

천공저항시험에 의한 터널구조물의 화재손상 평가기법 개발에 관한 연구

성연창(군산대학교)
최순욱(한국건설기술연구원)
장수호(한국건설기술연구원)
이연규(군산대학교)

1. 서론

최근 산업·경제의 발전과 도시화에 따라 국토를 효율적으로 활용하기 위해 도로 및 철도, 지하철, 핵 폐기물 처리장 등과 같은 기반시설이 지하공간에 건설되는 사례가 증가하고 있다. 이에 따라 지하구조물에서 화재와 같은 재난이 발생하는 빈도가 증가하여 재산손실과 인명피해가 해마다 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라 지하구조물의 신속하고 안전한 건설을 위한 기술개발과 연구가 활발히 진행되어 빠르게 현장에 적용되고 있지만, 지하공간내 화재 등과 같은 재해에 대한 신속한 복구를 위한 조사 및 보수·보강에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

그 사례로, 지난 2003년 3월 대구지하철 화재로 인한 복구비용은 약 1,000억원이 소요되었으며, 8개월 동안 보수·보강 작업이 이루어져 신속한 재개통에 차질을 빚었다. 유럽에서도 영불 해저터널, 몽블랑 터널 및 타우론 터널에서 발생한 화재로 인해 3개월에서 최대 3년 동안 복구 작업이 이루어졌다(한국건설기술연구원, 2006). 따라서 화재발생 후 구조물의 복구를 위해 가장 중요한 것은 화재손상 구간을 신속하고 정확하게 파악하여 보수·보강을 위한 공법 선전에 도움이 되는 자료를 수집하는 것이다.

현재까지 발생한 화재사고에 대한 조사방법들로는 현장에서 슈미트햄머를 이용하는 반발경도시험, 중성화시험이 있고, 실험실에서는 코어를 수거하여 압축강도시험을 수행하거나, X선 회절분석, 열중량분석, 시차열분석, 주사 전자현미경분석 등을 수행하여 수열온도 분포를 추정하는 방법이 있다(대구지하철공사, 2003; 서울철도공사, 2005). 그러나 반발경도시험은 구조물의 표면에 대한 제안된 정보만을 제공하여 두께 방향으로 손상정도를 파악하기 힘들고, 중성화시험은 구조물의 서비스 기간, 환경 조건에 따라 큰 영향을 받아 화재로 인한 피해정도를 파악하는데 어려움을 겪을 수 있다. 실험실시험을 이용하는 경우라도, 고열로 인해 심각한 손상을 받은 구역은 압축강도시험을 실시하기 곤란할 수 있다. 또한, 수열온도를 추정하기 위한 실험들은 시료를 채취하는데 많은 시간이 걸리고 구조물의 역학적 특성 변화를 추정할 수 없다는 단점을 갖고 있다.

이와 같이 기존 시험방법들은 화재 손상구간에 대하여 두께방향으로 연속적이고 신속하게 파악하는데 있어 많은 문제점들을 갖고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이런 문제점들을 극복하기 위한 대안으로 발파 굴착시 사용되는 천공장비를 기반으로하여, 소형의 천공저항시

험 장비를 제작하였다.

천공저항방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 드릴비트의 추력과 분당회전수를 일정하게 한 상태에서 관입속도를 측정하는 방법이 있고, 두 번째로 드릴비트의 관입속도와 분당회전수를 일정하게 한 상태에서 추력(thrust)과 비에너지(specific energy)를 측정하는 방법이 있다. 전자의 방법은 몽블랑 화재사고 후 프랑스와 이탈리아에서 화재조사시 수행한 방법으로서, 발파천공용 드릴장비(비트직경: 40 mm)를 사용하여 화재손상부와 건전부에서의 관입속도의 차이를 측정하여 열화손상부를 파악한 다음, 코어링에 의해 측정된 압축강도와 드릴링변수를 비교하여 드릴링변수와 압축강도와의 관계를 도출한 것이다(Marche et al., 2003). 이 방법은 비트직경이 크고 콘크리트의 강도가 높을 경우, 추력을 일정하게 유지하기 위해 큰 힘으로 추력을 유지해야 하므로 발파천공용 드릴장비와 같이 자체중량이 클 경우에만 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 후자의 방법으로 Gussi & Barsotti(1995)는 드릴의 전기-역학적 효율에 의한 영향을 줄이기 위해 비에너지를 측정하는 방법을 주로 사용하였다. 또한 Felicetti(2006)는 비에너지를 사용하면 추력의 영향을 줄일 수 있다고 하였다. 이와 같이 비에너지를 사용하는 방법은 소형 드릴장비를 사용하여 드릴링변수를 얻을 수 있기 때문에 효과적일 것으로 생각된다. 대다수의 연구에서 소형 드릴장비를 사용할 경우, 배터리 충전식 드릴장비를 사용하여 드릴링에 쓰여진 전기소모량을 측정하는 방식을 채택하고 있다. 이 방법은 풍화되지 않은 모르타르의 표면강도를 간접적으로 측정하는 RILEM TC 177-MDT(2004)에서도 규정되어 있다. EU의 Framework 프로그램중의 일부로서 수행된 Stavropoulou(2006)의 연구에서는 1~110 MPa범위의 암석시험편에 대한 드릴링저항시험이 수행되었다. 이 연구에서는 비트(비트직경: 2~5 mm)의 관입속도와 분당회전수를 일정하게 한 상태에서 대리석 및 사암 등에 드릴링을 수행하였을 때 발생하는 반력과 토크를 측정한다. 그 결과를 수치해석한 결과와 비교하였다.

이 연구에 사용된 장비는 두 번째 방법을 기반으로 제작된 장비로써, 모르타르 블록시험체와 콘크리트 블록시험체에 천공저항시험(drilling resistance test)을 실시하여 터널구조물에서 구조물의 물성을 예측하는 방법을 제안하였다. 시험체 조건별로 적정 천공시험조건(분당회전수, 관입속도, 비트직경)을 도출하였으며, 적정 천공시험조건으로 측정된 평균 반력과 일축압축강도와의 상관관계를 도출하였다. 도출된 관계식을 반발경도시험, 초음파속도시험의 경우와 비교한 결과 상관계수가 큰 것으로 나타나 본 연구에서 개발한 천공저항시험 장비의 적용성을 확인할 수 있었다. 또한 화재로 손상된 콘크리트의 손상깊이를 추정하기 위해 누적반력곡선과 점이동 회귀분석을 활용하는 기법을 제시하였다.

2. 시험편 및 시험 장치 제작

2.1 시험편 제작

본 연구에서 사용한 시험편은 600×600×400 mm의 블록시험편으로 모르타르 블록시험편 4종과 콘크리트 블록시험편 5종을 제작하여 사용하였다. 또한 사전에 제작된 1개의 고강도 모르타르 블록시험편을 사용하였다. 시험편의 배합조건은 표 1과 같다.

