

단섬유강화 금속복합재료의 계면분리 및 균열

김 진
한국기계연구소 구조해석실



●1955년생
●복합재료역학을 전공하였으며, 금속복합재료 제조공정과 항공 우주용 복합재료 구조물개발을 하고 있고, 자동차용복합재료 구조물 응용설계에 관심을 가지고 있다.

고 병 천
한국기계연구소 구조해석실



●1953년생
●유한요소법을 전공하였으며, 전산고체역학응용 구조물설계 및 해석을 하고있고, 자동차용 복합재료 구조물 설계 관련 소프트웨어 개발에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

금속복합재료는 복합재료의 일반적인 장점인 높은 비강도, 강성을 높은 온도범위에 적용할 수 있다는 우월한 열기계적성질·금속에 비해 낮은 열팽창계수, 열적치수 안정성으로 인하여 내연기관부품에서 부터 고속 항공기 구조물 까지 적절한 기지재료 선택에 의해 그 응용범위가 광범위 하다^(1,2). 현재 금속복합재료의 실제적 응용을 저해하고 있는 요인으로는 낮은 제조공정 신뢰성과 이로인한 높은 제조단가이다. 아울러 사용되고 있는 보강섬유는 장섬유 및 휘스커 형태의 세라믹섬유로 고분자복합재료에 많이 사용되고 있는 탄소섬유에 비하여 10배이상의 고가이고 SiC휘스커 경우 인체에 유해한 것으로 사용이 제한되고 있다. 그러므로 값싼 보강섬유 및 입자형태의 보강섬유를 이용한 안정성있는 금속복합재료 대량생산 방법이 연구 개발 되고 있는데, 상대적으로 낮은 단가의 Al₂O₃ 섬유강화 금속복합재료의 스쿼시 cast-

ing에 의한 부품의 대량생산⁽³⁾과 빌렛 제조후 2차 가공으로 열간압출에 의한 대량생산방법⁽⁴⁾이 주로 고려되고 있다. 금속복합재료 2차가공은 금속복합재료의 넓은범위 응용에 필수적인데 이는 생산성 뿐만 아니고 보강섬유의 방향성 정렬로 인한 기계적성질 증대효과를 함께 가지고와 열간압출, 단조, 압연가공은 주조된 금속복합재료 빌렛의 2차 가공방법으로 많은 관심을 받고 있다⁽⁵⁾.

금속복합재료 2차가공에서의 주요관점은 2차가공중 제조조건에 따른 보강섬유의 파단과 이로인한 보강섬유의 한계길이(critical length) 이하로 짧아짐과 기지재료 미세조직상에서 보강섬유끝단의 균열⁽⁶⁻⁷⁾로 인한 복합재료의 기계적 성질 저하이다. 그러므로, 금속복합재료의 2차 가공에 있어서는 제조공정, 보강섬유의 파단과 균열 그리고 기계적 성질이 서로 상관관계를 가지므로 이에 대한 체계적 관계정립이 신뢰성 있는 대량 생산을 위하여 우선적으로 이해되어야 한다. 2차가공방법중 열간 압출을 이용한 금속복합재료 제조공정에 있어서 섬유

파단을 최소화하기 위한 성형온도 및 압력조건
의 최적화는 실험적으로 많이 시도 되어 왔
나^(5,6,8,9), 성형조건에 따른 보강섬유방향의 변
화 및 이로인한 기지재료내에서 재위치를 잡을
때 생기는 균열에 대해서는 간과되어 왔으며,
또한 균열이 발생후의 금속복합재료의 강성도
및 강도 변화에 대한 확립된 해석 방법도 매우
제한된 방법으로 시도되어왔다^(10,11,12).

본 글에서는 실험적으로 열간압출시에 보강
섬유의 끝단에서 생기는 계면분리(debonding)
및 균열 발생을 제조조건에 따라 확인하고, 이
에 대한 수치적 예측 방법으로 NIKE2D⁽¹³⁾를
이용한 압출시의 금속복합재료 단위셀에 대한
응력분포 및 균열발생 모의해석을 시도하고 균
열발생후의 강도 및 강성도해석을 advanced
shear-lag 모델을 응용한 미세역학적 접근방법
으로 해석하여 열간압출에 의한 금속복합재료
2차 가공조건 최적화를 위한 복합재료내 보강
섬유와 기지재료 소성변형거동의 미시적 · 거시
적 해석방법에 대해 논하고저 한다.

