

암석코어용 micro CT를 이용한 초기 동물의  
내부구조 형태 분석

Analyses of internal structures of early-geologic-time  
animals utilizing the rock-core micro-CT system

한국지질자원연구원

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 북그린란드 고생대 동물 초기진화와 원시지구환경 규명에 관한 연구” 과제의 위탁연구 “암석코어용 micro CT를 이용한 초기 동물의 내부구조 형태 분석에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2020. 1.

총괄연구책임자 : 박 태 윤

위탁연구기관명 : 한국지질자원연구원

위탁연구책임자 : 진 재 화

위탁참여연구원 : 김 준 호

## 보고서 초록

위탁연구과제명	암석코어용 micro CT를 이용한 초기 동물의 내부구조 형태 분석				
위탁연구책임자	진재화	해당단계 참여연구원수	2	해당단계 연구비	135,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	한국지질자원연구원 석유해저연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약				보고서 면수	30
<p>본 연구는 총 3개년(2017-2019)동안 실시된 것으로 극지연구소에서 한국지질자원연구원(이하 KIGAM)에 제공한 화석 시료 및 현생 유사 생물종에 대해 KIGAM이 CT 단층촬영과 그 내외부 구조를 3D로 복원하는 작업을 수행함과 아울러 각 개별 시료의 최적 촬영모수를 확보하고 그를 적용한 고해상 CT 단층촬영 자료 및 3D 복원 영상을 극지연구소에 제공하는 형태로 연구가 수행되었다.</p> <p>micro CT분석이 비파괴 방식으로 - 즉 화석이나 현생 유사 생물종을 파괴하지 않고 내외부 형태/구조를 초고해상으로 밝힐 수 있다는 측면에서 전 세계적으로 연구 수요가 폭증하는 현실에 발맞추어, KIGAM CT의 장점 (시료 크기, 종류의 제한성을 극복한 고분해능 분석)에 입각 국내에서 해당 기술을 선도 확보하기 위한 연구이다.</p> <p>본 연구는 다음과 같은 연도별 목표를 100% 달성하였다.</p> <p>제1차년도 - 극지연구소 제공 화석시료들에 대해 다양한 조건 하에서의 반복적 CT 단층 촬영 및 3차원 입체 분석 실시, 최적 분석 모수 확보</p> <p>제2차년도 및 제3차년도 - 극지연구소에서 제공한 화석 및 유사 현생 생물 종에 대한 다양한 조건 하에서의 반복적 CT 단층 촬영 및 3차원 입체 분석 실시, 최적 분석 모수 확보, 그 결과의 극지연구소 수시 납품</p> <p>이러한 성공적인 연구수행에 기반, micro-CT 추가 생산 및 화석분야 분석 수요를 증대시킬 계획이다.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	마이크로 씨티, 단층 촬영, 화석, 현생유사생물, 초고해상 3D 형태/구조 분석			
	영 어	micro-CT, computed tomography, fossil, modern similar biota, high-resolution 3D morphological/structural analysis			

# 요 약 문

## I. 제 목

- 암석코어용 Micro CT를 이용한 초기 동물의 내부구조 형태 분석

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 암석코어용 Micro CT를 이용한 초기 동물 화석 및 현생 유사 생물의 내부구조 형태 분석을 목적으로 함
- 상기 시료를 상기 기법으로 비파괴 방식으로 상기시료를 초고해상 3D 입체분석할 수 있다는 점에서 전 세계적으로 활발히 수행되는 연구에 발맞추어 최적의 기술을 개발코자 함

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 제1차년도: 극지연구소 제공 화석시료에 대한 Micro CT 분석 기법 및 최적 분석 모수 설정과 아울러 분석 사례 제공
- 제2차년도: 극지연구소 제공 화석 및 현생 유사 생물 시료에 대한 Micro CT 분석 기법 및 최적 분석 모수 설정과 아울러 분석 사례 제공
- 제3차년도: 극지연구소 제공 화석 및 현생 유사 생물 시료에 대한 Micro CT 분석 기법 및 최적 분석 모수 설정과 아울러 분석 사례 제공

## IV. 연구개발결과

- 총 3개년의 연구기간 동안 각 연도별 연구목표를 100% 달성함

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 본 과제를 통하여 획득된 “CT를 이용한 초기 동물의 내부구조 형태 분석 기술의 확대 적용
- Micro CT의 화석분야 분석 기술 개발 성공을 바탕으로 Micro CT 추가 생산 및 추가 분석 수요 창출

# S U M M A R Y

## I. Title

- Analyses of internal structures of early-geologic-time animals utilizing the rock-core micro-CT system

## II. Purpose and Necessity of R&D

- Structural/morphological analyses of internal/external structures of early-geologic-time and modern similar biota using micro-CT system
- Based on upper mentioned methodology, keeping pace with the world-wide research trend applying micro-CT for analyses of fossils modern analogues for 3D reconstruction of internal/external structure and morphology

## III. Contents and Extent of R&D

- The 1<sup>st</sup> year: establishment of technology and parameters of micro-CT analyses of fossils provided by KOPRI, and returning the analysis examples back to KOPRI
- The 2<sup>nd</sup> year: establishment of methodology and parameters of micro-CT analyses of fossils and modern analogues provided by KOPRI, and returning the analysis examples back to KOPRI
- The 3<sup>rd</sup> year: establishment of methodology and parameters of micro-CT analyses of fossils and modern analogues provided by KOPRI, and returning the analysis examples back to KOPRI

## IV. R&D Results

- 100% accomplishment of planned goals throughout the entire 3-years research period and every year step

## V. Application Plans of R&D Results

- Worldwide-wide application of the technology accomplished by this research
- Creation of new demands of additional micro-CT machines and accommodation of extended analysis requisite of fossils and modern analogues

## 목 차

제 1 장 서 론 .....	6
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	7
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	8
제 1 절 1차년도 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	16
제 2 절 2차년도 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	20
제 3 절 3차년도 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	20
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	22
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	23
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	24
참 고 문 헌 .....	25
부    록 .....	26

## 제 1 장 서론

본 연구는 2017년부터 2019년까지 총 3개년 동안 실시된 것이다. 본 연구에서는 극지연구소에서 한국지질자원연구원(이하 KIGAM)에 제공한 화석 시료 및 현생 유사 생물종에 대해 KIGAM이 CT 단층촬영과 그 내외부 구조를 3D로 복원하는 작업을 반복하였다. 이러한 과정을 통하여 KIGAM은 각 개별 시료에 대해서 최적의 촬영 모수를 확보하고 그를 적용한 고해상 CT 단층촬영 자료 및 3D 복원 영상을 극지연구소에 제공하는 형태로 연구가 수행되었다.

본 연구는 연도별, 단계별로 중점 연구/분석 대상을 구분 설정하여 실시하였는데, 우선 1차 년도에서는 극지연구소 제공 화석시료들에 대해 다양한 조건 하에서의 반복적 촬영 분석을 실시하였고 경우에 따라 시료에 대하여 KIGAM이 필요 시에는 물리화학적 전처리를 실시하면서까지 시료를 재촬영하는 과정을 반복하기도 하였다. 이러한 방식으로 제 1차년도에서는 화석 내외부 구조/형태의 3D 복원에 몰두하였고 화석분석에 최적인 CT 촬영 모수를 확인하는데 연구의 중점을 두었다.

