

세라믹/금속기지 복합재료의 특성에측을 위한 미시역학적 유한요소해석

김태우[†] · 박상환*

국민대학교 기계자동차공학부

*한국과학기술연구원 복합기능세라믹스

(2001년 5월 15일 접수; 2001년 5월 28일 승인)

Micromechanical Analysis for Transverse Properties of Ceramic/Metal Composite

Tae-Woo Kim[†] and Sang Hwan Park

Mechanical Engineering, Kook-Min University, Seoul 136-702, Korea

*Multifunctional Ceramics, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

(Received May 15, 2001; Accepted May 28, 2001)

초 록

세라믹/금속기지 복합재료에서 횡방향의 단축인장하중을 받는 경우, 복합재료의 특성에 관한 시뮬레이션결과이다. 세라믹과 금속기지간 계면에 강한 결합이 존재하는 복합재와, 계면에서의 결합이 약한 복합재의 두 경우에 대하여 횡방향 평균응력과 평균변형률에 대한 관계를 계산하였다. 복합재료에 미시역학적개념과 유한요소해석법을 적용하여 세라믹체적분율의 변화에 따라 각기 해석되었다. 본 연구에서 계산된 횡방향 탄성계수는 문헌에 알려져있는 미시역학개념으로 유도된 식에 의한 횡방향탄성계수값과 잘 일치되었다. 계면에서 강한 결합이 있는 복합재와는 달리, 약한 결합의 복합재는 인장하중에 의하여 세라믹/금속계면에서 금속재료와 세라믹간의 분리가 발생된다. 이 분리는 전체복합재의 강성을 감소시키며, 금속의 파괴분율이 감소될수록(즉, 세라믹의 파괴분율이 증가할수록) 횡방향 평균응력의 평균변형률에 대한 감소로 나타났다. 미시역학의 개념을 적용한 유한요소해석기법을 통하여, 이미 알고 있는 복합재 각 성분의 특성으로부터 복합재료의 계면특성과 횡방향특성을 예측할 수 있다.

ABSTRACT

The present investigation shows the simulation results for ceramic reinforced metal matrix composite under uniaxial transverse tensile loading. The resulting transverse mean stress with the transverse mean strain was described for composites with two different types of interfacial bonding: (1) strongly bonded interface, and (2) weakly bonded interface. A two-dimensional finite element modeling and analysis were conducted based on the unit-cell concept with an assumption of a regular square arrangement of the reinforcement within the composite. The FEM-based prediction of transverse modulus of the composite agreed fairly well with available analytical solutions with volume fraction changes within the composite. The transverse mean stress was generally increased with the ceramic volume fraction for composite with strong interface bonding. For the composite with weak interface bonding, however, the transverse mean stress was calculated to be decreasing with ceramic volume fraction. The decrease is caused by the interface debonding-induced stiffness reduction of the composite. The micromechanics concept combined with finite element modeling for composite can be used in order to predict the interfacial and transverse properties of composites with a priori known properties of constituents.

Key words : Ceramic/metal composite, Micromechanics, Finite element analysis

1. 서 론

연속상태(long-continuous), 비연속단섬유(short fiber), 또는 입자(particle)형상의 세라믹재료를 보강재로 하고, 연성이 풍부한 금속재료를 기지재료로 하는 세라믹/금속 복합재료의 응용은 강도, 크리프하중에 대한 저항성이 요구되는 구

조재료에 널리 응용되고 있다. 특히, 열팽창계수가 낮은 세라믹을 강화재로 적용하면 순수 금속재료에 비하여 강성증가 및 열팽창정도를 감소시킬 수 있는 것으로 기대되고 있으며, 세라믹강화 금속기지복합재료(MMC: Metal Matrix Composite)로 분류되고 있다. 동일한 방향으로 보강재가 배열되는 복합재료의 경우에, 탄성계수의 크기가 종방향보다 비교적 작은 횡방향에서의 기계적특성에 대한 연구가 요구되고 있다.¹⁻³⁾

[†]Corresponding author : twkim@kookmin.ac.kr

복합재료는 미세조직상 불균질한 구성재료를 포함하고 있으나, 부품에 가해지는 하중을 균일하게 강화재와 기지간에 전달하기 위하여 균일한 강화재의 배열을 하는 경우가 많다.¹⁾ 균일한 배열뿐 아니라, 규칙적인 강화재의 배열로 인하여 복합재료의 미세조직특징에 대한 반복적인 최소의 단위를 나타내는 단위포(unit-cell) 또는 다단위포(multi-cell) 개념을 기초로 하여 복합재료의 특성에 대하여 이론적인 관계식도출이 이루어져왔으며, 복합재료에 대한 미시역학(micromechanics)의 개념으로 문헌에 알려지고 있다.³⁻⁵⁾

