

유도파 기반 장거리 파이프라인 검사를 위한 모니터링 센서의 위치결정

Determinating Sensor Location for Guided-Wave-Based Long Range Pipeline Inspection

나 원 배* · 류 연 선** · 김 정 태***

Na, Won-Bae · Ryu, Yeon-Sun · Kim, Jeong-Tae

ABSTRACT

Guided wave techniques have been used for pipeline inspection because of the long range inspection capability of guided waves. One of main concerns of these technique is how ones decide the axial interval of sensors when they are utilized for pipeline inspection. This question is related to the characteristic of cylindrical guided wave propagation, especially wave attenuation. Thus, attenuation of fundamental longitudinal guided wave propagating liquid-filled steel pipes is numerically investigated in the paper. Several liquids such as water, diesel oil, castor oil etc. are considered for the filling materials in the pipes. Sink is considered for numerical models for abandoning standing wave modes; hence, the attenuation dispersion curves become much simpler. Those attenuation calculations can be utilized for guided-wave-based nondestructive testing of pipelines when one inspects pipelines, using monitoring sensors, which are installed outside pipes.

Keywords: *attenuation, cylindrical guided wave, liquid-filled steel pipe*

1. 서 론

파이프라인은 수자원, 화석연료 등을 운반하는 중요한 사회기반시설이다. 종종 발생하는 파이프라인의 파손은 사회적 불안감과 산업적 손실을 초래하며 때때로 인명의 손실까지도 초래할 수 있다. 따라서 정기적인 파이프라인의 검사로 불건전한 파이프라인의 손상을 발견하고 손상의 정도에 따른 보수 또는 재생을 실시하여야 한다. 이 때, 손상의 발견은 신뢰할 수 있어야 하며 경제적이어야 한다. 현재, 파이프라인을 검사하는 비파괴 검사법은 크게 두 가지로 대별할 수 있다. 첫 번째는 스마트 피그(smart pig)나 유체를 파이프라인 내부에 진수 또는 주입하여 파이프라인 내부에서 손상의 정도를 검사하는 방법이고 두 번째는 파이프라인의 외부에서 모니터링 센서를 부착 또는 삽입하여 손상의 정도를 검사하는 방법이다. 전자는 비교적 안정된 기술이며 오랜 기간 동안 이용되어져 기술이 검증된 상태이나, 검사를 준비하거나 검사 중인 기간에는 파이프

* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 조교수 E-mail: wna@pknu.ac.kr

** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수 E-mail: ysryu@pknu.ac.kr

*** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수 E-mail: idis@pknu.ac.kr

라인의 일부 또는 전체의 가동을 중지해야 하고 특수한 진수 또는 철거 장치가 필요하게 된다. 후자는 비파괴 검사법이 발달함에 따라 점차적으로 그 적용성이 검증되어가는 추세이며 가동 중인 파이프라인에도 적용 가능하고 따로 진수나 철거장치가 필요 없다는 장점이 있다. 따라서 개발의 정도는 전자가 후자보다 앞서나 후자는 상대적으로 전자에 비해 간편하고 경제적이므로 연구개발 가치가 높다 하겠다. 따라서 현재 비파괴 검사(nondestructive testing), 스마트 센서(smart sensor), 구조건전성 모니터링(structural health monitoring) 등과 관련된 연구개발(R&D)에 파이프라인의 비파괴 검사법은 중요한 부분을 담당하고 있다.

파이프라인의 외부에서 사용될 수 있는 비파괴 검사법의 종류는 다양하지만 초음파, 음향 방출법 등의 음향의 정보를 이용하는 음향법(acoustic method)은 상대적으로 간편하고 용도가 넓다. 특히, 파이프라인의 기하학적 특성에 의해 유도되어지는 유도음향파(guided acoustic waves)는 전파거리가 길어 장거리 파이프라인의 검사에 매우 유리하다. 따라서 유도파를 이용한 파이프라인의 비파괴 검사법의 개발은 활발히 진행되고 있으며 그 적용성이 검증되고 있다(Alleyne and Cawley, 1996; Achenbach, 2000; Hwang et al., 2000; Guo and Kundu, 2001; Na and Kundu, 2002; Rose, 2002; Gokhale and Graham, 2004). 그림 2는 유도파를 이용한 파이프라인 검사의 개념도이다.

