

원전 기기 건전성의 온라인 검사를 위한 유도 초음파의 실험적 연구

Experimental Studies on Ultrasonic Guided Waves for the On-Line Inspection of Structural Integrity of Nuclear Power Plants

엄홍섭*, 김재희*, 송성진**, 김영환**†

Heung-Seop Eom*, Jae Hee Kim*, Sung-Jin Song** and Young H. Kim**†

초 록 기기 건전성의 온라인 검사 및 감시 기술은 기존의 원전의 가동 중 검사의 효율적 수행에 필요한 정보를 제공한다. 유도 초음파는 온라인 검사와 감시에 활용 가능성이 있는 기술 중의 하나로 알려져 있다. 본 연구에서는 온라인 검사 및 감시 기술 개발의 일환으로 유도초음파를 이용하여 파이프의 건전성을 검사/감시하는 기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 증기 발생기 세관을 실험 대상으로 하여 분산 선도 및 특정 모드에 대응하는 초음파 입사각을 계산하였다. Short time Fourier transform을 이용한 시간-주파수 분석을 통하여 유도초음파 모드를 확인하였으며, 유도 초음파가 증기발생기 세관의 곡관 부분을 통과할 때 모드 변환이 발생하지 않는 것을 실험적으로 확인하였다. 유도 초음파를 이용한 증기발생기 세관의 최적 검사 모드를 제안하고 실험에 의하여 이를 확인하였다

주요용어: 원자력발전소, 기기 건전성, 온라인 모니터링, 유도초음파, 증기발생기 세관

Abstract Deployment of an advanced on-line monitoring of the component integrity offers a prospect of improved performance, enhanced safety, and reduced overall cost for nuclear power plants. Ultrasonic guided waves have been known as one of the promising techniques that could be utilized for on-line monitoring. The present work is aimed at developing a new method for on-line monitoring of the pipes during the operation period of nuclear power plants. For this purpose, the steam generator (S/G) tube was selected as an object of the experiment. Dispersion curves and the incident angles corresponding to the specific modes were calculated for the S/G tube. The modes of guided waves were identified by the time-frequency diagrams obtained by the short time Fourier transform. It was experimentally confirmed that there was no mode conversion when the ultrasonic guided waves passed over the curved region of the S/G tube. An optimum mode of guided wave for the S/G tube was suggested and verified by the experiment.

Keywords: nuclear power plant, structural integrity, on-line monitoring, ultrasonic guided wave, steam generator tube

1. 서 론

국내에서 1970년대 이후 건설되어 운전 중인 원자력 발전소들의 운전 연한이 증가함에 따라 기기 및 구성 부품의 건전성이 경제적 측면과 안전성 측

면에서 점차 중요한 이슈로 제기되고 있다. 외국에서는 이미 일본의 하마오카 원전 1호기 증기배관 파열사고에서 나타났듯이 원전 주요 기기의 건전성 상실은 경제적으로나 사회적으로 심각한 피해를 주고 있다[1]. 가동중인 원자력발전소 기기의 건전성을

확보하기 위해 현재 사용중인 방법은 핵연료 교체 시 수행되고 있는 주기적인 가동 중 검사(in-service inspection: ISI)와 일부 계통에 대한 온라인 모니터링이다. 주기적인 가동 중 검사에서는 기기의 열화, 노후화 그리고 파손을 감지하기 위해 여러 가지 비파괴검사 시험(non-destructive testing: NDT)을 하고 있으며 일부 주요 계통에 대한 온라인 모니터링은 진동 감시, 음향 누설 감시 그리고 loose parts 모니터링 기술을 사용하고 있다. 현재 가동 중 검사에서 사용 중인 NDT 기술들은 비교적 잘 정립되어 있고 또 상용으로 개발된 검사용 장비가 많이 있지만, 이들은 비교적 단순한 재료와 간단한 형상의 피검체에 대한 검사를 가정으로 확립된 기술이어서 원전의 주요 기기와 같이 형상이 복잡하고 재료가 다양하며 또 방사능이나 접근 제한이 있는 피검체의 신뢰성 있는 검사에는 어려움이 있다.

이와 같은 어려움을 해결하기 위한 하나의 방안은 원전 주요 기기 및 구성품의 온라인 실시간 검사와 감시이다. 발전소가 운전되고 있는 동안 주요 기기와 구성 부품에 대한 온라인 실시간 검사 및 감시를 수행하여 현재의 ISI보다 조기에 결함을 찾고 또 결함의 발생 여부와 진행 상태에 대한 정보를 수집하여 이를 토대로 가동 중 검사에서 집중적이고 정밀한 검사를 수행한다면 경제성과 안전성 측면에서 보다 효율적인 성과를 얻을 수 있기 때문이다. 한편 현재 원전에 설치되어 있는 계통에 대한 온라인 모니터링 시스템들은 계통의 기능 감시가 주목적이기 때문에 결함의 발생과 그 상태에 대하여는 충분한 정보를 제공하지 않는다. 또 한편으로 Generation IV와 같은 차세대 원자로의 경우에 핵연료 재장전 간격이 더 늘어나고 이점은 기존의 재장전 주기(1년 ~ 1.5년)를 기준으로 설정되었던 현행 검사 관련 규제와 ISI 기술에 대한 보완을 필요로 하게 된다. 따라서 차세대 원자로의 이점을 살리고 현재 수준의 안전성을 보장하기 위해서는 새로운 접근 방법이 필요한데 원전의 운전을 방해하지 않고 기기의 건전성 검사를 수행할 수 있는 온라인 검사 및 감시 기술은 이에 대한 하나의 방안으로 국외에서도 최근에 연구가 수행되고 있다[2-5].

