

비파괴기법을 이용한 현장타설 콘크리트의 강도 및 내구성 평가

Strength and Durability Evaluation of Cast-in-placed Concrete by NDT(Non-Destructive Test)

이상민 Sang-Min Lee
비엔티엔지니어링(주)
대표이사

이호영 Ho-Young Lee
비엔티엔지니어링(주)
부사장

안홍준 Hong-Jun An
비엔티엔지니어링(주)
진단설계팀 이사

이상국 Sang-Kuk Lee
비엔티엔지니어링(주)
기술연구소 이사

1. 머리말

과거부터 현재까지 콘크리트는 도로, 철도, 항만, 수리시설 및 건축 시설물 등에 가장 중요한 재료로서 널리 활용되고 있으며, 최근에는 특수 기능성 콘크리트 즉, 초고성능 콘크리트(Ultra-High Performance Concrete), 초경량 콘크리트, 초저발열 콘크리트 등이 개발되어 강도와 내구성, 작업성(workability) 등의 성능향상과 자연의 순환, 생태계 및 경관을 배려하는 친환경 콘크리트 재료의 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 콘크리트 강도 측면에서는 20 ~ 40 MPa 수준을 가장 많이 사용하고 있으나 200 MPa에 이르는 초고강도 콘크리트뿐만 아니라 다양한 강도수준의 콘크리트가 개발되고 특수구조물에 활용되고 있다¹⁾. 이런 측면에서 콘크리트의 강도평가는 매우 중요한 요소이며, PSC 빔 부재에 대한 엄밀한 강도평가를 통해 향후 고강도 콘크리트 활용이 일반화 되었을 경우 콘크리트의 강도를 보다 신뢰성 있게 평가하는데 활용하길 기대한다.

2. 콘크리트 압축강도 평가를 위한 국내 기술동향

콘크리트의 압축강도를 신뢰성 있게 평가하기 위한 평가방법은 크게 파괴시험기법과 비파괴시험기법으로 대별된다. 파괴시험은 기존 콘크리트 구조물에서 시험체를 채취하여 이를 실내에서 파괴하여 압축강도를 측정하는 국부파괴법인 코어 채취시험이 있는데, 직접 콘크리트를 일축압축강도를 측정하는 방법이므로 가장 정확한 방법이지만 통상 철근 콘크리트 구조물은 치수, 배합조건, 양생 등의 시공조건이 다르기 때문에 샘플 선정이 어렵고 코어 채취 시 철근의 절단 등에 의한 구조물의 변형이 발생할 수 있으므로 코어 채취 시 철근의 위치를 정확히 파악한 후 시험을 해야 하며, 다만 국부적인 파괴이지만 구조물의 손상은 피할 수 없다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 대상구조물의 압축강도 평가 시 구조물의 피해를 최소화 할 수 있는 비파괴시험방법이 필요하며, 그 방법 중 대표적인 기법이 반발경도법과 초음파속도법이다.

반발경도법의 원리는 테스트 해머(test hammer)로 경화 콘크리트면을 타격하여 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(f_c)와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 토대로 콘크리트의 압축강도를 추정한다.

콘크리트 강도의 추정이 매우 중요한 시설물에 대해서는 두 가지 이상의 반발경도측정법과 초음파속도법, 코어-압축강도와의 상관관계를 통하여 신뢰성 있는 콘크리트 강도추정이 필요할 것이다. 본 고에서는 기존에 널리 사용되고 있는 콘크리트 강도 추정을 위한 비파괴시험기법을 동일하게 시행하되 보다 정확한 강도추정을 위하여 어떤 절차와 분석기법

을 사용해야 하는지에 대하여 초점을 두고 기술되었다.

3. 실구조물의 콘크리트 압축강도 시험

3.1 시험개요

시험대상 시설물은 부순잔골재(Sand Mill)와 화학성 혼화제를 Modifier로 사용한 PSC 빔 형식의 A교와 B교이며, 콘크리트 타설 후 강도발현이 적절하게 이루어지지 않아 공사가 일정기간 중단되었고, 구조 안전성 및 구조물의 사용성, 내구성 등을 감안할 때 콘크리트 강도에 대한 엄밀한 평가가 필요 했던 시설물이었다. 이에 보편적으로 시행되고 있는 콘크리트 비파괴시험을 실시하여 PSC 빔의 강도를 검증한 후 공사가 재개되었던 시설물이다. 이번에 사용되었던 콘크리트 강도 평가식은 <표 1>과 같다.

