

배기계 용접이음의 고온피로강도

주석재[†] · 이한용* · 남궁규완**

(2008년 8월 4일 접수, 2008년 8월 28일 수정, 2008년 8월 29일 심사완료)

High Temperature Fatigue Strength of the Welded Joint in Exhaust System

Seok Jae Chu, Han Yong Lee and Nam Koong Kyu Wan

Key Words: Exhaust System(배기계), High Temperature(고온), Fatigue(피로), Weld(용접), Resonator(소음기)

Abstract

The exhaust systems are usually subjected to vibration or shock at high temperatures. The high temperature fatigue tests of the exhaust systems are rarely performed in domestic industries due to limited number of test facility and high test costs. In this paper, the high temperature fatigue test of some part of the exhaust system, not the whole system, is carried out. The resonator located at the central range is heated in the cylindrical electric furnace and the alternating load is applied on the end of the pipe welded to the resonator. The high temperature fatigue strength of the welded joint is obtained. The location of the fatigue crack is different to that in room temperature.

1. 서 론

배기계는 앞쪽이 엔진 배기구에 연결되고, 또 중간 중간 행거로 차체에 연결된다. 차량 운행 중 배기계는 배기가스로 가열되고 또 엔진이나 차체의 진동이나 충격을 받으므로 피로에 관하여 가혹한 조건에 처하게 된다. 배기계 중간에 삽입된 소음기(resonator)의 온도는 약 500 °C까지 올라간다.

배기계의 피로성능을 시험하려면 차량 운행 중과 같이 가열하고 시험하는 것이 바람직하나 시험 시설이 부족하고 시험 비용이 부담되어 극히

제한적으로만 하였다. 배기계 전체를 테이블에 얹고 장시간 흔들며 계속 연료를 태워 배기계를 가열하여야 하므로 비용이 많이 든다. 최근까지 상온에서 시험하거나,⁽¹⁾ 주행시험 중 고온 배기가스를 by-pass시켜 배기계를 가열시키지는 않고 시험하는 것이 일반적이었다.

최근 국내 배기계 업체에서도 고온시험에 대한 관심이 점점 높아지고 있다. 배기계 전체를 테이블에 얹고 계속 연료를 태워 가열하며 흔들는 시험도 필요하지만 배기계 부품만 가열하고 기존 시험시설로 시험하는 것도 배기계 부품업체에게는 필요하다.

본 연구에서는 배기계 소음기와 이것 후단에 용접된 배기계 파이프만 가열하고 기존 시험시설로 시험하는 것을 시도하여 본격적인 고온시험에 대비하고자 한다. 용접이음의 상온과 고온 피로강도와 피로균열 발생부위를 비교하여 보고 유한요소해석결과와 고온스트레인게이지 측정결과를 이용하여 고온피로현상을 검증하려고 한다.

[†] 책임저자, 회원, 울산대학교 기계자동차공학부
E-mail : sjchu@ulsan.ac.kr

TEL : (052)259-2141 FAX : (052)259-1680

* 울산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 울산대학교 기계자동차공학부

2. 고온피로시험

2.1 부품 가열로

소음기는 전체 배기계 중간에 삽입된 것으로서 온도는 약 500 ℃까지 올라간다. 소음기 후단 용접이음 가까이 파이프 표면 상단에 열전대를 붙이고 Fig. 1과 같이 용접이음 부위가 전기가열로 중심에 놓이도록 고정하였다. 전기가열로는 소음기 후단 용접이음 부근 온도를 약 500 ℃까지 올리는 용도로 설계된 것으로 전력소비 2 kW인 전기저항식이다. 원통형이고 시험할 때는 전후에 커버를 덮어 열을 보호하였다.

실제 소음기는 배기가스가 Fig. 2와 같은 내부를 흘러 가열되지만 전기가열로는 외부를 가열하는 것이 다르다. 전기가열로는 실제 소음기 상태와 가열특성이 약간 다르기는 하지만 연료를 태워 흘리는 방법보다 간편하여 전기가열로를 선택하였다.

