

## 다중벽 탄소나노튜브의 형상인자에 따른 고분자 복합재료의 탄성계수에 관한 연구

서 종 환\*†

\* 성균관대학교 고분자시스템공학과

### Geometry Effect of Multi-Walled Carbon Nanotube on Elastic Modulus of Polymer Composites

Jonghwan Suhr\*†

\* Dept. of Polymer Science & Engineering, Sungkyunkwan Univ.

(Received October 22, 2013; Revised October 31, 2013; Accepted November 2, 2013)

**Key Words:** Micromechanics(미시역학), Representative Volume Element(대표체적요소), Finite Element Analysis(유한요소해석), Elastic Modulus(탄성계수), Multi-walled Carbon Nanotube(다중벽 탄소나노튜브)

**초록:** 탄소나노튜브는 우수한 기계적 특성으로 인해 주목받고 있으며, 다양한 산업 분야로의 잠재적 활용성을 갖는 고강도/고강성의 나노복합재료를 설계/제작하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 다중벽 탄소나노튜브를 이용한 강화 복합재료를 효과적으로 설계하고, 기계적 물성을 예측/평가하기 위한 미시역학적 해석 방법 연구를 수행하였다. 이를 위해 먼저 대표체적요소 모델을 설계하고 이를 이용한 유한요소 해석을 통해서 강화 복합재료의 기계적 물성을 평가하였다. 특히 MWCNT의 각 형상인자에 따른 복합재료의 탄성계수 변화를 예측하고, 각 인자들의 영향을 정성적으로 평가하였다. 더불어 형상인자들의 복합적 조건에서의 탄성계수에 대한 영향 평가도 수행하였다.

**Abstract:** The high Young's modulus and tensile strength of carbon nanotubes has attracted great attention from the research community given the potential for developing super-strong, super-stiff composites with carbon nanotube reinforcements. Over the decades, the strength and stiffness of carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites have been researched extensively. However, unfortunately, such strong composite materials have not been developed yet. It has been reported that the efficiency of load transfer in such systems is critically dependent on the quality of adhesion between the nanotubes and the polymer chains. In addition, the waviness and orientation of the nanotubes embedded in a matrix reduce the reinforcement effectiveness. In this study, we carried out performed micromechanics-based numerical modeling and analysis by varying the geometry of carbon nanotubes including their aspect ratio, orientation, and waviness. The results of this analysis allow for a better understanding of the load transfer capabilities of carbon nanotube-reinforced polymer composites.

#### 1. 서론

우수한 기계적/전기적/열적 특성을 갖는 탄소나노튜브(CNT, carbon nanotube)를 이용한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 다양한 산업 분야로의 적

용을 위한 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 그 중에서도 탄소나노튜브를 여러 고분자 재료와 혼합하여 분산시킨 나노복합재료는 우수한 기계적 성질 뿐만 아니라 전기적, 열적 특성을 제어할 수 있어 가장 주목받고 있는 연구 분야라고 할 수 있다.<sup>(1-3)</sup> 특히 대량생산 체계가 갖춰진 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT, multi-walled carbon nanotube)를 활용한 고분자 재료의 기계적 강도 향상에 대한 연구는 기존 고분자 재료의 제조공정을 그대로 활