2. 금속복합재료의 열간압출

열간압출은 압연 및 단조와 더불어 구조된
금속복합재료를 반복적으로 균일하게 2차 가공
할 수 있는 방법으로 간주되고 있다. 열간압출
시 최종적인 금속복합재료 특성에 미치는 제조
공정인자는 다이각도, 압출온도, 압출력, 압출
속도이고 구조된 금속복합재료의 영향인자로는
보강섬유직경, 형상비, 기지재료 성분, 체적
율, 분포상태 및 방향 등이다^(5,6,9). 일반적으로
최적화된 제조조건에서의 열간압출은 압출방향
으로 보강섬유 방향이 정렬 되어 기계적 성질
을 증대시키고 최적제조공정 범위 밖에서는 제
조조건에 따라 보강섬유의 파단, 보강섬유/기
지재료 계면에서의 접합분리(debonding) 및
균열발생을 가져온다. 그림 1은 2mm/min 속
도로 열간압출한 10% v_f Al₂O₃/Al 복합재료의
파단된 보강섬유 예이다. 파단된 보강섬유는
복합재료화 되어 보강효과를 가져오는 임계 보

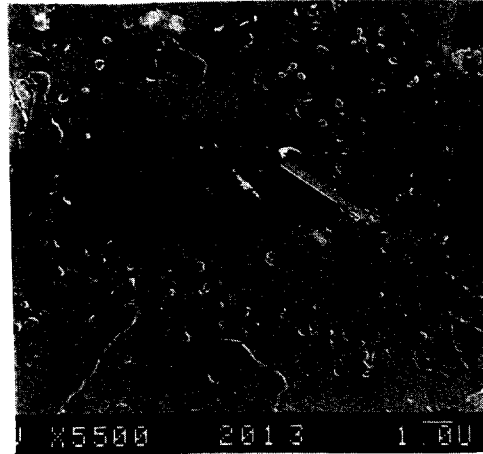


그림 1 보강섬유의 파단(10% v_f Al₂O₃/Al, 2mm/
min 압출속도)

강섬유길이,

$$L_c = \sigma_f d / 2\tau_m \quad (1)$$

보다 적어지게 되면 강화효과는 기대할 수 없
다⁽⁷⁾. 여기서 σ_f 는 보강섬유 파괴강도, d 는
보강섬유직경, τ_m 은 보강섬유 · 기지재료 계면
의 전단강도이다.

보강섬유의 파단은 열간압출시 기지재료의
소성변형으로 보강섬유와 기지재료 계면에서의
전위축적(dislocation pile-up)된 크기가 보강섬
유의 강도를 넘어 발생되리라고 예측되고 있으
나, 온도를 증가 시켰을 때 가해진 압출력에
의하여 확산(diffusion) 및 전위상승(disloca
tion climb)이 생겨 소성변형률을 완화시키는
운동이 변형된다⁽⁵⁾. 이와 같은 조건에서 보강
섬유와 기지재료 혹은 기지재료내에 압축방향
의 정수압에 의하여 공동(cavitation)이 생길
가능성도 야기시킨다. 계면에서의 접합분리와
균열은 이와 같은 현상에 의하여 발생되리라고
예측되며 실제로 400°C에서 압출한 20%, v_f Al₂
O₃/Al의 계면에서의 균열을 그림 2에서 보여
주고 있다.

계면에서의 균열발생 기구는 열간압출 온도
와 압출력에 따른 확산률과 보강섬유 방향성,
가해진 압축력에 따른 기지재료내의 소성변형

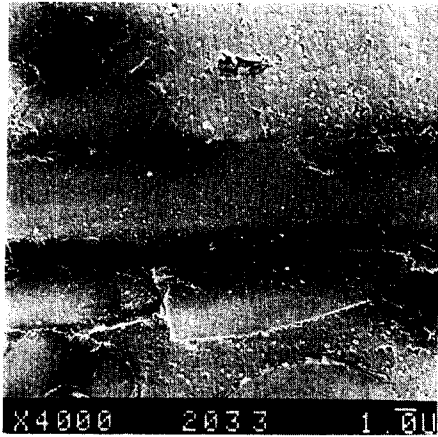


그림 2 계면에서의 균열(20% v_v Al₂O₃/Al, 400°C 압출온도)