한편 2차년도와 3차년도에는 극지연구소에서 제공한 바의, 주요 관심 화석과 유사한 현생 생물 종에 대한 CT 단층 촬영 및 3D 구조/형태 분석에 몰두하였다. 현생 생물종의 경우에는 투과력이 강한 X-ray의 특성상 CT 촬영에서 각 생물의 연결조직이 뚜렷이 구별되지 않는 경우가 하다하였고 이에 따라 극지연구소와 지질자원연구원 연구원과의 활발한 의견 교환과 토론을 통하여 각 종 중금속 물질로 분석 대상을 염색한 후 재촬영하는 경우도 빈번히 실시되었다. 현생 생물종에 대한 각종 중금속 원소 염색은 극지연구소에서 시행하였고, 해당 시료를 고해상 촬영을 위해 특화된 KIGAM industrial CT로 촬영하고 해당 생물의 내외부 형태/구조를 3D 복원하는 일을 KIGAM이 주로 담당하였다. 물론 복원된 특이 구조의 해석은 주관 연구기관인 극지연구소가 주도하였고 연구 대상 특정 생물종의 특이 구조가 식별 여부와 그 결과 값은 양 기관이 공유하였다. 이러한 그 동안의 연구결과를 본 보고서에 축약 서술하여 제출하는 바이다. 특히 2차년도 및 3차년도 동안에 집중적으로 다양하게 수행된 현생 생물종들의 CT 단층 결과는 그 대표이미지만 낱장 사진으로 부록에 열거하였다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

화석의 micro CT분석은 비파괴 방식으로 - 즉 화석을 파괴하지 않고 - 내부구조를 밝힐 수 있기 때문에 매우 유용한 것으로 인식이 점점 확대되고 있다 (예: Penny, D., 2016). 또한 이 방식을 활용하면 단층촬영 영상의 3차원적 복원 후 해당 화석의 이미지를 여러 각도에서 내부구조까지 보다 자세히 관찰할 수 있어서 고기 생물의 구조 및 형태에 대한 정밀 파악이 가능하다 (예: Racicot, R., 2017)(그림 1). 특히 최근에는 고기 생물에서 화석화되기 쉬운 고기 경질의 표피나 뼈대 뿐만 아니라 (예: Ryan and Sukhdeo, 2016), 당시 생물의 내장 등과 같은 연질부의 세부구조에 대한 고찰이 집중하고 있는데 (Sasaki et al., 2018; Kouraiss et al., 2019), 이는 고기생물의 분류, 생태 및 진화 과정 규명에 중요한 키가 되기 때문이다 (예: Penny, D., 2016; Racicot, R., 2017). 그러나 아직은 이러한 기기들을 활용하여 고기 생물의 매우 세밀한 3D 분석에 한계가 많고 그 사례가 많지 않아서 앞으로 더욱 더 micro CT와 기타 주변 기기들을 활용하면서 이러한 문제점들을 해결하고 고기 생물의 분류학적 토대를 공고히 하는 한편 생물의 생태 및 진화 과정을 보다 자세히 규명할 필요가 있다. 그러기 위해서는 물체의 내외부를 모두 3D 복원할 수 있는 CT의 장점을 살려서 고기 생물화석의 3D 영상을 최대한 고해상으로 확보하려는 노력이 필요한 한편 유사 현생 생물화석에 대한 비교 분석 연구도 활발히 진행되어 가고 있다.

현재 시판되는 대다수의 Micro CT는 인체에 해로운 X-ray를 차폐하기 위해서 차폐 박스를 이용하여 기기 전체를 둘러싸는 구조를 갖고 있는데, 이는 대형 화석이나 형체가 불완전한 시료를 거치하는데 장애로 작용하고 있다. 또한 이러한 구조는 CT 단층촬영 영상을 궁극적으로 전기신호로 바꾸어 주는 디텍터의 크기나 설치 방식에 상당한 제한 요소로 작용하게 되며 결국 이는 고해상의 화질을 확보하는데 장애로 이어지게 된다. 또한 CT 단층촬영은 촬영대상의 내외부 밀도 차이를 형상화하는 것이기에 만약 암석 내에 고기 생물 화석이 포함되어 있더라도 화석화 과정에서 주변 암석 및 화석 각 부위의 밀도가 매우 유사하게 화석화된 경우에는 원하는 영상을 제대로 획득하지 못할 수도 있다. 그리고 또한 현재까지의 전자기술의 한계로 고해상 촬영이 가능한 Conbeam CT의 3D 영상도 마이크론급 해상도에 머물러 있는 실정이다.

지질자원연구원에서는 CT실 외곽 전체를 차폐하여 시료 설치 공간의 제한 문제를 해결하고 X-ray source와 디텍터의 거리를 폭넓게 조정할 수 있는 특허화된 CT를 개발 보유하고 있다 (그림 2). 이에 따라 미터급부터 밀리미터급 크기의 다양한 시료를 취급할 수 있고 보통 고해상 분석이 요구되는 소형의 시료는 2 마이크론 해상도까지 3D로 정밀 분석할 수 있는 상태에 있다.



### 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

일반적인 CT는 의료 용도로서 가장 특징적인 부분은 간트리라고 불리는 원형의 고리로서 그 고리 골격에는 CT빔송출부와 디텍터가 서로 마주보는 형태로 배치되어 있다. 이때 디텍터에는 X-선 감지 소자들이 선형으로 배열되어 있으며, CT빔송출부도 디텍터의 선형 배열된 소자 쪽으로만 팬빔 형의 X-ray를 내보내게 된다 (그림 1).

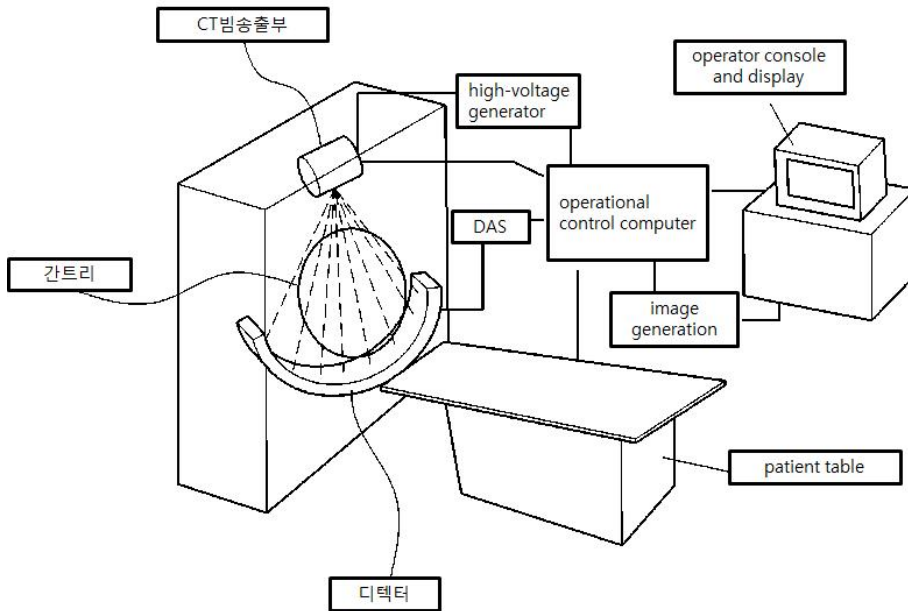


그림 1. 일반적인 의료용 CT의 하드웨어 구성.

의료용 CT를 이용하여 시료의 영상을 획득하기 위해서는 360° 전방위에서의 촬영이 필요하며 CT빔송출부와 디텍터가 좌우 또는 회전하는 방식을 이용하게 된다.

이러한 방식의 촬영 즉 디텍터에서 X-ray 감지 소자들을 선형으로 배열하고 X-ray를 팬빔 형으로 주사하며 환자를 종축으로 스캔하여 지나가는 것은 환자에 대한 방사선피폭량을 최소화시키는 효과가 있다. 또한 신속한 촬영을 위해 상당한 무게에 달하는 간트리를 불규칙한 떨림 작용 없이 최대한 빠른 속도로 회전시켜야 하기 때문에 하드웨어 구성을 위해 상당한 비용이 투자된다. 의료용 CT는 시료에 대한 고속 촬영이 가능한 반면 고정된 하드웨어(CT빔송출부, 디텍터, 테이블 등)로 인해 고해상 촬영이 요구되는 화석시료에 대해서는 해상도 확보에 어려움이 있다.

본 연구에 사용된 산업용 CT는 의료용에서 요구되는 기술적 요건 일부를 필요로 하지 않아 의료용과는 다른 구조를 지닌다. 즉, 인체도 아니고 움직임도 없는 무생물 피사체인 경우에 대해서는 방사선 피폭량을 최소화시키거나 최단 시간 안에 촬영을 끝내기 위해 의료용처럼 간트리를 구성하여 CT빔송출부와 디텍터를 초고속 회전시킬 필요가 없기 때문에 그림 2와 같이 CT빔송출부와 디텍터를 고정된 상태

에서 시료를 360° 회전시키며 영상을 확보한다. 산업용 CT는 최대 해상도 확보를 위해 CT빔송출부나 디텍터 사이에 위치하는 회전축이 형성하는 직선축을 따라 어느 한쪽으로 움직일 수 있도록 가변형으로 제작되며 화석시료 촬영에 사용된 KIGAM CT 또한 회전축을 CT빔송출부에 가까이 밀착하여 시료를 최대한 확대하여 영상을 확보하는 방식을 적용하였으며, 세부 사양은 아래와 같다.