† Corresponding Author, suhr@skku.edu

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

용하면서 효과적으로 강화 복합재료를 제작 할 수 있다는 장점 때문에 저비용 대량생산과 우수한 기계적 강도가 동시에 요구되는 부품소재 산업에 활용될 수 있는 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.<sup>(1)</sup> 하지만 선행연구 결과들에 따르면 고분자 재료 내에서 MWCNT의 강화효과를 기대한 만큼 효과적으로 얻을 수 없는 것으로 보고 되었다. 따라서 제품에 요구되는 충분한 기계적 강도를 얻을 수 있는 MWCNT 강화 복합재료를 설계/제작하기 위해서는 먼저 MWCNT와 기지재료(Matrix) 사이의 하중 전달과 관련한 연구와 이해가 선행 되어야 한다. 특히 계면(Interface)에서의 결합강도(Bonding strength)나 경계 영역의 물성, MWCNT의 형상인자에 따른 강화 복합재료의 기계적 물성 영향 등에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 다중벽 탄소나노튜브를 이용한 강화 복합재료를 효과적으로 설계하고, 기계적 물성을 예측하기 위한 해석적 방법 연구를 수행하였다. 특히 미시역학적 접근 방법인 대표체적요소 모델(RVE, representative volume element)를 이용한 유한요소 해석을 통해 기계적 물성을 예측하고 평가하였다. 그러기 위해서 먼저 MWCNT의 대표적인 형상 변수인 세장비(Aspect ratio)와 배열방향(Orientation), 섬유과형(Waviness) 등을 정의하고, 이들 인자들을 반영할 수 있도록 RVE 모델을 설계하였다. 또한 설계된 RVE 모델을 이용한 유한요소 해석을 통해 각각의 형상인자에 따른 강화 복합재료의 탄성계수를 예측하고, 각 인자들의 영향을 정성적으로 평가하였다. 더불어 MWCNT의 배열방향과 섬유과형의 복합적 조건에서 나노복합재료의 탄성계수에 대한 영향 평가도 수행하였다.

## 2. 대표체적요소 모델

### 2.1 탄소나노튜브의 형상인자

본 논문은 MWCNT의 형상에 따른 강화 복합재료의 탄성계수 변화를 대표체적요소를 이용한 미시역학적 해석방법을 통해 예측하고, 영향을 평가하는 것을 목적으로 한다. MWCNT의 대표적인 형상 변수로는 크게 세장비와 배열방향, 섬유과형 등으로 구분할 수 있다. 여기서 세장비는 섬유의 직경(D)에 대한 길이(L)로 정의 하며, 배열방향은 하중의 전달 방향에 대한 MWCNT의 상대적인 배열 방향 또는 각도로 정의할 수 있다. 마지막으로 섬유과형은 섬유의 파장(Wavelength,  $\lambda$ )에 대한 진폭(Amplitude, A)의 비로 정의하며, 이때 섬유의 직경에 대한 파장의 비를 파장비(Wavelength

ratio)라 한다.<sup>(4-6)</sup> 따라서 MWCNT가 첨가된 강화 복합재료의 기계적 물성을 예측하고 각 인자의 영향을 평가하기 위해서는 이러한 각각의 MWCNT 형상인자들을 고려할 수 있도록 RVE 모델이 설계 되어야 한다.

탄소나노튜브와 탄소단섬유를 이용한 강화 복합재료에서 섬유가 주변 기지재료로부터 하중을 충분히 전달받기 위해서는 섬유의 길이가 임계길이(Critical length) 이상이 되어야 한다.<sup>(7,8)</sup> Wagner 등<sup>(9,10)</sup>의 연구 결과에 따르면 MWCNT의 임계길이는 직경이 10 ~ 20 nm 일 때 대략 50 ~ 500 nm 인 것으로 발표되었다. 이러한 임계길이는 MWCNT의 형상인자 중 세장비와 직접적으로 관계되며, 본 연구에서는 직경이 20 nm 인 MWCNT의 길이 변수를 각각 500 / 1000 / 2000 / 5000 / 10000 nm로 정의 하였다.

일반적으로 섬유강화 복합재료에서 섬유의 방향은 복합재료의 일방향 물성을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 이와 유사하게 MWCNT가 첨가된 강화 복합재료 역시 MWCNT의 배열 방향에 따라서 강화 복합재료의 기계적 물성이 큰 영향을 받을 것으로 판단된다. 선행연구에 따르면 배열 방향이 0°에서 40°로 증가함에 따라서 탄성계수가 급격히 감소하다가 그 이상의 각도에서는 거의 일정한 값으로 수렴함을 확인 할 수 있다.<sup>(4)</sup> 따라서 본 논문에서는 MWCNT의 배열방향을 각각 0 / 10 / 20 / 30 / 40°로 정의하였다.

