

비틀림 유도파를 이용한 배관 슬러지 검출 방법의 현장 적용성 평가

Feasibility Study of Sludge Detection inside Pipes Using Torsional Guided Waves

박경조*†

Kyung-Jo Park*

(접수일 : 2014년 6월 17일, 수정일 : 2014년 8월 18일, 채택확정 : 2014년 8월 20일)

Abstract: It has been previously reported that in principle sludge and blockages can be detected and even characterized by using guided ultrasonic torsional waves, based on an idealized model in which the sludge layer was simplified in terms of geometry and material properties. The work revealed that the presence of a layer inside a pipe scatters the guided wave propagating in the pipe and both the reflection and transmission of the guided wave can be used to effectively detect and characterize the layer. This paper proceeds the work by taking into account more realistic sludge characteristics, including irregular circumferential profiles of the sludge layer and imperfect bonding state between the sludge and the pipe. The influence of these issues is investigated to identify the critical factors that influence the detection and characterization capability of the two measurements.

Key Words : Sludge Detection, Reassignment Spectrum, Bonding State, Circumferential Profile

1. 서 론

배관 내부에 슬러지가 쌓이는 현상은 석유화학 공장이나 식품공장 등에서 흔히 발생하는 현상으로 슬러지가 배관 내부에 완전히 차게 되면 수송유체가 흘러가지 못하는 배관 폐색(blockage)이 발생한다. 슬러지나 폐색은 공장이나 운전조건에 따라 다양한 형태의 물질로 형성된다. 예를 들면 석유공장의 경우 슬러지는 원유수송이나 가공과정 중에 발생하는 파라핀이나 아스팔트의 침전 등에 의해 발생한다¹⁾. 화학공장의 경우 연료 부식에 의한 침전물이 슬러지의 주요 원인이라고 보고된다²⁾. 배관 내에 슬러지 또는 폐색이 발생하면 생산성

이 낮아지고 생산품의 품질저하, 슬러지 잔해에 의한 생산품 오염 등이 발생될 수 있다.

따라서 슬러지나 배관폐색을 조기에 진단할 수 있는 효과적인 검출방법이 필요하게 되었다. 현재 사용되는 방법은 제한적이거나 배관 내부에 접근할 수 있을 때 가능한 방법들이다. 즉 배관 내압을 증가시켜 직경이 확장된 양을 측정하거나^{3,4)}, 배관 내부에 음향압력파를 주입하여 고유진동수 천이를 측정하는 방법 등이 사용되고 있다⁵⁾. 배관 외부에서 슬러지를 검출하는 방법으로 감마선 진단방법이 사용되고 있지만⁶⁾ 방사능 피폭의 위험 및 검사비용, 시간 등의 제약 때문에 사용이 제한되고 있는 실정이다.

*† 박경조(교신저자) : 전남대학교 기계설계공학부

E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221

*† Kyung-Jo Park(corresponding author) : Department of

Mechanical Design Engineering, Chonnam National University.
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221

최근 Park⁷⁾은 비틀림 유도파를 이용하여 배관 내부의 슬러지를 검출하는 방법을 개발하였다. 이 방법은 단순 이중층 배관모델을 이용하여 첫 번째 비틀림 모드의 산란 및 반사특성 해석을 통해 슬러지의 존재 유무 및 크기를 찾는 방법이다. 그러나 실제 산업현장의 슬러지는 다양한 형태로 존재하기 때문에, 제안된 방법을 현장에 적용하기 위해서는 이상적인 모델에서 고려하지 않았던 문제들을 포함할 수 있는 해석결과가 필요하다.

이 논문에서는 기존 논문에서 도입되어 사용되었던 반사계수 스펙트럼 외에 재할당 스펙트로그램(reassigned spectrogram)을 이용하여 슬러지 존재 유무를 재확인하는 방법과 비축대칭 슬러지나 불완전 결합조건과 같은 실제 현장에서 발생할 수 있는 현상에 대한 검토도 수행하고자 한다.