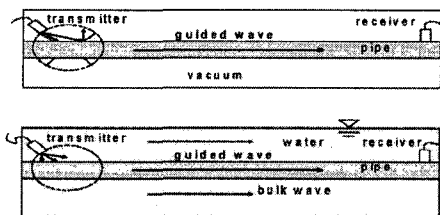


그림 1 유도파를 이용한 파이프라인 검사의 개념도

유도파의 개발과 적용에서 신호를 보내고 받는 센서의 위치를 결정하는 것은 매우 중요하다. 특히, 영구적으로 또는 반영구적으로 파이프라인 외부에서 반지름 방향으로 삽입되어지는 센서의 위치결정은 신호의 송신과 수신 그리고 수신된 신호의 해석과 직접적으로 관련된다. 따라서 적절한 센서의 위치를 결정 또는 선정하는 기술은 확보되어야 한다. 만일 센서의 위치가 부적절하여 수신 또는 해석에 어려움이 따른다면 경제적인 손실과 기술적인 어려움이 발생하게 될 것이다.

본 논문은 유도파를 이용하여 파이프라인을 비파괴적으로 검사할 때 필요한 모니터링 센서의 위치를 선정하는 기법을 소개하였다. 센서의 위치결정은 유도파의 음향학적 특징인 분산(dispersion)과 밀접한 관련이 있다. 특히, 감쇠(attenuation) 분산특성은 유도파의 모드별 주파수별 감쇠특성을 나타냄으로, 특정 모드의 주파수별 감쇠 추이를 예측하기 위한 중요한 특성이다. 일반적으로, 분산특성은 유도파의 분산 방정식을 수치적으로 계산하여 분산곡선(dispersion curves)으로 나타낸다. 분산특성은 재료의 성질과 경계조건과 밀접한 관련이 있어 이들 성질과 조건에 따라 수치적 안정성(numerical stability)이 크게 차이난다. 일단, 감쇠분산곡선이 얻어지면, 특정모드의 주파수별 감쇠특성을 알 수 있으므로 음향강도(sound intensity)의 추이를 예측할 수 있고 센서간의 위치도 선정할 수 있다. 본 연구결과는 향후 파이프라인의 비파괴 검사에 활용되어, 경제적이고 효율적인 센서의 위치(또는 간격) 선정에 정량적인 지침을 마련할 것으로 판단된다.

2. 수치계산

2.1. 감쇠계산

파이프의 재원과 재질 그리고 주변 매질의 특성에 의한 유도파의 감쇠분산 특성을 예측한다. 즉, 아래와 같은 특성을 고려하여 유도파의 감쇠분산 곡선을 수치적으로 계산한다: (1) 파이프의 안지름과 두께 (2) 파이프 내부에 채워진 즉 파이프가 운송하는 재료의 특성 (3) 파이프를 둘러싸는 외부 물질의 특성.

