

기술보고

평창 동계올림픽 대비 드론 측량과 눈 용해 모델을 이용한 잔설량 예측

정용복¹⁾ · 박의섭^{1)*} · 조성준²⁾ · 이태종¹⁾ · 오태민¹⁾

Estimation of Volume Variation in Snow Stockpile for Olympic Winter Games in PyeongChang using Snow Melting Model and Drone based Areal Mapping

YongBok Jung, EuiSeob Park*, Seong-Jun Cho, Tae Jong Lee, and Tae-Min Oh

(Received 25 October 2017; Final version Received 19 December 2017; Accepted 22 December 2017)

Abstract : For the 2018 Olympic Winter Games, a pilot project was carried out to obtain information, such as the feasibility of the snow storage, melting rate and thermal insulation characteristics. The important factors are the design of insulation system and the reliable estimation of the final snow volume. The volumes of two types of snow stockpiles were estimated by using a simple snow melting model and their results were compared with the volume measured by aerial mapping using drone. As a result of comparison, the simple model provided a reliable estimation of snow stockpile volume. The sensitivity analyses were also performed to explore the effect of initial volume and thermal conductivity of insulation system on the final volume. Finally, rational selection method for adequate initial volume of stockpiled snow and insulation system was suggested. This method can be applied to renewable cooling system during summer using the stockpiled snow during winter season.

Key words : Snow storage, Melting rate, Insulation system, Drone, Aerial mapping

요약 : 동계 올림픽 및 패럴림픽 대회를 위한 눈 저장사업의 타당성과 융해율이나 단열재 특성 등 사업실시에 필요한 사전 정보를 획득하고자 하여 눈 저장 시범사업을 수행하였다. 저장 사업 운영시 적절한 단열시스템 설계와 이에 따른 신뢰할만한 최종 잔설량의 추정이 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서는 비교적 단순한 수치 모델을 사용하여 두 가지 형태로 진행된 눈 저장 사례에 대하여 예측을 하였으며 드론기반 항공촬영으로 구축한 3D 모델로 눈의 부피를 측정하여 비교 검토하였다. 비교 결과 이론 모델은 단순하지만 현장 측정결과와 잘 부합하였다. 동일한 모델을 사용해 민감도 분석을 수행하여 초기 저장부피와 열전도도의 영향을 검토하여 적절한 초기 저장부피와 단열시스템을 선정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법은 동절기에 저장한 눈의 냉열을 이용한 하절기 냉방과 같은 신재생 에너지 시스템에 동일하게 적용할 수 있다.

주요어 : 눈 저장, 융해율, 단열재, 드론, 항공촬영

서 론

최근 지구 온난화 현상으로 인한 기상이변으로 겨울철에 개최하는 동계올림픽 등 다양한 동계 스포츠 행사에서 눈 부족사태로 많은 어려움을 경험하는 사례가 발생하고 있다. 2018년 평창 동계 올림픽을 준비하고 있는 국내 또한 기

상이변으로 인한 겨울철 기온 상승에 대비한 리스크 관리의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 조직위원회에서 검토하는 제설종합대책(Snow Contingency Plan) 중의 하나인 눈저장은 동계 올림픽의 기상이변에 대한 리스크 관리 차원에서 고려할 수 있는 방안이 될 수 있다.

눈 저장량과 저장기간을 2017-2018 설상 경기장별 제설 계획(11.15-1.20 제설 및 정설)에 맞추어 대회(2월 올림픽, 3월 패럴림픽) 운영을 위한 필요량을 산정해보면, 총 2,100,000 m³이 필요하며, 이는 축구장 크기의 면적을 3 m 두께로 포설한다고 가정하면 약 100개가 소요되는 양이다. 일반적으로 리프트 운영을 위해서는 30 cm의 제설 높이가 필요하나, 월드컵은 1 m, 올림픽은 1.2 m의 제설 높이가 필요하다. 하지만 눈이 압축될 때 부피가 감소함을 고려하면 약 2 m 높이의 눈이 필요

1) 한국지질자원연구원 전략연구본부
2) 한국지질자원연구원 광물자원연구본부

*Corresponding Author(박의섭)

E-mail; espark@kigam.re.kr

Address; Climate Change Mitigation and Sustainability
Division Korea Institute of Geoscience & Mineral
Resources (KIGAM) 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu,
Daejeon 34132, KOREA

하디(PyeongChang2018 Organizing Committee, 2015).

용평, 알펜시아, 보광 및 정선의 표고차, 12월 평균기온과 최악의 기상조건을 감안한 제설 능력을 계산하면, 약 1,200,000 m³이 적설 가능하다. 그럼에도 불구하고 눈 필요량 2,100,000 m³에 비해 900,000 m³이 부족한 상태이다. 따라서 부족 수량을 위한 제설 종합 대책이 필요하다.

제설 종합 대책은 다음 3가지 경우를 가정하여 수립하여야 하며, 이 중에서 눈 저장과 관련된 상황은 대회 전에 눈을 만들 수 없는 경우에 해당한다.

