

축대칭 반사모드 특성 규명 및 배관 결함검출 Characterization of Axisymmetric Reflection Modes and Detection of Defect in Pipelines

박경조*†

Kyung-Jo Park

(Received 15 September 2022, Revision received 18 October 2022, Accepted 18 October 2022)

Abstract : The converted modes generated by mode conversion in guided waves-based inspection can provide plenty of defect information, and the reasonable usage of multiple wave modes can improve the results of defect inspection and evaluation. This paper focuses on the inter-conversion process of axisymmetric modes for incident longitudinal modes when interacting with the defects in pipeline whilst ignoring the converted non-axisymmetric modes through suppressing them in reception. This process is defined as symmetric mode conversion in this research. The pattern of axisymmetric mode sequence during symmetric conversion is identified and the method is proposed to extract the converted axisymmetric mode components for analysis. The relationships between the defect features and the modes generated in symmetric mode conversion under the excitation of longitudinal mode waves are investigated. The results show that longitudinal modes in symmetric mode conversion provide the potential for establishing an effective defect inspection.

Key Words : Guided waves, Mode conversion, Longitudinal mode, Mode extraction, Reflection coefficients

1. 서 론

초음속 유도파(guided wave)는 결함에 대한 민감도가 우수하고 운전 중 검사가 가능한 장점 때문에 평판이나 배관의 결함검출에 사용될 수 있는 가능성이 크다.^{1,2)} 그러나 복잡한 파동 발생 현상 때문에 유도파가 배관의 결함과 만났을 때 발생하는 현상은 아직 충분히 밝혀지지 않은 상태이다.^{3,4)} 배관의 결함에서 반사된 신호에는 모드변환(mode conversion) 등에 의해 원하지 않는 모드들이 존재하게 되어 파동의 형상이 매우 복잡해

진다.

반사계수는 배관의 결함 크기를 정량적으로 평가하기 위해 널리 사용되어 왔는데, 이는 결함에서 반사된 신호를 분리하여 축대칭 모드의 진폭에 대한 비축대칭 모드의 진폭 비를 구하여 계산할 수 있다.⁵⁾ 그러나 반사 신호에는 축대칭파와 비축대칭파가 혼재되어 있으므로 단일 모드들을 분리하는 것이 반드시 필요하며, 이를 위해 분산성을 갖는 다중 모드 신호를 해석할 수 있는 신호 해석 방법이 필요하다.

지금까지의 연구들은 대부분 결함에서 반사되

*† 박경조(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2957-3342)
: 교수, 전남대학교 기계설계공학부
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221

* Kyung-Jo Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2957-3342)
: Professor, Department of Mechanical Design Engineering,
Chonnam National University.
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221

는 비축대칭 모드(non-axisymmetric mode) 규명에 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 비축대칭 모드는 결함에 대한 특성을 규명하는데 유익한 정보를 제공하지만 분산성이 크고 전달 에너지가 작기 때문에 신호해석에 어려움을 유발한다. 이 논문에서는 종축방향 모드가 입사되었을 때 결함에서 반사되는 신호 중 모드 변환된 축대칭 모드에 초점을 맞춰 특성을 규명하고 결함검출에 적용하는 방법에 대해 기술하고자 한다.

이를 위해 먼저 배관에서 존재하는 축대칭 모드들의 특성을 파악하고 모드변환 과정에 대해 간략하게 기술한다. 다음으로 유한요소법을 이용하여 배관에 대한 해석 모델을 수립하고, 이를 이용하여 모드의 전달 특성 및 모드 변환된 모드들의 모드해석을 수행한다. 마지막으로 칩릿 변환(Chirplet transform)을 통해 모드들을 분리하고, 분리된 모드들의 반사계수를 계산하여 결함의 크기와 반사계수 사이의 상관관계를 규명함으로써 결함 검출에 축대칭 모드변환이 유용하게 사용될 수 있음을 보이고자 한다.

