

〈論 文〉

Si₃N₄/SUS304 접합재의 잔류응력 및 강도평가

박영철* · 오세욱* · 허선철** · 조용배**

(1993년 6월 23일 접수)

Evaluation of Strength and Residual Stress in Si₃N₄/SUS 304 Joint

Young Chul Park, Sae Wook Oh, Sun Chul Hue and Yong Bae Cho

Key Words : Si₃N₄/SUS304 Joint(질화규소/스테인레스 접합재), Residual Stress Distribution(잔류응력분포), X-Ray Stress Measurement(X선 응력측정), Elastoplastic Analysis(탄소성해석), Finite Element Method(유한요소법), Fracture Strength(파단강도)

Abstract

The measurement of residual stress distribution of Si₃N₄/SUS304 joint was performed on 23 specimens with the same joint condition using PSPC type X-ray stress measurement system and the two-dimensional elastoplastic analysis using finite element method was also attempted. As results, residual stress distribution near the interface on the ceramic side of the joint was revealed quantitatively. Residual stress on the ceramic side of the joint was turned out to be tensional near the interface, maximum along the edge, varying in accordance with the condition of the joint and variance to be most conspicuous for the residual stress normal to the interface characterized by the stress singularities. 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 measurement using X-ray yielded tensile σ_x . Here we discuss two dimensional superposition model the discrepancy between the results from the two dimensional finite element analysis and X-ray measurement.

1. 서 론

최근 가스터빈, 터보과급기 등 경량, 고강도 및 내열성 등이 함께 요구되어지는 구조물에 대하여 금속재료를 대신하여 세라믹재료의 적용이 활발히 검토되어지고 있다. 그러나 세라믹재료는 경량, 내마모성, 고내열성 등 우수한 특성을 지니고 있는 반면

면에 대단히 취약하다는 치명적인 결점을 갖고 있어 일반 구조용 재료로서의 활용은 대단히 어렵다.

세라믹/금속접합재는 이와 같은 세라믹재료와 금속재료의 단점을 보완하고 장점은 살려 구조용 재료로서의 적용을 확대하는 수단으로써 개발된 유망한 재료이다.

그러나 세라믹과 금속의 접합재는 고온에서 접합되어지기 때문에, 냉각시에 양 재료의 열팽창계수의 현저한 차이에 의하여 접합열 잔류응력이 발생되며,^(1,2) 특히 이와 같은 접합잔류응력은 세라믹측

*정회원, 동아대학교 기계공학과

**동아대학교 기계공학과 대학원

에서 인장잔류응력이 발생되어 접합재의 파괴강도를 크게 저하시킨다. 따라서 이와 같은 잔류응력을 되도록이면 완화시키는 방법에 대한 연구가 세라믹/금속접합재의 실용화에 있어서 필수적이며, 이를 위하여 잔류응력의 정량적인 평가에 대한 연구가 절대적으로 필요하다.

세라믹/금속접합재의 잔류응력평가에 관한 연구는 X선에 의한 실험적 연구^(3,4)와 유한요소법^(5,6)에 의한 수치해석 등의 양면에서 검토되고 있다.

유한요소법에 의한 잔류응력해석은 간단히 수행될 수 있으므로 대단히 효율적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 실제 접합재의 접합상태나 잔류응력에 영향을 미치는 인자는 대단히 복잡하므로, 유한요소법에 의하여 계산된 잔류응력이 실제의 잔류응력과 반드시 일치한다고는 할 수 없다. 따라서 접합재의 잔류응력을 정확히 파악하기 위해서는 직접 측정하는 것이 가장 바람직하다.

X선 응력측정법은 재료 표면의 국소 잔류응력을 비파괴적으로 측정할 수 있으므로, 접합재의 계면 근방에 발생하는 불균일한 잔류응력분포의 측정에 있어서 최적의 방법이므로 이를 이용한 연구가 시도되고 있다. 그러나, 접합계면 근방의 명확한 분포나 각 접합재의 접합잔류응력의 변동 등 접합재 계면근방의 잔류응력해석에 있어서는 아직 해결되지 못한 문제점이 대단히 많다고 할 수 있다.

본 연구에서는 세라믹/금속접합재의 강도평가에 가장 문제가 되고 있는 접합잔류응력 평가방법을 확립하기 위하여 PSPC형 X선 측정장치를 이용하여 접합계면 근방에 있어서의 접합잔류응력분포를 명확히 밝혀내고자 한다. 또한, 유한요소해석을 병행하여 X선 실측결과와 비교 검토함으로써 세라믹/금속접합재의 계면근방의 잔류응력을 보다 간편하고 정확하게 평가할 수 있는 접합잔류응력 간이 평가법에 대하여서도 검토하였다.

뿐만 아니라, 동일조건에서 접합한 단수의 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS304}$ 접합재의 시험편들을 이용하여 각 접합시편에 있어서의 잔류응력의 변동특성과 함께, 강도 시험을 실시하여 잔류응력이 접합재의 강도에 미치는 영향 및 파괴기구에 대하여서도 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편과 접합방법

접합재 시험편은 상압소결 질화규소(Si_3N_4)와 오

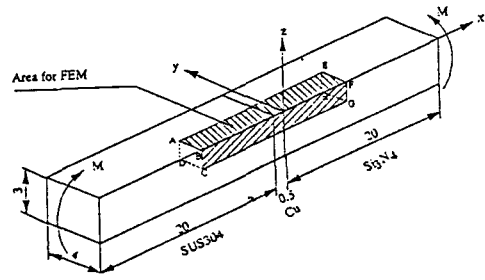


Fig. 1 Configuration of specimen

Table 1 Material properties

	Si_3N_4	Cu	SUS304
E(GPa)	304	108	193
ν	0.27	0.33	0.3
$\alpha(\text{K})$	3.0×10^6	17.7×10^6	6.5×10^6

Table 2 Condition of jointing

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

스테나이트계 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 랩핑가공 후 1000°C 의 대기중에서 24 hr 소둔처리를 실시하였으며, 스테인레스강은 연삭가공 후 900°C 의 대기중에서 1 hr 소둔처리를 실시한 후 접합하였다. 접합시 열팽창계수의 차이에 의하여 발생하는 잔류응력을 완화시키기 위하여 두께 0.5 mm의 동판을 중간층으로 사용하였다. 접합방법은 비교적 높은 강도와 신뢰성을 얻을 수 있는 활성금속법을 이용하였으며, 접합조건은 Table 2와 같다.

