한국지반공학회논문집 제23권 1호 2007년 1월 pp. 51 ~ 65

암반 불연속면 탐측을 위한 초음파 반사 이미지 - 실내실험

Ultrasonic Reflection Imaging for Discontinuity Detection of Rock Mass - Laboratory Study

이 종 섭[1] Lee, Jong-Sub
김 승 선[2] Kim, Seung-Sun
김 동 현[3] Kim, Dong-Hyun
김 욱 영[4] Kim, Uk-Young
이 인 모[5] Lee, In-Mo

Abstract

The purpose of this study is the development and application of a high resolution ultrasonic wave imaging system to detect discontinuity plane in lab-scale rock models. This technique is based on received time series which capture the multiple reflections at interface. This study includes the fundamental aspects of ultrasonic wave propagation in rock mass, the selection of the optimal ultrasonic wave transducer, data gathering, a signal processing, imaging methods, and experiments. Experiments are carried out by the horizontal movement and rotation devices. Experimental studies show the discontinuity is well detected by the horizontal movement and rotation devices under water. Furthermore, the discontinuity and the cavity on the plaster block are identified by the rotation device. This study suggests that the new method may be an economical and effective tool for the detection of the discontinuity on rock mass.

요 지

본 논문의 목적은 초음파 탐사 방법을 이용하여 지반내의 불연속 물질을 탐측할 수 있는 고해상도의 시스템을 개발하고 실내에서 적용하는 것이다. 초음파 탐측 방법은 불연속면의 경계면에서 반사되어온 반사파를 탐측하고, 이를 배열하여 불연속면의 존재를 찾는 방법이다. 본 논문은 암반내 초음파의 전달 양상, 최적화된 트랜스듀서의 선택, 데이터 획득, 신호처리 방법, 영상화 기법, 그리고 실내 적용실험을 포함하고 있다. 실내실험은 수평이동장치와 회전이동장치를 이용하여 수행된다. 수중에서 수평이동 및 회전실험 결과, 불연속면의 위치와 크기가 정확하게 평가되었다. 또한 석고시료에서 회전실험결과 석고 내에 존재하는 균열과 공동이 비교적 정확하게 영상화됨을 알 수 있다. 본 논문은 새롭게 제시된 방법이 암반 불연속면 탐측에 매우 경제적이고 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여준다.

Keywords : Cavity, Coupling, Directivity, Discontinuity, Impedance, Reflection, Signal processing, Transducer, Ultrasonic waves

1 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.)
2 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.)
3 GS 건설 지하공간팀 과장 (Manager, GS Engrg. & Construction, Geosystem Engrg. Team)
4 GS 건설 지하공간팀 대리 (Assistant Manager, GS Engrg. & Construction, Geosystem Engrg. Team)
5 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr, 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

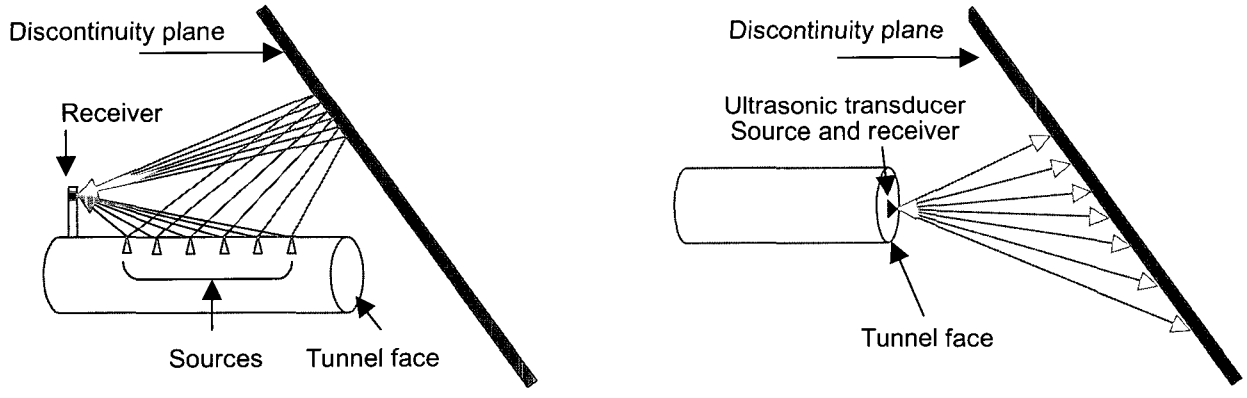
터널의 조사와 시험은 노선 계획단계에서부터 공사 단계까지 여러 가지 목적에 따라 실시되고 있다(한국지반공학회 1997). 노선 계획단계에서 수행되는 사전 조사단계에서는 광역 조사 및 지표 지질 조사, 물리 탐사, 그리고 현장 조사 및 시험 등을 포함한다. 터널 시공 중 위험 구간을 사전에 예측하기 위하여 막장 전방에 대하여 지질 맵핑(mapping), 선진수평보링, Tunnel Seismic Prediction(TSP) 등과 같은 여러 가지 지반조사가 수행되고 있다. 지질 맵핑의 경우 직접적이고 신뢰성이 높으나 막장의 표면에 국한되어 터널 전방의 예측에는 한계가 있으며, 선진 수평 보링의 경우 눈으로 직접 확인하는 장점이 있으나 일차원적인 조사 방법으로 국부적인 변화를 검측하기가 어려우며, 많은 시간과 고가의 비용이 소요되는 단점이 있다. 그리고 TSP의 경우 절리 혹은 파쇄대 등의 파악에 유리하고 조사 범위가 비교적 크나, 공동이나 수평 절리의 판단이 어렵고 탄성파 발신을 위해서 발파를 이용해야 한다는 단점이 있다.

그림 1(a)는 탄성파를 이용한 대표적인 터널막장 전방 파쇄대 예측방법인 TSP 방법을 보여주고 있다(이인모 외 2002). TSP 방법에서는 그림 1(a)와 같이 여러 개의 발파공(source)에 대하여 장약 후 발파를 실시하여 파를 발생시키며, 불연속면으로부터 되돌아온 반사파를 하나의 수신원에서 획득하여 불연속 면에 대한 정보를 획득하는 방법이다. 일반적으로 TSP 방법의 탐측범위는 100m 이상인 것으로 알려져 있다. TSP 방법에서는 파의 발생을 위하여 발파를 이용하므로 파가 모든 방향으로 전파되므로 측정된 파의 해석을 위해서 복잡한 과정이 필요하다.

압축파(P-wave)의 주파수가 20kHz이상이면 초음파(ultrasonic wave)라고 불리며 초음파가 전파되면서 매질과 임피던스(impedance)의 차이가 발생한 경계면에서 초음파가 다시 반사되어 되돌아 온다(Richart et al. 1970; Aki and Richards 1980). 이와 같은 개념을 이용하여 금속들의 결함부위를 찾는 비파괴시험(McIntire 1991), 수중에서 잠수함의 운행을 돕는 수중항해(underwater navigation), 해양탄성파 탐사(Waters 1992) 등이 실생활에 적용되고 있다. 뿐만 아니라 초음파의 주파수를 MHz이상으로 올려 의학분야에서 태아의 건강상태 검진용으로 매우 활발하게 적용되고 있다(Gomm and Mauseth 1999).

본 연구에서는 그림 1(b)와 같이 수중항해나 의학분야에 적용되는 초음파 반사법을 터널 막장 전방조사에 적용하기 위해 실내실험을 수행하였다. 즉, 파의 발신과 수신을 위해서 초음파 트랜스듀서를 이용하여 동일한 지점에서 파를 발생시키고 불연속 구간으로부터 되돌아온 반사파를 획득하는 방법을 이용한 것이다.

본 논문에서는 트랜스듀서를 적용하여 터널막장 불연속면의 탐측방법을 조사하기 위한 것으로 트랜스듀서의 구성과 파의 지속시간, 해상도와 탐측심도와 관련된 트랜스듀서의 특징을 우선 조사하였다. 트랜스듀서에서 발산된 빔의 근접장(near field)과 원거리장(far field)에서 영향과, 원거리장에서 지향성(directivity)을 조사하였다. 그리고 탐측 시 측정되는 직접 전달파를 제거하는 방법과 트랜스듀서와 시험체 사이의 커플링층(coupling layer)의 선택방법을 살펴보았다. 또한 측정된 신호의 영상화를 위한 신호처리 과정을 소개한 후, 수중에서 고체 파라핀 불연속면에 대한 수평이동 실험과 석고 블럭에 대한 회전이동 실험을 통하여 이미지 획득하였다. 마지막으로 수평이동과 회전이동 실험을 통하여 산정된 이미지를 비교·분석하였다.



(a) TSP method (b) New ultrasonic reflection method

그림 1. 새로운 초음파 탐측 방법과 TSP의 개요도

2. 트랜스듀서(Transducer)

트랜스듀서는 기계적 신호를 전기적 에너지로, 또는 전기적 에너지를 기계적 신호로 바꾸어 주는 장치이다. 이 장치는 초음파 탐측 시 파의 송신과 수신 용도로 사용된다. 초음파 트랜스듀서의 이용 시 주파수에 따라 해상도 및 탐측 심도가 좌우된다.

