

복합 비파괴시험법에 의한 현장 콘크리트강도추정의 지침안

權 相 水

(주) 한서엔지니어링
콘크리트비파괴계측사업부 부장

●머릿말

오늘날에 있어 구조체에 타설된 콘크리트의 품질신뢰성을 둘러싼 여러가지의 문제가 크다란 관심을 불러 일으키고 있다. 그래서 현재 콘크리트 품질관리용의 원주공시체에 의한 압축강도와 구조체에 타설된 콘크리트의 압축강도와는 거의 일치되지 않는다는 것은 주지의 사실이다. 이때문에 미국 및 유럽에서는 공시체에 의한 축진강도의 시험과 구조체에 타설된 콘크리트의 비파괴시험법을 토대로 하여 콘크리트의 새로운 품질관리체계에 대한 검토가 진행중에 있다. 그리고 재래의 콘크리트 비파괴시험법은 아무래도 강도추정이 정확하다고 확신하기가 어렵기 때문에 이와같은 새로운 방식의 품질관리법을 구체화하기 위해서는 콘크리트강도의 추정정도를 향상시키기 위한 여러가지의 요인분석 및 새로운 비파괴시험법의 개발 내지는 표준화가 강력하게 요망된다.

콘크리트의 비파괴시험법에 관한 역사는 오래되어 1934년~1935년에는 이미 영국, 독일, 소련 등에서 표면경도법 및

인발법 등의 비파괴시험법이 개발되어 있었고, 1948년에 스위스의 슈미트에 의해 슈미트시험기가 개발된 이래로 이미 40년이 경과했다. 이동안 필자가 1984년 9월호의 본협회지에 소개한 “콘크리트비파괴시험법의 종류 및 특성”에도 언급한 바와 같이 대단히 광범위하게 각종의 비파괴시험방법이 제안되어 왔지만 구조체에 가설된 콘크리트의 강도를 정확하게 오차없는 방법이 지금까지 개발되었다고 하기는 어려운 형편이다. 이것은 본래 파괴하지 않으면 알 수 없는 구조체의 민감성에 속하는 강도의 특성을 비파괴 측정방법인 반발경도, 초음파전파속도, 탄성계수 등, 구조체의鈍感性에 속하는 물리적성질에서 추정하려고 하는데서 근본적인 모순이 있기 때문이다. 그럼에도 불구하고 전술한 바와 같이 콘크리트 구조물의 품질신뢰성의 문제점에 대해 비파괴시험법에 관한 연구 활동이 동구권을 비롯한 콘크리트 역사가 오래된 나라에서 최근 급속하게 증가하고 있는 실정이다. 그래서 본고에서도 현재까지 제안되어 왔던 콘크리트의 비파괴시험법중에서 실용성면에 있어서나 추정

정도면에 있어서나 금후에 있어 가장 우수하다고 인정이 되는 음속법과 반발경도법에 의한 복합비파괴시험법에 대해 소개하고자 한다. 당기의 복합 비파괴시험법은 RILEM(국제재료구조 시험연구기관연합)에서 1976년에 국제규격을 제정하기 위한 위원회를 설치하여 1977년에 규격공표되어 동구권 및 서구유럽의 여러나라에서도 이미 RILEM 지침에 의한 각 나라 나름대로의 규격을 제정하여 활용하고 있는 실정이다. 그리고 작금의 국내 시공 현실 또는 콘크리트 구조물의 품질 및 시공성을 감안할 때 현재 세계적인 추세에 따라 시험실에서의 파괴시험과 더불어 정상적 평가기준을 얻기 위해 가급적 빠른 시일내에 규격을 마련하여 국내의 모든현장에서 이러한 비파괴 시험방법이 활용되도록 제도적 장치가 마련되어야 하겠다.

●초음파음속과 반발경에 의한 복합비파괴시험법

1. 시험일반

1-1 초음파음속법과 표면 반발경도법의 복합 시험법은 서로 다른 두 종류의 비파괴 특성을 갖는 측정방법을 통해 현장 콘크리트의 제반=모든 상태를 추정할 수 있는 방법을 제시해 주고 있다.

