

전산화 단층촬영에 의한 니들펀칭 탄소/탄소 복합재료 노즐 목삽입제의 밀도 분포 평가

김동륜* · 윤남균* · 이진용*

Density Profile Evaluation of Needle-punched Carbon/Carbon Composites Nozzle Throat by the Computed Tomography

Dongryun Kim* · Namgyun Yun* · Jinyong Lee*

ABSTRACT

In this study, the non-destructive computed tomography was adopted to observe the density profile of the needle-punched Carbon/Carbon(C/C) composites nozzle throat. The density profile of 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 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 목삽입제의 밀도 분포를 평가하였다. 전산화 단층촬영법의 Beam hardening, 전기적 잡음 및 산란 X-ray의 영상을 보정하고 신호 대 잡음비를 높여 최적화할 때 측정된 탄소/탄소 복합재료의 밀도는 98.74%의 신뢰도 수준에서 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 분포를 갖는 것으로 평가되었다. 전산화 단층촬영 결과의 검증은 탄소/탄소 목삽입제를 절단하여 수침법에 의한 밀도 측정과 주사전자현미경 관찰을 통하여 수행되었으며 단층촬영 결과는 수침법에 의한 밀도 분포와 주사전자현미경의 영상과 일치하였다.

Key Words: NonDestructive Testing(비파괴시험), Computed Tomography(전산화 단층촬영), Carbon/Carbon Nozzle Throat(탄소/탄소 목삽입제), Density Profile(밀도 분포), Linear Attenuation Coefficient(선형흡수계수), CT number(CT 계수)

† 2005년 12월 23일 접수 ~ 2006년 3월 9일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 기술연구본부
연락처, E-mail: ndtpro@hanmail.net

1. 서 론

우수한 초고온 내삭마 및 기계적 특성이 요구되는 유도무기 추진기관의 목삽입재로 주로 ATJ급 흑연이 사용되고 있으나 연소시 발생하는 급격한 온도 상승 및 연소 후의 급격한 냉각으로 인한 열충격 (Thermal shock)은 때때로 흑연 목삽입재의 균열을 발생시킨다. 따라서 이러한 열충격에 견딜 수 있는 소재의 개발이 요구되고 있으며 니들펀칭 (Needle-punching) 탄소/탄소 목삽입재는 우수한 삭마 및 열충격 저항성 뿐만 아니라 제조공정이 비교적 단순하여 ATJ급 흑연을 대체할 수 있는 소재로 고려되고 있다.

니들펀칭 탄소/탄소 목삽입재는 니들펀칭이라는 특수한 기술을 이용하여 탄소섬유 프리폼을 제작하고 제작된 탄소섬유 프리폼을 고밀도화 공정 및 2400℃ 열처리 공정을 거쳐 제작된다. 개발된 니들펀칭 탄소/탄소 복합재료용 탄소섬유 프리폼은 제작시 층간강도 및 프리폼의 두께를 증가시키기 위하여 토우(Tow) 크기가 320K인 탄소섬유 펠트 (Felt)를 [0/90]로 교차시키고 특수 바늘로 펀칭하여 제작되었다. 따라서 고밀도화 후에도 동일 방향 혹은 90도로 교차되는 토우와 토우 사이에 기공이 존재함은 물론 고밀도화 공정단계에서 완벽한 밀도의 균일화는 어렵다.

이러한 부분적 밀도 불균일화는 추진기관의 성능에 커다란 영향을 미치게 되므로 니들펀칭 탄소/탄소 복합재료 제작시 균일한 밀도를 갖는 공정이 확립되어야만 되며 더불어 제작된 니들펀칭 복합재료의 정확한 밀도 분포 및 밀도 정량화 분석이 수행되어야만 고성능 추진기관의 제작이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 전산화 단층촬영이라는 비파괴 시험법을 이용하여 제작된 니들펀칭 탄소/탄소 복합재료의 밀도 분석 및 정량화를 시도하였다.