재료의 연속체(continuum) 개념에 근거하여 복합재료의 정량적인 거동예측에 대한 연구가 폭넓게 진행되어 왔으며, rule-of-mixture, self-consistent 모델, Hashin-Strikman 모델 등의 이름으로 복합재료에 대한 선형, 탄성적 거동에 대한 연구가 진행되어 왔다. 복합재료의 거동변화는 강화재, 기지재료의 기계적특성(예: 탄성계수, 포와송의비)와 구성재료의 각 부피분율의 변화에 따라 달라질뿐 아니라, 강화재와 기지사이의 계면결합력등에 따라 계면전달하중의 크기가 변화하며 복합재료의 응력-변형율로 나타나는 거동의 변화가 나타나기 때문에, 복합재료의 계면력변화(bonding정도)에 따른 거동변화에 대한 예측은 중요하다.^{6,7)}

본 연구에서는 세라믹/금속기지 복합재료에 단축방향 인장하중이 가해질 때, 세라믹과 금속간 계면에서의 결합특성에 따른 복합재료의 응력-변형율의 영향에 관하여 미시역학과 유한요소개념을 이용하여 계산하였다. 유한요소법⁸⁾을 사용하여 세라믹의 부피분율의 변화에 따라 계산된 횡방향 탄성계수는 미시역학개념을 이용한 탄성계수 계산식과 비교하여, 모델링기법의 유효성을 점검하였다.

2. 모델링 및 해석절차

복합재료에서 강도(strength) 또는 강성(stiffness)의 향상을 위하여 사용되는 세라믹(입자, 또는 fiber보강재)은 공간적으로 균일하게 분포되는 경향이 있다. 탄화규소화이버로 보강한 유리세라믹 복합재료의 경우¹⁾에 연마한 복합재료의 단면에서의 미세구조에서는 규칙적이고, 균일한 배열이 관찰된다. 공간적으로 균일하며, 규칙적인분포의 예로써, 사각형 배열(square arrangement)와 육각형배열(hexagonal arrangement)가 대표적으로 알려지고 있다. 본 연구에서는 사각형 배열의 세라믹강화재의 경우에 대하여, 복합재료의 세라믹 부피분율의 변화에 따른 응력-변형율거동에 대하여 연구하였다. Fig. 1은 사각형배열에 대한 복합재료의 단면에 대한 개략도를 나타내고 있으며, 실제해석은 대칭성을 이용하여, 형상이 반복되는 가장 작은 부피단위인 단위포(unit-cell)에 대하여 수행하였다.

연속상태(long-continuous)의 세라믹강화재 복합재료, 또는 입자상태의 강화재를 사용한 복합재료의 횡방향 단면에 대하여 2차원적인 해석을 수행하였다. Fig. 2는 복합재료의 2

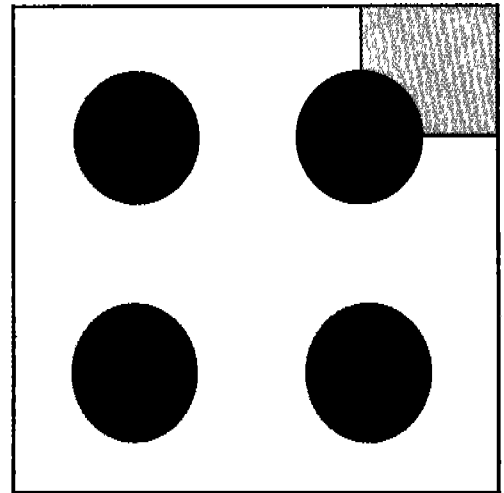


Fig. 1. The schematic for an unit-cell of square array packing geometry.

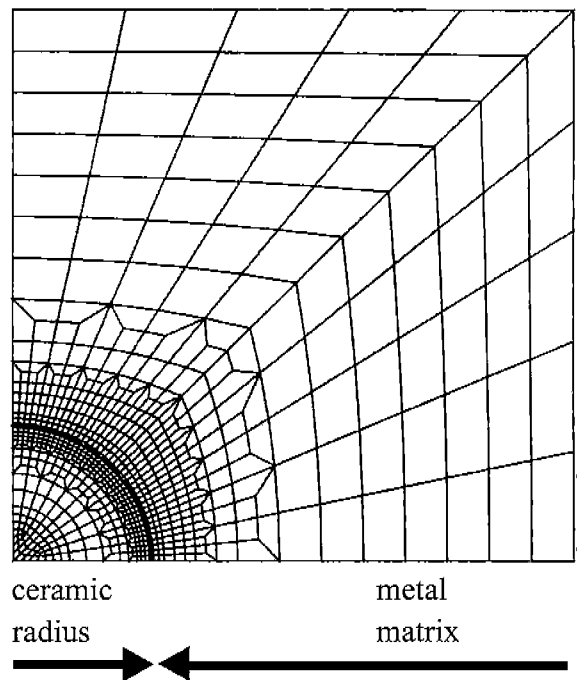


Fig. 2. Typical two-dimensional finite element mesh used for the analysis.

