

## 학술기사

# 충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 슬래브 두께, 기둥 크기, 철근 위치 추정

Estimation of Slab Depth, Column Size and Rebar Location of  
Concrete Specimen Using Impact Echo Method



이 용 택<sup>1)</sup>

Lee, Yong Taeg



홍 성 욱<sup>2)\*</sup>

Hong, Seong Uk



나 준 호<sup>3)</sup>

Na, Jun Ho

## 1. 서론

콘크리트 구조물의 유지·관리 및 안전진단이 대두됨에 따라 대형 구조물의 사고를 미연에 방지하기 위하여 주기적인 안전점검을 요구하고 있다. 이에 콘크리트 구조물의 진단을 위한 신뢰성 높은 비파괴검사법의 활용이 증대되고 있다.

비파괴검사법은 구조물에 문제점이 발생 했을 때 내부를 검사하기 위해, 해체하거나 절단 및 코어를 채취하는 일반적인 파괴검사법이 아닌, 응력파, 초음파, 방사선, 전자기, 열, 빛 등을 사용하여 내부 조직의 변화 및 구조체 내·외면의 결합존재유무, 응력상태, 재질변화 등을 검사할 수 있다.

비파괴검사법 중 충격반향기법(Impact Echo Method, IE)은 응력펄스(Stress Pulse)를 생성시키기 위해 충격을 사용하는 것은 큰 부피의 변환기에 대한 필요성을 없애면서 더 큰 투과 능력을 제공하는 장점을 갖기 때문에 오래 전부터 많이 사용되는 방법이다. 초음파와 달리 큰 에너지를 가지고 있기 때문에 보다 멀리까지 전파되며, 매스콘크리트와 같은 두꺼운 콘크리트의 탐사도 가능하다. 초음파 속도법으로는 측정이 곤란한 공동의 탐사, 매설물의 탐사, 말뚝 근입 심도의 측정에 이용되며 그 밖에 콘크리트 강도

판단, 균열의 심도측정, 두께 측정에 이용한다.

구조물의 손상이나 결함, 적정시공여부 등을 구조물의 손상 없이 추정하기 위하여 비파괴검사방법 중 응력파를 기반으로 한 충격반향기법을 이용하여 콘크리트 모의부재에서의 슬래브 두께, 기둥 크기, 철근 위치 추정을 위한 실험적 연구를 실시하였고, 이에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 응력파의 전파특성

탄성체 충격에 의해 매질을 따라 전파하는 응력파의 종류 중 체적파는 매질 입자의 압축과 인장(P파), 혹은 좌우 또는 위아래로 움직이는 전단(S파) 운동에 의하여 매질의 내부를 통해 전파하며 표면파(R파)는 매질이 지표와 같이 자유면을 갖고 있을 때 발생한다.

압축파(P파)는 입자운동이 파의 진행방향과 평행하게 전후 운동을 하며 전단변형 없이 체적변형만을 일으키며 전단파(S파)는 입자가 체적변형 없이 전단변형만을 일으킨다. 측방향 변위가 구속된 경우 압축파의 속도( $V_p$ )는 매질의 탄성계수와 밀도에 의해 식 (1)과 같이 결정된다.

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

1) 국립한밭대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
2) 국립한밭대학교 건축공학과 연구교수, 공학박사  
3) 국립한밭대학교 건축공학과 연구원, 석사과정  
\* E-mail : suhong7@hanbat.ac.kr

여기서,  $M$ : constrained modulus,  
 $E$ : Young's modulus,  
 $\rho$ : 밀도,  $\nu$ : 포아송비

만일 축방향 변위가 허용되는 봉과 같은 형태의 매질에서 식 (2)에 의하여 압축파 속도( $V_c$ )를 결정 할 수 있다.

$$V_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

전단파(S파)의 속도( $V_s$ )는 매질의 전단탄성계수와 밀도에 의해서 식(3)과 같이 결정된다.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

여기서,  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ : 전단탄성계수

표면파(Rayleigh wave)는 역행타원운동을 하여 타원의 윗부분에서는 파의 진행방향과 반대가 된다. R파의 에너지가 표면을 따라 전파할 때, 교란은 표면에서 최대이고 깊이에 따라 지수함수의 형태로 감소하며 한파장안에 거의 모든 에너지가 분포한다. R파의 속도( $V_R$ )는 전단파 속도( $V_s$ )와 포아송비( $\nu$ )의 함수로 식(4)와 같이 나타낸다.