전산화 단층촬영은 물체에 여러 각도로 투과한 X-ray를 검출하여 물체의 단면에 대한 선형 흡수계수를 컴퓨터를 사용하여 영상으로 재구성

하는 시험기법이다. 선형흡수계수는 물질과 X-ray의 상호작용에 의해 X-ray가 물질 내에서 흡수되는 물리적 현상을 표현한 수치이며 동일한 물질이라도 X-ray 에너지가 달라지면 선형흡수계수도 달라진다. 전산화 단층촬영에서 선형흡수계수를 용이하게 표현하기 위해 물질간의 선형흡수계수의 차이인 CT 계수 (CT number)를 이용하여 영상을 구성한다. CT 계수는 선형흡수계수와 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 선속경화현상 (Beam hardening)과 전산화 단층 촬영 영상을 보정하여 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. 이 론

X-ray가 피사체를 통과할 때는 X-ray 강도는 감쇠 법칙을 따르며 감쇠 정도는 에너지의 함수인 선형흡수계수 $\mu(x)$ 에 관계된다.

$$I = I_0 \exp\left(-\int \mu(x) dx\right) \quad (1)$$

Equation 1에서 I 는 피사체를 투과한 방사선량, I_0 는 피사체를 투과하지 않은 방사선량, $\mu(x)$ 는 선형흡수계수이고 x 는 피사체를 투과한 두께이다. 선형흡수계수 $\mu(x)$ 는 밀도, 원자번호 및 X-ray 에너지의 함수이고 Eq. 2와 같이 표현할 수 있다[7].

$$\mu = \rho \left(a + \frac{bZ^{3.8}}{E^{3.2}} \right) \quad (2)$$

Equation 2에서 ρ 는 밀도이고 Z 는 원자번호이고 E 는 X-ray 에너지이다. a 와 b 는 전산화 단층촬영 장비에 의존하는 상수이다. Eq. 2에서 선형흡수계수는 밀도와 비례하는 것을 알 수 있다.

전산화 단층촬영에서 콘트라스트를 높이기 위하여 CT 계수로 영상을 재구성하며 CT 계수는 Eq. 3과 같다.

$$CT \text{ number} = A \left(\frac{\mu - \mu_b}{\mu_b} \right) \quad (3)$$

Equation 3에서 A 는 Hounsfield 계수이고 μ_b 는 기준 물질의 선형흡수계수이다. 전산화 단층촬영의 CT 계수를 분석하여 밀도를 분석할 수 있다.

3. 실험장치 및 시험편

3.1 실험장치

실험에 사용한 전산화 단층촬영 장치의 구조도는 Fig. 1과 같으며 본체의 구성은 X-ray 발생장치와 검출기(Detector), 이송장치(Scanning Unit), 영상장치(Graphical display system) 및

컴퓨터로 구성되어 있다.

산란 방사선의 방지와 전산화 단층촬영에서 필요한 부채꼴 선속(Fan Beam)을 얻기 위하여 X-ray 발생장치와 검출기 앞에 각각 Collimator가 설치되었다. X-ray 발생장치 앞쪽에는 길이 50mm의 Collimator 두 개를 포개어 설치하여 단층촬영을 하려는 부분을 제외한 나머지 영역은 X-ray가 Collimator에 흡수되도록 설계되었고, 검출기 앞쪽에는 시험체를 통과한 X-ray 중 이미지 재구성을 위해 필요한 X-ray의 양을 조절하기 위한 X, Z Collimator가 각각 설치되었다. X-ray 발생장치에 설치된 Collimator는 고정되었지만 검출기 쪽의 X, Z의 Collimator는 실험 용도에 맞게 크기를 선택할 수 있다.

X-ray 발생장치에서 발생한 X-ray는 시험체와 Collimator를 거쳐 검출기에서 측정하는데 검출기는 32채널을 가진 32개의 Cadmium Tungsten Scintillator를 사용하며 검출기의 크기는 5×7.5×15mm이다. 검출기에서 측정된 X-ray는 광전증배관을 거쳐 빛의 신호를 전기적 신호로 바꿔준다.