일축압축강도 및 탄성계수를 측정하기 위해 Ø100×200 공시체를 블록시험편을 제작시 함

계 제작하였다. 고강도 모르타르 공시체는 고강도 모르타르시험편에 코어링을 실시하여 $\varnothing 50 \times 100$ 공시체를 수거하여 시험에 사용하였다.

표 1. 모르타르 및 콘크리트 배합표

시험조건	C/S(%)	W/C(%)	C(g)	W(g)	S(g)	SP	비고
CASE 1	3.45	70	300	210	1035	3.6	모르타르
CASE 2	3.00	55	510	280.5	1530	0	모르타르
CASE 3	3.45	55	300	165	1035	3.6	모르타르
CASE 4	사전에 제작된 고강도 모르타르 블록시험편						모르타르
CASE 8	4	75	280	210	1120	3.36	모르타르

표 1. 모르타르 및 콘크리트 배합표(계속)

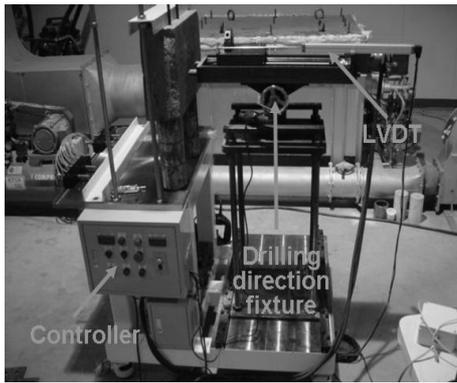
시험조건	G_{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)					비고
						W	C	S	G	SP	
CASE 5	25	15±2.5	4.5±1.0	0.65	42.0	187.0	287.7	724.4	1000.4	2.3	콘크리트
CASE 6	25	15±2.5	4.5±1.0	0.50	42.0	187.0	374.0	695.0	959.7	3.0	콘크리트
CASE 7	25	15±2.5	4.5±1.0	0.35	42.0	187.0	534.3	640.3	884.2	4.3	콘크리트
CASE 9	25	15±2.5	4.5±1.0	0.58	42	187.0	325.2	711.6	982.7	2.6	콘크리트
CASE 10	25	15±2.5	4.5±1.0	0.43	42	187.0	440	672.5	928.6	3.5	콘크리트

* C: 시멘트, W: 물, S: 잔골재, G: 굵은 골재, C/S: 시멘트·잔골재 비, W/C: 물·시멘트 비
S/a: 잔골재율, SP: 유동화제

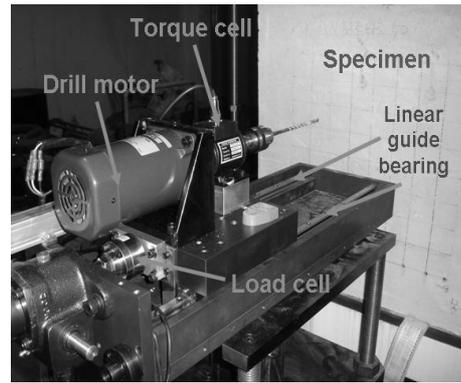
2.2 실험 장치 제작

본 연구에서는 손상된 구조물을 평가하는데 가장 기본이 되는 압축강도 및 탄성계수를 현장에서 추정하기 위한 소형의 천공저항시험 장비를 제작하기에 앞서 실내에서 콘크리트의 역학적 특성과 천공저항변수들의 관계를 도출하기 위하여 그림 1과 같이 천공저항시험 장비를 제작하였다. 본 시험기는 controller에 의해 드릴비트의 분당회전수를 0~1,550 rpm 범위로 제어할 수 있으며, 드릴비트의 관입속도를 0~4 mm/sec 범위로 제어할 수 있도록 제작되었다. 천공저항시험은 국부파괴 조사방법에 분류되는 시험법으로 파괴부위를 최소화 할 수 있도록 비트 직경을 8 mm, 10 mm, 13 mm로 제한하였고, 시험기의 활용성과 드릴비트 개발에 따른 추가 비용을 줄이기 위해 시중에서 상용되고 있는 BOSCH사의 SDS-plus 햄머드릴을 선정하여 사용하였다. 이상과 같은 천공저항시험 장비의 주요 사양을 정리하면 표 2와 같다.

본 시험기는 시험을 실시하기 전에 분당회전수와 관입속도를 설정할 수 있으며 설정된 조건에서 측정되는 값은 반력(reaction force), 토크(torque) 및 관입깊이(penetration)로 각각 로드셀(load cell), 토크셀(torque) 및 LVDT에 의해 측정된다.



(a) 천공저항시험 장치 전경



(b) 천공저항시험 장치 상세

그림 1. 실내시험용 천공저항시험 장치

표 2. 실내시험용 드릴링 조사장치 주요구성품의 사양

구 분	사 양
로드셀	· 최대용량: 200 kgf
토크셀	· 최대용량: 50 kgf·cm
드릴모터	· 전력: 200 W · 전압: 220 V · 주파수: 60 Hz · 전류: 1.20 A · 분당회전수: 최대 1,550 rpm
관입속도 조절용 스피드모터	· 전력: 90 W · 전압: 220 V · 주파수: 50 Hz · 전류: 0.97 A · 분당회전수: 최대 1,250 rpm
LVDT	· 비선형성: $\pm 0.05\%$ · 최대 용량: 30cm

2.3 시험 방법

조건별로 제작된 블록시험편과 공시체에 천공저항시험, 반발경도시험과 초음파시험, 압축시험을 실시하였다. 천공저항시험과 반발경도시험은 블록시험편에 실시하였고, 반발경도시험과 초음파시험은 공시체에 실시하였다. 시험에서 반발경도시험과 초음파시험을 병행한 이유는 천공저항시험의 타당성 여부를 비교·평가하기 위함이다.

시험 방법은 다음과 같다. 블록시험편의 표면을 평탄하게 하기위해 연마기를 사용하여 표면을 연마한 후, 가로·세로 5 cm 간격으로 격자를 그린다. 각 격자점중 20개를 선정하여 반발경도시험을 실시하고 20개의 격자점중 5개를 선정하여 천공저항시험을 실시한다. 천공저항시험에서 반력, 토크 및 관입깊이는 20 Hz의 샘플링 속도로 측정하였다. 다음으로 초음파시험은 공시체의 상·하면을 연마한 후, 각 공시체마다 직접법으로 3회씩 측정하여 평균값을 도출하는 방법으로 실시하였다. 그리고 초음파시험을 실시한 공시체를 이용하여 압축강도시험에 실시하였다. 압축강도시험은 하중제어방식으로 실시하였으며 하중속도는 0.3 MPa/sec

의 속도로 측정하였다.

