

복합재료의 미시특성에 따른 기계적 특성해석

김 태 우[†]

국민대학교 기계자동차공학부
(2003년 7월 7일 접수; 2003년 7월 24일 승인)

Analysis of Composite Response Based on Microstructure Details

Tae-Woo Kim[†]

Mechanical Engineering, Kook-Min University, Seoul 136-702, Korea
(Received July 7, 2003; Accepted July 24, 2003)

초 록

본 논문은 세라믹재료가 강화재로써 보강된 복합재료가 횡방향의 단축인장하중을 받는 경우, 복합재료의 변형, 재료내 발생하는 손상의 특징, 및 응력-변형률 특성에 관한 컴퓨터 해석결과이다. 해석은 SiC/Ti 시스템을 대상으로 하였으며, 특성은 강화재의 배열형태, 강화재/기지 계면에서의 결합유무, 강화재의 파괴분율변화에 대하여 각기 해석되었다. 기면에서 강한 결합이 있는 복합재와는 달리, 약한 결합의 복합재는 인장하중에 의하여 세라믹/기지 계면에서 분리가 발생되었다. 이 분리는 전체 복합재의 강성을 감소시키며, 세라믹 강화재의 파괴분율이 증가할수록 탄성계수 및 횡방향 평균응력의 최종크기를 나타내는 한계응력의 크기감소로 나타났다. 계면결합이 강한 경우는 세라믹 파괴분율이 증가할수록 사각형 배열보다는 육각형배열의 복합재에서 다소 큰 증가율로 나타났다. 그러나, 계면결합이 약한 경우는 세라믹 파괴분율이 증가할수록 사각형 배열보다는 육각형배열의 복합재에서 상대적으로 큰 감소율로 해석되었다. 본 연구의 해석결과는 알려진 문헌의 결과와 잘 일치하였다.

ABSTRACT

Present investigation shows the analysis results for ceramic reinforced metal matrix composite under uniaxial transverse tensile loading. The resulting deformation, the projected damage type, and stress-strain behavior were computed depending on microstructure details such as the type of periodic reinforcement array, and the type of interface bonding. A two-dimensional finite element analysis was conducted based on the unit-cell of square, hexagonal, or diagonal periodic array. For composite with strong interface bonding, the transverse stress vs. strain curve was generally increased with the increase of the ceramic volume fraction. For the composite with weakly bonded interface, however, the transverse stress vs. strain curve was reduced against the ceramic volume fraction. The decrease was caused by the interface debonding-induced stiffness reduction of the composite. For the composite of weakly bonded interface, the relative reduction rate in the final limit stress for hexagonal array was larger than that for square array. Outcome of the present study was compared favorably with the published literature data.

Key words : Composite, Micromechanics, Finite element analysis

1. 서 론

산화물, 질화물 또는 탄화물계의 세라믹을 강화재로 사용하는 금속기지 복합재료는 저가의 세라믹개발 및 복합재료 제조기법의 발전과 함께 응용이 증대되고 있으며,¹⁾ 경량 항공용재료로는 티타늄 또는 알루미늄재료가 응용되고 있다.²⁾ 특히, 저밀도와 고온에서 적절한 내구성이 요구되는 항공엔진용 복합재료로써 알루미늄보다 티타늄(Ti: Titanium)이 기지재료로써 유리한 점이 많으며, 고온

특성향상 및 밀도절감을 위하여 탄화구소 장섬유(continuous fiber)를 강화재로 하는 금속기지 복합재료에 대한 연구가 문헌에 알려지고 있다.^{3,4)}

세라믹/금속기지 복합재료는 강화재의 저부피분율에서는 기지재료와 유사한 특성을 나타내지만, 부피분율이 증가됨에 따라 일반적으로 향상된 강성과 감소된 연성이 기대된다. 장섬유로 보강된 복합재료는 미세구조상 비등방성 구조로 인하여 방향에 따라 기계적거동이 상이하게 나타난다. 또한, 복합재료는 강화재와 기지 계면에서의 결합력의 차이, 강화재내의 결합, 기하학적 형상 및 분포 등에 따라 상이한 기계적 특성을 나타낸다.⁵⁾ 따라서, 복합재료를 구성하고 있는 강화재/기지의 재료종류, 강화재의 부피분율 및 미세구조의 특징차이에 따라 상이하게 나타

[†]Corresponding author : Tae-Woo Kim
E-mail : twkim@kookmin.ac.kr
Tel : +82-2-910-4678 Fax : +82-2-910-4678

나는 열적, 기계적 특성의 변화에 대한 연구가 요구되고 있다.^{6,7)}

복합재료는 미세조직상 불균질한 구성재료를 포함하고 있으나, 부품에 가해지는 하중을 균일하게 분포시켜서 강화재와 기지간에 전달하기 위하여 균일하며 규칙적인 강화재의 분포를 하는 경우가 많다. 복합재료에서 강화재의 파괴분율의 증가에 따라 강성 또는 강도의 변화정도를 예측하기 위하여 복합재료의 미세특징을 표현하는 다양한 해석방법이 개발되어 왔다. 강화재를 타원체(ellipsoid)의 형상으로 가정하여 해석하는 Eshelby의 기법⁸⁾이 있으며, 일반화된 단위포(GMC: Generalized Method of Cell)개념⁹⁾은 기지내의 강화재를 사변형(또는 육면체)로 단위포화시키는 해석기법이며, 유한요소해석법⁷⁾은 강화재의 실제 기하학적 형상자체를 모델링하여 기계적 특성이 해석되어 왔다. 복합재료내 반복되는 미세특징을 단위포 또는 다단위포(multi-cell)개념으로 모델링하는 기법은 미시역학(micromechanics)의 개념으로 문헌에 알려지고 있다.^{10,11)}