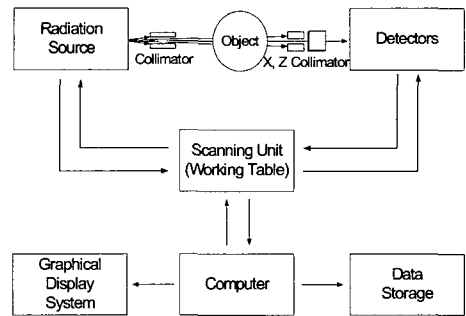


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

X-ray 발생장치와 검출기 사이에는 이송장치가 설치되었고 이송장치에 설치된 작업대 위에 시험체를 고정시켜 단층촬영을 한다. 작업대는 횡방향으로 이동되어 촬영하고 횡방향 이동 후에는 12°회전하여 촬영하는 방식이다. 14번의 회전을 거쳐 CT 밀도 분포 (CT density profile)를 얻고 이를 CT 알고리즘을 이용하여 컴퓨터

로 계산하여 이미지를 재구성한다. 전산화 단층촬영의 영상은 모니터를 통해 확인할 수 있는데, 이때의 영상의 크기는 512×512와 1024×1024 Pixel로 구성되며 영상의 크기는 컴퓨터에서 전환할 수 있다.

3.2 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.

Figure 2는 밀도분해능시편의 전산화 단층촬영 영상으로 밀도가 증가할수록 CT 계수가 선형적으로 증가함으로 증류수와 NaCl 수용액이 각각 분리되므로 전산화 단층촬영 장비의 밀도 분해능은 0.010 g/cm³ 이하라고 판단한다.

Figure 3은 표준밀도시편을 탄소/탄소 목삽입재에 장착한 전산화 단층촬영 영상으로 밀도분해능시편과 마찬가지로 증류수와 NaCl 수용액이 전산화 단층촬영 영상에서 분리되나 탄소/탄소 목삽입재로 인한 기하학적 크기의 증가 때문에 영상 범위가 확장되므로 밀도 분해능 시편에서 보여준 증류수와 NaCl 수용액의 밀도분해능보다 다소 낮았다.

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

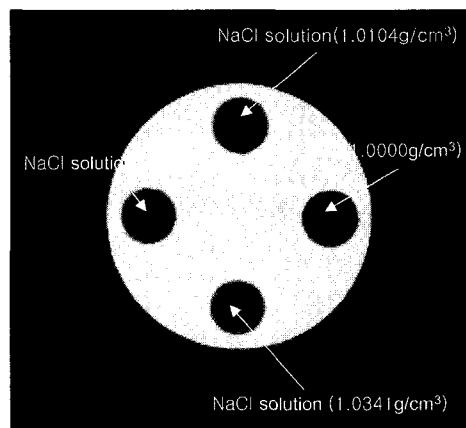


Fig. 2 CT Image of the Density Resolution Test Block

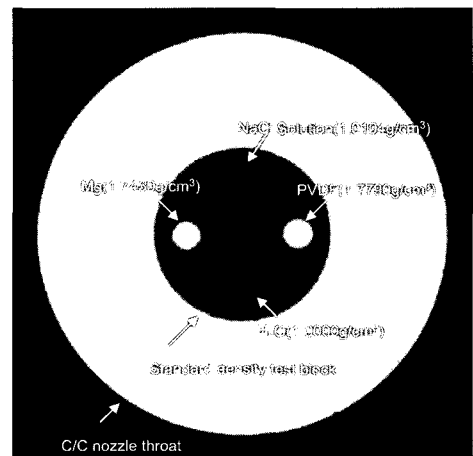


Fig. 3 CT Image of the Standard Density Test Block Inserted with C/C Nozzle Throat

4. 실험 및 결과

4.1 선속경화현상 보정

전산화 단층촬영 영상에 영향을 미치는 인자는 선속경화현상, 산란 X-ray 및 전기적 잡음 등이 있고 그 중 가장 큰 영향을 주는 인자는 선속경화현상이다. 선속경화현상은 연속 X-ray가 매질을 통과할 때 매질의 두께가 증가할수록 저에너지의 X-ray가 매질에 많이 흡수되고 X-ray의 평균 에너지가 높아짐으로 선형 흡수 계수가 낮아지는 현상이다.

Figure 4는 선속경화현상이 전산화 단층촬영 영상에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 선속경화현상을 보정하지 않았을 때 시편 중앙으로 갈수록 CT 계수가 낮아지는 것을 알 수 있고 밀도 측정에 영향을 주기 때문에 항상 실험 전에 보정을 해야 한다. 선속경화현상을 보정시키기 위하여 Bowtie filter를 사용하거나 피사체 두께에 따라 흡수되는 X-ray의 양을 수학적으로 보정한다. 본 실험에서 선속경화현상은 전산화 단층촬영 장치의 Polychromatic correction의 수치를 이용하여 수학적으로 보정하였고 실험으로 확인하였다.

