

# Investigating Elasto-dynamic Correlation between Wave Propagation and Vibration in a Finite Waveguide

박현우<sup>†</sup>

Park, Hyun Woo

## 1. 연구 배경

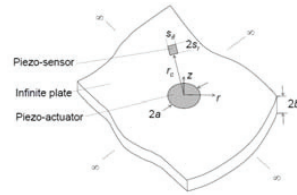
최근 10년간 Lead Zirconate Titanium (일명 PZT) 또는 Macro Fiber Composite 와 같이 가진(Actuation)과 탐지(Sensing)를 동시에 가능하게 하는 표면 부착형 압전소자를 이용한 구조물 건전성 감시 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다<sup>(1)</sup>. 특히, 부착형 압전소자를 이용하여 원전 등의 주요설비로 쓰이는 파이프라인, 항공기의 날개로 쓰이는 관형 구조 등의 다양한 형태의 도파관(waveguide)의 건전성 감시를 하기 위한 연구가 주목을 받고 있다. 이러한 부착형 압전소자는 작고 가벼울 뿐만 아니라 균열과 박리와 같은 미세 손상에 민감한 고주파수 대역의 동적 응답을 발생시키고 탐지할 수 있다.

부착형 압전소자를 이용한 도파관의 건전성 감시 기술은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 램파(Lamb wave)와 같이 도파관에 발생하는 탄성 유도파를 이용하여 손상을 진단하는 기술이다<sup>(1)</sup>. 탄성 유도파는 미세 손상에 민감할 뿐만 아니라 비교적 먼 거리까지 전달될 수 있는 장점을 가지고 있다. 다른 하나는 압전소자가 부착된 위치에서 압전소자의 전기역학적 임피던스를 이용하여 손상을 탐지하는 기술이다<sup>(2)</sup>. 전기 역학적 임피던스는 국부적인 미세 손상에 민감하다고 알려져 있다. 동역학적 관점에서 보면 탄성 유도파는 파 전달 이론에 기반을 두고 있고 전기 역학적 임피던스는 구조물의 진동특성에 의해 결정된다. 이제부터 설명의 편의상 탄성 유도파를 이용한 구조물 건전성 감시 기법을 ‘유도파 기법’으로 전기역학적 임피던스를 이용한 구조물 건전성 감시 기법을 ‘임피던스 기법’이라고 줄여서 칭한다.

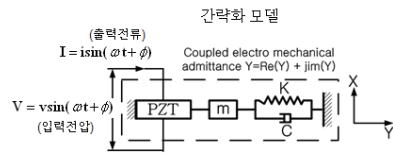
부착형 압전소자를 이용한 대표적인 도파관의 건전성 감시 기법인 유도파 기법과 임피던스 기법 모두 같은 압전소자를 이용하여 활용이 가능하다. 따라서 두 방법을 융합하여 하나의 새로운 통합기법으로 활용하기 위한 연구가 제시되었다. Thien 등은 파이프라인 건전성 진단을 위해 임피던스 기법은 손상의 유무를 판단하고 유도파 기법에서는 손상의 위치를 추정하는 2 단계의 기법을 제시하였다<sup>(3)</sup>. Park 등은 유도파 기법에서 사용되는 손상지수와

임피던스 기법에서 사용되는 손상지수를 동시에 고려하여 새로운 손상지표를 제시하고 이를 구조물의 손상진단에 적용하였다<sup>(4)</sup>. An 등은 온도와 같은 환경적인 요인을 보완할 수 있도록 임피던스를 활용하여 유도파 기법과 임피던스 기법을 통합한 손상진단 기법을 제안하였다<sup>(5)</sup>.

이와 같이 유한 도파관의 건전성 감시를 위해 유도파 기법과 임피던스 기법이 통합하기 위한 시도가 있었음에도 불구하고 대부분의 연구들에서 두 기법은 서로 별개의 특성을 가진 기법으로 간주되어 왔다. 그 원인은 유도파 기법과 임피던스 기법의 근간을 이루는 동탄성학적 모델의 한계에서 찾을 수 있다. 즉, 유도파 기법의 경우는 Fig. 1(a)의 예와 같이 무한 도파관 모델과 압전소자의 상호관계를 동탄성학적 관점에서 모델링하였기 때문에 유한 도파관의 경계에서의 파 반사 효과는 배제되어 왔다. 반면, 임피던스 기법의 경우 Fig. 1(b)와 같이 압전소자를 중심으로 도파관은 일차원 동적 모델로 간략화된 Liang 모델<sup>(6)</sup>을 대부분 적용해왔기 때문에 도파관의 동적 특성을 정확하게 나타내기 어려웠다.



(a) An infinite waveguide model with surface-bonded PZT for the guided wave based method



(b) Liang model for the impedance based method

Fig. 1. Elasto-dynamic models for the guided wave based and the impedance based methods

그러나 최근 압전소자를 이용한 관에서의 무기저 손상 탐지 연구에서 유도파 기법과 임피던스 기법의 동탄성학적 상호 관련성과 각 방법의 장단점 등이 수치해석 및 실험을 통해 규명되었다<sup>(7)</sup>. 무기저 손상탐지 기법에서는 압전소자의 극성을 이용한 램파 모드 분해 기법을 통해 관

<sup>†</sup> 정희원, 동아대학교 토목공학과 조교수  
E-mail : hwpark@dau.ac.kr  
Tel : (051)200-7630, Fax : (051)201-1419

의 손상으로부터 유발된 모드 변환 램파 모드가 판의 고유 진동수에 대응되는 특정 파수를 가지는 경우 판에 공진이 발생함을 규명하였다<sup>7)</sup>. 따라서 미세한 손상에 의해 발생한 매우 작은 크기의 모드 변환 램파 신호라도 판의 공진을 이용하면 보다 높은 신호대 잡음비를 가지는 손상 진단이 가능해진다. 여기서 공진이 구조물의 대표적인 진동특성이고 전기역학적 임피던스가 바로 구조물의 진동에 대한 응답함수를 측정한다는 사실에 주목해야 한다.