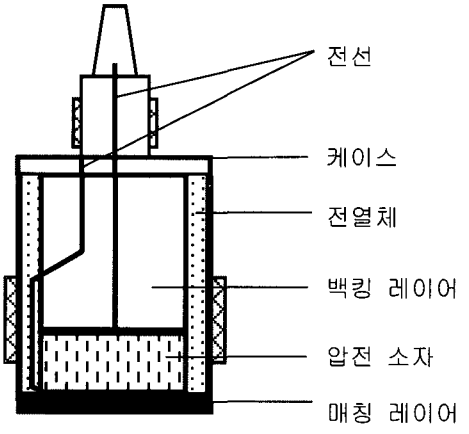


그림 2. 트랜스듀서의 구성

2.1 트랜스듀서의 구성

트랜스듀서는 그림 2와 같이 파를 발생시키는 압전소자(piezoelectric element)와 케이싱(casing), 매칭 레이어(matching layer), 백킹 레이어(backing layer), 케이블, 전열체 등으로 구성되어 있다(Lee and Santamarina 2004).

2.1.1 백킹 레이어(Backing layer)

여진 주파수로 인하여 물체는 자신의 주파수에서 진동하는 울림(ring) 현상이 있다. 이런 외부의 울림 현상은 트랜스듀서의 압전소자의 뒤에 뒷채움 물질로 조절할 수 있다. 이런 뒷채움 물질을 백킹 레이어(backing layer 또는 backing block)라 한다. 그림 3과 같이 뒷채움 물질의 댐핑이 높으면 신호의 지속 시간은 짧아지게 되고 진폭도 감소하게 되며, 낮은 댐핑의 뒷채움 물질을 사용하면 신호의 지속 시간은 길어지고 진폭의 감소도 적다(Wells

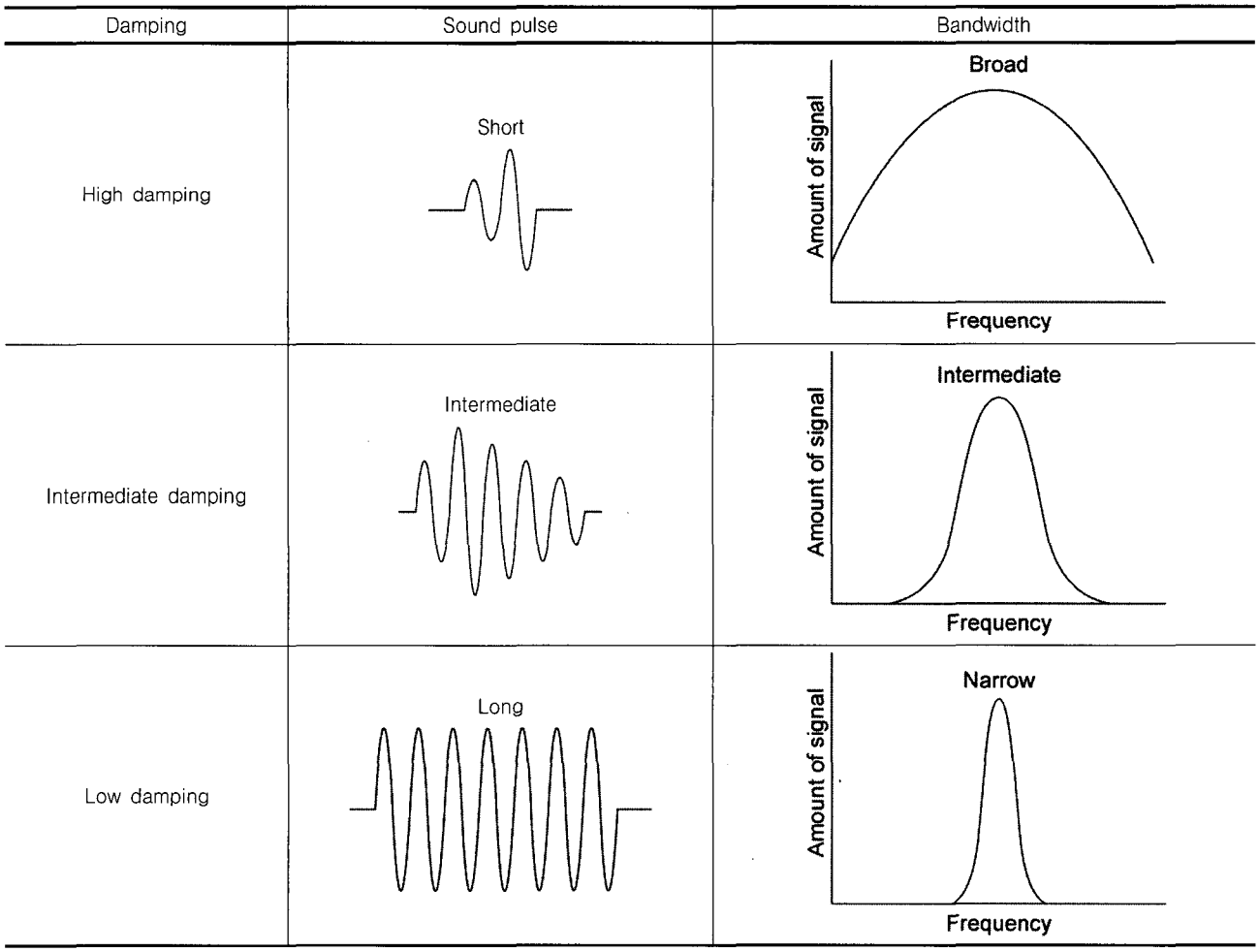


그림 3. 댐핑과 파동의 지속시간에 따른 주파수의 대역(Wells 1977; Zagzebski 1996)

1977). 진동의 지속 시간이 짧을수록 트랜스듀서의 축 해상도를 증가시킬 수 있으므로 불연속 지반을 탐측하기 위해서는 높은 댐핑을 가진 트랜스듀서를 사용해야 한다.

2.1.2 매칭 레이어(Matching layer)

매칭 레이어는 트랜스듀서와 매개체 사이의 중간물질로 트랜스듀서를 보호할 뿐만 아니라 트랜스듀서와 매질 사이 혹은 매질에서 트랜스듀서 사이에서 파의 효과적인 전달을 위한 부분으로써 트랜스듀서의 대역폭(bandwidth)과 민감도에 영향을 미친다. 매체와 트랜스듀서 사이의 큰 임피던스 차이는 반사율을 크게 하기 때문에, 중간 매체인 매칭 레이어는 반사파를 줄여 주는 역할을 한다. 또한 파의 에너지를 효율적으로 전달하여 트랜스듀서에 발생되는 울림 현상을 줄여주게 된다. 트랜스듀서는 일반적으로 하나의 주파수가 아니라 광역 주파수이므로 매칭 레이어는 중심 파장을 보내는 역할을 한다. 즉, band-pass filter 역할을 하게 된다(Zagzebski 1996). 매칭 레이어의 가장 적절한 두께는 파장의 1/4이다. 매칭 레이어의 임피던스는 트랜스듀서와 매질 사이의 중간 값을 갖도록 설계된다. 탐측 매질의 임피던스가 z_w이고 트랜스듀서의 임피던스가 z_t인 경우, 매칭 레이어의 임피던스가 $z_m = \sqrt{z_w \times z_t}$인 경우 가장 효율적인 것으로 알려져 있다(Hadjicostis et al. 1988). 매칭 레이어의 재질은 지향성 부분에서 언급한 렌즈의 설계에 영향을 주게 된다.

2.2 트랜스듀서의 특징

2.2.1 파동 지속시간

파의 진동이 시작되는 시간부터 끝나는 시간까지의 길이를 파장의 지속시간(pulse duration)이라 한다. 파장의 지속시간이 짧을수록 더 넓은 대역폭을 가지며 파장의 지속시간이 길수록 좁은 범위의 주파수 대역을 띄게 된다(그림 3).

2.2.2 해상도

해상도는 축방향 해상도(axial resolution)와 측방향 해상도(lateral resolution) 두 가지 종류가 있다. 축방향 해상도는 빔이 향하는 방향으로 매질과 다른 이질적 물질(anomaly) 간격이 어느 정도까지 측정이 가능한지를 나타내는 능력이며, 측방향 해상도는 축에 교차되는 방향으로 매질과 이질층을 구분할 수 있는 능력을 말한다(Zagzebski 1996). 트랜스듀서의 축방향 해상도는 펄스의 지속 시간, 즉 트랜스듀서에 의해 매질로 이동되는 음파의 펄스 지속시간과 트랜스듀서의 주파수에 의해 영향을 받는다. 그러나 트랜스듀서의 측방향 해상도는 트랜스듀서의 주파수뿐만 아니라 트랜스듀서의 크기와 방향성에 따라 달라지게 된다. 즉, 빔의 폭에 의해 결정된다. 만약 신호가 빔의 축방향이나 측방향에서 각기 다른 위치에서 반사되어온 신호가 왔을 때 시간 간격이 펄스의 지속기간보다 크다면 그림 4와 같이 신호는 분해가 가능해지게 된다. 그러나 짧은 지속시간은 더 넓은 주파수 대역폭을 나타낸다. 따라서 짧은 지속시간은 축

