

초음파 주파수분석법에 의한 발전소 고온배관재료의 크리프손상 평가

정민화* · 이상국**

(99년 4월 20일 접수)

Creep Damage Evaluation of High-Temperature Pipeline Material for Fossil Power Plant by Ultrasonic Frequency Analysis Spectrum Method

Min-Hwa Chung* · Sang-Guk Lee**

Key Words : Creep Damage(크리프손상), Ultrasonic Frequency Analysis Spectrum Method(초음파 주파수 분석법), Time-Joint Frequency Analysis Method(시간-주파수분석법), Fossil Power Plant(화력발전소), High-Temperature Pipeline(고온배관), Peak Frequency(최대주파수), Central Frequency(중심주파수), Frequency Bandwidth(주파수 대역폭)

Abstract

Boiler high-temperature pipelines such as main steam pipe, header and steam drum in fossil power plants are degraded by creep damage due to severe operating conditions like high temperature and high pressure for an extended period time. Such material degradation lead to various component failures causing serious accidents at the plant. Conventional measurement techniques such as replica method, electric resistance method, and hardness test method have such disadvantages as complex preparation and measurement procedures, too many control parameters, and therefore, low practicality and they were applied only to component surfaces with good accessibility.

In this study, both artificial creep degradation test using life prediction formula and frequency analysis by ultrasonic tests for their preparing creep degraded specimens have been carried out for the purpose of nondestructive evaluation for creep damage which can occur in high-temperature pipeline of fossil power plant. As a result of ultrasonic tests for crept specimens, we confirmed that the high frequency side spectra decrease and central frequency components shift to low frequency band, and bandwidths decrease as increasing creep damage in backwall echoes.

* 정희원, 한국전력공사 발전교육원

** 정희원, 한국전력공사 전력연구원

1. 서론

발전소 가동효율 증가추세와 가동, 정지횟수 증가에 의한 과도운전조건으로 고온, 고압 설비재료의 열화도가 가속화됨에 따라 파손사고 및 인명피해 등이 발생할 수 있다. 이들 발전설비에서 발생하는 경년열화손상 검사에 대한 높은 신뢰도를 가진 비파괴적 검출법과 잔여수명 측정법의 확립이 시급한 실정이다. 따라서 발전소 고온, 고압설비재료의 대표적인 경년열화인 크리프손상 상태를 신속, 정확하게 진단할 수 있고 진단결과에 따라 적절한 유지보수를 통하여 고온, 고압설비의 안전 및 장수명화를 유도할 수 있는 비파괴검사기술을 확보하여 고온, 고압설비의 불시사고를 예방할 필요가 있다.

이러한 크리프 손상이 축적되고 있는 고온고압 설비 재료의 전전성 및 잔여수명을 정량적으로 평가·보증하기 위해서는 크리프 손상정도를 조사하기 위한 정량적인 비파괴평가기술이 요구된다¹⁻⁴⁾. 그러한 정량성에 있어서, 각종의 비파괴검사법 중에서 초음파법이 정보량이 풍부하고 정량성 및 분해능이라는 점에서 현재로서는 가장 잠재력이 높다^{5,6)}.

또한, 초음파는 주파수에 따라 다른 응답을 나타내며 초음파를 주파수 등으로 분해시켜 해석·평가할 수 있으므로, 명료하게 그 재료의 상태를 알아내는 것이 가능하다. 크리프손상에 따른 재료의 결정입계나 미소결합에서의 산란량이 초음파의 주파수에 따라 변화하는 특성을 이용하여 반사파를 주파수분석기에서 해석하여 그 분포상태, 최대주파수(peak frequency), 중심주파수(central frequency), 주파수 대역폭(bandwidth) 등의 변화량으로부터 크리프 손상량을 측정할 수 있다.

본 논문에서는 크리프손상 평가를 위한 초음파 측정기술의 기술적 신뢰도를 확보하여 현장설비에 실용화할 수 있는 방법으로서의 접근성을 향상시키고 적용분야를 확대시키기 위한 목적으로, 화력발전소 주요 고온배관인 주증기관, 헤더류 및 스팀드럼에서 발생하는 크리프손상에 대한 초음파 측정연구를 수행한 결과로서, 고온배관재료인

2.25Cr1Mo강의 크리프 인공열화재를 대상으로 크리프손상상태별 초음파 신호분류를 위해 초음파 신호의 각종 주파수특성을 평가하였다.

