

## 시추공자력계를 이용한 기초파일 근입심도 추정

Borehole magnetics for the estimation of unknown foundation pile depth

조철현\*

정현기\*\*

조광호\*\*\*

Jo, Churl-Hyun Chung, Hyun-Key Cho, Kwang-Ho

### Abstract

There is an increasing need for the estimation of foundation piles whose depths are unknown. Especially in repair and reinforcement works or in safety inspection and assessment to the big structures whose foundations are piles, the accurate information about the depth of foundation piles is one of the most important factors.

A borehole magnetic tool has been developed and tested to meet this object. The fundamental base is that there usually exist many re-bars inside the foundation structure such as piles, and these re-bars are ferromagnetic materials which cause strong induced magnetic field comparable to the earth magnetic field. It utilizes flux-gate type magnetometer which measures 3-components of the magnetic field.

Taking vertical derivatives of vertical component of the measured magnetic field, we can expect the error limit of estimating the depth of the pile end less than 20 cm in favorable condition. The maximum measurable distance is about 3 m to the pile from the borehole. The field data show that borehole magnetics is one of the most accurate, fast, and reliable methods for this object so far, as long as there is no magnetic materials such as deep located steel pipe or power cables close to the foundation piles.

**Key words :** Borehole Magnetics, Foundation Pile, Depth of the Pile End

\* 정회원, 지하정보기술(주) 대표이사, 공학박사

\*\* 한국자원연구소 선임연구원, 공학박사

\*\*\* 지하정보기술(주) 대리, 공학석사

● 본 논문에 대한 토의를 1999년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 1999년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 언

많은 경우 교량이나 대형 구조물의 기초는 파일로 이루어져 있다. 그러나 여러 사정에 의해 시공도서를 입수할 수 없는 경우가 있다. 이렇듯 기초 파일의 깊이를 파악해내는 과제는 국내는 물론 전세계적으로 널리 대두되고 있는 문제이다. 특히 우리나라에서는 구조물의 안전점검, 교량의 성능개선 등의 과정에서 이들에 대한 정확한 정보를 알아내야 하는 필요성이 요구될 때가 있다. 지금까지는 파일의 깊이를 알아내는 효과적인 방법이 없어 파일의 깊이는 대략적인 가정으로 의존하고 있는 실정이며, 특수한 경우에는 주변 지반의 개착으로 해결하는 경우도 있었다.

이러한 기초 파일 깊이 파악을 위한 지금까지의 방법은 탄성파법(seismic method)과 자기경도법, 시추공레이디법(borehole radar method)이 있다. 종래의 기초파일 심도 파악을 위한 탄성파탐사는 평행탄성파법(parallel seismics)이 가장 효과적이며 국내에서도 일부 적용된 바 있다. 이 방법은 기초파일을 구성하고 있는 콘크리트와 지반의 탄성파 속도의 차이를 이용한 방법이다. 그러나 평행탄성파법의 적용은 파일에의 확실한 탄성파 에너지 전파가 보장되어야 하는데 파일 상부의 기초 슬라브 혹은 빔의 형태에 따라 이러한 조건이 항상 성립되지 않으며, 더우기 파일과 탐사 시추공파의 거리가 1.5 m 이상이 되면 적용이 어렵다는 평행탄성파탐사기기 개발회사의 보고<sup>(1)</sup>가 있다. 일본에서 사용되고 있는 것으로 보고된 자기경도법<sup>(2)</sup>은 지자장에 의한 파일내 철근의 유도 자장을 일정한 속도로 움직이는 수직 코일로

측정하여 파일의 선단을 추정해내는 방법이다. 이 방법은 센서를 일정한 속도로 이동시켜야만 정확한 해석을 기할 수 있다는 단점이 있다. 시추공례이다는 매우 양호한 조건에서는 파일의 형상까지도 파악해낼 수 있으나, 기초파일 주변의 지질상태에 따라 탐지 능력이 변화가 급변하는 단점이 있다. 즉 사질토 지질에서는 파일에 대한 정확한 파악이 가능하지만 점토질이 증가할수록 탐지능력이 급격히 떨어진다.