소음기는 납작한 타원형 단면으로서 전후를 막은 엔드플레이트 가까이를 고정하는 것이 튼튼하다. 그러나, 후단을 전기가열로에 넣으면서 부득이 엔드플레이트에서 약간 떨어진 부위를 고정하여야 하였다. 상하 분할형 지지대를 사용하고 지지대 내면이 소음기 표면과 완전히 밀착하도록 CNC 가공하였다. 상하 분할형 지지대는 소음기 표면보다는 무른 알루미늄으로 제작하여 가급적 소음기 표면이 압입되거나 긁히지 않게 하였다.

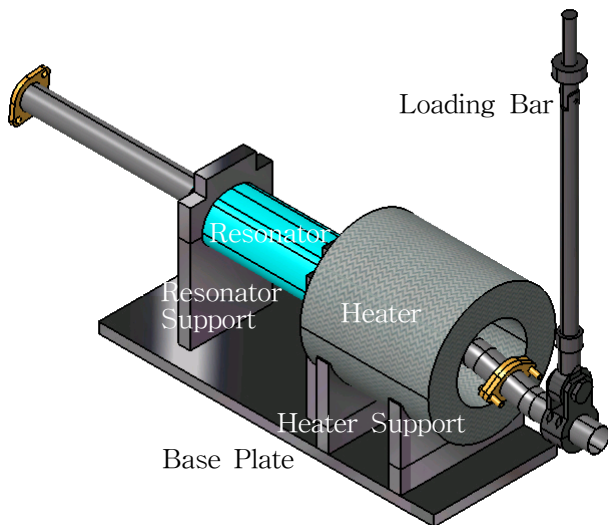


Fig. 1 High temperature fatigue test of a resonator in exhaust system

가열된 소음기에서 열이 지지대를 통하여 베이스플레이트까지 전달되는 것이 염려되어 지지대에 냉각수 순환통로도 만들었으나 실제 냉각수를 순환하지 않아도 베이스플레이트의 온도는 별로 높아지지 않았다. 그리고, 반대쪽 로딩바를 통하여 로드셀에 열이 전달되는 것을 염려되어 Fig. 1과 같이 로딩바를 길게 하였다.

전기가열로의 온도제어는 전기가열로 외벽을 뚫고 끝이 내벽과 일치하도록 삽입한 열전대로 하였다. Fig. 3과 같이 소음기 후단 용접이음 가까이에 열전대를 붙여 이 곳 온도를 500 ℃까지 올렸다.

2.2 데이터 취득체계

소음기 후단 용접이음 가까이에 열전대와 고온 스트레인게이지를 붙여 온도와 스트레인을 모니



Fig. 2 Cut-away view of a resonator



Fig. 3 Heating the resonator



Fig. 4 Data acquisition system

터하였다. Fig. 4와 같이 온도는 열전대 → A/D 보드 → PC, 스트레인은 스트레인게이지 → 신호 증폭기 → MTS 컨트롤러 → PC로 저장하였다.

2.3 고온피로시험 조건

MTS 피로시험기(직선운동 100 kN, 회전 550 N·m)를 사용하였다. 로딩바는 소음기 후단 용접 이음에서 300 mm 떨어진 파이프에 고정한다. Table 1과 같이 30 °C 상온피로시험은 하중진폭 530 N에서 736 N까지, 약 500 °C 고온피로시험은 하중진폭 530 N에서 932 N까지 약 100 N씩 단계적으로 올려 시험하였다. 하중주파수는 가능한 한 올려 하중진폭 834 N까지는 6 Hz, 하중진폭 932 N은 4 Hz를 사용하였다. 배기계 파이프의 소재는 페라이트 스테인리스강 409이다.⁽²⁾

피로균열 발생판정방법은 변위진폭이 안정되었다가 10 % 증가하면 피로균열이 발생하여 성장한 것으로 처리하였다. 2,000,000 cycles까지 피로균열이 발생하지 않으면 시험을 중단하였다.

2.4 고온피로시험 결과

피로시험 결과 하중진폭을 피로수명에 대하여 그린 것이 Fig. 5이다. 상온피로시험결과는 속이 찬 사각형으로, 고온피로시험결과는 속이 빈 사각형으로 구분하여 표시하였다. 고온피로강도가 상온피로강도보다 낮아질 것으로 예상한 것과 반대인 것이 특이하였다.

그 원인을 찾기 위하여 피로균열 발생부위를 관찰하였다. 상온과 고온 피로균열 발생부위가 달랐다. 상온에서는 파이프 하부에 연결된 엔드

Table 1 Fatigue test conditions and results.