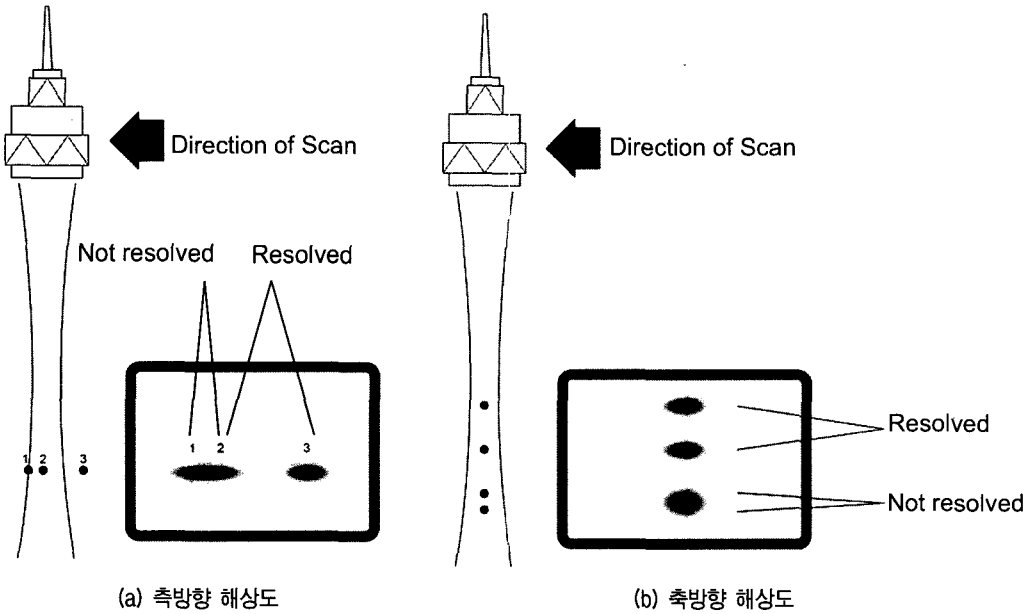


그림 4. 트랜스듀서의 축해상도와 측해상도의 모식도(Zagzebski 1996)

방향 해상도를 증가시키지만 민감도를 낮추게 된다. 초음파를 이용한 영상화 기법을 적용한 경우 높은 댐핑(damping)을 가진 트랜스듀서를 사용하여 파의 지속시간을 짧게 하여 해상도를 높이고, 낮아지는 민감도는 출력 에너지나 입력에너지를 조절함으로써 극복해야 한다.

2.2.3 탐측 심도(Skin depth)

주어진 매질의 깊이 혹은 민감도(sensitivity) 내에서 매질과 이질층을 측정할 수 있는 능력을 신호의 진폭이라고 한다. 민감도는 전달파의 에너지가 크거나 혹은 수신기로 되돌아 오는 파의 크기가 클 때 향상된다. 따라서 반사파의 진폭은 감쇠 α와 탐측 가능한 최대 깊이인 탐측 심도(skin depth, S_d)에 따라 변하게 된다. 탐측 심도는 식 (1)과 같이 표현된다(Santamarina et al. 2001).

$$S_d = \frac{1}{\alpha} = \frac{V}{2\pi Df} \tag{1}$$

여기서, V는 초음파 속도, D는 댐핑 비율(damping ratio)이고, f는 주파수이다. 주파수가 증가함에 따라 해상도는 증가하지만 탐측심도는 감소하게 된다.

2.3 트랜스듀서의 선택

본 논문에 사용된 트랜스듀서는 초점방식(focal type)의 트랜스듀서(Panametrics A3441)와 비초점방식(nonfocal type)의 트랜스듀서(Panametrics V318)로, 두 종류의 트랜스듀서가 사용되었다. 두 트랜스듀서는 직경이 19mm, 공진주파수가 500kHz로 동일하며 또한 모두 수중에서 사용하기에 적합한 immersion type이다.

3. 트랜스듀서의 빔 특징

3.1 기본 이론

3.1.1 근접장(Near field)과 원거리장(Far field)

비초점 방식의 트랜스듀서는 그림 5와 같이 일반적으

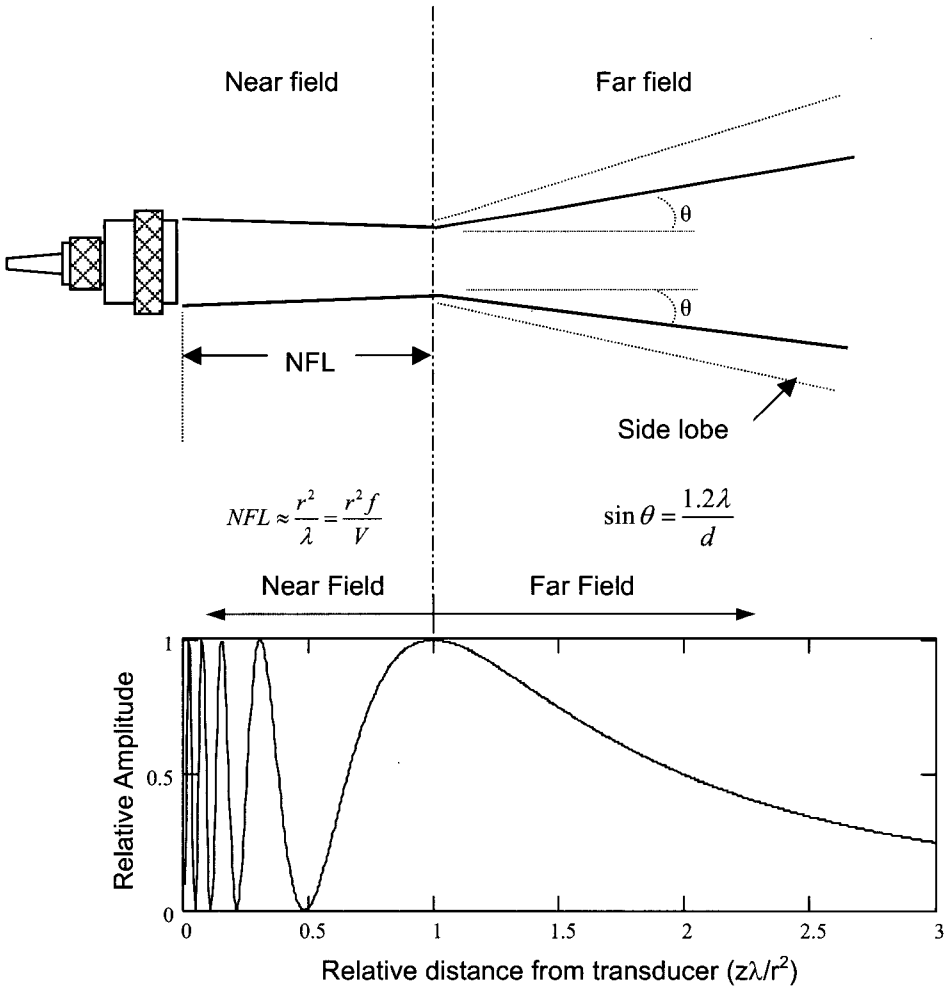


그림 5. 트랜스듀서 빔의 특징

로 두 가지로 구분되는 빔의 구간이 있다. 그 두 구간은 근접장(near field)과 원거리장(far field)이다. 근접장은 Fresnel Zone 라고도 하며, 원거리장은 Fraunhofer Zone 라고 한다. 근접장 구간(Near Field Length, NFL)은 아래 식 (2)와 같다(Krautkramer and Krautkramer 1990).

$$NFL \approx \frac{r^2}{\lambda} = \frac{r^2 f}{V} \tag{2}$$

여기서, r은 트랜스듀서의 반경, λ는 파장, f는 주파수, 그리고 V는 초음파 속도이다. 근접장내에서 진폭은 공간적으로 높은 파동을 보이다가 점차 감소하게 된다. 그러나 이 감소는 기하학적인 감소 경향을 보이는 것은 아니다. 트랜스듀서의 직경이 크거나 주파수가 높은 트랜스듀서의 경우 근접장 구간이 길어지게 된다.

3.1.2 파의 지향성(Beam directivity)

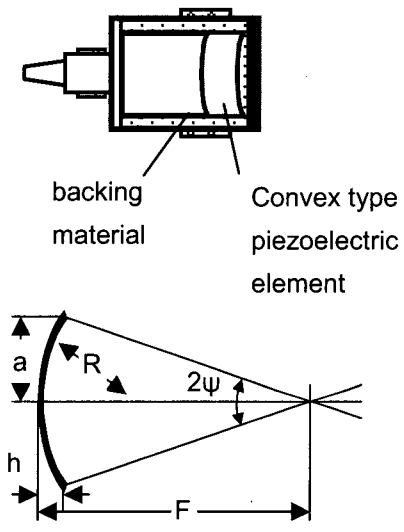
트랜스듀서로부터 발생되는 파는 전방향으로 발산하게 된다. 그러나 실험에 사용되는 트랜스듀서는 그림 5와 같이 중심축으로 지향하여 발산하게 되는 형태이다. 이런 파는 반경방향으로 벗어날수록 에너지가 소산되어 사라지게 된다. 이와 같이 소산되는 구간을 로브(lobe)라고 한다. 파가 어느 정도의 각도로 발산하는 지를 나타내는 것이 지향성(directivity)이다. 원거리장에서 발산각은 다음 식 (3)과 같다(Zagzebski 1996).

$$\sin\theta = \frac{1.2\lambda}{d} = \frac{1.2V}{fd} \tag{3}$$

여기서 θ는 발산각, λ는 파장, d는 트랜스듀서의 직경을 의미한다. 발산각은 매질의 속도가 크거나 트랜스듀서의 주파수가 작거나, 직경이 작은 경우 커지게 된다.

