

〈논 문〉 SAE NO. 96370116

SiC 휘스커강화 금속복합재료와 지르코니아 접합체의 잔류응력 해석에 관한 연구

A Study on Residual Stress of SiC Whisker Reinforced Al Alloy/ZrO₂ Joints

주 재 황,* 박 명 균,** 박 세 만***
J. H. Joo, M. K. Park, S. M. Bahk

ABSTRACT

A two dimensional thermo elasto-plastic finite element stress analysis was performed to study residual stress distributions in Al composites reinforced by SiC whisker and ZrO₂ ceramic joints. The influences on the residual stress distributions due to the difference of the reinforcement volume fraction and interlayer material property were investigated. Specifically, stress distributions between Al interlayer and ZrO₂ ceramic and between the Al interlayer and Al composite were computationally analyzed.

주요기술용어 : Thermo elasto-plastic analysis(열탄소성해석), Finite element analysis(유한요소해석), Ceramic/metal joints(세라믹/금속접합), Residual stress(잔류응력), Volume fraction(체적함유율), 열팽창 부조화(Thermal expansion mismatch)

1. 서 론

구조용 세라믹은 고온강도, 내열성, 내식성 및 경량성과 같은 우수한 특성을 갖고 있는 반면 취성이 강한 특성으로 인하여 실제구조물의 부품소재로 활용함에 있어서 많은 문제점이 있었다. 그러나, 최근 세라믹/금속 접합기술에 대한 연구가 활발히 진행되면서 세라믹 가스터빈, 디젤엔진

등과 같은 동적 구조물의 부품소재로서의 적용가능성 및 실제응용이 증대되고 있다. Al합금 SiC_w(실리콘 카바이드 휘스커) 강화 복합재료는 높은 비강도와 비탄성의 특성 때문에 항공기, 헬리콥터, 인공위성, 미사일의 구조부분과 자동차의 엔진주변부 등 경량고특성을 요구하는 구조재부분에 응용개발이 진행되고 있으며 사용분야의 확대 및 섬유강화 복합재료의 필요성 그리고 자동차부품개발의 성능향상차원으로 보아 필수 불가결한 조건이다. 특히, 국내 Al피스톤 업계에서는 피스톤헤드 부분에 지르코니아(ZrO₂)를 접합시

* 정희원, 명지대학교 대학원 기계공학과

** 정희원, 명지대학교 기계공학과

*** 명지대학교 기계공학과

켜 피스톤의 내수명을 향상시키려는 연구투자를 진행하고 있다¹⁾.

세라믹재료의 금속접합시의 발생하는 잔류응력은 접합강도에 큰 영향을 미치기 때문에 설계시 잔류응력해석은 매우 중요하다. 잔류응력의 크기와 분포에 대해서는 X-선법의 실측에 의한 연구와 유한요소법과 같은 수치해석에 대한 연구가 병행되고 있다²⁾. 최근 일본에서 활발한 연구가 진행되고 있지만 SiC_w강화 Al복합재료와 지르코니아 접합에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에는 잔류응력(Residual stress) 발생의 주된 원인인 열팽창계수 차이를 줄이는 방안으로 적당한 두께의 중간재를 삽입하여 Al복합재료, 중간재, 세라믹의 열팽창계수의 차이로 인한 부조화(Thermal expansion mismatch)를 중간재의 영향으로 잔류응력을 완화시키는 접합방법을 선택하였으며 유한요소법을 이용하여 2차원 열탄성 및 열탄소성해석을 Al합금 SiC_w강화 복합재료와 지르코니아 접합에 대한 잔류응력해석을 하였다. 또한, 열탄성 및 열탄소성해석을 하였을 때의 차이점에 대해서도 비교하였고, SiC_w강화 복합재료의 체적함유율(Volume fraction) 첨가에 따른 잔류응력분포와 중간재의 재질변화로 인한 잔류응력에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 접합잔류응력의 유한요소해석

본 연구에서는 세라믹/금속접합(Ceramic/metal joints)의 잔류응력해석을 위하여 범용구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 일반적으로 유한요소해석시 재료의 기계적 물성치를 결정하여 입력시키는 것이 필요하기 때문에 가장 단순한 모델에는 혼합법칙(Rule Of Mixture: ROM)을³⁾ 이용하여 열팽창계수, 밀도, 강도, 탄성계수 등을 결정한다. 그런데, 본 연구에서는 보강재의 종횡비(Aspect ratio)로 인한 비등방성(Non-isotropic)재료의 물성치나 경계면에서 열장벽(Thermal barriers)의 영향을 고려하는데는 한계가 있는 것을 알 수 있다. 그래서, Al합