1-2 상기방법으로 측정된 콘크리트의 강도는 비파괴추정이 갖는 특성을 콘크리트강도로 전환할 때 같은 부류의 강도에 대해서는 그것에 관한 연구가 뒤따라야 한다.

1-3 본 지침안은 특별히 비파괴로 측정된 특성을 콘크리트 압축강도로의 환산에 대해 언급하고 있으나 인장강도, 휨인장강도, 전단강도와 같은 다른 종류의 콘크리트 강도도 마찬가지로 운용이 가능하다.

1-4 본 지침안은 정육면체 시편의 강도를 기준으로 했으나, 원형공시체 및 프리즘시편 등과 같이 형태가 다른 시편에 대해서도 응용될 수가 있다.

표 1. 골재의 크기에 따른 시편치수

최대입도	시편 크기
φ (mm)	a (mm)
15	100
30	150-200
70	300

다. 최종소거조건은 반발치가 3 이상이어야 한다.

d) (c) 조건이 충분하지 못하면 소거된 수치가 평균치 계산에 다시 도입되어야 한다.

2-16. 시편에서의 표면경도 시험부위 유효치가 6 이상이어야 한다.

2-17. 반발경도치는 다음과 같이 측정수치중 소거되지 않은 수치를 산술평균치로 나타낸다.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{k} \quad (6)$$

n : 평균 반발경도치

2-18. 압축강도시험(파괴시험)은 눈금을 3번 조정으로 (control third) 시편의 파괴상태를 분명히 확인할 수 있도록 한다.

2-19. 재하속도는 시편의 파괴상태가 30초 이상(1분 이상이면 더욱 양호)의 시간이 걸려 발생할 수 있도록 2-5kg/cm²의 한도로 한다.

2-20. 시편의 실험치는 3가지의 자료(즉, 음속평균치: VL, 반발평균치: n, 압축강도치: Rc)가 조합이 되어 이루어진다.

2-21. 실험치는 다음과 같은 다축으로 구성되어 도시된다.

a) 음속-X축(가로좌표), 반발치-Y축(세로좌표)

b) 음속-X축(가로좌표), 압축강도치-Y축(세로좌표)

a)의 경우는 실험치가 X, Y축사이에 압축강도치의 곡선이 존재하게 된다.

그리고 b)의 경우는 실험치가 X, Y축사이에 반발치의 곡선이 있게 된다. 이 두가지 형태의 도시방법은 양쪽 모두 이용이 가능하다. 비파괴방식을 똑같은 조건으로 놓는 것 때문에 a) 방식이 b) 방식보다 선호된다.

2-22. 실험결과치를 기본으로 하여 축의 도시방식에 따라 해당강도치의 곡선(동강도치), 또는 해당 반발치의 곡선(동반발치)이 구성된다. 이 그래프의 결과는 수평선 항목에 반발치를, 수직선 항목에 음속치로 하는 형태의 Double Head Table로도 나타낼 수가 있다.

2-23. 기본 강도환산도를 이용한 표준 콘크리트의 강도 산출에 대한 정확도는 다음의 식에 의해서 산출된다.

$$C_v = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{R_{st} - R_{pr}}{R_{pr}} 100 \right)^2}{k-1} \% \quad (7)$$

여기에서 C_v -편차계수, R_{st} -비파괴 측정을 통해 산출된 콘크리트 강도, R_{pr} -압축시험에 의해 산출된 콘크리트 강도, k -사용시편의 수.

2-24. C_v 계수의 수치가(8)의 조건과 일치한다면, $C_v \leq 12\%$ -(8).

기본 강도환산도는 만족할만한 상태이다. 만일 C_v 의 수치가 12% 이상이 되면 실험프로그램에서 편차를 일으킨 원인을 찾아 그것을 제거한다.

3. 영향계수설정

3-1. 영향계수는 현장콘크리트의 실제강도를 얻기 위해 기본 강도환산도에 의해서 나온 결과치에 대한 보정계수이다.

3-2. 기본 강도환산도에서 나온 결과치에 대한 보정은 다음과 같다.

$$R_r = R_{st} \cdot C_t$$

여기에서, R_r -현장콘크리트의 실제 강도, R_{st} -기본 강도환산도에 의해 비파괴 측정으로 산출된 표준 콘크리트의 강도, C_t -전체 영향계수.

