

반발 경도법 및 충격반향기법을 이용한 콘크리트 슬래브의 압축강도 비교에 관한 연구

A Study Using Rebound Method and Impact Echo Method
for the Comparison of the Compressive Strength of Concrete Slab

홍 성 욱* 조 영 상**
Hong, Seong-Uk Cho, Young-Sang

Abstract

As infrastructures are being deteriorated, nondestructive evaluation of existing structures and construction quality control are increasingly demanded. The importance of predicting compressive strength of concrete structure is also gradually increasing in construction industry. The estimation of concrete compressive strength is a critical factor of the construction management and quality control. This study has been conducted using Schmidt hammer test and Impact echo method, which are nondestructive test methods for the comparison of the concrete compressive strength. It is focusing to examine the relationship between compressive strength of concrete and rebound number by Schmidt hammer test result by Impact echo method. It was found that concrete compressive strength and rebound number have a close correlation.

요 지

최근 구조물이 노후화되면서 기존 구조물과 시공품질을 관리하는 비파괴검사 평가의 요구가 증가되고 있다. 콘크리트 구조물의 압축강도 추정의 중요성이 건설업계에서 또한 점차적으로 증대되고 있는 실정이고, 시공관리와 품질관리에 있어서 중요한 요소이다. 본 연구는 콘크리트의 압축강도를 비교하기 위한 비파괴 검사법 중 슈미트해머 시험과 충격반향기법을 이용하여 수행되었다. 콘크리트 압축강도와 슈미트해머에 의한 반발경도 값과 충격반향기법 실험결과와의 관계를 알아내는데 초점을 두었으며, 콘크리트의 압축강도와 반발 경도 값은 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Compressive strength, Impact echo method, Nondestructive test, Rebound number, Schmidt hammer test

핵심 용어 : 압축강도, 충격반향기법, 비파괴 검사, 반발도, 슈미트해머 시험법

* 학생회원, 한양대학교 건축환경공학과 박사과정

** 정회원, 한양대학교 건축학부 교수, 공학박사

E-mail : suhong@hanyang.ac.kr 031-400-4687

•본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

콘크리트의 압축강도는 콘크리트의 품질과 특성을 나타내는 중요한 요소이다. 특히 실존 콘크리트 구조물의 강도를 추정하려는 목적은 관련 시방서상의 강도를 충족시키고 있느냐 하는 판단기준의 설정 또는 콘크리트 구조물을 평가하고자 하는데 있다. 실제로 시공 중이거나 사용되고 있는 구조물에 있어서 구조물의 사용성이나 안정성에 대하여 의문이 생기게 될 경우에는 해석적 방법이나 재하시험을 통하여 구조적인 강도 평가를 판단하기에 앞서 구조물의 콘크리트 강도를 구하는 것이 선행 작업으로 행해지고 있다. 지금까지 많은 연구자들은 실존하는 콘크리트 구조체로부터 그 실제 강도를 구하려는 노력을 끊임없이 하여 왔으며 이는 콘크리트 공학의 발전과 계측 기술이나 통계학 및 표준화의 도움으로 실제로 가까운 강도를 추정하기에 이르렀다. 더욱이 국내적으로는 크고 작은 콘크리트 건물과 교량 등이 사용성의 차원을 넘어 안전성에 대한 문제가 대두되고 있어 빠른 시간 안에 저렴한 비용으로 신뢰성 있게 그리고 편리하게 콘크리트 구조물의 강도를 구할 수 있는 비파괴시험법이 그 어느 때보다 절실히 요구되고 있다.

