

저온 얼음 표면의 화학적 특성 연구

Study of Chemical Properties of Ice Surfaces at Low
Temperature



서울대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “얼음화학 특성연구를 통한 극지방 자연현상 규명 및 응용기술 개발”과제의 위탁연구“저온 얼음 표면의 화학적 특성 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.



2020. 01. 17.

(본과제) 총괄연구책임자 : 김 기 태
위탁연구기관명 : 서울대학교 산학협력단
위탁연구책임자 : 강 현
위탁참여연구원 : 방 재 혁
“ : 강 한 이
“ : 박 영 욱
“ : 고 봉 현

요 약 문

I. 제 목

저온 얼음 표면의 화학적 특성 연구

II. 연구의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

얼음 표면에서 일어나는 화학 반응의 행태와 원리를 체계적으로 연구한다. 이 기반 지식들을 활용하여, 극지방 대기, 성층권 및 우주 공간의 얼음 입자 표면에서 일어나는 화학 반응을 모사하고, 이 반응들의 원리를 이해하고자 한다.

2. 연구개발의 필요성

- 얼음 표면에서 일어나는 화학 반응에 대한 이해는 극지, 성층권 대기, 우주 공간에 존재하는 화학 물질과 반응들의 물리, 화학적 원리에 대한 지식 (반응 조건, 반응 속도 등)을 증대시킨다.
- 자연현상에 대한 현상적 관찰 및 관찰 자료의 축적 연구가 주를 이루어온 극지 연구, 대기 환경, 지구화학 연구와 협력 연구를 통하여 현장 관찰 자료들의 체계적 분석 및 예측 모델의 정확도를 향상할 수 있다.
- 극지 환경, 성층권 등의 얼음 입자 표면에서 일어나는 반응을 이해하고 활용하여 지구 환경 문제의 원인 및 해결책을 모색할 수 있다.

III. 연구의 내용 및 결과

1. 화학 분자-얼음 간 상호작용 연구

○ 얼음 박막 시편의 생성 조건 및 성질 연구

초고순도의 얼음 박막을 생성하기 위한 초고진공 환경 실험 장비를 점검하고, 이 장비를 사용한 얼음 박막 시편의 생성 조건을 연구하였다. 필요한 물리적 형태(morphology)의 얼음 박막을 원하는 두께로 조절하여 제작할 수 있음을 확인하였다.

제작한 결정성 얼음 박막 표면의 구조적 특성을 확인하였다. 결정성 얼음 박막 표면에 암모니아 분자를 흡착시키고, 암모니아의 양에 따른 얼음 박막 표면과의 상호작용 정보를 뒤에서 점검한 반사-흡수 적외선 분광법, 온도 프로그램 탈착법, 켈빈 일함수 탐침을 통해서 얻었다. 얼음 박막의 표면 밖으로 향하고 있는 수소가 결정성 얼음 표면에서 차지하고 있는 밀도를 알 수 있었다.

○ 연구 대상 화합물 선정

얼음 박막 시편과 함께 연구할 산, 염기, 이온성 물질 등 중에서 고진공 환경의 시편에 사용 가능한 물질을 선정하였다. 극지 대기 및 성층권 대기 화학에서 중요성을 가지는 분자로 이산화황 (SO_2), 이산화질소 (NO_2), 염화불화탄소 (CFC) 화합물, 염화수소 (HCl), 그리고 암모니아 (NH_3)이다. 이들 기체 분자는 대기 중에 존재하는 환경 오염 관련 물질로서 많은 관심을 받는 대상이다. 얼음 박막 시편의 표면 성질 연구를 하기 위해서 암모니아를 연구 대상 화합물로 선정하였다. 암모니아는 얼음 박막을 이루는 물 분자와 함께 수소결합을 하기에 표면에 있는 물 분자의 성질을 연구하는 데 있어서 적합하다.

○ 연구 방법들의 확립

반응성 이온 산란법 (reactive ion scattering) 및 저 에너지 스퍼터링법 (low energy sputtering), 반사-흡수 적외선 분광법 (reflection-absorption infrared spectroscopy), 온도 프로그램 탈착법 (temperature programmed desorption), 켈빈 일함수 탐침 (Kelvin workfunction probe)이 연구에 적용 가능성을 확인하였다.