○ Manipulator 시스템

- X-ray 발생기, flat panel 이미지 디텍터, 회전 work table 을 컴퓨터제어로 움직일 수 있는 8축이상의 이동 축을 가진 고정밀 Manipulator 시스템  
 - 주 이동 축들은 연마된 석정반 프레임을 기반으로 위치정밀도를 위해서 optical linear measuring 구조

- 직선이동축의 위치정밀도: 2 $\mu$ m  
 - 회전 work table 의 회전정밀도: 0.0004°  
 - 회전 work table 위에 장착할 수 있는 최대 사이즈 및 중량은 보조 지그를 포함하여  $\phi$ 300mm x 1800mm, 120kg이상을 장착할 수 있다.

- X-ray 발생기와 이미지 디텍터 사이의 거리는 400mm ~ 1100mm 이상을 가변할 수 있다.

- X-ray 발생기와 회전 work table의 중심 사이의 거리는 10mm ~ 840mm이상을 가변 할 수 있다.

- 이동 축은 좌우이동, 상하이동, 전후이동, 그리고 회전축을 기본으로 구성 됨

- 1) X-ray 발생장치와 이미지 디텍터의 상하이동 거리 1,100mm이상
- 2) 이미지 디텍터의 좌우 이동거리 600mm이상
- 3) 이미지 디텍터의 전후 이동거리 200mm이상
- 4) 회전 work table의 좌우 이동거리 840mm이상

- 석정반 베이스 및 지지 프레임

- 1) 사이즈 3000mm x 1500mm x 300mm(LxWxH)이상
- 2) 석정반은 한국산 오석을 사용하여야 하며 높은 shock tolerance와 anti-magnetic 특성을 가지고 연마 후 1~2 $\mu$ m 의 편평도 유지
- 3) 석정반 지지 프레임은 열처리된 스틸로 점 접점 지지구조 및 진동방지 구조

- 각 축은 다음과 같은 사양을 충족하여야 한다.

1) X-ray 발생장치의 상하이동

Directional target 과 Transmission target을 장착한 dual X-ray 발생장치는 각각 독립적으로 이동되어야 하며 이동 시 서로 충돌을 방지하기 위한 구조 및 장치로 구성

(1) Directional target을 장착한 X-ray 발생장치

모터 및 드라이브: servo motor & servo drive

Scale : linear en-coder(resolution : 4.88nm)

가반하중: 최대 90kg이상

이동거리: 1,100mm이상

위치정밀도:  $\pm 2\mu\text{m}$

반복정밀도:  $\pm 1\mu\text{m}$

진직도:  $\pm 2\mu\text{m}$

In-position stability:  $\pm 0.5\mu\text{m}$

Maximum velocity: 200mm/s

(2) Directional target을 장착한 X-ray 발생장치

모터 및 드라이브: servo motor & servo drive

Scale : linear en-coder(resolution : 4.88nm)

가반하중: 최대 90kg이상

이동거리: 300mm이상

위치정밀도:  $\pm 2\mu\text{m}$

반복정밀도:  $\pm 1\mu\text{m}$

진직도:  $\pm 2\mu\text{m}$

In-position stability:  $\pm 0.5\mu\text{m}$

Maximum velocity: 200mm/s

(3) Transmission target을 장착한 X-ray 발생장치

모터 및 드라이브: servo motor & servo drive

Scale : linear en-coder(resolution : 4.88nm)

가반하중: 최대 90kg이상

이동거리: 1,100mm이상

위치정밀도:  $\pm 2\mu\text{m}$

반복정밀도:  $\pm 1\mu\text{m}$

진직도:  $\pm 2\mu\text{m}$

In-position stability:  $\pm 0.5\mu\text{m}$

Maximum velocity: 200mm/s

2) 이미지 디텍터의 상하이동

모터 와 드라이브: servo motor & servo drive

Scale : linear en-coder(resolution : 4.88nm)

가반하중: 최대 60kg이상

이동거리: 1,100mm

위치정밀도:  $\pm 2\mu\text{m}$   
반복정밀도:  $\pm 1\mu\text{m}$   
진직도:  $\pm 2\mu\text{m}$   
In-position stability:  $\pm 0.5\mu\text{m}$   
Maximum velocity: 200mm/s

3) 이미지 디텍터의 좌우이동  
모터 와 드라이브: linear servo & servo drive  
Scale : linear en-coder(resolution : 4.88nm)  
가반하중: 최대 300kg  
이동거리: 400mm  
위치정밀도:  $\pm 2\mu\text{m}$   
반복정밀도:  $\pm 1\mu\text{m}$   
진직도:  $\pm 2\mu\text{m}$   
In-position stability:  $\pm 0.5\mu\text{m}$   
Maximum velocity: 200mm/s

4) 이미지 디텍터의 전후이동  
모터 와 드라이브: : servo & servo drive  
Scale: linear en-coder(resolution : 4.88nm)  
가반하중: 최대 60kg  
이동거리: 200mm  
위치정밀도:  $\pm 2\mu\text{m}$   
반복정밀도:  $\pm 1\mu\text{m}$   
진직도:  $\pm 2\mu\text{m}$   
In-position Stability:  $\pm 0.5\mu\text{m}$   
Maximum Velocity: 200mm/s

5) Work table의 좌우이동  
모터와 드라이브: linear servo & servo drive  
Scale : linear en-coder(resolution : 4.88nm)  
가반하중: 최대 120kg  
이동거리: 900mm  
위치정밀도:  $\pm 2\mu\text{m}$   
반복정밀도:  $\pm 1\mu\text{m}$   
진직도:  $\pm 2\mu\text{m}$   
In-position stability:  $\pm 0.5\mu\text{m}$

Maximum velocity: 200mm/s

6) Work table의 회전(R $\theta$ )

모터 와 드라이브: servo motor & servo drive,

동력전달: worm gear

가반하중: 최대 120kg

Turn table 사이즈 및 회전:  $\phi$ 300mm, nx360°

반복정밀도:  $\pm 0.0004^\circ$

회전 run-out:  $< 3\mu\text{m}$

Angular scale speed max.: 5rps

○ X-ray 발생 시스템

- 본 시스템의 X-ray 발생장치는 두 가지의 focal spot size( $2.0\mu\text{m}$  &  $< 6.0\mu\text{m}$ )를 one switch 모드로 전환해서 사용할 수 있는 transmission과 directional target으로 된 two micro focus target 방식으로 구성

1) Directional target X-ray 발생장치

Tube Type: Open high power tube

Target design: Rotating tungsten target, water cooling 방식

High voltage range: 10 to 225kV

Tube current range: 0.02 to 3.0mA

Max. tube power: 320W

Max. target power: 280W

Beam cone angle:  $36^\circ$

Inherent filtration: 0.5mm Beryllium

Focal spot size: Multi focus mode 적용

$< 6\mu\text{m}$  for  $< 5\text{W}$ (acc. to EN 12543-5),

$< 15\mu\text{m}$  at 25W(acc. to EN 12543-5),

$< 200\mu\text{m}$  at 300W(acc. to EN 12543-5)

Long term intensity stability:  $< \pm 1\%$

Long term focus position stability:  $< 1\mu\text{m}$

Long term focus size stability:

$< 20\%$  of focus size for focal spots  $< 6\mu\text{m}$ ,

$< 15\%$  of focus size for focal spots:  $6\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ ,

$< 10\%$  of focus size for focal spots:  $> 50\mu\text{m}$

Duty cycle: 100% at max. Power

Long term intensity control function included

Isowatt function included

High voltage generator

High voltage cable

Vacuum system

2) Transmission target X-ray 발생장치(high power target 포함),

Tube Type: Open high power tube

Target design: Diamond high power transmission target

High voltage range: 10 to 160kV

Tube current range: 0.001 to 1.0mA

Max. tube power: 64W

Max. target power: 15W

Beam cone angle: 170°

Inherent filtration: 0.25mm Beryllium

Focal spot size: Multi focus mode 적용

Nanofocus Mode: < 1 $\mu$ m

Microfocus Mode: < 2.5 $\mu$ m

High power Mode: < 4.0 $\mu$ m

Long term intensity stability: <  $\pm$  1%

Long term focus position stability: < 0.5 $\mu$ m

Long term focus size stability:

< 20% of focus size for focal spots < 1 $\mu$ m,

< 10% of focus size for focal spots: 1 $\mu$ m~10 $\mu$ m,

< 5% of focus size for focal spots: > 10 $\mu$ m

Duty cycle: 100% at max. Power

Long term intensity control function included

Isowatt function included

High voltage generator

High voltage cable

Vacuum system

○ 이미지 디텍터 시스템

- Digital Flat Panel Detector

Receptor Type: Amorphous silicon

Conversion Screen: Integral columnar CsI:Tl

Pixel Area-Total: 397mm (h) x 298mm (v) (15.6x11.7in)

Pixel Matrix-Total : 2,048(h) x 1,536(v)

Pixel Pitch: 194 $\mu$ m

Resolution; 2.58lp/mm@7.5FPS (1x1), 1.29lp/mm @ 30FPS(2x2)

Fill Factor: 70%  
Dynamic Range (saturation-to-noise): 18,000: 1  
Scan Method: Progressive  
A/D Conversion: 14-bits  
Dual/Dynamic Gain Modes, Effective resolution: >16-bits  
Inactive Pixels: No inactive visible pixels after interpolation  
Maximum Entrance Dose/Frame: Gain-1: 4,000uR  
Cooling: Passive convection  
Radiation Tolerance: 1Mrad(active area), 10kRad(electronics)  
Lead Barrier Cap  
Power supply and Cables 15M each  
○ Workstation 컴퓨터 시스템  
CPU: Dual Intel(R) Xeon(R) X5550 2.66GHz/L3 Cache 8MB  
VGA: PCIe x16 nVidia Quadro FX1800(768MB), DVI  
Memory: 12GB(6x2GB) DDR3 RDIMM Memory (1333MHz)  
Hard disk: 250G + 1000G  
OS: Windows XP(64bit) pro  
Mouse: 1 unit  
Digital input card: 1 set  
16X max SATA DVD+/- RW Dual Layer drive  
10/100/1000 Gigabit Ethernet Network interface  
21 inches and Ultra Sharp LCD color monitor: 1 unit  
Key board: 1 unit

○ Operating 컴퓨터 시스템  
CPU: Intel(R) Core(TM)2 Quad Q9550 2.83GHz/L2 Cache 12MB  
VGA: PCIe x16 nVidia Quadro FX1800(768MB), DVI  
Memory: 4GB(2x2GB)  
Hard disk: 500G + 500G  
OS: Windows XP pro  
Mouse: 1 unit  
Digital input card: 1 set  
16X max SATA DVD+/- RW Dual Layer drive  
10/100/1000 Gigabit Ethernet Network interface  
21 inches and Ultra Sharp LCD color monitor 1 unit  
Key board 1 unit  
Color Laser Printer supporting A3

- CT processing 시스템
  - CT Software for CT image reconstruction
  - CT data collection time: Approx. 20sec. (when taking in 600 views)
  - CT reconstruction time: 512 x 512 x 600 views under 0.3 second, 1024 x 1024 x 600views under 1 second.
  - 2D Reconstruction matrix: 512 x 512, 1024 x 1024, 2048 x 2048
  - 3D CT : 512 x 512 x max. 5000, 1024 x 1024 x max. 10000, 2048 x 2048 x max. 20000
  - Gray scale : 16 bit
  - Export; BMP, JPG, 16bit raw data
  - DICOM Format 표준방식 적용
  
- 3D 입체영상 display를 위한 소프트웨어
  - VR functions
  - MIP functions
  - MPR functions for 4 frames of 1 display
  
- 시스템 제어 및 2D 투과영상 촬영을 위한 소프트웨어
  - X-ray control for X-ray system  
kV, mA adjustment  
X-ray parameters display ( kV / mA )
  - Motion control for manipulator system  
6 axes manipulator control
  - Image processing and display
    - Beam-Hardening removal filter
    - Dynamic histogram range display: 4096 gray level
    - Two steps real-time image enhancement
    - Real time average for noise reduction (max.256 integration)
    - 20 predefined digital filter functions
    - Histogram optimization (Auto/Manual)
    - Auto adaptive histogram expansion
    - Storage of digital images on hard disk, and CD
    - Inverse Image function for operators accustomed to Film technique
    - Line Profile (gray value profile along a line)
    - High dynamic range integration(HDR) function
    - Auto white balance adjustment (Background correction)



- Auto adaptive histogram expansion
- Local zoom window function
- Video file generation
- Measurement
  - Line, Point to Point (horizontal, vertical),
  - Vertical/Horizontal line, Parallel line, Perpendicular, Poly line,
  - Center to Center, Best fit,
  - Circle, 3 point Circle,
  - Ellipse, Rectangle, Polygon,
  - 2 line angle, 3 point angle, Point target.
- Filters
  - Image Filter: Hipass 3x3 / 5x5, Gaussian3x3 / 5x5, Median, Sharpen
  - Edge Filtering: Sobel, Prewitt, Laplacian 3x3/5x5
  - Spatial Filtering: Edge Enhancement, Smoothing and other filters
- Other functions
  - Annotation: Point, Line, Rectangle, Circle, Ellipse, Poly line, Polygon,
  - Color Conversion (RGB to GRAY)
  - Geometric Transform: Resize, Rotate, Flip Vertical/Horizontal, Both.
  - Pseudo 3D Display
  - Pseudo Color
  - Image Saving or automatic saving with automatic file name generation
  - Image Printing
- Reporting
  - Supply customer designed report format

## 제 1 절 1차년도 연구개발 수행 내용 및 결과

- 본 연구에 활용된 CT는 KIGAM CT 또는 성능상 그에 필적하는 외부기관의 CT로서 일반적인 비파괴 입체 분석을 실시하는 경우 최소  $\varnothing 81\text{mm} \times 1100\text{mm(h)}$  이상의 영역을  $50\mu\text{m}$  이하의 해상도로 단층영상촬영 및 3차원 복원을 수행하여 시료 내부의 다양한 물리적 특성과 특이 성분의 정량분포를 식별할 수 있음
- KIGAM CT를 구성하는 주요 유닛은 X-ray 발생기, 회전시료거치기, 평면디텍터, 컴퓨터 제어 유닛 등이고 (그림 2), 본 CT에는 서로 다른 두 개의 X-ray 발생기가 구성되어 있어 시료 특성에 맞추어 선택적으로 사용할 수 있으며, 그 중 하나는 transmissional 방식으로 focal spot size가 2.0 마이크로이며 최대 출력 160 kV로서 보다 고해상의 자료 획득에 활용되고, 또 다른 하나는 directional

방식으로 focal spot size가 < 6.0 마이크로이며 최대출력 225 kV로서 투과력이 좀 더 양호함

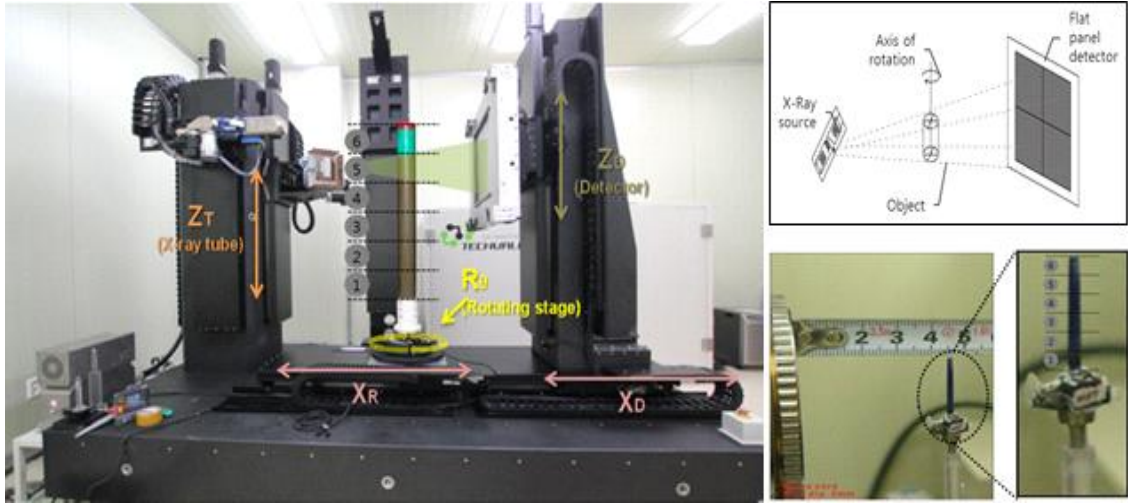


그림 2. KIGAM CT.