본 연구에서는 온라인 검사 및 감시 기술에 적용 가능성이 있는 기술 중의 하나인 유도초음파를 증기발생기 세관에 시범적으로 적용하였다. 이를 위하여 증기발생기 세관의 유도초음파와 분산 곡선을 구하였으며, 웨지를 사용하여 유도초음파를 발생시

키고 수신하였다. 시간-주파수 분석 기법 중의 하나인 short time Fourier transform (STFT)을 이용하여 수신한 초음파 신호를 분석하여 발생된 유도 초음파의 모드를 확인하였다. 증기발생기 세관의 곡관부에서도 동일한 실험을 수행하여 곡관부에서 모드 변환여부를 조사하였다. 탐촉자 사이의 거리를 변화시키면서 수신한 초음파 신호에 대하여 STFT를 수행하고 그 결과로부터 군속도를 구하였다. 증기발생기 세관에 사용할 유도초음파의 최적모드를 선정하여 이를 실험적으로 검증하였다.

2. 온라인 검사/감시

2.1. 온라인 검사/감시 현황

기존의 ISI를 보완하고 차세대 원전의 유지보수 전략에 대응하기 위한 하나의 방안으로 원전 주요 기기 및 구성부품에 대한 온라인 연속 검사와 감시 기술이 최근에 제시되고 있다. 특히, 핵연료의 재장전 간격이 길어진 차세대 원전의 기기 건전성 확보 측면에서도 온라인 연속감시 기술은 하나의 유력한 방안으로 고려되고 있어 미국의 NERI 프로그램과 같은 차세대 원전을 위한 프로젝트에서 관련 연구들이 진행 또는 계획 중에 있다.

원전 주요 기기 및 구성품의 건전성 온라인 연속 감시 분야는 최근에 대두된 분야로 아직 명확한 개념 정립이 되어있지 않은 상태이지만 외국에서 현재 진행 중이거나 계획 중인 연구 과제들의 내용을 종합하여 보면 기존의 오프라인 ISI에 대비된 발전소 운전 중 온라인 검사와 감시(on-line inspection and monitoring)에 중점을 두고 있다. 따라서, 주요 연구 내용도 기기의 온라인 결함 감시에 필요한 정보처리의 자동화, 온라인 감시용 센서 스위트(sensor suite) 개발, 무선을 비롯한 데이터 전송 방식 연구, 관련 시스템의 통합, 온라인 검사 및 감시에 적용 가능한 검사 기술 개발, 차세대 원전을 위한 불박이형(built-in) 구조적 건전성 감시 시스템의 개념 개발, 온라인 검사용 센서 시스템의 성능 평가, 발전소 운전 환경(고온, 방사능 등)에서 사용 가능한 센서 및 재료 개발 등이 주류를 이루고 있다. 국내의 경우에는 외국의 연구와는 조금 다르게 온라인 검사 측면 보다는 대상 시스템(밸브, 펌프, 터빈, 발전기, 배관 등)의 고유한 결함의 탐지와 이상상태 감시 및 진단 기술에 중점을 둔 연구가 대

부분이며 외국의 연구에서 나타난 온라인 관련 기술의 개발이 명시적으로 나타나 있지는 않다[6].

2.2. 온라인 감시/검사 기술 개발 시 고려 사항

국내외의 문헌을 통해 조사된 내용을 바탕으로 원전주요 기기 및 구성 부품의 온라인 감시 및 검사기술 개발에 필요하다고 보여지는 사항들을 정리하면 다음과 같다.

• 온라인 감시 및 검사 대상 기기 및 구성부품

수많은 원전 NSSS 기기 및 구성부품 모두를 온라인으로 감시하는 것은 경제적으로나 기술적으로 불가능하다. 따라서 과거의 고장 사례, 최근에 위험도 기반(Risk Informed: RI) 규제의 하나로 설정된 위험도 기반ISI의 내용 그리고 온라인 감시 및 검사에 사용 가능한 기술들의 특성 등을 고려하여 온라인 감시의 대상이 될 기기를 선정할 필요가 있다.

• 감시 및 검사 기술

기존의 원전 ISI에서 사용되는 NDT 기술이나 타 산업에서 사용되는 감시 및 검사 기술들을 그대로 온라인으로 활용하기 어렵다. 기존 NDT 기술은 검사자 또는 매니퓰레이터(manipulator)가 피검체를 따라 탐촉자를 움직이면서 검사하는 방식으로 이루어져 있는데 이는 발전소 운전 중에는 적용하기 힘든 방식이다. 따라서 음향 감시나 유도초음파 검사 등과 같이 한 곳에서 원거리 및 광범위한 탐사가 가능한 감시 및 검사 기술의 도출과 개발이 필요하다.

• 센서 스위트(sensor suite)

온라인 감시 및 검사에 사용될 센서 스위트는 발전소 운전 중에 사용되므로 검사자의 접근이나 기존 검사 장비(특히 매니퓰레이터)의 활용이 거의 불가능하다. 따라서 기본적으로 이들 센서 스위트는 운전되고 있는 기기나 구성부품에 부착되거나 또는 불박이(built-in) 형태가 되어야 한다. 또한 검사 신호를 비롯해서 여러 가지 정보를 관리자가 있는 원격지로 송수신 할 수 있어야 하기 때문에 보다 복잡한 전자기기 등이 포함될 가능성이 높는데 이렇게 복잡화 된 센서 스위트는 고온, 고압, 방사능과 같은 발전소 운전 환경에 취약할 수 있고 이를 해결하기 위한 연구가 필요하다.

• 자료 송수신 방법

ISI와 같이 발전소 정지 기간 중에는 일시적으로 케이블을 설치하고 이를 이용하여 검사 자료의 송

수신이 가능하지만, 온라인 감시 및 검사의 경우에는 이런 케이블의 설치가 영구적이 되어 새로운 문제점을 야기할 수 있다. 따라서 무선 데이터 송수신이나 멀티플렉싱 또는 중앙 집중식 데이터 송수신 전용 장비 등을 이용한 케이블의 간소화 등의 연구가 필요하다.