IV. 연구결과와 활용계획

- 외부 환경적 자극에 의한 얼음 박막 성질의 변화를 관찰하기 위해 저에너지 전자빔과 얼음 박막과의 상호작용을 연구할 계획임.
- 얼음에서 일어나는 화학 반응들의 원리를 이해하여, 실제 극지 대기 오염 반응의 원인 물질을 밝힌다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I . Title

Study of Chemical Properties of Ice Surfaces at Low Temperature

II . Purpose and Necessity of Research

1. Purpose of Research

- Study of fundamental principles and mechanisms of chemical reactions on ice surfaces.
- Application of the knowledge of ice chemistry to understanding for chemical processes on ice occurring in polar atmosphere, stratosphere, and outer space.

2. Necessity of Research

- Understanding of chemical reactions on ice surface can improve the knowledge of physics and chemistry in polar region, atmosphere, and space.
- By collaborating with polar researchers, the results of this proposed study can improve the scientific analysis of the observation data acquired from field studies and the accuracy of simulation models.
- To find the origins and solutions of earth environmental problems.

III . Contents and Results of Research

1. Study of Molecule-Ice Interaction

○ Preparation Conditions and Properties of Ice Films

In the beginning stage of research, we checked the experimental apparatus to be used for the formation of high-purity ice films in ultrahigh vacuum conditions. We examined and established the conditions for forming ice films with desired morphology and thickness.

The structural properties of a crystalline ice film surface was studied. Ammonia molecules (NH_3) were deposited on a crystalline ice surface, and the interaction between ammonia molecules and the ice surface was

examined by reflection-absorption infrared spectroscopy, temperature programmed desorption, and Kelvin workfunction probe. The surface density of dangling OH on the crystalline ice surface was estimated.

○ Selection of Target Molecules

We examined the candidates for acidic, basic, and ionic molecules available for studies in the high vacuum condition. The molecules of importance in polar atmospheric and stratospheric atmospheric chemistry include SO₂, NO₂, CFC compounds, HCl, and NH₃. To examine the ice surface property, NH₃ was chosen as a target molecule because of its property to make a hydrogen bond with a water molecule.

○ Experimental Methods

We checked that reactive ion scattering, low energy sputtering, reflection-absorption infrared spectroscopy, temperature programmed desorption, and Kelvin workfunction probe can be adequate methods for ice chemistry research.

IV. Application Plans of Research Results

- Future application of the present result includes the study of the effects of external energy input on ice film properties such as the interaction between low energy electron beams and ice films.
- The information about the mechanism of chemical reactions of ice can be used to better understand the chemical links between reactions on polar atmospheric ices and pollutions in the polar region.

목 차

제 1 장 서론	8
제 2 장 국내외 기술개발 현황	10
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	11
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	16
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	18

본 문

제 1 장 서론

1. 연구개발의 목적

- 가. 얼음 표면에서 일어나는 화학 반응의 행태와 원리를 체계적으로 연구함으로써, 지금까지의 주 화학연구인 기체상, 수용액 상의 반응들과는 다른 얼음 화학의 특이성을 밝히어, 새로운 화학연구 분야를 개척하고자 한다.
- 나. 얼음 화학 반응의 원리적 이해를 통해서 극지방 대기, 성층권 및 우주 공간의 얼음 입자 표면에서 일어나는 화학 반응을 모사하고, 실제 얼음에서 일어나는 반응들의 이해에 응용한다.

2. 연구개발의 필요성

- 가. 학술적 필요성과 파급효과
 - (1) 얼음 표면에서 일어나는 화학 반응에 대한 이해는 극지, 대기, 우주 공간에서 존재하는 화학 물질과 반응들의 물리, 화학적 원리에 대한 지식 (반응 조건, 반응 속도 등)을 증대시킨다.
 - (2) 얼음 화학 반응들에 대하여 기존에 컴퓨터 시뮬레이션이나 기본적인 화학 지식으로 예상하던 것보다 더 구체적인 실험 증거가 필요하다.
 - (3) 자연현상에 대한 현상적 관찰 및 관찰 자료의 축적 연구가 주를 이루어온 극지 연구, 대기 환경, 지구화학 연구와 협력 연구를 통하여 현장 관찰 자료들의 체계적 분석 및 예측 모델의 정확도를 향상할 수 있다.
 - (4) 일반적인 (상온, 상압) 환경에서 연구하기 힘든 빠른 반응을 저온의 얼음 표면에서 반응 단계별로 분리 검출하여, 화학 반응 연구의 깊이와 범위를 확장한다.