2. 크리프 실험방법

2.1 시험편

크리프손상 상태에 따른 초음파 신호측정을 위한 크리프 열화재의 시편 확보 목적으로 크리프 인공열화 실험을 수행하였으며, 실기부재에서 사용기간, 사용재료, 대상부위 및 운전조건에 따라 각각 상이한 시험편을 채취하여 초음파측정실험을 수행해야 하나, 현실적으로 불가능하므로 화력발전소의 주증기관, 헤드 및 스팀드럼 재료와 동일한 재료를 입수하여, 실제 보일러에 부착된 개소의 정상 운전조건하에 있는 내부압력에 의한 응력과 가열온도를 기초로 하여 결정된 실험조건으로 크리프 손상을 인공으로 부여하였다.

본 연구에 사용된 재료는 화력발전소 보일러용 주증기관, 헤드 및 스팀드럼의 강재인 저합금강 2.25Cr1Mo이다. 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2와 같으며, Fig. 1은 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of material(wt. %)

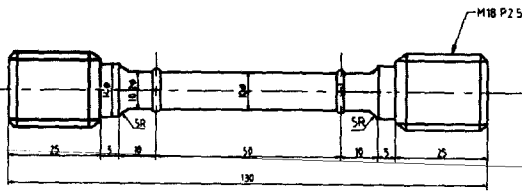
Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
2.25Cr1Mo	0.12	0.2	0.46	0.02	0.014	-	2.19	0.98	-

Table 2 Mechanical properties of material

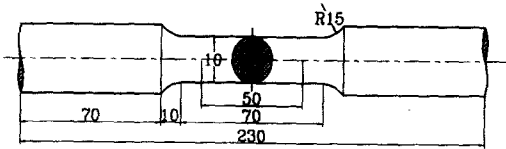
Material	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H _B)	Heat treat
2.25Cr1Mo	650	535	24	197	*N T

H_B : Brinell Hardness

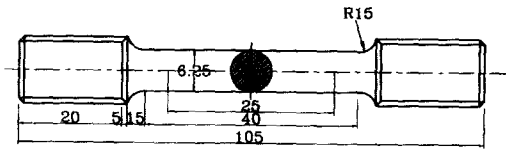
*N, T : 920°C Normalizing→620°C Tempering



(a) Creep test specimen(ASTM E139-83)



(b) Tension test specimen
(KS B 0801 No.10 or ASTM 8-86)



(c) High temperature tension test specimen
(ASTM E21-79)

Fig. 1 Shape and dimension of test specimen

2.2 실험방법

크리프시험기 노내 온도측정은 K형 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 설정온도까지 10℃/min으로 가열하였다. 그리고 부하 전에 노의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험중 온도를 일정온도에서 ±1℃ 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프시험중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 표점거리 50mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 하였고 LVDT (linear variable displacement transformer) 로써 측정하였으며, 제어반에 부착된 레코더로 기록 하여 이들로부터 크리프곡선을 작성하였고, 초기 연신률 (initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 경과한 후의 연신을 측정하는 것으로 통일하였다.

그리고 크리프손상 정도에 따른 초음파시험용

크리프 열화 시편 확보를 위한 크리프 중단실험은 크리프 파단 실험의 결과를 기초로 하여 크리프 파단수명의 1/4, 1/2, 3/4의 시점에서 각각 실험을 중단시켰다.

3. 초음파 측정방법 및 시험편

3.1 초음파 측정 시험편

Fig. 2는 초음파측정과 크리프손상 특성을 해석하기 위한 시험편 형상을 나타낸다. 크리프중단 및 파단실험결과로 준비된 시편에 대하여 초음파 측정면이 되는 평행부를 탐촉자 접촉이 가능하도록 표면을 평면으로 가공하기 위하여 아래와 같이 평행부의 양단면이 평행하고 응력축에 대해 수직이 되도록 평행 연삭가공후 랩핑(lapping) 또는 전해연마로 다듬질하되 가공정도가 되지 않게 하였다. 즉, 시편의 표면다듬질, 치수의 정확도 및 평행도에 주의를 기울여 가공하였다. 그리고 모든 초음파 측정은 시험편 두께방향으로 검사되었다.