금 SiC_w강화 복합재료의 기계적인 물성치를 실험적인 값에 가장 접근하고 강화재의 체적함유율이 50%미만에 가장 타당한 Hashin과 Shtrikman에 의해 제안된 식 (1)을 사용하여 결정하였다⁴⁾.

$$E_c = \frac{E_m[E_m V_r + E_r(V_r + 1)]}{[E_r V_m + E_m(V_r + 1)]} \quad (1)$$

여기서, E_m 은 Al은 탄성계수(Elastic modulus), E_r 은 강화재의 전단탄성계수, V_m 은 Al의 체적함유율, 그리고 V_r 은 강화재의 체적함유율이다.

또한, 기지재료(Matrix)와 보강재(Reinforcement)의 경계면에서의 열장벽의 영향과 전단응력의 효과를 종합하여 조금 더 복잡한 형상의 모델에 적용하는 Kener에 의해 제안된 식 (2)을 사용하여 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion; CTE)를 결정하였다⁴⁾.

$$CTE_c = CTE_m - V_r(CTE_m - CTE_r) \cdot A/B \quad (2)$$

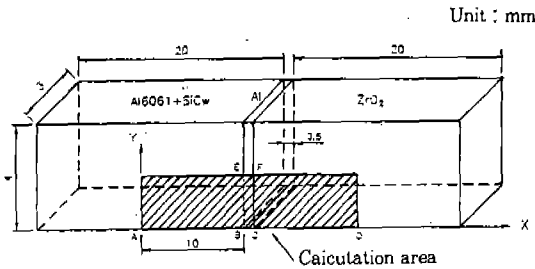
여기서, $A = K_m(3K_r + 4G_m)^2 + (K_r - K_m) \times (16G_m^2 + 12G_m K_r)$,

$$B = (3K_r + 4G_m)(4V_r G_m(K_r - K_m) + 3K_m K_r + 4G_m K_r),$$

G_m 은 Al의 횡탄성계수(Shear modulus), K_m 은 Al의 체적탄성계수(Bulk modulus), K_r 은 강화재의 체적탄성계수이다. 실험적으로 휘스커강화 알루미늄 복합재료의 성질은 보강재의 체적함유율이 증가되면 탄성계수, 항복강도 등이 현저히 개선됨을⁵⁾ 알 수 있고 반면 열팽창계수는 낮아짐을 알 수 있다^{6),7)}. 그리고, 중간재를 삽입한 활성금속 브레이징법에 사용하는 구리, 알루미늄 중에서 복합재료의 기지재료와 같은 Al을 중간재로 사용하였으며, 세라믹재료로 선택한 지르코니아는 다른 세라믹재료에 비해 비교적 높은 열팽창계수를 가지고 있어서 금속과 접합시 열팽창계수의 차이로 인한 잔류응력이 상대적으로 적기 때문에 접합시 세라믹재료로서 대단히 유용하다고 판단하여 사용하였다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 위식의 결과(복합재료)로 아래 Table

Table 1 The mechanical properties of the material^{(6)~(8)}

Material		E(GPa)			ν	$\alpha(\times 10^{-6}/K)$		
		300K	550K	800K		300K	550K	800K
Al 6061-T6 SiC whisker	10%	89.4	76	54	0.322	20.8	21.7	23
	20%	111	98	76	0.314	18.2	19.7	21.8
	30%	139	118	96	0.306	15.7	17.2	20.8
	40%	180	159	118	0.298	13.3	14.7	16.2
Stabilized ZrO ₂		138	—	—	0.33	10.5	—	—
Al 6061-O Temper		68.9	59	47	0.33	23.5	24.1	25.7

Fig.1 Configuration of Al+SiC_w composite/
ZrO₂ joint modelFig.2 Element meshes for 2-D finite element
analysis

1에 나타내었으며 관련문헌^(6),7)과 비교하여 잘 일치함을 알 수 있었으며 세라믹(Stabilized ZrO₂)과 중간재(Al 6061)도 문헌⁽⁸⁾을 참고하여 나타내었다.

