

열피로시험중 질화규소 와류실에 발생하는 응력해석

김창삼 · 정덕수

한국과학기술연구원

(1996년 1월 5일 접수)

Stress Analysis of Si_3N_4 Swirl Chamber during Thermal Fatigue Test

Chang-Sam Kim and Deock-Soo Cheong

Division of Ceramics, KIST

(Received January 5, 1996)

요 약

질화규소 와류실의 신뢰성을 조사하기 위하여 열피로시험과 응력해석을 실시하였고 그 결과를 금속 와류실의 결과와 비교하였다. 열피로시험 조건은 엔진의 운전조건보다 가혹하게 하였으며, 응력해석은 유한요소법을 이용하였다. 열피로시험에서 금속 와류실에는 2.4 mm의 균열이 발생하고 변형도 일어났으나, 질화규소 와류실에는 균열과 변형이 일어나지 않았다. 응력해석에서 질화규소 와류실에 발생하는 최대 인장응력은 300 MPa이었다.

ABSTRACT

Thermal fatigue test and stress analysis of Si_3N_4 and metal swirl chamber were carried out to investigate the reliability of the swirl chambers. Conditions of the thermal fatigue test were severer than those in real engine, and FEM was used to analyze the stress distribution in the swirl chambers. Fatigue cracks of the maximum length, 2.4 mm and deformation were occurred at the corner of the jet in metal swirl chamber, but not observed in Si_3N_4 swirl chamber. Maximum tensile stress in Si_3N_4 swirl chamber calculated by FEM was 300 MPa.

Key words: Si_3N_4 swirl chamber, Thermal fatigue test, FEM, Fatigue crack, Reliability

1. 서 론

디젤엔진의 연소온도를 높이면 엔진출력을 높일 수 있고 배연입자의 발생을 감소시킬 수 있다. 그러나 연소온도가 상승하면 연소실에 가해지는 열부하가 증가하기 때문에 열부하를 직접 받는 부분의 내열성을 향상시킬 필요가 있다. 와류실은 소형 디젤엔진에서 흡입공기와 연료가 혼합되어 1차 연소되는 곳으로 엔진에서 가장 내열성이 요구되는 부분의 하나이기 때문에 내열성이 우수한 질화규소 와류실이 금속 와류실과 대체되어 많이 사용되고 있다¹⁻⁴⁾.

질화규소는 내열성, 단열성, 고온강도가 뛰어나고 열충격에 강하지만 실제로 질화규소 와류실을 디젤엔진에 사용하기 위해서는 질화규소 와류실의 신뢰성과 효과를 확인 하여야 한다. 이를 위한 방법으로는 유한요소법에 의한 응력해석, 열피로시험, 다이내모시험, 주행시험 등이 있으며, 개발 초기단계에서는 유한요소법에 의한

응력해석과 열피로시험이 주로 실시되고 있다⁵⁾.

유한요소법에 의한 응력해석은 실제 부품을 제작하지 않고 와류실 내부의 응력분포를 평가할 수 있고, 응력이 집중 되지 않게 부품의 형상을 설계할 수 있는 것이 장점이다. 그러나, 해석결과가 해석방법이나 해석조건에 따라서 크게 변하기 때문에 실제로 실험한 결과와 비교하여 분석하여야만 결과의 신뢰성을 높일 수 있다. 따라서 본 실험에서는 질화규소 와류실과 금속 와류실을 동일한 조건에서 열피로시험하고, 열피로시험중에 발생하는 응력을 유한요소법으로 해석하여 질화규소 와류실의 신뢰성을 금속 와류실과 비교하였다.

2. 실험방법

2.1. 와류실의 제작

실험에 사용한 와류실의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 와류실은 직경이 36 mm, 높이가 13 mm이며, 와류실에서

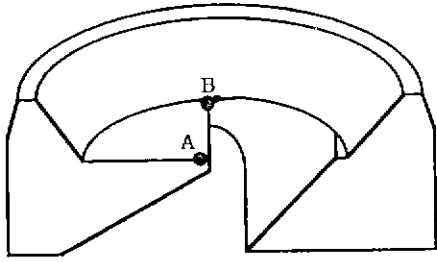


Fig. 1. Schematic drawing of a half of swirl chamber with symmetry plane: point A is center of jet and point B is corner of jet.