3.2 시험항목 및 시험결과

A교와 B교의 콘크리트강도 추정을 위해 <표 2>와 같이 시험항목을 정하여 시험을 실시하였다. A, B교의 경

표 1. 반발경도법 및 초음파강도 평가식²⁾

구분		콘크리트 강도 평가식(MPa)
반발 경도법	국토해양부	$f_c = (13R_0 - 184) \times 0.098 \times \alpha$
	일본건축학회	$f_c = (7.3R_0 + 100) \times 0.098 \times \alpha$
	과기부(고강도)	$f_c = (15.2R_0 - 112.8) \times 0.098 \times \alpha$
	권영웅(고강도)	$f_c = (2.304R_0 - 38.8) \times \alpha$
초음파 강도	국토해양부, 일본건축학회	$f_c = (215V_f - 620) \times 0.098$
	일본재료학회	$f_c = (102V_f - 117) \times 0.098$

표 2. A교 및 B교의 콘크리트 강도시험²⁾

시험항목	세부항목	측정기구	적용
비파괴 강도	A/ B교	반발 경도법	NR형 M형 
		초음파 속도법	직접법 (코어 채취부) 
			표면법 
코어 강도 물성 분석	A교	φ100× 200mm (L/D=2.0)	비중, 공극률 압축강도, 탄성계수 응력- 변형률곡선 

우 여러 개의 PSC 빔중에서 대표적인 빔을 선택하여 코어 채취를 하였으며, 이를 이용하여 재령일에 따른 비파괴 강도와 파괴강도의 비교를 통해 보다 엄밀한 강도 평가가 될 수 있도록 시험 및 분석을 실시하였다. 엄밀한 평가를 위해 1차로 NR형의 슈미트해머로 강도를 평가한 후 M형 슈미트해머로 NR형 슈미트해머를 검증하고 초음파속도법을 통해 슈미트해머의 값의 적정성을 확인하고자 하였다. 또한 최종적으로는 코어 채취를 통해 코어-압축강도와 비파괴강도의 상관관계를 분석하고 콘크리트 내부의 조직을 확인하여 콘크리트의 품질을 최종 확인하였다.

3.2.1 반발경도법에 의한 강도평가 결과

<그림 1>은 1차로 측정하였던 NR형 슈미트해머의 측정 결과이며, 그 결과 반발경도는 재령에 따라 증가하는 경향을 보였으나 부분적으로 선형관계를 유지하지 못하고 중앙이 함몰된 강도분포를 보여 타설 시기에 따라 품질변동이 발생<표 3>하는 NR형과 M형을 비교한 결과이다. 타격에너지가 큰 M형 슈미트해머의 반발경도에 비해 NR형 슈미트해머의 반발경도가 평균 6.8%(A교)~12.6%(B교) 큰 것으로 나타났으며, 이로부터 표면강도가 빔 복부의 평균 강도에 비해 다소 높음을 알 수 있다. 이러한 현상은 부순 잔골재와 고성능 감수제를 사용한 고유동 콘

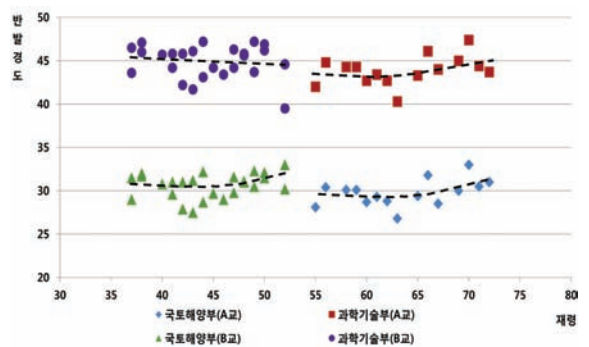


그림 1. A교 및 B교 NR-Type을 이용한 강도 평가결과

표 3. A교 및 B교의 콘크리트 강도시험

	A교	반발강도(MPa), 과기부(고강도식)		
		NR형 f_c	M형 f_c	$f_c(NR)$ $f_c(M)$
A교	최소 ~ 최대	38.8 ~ 47.4	36.3 ~ 43.6	0.941 ~ 1.191
	평균	43.2	39.8	1.081
B교	최소 ~ 최대	33.0 ~ 37.2	30.7 ~ 43.1	1.023 ~ 1.440
	평균	35.9	39.0	1.157

크리트의 타설과 다짐 시 강제거푸집 경계면에서 water channeling 현상으로 함수비와 단위 시멘트량이 증가하면서 빔표면의 초기강도발현과 밀도증진이 내부에 비해 다소 촉진되었거나 증기양생 cycle이 부적절하여 표면부를 제외하고 빔 내부로 충분한 적산온도가 공급되지 못할 때 발생하는 경향이 있으나 반발경도의 측정오차 이내이므로 참고자료로 활용함이 바람직하다.