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} V_s \quad (4)$$

### 2.2 충격반향기법(Impact Echo Method, IE)

충격반향기법은 반사면과 실험체 사이에서의 공진(Resonant)을 이용한 시험기법으로 응력파가 발생한 표면과 내부 결함 또는 외부 경계면 사이의 다중반사에 의해 유발된 공진상태에서의 획득한 공진주파수와 실험체의 길이의 관계를 이용하여 속도를 계산한다. 실험체의 표면에 기계적 충격을 가하면 구형의 탄성체에 전파되는 체적파와 표면파가 발생한다. 이중 실험체 내부로 전파되는 체적파는 내부의 균열, 공동과 같은 불연속체나 이질 매질층간의 경계면을 만나면 반사되어 응력파가 발생한 표면으로 돌아온다.

이와 같은 다중반사에 의한 파의 반사특성을 이용하여

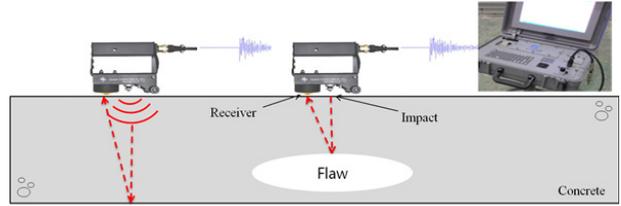


Fig. 1 충격반향기법 개념도

매질 내의 결함이나 두께, 경계면의 위치를 파악할 수 있다. 실험체의 치수를 알고 있을 경우 구성 재료의 강성도 결정을 통한 콘크리트의 불량도 추정이 가능하며 재료의 P 파의 전파속도를 알고 있다면 반사파의 도달시간을 측정하여 실험체 내부의 불연속면의 위치를 알 수 있다.

Fig. 1은 충격반향기법의 개념도를 나타내었다.

충격반향기법의 신호처리는 가진원으로 부터 발생한 응력파를 가속도계로 측정되는 시간영역(Time-domain) 해석과 주파수영역(Frequency-domain) 해석으로 나눌 수 있다. 파의 이동거리가 짧은 경우 시간영역상에서의 신호는 주파수가 다른 여러 종류의 파가 뒤섞여 복잡한 형태를 가지므로 시간영역에서의 기록을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 사용하여 주파수 영역으로 변환한다. 첫 번째 측정되는 주파수가 최대진폭 주파수가 되어 다중반사에 의한 공진주파수를 쉽게 획득할 수 있으며 식 (5)와 같이 압축파 속도를 이용하여 반사경계면까지의 거리를 구할 수 있다.

$$D = \frac{V_p}{2f} \quad (5)$$

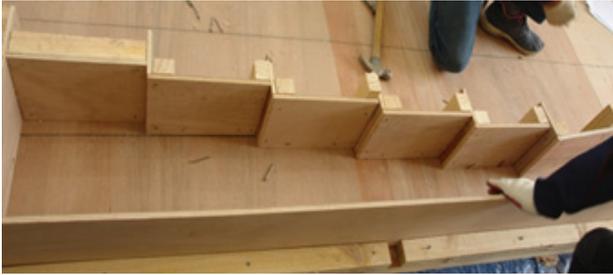
여기서,  $D$  : 반사경계면까지의 거리

$V_p$  : 압축파 속도

$f$  : 공진주파수

### 3. 실험

설계강도 30MPa로 배합을 하였으며, 콘크리트 슬래브 두께추정을 위한 실험체는 전체길이 1800×300으로 150, 180, 210, 240, 270, 300mm의 총 6가지로 두께변수를 달리 하였고, 기둥 크기추정을 위한 모의부재는 300×300×300mm, 400×400×400mm, 500×500×500mm로 총 3가지로 변수를 달리하여 제작하였다. 철근추정을 위한 300×370×200mm의 실험체에 철근 직경 22mm를 사용하여