2. 배관의 유도파 모드와 모드변환

배관을 따라 전파하는 유도 초음파는 하나의 주파수에 여러 개의 모드가 존재한다. 따라서 어느 주파수에서 어떤 모드를 사용하여 검사를 수행할지 미리 선택할 필요가 있다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 모드는 L(0,2)모드와 T(0,1)모드이다. 이중 축대칭 모드인 L(0,2)모드는 기진하기 쉽고, 신호의 반복재현성이 우수하며, 특정 주파수 구간에서는 비분산(non-dispersive) 특성을 갖기 때문에 유도파 검사 시 가장 선호하는 모드이다. 그

러나 L(0,2)모드를 배관에서 기진하면 같은 종파의 특성을 갖는 낮은 차수의 L(0,1)모드도 동시에 기진되는 경우가 많다. 신호에 존재하는 모드들이 많아질수록 반사 신호를 해석하기 어려워지는 단점이 있으므로, 유도파 모드 가진장치를 다수의 링(ring)으로 구성하여 L(0,1)모드의 발생을 억제하고 L(0,2)모드만 기진할 필요가 있다.^{6,7)} 그러나 다수의 링으로 유도파 가진장치를 만들 경우 제작 과정이 복잡하고 가격도 비싸지는 단점이 있다.

이 연구에서는 유한요소법을 이용한 배관의 3차원 해석을 통해 배관에서의 파동전파 현상과 결함과의 상호작용, 특히 모드변환 현상을 규명하고자 한다. 해석을 위해 범용 프로그램 ANSYS를 사용하였고, Solid185 요소를 이용하여 3차원 모델을 구성하였다. 배관에서 전파되는 파동의 특성은 과도해석을 통해 파악할 수 있는데 이때 사용되는 요소의 크기는 공간상에서 충분한 분해능(resolution)을 얻을 수 있도록 선택해야 하며, 관심 모드의 가장 짧은 파장 내에 10개 이상의 노드가 존재하도록 선택하는 것이 일반적이다. 주파수 175 kHz에서 이 연구의 관심대상인 L(0,1), L(0,2) 모드의 위상속도는 각각 2,198, 5,465 m/ms이고, L(0,1)모드의 파장이 L(0,2)모드의 파장보다 짧은 12.56 mm로 구해진다. 따라서 3차원 모델에 사용된 요소의 크기를 1 mm(12.56 > 10, L(0,1)모드 파장의 7.96%, L(0,2)모드 파장의 3.20%)로 선정하면 해석의 정확성을 확보할 수 있다.

축대칭 L(0,2)모드를 기진하기 위해 배관의 한쪽 끝단 노드(node)에서 동시에 해닝윈도우(Hanning window)를 씌운 5 사이클 톤버스트 신호를 인가하였다. 신호 측정지점은 가진 위치와 가까운 곳에 설정하였다. 전체 계산시간은 900 μ s으

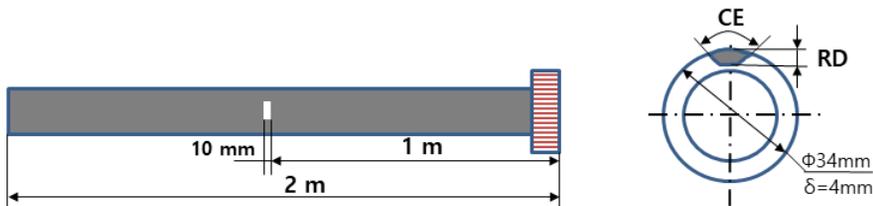


Fig. 1 Schematic diagram of the pipe with defect

로 설정하였는데, 이는 기진된 모드가 반대편 끝단에서 반사되어 다시 측정위치까지 되돌아올 때까지의 신호를 모두 측정할 수 있도록 충분한 시간을 확보하기 위한 것이다. 과도해석을 위한 시간 간격이 작을수록 해석의 정확도는 향상되지만 계산시간이 크게 증가하는 단점이 있으므로 두 가지 조건을 절충할 수 있는 선택이 필요하다. 이 연구에서는 전체 계산시간을 2,500개로 나누어 계산하였는데, 이는 $0.36 \mu\text{s}(=900/2500)$ 의 시간 간격에 해당된다. 주파수 175 kHz에서 L(0,2)모드의 주기는 $5.76 \mu\text{s}$ 이므로 한 주기 내에 15개 이상의 시간 간격이 포함되므로 에일리어징(aliasing) 발생을 충분히 방지할 수 있음을 알 수 있다.