2. 반사계수 및 재할당 스펙트로그램

Park은 슬러지 층의 에너지 흐름에 대한 배관 벽면에서의 에너지 흐름의 비인 *EFR*(Energy Flow Ratio)을 이용하여 슬러지로 구성된 이중층의 위치를 파악할 수 있다는 사실을 증명하기 위해 실험을 수행하고 그 결과를 제시하였다⁷⁾. 실험장치 및 구성은 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 배관은 외경 101.6 mm, 두께 2.1 mm, 길이 2 m인 주조강 배관이다. 전체 길이 2 m 중 종단면에서 약 0.5 m 구간 내부에 슬러지와 비슷한 특성을 갖는 두께 5 mm의 에폭시를 부착하였다. 부착의 어려움 때문에 에폭시 층은 완벽한 축대칭 조건을 만족하지 못하였다. 사용한 에폭시는 상용제품 Araldite 2020으로 음향 특성은 초음파 검사방법을 이용해 측정할 수 있으며 종방향, 전단방향 속도와 밀도는 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties

Material	Density ρ (kg/m ³)	Longitudinal velocity (m/s)	Shear velocity (m/s)
Cast iron pipe	7,100	4,500	2,500
Epoxy	1,170	2,610	1,100

비틀림 모드 가진 및 수신을 위해 미국 SwRI사에서 개발한 MsSR-2020 장비를 사용하였다. 이 장비는 자왜 또는 자기변형(magnetostriction) 현상을 이용하여 재료 내에 초음파를 발생시키고 그 역으로 반사된 신호를 감지할 수 있는 장비이다. 이 장치를 이용하여 원통형 구조물의 반사 신호를 측정할 경우, 배관의 원주를 자왜 특성이 우수한 상자성 코발트 스트립(cobalt strip)에 토로이달 코일(toroidal coil)을 감고 배관 원주방향으로 부착한 다음 솔레노이드 코일(solenoid coil)에 자장을 가하면 Wiedemann 효과에 의해 비틀림 모드가 발생하게 된다. 실험에서는 중심주파수 128 kHz인 3 사이클 톤버스트(tone-burst)를 입사하여 비틀림 모드를 가진하였고, 가진에 사용된 동일 신호변환기(transducer)를 이용하여 반사 신호를 수신하는 펄스-에코(pulse-echo) 방식을 채택하였다.

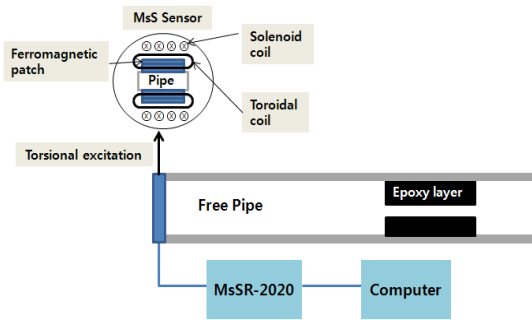
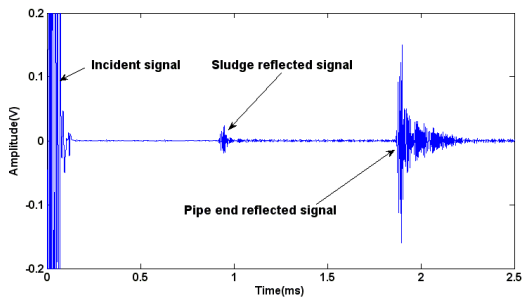


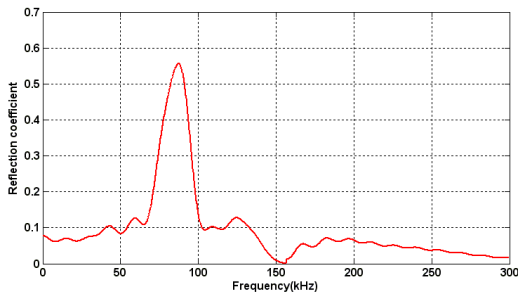
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

반사계수는 에폭시 층에서 반사된 신호의 주파수 스펙트럼을 입사 신호의 스펙트럼으로 나누어서 구할 수 있다. 내부에 5 mm 두께의 에폭시 층을 갖는 이중층 배관에 대한 측정 신호와 반사계수 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다. 실험결과로부터 구한 반사계수 스펙트럼에는 특징적인 피크와 골(trough)이 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 첫 번째 피크는 이중층 배관의 T_2 모드의 차단주파수인 85 kHz와 매우 유사한 87 kHz에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 차단주파수는 에폭시 층의 두께와 벌크 전단속도에 의해 유일하게 결정되므로 반사계수 스펙트럼의 피크 위치를 측정하면 에폭시 층의 전단방향 음향 특성이나 두께 등을 규명

할 수 있음을 알 수 있다. T_3 모드의 차단주파수는 194 kHz인데 실험으로부터 구한 반사계수 스펙트럼에서 이 주파수 부근에서도 작은 크기의 피크가 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 첫 번째 피크와 달리 크기도 작고 넓은 주파수범위에 걸쳐 분포되는 것을 알 수 있는데 이는 입사 신호 $T(0,1)$ 모드의 파동에너지가 대부분 T_2 모드로 전달되기 때문인 것으로 생각된다.



