

Simulated Annealing기법을 이용한 초음파의 계면 반사 특성평가

Evaluation of ultrasonic reflection characteristics on an interface surface using Simulated Annealing

은 길 수¹⁾
Eun, Gilsoo

김 노 유²⁾
Kim, Nohyu

나 환 선³⁾
Na, Hwan-sun

ABSTRACT

Epoxy coating and sealing used in nuclear plants for the protection of radiation degrades with aging and hazardous atmosphere. In order to evaluate the degradation of the epoxy, dependence of the acoustic impedance on the change of mechanical properties has been used. Unlike metals, the surface of the epoxy coating on a concrete liner is so wavy that the acoustic impedance is difficult to measure by using the reflectivity of the ultrasound on the interface surface because of the irregular reflection and propagation from the epoxy surface. SA(simulated annealing) algorithm is applied to calculate the acoustic impedance using a reflection wave from the rough epoxy surface. The surface waviness and acoustic impedance are taken into account and determined by SA method to evaluate the state of degradation quantitatively.

1. 서 론

원자력 발전소는 콘크리트 격납(containment)구조를 가지는데 밀봉을 위해서 경수로의 경우 콘크리트 내부에 강철판(steel liner)을, 중수로의 경우 비금속라이너를 부착한 후에 총체적 격납 시스템으로서의 누설제한 건전성을 확보하기 위해서 강재 및 비금속라이너에 격납 에폭시 라이너를 도포한다. 이때 사용되는 도장재는 에폭시 수지로서 방사능 누설 방지와 설비 수명 기간동안 안정적인 내부 환경을 조성하기 기능을 가진다. 에폭시 도장재료의 시공과 품질은 원자력 관련 규정에 의거하여 설계되나 실제의 현장 시공상태는 이론적인 조건을 완전히 반영하지 못할뿐더러 설계 수명기간 (중수로인 30년, 경수로인 40년)동안에 원자로 내에서 발생하는 방사선이나 열, 수분 등에 의해 에폭시 도료가 열화되어 변·퇴색, 들뜸, 부서짐 현상이 발생하여 부분적으로 보수가 필요한 경우가 발생한다. 원자로의 안전과 운전방법의 특수성을 고려할 때 도장재가 강재나 비금속 라이너의 표면에서 분리되거나 부서지기 이전에 에폭시 도장재의 사용수명을 예측하여 보수시점을 결정하는 것이 매우 필요

1) 한국기술교육대학교 기계공학부 대학원
2) 한국기술교육대학교 기계공학부
3) 한국전력연구원 토건그룹

하다고 할 수 있다⁽¹⁾. 그러므로 이를 위한 도장재의 열화정도에 대한 정량적인 평가방법에 대한 연구가 많이 수행되었는데 그 중에서 대표적으로 사용되어온 초음파 검사 방법은 초음파의 속도나 감쇠, 임피던스를 측정함으로써 평가하고 있다^(1,2). 그러나 도장재의 경우 fig.1에서와 같이 다른 금속재의 표면과는 달리 표면의 굴곡이 심해 초음파의 속도나 감쇠를 측정하는데 오차가 많고 복잡한 측정장치가 필요하기 때문에 현장에서 활용하기에는 한계가 많다. 이에 비해 도장재의 음향임피던스를 이용한 검사방법은 에폭시 표면에서의 초음파 반사특성을 이용하기 때문에 간단하고 편리하나 표면 조도나 표면형상을 고려하지 않을 경우 측정결과의 신뢰성이 저하되고 오차가 심해 적용하기 어렵다. 본 연구에서는 이러한 계면에서의 불규칙한 초음파 산란 및 다중반사등으로 인해 왜곡된 반사신호로부터 에폭시 도장재의 음향임피던스를 구하기 위해 SA(Simulated Annealing)를 이용한 최적화 기법을 적용하였다.

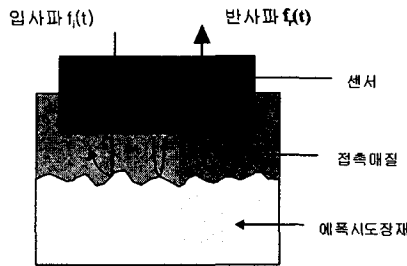


Fig.1 에폭시 표면의 굴곡에 의한 초음파 반사

2. 이론

격납 구조물 라이너 시스템을 이상적인 단면 형상으로 단순화하면 fig.2(a)와 같이 나타낼 수 있으며, fig.2(b)는 수직으로 입사된 초음파가 센서, 접촉매질(couplant), 에폭시 도장재에서의 반사와 투과되는 경로를 나타낸다. fig.2(b)에서 초음파 센서와 에폭시 경계면사이의 거리가 작다면 초음파 $f_i(t)$ 가 에폭시 도장재에 수직으로 입사될 때 얻어지는 반사 초음파 $f_r(t)$ 는 초음파 감쇠 효과를 무시할 경우 다음과 같이 표현될 수 있다^(4,5).