해석에 사용된 배관은 탄소강 재질로 이루어져 있으며, 길이 및 직경 그리고 결함의 위치 및 크기는 Fig. 1에 보인 바와 같다. 전체 배관의 길이는 2 m이고, 내경과 외경은 각각 26, 34 mm이며, 두께는 4 mm이다. 결함은 노치 형태로 가정하였으며, 배관 끝단에서 1 m 떨어진 위치에 생성하였다. 결함의 종축방향 길이는 10 mm이고 원주방향 길이(CE)와 반경방향 깊이(RD)를 변화시켜 가며 반사 신호를 측정하였다. 배관 재질의 밀도는 $\rho = 7,850 \text{ kg/m}^3$ 이고, 종파 속도 $C_L = 5.96 \text{ m/ms}$, 전단 파속도 $C_S = 3.26 \text{ m/ms}$ 이다.

해석 대상 배관의 군속도 분산선도는 Fig. 2에 보인 바와 같다. 이 분산선도는 영국 Imperial College에서 개발한 Disperse[®]를 이용하여 구하였다.⁸⁾ 그림에서 보듯이 종축방향 모드인 L(0,2) 모드가 가장 빠른 전파속도를 갖는다는 것을 알 수 있다. 가진 주파수가 150 kHz에서 200 kHz 사이에 존재하면 L(0,2)모드 속도가 거의 변하지 않으며 따라서 분산성이 매우 작아질 것이라는 사실도 쉽게 알 수 있다. 모드 L(0,1)의 속도는 L(0,2)보다 상대적으로 낮으며, 150~200 kHz 사이에서는 L(0,2)모드 속도의 거의 절반에 해당된다는 것도 확인할 수 있다. 따라서 이 주파수 구간에서 가진 주파수를 선택하면 신호의 분산성도 작을 뿐 아니라 L(0,2)모드와 L(0,1)모드를 쉽게 구분 또는 분리할 수 있음을 알 수 있다. 파동해석에서 사용한 가진 주파수는 175 kHz로 설정하였다.

주파수 175 kHz에서의 L(0,2), L(0,1)모드의 모드형상을 Fig. 3에 표시하였다. 각각의 변위는 해당 모드의 최대값으로 정규화하여 나타내었다. 그림으로부터 가장 먼저 알 수 있는 것은 두 모드

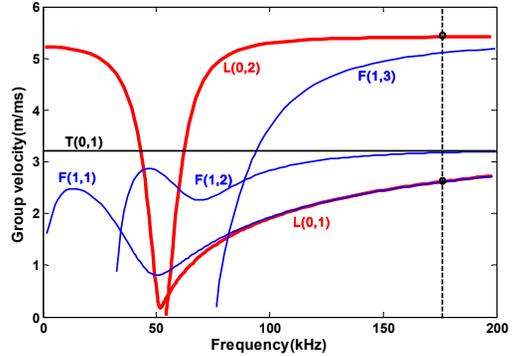
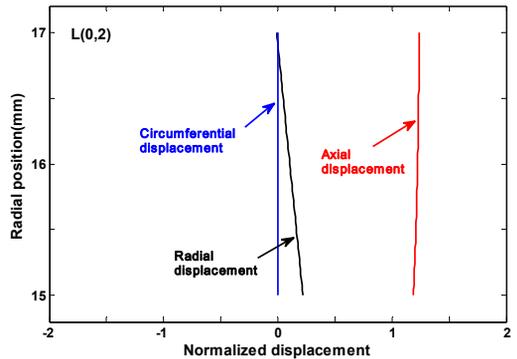
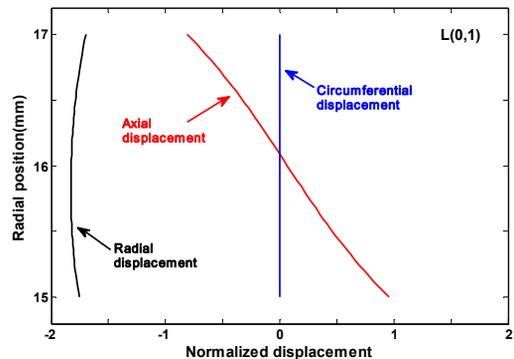


Fig. 2 Group velocity dispersion curves



(a) L(0,2)



(b) L(0,1)

Fig. 3 Mode shapes of L(0,2) and L(0,1) modes

모두 원주방향 변위가 0이라는 사실이다. $L(0,2)$ 모드의 종축방향 변위는 양(+)이고 상대적으로 크기가 크며 배관 두께를 따라 거의 균일하게 분포하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 배관 두께 방향을 따라 존재하는 모든 결함에 대해 $L(0,2)$ 모드의 민감도가 매우 강할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