해석조건은 고온접합시에는 열변형이 자유롭지만 응고가 시작되면서 모재간의 변형을 구속하게 되는 800K에서 상온 300K까지 1K씩 서냉하는 경우를 선택하였다. 해석에 사용된 모델은 대칭성을 고려하고 접합계면으로부터 10mm이상 떨어진 영역에서는 잔류응력이 거의 발생하지 않고 빗금친 표면의 수직방향응력이 0이므로 평면

응력해석으로 Fig.1에 표시한 영역을 해석대상으로 열탄소성해석(Thermo elasto-plastic analysis)을 하였다⁽²⁾. Fig.2는 2차원 유한요소모델의 요소분할을 나타낸 것으로 요소는 2차원 8절점 등매개요소(2-D 8nodes isoparametric solid)를 사용하였고 메시크기(mesh size)는 응력집중이 예상되는 이종재료 접합계면부위 및 단부부근에 자동메시생성기법을 이용 미세한 메시가 생성되도록 하였으며 총요소수는 540개, 절점수는 1,759개이다. 하중조건은 온도에 의존한 열응력(Thermal stress)해석이므로 계산에 이용한 온도하강스텝(Step)은 각 절점에 800K에서 상온 300K까지 1K씩 서냉하는 열하중을 주었으며 구속(경계)조건은 대칭조건(Symmetry B.C)을 고려하였으며 강체운동만 방지하도록 하고 이외의 변형은 자유로이 하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 2차원 열탄성해석

접합계면의 응력특이성(Stress singularity)은 세라믹/금속접합의 경우 기본적으로 세라믹은 소성변형(항복)이 일어나지 않지만 중간층은 접합계면에서 대규모항복을 한다. 이 경우 세라믹의 특이응력장은 중간층항복의 영향을 많이 받아 탄소성특이성(세라믹쪽이 탄성, 중간층이 탄소성 그리고, 금속이 탄성인 3층구조의 응력특이성)이 문제가 된다^(9),10). 열응력완화의 방법으로 낮은 항복강도(Yield strength)를 가지는 금속

을 중간재로 사용함으로써 열팽창계수차이로 인한 응력을 중간재의 소성변형을 통하여 완화시키기 때문에 열탄소성해석은 열탄성해석에 비해 상대적으로 많은 계산시간이 필요하다. 따라서, 열탄성해석은 초기설계단계에서 응력분포의 경향성을 파악하기 위해 사용되고 있는 것이다.

Fig.3은 2차원 열탄성해석을 하였을 때의 ABCD단부선상의 계면수직방향 잔류응력 σ_x 의 분포를 나타내었다. 단부선상의 σ_x 는, 지르코니아쪽의 계면근방에서 인장의 특이응력장을 나타내고, 금속복합재료 계면근방에서는 압축의 응력 특이장을 보여준다. 특히, Al에 보강재인 SiC_w의 체적함유율이 증가할수록 잔류응력이 감소함을 알 수 있으며 중간재를 전후로 약 5mm 바깥쪽에는 잔류응력이 거의 발생하지 않음을 알 수

있다. 그리고, Fig.4는 열탄성해석시 세라믹과 같은 취성재료에 있어서 항복(파괴)의 기준이 되는 주응력 σ_1 을 집합계면 수직방향(AD line)에 대한 분포를 나타낸 것으로 Al에 SiC_w 체적함유율이 증가할수록 주응력은 감소하는 경향을 보여주고 있다. 체적함유율이 증가할수록 잔류응력이 감소하는 이유는 금속복합재료와 세라믹간의 열팽창계수차이가 체적함유율이 증가할수록 적어지기 때문이다.

Fig.5는 역시 열탄성해석의 결과로써 BE선상 전단응력 τ_{xy} 는 SiC_w 체적함유율이 증가할수록 단부 경계부위에서는 전단잔류응력이 증가하는 경향을 알 수 있으며 중앙부에서는 그 반대의 경향을 알 수 있다. Fig.6은 탄성해석시 세라믹측 집합계면 평행방향(CF line)의 주응력 σ_1 를 나