본 연구에서는 기초파일의 심도를 파일내에 존재하는 철근의 반응을 측정함으로써 파악해내는 시추공자력탐사법을 개발해내었다. 철근의 자기적 반응으로부터 심도 파악이라는 점에서 기존의 자기경도법과 유사하나, 측정의 물리량이 자기경도법의 경우 자기의 시간적 변화인데 반해 자력탐사법은 자장 자체이기 때문에 측정의 편의성과 자료의 정확도 측면에서 큰 질적 우수성을 보이고 있다.

## 2. 파일근입심도의 추정

### 2.1 시추공자력탐사의 원리

모든 물질은 지자장에 대하여 반응하며, 그 자화강도는 대자율에 따라 달라진다. 즉 지자장의 강도를  $H$ 라 할 때 자화강도  $I$ 는  $I=kH$  이다. 여기서  $k$ 는 대자율(magnetic susceptibility)이다.

지반의 주요 구성 광물은 석영(quartz)이나 점토(clay)이며, 우리나라의 주된 기반암은 화강암(granite)이나 편마암(gneiss)이다. Table 1에서 알 수 있드시 철재의 주된 원료가 되는 자철석

Table 1. Magnetic susceptibility of various rocks and minerals(4)

mineral/rock	magnetic susceptibility( $\times 10^{-6}$ emu)	mineral/rock	magnetic susceptibility( $\times 10^{-6}$ emu)
limestone	25	sandstone	30
quartz	-1	granite	200
coal	2	gneiss	120
clay	20	magnetite	$5 \times 10^5$

(magnetite)의 대자율이 여타 광물이나 암석보다 수천배의 크기를 지니고 있다. 즉 기초파일내의 철근은 주변 지반이나 암반보다 그 자화강도가 최소 1,000배 이상을 나타낸다.

시추공자력탐사는 고감도의 flux-gate type 자력계를 시추공을 따라 움직이면서, 주변 물질의 자성체에 의한 유도자장이 지자장과 결합하여 형성된 이상반응을 측정한다(Fig 1). flux-gate 자력계는 자기기장에 의하여서도 자화가 가능할 정도로 투자율(magnetic permeability)이 높은 강자성체를 이용한다<sup>(5)</sup>. 즉, 강자성 물질에 코일을 감고 여기에 강한 교류를 보내서 주기적으로 변하는 자기장을 형성시켜 주면, 이 자기장은 지자기장과 합성되고, 합성된 자기장은 코일 중심에 있는 코어를 자기이력곡선(magnetic hysteresis loop)에 나타나는 포화상태에 이른다. 이 포화 상태를 측정하면 지자기장을 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 자기장의 수직성분을 깊이 방향으로 미분하면 기존의 자기경도계법에서 측정되는 물리량과 근본적으로 동일한 의미를 갖게된다. 그러나 자기경도계법에서 정확한 자료를 얻기 위해서는 시추공을 따라 자속감지센서가 일정한 속도로 내려가야 하는데 이는 현장에서 수행하기 어렵다. 또한 자속감지센서의 정밀도 및 감지능력은 본 시추공자력탐사기에서 사용한 flux-gate 자력계와 비교할 때 큰 차이가 난다. 따라서 시추공자력계는 자기경도계보다 기초파일로부터 더 멀리 떨어진 곳에서도 신뢰도 높은 측정이 가능하다.

