

원자력 구조재 신뢰성 향상을 위한 열피로 균열 시험편 제작 기법 개발

김 용* · 김 재 성** · 이 보 영**

*고등기술연구원 로봇생산기술센터

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Development the Technique for Fabrication of the Thermal Fatigue Crack to Enhance the Reliability of Structural Component in NPPs

Yong Kim*, Jae Sung Kim** and Bo Young Lee**

*Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Engineering, Yongin, 449-863, Korea

**School of Aerospace and Mechanical Eng. Korea Aerospace Univ., Goyang, 412-791, Korea

Abstract

Fatigue cracks due to thermal stratification or corrosion in pipelines of nuclear power plants can cause serious problems on reactor cooling system. Therefore, the development of an integrated technology including fabrication of standard specimens and their practical usage is needed to enhance the reliability of nondestructive testing. The test material was austenitic STS 304, which is used as pipelines in the Reactor Coolant System of a nuclear power plants. The best condition for fabrication of thermal fatigue cracks at the notch plate was selected using the thermal stress analysis of ANSYS. The specimen was installed from the tensile tester and underwent continuous tension loads of 51,000N. Then, after the specimen was heated to 450°C for 1 minute using HF induction heater, it was cooled to 20°C in 1 minute using a mixture of dry ice and water. The initial crack was generated at 17,000 cycles, 560 hours later (1cycle/2min.) and the depth of the thermal fatigue crack reached about 40% of the thickness of the specimen at 22,000 cycles. As a results of optical microscope and SEM analysis, it is confirmed that fabricated thermal fatigue cracks have the same characteristics as real fatigue cracks in nuclear power plants. The crack shape and size were identified.

*Corresponding author : welding@iae.re.kr

(Received December 12, 2007)

Key Words : Thermal fatigue crack, Nondestructive testing, Thermal stratification, Standard specimen

1. 서 론

원자력 구조물의 안전성 확보는 구조재의 안전성을 의미하며, 구조재의 안전성은 대부분의 경우 용접부의 품질 확보와 직결되어 있다. 용접부 품질 확보는 품질 관리 절차의 준수 외에 용접부에 대한 비파괴 검사의 정확도에 달려있다. 비파괴 검사의 경우 두꺼운 구조물의 검사에는 주로 초음파 탐상검사(이하 UT) 및 와전

류 탐상검사(이하 ECT)가 사용되고 있는데 용접부 내에 있는 균열들을 정확히 확인할 수 있는 수준까지 도달하기 위한 비파괴 검사 요원의 교육과 훈련에는 많은 비용과 노력이 소요된다. 그 이유는 용접부 내에 있는 결함들을 검사요원이 직접 확인할 수 있는 기회가 거의 없기 때문이다. 특히 원전의 가동 중 검사(in-service inspection)를 위해서는 배관부 파손의 주요 원인으로 지목되고 있는 배관 내부의 열성층(Thermal stratification) 현상에 의한 열피로 균열이나 용접부 루트 근방의 저면

에서 불규칙적으로 발생하는 입계응력 부식균열 등 실제 기기와 유사한 형상을 갖는 모의 시험편 (mock-up)의 기량 검증 (Performance Demonstration)을 통한 검사 기술의 인증이 필요하지만, 현재까지는 인공적으로 기계 가공된 모의시험편이 사용되어 왔다. 그러나 기량 검증을 위해 NDT 검사자 들에게 제공되는 모의 시험편은 EDM (Electric Discharge Machine) 노치(notch) 가공된 시험편으로 인공 가공된 균열의 폭이 최소 150 μ m 이상이지만, 원전에 발생하는 균열 틈은 10 μ m 이하로 매우 작다. 결과적으로 EDM 노치의 경우 결함의 존재를 쉽게 확인할 수는 있으나 실제 결함의 신호를 정확히 모사(模寫)할 수 없는 단점을 갖기 때문에 손상평가의 신뢰성을 고도화하는데 한계점을 갖고 있으며, 결함의 탐지능력에 대한 의구심을 일으킨 몇몇 사례 또한 보고되었다¹⁻²⁾. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 구조재 내에 특히, 용접부 내에 원하는 종류와 형상의 자연결함을 정밀제어 제조하는 기술을 개발할 필요가 매우 크다. 이에 따라 미국은 2000년도부터 원전기기에 예상되는 실제 결함을 실현한 모의시험편을 사용하여 원전기기에 적용되는 비파괴 검사의 결함탐지능력을 검증하도록 기량 검증을 제도화하여 적용하였고, 우리나라도 2003년부터 UT 및 ECT 기량검증을 적용하기 위하여 규제 기관과 원전 소유주를 중심으로 “한국형 기량 검증 시스템”을 개발하고 있다³⁾. 하지만 아직까지 국내에는 실제 결함을 실현한 모의시험편 제작기술을 보유하고 있지 않아 시험재의 대부분 외국에 주문하여 입수하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수입에 의존하던 모의 시험편의 국내 제작을 통해 원자력 발전소의 구조물 보수비용 및 기간을 단축시키며 또한 손상평가의 신뢰성을 고도화시키기 위해 열성층 현상에 의한 배관의 열피로 균열을 나타낼 수 있는 결함을 제작하였으며, 실제 원전에서 발생하는 결함과의 유사성을 검토하였다. 시험재는 Reactor Coolant System (RCS)의 배관재로 사용되는 오스테나이트계 STS 304를 채택하였으며, 다양한 열피로 형태의 적용을 통해 가장 적절한 열피로 균열 제작 방법을 제시하고자 한다.

