

콘크리트의 표면 경도 시험법

Surface Hardness Test for Concrete



권영웅*

1. 서 언

콘크리트는 만들어진 후 세월이 감에 따라 표면이 딱딱해지고 그 재령(age)에 따라서 경도(hardness)가 달리 나타나게 되는데, 콘크리트 전문가들은 이런 성질로부터 콘크리트의 재료적 특성을 구하고자 하였다.

이는 1930년대부터 Jones의 함몰시험법(indentation methods:독일,1934), Williams의 피스톨 시험법(pistol methods:영국,1936), Frank의 스프링햄머 시험법(spring hammer methods) 및 Einbeck의 회전햄머 시험법(pendulum hammer test)으로 개발 응용되었으며, 마침내 오늘날과 같은 슈미트 햄머에 의한 반발도 시험법(rebound hammer test)으로 까지 발전하게 되었다.

이러한 시험법들은 일찌기 콘크리트의 균질성(uniformity)이나 강도(strength) 및 콘크리트 품

질의 상대적 비교 수단으로 사용되어 왔다.

그러나 통계학의 발달과 더불어 마침내 1980년에 들어와 콘크리트의 강도를 구하기 위한 수단으로써 발전되어 ASTM과 ISO 등에서 반발도 시험법에 의한 콘크리트 강도를 구하는 표준 시험법이 등장하게 되었다.

특히, 본 특집에서는 표면 경도 시험법의 발전적 과정을 간단히 고찰하고 슈미트 햄머 시험법에 관한 강도추정법을 고찰하되, 이 시험법의 기계적 성질과 통계처리 과정에서 영향을 미치는 요인들에 대해 보다 상세히 알아 보고자 한다.

2. 발전적 고찰

2.1 피스톨 시험법

Williams는 1936년에 인텐터(indenter)로서 실탄(ball)을 발사하여 그 직경흔적을 확대렌즈 등으로

* 정회원, 인천대 건축공학과 교수

측정하여 콘크리트의 경도를 추정하였는데 중·고 (medium and high)강도 콘크리트에 매우 잘 들어맞았다. 이 때 콘크리트의 함몰 깊이(indentation depth) 1.5mm당 강도는 대략 70kg/cm² 이었으며 이후 콘크리트 강도를 충격(impact)에 의한 표면의 함몰깊이와 상관관계에 놓으려 하였는데 이는 1960 년대에 러시아의 Skramtaev, Leshchinszy 등에 의해서도 시도되었다.

2.2 스프링 햄머 시험법

이 시험법의 원리는 튜브관(tubular frame)에 스프링 조절 장치를 장착하되 햄머 단부(tip)에 직경이 다른 강구(ball)를 설치하여, 충격에 의해서 스프링을 작동시키는 방법이다. 이 때 시험 눈금을 대략 20 개 정도 취하여 함몰깊이(indentation)와 콘크리트 강도사이의 상관 관계를 구하려 하였다.

이 때 스프링 상수를 50kg/cm² 또는 12.5kg/cm² 로하여 콘크리트 표면의 함몰깊이를 강구직경의 0.3 ~0.7 사이에 있게 하였다.

2.3 회전 햄머 시험법

Einbeck에 의해 개발된 회전 햄머 시험법은 그림 1과 같다. 이 때 회전햄머의 구성 원리는 팔의 길이 55cm, 햄머 질량 22kg의 햄머로 콘크리트를 강타(impact)하여 콘크리트 표면의 함몰 깊이(indentation)를 구하는 것이다.

이때 햄머의 낙하는 90° ~ 180° 로하여 완전 강타(full impact)하는데, 함몰직경과 깊이를 구하고 이를 다시 콘크리트 강도와 상관시키는 것이다. 이 방법의 단점은 수직면에서만 사용 가능하다는 점에서

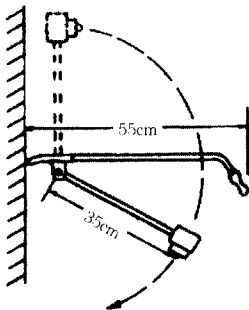


그림 1 회전 햄머의 작동원리

Frank의 스프링 햄머법과 상이하다.