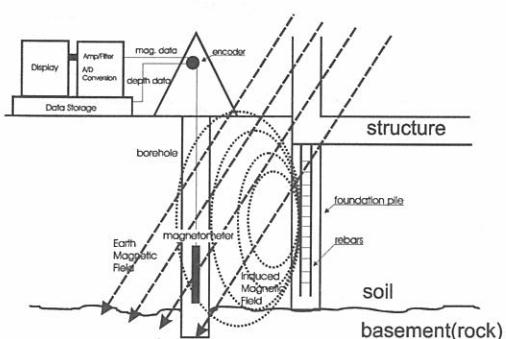


Fig. 1 시추공자력탐사의 모식도

파일근입심도 조사를 위해 개발한 3성분시추공 자기탐사시스템(KBHMAG1)의 주장비는 flux-gate 자력계이며 이로부터 측정된 3성분 자력값을 증폭시키고 심도에 따라 기록하는 전산장비로 구성되어 있다(Fig 2). 이를 일반적인 시추공 크기에 맞추어 공내에 삽입될 수 있도록 성형하고 시추공내 고압의 수압에도 견딜 수 있도록 내압장치 및 방수 처리가 되어 있다. 본 시추공자력계의 외경은 40mm 이하이므로 필요한 시추공의 직경은 내경 50mm 정도를 확보하면 된다. 시추공탐사는 시추공과 근접한 -3m 이내-거리의 이상물체에 대하여 탐지하도록 구성되어 있으므로 기초파일이나 우물통 기초를 탐지하기 위해서는 조사하고자 하는 목적물에 가능한 한 가까운 거리에 탐사공을 시추하여야 한다. 시추공에 감지기를 내려보낼 때에는 지표면에서 심도의 기준(영점)을 잡은 후, 감지기와 연결된 케이블이 시추공 직상부에 위치한 거리측정기(encoder)와 함께 움직이도록 설치한다. 감지기에서 측정된 신호는 증폭기에 의해 충분히 증폭된

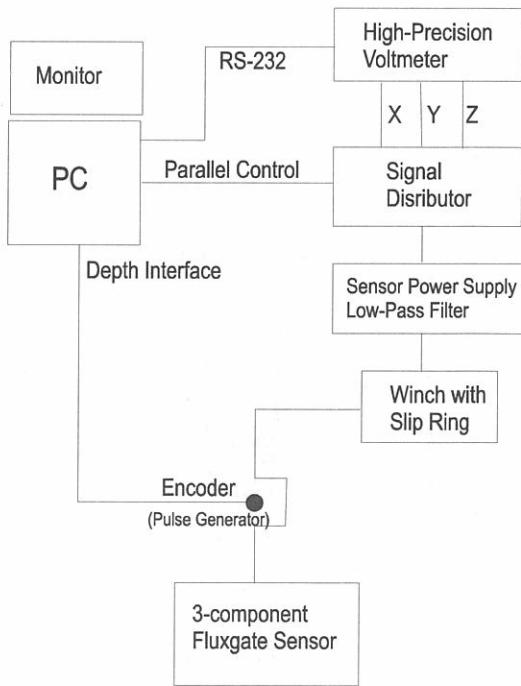


Fig. 2 3성분 시추공 자기탐사시스템 개념도

후, A/D변환기로 수치화되고, 미리 교정된 값에 따라 대응되는 물리량으로 변환되어 기록된다. 이 때 거리측정기로부터 얻어진 심도가 물리량과 함께 기록되어 공간적인 물성정보를 이루게된다. 본 장비는 한국자원연구소에서 개발하였다.

## 2.2 모형실험

본 방법의 타당성을 검증하기 위해 모형실험을 수행하였다. 고려되는 모델은 직경 13mm이고 길이가 4m인 수직철근이다. 모형실험은 한국자원연구소부지에 실험을 위한 시추공을 만들어 수행하였다. 모형실험장소는 주위에 철재가 없는 공간을 선택하여 잡음의 영향을 최소화하려 하였다.

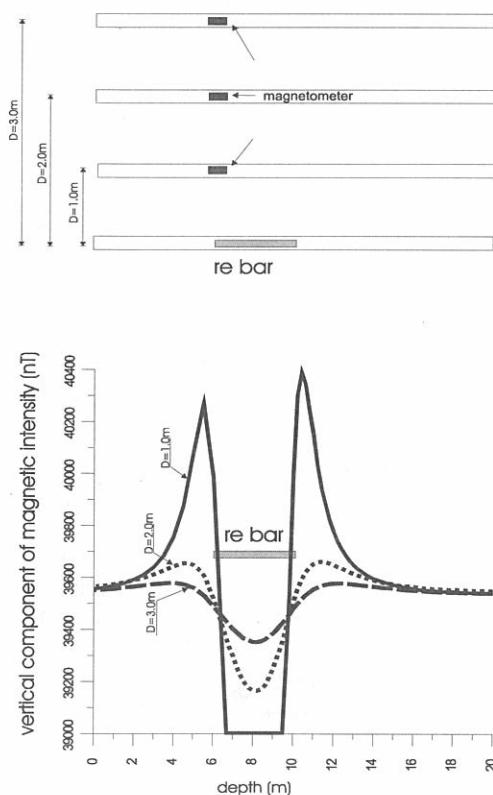


Fig. 3 철근과 자력계와의 수평거리가 1m, 2m, and 3m로 변할 경우의 모형실험 실측 곡선(자기장의 수직성분). 철근의 상단과 하단의 깊이는 각각 6m와 10m.