(a) 슬래브 두께추정 거푸집



(b) 기둥 크기추정 거푸집



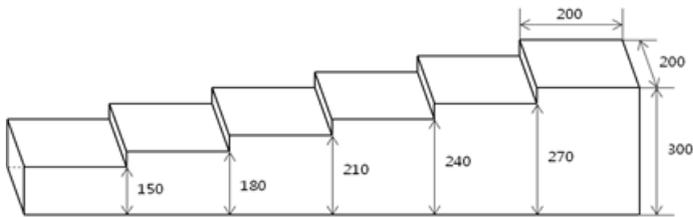
(c) 철근배근 거푸집

Fig. 2 거푸집

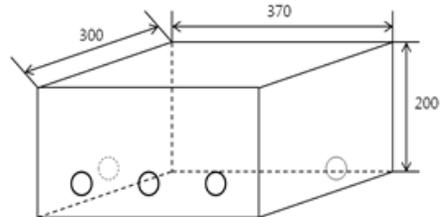
1행 3열로 실험체 상부에서 철근 상부까지 130mm, 150mm 로 배근하였다. Fig. 2는 슬래브 두께추정, 기둥 크기추정, 철근 위치 추정을 위한 거푸집이다. Fig. 3은 슬래브 두께추정, 기둥 크기추정, 철근 위치 추정 실험체의 형상이다.

실험장비는 OLSSEN사의 Freedom Data PC (WinTFS Software Version 2.5.2)를 사용하여 자료를 취득하였다. 충격반향기법(IE)을 이용한 콘크리트 슬래브 부재의 두께, 기둥부재의 크기, 철근위치 추정을 위해 ASTM C 1383-04 를 기준으로 실험을 하였다.

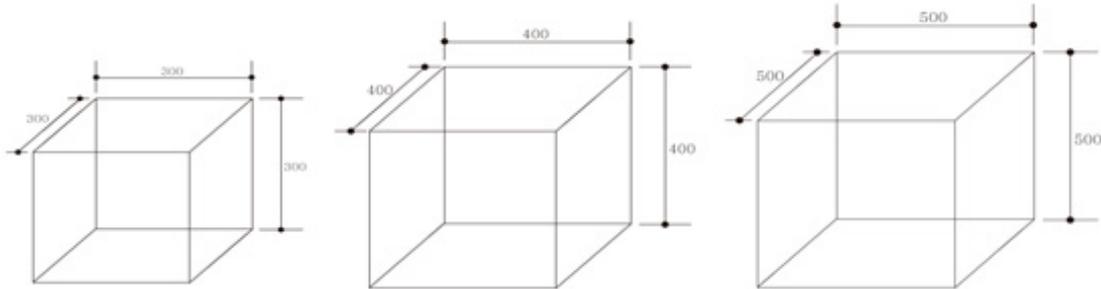
가진 할 위치에 불순물 제거를 위해 연마를 하였고 신뢰성 높은 실험을 위해 철근추정은 20번, 슬래브 두께추정과 기둥 크기추정은 9번 실험하였다. 철근추정 실험체의 경우 상부철근과 하부철근의 위치에 따라 각각 실험하였고, 슬래브 두께추정과 기둥크기추정은 중심부에서 가진 하였다. Fig. 4의 (a)는 Olson data 장비를 이용한 실험체 사진과 슬래브 두께추정을 위한 가진위치 사진이며, (b)는 기둥실험 실험체들과 가진위치 사진이다. (c)는 상부로부터 배근된 철근의 매립위치와 가진 위치이다. 충격반향기법을 사용하기 위해 사전실험으로 KS F 2731에 준하여 콘크리트 압축강도 추정을 위한 초음파펄스속도로 초음파속도를 측정하였다.



