미세 X선 단층촬영 기법의 개발과 적용

김승곤* · 임재홍** · 김보흠* · 이의재* · 이상준†

Development of X-ray Micro Computed Tomography and Applications

Seung-Gon Kim*, Jae-Hong Lim**, Bo-Heum Kim*, Eui-Jae Lee* and Sang-Joon Lee†

Abstract. The objective of this study is to elucidate the feasibility of synchrotron X-ray micro CT as a non-destructive imaging method to visualize the three-dimensional morphological structures of biological and non-biological samples. The experiments were conducted in 7B2 X-ray micro CT beamline in Pohang Accelerate Laboratory (PAL). A rotational 3-axis stage was specially designed for 0° - 180° scanning of test samples. Preliminary tests were performed for opaque samples including a mosquito head, a plant seed and gas diffusion layer (GDL) of polymer electrolyte fuel cell to verify the feasibility of the X-ray micro CT. It visualized clearly the internal structure of all the test samples, supporting its usefulness.

Key Words: Computed Tomography(전산화 단층촬영), Synchrotron(가속기), X-ray(X선)

1. 서 론

전산화 단층촬영 (Computed Tomography, CT)기법은 불투명한 물체에 엑스선을 여러 각도에서 피사체에 투영하고 이를 컴퓨터를 이용하여 수학적 방법으로 재구성하여 피사체의 내부 3차원 구조를 가시화하는 기법이다. 이 기법은 피사체의 내부를 비파괴적인 방법으로 확인할 수 있어 종래의 CT 장치로는 얻을 수 없었던 피사체 내부 구조나 조직의 상태까지 단층영상으로 정확히 취득할 수 있는 획기적인 가시화 기법으로, 그동안 의학적 목적으로 임상용 진단장비로 주로 사용되어 왔다.

1972년 Hounsfield는 인체 머리의 횡단면에 얇은 선형의 X선속을 여러 방향으로 조사하여 획득된 이미지를 컴퓨터를 이용하여 수학적 산술법으로 분석하고 다시 단층영상을 재구성하였다. 최근 들어 CT 기법은 인체 내부 구조나 조직 상태를 단층영상으로 얻어 임상용 진단과 치료에 도움이 되는 영상진단 장치로 발전되어

왔다⁽¹⁾.

CT 기법의 효용성이 부각되면서, 인체에의 적용 이외에도 화석에 대한 연구⁽²⁾, 파괴가 발생한 금속시료 내부에 대한 연구⁽³⁾ 등 비파괴적인 가시화가 필요한 분야로 그 적용범위가 넓어지고 있다. 최근에는 수십 나노미터에서 수 마이크로 미터의 공간분해능을 제공하는 synchrotron X-ray 미세 영상기법에 CT기법을 접목하여, 기존에 볼 수 없었던 매우 작은 피사체 내부의 복잡한 구조를 가시화하고, 이를 분석해내기에 이르렀다⁽⁴⁾.

본 연구에는 포항 가속기 연구소(Pohang Accelerate Laboratory)의 7B2 빔라인을 이용하여, 방사광 미세 전산화 단층촬영(synchrotron X-ray micro computed tomography, X-ray micro CT) 장치를 구축하고, 생물학적 시료를 포함한 다양한 샘플을 대상으로 가시화함으로써, 기존의 다른 가시화 기법으로는 확인하기가 어려웠던 물체 내부구조를 자세하게 분석하고 그 유용성을 확인하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 X선 단층 영상 현미경

본 실험은 시료의 3차원 영상을 획득하기 위해 포항

†포항공과대학교 생체유체연구단

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

*포항공과대학교 생체유체연구단

**포항방사광가속기연구소(PAL)

Fig. 1. Experimental setup of the X-ray micro CT.

가속기연구소의 7B2 X-ray Micro CT 빔라인을 이용하였다. 이 빔라인은 휨전자석(bending magnet)에서 나오는 백색광 X선(white beam X-ray)을 이용하여 현미경 및 단층촬영 실험을 수행하는 빔라인이다. Fig. 1은 사용한 광원의 스펙트럼 특성을 보여주고 있다. 감쇄장치(attenuator)로서 알루미늄 평판이나 실리콘 웨이퍼를 사용하면 낮은 에너지 밴드의 광량을 줄이는 효과가 커서, 시료에 조사되는 X선 광량을 조절하는데 유용하다.