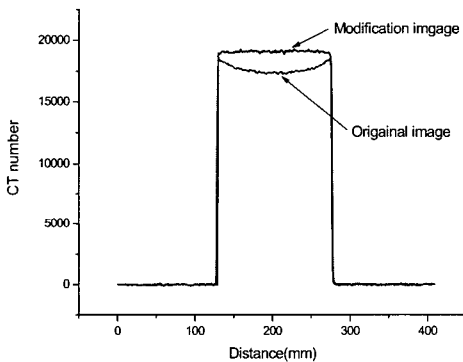


Fig. 4 Correction of Beam Hardening

4.2 산란 X-ray 및 전기적 잡음 보정

산란 X-ray 및 검출기의 전기적 잡음은 전산화 단층촬영의 영상에 영향을 미치는 중요한 인

자이다. 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 조사선량은 커진다.

Figure 5는 Collimator를 조정하여 얻은 탄소/탄소 목삽입재, PVDF (Polyvinylidene fluoride), 마그네슘(Mg), 아크릴(Acryl), NaCl 수용액 및 증류수에 대한 각각 1257개의 CT 계수에 대하여 $\pm 0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 범위 내에 위치하는 CT 계수의 개수를 나타낸 그래프이다. Collimator의 숫자가 낮을수록 조사선량이 커지기 때문에 신호 대 잡음비가 개선되므로 $\pm 0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 범위 내에 위치하는 CT 계수의 개수가 커짐을 알 수 있다.

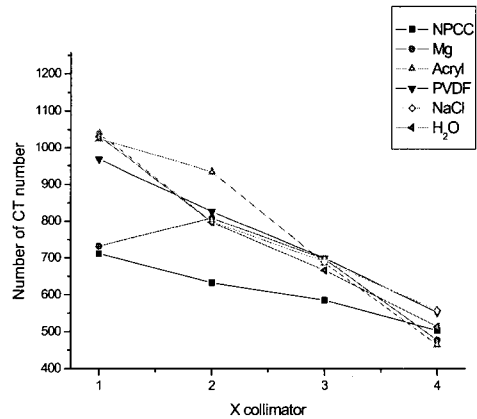


Fig. 5 The Number of CT Number Obtained from the C/C Nozzle Throat and Standard Density Test Block with Changing the X Collimator

4.3 영상 data의 신뢰도 측정

전산화 단층촬영 영상에 대한 Voxel의 크기는 $0.2 \times 0.2 \times 1.0 \text{ mm}$ 이고 각각의 Voxel에 대한 CT 계수는 정규분포를 따른다. 표준밀도시편 내 밀도가 $1.00 \text{ g}/\text{cm}^3$ 인 증류수는 CT 계수의 개수는 1257이고 평균은 11934.31이고 표준편차는 105.04이며, 밀도가 $1.02 \text{ g}/\text{cm}^3$ 인 NaCl 수용액과의 CT 계수 차이는 280.76이므로 두 물질의

CT 계수의 차이가 140.38일 때 밀도가 0.01 g/cm^3 이 차이가 발생한다. 밀도 1.00 g/cm^3 증류수와 1.02 g/cm^3 NaCl 수용액의 밀도 분포가 상당 영역에서 겹치게 되고 측정 밀도가 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 내에 있을 신뢰도는 81.86%를 보여준다.

CT 계수는 정규분포를 따르므로 $0.2 \times 0.2 \times 1.0 \text{ mm}$ 인 Voxel을 좌, 우로 5개, 상, 하로 5개를 합하여 Voxel의 크기를 $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ mm}$ 으로 수정한다면 중심극한정리에 의해 CT계수의 표본크기는 25가 되고 CT 계수의 표준편차는 21.01이 될 것으로 추정한다. 밀도 1.00 g/cm^3 증류수와 1.02 g/cm^3 NaCl 수용액의 CT 계수가 완전히 분리되어 측정 밀도가 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 내에 있을 신뢰도는 100%가 될 것이다. 하지만 산란 X-ray 및 전기적 잡음과 같은 고유한 에러로 인하여 CT 계수는 불규칙한 미세한 증감이 관찰되어 신뢰도는 100%에 미치지 못하였다.

