

세라믹/금속 접합재의 잔류응력 해석

박 영 철*, 허 선 철**, 김 광 영***

* 동아대학교 기계공학과

** 동아대학교 대학원 기계공학과

*** 한국기계연구원 산업기계실

요 약 동을 중간재로 하는 $Si_3N_4/SUS304$ 접합재의 접합계면 근방의 잔류응력 분포를 유한요소법과 X선 응력측정법을 이용하여 해석을 하였다. 그 결과, 접합재의 세라믹부 계면 근방의 잔류응력 분포를 정량적으로 밝혀낼 수 있었다. 세라믹부에 발생하는 접합 잔류응력은 접합계면 근방에서 대단히 크게 나타났으며, 특히 최대인장 잔류응력 σ_x 는 단부에서 발생하였다. 한편, σ_x 는 접합계면 근방에서 3차원분포를 하고 있기 때문에 2차원 유한요소 해석결과와는 대단히 다른 값을 나타내고 있으며, 특히 시험편 중앙부의 계면 근방에서는 X선 실측결과가 인장 잔류응력임에 반하여 2차원 유한요소 해석결과는 압축 잔류응력으로 계산되어짐을 알았다. 따라서, 이와같은 3차원 분포를 하고 있는 접합계면 근방의 잔류응력 σ_x 보다 간편하고 정확하게 예측할 수 있는 유한요소 해석모델에 대하여 서로 검토하였다.

1. 서 론

세라믹은 내열성, 내식성, 내마모성 등이 금속재료에 비하여 뛰어나며 저비중, 저열팽창성, 저열전도성 및 고온강도를 가지는 등 우수한 특성을 가지고 있어서 가스터빈, 터보과급기 등 경량, 고강도 및 내열성이 함께 요구되는 구조물에 대하여 금속재료를 대신하여 적용이 활발히 검토되어 지고 있다. 그러나 세라믹은 이러한 우수한 특성을 지니고 있는 반면에 대단히 취약하므로 일반구조용 재료로서의 활용은 대단히 어렵다. 따라서 이와 같은 세라믹이 갖고 있는 문제점을 보강하는 수단으로 인성이 충분한 기존 금속재료와의 접합이 각광을 받게 되었다.

그러나 세라믹/금속 접합재는 고온에서 접합되어 지기 때문에 냉각시에 양 재료가 열팽창계수의 현

저한 차이에 의해서 접합 열응력이 발생되며 특히, 시험편의 양단부에는 계면에서의 탄성계수 차이에 의하여 잔류응력이 특이 응력장을 형성하여 접합강도를 크게 저하시킨다.^{1), 2)} 따라서, 이와같은 잔류응력을 되도록이면 완화시키는 방법에 대한 연구가 세라믹/금속 접합재의 실용화에 있어서 필수적이며, 이를 위하여 잔류응력의 정량적인 평가에 대한 연구가 절대적으로 필요하다.

세라믹/금속 접합재의 잔류응력 평가에 관한 연구는 X선에 의한 실험적 연구^{3), 4), 5)}와 유한요소법에 의한 수치해석^{6), 7), 8)}이 동시에 진행되고 있다.

유한요소법에 의한 잔류응력해석은 간단히 계산할 수 있으므로 대단히 효율적인 방법이라 할 수 있다. 그러나, 유한요소법에 의한 해석의 경우 시험편 개개의 접합상태나 중간층의 정확한 물성치에 대하여 아직 불명확한 부분이 대단히 많아 정확한 시물

레이션이 곤란하므로 주로 영향인자의 감도 해석이나 특이 응력장의 정성적 평가 등에 그 유효성이 발휘되고 있는 실정이다. 이와같이 유한요소해석이 주로 정성적인 평가를 위하여 이용되어 진다면 막대한 계산시간을 필요로 하는 3차원 탄소성 해석을 이용하기 보다는 보다 간편한 2차원 유한요소해석 모델의 개발이 필요하다고 생각되어진다.

한편, X선 응력측정법은 재료 표면의 국소 잔류응력을 비파괴적으로 측정할 수 있으므로, 접합체의 계면 근방에 발생하는 불균일한 잔류응력 분포의 측정에 있어서 최적의 방법이므로 이를 이용한 연구가 시도되고 있다. 그러나, 접합계면 근방의 명확한 분포나 각 접합체의 접합 잔류응력의 변동 등 접합체 계면 근방의 잔류응력 해석에 있어서는 아직 해결되지 못한 문제점이 대단히 많다고 할 수 있다.

