

초음파 처리 조건에 따른 질화붕소나노튜브 구조 변화 및 분산성 평가

천다빈* · 최원정** · 유승화*·**†

Evaluation of Structural Changes and Dispersibility of Boron Nitride Nanotubes under Different Ultrasonication Conditions

Da Bin Cheon*, Won Jung Choi**, Seung Hwa Yoo*·**†

ABSTRACT: Boron nitride nanotubes (BNNT) are materials of significant interest in next-generation technological fields due to their outstanding physicochemical properties, including excellent chemical and thermal stability. However, for effective utilization, dispersion of BNNT is essential. Unfortunately, BNNT exhibit hydrophobic surfaces and strong van der Waals forces, making their dispersion challenging. Current dispersion methods include the addition of surfactants and surface functionalization, but these chemical treatments often damage BNNT and involve cumbersome processes. In this study, we dispersed BNNT in water under various tip ultrasonication conditions and identified conditions that do not affect BNNT using FT-IR spectroscopy, Raman spectroscopy, and X-ray diffraction analysis. Subsequently, enhanced dispersibility was confirmed through turbidity measurements, and the solubility range in 15 different solvents was evaluated using the Hansen solubility parameter.

초 록: 질화붕소나노튜브(boron nitride nanotubes, BNNT)는 우수한 화학적 및 열적 안정성 등의 뛰어난 물리화학적 특성을 지녀 차세대 기술 분야에서 주목받는 소재이다. 이를 활용하기 위해서는 분산이 필수적이거나, BNNT의 소수성 표면 및 반데르발스 응집력으로 인하여 분산이 어렵다는 단점이 있다. 현재까지 연구된 분산 방법으로는 계면활성제 첨가, 표면기능화 등이 있으나, 이러한 화학적 처리는 대부분 BNNT에 손상을 입히며 번거로운 공정이 포함된다. 이에 본 연구에서는, tip 초음파 처리 시간 조건별로 BNNT를 물에 분산시키고 FT-IR spectroscopy, Raman spectroscopy, X-ray diffraction, Scanning electron microscopy 분석 등을 통해 BNNT에 영향을 미치지 않는 tip 초음파 처리 조건을 파악하였다. 이후, 탁도를 통해 향상된 분산성을 확인하였으며 Hansen solubility parameter를 통해 15가지의 용매에서 용해도 범위를 평가하였다.

Key Words: 질화붕소나노튜브(Boron nitride nanotubes), 분산(Dispersion), 초음파 처리(Ultra sonication), 한센 용해도 매개변수(Hansen solubility parameter)

1. 서 론

질화붕소나노튜브(boron nitride nanotubes, BNNT)는 탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNT)와 유사한 구조로 이루어져 있으나, 탄소 단원자로 구성된 CNT와 달리, 질소와 붕

소로 구성되어 있다[1]. 전자가 질소 주위로 치우쳐 부분 이온 결합을 띠고 있으며[2], 5~6 eV의 넓은 밴드 갭으로 인해 전기적으로 절연성을 지닌다[3,4]. 또한, 화학적 안정성으로 인하여 대부분 산·염기에서 불활성이며[5], 약 900°C 까지도 높은 열적 안정성을 지닌다[6,7]. 우수한 기계적 특

Received 15 July 2024, received in revised form 30 July 2024, accepted 21 August 2024

*Department of Applied Plasma & Quantum Beam Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

**Department of Quantum System Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

†Corresponding author (E-mail: seunghwayoo@jbnu.ac.kr)

성으로 인해 복합재 필러로도 이용되며[8], 중성자 흡수 단면적이 높은 붕소를 다량으로 지녀, 원자력 발전소 등의 차폐 재료로도 이용이 가능하다[9,10]. 뿐만 아니라, 나노 및 바이오 분야에서도 활용할 수 있을 것으로 기대되는 차세대 소재로 주목받고 있다[11]. 그러나, 이러한 장점들을 활용하려면 분산이 필수적인 요소로 꼽히는데, BNNT의 반데르발스 응집력 및 소수성 표면 등으로 인하여 응용을 위한 분산이 어려워 현재까지도 연구가 진행되고 있다. 분산을 돕기 위한 표면기능화, 계면활성제 첨가 등의 화학적 처리 방법에 관한 다양한 연구들이 존재하나, 대부분 BNNT에 손상을 입히고, 번거로운 공정을 거쳐야 한다[12-14]. 이에, 본 연구에서는 tip 초음파 처리 시간 조건별로 분산한 BNNT에 대해 분석하고, 적절한 시간 조건을 선정하고자 하였다. 또한, 한센 용해도 매개변수(Hansen solubility parameter, HSP)를 통해 15가지의 용매에서 분산성 및 용해도 범위를 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료

