

예측디콘볼루션에 의한 볼트 나삿니의 미세 균열 검출

Small Crack Detection in Bolt Threads by Predictive Deconvolution

서 동 만*, 김 환 우**
(Dong-Man Suh*, Whan-Woo Kim**)

요 약

스터드 볼트에 존재하는 작은 결함은 초기에 발견되지 않으면 작은 결함이라도 결함 크기가 급진전되어 전체적인 파손에 이른다. 그러나 이러한 나삿니의 응력부식결함이나 부식 찌꺼기와 같은 것은 가동중검사에서 일반적인 초음파 검사로써는 검출이 어렵다. 본 연구에서는 디지털신호처리에 의한 결함 검출 방법을 보인다. 초음파가 나삿니에 평행하게 입사된다면 연속적인 나삿니로부터 발생되는 신호는 거의 일정한 시간 간격을 가지고 있다. 이러한 연속적인 나삿니신호는 예측 간격에 의해 처음 신호를 기초로 다음 신호를 추측할 수 있는 데 여기서 최적 연산자를 사용해 예측되는 연속적인 나삿니신호를 제거하여 결함 신호를 검출할 수 있다.

ABSTRACT

If small cracks in stud bolts are not detected early enough, they grow rapidly and cause total fracture. It is difficult to detect, prior to failure, flaws such as stress-corrosion cracking in thread roots and corrosion wastages using conventional ultrasonic testing methods during inservice inspection. This study show a method of detecting a small crack by digital signal processing. When ultrasonic beams travels into threads in a parallel way, the echoes from each successive threads has almost the same intervals between any two signals. We can estimate the next thread signal based on previous thread signal by the predictive distance. The optimized operator is used to remove the predicted successive thread signals so that a small crack signal can be detected.

I. 서 론

원자력 발전소에서 크고 작은 많은 종류의 스테드 볼트들이 사용되고 있다. 그러나 이러한 중요 장치에 사용되고 있는 볼트는 운전중 또는 분해 조립시 파손이 되는 사고가 자주 일어나 1980년대 이후로 원자력 산업 분야에서 주요 현안 문제가 되고 있다. 그 주된 원인은 응력부식결함이나 부식 찌꺼기와 같은 결함들을 파손이 일어나기 전까지는 상용되고 있는 초음파 검사로는 검출하지 못한 것이다. 또한, 매우 작은 임계크기에서도 결함은 급진전되어 전반적인 파손이 일어난다.^(1, 2) 일반적으로 볼트의 검사에는 초음파, 자분 그리고 와전류검사가 가동중검사로 사용되고 있다. 이들 방법들 중에 초음파 검사만이 스테드 볼트를 제거하지 않은 상태에서 나삿니부위의 결함을 검출할 수 있는 유일한 방법이다. 그러나 이 방법은 작은 결함은 나삿니들로부터 반사되는 복잡한 신호로부터 구분하기는 매우 어렵다. 이러한 이유로 새로

운 검사 방법과 결함 크기 측정 방법이 연구되었다.^(3, 4, 6, 7) 본 연구에서는 발표된 미세 결함 검출 및 크기 측정 방법을 기초로 나삿니의 기하학적인 특징으로 인해 발생하는 강한 나삿니신호를 예측 오차 필터를 이용한 예측 적인 디콘볼루션을 수행해 제거함으로써 미세한 균열로 인해 발생하는 산란 신호를 찾는 방법을 연구하였다.

II. 결함 검출 방법^(3, 4)

초음파 비파괴검사시 스테드 볼트는 중심에 홀이 있는 것과 없는 것이 있는데 홀이 없는 스테드 볼트는 수직 초음파 검사를 수행하고 홀이 있는 스테드 볼트는 사각 초음파 검사를 수행한다. 중심에 홀이 있는 스테드 볼트는 주로 대형으로 원자로와 원자로 덮개와 같은 중요 설비를 체결하는 데 사용되고 있고 홀이 없는 스테드 볼트는 일반적인 산업 설비에 많은 종류가 사용되고 있다. 홀이 있는 스테드 볼트의 검사는 탐촉자를 홀에 삽입해 초음파를 주사하면서 검사를 수행하고 홀이 없는 스테드 볼트는 머리 부분에 탐촉자를 위치해 나삿니에 초음파가 적절히 입사되도록 조절해 검사를 수행한다.