- 대회 전 눈을 만들 수 없는 상황
 - 인공제설(Snow making system)
 - 경기장 이외의 곳에서 눈 수송
 - 여름기간 동안 눈 저장
 - 영상에서의 눈 생산
- 대회 직전 또는 대회 중 눈이 많이 오는 상황
 - 신속한 슬로프내 눈 제거를 위한 경기운영인력 확보
- 대회 기간 중 비, 온도변화에 따른 설질 악화 상황
 - 염화나트륨 및 물 분사 등에 의한 설질 강화 방안 운영

본 연구에서는 대회 전 눈을 만들 수 없는 상황에서 제시한 네 가지 방식 중에서 여름기간 동안 눈을 저장하였다가 필요한 시점에 저장 눈을 다시 사용하는 방식을 검토하였다. 저장 사업 운영시 적절한 단열시스템 설계와 이에 따른 최종 잔설량의 추정이 가장 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 비교적 단순한 수치 모델을 사용하여 두 가지 형

태로 진행된 눈저장 사례에 대하여 잔설량을 예측하였으며 드론을 이용한 3D 모델을 사용하여 계산한 눈의 부피와 비교 검토하였다.

눈 융해 모델

눈 저장시 열교환 프로세스

눈더미와 주변과의 열교환은 에너지 수지에 맞추어 모든 열교환 방식(대류, 전도, 복사)을 고려하고 각각의 변수들을 고려하여 계산할 수 있으나 Fig. 1과 같이 매우 복잡하다. 따라서 비교적 단순한 모델을 사용하여 공학적 수준에서 필요한 결과를 얻는 것이 필요하다(Skogsberg et al. 2001; Skogsberg 2002).

눈융해는 적치된 눈과 주변환경과의 열교환에 따라 발생하는 현상이다. 따라서 눈융해는 기후, 눈저장 형상과 단열시스템 등에 의해 결정된다. 주변과의 열교환은 대기, 지반, 그리고 강우에 의해 발생한다. 단열시스템이 방수기능도 포함한다면 강우에 의한 열교환은 무시할 수 있다. 대기와 지반을 통한 열교환은 저장한 눈의 면적에 비례한다.

일반적으로 단열시스템이 없이 적치된 눈의 경우 온도-일(DD: degree-day) 모델이 많이 사용되며 단열시스템이 적용된 경우에는 일반적인 열전도 이론을 적용하여 눈융해를 모델링할 수 있다(Skogsberg et al., 2001).

온도-일(DD) 모델

온도-일 모델은 눈융해 모델링에 일반적으로 사용되는 모델이며 실제 결과와 잘 부합하는 것으로 알려져 있다(Sundin, 1998). 또한 계산에 필요한 입력자료가 주간 온도, 눈의 밀도와 저장 형상에 대한 정보만 있으면 되며 식 (1)과 같다.

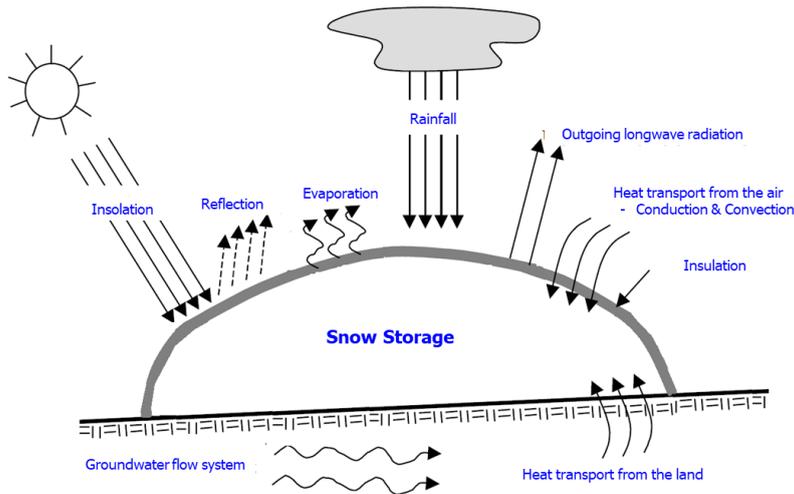


Fig. 1. Heat exchange process between the snow and surroundings during the snow storage.

$$\dot{V} = k \bar{T}_{air, diurnal} A \quad (1)$$

여기서, \dot{V} 는 용해된 물의 유동량 (m^3/day), k 는 온도-일 상수 ($m/K/day$), $\bar{T}_{air, diurnal}$ 은 주간 평균 대기 온도 ($^{\circ}C$), A 는 대기와 접하는 눈더미의 표면적 (m^2)이다. 용해된 물 유동량은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{V} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \Delta V_o \quad (2)$$

여기서 ρ_s, ρ_w 는 각각 눈과 물의 밀도이며 ΔV_o (m^3/day)는 일단위 눈의 체적감소량이다. 식 (1)과 (2)로부터 식 (3)과 같이 일단위 체적감소량을 구할 수 있다.

$$\Delta V_o = \frac{\rho_w}{\rho_s} k \bar{T}_{air, diurnal} A \quad (3)$$

여기서 k 는 경험적 상수이며 스웨덴의 눈저장 사례에서는 0.003 ~ 0.011사이의 값을 사용하였다(Skogsberg *et al.*, 2001; Skogsberg, 2002; Skogsberg *et al.*, 2005).

열전도 모델

눈저장시 단열시스템을 적용할 경우 Fig. 2와 같이 열전도(heat conduction) 개념을 사용하여 눈과 주변과의 열교환을 계산할 수 있다.

먼저 주변 대기와의 열교환을 통한 열유량은 1차원 열전도를 가정할 때 식 (4)와 같으며, 대기와 접한 눈더미의 면적 전체에 걸쳐 일어난 경우 전체 열유량을 계산할 수 있다.