세라믹 장섬유강화재가 길이방향의 일방향으로 보강된 금속기지 복합재료에서는 강화재의 길이방향의 하중하에서 기계적특성이 기지의 특성보다 향상될 수 있는 것으로 알려지고 있다. 그러나, 횡방향의 하중하에서는 길이방향의 하중하에서 보다 강화재의 보강효과가 상대적으로 작기 때문에 기지 또는 미세특성에 상대적으로 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 세라믹재료를 강화재로 사용하는 금속기지 복합재료에 단축 횡방향 인장하중이 가해질 때, 미세조직의 특징인 강화재 배열상태 및 강화재/기지 계면에서의 결합정도에 따라 상이하게 나타나는 변형형상과 손상특징의 차이 및 응력-변형률의 영향에 관하여 미시역학개념을 이용하여 해석하였다. 유한요소법을 사용하여 세라믹의 파괴분율의 변화에 따라 계산된 결과는 강화재의 배열상태, 결합정도에 따라 비교되었으며, 본 연구의 해석결과는 유사한 현상을 다루고있는 문헌결과와 비교되었다.

2. 모델링 및 해석절차

복합재료에서 강도(strength) 또는 강성(stiffness)의 향상을 위하여 사용되는 세라믹 보강재가 공간적으로 균일하게 분포되게 함으로써 응력집중을 피하고, 균일한 하중전달을 담당한다. 특히, 세라믹 장섬유는 파괴분율에 대한 효율적인 충전을 위하여, 규칙적이며 반복적인 배열상태를 요구하게 된다. 탄화규소화이버로 규칙적으로 보강된 복합재료의 단면의 일례를 나타낸다.^{2,12)} 공간적으로 균일하며 규칙적인 분포의 예로써, 사각형배열(square array)과 육각형배열(hexagonal array)¹³⁾이 대표적으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 대표적인 2개의 배열에 대하여 특성차이를 비교하였으며, 대각선방향으로 강화재가 위치된 육각형배

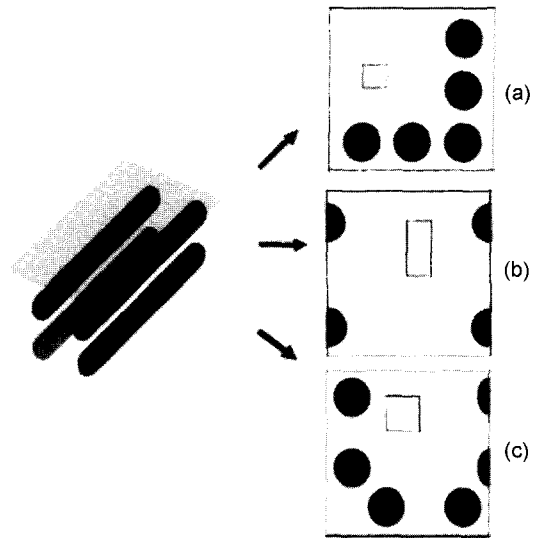


Fig. 1. Schematic representation of periodic array for the reinforcement within the matrix. (a) square array, (b) hexagonal array, and (c) diagonal array.

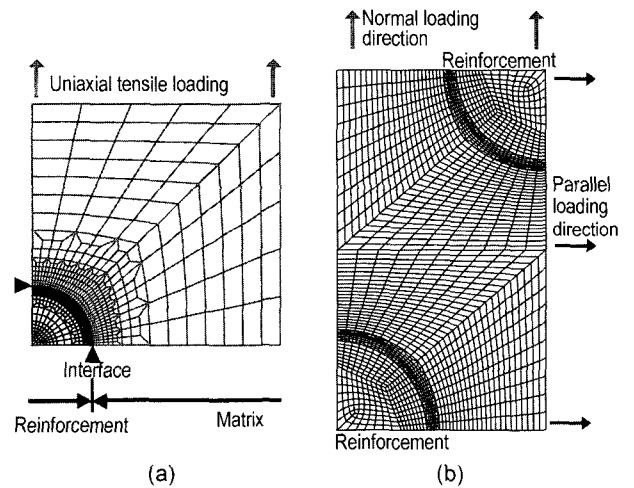


Fig. 2. Typical finite element mesh configuration of (a) square array and (b) hexagonal array.

열과 유사하며 단위포의 횡중축길이가 동일한 대각선 배열에 대하여 추가적인 특징차이가 있는지 검토하였다. Fig. 1은 일방향으로 배열된 연속강화재의 횡단면 형태에 따라 구분한 3가지 형태에 대한 개략도를 나타내고 있으며, 실제해석은 대칭성을 이용하여 형상이 반복되는 가장 작은 파괴단위인 단위포에 대하여 수행하였다. 실제 모델링된 단위포는 Fig. 1에서 각각 네모구간으로 표시되었다. 연속상태의 세라믹강화재 복합재료의 횡단면에 대하여 2차원적인 해석을 수행하였다. Fig. 2(a)는 횡방향, 종방향의 치수가 동일한 정사각형 단위포내에, 4분의 1원인 세라믹과 나머지 부분은 기지재료를 의미하는 유한요소분할도를 나타낸다. Fig. 2(b)는 정육각배열의 강화재에 대한 유한요소분할도를 나타내며, 유사한 요령으로 대각선