차원 단면형상의 단위포에 대하여, 횡방향, 종방향의 간격이 동일한 4분의 1원인 세라믹과 나머지 부분은 금속기지재료에 대한 유한요소분할도를 나타낸다. 세라믹과 금속기지재료가 연결되어 하중을 전달되는 부분이 계면이며, 계면근방에는 재료특성의 변화로 인하여 나머지 부분보다 더 작은 요소분할을 하였다. 세라믹 부피분율은 보통 10% 이내의 저분율에서부터, 충전(packng) 및 균일분포의 공정상 어려움 때문에 최대 50부피 분율전후로 제작되는 것으로 알려져 있기 때문에, 본 연구에서의 부피분율은 5, 20, 30, 50 vol%

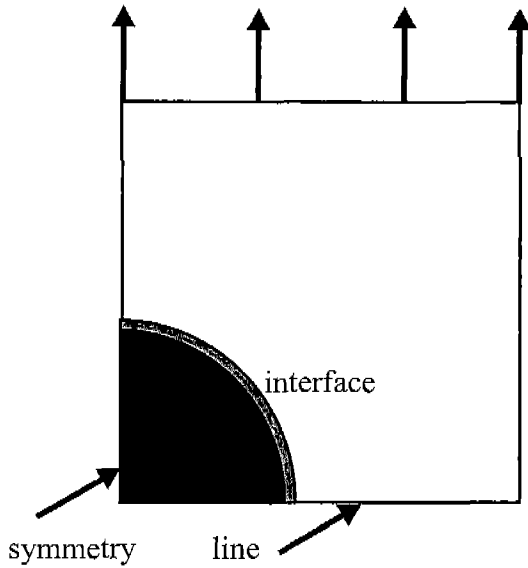


Fig. 3. Uniaxial tension applied to the finite element model.

를 선택하여 각 분율에 대한 거동을 계산하였다. 세라믹의 파괴분율의 변화에 따라, 4분의 1원의 반경의 증가, 또는 감소시켰으며 계면근방의 요소의 크기, 요소의 형상변화에 따른 계산결과와 타당성, 수렴성등을 복합재료역학의 기본이론을 근거로 점검하여 요소분할도에 대하여 확정후한 계산 작업을 진행하였다.

Fig. 3에서는 일방향(단축) 인장하중을 받는 단위포에서의 개략도를 나타내고 있다. 복합재료에서의 강화재와 기지사이의 분리(debonding)은 기공(void)의 생성과 하중의 비효율적인 전달 때문에 기계적특성의 저하를 초래하는 것으로 알려져 있다.^{9,10} 세라믹과 금속기지사이에서 계면에서 세라믹과 금속간에 강한 결합(bonding)이 존재하는 경우와, 계면에서 약한 결합(weak bonding)의 형태를 가정하여 응력-변형율의 변화에 대하여 계산하여 계면결합력의 변화에 따른 복합재료의 거동에 대한 계산결과를 비교하였다. 규칙적으로 반복되는 단위포의 특징을 적용하기 위하여, 4분의 1원의 대칭선에서의 직각방향으로 변위가 발생되지 않도록 하였다. 또한, 인접한 단위포와의 경계면을 따라서 경계면에 직각방향으로의 변위가 동일하도록 모델링하여서 인접단위포와의 대칭성을 적용하였다. 실제 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS¹¹)를 사용하였으며, 파괴분율의 변화에 따라 약 1000개내의 4변형 평면변형율요소를 사용하였다. 세라믹강화재는 탄성, 선형적인 변형을 하는 것으로 가정하였으나, 금속기지는 탄소성변형을 하는 것으로 가정하였다.

알루미늄 금속재료는 경량성으로 인하여, 항공기 등의 복합재료의 기지재료로 폭넓게 활용되고 있으며, 특히 최근에는 종래의 분말야금법(PM: Powder Metallurgy)기법을 이용한 알루미늄기지복합재료의 제조가 연구되고 있다.¹²⁾ 한편, 탄화규소세라믹재료는 우수한 강성으로 인하여 세라믹 강화

재료로 많이 선택되고 있다. 상기 이유로 인하여, 탄화규소로 보강된 알루미늄복합재료에 대하여 실험결과가 문헌에 보고되고 있기 때문에, 본 시뮬레이션에서의 복합재료의 구성은 탄화규소(SiC) 세라믹과 알루미늄기지재료로 구성된 복합재료의 특성을 이용한 단위포의 횡방향 거동에 대하여 계산하였다. 계산결과는 실제 응력-변형율의 값보다는 계산된 응력과 변형율을 각각 항복응력과 항복변형율로 나눈 값의 비율로 표현하였다. 따라서, 각 축에서의 변수가 무차원수가 되게 하였으며, 무차원수의 변화량과 각 파괴분율의 변화에 따른 응력변화 정도의 관찰을 용이하게 하였다.