나. 경제적 파급효과

- (1) 극지 환경, 성층권 등의 얼음 입자 표면에서 일어나는 반응을 이해하고 활용하여 지구 환경 문제의 원인 및 해결책을 모색할 수 있다.
- (2) 진공 과학 기술, 저온 과학 기술, 얼음 활용 기술의 발전에 기여 한다.

3. 연구개발의 범위 - 2019년도

가. 화학 분자-얼음 간 상호작용 연구

- (1) 얼음 박막 시편의 생성 조건 및 성질 연구

- (2) 연구 대상 화합물 선정 - 극지 및 성층권 영역에서 화학적 중요성을 가지는 분자
- (3) 연구 방법들의 확립 - 초고진공 용기와 분석 장비의 얼음 화학 연구에의 적합성 검토



제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국·내외 관련분야에 대한 기술개발현황

가. 미국

J.P. Devlin 교수(Oklahoma University)가 진공 조건에서 제작한 얼음 나노입자 및 가스 하이드레이트의 화학 반응들에 대해 적외선 분광법을 사용한 연구를 오랫동안 진행해 오고 있다. 물리적, 화학적 관점에서 기초과학적 접근에 중점을 준 연구를 진행하며, 천체 과학적 과정과 관련된 연구도 진행하고 있다.

나. 일본

일본 홋카이도 대학의 저온 과학 연구소 (Institute of low temperature science)의 연구팀 중 'Ice and planetary science group'과 'Astrophysical chemistry group'에서 얼음의 기초적인 물리적 성질, 대기화학 및 천체 과학적 연구를 활발히 진행 중이다.

2. 연구결과의 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

가. 기초과학 수준의 얼음 화학 연구는 세계적으로 아직 초기 단계에 머물러 있다.

나. 얼음 화학 연구에서 기초과학적으로 깊이 있는 연구를 추구함으로써, 극지연구소의 연구 활동에서 화학 분야에서 선진국과 대등한 지위를 점할 수 있다.

나. 얼음 화학에 대한 기초과학 지식 축적을 통해 세계 극지 연구 학술계에 극지에서 일어나는 화학 반응 연구에 대한 새로운 자극을 줄 수 있다.

다. 얼음 화학 연구를 위한 새로운 연구 방법 (반사-흡광 적외선 분광법, 저에너지 스퍼터링법, 반응성 이온 산란법, 온도 프로그램 탈착법, 켈빈 일함수 탐침)은 다른 연구 분야에서 수행하는 얼음 및 극지 연구에 새로운 실험 기술들을 도입하는 계기가 될 수 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1. 얼음 박막 시편 연구

가. 얼음 박막 시편의 생성 조건 및 성질 연구

초고순도의 얼음 박막을 생성하기 위한 초고진공 환경 실험 장비를 점검하고, 이 장비를 사용한 얼음 박막 시편의 생성 조건을 연구하였다. 초고진공 환경은 수 분에서 수 시간 동안 표면이 오염되지 않는다. 따라서 얼음이 형성될 수 있는 온도에서 수증기를 노출 시키게 되면 오염물질이 들어있지 않은 순수한 얼음 박막을 생성할 수 있다. 초고진공 용기 내에서 얼음 박막 성장의 기질로 사용하는 백금 기질의 온도를 10-1500 K 범위에서 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 조절된 분압의 수증기를 초고진공 용기 내로 도입하고 백금 표면 위에 증착시켜 얼음 박막을 생성하였다.