2.4 반발도 시험법

스위스의 엔지니어 Schmidt는 1948년에 스프링의 반발도를 이용하여 콘크리트의 경도를 구하였다. 이 방법은 곧 취리히의 스위스 연방 재료 시험소로 하여금 오늘날과 같은 슈미트 햄머를 등장하게 하였고, 전세계적으로 보급되어 사용하게 하였다.

3. 슈미트 햄머 시험법

3.1 시험법의 원리

슈미트 햄머 시험법의 기본원리는 콘크리트의 경도(hardness)를 강도(strength)로 변환시키는 방법이다. 이 때 슈미트 햄머 경도는 반발도(rebound index)로 대신하되, 그 상관성은 이론적으로 다소 떨어진다. 그러나 제한된 범위내에서는 콘크리트의 강도와 반발도 사이에서의 상관관계가 잘 성립한다.

3.2 슈미트 햄머의 제원

슈미트 햄머는 중량 18kg로서 현장과 시험실에서 공히 사용할 수 있다. 최근에는 스위스의 proceque사에서 대형 슈미트 햄머를 등장시키고 있으나 사용은 거의 되지 않고 있다. 그 전형적인 형태와 작동 원리는 그림 2와 같다.



Schmidt rebound hammer

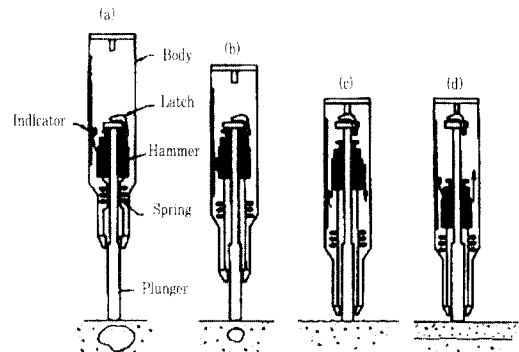


그림 2 슈미트 햄머의 작동모형도

슈미트 햄머의 제원은 튜브관, 플런저 로드, 햄머 스프링으로 이루어지며 햄머를 플런저 로드와 잠귀 주는 걸쇠(latch)와 반발도를 나타내주는 미끄럼자(sliding rider)의 부품으로 이루어진다. 반발눈금은 10~100으로 나타내지며 반발거리는 반발도(rebound number or rebound index)로서 나타낸다.

3.3 시험 방법

- ① 시험을 행하기 위해서 먼저 잠겨진 플런저를 푼다.
- ② 플런저를 콘크리트 면에 수직으로 대고 시험물체 쪽으로 민다(그림 2(a)).
- ③ 몸체(body)가 밀리면 햄머와 연결되어 있는 스프링이 늘어나게 된다(그림 2(b)).
- ④ 이 때 몸체가 끝까지 밀리면 걸쇠는 자동적으로 풀려지게 되고, 스프링에 저장되어 있는 에너지는 햄머를 플런저 단부로 밀어낸다(그림 2(c)). 그 순간 햄머는 플런저의 돌출부(shoulder)를 때리게 되고 반발하게 된다. 이때의 눈금으로부터 반발도를 읽는다(그림 2(d)).
- ⑤ 플런저가 후퇴 위치에 있을 때 옆 버튼을 눌러 잠근다.
- ⑥ 반발도는 햄머의 중량 때문에 수평 · 수직 · 상 · 하 또는 경사방향에 따라서 영향을 받게 되므로 각도 보정을 해준다.

3.4 상관 분석

모든 슈미트 햄머에는 시험기기 제작자에 의해서 만들어진 상관식이 인쇄 · 부착되어 있다. 그러나 이들의 상관식은 사용재료와 환경조건이 바뀌게 되면 상관 정도가 달라지므로 사용상의 제한을 받는다. 그렇기 때문에 기기에 붙어있는 추정식이나 기타 시험식을 인용하는 것 보다는 조사 대상 시험체나 표준공시체로부터 직접 상관식을 만들어 사용함이 타당하다.

본 절에서는 작업현장 시험공시체로부터 상관식을 만드는 전형적인 방법 2가지를 소개하고자 한다.