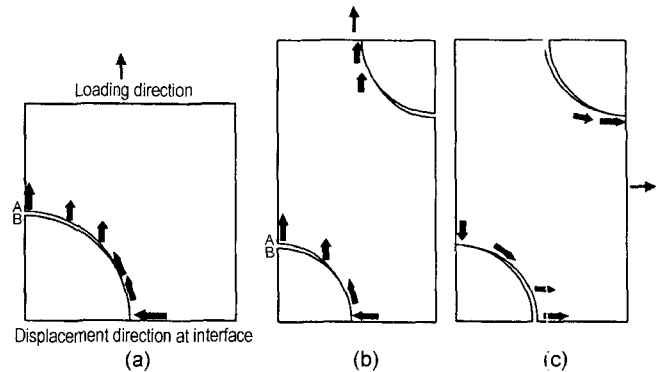
Table 1. Selected Properties for Materials Used in the Present Study

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Yield strength (MPa)
SiC	414	0.22	4.7	N/A
Ti	100	0.33	9.0	200~700

배열에 대하여 유한요소 분할하였다. 세라믹과 기지재료가 연결되어 하중을 전달되는 부분이 계면이며, 계면근방에는 불연속적인 재료특성변화때문에 나머지 부분보다 비교적 작은 크기의 요소로 분할하였다.

세라믹 부피분율의 변화에 따라, 4분의 1원의 반경을 증가 또는 감소시켰다. 실제 해석에 앞서, 본 연구에서 설정된 유한요소 모델의 수렴성 및 정확성에 대한 검증을 실시하였다. 검증은 강한 계면결합의 복합재에서 부피분율의 증가에 따른 횡방향 탄성계수값을 대상으로 하였다. 유한요소분할도를 사용하여 얻은 해석결과값을 미시역학 개념에 기초한 문헌식의 계산값¹⁰⁾과 비교하여 수렴성과 정확성 여부를 확인한 후 실제 계산작업을 진행하였다. 본 연구에서는 탄화규소/티타늄 기지 시스템으로 선정하였으나, 본 연구의 해석방법은 다양한 특성을 갖는 금속, 폴리머, 또는 세라믹 기지재료가 동일하게 적용될 수 있다. 해석에 사용된 각 재료의 특성값은 문헌값^{7,14)}을 기초로 하였으며, Table 1에 정리하였다. 탄성계수 및 열팽창계수는 온도변화에 따라 크게 변화하지 않는 것으로 문헌에 조사되었으나, 항복강도는 온도의존성이 큰 것으로 보고되었다.¹⁵⁾ 또한, 항복강도는 합금성분에 따라 상당히 증가될 수 있기 때문에, 항복강도의 증가에 따른 복합재료 내에 예상되는 손상에 대한 특징변화를 기술하였다.

세라믹 부피분율은 보통 10% 이내의 저 분율에서부터, 충전(packing) 및 균일분포의 공정상 어려움 때문에 50% 부피분율 내외로 제작되는 것으로 알려져있기 때문에, 본 연구에서의 부피분율은 5, 20, 30 vol%를 선택하여 각 분율에 대한 거동을 계산하였다. 경계조건은 단위포의 대칭특징을 적용하기 위하여, 강화재부분의 단위포 대칭선을 따라 각 선분의 직각방향 변위가 발생되지 않도록 하였다. 또한, 인접한 단위포와의 경계면을 따라서 경계면에 직각방향으로의 변위가 동일하도록 모델링하여서 인접단위포와의 대칭성을 적용하였다. 사각배열¹⁶⁾과는 달리, 단위포형상이 수평, 수직방향으로 비대칭이기 때문에 인장하중방향에 따라 수직(normal)방향의 인장하중, 수평(parallel)방향의 인장하중으로 구분하여 각기 계산하였다. 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS¹⁷⁾를 사용하였으며, 부피분율의 변화에 따라 약 1500개 내외의 4변형 평면변형률요소를 사용하였다.

**Fig. 3.** Deformed shape showing debonded interface for array of (a) square, (b) hexagonal with normal loading, and (c) hexagonal with parallel loading.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2(a) 보인 사각배열에 일방향(단축) 인장하중을 받는 사각 단위포에 대한 응력분포 및 변형형상의 특징을 Fig. 3(a)에 나타내고 있다. Fig. 3에서 A, B의 두 점은 하중작용선에 동일한 위치를 의미한다. 강한 계면결합 복합재에서는 A점 및 B점 위치가 하중이 연속적으로 작용하는 동안 동일한 값으로 결정된다. 따라서, 강한 계면 복합재의 경우에 원형형상단면의 강화재는 기지와 계면에서 인장하중 방향으로 변형되게 된다. 그러나, 계면 결합력이 약한 경우에는 기지에 가해지는 인장하중으로 인하여 강화재/기지의 계면에서 분리가 발생되며, 두 점의 공간상 최종위치가 상이하게 계산된다. 인장하중과 수직방향으로 열림모드(opening mode)균열인 계면분리가 나타나며 분리된 기지재료는 변형률이 증가될수록 강화재로부터 멀어지게 된다. 반면, 단위포내의 반대쪽 계면 끝 근방에서는 기지재료가 계면을 향하여 수평이동하여 강화재를 압축접촉하는 것으로 나타났다. Fig. 3(a)의 변형형상은 문헌에 보고된 변형형상과 동일하게 나타났다.¹⁸⁾ 한편, Fig. 3(b),(c)는 육각배열의 약한 계면결합 복합재에 대하여 2가지 인장하중방향에 따라 계산된 변형형상을 나타낸다. 두 점 A, B간에 계면분리가 나타났으며, 분리된 특징은 Fig. 3(a)에 보인 사각배열의 경우와 유사하게 나타났다. 육각배열에서는 기하학적 비대칭 때문에, 하중의(수직 또는 수평)방향에 따라 계면분리되는 위치가 상호 반대위치에서 발생하는 것으로 나타났다. 부분적으로 계면분리된 기지와 강화재사이에는 하중이 전달되지 않게 된다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 약한 결합의 복합재에서는 계면분리가 발생되며, A점과 B점간의 거리가 체적분율의 변화에 따라 상이해진다. 5% 강화재 체적분율일 때 계면에서의 분리되는 수직변위를 단위값(1.0)으로 스케일하여 20, 30% 체적분율때 발생하는 변위의 상대적인 증가율을 사각과 육각배열에 따라 비교하여 Fig. 4에 보였다. 강화

