

전산화 단층촬영 영상 분석에 의한 탄소/탄소 목삼입재의 밀도 분포 측정

김동륜* · 윤남균* · 이진용*

Density Profile Measurement of Needle-punched Carbon/Carbon Nozzle Throat by the Analysis of Computed Tomography Image

Dongryun Kim* · Namgyun Yun* · Jinyong Lee*

ABSTRACT

In this study, the non-destructive computed X-ray tomography was adopted to observe the density distribution of the needle-punched C-C composites nozzle throat. The density distribution of the C-C was evaluated within $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ with 98.74% confidence when the correction of the image and high signal-to-noise ratio were achieved by the optimization of the beam hardening, the electrical noise and the scattered X-ray. The density variation of the C/C with the computed tomography was in good agreement with the results obtained by the water immersion method and the observation with scanning electron microscope.

초 록

전산화 단층촬영법을 이용하여 탄소/탄소 목삼입재의 밀도 분포를 평가 하였다. 전산화 단층촬영법의 Beam hardening, 전기적 잡음 및 산란 X-ray의 영상을 보정하고 신호 대 잡음비를 높여 최적화할 때 측정된 제작된 탄소/탄소 복합재료의 밀도는 98.74%의 신뢰도 수준에서 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 분포를 갖는 것으로 평가 되었다. 전산화 단층촬영 결과의 검증은 탄소/탄소 목삼입재를 절단하여 수침법에 의한 밀도 측정과 주사전자현미경 관찰을 통하여 수행되었으며 단층촬영결과는 수침법에 의한 밀도 분포와 주사전자현미경의 결과와 일치하였다.

Key Words: Non-destructive Testing(비파괴시험), Computed Tomography(전산화 단층촬영), Carbon-Carbon Nozzle Throat(탄소/탄소 목삼입재), Density Profile(밀도 분포), Linear Attenuation Coefficient(선형흡수계수), CT 계수(CT 계수)

* 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

1. 서 론

전산화 단층촬영은 물체에 여러 각도로 투과한 X-ray를 검출하여 물체의 단면에 대한 선형 흡수계수를 컴퓨터를 사용하여 영상으로 재구성하는 시험기법이다. 전산화 단층촬영에서 선형 흡수계수를 용이하게 표현하기 위해 물질간의 선형흡수계수의 차이인 CT 계수 (CT number)를 이용하여 영상을 구성한다. CT 계수는 선형 흡수계수와 마찬가지로 물질의 밀도와 근사적으로 비례하지만 정량적인 밀도로 환산하는 것은 용이하지 않다.

비파괴 시험으로 밀도 분포를 측정하는 연구는 전산화 단층촬영을 이용하여 많은 국가에서 진행되고 있다. 의료분야에서는 인체의 골밀도를 측정을 위하여 CT 계수를 통계적으로 분석하고 있다[1]. 제약분야에서는 Beam hardening 및 영상 보정을 통하여 알약의 밀도 분포를 측정하고 이를 응용하여 알약의 충전 상태 및 제조 공정을 개선하고 있다[2]. 산업분야에서는 복합재료와 같은 불균일성 소재 분야에서 전산화 단층촬영의 영상을 개선하기 위하여 영상 필터를 이용하여 산란 X-ray 및 전기적 잡음을 감소시키는 연구가 진행되고 있으며 밀도 시편을 제작하여 밀도와 CT 계수의 상관관계를 분석하는 연구도 진행되고 있다[3, 4]. 3차원 전산화 단층촬영 장비의 보급은 더 정확한 밀도 분포 측정에 기여하였는데 복합재료 내의 탄소 섬유, 매트릭스 및 기공에 대한 CT 계수를 각각 분리하여 밀도 분포를 측정할 사례가 있다[5, 6]. 하지만 기존의 연구는 CT 계수를 정확한 밀도로 표현하지 못하고 있으며 단지 정성적인 밀도 분포만을 보여주고 있다.

본 연구에서는 전산화 단층촬영으로 측정된 CT 계수와 밀도의 상관관계를 규명하고 밀도분해능시편과 표준밀도시편을 이용하여 탄소/탄소 목삽입재의 밀도 분포를 정량적으로 측정하는 방법을 제시하며 측정된 밀도는 절개하여 수침법으로 측정하여 결과를 비교하고 주사전자현미경 (SEM)으로 검증하고자 하였다.