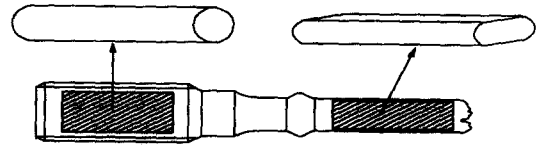


Fig. 2 Shape of ultrasonic test specimen

3.2 초음파 측정장비

초음파측정에 사용된 초음파장비는 RITEC사의 저잡음으로 30kHz~80MHz대역의 데이터의 획득이 가능한 최대 5kW 출력의 하이파워 초음파분석시스템(RAM 5000 Non-linear System), 오실로스코프는 Sampling Rate 최대 1GSa/s, 윈도우환경 구동의 HP사의 Infinium Oscilloscope를 사용하였으며, 주파수분석을 위한 장비로 1GHz의 HP사 Power Spectrum 분석기 및 초음파장비 작동제어와 데이터처리용 PC 등으로 구성하였다. 송신신호의 파형은 톤 버스트(ton burst)를 이용하였으며, 수신에는 5, 10 및 15MHz의 광대역 탐촉자(0.25inch)를 사용하였다.

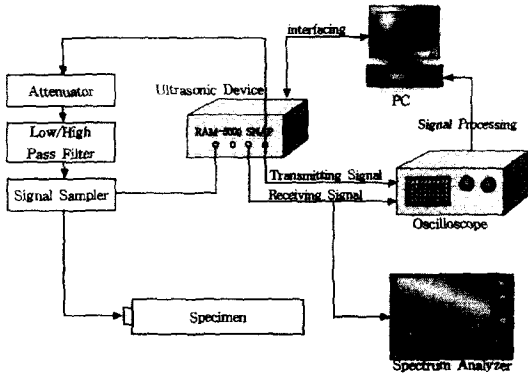


Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic test device

또한 초음파장비의 RF Burst 최대출력은 5KW으로 실험에 맞는 송신출력을 제공하기 위하여 송신 신호의 출력을 적절히 가감할 수 있도록 감쇠기 (attenuator)가 연결되어 있으며, Low/High Pass Filter를 이용하여 원하는 주파수대역을 선택할 수 있도록 하였고 Signal Sampler를 통하여 수신신호를 주어진 채널로 수신되도록 하였다. 실험에 사용된 초음파 실험장치 구성도는 Fig. 3과 같다.

3.3 초음파 주파수분석 방법

3.3.1 파형분석에 의한 주파수분석

시간영역에서 출력파형은 포락선 검파에 의해 상승시간, 하강시간 또는 지속시간 등을 이용하여 Fig. 4(a)와 같이 특징화 (수치화)하는 것이 가능하다. 또한 출력파형의 파워스펙트럼은 Fig. 4(b)에 나타낸 것과 같이 최대 주파수(peak frequency; f_{peak}), 주파수 대역폭(bandwidth; B_{half}), 중심주파수 (central frequency; f_c) 등에 의해 특징 지을 수 있다. 현재 초음파 펄스를 특징화할 수 있는 파형 파라미터(특징량)가 N개 존재하는 경우, 시스템 출력인 초음파 펄스는 N차의 스펙트럼 공간좌표에 의해 재료는 특징화시켜 평가된다⁷⁾. 따라서, 재료의 경년열화는 좌표의 변화로서 포착하는 것이 가능하다. 이들 파형 특징량의 측정방법으로는 우선, 주어진 스펙트럼 파형에서 최대진폭이 되는 점의 주파수를 최대 또는 피크주파수로 측정하며, 그 다음으로 최대진폭의 50%(6dB drop)를 낮춘 상태의 진폭점에서 수평선으로 포락선에 그어 만나

두 점을 만든다. 이때 만나는 두점에서 주파수축으로 수직선을 내리면 두 교점이 생기고 첫 번째를 하한 주파수(lower frequency; f_L), 두 번째를 상한 주파수(upper frequency; f_U)로 하여 구한다. 이때 이들 상하한 주파수의 합을 2로 나누어 주면 중심주파수가 되며, 상하한 주파수와 중심주파수를 이용하여 대역폭은 아래의 식으로 계산하면 된다.

