

비파괴 평가를 위한 초음파 센서의 구현

이영석

청운대학교 디지털방송공학과

yslee@chungwoon.ac.kr

Implementation of Ultrasonic Sensor for Nondestructive Evaluation

YoungSeock LEE

Dept. of Digital Broadcasting & Electronics Engineering

요 약

본 연구에서는 원전 시설 및 파이프라인의 초음파 비파괴 평가를 위하여 압전 소자를 이용한 초음파 센서를 설계하고 구현하였다. KLM 모델에 의하여 설계된 초음파 센서는 임펄스 응답 및 전기음향 측정 시험을 통하여 특성을 평가하였다.

1. 서론

초음파 비파괴 평가는 검사하려는 대상에 물리적 화학적 영향을 주지 않고 대상을 검사할 수 있다는 관점에서 가동 중인 시스템, 또는 파괴 시 경제적 산업적 손실을 초래할 수 있는 중후장대형 기계들을 평가하여 피로도 예측, 수명 평가 등에 사용할 수 있는 기술이다. 특히, 원자력 발전소와 같이 중단할 수 없는 시설물의 수명 예측에는 필수 불가결한 검사 기술로서 각광을 받고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 초음파 비파괴 평가를 수행하기 위한 초음파 센서를 개발하였다.. 개발된 초음파 탐촉자(sensor)는 임펄스 응답 및 음향 특성을 분석하여 탐촉자의 특성을 검증하였다.

가 결정된다 매질의 표면 거칠기에 따라서 물과 매질 내부 경계면에서 작은 표면 에코가 발생할 수도 있다.

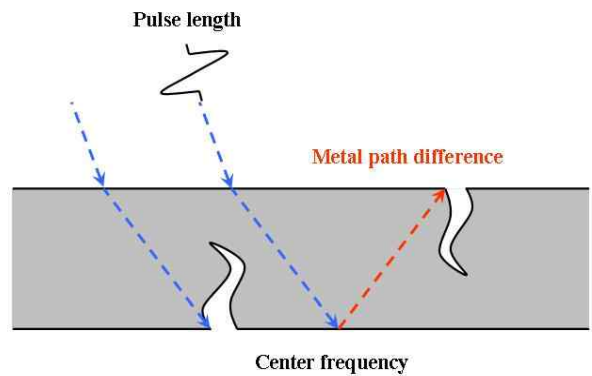


그림 1. 전열관의 초음파 검사 도식

1. 초음파 검사를 위한 탐촉자의 특성 설계

그림 1은 초음파 비파괴 평가를 수행하기 위한 검사의 도식도이다. 검사 방법은 일반적인 검사 방식은 수침 펄스-에코 방식으로 물 속에서의 초음파 임펄스는 매질 내에서 굴절각 45° 횡파만이 발생되도록 입사된다. 물 속에서의 음속(: 1480 m/s)과 매질에서의 횡파의 속도로부터 초음파 빔의 입사각도

횡파 펄스는 매질 두께 내에서 V-path를 지난 후 그 내면에 도달하게 되므로, 검사는 V-path 내에서 이루어진다. 매질 두께의 10%에 해당하는 균열을 감지하기 위해서 반 파장 조건을 부여하면 사용

주파수를 결정할 수 있다. 피복관 내면과 외면 결합을 구별하기 위해서는 1/2 V-path를 구분할 수 있는 분해능이 필요하므로, 요구되는 최소 시간분해능은 $0.37\mu s (=1.1\text{mm}/3000\text{m/s})$ 이며, 양호한 Axial scanning resolution을 얻기 위해서는 이보다 우수한 성능을 요구한다. 이는 중심주파수가 높을 뿐 아니라 주파수 대역폭이 넓은 초음파 펄스가 사용되어야 한다는 것을 의미한다. 6dB drop method를 이용하여 결합의 원주방향 프로파일을 측정할 경우 집속된 빔의 Focused beam 6dB diameter는 탐촉자 Manipulator의 스캐닝 스텝과 상호 연관되며, 양호한 검사 감도를 얻기 위해서는 집속 반경이 최소한 검사대상의 wall thickness 이하가 되도록 한다(: specification c. focused beam diameter). 이상 도식도와 해외에서의 개발 사례를 연구한 결과는 아래의 사양으로 정리된다.

