

음향비선형성 정밀계측을 통한 고온재료의 미세구조특성평가

Microstructural characterization of high temperature materials by précising measurement of acoustic nonlinearity

*#김정석¹, 장경영², 이태훈¹

*# C. S. Kim (chs2865@hanyang.ac.kr)¹, K. Y. Jhang², T. H. Lee¹

¹ 한양대학교 자동차공학과, ² 한양대학교 기계공학과

Key words : Microstructural characterization, High temperature materials, Acoustic nonlinearity

1. 서론

고체 재료내부를 전파하는 초음파의 비선형적 특성은 전위, 석출물, 피로균열 등 재료 내 미시적인 결함을 평가하는데 널리 이용되고 있다. 현재 전세계적으로 구조물외에 부품소재의 안전성과 견정성에 대한 정밀평가법으로 폭넓게 연구가 진행되고 있다. 초음파의 비선형특성은 재료내의 원자단위결합에서부터 전위와 석출물 등 격자변형을 일으켜 응력-변위특성의 비선형적 거동을 충분히 크게하여 전파하는 초음파의 왜곡을 야기하는데 있다 [1,2]. 본 연구의 목적은 다양한 응용분야에 사용되고 있는 고온재료들에 나타나는 대표적인 미세조직적 변화현상을 미세조직의 변화에 매우 민감한 초음파의 비선형성을 이용하여 그 상관성을 살펴보고자 하였다. 먼저 발전설비 및 제트엔진의 터빈 블레이드 재료인 IN738 합금은 고온에서의 기계적물성의 우수성으로 가장 널리 사용되고 있다. 따라서 니켈기 초내열합금의 크리프 손상에 대한 미세조직특성을 초음파 비선형성을 이용하여 평가하였다. 다음은 터빈, 밸브 등 원자력 및 화력 발전소의 내열소재인 12Cr 강으로 사용되고 있는 내열강의 크리프 특성을 초음파 비선형성을 이용하여 실험적으로 연구하였다. 마지막으로 상업용 원자로용 압력용기 및 이중용접재료로 가장 널리 사용되고 있는 SA508 저합금강의 품질 열처리 조건 중 오스테나이트링과 템퍼링 조건을 변화시켜 모상의 오스테나이트 결정립크기와 석출물의 크기를 제어하고, 이에 따른 미세구조적 변화와 초음파 비선형 특성간의 상호관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

피로 손상제와 등온열화제에 대한 비선형성을 측정하기 위해서 압전소자를 이용하여 f-2f법을 사용하였다. 비선형 측정을 위한 계측시스템으로 초음파신호분석장치 (RAM10000)를 송수신장비로 사용하였고 이는 고전압감쇠기 (RA-31), 50 오옴 감쇠기 (RL-50) 그리고 6dB 감쇠기 (RA-6)로 구성되었다. 기본주파수성분을 갖는 초음파를 발생시키기위해 주파수가 5MHz인 중과압전소자를 사용하고 고조파성분의 초음파를 수신하기 위해 10MHz 압전소자를 사용하였다. 수신된 신호를 고속퓨리에 변환하므로써 기본주파수와 고조파 성분에 대한 변위진폭 A1 과 A2 를 측정하였다. 시험편의 한쪽 면에 압전소자를 접촉하여 기본주파수 성분 $w_0=5.1$ MHz를 입사하였다.

3. 결과

열처리와 크리프 변형에 의한 미세조직의 변화로써 크리프시간의 증가에 따라서 시효과정에서 생성된 미세한 2 차 감마프라임은 점차 성장하고 조대화되며, 조대한 1 차 감마프라임은 크리프 응력에 수직한 방향으로 래프팅현상을 나타내었다 (참고 Fig. 1(c), Fig. 1(d)). Fig. 1(a)는 응력에 따른 전형적인 크리프 곡선을 나타내었다. Fig. 1(b)는 초음파비선형의 변화를

나타내었다. 크리프 시간의 증가에 따라서 비선형성도 증가하였다. 실험적으로 측정된 석출물의 격자상수는 용체화처리후 3.604 Å 이고 175 MPa 의 응력에서 과단후에는 3.611 Å 으로 증가하였다. 이는 기지와 석출물간의 불일치도의 증가를 나타내며 용체화처리후의 불일치도는 0.44% 이며 과단후에는 0.63%로 실험적으로 계산하였다. 물리적으로 상간격자의 불일치도의 증가는 두 상의 계면에 국부적인 변형을 증가시키게 되고 비선형적인 응력-변형의 관계를 증가시키게 된다. 따라서 탄성 초음파가 고체내를 전파할 경우 이들 상간계면의 불일치 증가에 따라서 초음파의 왜곡이 일어나고 초음파 비선형성은 증가를 하게 된다 [3,4].