본 연구에서 BNNT는 NAIEEL technology (Korea)의 제품인 NanoBorNT-90 (직경: 30~50 nm, 길이: 5~10 μm , 순도: 90 wt%)을 구매하여 받은 그대로 사용하였다. NanoBorNT-90 분말은 90% 이상의 BNNT와 9% 이하의 h-BN 및 Mg, Fe, N-H 결합 등이 포함되어 있다. 용매로는 3차 증류수를 사용하였다.

2.2 샘플 준비

BNNT 10 mg을 10 ml의 물에 혼합한 후 500 W tip 초음파 장비(VC-505, Sonics & Materials, Inc.)를 이용하여 처리하였다. 초음파 처리 조건은 amplitude는 26%, 처리 2분, 쉬는 시간 2초로 하여 총 처리 시간을 2분 2초로 설정하였다.

2.3 분산 샘플 준비

BNNT 1 mg을 물 10 ml와 혼합하고 15 ml conical tube에 담아 2, 5, 16, 32분 tip 초음파 처리하여 제조하였다. 이후, 바이알 병에 옮겨 2시간 동안 방치하여 응집된 BNNT를 가라앉히고, 상층액 육안관찰을 진행하였다.

2.4 특성 분석

시간별로 tip 초음파 처리한 BNNT의 구조적 차이를 확인하기 위해 FT-IR, Raman spectroscopy, XRD, FE-SEM을 이용하였다. 10 mg/ml 농도로 물에 분산한 샘플을, 24시간 동안 진공 건조하여 분말을 회수하였다. FT-IR은 Fourier transform infrared spectrometer (FT/IR-8X, Jasco) 장비를 사용하여 resolution 1 cm^{-1} , $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 범위에서 감쇠 전

반사 (attenuated total reflection, ATR) 모드로 분석을 진행하였다. Raman spectroscopy는 High-performance 3D imaging Raman spectroscopy (Xplora, Horiba) 장비를 사용하였고, 532 nm 파장인 DPSS (diode pumped solid state) 레이저를 이용하여 0.02 mW의 출력으로 측정하였다. 또한, BNNT의 결정 변화 확인을 위해 XRD를 이용하였다. High power X-ray diffractometer (Smartlab, Rigaku) 장비를 사용하여, Cu K α ($\lambda = 1.54\text{ \AA}$) 선을 활용하여 스캔 속도와 2θ 범위를 각각 $4^\circ/\text{min}$ 과 $5\sim 90^\circ$ 로 측정하였다. 각 피크에 대한 d-spacing은 아래의 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$d\text{-spacing} = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (1)$$

BNNT의 튜브 형태 변화를 확인하기 위해 FE-SEM을 이용하였다. Field emission scanning electron microscopes (SUPRA40VP, Carlzeiss) 장비를 이용하여, accelerating voltage 2.0 kV에서 측정하였다. 샘플은 90초 백금 코팅하여 분석을 진행하였다.

2.4 분산성 평가

물에 분산된 BNNT는 turbidity meter (TL2350, Hach) 장비를 이용하여 탁도 분석을 통해 분산성을 확인하였다.