X-ray micro CT 실험장치의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. X-ray 노출에 기인한 시료의 열변형을 최소화시키기 위하여 기계적 셔터(mechanical shutter)를 써서 시료에 조사되는 선량을 조절한다. 단층촬영 스캔은 시료를 회전이 가능한 3축 스테이지 위에 고정시키고, 0도에서 180도 까지 일정한 간격으로 시료를 회전

Fig. 2. X-ray spectrum of the beamline 7B2 at Pohang Accelerator Laboratory (PAL)

Table 1. Resolution and field of view of the X-ray micro CT beamline 7B2 at PAL

Objective lens	Resolution	Field of view
5×	3 μm	7.0×4.6 mm ²
10×	2 μm	3.5×2.3 mm ²
15×	2 μm	1.6×1.1 mm ²

시키면서 각각의 각도에서 X선 영상을 획득한다. 시료를 투과한 X-ray 빔을 검출하기 위해 섬광 결정(scintillator crystal)을 이용하여 X-ray를 가시광선으로 변환한 후 이를 광학현미경으로 집속하여 CCD 카메라(Vieworks VM-11M5)로 확대 영상을 얻었다.

광학현미경에는 2배, 5배, 10배, 20배의 대물렌즈를 선택할 수 있게 turret을 부착하였다. 섬광 결정 으로는 500 μm 와 100 μm 두께의 CdWO₄ 결정을 사용하였다. 섬광 결정이 얇을수록 해상도가 좋으나, 다루기가 어렵기 때문에 2배, 5배 렌즈에서는 500 μm 두께의 결정을, 10배와 20배 렌즈에서는 100 μm 두께의 결정을 사용하여 영상을 얻었다. Table 1에 7B2 X-ray 현미경의 해상도와 관측창(field of view)의 넓이를 나타내었다.

X-ray 빔이 시료를 투과할 때 시료를 구성하는 물질들의 경계선에서 간섭효과를 일으키는데 이 성질을 이용하여 고해상도의 X선 영상을 얻을 수 있다. 7B2 빔라인에는 시료와 X-ray 검출기(섬광 결정 및 광학 현미경) 사이의 거리를 조정할 수 있도록 긴 선형 이송장치가 설치되어 있다.

2.2 CT 영상 획득

시료를 CCD 카메라의 관측창 내에 위치하도록 스테이지 위에 고정시켰다. 샘플에 따라 0도에서 180도 까지 1도씩 또는 0.5도씩 회전시키며 각각의 각도에서 X-ray 투과영상을 획득하였다. 획득되는 X선 영상의 수는 1도 회전 시 181장이 되고 0.5도일 경우 361장이 된다. 한 장의 영상을 획득하는데 사용되는 시간은 1초 내외였다. 0도와 180도 각도에서의 X선 영상은 정확히 좌우가 대칭되어 3D 재구성을 위한 회전축을 설정하는데 이용하였다. 시료와 X-ray 검출기사이의 거리는 100 mm 로 고정하였다. Fig. 3(a), (b)는 고분자 연료전지를 구성하는 구성품 중 하나인 기체확산층(gas diffusion layer, GDL)의 X선 영상이다. Fig. 3(a)는 기체확산층을 정면에서 바라본 영상이고, Fig. 3(b)는 90도 회전시켜 획득한 영상이다. Fig. 3(c)는 다양

Fig. 3. Procedure of X-ray micro computed tomography; (a) 0° image (b) 90° image (c) sliced image (d) reconstructed 3D image.

한 각도에서 얻어진 X선 영상으로부터 수학적 계산을 통해 획득되어진 단층 영상이다. 이러한 수학적 계산은 OCTOPUS 소프트웨어를 이용하여 수행되었다⁽⁵⁾. 계산되어진 수많은 단층영상을 이용하여 3차원 영상으로 재구성하였는데, 이러한 과정을 3D 렌더링이라 한다. AMIRA 소프트웨어를 사용하여 렌더링하였으며⁽⁶⁾, 그 결과를 Fig. 3(d)에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 GDL 내부 구조 가시화

