

## Stress Analysis for Fiber Reinforced Composites under Indentation Contact Loading

Kyung Soon Jang, Tae Woo Kim, Chul Kim, Sang Kuk Woo\*, and Kee Sung Lee<sup>†</sup>

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

\*Energy Materials Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

(Received April 1, 2008; Accepted April 28, 2008)

### 압입접촉하중이 작용하는 섬유강화 복합재료의 응력해석

장경순 · 김태우 · 김철 · 우상국\* · 이기성<sup>†</sup>

국민대학교 기계자동차공학부

\*한국에너지기술연구원 융복합재료연구센터

(2008년 4월 1일 접수; 2008년 4월 28일 승인)

#### ABSTRACT

Modeling and FEM analysis on Boron Nitride and/or Pyrolytic Carbon coating layers on SiC fibers under indentation contact loadings are investigated. Especially this study attempts to model the mechanical behavior of the SiC fibers with and without coatings. Tyranno S grade and Tyranno LoxM grade of SiC are selected for fiber and Boron Nitride and/or Pyrolytic Carbon as coating material. The modeling is performed by SiC fiber without coating layer, which includes single(BN or PyC) and double(BN-PyC or PyC-BN) coating layer. And then the analysis is performed by changing a type of coating layer, a type of fiber and coating sequence. In this study, the concepts of modeling and analysis techniques for optimum design of BN and PyC coating process on SiC fiber are shown. Results show that stresses are reduced when indentation contact loading applies on the material having lower elastic modulus.

**Key words :** FEM, Indentation, Fiber Reinforced Composites

#### 1. 서 론

다른 세라믹 재료에 비해 열전도율과 경도가 높고, 내산화성, 내마모성, 내부식성, 고온안정성 및 열충격 저항성이 우수한 탄화규소(SiC)는 강한 공유결합으로 이루어져 있는 물질이다.<sup>1-5)</sup> 따라서 고온에서의 구조재료로 SiC를 사용한 C<sub>f</sub>/SiC 및 SiC<sub>f</sub>/SiC 복합재료는 라디에이션 히터(radiation heater), 차세대 엔진 부품, 열병합 발전용 가스터빈 부품, 열교환기 등의 일반산업 분야뿐만 아니라 핵융합로의 블랭킷 구조재료, 가스냉각형 4세대 원자로의 노심 구조재료 등의 원자력 산업용으로 응용하기 위한 연구개발이 진행되고 있다.<sup>6,7)</sup> 이러한 응용으로 기지(matrix)의 보다 우수한 특성을 향상시키기 위하여, 입자, 휘스커(whisker) 또는 섬유를 분산시켜 세라믹 복합재료를 제조한다. 그러나 입자 또는 휘스커 강화 세라믹 복합재료는 단일상 세라믹스의 파괴에너지 범위를 크게 벗어나지 못하는 단점을 지니고 있는 반면에, 섬유 강화 세라믹 복합재료는 기지에 응력이 가해질 때, 섬유가 균열의 전파를 억제하여 세라믹스의 파괴인성을 향상시킬 수 있는 소

재료 알려져 있다.<sup>6)</sup> SiC 섬유는 대부분 일본을 중심으로 개발되어 왔으며, 최근에는 Tyranno SA<sup>TM</sup> 섬유를 이용한 연구개발이 주로 이루어지고 있다. 이것은 직조가 비교적 쉽고, 순도 및 결정성이 높아서 가격 및 내방사선 특성 등에서 다른 섬유 보다 우수하기 때문이다.<sup>8,14)</sup> SiC 기지상 복합재료를 제조하기 위한 방법은 직조된 SiC 섬유에 계면상을 코팅한 다음 SiC 기지상을 예비형상(preform) 내부에 형성시켜 조직을 치밀하게 하는 단계로 이루어진다. 이 때, 섬유 강화재의 고온 안정성 및 고온 특성, 그리고 가장 중요한 요인으로 세라믹 기지와 섬유 강화재 사이의 계면 현상(계면 결합정도, 잔류응력, 계면 반응물의 형성)에 의해 기계적 특성 및 고온에서의 응용 가능성이 결정된다. 이러한 계면 현상을 제어하기 위하여 섬유에 코팅(coating)을 하여 섬유 강화재와 기지 물질 사이에 중간층(interphase or interlayer)을 형성시키는 것이다. 이러한 중간층의 물질로는 주로 열분해 탄소(pyrolytic carbon, PyC)와 질화보론(boron nitride, BN)이 사용되고 있다.<sup>9-12)</sup>

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 라디에이션 히터(radiation heater)에 SiC<sub>f</sub>/SiC 복합재료를 전열재로 사용하여 상부에 물체를 놓고 가열 할 때, 하부에 가해지는 하중에 의한 응력 거동을 해석하기 위해 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS<sup>13)</sup>를 이용하여 압입접촉하중이 작용할 경우 섬

<sup>†</sup>Corresponding author : Kee Sung Lee

E-mail : keeslee@kookmin.ac.kr

Tel : +82-2-910-4834 Fax : +82-2-910-4839

유와 코팅층에 발생하는 응력과 최대 변위량을 관찰하여 복합재료의 최적 설계를 위한 해석을 수행하였다. 이 때, SiC 섬유의 종류, 코팅층의 재료와 적층순서를 변화시켜 탄성응력 측면에서 고찰하였다.

## 2. 유한 요소 해석

### 2.1. 물성값

#### 2.1.1. 탄화규소 섬유(SiC<sub>f</sub>)

본 연구에서 사용한 탄화규소 섬유(SiC<sub>f</sub>)는 일본 UBE Industries사 (www.ube-ind.co.jp)의 자재인 Tyranno Grade S ceramic high temperature fiber (type : TY-S1H16PX, Bobbin No. 08407K0724)와 Tyranno Grade LoxM ceramic high temperature fiber (type : TM-S1E08PX, Bobbin No. 07785K0703)이다. Tyranno Grade S ceramic high temperature fiber는 50.4 at.% Si, 29.7 at.% C, 17.9 at.% O와 2.00 at.% Ti으로 구성되어 있으며, filament의 직경은 11.0 μm로 800 fil./yarn으로 제조되어 있다. Tyranno Grade LoxM ceramic high temperature fiber는 55.4 at.% Si, 32.4 at.% C, 10.2 at.% O와 2.00 at.% Ti으로 구성되어 있으며, filament의 직경은 11.0 μm로 800 fil./yarn으로 제조되어 있다. 또한 섬유의 물성값은 Tyranno S는 170 GPa, Tyranno LoxM은 187 GPa로 적용하였으며, 프와송 비는 0.2로 가정하였다.