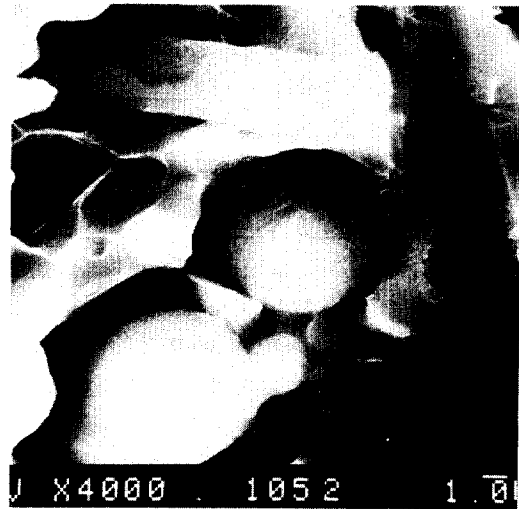


그림 3 인장파단면에서의 보강섬유 뽑힘(pull-out)

률과 관계가 깊다. 특히 확산물을 나타내는 지배식에서는 보강섬유의 길이와 보강섬유사이의 거리, 즉 체적율의 영향이 크다⁽¹⁴⁾. 그러나 실제적으로 계면에서의 접합분리 및 균열발생을 정량적으로 나타낼 수 있는 것은 기지재료내의 소성변형률 즉 응력분포와 보강섬유와 기지재료계면에서의 계면강도이다. 계면강도는 수치적으로 기지재료의 항복강도를 취하거나 보강섬유와 기지재료의 포와송비의 차로 생긴 보강섬유 횡방향의 수직압력에 임의의 마찰계수를 곱한 값을 택할 수 있다. 기지재료내의 응력분포는 압출력과 압출다이각도에 영향을 받는데 금속복합재료 빌렛의 보강섬유 체적률과 보강섬유분포와 관련되어 압출시 보강섬유 파단 혹은 보강섬유·기지재료 계면의 접합분리와 균열 발생여부를 결정하게 된다. 그러므로 열간 압출시의 제조공정을 최적화 하기 위하여서는 정량적으로 나타낼 수 있는 것은 제조장치의 조건과 관련된 금속복합재료의 변형률과 주조된 금속복합재료 상태에 따른 보강섬유 분포 및 방향 그리고 체적률이다. 이와 같은 제조공정인자의 변화와 이에따른 압출후의 보강섬유 상태와의 관계는 제조공정 최적화를 위하여 기본적으로 요구된다. 또한 균열발생후의 기계적

성질 즉, 인장강도 변화는 미세조직변화, 제조 공정, 기계적성질의 일관성 있는 체계화를 위하여 필요하다. 그림 3은 균열이 있는 금속복합재료 시편의 인장실험후의 파단면에서 보인 보강섬유 뽑힘(pull-out)인데 이것은 계면에서의 불완전결합(weak bonding)으로 인하여 강도를 저하시키게 된다.

3. 유한요소법에 의한 모의해석

금속복합재료의 2차가공성에 영향을 미치는 가공변수는 금형과 가공재사이의 마찰조건, 소성변형률, 가공속도 등과 같은 거시적 조건 외에 보강섬유와 기지재료의 접합상태, 보강섬유의 방향성, 구성재료들의 강도 및 보강섬유체적율 등 미시적 재료조건도 포함된다. 2차 가공의 성형한계는 흔히 보강섬유의 파단이나 보강섬유와 기지재료의 계면분리 등과 같은 미시적 파괴 현상에 의하여 결정된다. 따라서 금속복합재료의 성형성과 가공조건에 대한 상관관계를 구하기 위해서는, 거시적·미시적 접근방식이 요구된다. 최근 유한요소법이 소성가공과