측정장비는 앞서 설명한 KBHMG1이다.

철근에 의한 유도 자장의 양상을 Fig. 3에 나타내었다. 자기유도 양상(수직성분)은 철근의 양끝 주변에서 양의 극값을 나타내며 중간에서는 음의 극값을 나타낸다. 여기에는 시추공과 철근과의 수평거리 증가에 따른 변화도 함께 나타내었다. 시추공과 철근의 거리가 증가함에 따라 유도 자장의 크기는 거리의 약 3승으로 감소함을 볼 수 있으며, 또한 철근 양단에서 보이는 극값은 파일에서 멀어짐을 알 수 있다. 이로부터 이러한 수직성분의 극값을 바로 파일선단의 깊이로 파악하면 1m 이상의 오차가 발생할 수 있으며, 파일이 다수 존재할 경우 시추공과 각 파일의 거리의 비가 크다면 가장 근접한 파일의 영향이 가장 크게 나타나므로 1개의 근접깊이만을 정확히 파악할 수 있음을 알 수 있다.

파일선단깊이를 추정하기 위해서 자기경도법에서는 가장 측정값이 큰 심도를 선단깊이로 추정한다. 자기경도법의 측정값은 자력값의 수직성분을 수직미분한 것과 같은 양상을 나타내므로 이를 검증하기 위해 모형실험값을 수직미분하여 살펴보았다(Fig 4). 모형은 철근이 자력계의 남쪽에

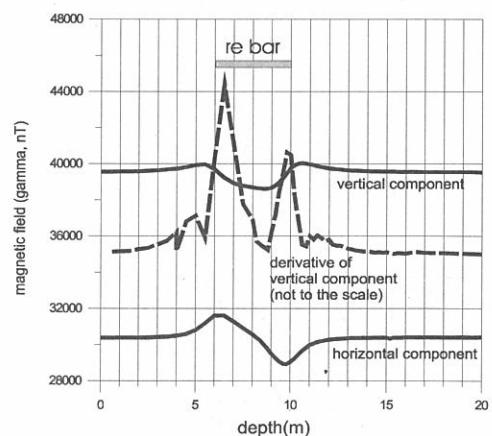


Fig. 4 철근과 자력계와의 수평거리가 1m이고 자력계가 철근의 정북에 위치할 경우 모형실험 실측곡선. 철근의 상단과 하단의 깊이는 각각 6m와 10m. 수직성분의 수직미분곡선은 다른 곡선과의 비교를 위해 5배 증폭하고 일정하게 수직 이동시킨 상태임.

위치하며 수평이격거리는 1m이다. 미분곡선은 절대값을 취하였으며 5배의 증폭과 다른 곡선과 비교를 위해 35000 만큼 더하여 도시하였다. 수직성분의 미분값이 파일의 양단(심도 6m와 10m) 근처에서 최대값을 보이며 이는 20cm 이내 오차 범위에서 정확한 결과를 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 수직미분법의 적용성을 살펴보기 위하여 철근과 시추공사이의 거리가 증가하는 경우를 살펴보았다. Fig 5에는 철근과 시추공사이의 거리가 1m, 2m, 3m인 경우 자기장의 수직성분을 수직미분하여 절대값을 취하고 거리가 2m인 경우 2배, 3m인 경우 5배의 증폭을 시킨 후, 상호 비교를 위해 서로 다른 상수값을 더하여 동시에 도시하였다. 수직미분의 최대치가 자기쌍극자의 양단(6m와 10m) 근처에서 나타남을 알 수 있다. 상단의 깊이 오차가 더 큰 것처럼 나타나는 이유는 모형실험시 철근의 하단을 중시하여 상단(6m)부근에서는 측정간격을 0.5m 간격으로, 하단(10m)부근에서는 측정간격을 0.2m로 좀 더 정밀하기 수행하였기 때문이다. 수직

성분의 미분법은 정확한 결과를 얻게 하여 주지만, 이러한 방법은 아직 명쾌한 수리물리적 설명이 부족한 상태이다.

