

초음파현미경의 V(z) 곡선의 관찰과 크리프 손상 평가에의 응용 Observation of V(z) Curve of Scanning Acoustic Microscopy and it's application Creep Damage Assessment

*#박태성¹, 박익근¹, 김정석¹, 한의정², 이창준², 이승석³

*#T. S. Park¹(taesung78@snut.ac.kr), I. K. Park¹, C. S. Kim¹, E. J. Han², C. J. Lee², S. S. Lee³
¹ 서울산업대학교 기계공학과, ² 서울산업대학교 공동실험실습관, ³ 한국표준과학연구원

Key words : Scanning Acoustic Microscopy, V(z) curve, Surface Acoustic Wave

1. 서론

발전소 가동효율 증가추세와 가동, 정지횟수 증가 및 사용조건이 가혹화와 함께 고온, 고압 설비재료의 열화도가 가속화됨에 따라 이들 발전설비에서 발생하는 경년열화 손상에 대한 신뢰성 높은 검사가 요구되고 있다. 또한 발전용 보일러 플랜트나 화학 플랜트 등의 고온기기에 있어서 노후화 대책과 안전성에 대한 문제가 큰 관심을 모으고 있다. 이처럼, 장기간 고온고압의 조건하에서 노출되어 있는 구조재료는, 크리프, 부식, 피로 등의 경년 열화·손상으로 인하여 플랜트의 안전성 및 신뢰성 향상에 많은 문제점을 야기하고 있다. 특히, 발전소 고온, 고압설비 재료의 대표적인 경년열화인 크리프손상 상태를 신속하고 정확하게 진단할 수 있고 진단결과에 따라 적절한 유지보수를 통하여 고온, 고압설비의 안전성 및 장수명화를 유도할 수 있는 비파괴검사 기술을 확보하여 고온, 고압설비의 불시 사고를 예방할 필요가 있다. 흔히 주요 고온배관설비에서 발생하는 크리프 손상을 측정하는 비파괴적 측정방법에는 레프리카, 전기저항법 및 경도법 등이 적용되고 있다. 이러한 기법들은 그 절차가 까다롭거나 구조물에 미세한 영향을 주기 때문에 연구자들은 초음파법[1]에 주목하기 시작하였다. 초음파를 이용한 크리프 손상을 측정하는 선형 연구자로 Ledbetter[2] 등은 크리프 손상을 받은 Cu 에서 초음파 속도가 감소함을 보고하였고 Stigh[3] 등은 크리프 파단된 AISI316 강에서 8%의 속도 감소를 확인하였다. 그러나 앞에서 열거한 측정방법들은 절차 및 준비가 복잡할 뿐만 아니라 접근이 가능한 설비표면에만 적용되는 제한점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 높은 측정정밀도를 가지는 초음파현미경(scanning acoustic microscope:SAM)을 이용하여 크리프 상태를 평가하기 위해 초음파현미경의 기하학적 원리와 V(z)곡선법을 소개하고, 초음파현미경의 누설탄성표면파의 속도측정 결과에 근거하여 크리프 시험한 시험편 내에서 미세조직 분석과 기계적 특성을 비교분석하여 V(z)곡선법에 의한 크리프 평가법의 유용성 유무를 검증하고자 한다.

2. 관련이론

Fig. 1 과 같이 탐촉자의 구성요소는 압전현상이 일어나는 압전소자(ZnO)와 초음파 빔을 집속시켜줄 수 있는 렌즈(lens)와 압전소자에서 생성된 초음파가 렌즈까지 도달하고 또한 렌즈와의 구면 수차를 작게 만들기 위해 적용된 사파이어매질로 구성되어 있다. 디포커스 모드에서는 집속매질을 지난 초음파가 시험편을 통과하며 모드변환이 일어나 종파와 횡파의 초점이 다른 두 개의 파가 생성되며, 렌즈에서 여러 가지 각도의 초음파중 스넬의 법칙에 의해 제 2 임계각이 되는 부분에서는 누설탄성 표면파(leaky surface acoustic wave:LSAW)가 발생한다. 이러한 디포커스 모드는 재료내부의 특성에 대해서는 벌크파인 종파와 횡파에 의해 영향을 받으며, 재료표면의 특성에 대해서는 표면파인 LSAW 에 의해 영향을 받아 이미지로 표현하게 된다.