판의 무기저 손상탐지 기법에서 제시된 바와 같이 유한 도파관에서 유도와 기법과 임피던스 기법의 융합을 통해서너지 효과를 얻기 위해서는 두 방법의 이론적 근간이 되는 유한 도파관에서의 탄성과 전달과 진동의 상관관계를 정량적으로 규명하는 것이 필수적이다.

## 2. 파 반사에 의한 파 전달 경로의 주기성

파 반사에 의한 파 전달 경로의 주기성의 개념을 쉽게 설명하기 위해 Fig.2 와 같이 양단이 고정되어 있고 길이가  $L$  인 taut string 의 예를 사용한다. Fig.2 와 같이 C 점을 위아래로 조화 가진하여 입사파를 발생시키면 도파관을 따라 왼쪽과 오른쪽으로 파가 전달되게 된다. 고정단인 A 와 C 점에 각각 입사파가 도달하게 되면 지점 조건을 만족시키기 위해 파 반사가 발생하게 된다. 지점이 고정된 경우 반사파의 위상은 입사파와 180 도의 차이를 보이게 된다. 만약 지점이 자유단인 경우는 입사파와 반사파는 같은 위상을 지닌다. 시간이 지남에 따라 파 반사는 지속적으로 발생하게 된다.

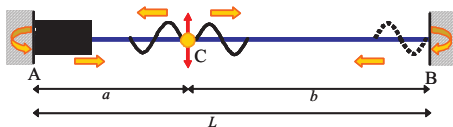


Fig. 2. A schematic for wave propagation on a finite wave guide: incident and reflected waves on a taut string with both ends fixed.

Fig. 3 에서는 Fig. 2 에서 발생될 수 있는 모든 파 반사 경로에 대한 파의 이동거리를 고려하여 주기적으로 발생하는 파 전달 경로 길이의 주기성을 나타냈다. Fig. 3 에서 나타난 것과 같이 이 경우 파 전달 경로의 주기성은 4 개를 한 묶음으로 경로 길이 마다 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 파 반사에 의한 파 전달 경로의 주기성은 유한 도파관의 파 반사에 의한 가상 탐지자의 배치의 주기성과 관련되어 있고 궁극적으로 도파관의 고유주기를 결정하는 중요한 인자이다.

유한 도파관에서 파 전달과 진동간의 상관관계를 설명하기 위해서는 파 전달 경로의 주기성외에 고려해야 할 사항은 도파관에서 파 전달의 특성을 결정하는 분산특성이다. 도파관에서의 분산특성은 무한 경계를 갖는 도파관의 특성방정식으로부터 계산된다. 이 연구에서는 유한 도파관의 파 전달과정에서 고주파수 대역의 분산특성을 잘 나타낼 수 있는 동시에 파 반사에 의한 파 전달 주기성과 파

반사가 만족시켜야 하는 경계조건을 적절하게 고려하여 파 전달과 진동간의 상관관계 정식화를 수행한다.

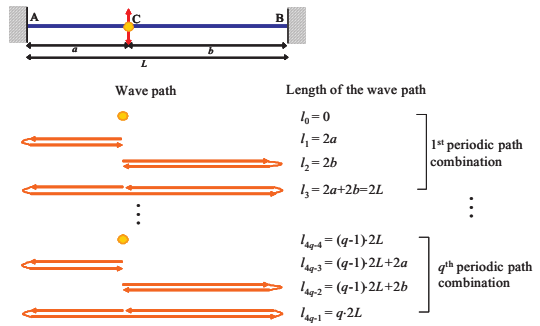


Fig. 3. A schematic for periodic path combinations due to wave reflections on a finite wave guide in Fig. 2.

## 참 고 문 헌

- (1) Raghavan, A., Carlos, E.S., 2007 "Review of Guided-wave Structural Health Monitoring." The Shock and Vibration Digest, Vol.39, No.2, pp.91-114.
- (2) Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R., Inman, D.J., 2003, "Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward," Shock Vibration Digest, Vol.35, pp.451-463.
- (3) Thien, A.B., Chiamori, H.C., Ching, J.T., Wait, J.R., Park, G., 2008, "The use of macro-fibre composites for pipeline structural health assessment," Structural Control and Health Monitoring, Vol.15, pp.43-63.
- (4) Park, S., Yun, C.B., Roh, Y., Lee J.J., 2006, "PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components," Smart Materials Structures, Vol.15, pp.957-966.
- (5) An, Y., Sohn, H., 2012 "Integrated impedance and guided wave based damage detection," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 28, pp. 50-62.
- (6) Liang, C., Sun, F.P., Rogers, C.A., 1994, "Coupled electromechanical analysis of adaptive material systems - determination of the actuator power consumption and system energy transfer," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, pp. 12- 20.
- (7) Kim, E.J., Kim, M.K., Sohn, H., Park, H.W., 2011, "Investigating electro-mechanical signals from collocated piezoelectric wafers for the reference-free damage diagnosis of a plate," Smart Materials and Systems, Vol.20, pp.065001.
- (8) Kim, M.K., Kim, E.J., An, Y.K., Park, H.W., Sohn, H., 2011, "Reference-free impedance-based crack detection in plates," Journal of Sound and Vibration, Vol.330, No.24, pp.5949-5962.