(a) Time traces



(b) Reflection coefficient spectra

Fig. 2 Time traces and reflection coefficient spectra from the pipe coated inside with 5 mm thickness epoxy

에폭시 층을 지나 전달된 신호는 분산성이 심한 다중 비틀림 모드들로 변환되고 배관 종단면에서 반사되어 다시 가진 위치에 도달하게 된다. 따라서 종단면에서 반사된 신호에는 이중층 영역의 분산특성 정보가 실려 있으므로 이 신호를 분석하여 슬러지 층을 갖는 배관의 파동전파 특성을 파악할 수 있다. 그러나 종단면에서 반사된 신호에는 분산성을 갖는 다중 신호들이 동시에

존재하기 때문에 신호해석이 매우 복잡해진다. 최근 스펙트로그램, 스칼로그래(scalogram), Wigner-Ville 방법과 같은 시간-주파수 표현법을 사용하여 다중 모드를 포함한 유도파 신호를 분석하는 기법들이 개발되고 있다⁸⁾. Kwun 등⁹⁾은 스펙트로그램의 일종인 STFT (Short Time Fourier Transform) 을 이용하여 내부에 유체가 차있는 배관에서 나타나는 종방향 모드들의 분산특성 변화를 고찰하였다. 그러나 시간-주파수 표현법은 사용하는 창(window)의 크기와 형태에 의해서만 달라지고 주파수와는 무관하기 때문에 창을 크게 하면 주파수 분해능은 향상되지만 시간 분해능은 나빠지고 창을 작게 하면 반대의 현상이 나타나기 때문에 시간영역과 주파수영역의 분해능을 동시에 향상시킬 수 없는 단점을 갖고 있다. 이와 같은 단점을 극복하기 위해 Auger와 Flandrin¹⁰⁾은 이동 창(moving window)을 이용한 재할당 스펙트로그램 기법을 개발하였다. 이 방법의 목적은 시간-주파수영역에서 에너지 분포를 재분배하여 신호의 분해능을 향상시키는 것으로 배관의 유도파 해석에 사용되는 빈도가 증가하고 있다.

이 논문에서는 재할당 스펙트로그램을 이용하여 이중층을 갖는 배관의 종단면에서 반사된 신호를 해석하고, Disperse를 이용하여 구한 군속도 분산선도와 비교하고자 한다. 측정된 신호에 대한 재할당 스펙트로그램을 Fig. 3에 나타내었다. 비교를 위해 Disperse를 이용하여 구한 군속도 선도를 점선으로 표기하였다. 각 모드의 도착시간은 배관의 길이를 주파수에 따른 해당 모드의 군속도로 나누어서 구하였다.

그림으로부터 재할당 스펙트로그램을 통해 종단면에서 반사된 신호에 각각의 모드들이 명확히 나타나는 것을 확인할 수 있고 군속도 분산선도와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 가장 많은 에너지가 전달된 T_2 모드의 경우 군속도 선도를 정확하게 따라가지 못하는 부분이 존재하는데 이는 부가적인 모드가 존재하기 때문이다. 즉, 배관 내부에 부착된 에폭시의 두께가 일정하지 못하기 때문에 작은 규모의 비축대칭 모드, 즉 휨 모드가 모드변환 되어 나타나기 때문이다. 휨 모드의 군

속도는 T_2 모드의 군속도와 매우 근접하여 존재하기 때문에 시간영역이나 주파수영역에서 쉽게 분리할 수 없고 따라서 재할당 스펙트로그램을 통해서도 두 모드들을 구별할 수 없다는 사실을 알 수 있다. 비축대칭 에폭시 층에 의해 T_1 모드의 모드 구조도 일부 파괴되어 이 모드로도 일부 에너지가 전달된 것도 확인할 수 있다.