• 결함 탐지의 신뢰성

온라인에 의한 검사 및 감시 경우는 센서의 고착, 아직까지는 미비한 신호 수집 및 해석 기술 등으로 인하여 결함 상태의 정량화 정도나 정확도가 오프라인 검사에 비하여 떨어질 것으로 보여진다. 그래서 NIMS와 같은 계통의 감시 및 진단 시스템에서도 이를 극복하기 위한 지속적인 연구가 진행되고 있는데 기기 및 구성품의 온라인 감시 및 검사의 경우에도 검사 결과의 정확성을 높이는 연구가 필요하다.

• 오프라인 검사 방식(ISI)과의 비교

기존 ISI를 온라인 방식으로 완전하게 대체하는 것은 가까운 장래에는 불가능한 것으로 보여진다. 그래서 당분간은 기존 ISI를 보완하거나 또는 부분적으로 대체하는 것이 동 분야의 주된 연구 개발 목표로 될 것이다. 보완 또는 부분적 대체 어느 경우나 안전성과 경제성 측면에서 기존 ISI 방식과의 비교가 필요한데 이것은 온라인 감시 및 검사 방식이 기존 기기 및 구성품의 구조상 설계 변경이나 또는 발전소 운전 방식의 변화를 필요로 할 가능성도 있어서 예측하기가 매우 복잡하고 어려운 작업으로 보여지며, 따라서 이에 대한 연구도 필요하다고 보여진다.

2.3. 온라인 검사/감시 기술의 전망

원전 NSSS 기기 및 구성 부품에 대한 온라인 감시 및 검사 기술은 단기 중기적으로는 운전 중 기기 및 구성품의 건전성에 대한 여러 가지 유용한 정보를 수집하여 ISI를 보다 효율적으로 수행하는데 필요한 정보를 제공할 수 있어 운전 연한이 점차 높아지고 있는 기존 원전의 안전성 확보와 경제성 향상에 있어 하나의 유력한 방안이 될 가능성을 가지고 있다. 장기적으로는 핵연료 재장전 간격이 늘어난 차세대형 원자로의 경우 기존의 재장전 주기(1년 ~ 1.5년)를 기준으로 설정되었던 현행 ISI 관련 규제와 관련 비파괴검사 기술에 대한 보완을 필요로 하게 되는데, 차세대 원자로의 이점을 살리고

현재 수준의 안전성을 보장하기 위해서는 원전의 운전을 방해하지 않고 기기의 건전성 검사를 수행할 수 있는 형태의 접근 방법이 필요하고 기기의 온라인 감시 및 검사는 이에 대한 하나의 방안으로 보여진다.

3. 유도초음파

3.1. 유도초음파의 정의

관, 판, 봉과 같은 구조물의 원거리 탐상에 유도초음파가 적합하다는 것이 널리 알려져 있다[7]. 검사체 내부로 경사지게 입사된 종파나 횡파는 경계면에서 반사되면서 모드변환(mode conversion)을 통해 수많은 종파와 횡파로의 다중반사를 일으키게 된다. 이때, 모드 변환된 종파 및 횡파의 파장이 피검사체의 두께와 비슷한 수준인 경우에는 반사된 부분파동모드(partial wave modes)들 사이에는 상호간섭(interference)과 중첩(superposition)이 발생한다. 이와 같은 파동의 중첩은 상하 경계면에서 반사된 종파와 횡파, 각 부분 파동 모드의 파벡터(wave vector) 성분 중 피검사체의 종 방향으로 진행되는 파동성분을 제외한 두께 방향의 파동 성분 사이에는 상쇄간섭(destructive interference)이 일어난다. 이와 함께 피검체의 길이 방향으로의 보강간섭(constructive interference)효과를 통해 두께 방향이 아닌 종방향으로 전파하게 되는 새로운 형태의 초음파가 합성되는데 이를 유도초음파(ultrasonic guided waves)라고 부른다[8].

3.2. 관형 구조물에서의 유도초음파의 모드

유도초음파는 부분파동 모드들이 서로 간섭을 일으켜서 진행되는 초음파로, 간섭이 일어나는 모드들에 따라서 유도 초음파의 모드가 존재한다. 이론적으로 무한한 수의 유도초음파 모드가 존재할 수 있는데, 이 모드들은 시험체의 밀도와 탄성 계수는 물론이고, 시험체의 형상, 파의 진행방향 등에 의해 결정된다. 직관에서의 유도 초음파 전파에 대해서는 많은 연구가 이루어져 있으므로[9,10], 여기에서는 그 특성을 간단히 기술한다. 유도초음파가 관의 길이 방향으로 진행되는 경우에는 원주방향과 두께 방향으로 간섭이 일어난다. 이에 의해 결정되는 유도초음파 모드를 나타내기 위해서 각각에 대하여

두 개의 첨자 M (circumferential order)과 n (mode number)을 사용한다. Circumferential order가 0이면 진행하는 유도초음파가 관의 축에 대해 대칭이고, 0이 아닌 경우에는 축 대칭이 아님을 의미한다. 축 대칭인 모드(axisymmetric modes)는 다시 longitudinal 모드와 torsional 모드로 구별되어 있는데 이는, 파가 관의 벽 속에서 진동하는 양상에 따른다. Longitudinal 모드는 파가 진동하는 성분이 관의 길이방향과 반경방향으로만 있는 경우로서 $L(0,n)$ 으로 나타내며, torsional 모드는 파의 진동성분이 원주방향으로만 있을 경우로서 $T(0,n)$ 으로 나타낸다. $M=1, 2, 3$, 인 경우에는 비축대칭인 모드(non-axisymmetric modes)를 나타내는데 이를 flexural 모드라고 불리우며 $F(M,n)$ 으로 표시한다. Flexural 모드의 경우에는 관의 벽 속에서 파의 진동성분이 세 방향(반경, 원주 그리고 길이방향)으로 모두 존재한다.