- Nominal frequency : 15 MHz
- Focused beam 6dB range > 2.2 mm
- Refraction angle : $45\pm 2^\circ$
- Pulse Length < 0.3 μsec

2. 초음파 검사를 위한 탐촉자의 전기음향 설계

압전체를 이용한 탐촉자는 압전재료의 전기/기계적 특성을 고려하여 전면부하와 후면 흡음층을 설계한다. 본 연구에서는 정합층을 상용하지 않으므로 전면부하의 크기는 음향렌즈의 임피던스와 일치하게 된다. 기존의 설계방법에 따르면 이 전면부하는 후면 흡음제와의 상관관계가 없으므로 단순히 음파의 흡음성만을 고려하여 후면 흡음제를 제조하였다. 그러나 최근 연구를 통해 압전체의 전기적 특성을 고려할 경우 후면 흡음제의 임피던스 및 전면 부하의 임피던스는 밀접한 관계가 있으며, 이들이 부적절하게 선택되었을 때는 고전적인 파동전파의 이론과 부합되지 않는다. 압전재료의 두께방향의 운동만을 고려하여 1차원 문제로 축소할 경우, 압전 파동 방정식의 해는 다음과 같이 행렬식으로 표현할 수 있으며, 이 행렬을 식 1과 같은 임피던스 Z 행렬이라 한다. 이 행렬방정식으로부터 압전소자의 전기-기계

결합효과에 대한 해석이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z'_0 \cot 2\theta & Z'_0 \csc 2\theta & \frac{h}{w} \\ Z'_0 \csc 2\theta & Z'_0 \cot 2\theta & \frac{h}{w} \\ \frac{h}{w} & \frac{h}{w} & \frac{1}{wC_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (\text{식 1})$$

압전재료의 두께방향의 운동만을 고려하여 1차원 문제로 축소할 경우, 압전 파동 방정식의 해는 다음과 같이 행렬식으로 표현할 수 있으며, 이 행렬을 임피던스 Z 행렬이라 한다. 이 행렬방정식으로부터 압전소자의 전기-기계 결합효과에 대한 해석이 가능하다. 그러나 이 Z 행렬과 동일한 임피던스 행렬을 가지는 회로(: 등가회로)를 고안함으로써 해석 범위의 확장을 가져올 수 있으며, 그 물리적 의미에 대한 직관을 높여 준다. 이미 수많은 등가회로가 고안되어 왔으나 가장 널리 알려지고 유효한 것은 Mason 등가모델과 KLM 등가모델이다. KLM 등가모델은 압전소자, 정합층, 후면층 등 압전소자의 음향적 부분을 전송선로로 대체하며, 구속 상태에서의 전기용량 C_0 , 복소 전기용량 C' , 및 전기부분과 음향부분을 매개하는 권선비 ϕ 를 가진 변압기로 그림 2와 같이 이루어진다. (그림 2.28)

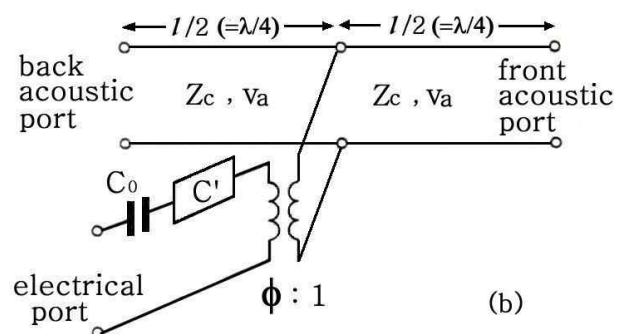


그림 2. KLM 모델

KLM 모델의 장점은 실제 탐촉자와의 유사성과 해석대상의 확장성에 있다. 정합층 및 후면층이 첨가될 경우, 해당 층에 대한 등가 회로를 새로이 구성해야 하는 여타 등가모델과는 달리 적당한 전송선로