Fig. 1은 MWCNT가 0.1 wt% 첨가된 폴리스티렌(Polystyrene) 복합재료의 TEM(Transmission Electron Microscope) 이미지를 바탕으로 MWCNT의 전체 섬유과형 분포를 실험적으로 나타낸 그래프이다.<sup>(5)</sup> TEM 사진에서 보는 것과 같이 MWCNT의 형상은 직선이 아닌 곡률을 갖는 곡선 단섬유 형태를 가지며, 곡률의 크기와 형태도 다양하게 존재한다. 따라서 앞선 배열방향의 영향과 마찬가지로 곡률의 형태에 따라서 하중의 전달 방향과 섬유의 배

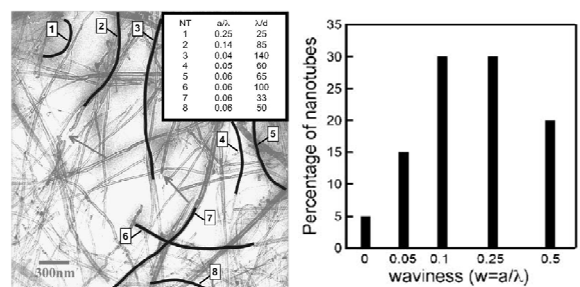


Fig. 1 (a) TEM image of multi-walled carbon nanotubes and (b) their waviness distribution<sup>(5)</sup>

열 방향이 부분적으로 차이를 갖게 될 것으로 예상할 수 있다. 또한 이러한 방향의 불일치는 강화 섬유가 충분히 하중을 지지하지 못하게 하고, 이로 인해서 복합재료의 기계적 물성을 저하시키는 원인으로 작용하게 된다.<sup>(5,6)</sup> 따라서 본 논문에서는 MWCNT의 섬유과형을 각각 0.0 / 0.05 / 0.10 / 0.25 / 0.50로 정의 하였다.

2.2 대표체적요소 모델 생성

MWCNT를 이용한 강화 복합재료의 기계적 물성을 예측하기 위해서 미시역학적 접근 방법인 대표체적요소 모델을 이용한 유한요소 해석을 활용하였다. 특히 MWCNT의 형상 변수들에 따른 강화 복합재료의 탄성계수 변화를 효과적으로 예측하고 평가할 수 있도록 대표체적요소 모델을 선정하고 설계하였다. 먼저 RVE 모델을 설계하기 위해서는 몇 가지 고려사항이 있는데, 모델의 형상과 계면의 형태, 섬유 끝단의 모양 등이다. 먼저 모델의 형상은 크게 원형과 정사각형, 육각형이 있으며, 계면의 형태는 섬유와 기재재료 사이의 Perfect bonding과 얇은 Interphase 결합 형태가 있다. 마지막으로 섬유의 끝단 모양에 따라서 Open cylinder end와 Close end 형태로 나눌 수 있다.<sup>(10)</sup> 선행연구에 따르면 MWCNT 강화 복합재료의 탄성계수를 예측함에 있어서 정사각형 모양의 모델이 원형과 육각형의 RVE 모델보다 정확한 수치해석 결과를 얻을 수 있다. 반면 끝단의 형태는 전체 해석결과에 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고되었다.<sup>(6,10~12)</sup>

본 논문에서는 효율적이며, 정확한 수치해석 결과를 얻기 위해서 Close end를 갖는 사각형 RVE 모델을 선정하고, 섬유와 기재재료 사이의 경계조건을 Perfect bonding을 가정하였다. 또한 MWCNT의 형상인자에 따른 강화 복합재료의 탄성계수에 대한 영향만을 평가하기 위해서 MWCNT의 체적비(Volume

fraction)을 1.0 vol%로 고정하여 설계하였다. MWCNT의 형상 변수인 세장비와 배열방향, 섬유 과형 등을 고려할 수 있도록 설계된 사각형 Half-RVE 모델을 Fig. 2에 나타내었다.