Longitudinal 모드와 torsional 모드는 circumferential order가 0에서 무한한 수의 모드를 가지고 있고, circumferential order가 1, 2, 3, 인 경우에 대해서도 circumferential order에 대해 무한한 수의 flexural 모드의 수를 가지고 있다. 유도초음파가 관을 전파할 때 이들 세가지 모드가 모두 존재할 수 있지만, 일반적으로 실험적으로 주로 사용되는 모드는 축 대칭인 longitudinal 모드이다. 그 이유는 일반적인 초음파 센서로 잘 발생될 수 있으며, 축 대칭이기 때문에 분석이 간단하기 때문이다. 그러나 비축대칭 센서의 사용 또는 비축대칭 결합으로 부터의 반사 등으로 인하여 실험적으로 비 축대칭인 모드, 즉 flexural 모드가 생성될 수 있기 때문에 비축대칭 모드에 대한 연구가 필수적이다. 그리고 torsional 모드는 실험적으로 발생시키고 수신하는데 있어서 일반적인 초음파 센서로는 효율이 떨어져서 잘 사용되지 않고 있다.

3.3. 유도초음파의 분산성

유도초음파의 대표적인 물리적 특성중의 하나는 일반적인 체적파(bulk wave)와 달리 유도초음파의 속도는 매질의 밀도와 탄성계수는 물론이고 시험체의 형상, 유도초음파의 모드, 전파하는 유도초음파의 주파수 등에 의해 달라진다. 따라서, 유도초음파는 주파수에 따라서 전파속도가 달라지므로 매질 내를 진행하면서 그 파형이 달라지게 되는데, 이를

분산이라 한다. 유도초음파를 비파괴검사나 온라인 감시에 적절히 적용할 때에 가장 어려운 점은 유도 초음파의 분산성이다. 분산특성을 가진 유도초음파의 신호를 정확하게 발생시키고, 이를 수신하여 판독하기 위해서는 피검체의 형상, 두께, 재질, 입사 각 및 주파수 등의 탐상 조건에 따라 유도초음파의 모드를 예측하고 그에 따른 신호 예측이 가능해야 하는데, 이를 위해서는 유도초음파의 분산성을 잘 알아야 한다.

4. 온라인 검사 적용을 위한 유도초음파 실험

4.1. 증기발생기 세관의 유도초음파 분산선도

온라인 검사 대상으로 본 연구의 대상으로 두산 중공업(주)에서 제작한 울진 3, 4 호기용 증기발생기 세관을 선정하였으며, 이 세관에 대한 유도초음파 분산곡선을 구하였다. 분산선도를 구하기 위하여 사용한 증기발생기 세관 물성치 항목들은 Table 1과 같다. 분산해(solution)를 구하기위해 Matlab을 사용하였다. 5-point 평균법을 적용하였으며, 해가 발산하거나 계산상의오류로 인해 엉뚱한 값이 생기는 경우에는 앞뒤 수치의 평균값 등으로 보정하였다. 이와 같이 구한 분산곡선을 Fig. 1에 나타내었다.

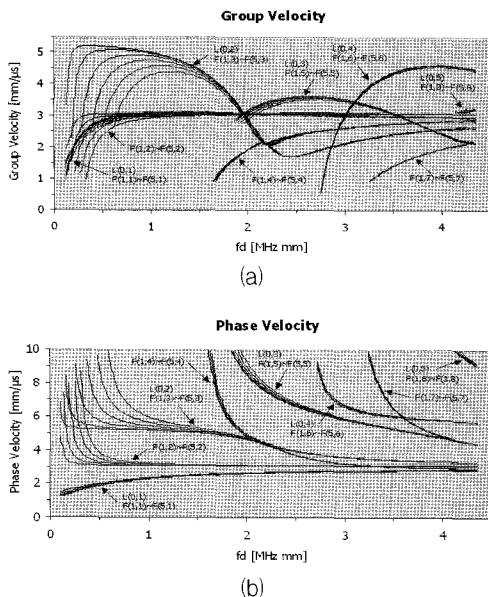


Fig. 1 Calculated dispersion curves of for a steam generator tube for (a) the group velocity and (b) phase velocity.

Table 1 Specification of a steam generator tube

Item	Contents
Material	Inconel 600 HTMA
Longitudinal wave velocity	5,915 m/s
Transverse wave velocity	3,078 m/s
Density	8.45 g/ cm ³
Outside Diameter	19.05 mm (0.75")
Thickness	1.09 mm (0.043")
Total length	16.94 m
Radius of Curvature	180 mm

4.2. 실험장치

유도초음파를 발진하고 수신하기 위한 고풍력 Pulser/receiver 장치로는 RITEC의 RAM-10000을 사용하였으며, tone burst 출력과 연속적인 주파수는 PC에 연결하여 전용 프로그램에서 조절하였다. 수신된 유도초음파 신호를 표시하고 저장하기 위해서 디지털 오실로스코프(Lecory 9310A)를 사용하였다. 증기발생기 세관은 내·외부의 위치에 따라 그 곡률의 차이는 있으나 모양은 U자형으로 되어있다. 실험은 경계면에서의 초음파 모드변환여부를 고려하기 위하여 Fig. 2와 같이 직관부와 곡관부에서 각각 실험을 수행하였다.

원하는 모드의 유도초음파를 선택적으로 발생시키기 위해서는 초음파 입사각의 변경이 가능해야 한다. 이를 위해서 가변각 웨지를 설계, 제작하였다. 웨지의 재질은 Plexiglass로써 종파속도 2720 m/s 이다. 중심주파수가 0.5, 1.0, 2.25 MHz인 Panametrics 사의 Accuscan-S 사각형 탐촉자를 사용하였다.