#### 2.1.2. 코팅재(coating materials)

섬유 강화재와 기지 물질의 중간층에 형성 시키는 섬유의 코팅 재료로 질화붕소와 열분해 탄소를 사용하였다. 물성값은 Boron Nitride는 10.3 GPa, Pyrolytic Carbon은 29.4 GPa로 적용하였으며, 프와송 비는 0.2로 가정하였다.

### 2.2. 유한 요소 모델

#### 2.2.1. 예비형상 및 해석 부위

예비형상(preform)은 반경 3.18 mm의 구형 압입자의 하단면을 섬유 또는 섬유와 코팅층으로 이루어진 시편의 상단에 위치시켰다. 이 때, 압입에 의한 섬유와 코팅층에 발생하는 응력 거동과 변형만을 관찰하기 위해 코팅층 상부의 세라믹 기지상은 모델링에서 제외하였다. 구형 압입자와 하중의 대칭성을 이용하여 유한 요소 해석은 축대칭 해석을 하였으며, 해석시간을 단축하기 위하여 구형 압입자의 축대칭 단면의 하부 1/2만이 모델링 되었다. 모델링을 위해 섬유로 이루어진 다발(bundle)의 두께는 약 1 mm로 측정 되었다. SiC<sub>f</sub>를 단층으로 모델링하여 해석할 경우에는 섬유의 두께를 1 mm로 적용하였다. SiC<sub>f</sub>와 한 개의 코팅층을 모델링하여 해석할 경우에는 섬유의 두께를 0.8 mm, 코팅층의 두께를 0.2 mm로 적용하였다. SiC<sub>f</sub>와 두 개의 코팅층을 모델링하여 해석할 경우에는 섬유의 두께를 0.6 mm, 각각의 코팅층의 두께를 0.2 mm로 적

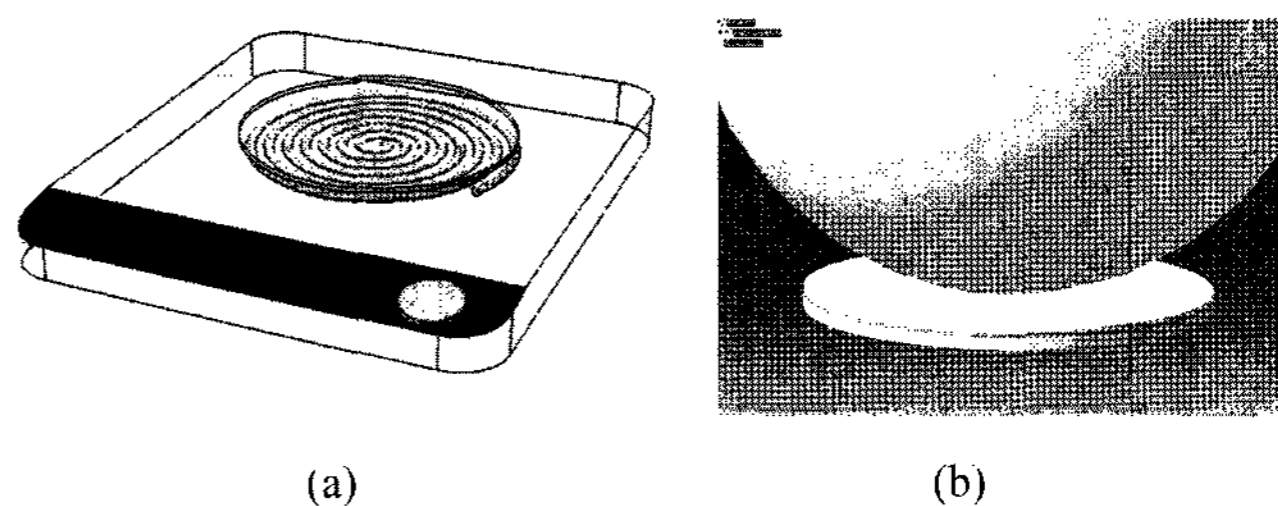


Fig. 1. Schematic diagrams of (a) radiation heater and (b) modeling.