Fig. 4는 두 가지 다른 종류의 기체확산층에 대해 재구성한 결과를 보여주고 있다. 고분자 연료전지에 사용되는 기체확산층은 연료 전지 내부로 공급되는 수소와 산소의 반응 면적을 증가시켜 연료전지의 효율을 증가시키는데 있어서 중요한 역할을 하고 있다. 기체확산층은 다양한 재질로 제작될 수 있으며, 재질과 압축방법에 따라 다공성이 다른 구조를 형성한다. 연료전지의 성능은 기체 확산층의 다공에 크게 영향을 받

는 것으로 알려져 있다⁽⁷⁾. 실험에 사용되어진 기체 확산층은 carbon fiber 재질과 felt 재질로 만들어졌다. Fig. 4a, b는 carbon fiber 재질로 만들어진 기체확산층이고, Fig. 4c, d는 felt 재질로 만들어진 기체확산층이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 재질에 따라 fiber의 굵기가 다르고, carbon 재질의 경우 felt에 비해 직선구조 형태를 많이 보이고 있으며 이에 따라 다공화 정도가 매우 다르게 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한, 기체 확산층 내부에서도 공동(cavity)이 고르게 분포하지 않고, 부분적으로 집중되어 비교적 큰 pore가 형성되어 있는 것으로 나타났다. 이러한 공동의 집중현상은 연료전지 운전시 생성된 수분이 쉽게 모일 수 있어 연료전지 자체의 성능을 저하시키는 주요 원인이 될 수 있다. 기존의 가시화 기법으로는 이러한 불투명한 샘플에 대한 가시화가 불가능하였을 뿐 아니라, 공동의 지역적 분포와 같은 정보를 3차원 재생을 통해서 효과적으로 분석할 수 있으므로, X-ray micro CT 기법은 이와 같은 시료의 내부 구조분석에 매우 유용한 것으로 나타났다.

Fig. 4. Reconstructed 3D images of GDL; (a) normal image, fiber (b) tilted image, fiber (c) normal image, felt (d) tilted image, felt.

Fig. 5. Reconstructed 3D image showing the morphological internal structure of the head of a female mosquito.

3.2 암모기 머리 내부 가시화

Fig. 5는 X-ray micro CT 기법으로 찍은 암모기의 머리 내부 구조를 3D 렌더링을 통해 재구성한 것이다. 모기의 머릿속에는 두 개의 펌프조직을 가지고 있는데 전방에 위치한 펌프를 cibarial pump (CP), 후방에 위치한 펌프를 pharyngeal pump (PP) 라고 부른다. 모기는 이 두 펌프의 수축과 팽창 작용으로 큰 압력구배 (pressure gradient)를 형성 시키고 이를 동력원으로 사용하여 외부의 액체 영양분을 모기 침을 통해 빨아들여 소화기관으로 이송시킨다⁽⁸⁾. 최근 모기 펌프의 기계적 성능이 기존의 어떠한 마이크로 펌프보다도 월등하다는 것이 알려지기 시작함으로써 모기 펌프를 생체모방하고자 하는 연구가 시작되고 있다⁽⁹⁾. 모기의 펌프시스템을 생체 모방하기 위해서는 펌프시스템의 전체적인 형상과 내부기관의 자세한 구조를 아는 것이 필수적이다. 이를 위해 모기의 머리를 마이크로 단위로 절단하여 (micro sectioning) 관찰할 수 있는데 이러한 방법은 절단하는 과정에서 조직의 미세한 구조를 손상시킬 수 있고 입체적인 형태로 재구성하는데 큰 어려움이 따른다. 반면에 X-ray micro CT 기법을 이용하면 모기 머리 내부의 펌프시스템의 전체적인 구조를 수 마이크로 미터의 공간분해능으로 뚜렷하게 가시화할 수 있다.

생물학적 시료의 경우 생체 내부에 수분을 가지고 있고, 촬영을 위해 일정시간 이상 X-ray를 조사하게 되면 수분의 일부가 증발되어 시료에 변형이 일어날 수 있다. 이러한 변형을 방지하기 위해 다양한 기법이 개발되었