3. 천공저항시험의 적정 시험조건 결정

천공저항시험을 수행하는데 있어 본 시험의 정확성을 높이고 편차를 최소화하는 것은 매우 중요한 요소이다. 또한, 화재사고로 인한 터널구조물의 손상 깊이가 10 cm 내외임을 감안하여 실험을 실시하였다(대구지하철공사, 2003; 서울철도공사, 2005). 이런 점들을 만족시키기 위해 본 연구에서 제작된 시험기의 조건에 맞도록 분당회전수, 관입속도 및 비트직경을 변경하면서 적정 시험조건을 도출하였다.

3.1 비트 교환시기 결정

1개의 드릴비트를 사용하여 그림 2와 같이 드릴비트 10 mm, 관입속도 1.41 mm/sec, 회전속도 1,300 rpm으로 같은 시료(CASE 2)에 반복하여 실험을 실시하였다. 그 결과 반력 값이 점진적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 드릴비트가 반복하는 횟수가 증가 할수록 드릴비트가 마모되어 천공저항이 증가하기 때문에 반력 값이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 드릴비트의 마모에 의한 영향을 최소화할 목적으로 모르타르 블록시험편에서는 5회, 콘크리트 블록시험편에서는 1회 사용 후 드릴비트를 교환하여 실험을 실시하였다.

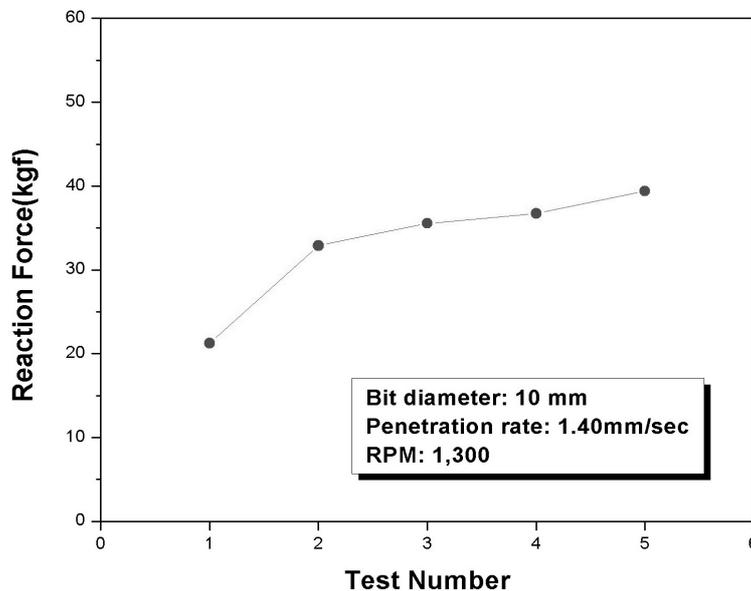


그림 2. 드릴비트의 반복사용에 따른 반력 증가의 예 (CASE 2)

3.2 적정 분당회전수 결정과 토크

본 시험기의 적정 분당회전수를 결정하기 위하여 모르타르 블록시험편(CASE 2, 표 1 참조)에 비트직경과 관입속도를 각각 10 mm와 1.4 mm/sec로 일정하게 설정한 후 분당회전수를 변화시켜가면서 드릴비트의 관입깊이와 반력을 측정하였다(그림 3).

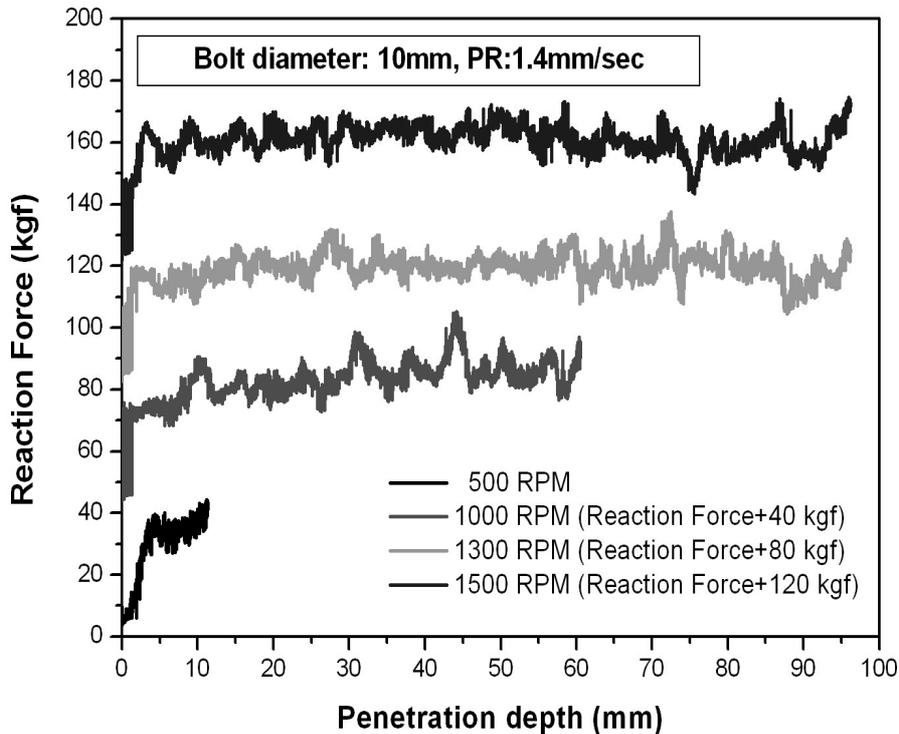


그림 3. 분당회전수 변화에 따른 관입깊이의 변화

그림 3과 같이 분당회전수가 증가하면 드릴비트의 관입깊이가 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 1,000 rpm 이하에서 실험을 실시하면, 드릴비트의 걸림현상이 자주 발생하였다. 이런 현상은 회전수가 적은 조건하에서는 회전력이 드릴비트에 작용하는 회전 마찰력을 극복하지 못 하기 때문인 것으로 사료된다. 반면, 1,300rpm 이상의 회전수에서는 걸림현상이 급격히 감소하여 원하는 깊이까지 관입시킬 수 있었다. 장수호 등(2006)은 독일의 RABT 및 네덜란드의 RWS 화재시나리오 실험에서 터널구조물의 시공재료별 화재손상 특성을 규명한 결과, 화재 발생 후 잔존부의 화재 손상깊이는 약 10~15cm인 것으로 보고되었다.

따라서, 본 천공저항장비의 가용할 수 있는 최대 분당회전수(1,550 rpm)와 장수호 등의 RABT 및 RWS 화재시나리오의 화재손상 특성을 종합하여 보면, 10 cm 이상을 관입할 수 있는 적정 분당회전수는 1,300 rpm인 것을 확인할 수 있었다.