시간별로 tip 초음파 처리한 BNNT 특성 분석 결과를 기반으로 하여 tip 초음파 시간을 2분으로 조건을 선정해, acetone, benzyl alcohol, methanol, 2-propanol, chloroform, methylene dichloride (dichloromethane), ethyl acetate, toluene, ethanol, water, tetrahydrofuran (THF), n,n-dimethyl acetamide (DMA), dimethyl formamide (DMF), n-methyl-2-pyrrolidone (NMP), dimethyl sulfoxide (DMSO)의 총 15가지의 용매에 0.1 mg/ml의 농도로 분산시키고 한센 용해도 매개변수를 이용하여 분산성을 평가하였다. 용매의 매개변수 값은 Hansen solvent list를 참조하였으며, 소프트웨어는 HSPiP 5th Edition 5.4.05버전을 활용하였으며, genetic algorithm, inside를 1로 설정하여, 1점으로 평가한 용매가 구 내부에 위치할 수 있도록 fitting 하였다. 분산 샘플은 0, 7일차에 육안 관찰을 진행하였다. 7일 경과 후, 육안으로 평가한 분산 상태에 따라서 점수를 부여하였다(Fig. 1). 분산되지 않은 상태는 0점, 적당히 분산은 되어 있으나 가라앉은 상태는 2점, 완벽히 분산된 상태는 1점으로 평가하였다.



Fig. 1. Criteria for the evaluation of HSP scores

3. 결과 및 고찰

3.1 BNNT 특성 평가

Tip 초음파와 시간별로 분산한 BNNT 샘플을 회수하여 FT-IR spectroscopy를 분석하였다(Fig. 2). Pristine BNNT에서 777, 1336, 2922 cm^{-1} 에서 B-N-B, B-N, N-H 진동모드 및 933, 1081 cm^{-1} 에서 C-N 진동모드가 나타났다. Tip 초음파 처리한 샘플에서는 2850 cm^{-1} 에서 CH_2 가 새로 나타났는데, tip 초음파 처리 중 기존의 C-N 결합이 깨지고 C-H 결합이 형성된 것으로 판단된다. 또한, tip 초음파를 5, 16, 32분 처리한 샘플에서는 B-N 및 B-N-B 결합이 757, 1288 cm^{-1} 로 shift가 일어났다. CH_2 형성 및 B-N, B-N-B 피크의 shift를 통해 tip 초음파 처리로 인한 영향이 있음을 확인하였다.

BNNT는 E_{2g} 진동모드의 특성을 지녀 6각형 구조 원자들이 인접한 원자와 서로 반대 방향으로 진동한다. 본 연구의 다중벽 BNNT는 벽의 개수가 불규칙하여 직경이 30~50 nm

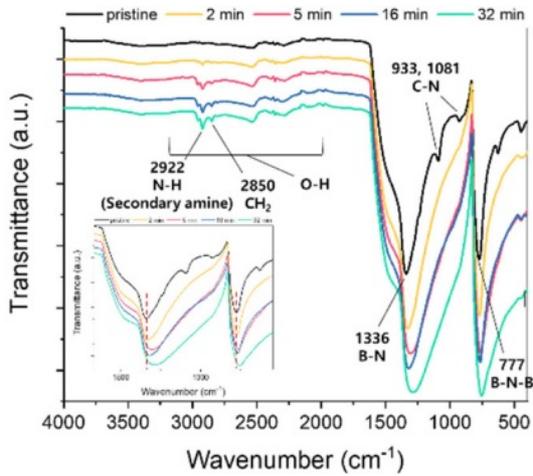


Fig. 2. FT-IR spectroscopy results of BNNT under different tip sonication conditions

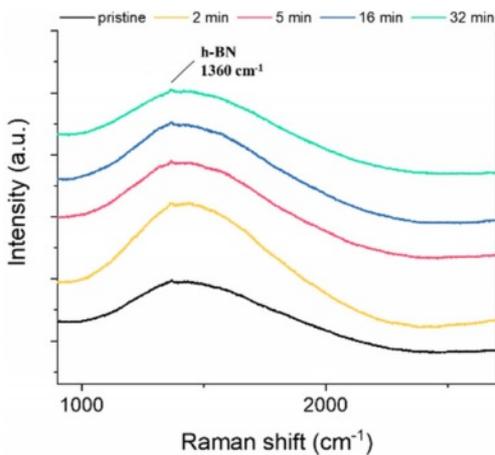


Fig. 3. Raman spectroscopy results of BNNT under different tip sonication conditions

로 크고, 튜브 구조 내의 곡률이 진동모드에 기여하기 때문에 브로드한 형태의 피크를 나타내는 것으로 사료된다(Fig. 3). 또한, 제품 자체의 불순물인 h-BN으로 인해 1360 cm^{-1} 주변에서 단일한 작은 피크가 나타난다. Tip 초음파 처리한 BNNT 샘플에서도 h-BN의 피크 및 BNNT 피크의 형태 변화 및 shift는 일어나지 않았으며, 초음파 처리 조건에 따른 구조적 변화는 없는 것으로 판단된다.