$$f_r(t) = R_{12} \cdot f_i(t) + \frac{T_{12} T_{21}}{R_{21}} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} [(R_{21} R_{23})^m f_i(t - 2msd)] \quad (1)$$

$$\text{여기서 } R_{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_2 + Z_3}, \quad T_{23} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

위의 식에서 R_{12} , T_{12} 는 초음파가 매질 1에서 매질 2로 진행할 때 경계 면에서의 반사계수와 투과 계수이며 R_{23} , T_{23} 은 초음파가 매질 2에서 매질 3으로 진행할 때 경계 면에서의 반사계수와 투과계수이다. s 는 매질 2에서의 초음파 속도의 역수인 slowness이며, d 는 센서와 에폭시 도장재 사이의 간극(접촉매질의 두께)을 나타내고 Z_i 는 i 번째 매질의 음향

임피던스이다. 식(1)의 오른쪽 첫 번째 항은 매질 1(센서)과 매질 2의 경계 면에서의 반사파이며(fig.2(a)에서 1번 신호), 두 번째 항은 매질2와 매질 3의 경계 면으로부터 반사되어 오는 반사 파들의 합을 나타낸다.

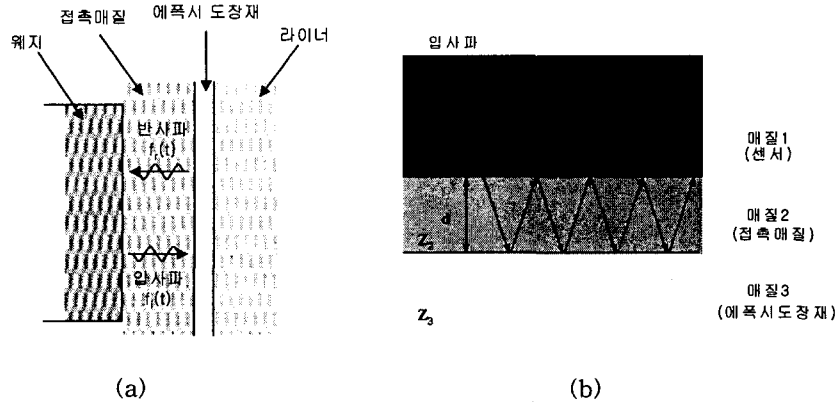


fig.2 계면에서의 초음파 다중반사 (a) 에폭시 라이닝 시스템 (b) 초음파의 진행경로

그런데 식(1)은 전파 매질2 내에서 감쇄가 없다는 가정 하에서의 반사 파이므로 에폭시 표면에서와 같이 표면이 거칠고 굴곡이 심한 경우에는 보완이 필요하다. 이점을 고려할 때는 매회 각 매질 내를 진행하는 파가 이제는 더 이상 서로 in-phase가 아니므로 표면조도나 waviness에 의해서 매회 반사 시에 발생하는 위상차를 ϕ 라고 하면 이 값을 확정적인 값을 가지지 못하는 확률변수로 가정할 때 이 영향을 포함한 반사초음파는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_r(t) = R_{12} f_i(t) + \frac{T_{12} T_{21}}{R_{21}} \sum_{m=1}^{\infty} \left[(R_{21} R_{23})^m \int_{-\infty}^{\infty} f_i(t - 2msd + \phi) p(\phi) d\phi \right] \quad (2)$$

여기서 $p(\phi)$ 는 센서와 계면사이에서 초음파 ray의 위상차가 ϕ 만큼 발생할 확률밀도 함수이며 측정된 입사신호 $f_i(t)$ 와 반사신호 $f_r(t)$ 로부터 구하고자 하는 변수 $p(\phi)$, d , R_{23} 를 구하기 위해서 다음의 SA(simulated annealing)를 이용한 최적화 기법을 사용하였다.