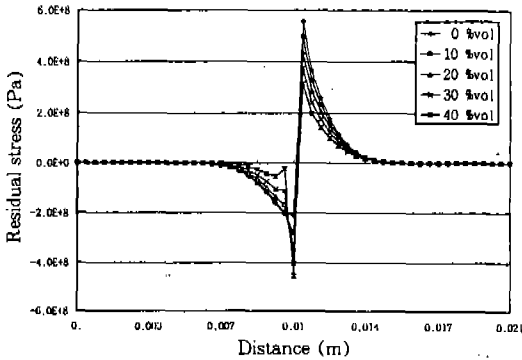


Fig.3 Stress distribution of σ_x along AD-line

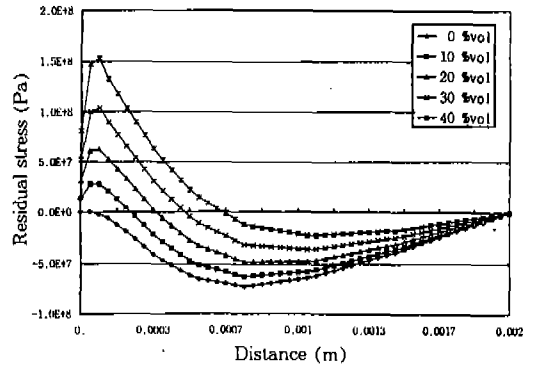


Fig.5 Stress distribution of τ_{xy} along BE-line

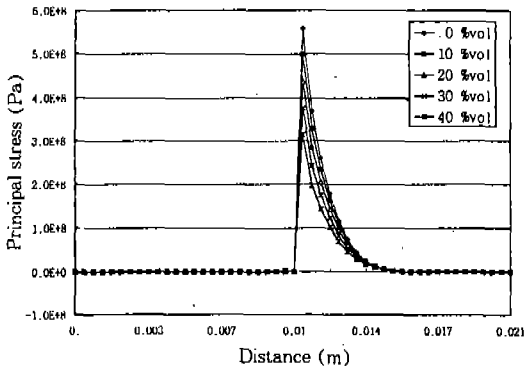


Fig.4 Stress distribution of σ_1 along AD-line

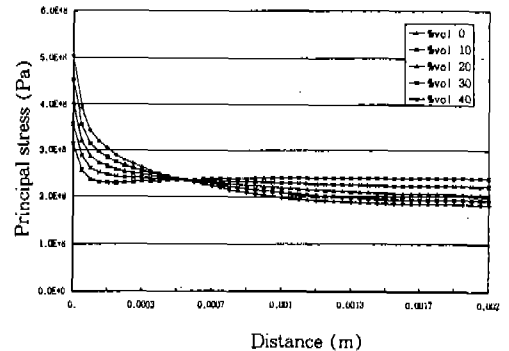


Fig.6 Stress distribution of σ_1 along CF-line

타낸 것으로 단부에서는 SiC_w 체적함유율이 증가할수록 주응력은 낮게 나타났으며 단부에서 y 방향 0.5mm 부근에서 서로 반대의 경향으로 SiC_w 체적함유율이 증가할수록 주응력은 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 하지만 그 크기는 응력집중이 매우 높히 발생하는 단부부근의 응력크기에 비해 무시할 수 있다. 그 이유는 세라믹과 금속간의 영팽창계수차이는 줄어드는 반면에 금속과 중간재간은 증가로 인하여 잔류응력(전단응력, 주응력)은 다소 높게 나타나기 때문이라고 판단된다.

3.2 2차원 열탄소성해석

Fig.7은 2차원 열탄소성해석을 통한 접합체의 파단강도에 가장 큰 영향을 미치는 ABCD단부 선상의 계면수직방향 잔류응력 σ_x 의 분포를 나타내었다. 단부성상의 σ_x 는, 지르코니아쪽의 계

