

다중위성자료를 이용한 서남극 Pine Island 빙하의 질량변화 분석

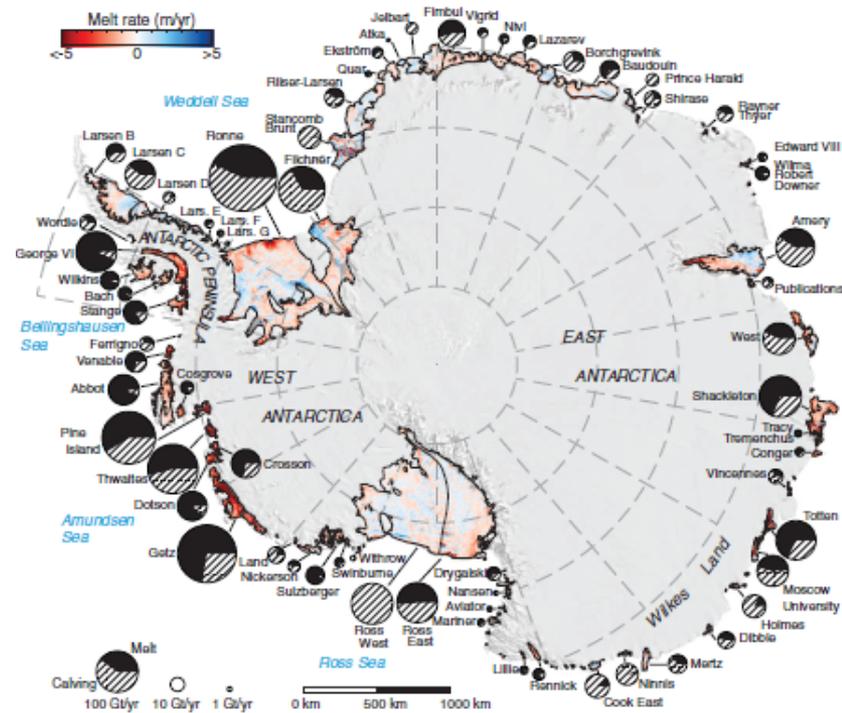
한향선^{1,2}, 임정호², 이상균², 김현철¹

¹ 극지연구소 극지해양환경연구부

² 울산과학기술원 도시환경공학부

남극 빙붕의 역할과 중요성

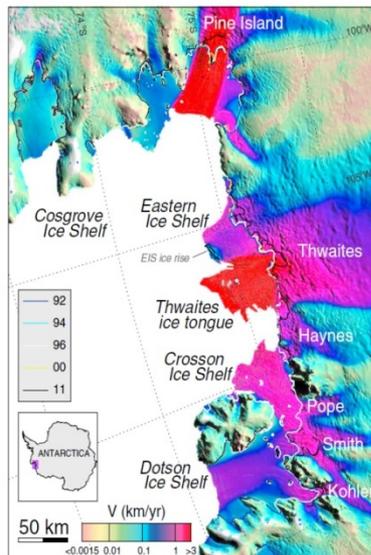
- 남극 빙붕(Antarctic Ice shelves)
 - 남극 전체 해안의 45% 이상 차지
 - 남극 빙상(Antarctic Ice Sheets)의 유출 경로
 - 빙붕의 감소 ⇒ 기후변화 지시자/해수면 상승에 간접 영향
 - 전 지구적 환경변화 예측을 위해 빙붕의 변화 모니터링 요구



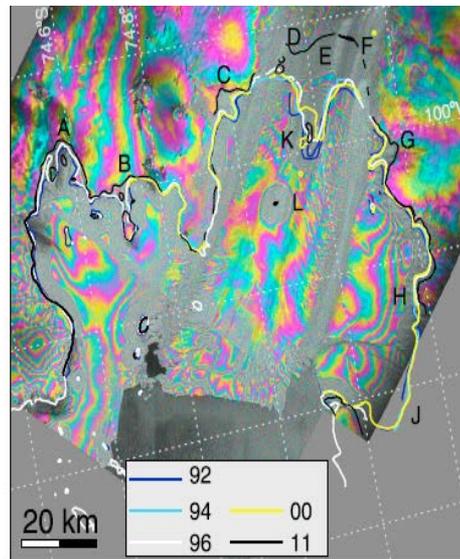
Rignot et al., *Science* 341, 296-270 (2013)

서남극 아문센 해 빙붕의 변화

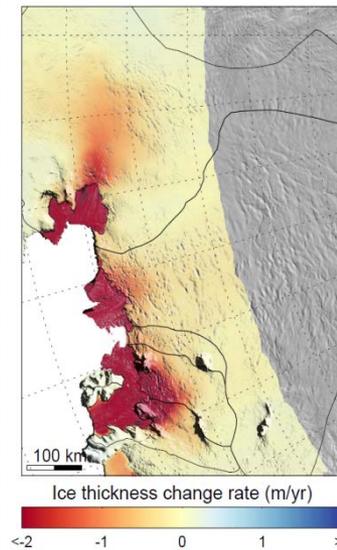
- 최근 40년간 30% 이상의 흐름속도 가속화 발생
- 2014년 빙체 수송량: $\sim 340 \text{ Gt a}^{-1}$ (Mouginot et al., 2014)
- Pine Island 빙하 빙붕(Pine Island Glacier ice shelf)에서의 빙체 유출이 가장 심각
 - ▣ 연평균 6.8 m 두께 감소(2003-2008년), 2009년 이후에 대한 질량변화 보고 없음
 - ▣ Pine Island 빙하 빙붕에 대한 최신 질량변화 분석 요구