*군장공업전문대학 전자과
**충남대학교 전자공학과
접수일자: 1996년 1월 22일

볼트의 나삿니는 보통 2-3 mm의 간격을 갖는 나삿니들을 가지고 있는데 나삿니와 나삿니사이의 간격이 일정하기 때문에 초음파가 나삿니에 입사될 때 반사되는 신호는 일정한 시간 간격을 가지고 있다. 그림 1과 같이 나삿니와 나삿니사이가 일정한 간격 L을 갖는다고 하고 스테드 볼트의 축과 초음파 입사각 사이의 각도를 θ 라 하면 나삿니에서 반사되는 초음파 신호는 일정한 시간 지연을 가지고 있다. 만약에 나삿니에 미세한 결함이 그림 2와 같이 존재한다면 R_1 신호는 나삿니 결함으로 인해 R_T 신호와 R_R 신호들이 발생되고 미세한 시간 지연이 일어난다.

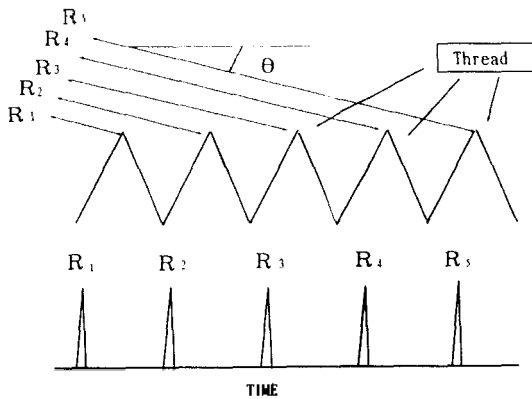


그림 1. 나삿니에서 반사되는 신호
Fig 1. Signals from threads

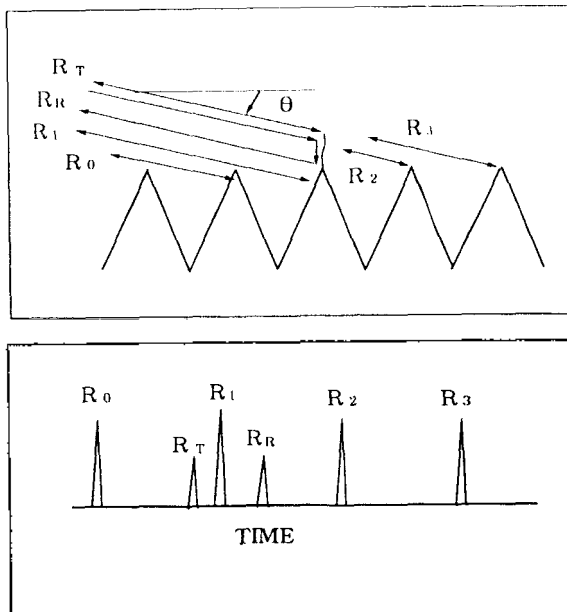


그림 2. 나삿니와 결함으로 인한 신호
Fig 2. Signal from threads and defect

그림 2에서 보는 바와 같이 스테드 볼트의 축과 초음파 입사각 사이의 각이 θ 이고 결함의 높이가 h 라 하면 R_T 신호는 R_1 신호 앞에 그리고 R_R 신호는 R_1 신호 뒤에 발생

된다. R_T 신호와 R_R 신호는 결함의 높이 h 와 θ 에 따라서 R_1 신호와 시간차(time delay)가 발생된다. R_T 신호는 결함 꼭대기(Tip)에서 산란되는 신호이고 R_R 신호는 결함을 따라 진행하다 나삿니와 결함 사이에서 반사되는 Rayleigh 신호이다. 여기서 R_1 신호와 R_T 신호의 시간차나 R_1 신호와 R_R 신호의 시간차를 이용해 결함의 크기를 결정할 수 있다.