Specimen ID	Force Amplitude (N)	Test Temp. (°C)	Cycles to Failure (Cycles)	Test Frequency (Hz)
#1	530	30	233,317	6
#2		517	2,000,000	6
#3	637	515	2,000,000	6
#8		25	2,000,000	6
#6	736	520	2,000,000	6
#7		26	222,268	5
#11		510	2,000,000	6
#14		510	2,000,000	6
#4	834	500	249,777	6
#12		509	38,273	6
#13		520	430,650	6
#5	932	500	25,000	4
#9		506	54,470	4

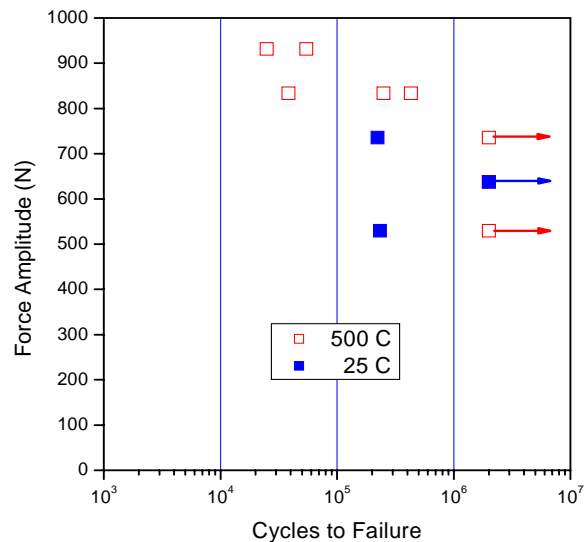


Fig. 5 Fatigue test results at room temperature and at high temperature

플레이트에서 발생하였지만 고온에서는 파이프 표면 용접이음 가장자리 상단에서 발생하였다.

MTS 피로시험기는 하중제어 경우 피로균열이 발생 성장하면 변위가 증가한다. 상온에서는 파이프 하부에 연결된 엔드플레이트에서 피로균열이 발생하여 로딩바가 많이 올라가 upper interlock에 걸리고, 고온에서는 파이프 용접이음 가장자리 상단에서 발생하여 로딩바가 많이 내려가 lower interlock에 걸린 것과 피로균열 발생부위는 일치한다.

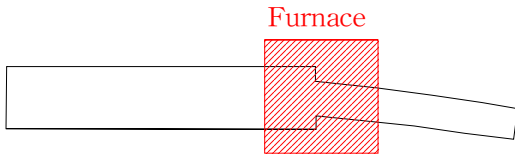


Fig. 6 Thermal distortion of a resonator

상온에서 가장 취약한 부위는 파이프 하부에 연결된 엔드플레이트 피로균열 발생부위이었다. 그러나, 소음기를 전기가열로에 넣고 가열하면 대류 현상 때문에 하부보다 상부 온도가 상대적으로 높아져서 Fig. 6과 같이 파이프가 휘어 끝이 낮아졌다. 그 결과 상온피로균열 발생부위에 압축응력이 추가되고 이 부위에 피로균열이 발생하는 것을 억제하였다. 그리하여, 고온에서는 다음 취약부위인 파이프 표면 용접이음 가장자리 상단에서 발생하였다.

Fig. 7은 상온 피로시험인 경우 하중점 변위의 상한과 하한을 모니터한 것으로 상온 피로시험은 다 이와 같았다. 시험이 10^5 회까지 진행될수록 상한은 내려가고 하한은 올라가 경화현상이 진행되었다. 이와 같은 스테인리스강의 반복변형경화 현상은 Lee 등⁽³⁾이나 Mannan 등⁽⁴⁾의 연구결과에도 나타났다. 10^5 회를 넘으며 반전되어 상한은 올라가고 하한은 내려온다. 상한이 더 급격하게 변하는 것은 소음기 파이프 하부에 연결된 엔드플레이트에 피로균열이 발생한 것을 뒷받침한다.

변위를 보고 예상한 것과 같이 Fig. 8 상부에는 피로균열이 보이지 않았으나 Fig. 9 하부에는 피로균열이 뚜렷하였다.