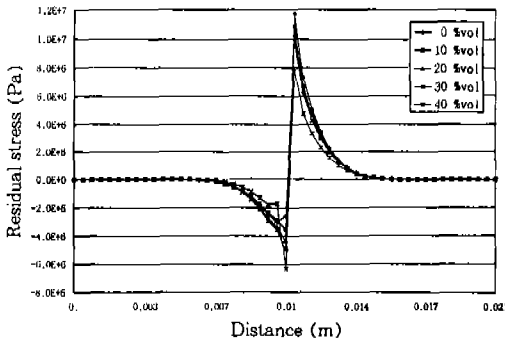


Fig.7 Stress distribution of σ_x along AD-line

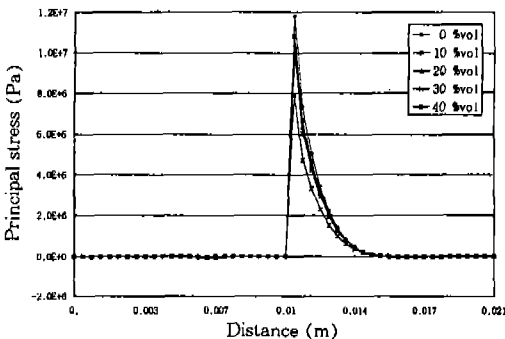


Fig.8 Stress distribution of σ_1 along AD-line

면근방에서 인장의 특이응장력을¹⁰⁾ 나타내고, Al에 SiC_w 체적함유율이 증가할수록 잔류응력이 감소하는 경향을 보여주며, 체적함유율이 40%인 경우 열탄소성해석(Fig.7)의 잔류응력 최대값은 약 8MPa인데 비하여 열탄성해석(Fig.3)의 최대값은 약 300MPa이며 열탄소성해석에 비해 잔류응력값이 현저하게 낮음을 알 수 있다. 그리고, Fig.8은 파괴에 기준이 되는 주응력 σ_1 을 접합경계면 수직방향(AD line)에서 나타낸 것으로 SiC_w 체적함유율이 증가할수록 주응력은 감소함을 잘 보여주고 있으며, σ_1 의 값은 Al복합재와 중간재의 경계면 사이보다는 중간재와 지르코니아 사이에서 훨씬 큰 잔류응력이 있음을 알 수 있다.

Fig.9, Fig.10은 열탄소성해석을 통한 접합계면 평행방향에서의 금속(BE line)측의 전단응력과 세라믹(CF line)측의 전단응력을 나타낸 것

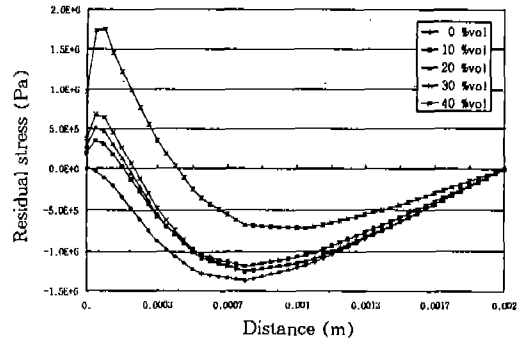


Fig.9 Stress distribution of τ_{xy} along BE-line

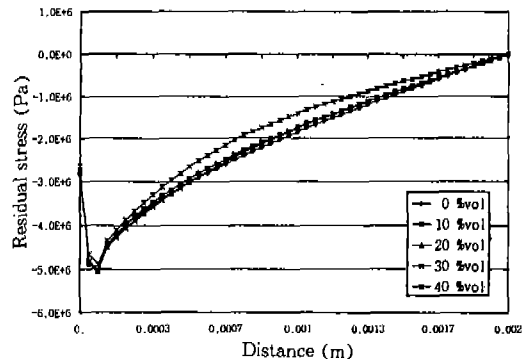


Fig.10 Stress distribution of τ_{xy} along CF-line

으로 세라믹층에 비해 금속층의 잔류응력의 변화가 SiC_w 체적함유율에 따라 변화가 더 크며 SiC_w 체적함유율이 증가할수록 전단응력이 감소하는 경향을 알 수 있다. 그리고, 세라믹층의 전단응력 τ_{xy} 는 단부에서 응력발생이 크고 중앙부로 갈수록 작아짐을 알 수 있으며 SiC_w 체적함유율에 따라 잔류응력발생의 변화는 거의 없다. 또한, 세라믹층의 전단잔류응력이 금속층의 잔류응력에 비해 훨씬 크게 나타남을 알 수 있으며 이 결과로 4점굽힘시험(4 Point Bending Test)시 세라믹층 경계면에서 균열이 시작됨을 예측할 수 있다.

3.3 2차원 열탄성 및 열탄소성해석 비교

Fig.11은 2차원 열탄성해석과 열탄소성해석을 비교한 것으로 접합계면 수직방향(AD line)에 분포하는 수직잔류응력 σ_x 의 금속층 Al에 SiC_w 체적함유율이 10%와 40%의 경우만을 나타낸 것이다. 체적함유율이 0%에서 40%로 점차 증가함으로 인하여 세라믹층이 금속층에 비해 잔류응력은 높게 발생하며 열탄성 및 열탄소성해석 모두 체적함유율 첨가로 인하여 세라믹층의 잔류응력은 약 30%정도 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 열탄소성해석에서는 중간재의 소성변형을 고려하였고 소성변형을 고려하지 않은 열탄성해석보다는 응력완화현상이 두드러지게 나타나며 금속복합재료와 세라믹간의 열팽창계수차이

가 체적함유율이 증가할수록 적어지기 때문이다. 그리고, 체적함유율이 40%인 경우 열탄소성해석(Fig.8)의 잔류응력 최대값은 약 8MPa인데 비하여 열탄성해석(Fig.3)의 최대값은 약 300MPa이다. 이와같이 잔류응력 감소방안의 하나인 중간층의 소성변형을 고려한 열탄소성해석은 보다 실제적인 값이라 평가할 수 있으며 세라믹/금속 접합시 가장 바람직한 해석이라고 할 수 있다.