본 연구에서는 세라믹/금속 접합체의 강도평가에 가장 문제가 되고 있는 접합 잔류응력 평가방법을 확립하기 위하여 PSPC형 X선 측정장치를 이용하여 접합계면 근방에 있어서의 접합 잔류응력 분포를 명확히 밝혔다. 뿐만 아니라, 유한요소해석을 병행하여 X선 실측 결과와 비교 검토함으로써 세라믹/금속접합체의 계면 근방의 잔류응력을 보다 간편하고 정확하게 평가할 수 있는 새로운 2차원 유한요소 모델을 이용한 접합 잔류응력 간이평가법에 대하여서도 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시험편과 접합방법

접합체 시험편은 상압소결 질화규소(Si_3N_4)와 오스테나이트계 스테인레스(SUS304)를 접합하여 제작하였으며, 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1과 같고 재료특성은 Table 1과 같다. 가공과정에서 발생하는 잔류응력을 제거하기 위하여, 접합하기 전에 상압소결 질화규소(Si_3N_4)를 램핑가공 후 1000°C의 대기중에서 24hr 소둔처리를 실시하였으며, 스테인레스강은 연삭가공 후 900°C의 대기중에서 1hr 소둔처리를 실시한 후 접합하였다. 접합시 열팽창계수의 차이에 의하여 발생하는 잔류응력을 완화시키기 위하여 두께 0.5mm의 동판을 중간층으로 사용하였다. 접합방법은 비교적 높은 강도와 신뢰성을 얻을 수 있는 활

성금속법을 이용하였으며, 접합조건은 Table 2와 같다.

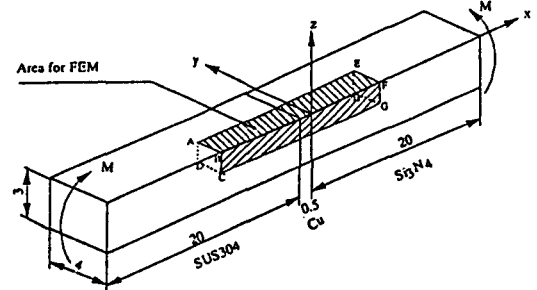


Fig. 1. Configuration of specimen

Table 1. Material properties

	Si_3N_4	Cu	SUS304
E(GPa)	304	108	193
ν	0.27	0.33	0.3
σ_c (/k)	3.0×10^6	17.7×10^6	6.5×10^6

Table 2. Conditions of jointing

Brazing filler	Ti-Ni-Cu
Temperature	1073-1123K
Atmosphere	Vacuum, 1×10^{-5} torr
Interlayer	Cu(thickness 0.5mm)

Table 3. Conditions for X-ray stress measurement

System	PSPC/RSF system(Rigaku)
Characteristic X-ray	Cu-K α
Diffraction planes	$\beta-Si_3N_4(323)$
Filter	Ni
Tube voltage	35kV
Tube current	40mA
Collimeter	$\phi 0.5$ mm
Method	$\sin^2\phi$ iso-inclination method
Incident angle	$\phi = 0, 15, 25, 35, 40, 45$
Fixed time	300sec/ 1ϕ
Stress constant	-806.5Mpa/deg
Peak position	Parabola peak top method

2.2. X선 잔류응력 측정

잔류응력 측정영역은 Fig. 1과 같이 시험편 표면 세라믹부의 단부 근방($y=0.5\text{mm}$)의 x방향과 중앙 선상($y=2\text{mm}$)의 x방향 그리고 계면 근방($x=0.5\text{mm}$)의 y방향의 3영역에 대하여 계면 수직방향 잔류응력(σ_x)과 계면 평행방향 잔류응력(σ_y)을 각각 측정하였다. 측정에는 PSPC(위치 민감형 비례배수관) 미소부 응력측정장치(理學電機社製)를 이용하여 Table 3의 측정조건으로 23개의 시험편에 대하여 실시하였다.

2.3. 유한요소 해석방법

유한요소 해석에는 범용 구조해석 프로그램 MARC를 이용하여 2차원 탄소성 유한요소 응력해석을 하였다. 세라믹과 금속의 접합은 고온(약 1100°C)에서 행하여지나, 고온에서는 브레이징재가 액체이므로 강도를 갖지 않기 때문에 금속과 세라믹 둘 다 자유로이 열변형하여 응력을 발생하지 않는다. 그러나

냉각이 진행되어 브레이징재가 강도를 갖기 시작하면 열팽창계수가 다른 세라믹과 금속이 접합면에서 열변형을 서로 구속하게 되므로 응력이 발생된다. 따라서 본 연구에서는 냉각과정에서 브레이징재가 응고하여 강도를 갖기 시작하는 온도를 800k 로 하고, 이 온도로 부터 실온(300k)까지 서서히 냉각할 경우에 발생하는 잔류응력에 대하여 2차원 탄소성 해석을 하였다. 이때 계산에 이용한 온도 하강스텝(step)은 10°C 로 하였으며 또한, 브레이징재의 두께는 중간재 두께에 비하여 대단히 얇기 때문에 중간재(Cu)와 동일하게 변형한다고 가정하고 해석모델에는 브레이징재를 포함하지 않았다. 또한, 응력해석은 평면응력과 평면변형률 상태를 가정하여 계산하였고, 시험편의 대칭성을 고려하여 시험편의 절반에 대하여 해석하였으며, 탄소성해석에 있어서 소성 변형과 응력의 관계는 변형률 증분이론을, 항복조건으로는 Von Mises항복조건을 사용하였다. 잔류응력은 계면으로부터 약 10mm 이상 떨어진 영역에서는