반면에 $L(0,1)$ 모드의 종축방향 변위는 양(+), 음(-)의 값을 모두 가지며, 배관 두께 방향을 따라 대칭 모드로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 즉 배관 두께의 중간 지점에서 $L(0,1)$ 모드의 종축방향 변위는 0이며, 배관의 안쪽, 바깥쪽 표면에서 상대적으로 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 따라서 $L(0,1)$ 모드는 배관의 내, 외부 표면 근처에 존재한 결함 탐지에 유리하다는 사실을 확인할 수 있다. 배관의 반경 방향(또는 두께 방향) 변위는 $L(0,2)$ 모드가 $L(0,1)$ 모드보다 작으므로 감쇠에 의한 영향도 더 작게 나타날 것으로 예상된다.

입사된 모드가 배관 끝단, 결함, 플랜지와 같은 불연속 구간을 만나게 되면 모드변환이 발생하게 되어, 다른 모드들로 변환되고 입사파의 에너지도 다른 모드들로 재분배되는 현상이 발생한다.⁹⁾ 모드변환에 의해 추가로 발생될 수 있는 모드는 가진 주파수에 존재하는 모든 모드들이 후보가 된다. 즉, Fig. 2의 분산선도에서 주파수 175 kHz(그림의 점선)에 존재하는 $L(0,1)$, $F(1,1)$, $F(1,2)$, $F(1,3)$ 모드는 $L(0,2)$ 모드의 모드변환에 의해 추가로 발생할 수 있다. 이로부터 종파 모드가 입사되어 결함에서 반사되는 신호에는 같은 모드형상을 갖는 종파 모드(주 모드)뿐만 아니라 차수가 다른 종파 모드(Fig. 2의 $L(0,1)$ 모드)들과 횡 모드(Fig. 2의 $F(1,n)$ 모드)들도 나타나게 된다. 모드 변환된 신호를 해석하여 결함에 대한 다양한 정보(크기, 위치 등)를 얻을 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다.

3. 종방향 모드의 대칭 모드변환

3.1 결함반사 신호의 모드 성분분석

입사된 종축방향 모드가 결함과 같은 불연속 구간을 만나면 모드변환에 의해 축대칭 모드뿐만

아니라 비축대칭 모드들도 발생된다. $L(0,2)$ 모드를 입사하면 이 모드뿐만 아니라 $L(0,1)$ 모드와 횡 모드도 반사 신호에 나타나게 된다. 여러 개의 링(ring)으로 구성된 신호변환기(transducer)가 원주방향으로 일정하게 배열되어 있으면 각각의 링에서 측정된 반사 신호를 모두 더하면 횡 파와 같은 비축대칭 모드는 상쇄되고 축대칭 모드($L(0,1)$ 또는 $L(0,2)$ 모드)만 기록된다.⁴⁾ Alleyne 등은 이와 유사한 현상을 모드변환이라 기술하였는데, 이는 두 개의 종축방향 모드의 상호 변환에 의해 발생한 현상이기 때문이다.

모드변환에 의해 추가적으로 발생하는 반향(echo)은 신호해석을 어렵게 만들기 때문에 이를 억제하기 위해 Alleyne 등은 4개의 링으로 구성된 신호변환기를 이용하였다. 그러나 신호측정 시스템이 복잡해지면 제작비용이 상승하고 장비의 신뢰성도 낮아지므로 단일 링을 사용하여 시스템을 구성할 필요가 있고, 이 경우 두 개의 종축방향 모드가 동시에 가진되는 현상이 발생한다. $L(0,2)$ 모드가 결함에서 반사되는 신호뿐만 아니라 $L(0,1)$ 모드의 반사 신호도 측정되기 때문에 결함 반사 신호에도 두 신호가 중첩되어 나타난다. 반사 신호에는 $L(0,2)$ 모드의 반사 신호, $L(0,2)$ 모드가 모드변환된 $L(0,1)$ 신호, $L(0,1)$ 의 반사 신호 그리고 $L(0,1)$ 모드가 모드변환된 $L(0,2)$ 모드가 동시에 나타난다.