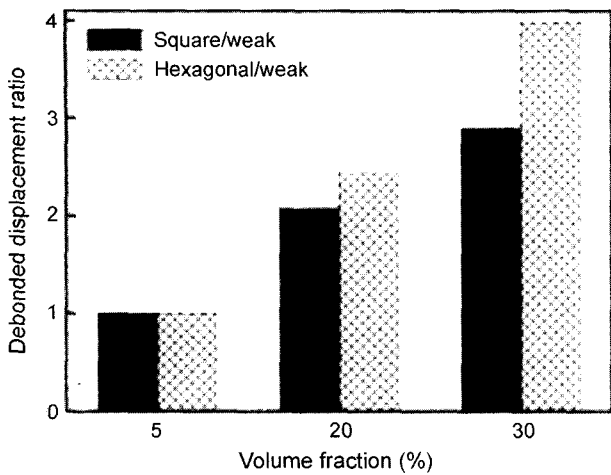


Fig. 4. Rate changes in debonded displacement for square and hexagonal arrays.

재 부피분율이 증가함에 따라, 사각형 배열보다는 육각배열에서 더 큰 분리증가율이 나타났다. 따라서, 계면분리의 정도가 더 많이 증가된 육각배열의 경우가 사각배열보다 부피분율의 증가에 대하여 더 큰 강성의 저하율을 발생시킬 것으로 추정된다. 또한, 원래 동일한 위치를 나타내는 두 점(A,B)에서는 하중의 증가에 따라 분리가 증가되며, 기지재료내 변형량이 증가된다. 변형량의 증가에 따라 기지내부에서는 국부적으로 소성변형이 발생되며, 소성변형이 발생한 지역의 넓이는 변형량 증가에 따라 비례하여 증가되게 된다.

Fig. 5는 Fig. 2에서 보인 수직 또는 수평방향 인장하중 하에서 계면에서 강한 결합 또는 약한 결합을 갖는 육각형 배열의 복합재에 발생하는 소성역의 발전과정을 표시하고 있다. 복합재 기지내의 소성역의 발전과정이 중요한 이유는 세라믹강화재가 연성의 기지와 함께 복합재를 구성하는 경우에 복합재료내의 손상(damage)특징을 해석하기 위함이다. 손상정도가 상대적으로 크거나, 먼저 발생하는 지역에서부터 파손에 이를 수 있는 미세균열 또는 기공의 생성이 예상되기 때문이다. 강화재/기지 계면에서의 결합정도에 따라 소성역의 위치와 형상이 상이하게 나타

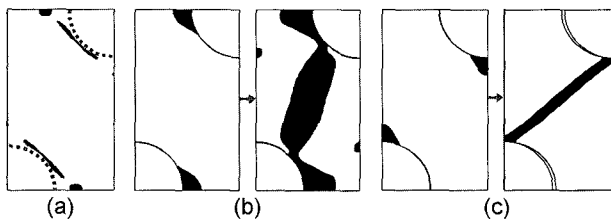


Fig. 5. Evolution of plastic deformation for hexagonal array with (a) strongly bonded interface, (b) weakly bonded and normal loading, and (c) weakly bonded and parallel loading.

났다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이, 계면분리가 없는 강한 계면 복합재에서는 변형률증가에 따라 계면근방에 소성역이 발전되는 것으로 나타났으며, 하중방향이 수평, 수직에 상관없이 거의 동일한 형태로 나타났다.

그러나, 계면결합이 약한 복합재에서는 변형률이 증가됨에 따라 단위포의 한쪽 끝 계면에서는 분리가 증가하는 반면, 단위포의 다른쪽 끝 계면에서는 Fig. 3에 보인바와 같이 기지가 계면을 향하여 압축접촉으로 인한 소성역의 발전이 시작된다. 변형률의 증가에 따라 육각배열에서 소성역의 발전은 계면분리가 Fig. 3(b),(c)에서 보인 것처럼 2개의 강화재 계면에서 동시에 발생되며, 양쪽 강화재/기지 사이의 기지내부로 발전되어 궁극적으로 연결된다. 연결된 소성역은 부피분율에 따라 다소 상이하나, 수직인장 하중경우에 수평선기준 약 70~80°의 각도방향으로 진전되었다. 참고문헌¹⁹⁾에서는 강화재의 탄성계수를 정하지 않고 0 또는 무한대의 2가지 경우에 대하여 해석된 결과를 보고하고 있으며, 탄성계수를 유한값으로 정하여 해석한 본 연구에서의 Fig 5(b) 형상은 양 극한값에 대하여 각각 보고한 참고문헌 결과의 중간형태로 관찰된다. 또한, 약한 계면결합의 육각배열에서는 소성역의 발전형태가 계면에서 먼저 발생되어 기지내부쪽으로 발전되는 경향을 보이며, 사각배열¹⁶⁾에서의 소성역진전형태와 유사하게 나타났다. 유사한 특징의 소성역발전이 약한 계면 결합의 대각선 배열에서도 해석되었다. 단위포의 횡/종방향 길이가 동일한 대각선 배열의 약한 계면 복합재에서도 단위포내 포함된 양쪽의 강화재계면에서 각각 소성역이 시작되어 기지내부로 진행되었다.