Fig. 2. Mesh model used in FEM

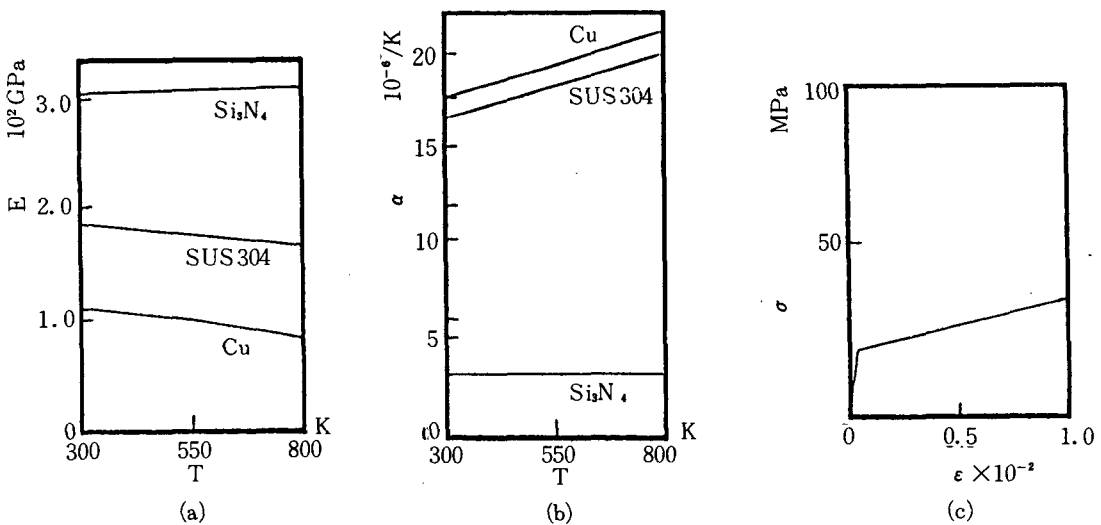


Fig. 3. Dependence of temperature of mechanical properties
 a) Young's modulus b) Thermal expansion coefficient
 c) Yield strength for Cu

계면의 영향이 거의 나타나지 않아 잔류응력이 0에 가까우므로 해석은 Fig. 1의 빗금친 계면 근방의 표면 ABFE, 측면 BCGF 그리고 중앙 종단면 ADHE를 해석영역으로 하였다. 표면 ABFE와 측면 BCGF는 면의 수직방향 응력이 0이므로 평면응력 해석을 하였고, 종단면 ADHE는 면의 수직방향 변형율이 0이기 때문에 평면변형을 해석을 하였다.

Fig. 2는 요소분할을 나타낸다. 응력이 집중되는 접합계면과 단부 근방의 요소는 보다 잘게 분할하였다. 요소는 8절 점등방 계수요소(isoparametric element)를 이용하였으며, 총요소수 540개, 총절점수 1749개, 최소요소 x, y방향의 크기는 0.01858mm, 0.02865mm이다. 경계조건은 대칭조건을 고려하여 강제운동만 방지하도록 하고, 이외의 변형은 자유로이 하였다. 각 재료의 종탄성계수와 열팽창계수의 온도의존성 그리고 동의 항복특성은 각각 Fig. 3(a), (b), (c)와 같다.^{8), 9)} 단, Fig. 3(c)의 동의 항복특성은 온도에 의존하나, 접합 잔류응력이 동의 실온에서의 항복강도에 좌우되기 때문에 해석에는 실온의 항복특성을 그대로 이용하여 계산하였다.

3. 잔류응력해석 결과 및 고찰

Fig. 4는 시험편 표면의 단부 근방(y=0.5mm)과 중앙선상(y=2mm)에 있어서 유한요소법에 의하여 계산한 계면 수직방향 잔류응력(σ_x)분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 세라믹부의 잔류응력과 스테인레스부의 잔류응력은 시험편의 중심에 대하여 거의 점대칭으로 분포되어 있다.