(1) 제 1 방법

- ① 작업현장에서 사용되고 있는 강도범위

(strength range)내에서 표준 시험 공시체(실린더 혹은 큐브)를 제작한다. 이때 시멘트와 골재는 현장 콘크리트에 사용되는 것이 어야 하며 습윤상태에서의 양생조건과 시방서에서 요구하고 있는 재령을 지킨다.

- ② 캡핑(capping)이 끝나면 압축시험기에서 콘크리트 강도의 15%에 해당하고 압축재하를 실시 하되, 공시체의 흡수상태는 SSD로 한다.
- ③ 반발도는 15개로 하되 120° 방향에서 각각 5개 씩 구하며, 이때 타격위치는 공시체의 2/3 중앙 부로 한다.
- ④ 15개 반발도의 평균 반발도를 구한다.
- ⑤ 모든 실린더에 대하여 이 과정을 반복한다.
- ⑥ 압축강도시험을 행한후 X-Y 좌표상에서 반발도와 강도를 1:1로 대응시켜 표기한다.
- ⑦ 최소자승법의 원리에 의해서 반발도와 압축강도의 관계를 직선 혹은 곡선으로 나타낸다.

(2) 제 2 방법

본 방법은 1994년 KCI-JCI joint seminar에서 발표된 내용으로서,

- ① 작업현장에서 사용되고 있는 200~300kg/cm² 설계강도 범위에서 상당수의 시험개소를 정한다.
- ② 철근탐사를 행하여 앞으로의 코아 천공위치를 준비한다.
- ③ 시험 엔벨에 의해서 슈미트 햄머를 보정한다.
- ④ 철근탐사의 결과에 따라 철근이 없는 위치에서 20번의 반발도와 그 평균 반발도를 구하여 그 평균값을 그 위치에서의 반발도로 한다.
- ⑤ 콘크리트 코아를 채취한다.
- ⑥ 코아를 캡핑한다.
- ⑦ 코아 압축 강도시험을 통하여 코아강도를 구한다.
- ⑧ 코아강도를 보정하여 압축강도를 구하고 이로 부터 X-Y좌표상에서 상관관계를 나타내면 그림 3과 같다.
- ⑨ 4개의 회귀식을 각 보정환경조건에 따라 구함.

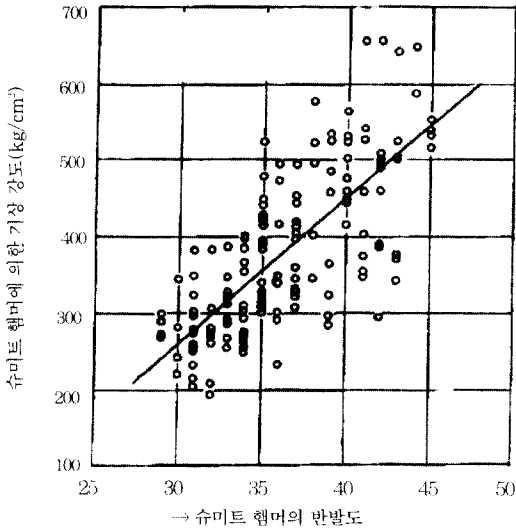


그림 3 반발도와 가압강도와의 상관도

3.5 상관식의 인용

3.4절에서 지적하였듯이 슈미트 햄머 시험법에 의한 강도는 시험환경(block)에 따라 그 영향이 크게 달라 나타남을 알 수 있다.

우리나라의 경우 일본 재료학회 시험식·일본건축학회 시험식·동경도 시험식 등을 인용하여 사용하고 있는데 이는 크게 잘못된 것이라 할 수 있다. 그렇기 때문에 기존의 강도식을 사용할 때에는 그 식이 만들어진 시험환경 조건을 고려하여 제한된 반발도 범위내에서 사용하여야 할 것이다.

4. 슈미트 햄머 시험의 영향 요인

슈미트 햄머 시험법이 비록 방대한 시험현장에서 빠르고(speedy), 경제적(inexpensive)이고, 편리한(easy) 방법이라고 하지마는, 사용에 있어서는 다음과 같은 요인-시험체의 표면상태, 시험체의 크기·형상·강성, 시험체의 재령, 흡수상태, 골재종류, 시멘트 종류, 몰드 종류 및 탄산화 등에 의하여 영향을 받게 되므로 이들을 고려하지 않으면 아니된다.

