

중·저준위 방사성폐기물 고화체의 압축강도 평가를 위한 초음파속도 측정

문균영[†] · 이태훈* · 문용식*

Measurement of Ultrasonic Speed for Evaluating Compressive Strength of Solidified Low & Intermediate-Level Radioactive Wastes

Gyoon Young Moon[†], Tae Hun Lee* and Yong Sig Moon*

(Received 30 OCT 2011, Accepted 22 NOV 2011)

ABSTRACT

In order to ship low & Intermediate level radioactive waste drums, which have been temporarily stored on site, to a disposal facility, their physical and chemical properties should be evaluated and proven to meet the acceptance guideline prior to their shipment. Ultrasonic velocity method, which has been used to estimate the strength of concrete, can be suggested to evaluate the compressive strength of solidified radioactive waste, which is one of the evaluated properties. The strength is estimated from acoustic velocity. However, a guided wave traveling along a drum is generated when applying ultrasonic method to the drum, and this makes it difficult to analyze the signal due to overlap between transmitted wave through the contents in drum and the guided wave. This paper reported feasibility of ultrasonic method to evaluate of the compressive strength of the solidified LLW. It is observed that the guide wave is greater than transmitted wave, and ultrasonic velocity could be estimated from transmitted wave signal arriving prior to the guided wave

Key Words : Low & Intermediate level radioactive waste(LLW:중·저준위 방사성 폐기물), Nondestructive test(비파괴 검사), Ultrasonic velocity method(초음파 속도법), Compressive strength(압축강도), Guided wave(유도초음파)

기호설명

V_p = acoustic velocity
 D_I = inner diameter of drum
 Δt_{TOF} = time of flight
 Δt_{drum} = propagation time of acoustic through a drum

1. 서론

원전 부지내 임시저장고에 보관하여 관리중인 방사성폐기물 드럼을 영구 처분장에 처분하기 위해서는 드럼 내용물의 구조적 건전성을 비롯하여 핵종농도, 유리수 함량 등 물리·화학적 특성이 규정하고 있는 중·저준위방사성폐기물 인수기준을 만족하여야 한다¹⁾. 원전 운영 중 발생된 방사성폐기물 중 농축폐액과 폐수지는 시멘트, 파라핀 등과 함께 혼합되어 고형화된 상태로 드럼 내 보관하고 있으며, 인수기준 중 압축강도는 ‘중·저준위방사성폐기물처분시설 안전성 분석 보고서’에 따라 기준치 이상의 압축강도를 가져

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력 중앙연구원
E-mail : icandoit@khnp.co.kr
TEL : (042)870-5625 FAX : (042)870-5639

* 한국수력원자력 중앙연구원

야 하며, 시멘트 등과 같은 경질 고화체의 경우 압축강도가 500psig(3.44MPa)이 이상이 되도록 요구되고 있다. 이러한 방사성폐기물 고화체의 압축강도를 평가하기 위해서는 대표드럼을 선정하고 시료를 채취하여 분석하는 파괴분석과 드럼의 개봉 또는 시료채취 없이 원상태에서 분석할 수 있는 비파괴 검사 기법이 활용될 수 있다. 비파괴적으로 고화체의 압축강도를 평가하기 위해서는 콘크리트의 강도 평가에 사용하는 비파괴 기법을 동일하게 적용할 수 있다. 콘크리트 강도 추정을 위한 비파괴 기법으로 반발경도법과 초음파 속도법이 보편적으로 사용되고 있으며, 관입법, 인발법, 압입법 등의 기법이 사용되고 있다²⁾. 이 중 반발경도법은 콘크리트 표면을 강구로 쳤을 때 반발도를 측정하는 방법으로, 슈미트 해머와 같이 상용화된 장비로 널리 사용되고 있으며, 미리 반발도와 압축강도 사이의 관계를 구하여 놓고 측정된 반발도로부터 압축강도를 추정한다. 그리고 초음파 속도법은 콘크리트의 강도와 탄성계수 사이에는 선형적인 비례관계를 가지는 점을 이용하여 콘크리트 내에 전파하는 탄성파의 속도의 변화차를 측정하여, 압축강도를 추정하는 방법을 사용한다. 일반적으로 초음파의 산란, 감쇠와 초음파 발생의 기술적인 문제로 주로 50kHz~200kHz 정도의 낮은 초음파를 사용하며 주로 투과에 의한 시험법이 많이 사용되고 있다³⁾.