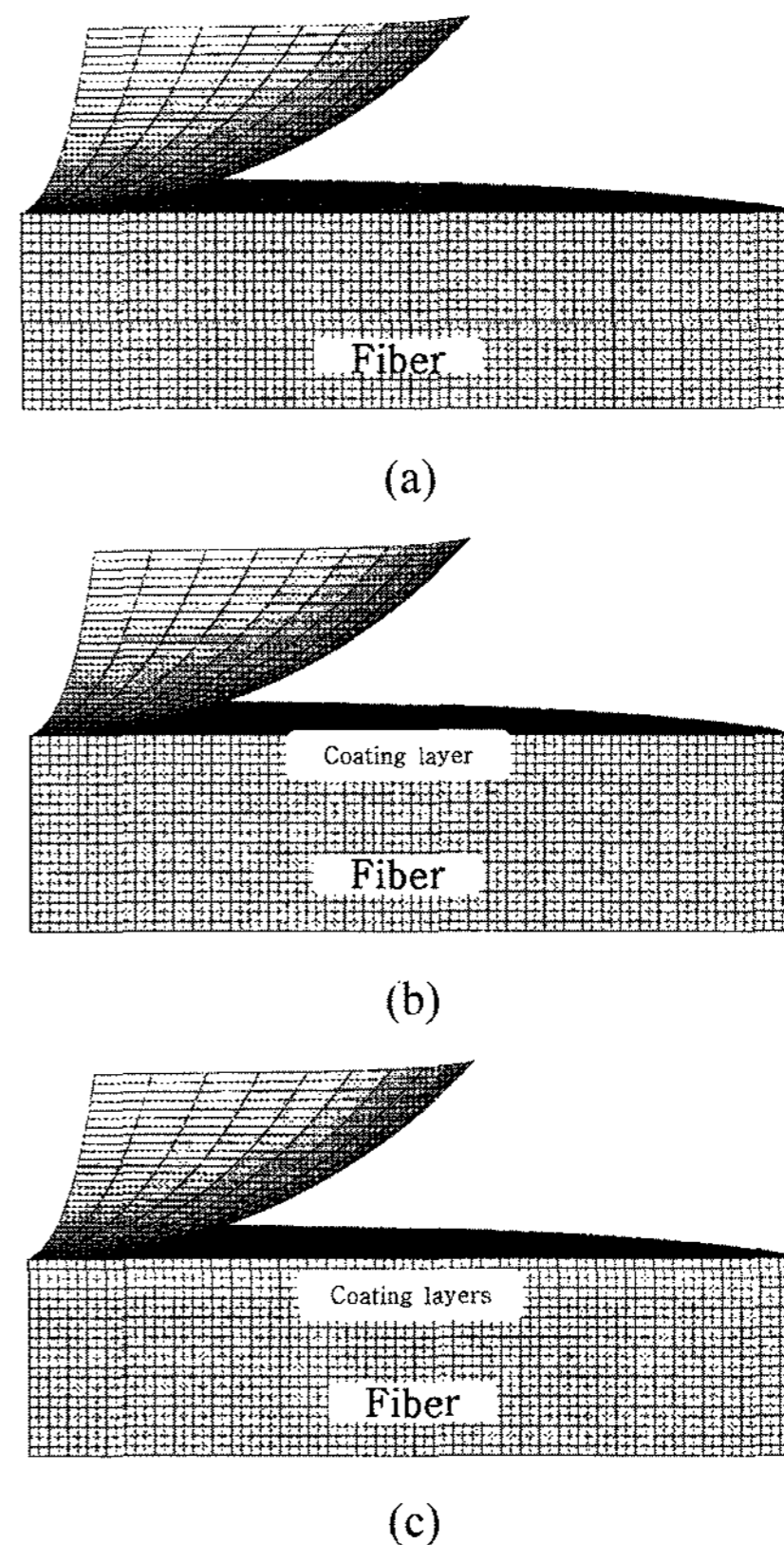


Fig. 2. Diagrams showing finite element model ; (a) fiber, (b) one coating layer on fiber and (c) double coating layer on fiber.

용하였다. Fig. 2는 구형 압입자가 시편에 압입 접촉하중을 가하는 예비형상을 나타낸 것이다. 세 가지 예비형상을 바탕으로 구간별로 물성값을 바꾸어 가며 시편 상단에 위치한 구형 압입자와 시편에 접촉 하중을 가해 응력 해석을 실행하였다. 해석 부위는 코팅층을 포함하는 각각의 시편에 발생하는 면내 최대 주응력과 섬유에 발생하는 최대 변위를 관찰하였으며, 결과를 비교하였다.

#### 2.2.2. 유한 요소

해석에 사용된 요소는 축대칭 사변형 요소를 사용하였으며, 구형 압입자는 형상이 변하지 않도록 2차원 강체셀 축대칭 해석(2D analytic rigid shell)을 사용하였다. 유한 요소 해석 프로그램(ABAQUS)의 CAX4R요소를 사용하

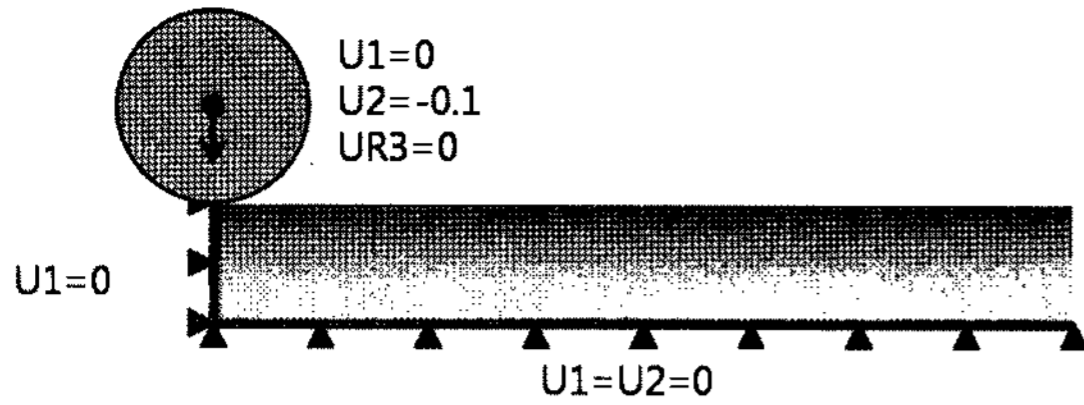


Fig. 3. Displacement and boundary conditions of the modelling in this study.

여 약 1600개의 요소와 1700개의 절점으로 일정하게 구성하였다.

2.2.3. 하중 및 경계 조건

구조적으로 라디에이션 히터(radiation heater)는 하부층이 고정되어 있고, 상부층에 접촉하중이 발생하는 구조로 구성되어있다. 따라서 이와 같은 구조를 시뮬레이션 하기 위해 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 하중과 경계조건을 적용하였다. 섬유 바닥면은 x, y 방향의 변위를 고정하였고, 코팅층을 포함하는 섬유의 축대칭 중심축은 x 방향의 변위를 고정하였다. 구형 압입자는 x 방향의 변위와 z 방향 회전을 구속하고, 하중을 대신하여 y 방향의 변위를 섬유 방향으로 0.1 mm가하였다. 이 때 발생하는 탄성응력과 변위를 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

해석은 크게 코팅을 하지 않은 SiC<sub>f</sub>를 단층으로만 모델링한 섬유 시편, SiC<sub>f</sub>에 한 개의 코팅층을 형성하여 모델링한 1층 코팅 시편, SiC<sub>f</sub>에 두 개의 코팅층을 형성하여 모델링한 2층 코팅 시편으로 나누어서 수행하였다. 그리고 각각의 경우에 코팅층을 포함한 시편 자체의 면내 최대 주응력과 변위를 측정하였고, 그 시편에서 섬유에 작용하는 변위를 측정하여 비교, 평가 하였다.

3.1. 섬유 시편의 구조 해석 결과

Fig. 4에서 보는 바와 같이, 코팅층이 없는 섬유에 압입 접촉 하중을 가했을 경우에 발생하는 면내 최대 주응력을 나타내었는데, Tyranno S grade 섬유와 Tyranno LoxM