기지의 항복강도가 낮을때는 기지에서 발생하는 소성역의 발전이 손상특징이 될 수 있지만, 기지의 항복강도가 상대적으로 높은 경우는 소성의 발생으로 인한 응력이완이 어려워지기 때문에 마치 취성의 재료처럼 기지의 균열로 발전될 수 있다. 취성기지의 복합재료에서 기지는 강화재보다 균열에 대한 저항성이 더 낮기 때문에, 과도한 인장응력으로 인하여 발생하는 균열(cracking)이 취성 복합재의 주된 손상이 되어 궁극적인 파손원인이 된다.²⁰⁾ Fig. 6(a),(b)에서는 각각 계면결합이 강할 때와 약할때의

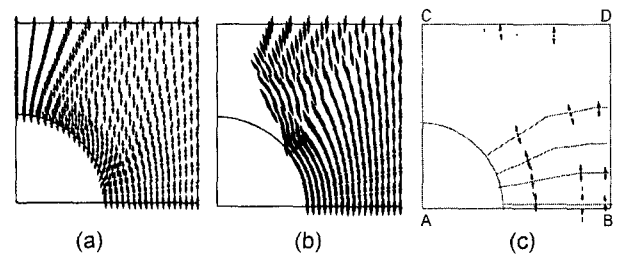


Fig. 6. Direction of the maximum stress and projected crack path based on arrows (a) strongly bonded, (b) weakly bonded interface, and (c) projected crack path.

경우 단위포에 발생되는 최대주응력의 방향을 화살표를 사용하여 나타내었다. 화살표의 길이는 단위포내에서 응력의 상대적인 크기를 나타낸다. Fig. 3에 보인 바와 같이 기지가 분리되는 계면근방에서는 단위포내에서 상대적으로 작은 크기의 응력발생으로 인하여 Fig. 6(b)의 이 지역에서는 화살표가 나타나지않았다. 또한, 화살끝이 양 끝방향으로 벌어지는 것은 그 지점에서 최대 응력이 인장방향임을 의미한다.

인장방향의 응력에 취약한 취성재료가 열림모드(opening mode)에 의한 균열생성으로 전개된다면, 화살표 길이방향과 직각방향으로 재료내에 균열이 발생될 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 기지내의 화살방향과 수직방향을 가상적으로 이은 선을 나타내는 Fig. 6(c)의 형태로 균열진전이 예상된다. 선분 A-B의 근방에서는 선분 A-B 방향과 평행방향으로 미세균열이 예상된다. 선분 A-B에서 멀어짐에 따라, 화살길이의 직각방향을 연결하는 가상선은 사각형 단위포내 강화재의 반경방향으로 나타났다. 계면근방에서 반경방향으로 진전되는 미세균열은 단위포의 B-D 경계면으로 향할수록 선분 B-D와 수직되는 경향을 보인다. Fig. 6(c)에 보인 예상 균열경로의 특징은 취성을 나타내는 사각배열 폴리머기지 복합재료에 대하여 문헌에 알려진 균열²¹⁾의 경로와 거의 동일한 것으로 나타났다. 본 연구의 해석기법으로 연성 및 취성거동을 나타내는 규칙배열의 복합재료에 대한 해석기법이 유효함으로 판단된다.

본 연구의 해석에서 선정된 탄화규소와 티타늄금속간의 열팽창계수차이와 제조시 온도차이로 인하여, 복합재료내에는 열적 잔류응력의 발생이 예상된다. 티타늄금속의 열팽창계수가 세라믹의 열팽창계수에 비하여 크기 때문에, 강화재에는 반경방향으로 기지가 강화재를 죄는 듯한 압축적인 잔류응력이 발생된다.²²⁾ Fig. 7에서는 잔류응력의 존재를 고려한 본 연구결과를 참고문헌⁷⁾에 보고된 실험결과와 비교하였다. 티타늄기지 복합재료는 1000°C

근방의 온도에서 결합이 완성되는 것으로 알려져있지만 정확한 제조온도는 문헌⁷⁾에 잘 밝혀지지 않았기 때문에, 본 해석에서는 문헌 실험결과와의 비교를 위하여 사각배열 및 350°C의 온도차이를 가정하여 해석하였다. 잔류응력이 존재하는 복합재료에 기계적 인장하중이 작용되면, 잔류응력상태에 추가적인 응력의 중첩효과가 발생된다. 완벽한 결합, 또는 약한 결합에 대한 본 해석결과사이에 문헌에서의 실험결과가 존재하는 것은 실제 복합재료의 계면결합이 약한 쪽에 가까움을 의미할 수 있다. SiC/Ti 복합재에서는 활성인 티타늄재료가 탄화규소 강화재표면과 반응하여 계면반응물을 생성하여 부분적인 결합을 하거나, 또는 강화재표면의 여유 그래파이트 성분으로 인하여 부분적 결합을 할 수 있다고 추정되고 있다. 한편, Fig. 7 곡선은 곡선의 형태에 따라 3단계의 특징구간으로 구분될 수 있다. 1단계는 복합재료내에 강화재/기지가 선형 거동을 나타내며, 2단계는 계면분리가 시작되고 비선형적인 변형을 나타낸다. 3단계에서는 계면에서 계속적으로 분리가 진행되며, 상당한 소성변형의 영역이 진행됨에 따라 한계응력에 도달함을 보인다. 응력-변형률 곡선에서 초기의 선형구간에서 기울기가 다른 구간(Fig. 7의 1,2,3단계)이 존재하는 현상은 참고문헌^{7,12)}에서도 유사하게 기술되어 있다.