심도 추정의 다른 하나의 방법은 시추공이 철근과 남-북방향에 가깝게 배열되어 있을 경우 자기장의 수평성분을 이용하는 방법이다. Fig 4의 수평성분을 보면 자기쌍극자의 양단에서 극값을 나타내는 것을 알 수 있다. 양호한 경우 이 방법으로도 20cm 오차 이내의 정확한 심도추정을 기대할 수 있다. 그러나 자기쌍극자는 동-서방향으로는 유도자장이 미약하므로, 파일이 수개 존재하고 있고 시추공이 파일과 파일 사이에 위치하면 수평성분이 서로 상쇄하여 해석에 오류를 범할 수 있다. 따라서 자기장의 수평성분과 수직성분을 동시에 해석하면 파일근입깊이 추정의 정확도를 높일 수 있다. 자기경도법에서는 자기장의 수평성분을 측정하지 못하므로 이러한 상호 보완 해석이 불가능하다.

### 2.3 현장적용

파일기초의 설계가 남아있는 상태에서 기초파일의 심도를 확인하는 작업을 수행하였다. 1개의 시추공에서 조사한 결과를 다음과 같이 해석하였다. 해석시 제시하는 곡선은 횡축이 조사 심도이며 종축은 자력 측정값과 수직성분의 수직미분곡선이다. 심도의 단위는 m이고 기준 심도는 측정면, 즉 G.L.이며 아랫 방향으로 심도가 양의 부호를 가지고 증가한다. 자력값의 단위는 gamma이다. 수직성분의 수직미분값은 절대값을 취한 뒤 다른 곡선과의 비교시 편의를 위해 일정한 값을 더하여 제시하였다.

Fig 6에 나타나 있드시 측정값은 심도 약 5m 까지 복잡한 양상을 나타내지만 그 이하의 심도에서는 모형실험에서 볼 수 있는 곡선형상을 보이고 있다. 이는 지상의 철골구조에 의한 자기반응의 영향이 이 심도에서 거의 소멸되어 의미 있는 값을 지니고 있지 못하기 때문으로 해석된다. 수직성분의 수직미분은 측정면에서 11.4m 심

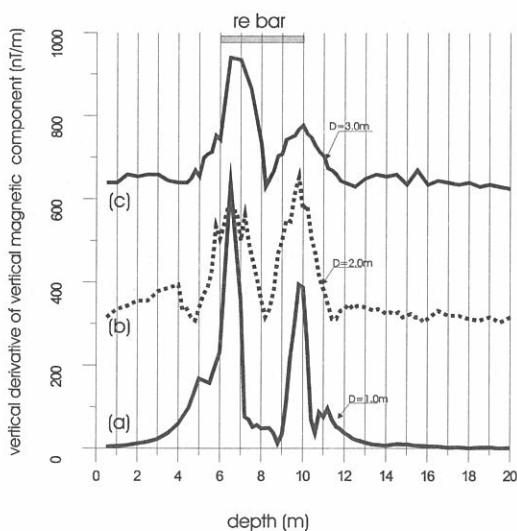


Fig. 5 철근과 자력계와의 수평거리가 (a) 1m, (b) 2m, (c) 3m로 변화할 때 자기장의 수직성분을 수직미분한 곡선. 철근의 상단과 하단의 깊이는 각각 6m와 10m이며 각각의 곡선은 상호간의 명확한 비교를 위해 서로 다른 증폭과 서로 다른 상수값을 더하였다.

도에서 최대값을 나타내며, 자기장의 수평성분은 11.6m에서 최대값을 나타낸다. 이 경우 파일이 자력계의 북쪽에 존재하므로 양의 극값(최대값)을 나타낸다. 모형실험(Fig 4)의 경우는 철근이 자력계의 남쪽에 존재하므로 음의 극값을 나타내었다.

이상을 종합하면 파일선단 깊이는 약 11.5m로 추정할 수 있다. 이 파일의 설계심도는 11.36m로 기록되어 있었다. 이상을 종합하여 볼 때, 수직미분법과 수평성분 비교법을 적용하여도 심도추정에는 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