3. 결과 및 고찰

강화재와 기지상태의 탄성계수의 비율에 따라 복합재료의 탄성계수도 변화되며, 탄성계수의 비율변화에 따른 복합재료의 횡방향 평균응력-변형율변화도를 Fig. 4에 나타내었다. 기지에 가해지는 일방향 인장하중점에서 기지응력을 기지의 항복응력으로 나눈 비율을 횡방향 평균응력으로 표시하였으며, 유사한 요령으로 횡방향 평균변형율을 계산하여 응력-변형율 곡선을 강화재/기지간의 탄성계수의 비율변화에 대하여 계산하여 Fig. 4에 보였다. 비율의 변화는 기지재료의 탄성계수를 고정시키고, 강화재의 탄성계수의 증가(또는 감소)에 따라, 전체 복합재료의 응력변화를 나타낸 것이다. 강화재의 탄성계수의 증가에 따라 복합재료에서 계산되는 응력-변형율의 곡선의 기울기를 나타내는 탄성계수의 증가가 예상되면, Fig. 4의 결과와 일치한다. 강화재와 기지사이에서 완벽하고 강한 결합이 존재하는 복합재에서는 탄성계수비의 증가에 따라 응력-변형율의 기울기도 증가되며, 응력-변형율 곡선에서의 기울기의 증가는 복합재료의 강성(stiffness)의 증가를 의미한다.

탄화규소/알루미늄 복합재료에서의 횡방향탄성계수를 세라믹 파괴분율의 변화에 따라 유한요소법을 사용하여 계산

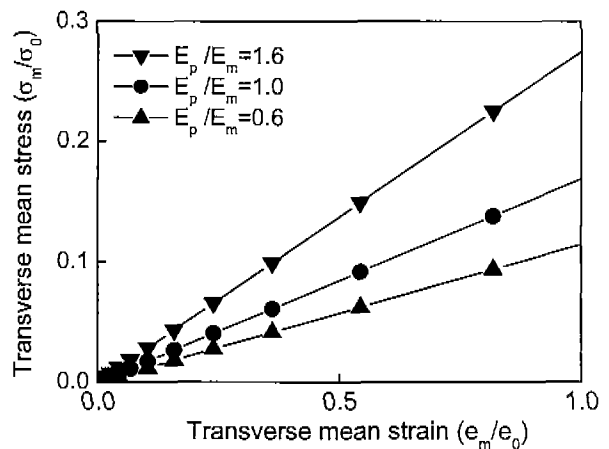


Fig. 4. Stress vs. strain with a change of elastic modulus ratio for composite constituent.

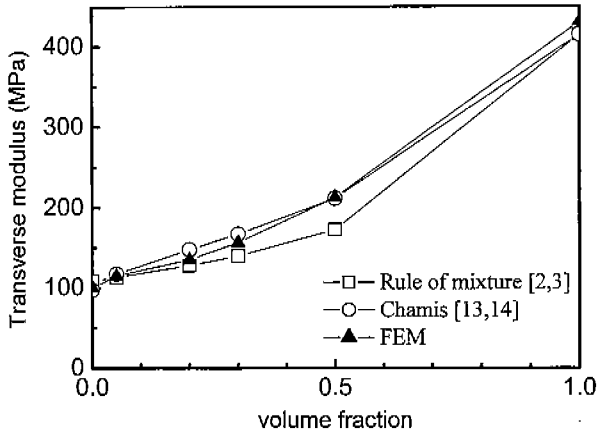


Fig. 5. Comparison of transverse modulus of the composite with volume fraction.

한 결과를 Fig. 5에 보였다. 유한요소법에 의하여 계산된 결과의 유효성을 점검하기 위하여, 문헌^{2,3,13,14})에서 미시역학적 개념을 이용하여 유도된 식에 복합재료의 강화재와 기지의 특성을 대입한 수치값과 비교하였다. Rule of mixture를 이용한 강화재의 부피분율변화에 따른 횡탄성계수(E_{22})의 변화는 eq.(1)로 계산되었으며, Chamis^{13,14})의 식은 eq.(2)로 계산되었다.