3. 유한요소 해석

3.1 유한요소 모델 생성

MWCNT 강화 복합재료의 탄성계수를 수치 해석적 방법을 통해 계산하기 위해서 상용 프로그램인 ABAQUS 6.11을 활용하였다. 또한 설계된 3차원 RVE 모델을 이용한 유한요소 모델을 구성하기 위해서 8개의 절점을 갖는 육면체 요소(C3D8R)를 사용하였다. 경계조건으로는 직교좌표계를 사용하여 x축은 섬유 방향이고 섬유의 단면 방향인 z축에 대칭 경계조건을 적용하였다. 또한 RVE 모델의 왼쪽 면을 x축 방향에 대한 자유도(Degree of freedom)를 구속하고 반대쪽 면에 x축 방향으로 인장하중을 부과하였다.

본 연구에서는 사용된 강화재료인 MWCNT와 기지재료인 PA66를 등방성(Isotropic)의 재료로 가정하여 그 물성치를 Table 1에 정리하였다. 특히 MWCNT의 탄성계수에 대한 선행연구에 따르면 화학기상증착법(CVD, chemical vapour deposition)을 통해 제조된 다중벽 탄소나노튜브는 내부에 존재하는 많은 결함들로 인해 30 ~ 100 GPa의 낮은 값을 보이는 것으로 발표되었다.<sup>(13,14)</sup> 본 논문에서는 강화재료로 CVD로 합성된 MWCNT를 선정하여 탄성계수가 30 / 50 / 100 GPa인 경우에 대해서 유한요소 해석을 수행하였다.

3.2 RVE 모델을 이용한 유한요소 해석

대표적으로 MWCNT의 섬유과형, 파장비, 배열 방향이 각각 0.10, 50, 0°인 RVE 모델에 대해서 인장하중 작용 시 유한요소 모델의 유효 응력 분포(von Mises) 결과를 아래 Fig. 3에서 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 MWCNT의 중심 부분에서만 높은 응력값을 가지며, 대부분의 영역에서는 낮은 응력 분포가 나타남을 확인할 수 있다. 이

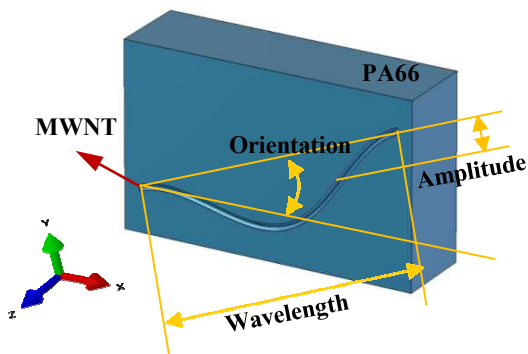


Fig. 2 A schematic of a half RVE model for MWCNT reinforced PA66 Composites

Table 1 Material properties of MWCNT and PA66

Properties	MWCNT	PA66
Young's Modulus	30 ~ 100 GPa	3.14 GPa
Poisson Ratio	0.30	0.38
Density	1.80 g/cm <sup>3</sup>	1.15 g/cm <sup>3</sup>

러한 응력 분포 결과를 갖는 이유는 MWCNT 의 섬유과형에 의해서 하중의 진행 방향과 섬유의 배열 방향이 불일치함에 따라서 MWCNT 가 충분히 하중을 전달받아 지지하지 못하기 때문이다. 따라서 방향이 일치하는 중심을 제외하고 대부분의 위치에서 낮은 응력값을 보이는 것이다. 그러므로 강화 복합재료의 탄성계수 역시 저하시키는 원인으로 작용하게 된다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 MWCNT 의 세장비에 따른 영향

