

# 마이크로파 산란계와 유전자 알고리즘을 이용한 호수 얼음의 물성 모델링

한향선 · 이훈열<sup>†</sup>

강원대학교 지구물리학과

hyangsun@kangwon.ac.kr, hoonyol@kangwon.ac.kr

## Modeling of Physical Properties of Lake Ice by Using Microwave Scatterometer and Genetic Algorithm

Hyangsun Han and Hoonyol Lee<sup>†</sup>

Department of Geophysics, Kangwon National University

**요약:** 본 연구에서는 호수 얼음의 상변화에 따른 마이크로파 산란특성을 분석하기 위해 얼음 표면에 물을 도포한 후 마이크로파 산란계 실험을 수행하였다. 그리고 유전자 알고리즘을 이용하여 얼음의 물성을 추정하였다. 산란계 실험 결과에서 두 개의 강한 산란이 관찰되었다. 첫 번째 산란신호( $S_1$ )는 얼음의 표면에서 발생한 것으로 시간이 지남에 따라 크기가 감소하다가 다시 증가하는 양상을 나타냈다. 얼음/물 경계면의 위치에서 발생한 두 번째 산란신호( $S_2$ )는  $S_1$ 과 대조적인 증감양상을 나타냈다. 이는 얼음 표면의 상변화에 따른 유전율 변화에 기인한다. 유전자 알고리즘을 통해 추정된 얼음 표면의 유전율은 도포된 물에 의해 실험 초기에 매우 큰 값을 나타냈으나 물이 결빙되면서 급격히 감소하였다. 이 때 얼음 표면의 거칠기는 무작위하게 변화하지만 변화 폭은 크지 않았다. 기온이 영상으로 상승하고 얼음 표면에 해빙이 일어나면서 유전율은 급격히 증가하였고, 거칠기는 다시 무작위성 변화를 나타냈다.

### 1. 서론

얼음은 기온의 변화와 물의 온도, 바람의 세기에 따라 물리적 특성이 변화한다 (Williams *et al.*, 2004). 이러한 얼음의 물성은 기후 변화 관찰을 위한 중요한 인자로 사용되고 있다. 또한 수자원의 사용에도 영향을 미치므로, 얼음의 정확한 물성 분석은 매우 중요하다(Gherboudj *et al.*, 2010).

마이크로파 산란계는 관측 대상으로부터 후방산란을 측정한다. 얼음에서의 후방산란은 얼음의 유전율과 거칠기 뿐만 아니라 기포의 함량과 같은 다양한 물성에 의존한다. 따라서 마이크로파 산란계는 얼음의 물성 측정에 매우 유용하게 사용될 수 있다(Gherboudj *et al.*, 2010).

얼음의 표면은 결빙기와 해빙기에 서로 상반되는 상변화를 일으키며, 유전율과 거

<sup>†</sup> 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

칠기의 변화는 다양하게 나타날 수 있다. 그러나 현재까지 수행된 연구에서는 일정한 유전율과 거칠기에 대해 파장과 편파, 입사각에 따른 얼음의 산란특성만이 논의되었다(Dierking, 1999; Geldsetzer *et al.*, 2007).

이 연구에서는 C-band HH 편파 산란계를 구성하여 호수 얼음 표면에서 상변화가 진행되는 동안의 산란특성을 측정하였다. 그리고 유전자 알고리즘을 이용하여 얼음의 물성을 추정하고 이로부터 얼음의 후방산란을 모델링하였다.

## 2. 현장 실험 및 얼음의 물성 모델링

본 연구에서는 중심주파수가 5.3 GHz인 C-band HH 편파 Square Horn 안테나를 이용하여 마이크로파 산란계 시스템을 구축하였다. 안테나의 빔 폭은 600 MHz로 설정하였고, 시간해상도와 거리해상도는 각각 1.67 ns와 25 cm이다. 마이크로파 산란계 현장실험은 2006년 2월 2일 춘천호에서 수행되었다. 실험을 수행하기 전에 전기적, 구조적 변화가 없는 삼면코너반사기에 대한 반복측정을 통해 산란계의 안정성을 확인하였다. 그리고 상변화를 구현하기 위하여 얼음 표면에 물(surface water)을 도포한 후 안테나의 높이를 2 m, 입사각은 40°로 설정하여 호수 얼음에서의 산란을 2시간 동안 10회 반복 측정하였다.