원통유도파(cylindrical guided wave)에 관한 연구는 Gazis(1959)로부터 이론적으로 시작하여 정립되어 왔다(Gazis, 1959; Kolsky, 1963; Knopoff, 1964; Kumar, 1971; Silk and Bainton, 1979; Achenbach, 1984; Mal, 1988; Graff, 1991; Lowe, 1995; Pavlakovic et al., 1997; Rose, 1999). 원통유도파의 분산곡선을 계산하기 위해 주로 사용되는 수치적인 방법은 전체행렬법(global matrix method)인데 이 방법은 수렴속도는 느리나 수렴 안정성이 좋다는 장점이 있다(Aristégui, 2001). 본 연구에서는 전체행렬법으로 원통유도파(cylindrical guided wave)의 여러 가지 모드의 분산특성 중 종방향 유도파의 기본 모드인 $L(0,1)$ 의 감쇠분산곡선을 계산하여 센서의 위치결정에 사용하였다. 이는 $L(0,1)$ 모드가 비교적 특정 주파수대에 일정한 음향 정보를 지니고 기존의 유도파를 이용한 비파괴 검사에 많이 사용되고 감쇠분산곡선이 유도파의 감쇠특성을 나타내기 때문이다. 또한 파이프 내부 유체에서 흡수(sink)를 가정함으로써 불필요한 정상파를 제거하여 수치계산의 안정성과 효율성을 향상시켰다. 이를 종합한 파이프의 수치모델은 아래와 같다.

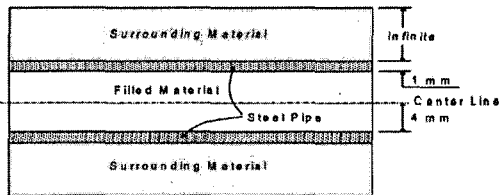


그림 2 수치계산을 위한 모델

수치계산에 사용된 강파이프의 안지름은 4 mm, 파이프의 두께는 1 mm이다. 파이프는 물에 잠겨 있다고 가정하였고 파이프 내부에 채워진 유체의 종류는 표 1에 나타내었다. 액체가 파이프 내부에 채워질 경우 모델링 과정에서 흡수(sink)를 가정할 수 있다. 엄밀히 말하면, 흡수를 가정하는 것은 실제 현상을 정확히 나타내지 못하나 유도파가 파이프의 벽을 따라 전파된다고 가정한다면 실제현상에 영향을 주지 않으면서 불필요한 정상파를 분산곡선에서 제거하는 효과를 얻을 수 있다. 따라서 본 수치계산에서 감쇠효과는 파이프 내부에서의 흡수와 파이프 주변 물질에 의하여 기인한다.

그림 3은 흡수를 고려하지 않은 경우 속채움재가 물인 강파이프의 감쇠분산곡선을 나타내고 있다. 종방향 기본 모드뿐만 아니라 고차 모드 또한 나타내고 있다. 만일 흡수를 고려한다면 그림 4a와 같이 분산곡선은 간단해 질 것이다. 표 1의 재료를 각각 파이프 내부에 채웠을 때의 분산곡선식을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 얻어진 종방향 모드 중에서 기본 모드 $L(0,1)$ 을 분리하여 그림 5에 나타내어 비교하였다. 그림 5에서 저주파수대에서는 내부에 채워진 유체의 종류에 관계없이 감쇠분산 곡선이 비슷한 결과를 나타내지만 고주파수대에서는 유체의 종류에 따라 감쇠분산 곡선이 차이를 보이고 있다. 특이한 점은 저주파수대에서 감쇠 값이 약간 증가하는 '혹'과 같은 영역이 나타남을 알 수 있다. 저주파수대와 고주파수대의 감쇠 값을 면밀히

조사하기 위해 1MHz와 2.68MHz를 선택하여 이들 감쇠분산 곡선을 그림 6과 그림 8에 각각 나타내었다.

표 1 재료의 성질

Name	Density [kg/m ³]	Longitudinal Velocity [m/s]
Water	999.8	1421
Diesel Oil	800.0	1250
Castor Oil	971.0	1474
E t h y l Alcohol	790.0	1238
Glycerin	1258.0	1860
Motor Car Oil	870.0	7140
Paraffin Wax	830.0	2200
Air	0.946	388