또한 평면응력과 평면변형을 해석에 의한 잔류응력값을 비교하여 보면, 단부의 계면 근방 영역에서의 평면변형을 해석 결과가 보다 급격한 분포를 나타내는 것과 중심선상에서 보다 완만한 분포를 나타내는 것 등 부분적으로 다소의 차이를 나타내지만, 전체적으로는 커다란 차이가 없이 거의 같은 분포형상을 하고 있는 것을 알 수 있다. 이와같이 평면응력과 평면변형을 해석결과가 거의 같은 값을 나타내는 원인은, 본 해석에 있어서 시험편의 두께가 작아서 Z방향의 변형구속 정도가 작기 때문이라고 생각되어진다.

한편, 잔류응력 분포는 중앙선상에서 세라믹부가

압축 잔류응력을 나타내나, 스테인레스부는 인장 잔류응력이 발생되어 시험편 전체는 인장 잔류응력과 압축 잔류응력이 연속적으로 완만하게 분포하고 있다. 이에 반하여, 단부에서 0.5mm떨어진 단부선상의 잔류응력 분포는 스테인레스부에서는 압축 잔류응력이, 세라믹부에서는 인장 잔류응력이 발생되며, 계면을 경계로 불연속적으로 분포되어짐을 알 수 있다. 또한 접합 잔류응력은 계면 근방에 집중되며, 그 절대값은 단부 근방이 중앙선상보다도 대단히 크다는 것을 알 수 있다. 특히 접합재의 파단강도를 크게 저하시키는 인장 잔류응력 최대값은 세라믹부의 단부 근방에서 발생되어짐을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 세라믹부를 중심으로하여 접합 잔류응력의 해석을 수행하였다.

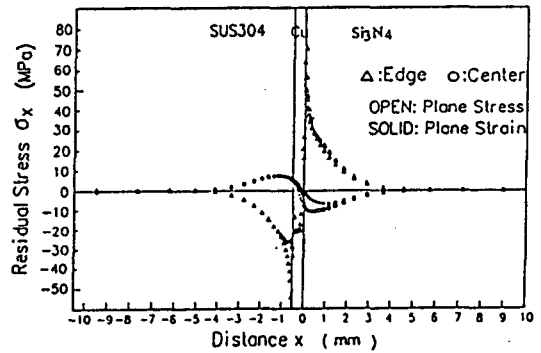


Fig. 4. Distribution of residual stress σ_x on $Si_3N_4/SUS304$ joint specimen

Fig. 5, 6은 세라믹부의 중앙선상(y=2mm)과 단부 근방(y=0.5mm)에 있어서 X방향의 계면 수직방향 잔류응력(σ_x)에 대하여 평면 응력해석 결과와 비교를 위하여 X선에 의한 실측결과를 나타낸다.

중앙선상에 있어서 σ_x 의 분포는 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 평면 응력해석 결과가 X선 측정결과와는 전혀 다른 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 평면 응력해석 결과는 접합계면 근방에서 최대 압축 잔류응력을 나타낸 후 서서히 감소하여 계면에서 약 5mm떨어진 위치부터는 잔류응력값이 거의 변화없이 0에 가까운 값을 나타내고 있다. 이에 반하여, X선 잔류응력 측정결과는 접합계면에서 최대 인장 잔류응력을 나타낸 후 계면에서 멀어짐에 따라서 급격히 감소하여, 계면에서 약 2.5mm 떨어진

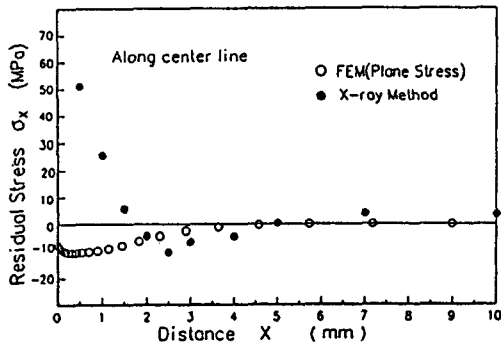


Fig. 5. Distribution of σ_x along center line of the specimen(X-axis)

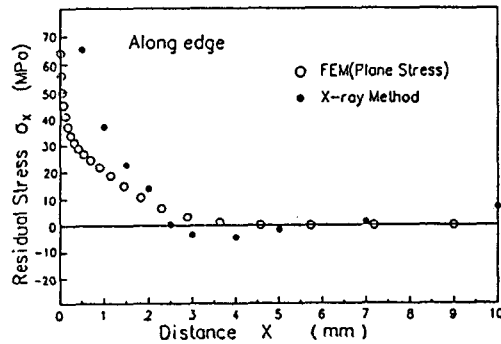


Fig. 6. Distribution of σ_x along the edge of the specimen(X-axis)

위치에서는 최대 압축 잔류응력을 나타낸 후 다시 증가하여, 계면에서 약 5mm 떨어진 위치에서 잔류응력이 거의 0이 된다. 이와 같이 2차원 유한요소 해석결과와 X선 잔류응력 측정결과가 계면에서 멀리 떨어진 영역에서는 잘 일치되나, 계면 근방에서는 서로 정반대의 결과를 나타내는 원인으로서 계면 근방에서 커다란 응력집중에 의하여 잔류응력이 실제로 3차원으로 분포하고 있으나 2차원 평면 응력해석에서는 시험편 두께방향(Z 방향)의 수축을 전혀 고려하지 않았기 때문이라고 생각되어진다. 따라서 σ_x 를 정도 높게 해석하기 위해서도 시험편의 두께방향의 수축도 고려된 3차원 탄소성해석을 할 필요가 있다.