연간 $\sim 4 \text{ km}$ 유속



Grounding line 후퇴



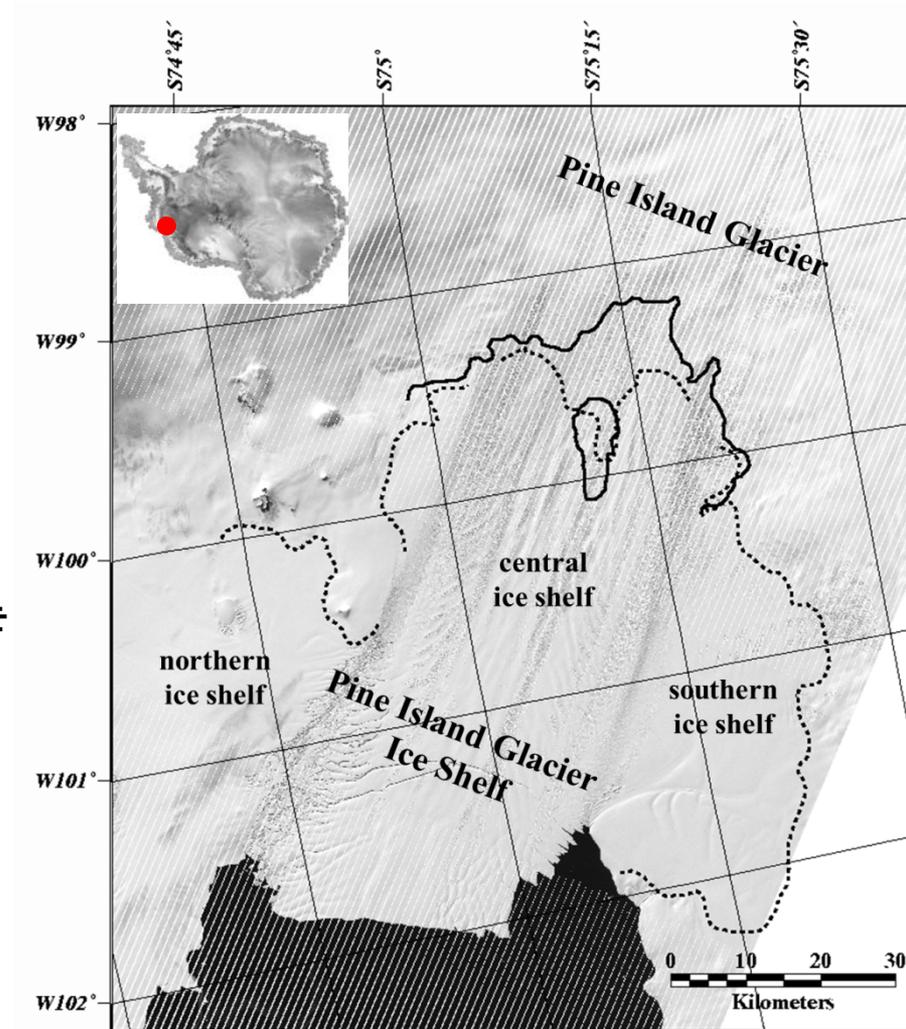
연간 6 m 이상 두께 감소

연구목적

- 다중위성자료(광학/레이더 고도계)를 활용하여 2011-2014년 Pine Island 빙하 빙봉의 질량변화 규명
 1. Landsat 다중분광영상 기반의 빙봉 흐름속도 측정
 2. CryoSat-2 관측 자료를 활용한 빙봉 두께 변화 추정
 3. Pine Island 빙하 빙봉의 연간 질량변화 및 질량변화 요인 분석

연구지역

- Pine Island Glacier ice shelf (PIGIS)
(75° S, 102° W)
 - 3개의 빙붕으로 구성: central, northern, southern ice shelf
 - Basin area: ~175,000 km² (서남극 빙상의 10%)
 - 빙체 수송량: ~50 Gt a⁻¹ ⇒ 아문젠 해로 유입되는 전체 빙체 질량의 40% (Mouginot et al., 2014)
 - 연간 6.8 m의 두께 변화 (Pritchard et al., 2012)
 - 대규모 붕괴현상 지속적 발생



Landsat-7 ETM+ Pan image (2012. 11. 22)

Mouginot et al., *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1576-1584 (2014)

Pritchard et al., *Nature* **484**, 502-505 (2012)

연구자료

- Cryosat-2 SAR interferometry Radar Altimeter data

- 2010년 7월-2015년 3월 (Baseline B) 고도 관측 자료: 빙봉의 연간 고도 변화량 추정

- Landsat-7 ETM+, Landsat-8 OLI multispectral data

- 총 2개 WRS 이용 (path/row 232/113, 233/113), Level 1GT products: 빙봉 흐름속도 측정
- 2013년 Landsat 영상 자료의 부재로 인해 흐름속도 측정 불가

Pair ID	Landsat sensor	Dates	Path/Row	Time difference (days)
1	ETM+	8 Dec 2010*, 27 Dec 2011*	233/113	384
2	ETM+	27 Dec 2011*, 11 Nov 2012*	233/113	320
3	OLI	1 Dec 2013, 4 Dec 2014	232/113	368