2. 실험장치 및 시험편

2.1 실험장치

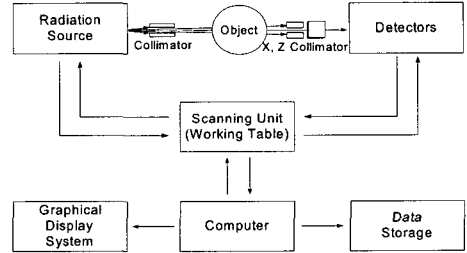


Fig 1. Schematic diagram of experimental apparatus

실험에 사용한 전산화 단층촬영 장치의 구조도는 Fig. 1과 같으며 본체의 구성은 X-ray 발생장치와 Detector, Scanning Unit, Graphical display system 및 컴퓨터로 구성된다.

2.2 밀도분해능시편 및 표준밀도시편

밀도분해능시편은 전산화 단층촬영 장비의 밀도 분해능을 알기 위해서 제작한 시편으로 아크릴 소재에 .90° 간격으로 지름이 10 mm이고 깊이가 64 mm인 홈을 파서 Table 1과 같은 물질을 넣어 제작하였다. 표준밀도시편은 밀도분해능시편과 기하학적 형상은 같고 Table 2와 같은 물질을 넣어 제작하였다.

밀도분해능시편에서 증류수와 NaCl 수용액이 각각 분리되므로 전산화 단층촬영 장치의 밀도 분해능은 0.010 g/cm³ 이하라고 판단한다.

Table 1. Density of material inserted with the density resolution test block in degrees (Unit: g/cm³)

Degree	0°	90°	180°	270°
Material	H ₂ O	NaCl Solution	NaCl Solution	NaCl Solution
Density	1.0000	1.0104	1.0217	1.0341

Table 2. Density of material inserted with the standard density test block in degrees (Unit: g/cm³)

Degree	0°	90°	180°	270°
Material	PVDF	NaCl Solution	Mg	H ₂ O
Density	1.7790	1.0104	1.7450	1.0000

3. 실험 및 결과

3.1 Beam hardening 보정

전산화 단층촬영 영상에 영향을 미치는 인자는 Beam hardening, 산란 X-ray 및 전기적 잡음 등이 있고 그 중 가장 큰 영향을 주는 인자는 Beam hardening이다. Fig. 2는 Beam hardening을 보정한 경우와 보정하지 않은 경우에 대한 CT number를 도시한 그래프이다.

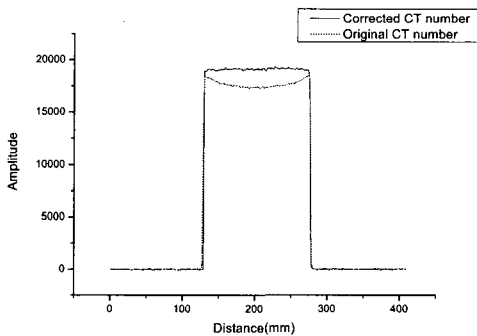


Fig. 2 Correction of beam hardening

3.2 산란 X-ray 및 전기적 잡음 보정

산란 X-ray 및 Detector의 전기적 잡음은 전산화 단층촬영의 영상에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 산란 X-ray 및 전기적 잡음은 장비의 고유한 에러이므로 제거할 수 없기 때문에 신호 대 잡음비를 높여 최적 조건을 설정한다. 신호

대 잡음비는 Collimator로 조사선량을 조절하여 변경할 수 있으며 Collimator는 숫자가 낮을수록 조사선량이 커진다. Fig. 3은 Collimator를 조정하여 얻은 탄소/탄소 목삽입재, Mg, Acryl, PVDF (Polyvinylidene fluoride), NaCl 수용액 및 증류수에 대한 CT 계수의 표준 편차이다.