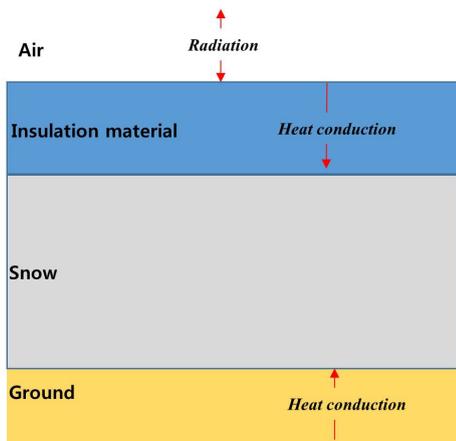


Fig. 2. Simplified model of heat conduction during the snow storage covered with insulation material.

전체 열유량이 눈을 물로 상변화시키는데 사용되는 것으로 가정하면 식 (5)와 같이 1일당 눈용해량을 구할 수 있다.

$$q = \lambda_{ins} \frac{\Delta T_{top}}{t} \quad (4)$$

$$\Delta V_{top} = \frac{\lambda_{ins} A_{top} \frac{\Delta T_{top}}{t}}{F \rho_s} - 86400 \quad (5)$$

여기서 q 는 열유량 (W/m^2), ΔV_{top} 은 일단위 눈의 용해체적이며 λ_{ins} 는 단열재의 열전도도 ($W/m/K$), A_{top} 은 잔설의 상부면적, ΔT_{top} 은 눈과 대기와의 온도차이, t 는 단열재의 두께, F 는 눈의 잠열 ($334 J/g$)이며 86400은 24시간에 해당하는 초이다(Skogsberg *et al.*, 2001; Yunus, 2007).

지반과의 열교환 역시 1차원 열전도로 고려하여 계산할 수 있으며 연간 비교적 일정한 온도를 유지하는 심도를 기준으로 계산하면 식 (6)과 같다.

$$q = \lambda_{soil} \frac{\Delta T_{bottom}}{l} \quad (6)$$

여기서 q 는 열유량 (W/m^2)이며 λ_{soil} 은 지반의 열전도도, ΔT 는 지표면과 거리 l 만큼 떨어진 지반의 온도차이다. 일반적인 지반의 경우 약 $6^{\circ}C$ 온도차이일 경우 $2.4 W/m^2$ 정도의 열이 이동하며 대기와의 열교환에 비하면 매우 작은 양이 된다. 눈의 부피 감소는 앞의 경우와 같은 방식으로 눈더미의 바닥면적을 통해 이동하는 열유량을 눈이 물로 상변화할 때 필요한 잠열로 나누어서 계산하며 식 (7)과 같다.

$$\Delta V_{bottom} = \frac{\lambda_{soil} A_{bottom} \frac{\Delta T_{bottom}}{l}}{F \rho_s} - 86400 \quad (7)$$

강우에 의한 눈 용해

단열시스템이 방수가 되지 않을 경우 강우의 유입은 에너지 유입을 의미하기 때문에 저장된 눈을 용해시킨다. 가장 기본적인 모델은 강우의 양과 온도를 알 경우 열량을 계산할 수 있고 이를 눈의 잠열로 나누면 강우에 의해 용해된 눈의 질량과 부피를 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

일 강우량이 10 mm, 빗물의 온도는 $10^{\circ}C$, 강우 침투 면적이 $140 m \times 60 m$ 인 경우 하루에 녹은 눈의 양은 $16.4 m^3/day$ 정도이다.

$$\Delta V_{rain} = \frac{\rho_{rain} C_{p,rain} h_{rain} A T_{rain}}{F \rho_s} \quad (8)$$

여기서 ΔV_{rain} 은 강우로 용해된 눈의 부피(m^3/day), ρ_{rain} , $C_{p,rain}$, h_{rain} , T_{rain} 은 각각 강우의 밀도, 비열, 일강우량, 온도이다. 본 연구에서는 방수성능을 가진 단열재를 사용하였기 때문에 강우에 의한 눈 용해는 고려하지 않았다.

눈저장 시범 현장

2018 평창 동계올림픽을 대비하여 용평리조트와 알펜시아 리조트 주변에서 2016년 3월부터 11월까지 눈저장 시범 사업을 진행하였으며 2가지 형태의 단열시스템을 적용하였다(Fig. 3과 Table 1).

용평의 경우 Fig. 3(b)와 같이 용평리조트내 스키장 슬로

프에 눈을 저장하고 Table 1의 단열시스템 Type I을 시공하였다. 알펜시아 사이트의 경우에는 Fig. 3(c)와 같이 크로스컨트리 출발 지점 근처의 평지에 눈을 적치하고 단열시스템 Type II를 시공하였다.

용평에 사용된 단열시스템은 Table 1의 Type I이며 각 재료별로 측정된 열전도도와 두께로부터 해석을 위해 사용한 등가열전도도(λ_{ins})는 0.0469 W/m/K이며 단열재의 전체 두께(t_{ins})는 26 mm이다. 중간에 포함된 공기단열시트는 초기에 시공되었으나 강풍에 의해 단열재가 파손되고 재시공하는 과정에서 사용되지 않았기 때문에 해석에서는 제외하였다. 또한 알루미늄 시트의 경우에도 두께가 1 mm 이하로 매우 얇고 방수 목적으로만 사용되었기 때문에 등가열전도도 계산에서 제외하였다.