산란계 실험 결과로부터 얼음의 물성을 추정하기 위해서는 후방산란 모델링이 수행되어야 한다. 얼음으로부터 관찰될 수 있는 후방산란은 얼음 표면에서의 표면산란( $\sigma_{surface}$ ), 체적산란( $\sigma_{volume}$ ), 얼음/물 경계면에서의 산란( $\sigma_{iws}$ ), 그리고 얼음/물 경계면에서 반사된 신호와 얼음의 이질성(volume inhomogeneity) 사이의 상호작용에 의한 산란( $\sigma_{iww}$ )이다(Fung, 1994).

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 ice model을 고려하였다. 이 모델에서 surface water의 유전율과 거칠기는 시간에 따라 변화하며, 다른 물성들은 고정된 값이 적용된다. 얼음의 유전율은  $\sigma_{surface}$ 와  $\sigma_{iws}$ 가 발생한 위치와 실측된 얼음의 두께를 이용하여 구할 수 있으며, 얼음 아래 위치한 물의 유전율은 Sadiku(1985)에 의해 제안된 경험식으로부터 계산할 수 있다. Ice model로부터 후방산란을 모델링하기 위해 Fig. 2와 같은 scatterometer measurement model을 가정하였다. Fig. 2에서 산란계는 2개의 radar return을 측정할 수 있다. 첫 번째 return( $S_1$ )에는 안테나의 빔 중앙에서 관측되는  $\sigma_{surface}$ 와

용에 의한 산란( $\sigma_{iww}$ )이다(Fung, 1994). 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 ice model을 고려하였다. 이 모델에서 surface water의 유전율과 거칠기는 시간에 따라 변화하며, 다른 물성들은 고정된 값이 적용된다. 얼음의 유전율은  $\sigma_{surface}$ 와  $\sigma_{iws}$ 가 발생한 위치와 실측된 얼음의 두께를 이용하여 구할 수 있으며, 얼음 아래 위치한 물의 유전율은 Sadiku(1985)에 의해 제안된 경험식으로부터 계산할 수 있다. Ice model로부터 후방산란을 모델링하기 위해 Fig. 2와 같은 scatterometer measurement model을 가정하였다. Fig. 2에서 산란계는 2개의 radar return을 측정할 수 있다. 첫 번째 return( $S_1$ )에는 안테나의 빔 중앙에서 관측되는  $\sigma_{surface}$ 와

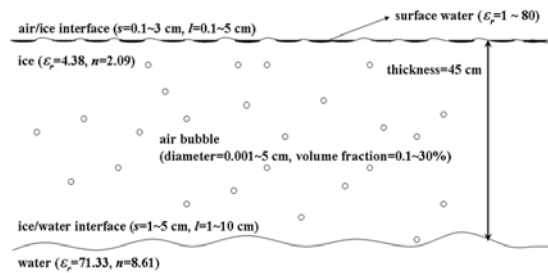


Fig. 1 The ice model used in this study.

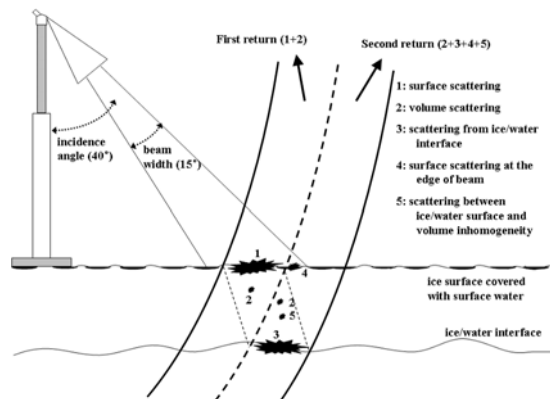


Fig. 2 The scatterometer measurement model proposed in this study.