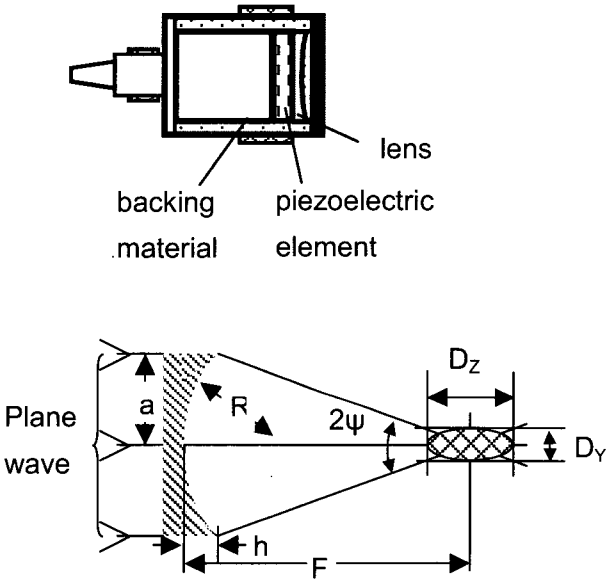
3.2 지향성(Directivity)의 향상

트랜스듀서의 지향성을 향상 시키기 위해 기초 광학의 원리를 적용할 수 있다. 이때 고려되는 초점 구간이 파장보다 매우 크지 않는 경우에는 광학 이론에서 벗어나게 된다. 즉, 그림 6(a)와 같이 트랜스듀서의 압전 소자를 곡면으로 만들어 빔을 집중시키는 방법과 그림 6(b)와 같이 트랜스듀서의 압전 소자 앞에 렌즈를 부착하여 지향성을 향상시키는 방법이 있다. 곡면의 압전 소자를 사용할 경우 그림 6(a)와 같이 초점 거리 F는 한 점으로 표시될 수 있지만, 렌즈를 부착한 경우에는 그림 6(b)와 같이 초점 거리가 한 점으로 나타나지 않고 초점 구간으로 표시된다. 이런 렌즈로는 물보다 초음파 속도가 빠른 가공된 형태의 고체를 사용하는 것이 일반적이다. 렌즈를 사용한 경우, 트랜스듀서의 중심축으로부터



a : 트랜스듀서의 반경
R : 압전소자의 굴곡 반경
F : 초점 거리

(a) 굴곡의 압전 소자를 사용한 초점 방식 및 초점 거리



(b) 렌즈를 사용한 초점 방식 및 초점 영역

그림 6. 트랜스듀서의 초점 방식과 초점 거리(Krautkramer and Krautkramer 1990)

수렴 영역이 만나는 중심점까지의 거리를 초점 거리(F)라고 한다. a를 렌즈의 반지름, R이 렌즈의 곡률 반경이고, 2ψ가 초점각이라고 할 때, 렌즈의 구면으로부터 외각의 높이 h가 0.1R 이하일 경우에, 초점 거리 F는 다음과 같다(Wells 1977).

$$F = R/(1-1/n) \tag{4}$$

여기서 $n=V_1/V_2$이며 V_1은 렌즈에서의 초음파 속도이고 V_2는 전달 매개체의 초음파 속도이다.

그림 7은 트랜스듀서의 지향성을 측정한 실험 개요도이다. 지향성 실험은 물속에서 발신기와 수신기 사이의 축방향 거리를 고정시킨 후 한쪽 트랜스듀서를 수평방향으로 이동시키면서 진폭의 변화를 측정하는 실험이다. 초점방식의 트랜스듀서(A3441)와 비초점 방식의 트랜스듀서(V318)를 적용하여 그림 8과 같은 결과를 얻었다. 그림 8(a)와 같이 초점 방식의 트랜스듀서 A3441이 그림 8(b)와 같이 비초점 방식의 트랜스듀서 V318 빔보다 발산되지 않음을 알 수 있다. 즉, 초점방식이 비초점 방식보다 지향성이 큼을 보여준다. 한편 비초점 방식의 트랜스듀서 V318의 지향성을 향상시키기 위해 트랜스듀서 앞에 곡면의 초점 렌즈(matching lens)를 부착시킬 수 있으며 그 결과는 그림 8(c)와 같다. 그림 8(c)와 같이 초점 렌즈를 부착할 경우 트랜스듀서의 지향성이 월등히 향상됨을 보여준다.

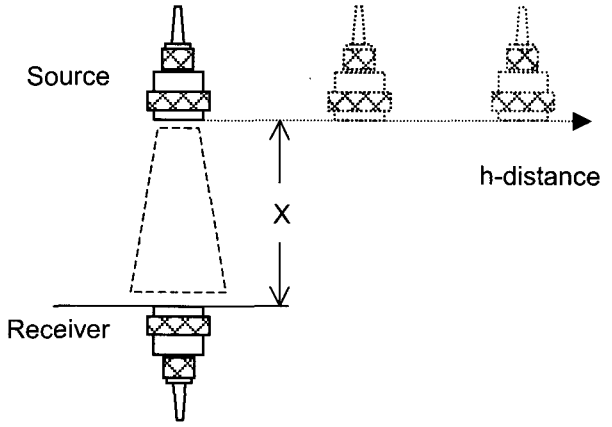
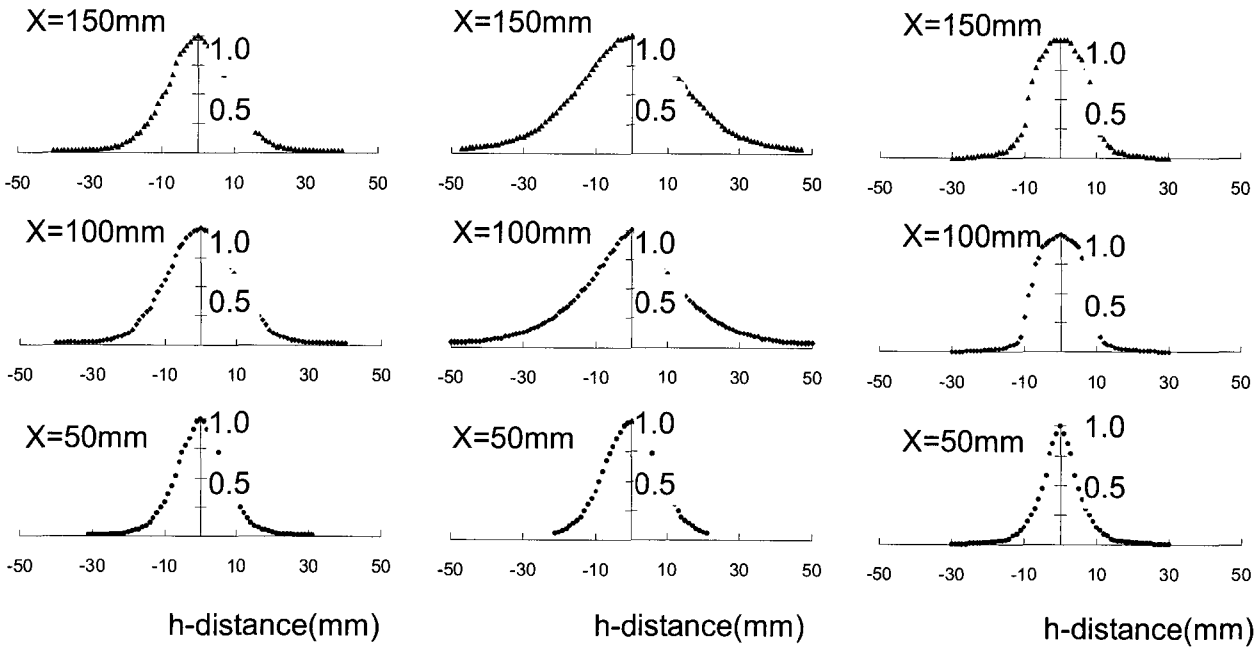


그림 7. 지향성 실험 개요도(Lee and Santamarina 2004)

4. 탐측 시 고려사항

탐측 시스템을 이용하여 불연속면을 탐측하기 위해서는 불충분한 샘플링(sampling)으로 인한 영상신호의 결함인 공간적 및 시간적 에일리아싱(aliasing)을 피하여야 한다. 에일리아싱은 샘플링 주파수와 샘플링 간격을 조절하면 쉽게 해결될 수 있다. 그러나 트랜스듀서에서 트랜스듀서로 직접 전달되는 기계적 신호와 트랜스듀서와 측정하려는 시험체 사이에 존재하는 커플링층(coupling layer)의 선택은 실험을 통하여 해결하여야 한다.



(a) 초점 방식의 트랜스듀서(A3441) (b) 비초점 방식의 트랜스듀서(V318) (c) 렌즈를 부착한 트랜스듀서(V318)

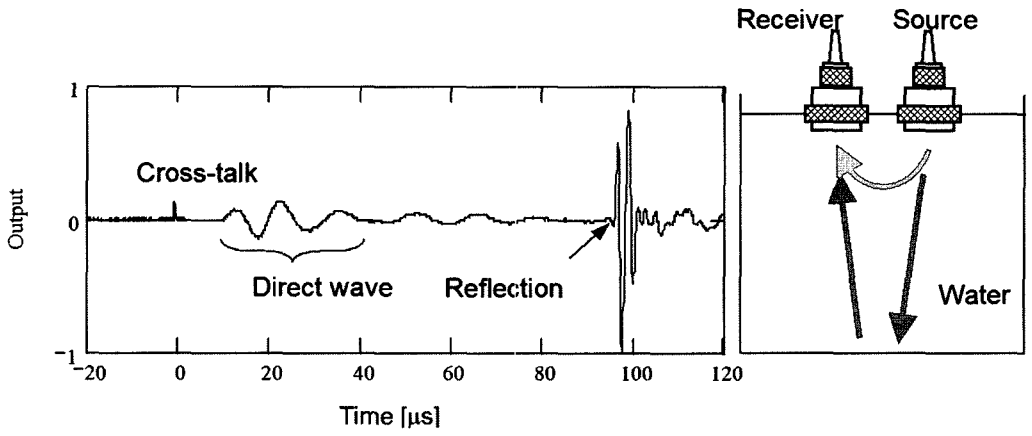
그림 8. 트랜스듀서 지향성 실험 결과

4.1 직접 전달파(Directly transmitted waves)