실험으로 Voxel의 크기를 $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ mm}$ 으로 수정하여 CT 계수의 표준편차를 측정하였을 때 CT 계수의 표준편차는 67.21이었고 실제 밀도가 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 내에 있을 신뢰도는 96.36%였다.

신뢰도를 높이기 위하여 밀도 측정 단위는 $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ mm}$ 로 설정하였다. 밀도 측정 단위를 $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ mm}$ 로 설정한다면 미세한 기공이 밀도에 미치는 영향도 줄어들게 된다. Fig. 6은 전산화 단층촬영의 Voxel 크기 및 밀도 측정 단위를 나타낸 그림이다.

Fig. 7은 증류수와 NaCl 수용액에 대한 CT 계수의 분포범위를 Voxel의 크기가 $0.2 \times 0.2 \times 1.0 \text{ mm}$ 일 때 CT 계수의 표준편차가 105.04인 확률밀도함수의 그래프와 CT계수의 표본크기를 25로 가정하여 영상을 $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ mm}$ 로 합했을 때 이론적으로 추정한 CT 계수의 표준편차가 21.01인 확률밀도함수의 그래프를 나타내었다. 또한 실험으로 Voxel의 크기를 $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ mm}$ 으로 수정하여 CT 계수의 표준편차를 측정하였을 때 CT 계수의 표준편차가 67.21인 확률밀도함수의 그래프를 나타내었다.

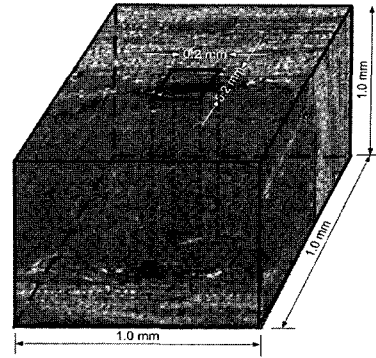


Fig. 6 Voxel Size of the CT Image and Measurement Range of the Density

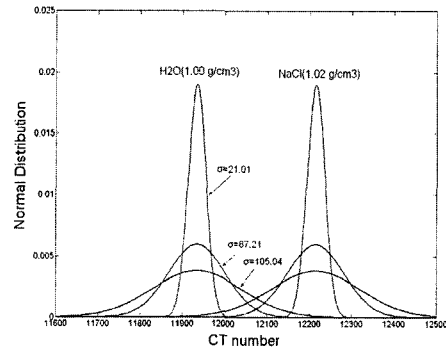
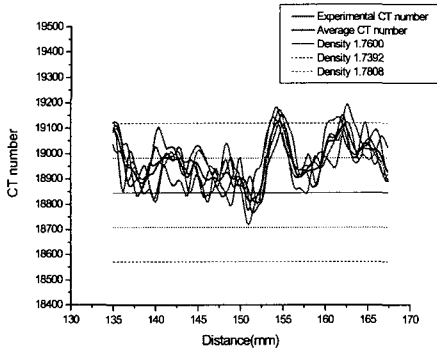


Fig. 7 Normal Distribution of the CT Number for H₂O and NaCl Solution

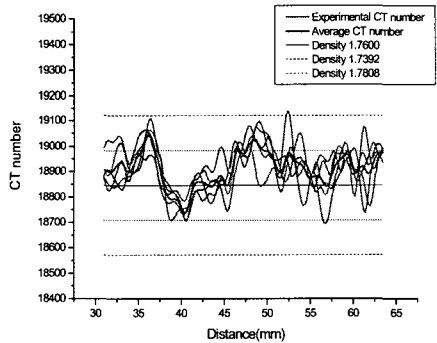
표준밀도시편에서 얻은 증류수와 NaCl 수용액에 대한 CT 계수의 분포 범위는 탄소/탄소 목삽입재에도 동일하게 적용될 것으로 판단된다. 신뢰도 평가는 밀도 분포가 비교적 일정하다고 알려진 ATJ 흑연 목삽입재를 이용하였고 니들편칭 탄소/탄소 목삽입재와 밀도가 유사하므로 흑연 목삽입재의 신뢰도를 적용해도 된다고 생각한다.

