

세라믹/금속복합재료에 대한 미시역학적 특성해석

김병식*· 김태우**

Analysis for Properties of Ceramic/Metal Composite Based on Micromechanics of materials

B. S. Kim, T. W. Kim

Abstract

A proper estimation of the mechanical properties for composites has been required for better design/selection of constituents for composite materials. 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 as a function of the volume fraction with two different types of interfacial bonding: (1)strongly bonded interface, and (2)no 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 mean stress was generally increased with the ceramic volume fraction for composite with strong interface bonding. The micromechanics concept combined with finite element modeling for composite can be used in order to predict the transverse properties of composites with a priori known properties of constituents.

1. 서론

우주항공산업과 방위산업 자동차산업 그리고 산업구조물의 고강도화, 고경량화 되어감에 따라 복합재료가 다양하게 개발됨과 동시에 각종 산업 분야에서는 연성이 풍부한 금속기지에 세라믹 입자를 강화재로한 세라믹강화 금속기 복합재료(MMC: Metal Matrix Composite)개발에 무엇보다 깊은 관심을 기울이고 있다. 특히 알루미늄 복합재료는 열팽창계수가 낮으면서 강도와 강성을 접촉마모저항이 높고 금속피로와 고온에 대한 강도가 우수해 차세대 신소재로 각광을 받고 있으며 산업 전반에 중요한 소재로 인식되고 있다[1].

특히 열팽창계수가 낮은 세라믹을 강화재로

적용하면 순수 금속재료에 비하여 강성증가 및 열팽창정도를 감소시킬 수 있는 것으로 기대되고 있다.

기지조직은 섬유를 잡아주는 역할외에도 하중을 섬유에 전달하는 중요한 기능을 담당하고 있다. 이것은 복합재료의 성질, 각 구성요소의 성질과 그 기하학적 배열을 예측할 경우에 상당히 중요하다.

탄성계수가 다른 구성요소들로 구성되어진 섬유 강화 복합재료에 동일방향으로 보강재가 배열되는 복합재료의 경우 기지와 섬유간의 포와송비의 차이 즉 서로 다른 수축을 하기 때문에 탄성계수의 크기가 종방향보다 비교적 작은 횡방향에서의 기계적 특성에 대한 연구가 요구 되고 있다.

미세조직상 불균질한 구성재료를 포함하고 있는 복합재료는 부품에 가해지는 하중을 균일하게 강화재와 기지간에 전달하기 위하여 균일한 강화재의 배열을 하는 경우가 많기 때문에 복합재료의 미세조직특징에 대한 반복적인 최소의 단위를

* 국민대학교자동차공학대학원

** 국민대학교기계자동차공학부

나타내는 단위포(unit-cell) 또는 다단위포(multi-cell)개념을 기초로 하여 복합재료의 특성에 대하여 이론적인 관계식도출이 이루어져왔으며 복합재료에 대한 미시역학의 개념으로 문헌에 알려지고 있다[2].

재료의 연속체(continuum)개념에 근거하여 self-consistent 모델, Hashin-Strikman 모델, 복합재료를 구성하고 있는 구성 성분의 평균 부피-질량으로 복합재료의 특성을 파악하고자 할때 사용하는 rule-of-mixture 등의 이름으로 복합재료에 대한 선형, 탄성적인 거동에 대한 연구가 진행되어왔다.

고강도 고인성의 복합재료를 만들기 위해서는 섬유자체의 고강도와 최소의 결합, 일정 부피분율에서의 최소섬유분포등이 필요하며, 복합재료의 거동변화는 강화재, 기지재료의 기계적 특성과 구성재료의 각 부피분율의 변화에 따라 달라질 뿐만아니라, 강화재와 기지사이의 계면결합력에 따른 계면 전달하중 크기의 변화와 복합재료의 응력-변형률로 나타나는 거동의 변화등으로 인한 복합재의 계면력변화에 따른 예측은 중요하다[3-5].