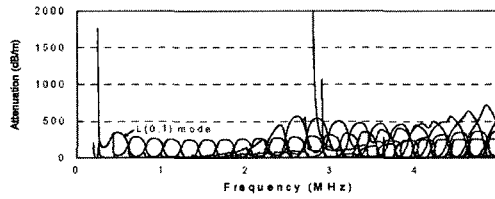
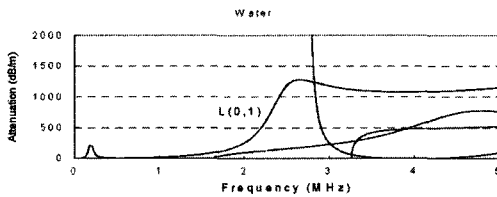
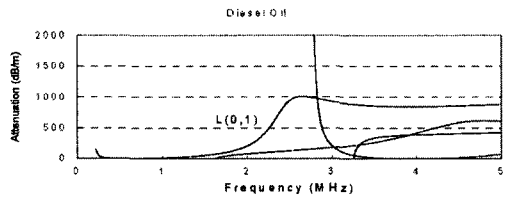


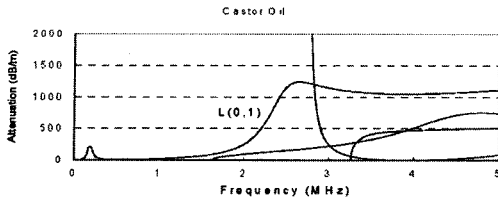
그림 3 강파이프의 감쇠곡선, 속체움재는 물이고 흡수(sink)는 고려되지 않았다.



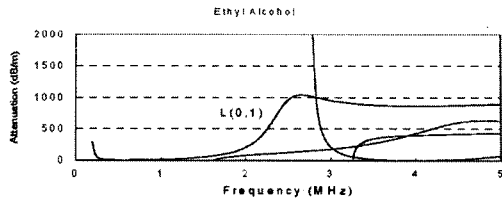
(a) Water



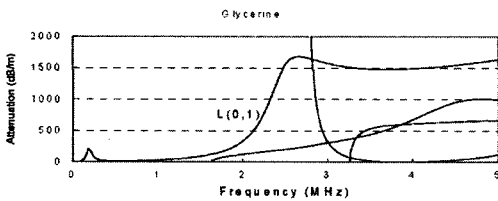
(b) Diesel Oil



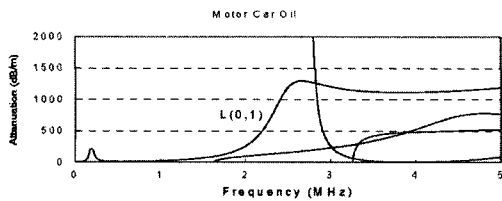
(c) Castor Oil



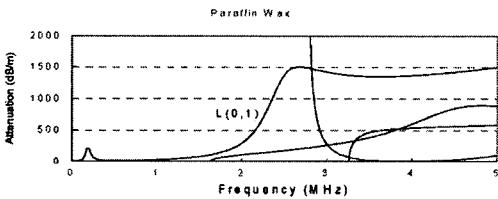
(d) Ethyl Alcohol



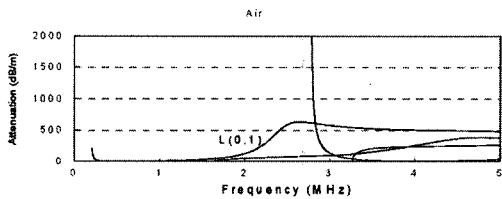
(e) Glycerine



(f) Motor Car Oil



(g) Paraffin Wax



(h) Air

그림 4 종방향 유도파 모드의 감쇠분산곡선, 흡수(sink)가 고려되었다.

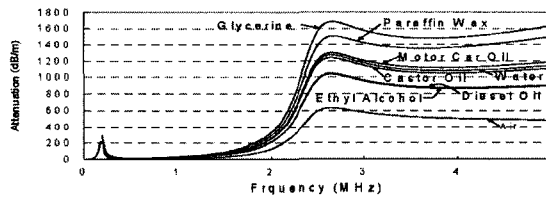


그림 5 종방향 기본 유도파 모드의 감쇠분산곡선.