2. 열피로 균열과 기존의 결함 제작법

2.1 열피로 균열 발생기구

열성층(Thermal stratification)은 물의 밀도가 온도에 따라 급격히 변화되기 때문에 발생된다고 알려져 있다. Fig. 1과 같이 밀도가 낮은 뜨거운 물은 배관의

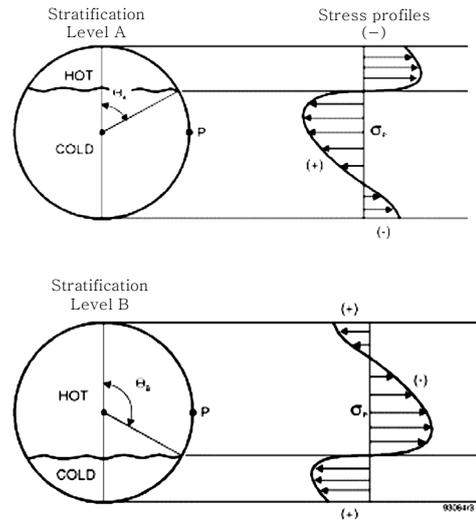


Fig. 1 Thermal stratification in a pipe

상단에 위치하려 하는 반면에 밀도가 큰 차가운 물은 배관의 하단에 그대로 존재하려고 한다. 또한 물은 열 전달이 어렵고 열용량이 큰 특성 때문에 서로 섞이지 않아 열성층이 쉽게 일어날 수 있다. 열성층이 발생된 배관은 상하단의 온도편차에 의한 굽힘 응력을 받게 되며 배관에는 심각한 변형이 발생할 수 있다. 이러한 열성층 현상이 주기적으로 반복되면 심각한 피로손상으로 열피로 균열이 야기될 수 있다⁴⁻⁵⁾. 따라서 균열 성장으로 인한 누수가 발생되기 전에 균열을 검출하는 것은 매우 중요한 일이다.

이와 같은 열성층 현상으로 인해 파이프 내면으로부터 균열이 발생하게 되는데, 이렇게 발생한 열피로 균열 주변은 산화막이 분포되어 있으며 균열로부터 멀어질수록 산화막 분포가 감소된 경향을 보인다고 알려져 있다^{1,6-7)}. 또한 파단면은 일반적인 기계적 피로 형태의 양상을 나타내며, 배관의 온도는 상부에서 약 300 $^{\circ}$ C, 하부는 약 35 $^{\circ}$ C 정도로 $\Delta T = 260^{\circ}$ C의 차이로 인해 열응력이 발생하게 된다. 그 주기는 약 25분이며 이때 발생된 열응력은 100MPa 정도로 나타났다. 그러나 실제 위와 같은 사용 환경에서 열피로 현상으로 인한 균열은 상당히 오랜 시간 후에 발생되기 때문에 열피로로 인한 균열 시편을 제작하기 위해서는 시험환경 조건의 변화가 불가피하다. 일반적으로 열응력은 온도의 함수이며, 식(1)과 같이 표현된다.

$$\sigma = E\alpha (\Delta T) \tag{1}$$

여기서 α 는 열팽창계수, E는 재료의 탄성계수 그리고 ΔT 는 최대 및 최소 온도 차이를 나타낸다. 식(1)과 같이 열응력은 ΔT 에 비례하여 선형적으로 증가하

게 되는데, 오스테나이트계 STS 304의 경우 열효율을 100%로 가정하면 이론적으로 ΔT 에 따라 시험편은 Fig. 2와 같은 열응력 변화를 나타낸다.