본 연구에서는 세라믹/금속기지 복합재료에 단축방향 인장하중을 받는 경우, 세라믹과 금속간 계면에서의 결합력에 따른 복합재료의 횡방향 평균응력과 횡방향 평균변형율의 영향에 관하여 미시역학[6]과 유한요소개념을 이용하여 계산하였다. 유한요소법을 사용하여 세라믹의 부피분율의 변화에 따라 계산된 횡방향 탄성계수는 미시역학개념을 이용한 탄성계수 계산식 및 실험결과와 비교하였다.

2. 해석절차

복합재료에서 강도(strength) 또는 강성(stiffness)의 향상을 위하여 사용되는 세라믹(입자, 또는 fiber보강재)는 공간적으로 균일하게 분포되는 경향이 있다. 탄화규소화이버로 보강한 유리세라믹 복합재료의 경우[7]에 연마한 복합재료의 단면에서의 미세구조에서는 규칙적이고, 균일한 배열이 관찰된다. 공간적으로 균일하며, 규칙적인분포의 예로써, 사각형배열(square arrangement)와 육각형배열(hexagonal arrangement)가 대표적으로 알려지고 있다. 본

연구에서는 사각형배열의 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.

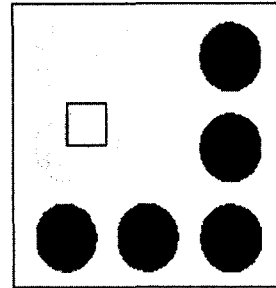


Fig.1 Typical square array of matrix and reinforcement in composites

연속상태(long-continuous)의 세라믹강화재 복합재료, 또는 입자상태의 강화재를 사용한 복합재료의 횡방향 단면에 대하여 2차원적인 해석을 수행하였다. 세라믹과 금속기지재료가 연결되어 하중을 전달되는 부분이 계면이며, 계면근방에는 재료특성의 변화로 인하여 나머지부분보다 더 작은 요소분할을 하였다. 세라믹 부피분율은 보통 10%이내의 저분율에서부터, 충전(packing) 및 균일분포의 공정상 어려움 때문에 최대 50부피분율전후로 제작되는 것으로 알려져있기 때문에, 본 연구에서의 부피분율은 5, 20, 30, 50 vol%를 선택하여 각 분율에 대한 거동을 계산하였다. 세라믹의 부피분율의 변화에 따라, 4분의 1원의 반경의 증가, 또는 감소시켰으며 계면근방의 요소의 크기, 요소의 형상변화에 따른 계산결과와 타당성, 수렴성등을 복합재료역학의 기본이론을 근거로 점검하여 요소분할도에 대하여 확정 한후 계산작업을 진행하였다.

복합재료에서의 강화재와 기지사이의 분리(debonding)은 기공(void)의 생성과 하중의 비효율적인 전달 때문에 기계적특성의 저하를 초래하는 것으로 알려져 있다. 세라믹과 금속기지사이

에 계면에서 세라믹과 금속간에 강한 결합(bonding)이 존재하는 경우와, 계면에서 약한 결합(weak bonding)의 형태를 가정하여 응력-변형률의 변화에 대하여 계산하여 계면결합력의 변화에 따른 복합재료의 거동에 대한 계산결과를 비교하였다. 규칙적으로 반복되는 단위포의 특징을 적용하기 위하여, 4분의 1원의 대칭선에서의 직각 방향으로 변위가 발생되지 않도록 하였다. 또한, 인접한 단위포와의 경계면을 따라서 경계면에 직각방향으로의 변위가 동일하도록 모델링하여서 인접단위포와의 대칭성을 적용하였다. 실제 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS[8]를 사용하였으며, 부피분율의 변화에 따라 약 1000개내의 4변형 평면변형률요소를 사용하였다. 세라믹 강화재는 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 알루미늄 기지복합재료의 제조가 연구되고 있다[9]. 한편, 탄화규소세라믹재료는 우수한 강성으로 인하여 세라믹 강화재료로 많이 선택되고 있다. 상기 이유로 인하여, 탄화규소로 보강된 알루미늄복합재료에 대하여 실험결과가 문헌에 보고되고 있기 때문에, 본 시뮬레이션에서에서의 복합재료의 구성은 탄화규소(SiC) 세라믹과 알루미늄기지재료로 구성된 복합재료의 특성을 이용한 단위포의 횡방향 거동에 대하여 계산하였으며, 제조된 시편에 대한 실험결과와 비교하였다. 계산결과는 실제 응력-변형률의 값보다는 계산된 응력과 변형률을 각각 항복응력과 항복변형률로 나눈 값의 비율로 표현하였다. 따라서, 각 축에서의 변수가 무차원수가 되게 하였으며, 무차원수의 변화량과 각 부피분율의 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-변형

률변화도가 변화된다.