흑연 목삽입재의 밀도는 1.76 g/cm^3 고 CT 계수의 평균은 18846이고 밀도 0.01 g/cm^3 차이가 날 때 CT 계수 차이는 137이었다. Fig. 8은 전산화 단층촬영을 동일조건에서 5회 실시한 흑연 목삽입재의 0° , 90° , 180° , 270° 위치에 대한 CT 계수 및 CT 계수의 평균을 보여주는 그래

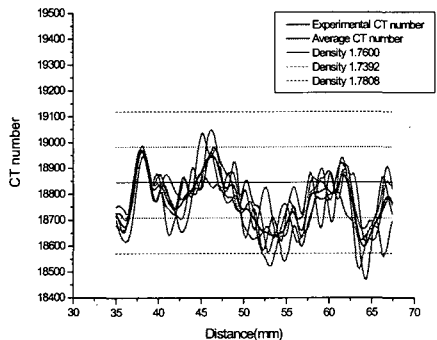
포이다. 실험 결과 CT 계수의 평균을 기준으로 밀도가 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 내에 분포한 신뢰도는 98.74%였다.



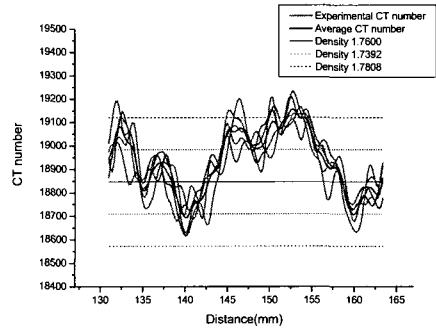
(a) CT Number at 0°



(b) CT Number at 90°



(c) CT Number at 180°



(d) CT Number at 270°

Fig. 8 Confidence Evaluation of the CT Number of the ATJ Graphite Nozzle Throat

4.4 결과 분석 및 검증

Figure 9는 탄소/탄소 목삽입재의 밀도 측정 위치와 시편 절단 위치를 나타낸 그림이다. 밀도 측정은 원주 방향으로 A, B, C로 나누어 90° 간격으로 측정하였고 측정 위치는 탄소/탄소 목삽입재의 상단면에서 하단면까지 4 mm 간격으로 14부위를 측정하였다. 밀도 측정의 크기는 1.0×1.0×1.0 mm로써 측정된 결과를 Fig 10에 나타냈다. 니들펀칭 탄소/탄소 목삽입재의 밀도는 안쪽 지름에서 바깥지름으로 갈수록 A, B, C의 순서로 순차적으로 낮아지고 있으며 밀도는 1.804 g/cm³~1.851 g/cm³ 내에 분포하였다.

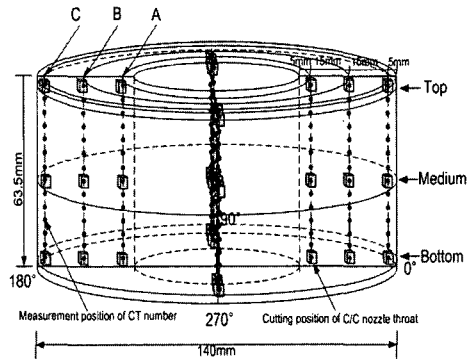
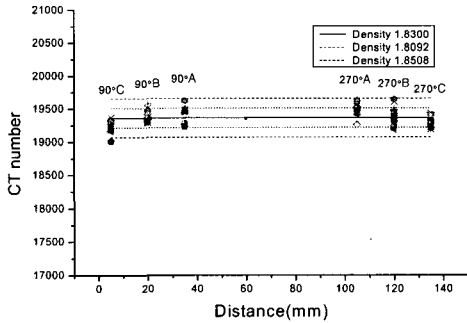
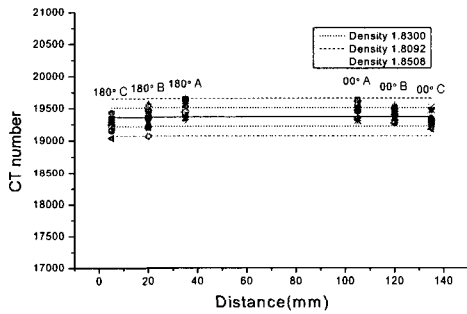