부식에 의한 결함과 같이 종축방향으로 일정한 길이를 갖는 결함에 유도파가 입사되면 Fig. 4와 같이 결함의 전면과 후면에서 두 번 반사가 이루어진다. 예를 들어 전면에서 일부 신호는 반사되고 일부 신호는 결함을 따라 전달되어 후면에서 다시 반사된다. 후면에서 반사된 신호 중 일부는 결함을 통과하여 배관의 다른 끝단으로 진행하고 일부 신호는 다시 결함을 따라 진행하여 전면에서 반사된다. 반사와 전달이 발생할 때마다 모드변환이 발생하게 되므로 신호변환기에서 측정된 신호는 다중 모드들이 중첩되어 나타나게 된다.

Fig. 4에서 R1은 전면에서 반사된 신호를, T1은 전면을 통과하여 결함으로 전달되는 신호를 나타낸다. R2는 후면에서 다시 반사된 신호를 나타내

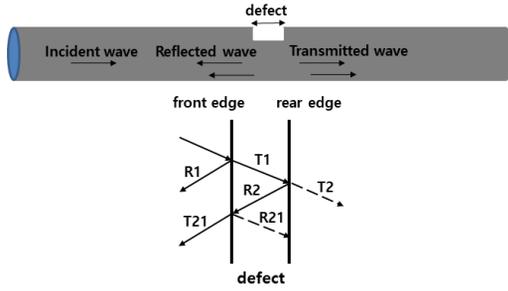


Fig. 4 Interaction of guided waves with the defect

고, 이 신호가 전면에서 다시 반사된 신호를 R21, 전면을 통과하여 전달되는 파동을 T21로 표시하였다. T2는 결함 후면을 통과하여 전달되는 파동을 나타낸다.

위와 같은 모드해석을 통해 결함 반사 신호에서 나타나는 모드의 순서 및 형태를 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 결함에서 반사된 신호는 크게 4개의 부분으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 즉, 입사된 L(0,2)모드가 L(0,2)모드로 반사된 부분과 입사된 L(0,1)모드가 L(0,1)모드로 반사된 부분 그리고 입사된 L(0,2)모드가 L(0,1)모드로 모드 변환된 부분과 입사된 L(0,1)모드가 L(0,2)모드로 모드 변환된 부분으로 구성된다. 모드 변환된 두 신호의 전파시간은 동일하기 때문에 두 신호는 겹쳐서 나타난다. 따라서 수신된 반사 신호에는 세 부분으로 구성된 형태로 나타난다. 가장 먼저 신호변환기에 도달하는 신호는 입사된 L(0,2)모드가 L(0,2)모드 형태로 반사된 신호이고, 중첩되어 나타나는 모드 변환된 신호가 두 번째, 그리고 L(0,1)모드가 반사되어 나타나는 L(0,1) 반사 신호가 마지막으로 측정된다(Fig. 5 참조).

배관의 길이가 2, 4 m일 때 결함에서 반사되는 신호들의 형태를 Fig. 6에 나타내었다. 두 경우 모두 결함은 배관의 중앙에 위치하고 있으며, 반경 방향 깊이는 2 mm, 종축방향 길이는 5 mm, 원주 방향으로는 120° 만큼의 크기를 갖도록 하였다. 두 경우 모두 세 개의 파동 패킷(packet)으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. L(0,1), L(0,2) 모드의 속도와 3.1절의 모드해석 결과를 바탕으로 세 개의 파동 패킷은 L(0,2)모드, 모드 변환된 종축방향

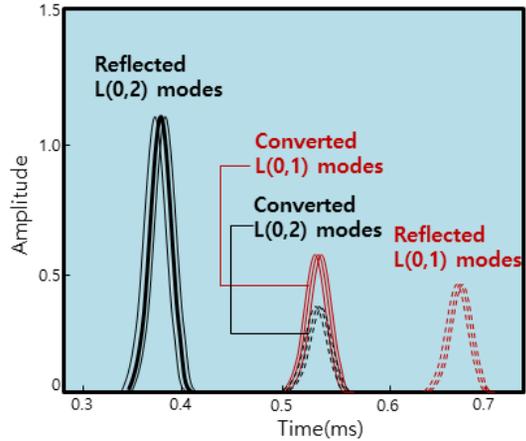
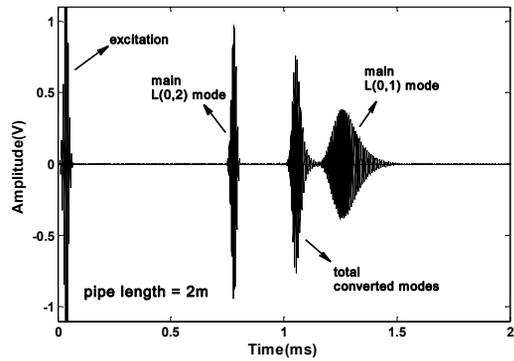
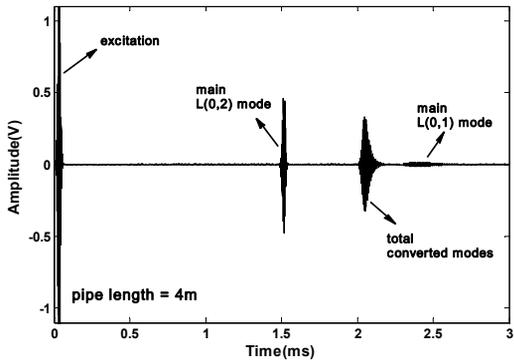