- 회전시료거치기는 최대 120 kg까지의 하중을 견디면서도 위치정밀도  $\pm 2$  마이크로, 회전정밀도가  $\pm 0.0004^\circ$ 에 달할 정도로 뛰어난 성능을 갖고 있고, 평판 디텍터는 40 cm \* 40 cm 크기로서 세계 최대 규모 디텍터들과 같은 급수임
- 본 CT의 주요 특징 중 하나는 X-ray 발생기, 회전시료거치기, 평면디텍터 간의 거리를 적절히 조절할 수 있게 설계되었고 최대 해상도를 필요로 하는 경우에는 회전시료거치기 즉 시료를 X-ray 발생기 쪽으로 최대한 붙여 평판 디텍터에 가능한 한 크게 상이 맺히게 하여 촬영을 수행하게 됨 (그림 3)

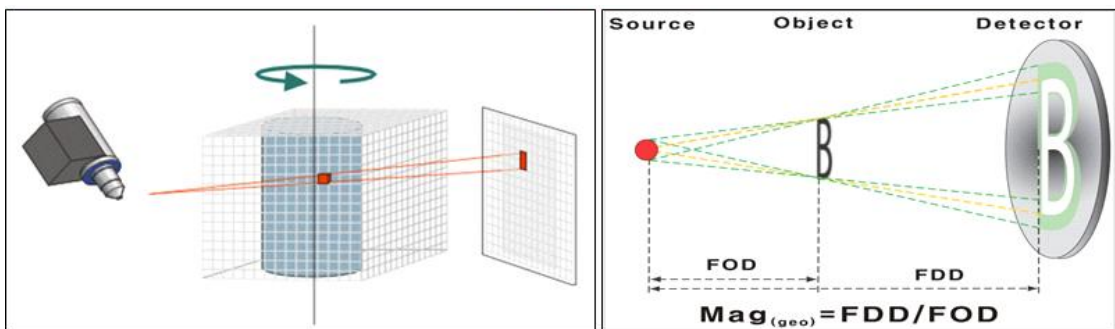


그림 3. 고분해능 영상 확보를 위한 기하학적 확대방법.

- 시료의 크기가 디텍터의 크기보다 더 큰 경우에도 똑 같은 조건 하에 시료를 구간별로 나누어 촬영하고 그 촬영결과들을 이어붙임으로서 거대 시료 촬영을 완

성할 수 있음 (그림 4)

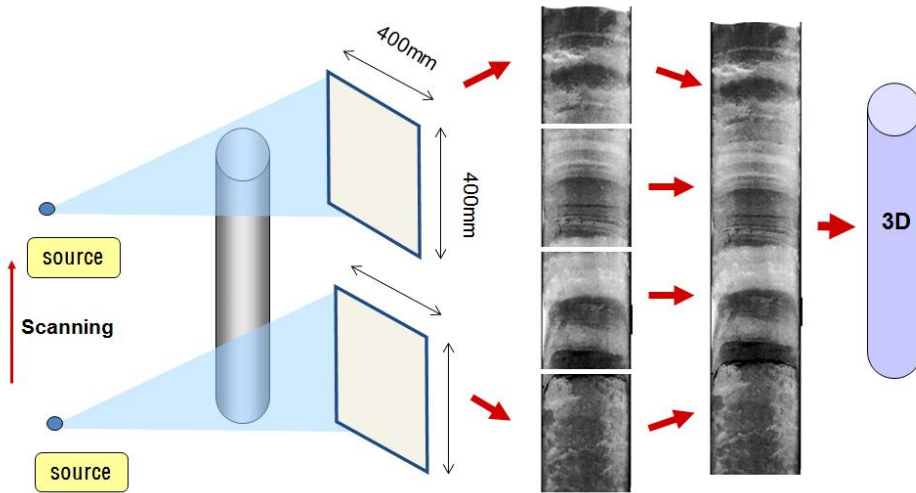


그림 4. KIGAM CT의 stitching system.

- 지질시료는 다양한 광물들로 구성되어 있고, 각각의 광물들은 고유의 밀도를 갖고 있으며, X-ray가 투과된 광물들은 밀도에 따라 흑백의 컬러로 표현됨
- 컬러의 밝기 정도에 따라 수치화 할 수 있고 이렇게 수치화된 값을 그레이레벨 (gray level)이라고 부르며, 본 CT 촬영에서 획득된 데이터는 16bit 형식으로 0에서 65,536 범위 내의 그레이레벨로 표현 되는데 (그림 5), 통상적으로 아무런 물질이 없는 상태 즉 공기에 대한 그레이레벨을 0으로 간주함



그림 5. 16bit 슬라이스 이미지에서 표현되는 그레이레벨 범위.

- 다양한 광물로 구성된 지질시료에 대한 CT 촬영 결과는 넓은 그레이레벨 영역 대로 가시화 되고, 이때 최적의 영상을 구현하고 광물들의 밀도차에 의해 발생할 수 있는 노이즈를 최소화하기 위해서는 시료의 특성에 맞는 적정 전압과 전류를 찾는 것이 매우 중요함
- 본 연구에서는 시료의 고해상 이미지를 확보를 위해 focal spot size가 6.0 마이크론인 225 kV X-ray 발생장치를 사용하였고, 반복 촬영을 통해 최적의 촬영 조건(전압 150 kV, 전류 80 uA)을 적용하였음

- 각 시료 촬영 시에 평균 중첩횟수(averaging) 16회, 스캔 간격(rotation angle) 0.25°, 100 ms의 readout time 조건이 적용되었으며, 시료 당 총 1440장의 단면 이미지를 얻어 시료 3D 이미지를 형상화하였음
- CT에서 획득된 디지털 이미지 상에서는 각 pixel이 고유의 CT number 값(일명 그레이레벨)을 갖게 되고 그 값은 스캔된 물질의 물리화학적 특성을 반영하고 있어, 시료 내 특이 성분을 대변하는 CT number를 정확히 정의해 줄 수 있다면 그 지정된 수치 값에 의해 해당 성분을 여타 성분과 뚜렷하게 구분할 수 있음 (그림 6)

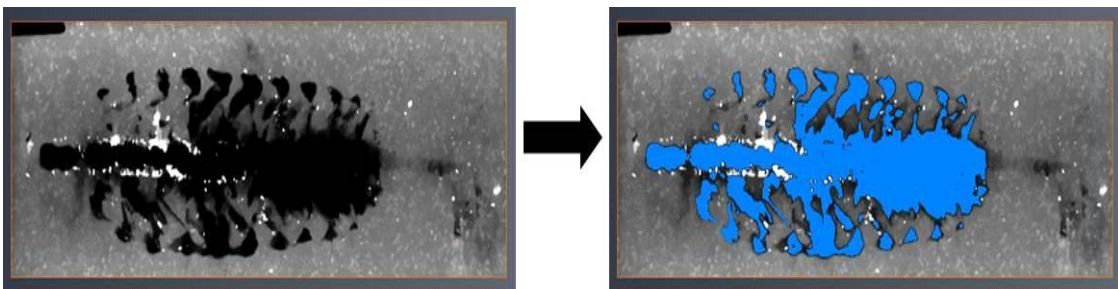


그림 6. 이미지 분할을 위한 컬러 맵핑.