4.1 시험 기기

모든 시험에 있어서 가장 선행되어야 할 것은 사용 시험기기가 제대로 작동하느냐를 확인하는 것이다.

슈미트 햄머를 사용함에 있어서는 시험 전·후를

통하여 반드시 시험 앤빌(test anvil)을 통하여 기기를 검증하여야 되는데, 이때 시험기기의 검증에 사용되는 앤빌의 표준 반발도(Ra)는 80으로 하되, 그렇지 못할 경우에는 반발도를 보정하여야 할 것이다.

여기에서 주의 할 것은 일반 슈미트 햄머의 반발도는 탄성 스프링의 성능하에서 오는 것이 아니라 주로 눈금자(sliding rider)에 미세 먼지가 끼어 반발도가 적게 나오고 있으므로 이를 확인하여 반발도를 보정해야 한다. 이때 먼지 제거 윤활 스프레이를 뿌릴하거나 윤활유를 칠하여 눈금자의 이동에 지장이 없게 한 다음, 앤빌 시험(anvil test)을 다시 하여야 할 것이다.

여기에서 또 한가지 유의하여야 할 것은 사용 슈미트 햄머와 시험 앤빌은 동일 제작사에서 제작된 것을 사용할 것을 잊지 말아야 한다.

4.2 콘크리트 표면 상태

콘크리트의 표면상태는 시험 결과의 정확도에 매우 큰 영향을 미친다. 만약 거칠은 면에서 시험을 행하면 플런저 단부(plunger tip)가 콘크리트의 파괴(crushing)에 과도한 에너지를 소비하여 반발도의 감소를 가져온다. Kolek과 Greene의 시험 결과에 의하면 금속이나 목재 형들로 만들어진 콘크리트 표면에 의한 반발도는 5~25%정도 차이가 나는 것으로 보고되어 있다.

실제로 마모 그라인더를 사용하여 표면을 매끄럽게(smooth)하여 사용하고 있으나 그렇지 않을 경우 시험값의 일산(scatter)을 방지하기 위하여 보정계수나 보정표를 사용하여야 할 것이다.

4.3 시험체의 치수·형상 및 강성

콘크리트 보와 벽체에 있어서 단면이나 시험체가 작거나 얇으면 충격시에 변위가 발생하여 반발도의 감소를 가져온다. 이러한 강성 저하는 약 15%정도의 반발도 감소를 가져온다.

4.4 시험체의 재령

콘크리트의 경도는 일반적으로 7일까지는 급격하게 증가되고 그 이후는 거의 일어나지 않는다. 그러나, 7일 이후에도 강도가 크게 증가되고 있고, 특히 Zoldners와 Victor의 시험에 의하면 동일 강도하에

서는 7일 콘크리트의 경도가 28일 콘크리트의 경도보다 높게 나타나는 것으로 밝혀졌다.

그렇기 때문에 오래된 콘크리트(old concrete)를 시험하고자 할 때에는 구조체로부터 반발도와 코어 강도를 구하여 그들의 직접 상관 관계식을 구할 필요가 있다.

콘크리트 강도가 70kg/cm^2 이하인 초기 재령 콘크리트는 슈미트 햄머의 사용을 제한할 필요가 있는데 이는 반발도가 너무 낮아 반발도의 정확한 판독이 불가능할 뿐만 아니라 콘크리트의 표면에 손상(damage)을 가져오기 때문이다.

4.5 콘크리트의 습윤상태

콘크리트의 습윤 정도와 표면의 습윤은 시험값을 평가하는데 결정적인 영향을 미친다.

Zoldner의 실험에 의하면 정상적으로 양생되고-기건 상태에 있는 시험체를 물에 담귀 SSD 상태에서 시험을 했을 때 건조상태보다도 반발도 값이 5이상 떨어지고 동일 시험체를 21°C 안에서 기건 상태로 두면 3일과 5일의 반발도가 각각 3, 5 정도 회복되는 것으로 밝혀졌다. Klieger는 3년된 콘크리트의 습윤 상태와 건조상태에서의 반발도 차가 10-12정도 나타남을 발견하였으며, 이 정도의 반발도는 대략 140kg/cm^2 의 콘크리트 압축강도 차가 남을 의미한다. 만약 현장에서의 습도가 불명확하다면 시험을 하기 몇 시간전에 미리 수중에 담그어 두고 SSD 상태와 비교하여 상관시키는 것이 좋다.