Fig. 4의 XRD 분석을 통해 tip 초음파 처리 시간 0, 2, 5, 16, 32분 별로 BNNT의 결정성 변화를 확인하였다. $2\theta = 26.600, 41.620, 54.990^\circ$ 에서 (002), (101), (004)의 BN 결정면 피크가 나타났으며, Tip 초음파 처리 전후 BNNT의 (002) 결정면 피

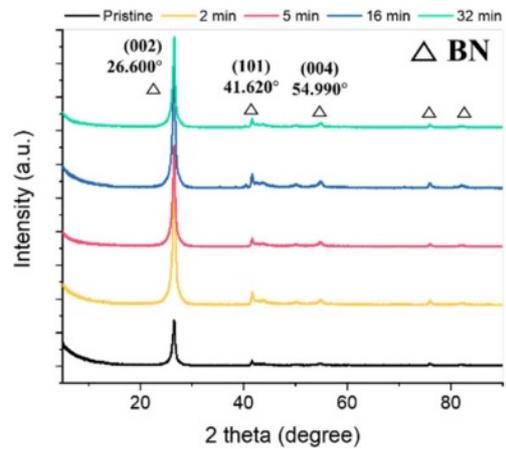


Fig. 4. XRD results of BNNT under different tip sonication conditions

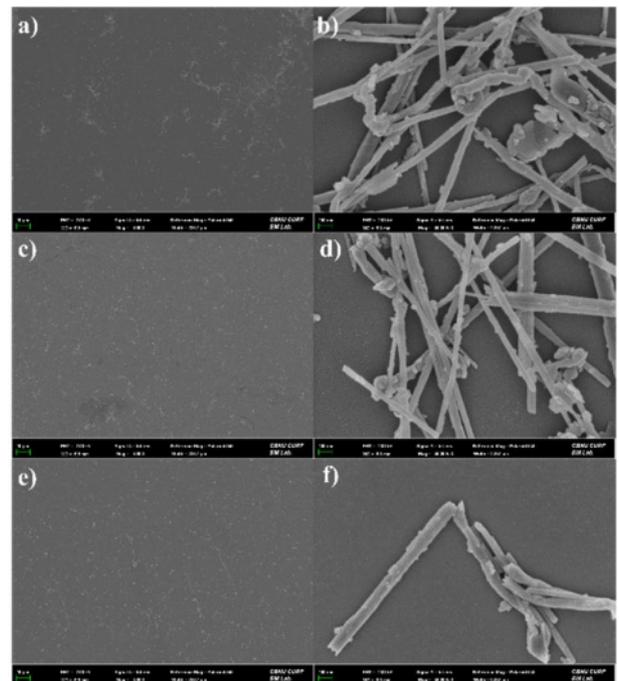


Fig. 5. FE-SEM images of dispersed BNNT under different tip sonication conditions: (a, b) pristine, (c, d) 2 min, (e, f) 32 min

크의 d-spacing 값은 3.347 Å로, 결정면의 변화는 없음을 확인하였다.

Fig. 5와 같이 FE-SEM 관찰을 통해 tip 초음파 처리 시간이 BNNT의 튜브 형태에 미치는 영향을 확인하였다. 저배율로 확인해 본 결과, 초음파 처리 전에는 응집된 BNNT들이 존재하나(Fig. 5a), tip 초음파 2분만 처리해도 응집된 BNNT들이 분산된 상태임을 알 수 있다(Fig. 5c). 32분 tip 초음파 처리한 샘플도 응집된 BNNT들은 보이지 않으나, 전체적으로 튜브들이 짧아진 것을 확인하였다(Fig. 5e). 이를 정량적으로 평가하기 위해 튜브 40개의 길이를 측정하고 통계적으로 처리하였다. Pristine, 2분 처리한 샘플, 32분 처리한 샘플의 BNNT 길이는 각각 $3.908 \pm 1.235 \mu\text{m}$, $2.152 \pm 0.690 \mu\text{m}$, $1.688 \pm 0.960 \mu\text{m}$ 로 pristine BNNT와 32분 처리한 BNNT의 평균 길이는 약 2배 이상 차이를 보였으며, 이는 과도한 초음파 처리에 의해 물리적인 손상을 입은 튜브들이 절단된 것으로 판단된다. 그러나, 고배율로 관찰하였을 때 튜브의 형태는 유지되는 것으로 확인하였다.