같이 큰 변형이 존재하는 재료의 물성 거동에 대한 연구에서 많은 성과를 보이고 있으나⁽¹⁵⁾, 이러한 방법도 거시적 물성 구성식에 기반을 두고 있기 때문에 금속복합재료의 미시적 파괴 현상을 예측하는 데에는 불충분하다. 이러한 점을 보완 하는 방법으로 보강섬유와 기지재료로 이루어진 하나의 단위셀(a unit-cell)을 도입하여 2차가공 과정에서 발생하는 단위셀 내부의 기계적 거동을 관찰하는 방법이 고려될 수 있다⁽¹⁶⁾. 이러한 방법으로 비록 정성적이기는 할 지라도 제반 가공조건이 금속복합재료의 2차가공 성형한계에 미치는 영향을 예측할 수 있다. 그림 4는 이와같은 단위셀을 포함한 복

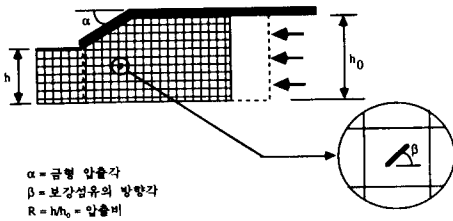


그림 4 Al₂O₃/Al 복합재료의 압출해석 모델: 원안은 단위셀을 확대한 모습 압출비=20%

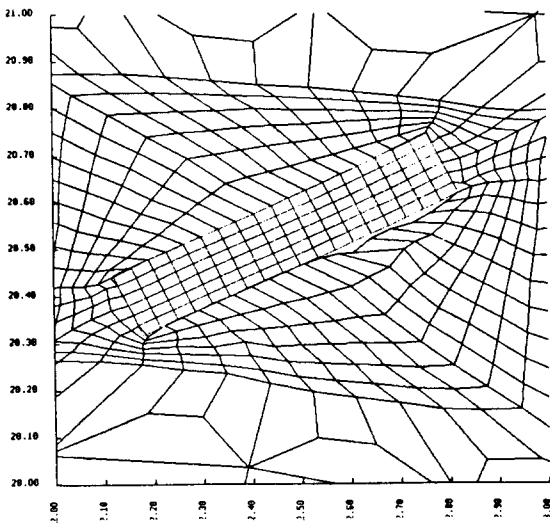


그림 5 압출후 단위셀내의 모습: 압출금형각=26.6도, 보강섬유방향각=45도 보강재료의 양단과 하면에서 계면분리가 발생

합재료의 2차가공 해석을 위한 한 예로서 Al₂O₃/Al 복합재료 압출에 대한 모델이다. 이 모델의 압출 축소량은 20%이고, 보강재의 체적률은 10%인 경우이다. 단위셀은 복합재료의 중간위치에 존재하고, 단위셀 내의 보강섬유의 방향성은 압출방향에 대하여 45도로, 기지재료

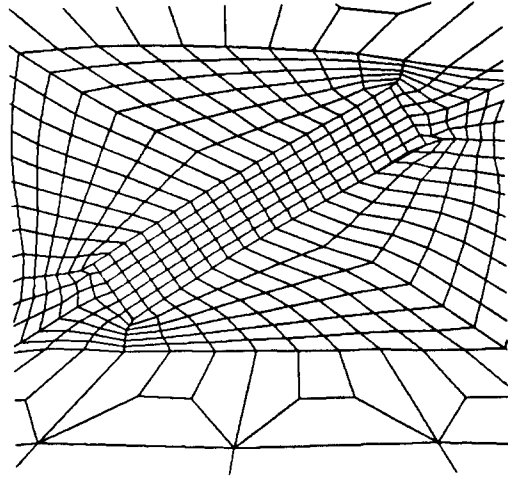


그림 6 압출후 단위셀내의 모습: 압출 금형각=18.4도, 보강섬유방향각=45도 보강섬유의 양단에서 계면분리가 발생

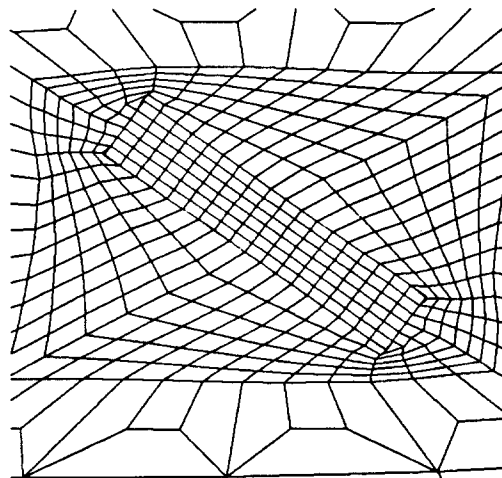


그림 7 압출후 단위셀내의 모습: 압출 금형각=26.6도, 보강섬유방향각=-45도 보강섬유의 양단에서 계면분리가 발생

와 보강섬유의 계면은 상호 슬립이 일어날 수 있다고 가정하였다.