그러므로, 실제의 가장 가까운 열탄소성해석을 통하여 설계시 적용하는 것이 가장 바람직하다고 생각하며 조금 더 정확성을 고려하려면 3차원 유한요소해석(Finite element analysis)을 해야 하고 이러한 해석결과는 X-선 촬영에 의한 잔류응력 측정의 비교가¹¹⁾ 고려되어야 한다. 이상의 결과를 검토해 볼 때 보강재의 체적증가는 탄성계수(E)의 크기를 상승시키는 반면 열팽창계수(α)의 크기는 저하시키기 때문에 매우 복잡한 잔류응력 분포양상을 나타낸다. 따라서, 중간재와 SiC_w강화 Al복합재의 경계면(BE line)과 중간재와 지르코니아 경계면(CF line)에서의 자세한 응력해석 및 조심스러운 양계면에서의 응력에 대한 비교·검토가 이루어져야 한다. 본 연구 결과 중간재와 지르코니아 경계면(CF line)에서 지배적인 응력특이점이 나타나므로 이를 기준으로 잔류응력해석을 행하였을 때 휘스커의 체적함유율이 증가할수록 잔류응력은 감소됨을 알 수 있다.

3.4 중간재의 시계열변화로 인한 잔류응력 해석

이전의 연구에 따르면 중간재의 재질은 잔류응력분포에 영향을 미치는데 동일한 재질에 항복응력만을 변화시켰을 때 항복응력이 낮을수록 낮은 잔류응력을 나타낸다. 하지만 실제 중간재료는 탄성계수(E), 열팽창계수(α), 항복응력 등이 다르기 때문에 설계시 각 중간재료의 사용에 따른 잔류응력 변화상태를 검토해볼 필요성이 있다.

본 연구에서는 실제 사용가능한 알루미늄 중간재를 사용하여 잔류응력에 미치는 영향을 검토하였다. 2차원 열탄소성해석을 하였을 경우 Al계

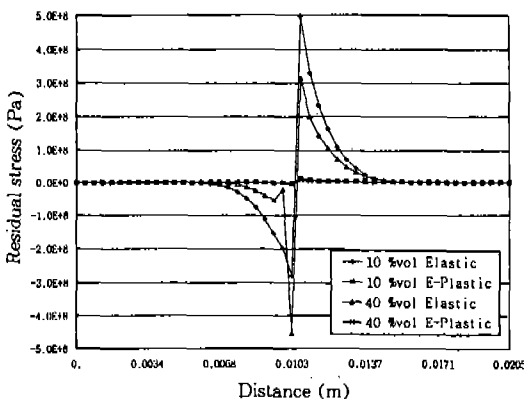


Fig.11 Stress distribution of σ_x along AD-line

Table 2 The mechanical properties of the material⁶⁾

Material	E(GPa)			ν	Yield strength (MPa) (O Temper)	$\alpha(\times 10^{-6}/K)$		
	300K	550K	800K			300K	550K	800K
Al 1050	69.0	59	47	0.33	28.0	23.6	24.5	25.5
Al 2024	72.4	62	50	0.33	75.0	22.9	23.8	24.7
Al 3003	70.0	60	48	0.33	42.0	23.2	24.1	25.1
Al 4032	79.0	68	57	0.33	55.0	19.5	20.2	21
Al 5005	68.2	57	46	0.33	41.0	23.7	24.6	25.6
Al 6061	68.9	59	47	0.33	55.0	23.5	24.1	25.7
Al 7005	71.0	60	49	0.33	83.0	23.1	24	25