다음으로 본 시험기는 2.2절에서 설명한 바와 같이 반력 및 토크를 모두 측정할 수 있도록 제작되었다. 그러나 그림 4와 같이 측정된 토크 값을 보면 드릴비트의 관입깊이에 따라 측정된 값이 많은 편차를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이런 현상은 드릴비트가 시험편을 관입하면서 천공저항장비가 진동하는데, 이 진동에 토크셀이 민감하게 반응하기 때문인 것

으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 천공저항에 따른 재료의 역학적 특성을 도출하는데 주된 목적이 있으므로, 결과 분석 시에 토크 측정결과를 배제하고 반력 측정결과만을 활용하였다.

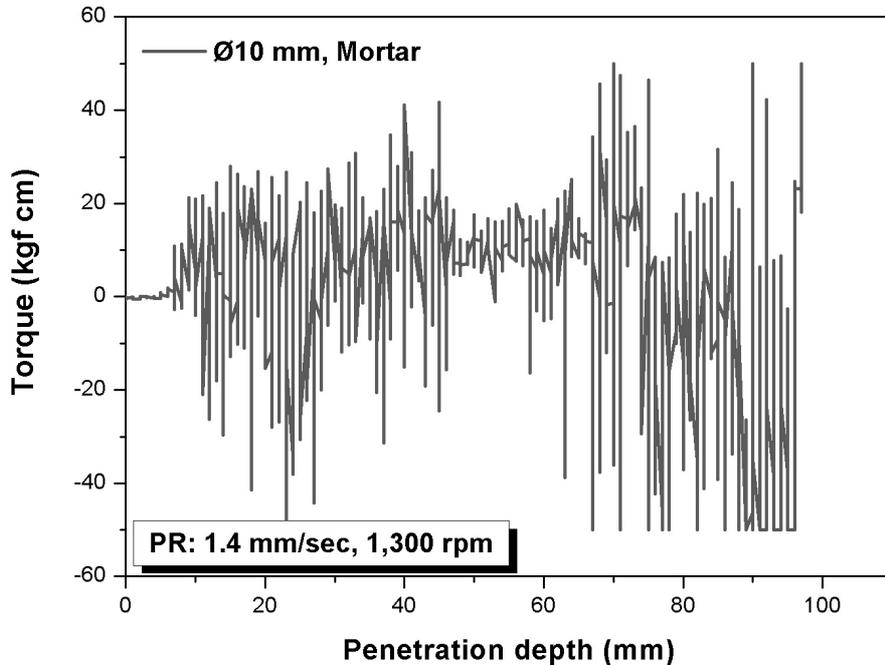


그림 4. 토크셀을 이용하여 측정된 토크

3.3 적정 관입속도 결정

앞서 3.2절에서 도출한 적정 분당회전수 1,300 rpm을 조건으로 하여 모르타르 블록시험편 (CASE 2, 표 1 참조)에 대하여 총 9종의 조건(표 3)으로 실험을 실시하였으며, 각 조건마다 3~5번의 반복 실험을 수행하였다. 그리고 적정 관입속도를 도출하기 위해 평균반력과 표준편차 및 분산계수를 분석하였다.

그림 5는 표 3의 비트직경별 관입속도와 평균 분산계수와의 관계를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 비트직경에 관계없이 비트직경별로 관입속도가 대략 1.40 mm/sec에서 가장 작은 분산계수를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 시험 장비의 적정 관입속도를 1.40 mm/sec로 판단할 수 있다.

표 3. 측정조건별 평균, 표준편차 및 분산계수(1,300 rpm)

시험조건	비트직경 (mm)	관입속도 (mm/sec)	반력 (kgf)	표준편차 (kgf)	분산계수 (%)
TEST 1-1	8	0.69	16.65	5.21	31.29
TEST 1-2			22.66	6.96	30.71
TEST 1-3			26.51	10.24	38.63
TEST 1-4			26.03	4.66	17.90
TEST 1-5			29.19	9.37	32.10
평균			24.21	7.29	30.13
TEST 2-1	8	1.40	17.09	5.57	32.59
TEST 2-2			24.86	7.63	30.69
TEST 2-3			26.92	6.96	25.85
TEST 2-4			28.87	5.84	20.23
TEST 2-5			31.33	6.39	20.40
평균			25.81	6.48	25.95
TEST 3-1	8	2.08	19.57	5.39	27.54
TEST 3-2			25.32	6.29	24.84
TEST 3-3			28.55	7.74	27.11
TEST 3-4			31.89	11.50	36.06
TEST 3-5			30.19	7.31	24.21
평균			27.10	7.65	27.95
TEST 4-1	10	0.69	20.76	5.35	25.77
TEST 4-2			24.59	5.67	23.06
TEST 4-3			27.37	5.53	20.20
TEST 4-4			28.43	7.76	27.30
TEST 4-5			33.26	7.96	23.93
평균			26.88	6.45	24.05
TEST 5-1	10	1.40	21.25	6.48	30.49
TEST 5-2			32.88	8.75	26.61
TEST 5-3			35.54	6.94	19.53
TEST 5-4			36.73	6.41	17.45
TEST 5-5			39.40	7.43	18.86
평균			33.16	7.20	22.59
TEST 6-1	10	2.08	22.84	6.89	30.17
TEST 6-2			28.73	6.40	22.28
TEST 6-3			32.59	8.37	25.68
TEST 6-4			36.39	6.14	16.87
TEST 6-5			37.70	8.06	21.38
평균			31.65	7.17	23.28
TEST 7-1	13	0.69	23.57	6.57	27.87
TEST 7-2			25.59	8.17	31.93
TEST 7-3			24.10	7.29	30.25
평균			24.42	7.34	30.02
TEST 8-1	13	1.40	25.04	5.49	21.92
TEST 8-2			28.88	8.32	28.81
TEST 8-3			24.39	5.61	23.00
평균			25.10	6.47	24.58
TEST 9-1	13	2.08	29.21	11.38	38.96
TEST 9-2			22.98	9.46	41.17
TEST 9-3			25.62	6.67	26.03
평균			25.94	9.17	35.39