그림 5와 그림 6은 각각 26.6도 및 18.4도의 압축각으로 압출한 후 단위셀의 변형모습이다. 이 그림들은, 압출후에 보강섬유는 그 방향이 25도 정도로 압출방향과 비슷한 방향성을 가지며, 보강섬유의 양단에서는 계면분리의 양상이 나타나고 있음을 보여주고 있다. 또한 이러한 계면분리 현상은 압축각이 큰 경우(26.6도)가 압축각이 작은 경우(18.4도)보다 크게 발생하고 있다.

그림 7은 26.6도의 압축각에서 보강섬유의 방향이 -45도인 경우에 나타난 단위셀의 변형모습이다. 이 경우에는 보강섬유의 계면분리가 앞의 경우보다 심하지 않다. 따라서 이러한 결과들은 압축각과 보강섬유의 방향성이 보강섬유와 기지재료의 계면분리에 영향을 주는 중요한 인자들임을 말해 준다. 한편, 그림 8은 기지재료와 보강섬유의 계면에 상호 슬립이 없으며 완전한 접합이 이루어졌다고 가정하였을 때 압출후 단위셀부근에 존재하는 최대주응력의 분포를 그린 것이다. 이 경우에 최대값은 2.4 GPa로서 보강섬유내에서 발생한다. 이 크기는

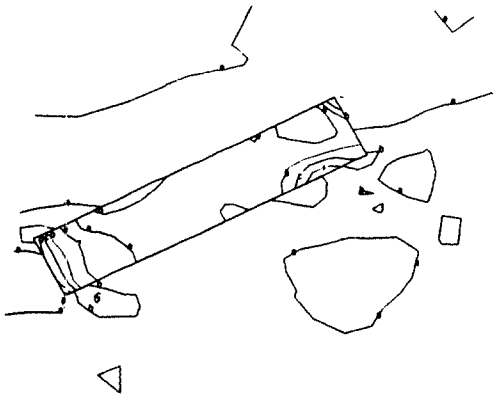


그림 8 압출후 단위셀에 분포하는 최대 주응력 : 보강섬유와 기지재료의 계면이 상호 슬립 없이 완전접합된 경우

보강재료의 최대강도를 크게 넘어서는 값이다. 이로부터 계면사이의 완전접합이 복합재료의 2차가공성에 반드시 유리하지는 않다는 것을 알 수 있다.

이러한 해석을 위하여 사용된 범용 유한요소 소프트웨어는 NIKE2D이다⁽¹³⁾. 이상의 예에서 보여 주듯이, 단위셀을 도입한 모의해석은, 복합재료의 구성재료들의 미시적 기계적 거동을 이해하고 정성적인 2차 가공성에 성형한계를 예측하는 데에 많은 도움을 준다. 그러나 이와 같은 방법도 2차가공시의 성형성을 많은 가공변수에 대하여 정량적으로 예측하기에는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해서는, 복합재료 구성요소들의 미시적 거동, 혹은 미시적 거동이 복합재료의 거시적 거동에 미치는 영향 등을 고려하는 수치해석모델을 도입하는 것이 필요하다. 다음 절에서 설명하고자 하는 Shear-lag 과 같은 모델은 미시적 거동을 이해하고자 할 때 큰 도움이 된다. 이러한 모델을 유한요소해석법의 구성식이나 구속조건으로 도입하여 복합재료에 대한 거시적 거동 해석을 수행함으로써, 보다 체계적으로 가공성형한계를 예측할 수 있을 것이다. 아울러, 최근에 수학적으로 연구되고 있는 균질화법(homogenization method)은 이러한 재료의 미시적·거시적 거동현상을 이해하는데 적어도 선형변형의 범위내에서는 많은 성공을 거두고 있는 것으로 알려져 있다⁽¹⁶⁾. 따라서 현상적 모델인 shear-lag 모델을 수학적 모델인 균질화법에 도입하면 미시적·거시적 거동해석이 함께 요구되는 금속복합재료의 열간압출거동 해석에 더욱 적합한 방법이 될 것이다.