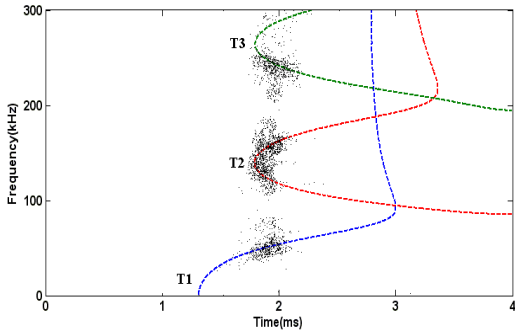


Fig. 3 Reassigned spectrogram of the measured signal reflected at pipe end

3. 현장적용 타당성 평가

첫 번째 비틀림 모드인 $T(0,1)$ 모드를 이용하여 배관 내부의 슬러지를 검출하고 그 분산특성을 살펴볼 수 있음을 2장에서 보였다. 그러나 실제 현장에서 나타날 수 있는 슬러지의 형태 및 배관과의 결합조건은 이상적인 모델과 다른 경우가 많기 때문에 이때 발생할 수 있는 문제점 및 유도와 분산특성에 미치는 영향을 살펴보는 것이 필요하다. 이 장에서는 슬러지 층이 비축대칭인 경우와 결합조건이 완벽하지 않을 경우 반사계수와 전달 신호에 미치는 영향을 살펴보고 이를 통해 제안된 방법의 타당성을 평가하고자 한다.

슬러지의 특성을 반영할 수 있는 에폭시의 원주방향 길이를 원주의 25, 50, 75, 100%로 증가시킬 때 나타나는 반사계수를 Fig. 4에 나타내었다. 그림으로부터 에폭시 층의 원주방향 길이가 감소할수록 전주파수에 걸쳐 반사계수가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 특히 T_2 모드의 차단주파수인 85 kHz 근처에서 반사계수의 피크가 급격히 감

소하는 것을 알 수 있다. 이는 에폭시 층의 원주방향 길이가 짧은 영향도 있지만, 비축대칭 형상에 의해 비틀림 모드가 모드변환에 의해 횡 모드로 변환되어 일부 에너지가 횡 모드로 전달되기 때문이다.

또한 피크가 나타나는 주파수도 원주방향 길이가 감소할수록 오른쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Disperse를 이용하여 분산선도를 계산할 때 이중층이 축대칭이라고 가정하여 군속도 선도를 구하였는데 실제 비축대칭 에폭시 층에 의해 분산선도의 왜곡이 발생하고 이에 따라 T_2 모드의 차단주파수가 오른쪽으로 천이되는 현상이 나타난 것으로 해석할 수 있다. 그러나 모든 경우에 대해 피크가 나타나는 주파수는 축대칭 에폭시 층을 갖는 배관의 T_2 모드 차단주파수 근방에서 나타나므로, 원주방향 길이와 상관없이 제시된 방법을 사용하여 슬러지 유무를 판단할 수 있음을 알 수 있다.

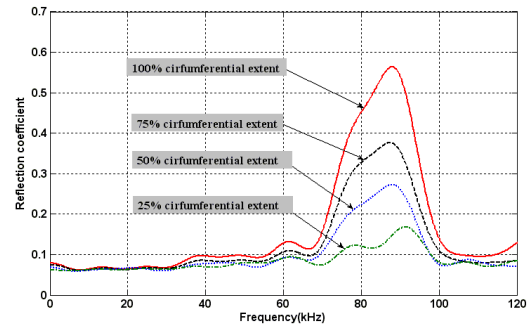


Fig. 4 Reflection coefficient spectra for different circumferential extents

실제의 경우 슬러지 층과 배관 사이의 결합조건은 완벽하지 않을 가능성이 높다. 배관과 슬러지 층 사이의 결합조건 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 Disperse의 스프링 층을 이용하여 분산선도를 계산하였다. Fig. 5에 결합 강성을 감소시켜 가면서 구한 군속도 분산선도를 나타내었다. 결합조건을 형성하는 강성은 압축강성 K_L 과 전단강성 K_T 가 있지만 전단강성만이 비틀림 모드에 영향을 미치기 때문에 이 논문에서는 K_T 를 완벽

결합조건($K_T \in \infty$)에서 결합조건이 매우 약한 경우($K_T = 0.5$ GPa/mm)로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다.

결합강성이 감소할수록 T_2 모드의 차단주파수가 왼쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 여러 가지 다양한 결합조건을 갖는 두 평판에 대해 Lamb파의 분산선도를 구한 Scalea와 Rizzo의 연구결과⁽¹¹⁾와도 일치하는 결과이다. 이로 부터 결합강성이 약해질수록 반사계수의 피크가 나타나는 주파수도 낮은 쪽으로 이동할 것이라는 것을 예측할 수 있다. 따라서 실제의 경우 결합조건이 불확실한 상황에서 슬러지 층을 검출하기 위해서는 광대역 주파수로 가진 또는 주파수 스위프(frequency sweep)을 수행할 필요가 있음을 알 수 있다.