인장하중점에서 기지응력을 기지의 항복응력으로 나눈 비율을 횡방향 평균응력으로 표시하였으며, 유사한 요령으로 횡방향 평균변형률을 계산하여 응력-변형률 곡선을 강화재/기지간의 탄성계수의 비율변화에 대하여 계산하여 비교하였다. 강화재와 기지사이에 완벽하고 강한 결합이 존재하는 복합재에서는 탄성계수비의 증가에 따라 응력-변형률의 기울기도 증가되며, 응력-변형률곡선에서의 기울기의 증가는 복합재료의 강성(stiffness)의 증가를 의미한다.

탄화규소/알루미늄 복합재료에서의 횡방향탄성계수를 세라믹 부피분율의 변화에 따라 유한요소법을 사용하여 계산한 결과를 Fig. 2에 보였다.

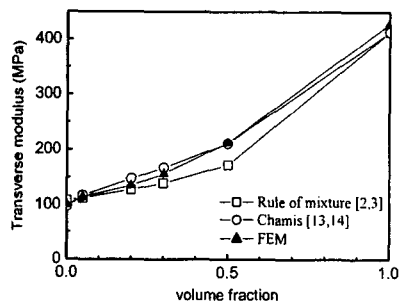


Fig. 2 Comparison of transverse modulus of the composite with volume fraction

유한요소법에 의하여 계산된 결과의 유효성을 점검하기 위하여, 문헌에서 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[10]의 식은 Eq.(2)로 계산되었다.

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

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

ROM과 Chamis의 식을 이용한 계산값과 본 연구

에서 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 50vol%보다 작을 때에는 유한요소법에 의한 결과가 다소 작게 나타났으나, 50vol%이상(100vol%)에서는 유한요소법에 의한 결과가 Chamis에 의한 결과보다 약간 높게 나타났다.

Fig. 3에 부피분율의 변화에 따라 세라믹과 금속간의 완벽(perfect)하고 강한(strong) 결합을 하는 복합재에서의 횡방향 평균응력-변형률 곡선을 나타내고 있다.

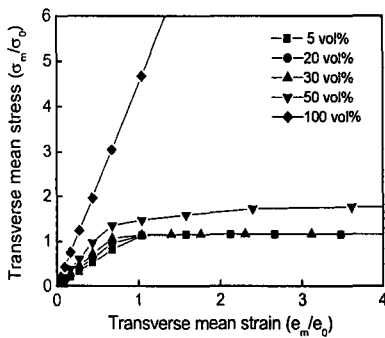


Fig.3 Transver mean strain vs. transverse stress for strongly-bonded composite

변형율이 비교적 작은 구간에서는 응력과 변형율이 선형으로 비례하게 되며, 기울기의 증가는 복합재료의 강성증가로 해석된다. 변형율이 점차 증가됨에 따라, 금속기지내에 국부적인 항복이 발생되기 때문에 일정한 변형율이상으로 변화된 복합재료의 응력-변형률곡선은 선형거동을 하지 않게 된다. 응력과 변형율이 선형으로 비례하는 구간에서는 세라믹부피분율의 증가에 따라 복합재료의 강성의 증가를 나타내는 곡선의 기울기가 증가된다. 세라믹의 부피분율이 계속 증가되어 세라믹으로만 구성된(volume 100%)의 경우에 계산된 응력-변형률의 곡선은 완전한 직선으로 나타났다. 한편, 5, 20, 30vol%를 나타내는 곡선에서 평균변형율이 1보다 작은 구간에서는 부피분율의 증가에 따라 곡선의 기울기가 증가하였으