3.2 BNNT 분산성 평가

농도 0.1 mg/ml로 물에 분산한 BNNT의 육안 및 탁도 분석하였다(Fig. 6). 0일차에 pristine와 2분 tip 초음파 처리한 샘플은 응집된 BNNT들이 가라 앉았으나, 상층액이 불투명함을 확인하였다. 그러나, pristine BNNT는 3일차부터 상층액이 투명하며, 2분 처리한 샘플은 7일차부터 상층액이

투명하였다. 32분 처리한 샘플은 14일차까지도 가라앉은 BNNT들이 없었으며 안정적으로 분산된 것을 확인하였다.

탁도 분석 결과, 육안관찰과 일치하는 양상을 보였으나, 모든 샘플이 0~1일차에 탁도 값이 큰 폭으로 감소하였으며, 1일차 이후로는 2분 샘플과 32분 샘플의 감소폭이 큰 차이가 없는 것으로 확인하였다.

육안 및 탁도 분석 결과, 32분이 가장 안정적인 분산 상태를 나타냈으나, 위의 FT-IR spectroscopy 분석(Fig. 2)을 통해 tip 초음파 처리 5, 16, 32분 샘플에서 피크 shift를 확인하였으므로, 이후 Hansen solubility parameter 평가를 위해 제작한 샘플에서는 tip 초음파 처리 시간을 2분으로 선정하였다.

3.3 Hansen solubility parameter (HSP)

물질 사이의 상호 작용 정도에 대한 추정값을 응집 에너지 밀도(cohesive energy density, ΔE)를 이용한 수치로 나타내어 용해도를 표현한 지표로 매개변수, δ 로 나타낸다. ΔE 는 물질의 단위 부피 내에서 모든 분자 간의 결합을 끊기 위해 필요한 에너지이다. 이는 화합물의 기화열을 분자에 대한 몰 부피로 나눈 값과 같다(식 (2)).

$$\delta = \left(\frac{\Delta E}{V} \right)^{0.5} = \left(\frac{\Delta H_V - RT}{V} \right)^{0.5} \quad (2)$$

ΔH_V , R, T, V는 기화열, 기체 상수, 절대 온도 및 분자에 대한 몰 부피를 의미한다.

그러나, δ 만으로는 물질 사이의 상호작용을 고려하기 어려우므로, Hansen은 용해도 매개변수를 세 부분으로 나누어 δ_D , δ_P , δ_H 로, 각각 분자 사이의 분산력(dispersion force)으로 인한 에너지, 극성(polar)으로 인한 에너지, 수소 결합(hydrogen bonding)으로 인한 에너지에 관한 것으로 나타내었으며, 단위는 $\text{MPa}^{0.5}$ 와 같다.

$$(\delta_T)^2 = (\delta_D)^2 + (\delta_P)^2 + (\delta_H)^2 \quad (3)$$

매개변수를 이용하여 δ_D , δ_P , δ_H 를 각각 x축, y축, z축으로 하는 3차원 공간인 HSP space에서 한 물질이 다른 물질에 용해되어 용액을 형성하는지 예측하고, 용해도 범위를 추정할 구를 형성하였다. 한 물질의 HSP는 δ_D , δ_P , δ_H 를 원점으로 하고, δ_T 를 반지름으로 하는 구를 형성하며, 용매와 용매 사이의 거리 R_a 는 다음 식 (4)과 같이 구할 수 있다.

$$(R_a)^2 = 4(\delta_{D2} - \delta_{D1})^2 + (\delta_{P2} - \delta_{P1})^2 + (\delta_{H2} - \delta_{H1})^2 \quad (4)$$