2.2 X선 잔류응력 측정

잔류응력 측정영역은 Fig. 1과 같이 시험편표면 세라믹부의 단부 근방($y=0.5$ mm)의 x 방향과 중

Table 3 Conditions for X-ray stress measurement

System	PSPC/RSF system(Rigaku)
Characteristic X-ray	Cu-K α
Diffraction planes	β -Si ₃ N ₄ (323)
Filter	Ni filter
Tube voltage	35 kV
Tube current	40 mA
Collimeter	ϕ 0.5 mm
Method	Sin ² ϕ iso-inclination method
Incident angle	$\phi=0, 15, 25, 35, 40, 45^\circ$
Fixed time	300 sec/1 ϕ
Stress constant	-806.5 MPa/deg
Peak position	Parabola peak top method

양선상($y=2$ mm)의 x 방향 그리고 계면근방($x=0.5$ mm)의 y 방향의 3영역에 대하여 계면수직방향 잔류응력(σ_x)과 계면 평행방향잔류응력(σ_y)을 각각 측정하였다. 측정에는 PSPC 미소부응력 측정장치를 이용하여 Table 3의 측정조건으로 23개의 시험편에 대하여 실시하였다.

2.3 4점 굽힘시험

강도시험은 4점 굽힘시험을 시행하였으며(외부 Span $L=30$ mm, 내부 Span $l=10$ mm), 접합부가 중앙에 위치하도록 하였다.⁽⁷⁾ Cross head속도는 0.5 mm/min으로 조절하였으며, 최대하중 P_{max} 로부터 식(1)에 의하여 굽힘강도 σ_b 를 산출하였다.

$$\sigma_b = 3P_{max}(L-l)/2wt^2 \quad (1)$$

단, w 와 t 는 시험편의 폭과 두께이다.

3. 유한요소해석 방법

유한요소해석에는 범용구조해석 프로그램 MARC

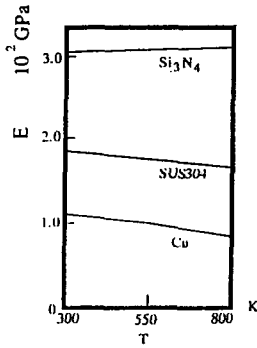
를 이용하여 2차원 탄소성 유한요소응력해석을 하였다. 세라믹과 금속의 접합은 고온(약 1100°C)에서 행하여지나, 고온에서는 브레이징재가 액체이므로 강도를 갖지 않기 때문에 금속과 세라믹 둘다 자유로이 열변형하여 응력을 발생하지 않는다. 그러나 냉각이 진행되어 브레이징재가 강도를 갖기 시작하면 열팽창계수가 다른 세라믹과 금속이 접합면에서 열변형을 서로 구속하게 되므로 응력이 발생된다. 따라서 본 연구에서는 냉각과정에서 브레이징재가 응고하여 강도를 갖기 시작하는 온도를 800 K로 하고, 이 온도로부터 실온(300 K)까지 서서히 냉각할 경우에 발생하는 잔류응력에 대하여 2차원 탄소성 해석을 하였다. 이때, 계산에 이용한 온도하강스텝(step)은 10°C로 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 소성변형과 응력의 관계는 변형률 증분이론을, 항복조건으로는 Von Mises 항복조건을 사용하였다. 잔류응력은 계면으로부터 약 10 mm 이상 떨어진 영역에서는 계면의 영향이 거의 나타나지 않아 잔류응력이 0에 가까우므로 해석은 Fig. 1의 빗금친 계면근방의 표면 ABFE, 측면 BCGF 그리고 중앙 종단면 ADHE를 해석영역으로 하였다. 표면 ABFE와 측면 BCGF는 면의 수직방향응력이 0이므로 평면응력해석을 하였고, 종단면 ADHE는 면의 수직방향 변형률이 0이기 때문에 평면변형률 해석을 하였다.

Fig. 2는 요소분할을 나타낸다. 응력이 집중되는 접합계면과 단부근방의 요소는 보다 잘게 분할하였다. 요소는 8절점 등방계수요소(isoparametric element)를 이용하였으며, 총요소수 540개, 총절점수 1749개, 최소요소 x, y 방향의 크기는 0.01858 mm, 0.02865 mm 이다. 경계조건은 대칭조건을 고려하였으며, 강제운동만 방지하도록 하고, 이외의 변형

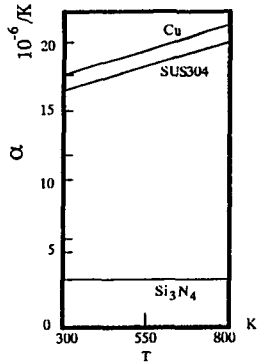


Fig. 2 Mesh Model used in FEM

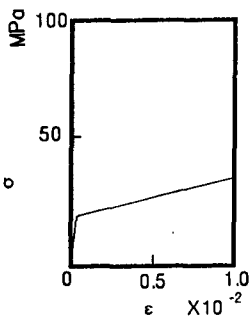
은 자유로이 하였다. 각 재료의 종탄성계수와 열팽창계수의 온도의존성 그리고 동의 항복특성은 각각 Fig. 3(a), (b), (c)와 같다. ^(8,9,10) 단, Fig. 3(c)의 동의 항복특성은 온도의존성을 표시하나, 접합잔류응력이 동 의 실온에서의 항복강도에 좌우되기 때문에 해석에는 실온의 항복특성을 그대로 이용하여 계산하였다.