본 논문에서는 MWCNT 의 탄성계수를 각각 30 / 50 / 100 GPa 로 증가시키면서 MWCNT 의 형상 변화에 따른 강화 복합재료의 탄성계수 영향을 RVE 모델을 이용한 유한요소 해석을 통해 살펴보았다. 아래 Fig. 4 는 MWCNT 의 세장비에 따른 강화 복합재료의 탄성계수 변화를 비교한 그래프이다. 해석 결과를 효과적으로 비교하기 위해서 기지재료인 PA66(E = 3.14 GPa)의 탄성계수를 기준으로 정규화된 탄성계수 값으로 계산하여 나타낸 그래프이다. 유한요소 해석을 위한 RVE 모델 설계에 있어 MWCNT 의 세장비 영향만을 고려하기 위해서 나머지 형상 변수인 배열방향과 섬유과형은 각각 0°, 0.0 으로 고정하였다. 또한 MWCNT 의 체적비를 1.0 vol%로 유지하도록 각각의 RVE 모델을 설계하였다. 결과에 따르면 세장비가 25 에서 100 으로 증가함에 따라서 강화 복합재료의 탄성계수도 역시 조금씩 증가하지만, 세장비가 100 이상의 경우에는 거의 일정하게 유지됨을 그래프를 통해서 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 직경이 20 nm 인 MWCNT 의 경우 2000 nm 의 길이에서 하중을 전달하기 위한 임계길이가 충분히 만족됨을 유추할 수 있다.

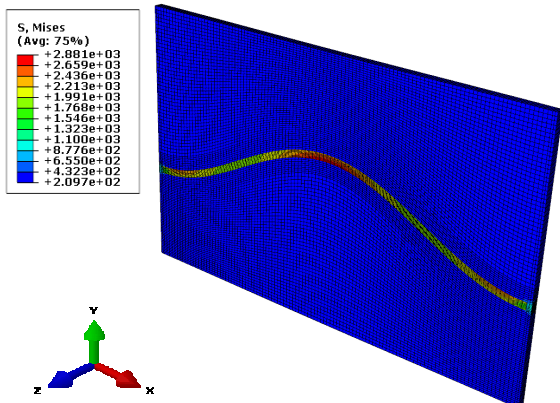


Fig. 3 Von Mises stress distribution in the RVE Model with waviness of 0.10 under tensile load

##### 4.2 MWCNT 의 배열방향에 따른 영향

MWCNT 의 배열방향에 따른 강화 복합재료의 탄성계수 변화를 정규화 하여 Fig. 5 의 그래프로 나타내었다. 해석 시 MWCNT 의 배열방향만을 고려하기 위해서 RVE 모델의 다른 형상 설계인자인 세장비와 섬유과형을 각각 50, 0.0 으로 고정하였다. 해석 결과에 따르면 MWCNT 의 배열방향이 0°에서 40°로 변함에 따라서 강화 복합재료의 탄성계수가 계속적으로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한 배열 방향이 20° 이상의 경우에서 탄성계수의 감소율이 크게 증가함을 알 수 있다. 특히, 섬유의 배열방향이 하중 작용 방향에 대해서 40° 이상이 되는 경우 강화 복합재료의 탄성계수는 MWCNT 의 탄성계수에 상관없이 거의 같은 값을 가지며, 기지재료에서 MWCNT 의 강화 효과 역시 크게 나타나지 않음을 결과적으로 알 수 있다.

##### 4.3 MWCNT 의 섬유과형에 따른 영향

MWCNT 의 섬유과형에 따른 강화 복합재료의

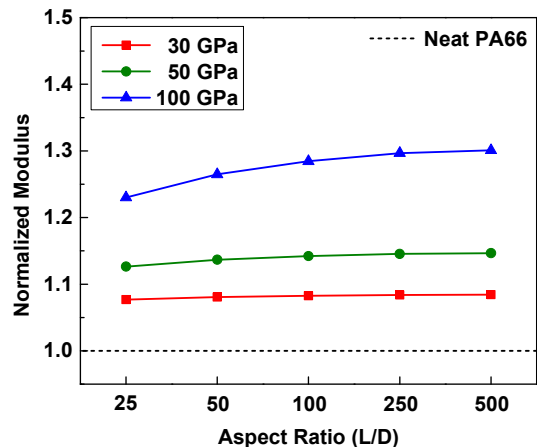


Fig. 4 Comparison of normalized elastic modulus with respect to MWCNT aspect ratio