- 시료 내 특이성분에 대하여 3차원적인 구조를 파악하기 위해서는 단면 이미지에 대한 2D 모델링이 선행되어야 하며, 단면 이미지에 대한 2D 모델링은 개별의 CT 이미지에서 특이성분에 해당하는 그레이레벨을 설정 부여하고 이진화 과정을 거쳐 3D 입체 모델이 완성 됨 (예: 그림 7)

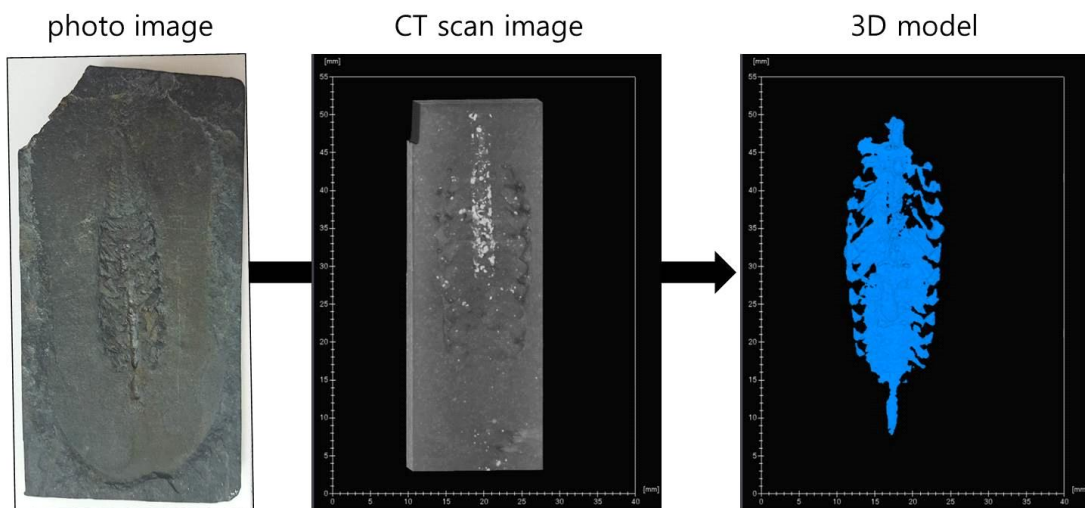


그림 7. 동물 화석의 micro CT 분석 및 내부구조 복원 사례.

## 제 2 절 2차년도 연구개발 수행 내용 및 결과

- 본 연구의 목표는 화석생물(현생 유사 생물) 내부구조 3차원복원 방법 확립 및 물리/화학적 처리 기법 적용한 고해상 3D 형상(근육 신경 등)복원임
- 3차원 복원을 위해 bulk 시료에 대한 외부 기관의 micro CT 분석과 한국지질자원연구원에서 보유중인 KIGAM CT를 활용하여 단층영상촬영 및 3차원 복원을 수행하여 시료 내부의 다양한 물리적 특성을 분석하였음
- 분석에 활용된 튜브는 directional 방식으로 최대출력 225 kV, focal spot size가 < 6.0 마이크론이며 각 시료의 촬영은 평균 중첩횟수(averaging) 16회, 스캔 간격(rotation angle) 0.25°, 노출시간(exposure time) 1초, 100 ms의 readout time 조건이 적용되었으며, 시료 당 총 1440장의 단면 이미지를 얻어 시료 3D 이미지를 형상화하였음
- 정밀 복원을 위해 다양한 물리/화학적 처리 기법(1%PTA, 0.1%iodine, 11%I2KI staining) 적용하여 반복 촬영이 진행되었음(예: 그림 8)

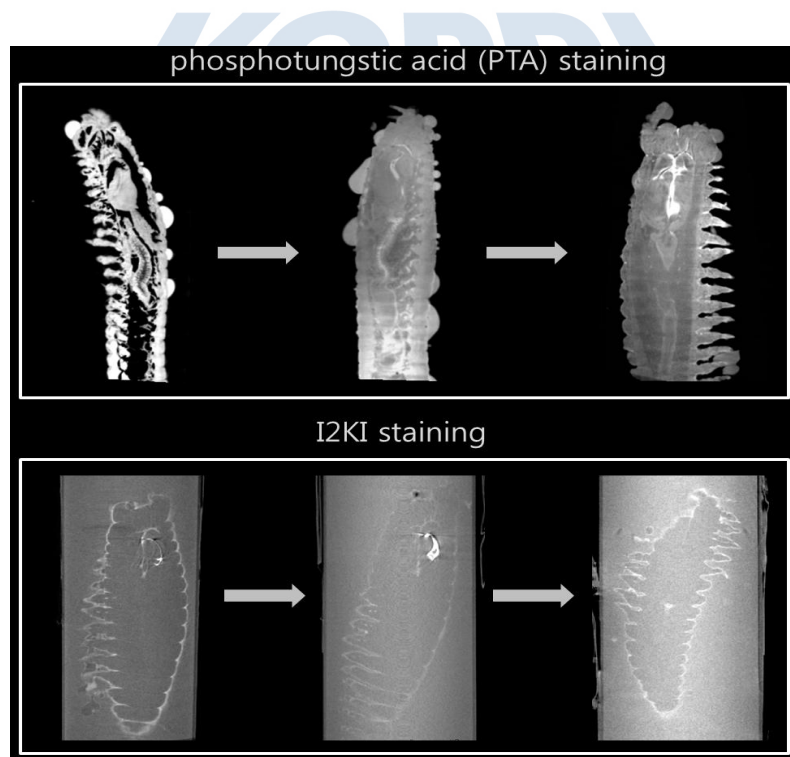


그림 8. 다양한 염색 방법을 적용한 내부구조 복원 사례

## 제 3 절 3차년도 연구개발 수행 내용 및 결과

- 본 연구의 목표는 화석생물(현생 유사 생물) 내부구조 3차원복원 방법 확립 및 물리/화학적 처리 기법 적용한 고해상 3D 형상(근육 신경 등)복원임

- 3차원 복원을 위해 bulk 시료에 대한 외부 기관의 micro CT 분석 결과와 한국 지질자원연구원 고유의 KIGAM CT 및 기술을 활용한 비교분석 및 3차원 복원을 수행하 결과를 종합하여 해당 시료 내부의 다양한 물리적 특성 분석 결과를 제공하는 것임
- 고해상 분석을 위해서 사용된 CT 시스템의 X-ray 튜브는 최대출력 160 kV, focal spot size < 2.0 마이크론이고, 각 시료의 촬영은 평균 중첩횟수 (averaging) 16회, 스캔 간격(rotation angle) 0.25°, 노출시간(exposure time) 5초, 200 ms의 readout time 조건이 적용되었으며, 시료 당 총 1440장의 단면 이미지를 얻어 이를 3D 이미지로 복원 형상화하였음
- 시료 각 부분의 정밀 분리 복원을 위해 다양한 물리/화학적 처리 기법 (PTA(0.3%, 1.5%), iodine(0.5%, 1.1%), I2KI(22.5%) staining)을 선행하고 반복 촬영으로 각 부분 최적의 이미지를 도출하여 그 결과물 뿐만 아니라, 각 대상 시료에서 최적 staining 방법을 추천 제공하였음 (예: 그림 9)

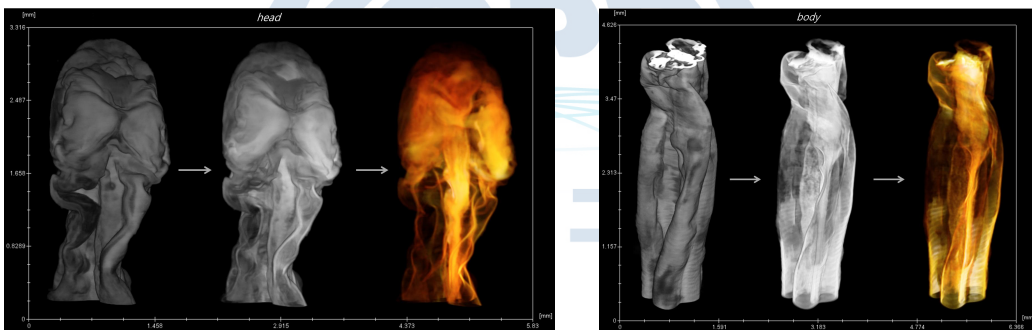


그림 8. 북극해에서 채집한 유사 현생 생물에 대한 내부구조 복원  
(좌: 머리, 우: 몸통)

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

성과목표	세부목표		평가지표 (핵심성과 스펙)	검증방법	달성도 (%)
다양한 초기 동물 화석들의 Micro CT 분석 및 내부구조 복원 (1차년도)	1-1	화석생물별 내부구조 3차원복원 방법 확립	최적의 분석 조건 확보	- 최적의 분석 조건 확보(예시적 3차원 최적 복원 결과 이미지)	100
	1-2	고해상의 화석시료 3D 형상복원을 위해 물리/화학적 처리 기법 적용	- Gd 처리 기법을 적용하여 고해상의 화석시료 내부구조 형상화	- 각 동물 그룹별 3차원 복원 이미지	100
성과목표	세부목표		평가지표 (핵심성과 스펙)	검증방법	달성도 (%)
Micro CT분석 데이터를 활용한 내부구조 형태 연구 수행 (2차년도)	1-1	- 유사 현생 생물에 대한 물리/화학적 처리기법을 적용한 내부구조(근육 및 신경 등) 복원	- 물리/화학적 처리기법을 적용한 내부구조(근육 및 신경 등) 형상화	- 예시적 3차원 최적 복원 결과 이미지	100