(a) Young's modulus



(b) Thermal expansion coefficient



(c) Yield strength for Cu

Fig. 3 Dependence of temperature of mechanical properties

4. 실험결과 및 고찰

4.1 X선 잔류응력 측정결과

Fig. 4는 단부근방($y=0.5\text{ mm}$)의 x 방향에 있어서 계면수직방향 잔류응력(σ_x) 분포를 측정된 결과를 나타낸다. 그림에는 전 데이터(23개)의 평균값과 변동범위(최대, 최소치)를 표시하였다. 단부 근방에서의 σ_x 분포는 그림에서 보는 바와 같이 접합 계면근방에서 최대 인장응력값을 나타내나, 계면근방에서는 응력구배가 대단히 크기 때문에 계면에서 멀어짐에 따라 급격히 감소하여, 계면으로부터 약 2.5 mm 떨어진 영역에서 압축잔류응력으로 반전한 후, 계면으로부터 약 4 mm 떨어진 영역에서 최대 압축 잔류응력을 나타낸다. 그 후 잔류응력은 다시 증가하여 계면에서 약 5 mm 부근에서 압축잔류응력에서 인장잔류응력으로 변하고, 그 후 잔류응력은 거의 변화없이 0에 가까운 값을 나타낸다. 한편 σ_x 의 변동범위는 잔류응력이 인장값을 나타내는 $x \leq 2.5$ 영역에서는 대체로 큰 값을 나타내며, 그 변동폭은 계면에 가까울수록 현저하게 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4의 변동범위를 표준편차로 정리한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 결과를 Fig. 4와 비교해보면, 계면근방의 변동폭이 극단적으로 감소한 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 접합불량(미접합부 존재)으로 인하여 극히 낮은 σ_x 를 나타내는 소수의 시험편(2개)의 결과가 Fig. 4의 계면근방의 변동폭에는 직접적으로 영향을 미치는 반면에, Fig. 5의 표준편차에는 크게 영향을 미치지 않았기 때문이라고 생각되어진다.

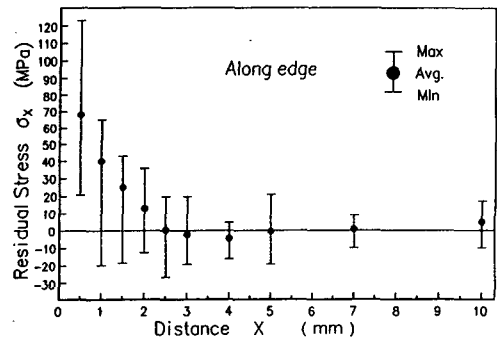


Fig. 4 The variation of residual stress σ_x along the edge of the specimen(X-axis)

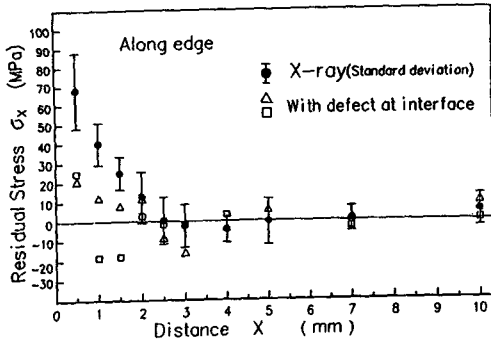


Fig. 5 The standard deviation of residual stress along the edge of the specimen(X-axis)

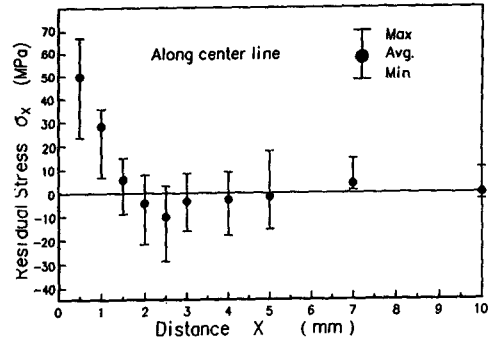


Fig. 6 The variation of residual stress σ_x along the center line of the specimen(X-axis)

한편, 본 측정에서 X선 강도의 통계변동에 기인하는 측정오차⁽¹¹⁾의 표준편차는 8.6 MPa였다. 이와 같은 통계변동에 기인하는 측정오차를 기준으로 하여 각 영역에서의 표준편차를 비교하여 보면, 계면에서 비교적 멀리 떨어진 $x \geq 2.5$ mm의 영역에 있어서 σ_x 의 표준편차는 이 값보다 약간 크거나 거의 같지만, 계면근방의 $x \leq 2.5$ mm의 영역에 있어서 표준편차는 통계변동에 기인하는 측정오차 8.6 MPa보다 대단히 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 계면에서 멀리 떨어진 $x \geq 2.5$ mm 영역에서의 변동은 주로 X선 응력측정의 고유변동에 기인하는 편차라고 생각할 수 있으나, 변동폭이 큰 계면근방의 $x \leq 2.5$ mm 영역에서의 오차는 통계변동에 기인하는 오차보다도 응력구배가 대단히 큰 점을 감안하여 본다면 측정위치에 따른 오차와 접합상태에 기인하는 오차등이 σ_x 의 변동에 보다 더 크게 기여하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 중앙선상($y=2$ mm)에 있어서 σ_x 의 평균값과 변동범위(최대, 최소값)를 나타내며, 이를 표준편차로 정리한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 중앙선상의 σ_x 분포는 단부에서의 잔류응력분포와 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 즉, σ_x 는 계면근방에서 최대 인장응력을 나타내며, 계면에서부터 멀어짐에 따라 감소하여, $x=2.5$ mm 근방에서 최소 압축응력값을 나타낸 후 서서히 0에 접근하고 있다. 그러나, 잔류응력구배는 단부가 중앙부보다 다소 완만하다는 것을 알 수 있을 뿐만 아니라, 중앙부와 단부에서의 σ_x 의 최대값을 비교하여 보면, 단부에서 중앙부보다도 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 또한 σ_x 의 변동폭도 중앙부보다도 단부근방의 변동폭이 더욱 크다는 것

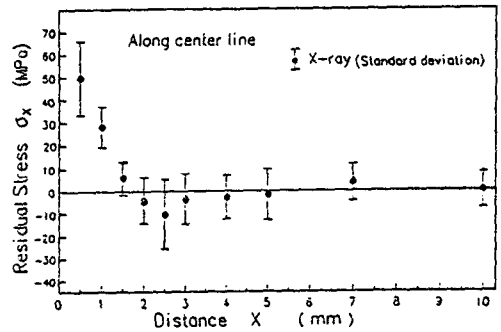


Fig. 7 The standard deviation of residual stress along the center line of the specimen(X-axis)