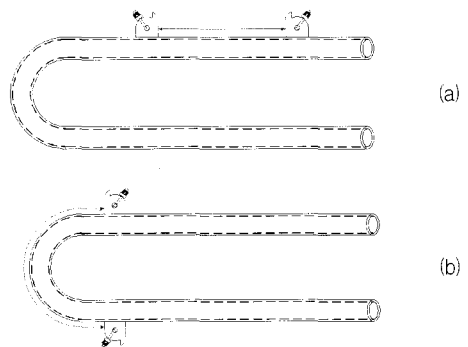


Fig. 2 Experimental setup of the guided waves for the steam generator tube. (a) straight region and (b) curved region.

4.3. 유도초음파 모드와 입사각

유도초음파의 위상속도와 입사각의 관계는 Snell의 법칙에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{V}{\sin \theta} = c_{ph} \quad (1)$$

여기서 V 는 초음파 센서에 부착된 웨지(wedge)의 종파속도, θ 는 웨지에서 입사각, 그리고 c_{ph} 는 유도초음파의 위상 속도이다. 주어진 탐촉자의 주파수와 판의 두께로부터 fd 값이 결정되고 원하는 모드의 위상속도를 분산곡선에서 구할 수 있다. 위상속도가 결정되면 식 (1)로부터 입사각이 결정된다. 이론적으로는 단일진동수와 단일위상속도를 결정하여 위상속도 분산선도 상의 특정지점의 모드를 발생시킬 수 있으나, 실질적으로는 가진하는 신호의 시간적인 길이와 센서의 크기 제한으로 인하여 단일 진동수와 단일 위상속도를 갖는 유도초음파를 발생시킬 수가 없다. 따라서, 실험적으로 발생되는 유도초음파는 시스템과 센서의 특성에 의해 결정되어지는 진동수 대역과 위상속도의 대역을 가지고 있다.

4.4. 증기발생기 세판에서의 유도초음파 시험

2.25 MHz 탐촉자를 사용하여 입사각이 30°로 하고 송수신 탐촉자 사이의 거리를 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 m로 하였을 때 수신된 파형과 SIFT 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 수신된 파의 시간 폭은 매우 길며 주파수 성분은 도착 시간에 따라 달라져서 전형적인 분산특성을 나타내고 있다. 따라서, 수신된 유도 초음파는 전파거리가 멀어질수록 파의 에너지가 긴 시간 동안에 퍼져서

진폭이 줄어든다. 그럼에도 불구하고 STFT의 형태는 유사하여 동일한 모드가 전파됨을 알 수 있다. 즉, 낮은 주파수 성분(1 MHz)이 먼저 도착하고 시간이 경과할수록 높은 주파수 성분(2 MHz)이 도착하여 높은 주파수 성분의 군속도가 더 느림을 정성적으로 유추할 수 있다. 전파모드를 확인하기 위해서는 정량적인 군속도 값을 알 필요가 있다. 군속도를 측정하려면 초음파 전파거리를 전파시간으로 나누면 되는데, 일반적으로 전파시간은 시험체의 내부에서 진행된 시간 뿐 아니라, probe delay와 wedge delay 등을 포함한다. 이러한 지연시간을 상쇄하기 위해서 탐촉자 사이의 간격을 0.2 m 씩 움직이면서 전파시간을 측정하였다. 분산이 있는 파의 군속도를 시간대역 파형에서 직접 측정하기는 매우 어렵다. 따라서, Fig. 3의 SIFT에서 대표적으로 1.0, 1.5, 2.0 MHz 주파수대의 전파시간을 측정하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 각각의 주파수에 대하여 탐촉자 거리에 대한 전파시간의 변화에서 기울기를 구하고 그 값의 역수로 군속도를 정의하였다.

Table 2 Propagation time of wave between transmitter and receiver

Distance (mm)	Transit time (μ s)		
	f=1.0 MHz	f=1.5 MHz	f=2.0 MHz
0800	180.82	191.78	337.53
1000	222.47	236.71	410.96
1200	260.82	290.41	493.15
1400	300.27	337.53	574.25
1600	338.63	380.27	654.25
Slope(μ s/mm)	0.1967	0.2389	0.3984
Group velocity(m/s)	5,080	4,190	2,510

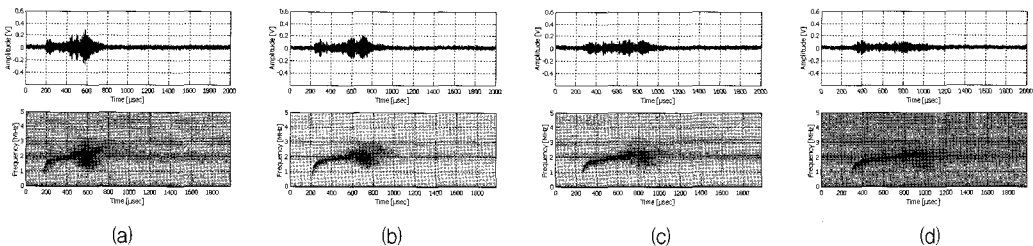


Fig. 3 Received RF signals and their STFT obtained by a 2.25 MHz transducer with an incident angle of 30°. The distance between the transducers were (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m and (d) 1.4 m

Fig. 4에 유도초음파의 모드 분석을 위한 다이어그램을 나타내었다. 이 다이어그램에서는 Table 2에서 구한 군속도와 계산된 분산곡선과 비교 분석이 가능하다. 여기에서는 대표적으로 2.25 MHz 탐촉자와 가변각 웨지를 사용한 결과를 보여주고 있다. 입사각이 30°로 정해지면 이에 해당하는 위상속도는 5.37 mm/μs로 결정되고, Table 2의 측정값이 Fig. 4의 오른쪽(e 도표)에 나타난 군속도 분산곡선상의 군속도와 잘 일치한다. 따라서 탐촉자에서 발생하는 주파수 성분의 폭과 빔 퍼짐으로 인하여 위상속도와 주파수 성분에 어느 정도 오차는 있으나 발생된 유도초음파 모드는 L(0,2), F(1,3)-F(5,3)임을 알 수 있다.