$$Bandwidth(B_{half}) = \frac{f_U - f_L}{f_c} \times 100(\%) \quad (1)$$

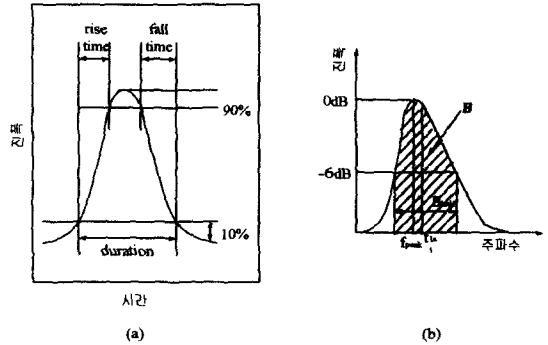


Fig. 4 파형분석에 의한 주파수분석방법

3.3.2 시간-주파수 분석

수학적인 의미에서 신호처리는 시간영역에서 신호 진폭의 변화와 주파수 영역에서 얼마나 자주 진폭이 변화하는지에 관한 주파수의 함수로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 시간과 주파수간의 가교적 역할을 하는 것이 푸리에 변환이며, 광범위한 분야에서 사용되어지만 시간 영역과 주파수 영역의 신호를 동시에 해석할 수 없다는 한계점으로 이의 적용에는 한계가 있다. 그러나 시간-주파수 분석법을 적용하면 파형 데이터를 시간과 주파수의 2차원 평면상에 분해하여 파형의 에너지 분포를 구할 수 있기 때문에 재료열화에 따른 정밀측정분야에 적용이 가능하다⁸⁾.

초음파에 의한 비파괴 평가에서 탐촉자에서 수신된 펄스파의 주파수에 대한 에너지 분포가 시간적으로 어떻게 변화하고 있는가를 정확하게 파악하는 것은 재료내부의 상태변화를 아는 유용한 방법이다. 초음파 신호의 데이터 해석에 시간-주파수 해석법을 적용하면 신호의 전파거동을 각 주파수

성분마다 분해할 수 있으며, 이를 시간에 따른 변화로 나타내어 분산관계를 쉽게 처리할 수 있다.

측정방법은 초음파 펄스반사신호를 고속 A/D 변환기를 통해 PC로 데이터 수집하고 LabVIEW로 개발된 초음파 신호해석 프로그램법에 의해 분석하였으며, 이 프로그램은 기존의 초음파 탐상기의 기본적인 기능을 직접 PC상에서 작동하도록 구현하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 크리프중단 및 파단실험결과

일정온도 600°C하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 2.25Cr1Mo강의 대표적인 크리프(크리프수명 10³, 10⁴h) 곡선을 Fig. 5에 초기연신률(initial strain, IS)과 함께 나타내었다. 그림에서 초기연신률의 증감은 응력, 파단수명 및 온도에 영향을 주며, 여러 크리프 특성값도 상관성이 있음을 알 수 있었다.

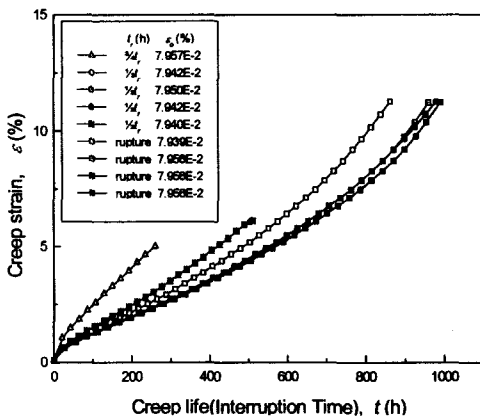


Fig. 5 Creep rupture curve (600°C, 105MPa)

Fig. 6은 2.25Cr1Mo강의 크리프 열화상태별 초음파 측정시험편 확보를 위하여 크리프 온도 및 응력조건을 변화시켜 파단시간 10³ 이내의 크리프 실험을 완료하고, 각 조건에 따른 파단시간의 1/4, 1/2, 3/4이 되는 점에서 각각 실험을 중단시키는 중단실험 결과를 나타낸다.