2.2 기존의 결함제작 방법

미국의 경우 원자력 발전 설비와 관련해서 ASME Sec.XI App. VIII에 비파괴 기량검증 시험을 위한 결함의 위치 및 최소 숫자, 방향 등에 관하여 모재 두께의 30% 이하, 60%이하 및 61%이상으로 깊이를 정하고 각 깊이 범위 내에 최소 결함의 숫자 등을 규정하고 있다. 원자력 분야가 아닌 경우에는 API RP 2X (API Recommended Practice for Ultrasonic Examination of Offshore Structural Fabrication and Guidelines for Qualification of Ultrasonic Technicians)에 기본적인 용접부 결함을 만드는 자료가 제시되어 있으나 이들 결함은 비파괴 검사요원의 일반 훈련용으로 판매의 틈새를 이용해서 용융 불량을 모사하는 기초적인 방법에 관한 것으로 실제 균열을 모사할 수 있는 방법에 대해서는 제시하고 있지 않다. 독일 및 스웨덴의 경우 또한 실제 균열 등의 자연 결함을 용접부에 심을 수 있는 기술을 확보하고 있으나 대외 제공을 불허하고 있는 상황이다.

일반적으로 원전 구조물 검사자에게 기량 검증을 위해 사용되는 결함은 형상결함(Geometrical defects), 삽입결함(Implants), 용접응고결함(Weld solidification cracks), 용융부족(Lack of fusion), 기계피로 균열(Mechanical fatigue crack), 인공결함(EDM notch and holes) 및 열피로 균열 등 크게 7가지로 분류된다. 이 중 열피로 균열을 제작하기 위한 다양한 방법이 연구되었으며⁸⁻¹¹⁾, 이를 요약하면 크게 3가지 방법으로 분류할 수 있다. 첫째로 시험편을 오토클레이브(autoclave)에 장착한 후에 적절한 인장 또는 압축 응력을 가한 상태에서 high/low temperature를 반복적으로 가하여

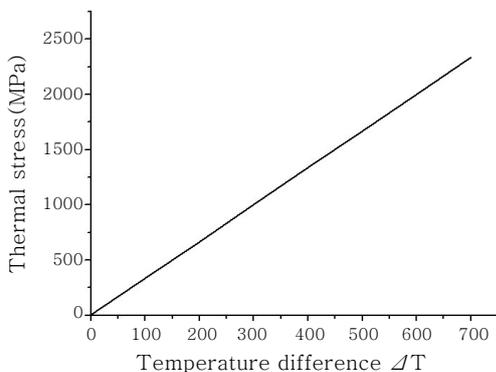


Fig. 2 Thermal stress variable depend on ΔT

균열을 만드는 방법, 둘째로는 일정 온도를 유지하면서 인장과 압축응력을 반복적으로 가하는 방법, 마지막으로 시험편에 기계적인 하중 없이 반복적인 온도변화만으로 균열을 만드는 방법이다.

그러나 지금까지 발표된 연구결과는 비파괴 검사 활용을 위한 균열의 제작 기법에 초점을 맞춰 진행된 것이 아니라 피로 수명의 예측¹²⁾이나 균열 전파거동 관찰¹³⁻¹⁵⁾을 위한 것이므로 기존의 연구 기법을 결함시험편을 제작을 목적으로 적용하는 것은 한계가 있다. 이미 알려진 바와 같이 열피로 균열은 배관 내면에서부터 발생하므로 균열 검출을 위해서는 ECT 검사 또는 UT를 적용하여야 하는데 이를 위해서 목적에 맞도록 시험편 형상을 개조하는 것은 불가피하다.

3. 유한요소 검증

3.1 유한요소 해석

대부분의 고온고압 설비들은 기계적 응력과 함께 열 응력을 받게 되고, 특히 응력의 변동과 동시에 온도 변화가 수반되는 열피로 현상을 보인다.