Fig. 8은 육각형 배열의 복합재에 수직방향 인장하중 작용시, 계면결합정도에 따라 응력-변형률 곡선을 세라믹부 파괴분율의 변화에 따라 나타내었다. 기지에 가해지는 일방향 인장하중중점에서 기지응력을 기지의 항복응력으로 나눈 비율을 횡방향 응력비율로 표시하였으며, 유사한 요령으로 횡방향 변형률비로 정의하였다. 따라서, 응력비 및 변형률비는 무차원수(non-dimensional parameter)가 된다.

복합재료에 대한 응력-변형률의 곡선의 초기 선형기울기는 재료의 강성크기를 의미한다. 따라서, 강화재와 기지사이에 완벽하고 강한 결합이 존재하는 복합재에서는 세라믹 강화재의 파괴분율 증가에 따라, 복합재의 강성크기를 나타내는 선형부분 곡선기울기도 증가되며, 기울기의 증가는 복합재료의 강성의 증가를 의미한다. 또한, 강한 계면의 복합재를 나타내는 Fig. 8(a)에서는 변형률이 점차 증가하면서 응력의 크기가 거의 변화되지않았다. 최종의 응력크기에 근거하여, 파괴분율의 증가에 따른 복합재의 강도의 향상을 예상할 수 있다. 반면, 약한 결합의 복합재에서는 곡선의 기울기를 나타내는 강성크기의 감소로 나타났다. 기울기의 감소는 약한 계면의 분리로 인한 강성의 저하가 원인으로 판단된다. 변형률이 점차 증가에 따라, 응력-변형률곡선은 거의 일정한 응력값을 나타내게 되며, 이 응력값을 최종 한계응력(limit stress)⁵⁾으로 정의하였다. Fig. 8(a),(b)에서 비교되는 바와 같이, 응력-변형률 곡선의 선형기울기 및 한계응력의 크기는 동일한 파괴분율하에서 강한 결합일 때가 약한 결합의 경우

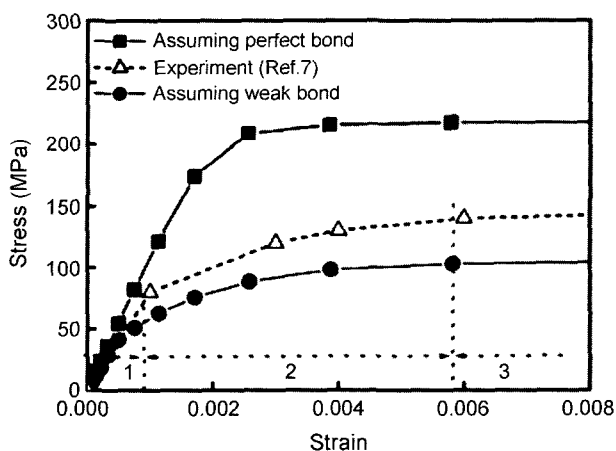


Fig. 7. Comparison of present study assuming perfect or weak interface bonding with experimental literature data.

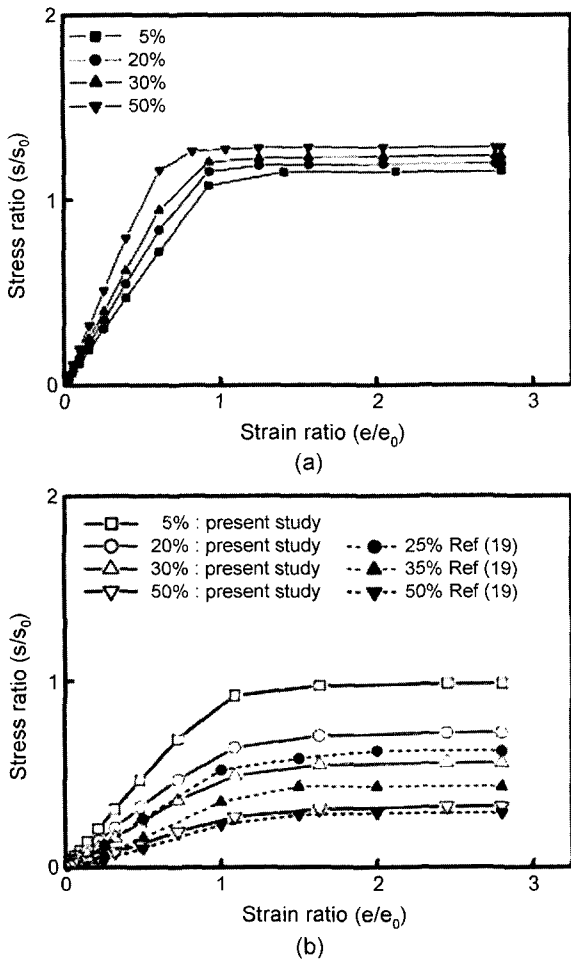


Fig. 8. Transverse stress-strain curve for hexagonal array with (a) strongly bonded interface and (b) weakly bonded interface.