일반적으로 콘크리트의 강도를 추정하기 위하여 타격법, 진동법, 복합법 3가지 비파괴시험법이 이용되고 있으며, 2종류 이상의 비파괴시험법을 병용하여 강도를 추정하는 복합법은 1953년부터 시작되어 외국에서는 현재 그에 대한 규준이 작성되어 있으나, 현장 구조물의 적용에는 한계가 있어 최근에는 국부 파괴법도 병용하여 비파괴적으로 적용할 수 있도록 많은 연구가 진행 중에 있다. 국내에서는 1960년대 물리학자와 공학자들에 의해 연구가 시작되어 주로 동력, 중화학 분야에 적용되면서, 1970년 후반부터 비파괴시험 장비가 상업적으로 이용되기 시작하면서부터 국방산업, 플랜트 건설, 원자력 공장, 항공기 제작 등의 활용에 이어 건축 분야 등 각종 건설 분야에 적용과 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

본 연구의 목적은 비파괴 시험의 대표적인 반발경도법(Schmidt Hammer), 충격반향기법(Impact Echo Method)을 이용하여 압축강도의 비교, 분석을 통해서 신뢰성의 검증과 반발경도와 응력과 속도와의 상관 관계를 알아내는 것이다.

1.2 연구동향

콘크리트의 비파괴 검사법에 대한 연구는 1934년 무렵 시작되어 1973년 굳지 않은 콘크리트에 결함이 발생하는 사건을 계기로 콘크리트 비파괴검사법에 관한 연구가 새로운 국면을 맞아 진행되고 있다. 미국에서는 N. J. Carino 등이 1980년대 후반 충격반향(Impact Echo)을 이용하여 압축과 속도와 부재의 두께와 결함, 강도의 관계에 관해 연구하였다.⁽¹⁰⁾ 1983년 일본에서는 건축학회에서 비파괴 실험방법 매뉴얼을 작성하고 압축강도 추정식을 제안하였으며 국내에서도 그 사용빈도가 높다.⁽⁴⁾ 국내의 콘크리트에 관한 연구는 대부분 배합특성 및 역학특성 등에 집중되어있고 비파괴 시험에 의한 콘크리트 강도 추정에 관한 연구는 임서형⁽⁵⁾ 등이 보통강도와 고강도에 대해 각각 추정식을 제안하였으며 2004년 김무한⁽⁴⁾ 등은 고강도 콘크리트에 대한 강도 추정식을 제안하였다. 그러나 이는 반발도법과 초음파 속도법에 한정되어 있으며 응력파를 이용한 비파괴검사 기법에 대하여는 연구가 미진하여 데이터가 부족한 실정이다.

2. 이 론

2.1 비파괴 시험의 종류

콘크리트 비파괴 시험에 대한 연구는 1934년부터 시작되어 현재에 이르고 있으며, 지금까지의 연구 방법, 목적 등은 매우 다양하다. 이들 가운데에는 강도 추정을 목적으로 하는 것 뿐 만 아니라 탐지, 철근 탐사 등을 목적으로 하는 것도 있다. 비파괴시험법의 종류는 다양하나, 타격법, 진동법, 복합법의 세 종류만 간단히 정리하여 기술한다. 이중 타격법에 관한 연구는 1934년부터 영국, 독일 등에서 시작되었으며,

1948년에 Schmidt Hammer를 고안함으로써 실용화되어 세계에서 널리 사용되고 있으나, 강도추정의 정밀도는 제반 시험 조건과 방법에 따라 반드시 만족할 만한 결과를 도출하지 않는다.

진동법은 공진법과 음속법으로 대별된다. 그러나 공진법은 적용 가능한 공시체의 형상, 치수에 있어 콘크리트 강도추정에 적합하지 못하나 음속법은 그러한 제약이 없어 구조물 콘크리트의 강도추정에 적용이 가능하다. 음속법의 종류에는 초음파 전파 속도법, 충격파법, 위상법등이 있다. 복합법은 두 종류 이상의 비파괴 시험법을 병용하여 강도추정을 하는 방법으로, 타격법이나 초음파법 등 한 종류로서는 콘크리트 강도추정의 정밀도 면에서 어려움이 있기 때문에 개발이 시작되었다. 이 방법은 다른 어느 방법보다도 정밀도가 우수하여 큰 관심을 모으고 있는 비파괴 시험법으로 최근 유럽 몇 개국에서 연구되기 시작하였다. 복합법의 방법은 수 가지이지만 콘크리트 구조물에 적용할 수 있는 방법은 1960년대부터 시작한 초음파 전파속도법과 반발경도법을 병용한 것이다. 이는 양자에서 나타난 장점을 모두 이용함과 동시에 서로의 단점을 보완할 수 있기 때문에 압축강도추정의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