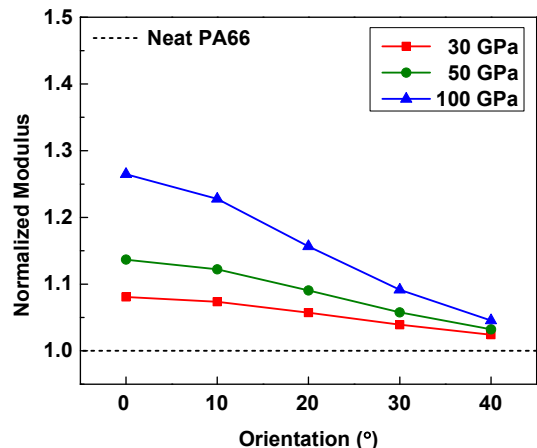


Fig. 5 Comparison of normalized elastic modulus with respect to MWCNT orientation

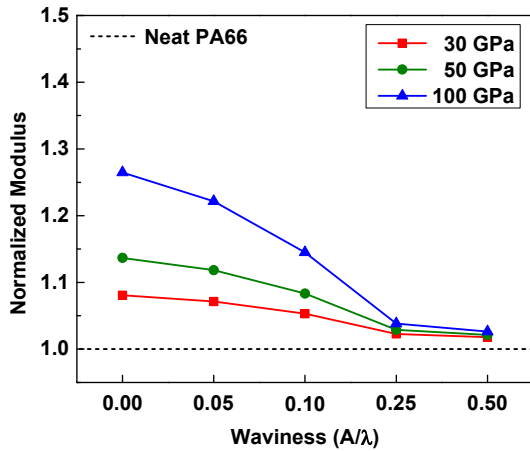


Fig. 6 Comparison of normalized elastic modulus with respect to MWCNT waviness

탄성계수 영향을 평가하기 위해서 섬유과형을 0.0 / 0.05 / 0.10 / 0.25 / 0.50 으로 조절하여 RVE 모델을 설계하였다. 특히 MWCNT 의 섬유과형에 대한 영향만을 고려하기 위해서 과장비와 배열방향은 각각 50 과 0°로 고정하였다. Fig. 6은 MWCNT 의 섬유과형 증가에 따른 강화 복합재료의 정규화된 탄성계수 변화를 나타낸 그래프 이다. 해석 결과에 따르면 섬유과형이 0.0에서 0.50으로 증가됨에 따라서 강화 복합재료의 탄성계수는 계속적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 섬유과형이 0.10 이상의 경우에서 탄성계수가 급격하게 줄어들어 거의 수렴하는 것을 결과로부터 확인 할 수 있다. 특히 MWCNT 의 탄성계수에 상관없이 섬유과형이 0.25 이상일 경우 강화 복합재료의 탄성계수는 유사한 값들을 가지며, 기지재료에서의 MWNT 강화 효과는 거의 나타나지 않음을 유추할 수 있다.

#### 4.4 MWCNT 의 복합적 요소에 따른 영향

4.2 절과 4.3 절의 결과들을 살펴보면 MWCNT 의 형상 변수 중 배열방향과 섬유과형이 기지재료에서 MWCNT 의 강화효과를 저해하는 주요 요소로 작용함을 알 수 있다. 또한 특정한 임계값을 지난 조건들에서는 기지재료에 대한 MWCNT 의 강화효과가 제한적임을 결과들로부터 유추할 수 있다. 따라서 본 장에서는 MWCNT 강화 복합재료 내에서 MWCNT 의 배열방향과 섬유과형이 복합적으로 작용될 때 탄성계수에 대한 영향을 평가하였다. 특히 앞선 4.3 절의 결과에 따르면 섬유과형이 0.25 이상인 경우 MWCNT 의 탄성계수 크기에 상관없이 거의 일정한 값으로 수렴하여 강화효과를 얻기 힘들기 때문에 MWCNT 의 탄성계수와 섬유과형을 각각 100 GPa 과 0.1 으로 고정하고, 이