Fig. 5 Pattern of longitudinal mode sequence in defect reflection



(a) pipe length is 2m



(a) pipe length is 4m

Fig. 6 Reflection signals when the defects are located at different positions

모드 그리고 L(0,1)모드의 시간순서로 측정위치에 도달한다는 것을 알 수 있다. 또한 배관의 길이가 증가할수록 파동의 전파거리도 늘어나고 따라서 감쇠의 영향도 커지기 때문에 배관의 길이가 4 m 가 되면 세 개의 파동 패킷의 크기가 감소하고 분산성의 영향도 커지는 것을 확인할 수 있다.

3.2 모드 변환된 신호의 분리

모드 변환된 신호에서 L(0,1), L(0,2)모드를 분리하기 위해서는 종축방향 변위에 대한 모드형상 해석이 필요하다. Fig. 3의 두 모드의 모드형상에서 보듯이 L(0,1)모드는 두께의 중앙(대상 배관의 경우 15 mm 지점)에서 종축방향 변위가 0이다. 따라서 이 지점에서 모드 변환된 신호의 성분은 L(0,2) 성분만 갖게 된다. 즉, 15 mm 지점에서 L(0,2)모드를 분리할 수 있다. 그리고 전체 모드 변환된 신호에서 모드형상 해석을 통해 구한 L(0,2)모드를 빼면 L(0,1)모드 성분을 구할 수 있다. 이와 같이 모드형상을 기본으로 모드를 추출하는 방법을 MSE(mode shape-based extraction)이라 부르고 있다.

모드형상에 기반한 MSE방법은 시뮬레이션 결과에 적용하기에 매우 편리한 방법이지만 실제 현장에서는 적용할 수 없는 한계점을 갖고 있다. 즉, 현장에서는 배관 내부에 접근하기 어렵기 때문에 두께 방향에 따른 신호 측정이 불가능하기 때문이다. 이에 대한 대안으로 칩릿 변환에 기반한 모드추출법 CTME(Chirplet transform-based mode extraction)을 고려할 수 있다.¹⁰⁾ 칩릿 변환은 시간-주파수 표현법을 일반화시킨 개념으로 기저함수는 천이, 전단, 확대 연산자에 의해 조절이 가능하며, 국소 후리에 변환(시간과 공간의 천이)과 웨이브렛 변환(시간 천이와 확대)의 에너지밀도에 의해 표시된다. 그 과정은 먼저 신호의 전체 영역에서 칩 변화율(chirp rate)과 지속시간(duration)을 추정하는 과정에서부터 시작된다. 이 과정은 다의함수(ambiguity function)를 이용하여 수행하는데 계산의 편의를 위해 칩 변화율과 중립화 할 수 있는 값으로 선택한다.

두 번째 단계에서는 추정된 칩 변화율과 지속시간을 이용하여 시간-주파수영역에서의 위치를

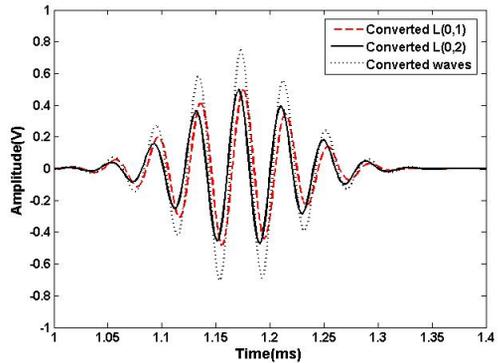


Fig. 7 Converted and extracted mode components

추정한다. 세 번째 단계에서는 국부적인 영역에서 칩 변화율과 지속시간을 다시 추정한다. 추정된 칩 변화율과 지속시간이 완벽한 것이라면 이 값은 최대가능 추정자(max. likelihood estimator)가 될 것이다. 마지막으로 해가 수렴할 때까지 두 번째, 세 번째 단계를 반복한다.