증기발생기 세관의 곡관부와 직관부의 유도 초음파 전파 특성을 알기 위한 실험을 수행하였다. 여러 주파수의 탐촉자와 다양한 입사각에 대하여 실험이 수행되었으며, 그 중에서 대표적으로 중심주파수가 2.25 MHz인 탐촉자를 사용하여 입사각이 60°인 경우에 직관부와 곡관부에서 수신된 유도초음파의 파형과 STFT 결과를 Fig. 5와 6에 각각 나타내었다. 두 그림을 비교해 보면 경과시간과 STFT 결과가 큰 차이가 없어서 확연한 모드 변환이 일어나지 않은 것으로 판단된다. 이는 관경에 비하여 대상체의 곡률이 크지 않아서 모드 변환으로 인한 신호의 변화를 고려하지 않아도 된다는 것을 의미한다.

4.5. 결함 검출 최적 모드 선정

결함 검출을 위한 유도초음파의 최적 모드 선정 기준은 검사 대상체에 따라 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 다음과 같은 사항을 고려하였다.

- 1) 군속도 분산선도에서 속도가 되도록 가장 빠른 모드를 선정한다. 파검체에 결함이 존재하게 되면 그 근처를 지나가는 초음파는 물리적인 특성상 경계면에서 모드변환되어, 그 모드와 속도가 바뀌고 예상치 못한 신호가 발생하면 신호해석이 어렵다. 따라서 빠른 군속도를 가지는 모드를 선정하면 다른 모드들과의 식별이 용이하고 모드변화 여부를 명확히 확인 할 수 있다.
- 2) 위상속도 분산곡선에서 비교적 평탄한 부분의 모드를 선정한다. 입사각에 의해 결정되는 위상속도에 대해 fd 의 폭이 넓으면, 탐촉자의 초음파에너지 중에서 많은 양이 유도초음파로 변환 될 가능성이 높아지며, 또한 넓은 주파수영역(board band)으로 인해 펄스 폭(pulse duration)이 좁아져서 시간 분해능(resolution)이 높아지는 장점이 있다.
- 3) 선정된 모드 부근에 여러 모드가 발생하지 않아야 한다. 비슷한 속도를 가진 모드가 많으면 구별이 어려워져, 신호의 특성 분석이 곤란해진다.
- 4) 적합한 탐촉자를 쉽게 구할 수 있어야 한다. 현재 일반적으로 구할 수 있는 탐촉자는 중심주파

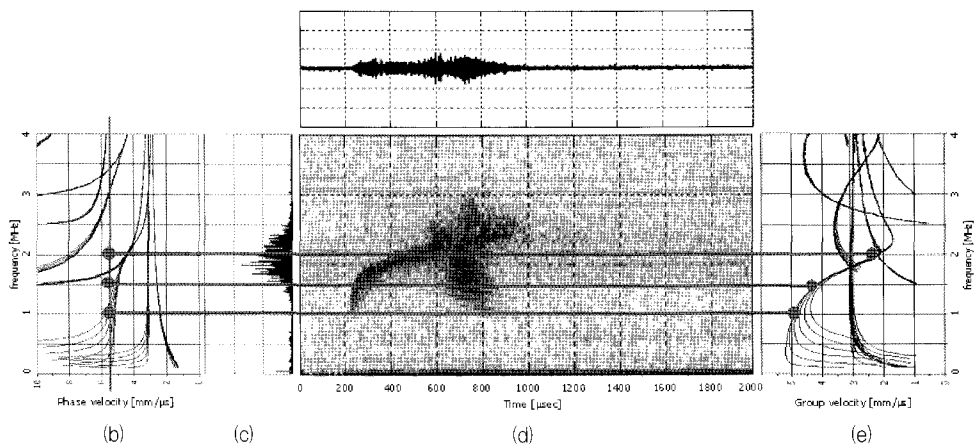


Fig. 4 An example of the analysis of ultrasonic guided wave obtained by a 2.25 MHz transducer with an incident angle of 30°. (a) time-domain waveform, (b) the phase velocity dispersion curve, (c) the frequency spectrum of the waveform, (d) the short time Fourier transform and (e) the group velocity dispersion curve.

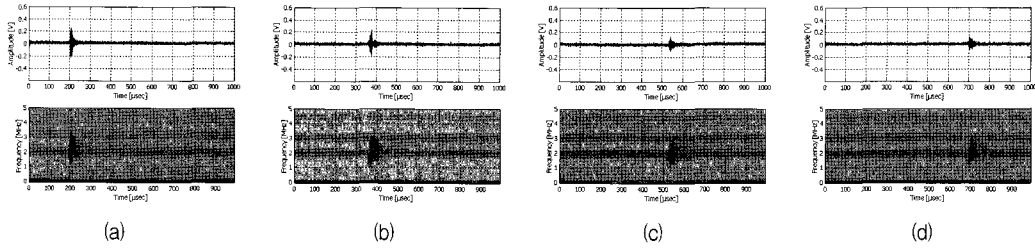


Fig. 5 Received RF signals and their STFT for the straight region of the steam generator tube obtained by a 2.25 MHz transducer with an incident angle of 60°. The distance between the transducers were (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m and (d) 1.4 m.

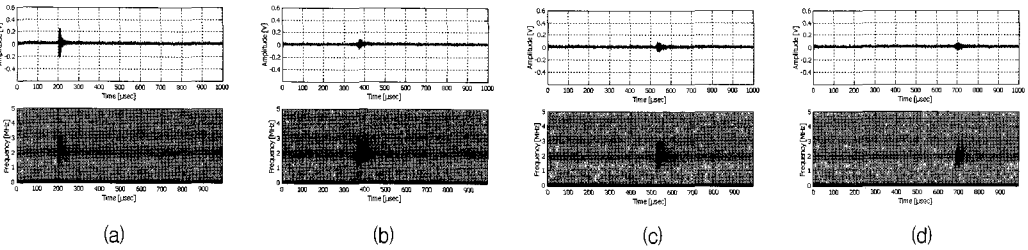


Fig. 6 Received RF signals and their STFT for the curved region of the steam generator tube obtained by a 2.25 MHz transducer with an incident angle of 60°. The distance between the transducers were (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m and (d) 1.4 m.