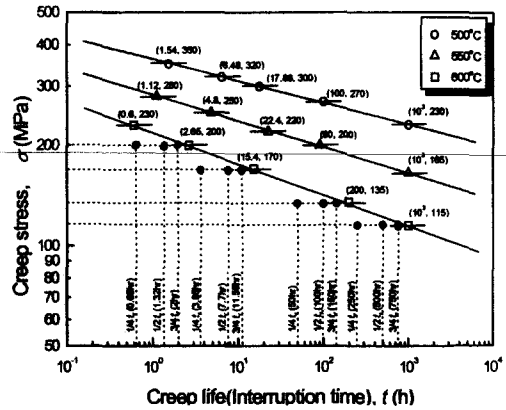


Fig. 6 Creep interruption curve(600°C)

4.2 주파수분석 결과

광대역 주파수범위에서 초음파 펄스의 주파수 정보를 이용한 스펙트럼을 해석한 것으로서, 광대역 주파수성분을 갖는 초음파펄스를 재료내에 입사시켜 반사파의 주파수 분포 및 중심주파수의 변화로부터 크리프손상상을 평가하였다.

4.2.1 크리프손상에 따른 주파수분석 결과

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 2.25Cr1Mo강의 크리프 손상상에 대한 주파수분석결과를 나타낸 것으로, 중심주파수가 5, 10, 15MHz인 광대역 종파 탐촉자를 이용하여 크리프손상상에 따른 주파수분포를 비교하여 나타낸 그림이다.

주파수분석결과, 시험온도, 응력, 탐촉자 주파수에 무관하게 크리프손상이 증가함에 따라 중심주파수는 저주파수대역으로 이동하였으며 대역폭과 진폭은 일정하게 감소하는 경향을 확인하였다.

이러한 주파수분포의 특성변화는 단 펄스법에 의한 초음파 주파수분포는 광대역 주파수범위에서 크리프손상에 의해 발생하는 재료내부의 캐비티 또는 미세균열 등의 결함으로 인하여 수신되는 초음파 빔강도(beam intensity)의 약화에 의한 감쇠, 산란을 야기시켜, 결국 주파수성분인 진폭, 주파수분포 및 중심주파수의 변화를 가져오는 것으로 해석된다. 특히 크리프 손상증가에 의한 주파수 분포도상의 진폭감소와 감쇠증가는 종속적인

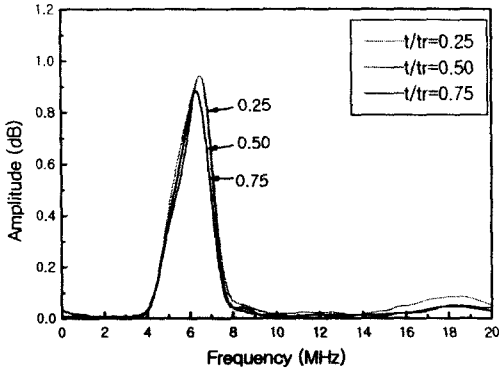


Fig. 7 Variation of frequency distribution of powerspectrum with increasing creep damage for 2.25Cr1Mo steel(5MHz)

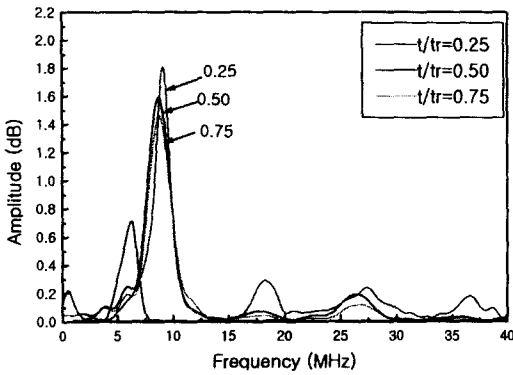


Fig. 8 Variation of frequency distribution of power spectrum with increasing creep damage for 2.25Cr1Mo steel(10MHz)

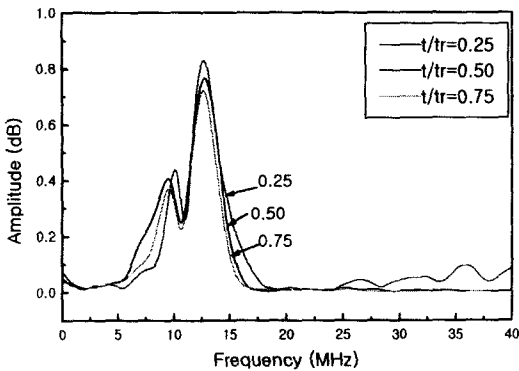


Fig. 9 Variation of frequency distribution of powerspectrum with increasing creep damage for 2.25Cr1Mo steel(15MHz)