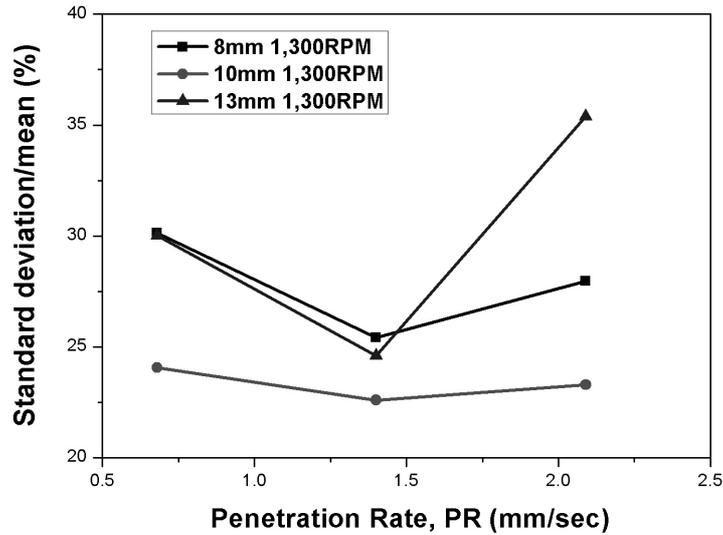


그림 5. 비트직경별 관입속도와 평균 분산계수와의 관계

3.4 적정 비트크기 결정

앞서 3.3절에서 결정된 적정 관입속도로 표 3의 실험조건에 시험을 실시하여, 각각의 TEST에 대한 평균 분산계수를 그림 6과 같이 도시하였다. 그림에서 드릴비트 직경이 10 mm일 때, 8 mm 및 13 mm으로 측정된 분산계수보다 작게 나타나 적정 비트직경임을 확인할 수 있다.

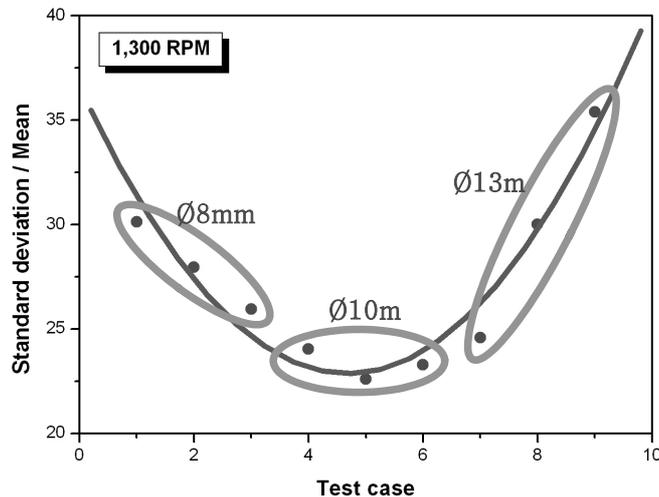


그림 6. 각 측정조건별 평균 분산계수의 분포

이상과 같이 본 연구에 사용된 천공저항장비의 적정 시험조건은 분당 회전수가 1,300 rpm, 관입속도가 1.40 mm/sec, 그리고 비트직경이 10 mm임을 확인할 수 있었다. 토크는 토크셀의 민감한 반응으로 관입깊이에 따라 토크 값이 큰 편차를 보이고 있어, 본 연구에서는 활용하지 않았다.

4. 시험 결과

4.1 압축강도시험 결과

각 CASE 별로 3개의 공시체에 압축시험을 실시하여 측정된 압축강도의 평균값을 각 재령 일별 압축강도로 판단하였다(표 4). 압축강도는 4.2~4.4절의 시험 결과와 비교·분석을 하는데 활용하였다.

표 4. 압축강도 및 탄성계수 측정결과

CASE	길이 (mm)	지름 (mm)	하중 (ton)	압축강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	비고
1	193.06	100.54	17.92	226	130,000	재령 13일
	190.24	100.32	12.87	163	120,700	
	194.75	100.25	16.96	215	136,500	
평균				201	129,100	
2	194.11	100.7	20.09	252	164,500	재령 24일
	192.35	100.19	20.98	266	157,400	
	191	100.08	20.23	257	145,800	
평균				259	155,900	
3	194.57	100.6	23.61	297	153,400	재령 13일
	197.18	101.43	24.16	299	144,100	
	197.17	100.54	23.65	298	172,900	
평균				298	156,800	
4	112.17	55.78	17.17	703	355,100	6개월이상
	115.93	55.71	22.12	907	422,700	
	109.4	55.6	19.79	815	265,000	
평균				808	347,600	
5	196.17	100.26	19.02	241	170,600	재령 14일
	195.57	100.88	18.21	228	167,400	
	196.45	100.42	18.73	236	158,700	
평균				235	165,500	
6	195.08	99.71	24.09	309	282,600	재령 13일
	199.95	99.76	23.93	306	187,800	
	194.83	100.29	23.1	292	209,600	
평균				302	226,700	
7	195.42	100.18	41.95	532	185,500	재령 14일
	195.14	100.58	43.72	550	222,500	
	195.13	100.54	38.66	487	176,700	
평균				523	194,900	
8	189.42	99.92	-	-	-	재령 7일
	199.22	100.03	6.22	79	84,100	
	189.57	100.17	6.29	80	103,800	
평균				79	94,000	
9	189.17	99.99	10.2	130	151,100	재령 7일
	199.34	100.12	7.85	100	124,600	
	191.95	99.90	10.54	134	124,600	
평균				121	133,400	
10	191.66	100.51	18.75	236	140,200	재령 7일
	195.71	100.51	19.75	249	145,500	
	195.72	100.05	16.08	205	-	
평균				230	142,800	

4.2 반발경도시험 결과

반발경도시험은 친공저항시험의 타당성을 확인하기 위한 시험으로, 슈미트햄머를 이용하여 표 1의 각 CASE 별로, 블록시험편의 타격면에 수직한 방향으로 20개의 지점에 타격하여 일본재료학회식의 추정강도 식을 사용하여 추정강도를 도출하였다. 반발경도시험 결과는 표 5와 같다.

그러나 표 5에서 보는 바와 같이 타격방향과 재령에 대하여 보정된 압축강도는 일축압축강도시험의 결과와 상당한 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히 CASE 8에서와 같이 평균 반발경도가 2.10으로 측정되어, 추정식을 적용할 경우 압축강도가 음수로 나타나 적용이 불가능하였다. 그리고 타격방향만을 보정하였을 경우, 상관관계가 그다지 높지 않았다. 그러나 보정을 하지 않은 평균 반발경도치와 일축압축시험 결과의 상관관계를 비교한 결과 상관계수가 0.85로 나타나 상관관계가 우수함을 확인할 수 있었다(그림 7). 따라서 본 연구에서는 반발경도치를 친공저항시험의 타당성을 확인하는데 활용하였다.