1차 연소한 연소가스가 2차 연소장소인 실린더 연소실로 분출되는 통로인 분출구의 중앙이 그림에서 점 A이며, 분출구의 모서리가 점 B이다.

금속 와류실은 마텐사이트계 내열강인 SUH 600 와류실을 사용하였고, 질화규소 와류실은 금속 와류실과 같은 형상인 것을 사출성형하여 탈지와 1800℃, 8기압의 질소분위기에서 가압소결, 그리고 소결체의 가공공정을 거쳐서 제작하였다. 제작한 질화규소 와류실의 상대밀도는 99.5%이었으며, 표면결함과 내부결함의 유무를 각각 광학현미경과 micro-focus X-ray로 비파괴검사하여 결함이 없는 것을 실험에 사용하였다.

2.2. 열피로시험

열피로시험에 사용한 시험기의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 시험기는 시편이 놓여져 회전하는 회전대, 시편의 가열과 냉각을 위한 가스버너와 압축공기 분사 노즐로 구성되어 있다. 회전대는 와류실이 고정된 홀더 6개를 동시에 놓고 실험할 수 있게 되어있으며, 한번에 60°씩 회전하고 20초 정지하게 설정되어 있어, 시험되는 와류실은 가스버너가 있는 위치에서 20초 가열되고 압축공기 분사 노즐이 있는 위치에서 20초 냉각되게 되어있다. 와류실의 온도는 가열시와 냉각후의 온도를 각각 pyrometer와 디지털 온도계를 사용하여 측정하였다.

열피로시험조건을 가능한 실제 엔진에서의 상태와 같게 하기 위하여 와류실을 고정하는 홀더의 재질을 실린더 헤드 제조에 많이 사용되는 FC25로 하였으며, 고정은 실제 엔진조립라인에서 이러한 형상의 와류실을 고정하는데 사용하는 방법인 실온에서의 압입법으로 하였다. 가열에 사용한 가스는 LPG이며, 산소의 혼합율을 조절하여 SUH 600 와류실의 분출구 중앙이 최고 800℃가 되게 하였다. 냉각은 냉각후의 분출구 중앙의 온도가 150℃ 이하가 되게 압축공기의 유량을 조절하였다.

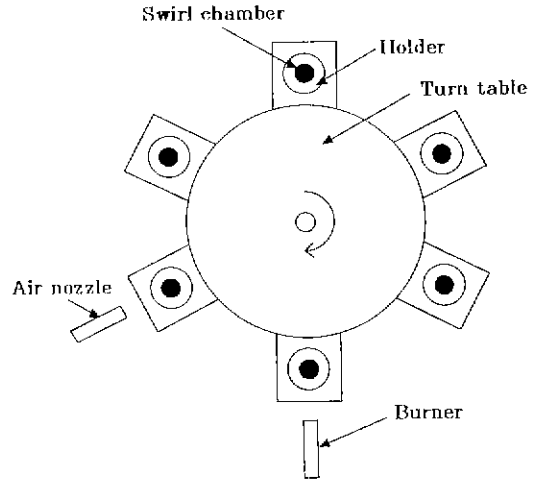


Fig. 2. Schematic drawing of thermal fatigue test apparatus for swirl chamber: 6 specimens (swirl chambers) are put on the turn table and they are heated by LPG burner for 20 sec then cooled by compressed air for 20 sec immediately.

회전대에는 질화규소 와류실과 SUH 600 와류실을 각각 3개씩 설치하였고, 가열과 냉각을 1,000회 반복하였으며, 400, 800, 1,000회에서 와류실에 발생한 균열의 크기를 광학현미경으로 측정하였다.

2.3. 응력해석

모델링은 와류실이 좌우대칭이기 때문에 Fig. 1과 같이 대칭면을 포함한 절반을 10절점 4면체 소리드요소로 요소분할하였으며, 분할된 요소의 수는 약 2,000개이었다.

최대로 가열된 와류실내의 온도분포는 열피로시험중에 실측한 수 개 부위의 온도와 일치하게 분위기 온도와 열전달계수를 입력하여 구하였으며, 냉각중의 온도분포는 25℃의 기체가 와류실 내부를 난류상태로 흐르면서 열을 흡수한다고 가정하고, 냉각 0.1, 0.5, 5초 후의 분포를 구하였다.