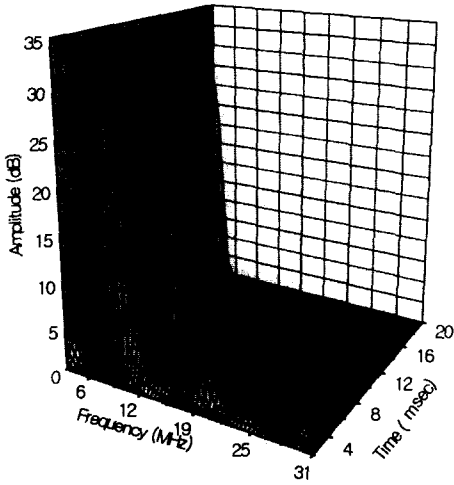
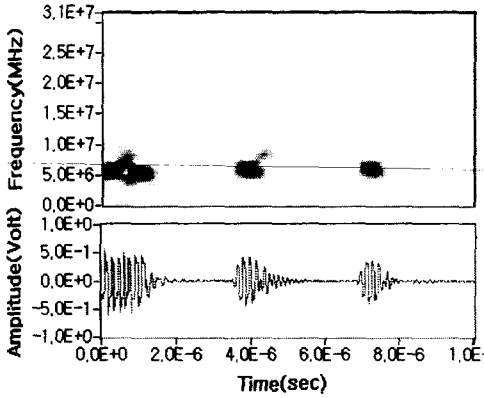
상관성을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 주파수분포 해석에 의한 주파수대역폭, 진폭 및 중심 주파수 변화로부터 크리프손상상태를 평가할 수 있음을 확인하였다.

4.2.2 크리프손상에 따른 시간-주파수 표현방식에 신호분석 결과

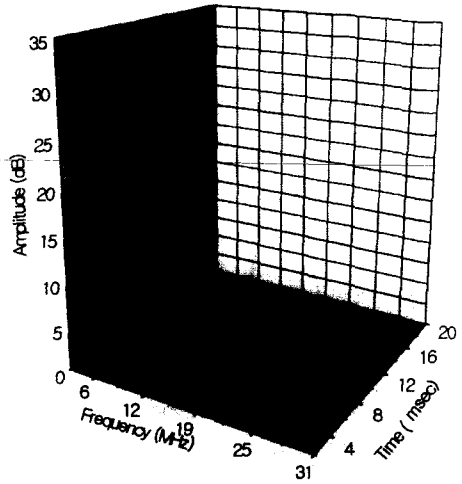
Fig. 10은 2.25Cr1Mo강의 크리프손상상태에 대한 시간-주파수 표현방식에 의한 주파수분석결과를 RF신호와 비교 및 3차원 표현방식(Wavelet 시간-주파수 표현방식)으로 나타낸 것으로, 중심주파수 10MHz 탐촉자를 이용하여 신재와 크리프손상재를 대상으로 크리프손상에 따른 주파수분포를 비교분석한 그림이다.

Fig. 10은 신재(uncrept specimen)와 754hr(크리프손상율 $\phi_c = 0.75$) 동안 크리프 중단실험 시편(crept specimen)과를 비교분석한 것으로, 주파수 10MHz 대역을 중심으로한 1, 2echo가 약 $4\mu\text{sec}$ 의 간격으로 나타내고 있으며 뛰어난 시간분해능을 보이고 있다. 그림에서 보면, 신재의 1echo에서는 5MHz이하의 저주파대 신호, 5MHz에서 20MHz까지 여러가지 대역의 주파수성분들이 나타나고 있으나 크리프손상재에서는 크리프손상의 진행에 따라 5MHz에서 10MHz의 고주파대역 신호들이 감소하는 형태를 나타내고 있어, 크리프손상에 의해 주파수성분의 큰 변화를 나타내고 있음이 확인된다. 이는 크리프손상의 진행에 따른 재료내부의 캐비티, 미세균열이 집중발생된것에 기인한 산란 및 감쇠현상에 의해 신재와 비교하여 고주파 성분이 감소하는 것으로 해석된다. 또한 크리프손상에 따른 감쇠현상을 주파수분포에서도 확인할 수 있다.