알펜시아의 경우 Table 1의 Type II와 같이 비교적 단순

Table 1. Specifications of two insulation systems (Bubble wrap in Type I was excluded in the model due to the damage by strong wind)

Insulation type	Type I	Type II
Site	YongPyong	Alpensia
t_{ins} (mm)	26	39
λ_{ins} (W/m/K)	0.0469	0.0419

Materials	Type I	Type II
	AL sheet	Geotextile 500g/m2
	PE foam 20mm	Double AL foil metalized PE-foam 30 mm
	Bubble wrap 20mm	Geotextile 1000g/m2
	Geotextile 1000g/m2	Snow
	Snow	



(a) Location of pilot snow storage site (from Google Earth)



(b) View of YongPyong site (Type I insulation)



(c) View of Alpensia site (Type II insulation)

Fig. 3. Location & view of snow storage site.

하계 두께가 다른 부직포와 방수가 되는 PE foam 형태의 단열재를 사용하였으며 등가열전도도는 0.0419 W/m/K로 용평에 적용한 단열재에 비하여 좀 더 단열효과가 좋은 것으로 나타났다.

눈용해 모델링

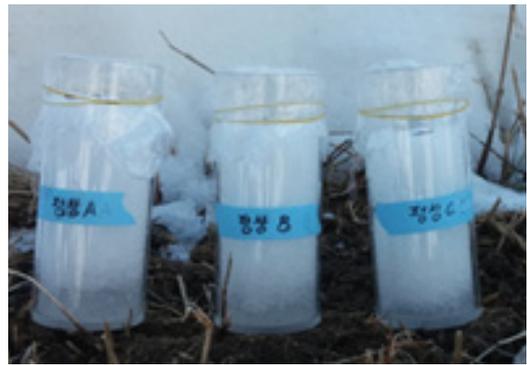
입력자료

눈용해 모델링에 필요한 입력자료는 일단위 대기온도, 단열재 열전도도와 두께, 지반의 온도, 눈더미의 초기 부피와 상부와 하부 표면적, 눈의 밀도이며 나머지 값들은 문헌상의 값으로 사용하였다.

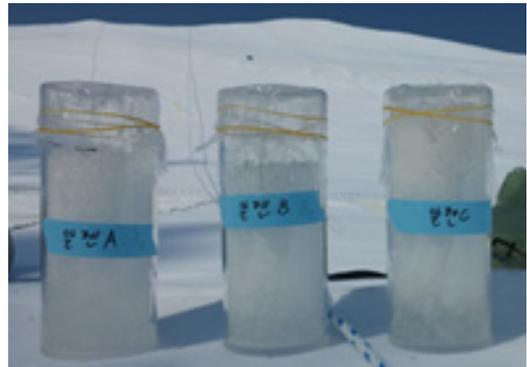
눈더미의 부피와 표면적자료는 드론 촬영을 통해 구축한 3차원 형상으로부터 확보하였으며, 밀도는 현장에서 직경 60 mm, 길이 150 mm로 시료를 채취하여 측정된 값의 평균치를 사용하였다(Fig. 4). 그리고 대기 온도는 저장 지역 근처에서 수집된 온도정보(기상청 제공)를 사용하였다. 눈용해 모델링에 사용한 입력자료는 Table 2와 같다.

온도분포

잔설량 예측시 미리 온도를 알 수 없으므로 기 확보된 2015년도 측정 온도 자료로 먼저 잔설량을 예측한 이후, 동일지점에 대한 2016년에 측정된 온도 자료를 눈 저장 시범사업 완료 이후 확보하여 이를 반영한 모델링 결과와 비교 및 검토하였다. 2016년의 경우 두 지역 모두 8월에 2015년보다 기온이 높은 상태가 상당히 오래 지속되었음을 볼 수 있다(Fig. 5).



(a) YongPyong site



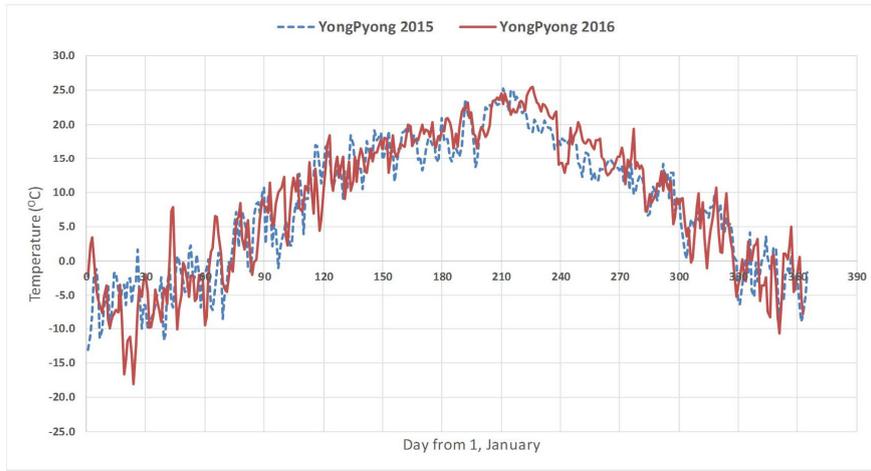
(b) Alpensia site

Fig. 4. Snow samples for density measurements.