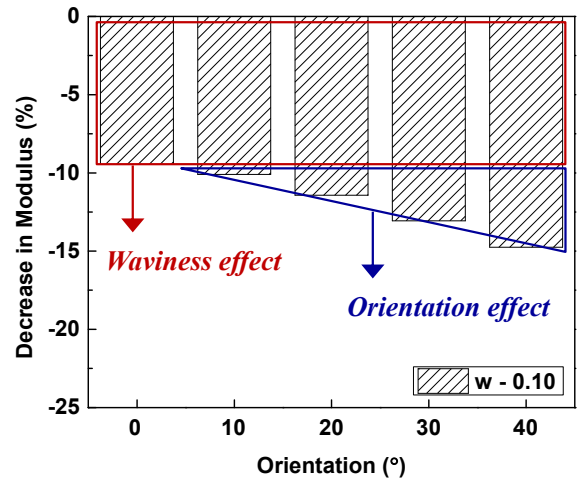


Fig. 7 Decrease of Young's modulus with respect to multiple MWCNT geometric factors

때 배열방향의 변화에 따른 영향을 해석하였다. 또한 RVE 모델은 MWCNT 의 체적비와 과장비, 섬유과형을 각각 1.0 vol%, 50, 0.10 이 되도록 설계하였다. Fig. 7은 유한요소 해석을 통해 계산된 강화 복합재료의 탄성계수를 MWCNT 의 섬유과형과 배열방향이 0.0 과 0°인 강화 복합재료의 탄성계수에 대한 상대적인 감소율로 계산하여 그래프에 나타내었다. 결과에 따르면 MWCNT 의 섬유과형이 0.10인 경우 배열방향이 0°에서 40°로 커짐에 따라 상대적인 탄성계수 감소율이 -12.1%에서 -12.2, -12.6, -13.1, -13.7%로 중첩되어 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 이상의 결과로부터 MWCNT 의 형상 요소가 복합적으로 작용할 경우 강화 복합재료의 탄성계수는 더욱 큰 영향을 받을 수 있음을 확인 할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 다중벽 탄소나노튜브를 이용한 강화 복합재료의 설계 및 제작에 앞서 MWCNT 의 형상 요소인 세장비와 배열방향, 섬유과형 등에 의한 강화 복합재료의 탄성계수에 대한 영향을 평가하기 위해서 대표체적요소 모델을 이용한 유한요소 해석을 수행하였다. 이를 위해 먼저 문헌들을 바탕으로 적합한 RVE 모델을 선정하여 설계하고, MWCNT 의 형상 변수를 정의 하였다. 유한요소 해석 결과에 따르면 MWCNT 의 형상 요소 중 배열방향과 섬유과형이 강화 복합재료의 탄성계수를 저하시키는 주요 요소로 작용하는 것을 알 수 있다. 특히 배열방향의 경우 20° 이상의 조건에서 탄성계수가 크게 감소하며, 섬유과형의 경우

0.10 이상의 조건에서 탄성계수가 급격하게 줄어들어 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인하였다. 또한 이들 각 요소들이 복합적으로 작용할 때 감소율이 증첩되어 더욱 크게 나타나며, 기지재료에서의 MWCNT의 강화 효과가 거의 나타나지 않음을 확인하였다. 따라서 MWCNT 강화 복합재료를 효과적으로 제작하기 위해서는 나노입자의 분산방법과 더불어 기지재료에서의 배열 방향을 적절히 제어할 수 있는 연구가 수반되어야 나노복합재료에서 충분한 강화 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

This work was supported by the WPM (World Premier Materials) Program, Project No. 10037878, Ultralight Structural Nano Carbon Composite, funded By the Ministry of Trade, industry & Energy (MI, Korea). The author would like to thank for the University of Delaware, Center for Composite Materials (UD-CCM), and Dr. Hong-Kyu Jang at the University of Delaware for fruitful discussion on this work.