(a) 슬래브 두께추정 실험체 형상

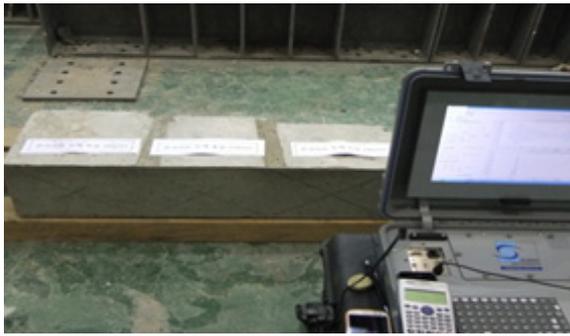


(b) 철근추정 실험체 형상



(c) 기둥 크기추정 실험체 형상

Fig. 3 실험체 형상



(a) 슬래브 두께추정



(b) 기둥 크기추정



(c) 철근 위치추정

Fig. 4 거푸집

## 4. 실험결과

### 4.1 슬래브 두께추정

슬래브 두께추정을 위한 실험체의 전체길이는 1800×200으로 두께 변수를 150mm, 180mm, 210mm, 240mm, 270mm, 300mm 총 6가지로 달리 하여 실험을 실시하였다. 슬래브 두께추정 실험체의 초음파속도값은 150mm, 180mm, 210mm, 240mm, 270mm, 300mm에서 각각 20번씩 측정하여 평균값으로 나타낸 결과 3251m/sec, 3159m/sec, 3548m/sec, 3643m/sec, 3719m/sec, 3722m/sec로 나타났다. 슬래브 두께추정 실험체의 실측 두께

Table 1 슬래브 두께 측정값

추정 두께 (mm)	초음파 속도 평균값 (m/sec)	최대공진주파수 (Hz)			두께측정 (mm)			실측 두께 (mm)	평균 (mm)	오차율 (%)
		1	2	3	1	2	3			
150	3,251	10352	10352	10352	157	157	157	152	148.7	2.2
		10352	10352	10352	157	157	157			
		12305	12305	12305	132	132	132			
180	3,159	9277	9277	9277	170	170	170	178	174.1	2.2
		9277	7617	9277	170	207	170			
		9277	9277	9277	170	170	170			
210	3,548	8886	8886	8886	200	200	200	208	198.3	4.6
		8886	9082	9082	200	195	195			
		9082	8886	8886	195	200	200			
240	3,643	7910	7226	7910	230	252	230	237	234.9	0.9
		7910	7910	7910	230	230	230			
		7226	7910	7910	252	230	230			
270	3,719	7226	7226	7226	257	257	257	270	259.7	3.8
		7128	7128	7128	261	261	261			
300	3,722	5859	5859	5859	318	318	318	300	314.0	4.7
		5957	5957	5957	312	312	312			
		5957	5957	5957	312	312	312			

는 152mm, 178mm, 208mm, 237mm, 270mm, 300mm이었으며, 슬래브 두께추정은 각각 9번씩 측정하여 평균값으로 나타낸 결과, 148.7mm, 174.1mm, 198.3mm, 234.9mm, 259.7mm, 314mm의 데이터를 얻었고 Table 1로 나타내었다. 실측 두께와 평균값을 비교한 오차율은 2.2%, 2.2%, 4.6%, 0.9%, 3.8%, 4.7%로 평균 1.5%로 비교적 정확함을 알 수 있었다.

### 4.2 기둥 크기추정

충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 초음파속도의 평균은 3,736m/sec, 3,792m/sec, 3,533m/sec로 측정하였다. 기둥 크기추정의 평균 실험값의 크기는 실제 300×300×300mm에서 304mm, 400×400×400mm에서 398mm, 500×500×500mm에서 484mm로 Table 2와 같이 나타났다. 실제크기와와의 상대오차율은 1%~3%로 나타나 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

### 4.3 철근 위치추정

철근의 위치를 알아보기 위해 300×370×200 실험체에 철근 직경22mm 철근을 사용하였다. 실험체 상부에서

Table 2 기둥 크기 측정값

실험체 (mm)	초음파 속도 평균값 (m/sec)	최대공진주파수 (Hz)			크기측정 (mm)			크기 평균 (mm)	실제 크기 (mm)	오차율 (%)
		5661	6768	6768	330	276	276			
300	3,736	6768	5949	5661	276	314	330	304	300	1
		6768	5661	5661	276	330	330			
		5464	5464	5267	347	347	360			
400	3,792	3807	5852	3807	498	324	498	398	400	1
		3909	5267	5267	485	360	360			
		3832	3727	3533	461	474	500			
500	3,533	3533	3605	3719	500	490	475	484	504	3
		3533	3680	3680	500	480	480			