는데 본 실험에서는 순간적으로 시료를 동결시켜 시료의 구조적 변형을 방지하는 cryo 기법을 적용하였다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 일반적으로 CP에 비해 PP의 크기가 더 크고 펌프 시스템의 유로가 곡선형태라는 것을 알 수 있다. 또한 유로의 형상까지 자세하게 파악하는 것이 가능하여 관 유동에서 각각의 펌프에 작용하는 유동저항을 대략적으로 추정할 수 있다. 펌프시스템에는 CP와 PP같은 액츄에이터와 함께 흡입 유동을 효과적으로 제어하기 위한 밸브장치가 있어야 한다. 기존의 해부학적인 연구에 의하면 모기는 CP가 끝나는 지점에 하나의 밸브구조(C-P valve)를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 뿐만 아니라 PP의 후방에도 valve 기능을 하는 구조가 있을 것으로 생각되는데 이러한 밸브들의 동적 거동은 X선 미세영상기법을 이용하여 2차원 영상으로 분석할 수 있다. 하지만 밸브들의 정확한 형상과 구조적 특징을 알기 위해서는 동적 거동뿐만 아니라 형태학적 구조를 파악하여야 하는데 Fig. 5에서 특정 구조가 위치한 부분만 선택하여 그림을 다시 재구성하면 원하는 부분을 더욱 자세하게 관찰하는 것이 가능하다. X-ray micro CT 기법은 불투명한 생체 샘플의 내부 형상과 세밀한 구조적 특징을 관찰하는 것을 가능하게 하여 모기펌프의 생체모방 연구에 필요한 핵심적인 설계 자료를 제공한다.

3.3 씨앗 단면 형상의 가시화

단풍나무는 종족 번식을 목적으로 효과적으로 씨앗 (maple seed)을 확산시키기 위해 바람을 이용하는데, 확산 거리가 짧게는 수 미터에서 길게는 수 킬로미터에 달하는 경우도 있다⁽¹⁰⁾. Azuma 등⁽¹¹⁾은 단풍나무 씨앗이 이렇게 멀리 날아가는 것은 하강 속도가 1 m/s에 불과하지만 1000 rpm의 빠른 속도로 회전할 때 발생하는 회전력으로 인한 lift가 발생하기 때문이라고 밝혔다. 이러한 유체역학적 특성을 해석하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으나⁽¹²⁾, 단풍나무 씨앗의 단면(cross section) 정보와 엽맥(venation)의 패턴 정보를 정확하게 측정하기가 힘들어 표면을 단순히 편평한 것으로 가정하고 실험을 진행하고 있다. 그러나, 실제 씨앗의 외형은 chord 방향을 따라 두께가 다른 것으로 나타났다는데, 이것으로부터 기존의 연구에서 사용된 모델이 실제 단풍나무 씨앗과는 외형적 구조에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이에 본 실험에서는 단풍나무 씨앗의 외형을, 특히 chord 방향에 따른 두께의 변화를

Fig. 6. Tomographic images of a maple seed; (a) 3D reconstructed image, (b) sliced image.

분석하기 위해 X-ray micro CT 기법을 이용하였다. 실험에 사용되어진 단풍나무 씨앗 시료는 X선 영상 취득 과정에서 수분 증발에 따른 변형을 방지하기 위해 장시간 자연건조를 통해 잔류 수분을 최소화한 후 실험에 사용하였다.

Fig. 6(a)는 시료의 X선 영상으로부터 재구성된 단풍나무 씨앗의 3차원 영상이다. 단풍나무 씨앗의 외형적 구조 이외에도 씨앗을 구성하는 내부적인 구조까지도 잘 보여주고 있다. 그리고 Fig. 6(b)의 단층 이미지(sliced image)를 활용하면 chord 방향에 따른 씨앗의 두께 변화를 정확하게 측정할 수 있다. 이러한 측정은 비파괴적인 방법을 통해 이루어지고 연속적인 단면 정보를 측정할 수 있기 때문에 단풍나무 씨앗 모형을 제작할 때 매우 유용하게 사용되어진다.

본 실험에서는 X-ray micro CT 기법을 이용하여 수 μm 의 높은 공간분해능으로 단풍나무 씨앗의 형태를 스캐닝해서 3차원 CT 자료를 얻고, 이를 이용하여 단풍나무 씨앗의 단면 정보를 얻을 수 있었다. 이러한 CT 자료는 차후 CFD 연구에 필요한 수학적 모델과 실험모형 제작에 필요한 기초 데이터로도 활용되어질 것이다.