$$\Delta t_R = h/V_R - h * \sin \theta / V_L \tag{1}$$

$$h = \Delta t_R * V_R - V_L / (V_L * \sin \theta) \tag{2}$$

$$\Delta t_T = 2 * \sin \theta / V_L \tag{3}$$

$$h = \Delta t_T * V_T / (2 * \sin \theta) \tag{4}$$

여기서 Δt_R : 나삿니신호와 레일라이신호의 시간차,
 Δt_T : 나삿니신호와 선단(Tip)신호의 시간차,
 V_R : 레일라이파의 속도, V_L : 종파의 속도,
 θ : 볼트의 축과 입사각 사이의 각, h : 결함의 높이.

그러나 작은 결함인 경우 이러한 시간차는 매우 작은 값이므로 R_1 신호와 겹쳐서 나타난다. 또한 스테드 볼트의 축과 초음파 입사각 사이의 각도 θ 가 클수록 R_T 와 R_1 사이의 시간차가 많이 발생되고 θ 가 작을수록 R_R 과 R_1 사이의 시간차가 많이 발생된다. 이와 같은 관계를 그림 3에서 표시하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 θ 가 작을 때는 R_R , θ 가 클 때는 R_T 를 이용하는 것이 용이하다.

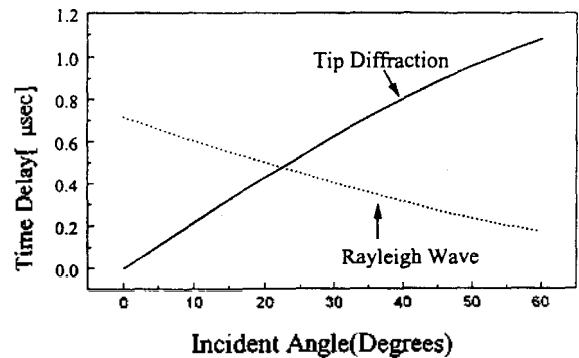


그림 3. 입사각에 따른 선단 신호와 레일라이파의 나삿니신호와 의 시간 지연(2mm 노치)
Fig 3. Time delay between tip or Rayleigh wave and thread signal depend on incident angle (2mm notch)

그러나 실제의 검사에서는 R_1 신호 전에 발생하는 R_T 는 신호의 크기가 작고 나삿니신호와 중첩되어 거의 구분 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 신호 처리에 의한 R_T 신호의 검출보다는 R_R 신호 검출에 중점을 두었다.

III. 이 론

초음파의 한 방향 진행 시간을 T_1 이라 하면 왕복 진행

시간은 T_2 가 된다. 여기서 $2T_1$ 을 T_2 라 하고 나삿니에 임펄스 $\delta(t)$ 가 입사된다고 하면 각각의 나삿니에서 반사되는 신호는

$$R(t) = \sum_{k=0}^N R_k \delta(t - kT_1) \quad (5)$$

이나, 여기서 R_k 는 금속에서 초음파 감쇄상수에 따라 반사되는 신호의 크기이다. 그림 1에서와 같이 초음파가 나삿니와 나삿니사이를 진행하여 반사되는 신호를 R_1, R_2, R_3, \dots 라고 하면 R_1 과 R_2 사이의 시간차가 T_2 가 된다. 여기서 각각의 나삿니신호들을 잘 분별하기 위해서는 초음파를 발생시키는 탐촉자의 주파수를 적절하게 선택하여야 한다. 즉 $1/T_1$ 보다 2, 3배이상 큰 주파수를 발생시키는 초음파탐촉자를 사용하여야 한다.