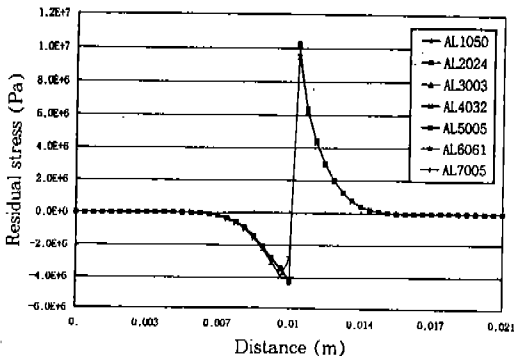


Fig.12 Stress distribution of σ_x along AD-line

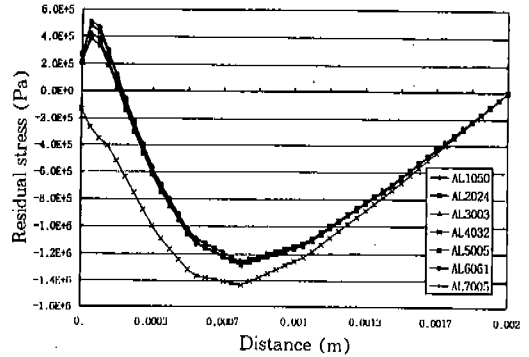


Fig.13 Stress distribution of τ_{xy} along BE-line

열(중간재)에 따른 재료의 기계적인 물성치는 Table 2에 나타내었으며⁶⁾ 항복강도는 열처리(O TEMPER)한 것을 사용하였으며 Fig.12, 13, 14는 Al 1050~Al 7005(금속측은 SiC_w 20%vol 기준)의 중간재가 바뀜으로 인한 잔류응력 발생을 나타낸 것으로 단부선상의 계면수직방향의 σ_x 는 거의 변화가 없으며 세라믹과 중간재간의 접합면에 대한 τ_{xy} 는 Al 4032에서 다소 낮은 응력분포를 나타내고 있다. 그 이유는 Al 4032의 열팽창계수가 인접 지르코니아와의 열팽창계수의 차이가 가장 작은 중간재질이기 때문이라 판단된다. 반면, 중간재의 낮은 열팽창계수로 인하여 금속복합재료와 중간재경계에서는 다소 높은 잔류응력을 보여준다. 하지만 그 크기는 세라믹 측에 비해 작다고 할 수 있다.

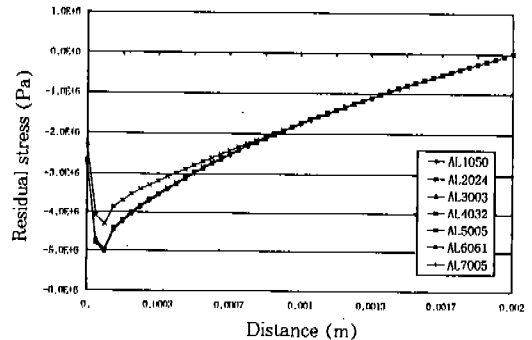


Fig.14 Stress distribution of τ_{xy} long CF-line

이와 같이 금속과 세라믹의 접합이 접합강도에 영향을 미치는 주요인자 즉, 외적인 인자에는 온도, 압력, 시간, 표면의 조도 및 청결도, 분위기, 재료의 크기 등이 있고 내적인 인자에는 세라믹

과 금속의 열팽창계수의 차이, 탄성계수의 차이, 반응성, 접합계면에 있어서 원자의 결합방식 등이 있다. 그러나, 이러한 모든 인자들은 변수로 하기에는 접합조건변화가 너무 많으므로 연구의 대상이 되는 특정한 인자들 외에는 일정한 조건을 갖는 상수로 취급하게 되고 가정을 하게 된다. 그 중에서 온도에 의한 열응력, 열팽창계수의 차이, 탄성계수의 차이만을 고려한 해석이지만 설계 및 강도평가의 기초자료로 이용되리라 사료된다.

일반적으로 금속은 세라믹에 비해 열팽창계수가 훨씬 크기 때문에 접합 후 냉각 시에 금속의 큰 수축으로 인한 변형구속으로 잔류응력이 발생하지만 Al 1050~Al 7005 계열의 열팽창계수의 차이는 거의 없으므로 잔류응력이 컴퓨터를 통한 유한요소해석에서는 큰 변화가 없으나 실제 실험 시에는 열팽창계수차이로 인한 많은 잔류응력의 변화가 있을 수 있다. 따라서, 강도실험 및 X-Ray투과시험을 통해서 자세한 비교·검토가 있어야 한다.

5. 결 론

열탄성 및 열탄소성 해석을 통한 Al 6061에 SiC_w 체적함유율에 따른 잔류응력의 영향과 중간재를 Al 1050~Al 7005(금속측은 SiC_w 20% vol 기준)로 바뀜으로 인한 영향을 열탄소성 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열탄성 및 열탄소성해석 차이점은 응력분포유형은 같으나 잔류응력값은 열탄성해석에 비해 열탄소성해석을 한 경우가 현저하게 낮은 잔류응력값을 알 수 있었고 바람직한 해석방법이라고 판단된다.
- 2) 열팽창계수의 차이에 의한 부조화 응력(Thermal expansion mismatch stress)¹²⁾ 즉, Al 6061에 SiC_w 체적함유율이 증가할 때 열팽창계수값은 점점 감소하게 되며 이로 인하여 중간재와의 열팽창계수 차이가 차츰 커짐으로 인하여 금속측(BE-line)에서는 잔류응력이 증가하고 반대로 세라믹과의 열팽창계수 차이가 점점 작아짐으로

인하여 세라믹측(CF-line) 잔류응력이 감소함을 알 수 있다.