응력분포는 온도분포에서 계산되는 열응력과 와류실에 가해지는 외력을 합하여 구하였다. 와류실에 가해지는 외력으로는 와류실을 홀더에 압입함으로써 발생하는 조임응력을 입력하였으며, 상온에서 압입하였을 때와 가열 및 냉각중의 조임응력이 와류실과 홀더의 열팽창 차이에 의하여 변화하는 것을 고려하여 와류실과 홀더의 접촉면 전체에 부과하였다. 응력해석에 사용한 물성치는 Table 1과 같으나, SUH 600은 온도에 따른 탄성계수의 변화가

Table 1. Mechanical Property of SUH 600 and Si₃N₄

| Property | SUH 600 | Si ₃ N ₄ |
|--|-----------------------|--------------------------------|
| Density (g/cm ³) | 7.7 | 3.2 |
| Young's modulus (GPa) | 220 | 300 |
| Poisson's ratio | 0.24 | 0.30 |
| Thermal expansion coefficient (mm/mm·°C) | 9.3×10 ⁻⁶ | 3.2×10 ⁻⁶ |
| Thermal conductivity (W/mm·°C) | 2.75×10 ⁻² | 1.69×10 ⁻² |
| Specific heat (J/kg·°C) | — | 720 |

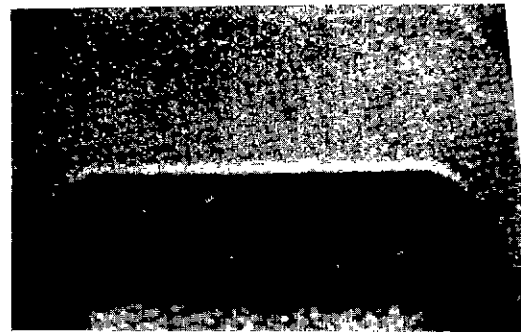
크기 때문에 온도에 따른 탄성계수의 변화를 고려하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열피로시험

가열중에 측정된 분출구 중앙의 최고온도는 SUH 600 과 질화규소에서 각각 800°C와 1000°C이었으며, 20초 냉각되었을 때의 온도는 각각 150°C와 200°C이었고 냉각후에 방치한 상태에서 약 100°C 상승하였다. 질화규소 와류실의 온도가 SUH 600 와류실에서보다 높은 것은 질화규소의 열전도율이 SUH 600보다 낮아 단열효과가 있기 때문으로, 질화규소 와류실을 사용하면 같은 연소 조건에서 금속 와류실을 사용한 경우보다 연소온도가 높아져 운전중 연소입자의 발생이 감소하고 출력이 향상되리라 기대된다. 또한 질화규소의 단열성은 시동시에 와류실 내부의 온도를 빠르게 상승시켜 시동성을 향상시킨다는 보고도 있다⁶⁾.

Fig. 3은 열피로시험 전후의 SUH 600 와류실의 분출구 주위 사진이다. 시험전에는 관찰되지 않았던 균열이 분출구의 양쪽 모서리에 관찰되며, 분출구의 오른쪽 모서리 부근의 형상이 변형된 것을 알 수 있다. 열피로시험에 의해 SUH 600 와류실에 발생한 균열의 최대 길이와 발생한 모든 균열의 길이의 합을 Table 2에 정리하였다. 최대 균열은 분출구 모서리에 발생하였으며, 400 사이클에서 0.84 mm, 800 사이클에서 1.51 mm, 1,000 사이클에서 2.40 mm로 점차 균열이 길어지는 속도가 빨라졌고, 발생한 모든 균열의 길이의 합도 같은 경향을 나타내었다. 한편 Fig. 4는 질화규소 와류실의 열피로시험 후의 사진으로 균열이 전혀 발생하지 않았을 뿐만 아니라



(a)



(b)

Fig. 3. Optical micrograph of the surface of jet in SUH 600 swirl chamber; (a) before thermal fatigue test, and (b) after thermal fatigue test for 1,000 cycles.

Table 2. Measured Crack Length During Thermal Fatigue Test for SUH 600 Swirl Chamber

| Crack length | Cycle | | |
|--------------------------|-------|------|-------|
| | 400 | 800 | 1,000 |
| Maximum crack length(mm) | 0.84 | 1.51 | 2.40 |
| Sum of crack length(mm) | 3.04 | 4.78 | 7.24 |

변형도 일어나지 않았음을 알 수 있다.