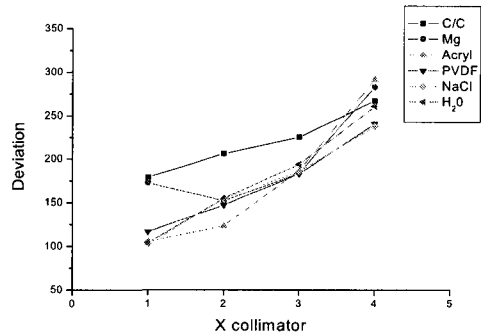
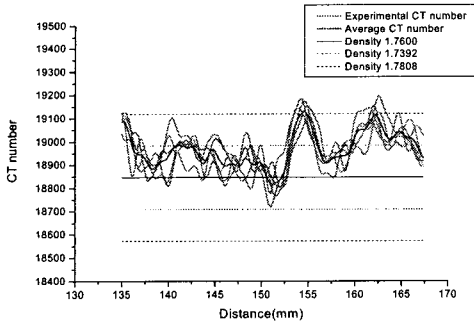


Fig. 3 Deviation of the CT number obtained from the C/C nozzle throat and standard density test block with changing the X collimator

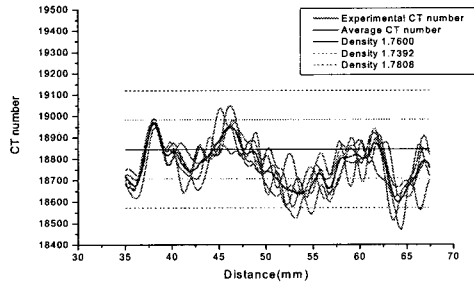
3.3 CT 계수의 신뢰도 측정

표준밀도시편에서 얻은 증류수와 NaCl 수용액에 대한 CT 계수의 표준편차를 측정하였을 때 CT 계수의 표준편차는 67.21이었고 실제 밀도가 ± 0.01 g/cm³ 내에 있을 신뢰도는 96.36%였다. 탄소/탄소 목삽입재의 신뢰도 평가는 밀도 분포가 비교적 일정하다고 알려진 ATJ 흑연 목삽입재를 이용하였고 니들펀칭 탄소/탄소 목삽입재와 밀도가 유사하므로 ATJ 흑연 목삽입재의 신뢰도를 니들펀칭 탄소/탄소 목삽입재에 적용해도 된다.

흑연 목삽입재의 밀도는 1.76 g/cm³고 CT 계수의 평균은 18846이고 밀도 0.01 g/cm³ 차이가 날 때 CT 계수 차이는 137이었다. Fig. 4는 전산화 단층촬영을 동일조건에서 5회 실시한 흑연 목삽입재의 x축 위치에 대한 CT 계수 및 CT 계수의 평균을 보여주는 그래프이다. 실험 결과 CT 계수의 평균을 기준으로 밀도가 ± 0.01 g/cm³ 내에 분포한 신뢰도는 98.74%였다.



(a) CT number at 0°



(b) CT number at 180°

Fig. 4 Confidence evaluation of the CT number of the ATJ graphite nozzle throat

3.4 결과 분석 및 검증

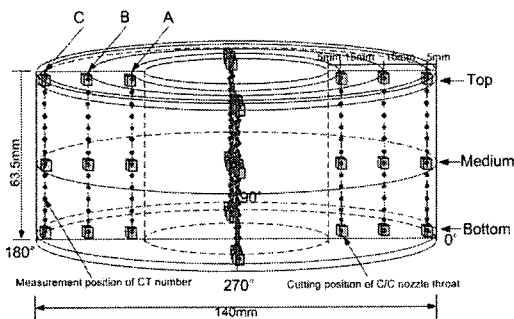


Fig. 5 Measuring positions of the CT number and cutting positions of needle-punched C/C nozzle throat

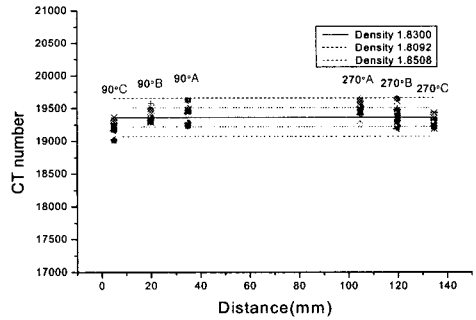
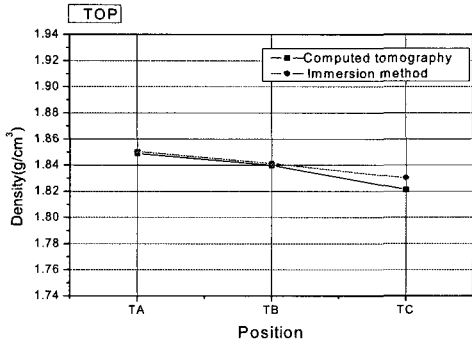