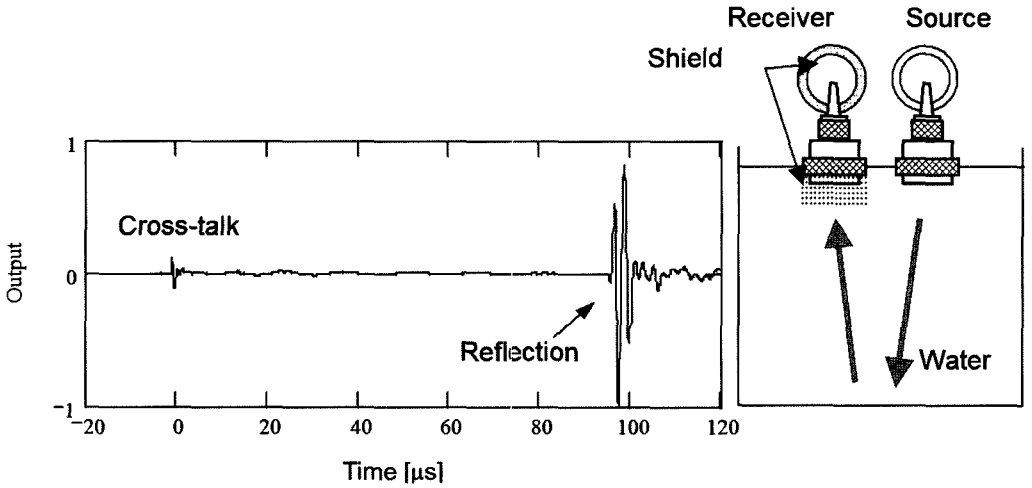
발신용 트랜스듀서에서 수신용 트랜스듀서로 직접 전달되는 그림 9(a)와 같은 기계적 신호는 측정신호의 노이즈(noise)를 증가시키며 그 크기 또한 커서 반사파의 크기를 상대적으로 작아지게 하여 신호처리를 어렵게 한다. 직접 전달되는 신호는 신호 중첩(stacking)을 통해서도 제거되지 않는다. 직접 전달파가 매질을 통한 신호이기 때문에 기계적 장치를 설치하여 제거하려 하였다. 그림 9(b)와 같이 발신용 트랜스듀서나 수신용 트랜스듀서 중 한 개에 대하여 방어벽(barrier or shield)를 설치하였다. 방어벽은 여러 층으로 구성된 알류미늄 호일을 사용하여 각 층마다 반사와 전달을 통하여 파의 전달을 차단시켜 그림 9(b)와 같이 매우 선명한 신호를 신호처리과정 없이 얻을 수 있었다.

4.2 커플링층(Coupling layer)

트랜스듀서와 측정하려는 시험체 사이에 중간층을 커플링층(coupling layer)이라고 한다. 트랜스듀서로부터 시험체로 파의 에너지 전달을 높이기 위하여 커플링층으로 사용될 매질을 결정하여야 한다. 커플링층의 매질로써 진공그리스(vacuum grease)와 물을 실험하였다. 트랜스듀서와 대상 매체 사이에 진공그리스를 적용하여 밀착이 완전히 이뤄지지 않은 경우에는 그림 10(a)와 같이 반사파의 신호가 매우 미약함을 알 수 있다. 그러나 대상 매질과 트랜스듀서를 완전히 밀착시킨 경우, 그림 10(b)와 같이 반사파의 신호가 상당히 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 진공그리스를 이용해 트랜스듀서를 밀착시킨 경우 시험대상체 표면으로 직접 전달파(directly transmitted wave)가 발생함에 주의 하여야 한다. 한편 커플링층으로 물을 사용하고 방어벽을 설치한

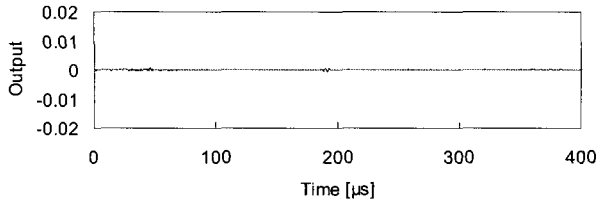


(a) 쉴드가 없는 경우

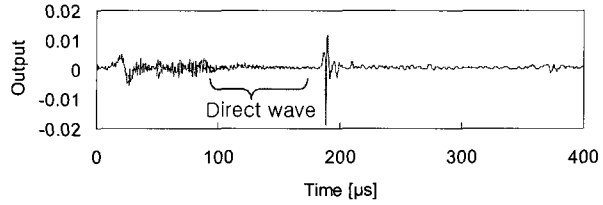


(b) 쉴드가 있는 경우

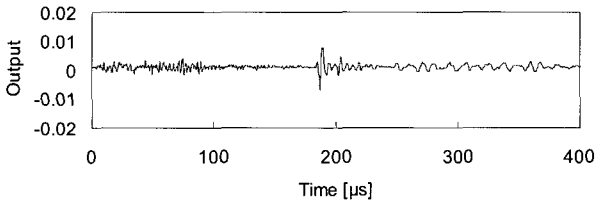
그림 9. 직접 전달파를 제거 방법(Lee and Santamarina 2004)



(a) 진공 그리스 - 밀착 상태가 나쁜 경우



(b) 진공 그리스 - 밀착 상태가 좋은 경우



(c) 물

그림 10. 트랜스듀서와 시료의 커플링층에 따른 반사파 특성

경우 그림 10(c)와 같은 신호가 얻어졌다. 물을 사용한 경우 잘 밀착시킨 진공그리스 보다 민감도가 떨어지지만, 트랜스듀서를 수평이동 또는 회전시키면서 반사파를 탐측해야 하는 경우에는 이동시에도 그 접촉성을 유지할 수 있는 물이 효율적인 것으로 나타났다.

트랜스듀서의 매칭레이어와 시험대상체의 중간 정도의 임피던스(impedance)를 갖는 재료를 커플링층으로 사용하는 것이 에너지 전달에는 가장 효율적일 수 있을 것으로 판단되어 물과 분말가루를 혼합한 복합재료를 사용하여 반사파를 측정하였다. 그러나 이와 같은 복합재료를 커플링층으로 사용한 경우, 댐핑 효과가 크게 증가하여 반사파의 민감도가 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 트랜스듀서와 대상 시험체 사이의 커플링층으로 물을 사용하였다.

5. 신호 처리 및 영상화

탐측된 신호는 잡음 신호를 포함하고 있으며, 불필요한 대역의 신호가 존재한다. 또한 거리에 따라 감쇠 현상에 의해 신호의 진폭이 감쇠되게 된다. 따라서 탐측된 신호를 이용해 불연속 지반에서 불연속 구간의 위치 및 형상을 알아내고 보기 쉽게 변환하기 위해 신호 처리가 필요하다. 신호 처리 과정은 크게 잡음을 줄이는 과정, 신호를 증폭시켜주는 과정, 신호를 변환하는 과정 그리고 영상화 하는 과정으로 나뉘게 된다.

5.1 잡음 조절

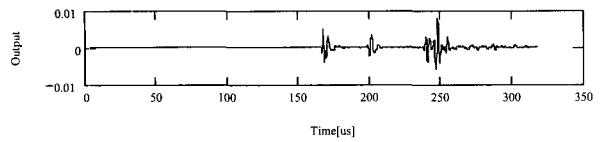
신호 잡음을 줄이기 위해 가장 중요한 부분은 탐측 시에 발생 할 수 있는 백색 잡음(white noise)을 최대한 줄여서 측정해야 한다는 것이다. 백색 잡음을 가장 효과적으로 제거할 수 있는 방법은 신호 중첩(stacking)으로서 본 연구에서는 1개의 signal trace를 얻기 위하여 1024개의 신호를 중첩하였다. 이 과정을 통해 그림 11(a)와 같은 신호를 얻을 수 있다.

5.2 신호 증폭(Amplification) 및 보상(Compensation)

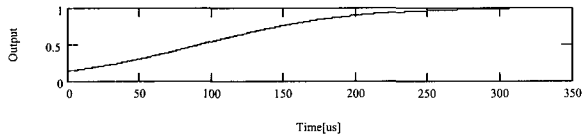
초음파 탐측을 통해 불연속면으로부터 되돌아온 신호는 수신용 트랜스듀서로 측정된다. 그러나 감쇠 현상(attenuation)으로 인해 측정된 신호의 민감도는 매우 작은 상태이다. 이 신호는 영상화하기에 미약하므로 되돌아온 신호를 증폭시켜주고 보상해주는 과정이 필요하다. 신호 보상은 탐측된 반사파를 시간 혹은 거리에 따라 신호 증폭의 크기를 증가시키는 방법으로써 본 논문에서는 시간에 따른 보상 즉, Time Gain Compensation (TGC) 방법을 적용하였다 (Zagzebski 1996). 이 보상 방법은 시간에 따른 일정 함수(gain curve)를 곱해 진폭을 증가시켜주는 방법으로, 그림 11(b)와 같은 logsig함수를 사용하였다. 그림 11(a)와 같은 원신호를 그림 11(b)의 logsig함수와 곱하여 그림 11(c)와 같이 보상이 이루어진 신호를 얻을 수 있다.