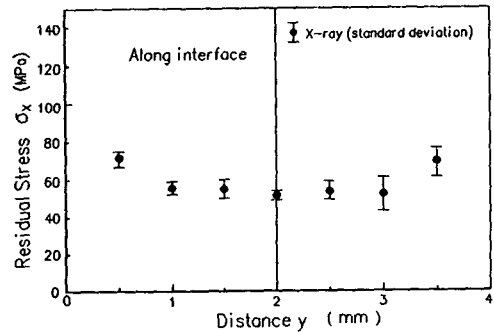


Fig. 8 Distribution of σ_x at the interface along the Y axis

을 알 수 있다. 이와 같이 단부와 중앙부의 잔류응력값이 차이를 나타내는 원인에 대하여서는 다음에 설명하는 2차원 중첩모델해석 결과에서 명확히 밝혔다.

Fig. 8은 계면근방($x=0.5$ mm)의 y 방향에서의 σ_x 분포를 측정된 결과를 나타낸다. 잔류응력 측정

은 전 시험편(23개)에 대하여 실시하지 않고, 앞의 σ_x 측정결과(Fig. 3, 5)에서 계면근방($x \leq 0.5$ mm)에서의 σ_x 가 전체의 평균값과 거의 일치하는 시험편 4개를 선정하여 평가하였다. 이와 같이 평균값에 거의 일치하는 시험편을 선택하여 잔류응력을 측정하였으므로, σ_x 의 변동폭은 대단히 작게 나타났다. 한편, σ_x 의 분포는 그림에서 보는 바와 같이 양단부에서 최대 인장잔류응력을 나타낸 후 중앙부로 갈수록 점차 감소됨을 알 수 있다. 또한, 그 분포형상은 중앙선에 대하여 거의 대칭이었다. 이상의 측정결과로부터, 세라믹 금속접합체의 강도를 크게 저하시키는 인장잔류응력은 계면에 가까울수록, 중앙부 보다 단부에서 크게 발생된다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 대단히 큰 응력집중을 나타내는 접합계면근방의 국소 영역($x \leq 0.5$ mm 영역)의 잔류응력분포를 보다 세밀하게 측정하여 보았다. 이는 계면의 응력특이상의 해석에 크게 기여될 것으로 판단된다.

Fig. 9는 시험편단부의 접합계면근방의 국소영역($x=0.5$ mm)의 σ_x 를 측정한 결과이다. 국소 영역의 σ_x 의 측정을 위하여, 0.15 mm의 collimeter를 사용하였으며, 조사시간은 3000초로 하였다. σ_x 의 분포는 계면근방 국소 영역에서도 역시 계면에 가까워짐에 따라 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 계면에 극히 가까운 영역인 $x=0.2$ mm에서의 잔류응력은 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 계면에 극히 가까운 $x=0.2$ mm 영역에서 잔류응력이 증가하지 않고 오히려 감소하는 것은 실제로 계면근방에서 잔류응력이 감소하는 것이 아니라, X선 측정방법의 잘못으로 나타나는 결과라고 생각되어진다. 즉, 이와 같은 결과는 $x=0.2$ mm 영역에서의 X선 측정강도가 다른 부분의 측정강도에 비하여 대단히 저하하였다는 것과 측정시 0.15 mm의 collimeter로 사용하였다는 두가지 점을 고려하여 고찰하여 본다면, 실제 X선 측정시 조사영역내에 계면이 약간 포함됨으로 인하여 이에 따른 측정오차가 발생한 것으로 생각되어진다. 따라서, 보다 미소의 collimeter의 사용 등 X선 측정방법의 개선을 통하여 정확히 측정한다면, 계면근방 국소 영역에서도 잔류응력이 저하하지 않고 계속적으로 증가할 것으로 생각되며, 이에 관한 보다 충실한 연구가 앞으로 필요하다고 생각되어진다.

Fig. 10은 중앙선상($y=2$ mm)의 x 방향에 있어서 계면평행 잔류응력(σ_y)을 측정한 결과이다. σ_y 도

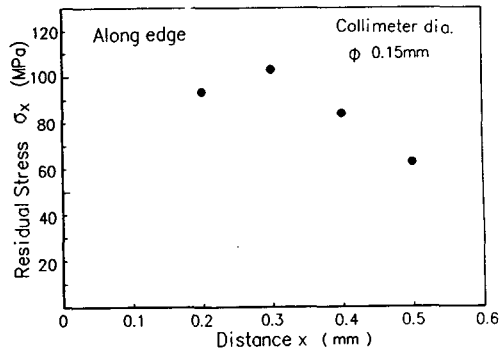


Fig. 9 Distribution of residual stress σ_x in local area near interface

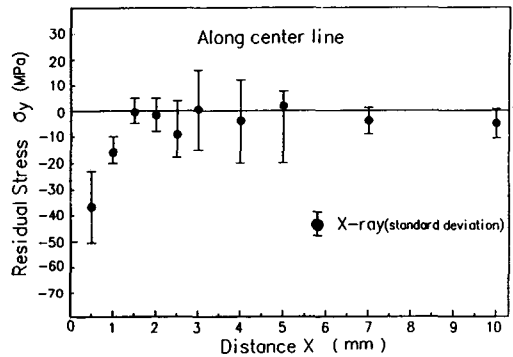


Fig. 10 Distribution of σ_y along the line (x-axis)

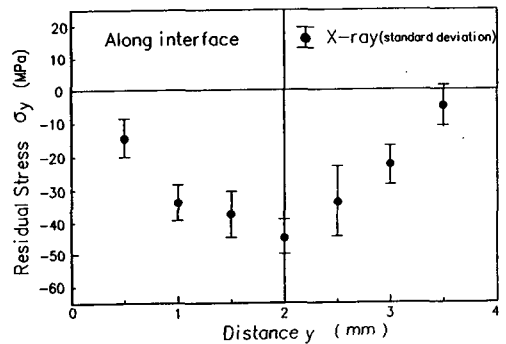


Fig. 11 Distribution of σ_y at the interface along Y axis

σ_x 와 같이 계면근방에서 응력이 집중되어 최대압축 잔류응력을 나타내나 계면에서 멀어짐에 따라 급격히 감소하여 계면으로부터 약 1.5 mm 떨어진 위치부터는 거의 변화없이 0에 가까운 값을 나타내었다.