즉, 고온설비들은 자유로운 열팽창이 구속되면 가열과 냉각의 반복에 의한 균열 발생과 함께 열피로 파괴 현상이 발생하게 된다. 그러나 기계적 하중 없이 온도 구배만으로 균열을 모사하기 위해서는 상당한 시간이 소요된다. 따라서 열피로 균열 발생을 가속화 시키는 최적 조건을 도출하기 위해 실험을 수행하기에 앞서 우선적으로 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 이용, 유한요소해석을 실시하여 노치부위의 최대 응력집중 정도를 파악하고 이상적인 가속 실험 조건을 찾고자 하였다.

시험편으로는 오스테나이트계 STS 304가 사용되었으며, 기본적으로 해석을 위해 사용된 재료의 물성치는 Table. 1과 같다. 시험편의 크기는 240×25×6t이며 노치의 깊이는 0.3mm로 시험편의 정 중앙에 가공하였다. 재료에 가해지는 최대 온도는 STS강의 예민화 현상을 고려하여 450℃로 제한하였으며, 열응력 및 인장

Table 1 Properties of STS 304

Properties	Value
Modulus of elasticity	193GPa
Coefficient of thermal expansion	$18.4 \times 10^{-6}/K$
Specific heat capacity	502 J/Kg · k
Thermal conductive	21.5 W/m · C
Possion's ratio	0.29

응력에 대한 경계 조건은 시간에 따라 온도 및 하중이 변하지 않는 정상상태로 가정하였다. 해석은 인장하중만 적용된 경우와 열하중만 적용된 경우, 그리고 인장하중을 우선적으로 가한 후에 양단을 고정시키고 열하중을 가하는 방법에 대하여 수행되었으며, 각각의 경우에 대해 시험편의 국부적 팽창량, 전체응력 및 노치 부위에서의 최대응력에 대해 해석하였다.

3.2 유한요소해석 결과

일반적인 인장하중에 의해 시험편이 걸리는 응력 및 연신량은 각각 이론적 계산에 의해 식(2), 식(3) 및 식(4)와 같다는 것을 알 수 있다. 여기서 F값은 실제 시험편의 하향복점 부근 하중 값인 51,000N을 적용하였다.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{51000N}{25 \times 6 \times 10^{-6}} = 340MPa \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{340 \times 10^6}{193 \times 10^9} = 0.00176 \quad (3)$$

$$\Delta L = \epsilon \times L = 0.4227mm \quad (4)$$

유한요소해석 결과 또한 Fig. 3과 같이 하중만 적용된 경우 시험편 전체에서 약 350MPa 정도의 응력이 분포되어 있으며 노치부위에서는 국부적으로 800MPa 정도의 응력집중이 발생했음을 알 수 있다. 연신량의 경우도 식(4)와 같이 0.423mm 정도 팽창이 일어났음을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 시험편 양단을 구속하고 노치를 중심으로 약 60mm 정도에 걸쳐 국부적으로 450°C의 열을 가한 후 발생된 응력분포의 변화를 나타내고 있다. 이 경우 시험편 전체적으로 분포된 응력은 150MPa 정도로 Fig. 3의 인장하중만 적용된 결과에 비해 낮은 응력분포를 갖지만 노치부위에서는 약 2,000MPa 정도의 응력집중이 일어나고 있다. 인장하중만 적용한 경우에 비