값보다 크게 나타났으며, 이러한 현상은 문헌¹⁹⁾결과와 동일하였다.

25, 35, 50%의 SiC 강화재 부피분율에 대하여 결과를 보고한 참고문헌¹⁹⁾에서는 잔류응력의 영향에 대한 고려하지 않았다. 따라서, 동일한 조건에서의 비교를 위하여, 잔류응력의 존재를 무시한 본 해석의 결과와 문헌의 결과를 Fig. 8(b)에 비교하였다. 본 해석은 20, 30, 50% 부피분율에 대하여 계산되었기 때문에 문헌의 25, 35, 50%에 대하여 계산된 곡선과 정확히 동일한 부피분율에 대하여 얻어진 결과비교는 아니지만, 부피분율에 대한 한계응력의 변화경향은 상호 일관성이 있으며 잘 일치하는 것으로 나타났다. 육각배열의 복합재에 수평하중이 작용할 때의 응력-변형률곡선의 기울기와 최종응력크기의 변화경향은 육각배열의 수직 하중하에서 얻어진 곡선의 경향과 유사하게 나타났다.

Fig. 9는 강화재의 배열형태(사각형, 육각형, 대각선), 계면결합(유무) 및 강화재 부피분율의 변화에 따라 Fig. 8에

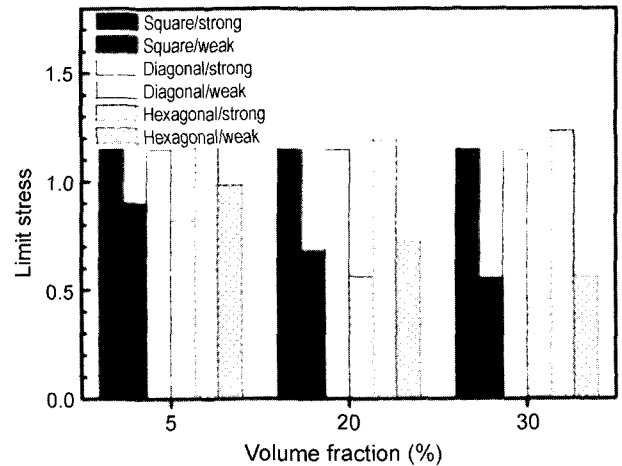


Fig. 9. Comparison of the limit stress depending on the type of the periodic array, volume fraction, and the type of the interface bonding.

서 육각형 배열에서 예시한 바와 같이 응력-변형률 곡선의 최대치를 나타내는 한계응력의 변화를 비교하였다. 강한 결합에서는 부피분율의 증가에 따라 한계응력이 일반적으로 증가되었으며, 약한 계면결합에서는 부피분율의 증가에 따라 한계응력이 감소되는 것으로 나타났다.¹⁹⁾

강한 계면결합에서는 체적분율이 증가함에 따라, 육각배열에 대하여 얻어진 한계응력 크기의 증가율이 사각형(또는 대각선) 배열의 한계응력 증가율에 비하여 약간 크게 나타났다. 육각배열이 사각형 또는 대각선 배열보다는 하중지지 측면에서 다소 효율적인 배열형태임을 의미할 수 있다. 그러나, 계면결합이 약한 경우는 사각형 배열보다는 육각형 배열에서 더 큰 한계응력의 감소율이 나타났다. Fig. 4에서 약한 계면결합에서는 부피분율의 증가에 따라 육각배열이 사각배열보다 더 큰 계면분리 증가율을 보였다. 더 큰 계면분리의 증가율은 육각배열의 더 큰 강성저하율을 나타내며, Fig. 9에 나타난 것처럼 육각배열에서 더 큰 한계응력의 저하율을 발생시키는 것과 관련이 있을 것으로 생각된다.

실제 응용되는 복합재료에서는 제조시 발생하는 결함, 계면에서의 화학적 반응물, 또는 물성의 불일치로 인하여 발생하는 잔류응력 때문에 완벽한 계면결합이 되지 않을 수 있다. 강화재/기지 계면에서의 분리는 열적, 기계적 특성에 영향을 미치는 중요한 변수가 되기 때문에, 실제 미세조직에 대한 특징을 반영한 해석을 통하여 거시적인 평균특성을 예측하는 기법이 요구되고 있다. 본 연구에서의 해석을 발전시켜서, 세라믹 강화재내의 파손, 또는 부분적 계면결합²³⁾이 모델링단계에서 고려되어 복합재의 거시적 열적, 기계적 특성에 대한 해석이 가능하다. 열팽창 계수가 작고, 열전도도가 우수한 탄화규소 세라믹을 강화재로 사용하는 금속기지 복합재료는 경량, 고온용 항공복합재료로서의 응용뿐 아니라, 전자부품 또는 생체재료로

의 응용이 기대되며, 본 연구의 해석기법을 응용하여 세라믹과 이종재료의 복합구성에 대한 특성해석에 사용될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄성거동을 하는 세라믹 강화재와, 연성 또는 취성을 나타내는 기지재료로 구성되는 복합재료에서 강화재의 배열형태, 파괴분율 및 계면결합의 유무에 따라 발생하는 횡방향의 거동을 계산하였다. 강한 계면결합이 있는 복합재와는 달리, 약한 결합의 복합재의 경우는 인장하중에 의하여 계면분리가 발생된다. 이 분리는 전체복합재의 강성을 감소시키며, 세라믹의 파괴분율이 증가할수록 응력-변형을 곡선기울기인 강성크기 및 곡선 최대값인 한계응력의 감소로 나타났다. 계면결합이 강한 경우는 세라믹파괴분율이 증가할수록 사각형 배열보다는 육각형배열의 복합재에서 다소 큰 한계응력의 증가율이 나타났다. 동일 파괴분율 증가에 대하여 육각형배열에서 사각형배열보다 더 효율적인 강도/강성증가를 얻을 수 있을 것으로 추정된다. 계면결합이 약한 경우는 세라믹 파괴분율이 증가될수록 사각형 배열보다는 육각형배열의 복합재에서 상대적으로 큰 한계응력의 감소율로 해석되었다.