- 3) 중간재와 금속측(BE line)의 경계면에 비해 중간재와 세라믹측(CF line)의 경계면에서 잔류응력이 매우 크기 때문에 세라믹측을 기준으로 강도설계를 고려할 때 체적함유율이 증가할수록 잔류응력이 감소하며 강도에 유리함을 알 수 있다.
- 4) 실제의 경우 여러가지 접합공정과 방법 그리고 접합조건에 따라 중간재료 사용한 Al계열변화로 인한 잔류응력 및 강도의 변화가 있을 수 있다. 그러나, 본 유한요소해석에 사용한 중간재의 계열변화는 잔류응력의 변화에 큰 영향을 주지 않았다. 그 이유는 금속(10mm)과 세라믹(10mm)에 비해 중간재(0.5mm)의 두께가 얇은 것과 중간재로 사용한 Al계열변화는 비교적 열팽창계수가 비슷하다는 것을 들 수 있으며 금속측을 SiC_w체적함유율이 20%기준으로 고정하여 해석한 것에도 이유가 있다고 판단된다.
- 5) 세라믹/금속 접합에서는 접합면의 불일치, 중간층 두께의 불균일 등이 또한 잔류응력에 영향을 미친다. 그러므로, 이상적인 해석조건을 설정한 유한요소해석의 잔류응력은 반드시 실제의 경우와는 일치하지 않는다. 또한, 동일한 조건으로 접합해도 접합재마다 잔류응력의 유한요소해석에 대해서는 X-선법 등의 실측에 의한 연구와 평가가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 인하대학교, "Al 합금-SiC 복합재료와 ZrO₂의 접합에 관한 연구", '89첨단공학(신소재분야)연구결과보고서, pp. 1~12, 1991.
2. 許張旭, 小林英男, "세라믹/금속 접합잔류응력의 3차원과 2차원 유한요소해석의 비교", 대한기계학회 '95년도 춘계학술대회논문집(I)", pp. 656~661, 1995.
3. B. D. Agarwal and L. J. Broutman, Anal-

- ysis and Performance of Fiber Composites, John Wiley and Sons, Inc., pp. 56~61, 85~86, 1990.
4. I. A. Ibrahim, F. A. Mohamed and E. G. Lavernia, "Particulate Reinforced Metal Matrix Composite-A Review", J. Mater. Sci., Vol. 26, pp. 1137~1156, 1991.
 5. D. L. McDanel, "Analysis of Stress-Strain, Fracture, and Ductility Behavior of Aluminum Matrix Composites Containing Discontinuous Silicon Carbide Reinforcement", Metal. Trans. A, Vol. 16A, pp. 1105~1115, 1985.
 6. J. L. Cook and W. R. Mahn, "Whisker-Reinforced MMCs", ASM Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, pp. 896~902, 1987.
 7. W. C. Harrigan, "Discontinuous Silicon Fiber MMCs", ASM Engineered Materials Handbook, Vol. 1 Composites, pp. 889~895, 1987.
 8. ASM International Handbook Committee, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Metals Handbook, Vol. 2, 10th edition, ASM International, pp. 62~122, 1019~1024, 1990.
 9. D. B. Bogy, "Two Edge-Bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Anales Under Surface Traction", J. Appl. Mech., Vol. 38, pp. 377~386, 1971.
 10. S. Sakata, T. Hattori, T. Hatsuda and G. Murakami, "A Stress Singularity Parameter Approach for Evaluating Adhesive Strength", JSME Int. J., Ser. I, Vol. 31, No. 4, 1988.
 11. 小林英男, 荒居善雄, 中村春夫, "セラミックス/金屬接合残留應力の有限要素解析の基礎的検討", 日本機械學會論文集(A編), 57卷 543號, 1991.
 12. O. Kimura, T. Kawashima, "Effect of Interlayer Thickness on Residual Thermal Stresses in a Ceramic-to-Metal Cylindrical Joint", Communications of American Ceramic Society, Vol. 76, No. 3, pp. 757~759, 1993.