그런데, 방사성폐기물 드럼의 경우 드럼의 개봉 없는 고화체에 직접 측정장비를 접촉할 수 없기 때문에 장비의 직접접촉이 요구되는 반발경도법보다는 드럼외부에서 초음파 입사 및 수신이 가능한 초음파 속도법이 보다 적합할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 시멘트를 고화제로 사용하는 드럼을 대상으로 하여 고화드럼에서의 초음파 전파 특성을 분석하고, 이를 통해 고화체의 압축강도 평가에 초음파 속도법의 적용 적합성에 대해 검증하고자 하였다.

2. 이론

2.1 초음파를 이용한 압축강도 평가

초음파를 이용하여 방사성폐기물 드럼의 고화체 압축강도를 측정하기 위해 계측 시스템은 Fig. 1과 같이 구성할 수 있다. 탐촉자를 드럼 양쪽에 위치시키고, 송신측 탐촉자에서 초음파를 발생시켜 반대 면에서

탐촉자가 초음파 신호를 측정하여 전파시간을 측정함으로써 속도를 계산할 수 있다. 일반적인 초음파 검사의 경우 반사법과 투과법을 사용할 수 있지만, 시멘트 고화체의 경우 높은 음향 감쇠 특성을 가지고 있고, 드럼의 직경이 크기 때문에 신호를 취득하기 위해서는 투과법이 보다 적합하다. 기존의 많은 연구들에서는 실험을 통해 콘크리트의 압축강도와 초음파 속도 사이에는 선형적인 관계가 있음을 밝히고 있으며, 대표적으로 일본건축학회식과 J, Pyszniak 식이 사용되고 있다⁴⁾. 이러한 기존 연구를 기반으로 초음파의 음속을 측정함으로써 고화체의 압축강도를 평가할 수 있다. 다만 기존 연구에서 사용된 혼합제, 배합방법, 양생조건 등이 본 연구와는 상이하기 때문에 상기 상관관계식들을 바로 적용하기에는 어려움이 있으며, 방사성폐기물 고화체에 관한 압축강도와 속도와의 관계식을 실험적으로 구할 필요가 있다. 이는 추후 연구로써 계속 진행될 예정이다.

그런데 초음파를 이용한 고화체 압축강도 평가와 콘크리트에서의 측정과의 큰 차이점과 어려움은 탐촉자가 직접 고화체에 접촉할 수 없고, 고화체 외부에 금속드럼체가 존재한다는 점이다. 이로 인해 드럼과 고화체 경계에서 초음파 에너지 손실이 발생할 수 있다는 문제와 함께 두께가 얇은 드럼체의 경계를 통하여 전파하는 유도초음파가 발생하여 고화체를 직접 투과된 초음파 신호와 중첩되어 고화체를 통과한 신

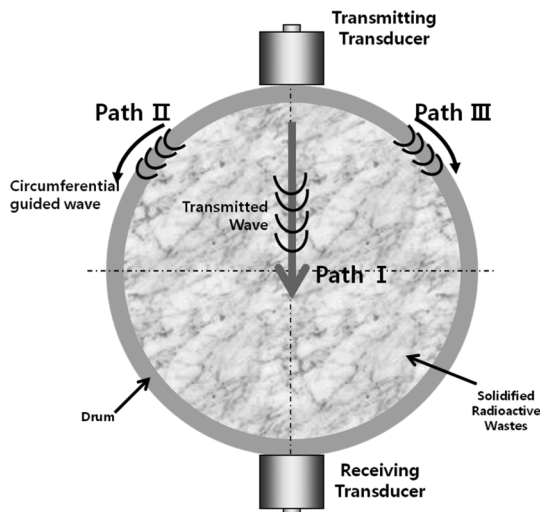


Fig. 1 Ultrasonic paths in drum of solidified radioactive waste

호와 유도초음파 신호의 구분이 어려워져 정확한 전파시간을 측정하는데 어려움이 발생한다. 유도초음파는 특정한 경계면을 따라 전파하는 탄성파의 한 종류로 여러 모드가 존재하고 분산성 특징을 가지고 있어⁵⁾ 신호를 해석하기가 또한 어렵다. 이러한 유도초음파가 Fig. 1의 II, III 경로와 같이 원주방향으로 전파되며, 음파의 에너지가 I 번 경로의 투과파에 비해 크기 때문에 수신되는 유도초음파를 투과파로 오인하는 문제가 발생할 수 있다. 또한 투과파와 유도초음파의 수신탐촉자로의 전파 시간이 비슷한 경우 신호분리가 어려워 정확한 평가가 어려워진다.