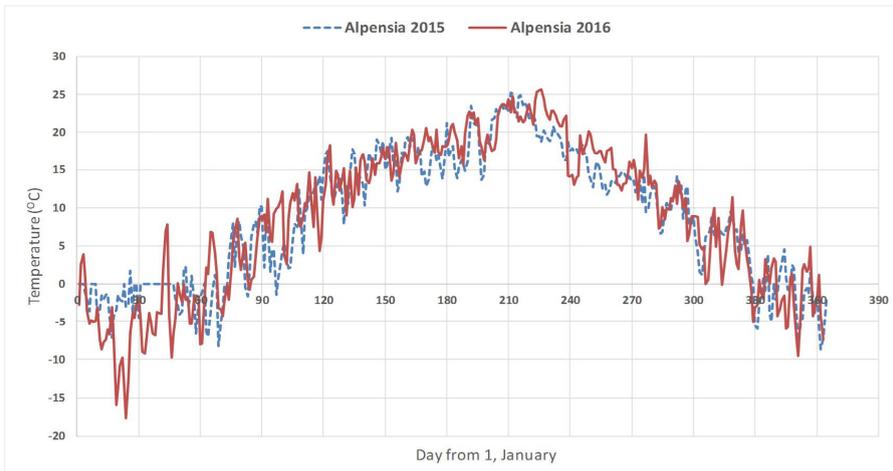
Table 2. Input data for the modeling of the snow melting

Properties		Unit	YongPyong	Alpensia
Initial snow stockpile	Density (ρ_s)	kg/m ³	555	556
	Volume (V_o)	m ³	12,786	13,723
	Upper surface area (A_{top})	m ²	3,192	2,978
	Bottom area (A_{bottom})	m ²	2,808	2,722
Insulation system	Equivalent thermal conductivity (λ_{ins})	W/m/K	0.0469*	0.0419
	Total thickness (t_{ins})	mm	26	39
Temperature	Ground	°C	10	10
	Ambient air (KMA station ID)	°C	ID318	ID2577 & ID2559

* Equivalent thermal conductivity without bubble wrap

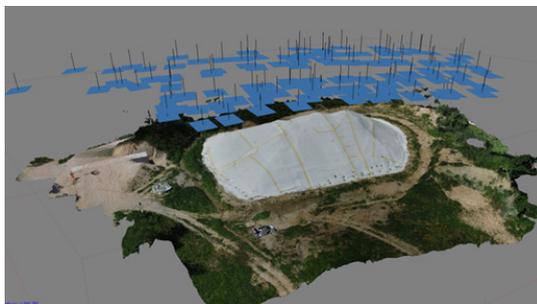


(a) YongPyong site

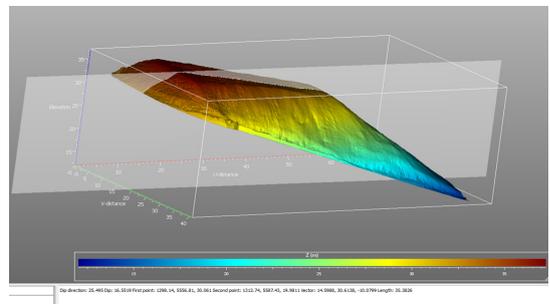


(b) Alpensia site

Fig. 5. Seasonal data of ambient temperature near the snow storage sites.



(a) Aerial photograph and 3D model reconstruction



(b) Volume estimation using 3D geometry model

Fig. 6. Estimation of snow volume through aerial mapping using drone.

결과 분석

현장계측 자료

평창의 용평과 알펜시아 부지에 조성된 눈 저장소의 경우 부피와 표면적 측정을 위해 Fig. 6과 같이 드론을 이용하여 사진을 촬영하고 이로부터 3D 형상모델을 만들어서 눈의 부피와 상부 및 하부 표면적을 계산하였다. 측정 기간과 횟수는 2016년 3월부터 2016년 8월까지 용평은 6회, 알펜시아는 7회였으며 획득한 부피변화는 Figs. 7~8과 같다.

용평의 경우 2016년 11월 최종 잔설량은 3,781 m³, 알펜시아는 5,750 m³이었으며 이 값은 각각 초기 부피의 29.6%와 41.9%이다(Tables 3~4). 하절기보다 봄에 더 용해가 많이 일어난 것으로 나타났는데 이는 눈저장 초기인 4~5월에 두 차례에 걸쳐 강풍으로 단열시스템이 파손되어 재시공하는 동안 많은 양의 눈이 녹았기 때문이다.

용평

용평 눈저장소에 대하여 모델링을 수행한 결과 Fig. 9와 같은 시계열 곡선을 얻을 수 있었다. 단열시스템이 시공되지 않았을 경우에는 5월 7일 경에 다 녹아 없어지는 것으로 나타났으며, 2016년 온도자료를 사용한 모델링에서 단열시스템을 시공하였을 경우 12월에 4,201 m³ (32.9%)가 남는 것으로 나타났다. 현장 측정결과 잔설 부피는 3,781 m³ (29.6%)로 모델링 결과보다 작았으며 이는 단열재 시공이 완벽하지 않았기 때문에 이론적인 성능을 다 발휘하지 못한 것으로 판단된다.

알펜시아

알펜시아 눈저장소에 대한 모델링 결과 Fig. 10과 같은 시계열 곡선을 얻었다. 단열시스템이 시공되지 않았을 경우 5월 8일 경에 녹아 없어지는 것으로 나타났다. 2016년 온도자료를 사용한 모델링에서 최종적으로 7,810 m³ (56.9%)의 눈이 남는 것으로 나타났다. 모델링 결과는 용평의 경우와 마찬가지로 현장 측정값보다 다소 크게 나타났다.