Fig. 6은 단부 근방($y=0.5\text{mm}$)에 있어서 σ_x 의 분포를 나타낸다. 평면 응력해석 결과는 중앙선상과는 달리 접합계면 근방에서 최대 인장 잔류응력을 나타낸 후 서서히 감소되어 계면에서 약 5mm 떨어진 위치에서는 잔류응력이 거의 0이 된다. 이에 반하여

X선 실측결과는 접합계면에서 대단히 큰 최대 인장 잔류응력을 나타낸 후 급격히 감소하여 계면에서 3.5~4mm 떨어진 부근에서 최대 압축 잔류응력을 표시한 후 계면에서 약 5mm부근에서 잔류응력은 거의 0에 가까운 값을 나타낸다. 이와같이 단부 근방에서는 2차원 평면 응력해석 결과와 X선 응력측정 결과는 거의 비슷한 결과를 나타내나 계면 근방에서의 최대 인장잔류응력값은 X선 측정결과에 비하여 대단히 작은 것을 알 수 있다. 이와같은 단부의 결과를 시험편 중심선상의 결과와 비교하면 대단히 다르다는 것을 알 수 있다. 이것은 시험편 중심부에 있어서 계면 근방 잔류응력은 3차원 분포를 하고 있는데 반하여, 단부에서는 σ_y 가 이론상으로 0이 되므로 잔류응력은 2차원에 가까운 상태로 되어 그 차이가 크게 줄어드는 것으로 생각되어진다.

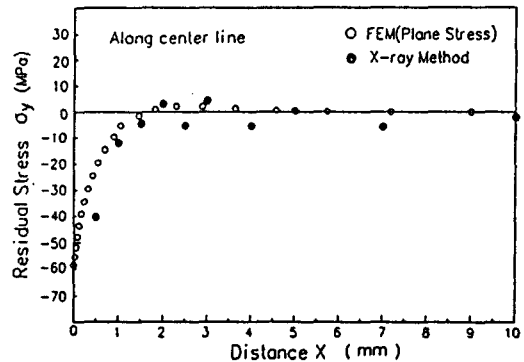


Fig. 7. Distribution of σ_y along center line of the specimen(X-axis)

Fig. 7은 세라믹부의 중앙선상($y=2\text{mm}$)에 있어서 x방향의 계면 평행방향 잔류응력(σ_y)을 평면 응력 해석한 결과이다. 중앙선상에 있어서 σ_y 의 분포는 접합 계면 근방에서 최대 압축 잔류응력을 나타낸 후 접합 계면에서 멀어짐에 따라 잔류응력은 급격히 감소하나, 계면에서 약 1.5mm 떨어진 위치부터는 거의 변화없이 0에 가까운 값을 나타내고 있다.

한편, σ_y 의 2차원 응력해석 결과를 X선 응력측정 결과와 비교하여 보면 앞에서 설명한 Fig. 5, 6의 σ_x 의 결과와는 달리, 전체적으로 거의 같은 분포를 하여 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이와같은 결과로부터 σ_y 는 계면 근방에서도 근사적으로 2차원 분포를 하고 있다는 것을 알 수 있다.

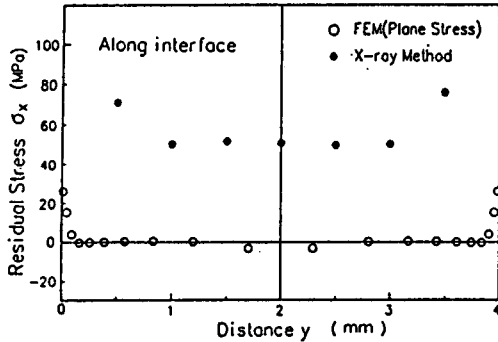


Fig. 8. Distribution of σ_y along the interface(Y-axis)

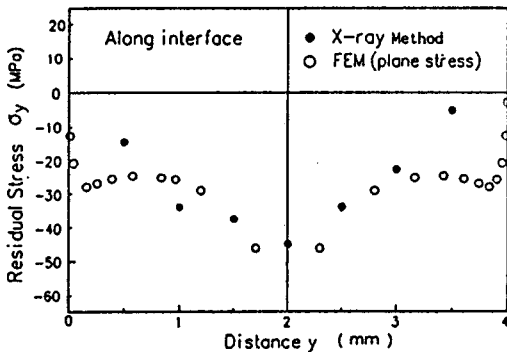


Fig. 9. Distribution of σ_y along the interface(Y-axis)

Fig. 8, 9는 세라믹부의 계면 근방($x=0.5\text{mm}$)에 있어서 σ_x 와 σ_y 의 y 방향 분포에 대하여 평면응력 해석 결과를 나타낸다.