수 및 대역폭, 크기나 모양이 제한되어 있다. 이러한 탐촉자 중에서 앞선 언급된 조건들을 만족하는 탐촉자를 선정해야 한다.

균속도 분산선도에서 속도가 가장 빠른 모드는 L(0,2)의 0.5 MHz 부근이나 이 부분은 위상속도 분산선도에서 평탄하지 않고 균속도 분산선도 상에서 부근에 여러 개의 모드 발생 여지가 있다. 1.0 MHz 부분은 속도도 비교적 빠르고 위상속도 곡선도 비교적 평탄하며 균속도 선도의 모드들의 뭉쳐있어 수신 신호의 강도도 높을 것으로 예상된다. 그리고 1.0 MHz의 탐촉자는 초음파 탐상에서 일반적으로 사용되고 있어 구입이 용이하다. 1 MHz의 중심 주파수를 가진 탐촉자에서 L(0,2) 모드를 발생시키기 위한 이론적인 입사각은 31.6도이다. 그런데 제작된 사각 탐촉자의 웨지 각이 15도 단위로 되어있고 탐촉자의 빔이 퍼지는 각도와 주파수의 bandwidth 등을 고려하고 또 L(0,2) 모드의 1.0 MHz 부근에는 F(1,3), F(2,3)이 뭉쳐있어 이 모드들 또한 발생할 가능성이 있으므로 본 실험에서는 입사각을 30도로 선정하였다.

Fig. 7은 pitch-catch 방식으로 입사각 20°에서 탐촉자 사이의 거리를 0.2 m씩 늘려가면서 수신한 RF 신호와 STFT이고 Fig. 8은 동일 조건에서 입사각이 30°인 경우를 보여주고 있다. 그 결과 Fig. 7은 Fig. 8에 비해서 STFT의 신호가 명확하지 않으며 탐촉자 사이의 거리가 멀어질 수록 신호의 진폭이 급격하게 감소하고 펄스가 퍼지고 있다. 반면에 Fig. 8에 나타난 바와 같이 입사각이 30°인 경우에는 거리에 따른 진폭의 감쇠가 적기 때문에 보다 멀리 전파할 수 있는 가능성이 있고 STFT결과도 보다 뚜렷하여 모드를 분석하는 데에 유리하다.

Fig. 9는 선택된 모드에 대하여 유도초음파 분석용 다이어그램을 나타내고 있다. 입사각이 30°이므로 위상속도는 5.37 mm/μs이다. 이를 위상속도 분산선도와 균속도 분산선도에서 보면 RF 신호에서 좌측부분(속도가 빠른 부분) 신호는 L(0,2) 또는 F(1,3), F(2,3)이다. 이는 측정된 균속도와 일치한다.

한편 Fig. 9의 RF 신호 우측부분(속도가 느린 부분) 신호는 STFT가 명확하지 않고 분산이 큰데 균속도는 대략 1.2-1.8 mm/μs이며 이는 L(0,3) 또는

F(1,5)-F(5,5) 모드들의 연장선에 해당하는 것으로 추정된다. 결론적으로 증기발생기 세관의 결함 검출 최적모드는 L(0,2) 또는 F(1,3), F(2,3)이며 이 모드를 발생시키기 위해서는 1 MHz 초음파 탐촉자를 사용하여 입사각이 30°인 웨지를 사용한다.

5. 요약 및 추후 연구 방향

기존 원전의 가동 중 검사를 보완하고 핵연료 재장전 주기가 길어진 차세대 원전의 안전성을 보장하는 새로운 방식의 유지보수 방안인 온라인 검사

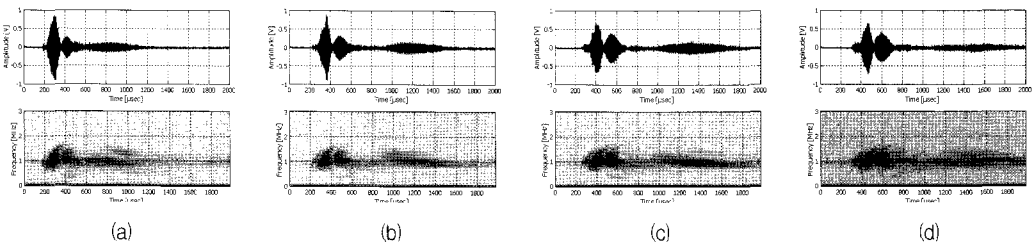


Fig. 7 Received RF signals and their STFT obtained by a 1 MHz transducer with an incident angle of 20°. The distance between the transducers were (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m and (d) 1.4 m.

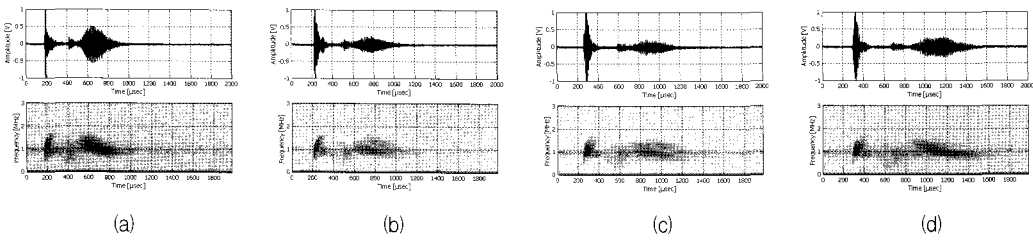


Fig. 8 Received RF signals and their STFT obtained by a 1 MHz transducer with an incident angle of 30°. The distance between the transducers were (a) 0.8m (b) 1.0m (c) 1.2m and (d) 1.4m.