$\sigma_{volume}$  이 포함된다. 두 번째 return( $S_2$ )에  
는 안테나의 빔 중앙에서 수신된  $\sigma_{iws}$ ,  
 $\sigma_{volume}$ ,  $\sigma_{iww}$ , 그리고 안테나 빔의 가장자  
리에서 수신된  $\sigma_{surface}$  가 모두 포함된다.

얼음에서의 후방산란을 모델링하기 위  
해서는 얼음 표면과 얼음/물 경계면의 유  
전율과 RMS height, correlation length,  
그리고 기포의 크기와 함량이 측정되어야  
한다. 그러나 이 모델변수들은 현장에서  
직접 측정되지 못했기 때문에 전역 최적  
화 기법 중 하나인 유전자 알고리즘  
(genetic algorithm, GA)을 수행하여 모델  
변수들을 추정하였고, Fung(1994)에 의해  
제안된 integral equation model 등을 이  
용하여 얼음으로부터의 후방산란을 모델  
링 하였다.

### 3. 산란계 실험 및 모델링 결과

Fig. 3은 산란계 실험 결과를 3차원으로  
도시한 것으로 x 축은 2-way travel time, y 축은 산란된 신호의 세기(unit),  
그리고 z 축은 측정 시각을 나타낸다.  
Fig. 3에서 두 번의 강한 radar return이  
측정되었음을 알 수 있다.  $S_1$ 은 얼음 표면  
인 28.6 ns에서 측정되었으며,  $S_2$ 는 얼음/  
물 경계면인 35.2 ns에서 측정되었다.  $S_1$   
과  $S_2$ 가 측정된 위치는 각각 얼음 표면과  
얼음/물 경계면이므로 얼음 내부에서 마이  
크로파 이동시간은 6.6 ns 이다. 이를 통  
해 얼음의 유전율을 4.38로 추정할 수 있  
었다.

Fig. 4(a)는 후방산란 모델링 결과를 현  
장 실험 결과와 함께 나타낸 것으로 신호  
의 세기를 dB로 변환하였다. 실측된  $S_1$ 은  
실선의 검은색 원,  $S_2$ 는 실선의 검은색 삼  
각형으로 나타났다. 모델링을 통해 추정된

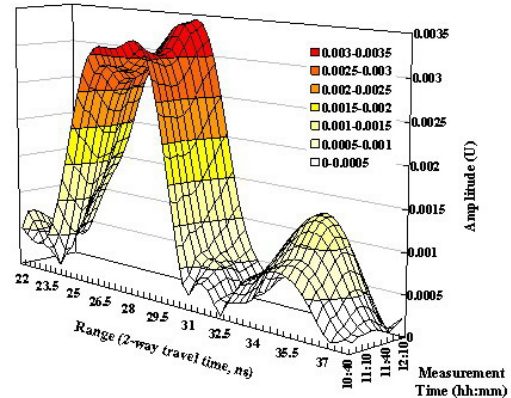


Fig. 3 Result of the scatterometer measurement showed as 3-dimension.

$\sigma_{surface}$  는 흰색 원,  $\sigma_{iws}$  은 흰색 삼각형,  
 $\sigma_{volume}$  은 흰색 사각형,  $\sigma_{iww}$  는 흰색 마름  
모로 나타났다. 그리고 모델링을 통해 추  
정된  $S_1$ 은 점선의 검은색 원,  $S_2$ 는 점선  
의 검은색 삼각형으로 나타났다. 산란계  
실험과 모델링 결과 사이의 RMSE는  
0.0051 magnitude로 서로 잘 일치하였다.  
 $\sigma_{volume}$  와  $\sigma_{iww}$  는 magnitude가 0에 가까운  
것으로 예측되었다.