δ_{D2} , δ_{P2} , δ_{H2} 는 용매의 매개변수, δ_{D1} , δ_{P1} , δ_{H1} 는 용질의 매개변수를 의미한다. 구 내부에는 용매와 용질의 매개변수가 존재하며, 용매의 매개변수가 용질의 매개변수인 구의 중심에 가까울수록 용해될 가능성은 증가한다. 또한, 상대적인 에너지 차이(relative energy difference, RED)를 이용하

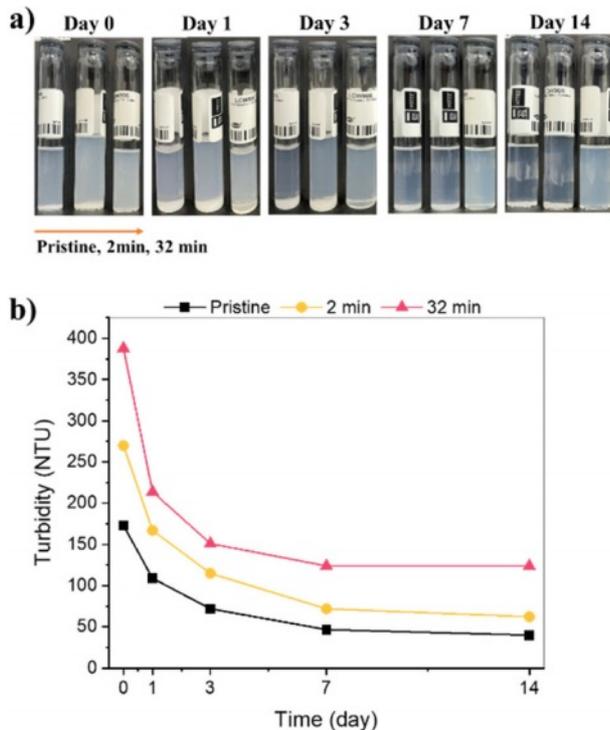


Fig. 6. a) visual observation and b) turbidity measurement results of dispersed BNNT under different tip sonication conditions



Fig. 7. Visual observation results of dispersed BNNTs: (a) Day 0 and (b) Day 7

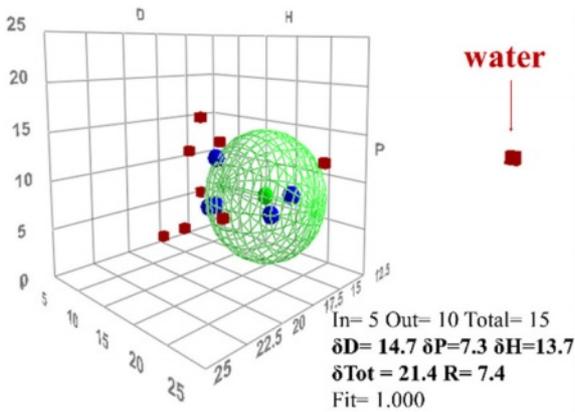


Fig. 8. HSP Results of BNNT

여 HSP space에서 혼합물의 위치를 확인할 수 있으며, RED는 식 (5)와 같이 R_a 를 용질의 구 반지름이자 상호작용 반경인 R_0 로 나누어 구할 수 있다.

$$RED = \frac{R_a}{R_0} \quad (5)$$

RED < 1이면, 용매는 용질의 구 범위 내에 위치하며 용질과 용매는 동일한 용해도를 가진다. RED = 1이면, 용매는 용질의 구 범위의 경계에 위치하고 부분적으로 용해될 수 있다. RED > 1이면, 용매는 구 범위 바깥에 위치하여 용해가 불가능하다.

Tip 초음파 2분 처리한 BNNT를 15가지의 용매에 분산하고, 0일차, 7일차를 관찰하였다(Fig. 7). 7일차 결과를 기반으로 용매에 점수를 매겼다(Table 1). 7일 경과 후, 2-propanol, ethyl acetate, ethanol, THF, DMA에서 가장 안정적인 분산 상태를 보였으며, acetone, methanol, chloroform, water, DMF, NMP에서 분산은 되어 있으나, 응집된 BNNT들이 가라앉은 상태를 보였다. Benzyl alcohol, dichloromethane, toluene, DMSO에서는 모든 BNNT들이 가라앉은 것을 확인하였다. 0점은 구 바깥에, 1점은 구 내부에, 2점은 구 경계에 위치하도록 fitting하면, 다음과 같은 3차원 그래프를 형성한다