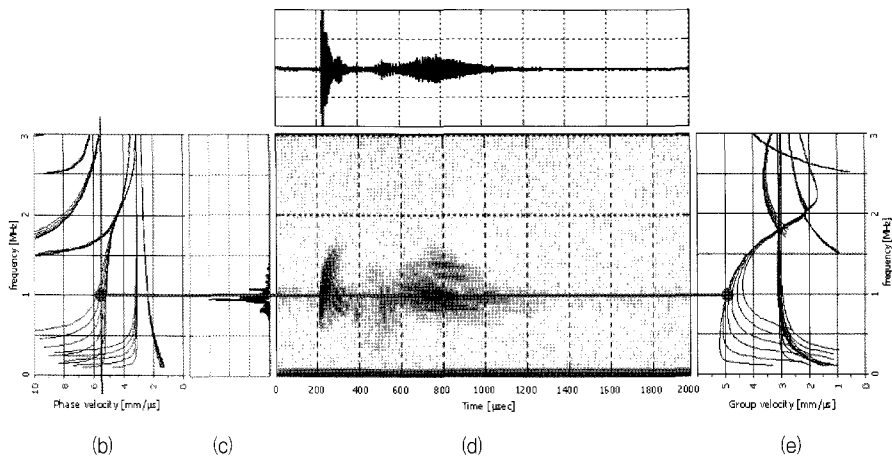


Fig. 9 Analysis of the optimum mode of the guided wave (1 MHz transducer with an incident angle of 30°): (a) time-domain waveform, (b) the calculated phase velocity dispersion curve, (c) the frequency spectrum of the waveform, (d) the short time Fourier transform and (e) the calculated group velocity dispersion curve.

및 감시에 적용하기 위하여 유도 초음파에 대한 기본적인 연구와 실험을 수행하였고 그 결과 적용 가능성을 확인하였다. 증기 발생기 세관을 실험 대상으로 하여 분산 선도 및 특정 모드에 대응하는 초음파 입사각의 계산을 수행하였고 short time Fourier transform을 이용한 시간-주파수 분석을 통하여 유도초음파 모드를 확인하였다. 또 서로 다른 거리에 배치된 탐촉자를 사용하여 수신한 초음파 신호에 대한 시간-주파수분석으로부터 군속도를 계산하였다. 그리고, 본 연구에서 여러 주파수의 탐촉자와 다양한 입사각에서 발생시킨 유도 초음파는 증기 발생기 세관의 곡관 부분을 통과할 때 모드 변환이 발생하지 않는 것을 실험적으로 확인하였으며, 유도 초음파를 이용한 증기발생기 세관의 최적 검사 모드를 제안하고 실험에 의하여 이를 확인하였다.

앞으로, 유도초음파 기술을 원전 현장의 온라인 검사 및 감시에 적용하기 위하여 추가적으로 수행하여야 할 연구 내용은 결합 검출을 위하여 결합의 크기, 종류 및 형상, 그리고 배관 내외부의 경계조건에 따른 유도초음파의 주파수 및 모드별 wave structure에 대한 분석이다. 또한, 수신된 신호의 해석 자동화와 지능화, 배열형 탐촉자를 사용한 최적 모드 발생도 향후 연구의 대상이다.

한편, 온라인 검사 및 감시와 관련하여 종합적으로 필요한 연구 항목들은 다음과 같은 내용이 필요하다고 보여진다.

- 온라인 방식을 채택 시 오프라인 방식에 비해 경제성 및 안전성 효과가 큰 기기와 부품의 선정
- 초음파, 음향, 적외선, 방사선 등 광범위 탐상이 가능한 기술을 이용한 불박이형 구조 건전성 감시 시스템 개념 확립
- 온라인 감시에 수반되는 관련 기술 파악: 센서, 무선 통신, 신호분석 자동화
- 고온, 고 방사능, 진동과 같이 발전소 운전 환경에서 장시간 운영이 가능한 센서, 장치 그리고 재료의 선정과 연구
- 검사를 간단하고 용이하게 하기 위한 기기와 부품의 기계적인 설계 파라미터의 최적화

감사의 글

이 논문은 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2002년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 한국원자력연구소, "일본 하마오카(浜岡) 원전 1호기 잔열제거계통 증기 배관 파단 사고 예비 분석보고서", KAERI/TR-1944/2001, (2001)
- [2] L. J. Bond, "On-line, intelligent, self-diagnostic monitoring for next generation nuclear power plants," NERI 2002 annual report, pp. 53-56, (2002)
- [3] F. A. Duran, "Smart equipment and systems to improve reliability and safety in future nuclear power plant operations (Smart-NPP)," NERI 2002 annual report, pp. 73-75, (2002)
- [4] G. E. Rochau, "Continuous-wave radar to detect defects within heat exchanger and steam generator tubes," NERI 2002 annual report, pp. 77-78, (2002)
- [5] N. Nakagawa, "On-line NDE for advanced reactor designs," NERI 2002 annual report, (2002)
- [6] 엄홍섭 외, "NSSS 부품 건전성의 온라인 감시를 위한 검사 및 진단 기술 현황 조사", KAERI/AR-642/2002, 한국원자력연구소, (2002)
- [7] 조윤희, "유도초음파에 대한 이해와 응용", 비파괴검사학회지, 21권 4호, pp. 446-460, (2001)
- [8] K. F. Graff, Wave motion in elastic solids, Dover Publication, New York, (1975)
- [9] 송성진, 신현재, 박준수, "피복강관의 광범위 비파괴 탐상을 위한 유도초음파 모드에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 춘계학술대회 발표 논문집, pp. 527-534, (2000)
- [10] 송성진, 김영환, 이동훈, 이현동, 배철호, "스케일이 있는 급수관내의 유도초음파의 전파 특성에 관한 연구", 비파괴검사학회지, 제23권 제1호, pp. 1-6, (2003)