GA를 통해 추정된 surface water의 유  
전율은 Fig. 4(b)에 검은색 원으로 나타났  
다. 흰색 원은 실험 당일 매 시간마다 측  
정된 기온의 내삽을 통해 구한 10분 단위  
의 기온이다. 유전율은 처음에 큰 값을 나  
타냈으며 11시 30분까지 급격하게 감소하  
였다. 이후 30분 동안 작은 구배로 증가  
하다가 12시 이후에 급격히 증가하였다.  
얼음 표면의 RMS height는 Fig. 4(c)에  
원으로 나타났으며, correlation length는  
삼각형으로 나타났다. Surface water의 거  
칠기는 유전율이 급격히 감소하거나 증가  
하는 시기에 무작위하게 변화하였으며, 유  
전율이 서서히 증가하는 시기에는 변화가  
거의 없었다. 얼음의 기포 함량과 직경은  
각각 0.1%와 0.21 mm, 얼음/물 경계면의

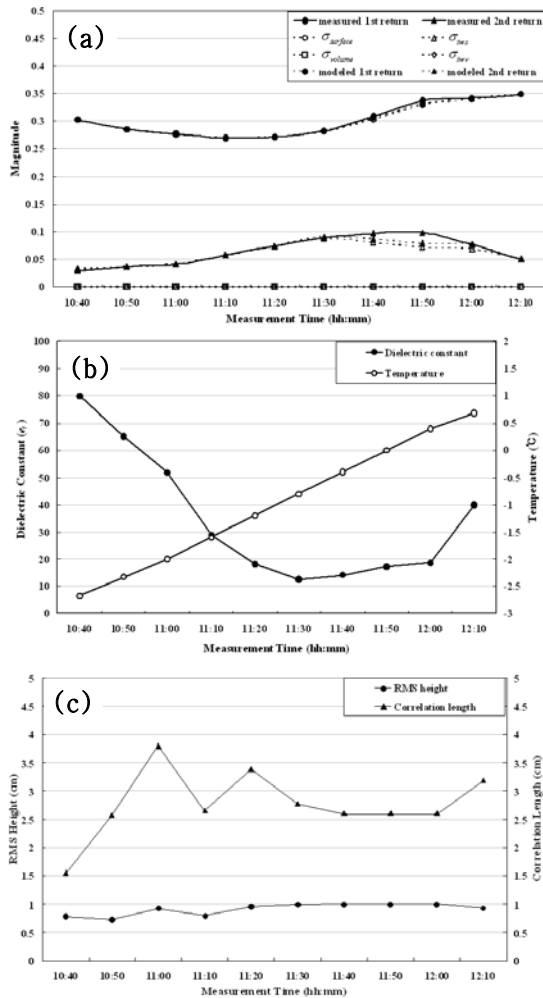


Fig. 4 (a) Measured backscattering and result of the modeling, (b) Gradients of the dielectric constant of ice surface and air temperature, (c) Gradients of rms height and correlation length of the ice surface.

RMS height와 correlation length는 각각 1.64 cm와 9.99 cm로 추정되었다.

#### 4. 토의

마이크로파 산란계 실험 결과에서  $S_1$ 은 실험 초기에 큰 값을 나타낸 반면에  $S_2$ 는 작은 값을 나타냈다. 이는 얼음 표면에 도

포된 surface water의 영향 때문이다. Surface water는 액체이므로 유전율이 매우 크고 이로 인해 얼음 표면에서 측정된 산란은 강하다. Surface water는 마이크로파의 투과율을 저하시키므로 작은  $\sigma_{iws}$ 가 측정되며, 산란계로 측정되는  $S_2$ 는 작다.