성과목표	세부목표		평가지표 (핵심성과 스펙)	검증방법	달성도 (%)
micro CT분석 데이터를 활용한 내부구조 형태 연구 (3차년도)	1-1	- 국내에서 채집한 유사 현생 생물에 대해 물리/화학적 처리기법을 적용한 내부구조 복원	- 물리/화학적 처리 기법을 적용한 3D 구조 복원	물리/화학적 처리기법을 적용한 3차원 복원 이미지 제시	100
	1-2	- 북극해에서 채집한 유사 현생 생물에 대한 내부구조 복원	반복 촬영을 통한 내부구조 3D 형상화	3차원 최적 복원 결과 이미지 제시	100

**대외기여도:** 국내 최초 micro-CT를 활용한 화석 및 현생 유사 초기 동물들의 내부구조 복원 절차/체계 확립

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 가. 학술적 파급효과

- 지질자원연구원에서 개발한 암석코어용 micro-CT를 이용하여 북그린란드에서 산출되는 초기 무척추동물 및 현생 유사 생물 내부구조의 3차원 복원에 적용하여 확립된 세계적으로 독보적인 형태 분석 기술의 확대 적용

### 나. 경제적 파급효과

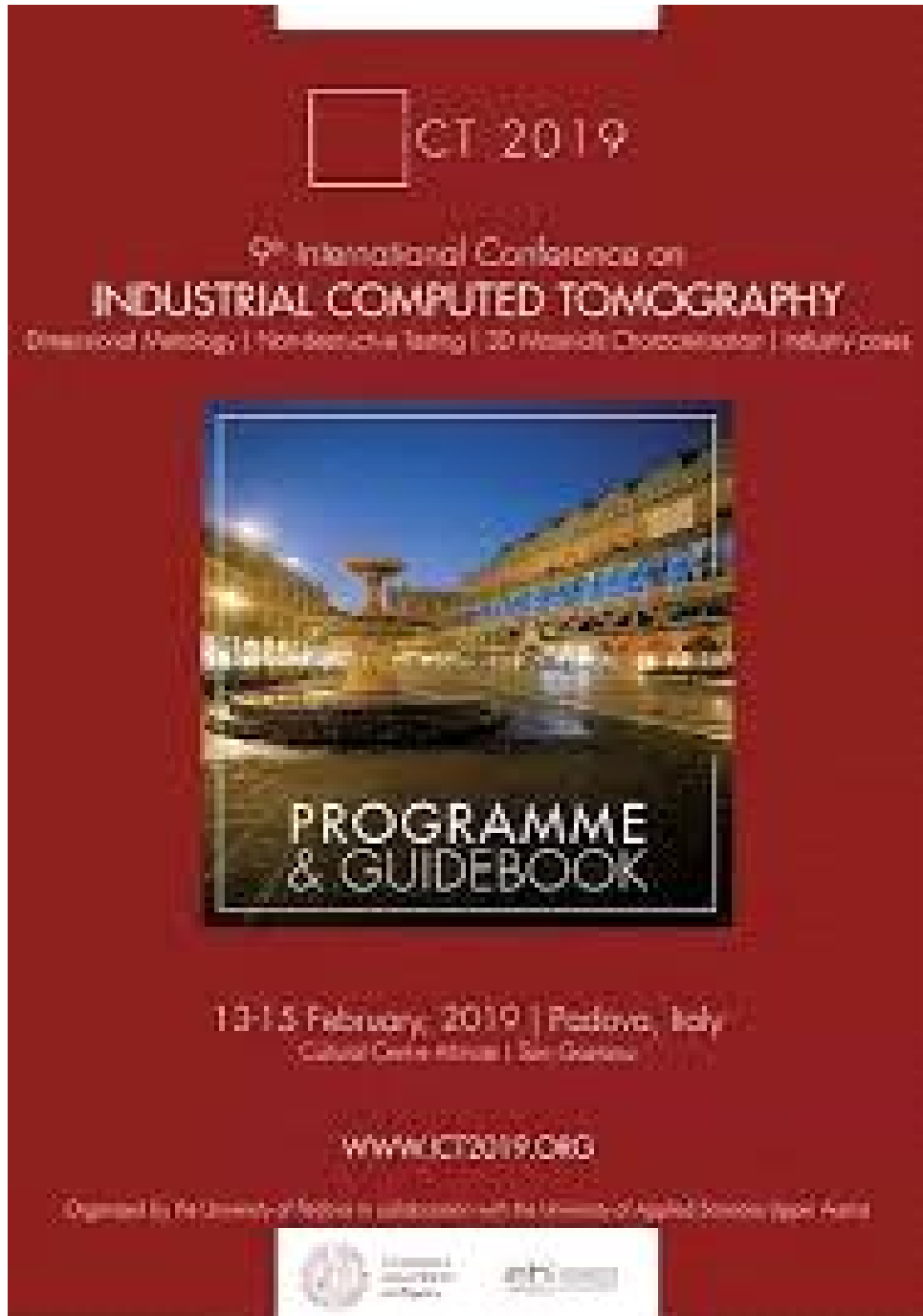
- 암석코어용 micro-CT에 대한 화석 연구 분야로의 새로운 적용 기술 확보로 인하여 기기의 활용 범위 및 machine 추가 생산 수요 증대





## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 제9회 International Conference on Industrial Computed Tomography에 참가하여 학술논문을 발표하고 획득한 초록집






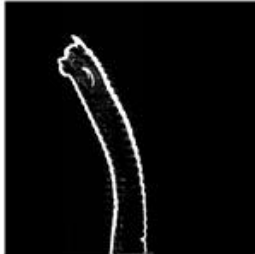
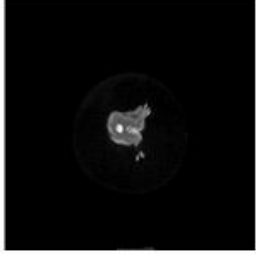
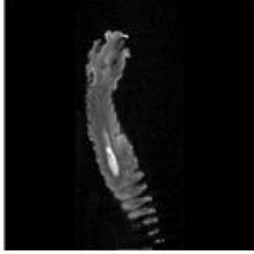
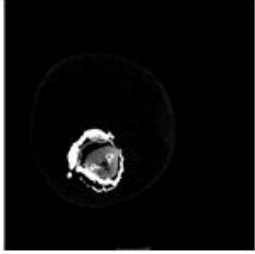
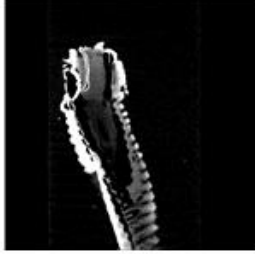
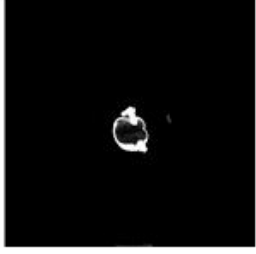

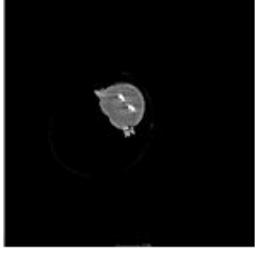




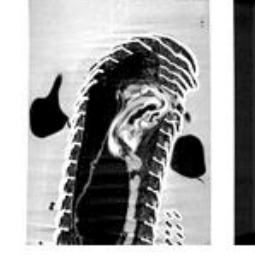
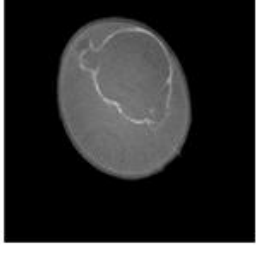
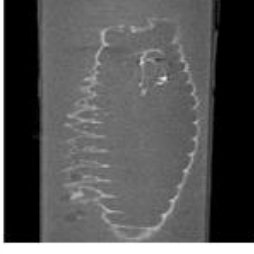
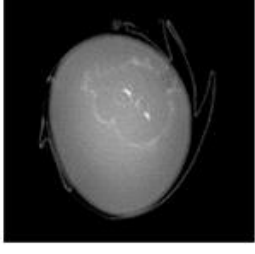