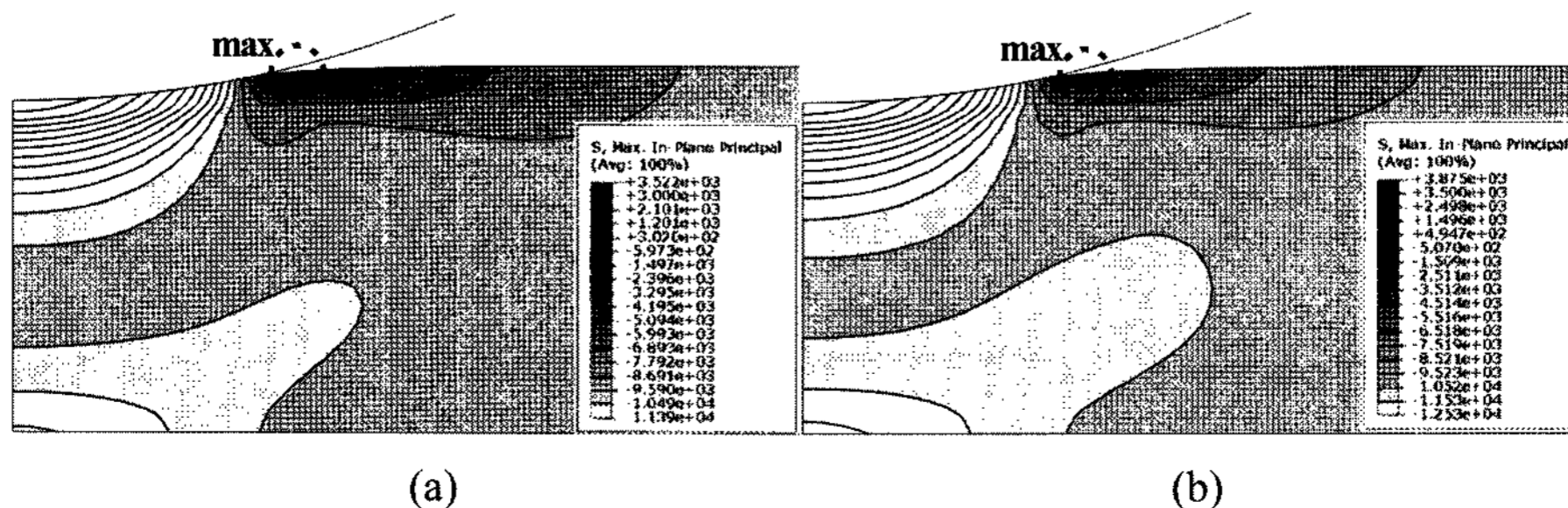


Fig. 4. Max. in-plane principal stress contour which appears in the SiC<sub>f</sub>; (a) Tyranno S grade fiber and (b) Tyranno LoxM grade fiber.

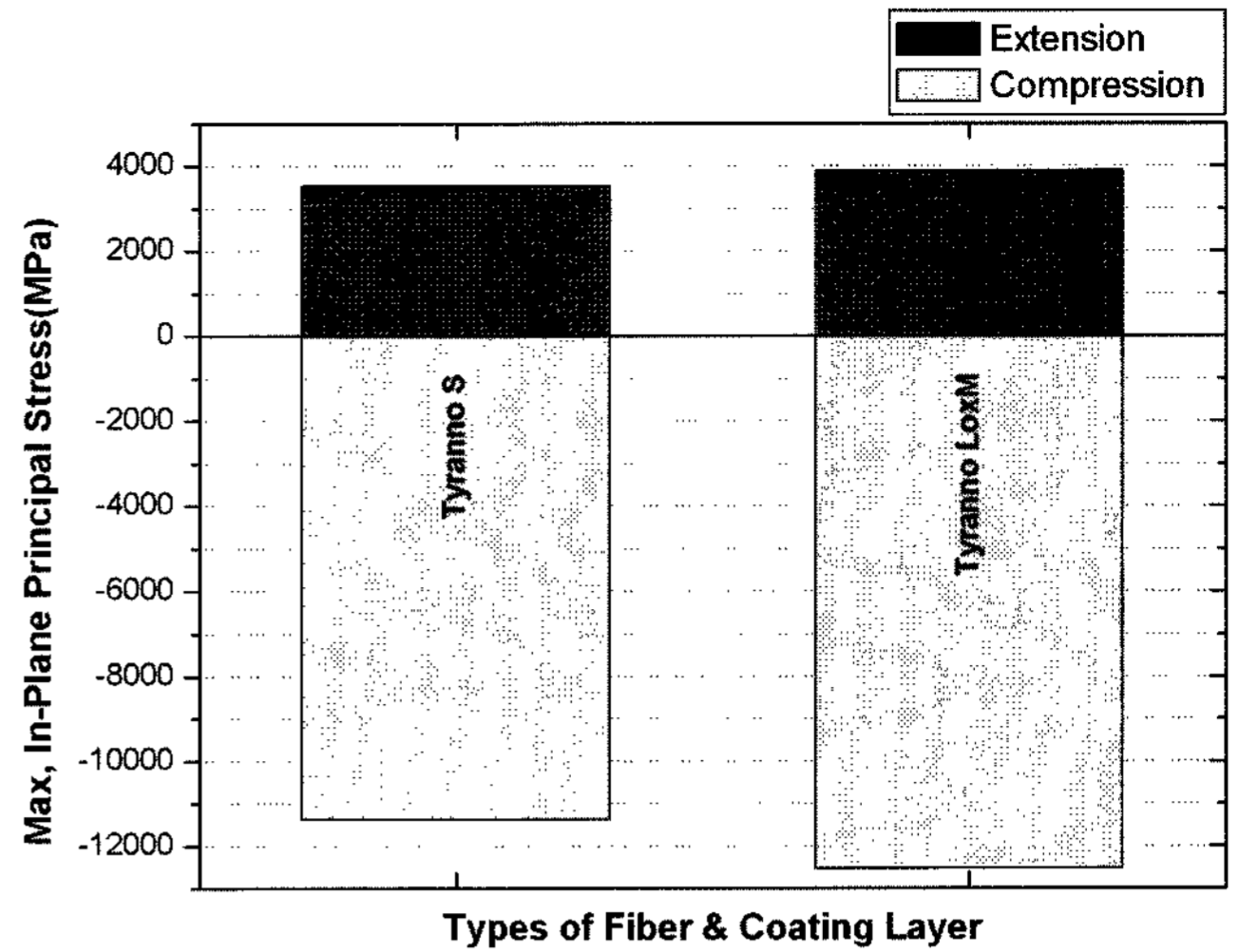


Fig. 5. Analysis results on the SiC<sub>f</sub> of extension & compression area.

grade 섬유, 둘 다 매우 유사한 거동을 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 최대 인장응력은 섬유의 종류에 관계없이 접촉부위에 인접한 바깥쪽에 위치하였다. 또한 섬유에 작용하는 면내 최대 주응력은 Fig. 5에서와 같이 탄성계수가 작은 Tyranno S grade 섬유가 약 3.5 GPa의 값을 보여 탄성계수가 큰 Tyranno LoxM grade 섬유(약 3.8 GPa)보다 더 작은 결과를 나타내었다. 따라서 본 논문에서는 면내 최대 주응력이 적게 발생한 Tyranno S grade 섬유의 거동만을 대표적으로 나타내었으며, Tyranno LoxM grade 섬유의 해석 결과는 그래프에만 나타내었다. 변위의 변화량은 해석 결과 0.1 mm의 변화를 보이는 단순한 거동을 보였기 때문에 섬유 시편의 변위는 생략하였다.