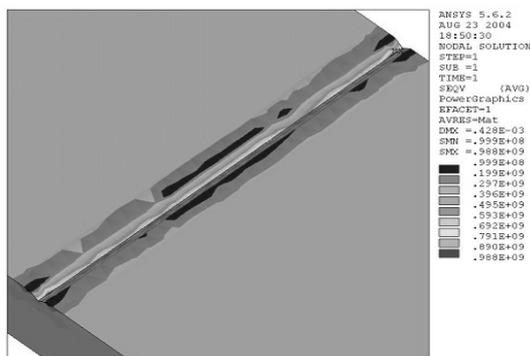


Fig. 3 Distribution of Von-Mises stress applied for only tension loads

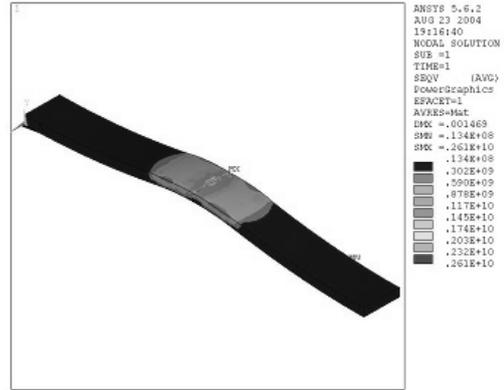


Fig. 4 Distribution of Von-Mises stress applied for only thermal loads

해 응력집중이 더욱 큰 이유는 열을 가한 쪽의 표면이 온도에 의해 팽창하려는 성질을 갖지만 양단이 구속되어 있어 자유로운 팽창이 어렵기 때문에 상대적으로 압축응력이 발생하기 때문이다. 폰-미세스 (Von-Mises) 이론을 적용하여 계산한 결과 또한 식(5)와 같이 유한요소해석결과와 유사한 값을 보여준다.

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E\alpha(\Delta T)}{1 - \nu} = 2,175MPa \quad (5)$$

마지막으로 Fig. 5는 인장하중을 우선적으로 가한 후 양단을 고정시키고 열하중을 적용한 결과를 보여주고 있는데, 이 경우는 약 0.54mm의 국부적인 팽창과 함께 1,700MPa 정도의 응력집중을 보이며 전체적으로 시험편에 잔류하는 응력은 약 400MPa가 나타났다. 여기서는 하향복점까지 인장한 상태에서 양단을 구속하고 열하중을 가하였기 때문에, 인장 시 우선적으로 재료에 존재하던 잔류응력이 이완되면서 전체적으로 폰미세스 응력은 열하중만 적용한 경우에 비해 약간 감소된 결과가 나타났다. 그러나 450°C로 가열했을 때 0.54mm의

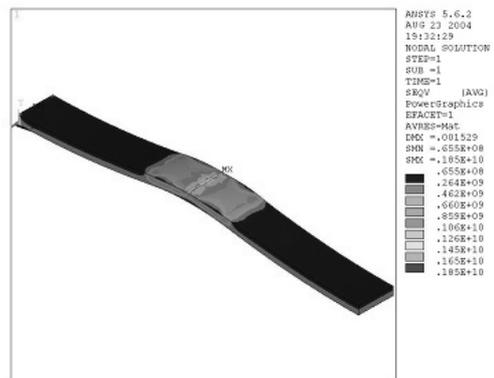


Fig. 5 Distribution of Von-Mises stress applied for thermal loads with tension

비교적 높은 팽창량은 상온으로 냉각 시에도 또한 재료의 상당한 수축을 수반함을 의미하므로, 전체적으로 시험편에 미리 인장 응력을 가한 뒤에 온도 변화를 통해 균열 발생을 유도하는 것이 열피로 균열 시험편 제작을 위한 최상의 방법으로 판단된다.

4. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 재료는 이미 언급된 바와 같이 RCS의 배관재료로 사용되는 오스테나이트계 STS 304 압연강으로 외부 표면은 밀링가공을 통해 표면의 거칠기를 최대로 줄이고자 하였다. 노치는 30°의 각도로 시험편의 정 중앙에 가공하였으며 그 깊이는 0.3mm이었다. 시험편은 하향복점 한계인 51,000N으로 인장하중을 가한 뒤 그 상태에서 450℃로 1분간 가열하고 다시 20℃로 1분간 냉각시키는 방법을 적용하였다. 드라이아이스와 염화나트륨, 그리고 물을 혼합한 냉각수를 분사기를 통해 시험편에 직접 분사시키는 방법을 이용하였으며 열전대(thermocouple)를 통해 시험편의 온도 변화를 측정하였다.

실험 장치는 10톤 용량의 기계식 인장-압축 시험기(Ball screw type)로서 20kW급의 고주파 유도가열기(HF induction heater), 하중, 변위, 온도 컨트롤러 및 실험결과 기록계 등과 같이 구성되었으며, 장치 제어용 모식도(block diagram)는 Fig. 6에 도식적으로 나타나 있다. 실험이 진행되는 동안 실제 실험을 통해 측정된 하중 및 연신량의 변화와 유한요소해석을 통해 얻어진 예측 값을 비교하기 위하여 실시간 온도 변화에 따른 하중 및 변위를 기록하였다. 이후 장기간 열피로를 받아 균열이 발생된 시험편은 균열의 거시적 특징을 파악한 후 파단을 통해 균열의 단면을 SEM으로 확인하였다. 또한 일반적인 기계적 피로균열과의 거시적 차이점을 비교하였다.