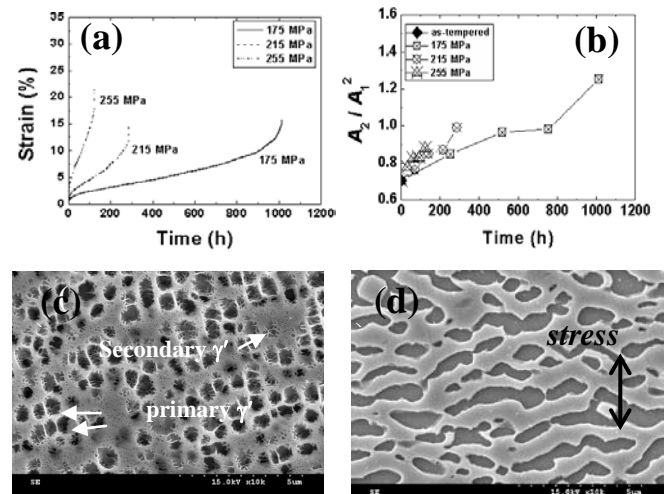


Fig. 1 Experimental results of high temperature creep in IN 738 alloy.

Fig. 2 는 크리프시간이 증가함에 따라서 초음파 비선형성과 크리프 변형 그리고 크리프전과 과단후의 투과전자현미경사진을 나타낸 것이다. 크리프 곡선은 전형적인 3 차 크리프 특성을 나타내었고 비선형성은 크리프 초기 급격하게 감소하며 파괴전까지 지속적인 감소를 보였다. 과단 후에는 증가를 하였다. 미소한 석출물은 전체적으로 조대화되고 전위밀도의 감소와 래스폭의 현저한 증가를 보였다. 본 연구에서 초음파 비선형성이 감소를 보이는 것은 전위밀도 감소로 인한 전위유도 변형율의 감소, 석출물 조대화로 인한 정합변형율의 감소, 그리고 마지막으로 래스폭의 조대화에 따른 래스입계 분율의 감소로 인한 래스입계에서의 계면변형의 감소로 초음파 비선형성은 감소를 한 것으로 판단된다. 과단후에 초음파 비선형성의 증가는 오스테나이트와 페킷에 생성된 크리프손상의 대표적인 미세 보이드의 생성 때문으로 판단된다.

Fig. 3 은 SA508 저탄소강의 열처리 조건에 따른 입사 초음파의 크기에 따른 초음파 비선형파라미터의 변화를 나타낸 것이다. 초음파의 비선형성에 대한 결정립의 영향은 결정립의 크기가 클수록 비선형 파라미터가 낮았다.

이는 결정립계가 입내보다도 높은 계면에너지와 높은 전위밀도 그리고 인접결정립과의 높은 방위차를 가지므로 결정립계는 국부적인 변위를 증가시키며 재료내를 전파하는 초음파를 왜곡시키기에 충분하기 때문이다. 석출물의 영향으로 템퍼링 시간이 증가함에 따라서 초음파 비선형성은 감소하였다. 이는 템퍼링시간이 증가함에 안정상이 아닌 준정합의 Mo₂C는 기지로 급격하게 재용되어 기지격자와 석출물간의 격자변형 정도를 감소시키기 때문이다. 이상의 결과로부터 초음파 비선형성에 미치는 결정립과 석출물의 영향을 고찰하였고 압력용기강인 SA508 저합금강의 미세조직적 변화를 실험적으로 평가하였다. 하지만 상부베이나이트조직을 갖는 SA508 저합금강은 미세조직적으로 복잡한 구조를 가지므로 단순히 결정립의 크기와 석출물크기 및 분포만의 효과를 분리하는 것은 매우 어려운 일이므로 폭넓고 다양한 연구가 수행되어야 한다.

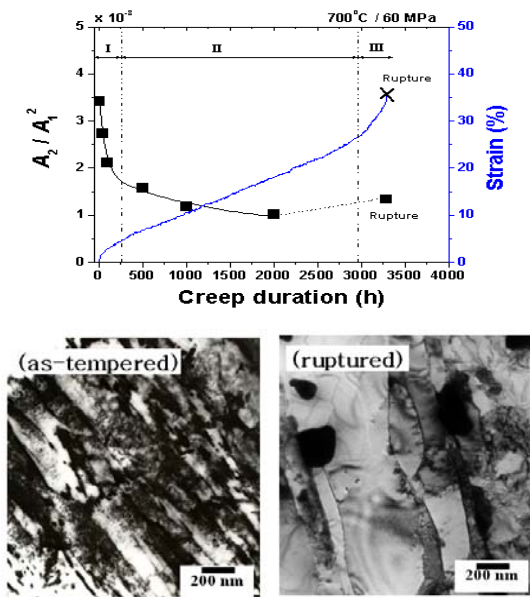


Fig. 2 Experimental results of high temperature creep in heat resistance steel.