와류실 분출구의 형상은 흡입공기의 와류가 강하게 발생하여 연료와의 혼합이 효과적으로 일어나고, 1차 연소된 연소가스가 2차 연소가 일어나는 실린더 내로 일정한 각도를 유지하며 분사되게 설계하기 때문에 SUH 600 와류실과 같이 분출구 주위에 균열이 발생하거나 변형이 일어나면 엔진의 성능이 떨어질 수 있다. 그러나 균열이나 변형이 발생하지 않는 질화규소 와류실은 초기에 설계된 엔진성능을 지속적으로 유지할 수 있으리라 기대되며, 질화규소 와류실의 특성을 최대한 활용하기 위해서 압축비, 과급압력, 연료분사 타이밍 및 연료분사

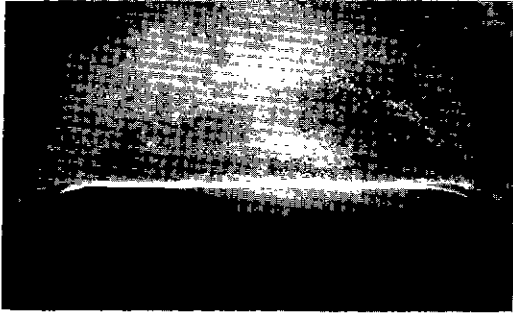


Fig. 4. Optical micrograph of the surface of jet in Si_3N_4 swirl chamber after thermal fatigue test for 1,000 cycles.

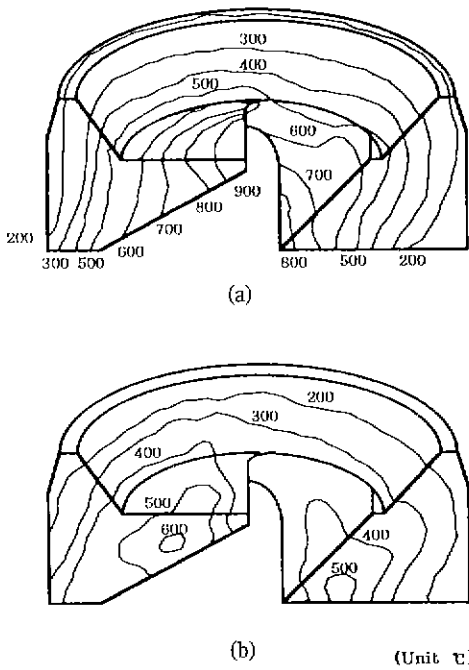


Fig. 5. Temperature distribution in Si_3N_4 swirl chamber; (a) heated for 20 sec, and (b) cooled for 0.5 sec.

량을 조절하면 엔진의 전회전수 영역에서 성능을 현저하게 향상시킬 수 있고, 최대 9마력(10%)의 출력향상을 달성하였다는 보고가 있다.^{4,6)}

3.2. 응력해석

실측한 온도를 기초로하여 유한요소법으로 해석한 질화규소 와류실의 온도분포를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5

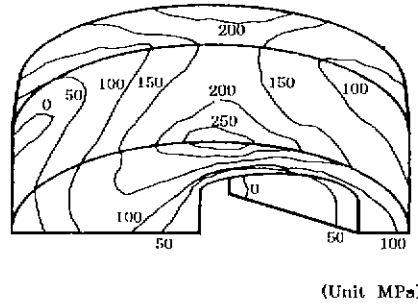


Fig. 6. Stress distribution in Si_3N_4 swirl chamber heated for 20 sec.

의 (a)는 열피로시험중 질화규소 와류실이 최고로 가열되었을 때의 온도분포이고, (b)는 최고로 가열된 상태에서 압축공기에 의하여 0.5초 냉각되었을 때의 온도분포이다. 가열된 상태에서는 연소가스를 분출하는 분출구 중앙의 온도가 높고, 홀더와 접촉한 외주부의 온도가 낮으며 그 온도차는 약 840°C 이었다. 냉각시에는 압축공기가 와류실 내부의 표면을 냉각시키기 때문에 최고 온부였던 분출구 중앙의 표면이 급속하게 냉각되고 내부의 온도가 표면의 온도보다 높아지며 이 때의 최대 온도차는 약 440°C 로 낮아졌다.