2.2 반발경도법(Rebound Method)

반발경도법은 콘크리트의 경도를 강도(strength)로 변화하는 시험방법으로서 빠른 시간 안에 간편하고 경제적이며, 편리하게 사용할 수 있는 국제적으로 표준화된 시험법이다. 그러나 콘크리트의 표면부 성질과 타격조건에 따라 영향을 받으므로 콘크리트 구조물 내부의 강도를 명확히 측정하기는 곤란하지만, 슈미트해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격할 경우, 반발도와 콘크리트 압축강도의 특정 상관관계를 이용하면 어느 정도 강도 추정이 가능하다. 슈미트해머의 원리는 타격 시 해머 내의 중추 반동량을 반발도로 표시하는 것이다. 일반적으로 타격 시의 반발도는 타격에너지 및 피타격체의 형상, 크기, 재료의 물리적 특성과 관계되는 물리량에 따라 다르다. 즉, 반드시 재료의 강도와 비례적인 관계가 있는 것은 아니다. 특히 콘크리트와 같은 불균질한 재료표면에서 슈미트해머로 국부적 타

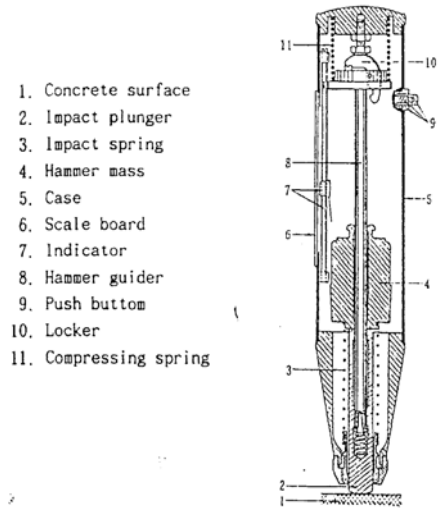


Fig. 1 N형 슈미트 해머의 내부구조

격을 하는 경우 반발도는 타격면에 존재하는 골재의 유무, 건조상태, 콘크리트의 재령 등에 따라 다르기 때문에 강도추정을 유일한 지표로 하는 데에는 많은 문제가 남아있지만 간편하고 짧은 시간 안에 콘크리트 구조물 전체의 강도측정이 가능하다는 점에서 매우 유효한 시험법이라 할 수 있다.

슈미트해머는 간단하게 반발도를 얻어서 압축강도를 추정하는 장점이 있는 반면에 오차가 많다. 오차를 줄이기 위하여 보정을 하는데, 경사각도 이외에도 재령, 콘크리트 표면상태, 시험체의 치수·형상 및 강성, 콘크리트의 습윤 상태, 조골재, 시멘트, 몰드, 탄산화 등의 영향도 받는다. 따라서 반발도 R 값을 보정해주고, 보정된 R 값을 이용해서 압축강도를 추정한다. 다음은 국내에서 많이 인용되는 콘크리트의 압축강도 추정식이다.⁽⁶⁾

$$\text{일 본 재료학회식} : f_{ck} = 13R_0 - 184 \quad (1)$$

$$\text{동 경 도 시험식} : f_{ck} = 10R_0 - 110 \quad (2)$$

$$\text{일 본 건축학회식} : f_{ck} = 7.3R_0 + 110 \quad (3)$$

여기서,

f_{ck} : 압축강도 (kgf/cm^2)