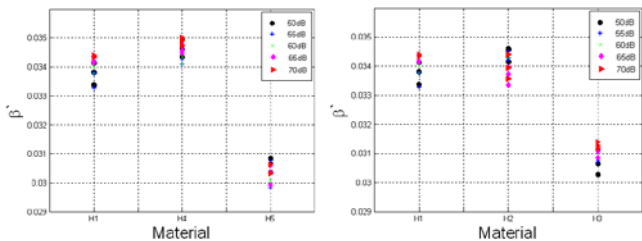


Fig. 3 Nonlinear parameter of SA508 at each tempering condition with induced voltages.

Fig. 4 는 피로를 가하지 않은 시편과 피로를 가한 시편에서 시편의 중앙으로부터 좌우 6 cm 까지 위치를 달리하며 비선형 파라미터를 측정된 결과이다. 두 실험결과는 피로를 가하지 않은 상태의 시편에서의 비선형 파라미터 값의 평균값과의 비로 나타내었다. 피로를 가하지 않은 시편은 시편의 전 구간에 걸쳐 위치와 무관하게 비슷한 비선형 파라미터를 갖는다. 반면 피로손상 시편의 경우 시편의 중심으로 갈수록 비선형 파라미터가 크게 나타난다. 중심부와 가장자리의 비선형 파라미터의 차이는 약 30% 정도이다. 시편의

위치에 따라서 비선형 파라미터가 차이를 보이는 것은 피로시험동안 중심부가 응력 집중부로 작용하여 재료의 변형이 크고, 그 만큼 손상이 커졌기 때문으로 판단된다.

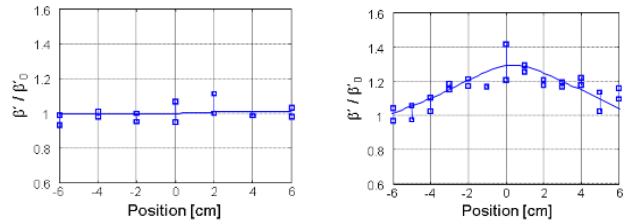


Fig. 4 Relative nonlinearity parameter with distance from center each fatigued specimen.

4. 결론

고온과 고압하에서 사용되는 구조재료들은 그 손상기구가 다양하지만 결국 고온에서의 기계적인 강도저하현상으로 나타나게 된다. 이러한 고온강도의 저하는 균열의 생성 전 다양한 미세조직의 변화를 동반하게 된다. 본 연구의 결과 터빈 블레이드 재료인 IN738 합금은 석출물의 조대화 및 래프팅현상이 나타나며 이러한 석출물과 기지간의 불일치의 증가는 재료내를 전파하는 탄성파의 국부적인 위상속도차를 가져와 초음파의 비선형성을 증가시키게됨을 실험적으로 규명하였다. 터빈과 밸브로 사용되는 발전소재인 12 크롬강의 크리프손상은 전위회복과 석출물조대화 및 래스펙의 현저한 증가로 초음파의 비선형성을 감소시킴을 보였고 이를 격자 뒤틀림의 증가현상으로 설명하였다. 압력용기 및 이중재료로 사용되는 SA508 합금에 대한 열처리로 석출물과 결정립의 변화 역시 초음파의 비선형과 매우 밀접한 상관성을 나타내었고 결정립의 크기와 매우 밀접한 관계를 나타내었다. 발전설비, 유화설비의 배관재료로 널리 사용되는 스테인레스 316 강은 피로손상 전과 후에 대한 실험결과 피로손상으로 재료내 누적되어진 변형정도에 따라서 초음파 비선형성이 크게 차이가 남을 알 수 있었다. 결과적으로 다양한 구조재의 손상거동과 초음파의 비선형성의 상관성을 규명함으로써 사용중인 구조재의 안전성과 건전성 및 수평을 평가하는데 매우 중요한 평가기법으로의 적용 가능성이 탁월하다고 판단된다 [5].

후기

이 논문은 2007 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-00467).

참고문헌

- Kim, C. S., and Park, I. K., "Microstructural Degradation Assessment in Pressure Vessel Steel by Harmonic Generation Technique," *Journal of Nuclear Science Technology*, **45**, 1036-1040, 2008.
- Kim, C. S., Park, I. K., and Jhang, K. Y., "Nonlinear ultrasonic characterization of thermal degradation in ferritic 2.25Cr-1Mo steel," *NDT E International*, **42**, 204-209, 2009.
- Kim, C. S., Kwun, S. I., Lissenden, Cliff J., "Influence of precipitates and dislocations on the acoustic nonlinearity in metallic materials," *Journal of Korean Physical Society*, **55**, 528-532, 2009.
- Kim, C. S., Lissenden, Cliff J., "Precipitate contribution to the acoustic nonlinearity in nickel-based superalloy," *Chinese Physics Letters*, **26**, 086107, 2009.
- Choi, I. H., Lee, T. H., and Jhang, K. Y., "Evaluation of fatigue degradation using nonlinear ultrasonics," *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, **29**, 1433-1438, 2010.