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{1}{E_r} + \frac{(1-v_f^2)}{E_m} \quad (1)$$

$$E_{22} = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f}(1 - E_m/E_r)} \quad (2)$$

ROM과 Chamis의 식을 이용한 계산값과 본 연구에서 수행한 유한요소해석결과는 부피분율의 변화에 대하여 잘 일치하는 것으로 나타났다. 복합재료의 횡방향 탄성계수에 대한 하한경계(lower bound)를 나타내는 것으로 알려진 ROM (Rule Of Mixture, 또는 LOM: Law Of Mixture)는 본 유한요소해석결과보다 낮게 나타났으며, Chamis의 식의 결과는 세라믹 부피분율이 50 vol% 보다 작을때에는 유한요소법에 의한 결과가 다소 작게 나타났으나, 50 vol% 이상(100 vol%)에서는 유한요소법에 의한 결과가 Chamis에 의한 결과보다 약간 높게 나타났다.

Fig. 6에 부피분율의 변화에 따라 세라믹과 금속간의 완벽(perfect)하고 강한(strong) 결합을 하는 복합재에서의 횡방향 평균응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 변형률이 비교적 작은 구간에서는 응력과 변형률이 선형으로 비례하게 되며, 기울기의 증가는 복합재의 강성증가로 해석된다. 변형률이 점차 증가됨에 따라, 금속기지내에 국부적인 항복이 발생되기 때문에 일정한 변형률이상으로 변화된 복합재료의 응력-변형률곡선은 선형거동을 하지않게된다. 응력과 변형률이 선형으로 비례하는 구간에서는 세라믹부피분율의 증가에 따라 복합재료의 강성의 증가를 나타내는 곡선의 기울기가

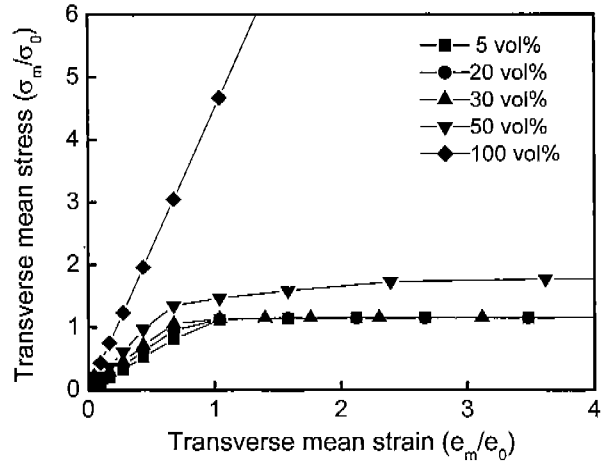


Fig. 6. Transverse mean stress/strain for the composite of strongly bonded interface.

증가된다. 세라믹의 부피분율이 계속 증가되어 세라믹으로만 구성된(volume 100%)의 경우에 계산된 응력-변형률의 곡선은 완전한 직선으로 나타났다. 한편, 5, 20, 30 vol%를 나타내는 곡선에서 평균변형률이 1보다 작은 구간에서는 부피분율의 증가에 따라 곡선의 기울기가 증가하였으나, 변형률이 점차 증가하면서 부피분율의 변화에 따른 응력-변형률 곡선값에 대한 차이가 감소하였다. 응력-변형률곡선의 차이가 감소함은 저부피 강화재 복합재의 경우에 기지에서 발생하는 국부적인 항복영역의 폭넓은 증가로 인한 응력의 감소로 생각된다. 부피분율이 50 vol%로 증가되면서, 응력-변형률의 크기도 증가하였으며, 응력의 크기도 증가하였다.

강화재와 기지간 계면에서의 결합이 완벽한 경우와는 달리, 결합이 약한 복합재의 경우에는 복합재료에 가해지는 인장하중으로 인하여 강화재와 기지사이의 계면에서 분리가 발생된다. 변형되는 형상의 특징을 다소 과장되게 표현하면 Fig. 7에 나타난 바와 같다. Fig. 7에서 'A', 'B'의 두 점은 공간상에서 실제 동일한 위치를 나타내고 있었으며, 강한 계면결합 복합재에서는 'A'점 위치가 변형함에 따라, 'B'점위치의 최종변위가 동일하게 결정된다. 따라서, 원형형상의 강화재는 강한 계면복합재의 경우에 일축 인장하중하에서 타원형상으로 변화하게된다. 그러나, 계면간의 결합력이 약한 복합재에서는 계면간의 분리가 쉽게 발생되며 두 점의 최종위치가 상이하게 나타난다. 기지상의 위치를 나타내는 'A'점은 인장하중과 인장하중으로 인한 프와송의 비의 영향으로 인하여 하중과 직각방향에서는 압축변형을 나타내게 된다. 한편, 강화재상의 위치를 나타내는 'B'점은 계면분리(debonding)으로 인하여 하중이 전달되지않기 때문에 인장하중에도 불구하고 'A'점의 변위량에 비하여 상대적으로 작은 값의 변위량을 나타내게된다.