R_0 : 반발도 ΔR

2.3 충격반향기법(Impact Echo Method)

실험체 표면에 기계적 충격을 가하면 탄성체 내부로 전파되는 체적파와 표면파가 발생하며 이중 체적파는 균열, 공동과 같은 불연속체 또는 이질 매질과의 경계면 또는 내, 외부의 이질 매질층 등에서 반사되어 충격이 가해진 표면으로 돌아오게 된다.(Fig. 2) 이때 충격이 발생한 표면과 내부 공극이나 외부 경계면 사이에서 공진 상태가 유발되며 표면에 위치한 감지기가 반사된 P파를 수집한다. 반사된 P파는 S파에 의한 표면변위보다 훨씬 크기 때문에 감지기에 감지되는 파형은 P파에 의한 파형으로 봐도 무관하다. 감지기에 수집된 시간 영역 데이터는 반사파의 도달 시간을 쉽게 찾을 수 없기 때문에 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통해 주파수 영역으로 변화하면 다중반사에 의한 공진 주파수를 얻을 수 있게 되어 반사파의 도달 주기를 결정할 수 있다. 실험체의 두께를 알고 있을 경우 실험체 재료의 강성도 결정을 통하여 콘크리트의 건전도 평가가 가능하며 재료의 압축파 속도를 알고 있는 경우에는 반사파의 도달시간 측정을 통하여 실험체 내부에 존재하는 균열, 공동 등의 위치를 파악할 수 있다.⁽¹¹⁾

응력파는 파의 전파 속도와 파가 전파되는 매질 입자의 거동 특성에 의해 체적파와 표면파로 구분된다. 매질 내부를 따라 전파하는 체적파에는 P파와 S파가 있으며 매질 표면을 따라 전파하는 체적파에는 Rayleigh파와 Love파가 있다. P파는 압축파라 하여 매질의 전단변형 없이 체적변형만을 일으키며 매질 입자의 운동방향은 파의 전파 방향과 같고 그 속도(V_p) 다음과 같이 구할 수 있다.⁽⁹⁾

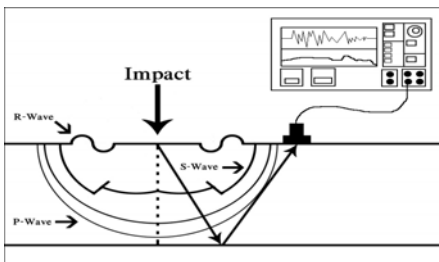


Fig. 2 충격에 의한 응력파의 종류

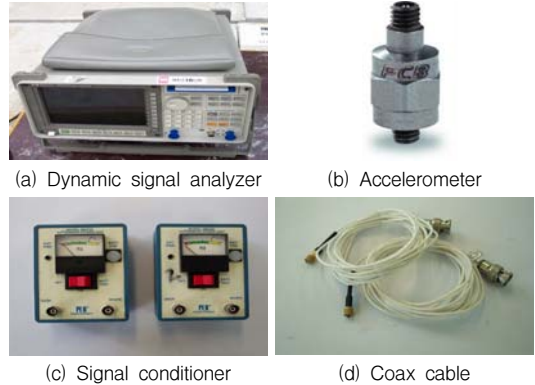


Fig. 3 비파괴 시험 장비

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4)$$

여기서,

M : constrained modulus

E : young's modulus

ρ : 밀도

ν : 포아손 비

본 연구는 Fig. 3에서 보는바와 같이 동적신호분석기(Dynamic Signal Analyzer)는 HP사의 35670A를 사용하여 데이터를 취득하였으며 이 장비는 채널수가 2개이며 양 채널 동시사용 시 분석 가능한 주파수의 범위는 $60\mu\text{Hz}$ 에서 50KHz 이며 한 채널만으로 할 경우에는 100KHz 까지 가능하다. 또한 디지털 샘플링과 고속 푸리에 변환(FFT)연산 알고리즘을 사용하여 주파수 특성 함수를 실시간으로 처리가 가능하다. 그리고 사용한 가속도계는 주파수 범위가 0.5Hz 에서 10000Hz 인 PCB사의 모델명 352C66 이다. 실험에서 필요로 하는 Data 수집범위는 $0-50/100\text{KHz}$ 로 적합한 감지기이다. 그 외에 신호처리기(Signal Conditioner)와 Coax Cable이 사용되었다.