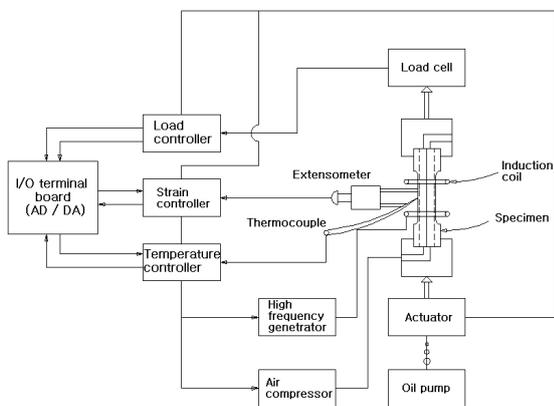


Fig. 6 Block diagram of control system used for thermal fatigue test

5. 실험결과

유한요소해석을 통해 적절한 실험 방법을 선정하고 이에 따라 실험을 실시한 결과 약 17,000cycle, 560 시간 (1cycle/2min) 만에 초기 균열이 발생하기 시작하였으며 측면 균열의 깊이가 시편 두께의 약 40% 정도 진전될 때까지 실험을 지속하였다. 균열은 1/100mm 까지 측정이 가능한 이동식 현미경(travelling microscope)을 이용하여 관찰 및 측정하였다. 최종적으로 약 22,000cycle에서 실험을 중단하였으며 이때까지 걸린 시간은 약 730시간이었다. 실험동안 가열 및 냉각으로 인하여 양단이 구속되어 수축 및 팽창이 자유롭지 못한 시험편에 전체적으로 걸리는 응력은 Fig. 7과 같이 450℃에서 70MPa 정도를 나타내지만, 20℃로 냉각이 되면 420MPa 정도로 증가하게 된다. 즉 1 사이클마다 $\Delta T = 430\text{℃}$ 정도의 변화를 보이며, 이 경우 전체적으로 350MPa 정도의 응력구배가 일어나 피로하중으로 변환된다. 특히 응력이 집중되는 노치 부위의 최대 응력은 실제 실험을 통해 얻을 수는 없었지만, 식 (1) 및 유한요소해석 결과를 토대로 예상할 때 약 1,200MPa 정도의 하중을 받을 것으로 예상된다.

Fig. 8은 열피로 시험이 완료된 후 노치 윗면을 연삭

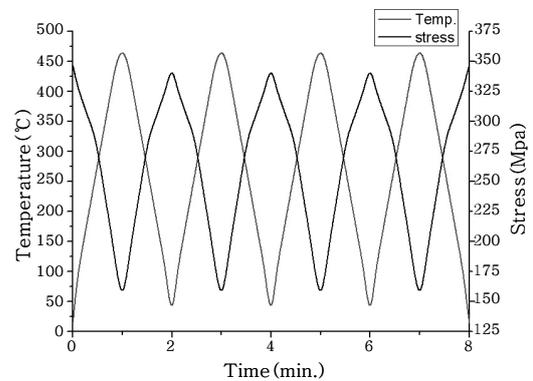
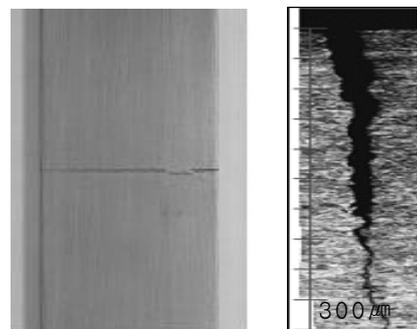