3.2. 1층 코팅 시편의 구조 해석 결과

한 개의 코팅층이 도포된 Tyranno S grade 섬유에 압입 접촉 하중을 가했을 경우에 나타나는 면내 최대 주응력과 변위의 변화량을 Fig. 6에 나타내었다. (a), (c)는 시편에 작용하는 면내 최대 주응력, (b), (d)는 섬유에 작용하는 변위의 거동을 나타내었다. 전반적으로 코팅층 형성에



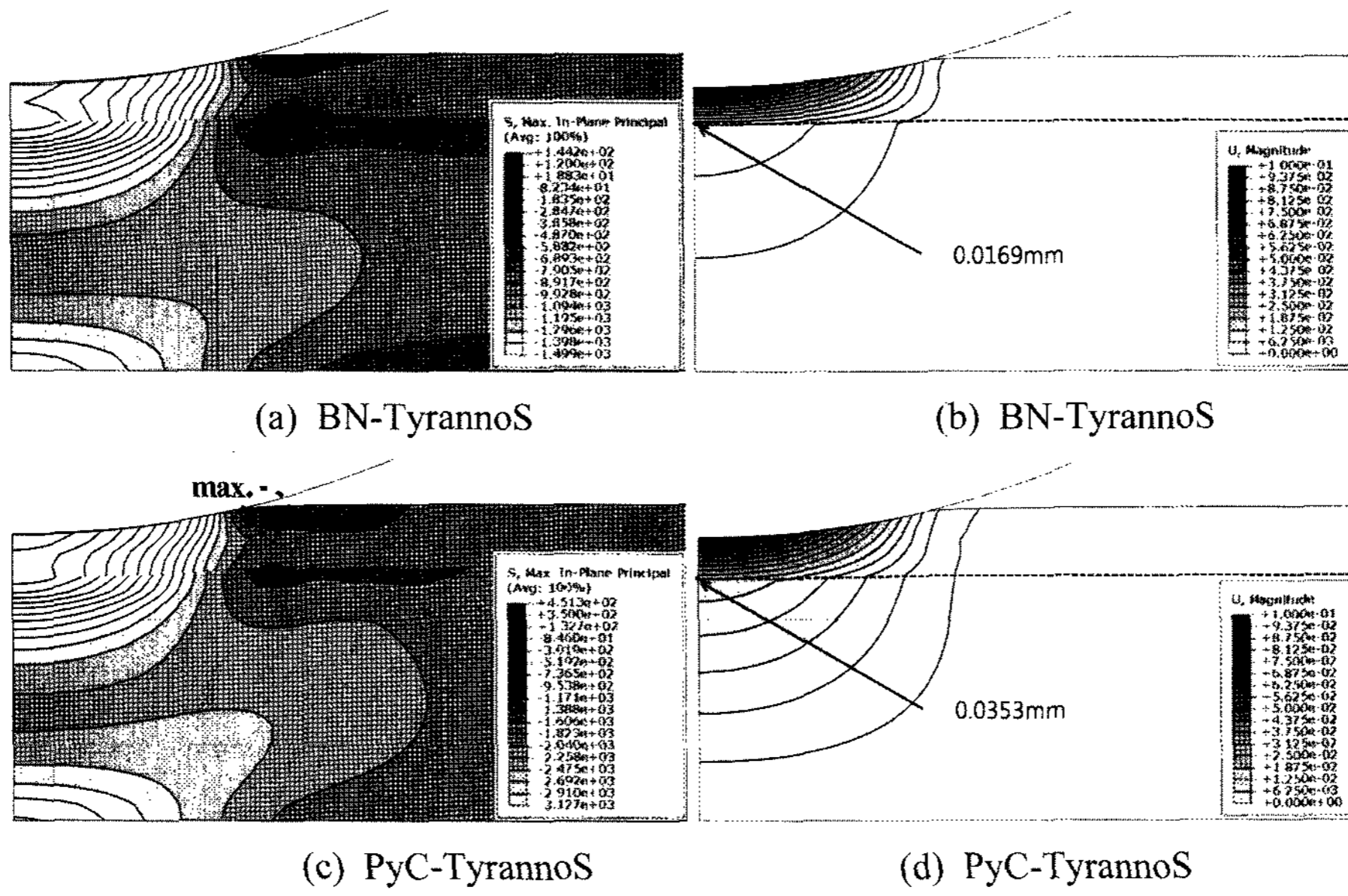


Fig. 6. The general contour which appears in the Tyranno S grade fiber with one coating layer ; (a),(c) Max. in-plane principal stress of specimen which includes BN or PyC coating layer ; (b),(d) Displacement of fiber which includes BN or PyC coating layer.