2.4 압축강도 시험

경화 콘크리트의 압축강도는 『KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법』에 준하여 실시하였다.⁽⁸⁾ 압



(a) Grinder (b) UTM

Fig. 4 압축강도 시험장비

축강도 시험을 실시하기 위해 연마기(Fig. 4(a))를 사용하여 공시체의 상면을 평활하게 연마하여 사용하였다. 연마는 공시체의 길이가 196mm보다 작지 않게 하였다. 압축강도는 압축강도 시험 시 최대하중을 측정하여 아래 식에 대입하여 압축강도를 산정하였으며, Fig. 4(b)의 200ton 만능시험기 (UTM: Universal Test Machine)를 사용하여 측정하였다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (MPa) \quad (5)$$

여기서,

σ_c : 압축강도 (MPa)

P : 최대하중 (kgf)

A : 공시체의 단면적 (cm^2)

3. 실험

본 연구에서 설계기준강도 18, 21, 24, 27, 30, 35, 40, 50, 60MPa인 총 9개의 배합비(Table 1)로 제작된 실험체에 비파괴 실험을 하였다. 비파괴 시험은 반발경도법(Rebound Method)과 충격반향기법(Impact Echo Method)으로 실험하여 압축강도를 비교하였다.

3.1 반발 경도법(Schmidt hammer)

3.1.1 측정준비

각 강도별 실험체를 시험하기 위하여 평탄한 면을 선정하고 Fig. 5와 같이 실험체 위에 표시하고 슈미트 해머로 타격하여 반발경도 R값을 측정하였다.

3.1.2 실험과정

Fig. 5와 같이 표시한 20점에 타격하여 눈금을 읽어 보고서에 기록하였고, Fig. 6과 같이 수직하향($\alpha = -90$)으로 실험하게 되므로 강도추정 시 경사각도에 대한 보정을 실시하였다.

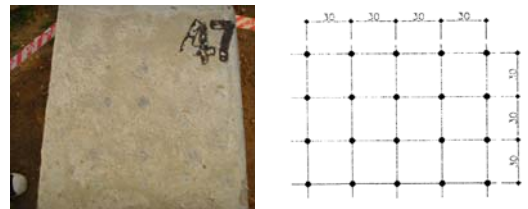


Fig. 5 슈미트 해머 시험 준비과정

Table 1 배합비

배합강도 (MPa)	단위재료량(kg/m^3)						
	단위수량	시멘트	혼화재(FA)	단위세골재량	단위조골재량	혼화제	
18	157	215	38	895	977	AE	0.63
21	163	244	43	873	953	AE	1.44
24	180	294	52	826	902	AE감수	0.87
27	185	355	40	822	897	AE	1.98
30	176	333	59	783	915	AE감수	0.98
35	175	369	65	838	925	AE감수	1.09
40	163	420	74	801	930	고유동	5.6
50	150	425	75	737	1012	고유동	10
60	163	534	59	715	937	고유동	8.9



Fig. 6 슈미트해머 시험

3.1.3 실험결과

슈미트해머로 각 실험체에 20곳에 타격한 후 취득한 반발경도(R)값의 평균을 구하여 Table 2에 나타내었다.

3.2 충격반향기법(Impact Echo Method)

3.2.1 측정준비

Fig. 7과 같이 실험체 위에 표시를 하여 비파괴검사기법중 하나인 충격반향기법을 이용하여 콘크리트의 강도추정실험을 수행하였다.