Fig. 9 Measurement Position of CT Number and Cutting Position of C/C Nozzle Throat



(a) Density and the CT Number Variation at X Axis

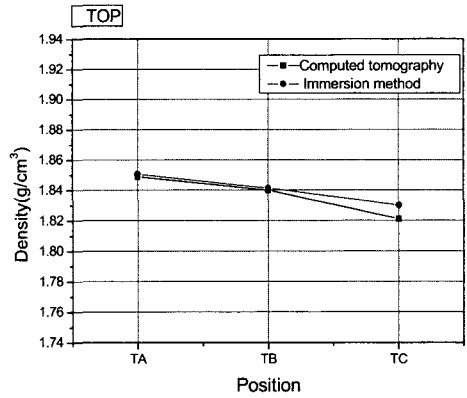


(b) Density and the CT Number Variation at Y Axis

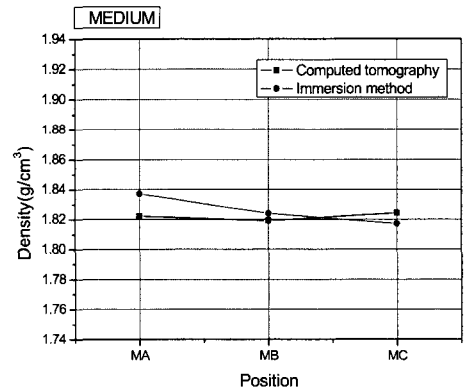
Fig. 10 Density and the CT Numbers of Needle Punched C/C Nozzle Throat

Figure 9와 같이 탄소/탄소 목삽입재를 5×5×5 mm 크기로 절단하여 수침법으로 밀도를 측정하였다. Fig. 11은 전산화 단층촬영으로 측정된 밀도와 수침법으로 측정된 밀도를 비교한 그래프이다. 전산화 단층촬영에서 측정된 밀도와 수침법으로 측정된 밀도 차이는 평균적으로 0.0083 g/cm³였고 전산화 단층촬영의 밀도 측정 결과와 절단 후 수침법의 측정 결과가 대체로 일치하고 있다.

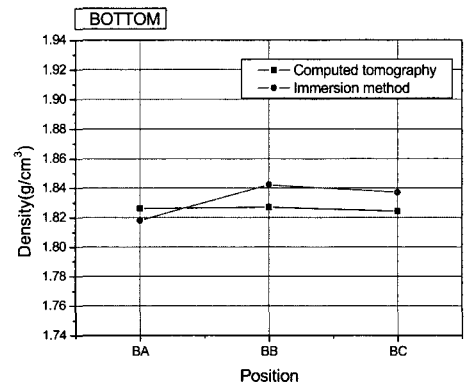
수침법으로 측정된 탄소/탄소 목삽입재의 밀도는 전산화 단층촬영에서 측정된 밀도와 마찬가지로 안쪽 지름(A)의 밀도가 가장 높게 나타났으며 바깥 지름(B, C)으로 갈수록 밀도가 점차 낮아지는 것을 알 수가 있다.