정상적인 나삿니신호들을 $R(t)$ 라하고 나삿니의 간격을 알고 있다고 가정하면 나삿니 신호의 첫 번째 신호만 수집이 가능하면 다음 신호는 예측이 가능하다. 여기서 예측연산자 a 를 도입하면 이 예측연산자 a 는 나삿니 신호가 일정하기 때문에 나삿니 간격에 해당하는 시간 간격 n 에 따라 반사되는 신호들을 예측할 수가 있다. 이러한 예측은 실제 신호와 예측된 신호 사이의 오차를 줄임으로써 예측연산자를 추출할 수가 있다.⁽⁵⁾

$$Err = \sum_{i=0}^N \left(R_i + n - \sum_{s=0}^m a_s R_{i+s} \right)^2 \quad (6)$$

위의 식에서 a 의 계수에 대한 함수로 실지의 신호와 예측된 신호 사이의 오차를 최소화하면 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{s=0}^m a_s r_{j-s} = r_{j+n}, \quad j=0, 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

- 여기서 a : 예측연산자
- n : 예측 간격
- m : 예측 연산자의 길이
- r : 수집된 신호 R의 자기 상관 함수

위의 선형 방정식(7)을 풀어 연산자 a 의 계수를 구할 수 있다. 이렇게 구한 연산자계수를 이용해 다음식 (8)의 연산자 f 를 만들 수 있다.

$$f(z) = 1 - \sum_{s=0}^m a_s z^{n+s} \quad (8)$$

여기서 미세한 결함이 존재하고 있는 스테드 볼트 나삿니 신호 R 을 수집해 위에서 구한 연산자 f 와 콘볼루션을 하면 신호 처리된 g 신호를 얻을 수 있다.

$$g = R * f \quad (9)$$

여기서 구한 g 신호는 나삿니에서 발생하는 강한 신호를

제거할 수 있어 결함으로 인한 나삿니사이에서 발생하는 작은 신호를 검출할 수 있다.

IV. 실험 및 결과

규칙적으로 반사되는 나삿니신호는 예측 적인 디콘볼루션에 의해 제거할 수 있어 결함 신호만을 검출할 수 있다. 이러한 신호 처리 방법을 적용하기 위해서 임의의 규칙적인 시뮬레이션 신호 만들었다. 그림 4(a)는 일정한 간격을 갖는 신호이고 그림 4(b)는 이러한 예측 적인 디콘볼루션방법으로 처리한 결과이다. 즉 첫 번째 신호를 기준으로 다음 신호를 예측할 수 있어 예측된 신호를 제거할 수 있다. 이 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 규칙적인 강한 신호가 없어짐을 알 수 있다. 예측 간격의 효과를 알아보기 위하여 예측 간격보다 20%의 오차를 주어 신호 처리한 결과 신호가 처리되지 않고 남아있음을 알 수 있다. (그림 4(c)) 또한 규칙적인 신호와 신호 사이에 그림 4(d)와 같이 작은 잡음 신호를 삽입하였으며 신호 처리한 결과는 그림 4(e)와 같으며 여기서 잡음 신호만 남게 됨을 알 수 있었다.