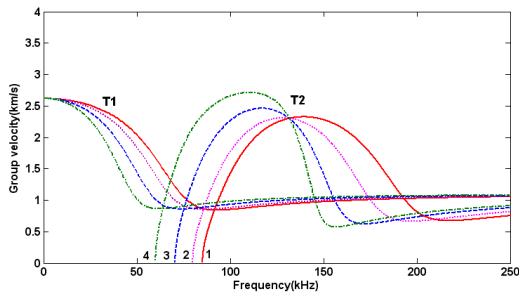


Fig. 5 Dispersion curves for the first two torsional modes for different bonding states.

Case 1: $K_T \in \infty$; Case 2: $K_T = 5$ GPa/mm; Case 3: $K_T = 1$ GPa/mm; Case 4: $K_T = 0.5$ GPa/mm

4. 결 론

이 연구에서는 재할당 스펙트로그램을 통해 슬러지 존재 유무를 재확인하는 방법을 개발하고, 비축대칭 슬러지나 불완전 결합조건과 같은 실제 현장에서 발생할 수 있는 현상에 대한 현장적합성 해석을 수행하였다.

슬러지 층을 지나 전달된 신호의 재할당 스펙트로그램을 통해 전달 신호가 심한 분산 특성을 나타내는 것을 확인하였고 이로부터 재할당 스펙트로그램을 통해 슬러지의 존재 유무를 확인할

수 있음을 보였다. 이러한 분산 특성은 슬러지 층이 없는 배관에서는 나타나지 않는 현상이기 때문이다. 반사계수 스펙트럼과 재할당 스펙트로그램 방법은 상호 보완적인 방법으로 두 방법을 조합하여 사용하면 슬러지 존재 유무 및 크기 등을 효과적으로 검출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

또한 실제 현장에서 나타날 수 있는 슬러지 형태 및 결합조건 변화 등에 대한 해석을 통해 제안된 방법이 실제 현장에서도 충분히 적용 가능하다는 것을 입증하였다.

후 기

본 연구는 2014년 전남대학교 학술연구비 지원 사업(과제번호 2013-2465)과 2013년 중화화학설비안전진단센터 사업의 일부 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

Reference

1. R. C. Sarmiento, G. S. Ribbe and L. A. Azevedo, 2004, "Wax Blockage Removal by Inductive Heating of Subsea Pipelines", Heat Transfer Engineering, Vol. 25, No. 1, pp. 2-12.
2. P. J. Rathbone, 2005, "Sludge Characterization for Ultrasonic Wave Guide Blockage Testing", Technical Report of BNFL Nexia Solutions, pp. 180~187.
3. T. P. Bott, 1995, "Fouling of Heat Exchangers", Elsevier, New York, chap. 3.
4. C. Kuchpil, M. Goncalves and L. Marquez, 2002, "Blockage Location and Remediation in Subsea Pipelines", Deep Offshore Technology Conference, New Orleans, Louisiana, pp. 691-700.
5. M. F. Salis and D. J. Oldham, 2001, "The Development of a Rapid Single Spectrum Method for Determining the Blockage Characteristics of a Finite Length Duct", Journal of Sound and Vibration, Vol. 243, pp. 625-640.
6. J. B. Kim, S. H. Jung, J. H. Moon, T. Y. Kwon

- and G. S. Cho, 2010, "Development of Tomographic Gamma-Ray Scan Method for Industrial Plants", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 30, pp. 20-30.
7. K. J. Park, 2014, "Characterization of Chemical Sludge Using Torsional Guided Waves", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 29-35.
 8. M. Niethammer, L. J. Jacobs, J. Qu and J. Jarzynski, 2001, "Time-Frequency Representations of Lamb Waves", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 109, pp. 1841-1847.
 9. H. Y. Kwun, K. Bartels and C. Dynes, 2000, "Dispersion of Longitudinal Waves Propagating in Liquid-Filled Cylindrical Shells", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 105, pp. 2601-2611.
 10. F. Auger and P. Flandrin, 1995, "Improving the Readability of Time-Frequency and Time-Scale Representations by the Reassignment Method", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 43, pp. 1068-1089.
 11. F. L. Scalea and P. Rizzo, 2004, "Propagation of Ultrasonic Guided Waves in Lap-Shear Adhesive Joints: Case of Incident Lamb Wave", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 115, pp. 146~156.