시간 주파수 표현 방식에 의한 신호분석결과, 크리프손상이 클수록, 즉 열화가 많이 진행될수록 고주파 성분들이 급격히 감소하였고 이것은 재료내부의 캐비티 발생, 결정립의 조대화 및 석출물에 따른 산란이나 감쇠의 증가로부터 고주파성분을 감소시키는 결과임을 알 수 있다.



(a) uncrept 2.25Cr1Mo specimen



(b) crept 2.25Cr1Mo specimen ($\phi_c = 0.75, 754hr$)

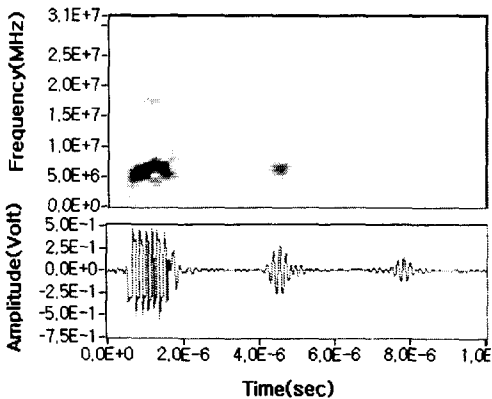
Fig. 10 Ultrasonic echo(RF signal) and its Wavelet transform(5MHz)

초음파에 의한 비파괴 평가에서 탐촉자에서 수신된 펄스파의 주파수에 대한 에너지 분포가 시간적으로 어떻게 변화하고 있는가를 정확하게 파악하는 것은 재료내부의 상태변화를 아는 유용한 방법이다. 초음파 신호의 데이터 해석에 시간-주파수 해석법을 적용한 결과, 신호의 전파거동을 각 주파수 성분마다 분해 할 수 있으며, 이를 시간에 따른 변화로 나타내어 분산관계를 쉽게 처리 할 수 있음을 확인하였다.

또한 후방 산란된 초음파 신호의 감쇠와 산란은 주파수에 종속하기 때문에 특성상 비정상(non stationary)신호이다. 그러므로 이러한 신호의 시간 주파수 표현 방식에 의한 신호분석(Joint Time-Frequency Analysis: JTFA)은 기본적인 푸리에 해석보다 더 많은 것을 보여줄 수 있었다^{8,9)}.

5. 크리프손상재의 조직관찰

Fig. 11은 2.25Cr1Mo강 크리프손상재의 크리프 손상 진행에 따른 조직관찰 결과이다



←Stress→

6. 결론

화력발전소 고온 후유배관인 주증기관, 과열기 헤더 및 스팀드럼 설비에서 발생하는 크리프 손상 상태를 초음파측정에 의해 검출 및 평가하기 위하여, 이들 대상 설비 재료인 2.25Cr1Mo강을 대상으로 인공열화 크리프실험과 초음파 주파수분석 및 신호평가방법의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 화력발전소 고온배관재료에 대한 크리프 파단 실험 및 중단실험을 통하여, 발전소 고온 배관재료와 동일한 재료를 라슨-밀러 파라미터법(LMP) 및 초기변형률법(ISM)의 장기 수명 예측식에 따라 장기크리프 경년열화를 모의한 크리프 인공열화실험을 수행하였으며, 이들 실험결과에 의해 신재에서 설계수명까지의 열화상태별 초음파신호 특성변화를 측정, 평가하기 위한 크리프특성 및 최적 수명예측 관계식을 도출할 수 있었으며, 이에 따라 단기 및 장기 크리프 인공열화재 제작기술을 확보하였다.

2) 크리프상태별 주파수분포를 비교분석한 결과, 크리프온도, 응력, 탐촉자 주파수에 무관하게 크리프손상이 증가함에 따라 최대주파수의 진폭은 감소하며, 중심주파수는 저주파수 대역으로 이동하며 대역폭은 일정하게 감소한다. 따라서 주파수 대역폭과 중심주파수의 진폭변화로부터 크리프 손상상태 평가가 가능함을 확인하였다.