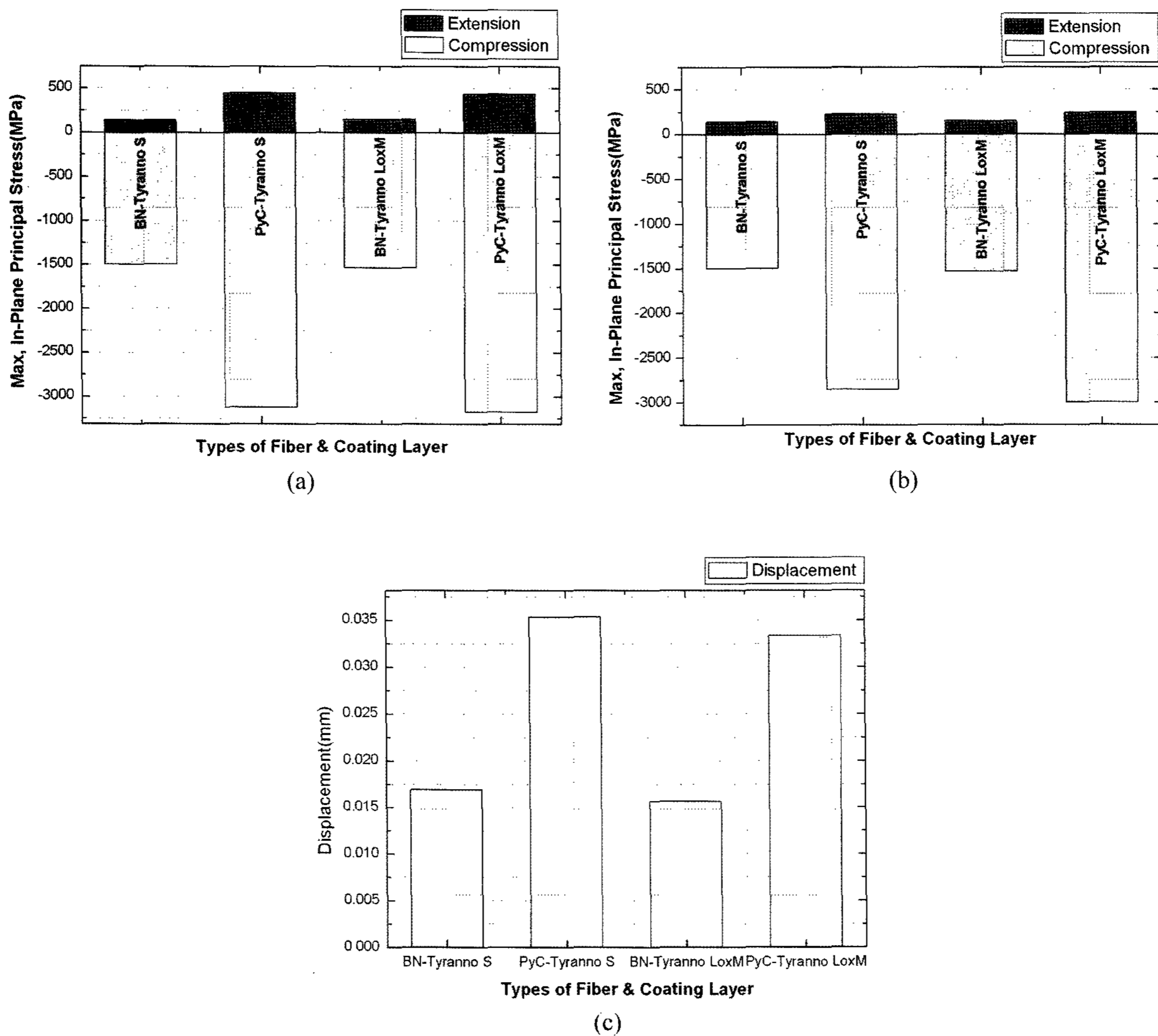


Fig. 7. Analysis results of stress on the  $SiC_f$  with one coating layer ; (a) for all, (b) only fiber, and (c) results of displacement in the fiber.

의해 면내 최대 주응력이 1 order정도 크게 감소함을 확인할 수 있었으며, 이 때, BN을 코팅층으로 하는 시편의 면내 최대 주응력이 더 적게 발생하였다. 또한, PyC를 코팅으로 하는 시편의 경우에는 구형 압입자와 접촉되는 코팅층의 윗면에서 면내 최대 주응력이 발생한 반면, BN을 코팅층으로 할 경우에는 섬유와 코팅층의 계면에서 면내 최대 주응력이 발생하였다. 따라서 코팅층의 종류에 따라 발생하는 응력 거동의 결과에 차이가 있음을 알 수 있었다. 섬유의 변위를 고찰한 결과 역시 BN을 코팅층으로 하는 시편의 경우에 섬유의 변위가 상대적으로 작았다. Fig. 7에 코팅층 뿐만 아니라 섬유에 나타난 최대, 최소 응력과 최대변위를 정리하여 도시하였다. Fig. 7의 (a)와 (b)에 나타난 바와 같이, BN이 코팅된 시편은 코팅층을 포함하는 시편과 코팅층을 제외한 섬유의 면내 최대 주응력은 동일하였다. 반면에, PyC가 코팅된 시편은 코팅층을 포함하는 시편과 코팅층을 제외한 섬유의 면내 최대 주응력이 서로 다른 결과를 나타내었으며, 따라서 코팅층의 종류에 따라 면내 최대 주응력이 발생하는 부분이 다르다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 거동이 발생하는 이유는 압입자가 상대적으로 탄성계수가 작은 BN에 접촉을 하는 경우, BN층이 큰 변형을 일으키며 응력을 완화 시키므로 아래층의 섬유에 국부적으로 발생시키는 응력의 전달을 억제하기 때문이라 생각된다. 반면에, PyC에 접촉을 하는 경우에는 탄성계수가 크기 때문에 변형에 저항하는 특성이 강해져서 더 큰 응력이 발생하고, 이것이 아래층의 섬유에 전달되어 BN을 코팅하였을 경우보다 상대적으로 큰 응력이 발생되는 것으로 생각된다. Fig. 7(c)는 섬유의 최대 변위량을 나타낸 것으로, 면내 최대 주응

력이 적은 BN을 코팅하였을 경우에 섬유가 더 적은 최대 변위량을 보였다. 따라서, 외부에서 하중이 가해지더라도 BN을 코팅층으로 사용한 경우 섬유의 변형을 더 억제할 수 있다.

3.3. 2층 코팅 시편의 구조 해석 결과

두 개의 코팅층이 도포된 Tyranno S grade 섬유에 압입 접촉 하중을 가했을 경우에 나타나는 면내 최대 주응력과 변위의 변화량을 Fig. 8에 나타내었다. (a), (c)는 시편에 작용하는 면내 최대 주응력, (b), (d)는 섬유에 작용하는 변위의 대표적 거동을 나타내었다. Fig. 9의 (a)와 (b)에 나타난 바와 같이 BN을 상부의 코팅층으로 하는 시편이 PyC를 상부의 코팅층으로 하는 시편의 면내 최대 주응력보다 더 적게 발생하였으며, PyC가 상부의 코팅층으로 하는 시편의 경우 오히려 한 개의 코팅층으로 하는 시편보다 면내 최대 주응력이 증가하였다. 따라서 코팅층의 종류와 적층 순서에 따라 해석 결과에 차이가 있음을 알 수 있었다. 그리고 코팅층이 한 개일 때와는 다르게 모든 시편이 구형 압입자와 접촉되는 코팅층의 윗면에서 면내 최대 주응력이 발생하였다. 이와 같은 거동이 발생하는 이유는 압입자가 상대적으로 탄성계수가 작은 BN층에 먼저 접촉을 하는 경우, 탄성계수가 가장 낮은 BN층에 큰 변형이 발생하는 동안 아래의 PyC층에 전달되는 응력을 완화 시키고, BN층 보다 높은 탄성계수를 갖는 PyC층은 완화된 응력을 차단하여 섬유에 발생하는 응력을 단계적으로 감소시키는 것으로 생각된다. 반면에, PyC가 먼저 접촉하게 되면 아래의 BN층의 탄성계수가 더 낮기 때문에 접촉되는 부분에 더 큰 응력을 발생시키는 것