4.6 조골재의 영향

반발도는 일반적으로 콘크리트 골재의 종류에 따라서 달리 나타나는 것으로 보고되고 있다.

Klieger의 시험에 의하면 석회암 쇄석은 강자갈보다도 반발도가 약 7정도, 강도는 약 70kg/cm^2 적게 나타난다. Grieb는 동일 종류의 골재라 할지라도 채석지에 따라서 상관관계가 달라지며, 그림 4에서 보듯이 동일한 반발도에서도 그 강도가 $17\sim 39\text{kg/cm}^2$ 가 변하고 있음을 알 수 있다.

특히, Greene에 의하면 경량골재로 된 공시체와 구조체에서는 그 시험결과가 매우 크게 나타나는데, 일례로 팽창성 혈암(shale) 골재와 경석(pumice) 골재의 경우이며, 일반적으로 경량 골재는 압축강도

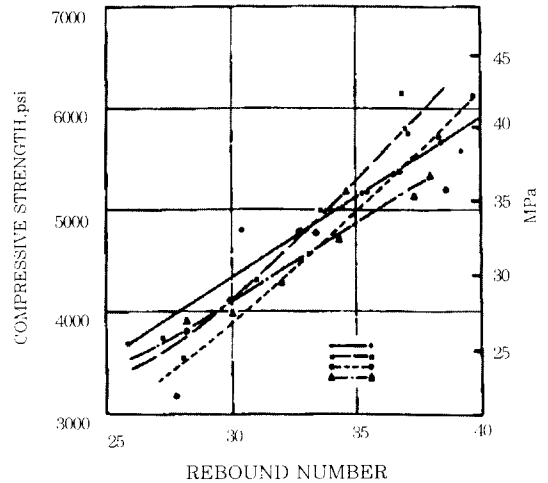


그림 4 골재의 종류에 따른 반발도와 강도관계

와 비례 관계로 나타난다.

4.7 시멘트의 영향

Kolek는 시멘트의 종류가 반발도에 큰 영향을 미친다고 하였는 바, 높은 알루미늄(high alumina) 시멘트에서는 보통 시멘트에서 보다 강도가 100%이상 높게 나오며 또한 유허이 많이 들어간(super sulfated) 시멘트는 50% 이상 낮게 나타내고 있다.

4.8 몰드의 영향

일반적으로 콘크리트 몰드(거푸집)가 금속제일 때는 이렇다 할 반발도의 차이가 나타나지 않지만 종이류 합판 몰드 또는 종이 카톤 몰드(paper carton mold)일 때는 그 차이가 많이 난다. 이는 종이 몰드가 습기를 흡수하여 콘크리트 표면의 W/C가 낮아져 이상강도가 나타나기 때문이다.

그렇기 때문에 종이류와 같이 흡수성이 강한 몰드나 몰드내부에 카톤을 사용하였을 경우에는 그러하지 않은 경우를 고려하여 보정할 필요가 있다.

4.9 탄산화의 영향

콘크리트 표면의 탄산화는 슈미트 햄머 시험의 반발도에 큰 영향을 미친다. 이러한 콘크리트의 탄산화는 오래된 콘크리트 일수록 커지며 수mm에서 20여 mm 두께까지 진전된다. 이러한 경우 그 반발도는 탄산화되지 않은 콘크리트에 비하여 약 50% 정도 높

게 나타나므로 적절한 보정계수의 사용이 요구된다.

5. 반발도와 강도 성향

5.1 반발도와 압축강도

콘크리트의 압축강도와 반발도는 일반적으로 상관 관계를 나타내고 있으나 그 신뢰도는 앞장에서 기술한 여러 가지 영향요인 등으로 인하여 크게 떨어지고 있다.

여러 문헌의 종합에 의하면 콘크리트의 압축강도는 평균 18~30%의 변동계수(cov)를 보이는 것으로 알려져 있으며, 강도 편차를 줄임으로서 그 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다.