Fig. 8의 σ_x 의 분포는 단부에서 최대 인장 잔류응력을 나타내나, 단부에서 조금 떨어지면 급격히 감소하여, 최소값을 표시한 후, 중앙부까지는 변화없이 거의 같은 값을 나타낸다. 또한 2차원 응력해석 결과는 X선 응력측정 결과와는 전혀 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, X선 잔류응력 측정값은 최대 70MPa에서부터 최저 52MPa까지의 계면 근방에서는 전부 인장 잔류응력값을 나타내는 반면에 유한요소 해석 결과는 최대 26MPa에서 최저 -5MPa까지의 인장에서 압축에 걸쳐서 변화되는 대단히 낮은 잔류응력값을 표시하고 있는 것을 알 수 있다.

한편, σ_y 의 분포는 Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이, 자유표면인 단부 근방에서는 0에 가까운 대단히 낮은 압축 잔류응력값을 나타내나, 중앙부에 가까워짐에 따라 증가하여 중앙부에서는 최대 압축 잔류

응력값을 나타낸다. 또한, 2차원 유한요소 해석결과를 X선 측정결과와 비교하여 보면, Fig. 8의 σ_x 와는 달리 양자가 같은 분포양상을 나타내어 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 세라믹/금속 접합재의 접합 계면 근방의 잔류응력 분포에 대하여 검토하여 본 결과, 계면 평행방향 잔류응력(σ_y)은 근사적인 2차원 분포를 하고 있으므로 2차원 평면 응력해석으로 정도 높게 해석할 수 있으나, 파단강도에 크게 영향을 미치는 계면 수직방향 잔류응력(σ_x)은 3차원 분포를 하고 있으므로 2차원 평면 응력해석으로는 정도 높게 해석할 수 없다는 것을 알았다. 따라서 계면 근방의 σ_x 를 정도 높게 해석하기 위해서는 시험편의 두께방향도의 수축도 고려된 3차원 탄소성 해석을 할 필요가 있다. 그러나, 3차원 탄소성 해석은 요소수가 크게 늘어나므로 막대한 해석시간이 필요하게 되어 광범위한 강도해석 등 적용상 많은 문제점이 있기 때문에 광범위한 강도해석 등에는 실제로 결과값에 다소 오차가 발생하더라도 2차원 해석을 많이 이용하고 있다. 이와같은 문제점을 보완하는 수단으로 3차원 상태를 보다 근접하게 평가할 수 있는 2차원 해석의 간이 평가 수법에 대한 연구가 필요하다고 생각되어지며, 특히 佐藤拓哉⁹⁾ 등은 3차원 탄성응력 분포가 2차원의 평면응력모델과 평면변형을 모델을 적절하게 조합한 2차원 중첩모델에 의하여 정도 높게 얻을 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 이와같은 방법을 열탄소성 문제에 확장하여 3차원 분포를 하고 있는 접합 잔류응력 σ_x 의 간이 평가 수법에 대하여 검토하였다.

Fig. 10, 11은 세라믹부의 단부 근방과 중앙선상 x 방향의 σ_x 분포를 2차원 중첩모델에 의하여 해석한 결과이다. 본 연구에서 이용한 2차원 중첩모델은 Fig. 1에서 표시한 바와 같이, 단부 근방 BF선상의 σ_x 해석은 표면 ABFE의 평면 응력해석에 의한 단부 근방(BF선상)의 σ_x 의 결과와 측면 BCGF의 평면 응력해석에 의한 단부 근방(BF선상)의 σ_x 의 결과를 중첩하여 평가하였으며, 중앙선상(AE선상)의 x 방향 σ_x 의 분포는 표면 ABFE의 평면 응력해석에 의한 중앙선상(AE선상)의 σ_x 결과와 종단면 ADHE의 평면 변형을 해석에 의한 AE선상의 σ_x 와의 결과를 중첩하여 평가하였다.