Table 1. HSP Evaluation of Pristine BNNT

	Solvent	δ_D	δ_P	δ_H	Score	RED
1	Acetone	15.5	10.4	7	2	1.027
2	Benzyl alcohol	18.4	6.3	13.7	0	1.01
3	Methanol	14.7	12.3	22.3	2	1.348
4	2-Propanol	15.8	6.1	16.4	1	0.495
5	Chloroform	17.8	3.1	5.7	2	1.485
6	Methylene Dichloride	17	7.3	7.1	0	1.092
7	Ethyl Acetate	15.8	5.3	7.2	1	0.97
8	Toluene	18	1.4	2	0	1.989
9	Ethanol	15.8	8.8	19.4	1	0.85
10	Water	15.5	16	42.3	2	4.056
11	Tetrahydrofuran (THF)	16.8	5.7	8	1	0.984
12	N,N-Dimethyl Acetamide (DMA)	16.8	11.5	9.4	1	0.997
13	Dimethyl Formamide (DMF)	17.4	13.7	11.3	2	1.183
14	n-Methyl-2-Pyrrolidone (NMP)	18	12.3	7.2	2	1.429
15	Dimethyl Sulfoxide (DMSO)	18.4	16.4	10.2	0	1.662

(Fig. 8).

BNNT의 δ_D , δ_P , δ_H 는 각각 14.7, 7.3, 13.7 MPa^{0.5}를 나타냈다. BNNT 제품 자체에 포함된 NH 등으로 인해 δ_H 가 높은 것으로 판단되며, tip 초음파 처리의 영향으로 BNNT의 분산성이 향상되며 δ_D 가 14.7로 높은 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 Tip 초음파를 이용해 BNNT의 물리적 분산을 시도하고, 여러 분석을 통해 초음파 시간 조건별로 물에 분산한 BNNT 특성 평가를 진행하여 최적의 조건을 선정하였다. 선정한 조건을 기반으로 하여, 탁도 측정을 수행하여 물에서의 분산성을 평가하였으며, Hansen solubility parameter를 통해 15가지 용매에 분산시키고 용해도 범위 평가를 실시하였다.

본 연구에 이용한 BNNT에는 본래 C-N 결합이 존재하는데, FT-IR 분석을 통해 tip 초음파 처리에 의해 C-N 결합이 깨지고 C-H 결합이 생성되었음을 확인하였다. 또한, tip 초음파 5, 16, 32분 처리 조건에서는 B-N 및 B-N-B가 shift 되었으므로, tip 초음파 처리의 영향인 것으로 판단된다. 그러나, raman spectroscopy 및 XRD에서는 초음파 처리 조건에 따른 구조적 및 결정성 변화는 없음을 확인하였다. FE-SEM을 통해서도 pristine BNNT 및 tip 초음파 2, 32분 처리한 BNNT를 분석하였으며, tip 초음파 처리 시간이 길어질수록

록 응집된 BNNT들이 보이지 않았으나, 튜브가 짧아짐을 확인하였다.

추가적으로 tip 초음파 2, 32분 처리 조건에서 육안관찰 및 탁도 분석을 실시하여 pristine BNNT보다 향상된 분산성 및 분산 안정성을 확인하였다. 이를 바탕으로, 특성 분석 결과와 비교하여 tip 초음파 시간 2분을 최적의 조건으로 선정하였다.

이후, 15가지의 용매에 tip 초음파 처리 2분 처리 조건으로 BNNT를 분산시키고, 0, 7일차 육안관찰을 시도하였다. 7일차 육안관찰 결과를 기반으로 점수를 매기고, Hansen solubility parameter를 통하여 용해도 범위를 평가한 결과, δ_D , δ_P , δ_H 는 각각 14.7, 7.3, 13.7 MPa^{0.5}를 나타냈으며, tip 초음파 처리로 인한 분산 개선 및 BNNT 제품 자체의 불순물인 NH 등으로 인하여 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 tip 초음파 처리 시간 조건에 따른 BNNT의 특성을 평가함과 동시에 최적의 조건을 선정하였으며, 분산성 및 분산 안정성 향상을 확인할 수 있었다. 또한, Hansen solubility parameter를 통해 용해도 범위를 평가하였다.