3-3. 전체 영향계수는 시편이 있거나 현장 시험시, 콘크리트 구조물에서 Core를 추출할 수 있다면 실험치 설정이 가능하다. 그리고 시험대상 콘크리트의 배합상태를 알고 있으면 준이론적인 설정이 또한 가능하다.

3-4. C_t 계수의 실험적 설정은 시험시, 시편이나 코어가 있을 경우 비파괴 및 파괴시험을 통해 다음식의 계산과 일치 될 것이다.

$$C_t^{exp} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{R_{pr}}{R_{st}} \right)_i}{k} \quad (10)$$

여기에서, C_t^{exp} -실험에 의해 설정된 전체 영향계수, R_{pr} -파괴압축강도, R_{st} -기본 강도환산도에 의한 비파괴 표준 콘크리트의 압축강도, k -시편 또는 코어의 개수(시험당시의).

주: 현장 콘크리트 시험시 코어를 추출하기전 추출부위에 반발 및 음속시험을 하도록 한다.

3-5. 전체영향계수의 준이론적 설정은 콘크리트에 영향을 줄 수 있는 여러가지의 요인의 운용에 달려있다.

$$C_t^{theory} = C_c \cdot C_d \cdot C_a \cdot C_{\phi} \cdot C_G \cdot C_m \quad (11)$$

여기에서, C_t^{theor} -준이론적 전체영향계수, C_c -시멘트종류에 의한 영향계수, C_d -단위시멘트량에 의한 영향계수, C_a -골재 종류(상태)에 의한 영향계수, C_{ϕ} -골재 최대크기에 의한 영향계수, C_f -0~1mm의 세골재율에 의한 영향계수, C_m -혼화제에 의한 영향계수.

3-6. 부분적인 영향계수는 연구 프로그램에 의해 설정된다. 영향계수를 구하기 위해 표준 콘크리트와 같은 배합을 가진 모의 시편과 여러가지 다양한 배합을 가진 콘크리트의 영향계수를 산출할 수 있도록 그것에 해당하는 시편들을 함께 준비하고 시험한다. 시편의 수는 가급적 10개 이상으로 하는 것이 좋다. 예를 들어 C_d 계수를 설정하려면 단위시멘트량 300kg/m³의 시편을 10개를 준비한다면 시멘트 단위용량 200kg/m³, 400kg/m³, 500kg/m³, 600kg/m³인 시편도 마찬가지로 같은 수의 시편을 준비해야 한다.

3-7. 시편은 비파괴(v_L, n) 및 파괴 방식으로 시험된다. 시편각조에 대해 다음과 같이 계산한다.

$$C_{x1} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{R_{pr}}{R_{st}} \right)_i}{k} \quad (12)$$

여기에서, x_1 -수치 1에 대한 parameter x , R_{pr}^i -시편 i 에서 얻어진 결과치, R_{st}^i -표준 콘크리트의 기본 강도환산도를 통해 비파괴 시험에 의한 시편에서 얻어진 결과치, k -각조의 시편개수.

3-8. 모의 시편 영향계수는 수치1과 같아져야 한다. 1과 같을 경우, 다른 여러가지의 parameter x 에 대해 영향계수 수치들은 최종확정수치이다. 만일 모의시편의 영향계수가 1이 되지않는 경우, 다음식을 통해 모든 영향계수가 같은 비율로 수정되어야 한다.

$$C_{xi}^{final} = \frac{C_{x1}}{C_{x0}} \quad (13)$$

여기에서, C_{x0} -모의 시편조의 영향계수치.

3-9. 이것에 대한 나라마다의 표준규격을 제정할 경우 그나라의 실정에 맞는 영향계수를 정하여 도표로 나타내어야 한다. 그렇지않을 경우 (3-8) 항목에서 기술한대로 특별한 연구가 이루어

1-5. 강도환산도를 만들 때 요구되는 시편의 최소한의 크기는 표 1에 나타난 바와 같이 골재의 최대 크기에 따라 달라진다.

1-6. 음속법의 측정 방향은 길이 방향과 직접전파법(Direct transmission method)이 있다.