3.2.2 실험과정

비파괴시험용 실험체에 충격반향기법(Impact echo method)을 적용하여 압축과 속도를 구하였다.(Fig. 8) 발진원은 3.6g의 쇠구슬로 하여 실험체의 표면으로

Table 2 반발경도(R)

배합 강도(MPa)	반발경도(R)
18	25.45
21	28.35
24	31.70
27	32.15
30	34.55
35	38.20
40	41.90
50	44.20
60	48.70

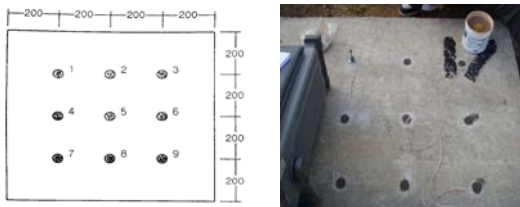


Fig. 7 충격반향기법 준비과정

부터 300mm 위치에서 자유 낙하시켜 충격을 주었다. Fig. 7의 1-9번 위치에서 각각 5번씩 가진하여 얻은 값을 평균 내어 압축과 속도를 구하였다.

충격반향기법의 실험순서는 다음과 같다.⁽³⁾(Fig. 9)

- ① 충격가진(압축과 형성)
- ② 감지된 파신호 기록
- ③ 시간영역 신호(Time Domain Data)를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)방법으로 주파수영역 신호(Frequency Domain Data)로 변환
- ④ 주파수영역 신호에서 공진 주파수(Peak Frequency) 계산
- ⑤ 압축과 속도(VP)산정

3.2.3 실험결과

충격반향기법을 통하여 획득한 데이터의 각 강도별 재령에 따른 파속도의 변화를 Fig. 10에 나타내었다.

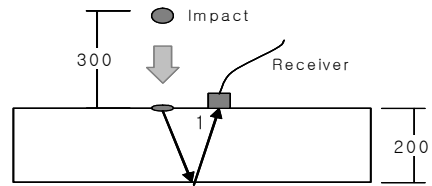


Fig. 8 충격반향기법 실험방법



Fig. 9 충격반향기법 실험과정

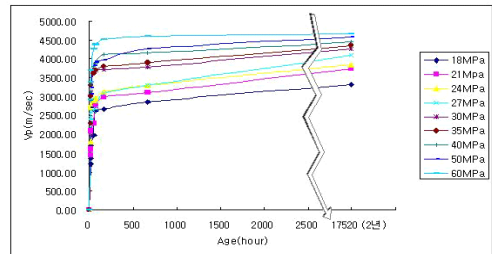


Fig. 10 재령과 Vp 그래프

3.3 압축강도 시험

압축강도 시험은 슬래브 모의부재 실험체에 코어를 3개씩 채취하여 슬래브 모의부재강도와 압축강도 시험용 공시체 강도를 비교하였다.(Fig. 11) 압축강도는 재령 16시간, 20시간, 24시간, 2일, 3일, 7일, 28일에 대하여 데이터를 취득하였다. 강도별로 압축강도를 시험한 결과를 재령일에 따라 분석하여 Fig. 12에 나타내었다. 압축강도의 경우 타설 후 재령 28일까지 급격한 강도발현을 보인 후 점점 강도증가가 완만해진다. 재령 2년이 경과된 실험체의 측정값에서 강도의 증가를 보이나, 그 값은 18MPa는 4%, 21MPa는 4.7%, 24MPa는 4%, 27MPa는 5.4%, 30MPa는 2.4%, 35MPa는 4.4%, 40MPa는 5%, 50MPa는 3.9%, 60MPa는 3.6%의 증가를 보이면서 강도의 증가가 모두 5%이내의 적은 수치이다.