5.3 신호 변환(Demodulation and Rejection)

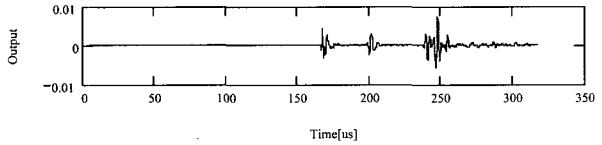
보상이 이루어진 신호의 영상화와 자료 분석을 용이하게 하기 위해서 신호를 변환하는 과정이 필요하다. 이런 신호 변환의 과정은 신호정류(retification), 이동평균(moving average), threshold를 통한 신호 제거(rejection)가 포함된다. 첫째, 신호 정류는 신호의 크기만을 얻기 위해 신호에 절대값을 취해주는 방법으로 그림 11(d)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 둘째, 이동평균에서는 [1/20, 2/20, 4/20, 6/20, 4/20, 2/20, 1/20]의 kernel을 적용하였



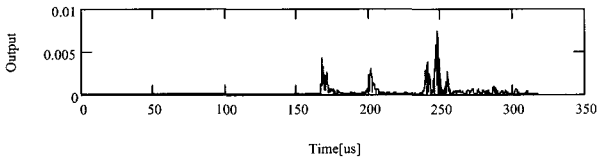
(a) 원 신호



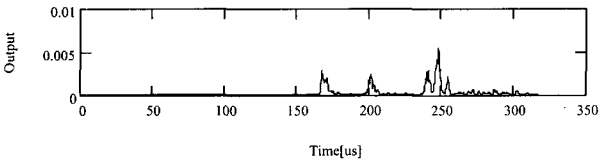
(b) Logsig 함수



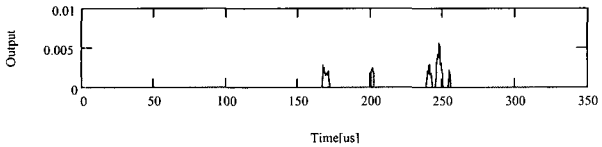
(c) 신호 보상



(d) 신호 정류



(e) 이동 평균



(f) 신호 제거

그림 11. 신호 처리 과정

으며(Santamarina and Fratta 1998) 그림 11(e)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 마지막으로 신호 제거는 일정 미만의 신호는 탐측된 신호에서 중요한 정보는 포함하지 않는다고 판단되어 제거해주는 방법으로 본 연구에서는 최대 진폭에서 10%~20% 미만의 신호는 제거하여 그림 11(f)와 결과를 얻었다.

5.4 영상화

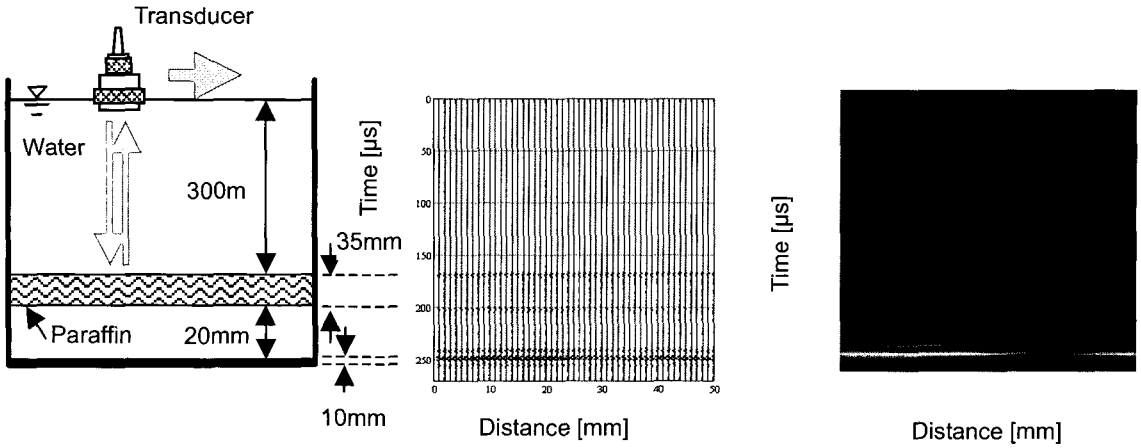
신호처리과정을 통한 신호를 영상화(imaging)에 적용하며 영상화 방법은 두 가지 방법을 포함한다(Zagzebski 1996). 첫째, Amplitude mode(A-mode)로써 탐측된 반사파를 신호의 진폭(amplitude)에 따라 화면에 표시하는 방법으로 거리에 따라 진폭의 크기를 보여주는 방법이다. 이 방법은 반사파의 위상 변화와 신호의 구조와 관계를 연구하기 쉬운 방법이다. 하지만 이 방법은 신호를 하나의 선상에 두게 되어 전체의 신호를 보기에는 적합하지 않으며 신호의 처리 이전 보조적인 방법으로 사용되는 방법이다. 둘째, Brightness mode(B-mode)로써, 신호의 강도를 흑백의 밝기로 바꾸어주어 점으로 표현하는 방법으로 신호 강도가 큰 부분은 백색으로 작은 부분은 흑색으로 표현하는 방법이다.

6. 실내 모형 실험

초음파를 이용한 불연속지반의 탐측을 위하여 실내 실험을 통하여 적용성을 평가하였다. 이들 실험은, 1) 수중 파라핀 불연속면 탐측을 위한 수평이동 실험; 2) 석고 블럭의 절리와 공동과 같은 불연속면 탐측을 위한 회전이동 실험을 포함한다. 적용성 평가 실험에서는 초점방식이며 주파수가 500kH인 A3441 트랜스듀서를 이용하였다.

6.1 수중 파라핀 불연속면 탐측을 위한 수평이동 실험

물속에 두께 35mm의 고체 파라핀을 설치한 후 그림 12(a)와 같이 한 쌍의 트랜스듀서를 수평 이동하면서 반사파를 측정하였다. 탐측간격은 공간적인 에일리어싱을 피하기 위하여 1mm(파장 λ=3mm)로 설정하였다. 탐측결과는 신호처리 과정을 통하여 그림 12(b)와 같이 A-mode 또는 그림 12(c)와 같이 B-mode로 나타내었다. 사용된 트랜스듀서의 지향성이 높은 관계로 A-mode 및 B-mode 모두 파라핀의 실제 위치를 매우 잘 나타내고 있다. 또한 10mm 두께의 수조 바닥도 영상으로 잘 표현되고 있음을 알 수 있다. 그림 12와 같이 지향성이 높은 트랜스듀서를 사용하였기 때문에 지구물리에서 일반적으로 적용하고 있는 영상화를 위한 migration(자세한 내용은 Yilmaz 1988; Sheriff and Geldard 1995)과 같은 후처리 과정 없이도 상당히 선명한 이미지를 얻을 수 있다.



(a) 실험 모식도 (b) A-mode (c) B-mode

그림 12. 수중 파라핀 탐측 수평이동 실험

6.2 석고 블럭의 불연속면 탐측을 위한 회전이동 실험

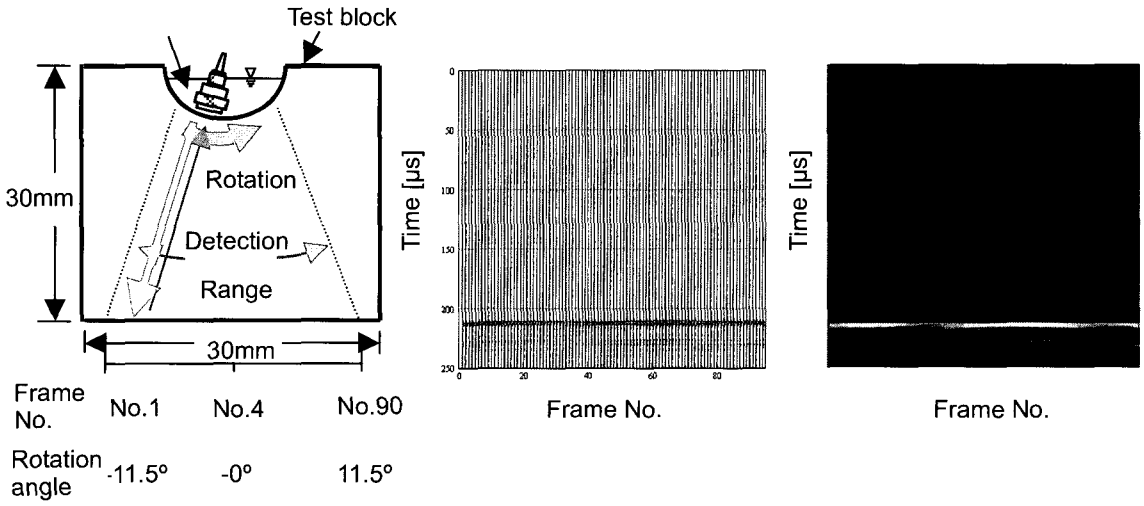
암반 내의 불연속면을 모델링하기 위해 300mm×300 mm×150mm 크기의 석고시편(삼우화학 M30-3, 초음파 속도: 2650m/s)을 제작하였다. 석고의 상부는 회전 이동 장치가 회전 가능하도록 원형으로 제작하였으며 물을 커플링층으로 사용하였기 때문에, 물에 의해 석고의 재질의 변화가 없도록 상부에 방수 페인트를 이용하여 2~3mm 두께로 방수 처리하였다. 석고시료의 바닥 면에서 탐측간격이 1.134mm 정도가 되도록 시료상부에서 트랜스듀서를 회전시켰다. 실험에는 1) 건전한 석고 블럭, 2) 경사 균열이 존재하는 석고 블럭, 3) 공동이 존재하는 석고 블럭과 같이 3종류의 시편이 이용되었다.

(1) 건전한 석고 블럭

건전한 석고 블럭에 대한 회전이동 실험결과를 그림 13에 실험 모식도와 함께 나타내었다. 약 200μs 구간에 반사파가 크게 발생하며 석고의 초음파 속도를 고려할 경우, 파는 깊이 약 260mm에서 반사되었으며, 이 값은 시험체의 표면부터 바닥면까지의 길이와 일치한다. 즉, 바닥면이 석고와 공기의 경계면으로 임피던스 값에서 큰 차이가 발생하여 파가 반사되었음을 보여준다.