## 참고문헌

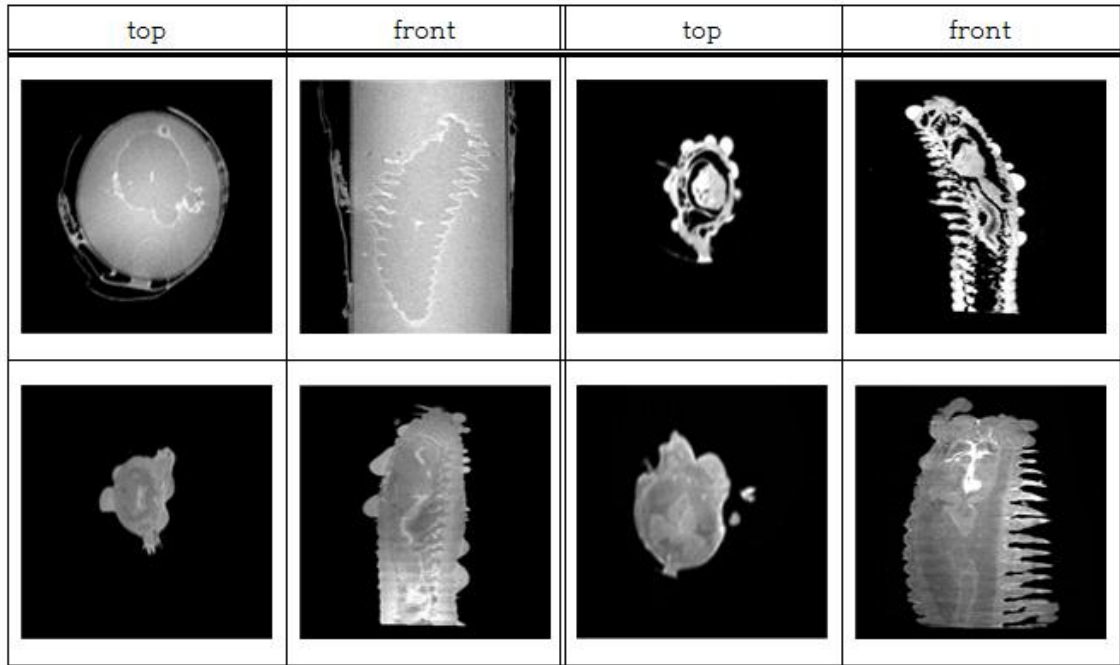
- Penny, D., 2016., Sub/fossil resin research in the 21<sup>st</sup> Century: trends and perspectives. *PalZ* 90: 425-447.
- Racicot, R., 2017. Fossil secrets revealed: X-ray CT scanning and application in paleontology. *The Paleontological Society Papers* 22: 21-38.
- Ryan, T.M. and Sukhdeo, S., 2016. Chapter 4. KSD-VP-1/1: Analysis of the postcranial skeleton using high-resolution computed tomography. Yohannes Haile-Selassie and Denix F. Su (eds.) *The postcranial anatomy of Australopithecus afarensis: new insights from KSD-VP-1/1, Vertebrate paleohiglogy and paleoanthropology.* p. 39-61.
- Sasaki, T., et al., 2018. Chapter 9. 3D visualization of calcified and non-calcified molluscan tissues using computed tomography. K. Endo et al., (eds.) *Biom mineralization.* p.83-92.
- Kouraiss, K., et al., 2019. Digitization of fossils from the Fezouata Biota (Lower Ordovician, Morocco): evaluating computed tomography and photogrammetry in collection enhancement. *Geoheritage* 11: 1889-1901.

극지연구소


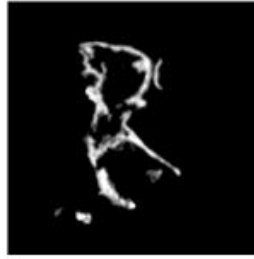

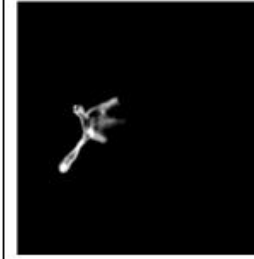
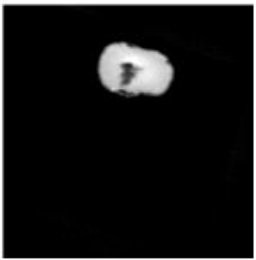
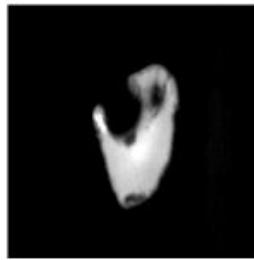



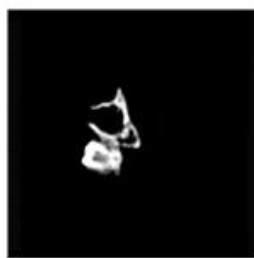
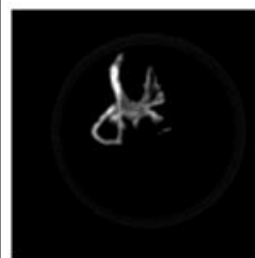
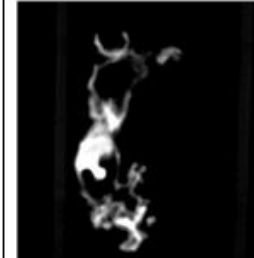


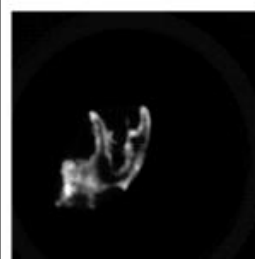





# 부록

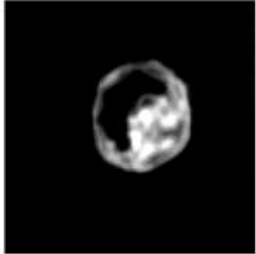
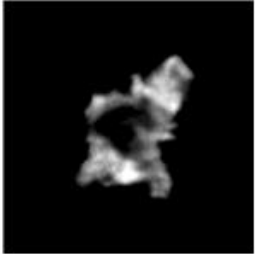
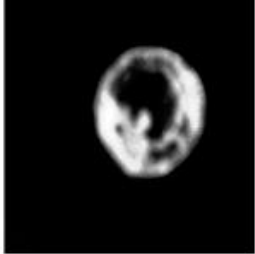
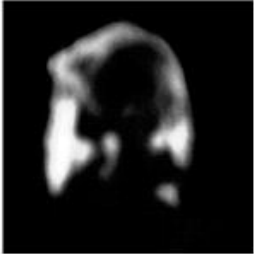
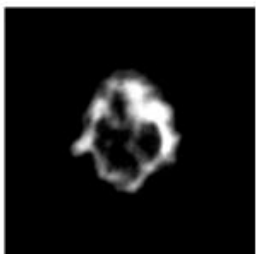
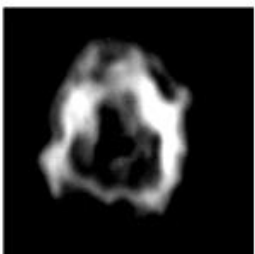
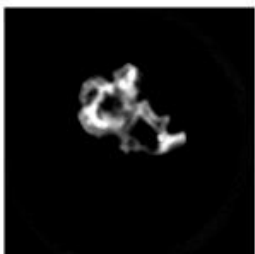
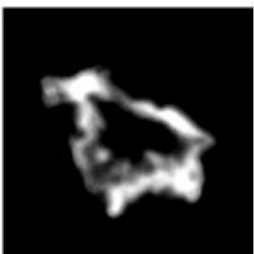
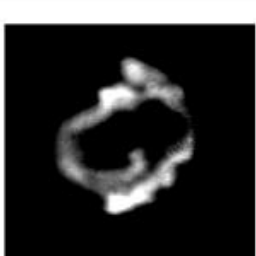

○ 촬영사례 (2차년도)

top	front	top	front
			
			
			
			
			



○ 촬영사례 (최종연도; 3차년도)

top	front	top	front
			
			
			
			
			

top	front	top	front
			
			
			



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.