그래서 여러 요인들을 잘 보정하기만 하면 콘크리트 강도의 신뢰를 $\pm 15\% \sim \pm 20\%$ 로까지 크게 낮출 수 있다. 그래서 일반 콘크리트 구조체로부터의 압축 강도는 $\pm 25\%$ 오차범위 내에서 측정할 수 있다.

한편, 조기 거푸집 탈형을 위해서 초기 재령의 콘크리트 강도를 구하고자 하는 노력이 시도되고 있는데 불행히도 이러한 시험의 노력에도 불구하고 적절하지 않은 것으로 알려지고 있다.

5.2 반발도와 휨 강도

Mitchel과 Klieger는 콘크리트의 반발도와 휨 강도 사이의 상관관계를 조사하였으나 이는 압축강도와의 관계보다도 그 유의(significance)수준이 크게 떨어짐을 밝혀내었다. 그는 보의 상단부 반발도가 측면 보다도 5~25%정도 낮게 나오며, 습윤상태와 골재종류에 따라서도 압축강도에서와 같은 상관관계를 나타내고 있음을 밝혀내었다.

5.3 반발도와 탄성계수

Mitchell과 Hoagland는 반발도와 콘크리트의 탄성계수와의 상관관계를 밝혀내려 하였으나 이들 사이에는 이렇다할 상관관계가 없는 것으로 밝혀졌다. 한편, Petersen, stoll, klieger 등에 의해서도 반발도와 동탄성계수 사이에서의 상관관계를 밝히려 하였다.

그들의 시험식에 따르면 압축강도에서와 마찬가지로 이들의 시험에서도 흡수 상태와 골재 종류가 큰 영향을 미치고 있음을 시사하고 있다.

6. 시험법의 표준화

1980년도 초기에 접어들면서 표면 경도 시험법은 그 한계성에도 불구하고 미국, 캐나다 등에서 표준화 단계를 맞게 되었다.

그러하여 초기 독일 규준에서 사용되었던 함몰 시험법(intentation method)은 사라지게 되고 반발도 시험법이 ASTM이나 ISO에서 채택되게 되는데, 그 표준 시험법의 주요 내용은 다음과 같다.

- (1) 반발도법은 현장 콘크리트 구조체의 균질성(uniformity)과 품질 및 성능저하의 평가 수단으로 사용될 수 있다.
- (2) 이 시험법은 콘크리트의 강도를 결정하는 주 수단이 될 수는 없다.
- (3) 이 시험법에서 나온 상관관계식은 건설중에 있는 방대한 현장의 콘크리트의 정보를 단시간에 그것도 가장 경제적이고 값싸게 얻을 수 있는 방법임을 부인할 수 없다.

7. 결론

반발도 시험법은 실험실이나 현장에서 사용콘크리트의 정보를 가장 빠르고 쉽게, 그것도 가장 경제적이면서도 구조체에 피해를 주지 않고 얻을 수 있는 방법중의 하나이다.

그러나 이 시험법을 사용할 때는 본문에서 기술한 사용상의 여러 제한들을 엄두에 두어야 함은 물론 콘크리트 구조체의 균질성 확인 방법이나 타 콘크리트와의 비교 방법이 아닌 압축강도 추정방법으로 지나치게 확대 해석되어서는 아니된다.

일반적으로 동일 상태에서의 콘크리트라 하더라도 반발도법에 의한 콘크리트 강도의 편차는 $\pm 15\% \sim \pm 20\%$ 수준에 있음을 명심하여야 한다.

참고 문헌

1. V.M Malhotra, N.J. Carino, "Handbook of Nondestructive Testing of Concrete," CRC press, 1991
2. Young-Wung, Kwon, "A Study on the Estimation of Concrete Strength in Existing Buildings Using

- NDT Results.” KCI-JCI Joint Seminar, Dec.,1994.
3. 권 영 웅, “콘크리트 소재 구조물의 강도특성시험에 관한 연구,” 콘크리트학회지, 1992
 4. J.M Bungey, S.G. Milland, “Testing of Concrete in Structures,” Blackie Academic & professional, 3rd ed.,
 5. ACI 228 Committee Report, “In-place methods for determination of strength of Concrete, ACI J. Mater., Sep./Oct., 1998
 6. V. M. Malhotra, “In Situ/Nondestructive Testing of Concrete,” ACI SP-82, 1984. 