Table 3 철근 위치추정 측정값

횟수	초음파속도 측정값 (m/sec)		최대공진 주파수 (Hz)		두께측정값 (mm)		오차율 (%)	
	상부	하부	상부	하부	상부	하부	상부	하부
1	2865	2,865	11621	9,375	123	153	5.69	1.96
2	2866	2,864	11621	9,375	123	153	5.69	1.96
3	2867	2,865	11621	9,375	123	153	5.69	1.96
4	2868	2,865	11818	9,375	121	153	7.44	1.96
5	2865	2,865	11816	9,375	121	153	7.44	1.96
6	2866	2,864	11816	9,375	121	153	7.44	1.96
7	2867	2,864	11816	9,570	121	150	7.44	0.00
8	2868	2,864	11816	9,570	121	150	7.44	0.00
9	2865	2,866	11816	9,570	121	150	7.44	0.00
10	2866	2,864	9570.3	9,570	150	150	13.33	0.00
11	2867	2,866	9570.3	9,570	150	150	13.33	0.00
12	2868	2,866	9570.3	9,570	150	150	13.33	0.00
13	2865	2,865	9570.3	9,570	150	150	13.33	0.00
14	2866	2,865	11621	9,570	123	150	5.69	0.00
15	2867	2,865	11621	9,375	123	153	5.69	1.96
16	2868	2,865	11621	9,375	123	153	5.69	1.96
17	2865	2,864	11621	9,375	123	153	5.69	1.96
18	2866	2,865	11621	9,375	123	153	5.69	1.96
19	2867	2,866	11621	9,375	123	153	5.69	1.96
20	2868	2,867	11621	9,375	123	153	5.69	1.96
평균	2866.5	2,865	11269	9,453	127.8	151.8	1.72	1.19

철근상부까지 130mm, 150mm로 1행 3열로 상부, 하부철근으로 배근하였다. 철근위치 추정은 총 20번씩 측정하여 평균값으로 나타내었고, 그 결과는 Table 3과 같이 상부와 하부로 나누어 초음파속도값은 2867m/sec, 2865m/sec였으며, 최대공진주파수 값은 11269Hz, 9453Hz로 나타났다. 철근 위치 추정값은 127.8mm, 151.8mm로 처음 배근

했던 130mm, 150mm과 비교하여 오차율 1.7%, 1.2%로 비교적 일치함을 알 수 있었다.

### 5. 결론

이상과 같이 비파괴검사법 중 충격반향기법을 이용한 콘크리트 슬래브 두께, 기둥 크기, 철근위치 추정 실험에 대한 적용 가능성을 살펴보았다.

충격반향기법(IE)은 콘크리트의 부재의 두께와 크기를 알아내거나 경우에 따라서는 구조물 내부에 있는 다양한 이질재료들도 유형별 파형을 통하여 구별이 가능함을 알 수 있었고, 구조물의 유지관리 및 안전성 확보에 구체적인 기준을 만들 수 있을 것으로 보며 추후 다량의 데이터 확보를 위한 신뢰성 있는 연구와 파형의 관계를 규명하는 연구가 필요할 것 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2012R1A2A2A01012013)을 받아 수행된 연구의 일부이며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. ASTM C 1383-04 (2010), Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method.
2. Heisey, J. S., Stoke, K. H., II, and Meyer, A. H., Moduli of Pavement Systems from Spectral Analysis of surface Waves, Transportation research record, 1982, No. 852, Washington D.C., pp.22-31.
3. Rosenblad, B. L., Sykoe, K. H. II, and Roesset, J. M.(1994), "Evaluation of stress-wave method for implementation into a rolling system to detect pavement irregularities", Research report number 1243-5F. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 178P.
4. Sansalone, M., and Carino. N. J., "Impact Echo Method : Detection Honeycombing, the depth of surface-opening Cracks, and UngROUTED Ducks", Concrete International : Design & Construction, Vol. 10, No. 4, Apr. 1988, pp.38-46.

담당 편집위원: 김태수  
(국립한밭대학교 건축공학과 부교수)  
tskim@hanbat.ac.kr