* SLC-off

- Regional Atmosphere and Climate Model/Antarctica (RACMO/ANT) ver. 2.3

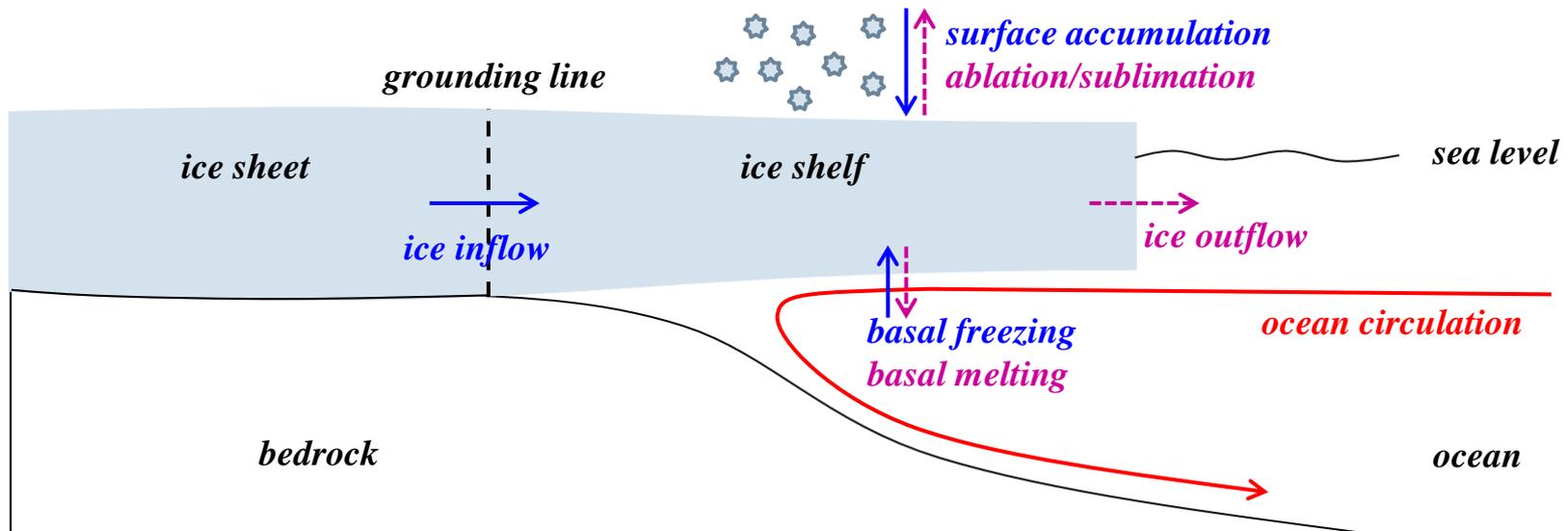
- 빙봉 표면의 snow accumulation, sublimation, firn depth change 추정

빙붕의 질량변화 추정 방법

Ice Mass Conservation Theory

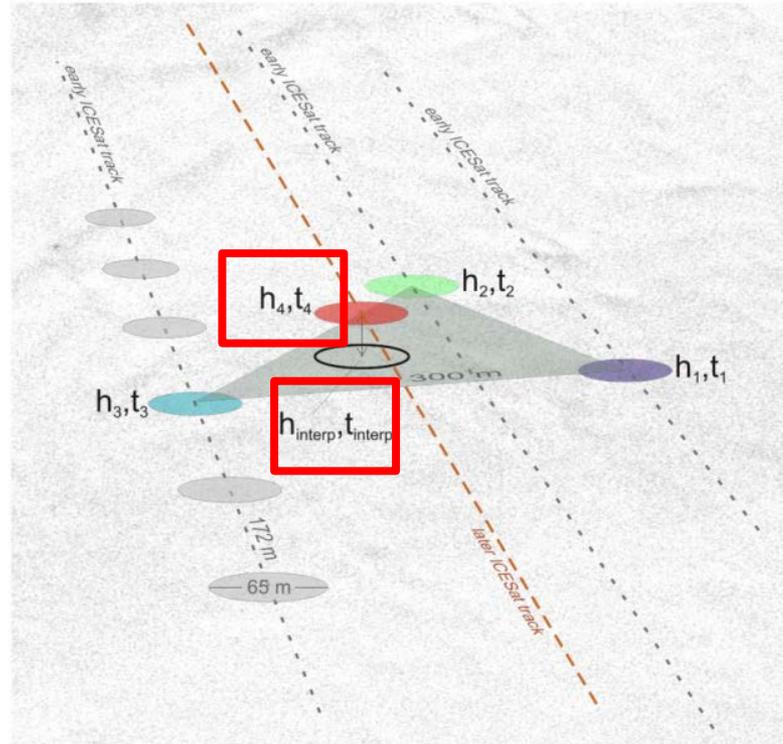
$$\partial H / \partial t = TMB = FMB + BMB + SMB$$

- $\partial H / \partial t$ = Total mass balance (TMB) : 빙붕 두께 변화, 즉 빙붕의 총 질량변화를 의미
- Flux mass balance (FMB) : 유속에 의한 질량변화
- Basal mass balance (BMB) : 기저용융에 의한 질량변화
- Surface mass balance (SMB) : 표면 적설/승화/침식에 의한 질량변화



빙붕의 두께 변화 추정

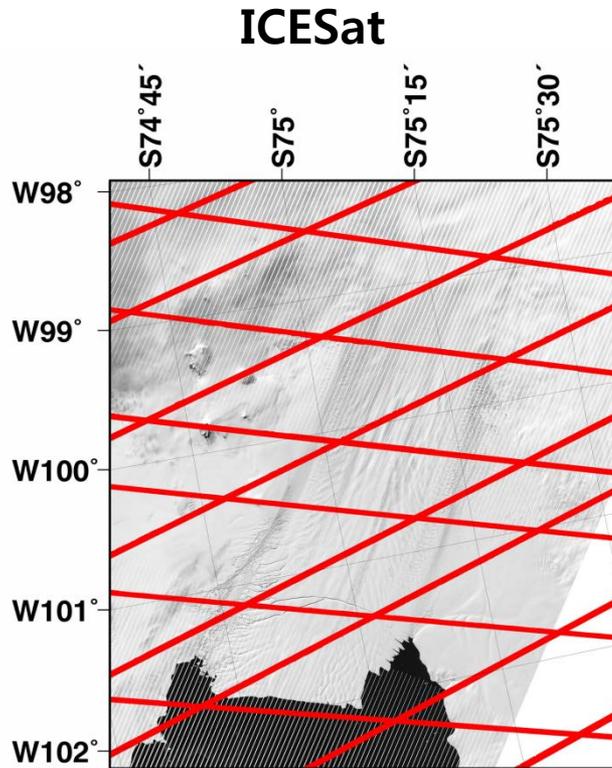
- 인공위성 고도계 관측 자료를 이용한 빙붕의 고도 변화 추정
 - 인접한 orbit의 관측값들에 대한 시/공간적 보간값을 추출하여 고도 변화량 추정