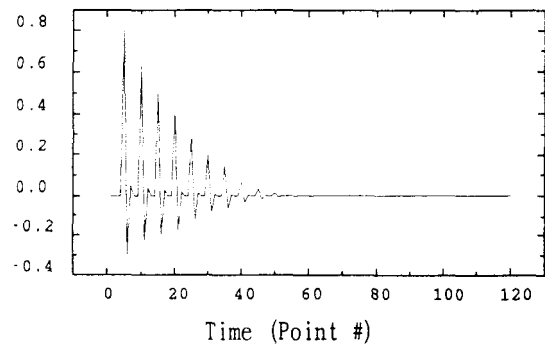


그림 4(a). 처리되지 않은 다중 반사 신호
Fig 4(a). Unprocessed signal with multiple reflection

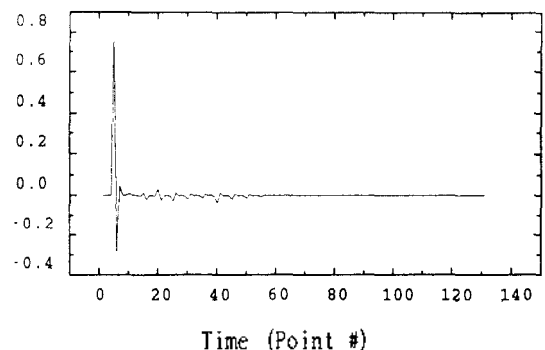


그림 4(b). 신호 처리된 결과
Fig 4(b). Processed data

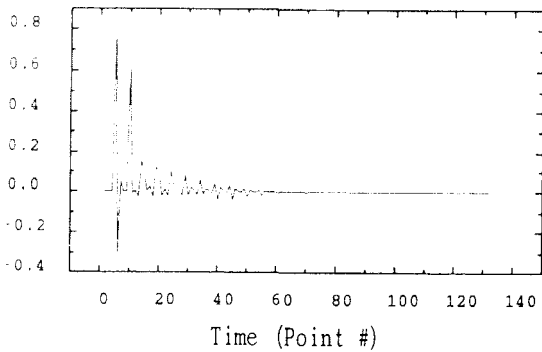


그림 4(c). 예측 간격을 20% 크게 하여 처리한 결과
Fig 4(c). Processed data; prediction distance is 20% larger than actual

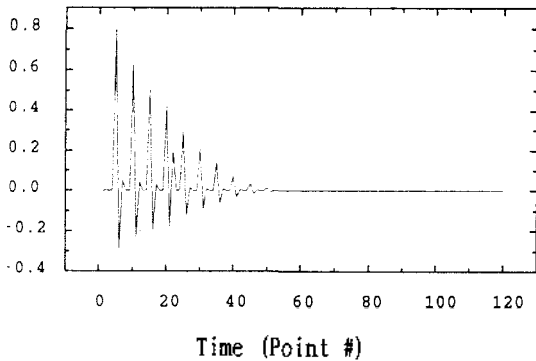


그림 4(d). 결함이 포함된 비정상 신호
Fig 4(d). Abnormal signal with defect signal

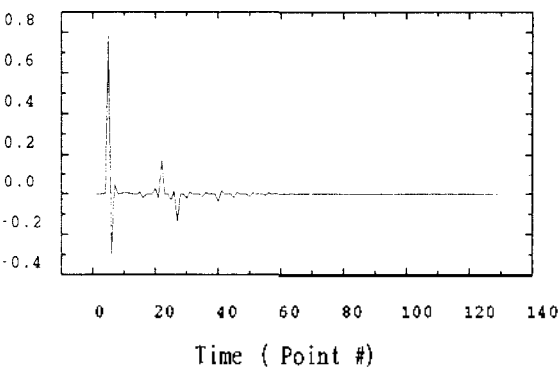


그림 4(e). (d)를 신호 처리한 결과
Fig 4(e). Processed data of (d)

다음은 시험편(carbon steel)을 나삿니 모양으로 가공하였고 노치를 그림 5와 같이 제작하였는데 본 연구에서는 0.5 mm 노치에서 신호를 수집하였다. 신호 수집에 사용된 탐촉자는 Kraut-Kramer 10MHz 탐촉자이며 PC에서 STR-825 AD 카드를 이용해 100MHz로 샘플링하였다. 그림 6(a)는 0.5 mm 크기의 결함이 3 번째 신호에 존재하는 초음파 신호이다. 이러한 신호는 일반적인 방법으로는 결함이 존재함을 알 수가 없는데 만약에 미세한 결함

이 존재하면 신호가 약간 변화한다. 이러한 변화는 미세한 시간 지연이나 진폭의 변화가 일어난다. 미세한 결함이 존재한 신호를 예측적인 디콘볼루션을 수행한 결과는 그림 6(b)와 같다. 여기서 미세한 결함 신호만 남아 있음을 알 수 있다.