(a) Top Position at 0° C/C Nozzle Throat



(b) Medium Position at 0° C/C Nozzle Throat

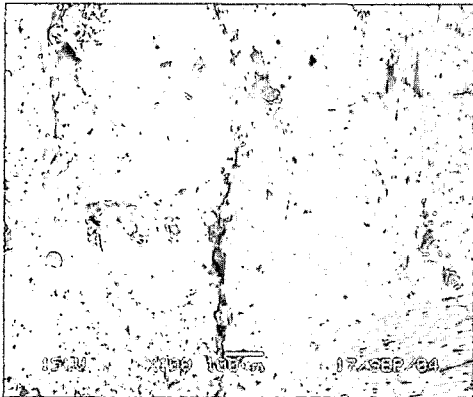


(c) Bottom Position of 0° C/C Nozzle Throat

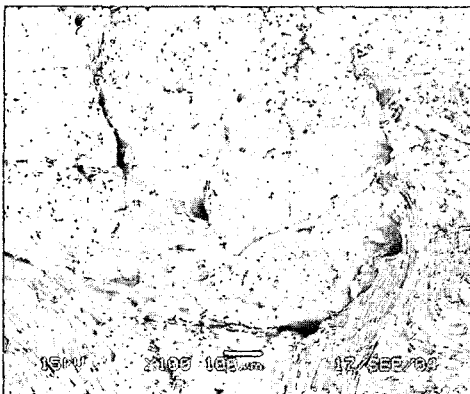
Fig. 11 Comparison of the Density Obtained by the Computed Tomography and Water Immersion Method

Figure 12는 탄소/탄소 목삽입제의 절단면을 전자주사현미경(SEM)으로 관찰한 결과로 전산화 단층촬영에서 측정된 밀도와 마찬가지로 안쪽 지름(A)보다 바깥 지름(B, C)으로 갈수록 기공이 점점 많아지는 것을 알 수 있다.

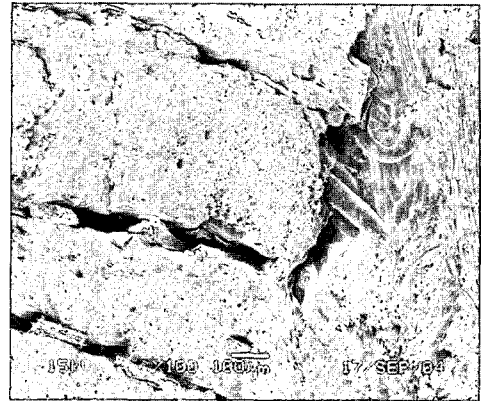
전산화 단층촬영 결과는 수침법에 의한 밀도 측정과 주사전자현미경 관찰을 통하여 검증하였으며 수침법에 의한 밀도 측정과 주사전자현미경의 영상과 대체로 일치함으로 전산화 단층촬영으로 탄소/탄소 목삽입제의 밀도를 파괴하지 않고 측정할 수 있다고 판단한다. 따라서, 전산화 단층촬영으로 탄소/탄소 목삽입제의 밀도를 파괴하지 않고 측정할 수 있으며 향후 밀도 분포에 대한 품질보증기법으로 활용할 수 있다고 판단된다.



(a) Top A Position



(b) Top B Position



(c) Top C Position

Fig. 12 Cutting Section of Needle-Punched C/C Nozzle Throat at Top Position

5. 결 론

전산화 단층촬영의 영상을 분석하여 파괴하지 않고 탄소/탄소 목삽입제의 밀도를 평가할 수 있었으며 세부 연구 결과는 다음과 같다.

1. 탄소/탄소 목삽입제의 밀도를 측정하기 위하여 밀도분해능시편 및 표준밀도시편을 제작하였으며 전산화 단층촬영 장비의 밀도분해능은 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 이하로 판단한다.
2. 선속경화현상을 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 $\pm 0.01\text{ g}/\text{cm}^3$ 내에 있을 신뢰도는 96.36%일 것으로 예상된다. 후연 목삽입제를 이용하여 신뢰도를 검증한 결과 측정 밀도가 $\pm 0.01\text{ g}/\text{cm}^3$ 내에 98.74% 분포하였다.
4. 전산화 단층촬영으로 측정된 탄소/탄소 목삽입제의 밀도는 안쪽 지름에서 바깥지름으로 갈수록 A, B, C의 순서로 순차적으로 낮아지고 있으며 밀도 분포는 $1.804\text{ g}/\text{cm}^3 \sim 1.851\text{ g}/\text{cm}^3$

내에 분포하였고 절단면에 대한 전자주사현미경의 결과와도 일치하였다.

5. 전산화 단층촬영에서 측정된 밀도와 수침법으로 측정된 밀도 차이는 평균적으로 0.0083 g/cm^3 이므로 전산화 단층촬영의 밀도 측정과 절단 후 수침법의 밀도가 비교적 잘 일치하였다.

6. 따라서, 전산화 단층촬영으로 탄소/탄소 목삽입재의 밀도를 파괴하지 않고 측정할 수 있으며 향후 밀도 분포에 대한 품질보증기법으로 활용 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