Pritchard et al., *Nature* **461**, 971-975 (2009)

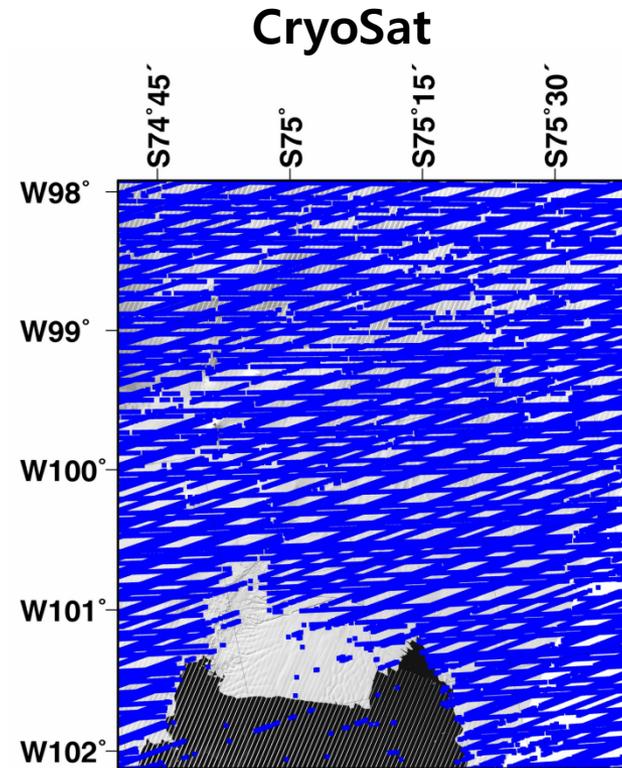
빙붕의 두께 변화 추정

- 인공위성 고도계 관측 자료를 이용한 빙붕의 고도변화 추정
 - 인접한 orbit의 관측값들에 대한 시/공간적 보간값을 추출하여 고도변화량 추정
 - CryoSat 관측 자료를 이용하여 Pine Island 빙하 빙붕의 연간 고도변화량 추정(5 km grid)



2003-2008년 관측값을 모두 사용하여
6년 평균 고도변화량 추정(25 km)

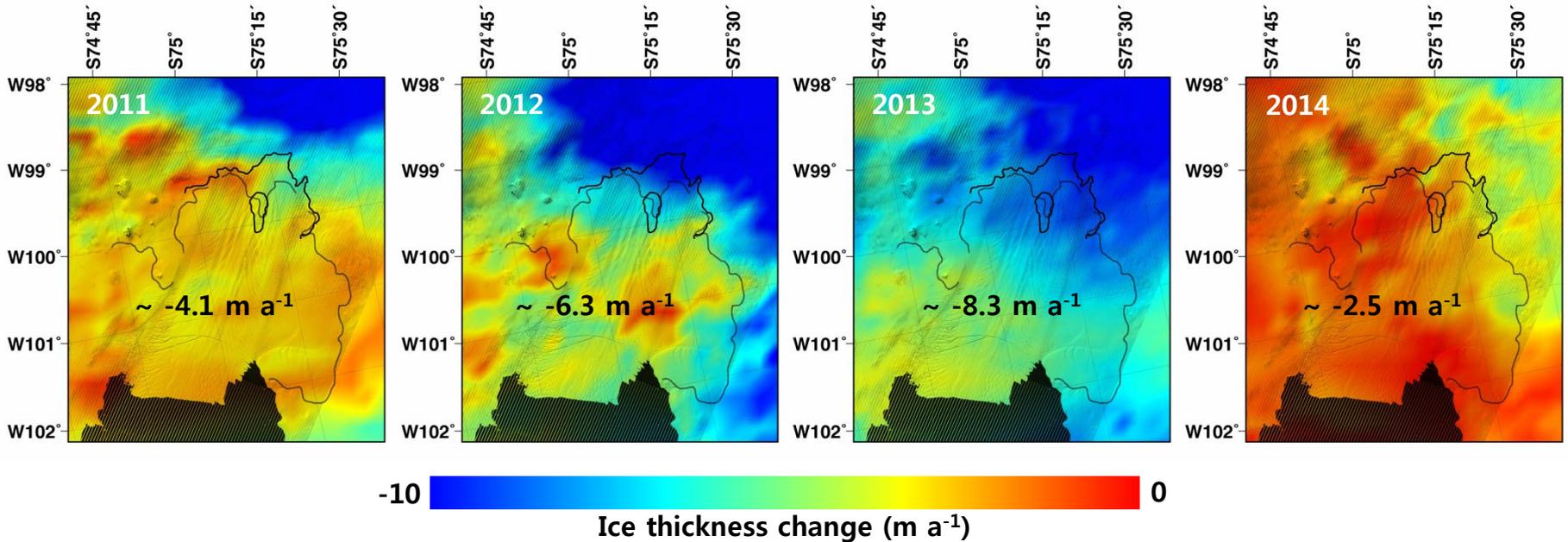
vs.