Fig. 11은 계면근방($x=0.5$ mm)의 y 방향에서 σ_y 의 분포를 나타낸다. σ_y 는 중앙선에 대하여 거의

대칭형상이며, 중앙부 근방에서는 최대 압축응력을 나타내나, 자유표면인 단부에 가까워질수록 서서히 감소하여 0에 가까운 낮은 압축잔류응력을 나타내었다.

이상의 측정결과로부터 접합잔류응력은 접합계면 근방에 극히 집중되며 특히 접합재의 파단강도를 크게 저하시키는 계면수직방향의 인장잔류응력(σ_x)은 계면에서 최대 인장잔류응력을 나타내며 그 최대값은 중앙부보다 단부에서 크게 발생된다는 것을 알 수 있었다. 또한 계면평행방향의 잔류응력(σ_y)은 계면에서 최대 압축잔류응력을 나타내며 그 최대값은 중앙부에서 발생된다는 것을 알 수 있었다.

4.2 유한요소해석 결과

Fig. 12는 X선응력측정법에 의하여 측정된 영역인 시험편 표면 ABFE의 단부근방($y=0.014$ mm)과 중앙선상($y=2$ mm)에 대하여 2차원 유한요소법에 의하여 계산한 계면 수직방향잔류응력(σ_x) 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 세라믹부의 잔류응력과 스테인레스부의 잔류응력은 시험편의 중심에 대하여 거의 점대칭으로 분포되어 있다.

또한, 잔류응력분포는 중앙선상에서는 세라믹부가 압축잔류응력을 나타내나, 스테인레스부는 인장잔류응력이 발생되어 시험편 전체는 인장잔류응력과 압축잔류응력이 연속적으로 완만하게 분포하고 있다. 이에 반하여, 단부근방의 잔류응력분포는 스테인레스부에서는 압축잔류응력이, 세라믹부에서는 인장잔류응력이 발생되며, 계면을 경계로 불연속적으로 분포되어짐을 알 수 있다.

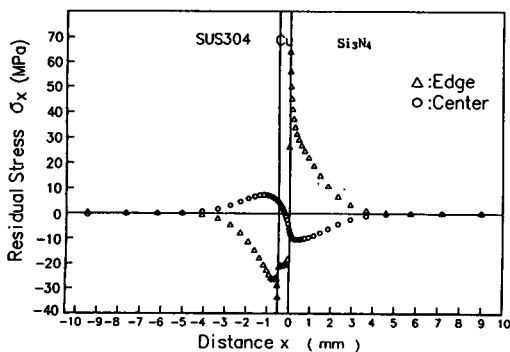


Fig. 12 Distribution of residual stress σ_x on Si₃N₄/SUS304 joint specimen

한편, 이와 같은 2차원 평면응력 해석결과를 앞의 X선 잔류응력 측정결과와 비교하여 보면 서로 전혀 다른 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히, 중앙선상에 있어서 σ_x 의 분포는 서로 정반대의 결과를 나타내고 있다. 즉, 중앙선상에 있어서의 σ_x 의 분포에 대한 평면응력 해석결과는 접합계면근방에서 최대 압축잔류응력을 나타낸 후 서서히 감소하여 계면에서 약 5 mm 떨어진 위치부터는 잔류응력값이 거의 변화없이 0에 가까운 값을 나타내고 있는데 반하여, X선 잔류응력 측정결과는 접합계면에서 최대 인장잔류응력을 나타낸 후 계면에서 멀어짐에 따라서 급격히 감소하여, 압축잔류응력의 피크(peak)를 나타낸 후 다시 증가하여, 계면에서 약 5 mm 떨어진 위치에서 잔류응력이 거의 0이 된다.

이와 같이 2차원 유한요소 해석결과와 X선 잔류응력 측정결과가 계면에서 멀리 떨어진 영역에서는 잘 일치되나, 접합계면근방에서는 인장과 압축의 서로 정반대의 결과를 나타내는 원인으로서의 계면 근방에서는 커다란 응력집중에 의하여 잔류응력이 실제로 3차원으로 분포하고 있으나, 2차원 평면응력해석에서는 시험편 두께방향(z 방향)의 수축을 전혀 고려하지 않았기 때문이라고 생각되어진다. 따라서 σ_x 를 정도높게 해석하기 위해서는 시험편의 두께방향의 수축도 고려된 3차원 탄소성해석을 할 필요가 있다. 그러나, 3차원 탄소성해석은 요소수가 크게 늘어나므로 막대한 해석시간이 필요하게 되어 적용상 많은 문제점이 있기 때문에 광범위한 감도해석 등 실제로 결과값에 오차가 발생하더라도 2차원 해석을 많이 이용하고 있다. 이와 같은 문제점을 보완하는 수단으로 3차원 상태에 보다 근접하게 평가할 수 있는 2차원 해석의 간이평가수법에 대한 연구가 필요하다고 생각되어지며, 따라서 본 연구에서는 佐藤 등⁽¹²⁾이 제안한 2차원 중첩모델을 이용하여 접합잔류응력 σ_x 의 간이평가수법에 대하여 검토하여 보았다.

Fig. 13, 14는 세라믹부의 중앙선상과 단부근방 x 방향의 σ_x 분포를 2차원 중첩모델에 의하여 해석한 결과이다. 본 연구에서 이용한 2차원 중첩모델은 Fig. 1에서 표시한 바와같이, 중앙선상(AE선상)의 x 방향 σ_x 의 분포는 표면 ABFE의 평면응력해석에 의한 중앙선상(AE선상)의 σ_x 결과와 중단면 ADHE의 평면변형률해석에 의한 AE선상의 σ_x 와의 결과를 중첩하여 평가하였으며, 단부근방 BF선상의 σ_x .