후 기

이 논문은 2023년 국립대학 육성사업의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- Cohen, M.L., and Zettl, A., "The Physics of Boron Nitride Nanotubes," *Physics Today*, Vol. 63, No. 11, 2010, pp. 34-38.
- Golberg, D., Bando, Y., Tang, C.C., and Zhi, C.Y., "Boron Nitride Nanotubes," *Advanced Materials*, Vol. 19, No. 18, 2007, pp. 2413-2432.
- Kalay, S., Yilmaz, Z., Sen, O., Emanet, M., Kazanc, E., and Çulha, M., "Synthesis of Boron Nitride Nanotubes and Their Applications," *Beilstein Journal of Nanotechnology*, Vol. 6, No. 1, 2015, pp. 84-102.
- Radosavljevic, M., Appenzeller, J., Derycke, V., Martel, R., Avouris, P., Loiseau, A., Cochon, J.L., and Pigache, D., "Electrical Properties and Transport in Boron Nitride Nanotubes," *Applied Physics Letters*, Vol. 82, No. 23, 2003, pp. 4131-4133.
- Golberg, D., Bando, Y., Huang, Y., Terao, T., Mitome, M., Tang, C., and Zhi, C., "Boron Nitride Nanotubes and Nanosheets," *ACS Nano*, Vol. 4, No. 6, 2010, pp. 2979-2993.
- Chang, C. W., Fennimore, A. M., Afanasiev, A., Okawa, D., Ikuno, T., Garcia, H., Li, D., Majumdar, A. and Zettl, A., "Isotope Effect on the Thermal Conductivity of Boron Nitride Nanotubes," *Physical Review Letters*, Vol. 97, No. 8, 2006, pp. 085901.
- Blase, X., Rubio, A., Louie, S.G., and Cohen, M.L., "Stability and Band Gap Constancy of Boron Nitride Nanotubes," *Europhysics Letters*, Vol. 28, No. 5, 1994, pp. 335.
- Choi, S.Y., and Yang, S.H., "Molecular Dynamics and Micromechanics Study on Mechanical Behavior and Interfacial Properties of BNNT/Polymer Nanocomposites," *Composites Research*, Vol. 30, No. 4, 2017, pp. 247-253.
- Kim, J.H., Pham, T.V., Hwang, J.H., Kim, C.S., and Kim, M.J., "Boron Nitride Nanotubes: Synthesis and Applications," *Nano Convergence*, Vol.5, No. 1, 2018, pp. 17.
- Silva, W.M., Ribeiro, H., and Taha-Tijerina, J.J., "Potential Production of Theranostic Boron Nitride Nanotubes (⁶⁴Cu-BNNTs) Radiolabeled by Neutron Capture," *Nanomaterials*, Vol. 11, No. 11, 2021, pp. 2907.
- Yang, S.H., "An Essay of the Reinforcing Effect of BNNT and CNT: A Perspective on Interfacial Properties," *Composites Research*, Vol. 37, No. 3, 2024, pp. 155-161.
- Lee, C.H., Zhang, D., and Yap, Y.K., "Functionalization, Dispersion, and Cutting of Boron Nitride Nanotubes in Water," *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 116, No. 2, 2012, pp. 1798-1804.
- Guan, J., Ashrafi, B., Martinez-Rubi, Y., Jakubinek, M.B., Rahmat, M., Kim, K.S., and Simard, B., "Epoxy Resin Nanocomposites with Hydroxyl (OH) and Amino (NH₂) Functionalized Boron Nitride Nanotubes," *Nanocomposites*, Vol. 4, No. 1, 2018, pp. 10-17.
- Lu, X., Nautiyal, P., Bustillos, J., Loganathan, A., Zhang, C., Chen, Y., Boesl, B., and Agarwal, A., "Hydroxylated Boron Nitride Nanotube-reinforced Polyvinyl Alcohol Nanocomposite Films with Simultaneous Improvement of Mechanical and Thermal Properties," *Polymer Composites*, Vol. 41, No. 12, 2020, pp. 5182-5194.