연간 고도변화량 추정 가능(~5 km)

Pine Island 빙하 빙봉의 두께 변화

- 인공위성 고도계 관측 자료를 이용한 빙봉의 고도변화 추정
 - 인접한 orbit의 관측값들에 대한 시/공간적 보간값을 추출하여 고도변화량 추정
 - CryoSat 관측 자료를 이용하여 Pine Island 빙하 빙봉의 연간 고도변화량 추정(1 km grid)
 - 빙체(917 kg m^{-3})와 해수의 밀도(1030 kg m^{-3})를 적용하여 두께변화량으로 환산(firn depth change 보정)



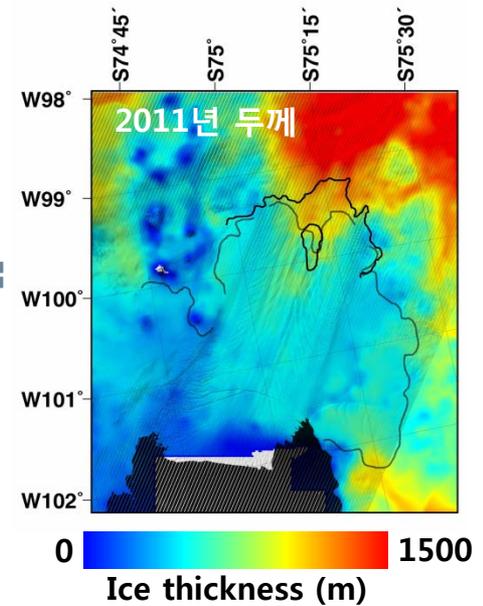
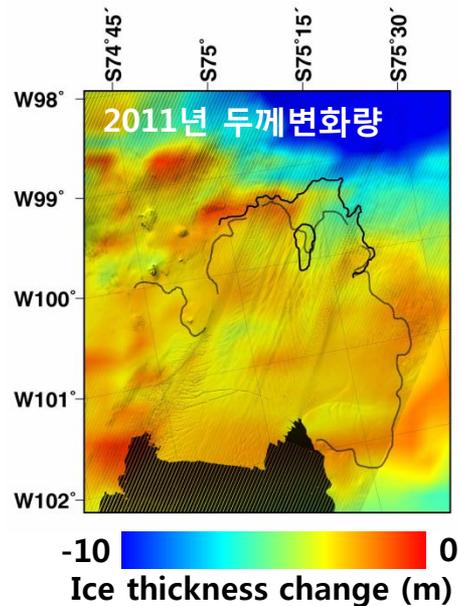
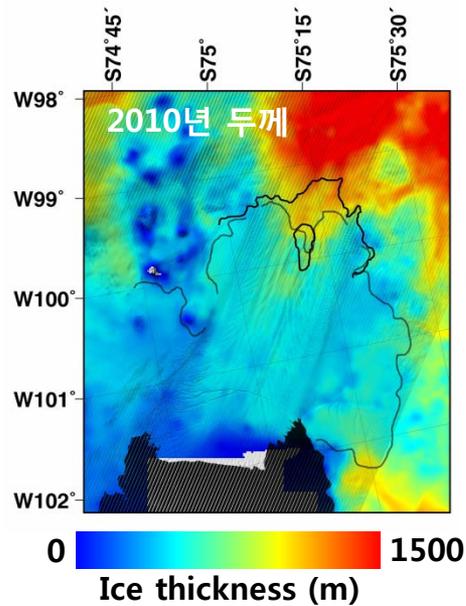
빙붕의 FMB 추정

Ice Mass Conservation Theory

$$\partial H / \partial t = TMB = FMB + BMB + SMB$$

$$FMB = -\nabla \cdot (Hv)$$

- H : 2009-2010 IceBridge MCoRDS L3 Gridded Ice Thickness (500 m grid)와 CryoSat-2 두께변화량 사용



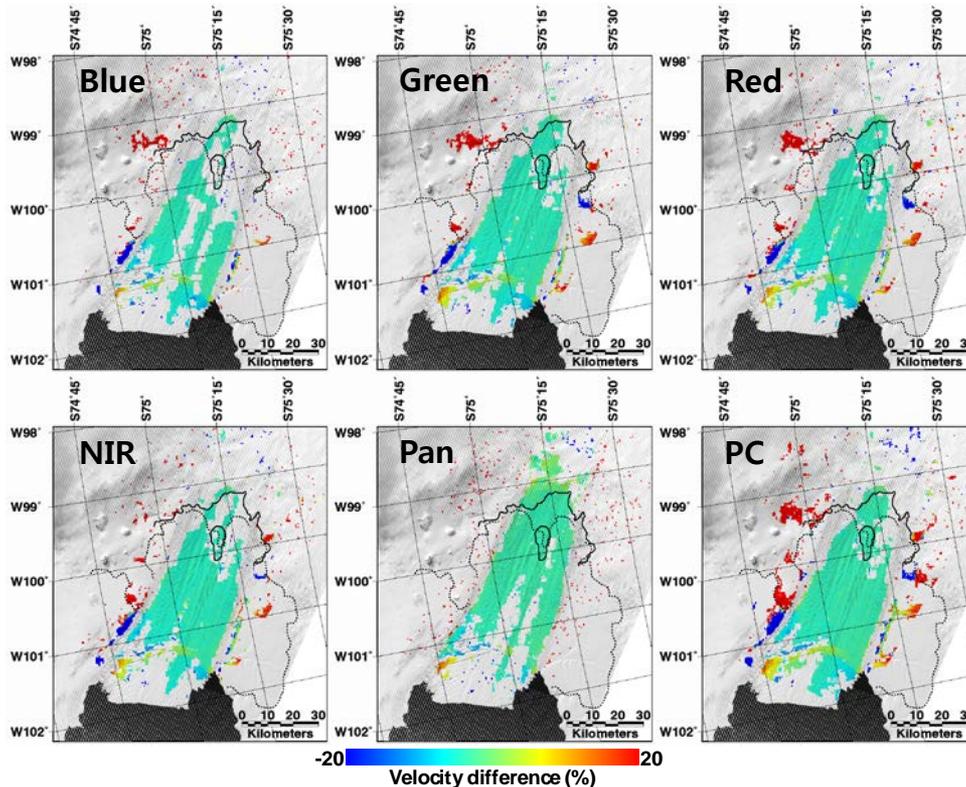
빙붕의 FMB 추정

Ice Mass Conservation Theory

$$\partial H / \partial t = TMB = FMB + BMB + SMB$$

$$FMB = -\nabla \cdot (Hv)$$

- H : 2009-2010 IceBridge MCoRDS L3 Gridded Ice Thickness (500 m grid)와 CryoSat-2 두께변화량 사용
- v : Landsat 다중분광 영상정합(Orientation Correlation 사용)