표 5. 반발경도시험 결과

CASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	합계	비고
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
1	36	36	36	36	35	34	35	36	34	35	35.00	재령13일
	35	36	36	34	34	34	36	32	34	36		
2	46	46	48	47	49	49	48	46	49	48	47.60	재령24일
	47	48	47	50	50	48	48	47	46	45		
3	40	40	40	40	40	40	39	40	41	41	40.40	재령13일
	38	41	41	41	40	41	40	40	41	44		
4	57	56	56	58	56	57	56	53	56	56	56.20	1년
	55	57	57	58	56	55	55	56	56	58		
5	33	35	34	35	36	34	36	34	36	36	34.95	재령14일
	34	34	35	35	34	36	36	34	36	36		
6	40	39	38	40	40	39	38	39	38	38	38.60	재령13일
	38	37	38	40	38	40	38	38	39	37		
7	51	49	47	48	46	48	48	48	47	56	47.75	재령14일
	48	46	48	46	45	47	46	47	48	46		
8	14	14	14	-	-	-	-	-	-	-	2.10	재령5일
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
9	24	23	22	24	25	24	24	21	24	26	23.10	재령5일
	20	23	23	24	23	22	23	22	22	23		
10	24	28	26	28	25	25	24	24	25	25	26.30	재령5일
	28	24	25	26	28	28	28	30	28	27		

표 5. 반발경도시험 결과 (계속)

CASE	반발경도(R)	타격방향보정치 (ΔR)	보정된 반발경도 (R_0)	추정강도 (F_c , kgf/cm ²)	재령계수(α)	보정된 강도 (F_{c28} , kgf/cm ²)
1	35.00	-4.3	39.30	326.90	1.4	457.66
2	47.60	-3.7	51.30	482.90	1.06	511.87
3	40.40	-3.1	43.50	381.50	1.4	534.1
4	56.20	-2.8	59.00	583.00	0.7	408.1
5	34.95	-4.3	39.25	326.25	1.36	443.7
6	38.60	-4.6	43.20	377.60	1.4	528.64
7	47.75	-3.7	51.45	484.85	1.36	659.4
8	2.10	-2.7	4.80	-	2.36	-
9	23.10	-1.7	24.80	138.40	3.36	465.02
10	26.30	-0.7	27.00	167.00	4.36	728.12

*강도추정은 일본재료학회식 $F_c = 13 \times R_0 - 184$ (kgf/cm²) 을 사용하였음.

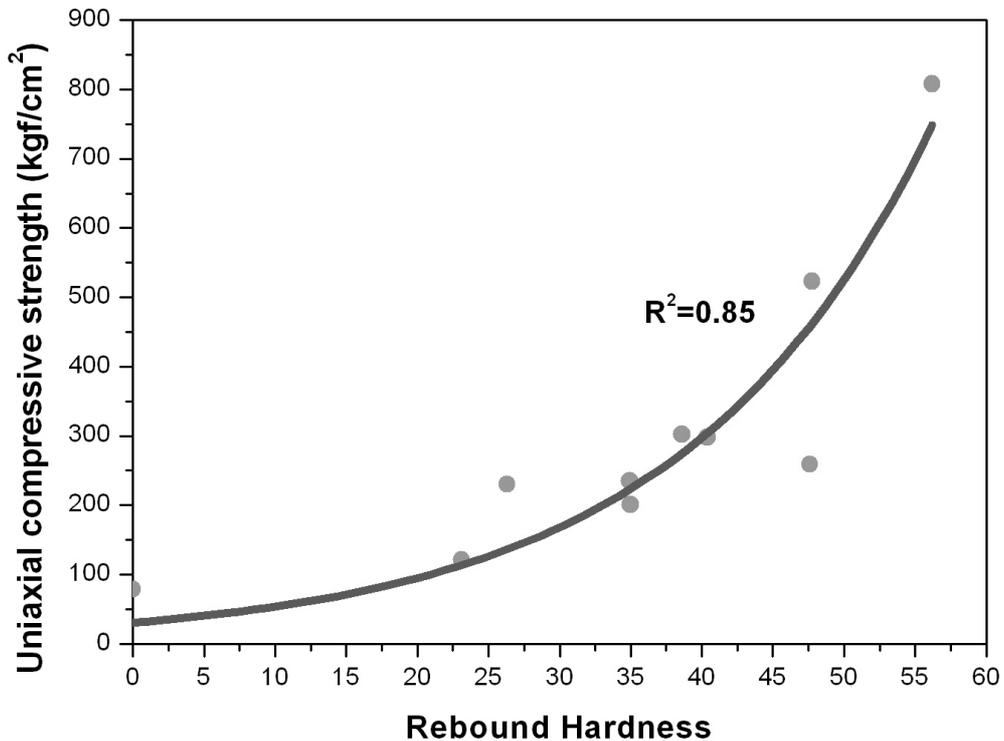


그림 7. 반발경도치와 압축강도의 상관관계

4.3 초음파속도시험 결과

초음파속도시험은 원주형공시체의 상·하단에 발신자와 수신자를 설치하여 직접법에 의해 수행되었고, 표 6과 같이 RILEM CNDT 소위원회 추천식을 사용하여 강도를 추정하였다. 강도 추정식을 사용할 경우, 초음파속도시험에서도, CASE 8에서 추정강도가 음의 값으로 나타났다.

표 6. 초음파속도시험결과

CASE	길이 (mm)	도달시간 (μ s)	초음파속도 (m/sec)	추정압축강도 (Fc, kgf/cm ²)	비고
1	193.06	57.20	3,375	105.6	재령 13일
	190.24	58.10	3,274	83.9	
	194.75	58.10	3,352	100.7	
평균			3,334	96.7	
2	194.11	56.70	3,423	115.9	재령 24일
	192.35	55.10	3,491	130.6	
	191.00	55.10	3,466	125.2	
평균			3,460	123.9	
3	194.57	54.10	3,596	153.1	재령 13일
	197.18	54.90	3,592	152.3	
	197.17	54.70	3,605	155.1	
평균			3,598	153.5	
4	112.17	27.40	4,094	260.2	1년
	115.93	28.10	4,126	267.1	
	109.40	27.50	3,978	235.3	
평균			4,066	254.2	
5	196.17	51.40	3,817	200.7	재령 14일
	195.57	51.00	3,835	204.5	
	196.45	51.70	3,800	197.0	
평균			3,817	200.7	
6	195.08	49.60	3,933	225.6	재령 13일
	199.95	50.30	3,975	234.6	
	194.83	50.30	3,873	212.7	
평균			3,927	224.3	
7	195.42	46.10	4,239	291.4	재령 14일
	195.14	45.70	4,270	298.1	
	195.13	45.70	4,270	298.1	
평균			4,260	295.8	
8	189.42	70.00	2,706	-	재령 7일
	199.22	69.30	2,875	-	
	189.57	67.30	2,817	-	
평균			2,799	-	
9	189.17	47.40	3,991	238.1	재령 7일
	199.34	49.90	3,995	238.9	
	191.95	49.90	3,847	207.1	
평균			3,944	228.0	
10	191.66	50.40	3,803	197.6	재령 7일
	195.71	50.80	3,853	208.4	
	195.72	51.40	3,808	198.7	
평균			3,821	201.6	

*강도추정: RILEM CNDT 소위원회 추천식 $F'_c = 215 (V_p / 1,000) - 620$

그림 8은 압축강도시험 결과와 초음파속도와와의 관계를 나타낸 것이다. 초음파속도시험 역시 반발경도시험과 같이 추정식을 사용하여 압축강도를 추정할 경우 압축강도시험 결과와 많은 차이를 나타내어 압축강도추정 값을 사용하지 않고 초음파속도를 직접 비교 대상으로 활용하였다. 압축강도시험결과와의 상관계수는 0.44로 매우 낮게 나타났다.