길이가 2 m인 배관의 신호(Fig. 6(a))에서 모드 변환된 신호에 대해 CTME를 적용한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 결함에서 반사된 신호는 L(0,2)모드에 의해 L(0,1)모드로 모드 변환된 신호와 L(0,1)모드에 의해 L(0,2)모드로 모드 변환된 신호가 서로 합성된 형태로 나타난다. 이를 CTME를 이용해 모드분리하면 두 개의 모드 변환된 신호를 추출할 수 있는데, 이때 L(0,2)모드가 L(0,1)모드에 비해 진폭이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 기진주파수 175 kHz에서 L(0,2)모드의 감쇠가 작게 나타나기 때문이다. 모드 변환된 파동의 전파거리는 1 m이기 때문에 분산에 의한 거의 나타나지 않는 것도 확인할 수 있다.

4. 대칭 모드변환 신호의 특성

모드 변환된 모드에는 결함의 형태 및 크기에 대한 다양한 정보가 포함되어 있다. 4장에서는 결함의 반경방향 깊이와 원주방향 크기가 결함 반사 신호에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 특히 결함 반사 신호 중 종축방향 모드의 대칭 모드변환에 초점을 맞춰 해석을 수행하고자 한다.

유한요소 모델에서 결함의 원주방향 길이는 전체 원주의 1/6, 2/6, 3/6, 4/6, 5/6, 전체 원주로 설정하였다. 즉, 각도 60°, 120°, 180°, 240°, 300°, 360°에 해당된다. 반경방향 깊이는 0.5 mm부터 4 mm까지 0.5 mm씩 증가시켜 총 8개의 경우를 고려하였다. 이는 배관 두께 12.5%에서 100%에 해당하는 깊이이다.

Fig. 8에 모드 변환된 L(0,1) 신호의 반사계수, 모드 변환된 L(0,2)모드의 반사계수를 나타내었다. 모드변환되지 않고 결함에서 직접 반사된 L(0,2), L(0,1)모드의 반사계수는 결함의 깊이에 따라 단순 증가하는 양상을 보이지만,⁴⁾ 모드 변환된 신호의 반사계수는 반 정현파 형태를 보이는 것을 확실히 알 수 있다. 즉, 결함 깊이가 배관 전체 두께의 50%일 때 모드 변환된 모드들의 반사계수가 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. 파동이 전파될

때 L(0,1)모드의 반경방향 감쇠가 크기 때문에 반사된 L(0,2)모드의 에너지가 반사된 L(0,1)모드보다 크다. 마찬가지로 L(0,2)모드로부터 변환된 L(0,1)모드의 에너지가 L(0,1)모드로부터 변환된 L(0,2)모드보다 크다는 것을 알 수 있다. 또한 결함의 원주방향 크기가 증가함에 따라 반사계수는 비례적으로 증가하지만 결함의 깊이에 따른 변화 형태는 모든 원주방향 크기에 대해 똑같은 정현파 형태를 갖기 때문에 결함의 원주방향 크기의 변화는 모드 변환된 모드들의 에너지 분포에 영향을 미치지 않는다는 사실도 알 수 있다.

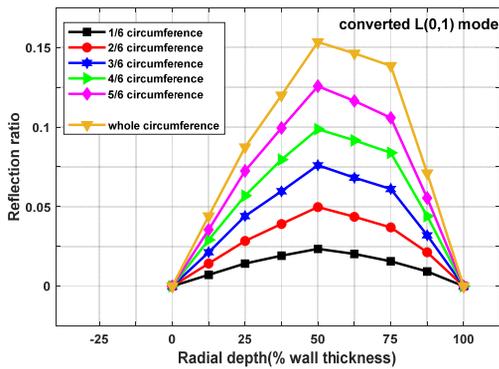
5. 결론

이 연구에서는 종축방향 유도파가 배관의 결함과 상호작용할 때 나타나는 대칭 모드변환의 특성에 대해 기술하였다. 유한요소법을 이용한 해석 모델을 수립하고 모드의 전달 특성 및 모드 변환된 모드들의 모드해석을 통해 결함의 크기와 반사계수 사이의 상관관계를 규명하였다.