- Landsat의 각 분광밴드에 대한 영상정합(image matching) 결과를 융합하여 빙하의 흐름속도를 측정하는 기법 제시
- Landsat-7 ETM+의 SLC-off 문제 해결을 위해 frequency domain에서 영상정합 수행 (Orientation Correlation 적용)
- 간단한 통계량으로 mismatch 제거가 가능하며, 기존 단일밴드(전정색) 영상정합보다 35% 더 많은 수의 흐름속도 벡터 산출

Han et al., *Remote Sens. Environ.* (in revision)

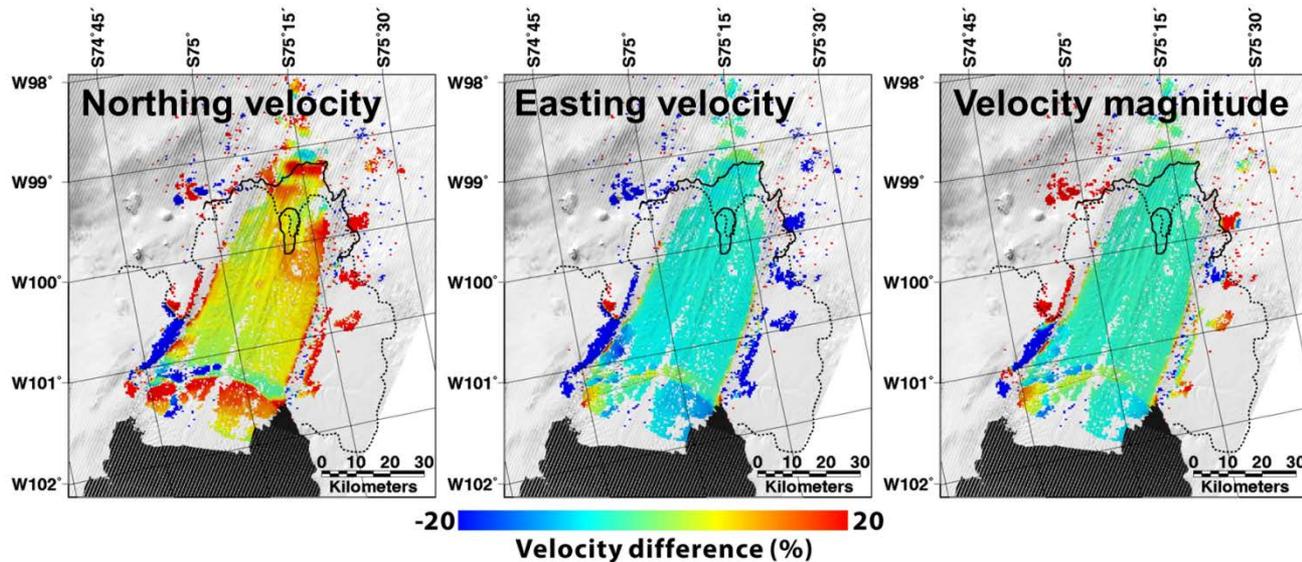
빙붕의 FMB 추정

Ice Mass Conservation Theory

$$\partial H / \partial t = TMB = FMB + BMB + SMB$$

$$FMB = -\nabla \cdot (Hv)$$

- H : 2009-2010 IceBridge MCoRDS L3 Gridded Ice Thickness (500 m grid)와 CryoSat-2 두께변화량 사용
- v : Landsat 다중분광 영상정합(Orientation Correlation 사용)



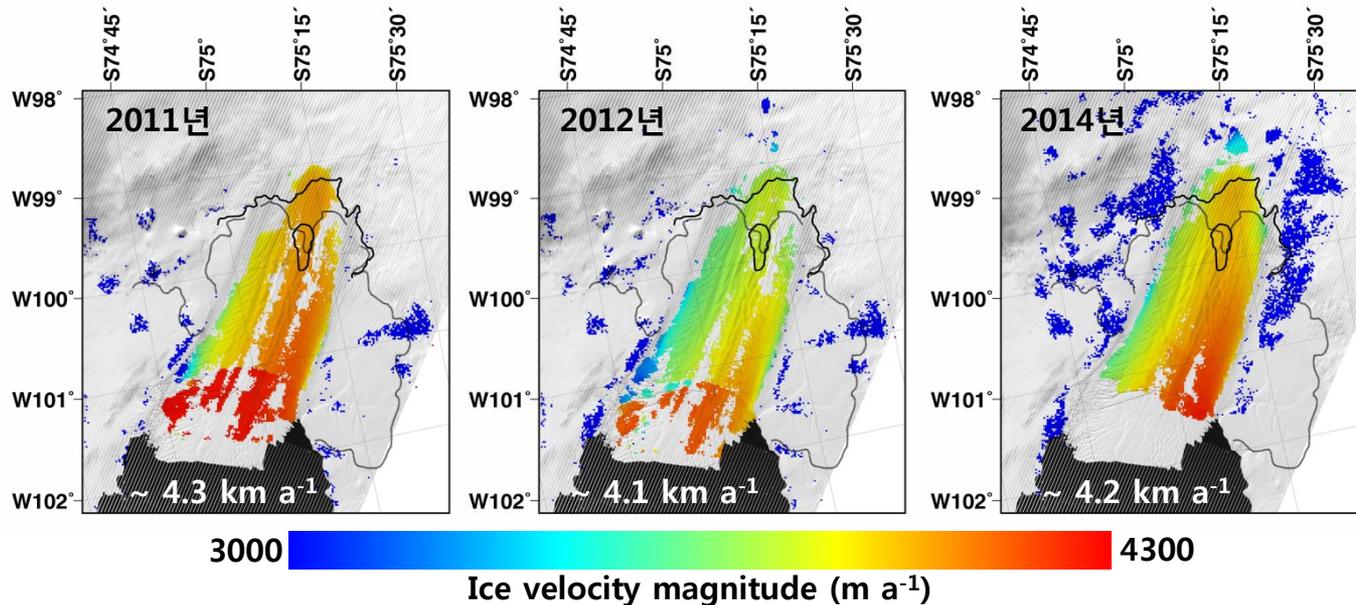
빙붕의 FMB 추정

Ice Mass Conservation Theory

$$\partial H / \partial t = TMB = FMB + BMB + SMB$$

$$FMB = -\nabla \cdot (Hv)$$

- H : 2009-2010 IceBridge MCoRDS L3 Gridded Ice Thickness (500 m grid)와 CryoSat-2 두께변화량 사용
- v : Landsat 다중분광 영상정합(Orientation Correlation 사용)