Fig. 10은 고온 피로시험인 경우 하중점 변위의 상한과 하한을 모니터한 것으로 다른 고온피로시험 경우도 이와 같은 것이 다수이었다. 시험이 진행될수록 상한은 거의 변하지 않았지만 하한은 계속 내려갔다. 이것은 소음기 표면 용접이음 가장자리 상부에 피로균열이 발생한 것을 뒷받침한다.

변위를 보고 예상한 것과 같이 Fig. 11 용접이음 가장자리 상부에는 피로균열이 뚜렷하였으나 Fig. 12 하부에는 피로균열이 보이지 않았다.

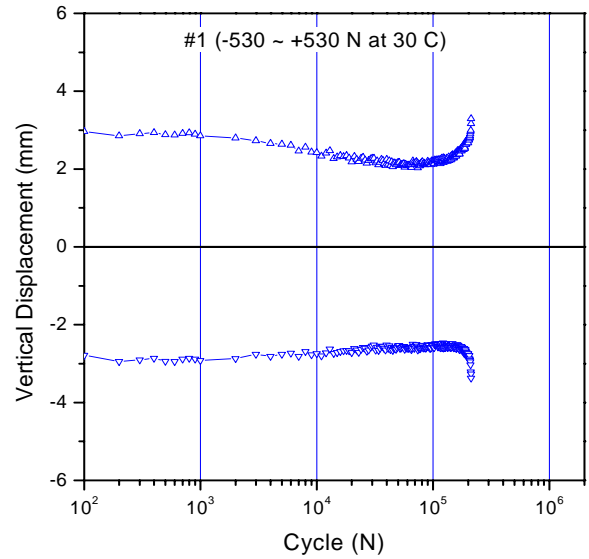


Fig. 7 Peaks and valleys for vertical displacement



Fig. 8 No visible crack(top view)



Fig. 9 Visible crack (bottom view)

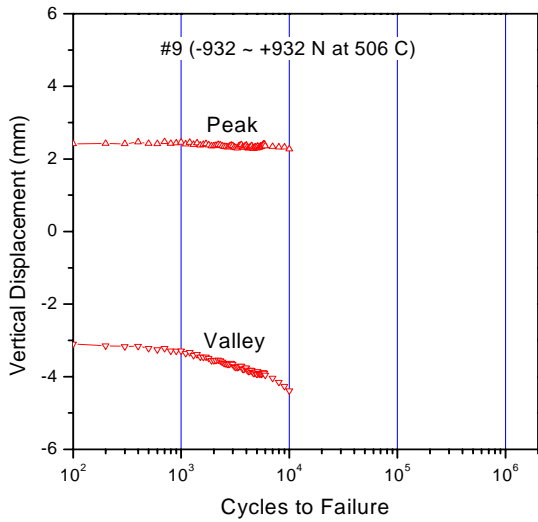


Fig. 10 Peaks and valleys for vertical displacement



Fig. 11 Visible crack (top view)



Fig. 12 No visible crack (bottom view)

3. 고온피로시험 결과 검증

3.1 유한요소해석

유한요소해석을 실시하여 피로균열 발생부위의 응력이 높은지 살펴보았다. 축을 포함하는 수직 평면에 관하여 대칭이므로 전체의 반쪽만 해석하였다. 따라서 하중은 500 N의 반인 250 N을 작용하였다. shell 요소만 사용하였으므로 용접비드는 shell 요소 두께를 증가시켜 표현하였다. 상온일 경우만 해석하였다. 고온 기계적 성질이나 온도분포에 대한 정보가 부족하였기 때문이다.

Fig. 13에 고정부위와 하중점을 표시하였다. 해석 결과 상온 피로균열 발생부위인 엔드플레이트 하부나 고온 피로균열 발생부위인 용접이음 상부 가장자리의 응력은 높았다. 그러나, Fig. 14와 같이 응력은 엔드플레이트 하부보다는 엔드플레이트 상부나 용접이음 가장자리 상부가 약간 더 높아 절대적으로 엔드플레이트 하부에서 먼저 피로균열이 발생하는 것은 설명하지 못하였다.