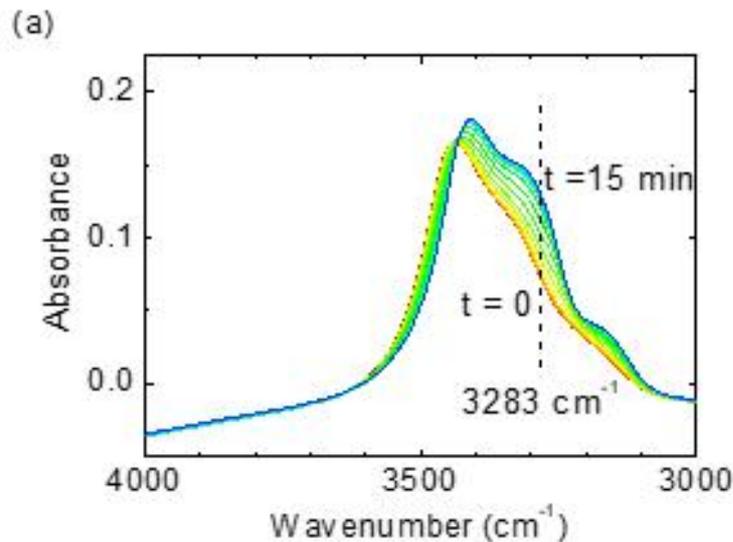


그림 1. 얼음 박막의 morphology 변화를 보여주는 적외선 분광 스펙트럼. 낮은 온도(100 K)에서 수증기 증착에 의해 생성시킨 비결정질 얼음 박막(빨간 선, $t = 0$)을 143 K 일정 온도에 유지시키면 시간이 지남에 따라 점점 결정성 얼음(파란 선, $t = 15$ min)으로 변화된다. 보여주는 흡광띠는 물 분자의 $\nu(\text{O-H})$ stretch band에 해당함. 점선(3283 cm^{-1})은 흡광도 변화가 가장 많이 나타나는 지점을 표시함.

원하는 조건의 얼음 박막 시편을 만들기 위해서는 형태(morphology)와 박막의 두께에 대한 조절이 가능한 생성 조건을 연구해야 한다. 첫째로, 원하는 morphology의

얼음 박막 시편의 생성 조건을 확인하였다. 백금 기질의 온도에 따라 130 K 이하 온도에서는 비결정질 얼음이 생성되고, 140 K 이상에서는 결정질의 얼음 박막이 생성됨을 적외선 분광법을 사용하여 확인하였다. 둘째로, 얼음 박막의 두께를 조절된 분압의 수증기의 노출 시간에 따라 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 박막의 두께는 반사-흡광 적외선 분광법 (reflection-absorption infrared spectroscopy)과 온도 프로그램 탈착법 (temperature programmed desorption)을 이용하여 확인하였다. 결과적으로 필요한 morphology의 얼음 박막을 원하는 두께로 조절하여 제작할 수 있음을 확인하였다.

상기한 방법을 이용해 성장시킨 얼음 박막 표면의 성질 연구를 진행하였다. 얼음 표면의 성질 연구 주제로는 표면 구조, 상전이, 산-염기 성질, 외부 자극 (전자, 자외선)에 의한 변화 측정이 있다. 첫 번째 연구 주제로 얼음 박막의 표면 구조의 연구를 진행하였다.

결정성 얼음 박막 표면의 구조적 특성을 확인하였다. 결정성 얼음 박막 표면에 암모니아 분자를 흡착시키고, 암모니아의 양에 따른 얼음 박막 표면과의 상호작용 정보를 뒤에서 점검한 반사-흡수 적외선 분광법, 온도 프로그램 탈착법, 켈빈 일함수 탐침 (Kelvin workfunction probe)을 통해서 얻었다. 결정성 얼음 표면에 존재하는 수소결합을 하지 않은 물분자의 수소가 얼음 박막의 표면 밖을 향하고 있음을 확인하였다. 그리고 암모니아의 덮임률을 변화시켜 가면 확인한 결과 얼음 박막의 표면 밖으로 향하고 있는 수소가 결정성 얼음 표면에서 차지하고 있는 밀도를 알 수 있었다.

