierking, W., Pettersson, M.I., and Askne, J., 1999, Multifrequency scatterometer measurements of Baltic Sea ice during EMAC-95, *International Journal of Remote Sensing*, 20: 349-372.
- 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.