민감도 분석

눈저장시 독립변수는 초기 저장부피와 단열재이다. 따라서 적절한 초기 저장부피와 단열시스템을 검토하기 위하여 알펜시아와 유사한 규모를 기준으로 Table 5와 같이 초기 저장부피를 2배, 5배로 늘린 경우와 각 경우에 대하여 단열재의 열전달 특성이 더 우수한 경우와 불량한 경우에 대해서 총 9가지 사례에 대해 눈용해 모델링을 수행하였으며 이때 사용한 눈더미 형상은 Fig. 11과 같다. 최종 잔설량은 대기 온도가 0°C 이하가 되어 열교환이 없는 시점의 잔설량이다.

초기 저장부피와 단열성능을 고려한 민감도 분석 결과는 Table 6과 같다. 초기 저장부피가 증가할수록 잔설량은 증가

하나 열교환이 발생하는 표면적도 증가하여서 선형적으로 증가하지는 않았다(Figs. 12~13). 또한 단열재의 열전도도가 감소할수록 잔설량이 증가하는 것으로 나타났다. 열반사 단열재 두께만 10 mm씩 증감한 형태이므로 단열재 두께 증가에 따라 선형적으로 잔설량이 증가하는 것으로 볼 수 있다.

토의사항

DD 모델과 단열재 고려한 눈용해 모델을 사용하여 추정 한 잔설량은 측정결과와 비교한 결과 오차범위는 용평 저장소의 경우 5.0 ~ 7.3%, 알펜시아 저장소는 16.5 ~ 18.4% 인 것으로 나타나 비교적 현장 측정결과를 잘 설명하는 것으로 나타났다. 측정치와의 차이는 단열재 시공이 완벽하



Fig. 7. Reconstructed 3D geometry model showing volume changes of snow stockpile during the storage period.

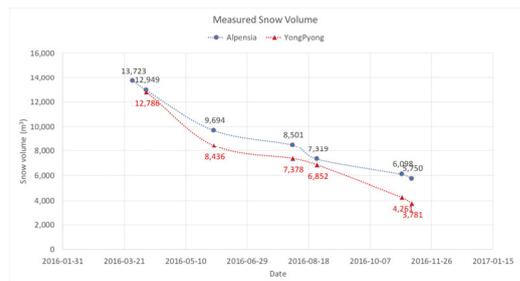


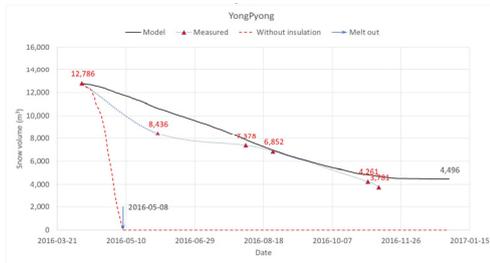
Fig. 8. Trend of measured snow volume change.

Table 3. Measured snow pile volume and surface area of Alpensia site

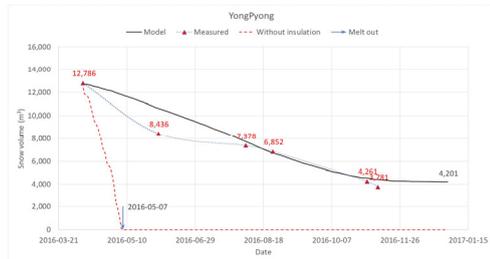
Date	Snow volume		Area (m ²)		Snow density (kg/m ³)
	m ³	%	Bottom	Top	
2016-03-28	13,723	100.0%	2,722	2,978	562
2016-04-08	12,949	94.4%	2,665	2,942	550
2016-06-02	9,694	70.6%	2,319	2,529	-
2016-08-05	8,501	61.9%	2,191	2,398	-
2016-08-25	7,319	53.3%	2,249	2,427	-
2016-11-02	6,098	44.4%	2,249	2,429	547
2016-11-10	5,750	41.9%	1,708	1,901	-

Table 4. Measured snow pile volume and surface area of YongPyong site

Date	Volume		Area (m ²)		Snow density (kg/m ³)
	m ³	%	Bottom	Top	
2016-04-08	12,786	100.0%	2,808	3,192	504
2016-06-02	8,436	66.0%	2,273	2,502	605
2016-08-05	7,378	57.7%	2,219	2,481	-
2016-08-25	6,852	53.6%	2,273	2,508	-
2016-11-02	4,261	33.3%	2,273	2,521	610
2016-11-10	3,781	29.6%	1,512	1,835	-

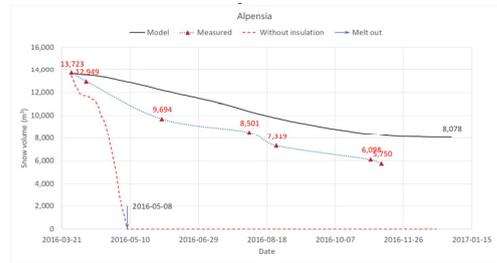


(a) Using 2015 temperature data (Estimated ratio of final residual volume to initial volume: 35.2%)

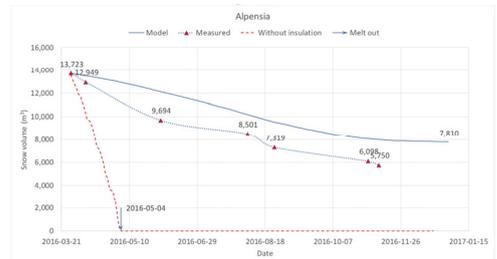


(b) Using 2016 temperature data (Estimated ratio of final residual volume to initial volume: 32.9%)

Fig. 9. Comparison of numerical results with measured data for YongPyong site. The red line shows the simulation results of snow volume change without insulation system.