Fig. 7 Temperature and stress variable depend on time



(a) Top view (b) Side view

Fig. 8 Outside view of thermal fatigue crack

하여 균열이 표면에 드러난 시험편의 윗면 및 단면에서의 균열 진전형상을 보여주고 있다. 균열이 시작된 노치 부위는 썩기 형태를 이루면서 균열의 간격이 150 μm 가량으로 상대적으로 넓은 편이나 균열의 첨단부에서는 수 μm 로 그 폭이 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 균열은 고온에서 발생하는 압축응력과 냉각 시 인장응력의 영향으로 전단형의 균열 내지 미끄럼이 초기에 발생하고, 마침내 개구형의 안정 성장으로 이행하여 피로줄무늬(fatigue striation)를 형성하면서 성장한 후 취성 내지 연성파괴를 교차시키면서 급속 파단에 이른 것으로 판단된다. 이와 같은 형태로 발생한 균열은 ASTM E399에 제시된 CT 시험편의 피로파괴 시험에서의 균열진전 거동 형상과 매우 유사한 형태를 띠고 있음을 알 수 있으며 외관상의 차이는 기계적 피로 균열과 크게 다르지 않았다. 그러나 문헌에 의하면^{1,6-7)} 열피로 균열의 경우 기계적 피로균열과는 달리 균열 주위에 산화막이 분포한다고 보고되어 있는데 실제 시험된 시험편의 표면 또한 Fig. 9와 같이 균열 주변으로 산화막이 분포되어 있으며 균열에서 멀어질수록 감소되고 있는 것을 확인할 수 있다.

이후 시험편을 파단하여 열피로를 받아 형성된 균열 단면을 SEM으로 확인한 결과는 Fig. 10과 같다. 파단

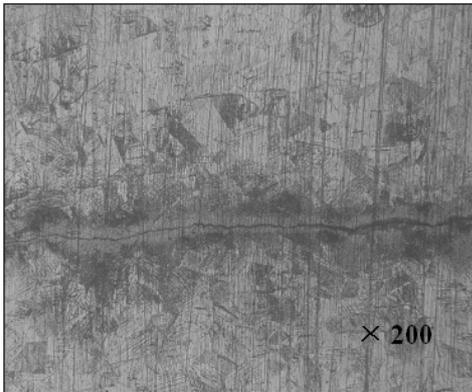


Fig. 9 Oxide layer around the crack

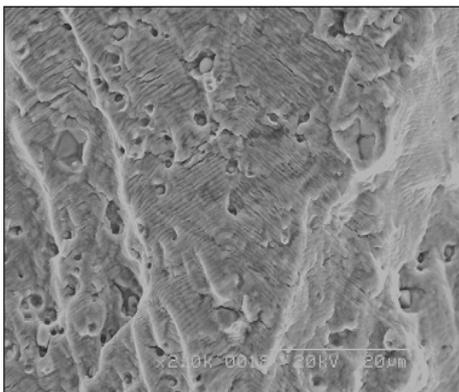


Fig. 10 SEM micrograph on fracture surface

면에 균열이 균열면을 따라 전파 할 때 반복하중에 의한 균열면의 여단힘에 따라 생성된 피로파면 특유의 전형적인 형태를 관찰할 수 있었는데 이는 하나의 열응력 사이클이 하나의 피로줄무늬를 형성하면서 균열의 진전을 만들어 내는 것으로 피로줄무늬의 간격은 응력과 변형의 구간에 의존한다. 피로줄무늬의 정밀 분석 결과, 균열의 전파 속도가 빠른 곳에서는 약 1 $\mu\text{m}/\text{cycle}$ 이상의 전파속도가 관찰되기도 하였으나 대부분의 경우에는 그 간격이 매우 조밀하여 이 속도에 크게 못 미치고 서서히 균열이 진전된 것으로 판단된다.

실제 비파괴 검사 훈련용 시험편으로 사용하기 위하여 평판에 EDM을 통해 인공결함을 제작하는 대신에 노치의 형태를 약간 변형시킬 경우 실제 자연균열과 유사한 다양한 형상의 결함을 얻어낼 수 있으며 그 예가 Fig. 11에 제시되어 있다. Fig. 11과 같이 일부분에만 미세한 균열을 제작하거나 또는 균집균열을 얻고자 할 때 노치의 형상, 방향 및 그 길이를 달리한다면 목적에 맞는 시험편의 제작이 가능할 것이다. 이와 같은 결함 제작 방법은 모재에만 국한되는 것이 아니라 용접부 또는 열영향부에 노치를 가공할 경우 또한 원하는 위치에 또한 결함제작이 가능할 것이다. 이러한 결함제작 방법이 표준화 된다면 외국에 의존하던 기량시험편의 제작에 대한 국내 기술 확보는 물론 비파괴 검사의 기술적 수준이 한 단계 도약할 것으로 기대된다.