1-7. 초음파 측정기의 트랜듀서의 이용가능 주파수는 40~100KHz이고 예외적으로 25~200KHz의 것도 허용된다. 그러나 후자의 경우 강도환산도(Calibration curves)를 얻기 위해 이용되는 트랜듀서와 현장에서 실제 운용하기 위해 사용되는 트랜듀서 사이에는 일정한 기준이 설정되어야 한다.

1-8. 초음파펄스의 전파시간을 측정하기 위해 이용되는 측정機器는 자체 측정오차를 검사하기 위한 수단 또는 기구(Calibration Bar)가 있어야 한다.

1-9. 초음파음속 측정시, 전파시간의 오차는 $1\% \pm 1 \text{Div}$ 이내이다.

1-10. 초음파 측정시, 전파측정거리의 오차는 실험실에서 $\pm 0.5\%$ 이내, 현장에서는 $\pm 1\%$ 이내여야 한다.

1-11. 본 지침안에서 거론된 반발경도의 측정은 N타입의 슈밋트햄머로 시행되어야 한다. 다른 부류의 시험기구에 의한 표면경도법의 응용은 동일한 시험기구가 강도환산도 또는 현장측정을 위해 이용되든지 반발경도법을 통해 상응되는 상관관계가 설정되는 조건으로써만이 사용이 가능하다.

1-12. 반발경도 측정에 이용되는 시험기구는 자체 측정오차를 확인할 수 있는 검사기구(Test Anvil)가 있어야 한다. 정상적인 반발수치에서 5Division 이상 오차가 나는 것은 사용할 수가 없다.

2. 기본 강도환산도의 구성

2-1. 음속과 반발에 의한 비파괴 복합추정에 의해 현장 콘크리트를 측정하기 위한 방법론은 기본 강도환산도에 의한 표준콘크리트의 강도측정과 보정계수 설정을 기초로 한 것이다.

2-2. 전체영향계수라고도 하는 보정계수는 실제 현장 콘크리트와 표준 콘크리트의 배합에 따른 모든 차이를 고려해야 한다.

2-3. 기본 강도환산도를 산출하기

위해 이용되는 표준 콘크리트의 선택은 다음의 Parameter를 일정하게 하는 것을 전제로 한다.

- 시멘트의 종류와 등급
- 단위 시멘트량
- 골재의 상태(종류)
- 골재의 입도(크기)
- 혼화재 유무

실제 응용에 이용될려면 이 Parameter를 가장 평균적이고 보편적인 수치에 가깝게 선택하는 것이 유리하다.

주: 상기의 예는 표 2를 참조 바람.

2-4. 배합, 타설, 양생조건에 따른 나머지 Parameter로 어떤 수치를 가질 수 있다. 시령은 3일 이상이 되어야 한다.

2-5. 기본 강도환산도를 얻기 위해 필요한 시편의 수는 시험자의 경험에 따라 60~200개로 한다.

2-6. 기본 환산도를 구하기 위해서는 차이가 나는 실험적 항목을 얻기 위해 다음의 Parameter는 각각 달라질 수가 있다.

- 함수량
- 밀도
- 콘크리트 경화도(3일-90일 사이)
- 양생조건(건조 양생, 수중 양생) 필요할 경우, 다음과 같이 제한된 변수(Variation)가 가미될 수 있다.
- 세골재율 $\pm 6\%$
- 단위시멘트량 $\pm 10\%$

2-7. 시편은 동일한 시령에 파괴 및 비파괴 방법으로 시험한다.

2-8. 초음파 음속 측정은 직접법(direct transmission method)으로 하고, 시편의 크기에 따라 2-4 point를 모울드 면에 시험한다.

2-9. 시험시, 시편의 치수는 다음의 사항에 유의해야 한다.

- 초음파의 전파교차방향에 따른 치수 $a \geq 2\lambda$ —(1)
a: 시편의 변 또는 직경의 치수

λ : 파장(Wave length)

특별한 경우 다음과 같은 조건이 허용된다.

$$a \geq 1.4\lambda \text{ —(2)}$$

- 초음파의 전파방향에 따른 치수 $s \geq 2\lambda$ —(3)

이러한 치수는 항목(1, 5)에 주어진 조건을 참조해야 한다.