나. 연구 대상 화합물 선정

얼음 표면과 화합물들의 상호작용은 극지방 성층권 구름(polar stratospheric cloud) 또는 극지방 대기에서 일어나는 오염물질들의 화학 반응을 이해할 수 있는 중요한 연구이다. 얼음 박막 시편과 함께 연구할 산, 염기, 이온성 물질 등 중에서 고진공 환경의 시편에 사용 가능한 물질을 선정하였다. 이들 중, 극지 대기 및 성층권 대기 화학에서 중요성을 가지는 분자를 연구 대상으로 하였다. 점검한 화합물로는 황산화물로는 이산화황 (SO_2), 질소 산화물은 이산화질소 (NO_2), 염화불화탄소 (CFC) 화합물, 염화수소 (HCl), 그리고 암모니아 (NH_3)가 있다. 이들 기체 분자는 대기 중에 존재하는 환경 오염 관련 물질로서 많은 관심을 받는 대상이다.

첫째로, 각 기체 분자들이 고진공 환경에서 사용 가능한지 확인하였다. 이산화황, 이산화질소, 염화수소, 암모니아의 경우 가스 실린더를 이용하여 초고진공 용기에 도입하였다. 염화불화탄소 화합물은 상온에서 액체로, 초고진공 용기에 연결된 액체

용기를 이용해 분압만큼 화합물을 도입하였다. 각 분자의 도입은 질량 분석기를 통해 확인하였다.

둘째로, 도입한 기체 분자의 초고진공 용기 내의 얼음 박막 시편에서 실험 적합 여부를 확인하였다. 얼음 박막 시편의 온도에서 기체 분자가 흡착된 상태를 유지하지 않으면 실험을 할 수 없다. 따라서, 도입한 기체 분자가 얼음 박막에 흡착 여부를 이번 연구에서 연구 방법으로 확립한 반사-흡수 적외선 분광법과 온도 프로그램 탈착법을 사용해서 확인하였다.

점검을 통해서 후보 물질 모두 연구 대상으로 적합하다는 것을 확인하였다. 연구의 목표인 얼음 박막 시편의 표면 성질 연구를 하기 위해서 암모니아를 연구 대상 화합물로 선정하였다. 암모니아는 얼음 박막을 이루는 물 분자와 함께 수소결합을 하기 때문에 표면에 있는 물 분자의 성질을 연구하는 데 있어서 적합하다.

다. 연구 방법들의 확립

- (1) 반응성 이온 산란법 (reactive ion scattering) 및 저 에너지 스퍼터링법 (low energy sputtering)이 위에 선정된 표면 화학종의 정성 및 정량 분석 방법으로 사용 가능함을 확인하였다. 반응성 이온 산란법을 이용하여 표면에 존재하는 비이온성 화학종의 정성 및 정량 분석을 하였다. 저 에너지 스퍼터링법을 이용하여 표면에 존재하는 이온성 물질들의 정성 및 정량 분석을 하였다. 얼음 표면과 화합물이 반응하여 만드는 화학종들을 확인할 수 있음을 확인하였다. 예를 들어, 염화수소 분자의 경우 수소 이온 (H^+)과 염화 이온 (Cl^-)의 형태로 존재한다는 것을 연구 방법을 통해 확인할 수 있었다.
- (2) 반사-흡수 적외선 분광법 (reflection-absorption infrared spectroscopy)이 분자 내 화학 결합 구조와 흡착 전후 결합 세기의 측정 방법으로 사용 가능함을 확인하였다. 반사-흡수 적외선 분광법은 기존의 적외선 분광법인 투과-흡수와 다르게 시편에 빛을 반사 시켜서 적외선 분광 정보를 얻는 분광법이다. 따라서 고체 표면에 흡착되어있는 화학종들의 적외선 분광 정보를 얻는데 적합하다. 얼음 박막 시편에 흡착된 물질의 구조가 얼음 박막 시편과의 상호작용 및 화학 반응을 통해서 변화하게 되면 진동 모드의 에너지가 달라진다. 이를 통해서 분자 내 화학 결합 구조와 결합 세기를 측정할 수 있었다.
- (3) 온도 프로그램 탈착법 (temperature programmed desorption)을 사용한 분자-얼음 간 탈착 반응 속도 및 탈착량 측정에 사용 가능함을 확인하였다. 1 K/s의 속도로 온도를 증가시키며 질량 분석기를 이용해 탈착되는 분자의 온도에 따른 탈착량 변화를 관찰하였다. 선택한 연구 대상 화합물의 탈착 온도,

얼음 표면에서 탈착 반응 속도 및 탈착량을 측정할 수 있었다. 온도 프로그램 탈착법으로 얻은 결과를 이용하여 얼음 박막 시편과 분자의 상호작용에 대한 정량적인 연구를 수행할 수 있었다.