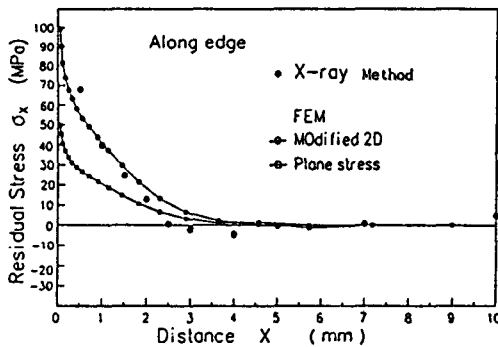


Fig. 10. Distribution of σ_x along the edge line of the specimen obtained by modified two-dimension FE analysis

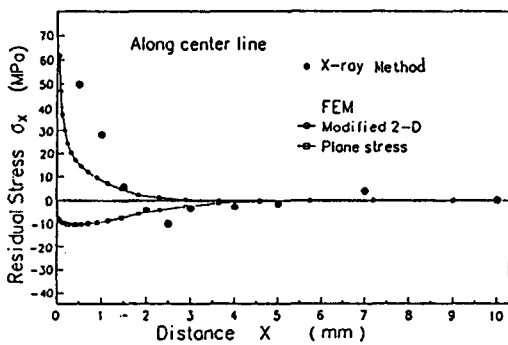


Fig. 11. Distribution of σ_x along center line of the specimen obtained by modified two-dimension FE analysis

Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이, 단부 근방의 σ_x 분포는 2차원 평면 응력해석 결과가 실측 결과보다 대단히 작는데 비하여 2차원 중첩모델 해석결과는 실측결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, X선에 의한 실측값은 $y=0.5\text{mm}$ 위치에서 측정된 결과인데 반하여, 해석값은 $Y=0.114\text{mm}$ 위치에서 해석한 결과이므로 실제로 X선 측정위치인 $Y=0.5\text{mm}$ 위치에서의 2차원 중첩모델 해석에 의한 σ_x 가 이보다 훨씬 작은 값으로 해석되어질 것을 감안한다면, 2차원 중첩모델해석 결과는 실제의 잔류응력을 과소평가하고 있다고 할 수 있다. 또한, Fig. 11의 중앙선상의 σ_x 분포는 2차원 평면해석 결과가 접합계면에서 압축으로서 실측결과와는 전혀 반대의 경향을 나타내는데 반하여, 2차원 중첩모델 해석결과는 절대값의 차이는 있으나 접합계면에서 최대의 인장잔류응력을 나타낸 후 계면에서 멀어짐에 따라 감소하는 분포형태를 나타냄으로서 정성적 경향은

잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 3차원 분포를 하고 있는 계면 근방의 접합 잔류응력 σ_x 는 2차원 평면 응력해석과 평면 변형률해석 결과의 적절한 중첩방법에 의하여 근사적으로 평가할 수 있다는 것을 알았다. 그러나, 이와같은 중첩방법은 탄성문제에서만 유효하므로, 엄밀하게 말하면 탄소성문제에는 적용할 수 없다. 그러나 본 연구에서는 소성변형하는 것은 중간재 부분으로 검토영역인 세라믹부는 실제로 거의 탄성 거동을 하고 있기 때문에 세라믹부 잔류응력의 기본적 특성은 탄성의 경우와 크게 다르지 않을 것이므로 중첩법을 적용하여도 문제가 되지 않을 것으로 생각되어 진다. 뿐만 아니라 접합재의 잔류응력 해석에 있어서 중간층과 브레이징재의 구성방정식의 온도 의존성, 브레이징재의 두께분포, 시험편 각각의 접합상태 등이 아직 명확히 밝혀져 있지 않은 상태에서 3차원 탄소성해석을 행하여도 정량적으로는 문제가 있다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 2차원 중첩모델은 간편하게 3차원 응력분포를 추정할 수 있는 대단히 유효한 수법으로 생각되어지며, 특히 접합잔류응력의 정성적 평가에는 유효하게 사용되어질 것으로 기대된다.

Fig. 12는 시험편단부, 중앙선 및 계면 근방에 있어서 σ_x 의 2차원 중첩모델에 의한 해석결과를 X선

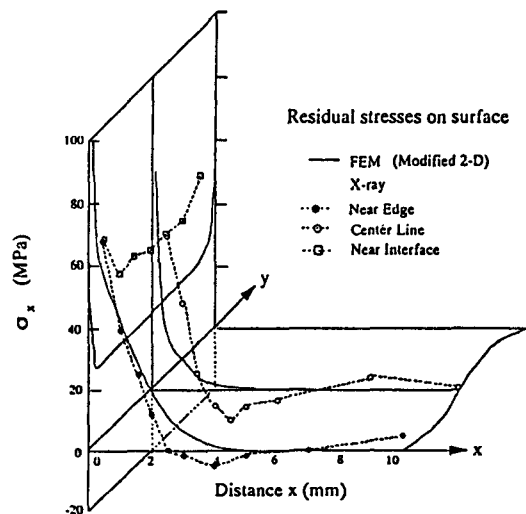


Fig. 12. Comparison of the results obtained by X-ray measurement and modified two dimensional FE analysis along edge, center line, and interface