6. 결 론

본 연구에서는 원자력 배관재 신뢰성 향상을 위한 비파괴 검사자의 기량 검증용 열피로 균열 시험편의 제작법에 대한 연구를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) STS 304 평판 위에 열하중 만으로 균열을 유도하여 실제 열피로 균열과 유사한 특성을 갖는 다양한 형상의 비파괴 검사용 모의시험편을 제작하는데 성공하였다.
- 2) 다양한 열피로 균열 제작 방법 중 가장 이상적인 실험 조건을 적용하기 위해 유한요소해석을 실시한 결과, 시험편에 미리 인장 형태의 응력을 가한 뒤에 양단

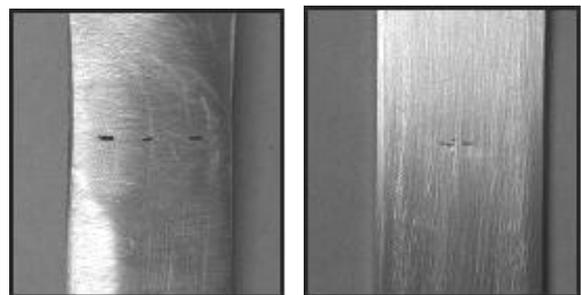


Fig. 11 Various crack fabrication to use in performance demonstration inspection

을 구속시킨 후 온도 변화를 통해 균열 발생을 유도하는 것이 시험편 제작 시간의 단축에 가장 효과적이며, 이렇게 제작된 시편은 실제 열피로 균열의 특성과도 가장 근접하였다.

2) 시험편의 하향복점 정도의 인장 응력을 가한 후 양단을 구속시키고 $\Delta T = 430^\circ\text{C}$ 의 온도변화 조건에서 시험편 제작 결과, 초기 균열은 약 17,000cycle에서 발생하였으며 22,000cycle에서는 열피로 균열이 시험편 전체두께의 약 40%까지 진전되었다. 이 경우, 시험편에 실제 가해지는 열응력 변화는 약 350MPa로 측정되었다.

3) 표면에 드러난 시험편의 열피로 균열 진전형상은 기계적 피로파괴 시험편에서 발생하는 균열형태와 크게 다르지 않았지만, 기계적 피로 균열과 달리 열피로 균열 주위는 산화막이 존재하는 것을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 (No.M20604005402-06B040040210) 사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Syavash Ensha : Handbook of Case Histories in Failure Analysis(1st Edition), ASM **vol.2**, 363-367
2. D. H. Hur, M. S. Choi, D. H. Lee and J. H. Han, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing., **20-5** (2000), 451-456 (in Korean)

3. S. H. Kang, J. H. Lee, S. W. Choi and B. Y. Lee, Key Engineering Materials, **270-273** (2004), 390-395
4. Klaus W. Bieniussa and Hans Reck, Nuclear Engineering and Design, **190** (1999), 239
5. Y. J. Yu and S. H. Park, Nuclear Engineering and Design, **178** (1997), 211-218
6. M. Guyette and M. De Smet, Nuclear Engineering and Design, **153** (1995), 183-190
7. C. S. Oh, International Journal of Fatigue, **34** (2001), 241-247
8. A. Fissolo, B. Marini, G. Nais, and P. Wident, Journal of Nuclear Materials, **233-237** (1996), 156-161
9. M. Hayashi, Nuclear Engineering and Design, **184** (1998), 135-144
10. A. Srivastava, V. Joshi and R. Shivpuri, Wear, **256** (2004), 38-43
11. J. Sjostrom, and J. Bergstrom, Journal of Materials Processing Technology, **153-154** (2004), 1089-1096
12. T. Tokiyoshi, F. Kawashima, T. Igari and H. Kino, International Journal of Pressure Vessels and Piping **81** (2001), 837-845
13. B. B. Kerezsi, A. G. Kotousov and W. H. Price, International Journal of Pressure Vessels and Piping **77** (2000), 425-434
14. G. Czuck, C. Mattheck, D. Munz and H. Stamm, Nuclear Engineering and Design, **84** (1985), 189-199
15. R. Shivpuri, Y. L. chu, K. Venkatesan, J. R. Conrad, K. Sridharan, M. Shamim and R. P. Fetherston, Wear, **192** (1996), 49-55