- (4) 켈빈 일함수 탐침 (Kelvin workfunction probe)를 사용한 얼음-흡착물 상호작용에 의해 발생하는 전위차 측정이 가능함을 확인하였다. 켈빈 일함수 탐침은 시편의 일함수를 측정한다. 측정되는 일함수는 시편에 발생한 전위차에 영향을 받는다. 따라서 얼음 박막 시편에 흡착물이 존재하면 얼음-흡착물 상호작용에 의한 효과로 전위차에 변화가 발생하고, 이를 켈빈 일함수 탐침으로 측정할 수 있음을 확인하였다. 켈빈 일함수 탐침이 측정하는 전위차를 통해 얼음-흡착물이 상호작용하여 만드는 결합 구조에 대한 정보를 얻을 수 있었다.

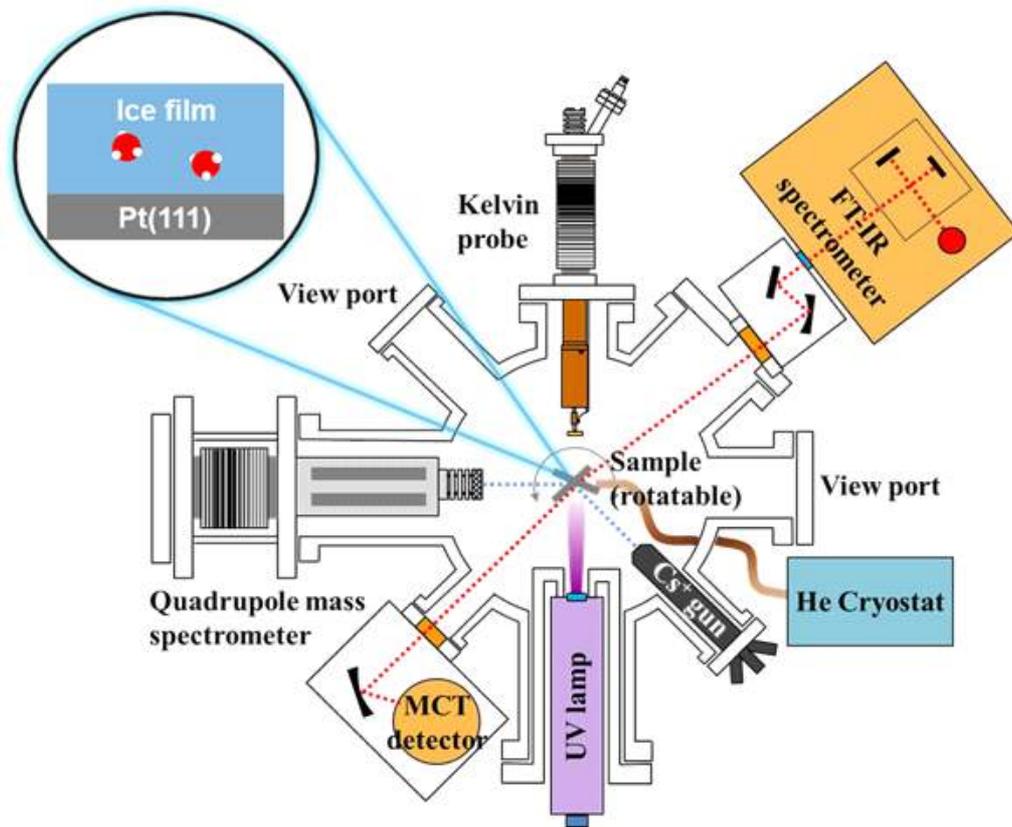


그림 2. 본 연구에 사용되는 초고진공 환경 실험 장비의 모식도. 화학 분자와 얼음 간 상호 작용 연구에 사용할 측정 방법들인 반응성 이온 산란법, 저 에너지 스퍼터링법, 반사-흡수 적외선 분광법, 온도 프로그램 탈착법, 켈빈 일함수 탐침 측정 등 여러 장치들이 부착되어 있다. 진공 용기의 중심에 위치한 얼음 증착의 기질로 사용하는 백금(111) 시편과 그 위에 생성되는 얼음 박막을 확대시켜 보여줌.