(a) Using 2015 temperature data (Estimated ratio of final residual volume to initial volume: 58.9%)



(b) Using 2016 temperature data (Estimated ratio of final residual volume to initial volume: 56.9%)

Fig. 10. Comparison of numerical results with measured data for Alpensia site. The red line shows the simulation results of snow volume change without insulation system.

Table 5. Equivalent thermal conductivity used for sensitivity analyses

Material	Kr (reference)		KH (Performance down)		KL (Performance up)	
	Conductivity (w/m/K)	Thickness (mm)	Conductivity (w/m/K)	Thickness (mm)	Conductivity (w/m/K)	Thickness (mm)
Non-woven geotextile	0.064	3	0.064	3	0.064	3
Reflection material	0.038	30	0.038	20	0.038	40
Non-woven geotextile	0.064	6	0.064	6	0.064	6
Equivalent	0.04193	39	0.04348	29	0.04106	49

Table 6. Results of sensitivity analyses considering initial snow volume and insulation performance

Initial snow volume		Final snow volume		
m ³	b, a, h (m)	KL (performance up)	Kr (reference)	KH (performance down)
		$k_{eq} = 0.04106$ $t_{eq} = 49\text{ mm}$	$k_{eq} = 0.04193$ $t_{eq} = 39\text{ mm}$	$k_{eq} = 0.04348$ $t_{eq} = 29\text{ mm}$
V1 (reference) 13,900	50, 15, 12	8,748 m ³ 62.9%	7,839 m ³ 56.4%	6,306 m ³ 45.4%
V2 (2 times) 26,717	60, 25, 14	19,055 m ³ 71.3%	17,665 m ³ 66.1%	15,300 m ³ 57.3%
V5 (5 times) 68,513	90, 45, 14.5	51,854 m ³ 75.7%	48,795 m ³ 71.2%	43,497 m ³ 63.5%

지 않았기 때문에 단열재가 100% 성능을 발휘하는 것으로 가정된 모델과 차이가 난 것으로 볼 수 있다.

민감도 분석 결과를 요약하면 단열재 성능 감소에 따라 잔설량이 감소하지만 초기저장부피가 클수록 감소량이 적게 나타났다. 따라서 이와 같은 민감도 분석을 통해서 경제성을 고려한 상태에서 비용상승 요인인 단열재 성능을 향

상시키는 방법과 초기저장부피를 증가하는 방법 사이의 최적조합을 결정할 수 있음을 확인하였다.

결론

2018 평창 동계 올림픽을 대비한 눈저장 시범사업에 대하여 단순한 눈 용해 모델을 적용하여 잔설량을 평가하고 현장 측정결과와 비교하였다. 사용한 모델은 단순하지만 현장 측정결과와 잘 부합하였다. 또한 동일 모델을 사용해 민감도 분석을 수행하여 초기저장부피와 단열재의 열전도도의 영향을 검토하여 적절한 초기저장부피와 단열시스템을 선정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이상의 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 이론해를 사용하여 잔설량을 계산한 값과 실제로 드론 촬영을 통해 측정된 잔설량을 비교한 결과 유사한 것으로 나타났으며, 오차범위는 용평 저장소는 5.0 ~ 7.3%, 알펜시아 눈저장소는 16.5 ~ 18.4%인 것으로 계산되었다. 각기 다른 방식의 단열재를 시공한 조건

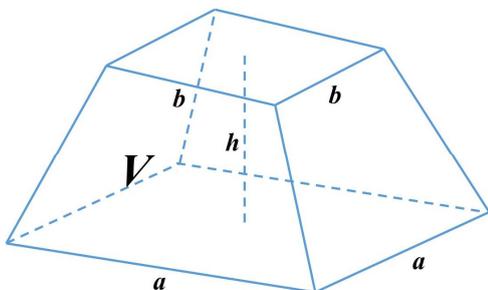
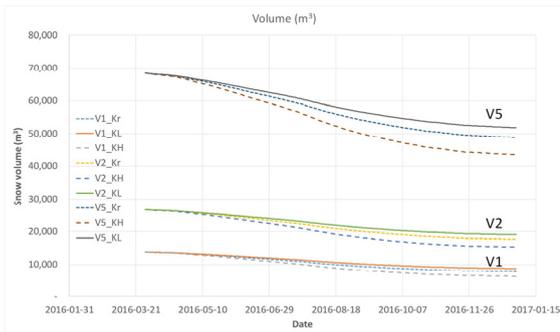
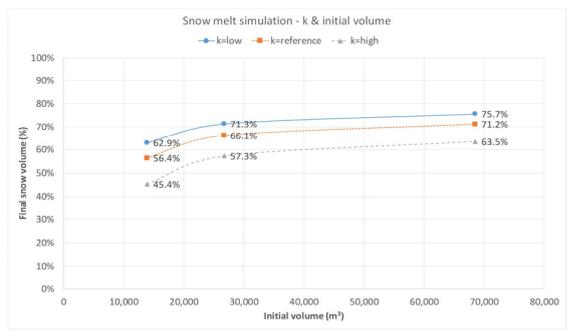


Fig. 11. Geometry and variables of snow stock pile for sensitivity analyses.