4. Advanced Shear-lag Model에 대한 해석

열간압출에 의한 보강섬유·기지재료 계면에서의 접합분리 및 균열발생, 그리고 이로 인한 응력 및 변형관계를 단섬유 끝단사이의 기지재료내에서의 하중전달과 전단변형을 고려한 advanced shear-lag model과 단섬유의 방향성

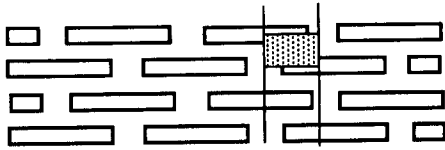


그림 9 정렬된 단섬유 강화 복합재료의 단위셀 모델

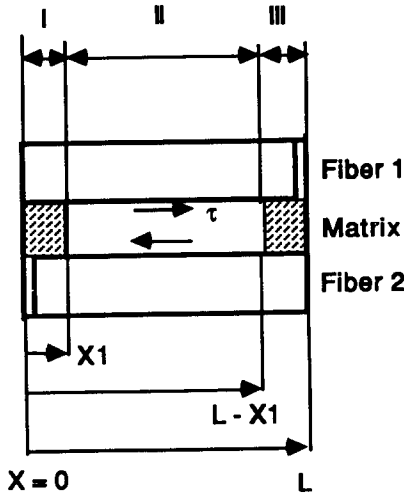


그림 10 단위모델안에서 보강섬유 끝단에서의 소성변형

을 고려한 분포함수⁽¹⁷⁾를 접속시켜 해석할 수 있다. 먼저 advanced shear-lag model에서는 그림 9에서와 같이 정렬된 단섬유 보강 복합재료에서 단위셀(a unit-cell)을 그림 10과 같이 선택하여 보강섬유는 단지 축방향하중을 견디고 보강섬유사이의 기지재료 끝단 임의의 구간 사이에서 소성변형이 발생되고 이 소성변형은 완전소성(perfect-plastic) 변형을 한다고 가정한다.

즉, 여기서 보강섬유 끝단에서의 경계조건을

$$\tau = \tau_0 \quad (0 \leq x \leq x_1, \quad L - x_1 \leq x \leq L) \quad (2)$$

$$\tau = \frac{G}{h} (u_2 - u_1) \quad (x_1 \leq x \leq L - x_1) \quad (3)$$

여기서 τ_0 는 계면에서의 미끄럼 강도, u_2, u_1

은 각각의 보강섬유의 변위이다. 이 경계조건을 단위셀에 대한 힘의 평형방정식과 (I), (II), (III) 영역 경계면에서의 변위의 연속성을 고려하면 각 구역의 응력 관계를 구할 수 있다. 이와 같이 구한 각 구역의 변형을 전체 단위 모델에 걸쳐 적분하여 평균을 하면, 즉

$$\bar{\epsilon}_c = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{III} \epsilon_i \quad (4)$$

주어진 하중과 전단항복강도 τ_0 에 대해 응력-변형 관계를 가질 수 있고, 방향성을 고려한 보강섬유분포함수를 2차원 평면에 대해 고려하여 다음과 같은 분포함수⁽¹⁷⁾

$$F'' = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{2\pi} n(\theta, \phi) F'(\theta, \phi) \sin\theta d\theta \quad (5)$$

를 곱하면 열간압출시 주어진 응력에 대해 균열이 발생된 균일분포된 단섬유보강 복합재료의 응력·변형 특성을 예측할 수 있다.