Fig. 6은 Fig. 5(a)의 온도분포에 의해서 발생하는 열응력과 외부에서 가해지는 조임응력에 의한 응력분포로, 최대응력이 발생한 부위를 표시하기 위해서 Fig. 5와 반대 방향에서 와류실을 관찰한 것이다. 큰 인장응력이 발생한 부위는 저온인 외주면으로, 특히 외주면의 상단부와 하단부에 $200\sim 300\text{ MPa}$ 의 인장응력이 발생하였다. 한편 그림에는 표시되지 않았으나 분출구 주위의 고온부에 가해지는 응력은 $-60\sim 40\text{ MPa}$ 로 일부에는 압축응력이 작용하고 있었다.

분출구의 모서리와 중앙부의 가열 냉각과정중의 응력변화를 Fig. 7에 나타내었다. 가로축은 냉각시간으로 0 초는 최고로 가열된 상태이고 그보다 좌측의 점은 가열전 상온에서 압입된 상태를 의미한다. 압입조건은 질화규소 와류실과 SUH 600 와류실이 동일하기 때문에 이때에 발생하는 응력값은 같았다. 압입된 상태에서 가열하게 되면 분출구 중앙의 인장응력은 감소하다가 냉각 초기에 급격하게 커지고 냉각 후기에는 다시 감소한다. 한편 분출구의 모서리는 가열에서 냉각 초기까지 인장응력이 증가하였다가 냉각후기에 감소한다. 분출구 중앙에 발생하는 최대 인장응력은 질화규소와 SUH 600 와류실에서 각각 190 MPa 과 250 MPa 이었으며, 분출구 모서리

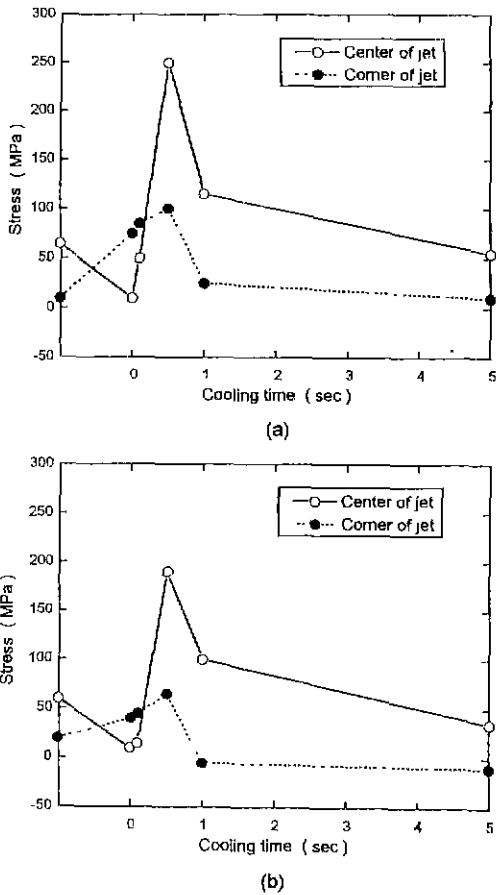


Fig. 7. Analyzed stress induced at the surface of jet in swirl chamber; (a) SUH 600 swirl chamber, and (b) Si₃N₄ swirl chamber. Left side of X-axis means fully cooled state and 0 sec means heated state just before cooling.

는 각각 65 MPa과 100 MPa이었다. SUH 600 와류실에 질화규소 와류실보다 더 큰 인장응력이 발생한 것은 SUH 600 와류실이 내부와 외주의 온도차가 적고 탄성 계수도 질화규소의 경우보다 작으나 가열되었을 때 크게 열팽창하기 때문에 조임응력이 증가하기 때문이라고 분석되었다. 또한 분출구 중앙의 인장응력이 압입상태에서 가열되면 감소하는 것은, 가열시 표면이 내부보다 고온으로 되기 때문에 열응력은 압축응력으로 작용하고 열팽창에 의해서 증가한 조임응력은 인장응력으로 작용하는데, 압축응력으로 작용하는 열응력이 인장응력으로 작용하는 조임응력보다 커지기 때문이라 분석되었다. 한편 냉각 초기에 급격히 인장응력이 증가하는 이유는

냉각시 표면의 온도가 내부보다 낮아지기 때문에 열응력도 조임응력과 같은 인장응력으로 작용하기 때문이라는 것을 알 수 있었다. 또한 냉각 후기의 인장응력 감소는 와류실 내부와 표면의 온도차가 작아지고 전체적인 온도가 감소함에 따라서 열응력과 조임응력이 모두 감소하기 때문이라고 유추되었다.