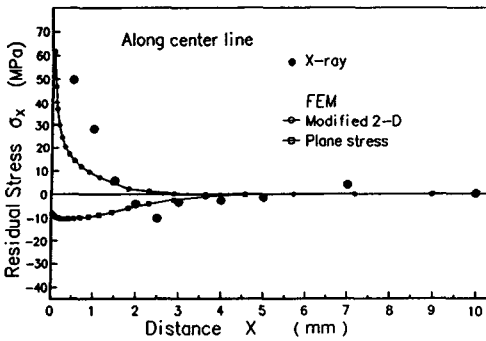


Fig. 13 Distribution of σ_x along center line of the specimen obtained by modified two-dimension FE analysis

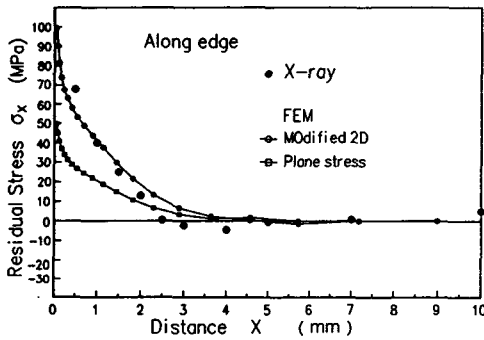


Fig. 14 Distribution of σ_x along edge line of the specimen obtained by modified two-dimension FE analysis

해석은 표면 ABFE의 평면응력해석에 의한 단부근방(BF선상)의 σ_x 의 결과와 측면 BCGF의 평면응력해석에 의한 단부근방(BF선상)의 σ_x 의 결과를 중첩하여 평가하였다.

중앙선상 σ_x 분포는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 2차원 평면해석결과가 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.

한편, 단부근방의 σ_x 의 분포는 Fig. 14에서 알 수 있는 바와 같이, 2차원 평면응력 해석결과는 X선 실측결과에 비하여 대단히 작은 값을 나타내며 특히, 계면근방에서의 인장잔류응력값은 그 차이가 현저함을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 결과는 앞

의 중앙선상의 결과에 비하여 보면 그 차이가 대단히 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 시험편 중심부에 있어서 계면근방의 잔류응력분포가 3차원 응력분포를 하고있는데 반하여, 단부에서는 σ_y 가 이론상으로 0이 되므로 잔류응력은 2차원에 가까운 상태로 되기 때문에 그 차이가 크게 줄어드는 것으로 생각되어진다. 또한 2차원 중첩모델해석 결과는 실측결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, X선에 의한 실측값은 $y=0.5\text{ mm}$ 위치에서 측정된 결과인데 반하여, 해석값은 $y=0.014\text{ mm}$ 위치에서 해석한 결과이므로 실제로 X선측정위치인 $y=0.5\text{ mm}$ 위치에서의 2차원 중첩모델해석에 의한 σ_x 가 이보다 훨씬 작은 값으로 해석되어질 것을 감안한다면, 2차원 중첩모델해석 결과는 실제의 잔류응력을 다소 과소평가하고 있다고 할 수 있다.

또한, 앞의 X선 측정결과에서도 언급한 바 있는 계면근방의 최대 인장잔류응력값이 단부에서가 중앙부보다 훨씬 높은 인장잔류응력값을 나타내는 이유는 이와 같은 2차원 중첩모델해석 결과로 명확히 설명할 수 있다. 즉, 단부의 경우에는 표면 ABFE의 BF선상의 인장잔류응력과 측면 BCGF의 BF선상에서 발생하는 인장잔류응력이 중첩되는데 반하여, 중앙부에서는 종단면 ADHE의 AE선상에서는 인장응력이 발생되나, 표면 ABFE의 AE선상에서는 압축응력이 발생되므로 당연히 단부의 접합계면근방 부근의 최대 인장잔류응력값 보다 낮아지게 된다. 뿐만 아니라, 중앙선상의 σ_x 의 측정결과가 접합계면근방에서는 인장잔류응력을 나타내나, 계면에서 조금 떨어진 위치에서 비교적 큰 압축응력값을 나타내는 것은 바로 평면응력해석의 표면 ABFE의 중앙선상에는 발생하는 압축잔류응력의 기여 때문이라고 할 수 있다.

이상의 결과로부터 3차원 분포를 하고 있는 계면근방의 접합잔류응력 σ_x 는 2차원 평면응력해석과 평면변형률 해석결과의 적절한 중첩방법에 의하여 근사적으로 평가할 수 있다는 것을 알았다. 그러나, 이와 같은 중첩방법은 탄성문제에서만 유효하므로, 엄밀하게 말하면 탄소성문제에는 적용할 수 없다. 그러나 본 연구에서 소성변형하는 것은 중간재 부분으로 검토영역인 세라믹부는 실제로 거의 탄성거동을 하고 있기 때문에 세라믹부 잔류응력의 기본적 특성은 탄성의 경우와 크게 다르지 않을 것이므로 중첩법을 적용하여도 문제가 되지 않을 것으로 생각되어진다. 뿐만 아니라 접합재의 잔류응

력해석에 있어서 중간층과 브레이징재의 구성방정식의 온도 의존성, 브레이징재의 두께분포, 시험편 각각의 접합상태 등이 아직 명확히 밝혀져 있지 않은 상태에서는 3차원 탄소성해석을 행하여도 정량적으로는 문제가 있다는 점을 고려하여 보면, 이와 같은 2차원 중첩모델에 의한 해석방법은 간편하게 3차원응력분포를 추정할 수 있는 대단히 유효한 수법으로 생각되어 지며, 특히 잔류응력의 감도해석 등 정성적평가 등에 유효하게 사용되어질 것으로 기대된다.