3) 크리프상태에 따른 초음파 신호의 데이터 해석에 시간-주파수 해석법을 적용하면 신호의 전파거동을 각 주파수 성분마다 분해할 수 있으며, 이를 시간에 따른 변화로 나타내어 주파수분포 관계를 쉽게 처리할 수 있다. 또한 크리프손상이 클수록, 즉 열화가 많이 진행될수록 고주파 성분들이 급격히 감소하였고 이것은 재료내부의 캐비티 발생, 결정립의 조대화 및 석출물에 따른 산란이나 감쇠의 증가로부터 고주파성분을 감소함을 확인하였다.

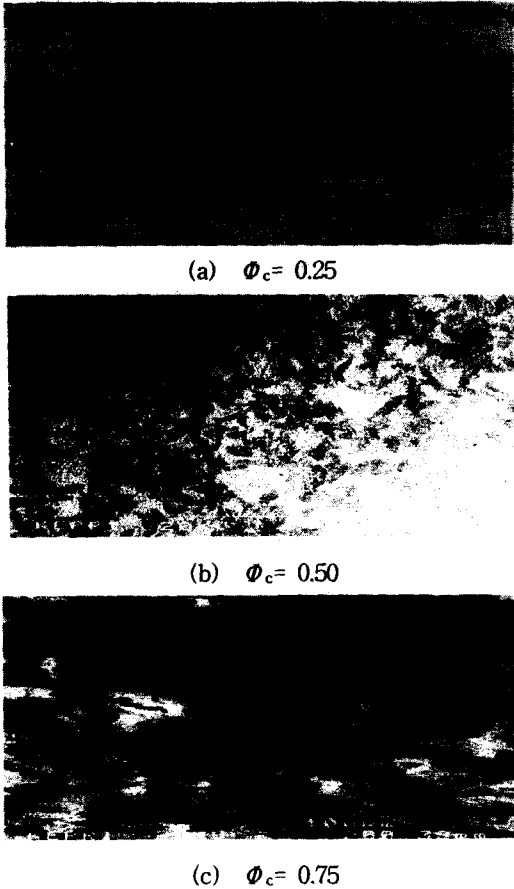


Fig. 11 Optical micrograph of 2.25Cr1Mo steel showing cavity ($\phi_c = 0.50$) and microcrack ($\phi_c = 0.75$)

그림에서 크리프손상율이 증가 즉, 크리프 시험시간이 증가함에 따라 조직은 모두 구상화되고 조대화되어 있음을 알 수 있으며 크리프손상이 증가하게 되면서 입내에서 캐비티가 형성되는 입내 파단모드 현상을 나타내고 있다. 그리고 결정립은 응력축 방향으로 늘려져 있음이 확인된다.

캐비티는 결정립내에서 부분적으로 발생하고 있으며 온도와 응력이 동시에 작용함으로써 응력 방향으로 캐비티의 발생이 증가하여 합체해나가고 있다. 특히 크리프 수명말기인 크리프손상율 $\phi_c = 0.75$ 에서는 이들 캐비티의 합체결과로 인하여 미세균열로 성장하고 있음을 보이고 있다.

참고문헌

- 1) Matsumoto, M. et al., J. of JSNDI, Vol.35, No.2, pp.140, 1985
- 2) Nakashrio, M. et al., TETSU-TO-HAGANE, Vol.71, No.13, pp.237, 1985
- 3) Nakashrio, M. et al., TETSU-TO-HAGANE, Vol.73, No.13, pp.147, 1987
- 4) Kyo, K., 配管技術, pp.134, 1987
- 5) Matsubara, M. and A. Nitta, "Theoretical Study on Creep Damage Detection by Ultrasonic Wave Measurement", CRIEPI Report, T88014, pp.4-6, 1988
- 6) Matsubara, M. and A. Nitta, "Study on Application of Ultrasonic Wave Measurement to Creep-fatigue Damage Detection", CRIEPI Report, T87046, pp.6-7, 1988
- 7) Randall, R. B., "Frequency Analysis", Br el & Kjær, 1987
- 8) Lee, S.G., et al., "An Application of Wavelet Transform to Ultrasonic Evaluation of Power Plant Materials", Proc. of KSNT, SC9808, 76-84, 1998
- 9) Oh, S. K., J. H. Oh, et al., "Ultrasonics Signal Analysis of Pipeline by Means of Joint Time-Frequency", Proc. of KCORE, II -15, pp.189-194, 1998