4. 반발경도법과 충격반향기법의 비교

4.1 반발경도법의 결과분석

반발경도법은 비파괴시험방법 중에서도 신속한 속도로 콘크리트의 압축강도를 얻을 수 있는 장점이 있으나 여러 보정계수를 적용해줘야 하는 단점이 있다. 오차를 줄이기 위해서 반발경도를 각도에 따른 보정값을 Table 3에 나타낸다.⁽⁷⁾

타격방향에 따른 보정을 한 반발경도(R)값을 식 (1),(2)의 평균값에 의해서 값을 구했다. 그 구한 값

은 다음 Table 4와 같이 나왔다. Table 4에 의하면 보통 콘크리트에서의 반발도 값은 오차가 적으나, 고강도 콘크리트로 갈수록 강도의 오차가 커지는 것을 알 수 있다.

또한, 반발경도(R)값을 압축강도 추정식을 이용해서 구한 강도 값과 실제 UTM 측정기로 측정한 실제 강도 값과는 18MPa, 21MPa, 27MPa, 30MPa는 10 kg/cm^2 미만의 차이를 보여주며, 24MPa는 -25.54 kg/cm^2 , 35MPa는 -36.52 kg/cm^2 , 40MPa는 -22.42 kg/cm^2 , 50MPa는 -50.46 kg/cm^2 , 60MPa는 52.44 kg/cm^2 의 차이를 보여준다.

Table 3 타격방향 보정값

반발경도(R)	수 평 과 이 루 는 각 도			
	+90°	+45°	-45°	-90°
10	-	-	+2.4	+3.2
20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1
40	-3.9	-2.6	+2.0	+2.7
50	-3.1	-2.1	+1.6	+2.2
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7

Table 4 반발경도-압축강도

배합강도 (MPa)	반발경도 (R)	압축강도 (kg/cm^2)	
		추정식	실험결과
18	25.45	180	183.53
21	28.35	220	215.75
24	31.70	260	235.46
27	32.15	280	278.39
30	34.55	310	292.98
35	38.20	370	343.48
40	41.90	425	402.58
50	44.20	460	510.46
60	48.70	540	607.56



Fig. 11 압축강도시험

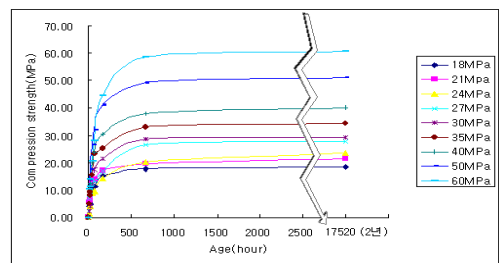


Fig. 12 재령과 압축강도 그래프

4.2 충격반향기법 결과분석

충격반향기법과 압축강도실험에서 취득한 결과를 토대로 P와 속도에 따른 압축강도관계를 재령 일에 따라 정리하였다. Fig. 13에 나타난 것과 같이 V_p 와 압축강도의 상관관계는 식(6)과 같이 도출할 수 있다.

$$V_p = 1311.9f_{ck}^{0.3198} \quad (6)$$

4.3 반발경도법과 충격반향기법의 비교

반발경도(R)와 P와의 상관관계를 분석하여 Fig. 14에 나타내었다. 반발경도 값이 증가함에 따라 P와 속도가 증가하는 상관관계를 알 수 있었으며, 반발경도와 V_p 와의 관계를 식(7)과 같이 도출할 수 있었다.