Fig. 15는 세라믹부의 중앙선상($y=2\text{ mm}$)에 있어서 x 방향의 계면평행방향 잔류응력(σ_y)을 평면응력해석한 결과이다. σ_y 의 2차원 응력해석 결과를 X선 응력측정결과와 비교하여 보면 앞에서 설명한 σ_x 의 결과와는 달리, 전체적으로 거의 같은 분포를 하여 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터, σ_y 는 근사적으로 2차원 분포를 하고 있다는 것을 알 수 있으며, 따라서 두께방향의 수축을 고려한 3차원 해석을 할 필요가 없다. 실제로, σ_x 에 대하여 2차원 중첩모델해석을 하여도 평면응력해석결과와 차이가 전혀 없었다. 왜냐하면, 접합계면근방에서 시험편 폭방향(σ_y)의 분포는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 중앙부에서는 최대 압축잔류응력을 표시하나 자유표면인 단부에서는 0이 된다. 따라서, 중앙선상의 σ_y 에 대한 2차원중첩모델해석시, 표면 ABFE의 중앙선상의 σ_y 값에 중첩되어지는 중앙중단면 ABHE의 단부에 있어서 σ_y 값이 항상 0이므로 앞의 표면 ABFE의 중앙선상이 해석결과와 차이가 전혀 없었다.

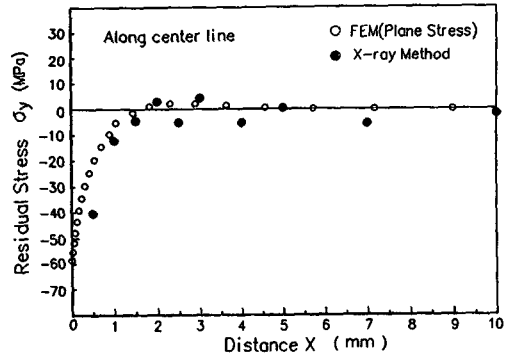


Fig. 15 Distribution of σ_x along the center line of the specimen(x-axis)

이상과 같이 세라믹/금속접합재의 접합계면근방의 잔류응력분포에 대하여 검토하여 본 결과, 계면평행방향 잔류응력(σ_y)은 근사적인 2차원 분포를 하고 있으므로 2차원 평면응력해석으로 정도 높게 해석할 수 있으나, 파단강도에 크게 영향을 미치는 계면수직방향 잔류응력(σ_x)은 3차원분포를 하고 있으므로 2차원 평면응력해석으로는 정도 높게 해석할 수 없다는 것을 알았다.

4.3 접합재의 파괴기구 및 강도평가

접합재의 파단강도를 검토하기 위하여 σ_x 가 평균값과 같은 3개의 시험편과, 평균값보다 높은 3개의 시험편 그리고 평균값보다 극히 낮은 2개 시험편등 모두 8개의 시험편에 대하여 4점 굽힘시험을 하여 Table 4와 같은 결과를 얻었다.

Table 4 The result of bending test

No	Fracture strength (MPa)	Fracture load (N)	Maximum displacement(mm)	Residual stress (MPa)
1	412.8	497.3	0.19	67.77
2	403.8	486.5	0.20	67.6
3	380.3	458.2	0.17	92.3
4	359.8	431.9	0.22	73.49
5	355.9	428.7	0.19	102.2
6	353.7	424.6	0.20	80.8
7	140.3	169.0	0.08	29.3
8	136.9	164.9	0.11	20.2

표에서 알 수 있는 바와 같이, 본 연구의 시험편 8개중 접합상태가 양호한 6개의 시험편의 파단강도는 300~415 MPa로 대체로 근사한 파단강도를 나타내고 있으나 접합불량으로 접합계면에 미접합부가 존재하는 두개의 시험편(No. 7, 8)의 파단강도는 140.3, 136.9 MPa로 대단히 낮은 파단강도를 나타내었다. 따라서 이와 같은 접합불량은 접합재의 파단강도에 치명적인 악영향을 미치므로, 보다 신뢰성높은 고강도 접합재의 실용화를 위하여서는 접합불량을 방지할 수 있는 제조기술 및 품질관리 기술의 개발이 절대적으로 필요하다는 것을 알았다.

또한, 이와 같은 건전한 6개 시험편의 평균파단강도는 약 380 MPa로, 세라믹 및 세라믹/접합재의 파단강도와 비교하여 보면, 세라믹의 파단강도보다는 약 500 MPa, 세라믹/금속접합재의 파단강도 보다도 약 250 MPa 정도가 저하되었음을 알 수 있다.⁽¹³⁾ 이와 같이 세라믹에 비하여 세라믹/금속접합재의 파단강도가 저하되는 원인은 이종접합에 의한 양재료의 탄성계수의 차이에 기인하는 접합계면에서의 응력집중현상과 앞에서 평가한 접합계면 부근에서 발생하는 접합잔류응력이 주요 원인이라고 생각된다.

Fig. 16은 접합재의 금속측 파단면 사진을 나타낸다. 극히 낮은 파단강도를 나타내는 시험편(No. 7, 8)의 파단면은 그림 (a)에서 보는 바와 같이 미접합부가 인장응력이 부하된 시험편 하부표면 부근에서 내부까지 대단히 큰 영역에 걸쳐 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 접합불량으로 인하여 접합계면에 미접합부가 존재하면 접합단면적의 감소와 함께 미접합부가 계면균열로 작용함으로써 접합강도는 크게 저하 되어진다.

한편, 접합상태가 양호한 시험편의 파단면은 그

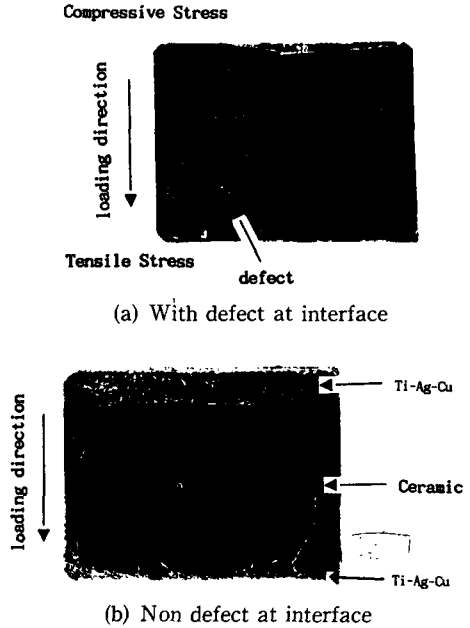


Fig. 16 Photograph of fracture surface for stainless steel side

림 (b)에서 보는 바와 같이 인장응력이 부하되는 시험편하부 표면에 가까운 부근과 압축응력이 부하되는 시험편 상부표면부근은 세라믹과 동사이의 접합계면에서 파괴되어졌으나, 내부에서는 세라믹에서 파괴되어졌음을 관찰할 수 있다. 특히 파괴기점은 최대 인장잔류응력이 발생하는 시험편 단부임을 알 수 있다. 이와 같은 파면관찰결과를 토대로 하여 접합재의 파괴기구를 모델화하면 Fig. 17과 같다. Fig. 17(a)에서 보는 바와 같이 금속/세라믹 접합재의 파괴는 균열이 시험편 하부표면상의 인장 잔류응력이 최대로 발생하는 세라믹측의 접합계면을 기점으로 하여 발생하여 계면을 따라 조금 안정