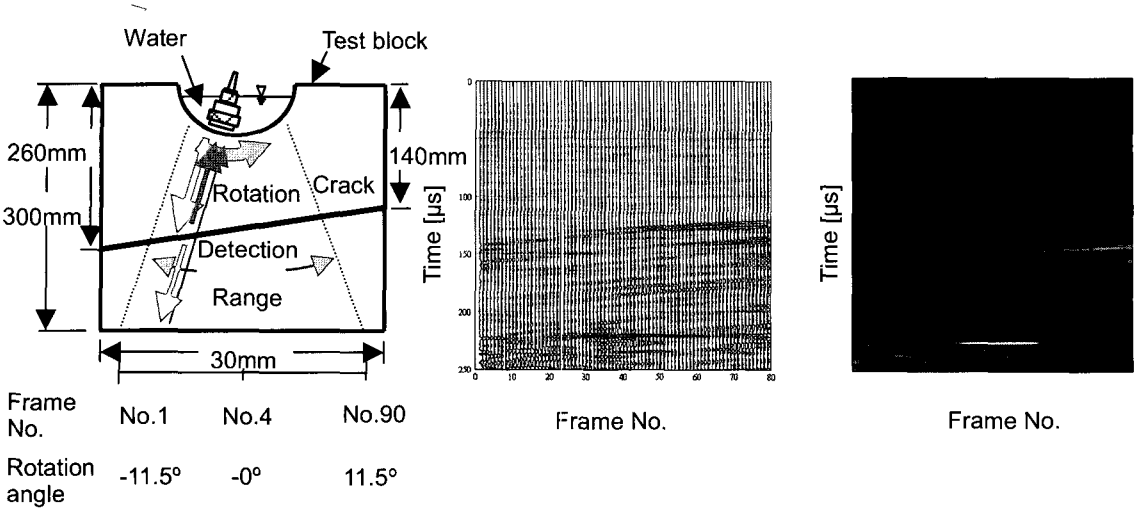
(2) 경사 균열이 존재하는 석고 블럭

석고 시험체는 경사 균열 그림 14(a)와 같은 1개의 경사균열과 바닥면으로 두 개의 불연속면이 존재한다. 경사균열 상하부의 석고 시험체는 진공그리스를 사용하여 밀착시켜 경사균열부에서 에너지 전달을 높이려고



(a) 실험 모식도 (b) A-mode (c) B-mode

그림 13. 건전한 석고 블럭



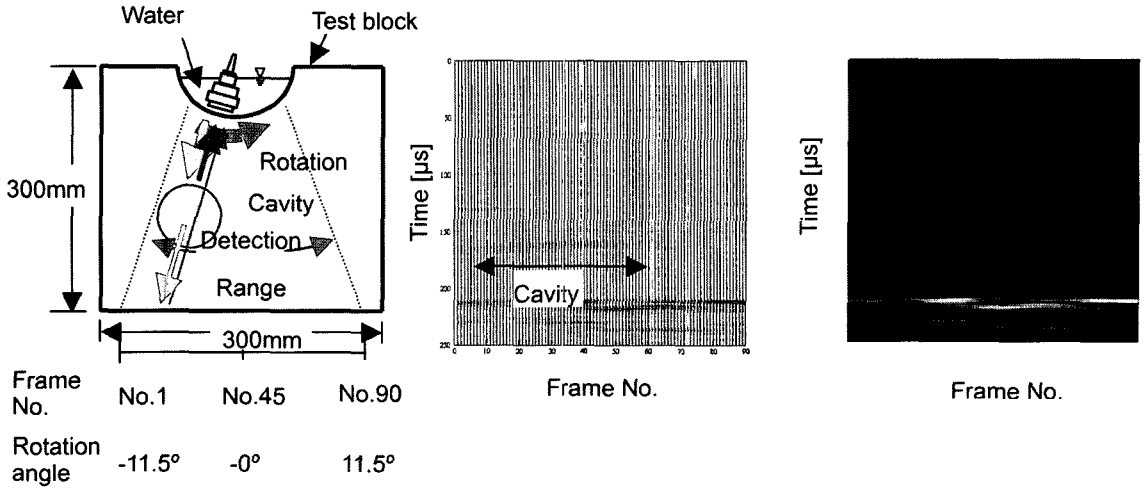
(a) 실험 모식도 (b) A-mode (c) B-mode

그림 14. 경사 균열이 존재하는 석고 블럭

하였다. 탐측결과는 그림 14(b) 및 14(c)와 같다. 반사파는 약 100μs~110μs에서 반사파가 되돌아 오는 것을 알 수 있으며, 이는 경사진 균열로부터 발생한 것으로써 시험체에서 실제균열 위치인 130~140mm와 잘 일치한다. 또한 약 200μs에서 또 다른 반사파가 측정되었으며, 초음파 속도로부터 역산된 거리는 270mm로써 실제 모형 시험체 바닥면을 나타낸다. A-mode와 B-mode로 표시된 영상에서 균열의 오른쪽 부분에서 더 선명하고 큰 반사파가 잡히는 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는 균열의 오른쪽에서 입사파가 절리면과 수직에 가까워지기 때문에 모드변환(mode conversion)이 적어 반사파의 진폭이 증가하기 때문이다.

(3) 공동이 존재하는 석고 블럭

건전한 석고 블럭의 좌측 하단부에 그림 15(a)와 같이 직경 30mm의 공동을 제작한 후 공동의 탐측을 실시하였다. 탐측결과는 그림 15(b) 및 15(c)와 같다. 강한 반사파가 프레임 번호 10번~50번 사이에서만 존재하며 초음파 속도를 이용한 환산한 거리는 약 260mm로 석고 시험체의 표면으로부터 공동 부분까지의 깊이와 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 석고시료 바닥면도 뚜렷하게 표현된다. 반사파의 파형을 분석해 볼 경우, 공동 부분의 반사파는 30프레임 근처에서 좌우 23프레임 즉 좌우 11.5도 정도로 약 43mm의 크기의 공동이 있는 것으로 나타난다. 이와 같은 이유는 트랜스듀서의 직경 19mm 이며 또한 원거리장에서 빔의 발산각이 존재하기 때문



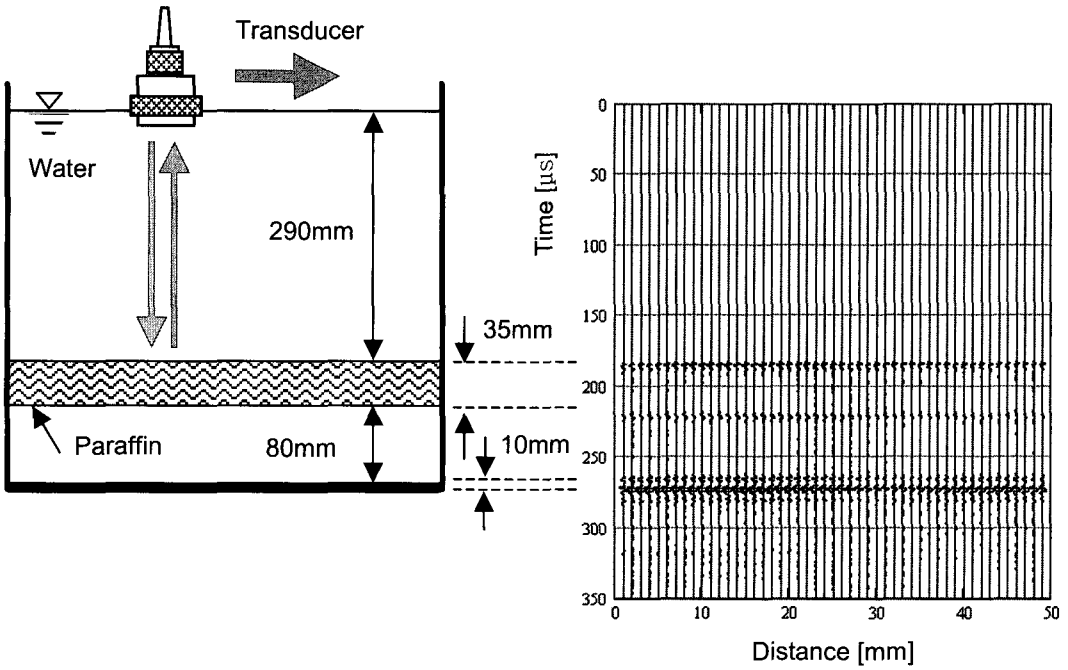
(a) 실험 모식도 (b) A-mode (c) B-mode

그림 15. 공동이 존재하는 석고 블럭

에 실제공동보다 더 공동이 산정된다. 한편 불연속면의 탐측과 달리 반사파의 형태가 연속적이지 않고 끊어지게 나타난다. 따라서 불연속면의 반사파와 공동의 반사파 형태는 차이가 있음을 알 수 있다.