$$V_p = 790.07R^{0.4651} \quad (7)$$

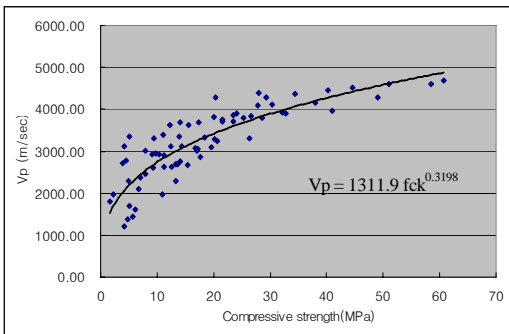


Fig. 13 압축강도와 V_p 그래프

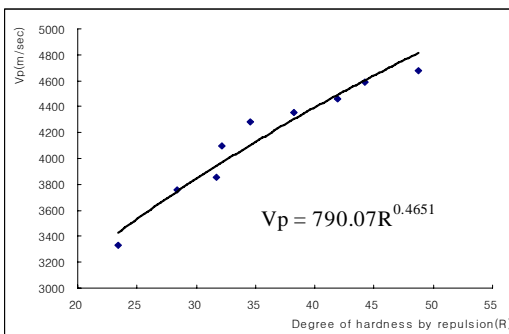


Fig. 14 반발경도와 V_p 그래프

5. 결론

본 연구에서 슈미트해머를 이용한 반발경도법과 응력파를 이용한 비파괴 검사법인 충격반향기법(Impact Echo Method)을 이용하여 반발경도와 압축강도와의 비교, 응력파와 압축강도의 비교를 통해서 반발경도와 응력파와의 상관관계를 알아내는 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반발경도법으로 보통콘크리트의 압축강도와 반발경도(R)값을 통한 압축강도추정식의 신뢰성을 확인할 수 있으나 고강도 콘크리트로 갈수록 오차율이 커지는 것을 알 수 있다. 슈미트해머 시험의 신뢰성 확보를 위하여 충격반향기법을 병행한 고강도 콘크리트의 압축강도 추정식에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.
- 2) 충격반향기법을 통해서 알아낸 압축파 속도는 비선형적인 상관관계를 나타낸다. 속도가 증가할수록 압축강도는 비선형적으로 증가한다. 이는 압축강도의 발현 속도보다 압축파의 발현 속도가 빠르기 때문으로 추정된다.
- 3) 슈미트해머시험의 반발경도(R)값과 충격반향기법의 압축파 속도의 상관관계는 식(7)과 같이 도출할 수 있었으며, 추후 추가적인 연구 및 실험을 통해서 신뢰도를 높이는 검증이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연 A10-5)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, “콘크리트 구조물의 비파괴검사 및 안전진단”, 한국콘크리트학회 제2회 기술강좌, I-1~II-51, 1993.
2. 대한건축학회, “건축물의 안전진단과 보수, 보강”, 대한건축학회 세미나 논문집, 1993, pp. 11-72.

-
3. 홍성욱, "Impact Echo Method를 이용한 콘크리트 구조물의 결함탐사 및 인공신경망 적용에 관한 연구" 석사학위논문, 한양대학교, 2005.
 4. 김무한, 최세진, 김용로, 장중호, 김재환, 윤종기, "비파괴시험에 의한 고강도콘크리트 강도추정식 제안 및 현장적용성 평가에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제20권, 제2호, 2004, pp. 55-62.
 5. 임서형, 강현식, 지남용, "비파괴 시험에 의한 콘크리트의 압축강도 추정에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제18권, 제8호, 2002, pp. 51-58.
 6. 황민영, 이광열, 구본희, 김형균, "건축재료 및 안전진단시험", 보성각, 2002, pp. 173-785.
 7. 김진욱, "슈미트헤머 타격법에 의한 콘크리트 압축강도식 추정", 석사학위논문, 인천대학교, 2003호, 1984.
 8. KS F 2405 : 콘크리트의 압축강도 시험방법.
 9. Y. S. Cho, "Non-destructive testing of high-strength concrete using spectral analysis of surface waves, NDT & E International", 36, 2003, pp. 229-235.
 10. Nicholas J. Carino, The Impact-Echo Method : An Overview, Contribution of National Institute of Standards and Technology.
 11. Ohtsu, M., Watanabe, T., "Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo method for flow detection", NDT&E International, V. 35, Issue 3, Apr. 2002, pp. 189-196.
- (접수일자 : 2007년 7월 13일)