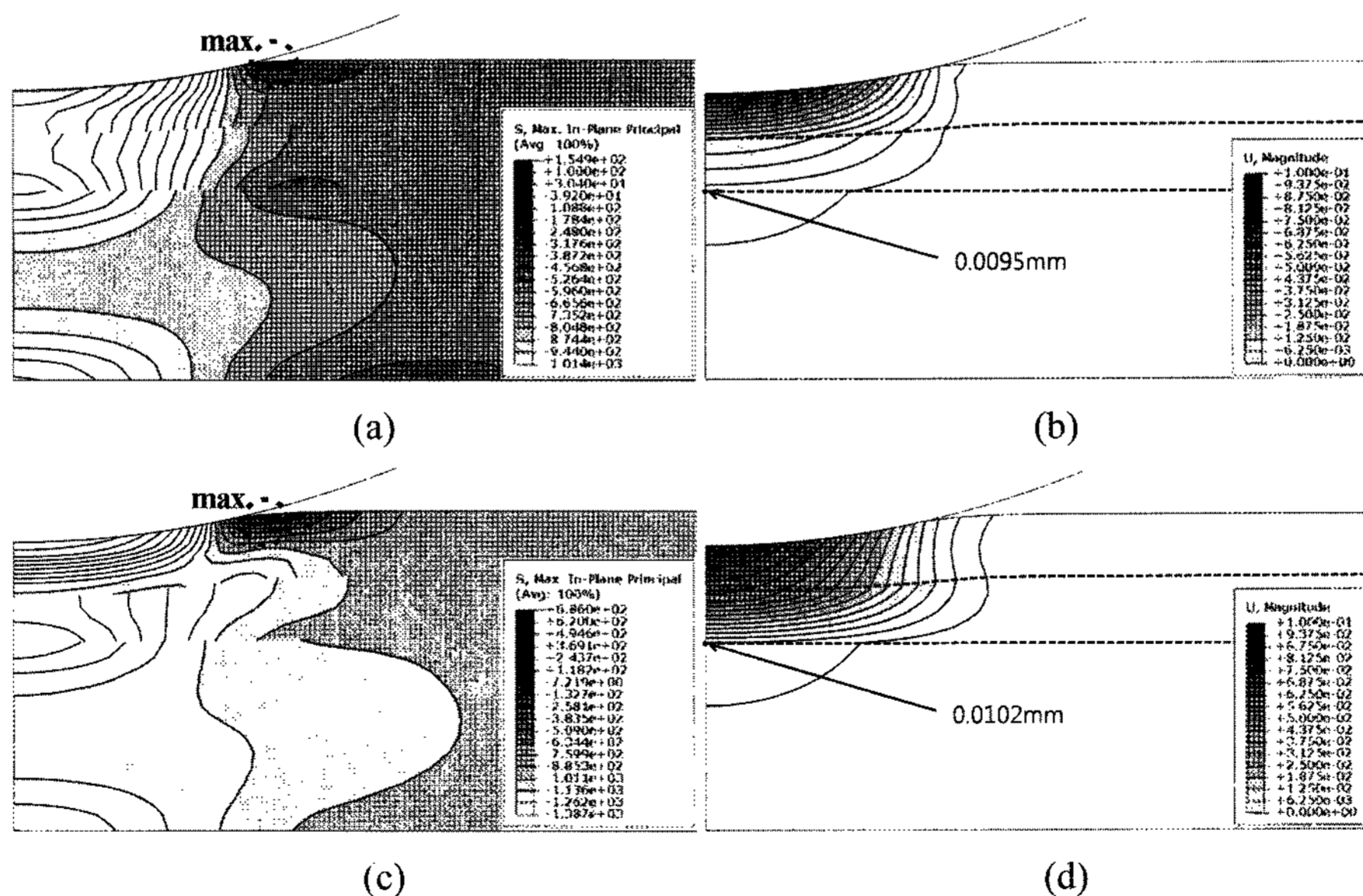


Fig. 8. The general contour which appears in the Tyranno S grade fiber with two Coating Layers ; (a),(c) Max. in-plane principal stress of specimen which includes BN-PyC or PyC-BN coating layers ; (b),(d) Displacement of fiber which includes BN-PyC or PyC-BN coating layers.