Fig. 8은 Fig. 7에서의 두점인 'A', 'B'의 위치에서의 분리정도를 변형률에 대하여 계산한 것이다. 좌표의 횡,종축에

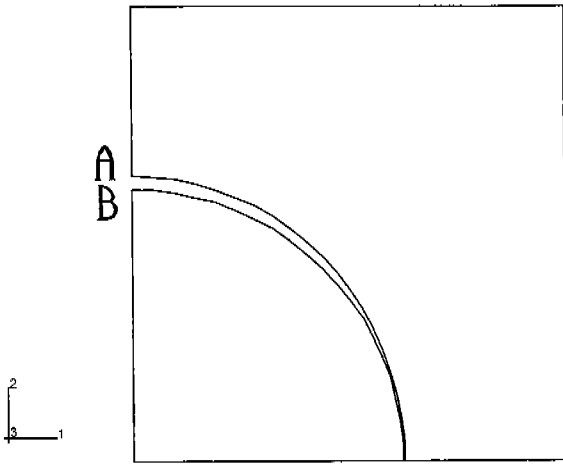


Fig. 7. The deformed shape of the composite under uniaxial tension with weakly bonded interface showing separation.

서의 변수를 무차원수로 표시하기 위하여, 발생하는 응력과 변형율을 각기 항복응력과 항복변형율로 나눈 비율로 표시(normalize)하였다. 변형율이 증가함에 따라 두점간의 변위량의 차이는 거의 선형적으로 증가됨으로 나타났다. 두 점간의 위치차이는 두 점과 직각방향에서의 계면위치에서의 변형량 증가를 의미한다. 변형량의 증가로 인하여 복합재에서는 국부적으로 소성변형이 발생되며, 소성역은 변형량의

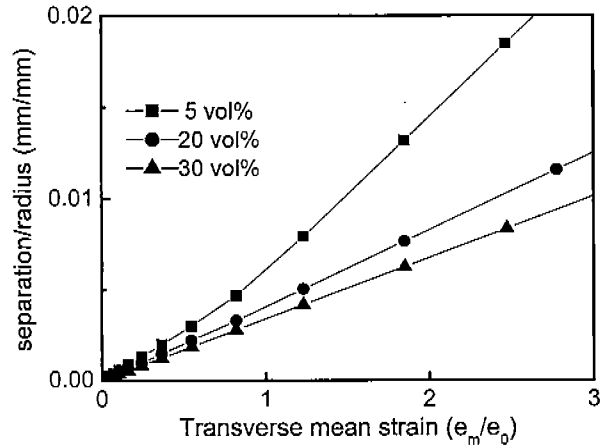


Fig. 8. The change of separation with the increase of mean strain.

증가에 따라 넓이가 증가되게 된다. 또한, 강화재/기지 계면에서의 결합정도에 따라 소성역의 위치와 형상이 상이하게 나타난다.

Fig. 9는 강한 결합과 약한 계면의 결합을 갖는 복합재에서 발생하는 소성역의 발전과정을 표시하고 있다. Fig. 9(a)에서 강한 계면결합의 복합재에서는 강화재의 강성이 하층의 전달과정에 영향을 미치지 때문에 하중방향에서부터 소성역이 발생되며, 변형량이 증가됨에 따라 강화재와 기지간