를 첨가하면 되므로 해석의 확장이 매우 용이하다. 또한 압전소자의 절반을 각각 전/후면으로 향하는 하나의 정합층으로 취급하고 압전소자의 전기적-기계적 연성을 권선비 Φ 에 부가함으로써 전기부분과 음향부분에 대한 명확한 구분이 이루어진다. 이 등가회로의 Z 행렬을 구하고, 이 행렬로부터 왕복전달 함수 $H = V_{out}/V_{in}$ 를 계산함으로써 탐촉자의 임펄스 응답을 효과적으로 모사할 수 있다. 또한 이미 연구된 결과에 따르면 KLM 등가회로의 음향부분과 전기부분의 품질인자를 일치시킬 때 가장 효율적인 에너지 전달이 이루어지며 최적의 대역폭을 얻는다. KLM 등가회로에서 음향부분의 품질인자

$$Q_a \sim \frac{\pi}{4} \frac{2Z_c - (Z_f/Z_c)^2 - (Z_b/Z_c)^2}{Z_f/Z_c + Z_b/Z_c} \quad (\text{식 2})$$

는 6dB 스펙트럼 폭을 정의 하는 두 주파수 ω_1 과 ω_2 중에서 낮은 주파수에서 전체 시스템 임피던스의 저항성분과 리액턴스 성분이 같다는 사실에서 유도되며, 전기부분의 품질인자

$$Q_E \sim \frac{\pi}{4k_t^2} (Z_f/Z_c + Z_b/Z_c) \quad (\text{식 3})$$

는 KLM 등가회로의 변압기에서의 운동임피던스와 RLC회로의 고찰로부터 얻어진다. 이 두 표현식으로부터 후면체의 최적 임피던스는 아래와 같이 주어진다:

$$Z_b = \frac{-Z_f + \sqrt{Z_f^2 + (1+k_t^2)[k_t^2(2Z_c^2 - Z_f^2) - Z_f^2]}}{1+k_t^2} \quad (\text{식 4})$$

이 방정식은 Z_b 에 대한 2차 방정식이므로 두 개의 해를 가지게 되며 이들이 양의 실근(후면체의 특성임피던스는 허수, 음수를 가질 수 없다)을 가지기 위해서는 전면부하의 임피던스가 다음의 조건을

만족해야 한다.

$$Z_f < Z_c \sqrt{\frac{2k_t^2}{1+k_t^2}} \equiv \bar{Z}_f \quad (\text{식 5})$$

즉, 압전소자의 전기기계 결합 계수에 의존하는 Z_f 의 한계 값이 존재한다는 결론을 얻는다. 이 한계 값을 \bar{Z}_f 라고 하면, $Z_f = \bar{Z}_f$ 에서 $Z_b = 0$ 이다. 다시 말해서 $Z_b = 0$ 일 때 $Q_a = Q_e$ 를 만족하는 전면부하 값이 \bar{Z}_f 이다. 이 조건에서 가장 효율이 좋고 대역폭이 넓은 탐촉자를 얻을 수 있으나, 일반적으로 $Z_b \neq 0$ 이므로 전면부하의 임피던스는 한계 값 보다 작은 어떤 값을 가진다: $Z_f < \bar{Z}_f$.

본 연구에서는 기존에 사용되어 오던 시간응답의 실수 부분으로 주어지는 rf 파형보다는 진폭으로 주어지는 비디오 파형을 사용한다. 비디오 파형은 전파정류된 rf파형의 포락선을 나타낸다. 음과 양의 두 피크를 갖고 진동하는 rf 신호 보다는 양의 한 피크를 갖고 단조 증가 또는 감소하는 비디오 파형을 이용함으로써, 초음파변환기의 임펄스 응답특성을 보다 정량적으로 평가할 수 있다. 단위 진폭을 갖는 전기임펄스에 대한 응답에코 진폭의 비를 의미하는 변환기의 상대감도를 먼저 정의한다.

$$S_r = 20 \log(A_p) \quad (\text{식 6})$$

여기서 A_p 는 비디오 파형의 피크진폭이다. 이 상대감도는 항상 음의 값을 갖는다. 그리고 변환기의 성능지수를 다음과 같이 정의한다:

$$P_x = |S_r| W_x \quad (\text{식 7})$$

3. 구현된 탐촉자의 특성 검증

그림 3은 구현된 초음파 탐촉자의 임펄스 응답 및 전파 정류된 파형을 보여주고 있다. 또한 초음파 탐촉자의 전면 부하 임피던스에 따른 특성 변화는 그림 4와 같이 나타난다.