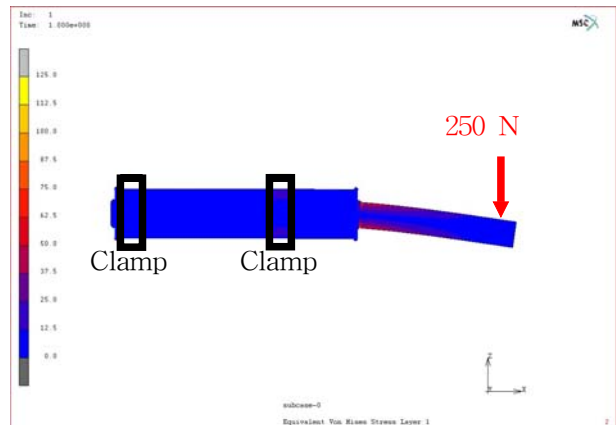


Fig. 13 Von Mises stress contours

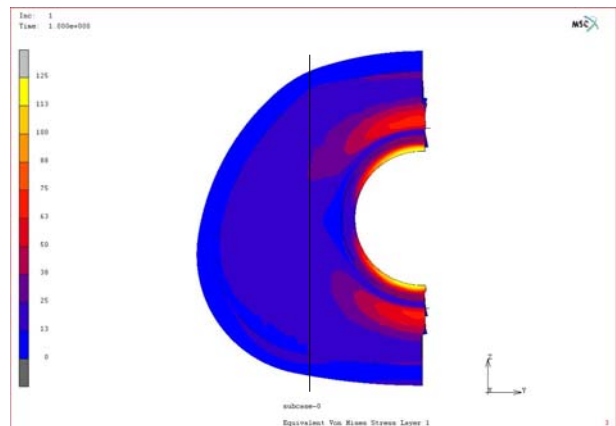


Fig. 14 Von Mises stress contours on end plate

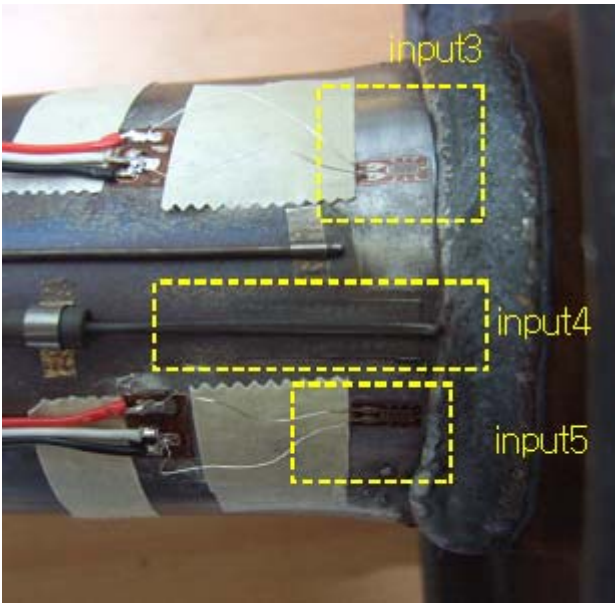


Fig. 15 One high temperature capsule gage(center) and two general usage strains gages(upper & lower)

3.2 고온스트레인게이지

Fig. 15와 같이 캡슐형 고온스트레인게이지(모델 KYOWA SKW-10244)와 일반스트레인게이지를 나란히 붙여 상온에서 같은 하중에 대한 출력을 비교하였다. 하중을 500 N까지 증가하였을 때 상온스트레인게이지를 고온스트레인게이지 부착 위치에 부착한 경우로 환산하여 비교하였다. 고온스트레인게이지 gage factor는 1.47로 상온스트레인게이지 gage factor 2.11보다 작았다.

Fig. 16은 축방향 스트레인 분포이다. 고온스트레인은 Chu 등⁽⁵⁾의 결과를 따라서 구하였다. 위치 0은 용접이음 가장자리를 가리킨다. 용접이음 가장자리에서 멀어지며 스트레인이 급격히 감소하다가 약간 증가하다 다시 서서히 감소하였다.

고온스트레인게이지(길이 20 mm)와 상온스트레인게이지(길이 2 mm)의 부착범위를 측정값 높이에 그렸다. 스트레인게이지 측정값은 부착범위 스트레인 평균값에 해당하므로 해석값과 잘 일치하는 편이다.