5. 맺음말

단섬유보강 금속복합재료의 2차가공은 금속 복합재료의 넓은 범위 응용을 위해 필히 요구된다. 여러 가공방법 중 하나인 열간압출시 보강섬유파괴 및 계면에서의 접합분리 및 균열발생이 없는 제조공정의 최적화를 위해서 가공시 내부조직의 소성변형 기구 규명보다 압출력에 의한 응력분포와 기지재료와 보강섬유 사이 계면 변화 및 기계적 특성 관계규명이 정량적으로 요구된다. 본 글에서는 유한요소법을 이용하여 계면에서의 접합상태를 임의로 가정하여 압출조건에 따른 압출후의 보강섬유 방향 및 계면균열 및 접합분리를 거시적으로 예측하고, advanced shear-lag을 이용하여 균열 전, 후의 응력·변형관계를 미시적으로 규명할 수 있음을 제시하였다. 그러나 향후 현상적 모델인 shear-lag모델을 수학적 모델인 균질화법에 도입하면 미시적·거시적 거동해석이 함께 요구되는 금속복합재료의 열간압출거동 해석을 일체적으로 행할 수 있어 효율적이고 정확한 예측이 가능 하리라고 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Feest, E.A., 1985, "Metal Matrix Composites", MRS-Europe, pp. 223.
- (2) 김진, 이상관, 전의진, 1990, "금속복합재료", 대한금속학회회보, 제3권, pp. 130~141.
- (3) Dinwoodie, J., 1987, "Automotive Applications for MMC's Based on Short Staple Alumina Fibres", SAE paper 870437.
- (4) Schumacher, C.A., 1989, "Reinforced Composites for Piston Engine Components", SAE paper 892495.
- (5) Stanford-Beals, C.A. and Clyne, T.W., 1989, "Extrusion and High Temperature Deformation of Fibre-Reinforced Aluminum", Composites Sci. and Tech., Vol.35, pp. 121~157.
- (6) Suganuma, K. et al., 1989, "Hot Extrusion of AA7178 Reinforced with Alumina Short Fiber", Mater. Sci. and Tech., Vol.5, pp. 249~254.
- (7) Piggott, M.R., 1980, Load Bearing Fibre Composites, Pergamon Press, Oxford, pp. 62~67.
- (8) Kang, C.G., Koh B.C., Kim, J. and Kim K. H., 1991, "Hot Extrusion of Al₂O₃ Whisker Reinforced Aluminum Matrix Composites and Their Mechanical Properties, will be presented in ICCM-VIII.
- (9) Suganuma, K., Okamoto, T. and Sutuki N., 1987, "Semisolid Extrusion of Aluminum Alloys Reinforced with Alumina Short Fibre by Cladding", J. of Mat. Sci. Lett., Vol.6, pp. 1357~1348.
- (10) Jarry, P., Loue, W. and Bouvaist J., 1987, "Rheological Behavior of SiC/Al Composites", Proc. ICCM-VI, pp. 2350~2361.
- (11) Fukuda, H. and Chou, T. W., 1981, "Stiffness and Strength of Short Fibre Composites as Affected by Cracks and Plasticity", Fibre Science and Tech., Vol.15, pp. 243~256.
- (12) Taya, M. and Mura, T., 1981, "On Stiffness and Strength of an Aligned Short-Fiber Reinforced Composite Containing Fiber-End Cracks under Uniaxial Applied Stress", J. of Applied Mechanics, Vol.48, pp. 361~367.
- (13) Hallquist, J.O., 1986, NIKE2D Manual, LLRL.
- (14) Humphreys, F.J. and Kalu, P. N., 1987, "Dislocation-Particle Interactions during High Temperature Deformation of Two-Phase Aluminum Alloys", Acta Met., Vol.35, pp. 2815~2829.
- (15) Nemat-Nasser, S., Asaro, R.J. and Hegemier, G.A. eds., 1984, "Theoretical Foundation for Large-Scale Computations of Nonlinear Material Behavior", Mirtinus Nijhoff Publishers.
- (16) Guedes, J.M. and Kikuchi, N., 1990, "Pre-processing and Postprocessing for Materials Based on the Homogenization Method with Adaptive Finite Element Methods", Comp. Meth. Apple. Mech. Engrg., Vo.83, pp. 143~198.
- (17) Takao, Y., Chou, T.W. and Taya, M., "Effective Longitudinal Young's Modulus of Misoriented Short Fiber Composites", J. of Applied Mechanics, Vol.49, pp. 536~540.