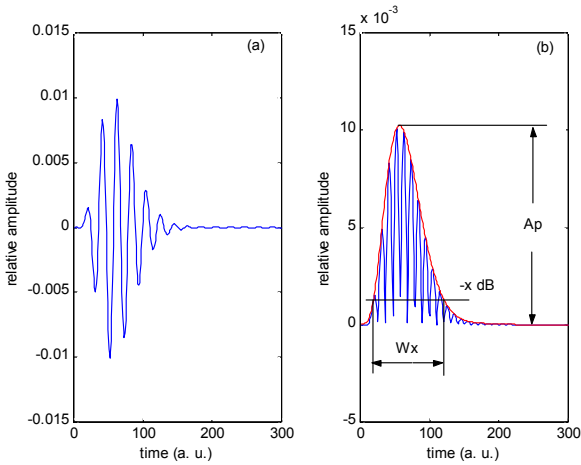


그림 3. 초음파 변환기의 임펄스 응답: (a) rf 파형, (b) 전파 정류된 rf 파형과 비디오 파형.

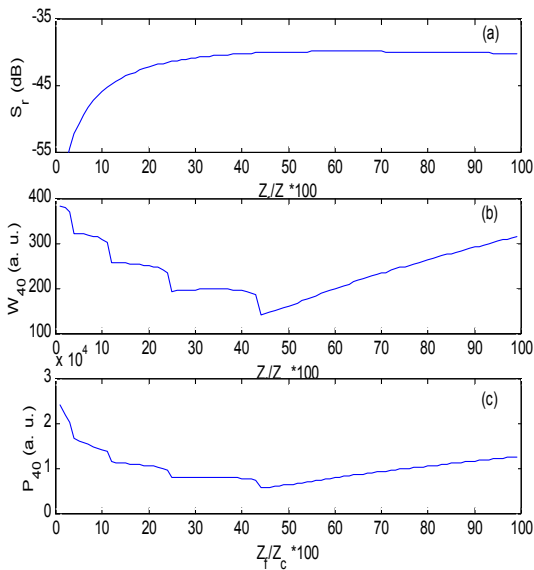


그림 4. 전면부하 임피던스에 따른 초음파변환기의 특성 변화 예: (a) 상대감도, (b) 파형폭, (c) 성능지수.

또한 그림 5는 구현된 초음파 탐촉자의 음향 설계 결과를 나타내고 있다.

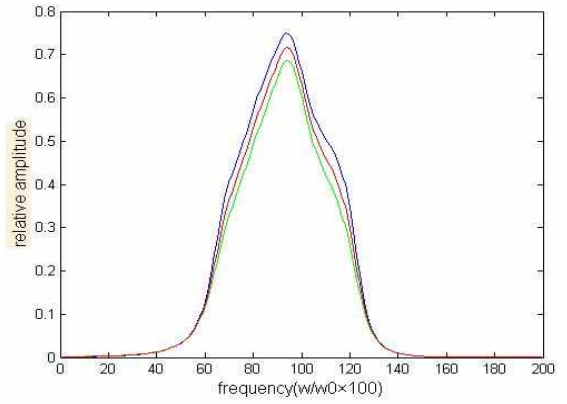
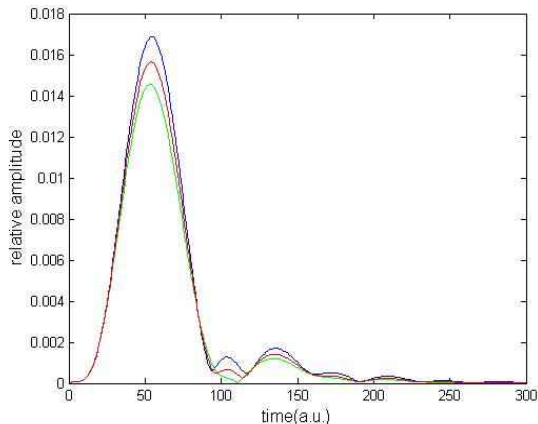


그림 5. 전기음향 설계 결과

2. 결론

본 연구에서는 초음파 탐촉자를 비파괴 평가에 응용하기 위하여 설계 및 구현을 수행하였다. 구현된 탐촉자는 각각 임펄스 응답 및 전기음향 설계 특성을 실험하여 탐촉자의 특성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Physical Acoustics XXIV - Ultrasonic Instruments and Device II, p289
- [2] GE-Panametrics Technical Note