따라서 투과파와의 신호구분을 위해서는 고화시험체 적용에 앞서 빈 드럼에 대한 초음파 실험을 통해 유도초음파의 전파모드를 해석하는 과정이 필요하다.

3. 실험방법

3.1 시편

사용되는 드럼은 방사성폐기물 고화에 사용하는 동일한 드럼을 사용하였으며, 직경은 572.9 mm, 높이는 884 mm 그리고 두께는 1.2 mm이다. 시편 제작을 위해 드럼을 1/3크기로 절단을 하여 사용하였으며, 폐수지 방사성폐기물을 모사하기 위해 시멘트, 수지, 소석회 혼합비율을 달리하여 Fig. 2 와 같은 고화 시험편을 제작하였다. 이와 함께 파괴시험을 통해 압축 강도 평가를 구하기 위한 공시체 시편도 각 혼합비율에 대해서 각각 만들어졌다. 본 적합성 연구에서는 순수 시멘트로 이루어진 드럼 시편을 시험대상으로 사용하였다.



Fig. 2 Photography of solidified specimens

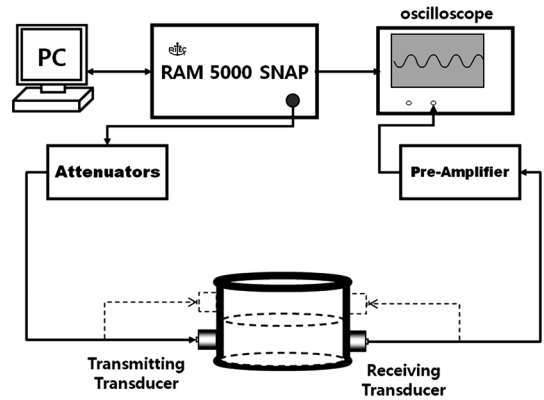


Fig. 3 Block diagram of experimental system construction

3.2 실험장치

본 연구를 위해 실험 장치를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 송신과 수신에는 중심 주파수가 54 kHz이고 직경이 45 mm인 탐촉자가 사용되었으며 초음파를 발생시키기 위해 RAM5000 SNAP(RITEC, USA) 시스템이 사용되었다. 이 장비는 탐촉자에 매우 큰 진폭의 전압을 가할 수 있도록 설계되어 있으며, 큰 증폭신호를 탐촉자에 가해 줌으로써 높은 음압의 초음파를 발생시켜 초음파의 감쇠가 큰 고화체를 투과하여 높은 S/N비를 가진 수신 신호를 확보할 수 있다. 이 시스템을 통해 송신 탐촉자에는 54 kHz, 3 cycle의 사인신호 형태의 인가신호가 가해졌다. 수신 신호는 RAM5000 SNAP 장비의 프리앰프(pre-amplifier)를 통하여 증폭되었으며, 높은 S/N를 위해 오실로스코프에서 64회 평균화되었다.

본 실험에서 유도초음파와 투과파에 대한 확인 및 구분을 위해 Fig. 3과 같이 고화체가 존재하는 부분과 없는 부분에 대해 초음파 투과 시험을 시행하였다.

4. 실험결과

4.1 속도측정 결과

본 실험장치를 통해 측정된 신호는 Fig. 4와 같다. 영점 부분에 나타난 초기 신호는 초음파 가진 전압신호가 높은 증폭으로 인해 나타난 것이다. Fig. 4(a)와 (b)의 유도초음파가 약한 진폭차를 보이고 있는데, 이는 양쪽으로 전파된 유도초음파가 수신지점에서 중첩되어 수신되는데 수신지점의 약간의 차이에 따라