열피로시험에서 SUH 600 와류실에 균열이 발생한 위치는 최대 응력이 발생하는 분출구 중앙이 아니라 모서리였다. 이것은 열피로시험중 분출구 중앙은 SUH 600의 연화온도보다 높은 800°C로 가열되기 때문에 냉각중에 발생한 균열이 가열중에 healing 되기 때문이라고 생각되며, 발생하는 응력값은 낮으나 중앙부보다 250~300°C 낮은 온도분포를 갖는 분출구 모서리에 균열이 발생한 것으로 생각되었다. 한편 질화규소도 피로균열이 발생하나^{7,8)} 열피로 시험에 의해서 와류실에 균열이 발생하지 않은 것은 열피로시험 조건이 질화규소에 피로 균열을 발생시킬 정도에 이르지 않았기 때문이며, 일반적인 질화규소 부품의 보증강도가 500 MPa인 점을 고려할 때 질화규소 와류실의 신뢰성이 높다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

열피로시험에 의해서 질화규소 와류실에는 균열이 발생하지 않았으나 SUH 600 와류실의 분출구 모서리에는 최대 2.40 mm의 균열이 발생하고 변형이 일어났다. 응력해석에서 와류실에 발생하는 최대 인장응력은 가열시 외주부에 발생한 300 MPa이었다. 그러나 SUH 600 와류실에서 균열이 발생한 분출구 주위에는 냉각 초기에 최대 인장응력이 발생하였으며, 중앙에 발생한 응력은 질화규소 와류실에서 190 MPa, SUH 600 와류실에서 250 MPa이었고, 모서리는 질화규소 와류실에서 65 MPa, SUH 600 와류실에서 100 MPa이었다. SUH 600 와류실에 더 높은 인장응력이 발생한 이유는 SUH 600의 열팽창계수가 크기 때문이라 분석되었고, 최대 응력부인 분출구 중앙에 균열이 발생하지 않은 원인은 냉각시 발생한 균열이 가열시에 healing 되었기 때문이라 생각되었다. 질화규소 와류실에는 열피로시험에서 균열이나 변형이 발생하지 않았고, 응력해석에서도 발생하는 최대응력이 300 MPa로 일반적인 질화규소 부품의 보증강도인 500 MPa보다 낮았던 점에서 질화규소 와류실은 고출력 디젤엔진용 와류실로 신뢰성이 높은 것으로 판단되었다.

REFERENCES

1. S. Kamiya, M. Murachi, H. Kawamoto, S. Kato, S. Kawakami and Y. Suzuki, "Silicon Nitride Swirl Lower-Chamber for High Power Turbocharged Diesel Engines," *SAE Transaction*, No. 8950523, 3894-3906 (1985).
2. 何村 英男, 北 英紀, "設計のコンセプトと材料特性向上のポイント," *FC Report*, **10**(6), 188-196 (1992).
3. 小島 康一, 神谷 純生, "自動車とセラミックス," *セラミックス*, **28**(10), 1007-1021 (1993).
4. 横山 泰弘, 望月 伸祐, 平井 眞, 岡田 誠二, "三菱キャンター用4D35, 4D36形エンジン," *内燃機関*, Vol. 33, **421**(10), 41-48 (1994).
5. 河本 洋, "ディーゼルエンジンSi₃N₄副燃焼室の應力・強度・寿命シミュレーション," *セラミックス*, **23**(6), 521-529 (1988).
6. 河本 洋, 加茂 尚, 神谷 純生, 岡野 弘, 長谷 貞三, 西川 保幸, 服部 資孝, *セラミック部品のエンジンへの應用*, 岩田 誠二 外, pp. 1-53, 内田老鶴圃, 東京, 1990.
7. A.G. Evans and S.M. Wiederhorn, "Crack Propagation and Failure Prediction in Silicon Nitride at Elevated Temperatures," *J. Mat. Sci.*, **9**(2), 270-278 (1974).
8. T. Fett, G. Himsolt and D. Munz, "Cyclic Fatigue of Hot-pressed Si₃N₄ at High Temperatures," *Advanced Ceram. Mat.*, **1**(2), 179-184 (1986).