4. 결 론

기존의 CT 촬영기법과 방사광 가속기를 이용한 X

선 미세영상기법을 결합하여 X-ray micro CT 기법을 구축하고 몇 가지 시료에 적용해본 결과, 광학적인 방법으로 가시화가 불가능하였던 불투명한 샘플의 내부 구조를 입체적으로 가시화하고 재구성할 수 있었다. 이로 인해 기존의 방식으로는 정확한 분석이 불가능하였던 다양한 생물학적, 비생물학적 시료들에 대해 세밀하고 입체적인 가시화가 가능하게 되어 미세한 형태학적 구조의 규명과 이와 연계된 미세유동현상에 대한 연구가 가능하게 되었다. 현재까지는 기법의 공간 해상도가 $2\mu\text{m}$ 수준에 머물러 있으나, 좀더 미세한 결정 구조를 가지는 섬광결정을 사용하고 방사광 가속기의 빔 에너지 레벨을 향상시키면 더욱 높은 공간 해상도를 확보할 수 있으리라 기대된다. 방사광 X선의 특성상 빔의 진행방향을 크게 변경하는 것이 어렵고, 하나의 시료에 대해 여러 각도에서의 X선 영상들을 동시에 촬영할 수가 없어 시료에 대한 영상 획득에 다소 시간이 걸린다는 단점이 있다. 그러나 X-ray micro CT 기법은 이러한 단점을 극복할 수 있는 여러 가지 장점을 가지고 있어, 차후 그 활용범위가 크게 넓어질 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 포항 가속기 연구소(PAL) 7B2 빔라인에서 진행되었고, 교육과학기술부/한국연구재단 창의적연구진흥사업(생체유동현상 규명 및 생체모방 연구)의 재원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Hsieh, J., 2003, *Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances*, WA:SPIE Press, Bellingham.
- 2) Tafforeau, P., Boistel, R., Boller, E., Bravin, A., Brunet, M., Chaimanee, Y., Cloetens, P., Feist, M., Hozowska, J., Jaeger, J.-J., Kay, R. F., Lazzari, V., Marivaux, L., Nel, A., Nemoz, C., Thibault, X., Vignaud, P. and Zabler, S., 2006, "Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimens", *Appl. Phys. A*, Vol.83, pp.195-202.
- 3) Toda, H., Sinclair, I., Buffière, J.-Y., Maire, E., Khor, K. H., Gregson, P. and Kobayashi, T., 2004,

- “A 3D measurement procedure for internal local crack driving forces via synchrotron X-ray micro tomography”, *Acta. Mater.*, Vol.52, pp.1305-1317.
- 4) McMahon, P. J., Peele, A.G., Paterson, D., Lin, J. J. A., Irving, T. H. K., McNulty, I. and Nugent, K. A., 2003, “Quantitative X-ray phase tomography with sub-micron resolution”, *Opt. Commun.*, Vol.217, pp.53-55.
 - 5) OCTOPUS homepage: <http://www.xraylab.com>
 - 6) AMIRA homepage: <http://www.amira.com>
 - 7) Selvarani, G., Sahu, A. K., Sridhar, P., Pitchumani, S. and Shukla, A. K., 2008, “Effect of diffusion-layer porosity on the performance of polymer electrolyte fuel cells”, *J. Appl. Electrochem.*, Vol.38, pp.357-362.
 - 8) Borrell, B. J., 2006, “Mechanics of nectar feeding in the orchid bee *Euglossa imperialis*: pressure, viscosity and flow”, *J. Exp. Biology*, Vol.209, pp.4901-4907.
 - 9) Lee, S. J., Kim, B. H., and Lee, J. Y., 2009, “Experimental study on the fluid mechanics of blood sucking in the proboscis of a female mosquito”, *J. Biomech.*, Vol.42, pp.857-864.
 - 10) Nathan, R., Katul, G. G., Horn, H. S., Thomas, S. M., Oren, R., Avissar, R., Pacala, S. W. and Levin, S.A., 2002, “Mechanisms of long-distance dispersal of seeds by wind”, *Nature*, Vol.418, pp.409-413.
 - 11) Lentink, D., Dickson, W. B., van Leeuwen, J. L., Dickinson, M. H., Lentink, D. and Dickson, W. B., 2009, “Leading-edge Vortices Elevate Lift of Autorotating Plant Seeds”, *Science*, Vol.324, pp.1438-1440.
 - 12) Azuma, A. and Yasuda, K., 1989, “Flight performance of rotary seed”, *J. Theor. Biol.*, Vol.138, pp.23-53.