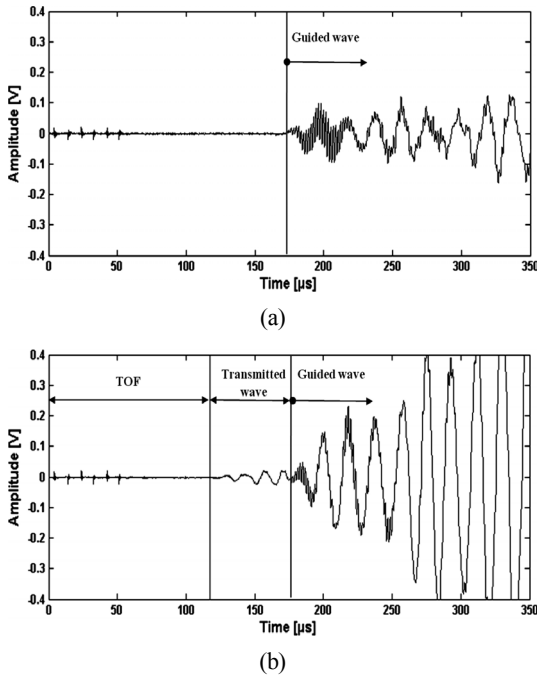


Fig. 4 Signals measured (a) at height of vacant drum and (b) at height of drum filled with cement

수신 위상차로 인해 차이가 발생된 것으로 판단된다.

Fig. 4에서 보는 것과 같이 드럼내 고화체 유무에 따라 신호차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)와 같이 고화체가 존재하는 지점에서만 나타나는 신호가 고화체를 투과한 신호이며, 나머지는 드럼을 따라 전파한 유도초음파로 볼 수 있다. 신호에서 보듯이 투과파에 비해 유도초음파는 큰 신호진폭을 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 투과파 선정에 있어 투과파와 유도초음파를 분리할 수 있도록 신호를 정확히 분석하는 과정을 요한다.

신호로부터 신호도착 시간은 신호의 0점을 벗어나는 지점으로 선택할 수 있으며, 이 시간까지를 총 전파시간(Time Of Flight, TOF)으로 결정할 수 있다. 이러한 특정점을 구하기 위해서는 여러 가지 방법이 사용될 수 있으며, 가장 보편적으로 사용되는 문턱치(thresholding) 기법이 사용되었다. 문턱치 기법은 설정한 문턱치에 걸리는 시간을 TOF로 정하는 방법으로, 이때 문턱치 값은 0에 가까운 값으로 선택되었다. 이러한 방법으로 측정된 총 전파시간은 119.3μs이다.

그런데 이 총 전파시간에는 드럼을 두께방향으로 투과하는 시간이 포함되어 있으므로, 정확한 속도 측

정을 위해서는 이 전파 시간을 구하여 제외할 필요가 있다. 이를 위해 별도의 초음파 반사법 시험을 통해 시간을 측정하였으며, 투과 시간은 약 0.4μs로 나타났다.

따라서 고화체에서의 초음파 속도(V_p)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_p = \frac{D_I}{\Delta t_{TOF} - \Delta t_{drum}} = \frac{570.5mm}{119.3\mu s - 0.4\mu s} = 4.798mm/\mu s = 4798m/s$$

이때 D_I 는 드럼의 내경, Δt_{TOF} 는 수신된 신호로부터 측정된 총 전파시간, Δt_{drum} 은 투과시 드럼의 두께 방향으로 전파된 시간을 나타낸다. 이 때 계산된 초음파 속도는 기존 연구들에서 측정된 콘크리트에서의 초음파 속도 범위 내에 속하는 것을 확인할 수 있다⁴⁾.

4.2 Pitch-catch 기법을 이용한 속도 검증

본 연구를 통해 측정된 초음파 속도를 검증하기 위해 Fig. 5와 같이 고화체 상부에 송수신 탐촉자를 위치시켜 저면의 반사파를 측정하는 pitch-catch 기법을 이용하였다. 이와 같이 직접 고화체 탐촉자를 접촉시킬 경우 드럼과 같은 중간 매개체의 영향이 없기 때문에 보다 신뢰도 있는 측정이 이루어진다고 판단하였다. 탐촉자 위치 외에 장치구성은 Fig. 3과 동일하게 이루어졌다.

pitch-catch 기법을 통해 측정된 신호는 Fig. 6과 같이 나타났다. 이 신호로부터 TOF는 50.85μs로 측정되었으며, 총 전파 거리는 254.95mm이므로 속도는 다음과 같이 측정된다.