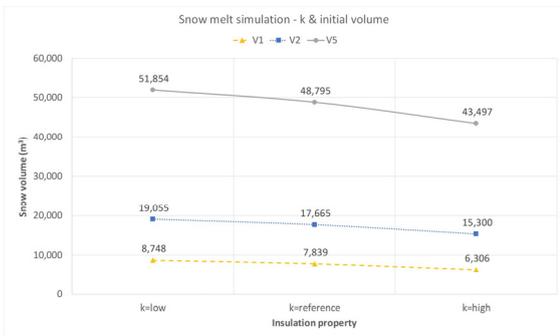


(a) Snow melting curve

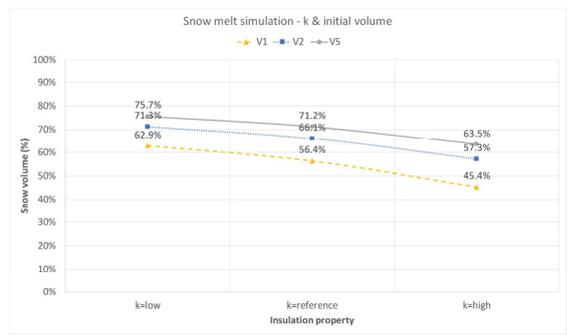


(b) Ratio of residual snow volume to initial snow volume

Fig. 12. Effect of the initial snow volume on the final residual snow volume.



(a) Final residual snow volume



(b) Ratio of final residual snow volume to initial snow volume

Fig. 13. Effects of insulation system on the final residual snow volume.

으로 용평과 알펜시아의 잔설량을 계산한 결과, 단열재 성능이 우수한 알펜시아가 용평보다 눈 저장효율이 좋은 것으로 나타났다.

- 이론해가 실제 측정값보다 잔설량이 많은 것으로 계산되어 용해율을 과소평가한 것으로 판단하며 이런 결과는 이론해에서 고려하지 못하는 복사열, 단열재 시공품질관리, 강풍으로 인한 단열재 손상 등이 모델에 반영되지 않았기 때문이다.
- 초기 눈 저장부피와 단열재 성능에 대한 민감도 분석결과, 눈 저장부피를 증가시키고 단열재 성능을 향상시킬수록 잔설량이 증가하였으며 이를 활용할 경우 특정 조건에서 최적 저장 부피와 단열재 성능을 선정할 수 있을 것으로 판단한다. 이는 저장능의 부피가 커질수록 더 많은 냉기를 축적함으로써 외부 기온 변화에 대한 저항력이 커지기 때문이다. 그러나 초기 저장 부피가 증가할수록 잔설량은 증가하나 선형적으로 증가하지 않는 양상을 보이므로 저장소의 입지와 저장 작업 용이성, 경제성 등을 감안하여 적절한 저장부피를 결정해야 한다. 향후 눈 저장사업을 성공적으로 운영하기 위해선 단순하

게 단열방식의 단열효과만을 고려할 것이 아니라 단열재의 시공성, 유지관리성 등도 반드시 고려하여야 한다. 또한 단열재 이음부 시공품질이 눈 저장효율에 영향을 미칠 수 있음을 염두하여 철저한 시공관리가 이루어져야 한다.

끝으로 본 연구에서는 눈저장 후 눈을 직접 사용하는 것을 모델링하였지만 동일한 방법론을 적용하여 적치된 눈의 냉열을 이용한 하절기 냉방과 같은 사업에도 적용할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘시추공 기반 심지층 특성규명 InDEPTH 요소기술 개발(GP2017-016)’의 일환으로 수행되었습니다.

References

PyeongChang2018 Organizing Committee - Venue Operation Bureau, 2015. Snow Master Plan, 19p.

Skogsberg, K. and Nordell, B., 2001. The Sundsvall hospital snow storage. *Cold Regions Science and Technology*, 32(1), 63-70.

Skogsberg, K., 2002. The Sundsvall Regional Hospital snow cooling plant - Results from the first year of operation. *Cold Regions Science and Technology*, 34(2), 135-142.

Skogsberg, K. and Lundberg, A., 2005. Wood chips as thermal insulation of snow. *Cold Regions Science and Technology*, 43(3), 207-218.

Yunus A. C., 2007. Introduction to Thermodynamics & Heat Transfer, McGraw-Hill, 960p.

Sundin, E., 1998. Snow Deposit Melt and Atmospheric Icing, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 146p.

정 용 복

현재 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 심지층연구단
(책임연구원)
(本 學會誌 第54卷 第1号 參照)

박 의 섭

현재 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 심지층연구단
(책임연구원)
(本 學會誌 第54卷 第4号 參照)



조 성 준

1991년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원학과 공
학박사

현재 한국지질자원연구원 자원탐사개발연구센터 센터장
(E-mail; mac@kigam.re.kr)



이 태 종

1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1992년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
학석사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
학박사

현재 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 심지층연구단 책임연구원
(E-mail; megi@kigam.re.kr)



오 태 민

2007년 부산대학교 공과대학 토목공학과
공학사
2008년 KAIST 대학원 건설및환경공학과
공학석사
2012년 KAIST 대학원 건설및환경공학과
공학박사

현재 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 심지층연구단 선임연구원
(E-mail; tmoh@kigam.re.kr)