2-10. 신뢰할만한 평균치를 얻기 위해 전파속도의 최대 및 최소치 사이의 차이는 5%를 넘어서는 안된다.

2-11. 길이방향의 음속은 다음과 같이 산출한다.

$$V_L = \frac{h}{T} / \text{m/s/} \text{ —(4)}$$

여기서 h - 전파거리, T - 전파시간(필요한 경우, 콘크리트에 이미 보정된 시간)

2-12. 시편에서 측정된 음속의 대표치의 산술평균치는 다음과 같다.

$$\bar{V}_L = \frac{\sum_{i=1}^k V_{Li}}{k} \text{ —(5)}$$

2-13. 표면반발경도 측정은 N타입의 슈밋트햄머로 모울드면 및 평탄한 부위에 시험한다. 기포 또는 큰 골재가 있는 부위의 측정은 산정대상에서 제외된다.

2-14. 반발경도의 시험시 완충작용으로 인한 충격에너지의 감소를 피하기 위해 완전히 고정해야 한다. 슈밋트햄머의 축은, 시험면에 대해 수직 또는 수평이어야 한다.

2-15. 큰 입도($\phi > 7\text{mm}$)의 골재 부위에서의 시험을 피할 수 있도록 다음과 같은 기준(직접적인 시험결과의 처리)이 이용된다.

- 측정된 최소 반발치에 대해 부위반발치가 5 이상의 결과치에 대해서 우선 소거한다.
- 남은 결과치(최소한 5부위의 반발치)의 평균치를 임의 계산한다.
- 임의 평균치에 소거된 반발치를 비교함으로써 다시 한번 소거치를 확인한다

표 2. 기본 Parameter

Nr. Parameter	Romania	Italy	Spain
1. Type of cement	Pz 35(Pz 400)	Pt 425	PA 350
2. Cement Dosage (kg/m ³)	300	400	300
3. Max grain size	30	30	30
4. Fine fraction(0-1mm) %	12- (16)	26	20
5. Nature of Aggre-gate	Silico-Limestone	Limestone	Silicious

져야 할 것이다.

“예” 표3 및 4에서 루마니아 및 이탈리아규격의 도표를 참조바람.

표 3. 시멘트 종류

Cc	R ·	· I
Pt 425	—	1.00
Pz 400	1.00	—
M 400	0.96	—
Pz 325	—	0.94
P 300	0.90	—

표 4. 단위시멘트량

Cd	R ·	· I
200	0.88	0.76
250	0.94	0.82
300	1.00	0.88
350	1.07	0.94
400	1.15	1.00
450	1.21	1.06

3-10. 전체영향계수가 실험적방법과 준이론적인 방법을 통해 동시에 설정될 수만 있다면 두가지 방법을 함께 이용하는 것이 바람직하다.

$$\frac{C_t^{\text{theory}} - C_t^{\text{exp}}}{C_t^{\text{exp}}} < 20\% \quad (14)$$

상기 결과의 수치가 20%이하일 경우 전체영향계수는 충분히 신뢰되는 수치이다. 그러나 일반적으로 다음식에 준한다.

$$C_t = \frac{C_t^{\text{theory}} + C_t^{\text{exp}}}{2} \quad (15)$$

만일 (14)의 관계식에서 주어진 차이가 20%이상이라면,

$$\frac{C_t^{\text{theory}} - C_t^{\text{exp}}}{C_t^{\text{exp}}} > 20\% \quad (16)$$

잘못된 수치를 제거하기 위해 그러한 차이에 대한 원인분석이 있어야 할 것이다. 가장 빈번하게 제거되는 수치는 준이론적 수치이다.

4. 현장콘크리트의 강도설정

4-1. 비파괴 시험대상 부위의 선택은 설계자, 고객의 요청부위, 감독관, 시험프로그램에 의해 다음과 같은 기준에 따라 이루어진다.

- a) 하중의 종류
- b) 하중의 정도
- c) 부재면

d) 준비, 장소선택, 콘크리트 경화내력 등.

4-2. 음속 및 반발의 복합추정법은 문제기동 등의 결함을 찾는데는 적합하지 않다. 그러한 경우는 초음파 음속법 및 방사선법(radiographic or radiometric method)이 더욱 능률적일 수가 있다.