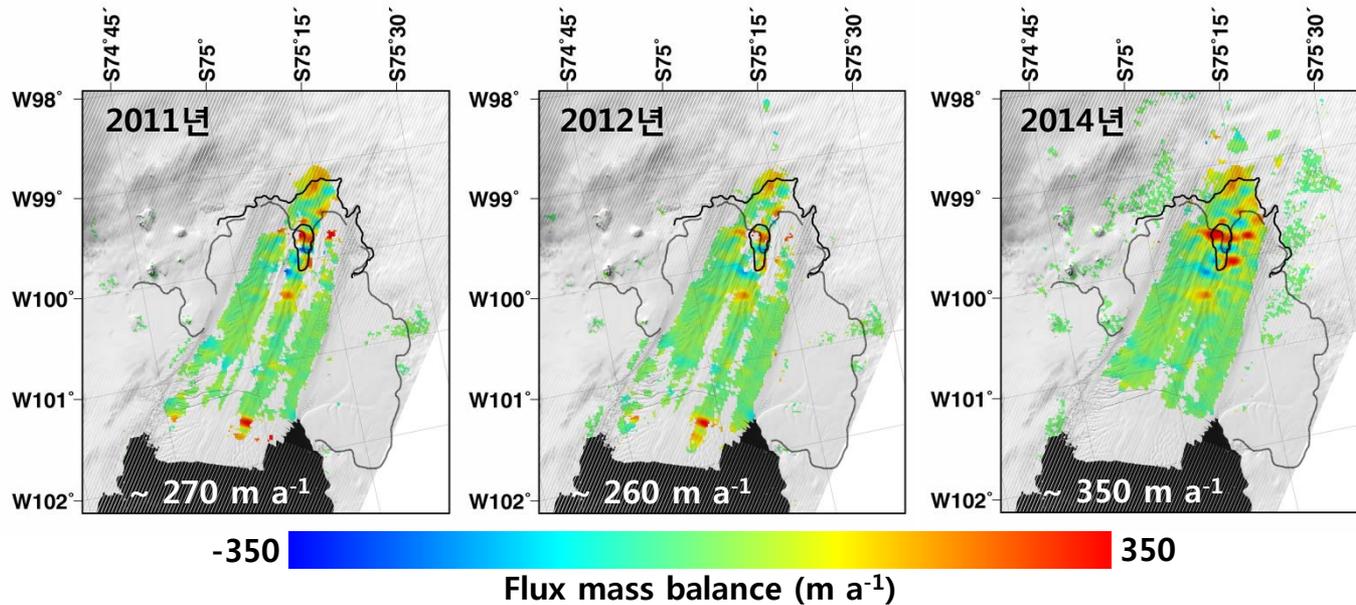
Pine Island 빙하 빙붕의 FMB

Ice Mass Conservation Theory

$$\partial H / \partial t = TMB = FMB + BMB + SMB$$

$$FMB = -\nabla \cdot (Hv)$$

- H : 2009-2010 IceBridge MCoRDS L3 Gridded Ice Thickness (500 m grid)와 CryoSat-2 두께변화량 사용
- v : Landsat 다중분광 영상정합(Orientation Correlation 사용)