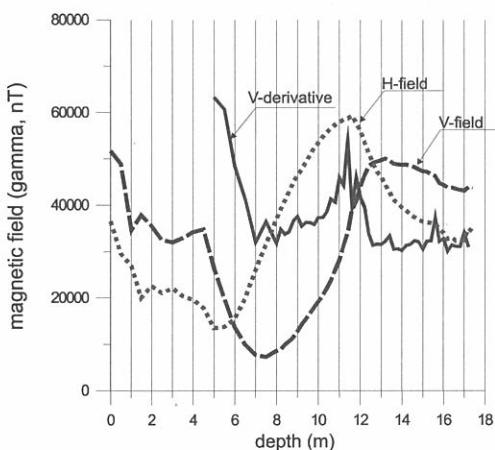


Fig. 6 현장자료. 측정값의 수직(V-Field) 및 수평성분(H-Field)과 수직성분의 수직미분곡선(V-derivative). 심도 11.5m 부근에서 수평성분과 수직성분 미분값이 최대값(극값)을 보이고 있다

### 3. 결 언

본 연구는 시추공자력탐사를 이용하여, 대형 구조물의 기초로 흔히 쓰이고 있는 기초파일의 근입심도를 조사해냄으로써 구조물의 안전점검이나 보강시 필요한 정보를 제공하는데 목적이 있다. 이를 위하여 3성분시추공자기탐사시스템을 제작하였으며, 추정된 자료를 해석하는 기법을 개발하였다.

시추공자력탐사는 기초파일이 존재하는 것으로

예상되는 지점에 탐사공을 시추하고, 시추공을 따라 자력계를 내려뜨리면서 이들 내부에 시공되어 있는 철근의 영향을 측정하는 과정으로 수행된다.

모형실험과 현장자료 취득 등을 통하여 시추공 자력탐사를 수행한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 자력탐사자료에 영향을 주는 인자로는 전지구적인 지자장의 변화, 자기폭풍, 지역적인 지질이상, 국부적인 자성체의 존재 등이다. 그러나 본 조사와 같은 국한된 시추공환경에서는 이들은 거의 일정한 값을 나타내며, 뚜렷한 변화를 줄 수 없다.

2) 지상의 교각과 교각기초슬라브에도 많은 수의 철근이 배근되어 있다. 그러나 이의 영향은 전체적으로 완만한 곡선, 즉 공간적으로 매우 저주파 성분을 띠고 있으므로 파일 선단의 급격한 변화와는 뚜렷히 구분된다.

3) 기초파일에 배근되어 있는 철근에 의한 자기유도값의 수직성분은 파일의 양단에서 급격한 변화를 야기 시킨다. 따라서 탐사 시추공은 기초파일의 예상심도보다 충분히 깊게 굴착하여야 한다. 또한 시추공은 가능한한 파일에 가깝게(3m 이내)에 위치해야 한다.

4) 파일선단깊이를 추정하기 위해서는 수직성분의 미분법, 수평성분해석법, 이론해 비교법이 있다. 수직성분 미분법은 비교적 신뢰성이 있는 결과를 신속히 얻을 수 있다. 수평성분해석법은 시추공과 파일의 배열 방향에 따라 적용가능성이 달라질 수 있으나, 해석의 보완자료로 적용될 수 있다.

5) 향후에 수직성분과 수평성분을 모두 고려하고 복수의 파일이 존재할 경우 주변의 파일의 영향까지도 고려하는 최소자승법에 기반한 자동역산법을 개발하면 매우 좀더 정확한 파일근입심도 추정이 가능할 것이라 사료된다.

### 감사의 글

장비개발에 힘써주신 한국자원연구소의 최종호

님, 지하정보기술(주)의 이 성일씨, 그리고 (주)희송  
지오텍의 민준기씨에게 깊은 감사드립니다. 또한 본  
논문 작성에 많은 조언을 베풀어 주신 한국해양  
대학교 해양에너지자원공학과 신성렬교수님과 서  
울대학교 신창수교수님 그리고 한국자원연구소  
박영수박사님과 임무택 박사님께도 감사를 드립니  
다.

#### 참 고 문 헌

1. Aoud, M.F., and Olson, L.D, Application of NDT methods for the determination of unknown bridge foundation depths in Bungey, J.H., Ed., Non-destructive testing in civil engineering NDT-CE '97, Volume 2 : An International Conference Organised by The British Institute of Non-Destructive Testing, 1997, pp435-448.
2. 이 의종(역), 콘크리트의 비파괴 시험, 도서출판 골드, 1996, pp223-227.
3. 민 경덕, 서 정희, 권 병두, 응용지구물리학, 우성문화사, 1985, p142.

(접수일자 : 1999. 3. 3)