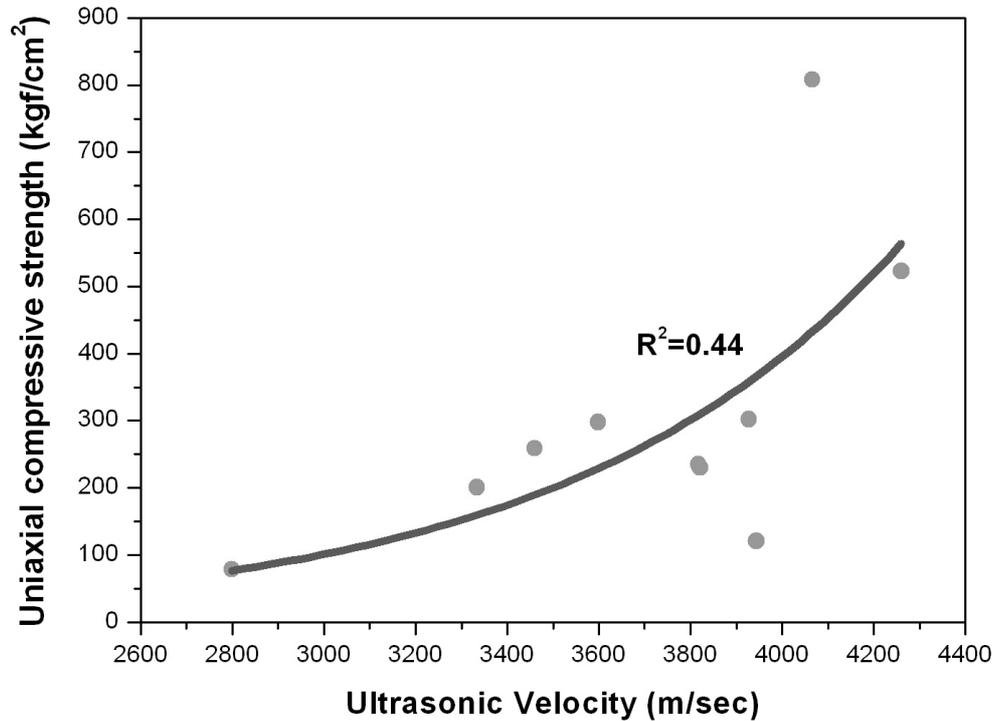


그림 8. 초음파속도와 압축강도의 상관관계

4.4 천공저항시험 결과

천공저항시험은 골재의 유무에 따라 시험결과가 큰 차이를 보여, 모르타르 블록시험편과 콘크리트 블록시험편으로 나누어 분석하였다.

4.4.1 모르타르 블록시험편

모르타르 블록시험편(CASE 1~4, CASE 8)에 대하여 천공저항시험을 수행한 결과는 표 7과 같으며, 그림 9와 그림 10은 천공저항시험 결과 값인 평균반력과 압축강도 및 탄성계수의 관계를 도시한 그림이다. 그림 9~10에서 평균반력과 압축강도의 상관계수가 0.91 그리고 평균반력과 탄성계수의 상관계수가 0.93으로 나타나 상관관계가 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 압축강도 및 탄성계수와 평균반력의 상관식을 각 그림 오른쪽 하단과 같이 도출하였다.

표 7. 별 천공저항시험 결과의 평균 및 표준편차, 분산계수

CASE	평균 반력 (kgf)	표준편차 (kgf)	분산계수 (%)
1-1	11.27	3.04	26.97
1-2	11.25	3.86	34.31
1-3	10.52	2.63	25.00
1-4	11.61	3.01	25.93
1-5	11.70	2.84	24.27
평균	11.27	0.46	27.30
2-1	21.25	6.48	30.49
2-2	32.88	8.75	26.61
2-3	35.54	6.94	19.53
2-4	36.73	6.41	17.45
2-5	39.40	7.43	18.86
평균	33.16	7.06	22.59
3-1	15.10	5.60	37.09
3-2	15.49	6.20	40.03
3-3	19.57	4.03	20.59
평균	16.72	2.48	32.57
4-1	49.79	8.59	17.25
4-2	64.19	10.75	16.75
4-3	69.49	8.10	11.66
4-4	76.89	9.45	12.29
4-5	85.35	6.45	7.56
평균	69.14	13.43	13.10
8-1	6.72	3.55	52.83
8-2	6.59	2.09	31.71
8-3	9.60	5.73	59.69
8-4	7.24	5.83	80.52
8-5	11.17	6.03	53.98
평균	8.26	6.04	55.75