라. SCI 논문 1편 출간 예정

상기한 결과로부터 국제학술지에 투고할 논문 1 편 작성 중이며, 논문 예상 제목은 다음과 같다. Adsorption State of Ammonia on Crystalline Ice and Its Implication to Ice Surface Structure Determination.



제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1. 연구목표별 주요 달성도(정성적 성과) (예: 해당 월에 음영 기입)

(기준일: 2020. 1.)

세부연구목표	수행내용	연 구 기 간												진도 율 (%)
		2019년												
		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	
○ 얼음 박막 시편의 생성 조건 및 성질 연구	- 실험 장비의 점검 및 시편의 생성 조건 연구를 진행함 - 얼음 박막 시편의 성질 연구를 진행함: 결정성 얼음 박막 시편의 표면 구조													90%
○ 연구 대상 화합물 선정	- 산, 염기, 이온성 물질 등 중에서 고진공 환경의 시편에 사용 가능한 물질의 범위를 점검함													100%
○ 연구 방법들의 확립	- 반응성 이온 산란법, 저 에너지 스퍼터링법, 반사-흡수 적외선 분광법, 온도 프로그램 탈착법, 켈빈 일함수 탐침이 적용 가능함을 확인함													100%

□ 당초계획 ■ 실 적

2. 관련 연구 분야에 대한 기여도

얼음 박막 시편의 생성 조건 및 성질 연구는 얼음 화학 연구에 있어 기본적인 정보로서, 관련된 다양한 분야에서 진행되는 연구들에 활용할 수 있다. 얼음 박막 시편 생성 조건에 대한 정보는 환경 화학, 천체 화학 분야에서 진행되는 얼음 화학 반응의 모사 실험의 정확도를 높이는 데에 기여할 수 있다.

주요 연구결과인 얼음 박막의 성질 연구의 연구결과인 얼음 표면의 구조 연구의 경우, 관련 연구 분야에 실험적 증거로써 중요한 위치를 갖는다. 얼음 표면은 극지, 극지 대기 및 우주에서 다양한 화학 반응이 일어나는 장소이다. 그리고 얼음 표면이 가지고 있는 수소 결합하지 않은 물 분자의 수소 원자들은 화학적 현상의 확률이 상당히 높은 곳이다. 따라서 얼음 표면의 수소 원자들의 밀도를 실험적으로 측정된 결과는 추후 극지, 대기, 우주에서 일어나는 반응들의 이해를 크게 높여줄 것으로 기대된다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 추가연구 계획

가. 얼음 박막 시편의 성질 연구

향후, 외부 자극에 의한 얼음 박막 성질의 변화를 관찰하기 위해 저에너지 전자빔과 얼음 박막과의 상호작용을 연구 계획 중이다. 극지 대기 중에 존재하는 얼음 알갱이들은 저에너지 전자에 노출된다. 저에너지 전자빔에 의한 얼음 박막 성질의 변화에 대한 이해는 극지 대기 환경에 존재하는 얼음 알갱이에서 일어나는 화학적 현상들을 이해하는데 기여할 수 있을 것이다.

나. 분자-얼음 표면의 화학 반응 연구

분자-얼음 표면의 화학 반응을 연구할 수 있다. 분자-얼음 표면의 화학 반응은 얼음 시편 표면의 구조적 성질에 큰 영향을 받는다. 따라서 얼음 시편 표면의 구조에 대한 이번 연구결과를 이용하여, 최종적으로 선정된 분자를 이용하여 분자-얼음 표면의 화학 반응을 연구할 계획이다.

2. 활용 범위

가. 얼음 박막 시편의 성질에 대해 얻어진 정보들을 활용하여, 극지 화학 반응 시뮬레이션의 정확도 향상에 기여

나. 얼음에서 일어나는 화학 반응들의 원리를 이해하여, 실제로 극지 대기의 얼음 알갱이에서 일어나는 화학반응과 극지의 오염 물질 생성 간의 관련성을 밝히는 데 활용.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.