실측결과와 함께 정리한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 2차원 중첩모델에 의한 해석결과는 X선 실측결과와 정성적으로 대단히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 잔류응력 σ_x 의 최대값은 계면 근방에서 발생하고, 단부가 중앙부보다 크며, 두 영역 모두 σ_x 가 계면에서 멀어짐에 따라서 급격히 감소하여 0에 접근하고 있음을 알 수 있고, 또한 인장 잔류응력이 발생하는 영역은 단부가 중앙부보다 크며, 또한 그 기울기는 단부가 보다 완만하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

세라믹/금속 접합재의 접합 잔류응력 분포 및 평가방법을 확립하기 위하여 동을 중간재로 하는 Si₃N₄/SUS304접합재의 접합계면 근방의 잔류응력에 대하여 PSPC형 X선 응력 측정장치와 유한요소 해석에 의하여 검토 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 최대 인장 잔류응력 σ_x 는 세라믹부 계면 근방의 단부에서 발생하는 것을 알았다.
2. 접합계면 근방에서의 σ_x 대한 X선 실측결과와 2차원 유한요소 해석 결과는 전혀 다른 값을 가진다는 것을 알았다. 특히, 시험편 중앙부의 계면 근방에서 σ_x 는 X선 실측에 의하면 인장 잔류응력이 발생하나, 2차원 유한요소 해석 결과로는 압축 잔류응력이 계산되어 짐을 알았다.
3. σ_y 는 σ_x 와는 달리 접합계면 근방에서도 근사적인 2차원 응력상태로 분포하기 때문에 2차원 유한요소 해석으로써 근사하게 응력분포 상태를 계산할 수 있었다.
4. 3차원 분포를 하고 있는 접합 계면 근방에서의 σ_x 는 2차원 평면 응력해석 결과와 평면 변형을 해석 결과를 적절하게 조합하여 제한한 2차원 중첩모델에 의하여 근사적으로 평가 가능하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 1993년도 동아대학교 교비 학술연구조성비의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Dalglish, B.J, LU, M.C and Evans, A.G, 1988 "The Strength of Ceramics Bonded with Metals", Acta metall. 36, pp. 2029~2035.
- 2) 김영식, 1991, "이종재 접합부의 강도평가", 대한기계학회 91년도 춘계학술대회 논문집(1), pp. 375~383
- 3) 小林英男, 荒居善雄, 1991, "X-線法によるセラミックス/金屬接合材の残留應力の測定と評價" 日本機械學會論文集, 57卷 536號, pp. 173~178.
- 4) 류지호, 강춘식, 김종영, 1989, "플라즈마 용사법에 의한 지르코니아 코팅에서의 잔류응력에 대한 연구", 대한용접학회지, 7권 4호, pp. 46~55.
- 5) Tanaka, S, Takahashi, Y, 1990, "Effects of X-ray beam collimation on the Measurement of Residual Stress Distrbution in a Si₃N₄/Steel Joint", ISIJ International, Vol 30, No 12, pp. 1086~1091.
- 6) 김석주, 조상명 김영식, 1991, "세라믹과 강 접합부의 열응력해석에 관한 연구", 대한기계학회 1991년도 춘계학술대회 논문집, pp. 419~422.
- 7) 佐藤拓哉, 小林英男, 荒居善雄, 1991, "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, 57卷540號, pp. 1801~1807.
- 8) 栗田政則, 1990, "窒化けい素と炭素鋼の接合材の残留應力分布", 日本機械學會 論文集 56卷 524號, pp. 298~303.
- 9) 佐藤拓哉, 1992, "セラミックス/金屬接合残留應力に關する基礎的研究", 東京工業大學博士學位論文

Analysis of Residual Stress of Ceramic/Metal Joint

Young Chul Park*, Sun Chul Hue*, and Kwang Young Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

** Industrial Machinery Lab, KIMM

Key Words : Ceramic/Metal Joint(세라믹/금속 접합),
Residual Stress(잔류응력),
Elastoplastic Analysis(탄소성 해석),
X-ray Stress Measurement(X선 응력측정)

Abstract The two-dimensional elastoplastic analysis was performed to reveal a detail residual stress distribution of ceramic/metal joint specimen using finite element method and X-ray method. The highest tensile residual stress, σ_x perpendicular to the interface appeared at the edge of the ceramic near the interface. In the vicinity of the interface, the high stress concentration occurs and residual stress distributes three-dimensionally. Therefore, the measured stress distribution differed remarkably from the result of the two-dimensional finite-element analysis. Especially at the center of the specimen near the interface, the residual stress, σ_x obtained from the finite element analysis was compressive, whereas X-ray measurement yielded tensile σ_x . Therefore, it is also attempted to investigate the finite element model for the prediction of residual stress σ_x distributed nearby the interface of joint.

(Received : December 28, 1993)