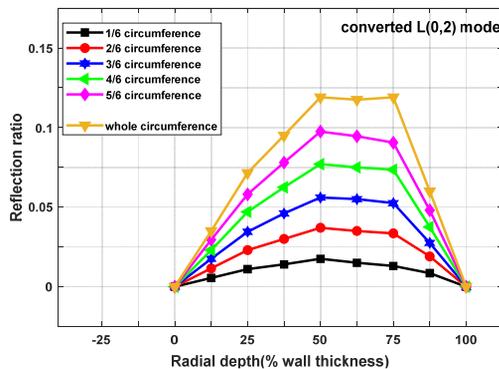
배관의 L(0,2)모드와 L(0,1)모드가 동시에 가진 되면 두 모드 모두 결함과 상호작용하여 모드변환이 연속적으로 발생함을 알 수 있었다. 또한 모드 변환된 모드의 성분들이 서로 중첩되어 나타나는데, 칩릿 변환을 이용하여 모드들을 분리할 수 있고, 모드분리 후 결함의 크기와 반사계수 사이의 상관관계를 명확히 구할 수 있었다. 모드 변환된 신호의 반사계수는 반 정현파 형태를 보이고, 모드 변환된 L(0,1)모드의 반사계수가 L(0,2)모드보다 큰 것도 확인할 수 있었다. 그리고 이로부터 결함검출에 축대칭 모드변환이 유용하게 사용될 수 있음을 입증하였다.

References

1. J. Li and J. L. Rose, 2001, "Implementing guided wave mode control by use of a phased array transducer", IEEE Transactions Ultrasonic Ferroelectric Frequency, Control, Vol. 48, No. 3, pp. 761-768.



(a) Converted L(0,1) mode component



(b) Converted L(0,2) mode component

Fig. 8 Reflection coefficients of converted modes

- (<http://doi.org/10.1109/58.920708>)
2. A. Demma, P. Cawley, M. Lowe, A. G. Roosenbrand and B. N. Pavlakovic, 2004, "The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements", *NDT&E International*, Vol. 37, No.1, pp. 167-180. (<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2003.09.004>)
 3. M. Lowe, D. N. Alleyne and P. Cawley, 1998, "The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch in a pipe", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 65, No. 4, pp. 649-656. (<https://doi.org/10.1115/1.2789107>)
 4. D. N. Alleyne, M. Lowe and P. Cawley, 1998, "The interaction of guided waves from circumferential notches in pipes", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 65, No. 4, pp. 635-641. (<https://doi.org/10.1115/1.2789105>)
 5. D. N. Alleyne, B. N. Pavlakovic and P. Cawley, 2001, "Rapid long range inspection of chemical pipes by guided waves", *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 20, No. 1, pp. 180-187. (<https://doi.org/10.1063/1.1373757>)
 6. D. N. Alleyne, T. Vogt and P. Cawley, 2009, "The choice of torsional or longitudinal excitation in guided wave pipe inspection", *Insight*, Vol. 51, No. 7, pp. 373-377. (<https://doi.org/10.1784/insi.2009.51.7.373>)
 7. X. Niu, K. Tee and H. Marques, 2020, "Enhancement of unidirectional excitation of guided torsional T(0,1) mode by linear superposition of multiple rings of transducers", *Applied Acoustics*, Vol. 168, No. 1, pp. 187-195. (<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107411>)
 8. B. Pavlakovic, M. Lowe, D. Alleyne and P. Cawley, 1997, "Disperse: A General Purpose Program for Creating Dispersion Curves", *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 16A, No. 2, pp. 185-192. (http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-5947-4_24)
 9. C. Yeung and C. Ng, 2019, "Time-domain spectral finite element method for analysis of torsional guided waves scattering and mode conversion by cracks in pipes", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 128, No. 3, pp. 305-317. (<http://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.04.013>)
 10. Y. W. Kim and K. J. Park, 2016, "Detection of axial defects in pipes using chirplet transform", *Journal of Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 205, No. 4, pp. 26-31. (<http://doi.org/10.9726/kspse.2016.04.026>)