V(z)곡선은 Fig. 1 에서 시험편에서 직접 반사해오는

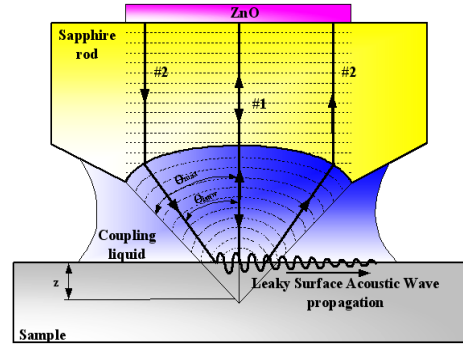


Fig. 1 Details of acoustic lens and interference of acoustic waves

#1 과 렌즈에서 시험편 표면에 대해 제 2 임계각으로 입사해 누설탄성표면파가 시험편의 표면을 따라 전파하여 대칭적인 경로를 따라 수신되는 #2 와의 간섭(interference)에 의해 발생한다. 이 때 Δz 는 고속 푸리에 변환을 통한 V(z) 곡선으로 측정하고 누설탄성표면파의 속도는 아래 식으로부터 계산하였다. [4]

$$V_{LSAW} = \frac{V_w}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{V_w}{2f\Delta z}\right)^2}} \quad (1)$$

여기서, f 는 주파수, V_w 는 중간매질인 물속에서의 음속, Δz 는 V(z)곡선의 한 파장 거리이다. Δz 는 상대위상변화가 2π 가 되는데 필요한 z 방향의 거리로써 중간매질에서의 파장(λ_w)과 속도 (V_w) 그리고 표면파의 속도(V_R)의 함수이고 스넬의 법칙에 의해 레일리 임계각, $R = \sin^{-1}(V_w/V_R)$, 의 관계로 표현되며 다음의 식과 같다[4].

$$\Delta z = \frac{1}{2(1 - \cos \theta_R)} \quad (2)$$

3. 실험방법

크리프 시험편은 1100°C에서 4 시간 노달라이징 처리 후 공냉을 하고 700°C에서 10 시간 템퍼링 처리한 것을 사용하였다. 크리프를 가속화시켜 크리프 시간에 따른 미세조직의 변화를 평가하기 위해 700°C에서 0~3,286 시간 범위에서 가속 크리프 시험을 시행하였고 주사전자현미경(scanning electron microscopy)과 전자투과현미경(Transmission Electron Microscopy)를 이용하여 표면부에 대한 미세조직을 관찰했다.

V(z)곡선법을 이용한 표면파의 속도는 5~200MHz 의 주파수를 발생할 수 있는 초음파현미경(Hitachi, HSAM220)을 사용하여 측정하였으며 이 때의 사용 주파수는 200MHz 인 탐촉자를 사용하였다. 초음파현미경으로부터 얻은 V(z) 곡선으로부터 Δz 를 측정하였고 표면파속도는 식(1)로 계산하였다. 측정의 오차를 줄이기 위하여 동일한 조건으로 10 회를 측정하여 평균값을 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 11cR-3.45W 강의 미세조직 평가

Fig. 2 는 크리프 시간에 따른 표면의 미세조직 변화를 관찰한 사진이다. 크리프 시간의 증가에 따라서 석출물들이 조대화 되고 특히, PAG 입계석출물의 조대화는 매우 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다. 크리프 시간의 증가에 따라서 석출물의 크기가 성장하고 단위면적당 개수는 감소한다. 이러한 석출물의 조대화는 확산기구에 따라서 석출물과 기지와의 계면에너지를 줄이면서 성장하게 되는 Oswald repening 에 의해 일어난 것이며 석출강화와 고용강화 효과를 감소시키므로 충격에너지를 크게 감소시키고 크리프 저항을 현저하게 감소시키는 원인으로 보고되고 있다 [5]. 크리프 시간의 증가에 따라서 마르텐사이트 래스 경계의 미세한 석출물들이 조대화되고 마르텐사이트 래스내의 전위밀도 감소와 마르텐사이트 래스폭이 성장하였다. 이를 Fig 3 에서 보여주고 있다. 래스 폭의 증가는 래스주위에 형성된 전위의 풀립과 이동에 의해서 나타나게 되며 래스경계에 존재하던 미세한 석출물들의 조대화로 석출물에 의한 래스의 고착효과가 미비해 지므로 나타나는 현상이라 할 수 있다. 이와 같은 래스폭의 증가에 대해서 Abe 는 9CrW 강에서 크리프 손상에 의한 마르텐사이트 래스 폭의 증가가 전위의 회복과 마르텐사이트 래스 경계들의 재결합에 의해 마르텐사이트 래스경계들이 소멸된다고 보고하였다[6].

4.2 V(z)곡선을 이용한 누설탄성표면파의 음속 측정

Fig.4 는 열화시간에 따른 V(z) 곡선들을 보여주고 있다. 열화시간에 따라 Δz 값이 감소함을 볼 수 있다. 식 (1)을 이용하여 누설탄성표면파의 속도를 계산하였다. Fig.5 에서와 같이 열화시간에 따른 누설탄성파의 음속은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 석출물이 증가하면서 마르텐사이트 래스폭이 증가하게 되고 전위의 회복에 의하여 격자 뒤틀림이 감소하면서 속도를 증가시킨다고 사료된다.