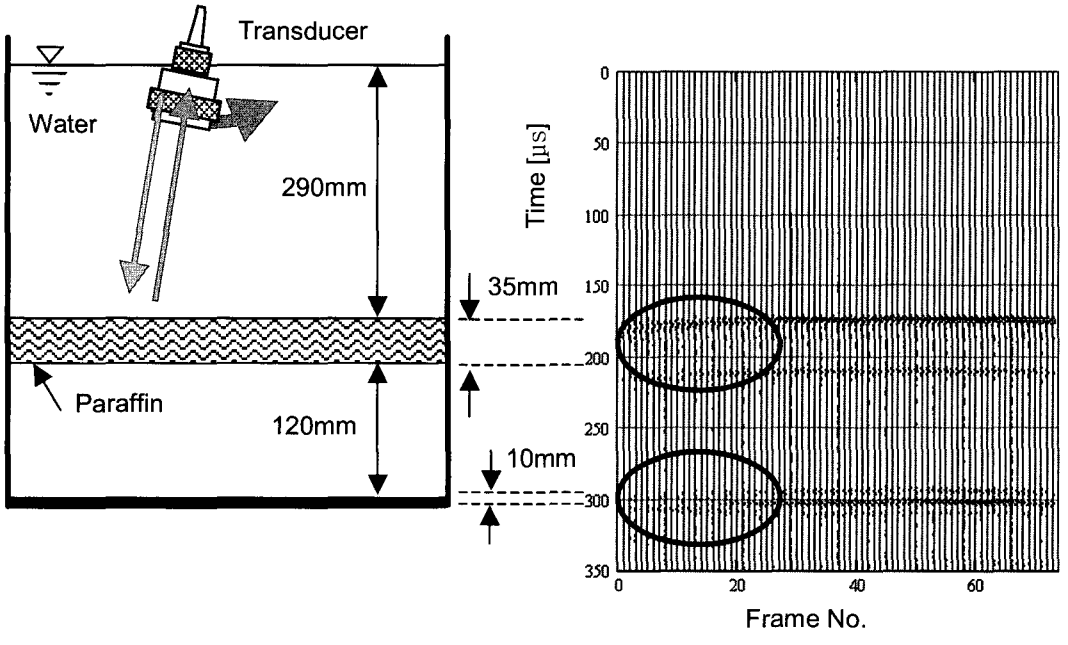
7. 토 의

회전 이동 장치를 이용하여 불연속면을 탐측한 결과는 정확한 위치 정보를 포함하지는 않는다. 영상화를 통해 보여준 화면은 사각형의 주시 곡선이나, 실제의 탐측은 회전 이동을 하였으므로 위쪽이 휘어진 부채꼴 모양의 사각형이 나와야 한다. 즉, 수평 균열을 탐측한 경우에는 위쪽으로 휘어진 반사파의 배열이 있어야 하지만 실제로는 수평 균열이 탐측 된다. 그림 16은 수중에서 고체 파라핀 불연속면에 대한 수평이동과 회전이동 실험결과를 보여준다. 그림 16(a)과 같이 수평이동으로 탐



(a) 수평이동실험 모식도

(b) 수평이동실험 결과



(c) 회전실험 모식도

(d) 회전실험 결과

그림 16. 수평 실험과 회전 실험의 비교

측하였을 경우 그림 16(b)와 같이 파라핀의 윗부분과 파라핀의 아래 부분 그리고 바닥면의 윗부분과 아래 부분에서 반사된 반사파가 모두 탐측되는 것을 알 수 있다. 동일한 시료에 대하여 그림 16(c)와 같은 회전이동 장치를 이용하여 실험한 경우, 그림 16(d)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 트랜스듀서로부터 발산된 파의 파라핀에 입사되는 각도가 frame No 20이하인 경우, 반사파의 도달시간이 길어지고 진폭이 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는 frame No 20이하인 경우에서 초음파의 이동거리가 약간 길어지고 입사각이 수직에서 벗어나므로 경계면에서 모드변환(mode conversion)이 발생하기 때문이다.

수평이동과 회전이동 탐측의 결과가 유사한 것은 트랜스듀서의 크기(19mm), 지향성 그리고 Fresnell's ellipse에 기인한다. 즉, 트랜스듀서의 빔은 레이져 포인터의 빔보다는 지향성이 떨어지므로, 수직면이 아닌 경사면에서도 반사파가 측정될 수 있으나 트랜스듀서의 축방향과 수직을 이루는 불연속면에서 가장 큰 진폭의 반사파가 측정된다. 즉, 그림 14에서와 같이 트랜스듀서가 반시계방향으로 회전하면서 트랜스듀서의 측방향이 불연속면과 점점 수직을 이루게 되므로 보다 큰 진폭의 파가 측정되어, A-mode 와 B-mode로 표시된 영상에서 균열의 오른쪽 부분에서 더 선명하고 큰 반사파가 잡히는 것을 알 수 있다. 즉, Snell's law(Fishbane et al. 1996)에 의해 경사진 불연속면에서는 모드변환이 발생하여 반사파의 진폭이 감소하게 된다. 그리고 트랜스듀서의 크기와 Fresnell's ellipse의 영향으로 빔의 크기차가 존재하므로, 경사진 부분에서는 빔의 중심축에서 빔 폭의 거리만큼 떨어진 부분에서 먼저 반사되어 오게 되며, Fresnell's ellipse 크기만큼의 이동거리에서 차이가 나지 않는 경우에는 수평이동과 회전 이동의 탐측 결과가 유사하게 나오게 된다.

8. 결 론

초음파를 이용한 불연속 지반 탐측을 위해 고해상도를 가지는 초음파 탐측 시스템을 개발하여 실내실험에 적용하였다. 본 논문에서는 초음파 탐측 시에 높은 해상도를 가질 수 있는 여러 요소를 분석하고 높은 해상도를 얻는 방법을 고찰하였다. 개발과정과 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 반사 초음파의 해상도를 증가시키기 위하여 지향성이 높은 초점방식의 트랜스듀서를 사용할 수 있다. 또한 지향성이 낮은 비초점방식의 트랜스듀서의 경우, 트랜스듀서 앞에 오목렌즈 형태의 매칭렌즈를 설치하여 지향성과 영상의 해상도를 높일 수 있었다.

(2) 발신용 트랜스듀서에서 수신용 트랜스듀서로 직접 전달되는 기계적 신호는 트랜스듀서 사이에 방어벽(barrier or shield)을 설치하여 효과적으로 제거할 수 있었다.

(3) 트랜스듀서와 탐측 매질 사이에 커플링층으로 진공그리스가 가장 큰 에너지를 전달시키는 것으로 나타났다. 그러나 수평이동이나 회전을 통하여 영상을 얻는 경우에는 커플링층으로 물을 사용하는 것이 더 효과적인 것으로 나타났다.

(4) 수중에서 고체 파라핀 불연속면에 대한 수평이동 실험한 결과, 잡음조절, 신호증폭, 신호보상, 이동평균, 미소신호 제거 등의 신호처리 과정을 적용하여 최종적으로 A-mode와 B-mode의 영상을 통해 모두 파라핀의 실제 위치를 정확하게 표시하였다. 또한 10mm 두께의 수조 바닥도 영상으로 잘 표현될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 지향성이 높은 트랜스듀서를 사용하였기 때문에 migration과 같은 영상화 후처리 과정 없이도 상당히 선명한 이미지를 얻을 수 있었다.

(5) 석고 블럭에 대한 회전 탐사 실험을 통하여, 수평균열, 경사균열 및 공동의 위치를 산정할 수 있었다. 균열이 존재하는 경우에는 직각을 이루는 면에서 큰 진폭의 반사파가 발생하고 점점 감소하는 직선의 trace를 보이고, 공동의 경우에는 직선의 trace가 아닌 곡선 형태를 보인다.

(6) 불균질한 매질일수록 잡음이 증가하며 전달되는 에너지가 떨어지므로 이를 극복하기 위한 연구가 계속되어야 한다. 특히 실제 터널 현장과 같은 곳에서 적용하기 위해서는 더 낮은 주파수와 높은 에너지를 가진 트랜스듀서의 연구와 함께 해상도를 높일 수 있는 방법이 연구 되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 이인모, 최상순, 김시탁, 김창기, 전제성 (2002), "반사 탄성파를 이용한 터널막장 전방 파쇄대의 3차원적 예측", *터널기술*, 4(4), pp.301-317.
2. 한국지반공학회 (1997), 터널, 구미서관, 서울.

3. Aki, K. and Richards, P.G. (1980), *Quantitative Seismology - Theory and Methods*, Freeman Company, San Francisco.
4. Fishbane, P.M., Gasiorowicz, S., and Thornton, S.T. (1996), *Physics for scientists and engineers-2nd edition*. Prentice Hall International, New Jersey.
5. Gomm, T.J. and Mauseth, J.A. (1999), "State of the Technology: Ultrasonic Tomography", *Materials Evaluation*, Vol.57, No.7, pp. 737-755.
6. Hadjicostic, A.N., Hottinger, C.F., Rosen, J.J., and Wells, P.N.T. (1988), "Ultrasonic transducer materials for medical application", *Medical application of piezoelectric polymers, Gordon and Breach Science publisher*, pp.169-188.
7. Krutkramer, J. and Krautkramer, H. (1990), *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-verlag, London.
8. Lee, J.S. and Santamarina, J.C. (2004), "P-Wave Reflection Imaging", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.28, No.2, pp.197-206.
9. McIntire, P. (1991), *Nondestructive testing handbook - Ultrasonic testing*. 2nd edition, American Society of Nondestructive Testing, USA.
10. Richart, F.E., Hall, J.R. and Woods, R.D. (1970), *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, USA.
11. Santamarina, J.C. and Fratta, D. (1998), *Introduction to Discrete Signals and Inverse Problems in Civil Engineering*, ASCE Press, Virginia.
12. Santamarina, J.C., Klein, A.K. and Fam, M.A. (2001), *Soils and Waves*, John Wiley & sons Ltd., England.
13. Sheriff, R.E. and Geldard, L.P (1995), *Exploration Seismology 2nd edition*, Cambridge University press, New York.
14. Waters. K.H. (1992), *Reflection Seismology: A Tool for Energy Resource Exploration* - 3rd Edition. John Wiley & Sons, England.
15. Wells, P.N.T. (1977), *Biomedical Ultrasonics*, Academic press, London.
16. Yilmaz, O. (1988), *Seismic Data Processing*, Society of Exploration Geophysics, USA.
17. Zagzebski, J.A. (1996), *Essentials of Ultrasound Physics*, Mosby, Inc., Missouri.

(접수일자 2006. 8. 24, 심사완료일 2007. 1. 4)