Fig. 4(b)를 통해 오전 11시 50분까지 영하의 기온이 유지됨을 확인할 수 있다. 기온이 얼음의 어는점 이하로 유지되면서 surface water는 고체의 얼음으로 상변화하였고, 유전율이 감소하여  $S_1$ 도 감소한 것으로 판단된다. 유전율 감소는 마이크로파의 투과율을 증가시키므로 강한  $\sigma_{iws}$ 가  $S_2$ 에 반영된 것으로 보인다. 11시 30분부터  $S_1$ 은 서서히 증가하였는데 이는 얼음 표면의 해빙으로 인한 유전율 증가를 의미한다. 기온이 영하임에도 얼음 표면이 해빙될 수 있는 것은 얼음 표면이 햇빛에 그대로 노출되어 있어 기온보다 높은 표면 온도를 지니기 때문이다. 이는 GA로 추정된 유전율을 통해서도 확인할 수 있다. Surface water의 유전율은 50분 동안 급격하게 감소하여 11시 30분에 가장 작은 값을 가지는 것으로 추정되었다. 이후 30분 동안 서서히 증가하는 양상을 나타냈고, 정오 이후에는 급격한 증가를 나타냈다.

유전율이 급격하게 감소하거나 증가하는 동안에는 상변화의 발생으로 인해 얼음 표면의 거칠기는 무작위적 변화를 나타낸다. 그러나 산란계 실험이 수행되기 전의 얼음 표면이 비교적 부드럽기 때문에 상변화가 급격히 진행되어도 거칠기의 변화 폭은 크지 않다. 이를 통해 얼음 표면의 상변화가 발생하는 경우 거칠기도 함께 변화함을 알 수 있다.

## 5. 결론

호수 얼음 표면에 물을 도포한 후 수행된 마이크로파 산란계 실험 결과에서 두 개의 강한 산란이 관찰되었다. 첫 번째 산란신호( $S_1$ )는 시간이 지남에 따라 크기가 감소하다가 다시 증가하는 양상을 나타냈다. 두 번째 산란신호( $S_2$ )는  $S_1$ 과 대조적이었다. 이는 surface water가 유전율이 크고 투과율이 작은 액체 상태에서 고체의 얼음으로 결빙되어 유전율이 작고 투과율이 커지다가 다시 액체 상태로 해빙되는 상변화가 발생했기 때문이다.

유전자 알고리즘을 통해 추정된 얼음 표면의 유전율은 surface water가 도포된 직후 결빙으로 인해 급격히 감소하였다. 이 때 얼음 표면의 거칠기는 무작위하게 변화하지만 변화 폭은 크지 않았다. 기온이 서서히 상승하면서 얼음 표면의 유전율은 증가하기 시작하였고, 기온이 영상으로 상승한 이후 해빙에 의해 급격히 증가하였다. 그리고 빠른 상변화로 얼음 표면의 거칠기는 다시 무작위성 변화를 나타냈다.

본 연구를 통해 얼음 표면의 상변화를 고려하지 않으면 정확한 얼음의 산란 특성 해석이 어려움을 알 수 있다. 특히 기온의 일변화가 크고 바람이 강한 지역에서는 얼음 표면의 상변화가 급격히 발생할 수 있으므로 상변화에 의한 유전율과 거칠기 변화 분석이 필수적으로 동반되어야 할 것으로 보인다.

## 사사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (No. 2010-0009465).

## 참고문헌

- Dierking, W. (1999). Multifrequency scatterometer measurements of Baltic Sea ice during EMAC-95. *International Journal of Remote Sensing*, 20(2), 349-372.
- Fung, A. K. (1994). *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. Artech House, Inc.
- Gherboudj, I., Bernier, M., Hicks, F., & Leconte, R. (2007). Physical characterization of air inclusions in river ice. *Cold Regions Science and Technology*, 49(3), 179-194.
- Gherboudj, I., Bernier, M., & Leconte, R. (2010). A Backscatter modeling for river ice: Analysis and numerical results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(4), 1788-1798.
- Sadiku, M. N. O. (1985). Refractive Index of Snow at Microwave Frequencies. *Applied Optics*, 24(4), 572-575.
- Williams, G., Layman, K. L., & Stefan, H. G. (2004). Dependence of lake ice covers on climatic, geographic and bathymetric variables. *Cold Regions Science and Technology*, 40(3), 145-164.