Fig. 6 Density and CT number of Needle-punched C/C nozzle throat at x axis

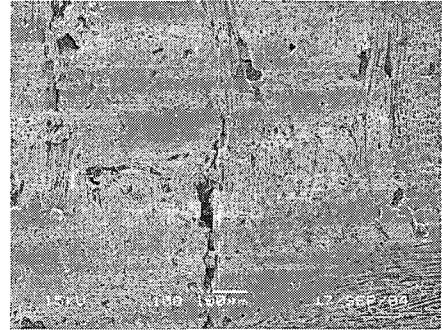
Figure 5는 니들펀칭 탄소/탄소 목삽입재의 밀도 측정 위치와 시편 절단 위치를 나타낸 그림이다. 밀도 측정은 원주 방향으로 A, B, C로 나누어 90° 간격으로 14 부위를 측정하였고 밀도 측정 단위는 1.0×1.0×1.0 mm이다. 니들펀칭 탄소/탄소 목삽입재의 밀도는 Fig. 6과 같이 안쪽 지름에서 바깥지름으로 갈수록 A, B, C의 순서로 순차적으로 낮아지고 있으며 밀도는 1.804 g/cm³~1.851 g/cm³ 내에 분포하였다.

Figure 5와 같이 탄소/탄소 목삽입재를 5×5×5 mm 크기로 절단하여 수침법으로 밀도를 측정하였다. Fig. 7은 전산화 단층촬영으로 측정한 밀도와 수침법으로 측정한 밀도를 비교한 그래프이다. 전산화 단층촬영에서 측정한 밀도와 수침법으로 측정한 밀도 차이는 평균적으로 0.0083 g/cm³였고 전산화 단층촬영의 밀도 측정 결과와 절단 후 수침법의 측정 결과가 일치하고 있다. 수침법으로 측정한 탄소/탄소 목삽입재의 밀도는 전산화 단층촬영에서 측정한 밀도와 마찬가지로 안쪽 지름에서 바깥지름으로 갈수록 A, B, C의 순서로 순차적으로 낮아지고 있다.

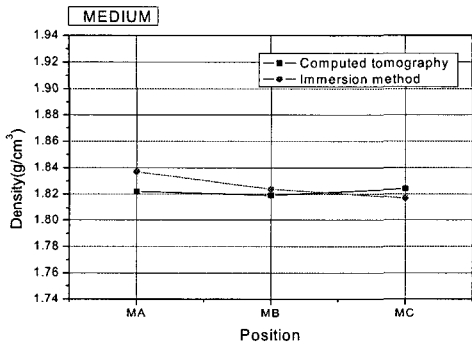
Figure 8은 탄소/탄소 목삽입재의 절단면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과로 안쪽 지름(A)보다 바깥 지름(B, C)으로 갈수록 기공이 점점 많아지는 것을 알 수 있다.



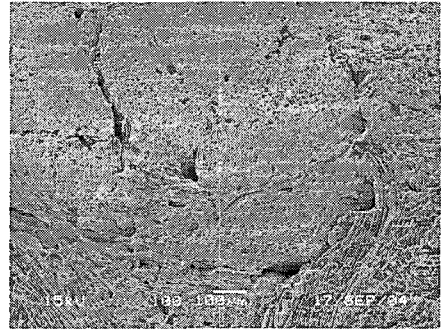
(a) Top position at 0° of C/C nozzle throat



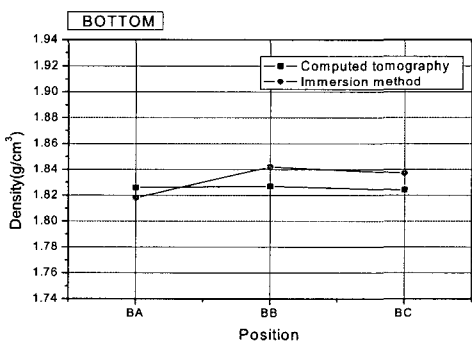
(a) Top A position



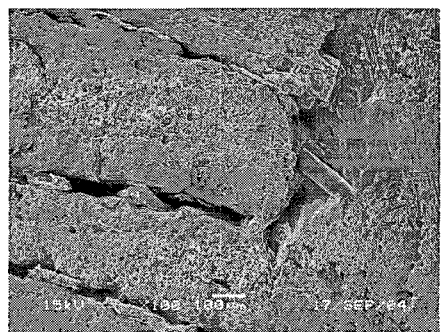
(b) Medium position at 0° of C/C nozzle throat