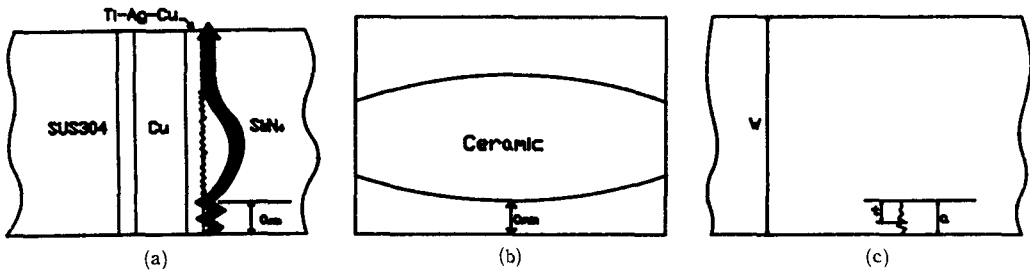


Fig. 17 Model of fracture mechanism

성장하다가 세라믹 내부로 진입한다. 그후, 균열은 세라믹 내부를 진전하다가 최종 파괴에 이르러서는 계면으로 다시 되돌아와 계면에서 파괴된다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 세라믹/금속접합체의 파괴는 세라믹측 접합계면을 기점으로하여 발생하나, 결국 불안정 파괴는 세라믹부에서 시작되어 대부분의 파괴과정이 세라믹부에서 진전되어 일어나므로 접합체의 파단강도에 직접 영향을 미치는 것은 금속부의 물성이 아니라 바로 세라믹부의 물성이라는 것을 알 수 있다. 따라서, 세라믹/금속접합체 강도에 대한 정확한 평가는 접합강도에 영향을 미치는 주요인자는 접합계면의 응력집중 정도 및 접합잔류응력 등에 대한 정량적인 평가는 물론 접합하는 세라믹부의 정확한 강도평가도 필수적이라 할 수 있다.

5. 결 론

세라믹/금속접합체의 접합잔류응력 분포 및 평가 방법을 확립하기 위하여 동을 중간재로 하는 Si₃N₄/SUS304 접합체의 접합계면근방의 잔류응력에 대하여 PSPC형 X선 응력측정장치 및 유한요소해석에 의한 접합계면근방의 잔류응력분포와 파괴기구에 대하여 검토 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 계면수직 잔류응력(σ_x)은 접합계면근방에서는 인장잔류응력으로 발생되고 그 최대값은 시험편 단부에서 발생되었다.

(2) 시험편의 접합잔류응력은 접합상태에 의존하여 변동하며, 변동범위는 응력특이성을 가지는 시험편 단부와 계면근방의 계면수직잔류응력(σ_x)이 가장 크게 나타났다.

(3) 접합계면 근방에서의 σ_x 는 3차원 응력상태로 분포되어 있기 때문에 2차원 유한요소 해석결과는 전혀 다른 값을 가진다는 것을 알았다. 특히, 시험편 중앙부의 계면근방에 σ_x 는 X선실측에 의하면 인장잔류응력이 발생되나, 2차원 유한요소 해석결과로는 압축잔류응력이 계산되어 짐을 알았다.

(4) σ_y 는 σ_x 와는 달리 접합계면근방에서도 근사적인 2차원 응력상태로 분포하기 때문에 2차원 유한요소해석으로써 근사하게 응력분포상태를 계산할 수 있었다.

(5) 3차원 분포를 하고 있는 접합계면근방의 σ_x 는 2차원 평면응력 해석결과와 평면변형을 해석결과를 적절하게 조합한 2차원 중첩모델에 의하여 근

사적으로 평가 가능하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 2차원 중첩모델은 σ_x 의 간이평가수법으로서 대단히 유효한 수법이라는 것을 알았다.

(6) 본 연구의 Si₃N₄/SUS304 접합체의 평균파단강도는 약 380 MPa로 세라믹(Si₃N₄)의 파단강도보다 약 500 MPa 낮은 파단강도를 나타낸다는 것을 알았다.

참고문헌

- (1) Dalgleish, 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 춘계학술대회논문집(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, "플라스마 용사법에 의한 지르코니아 코팅에서의 잔류응력에 대한 연구," *대한용접학회지*, 제7권 제4호, pp. 46~55.
- (5) 김석주, 조상명, 김영식, 1991, "세라믹과 강접합부의 열응력해석에 관한 연구," *대한기계학회 '91년도 춘계학술대회논문집*, pp. 419~422.
- (6) 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釋の基礎的検討," *日本機械學會論文集*, 57卷 540號, pp. 1801~1807.
- (7) 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.
- (8) JIS-R-1601-1981, "ファインセラミックスの曲げ強さ試験方法."
- (9) Kurita, M., 1981, "Simplified Equations for Peak Position and for it's Standard Deviation in X-ray Stress Measurement," *Journal of Testing and Evaluation*, 9-2, pp. 133~140.
- (10) 日本金屬學會編, 1984, *金屬データブック*, 丸善.
- (11) 技術資料 金屬材料の彈性係數 出版分料會, 1980, *金屬材料の彈性係數*, 日本機械學會.
- (12) *セラミックス工學特性データ*, 1969, (株)堀越研究所.

- (13) 佐藤拓哉, 1992, “セラミックス/金屬接合殘留應力に関する基礎的研究,” 東京工業大學博士學位論文.
- 1989, “セラミックス/金屬接合強度の力學的評價,” 日本機械學會論文集, 55卷 512號, pp. 750~755.
- (14) 小林英男, 荒居善雄, 中村春夫, 中村實,