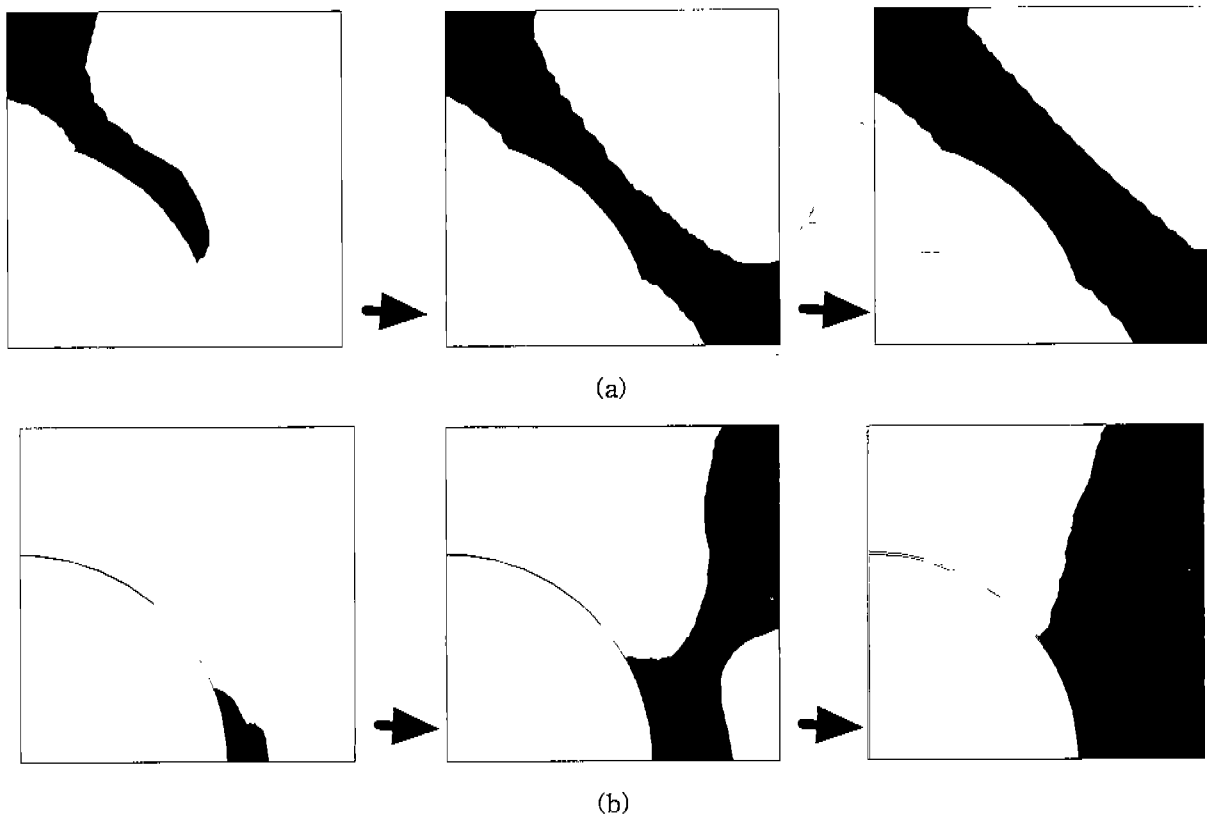


Fig. 9. The evolution of plastic region with uniaxial tensile loading. (a) with strong bond and (b) weak bond.

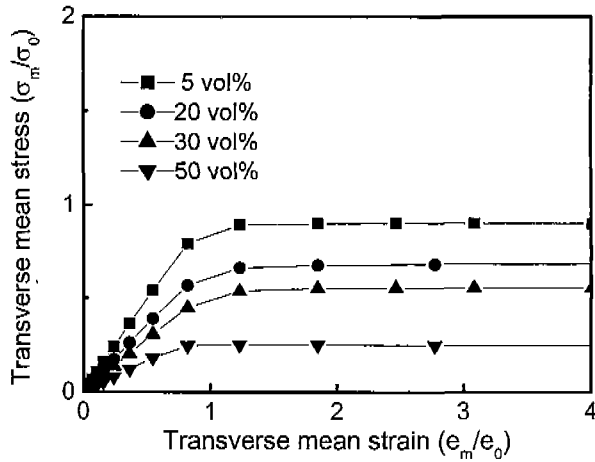


Fig. 10. Transverse mean stress/strain for the composite of weakly bonded interface.

의 계면을 따라, 그리고 기지 내부를 향하여 소성역이 발전 되는 것으로 나타났다. 그러나, 계면결합이 약한(또는 없는) 경우의 복합재에서는 하중방향에서의 계면분리와 함께, 하중과 직각방향의 계면에서는 기지의 강화재방향으로의 압축적인 접촉으로 인하여 소성역의 발전이 시작된다. 변형량의 증가에 따라 소성역의 발전은 기지내부로 진행되는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 약한 계면결합을 갖는 복합재에서의 횡방향 평균응력-변화율 곡선을 세라믹부피분율의 변화에 따라 나타내었다. 계면에서의 분리가 발생하는 복합재는 세라믹부피의 증가에 따라 상대적으로 기지부피의 감소가 발생되기 때문에 전체복합재료의 응력-변형률 곡선이 감소하는 것으로 나타났다. 계면에서의 분리는 전체복합재료의 강성저하를 발생시킨다.

Fig. 11에서는 미시역학적 모델링에 의하여 모델링된 2개의 다른 계면상태(즉, 강한 결합과, 약한 결합)에서의 복합

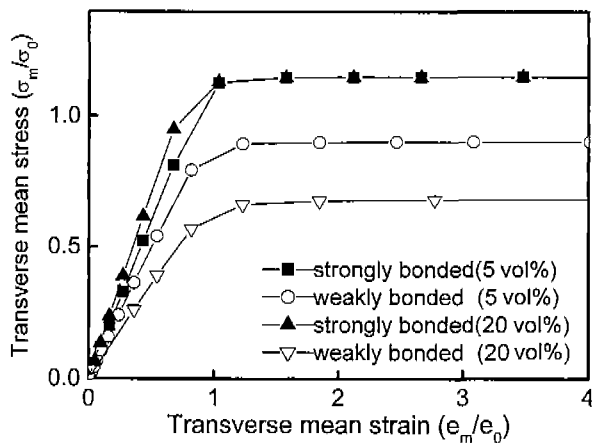


Fig. 11. Comparison of transverse mean stress/strain for the composite depending on the type of bonding.