3.2.2 습윤 상태와 건조 상태에 따른 반발경도차

슈미트해머의 반발경도는 콘크리트의 표면 함수비의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다. 기존 연구결과에 따르면 표면이 건조 상태인 경우가 습윤 상태인 경우에 비하여 평균 20%에서 25% 이상 반발경도가 증가함을 알 수 있다³⁾. 습윤 상태와 건조 상태에서 측정된 B교의 반발경도 분석결과 <그림 2>와 같이 습윤 상태에 비해 건조 상태에서 1% 정도의 매우 경미한 강도증진만이 발생한 것으로 나타났다는데, 이는 빔표면의 수밀성이 양호하여 짧은 시간의 강우로는 빔 내부까지 우수가 침투하지 못하여 표면함수비의 영향이 반영되지 않았음을 의미한다. 이는 콘크리트의 내구성측면에서 바람직한 현상으로 대상 PSC빔의 표면부 수밀성이 매우 양호하므로 공용기간 중 탄산화속도의 지배인자인 CO₂의 침투가 저감되어 내구수명을 충분히 유지할 수 있을 것으로 판단된다⁴⁾.

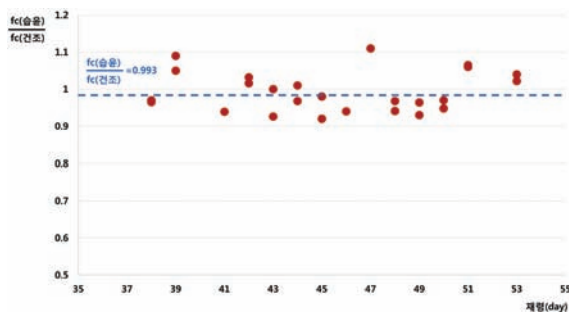


그림 2. 표면함수량에 따른 반발경도의 비

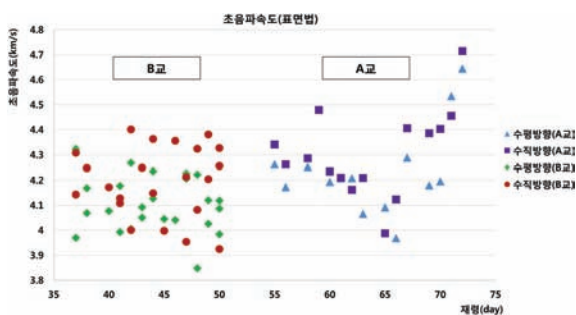


그림 3. A교와 B교 초음파속도 분포(표면법)

3.2.3 초음파 속도법에 의한 콘크리트 강도평가

초음파속도법 측정은 직접법과 표면법을 이용하였으며 <그림 3>은 시설물별로 재령일에 따른 초음파속도(표면법)를 도시하였다. A교 PSC빔의 초음파속도는 측정 결과 분산이 다소 존재하였으나 직접법과 표면법 모두에서 재령증가에 따라 초음파속도가 선형으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 B교 PSC빔의 초음파속도는 A교에 비해 재령별로 수직방향 초음파속도와 수평방향 초음파속도의 편차가 다소 큰 것으로 나타났는데, 이는 타설방향별 강도차이라기 보다는 빔 내부에 배근된 보강철근과 가외철근의 영향이 반영된 것으로 판단된다. 측정방법별로는 직접법이 표면법에 비해 초음파속도가 높은 경향을 나타내었고, 평가공식에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 분석되었다.

3.3 코어압축강도 분석결과

KSF 2422(콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도 시험방법)와 KSF 2438(콘크리트 원주형공시체의 정탄성 계수 및 포아송비 시험방법)에 따라 6개의 코어시편을 대상으로 압축강도시험을 실시하였다³⁾. 시험결과 A교의 3개의 빔에서 채취한 코어시편의 평균 압축강도는 43.56 MPa이며, B교의 3개의 빔에서 채취한 코어시편의 평균압축강도는 36.31 MPa로 설계기준강도(40 MPa)의 89.6 ~ 117.7%의 강도발현율을 나타냈는데, 이는 콘크리트표준시방서와 고속도로공사 전문시방서의 코어강도 구조적합성 판단기준인 85%(34 MPa)를 초과하는 값이다³⁾. 재령영향을 고려하여 강도특성을 판단할 경우 A교는 종곡강도에 수렴하고 있으나 B교는 향후 91일 이후까지도 추가 강도증진이 예상된다<그림 4>.