2.2. 음향강도계산

2.1에서 얻어진 특정 모드의 주파수별 감쇠를 근간으로 축방향 음향강도(sound intensity)의 추이를 계산하였다. 주파수 1MHz 부근에서의 감쇠분산곡선은 그림 6에 확대하여 나타내었다. 점 A는 30.08 dB/m, B는 25.32 dB/m, C는 21.49 dB/m, D는 16.61 dB/m, E는 6.89 dB/m를 각각 나타낸다. 이들 감쇠 값을 기초로 음향강도가 그림 7에 계산되었다. 예를 들면 유도파가 10m 전파되기 위해서 공기가 채워진 강파이프의 경우

69dB의 음향강도가 요구된다. 주파수 2.68MHz 부근에서의 감쇠분산곡선은 그림 8에 나타내었다. 점 A는 1680.97 dB/m, B는 1502.79 dB/m, C는 1296.07 dB/m, D는 1044.78 dB/m, E는 629.34 dB/m를 각각 나타낸다. 이들 감쇠 값을 기초로 음향강도가 그림 9에 계산되었다. 이들 값으로부터 주파수 1MHz에 비하여 2.68MHz에서는 요구되는 축방향 센서의 간격을 유지하기 위해서 매우 큰 음향강도가 요구되어 진다는 것을 알 수 있다. 따라서 이들 주파수대가 유도파를 이용한 파이프라인의 모니터링에서는 부적절한 것을 알 수 있다.

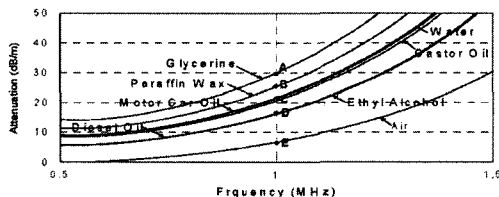


그림 6 주파수 1MHz 부근에서의 그림 5의 상세그림.

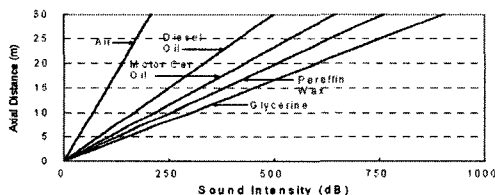


그림 7 모니터링 센서의 축방향 간격을 유지하기 위해 요구되는 음향강도. 주파수가 1MHz인 경우.

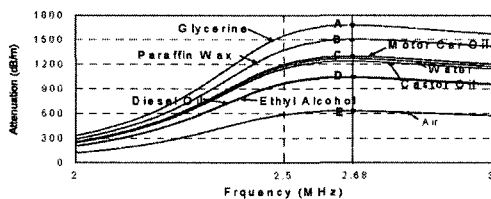


그림 8 주파수 2.68MHz 부근에서의 그림 5의 상세그림.

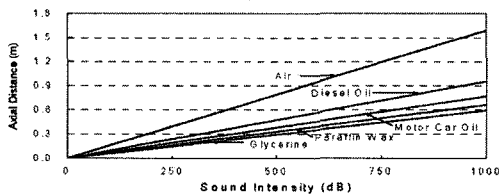


그림 9 모니터링 센서의 축방향 간격을 유지하기 위해 요구되는 음향강도. 주파수가 2.68MHz인 경우.