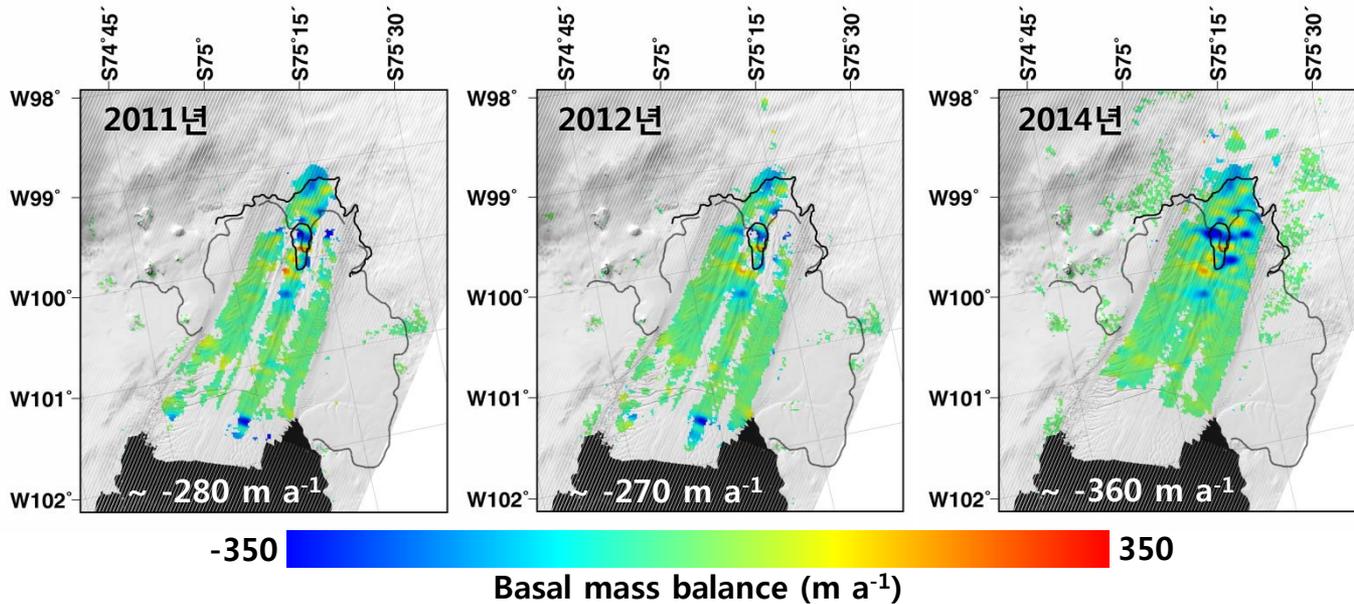


Pine Island 빙하 빙붕의 BMB

Ice Mass Conservation Theory

$$\partial H / \partial t = TMB = FMB + BMB + SMB$$

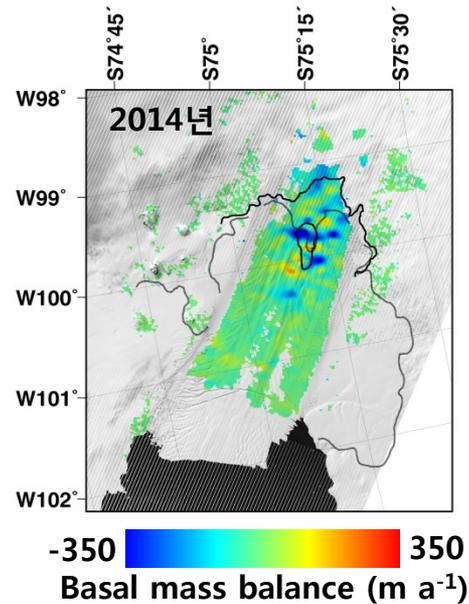
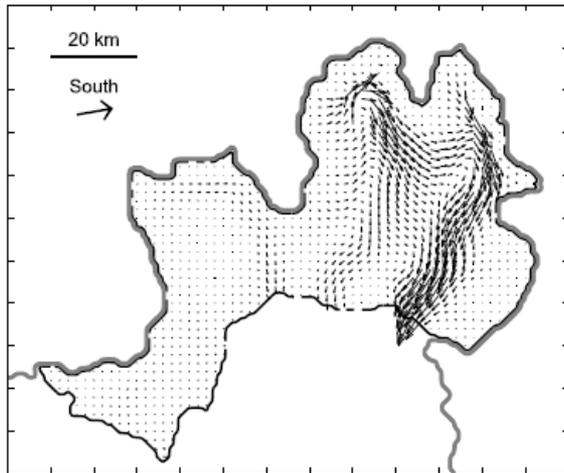
- 빙붕의 두께 변화량(TMB)으로부터 FMB와 SMB를 차분하여 추정
- RACMO/ANT로 추출된 빙붕의 SMB 사용



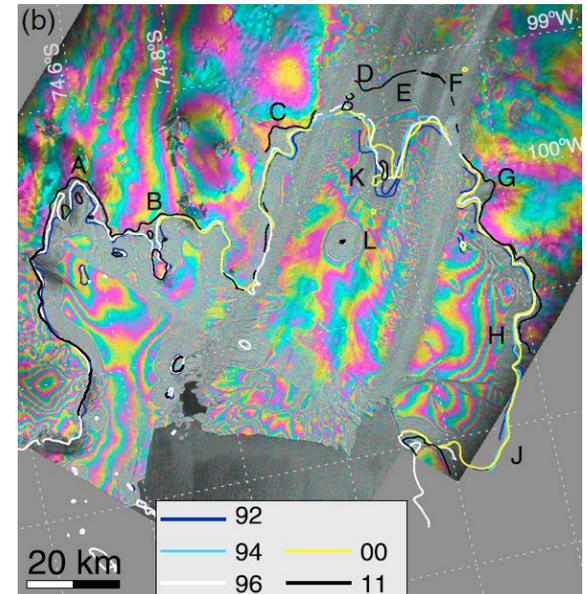
Pine Island 빙하 빙붕의 BMB

- Pine Island 빙하의 유출은 주로 basal melting에 기인
- Basal melting이 크게 증가한 지역과 해수 순환이 강한 지역이 일치
- Ice rumples 지역에서 basal melting이 크며, 시간에 따라 지속적으로 증가

water circulation vectors beneath PIGIS
(Payne et al., 2007)



tidal-induced motion of PIG
(Rignot et al., 2014)



결론 및 향후 연구

- 다중위성자료 활용을 통해 Pine Island 빙하 빙봉의 최근 질량변화 분석
 - 빙봉의 두께 변화 추정을 위한 CryoSat-2 레이더 고도계 관측 자료의 유용성 검증
 - 빙봉의 두께는 2011-2013년에 지속적으로 증가, 2014년에 급격히 감소
 - Landsat 다중분광 영상정합을 통해 빙봉의 흐름속도 측정
 - 2012년에 일시적인 흐름속도의 감소 관측, 2014년의 속도는 2012년에 비해 증가하였으나 최대 흐름속도에 도달하지 않음
 - Pine Island 빙하 빙봉의 질량변화는 대부분 빙봉의 기저용융에 기인
 - 현지영역 부근에서 연간 최대 370 m의 빙체 감소 관찰
 - 기저용융이 활발한 위치와 해수 순환이 강한 지역 일치
 - Ice rumple에서 빙하 흐름이 집중되는 반면, 기저용융이 크게 나타남을 관찰

결론 및 향후 연구

- 질량변화 분석의 불확실성 검토 및 제거
 - 한지영역에서의 질량변화 결과 재분석
 - Hydrostatic equilibrium assumption이 성립되지 않는 지역 검출(제거) 및 결과 재분석 요구
 - 질량변화량의 uncertainty 분석
 - CryoSat-2 고도계 기반 빙붕 두께 변화량의 uncertainty
 - Landsat 기반 흐름속도의 uncertainty
 - RACMO/ANT 기후모델 결과 uncertainty

감사합니다.