4. 결론

V(z) 곡선법으로 측정된 표면파의 속도변화를 이용하여 크리프 손상재에 대한 평가를 하고자 하였다. 또한 전자현미경을 통해 미세구조를 관찰하고 V(z) 곡선법을 이용한 누설탄성표면파의 속도 측정 결과와 상관관계를 관찰하였다. 표면파속도는 열화시간의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으며 이를 근거로 V(z) 곡선법에 의한 크리프 평가법의 유용성 유무를 검증하였다.

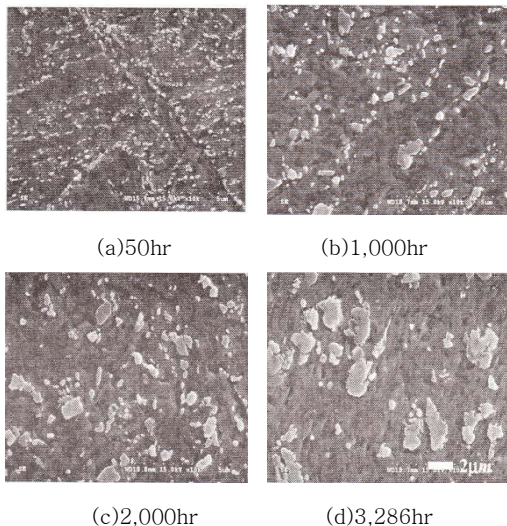


Fig. 2 SEM micrographs showing precipitates morphology in creep test at 700 °C

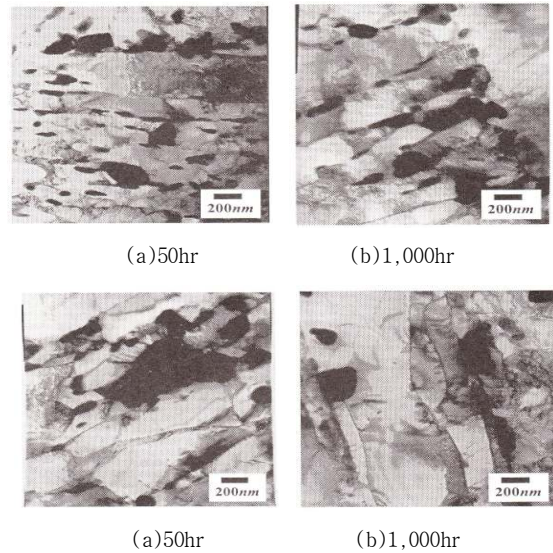


Fig. 3 TEM micrographs showing dislocation substructure and coarsening of precipitates

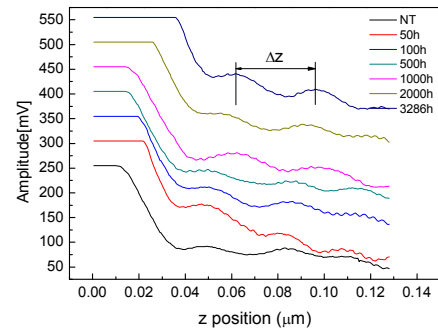


Fig. 4 V(z) curve with creep time

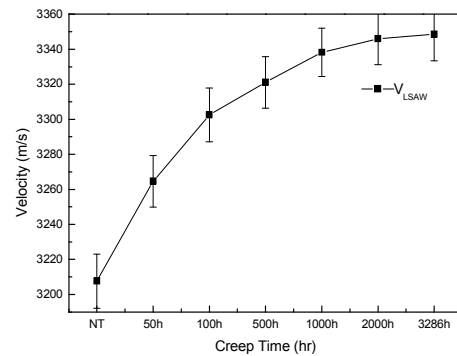


Fig. 5 Velocity changes of leaky surface acoustic wave by V(z)

후기

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2008-03516)

참고문헌

1. S. Hirsekorn, "The scattering of ultrasonic waves by polycrystals", J. Acoust. Soc. Am., Vol.72, No.3, 1992
2. M. J. Ledbetter, Acta Metall., Vol.2393, No.35, 1987
3. U. Stigh, Eng. Fract. Mech., Vol.28, No.1, 1987
4. R. J. M. Frnseca, et al., "Scanning acoustic microscopy-recent applications in materials science," Advanced Materials, Vol. 5, pp. 508-519, (1993)
5. G. Eggeler: Acta Metall., Vol. 37, 3225, 1989
6. F. Abe: Mater. Sci. Eng., Vol. 565, A387~389, 2004