$$V_p = \frac{254.95mm}{50.85\mu s} = 5.014mm/\mu s = 5014m/s$$

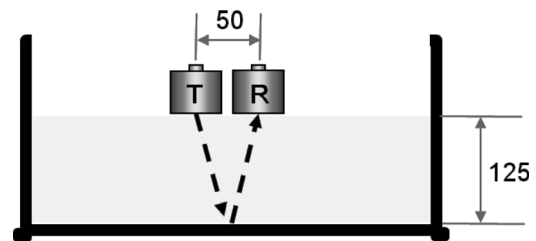


Fig. 5 Experimental setup for pitch-catch method (dimensions in mm)

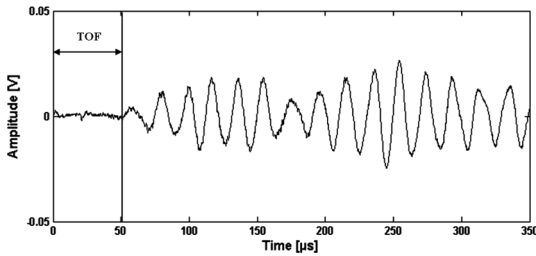


Fig. 6 Received signal of pitch-catch method

드럼 외부에서 속도를 측정하는 기법으로부터의 속도와 비교하였을 때 약 4.5%의 오차가 발생하지만, 드럼의 내경 측정 오차, 고화체의 높이 측정 오차, TOF 특징점 측정 오차 등을 고려하였을 때 측정결과는 오차 범위 내에 있다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서 드럼 외부에서 초음파 투과법을 적용하여 고화체의 초음파 속도를 측정하는 기법이 유효하다고 판단할 수 있으며, 이와 같이 초음파 속도를 구한 뒤 초음파 속도와 압축강도 관계식을 통해 비파괴적으로 고화체의 압축강도를 평가할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 비파괴적 기법 중 하나인 초음파 검사를 이용한 방사성 폐기물 드럼내의 고화체 압축강도 평가의 적합성에 대해 평가하였다. 드럼 내에 존재하는 고화체의 압축강도 평가를 위해서는 초음파 기법의 사용이 적합하지만, 드럼을 따라 전파하는 유도초음파 때문에 신호 분석이 어려운 문제점이 발생하였다. 실험을 통해 유도초음파를 확인하여 고화체를 투과한 신호와 구분할 수 있었지만, 큰 유도초음파 신호 때문에 신호 분석에 주의가 요함을 확인하였다. 투과파의 고화체 내 전파시간을 측정하여 고화체의 속도를 평가할 수 있었으며, pitch-catch 기법을 이용하여 계산된 속도를 검증하였다.

이와 같이 측정된 초음파 속도는 고화체의 압축강도 추정식을 통해 강도를 평가할 수 있지만, 앞서 밝힌 바와 같이 기존 연구에서 사용된 고화 조건들이 본 연구와는 차이가 있기 때문에 추후 연구에서는 성분비별로 제작된 시편에 대하여 고화체 내의 초음파 속도를 측정하고, 파괴시험을 통한 측정된 압축강도와의 상관관계를 도출하며, 이때 구해진 새로운 관계식을 통해 드럼내 고화체의 압축강도를 평가할 예정이다.

참고문헌

1. Park, J. K., Maeng, S. J., Lee, Y. E. and Hwang, T. W., 2008, "Evaluation of X-ray System for Nondestructive Testing on Radioactive Waste Drums," *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, Vol. 6, No. 3, pp. 189-203.
2. Kim, Y. H., 2000, "Nondestructive Testing of Concrete Structure," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 20, No. 4, pp. 329-341.
3. Park, S. Y., Yoon, S. H., 2002, "An Experimental Study on the Estimation of the Strength of Hardened Concrete," *Proceeding of Spring Conference of the Korean Society for Nondestructive Testing*, pp. 189-199.
4. Kim, M. H., Choi, S. J., Kang, S. P., Kim, J. H., Jang, J. H., 2002, "A Study on the Application of Non-Destructive Testing Equation for the Estimation of Compressive Strength of High Strength Concrete," *Journal of The Korea Institute of Building Construction*, Vol. 2. No. 3, pp. 123-130.
5. Rose, L. J., 1999, "Ultrasonic Waves in Solid Media," Cambridge University Press, pp. 101-136.