3. SA기법

“Annealing”이란 금속의 내부에너지의 기준인 온도를 높였다가 최소의 에너지 상태까지 서서히 냉각시키는 과정을 말하는데 Simulated Annealing 기법은 목적함수(objective) 또는 “energy” 함수의 global minimum을 찾아내기 위해 annealing 과정을 적용한 것이다. SA 기법에서 최적화의 진행은 가상적인 온도의 양에 의해 제어되는데 편의상 이 제어 변수를 “T”라 할 때 변수들의 현재 상태 p_k 에 따른 cost function을 $C(p_k)$ 라고 하면 최적화 과정은 random 하게 구성된 변수에 따른 cost를 계산하고 이를 이용해 최적 변수를 찾는 과정이 되며 각 단계에서 다음 상태로의 이동은 식(3)를 이용해 결정된다⁽⁵⁾.

$$p_{k+1}^i = p_k^i + y^i (B_i - A_i) \quad (3)$$

여기서 y^i 는 랜덤 변수이며, -1과 1사이의 값이다. B_i 와 A_i 는 각각 i 번째 변수에 대한 상한값과 하한값이다. 이 때 변수가 제한조건을 만족하는지 확인하기 위한 결정조건은 제어 변수 T 의 냉각조건(cooling schedule)을 기준으로 다음 식에 의해 결정된다.

$$\exp\left[-\frac{(C(p_{k+1}) - C(p_k))}{T_{\text{cost}}}\right] > U, \quad T(k) = \frac{T_0}{\ln(k)} \quad (4)$$

여기서 k 는 지금까지 허용된 구성(configuration)의 수이고 T_{cost} 는 제어 변수 T 의 현재 값이며 U 는 0과 1사이의 랜덤변수이다. SA기법은 많은 변수를 가진 최적화 문제에서 항상 global minimum을 제공하기 때문에 본 논문에서와 같이 변수가 많고 노이즈가 있는 실험데이터로부터 최적화 문제를 수행할 때 발생하는 local minimum을 회피할 수 있는 장점이 있다.

4. 실험 및 Simulation결과

에폭시 도장 재에서의 반사신호는 물을 접촉매질로 하여 초음파 센서를 시편 표면위에 직접 접촉시켜 초음파 펄스를 에폭시표면에 입사시키고 센서와 에폭시 표면사이에서 만들어 지는 펄스 반사 파를 계측하여 그 파형을 컴퓨터에서 읽어들인 후 이 신호를 식 (3)에서의 반사신호로 획득하였다. 최초의 입사 파 $f_i(t)$ 는 시편이 없는 물 속에서의 반사신호를 그대로 사용하였으며 시편의 표면으로부터의 반사신호를 입력받아 연결된 컴퓨터에서 SA프로그램을 이용해 에폭시의 임피던스를 계산하였는데 fig.3은 그 최적화 과정을 나타낸다.

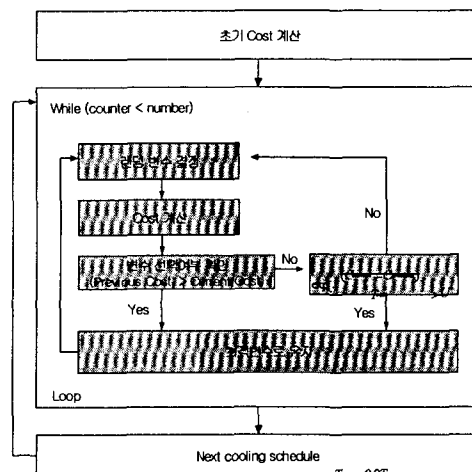
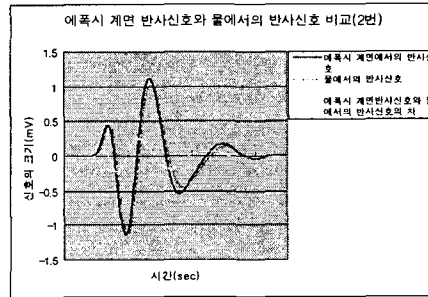
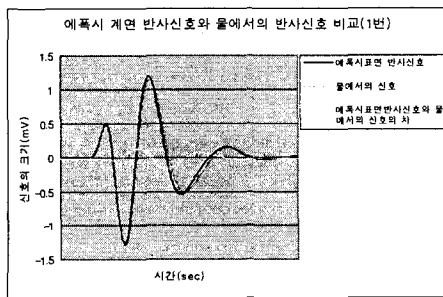
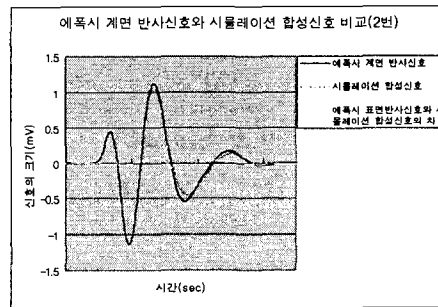
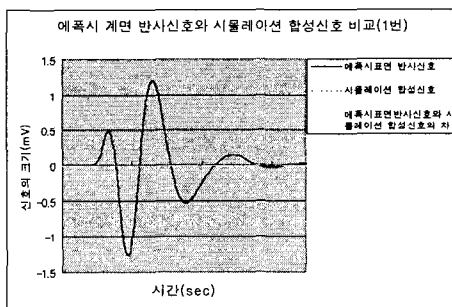