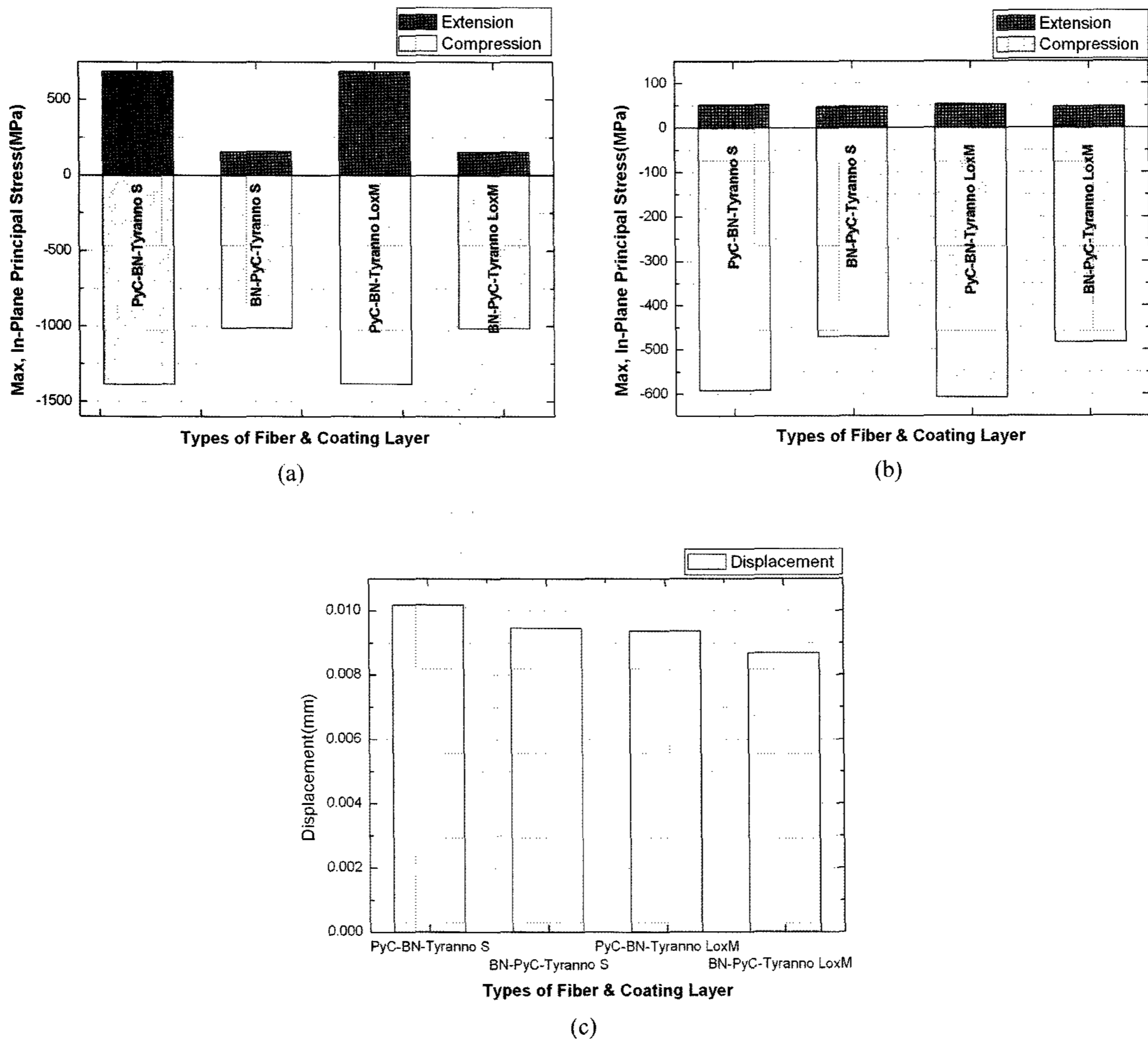


Fig. 9. Analysis results of stress on the SiC<sub>f</sub> with two coating layers ; (a) for all, (b) only fiber, and (c) results of displacement in the Fiber.

으로 생각된다. Fig. 9(c)는 섬유의 최대 변위량을 나타낸 것으로, Fig. 7(c)와 비교해볼 때 섬유의 변위가 2층코팅 시 더 작음을 알 수 있고, BN이 상부에 있을 경우, PyC가 상부에 있을 경우 보다 더 적은 변형을 보였다. 또한 탄성계수가 큰 Tyranno LoxM이 더 적은 최대 변위량을 보였으며, 그 원인은 섬유 상부의 코팅층까지 유사한 변형을 하지만 섬유에 도달하였을 때에는 탄성계수가 큰 섬유 일수록 변형에 저항하는 특성이 강하기 때문에 비록 면내 최대 주응력이 더 발생하더라도 변위량은 적게 나타나는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

압입 접촉 하중이 가해지는 탄화규소 섬유에, 서로 다른 탄성계수를 갖는 BN과 PyC를 1층 또는 2층으로 코팅을 적용하였을 경우 발생하는 면내 최대 주응력과 섬유에서의 최대변위를 비교, 평가하였다. 또한 각각의 적층

순서에 따라 복합재료의 면내 최대 주응력과 섬유에서의 최대 변위량을 평가하여 적절한 적층 방법을 찾을 수 있었다.

1. SiC<sub>f</sub>의 경우 탄성계수가 작은 Tyranno S의 면내 최대 주응력이 더 작은 결과를 보였다.
  2. BN을 1층 코팅한 경우 섬유와 코팅층의 계면에서 면내 최대 주응력이 발생한 반면에 PyC를 1층 코팅한 경우 압입자와 접촉하는 코팅층의 상부에서 면내 최대 주응력이 발생하였다. 이 때 BN을 코팅한 섬유가 PyC를 코팅한 경우 보다 낮은 응력이 발생하였다.
  3. 두 개의 코팅층으로 모델링 한 경우, BN 코팅이 PyC 코팅의 상부에 위치할 경우에는 한 개의 코팅층으로 모델링 한 경우보다 면내 최대 주응력과 변위가 비슷하거나 감소한 반면에, PyC 코팅이 BN 코팅의 상부에 위치할 경우에는 한 개의 코팅층으로 모델링 한 경우보다 면내 최대 주응력과 변위가 증가하는 결과를 보였다.
- 이와 같은 결과, 두 개의 코팅층으로 탄성계수가 작은

코팅층이 가장 상단에 위치할 경우에 면내 최대 주응력과 변위가 비교적 작게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구는 섬유에 코팅층이 도입된 시스템에 압입접촉하중이 작용하는 경우의 모델링/해석 연구를 수행한 것이며, 향후 SiC 기지상을 포함한 시스템에 대한 모델링/해석, 굽힘응력에 대한 모델링/해석, 코팅층의 두께 비율 변화에 따른 모델링/해석을 수행하여 보다 최적의 설계 연구를 수행할 계획이다.

### Acknowledgment

본 연구는 산업자원부에서 실시한 소재원천기술개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### REFERENCES

1. Y. I. Lee, S. H. Lee, and Y. W. Kim, "Technology Trends of Silicon Carbide Ceramics," *Ceramist*, **6** [3] 27-34 (2003).
2. W. L. Vaushn and H. G. Maahs, "Active-Passive Transition in the Oxidation of Silicon Carbide and Silicon Nitride in Air," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** [9] 1540-43 (1990).
3. S. Ogihara, K. Maeda, Y. Takeda, and K. Nakamura, "Effect of Impurity and Carrier Concentrations on Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of SiC Ceramics Containing BeO," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68** [1] c16-8 (1895).
4. L. J. Schioler, "Heat Engine Ceramics," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **64** [2] 268-94 (1986).
5. S. K. Woo, I. S. Han, "Technology Trend and Prospect of Silicon Carbide Based Ceramics for Energy and Environment Application(*in Korean*)," *Ceramist*, **10** [4] 23-30 (2007).
6. R. H. Jones, L. L. Snead, A. Kohyama, and P. Fenici, "Recent Advances in the Development of SiC/SiC as a Fusion Structural Material," *Fusion Engineering and Design*, **41** [1-4] 15-24 (1998).
7. D. W. Freitag and D. W. Richerson, "Opportunities for Advanced Ceramics to Meet the Needs of the Industries of the Future," *DOE/ORO 2060* (1998).
8. A. R. Raffray, R. Jones, G. Aiello, M. Billone, L. Giancarli, H. Golfier, A. Hasegawa, Y. Katoh, A. Kohyama, S. Nishio, B. Riccardi, and M. S. Tillack, "Design and Material Issues for High Performance SiC<sub>f</sub>/SiC-based Fusion Power Cores," *Fusion Engineering and Design*, **55** [1] 55-95 (2001).
9. R. J. Kerans, R. S. Hay, and N. J. Pagano, "The Role of the Fiber-matrix Interface in Ceramic Composites," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **68** [2] 429-42 (1989).
10. R. A. Lowden and D. P. Stinton, "Interface Modification in Nicalon/SiC Composites," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **9** [7-8] 705-22 (1988).
11. O. Dugne, S. Prouhet, A. Guette, and R. Naslain, "Interface Characterization by TEM, AES and SIMS in Tough SiC (ex-PCS) Fibre-SiC (CVI) Matrix Composites with a BN Interphase," *J. Materials Science*, **28** [13] 3409-22 (1993).
12. J. Y. Park, "Fabrication and Application of SiC<sub>f</sub>/SiC Composites(*in Korean*)," *Ceramist*, **10** [4] 31-7 (2007).
13. ABAQUS user's manual, HKS, U.S.A. (2006).