나, 변형율이 점차 증가하면서 부피분율의 변화에 따른 응력-변형률곡선값에 대한 차이가 감소하였다. 응력-변형률곡선의 차이가 감소함은 저부피 강화재 복합재의 경우에 기지에서 발생하는 국부적인 항복영역의 폭넓은 증가로 인한 응력의 감소로 생각된다. 부피분율이 50vol%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. 4에 나타난 바와 같다. Fig. 4에서 'A', 'B'의 두 점은 공간상에서 실제 동일한 위치를 나타내고 있었으며, 강한 계면결합 복합재에서는 'A'점위치가 변형함에 따라, 'B'점위치의 최종변위가 동일하게 결정된다. 따라서, 원형형상의 강화재는 강한 계면복합재의 경우에 일축 인장하중하에서 타원형상으로 변화하게 된다. 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 나타내게 된다.

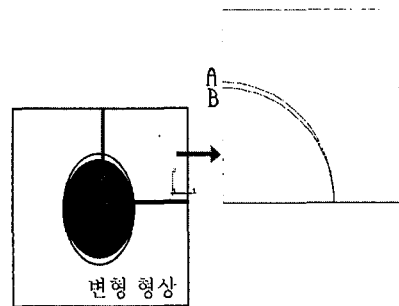


Fig. 4 The deformed shape of a composite under uniaxial tension with weakly bonded interface showing separation

Fig. 4는 본 연구의 결과의 유효성을 검토하기 위하여, 제조된 시편에 대하여 실험된 결과와 비교한 것이다. 제조된 시편은 5vol%세라믹을 함유하였다. 미시역학의 개념과 유한요소법의 결합적인 해석기법을 통하여, 이미 알고 있는 복합재 각 성분의 특성으로부터 복합재료의 계면특성과 횡방향특성을 예측할 수 있으며, 역으로 복합재료의 특성으로부터 구성성분의 특성을 예측하는 목적으로 해석기법을 응용할 수 있다.

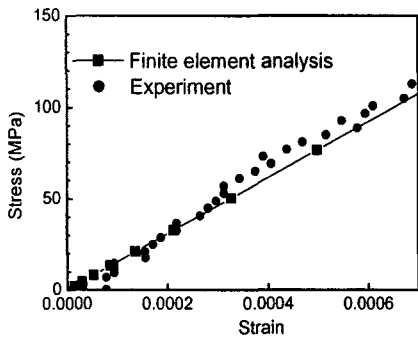


Fig. 4 The comparison of finite element analysis and experiments

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 횡방향탄성계수 결과는 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 감소시킨다. 미시역학의 개념과 유한요소법의 결합적인 해석기법을 통하여, 이미 알고 있는 복합재 각 성분의 특성으로부터 복합재료의 계면특성

과 횡방향특성을 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (1999-2-301-014-3)지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. B. Harris, *Engineering Composite Materials*, IOM communications (1999)
2. X. Chen, 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)
3. J. Kim, Y. Mai, *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*, Elsevier (1998)
4. B. Budiansky, A. G. Evans, J. Hutchinson, "Fiber Matrix Debonding Effects on Cracking in Aligned Fiber Ceramic Composites", *Int. J. Solids, Struct.* 32, 315-328 (1995)
5. 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)
6. J. M. Whitney, R. L. McCullough, *Micromechanical materials modeling*, Technomic (1990)
7. N. P. Bansal, "Mechanical Behavior of Siliconcarbide Fiber-reinforced Strontium Aluminosilicate Glass-ceramic Composites", *Mat. Sci. Eng. A231*, 117-127 (1997)
8. ABAQUS, User's manual, HKS (2000)
9. G. O'Donnel, and L. Looney, "Production of Aluminum Matrix Composite Components using Conventional PM Technology", *Mat. Sci. Eng. A303*, 292-301 (2001)
10. C. C. Chamis, NASA Tech Memo 83320, 38th Annual Conference of the Society of Plastics Industry(SPI) (1983)