4-3. 겹쳐있는 구조물이나 표면과 내부의 특성(강도, 밀도 등)이 다른 콘크리트에는 복합추정법(음속과 반발)이 적합하지 않다. 그러한 경우에도 음속법이나 표면음속법을 사용하는 것이 유리하다.

4-4. 복합추정법(음속, 반발)의 주된 응용목적은 통상적인 현장부재 콘크리트의 단면을 통해 콘크리트의 강도를 설정하는 것이다.

4-5. 시험하기로 결정된 부재에서 시험면을 선정할 때 다음과 같은 사항이 준수되어야 한다.

- a) 시험해당 section은 부재의 축에 대해 수직이어야 한다.
- b) 각 부재에 대해 적어도 3section은 조사 되어져야 한다.
- c) 시험대상면은 부재중 가장 크게 응력이 집중되는 곳을 선택한다.
- d) 시험면은 부재의 길이방향을 따라 골고루 분포되어야 한다.

4-6. 초음파 음속의 측정은 부재의 시험부위를 선정할 때 다음의 사항이 준수 되어야 한다.

- a) 모르타르 다듬질면을 피해야 한다.
- b) 기동의 경우 측정가능방향(x, y방향)은 전부 시험해야 한다.
- c) 보의 경우는 시험부위 선정시, 가장 압축하중이 크게 작용하는 곳을 우선한다.
- d) 가급적이면 직접전파법으로 한다. 그러나 직접법을 사용할 수 없는 경우는 반직접법(사변법) 또는 간접법(표면법)도 허용된다.

e) 측정방향과 철근방향이 평행하거나 철근이 밀집된 부위는 피할 것.

f) 부재표면의 가장자리에서 최소한 100mm는 떨어져서 시험할 것.

4-7. 반발경도의 측정은 부재의 시험부위를 선정할 때 다음 사항을 준수해야 한다.

- a) 각 부위는 시험부위선정시, 음속측정부위와 동일해야 한다.

b) 시멘트 다듬질은 피해야 한다.

c) 철근이 있는 부위는 피한다.

d) 기포 또는 공극이 많은 부위는 피한다.

4-8. 음속측정시, 시험대상면당 일반적으로 3번의 측정이 이루어져야 한다.

4-9. 반발경도측정시, 유효반발수치의 부위수가 6 이상이어야 한다.

4-10. 강도 산정할 때 각각의 해당 시험부위에서 측정된 음속치와 반발치는 각각 계산되어져야 한다.

4-11. 음속 및 반발의 복합 비파괴 추정법의 해석시, 중요한 요인은 단면을 통해 얻어진 콘크리트 강도의 평균치이다.

4-12. 콘크리트의 강도계산은 다음의 사항에 따른다.

- a) 시험대상지역에서 개개의 반발치 및 전파시간의 직접측정
- b) 각각의 시험기기에 대해 (4)-(6)항 및 그것의 환산강도시험의 결과치에 따라 시험대상지역에서의 각각의 음속치 및 평균반발치의 계산
- c) (2-19) 및 (2-20)항목에서 규정한 그래프 내지는 그것과 동일한 도표를 통해 표준배합을 한 콘크리트의 시험부위에 대해 비파괴 특성에 해당하는 등가의 강도계산
- d) 현재의 조건에 따라 (3-4)-(3-8)항목에 의한 실험적내지는 준이론적인 전체영향계수의 설정
- e) 표준 콘크리트의 강도 및 전체영향계수에 대한 상관관계를 통해 현장의 실제 콘크리트의 강도를 계산

4-13. 지금까지 기술한 방법에 의한 현장 콘크리트 강도추정의 정확도는 다음과 같이 추정된다.

- a) 콘크리트의 배합비와 시편 또는 코어가 있을 경우 오차는 10~13% 이내
- b) 시편 및 Core만 있을 경우의 오차범위는 12~15% 이내
- c) 콘크리트 배합비만을 알고 있을 경우의 오차범위는 15~20% 이내

4-14. 전체영향계수를 설정하기 위해 도움이 될 아무런 요소가 없을 경우라도 상기의 방법은 응용될 수 있다. 그러한 경우의 이방법에 의한 정확도는 시험자의 경험의 정도에 따라 달라질 것이다.