(b) Top B position



(c) Bottom position of 0° of C/C nozzle throat



(c) Top C position

Fig. 7 Comparison of the density obtained by the computed tomography and water immersion method

Fig. 8 Cutting sections of the needle-punched C/C nozzle throat at top position

5. 결 론

전산화 단층촬영의 영상을 분석하여 비파괴 방법으로 탄소/탄소 목삽입재의 밀도를 평가할 수 있었으며 세부 연구 결과는 다음과 같다.

1. 탄소/탄소 목삽입재의 밀도를 측정하기 위하여 밀도분해능시편 및 표준밀도시편을 제작하였으며 전산화 단층촬영 장비의 밀도 분해능은 0.01 g/cm^3 이하로 판단한다.
2. Beam hardening을 실험적으로 보정하고 산란 X-ray 및 전기적 잡음은 Collimator를 조정하여 신호 대 잡음비를 크게 하여 CT 계수의 표준편차를 줄이면 전산화 단층촬영의 영상을 최적화할 수 있다.
3. 전산화 단층촬영 영상의 Voxel을 좌, 우, 상, 하로 5개를 합하여 $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ mm}$ 으로 수정하면 측정 밀도가 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 내에 있을 신뢰도는 96.36%일 것으로 예상된다. 흑연 목삽입재를 이용하여 신뢰도를 검증한 결과 측정 밀도가 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 내에 98.74% 분포하였다.
4. 전산화 단층촬영으로 측정한 니들펀칭 탄소/탄소 목삽입재의 밀도는 안쪽 지름에서 바깥지름으로 갈수록 A, B, C의 순서로 순차적으로 낮아지고 있으며 밀도 분포는 $1.804 \text{ g/cm}^3 \sim 1.851 \text{ g/cm}^3$ 내에 분포하였고 절단면에 대한 주사전자현미경의 결과와도 일치하였다.
5. 전산화 단층촬영에서 측정한 밀도와 수침법으로 측정한 밀도 차이는 평균적으로 0.0083 g/cm^3 이므로 전산화 단층촬영의 밀도와 절단 후 수침법의 밀도가 비교적 잘 일치하였다.
6. 전산화 단층촬영으로 니들펀칭 탄소/탄소 목삽입재의 밀도를 파괴하지 않고 측정할 수 있으며 향후 밀도 분포에 대한 품질보증기법으로 활용할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. T. S. Kaneko, J. S. Bell, M. R. Pejic, J. Tehranzadeh and J. H. Keyak, "Mechanical

- properties, density and quantitative CT scan data of trabecular bone with and without metastases", *Journal of Biomechanics*, 2004, pp.523-530
2. I. C. Sinka, S. F. Burch, J. H. Tweed and J. C. Cunningham, "Measurement of density variations in tablets using X-ray computed tomography", *International Journal of Pharmaceutics*, 2004, pp.215-224
3. D. H. Phillips and J. J. Lannutti, "Measurement physical density with X-ray computed tomography", *NDT & E International*, vol. 30, 1997, pp.339-350
4. R. T. Lopes, H. S. Rocha, E. F. O. de Jesus, R. C. Barroso, L. F. de Oliveira, M. J. Anjos, D. Braz and S. Moreira, "X-ray transmission microtomography using synchrotron radiation", *Nuclear Instruments and Methods in physics Research*, 2003, pp.604-607
5. O. Coindreau, G. Vignoles and P. Cloetens, "Direct 3D microscale imaging of Carbon-Carbon composites with computed holotomography", *Nuclear Instruments and Methods in physics Research*, 2003, pp.308-314
6. A. Velhinho, P. D. Sequeira, R. Martins, G. Vignoles, F. B. Fernandes, J. D. Botas and L. A. Rocha, "X-ray tomographic imaging of Al/SiC_p functionally graded composites fabricated by centrifugal casting", *Nuclear Instruments and Methods in physics Research*, 2003, pp.295-302
7. M. V. Geet, G. Volckaert and S. Roels, "The use of microfocus X-ray computed tomography in characterising the hydration of a clay pellet/powder mixture", *Applied Clay Science*, 2005, pp.73-87