재료의 횡방향 평균응력-변형률 곡선을 비교하였다. 유한요소법에 의하여 계산된 결과를 근거로 하여, 실제 일방향으로 인장하중을 받는 경우에 제작된 복합재료내에서의 계면특성과 횡방향 탄성계수의 예측을 할 수 있다. 실제 복합재료를 구성하는 강화재와 계면간의 특성을 미리 알고 있는 경우에 예측시뮬레이션 기법을 사용하여 복합재료의 특성을 예측계산하고, 실제 측정된 복합재료의 거동(탄성계수, 응력-변화율곡선)과 비교할 수 있을 것이다. 또한, 복합재를 구성하고 있는 강화재나 기지재료중의 한가지 특성을 알지 못하는 경우에 실험으로 측정된 복합재료의 특성을 기초로 하여, 유한요소모델링상의 구성성분의 특성을 역으로 정량적인 추정이 가능할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 비교적 탄성거동을 하는 세라믹 강화재와, 세라믹에 비하여 항복현상으로 인하여 탄소성거동을 하는 금속기지 복합재에서 파괴분율 및 계면결합의 유무에 따라 발생하는 횡방향의 거동을 계산하였다. 계면결합이 강한 복합재료의 경우에 2차원적인 유한요소모델링을 통하여 파괴분율의 변화에 따라 계산된 횡방향탄성계수결과는 문헌에 알려진 식에 의한 계산값과 유사한 값으로 계산되었다. 한편, 계면결합이 계면에서 강한 결합(interface-bonding)이 있는 복합재와는 달리, 약한 결합의 복합재의 경우는 하중에 의하여 계면에서 금속기지재료와 세라믹간의 분리가 발생된다. 이 분리는 전체복합재의 강성을 감소시키며, 금속의 파괴분율이 감소될수록(즉, 세라믹의 파괴분율이 증가할수록) 횡방향 평균응력의 평균변형률에 대한 감소로 나타났다. 미시역학의 개념과 유한요소법의 결합적인 해석기법을 통하여, 이미 알고 있는 복합재 각 성분의 특성으로부터 복합재료의 계면특성과 횡방향특성을 예측할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 과학재단이 지원하는 특정기초연구과제(1999-2-301-014-3)의 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. N. P. Bansal, "Mechanical Behavior of Siliconcarbide Fiber-reinforced Strontium Aluminosilicate Glass-ceramic Composites," *Mat. Sci. Eng.* **A231**, 117-127 (1997).
2. B. Harris, *Engineering Composite Materials*, IOM communications (1999).
3. E. E. Gdoutos, K. Pilakoutas and C. A. Rodopoulos, *Failure Analysis of Industrial Composite Materials*, McGraw Hill (2000).

4. J. M. Whitney and R. L. McCullough, *Micromechanical Materials Modeling*, Technomic (1990).
5. X. Chen and Y. Liu, "Multiple-cell Modeling of Fiber-reinforced Composites with the Presence of Interphases using the Boundary Element Method," *Comput. Materials, Sci.* **21**, 86-94 (2001).
6. J. D. Achenbach and H. Zhu, "Effects of Interfacial Zone on Mechanical Behavior and Failure of Fiber-reinforced Composites," *J. Mech Phys. Solids*, **37**, 381-393 (1989).
7. J. Kim and Y. Mai, *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*, Elsevier (1998).
8. R. D. Cool, *Finite Element Modeling for Stress Analysis*, Wiley (1995).
9. B. Budiansky, A. G. Evans and J. Hutchinson, "Fiber Matrix Debonding Effects on Cracking in Aligned Fiber Ceramic Composites," *Int. J. Solids, Struct.*, **32**, 315-328 (1995).
10. A. Needleman, "A Continuum Model for Void Nucleation by Inclusion Debonding," *J. Appl. Mech.*, **54**, 525-531 (1987).
11. ABAQUS, User's manual, HKS (2000).
12. G. O'Donnell and L. Looney, "Production of Aluminum Matrix Composite Components using Conventional PM Technology," *Mat. Sci. Eng.*, **A303**, 292-301 (2001).
13. C. C. Chamis, NASA Tech Memo 83320, 38th Annual Conference of the Society of Plastics Industry (SPI) (1983).
14. K. K. Chawla, *Composite Materials: Science and Engineering*, Springer (1998).