## 참고문헌

- (1) Hong, S. H., 2010, "Status and Prospect of CNT/Metal Nanocomposites," *The National Academy of Science*, Vol. 49, No. 2, pp. 79~99.
- (2) Ma, P. C., Siddiqui, N. A., Marom, G. and Kim, J. K., 2010, "Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotubes for Polymer-based Nanocomposites: A review," *Composites Part A*, Vol. 41, No. 10, pp. 1345~1367.
- (3) Sun, L., Gibson, R. F., Gordaninejad, F. and Suhr, J., 2009, "Energy Absorption Capability of Nanocomposites: A Review," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 14, pp. 2392~2409,
- (4) Gibson, R. F., 2012, *Principles of Composite Material Mechanics*, CRC Press, Boca Raton, pp. 219~282.
- (5) Fisher, F. T., Bradshaw, R. D. and Brinson, L. C., 2003, "Fiber Waviness in Nanotube-Reinforced Polymer Composites – I: Modulus Predictions using Effective Nanotube Properties," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 11, pp. 1689~1703.
- (6) Anumandla, V. and Gibson, R. F., 2006, "A Comprehensive Closed Form Micromechanics Model for Estimating the Elastic Modulus of Nanotube-Reinforced Composites," *Composites Part A*, Vol. 37, No. 12, pp. 2178~2185.
- (7) Thostenson, E. T., Li, W. Z., Wang, D. Z., Ren, Z. F. and Chou, T. W., 2002, "Carbon Nanotube/Carbon Fiber Hybrid Multiscale Composites," *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, No. 9, pp. 6034~6037.
- (8) Wagner, H. D., Lourie, O., Feldman, Y. and Tenne, R., 1998, "Stress Induced Fragmentation of Multiwall Carbon Nanotubes in a Polymer Matrix," *Applied Physics Letters*, Vol. 72, No. 2, pp. 188~190.
- (9) Wagner, H. D., 2002, "Nanotube-Polymer Adhesion: A Mechanics Approach," *Chemical Physics Letters*, Vol. 361, No. 1/2, pp. 57~61.
- (10) Karimzadeh, F., Ziaei-Rad, S. and Adibi, S., 2007, "Modeling Considerations and Material Properties Evaluation in Analysis of Carbon Nano-Tubes Composite," *Metallurgical and Materials Transaction B*, Vol. 38B, No. 4, pp. 695~705.
- (11) Huang, G., Wang, B. and Lu, H., 2006, "Material Characterization and Modeling of Single-Wall Carbon Nanotube/Polyelectrolyte Multilayer Nanocomposites," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 73, No. 5, pp. 737~744.
- (12) Shokrieh M. M. and Rafiee R., 2010, "A Review of the Mechanical Properties of Isolated Carbon Nanotubes and Carbon Nanotube Composite," *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 46, No. 2, pp. 155~172.
- (13) Salvétat, J. P., Kulik, A. J., Bonard, J. M., Briggs, G. A. D., Stockli, T., Metenier, K., Bonnamy, S., Beguin, F., Burnham, N. A. and Forro, L., 1999, "Elastic Modulus of Ordered and Disordered Multiwalled Carbon Nanotubes," *Advanced Materials*, Vol. 11, No. 2, pp. 161~165.
- (14) Lukic B., Seo, J. W., Couteau, E., Lee, K., Gradecak, S., Berkecz, R., Hernadi, K., Delpeux, S., Cacciaguerra, T., Beguin, F., Fonseca, A., Nagy, J. B., Csanyi, G., Kis, A., Kulik, A. J. and Forro, L., 2005, "Elastic Modulus of Multi-walled Carbon Nanotubes Produced by Catalytic Chemical Vapour Deposition," *Applied Physics A*, Vol. 80, No. 4, pp. 695~700.