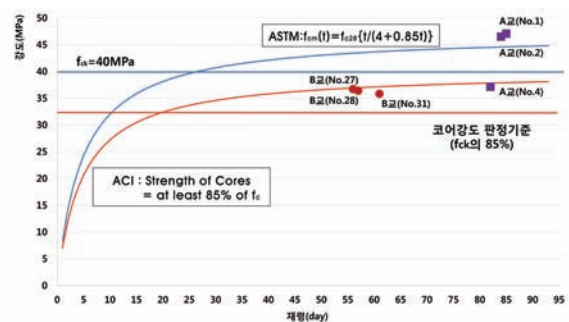



그림 4. A교와 B교의 코어강도 측정결과

4. 코어강도를 이용한 비파괴강도 보정식 제안

빔의 동일위치에서 코어강도와 반발강도 및 초음파강도의 상관관계를 분석하여 현장에서 활용할 수 있도록 보정계수를 제안하였다. 보정계수는 초기재령에서 비파괴강도의 변동성 존재와 고강도콘크리트의 경우 비파괴강도가 저평가되는 문제점 존재와 프리스트레스를 받는 PSC 빔에서의 한계존재, 부순골재의 사용이 일반화됨에 따라 강자갈과 강모래로 제조한 콘크리트에 적용해 오던 기존 비파괴 강도 평가공식의 엄밀성 저하 등에 보정계수 산정이 필요하며 매우 중요하다. 반발강도와 초음파강도(직접법, 표면법)를 이용하여 코어시편의 압축강도를 추정할 때 적용하는 보정계수를 다음과 같이 제안한다.

- (1) 반발경도법(국토부 제안공식) : $f_{코어} = 1.18f_{반발}$
- (2) 반발경도법(과기부 제안공식) : $f_{코어} = 0.80f_{반발}$
- (3) 초음파속도법(표면법, 일본재료학회 제안공식)
: $f_{코어} = 1.25f_{초음파}$
- (4) 초음파속도법(직접법, 일본재료학회 제안공식)
: $f_{코어} = 1.05f_{초음파}$
- (5) 조합법(NR형+직접법, 일본건축학회 제안공식)
: $f_{코어} = 0.85f_{초음파}$

5. 맺음말

콘크리트의 강도추정을 위한 비파괴 시험은 장비(hardware)의 개발보다는 분석기술의 개발(software)이 요구되는 시점이다. 동일한 장비를 이용하여 사용자가 어떤 관점과 장비를 가지고 분석하느냐에 따라 서로 다른 결과를 도출할 수도 있기 때문이다. 비파괴시험결과를 통해 보다 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위한 기술개발이 요구되는 시점이다. 

참고문헌

1. 김성욱, '특수 기능성 콘크리트 현황과 미래 콘크리트 기술', 건설기술정보, 2008.
2. 한국시설안전공단, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침, 2010.
3. Kumar Mehta P., Paulo J. M., Monteiro, "CONCRETE".
4. Sidney Mindess, Francis Young, J., David Darwin, "CONCRETE".
5. 한국콘크리트학회, 『콘크리트 표준시방서(해설)』, 기문당, 2009.

담당 편집위원 : 권성준(한남대학교) jjuni98@hannam.ac.kr



이상민 대표이사는 연세대학교 토목공학과에서 박사학위를 취득한 후 쌍용중앙연구소와 한국시설안전공단에 재직하였으며, 1997년 4월 비엔티엔지니어링(주) 설립하여 국내 토목시설물 안전진단분야의 상위기업으로 성장시켰다. 콘크리트 재료분야 및 구조분야에 대한 국내 최고의 전문가로서 상명대학교 겸임교수와 국토해양부 및 지자체에서 전문분야에 대한 강의와 자문활동을 하고 있다.

smlee@bnteng.com



이호영 부사장은 한국과학기술원 토목공학과에서 석사학위를 취득한 후 1987년 (주)우대기술단과 1995년 한국시설안전공단을 거쳐 현재 비엔티엔지니어링(주)에 재직중에 있다. 주요관심분야는 토목구조분야의 유한요소해석 분야이며 국토해양인재개발원 강사 및 충청대학교 겸임교수, 지자체 자문위원으로 활동하고 있다.

hylee@bnteng.com



안홍준 이사는 전북대학교 토목공학과에서 석사학위를 취득하였으며, 2004년부터 비엔티엔지니어링(주)에서 재직하고 있다. 주요 업무분야는 토목구조물에 대한 점검 및 진단업무를 수행하고 있으며 서울특별시 전문위원 및 국토해양인재개발원 강사로 활동하고 있다.

hjan@bnteng.com



이상국 이사는 중앙대학교 토목환경공학과에서 석사학위를 취득하였으며, 2002년부터 비엔티엔지니어링(주)에서 재직중에 있다. 주요업무분야는 기술연구소에서 토목구조물에 대한 진단업무와 콘크리트의 내구성에 관한 국책 연구과제를 총괄하고 있다.

sklee@bnteng.com