감사의 글

본 연구는 과학재단이 지원하는 특정기초연구과제(1999-2-301-014-3)의 지원에 의한 것입니다.

REFERENCES

1. N. Carrere, F. Feyel, and S. Kruch, "Multi-scale Modelling of Silicon Carbide Reinforced Titanium MMCs: Applications to Advanced Compressor Design," *Aerospace Sci. and Tech.*, **7** 307-15 (2003).
2. A. Vassel, "Continuous Fibre Reinforced Titanium and Aluminium Composites: A Comparison," *Mat. Sci. and Eng.*, **A263** 305-13 (1999).
3. P. W. M. Peters and J. Hemptenmacher, "Oxidation of the Carbon Protective Coating in SCS-6 Fibre Reinforced Titanium Alloys," *Composites: Part A* **33** 1373-79 (2002).
4. S. Djanarthany, J. Viala, and J. Bouix, "Development of SiC/TiAl Composites: Processing and Interfacial Phenomena," *Mat. Sci. and Eng.*, **A300** 211-18 (2001).
5. G. Bao, "Damage due to Fracture of Brittle Reinforcements in a Ductile Matrix," *Acta Metall. Mater.*, **40** [10] 2547-55 (1992).
6. T. D. Fadale and M. Taya, "Effective Thermal Conductivity of Composites with Fibre-matrix Debonding," *J. Mat. Sci. Lett.*, **10** 682-84 (1991).
7. J. A. Sherwood and H. M. Quimby, "Micromechanical Modeling of Damage Growth in Titanium Based Metal-matrix Composites," *Computers & Structures*, **56** [2] 505-14 (1995).
8. F. H. Gordon, S. P. Turner, R. Taylor, and T. W. Clyne, "The Effect of the Interface on the Thermal Conductivity of Titanium-based Composites," *Composites*, **25** [7] 583-92 (1994).
9. A. Sankurathri, S. Baxter, and M. Pindera, "The Effect of Fiber Architecture on the Inelastic Response of Metal Matrix Composites with Interfacial and Fiber Damage," *Damage and Interfacial Debonding in Composites*, 235-57 (1996).
10. X. Chen and Y. Liu, "Multiple-cell Modeling of Fiber-reinforced Composites with the Presence of Interphases using the Boundary Element Method," *Comput. Mater. Sci.*, **21** 86-94 (2001).
11. E. E. Gdoutos, K. Pilakoutas, and C. A. Rodopoulos, *Failure Analysis of Industrial Composite Materials*, 3-108, McGraw-Hill (2000).
12. B. Bednarck and S. M. Arnold, "Transverse Tensile and Creep Modeling of Continuously Reinforced Titanium Composites with Local Debonding," *Int. J. Solids Struct.*, **39** 1987-2017 (2002).
13. D. Hull and T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, 40-2, Cambridge (1996).
14. W. Callister, Jr, *Materials Science and Engineering*, 767-68, Wiley (1994).
15. Y. A. Bahei-El-Din and G. J. Dvorak, "Mechanics of Hot Isostatic Pressing of a Densified Unidirectional SiC/Ti Composite," *Acta Metall. Mater.*, **43** [7] 2531-39 (1995).
16. T. Kim and S. Park, "Micromechanical Analysis for Transverse Properties of Ceramic/Metal Composite," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [6] 575-81 (2001).
17. *ABAQUS/Standard Users Manual*, Hibbit, Kaarlson & Sorenson Inc, Providence, RI, U.S.A. (2002).
18. J. M. M. de Kok and T. Pejis, "Deformation, Yield and Fracture of Unidirectional Composites in Transverse Loading," *Composites: Part A*, **30** 917-32 (1999).
19. Z. Z. Du and F. W. Zok, "Limit Stress Concitions for Weakly Bonded Fiber Composites Subjected to Transverse Biaxial Tensile Loading," *Int. J. Solids Structures*, **35** [21] 2821-42 (1998).
20. J. Lamon, "A Micromechanics-based Approach to the Mechanical Behavior of Brittle-matrix Composites," *Composites, Sci. and Tech.*, **61** 2259-72 (2001).
21. S. Socrate, M. C. Boyce, and A. Lazzeri, "A Micromechanical Model for Multiple Cracking in High Impact Polystyrene," *Mechanics of Materials*, **33** 155-75 (2001).
22. Y. M. Xing, Y. Tanaka, S. Kishimoto, and N. Shinya, "Determining Interfacial Thermal Residual Stress in SiC/Ti-15-3 Composites," *Scripta Mater.*, **48** 701-06 (2003).
23. F. G. Yuan, N. J. Pagano, and X. Cai, "Elastic Moduli of Brittle Matrix Composites with Interfacial Debonding," *Int. J. Sol. Structures*, **34** [2] 177-201 (1997).