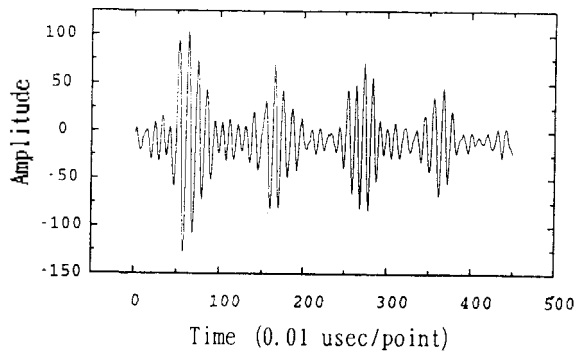


그림 5(a). 0.5mm 결함이 존재하고 있는 나삿니 신호
Fig 5(a). Thread signal with 0.5mm defect

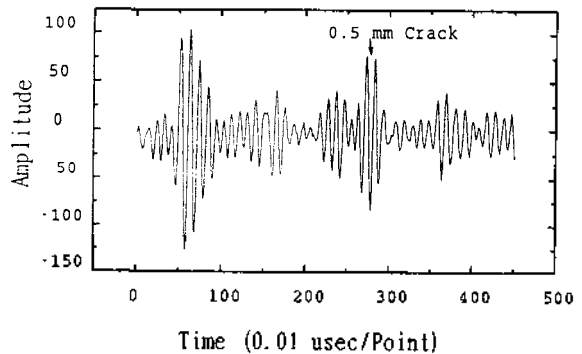


그림 5(b). (a)를 신호 처리한 결과
Fig 5(b). Processed signal of (a)

V. 결 론

여기서 이용된 신호 처리 방법은 반복되는 나삿니신호를 효과적으로 제거할 수 있는데 이러한 신호의 제거는 시험체의 구조에 대한 지식이 있어야 한다. 신호처리된 데이터는 적은 입력 파라미터에 대해 민감성을 보이지 않았으며 미세한 결함으로 인한 잡음 신호도 잘 검출할 수 있었다. 이러한 신호 처리 방법은 다층 구조를 갖는 복잡한 구조의 결함도 검출이 가능할 것이다. 그러나 초음파 신호가 금속의 조직에서 반사와 굴절이 심하기 때문에 깨끗한 신호를 얻을 수 없다. 이러한 혼성된 신호를 넓은 대역을 갖는 신호로 1 차로 신호 처리할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. NUREG-1335, "Resolution of Generic Safety Issue 29: Bolt-

ing Degradation or Failure in Nuclear Power Plants," U.S. Nuclear Regulatory Commission, June 1990.

2. NUREG-1338, "Regulatory Analysis for the Resolution of Generic Safety Issue 29: Bolting Degradation or Failure in Nuclear Power Plants," U.S. Nuclear Regulatory Commission, September 1991
3. 서동만, "Detection of Small Cracks by Forward or Backward Ultrasonic Wave in Threads," 한국음향학회, 1993. 6. (2권 3호, pp. 5-12.
4. Dong M. Suh, Whan W. Kim, "A New Ultrasonic Technique for Detection and Sizing of Small Cracks in Studs and Bolts," Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 14, No. 4, Dec. 1995, pp. 201-206.
5. Doron Kishoni, "Removal of Dominant Reverberations from Ultrasonic Time-Records of Layered Material by Digital Predictive Deconvolution," 1987 Ultrasonics Symposium, pp. 1075-1078.
6. Dong M. Suh, Whan W. Kim, and Jin G. Chung, "A Rayleigh Wave Technique for Detection and Sizing of Small Cracks in Studs and Bolts," Proceeding of the 1996 International Ultrasonics Symposium
7. Dong M. Suh, Whan W. Kim, "A New Ultrasonic Technique for Detection and Sizing of Small Crack in Stud Bolt Thread," Proceeding of the 14th World Conference on NDT, pp. 997-1000.

▲서 동 만(Dong-Man Suh)



1978년 3월~1985년 2월: 전북대학교
전자공학과
1990년 3월~1992년 8월: 전북대학교
일반대학원 전자공학과
(공학석사)
1993년 3월~1997년 2월: 충남대학교
일반대학원 전자공학과
(공학박사)

1985년 1월~1995년 2월: 한국원자력연구소 선임연구원
1995년 3월~현재: 군장공업전문대학 전자과
주관심분야: 초음파 결합 검출 및 신호처리, 비파괴검사
및 장비, 영상신호처리, 회로 및 시스템

▲김 환 우(Whan-Woo Kim) 1954년 9월 20일생

1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1979년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
1988년 6월: 미국 University of Utah (공학박사)
1979년 4월~현재: 충남대학교 전자 공학과 교수
※주관심분야: 신호처리, 이동통신, 디지털통신