Fig. 17은 500 ℃까지 단계적으로 올리며 하중을 500 N까지 높였다 내리며 고온스트레인게이지로 측정된 스트레인이다. 막대는 기계적 하중에 대한 스트레인으로서 온도가 높아지며 약간씩 증가 감소를 반복하나 결국은 증가하는 경향을 보인다. x축과 막대 사이는 열변형에 해당한다.

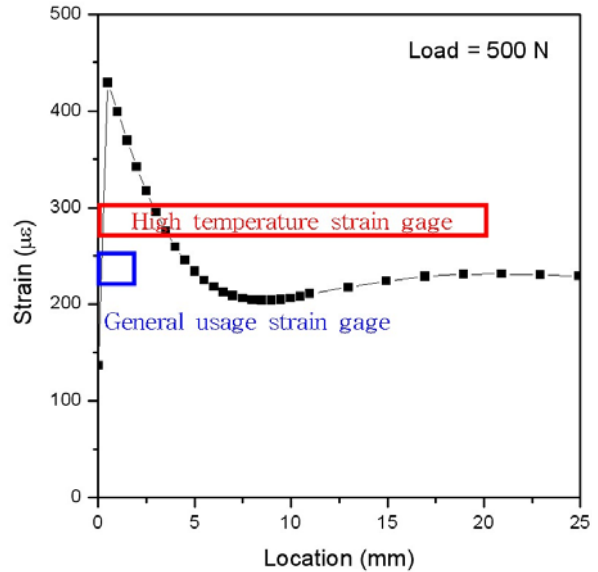


Fig. 16 Comparison of axial strains

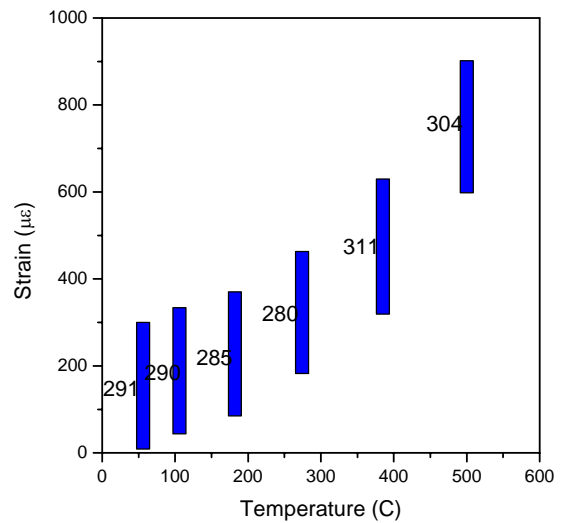


Fig. 17 High temperature strains.

Fig. 6과 같이 열변형된 것을 뒷받침한다.

4. 결 론

배기계 소음기 용접이음의 고온피로강도를 시험하여 구하였다. 열변형은 피로균열발생부위를 용접이음 가장자리로 바꾸고 고온피로강도에도 영향을 끼치는 현상을 발견하였다. 이 현상을 유한요소해석과 스트레인측정결과로 설명하였다.

후 기

이 연구는 산업자원부, 한국산업기술평가원, (재)경북테크노파크에서 시행한 기술인프라 연계 연구개발사업(주관기관: 산업자원부 지정 울산대 RIC(NARC), 참여기업: (주)세종공업)의 지원을 받아 이루어진 것으로 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Chu, Seok-Jae, 2004, "Development of Vibration Fatigue Analysis Method for Automobile Exhaust Systems," Research Project Report, Univ. of Ulsan Regional Research Center.
- (2) ASM International, 1996, *ASM Speciality Handbook*, Stainless Steels, pp. 505~525.
- (3) Lee, Keum-Oh, Yoon, Samson, Hong, Seong-Gu, Kim, Bong-Soo and Lee, Soon-Bok, 2004, "Low Cycle Fatigue Behavior of 429EM Stainless Steel at Elevated Temperature," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 28, No. 4, pp. 427~434.
- (4) Mannan, S. L. and Valsan, M., 2006, "High-Temperature Low Cycle Fatigue, Creep - Fatigue and Thermomechanical Fatigue of Steels and Their Welds," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 48, pp. 160~175.
- (5) Chu, Seok-Jae, Lee, Han-Yong, Kim, Chung-Kwan and Lee, Gwang-Hoo, 2007, "The High-Temperature Strain Measurements Using the "Capsule Gage," 2007 Fall Conference of the KSME, pp. 625~630.