3. 요약 및 결론

액체가 채워진 파이프라인의 종방향 유도파의 기본 모드의 감쇠를 계산하기 위해 수치계산이 수행되었다. 다양한 액체 또는 기체(공기)가 파이프 내부의 채움재로 고려되었고 이들의 영향을 감쇠분산 곡선을 계산하여 분석하였다. 분산곡선의 복잡성을 배제하기 위해 흡수를 수치계산에 가정하였고 감쇠분산곡선으로부터 특정 주파수(1MHz, 2.68MHz)에서의 음향강도를 계산하였다. 본 연구 결과는 종방향 기본 유도파가 파이프 내부의 속채움재에 따라 어떤 감쇠분산 특성을 나타내는가를 보였고 채택된 속채움재 중 글리세린이 특정 주파수대에서 최고의 감쇠를 나타내고 있음을 보였다. 전반적으로 저주파수대의 유도파가 파이프라인의 모니터링에 활용도가 높은 것을 알 수 있으며 저주파수대에서도 감쇠가 국부적으로 증가하는 '혹'과 같은 부분이 발견됨으로 이들 주파수 또한 모니터링에서 배제되어야 할 것이다. 본 연구에서는 파이프의 반지름과 두께 그리고 파이프 외부 물질을 고정함으로써 속채움재의 영향만을 고려하였으므로 차후에 이들의 상관관계 또한 분석되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00784).

참고문헌

- Alleyne, D.N. and Cawley, P. (1996) The Excitation of Lamb Waves in Pipes using Dry-Coupled Piezoelectric Transducers, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 15, pp.11-20.
- Achenbach, J.D. (2000) Quantitative Nondestructive Evaluations, *International Journal of Solids and Structures*, 37, pp.13-27.
- Hwang, K., Mandayam, S., Udpa, S.S., Udpa, L., Lord, W., and Atzal, M. (2000) Characterization of Gas Pipeline Inspection Signals Using Wavelet Basis Function Neural Networks, *NDT&E International*, 33, pp.531-545.
- Guo, D., and Kundu, T. (2001) A New Transducer Holder Mechanism for Pipe Inspection, *Journal of the Acoustical Society of America*, 110, pp.303-309.
- Na, W.B. and Kundu, T. (2002) Wave Attenuation in Pipes and Its Application in Determining Axial Spacing of Monitoring Sensors, *Materials Evaluation*, 60, pp.635-644.
- Rose, J.L. (2002) A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential, *Transactions of the ASME-Journal of Pressure Vessel Technology*, 124, pp.273-282.
- Gokhale, S. and Graham, J.A. (2004) A New Development in Locating Leaks in Sanitary Sewers, *Tunneling and Underground Space Technology*, 19, pp.85-96.
- Gazis, D.C. (1959) Three Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders ii. numerical results, *Journal of the Acoustical Society of America*, 31, pp.573-578.
- Gazis, D.C. (1959) Three Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders, *Journal of the Acoustical Society of America*, 31, pp.568-572.
- Kolsky, H. (1963) *Stress Waves in Solids*, Dover.
- Knopoff, L. (1964) A Matrix Method for Elastic Wave Problems, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 54, pp.431-438.
- Kumar, R. (1971) Flexural Vibrations of Fluid-Filled Circular Cylindrical Shells, *Acustica*, 24, pp.137-146.

- Silk, M.G. and Bainton, K.F.** (1979) The Propagation in Metal Tubing of Ultrasonic Wave Modes Equivalent to Lamb Waves, *Ultrasonics*, 17, pp.11-19.
- Achenbach, J.D.** (1984) *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland.
- Mal, A.** (1988) Wave Propagation in Layered Composite Laminates under Periodic Surface Loads, *Wave Motion*, 10, pp.257-266.
- Graff, K.F.** (1991) *Wave Motion in Elastic Solids*, Dover.
- Lowe, M.** (1995) Matrix Techniques for Modelling Ultrasonic Waves in Multilayered Media, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control*, 42, pp.525-542.
- Pavlakovic, B.N., Lowe, M.J.S., Alleyne, D.N., and Cawley, P.** (1997) Disperse: A General Purpose Program for Creating Dispersion Curves, Eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 18, pp.239-246, Plenum Press, New York.
- Rose, J.L.** (1999) *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press.
- Aristégui, C., Lowe, M.J.S., and Cawley, P.** (2001) Guided Waves in Fluid-filled Pipes Surrounded by Different Fluids, *Ultrasonics*, 39, pp.367-375.