그림 3. SA를 이용한 프로그램의 흐름도

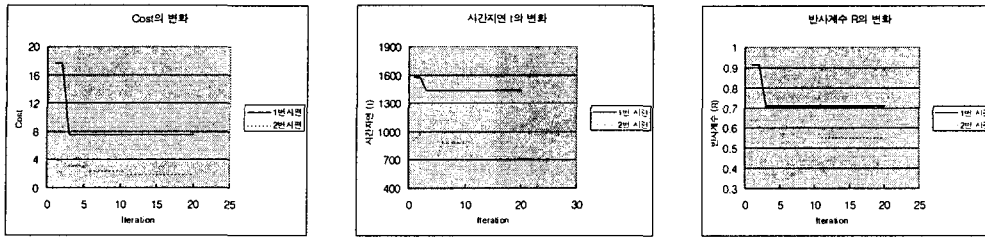
SA를 이용하는데 있어서 최적화 변수의 대상은 실제 반사신호의 파형에 변화를 주는 인자들이 되는데 입사 파 $f_i(t)$ 에 대해 추출된 변수들을 식(2)에 대입해 계면에서의 반사신호를 이론적으로 계산하고 이론적으로 예측된 계면에서의 반사신호와 실제 측정된 계면에서의 반사신호를 비교하여 그 차이를 목적 함수로 하여 다음과 같이 최소화함으로써 변수 값을 계산하였다. Fig.4의 (a),(b)는 서로 다른 두 시편에서의 입사신호와 반사신호를 나타내는데 각 그림에서 입사 신호(물에서의 반사신호)는 시편이 없는 물에서의 반사신호로서 에폭시 도장재의 표면에 입사되는 입사파이다. 이 두개의 입사신호와 계면 반사신호를 SA알고리즘에 입력하여 반사계수 R_{23} 와 평균계면사이의 거리 d 에 대한 최적의 변수 값들을 계산하였다. Fig.5는 이 변수 값들을 식(2)에 대입해 계산한 이론적 신호를 실제 측정된 중첩신호와 비교해 본 결과인데 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig.6에서는 시뮬레이션 과정 중의 cost 변화와 각 최적변수들이 수렴해 가는 과정을 cooling schedule의 각 단계에 따라 표시하였다. 두 시편 모두 계산 초기에 최적 값에 수렴하는 것을 볼 수 있다.



(a) (b)
 그림 4. 에폭시 계면반사신호와 입사신호, (a) 시편#1, (b) 시편#2



(a) (b)
 그림 5. 에폭시 계면반사신호와 시뮬레이션 합성신호 비교, (a) 시편#1, (b) 시편#2



(a) (b) (c)

그림 6. SA 과정중의 변수추이, (a) cost 변화,(b) 평균 위상변화(시간),(c) 반사계수

5. 결론

본 연구에서는 표면 굴곡이 심한 에폭시 도장 재에서 만들어지는 불규칙한 초음파 반사파의 수학적 모델을 수립하고 이를 이용하여 측정된 반사 신호로부터 에폭시 도장 재의 음향임피던스와 표면상태를 SA기법을 이용하여 계산하였다. 종래에는 에폭시 도장재의 표면을 결정적 변수로 가정하여 표면의 반사특성을 해석함으로써 오차가 많았으나 본 논문에서는 실제 에폭시 표면의 표면조도가 시공방법이나 도장표면의 상태에 따라 크게 변하는 성질을 확률변수로 모델링 함으로서 보다 정확한 초음파 반사특성을 해석할 수 있는 방법을 제시하였으며 실험을 통해 그 효과를 검증하였다. 이 방법은 간편하고 비교적 계산결과가 정확하여 현장에서 정량적으로 에폭시의 열화정도를 모니터링 하는 것은 물론 금속재의 열화정도를 평가하는데 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 한국전력공사, “월성 2·3·4호기 비금속라이너의 자연열화 시험 및 평가”, 연구보고서, 1998
2. Nohyu Kim and Wan Ha, "An Ultrasonic Method for Vibration Measurement of HDD Suspension", Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Iowa State University, July, 2000.
3. V. K. Kinra, and V. Dayal, A new technique of ultrasonic nondestructive evaluation of thin specimens , Experimental Mechanics, 1988, pp. 288-297.
4. V. K. Kinra and V.R.Iyer, Ultrasonic measurement of the thickness, phase velocity, density or attenuation of a thin viscoelastic plate. Part I: the forward problem ,Ultrasonics, Vol.33 No 2, 1995 , pp95-109.
5. Matthew A. O'hara, "Optimization of Proximity Recording Air Bearing Sliders in Magnetic Hard Disk Drives", J. of Tribology, Vol. 122, No. 1, pp 257-259, 2000.