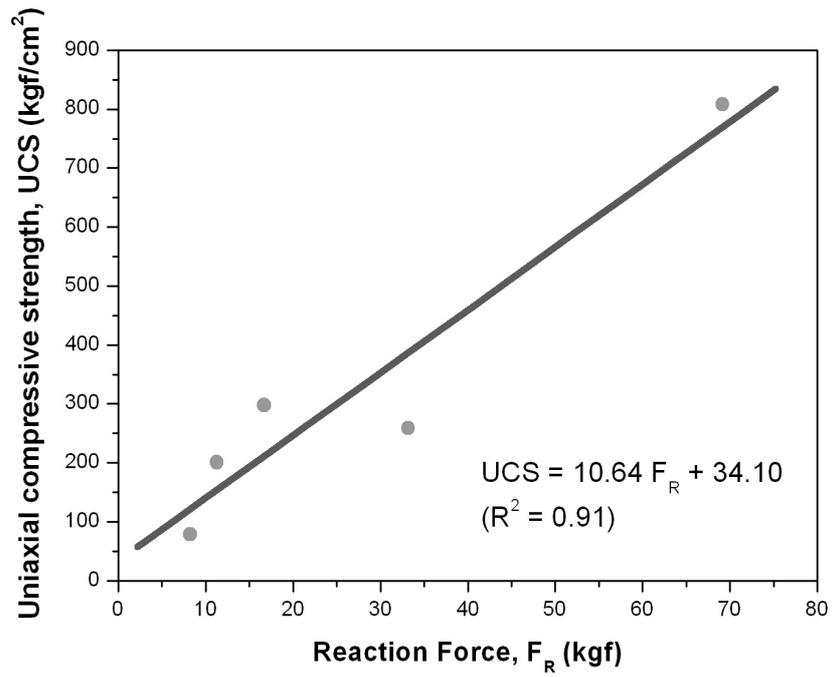


그림 9. 모르타르 시험편에 대한 천공저항시험의 평균반력과 압축강도의 상관관계

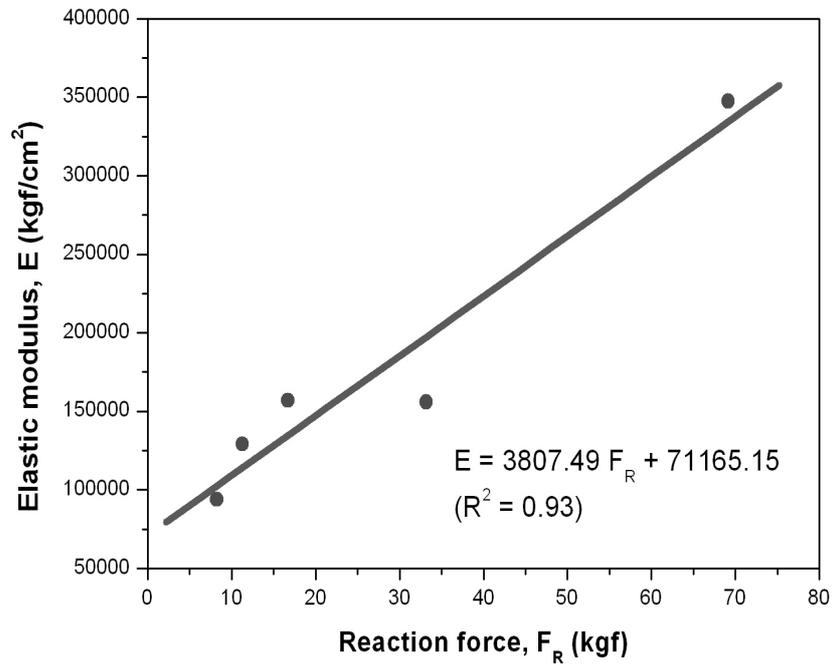


그림 10. 모르타르 시험편에 대한 천공저항시험의 평균반력과 탄성계수의 상관관계

4.4.2 콘크리트 블록시험편

콘크리트 블록시험편은 모르타르 블록시험편과 달리 골재의 영향으로 모르타르 블록시험편의 적정 시험조건인 10 mm, 1300 rpm 및 1.40 mm/sec로 실험을 실시할 경우, 걸림 현상이 발생하여 본 연구에서 정의한 관입깊이 10 cm 이상을 관입하지 못하는 경우가 많았다. 이에 따라 콘크리트 블록시험편에 대해서도 모르타르 블록시험편의 경우와 같은 방법으로 적정 시험조건을 도출하였고, 그 결과 8 mm, 1,300 rpm, 1.40 mm/sec로 나타났다. 또한 굵은 골재의 영향(골재의 개수)을 평가하기 위해 모르타르 시험편에 실시한 평균반력과 분산계수를 이용한 분석이 아닌, 에너지 개념을 응용한 분석을 활용하였다.

본 연구에서 제안한 에너지 개념에서는 그림 11과 같이, 골재를 만나지 않았을 때의 기본값(파란색선)을 설정한다. 그리고 관입깊이에 따른 반력 값의 전체 면적(total area)을 산정한 다음, 기본 값 이하의 면적을 산정한다. 전체면적에서 기본 값 이하의 면적(base area)을 빼면 골재에 의한 반력부분(①+②+③)의 면적을 구할 수 있다. 이 골재에 의한 반력부분은 드릴비트가 만나게 되는 굵은 골재의 개수에 따라 달라지므로 골재에 의한 반력부분(①+②+③)의 면적을 봉우리 개수(3개)로 나눠주면 굵은 골재의 개수에 의한 영향을 고려할 수 있게 된다. 마지막으로 기본 값 이하의 면적과 골재개수를 고려한 골재에 의한 반력부분을 더하는 방법으로 분석하였다. 산정된 면적은 표 8과 같다.

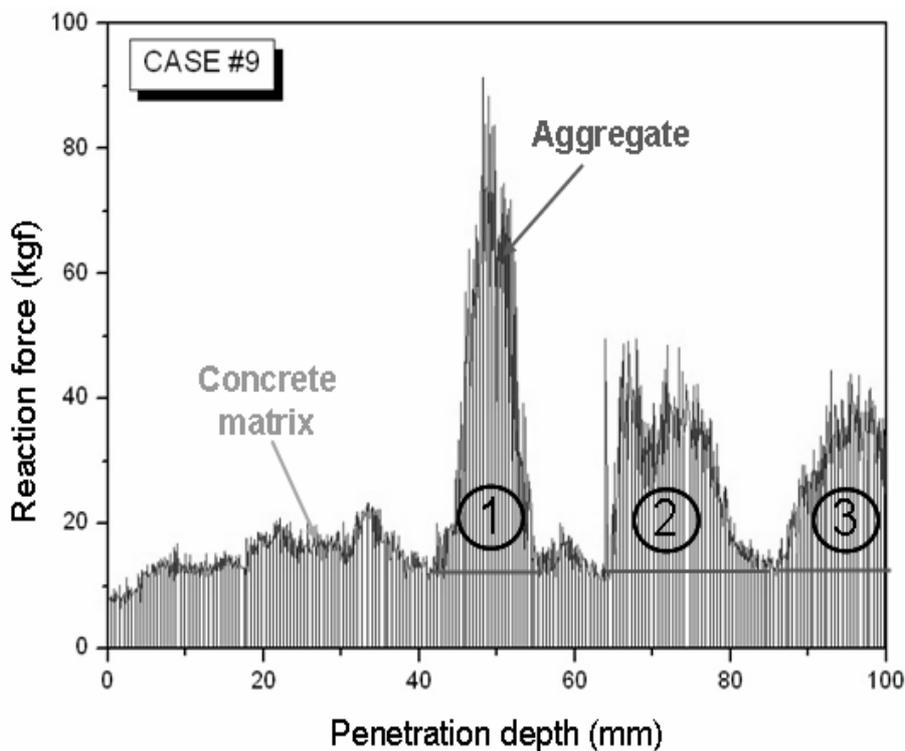


그림 11. 드릴링 저항시험에서의 굵은 골재에 대한 고려방법

표 8. 콘크리트블록시험체에서 거리에 따른 반력값의 변화면적

CASE	전체면적[㉠] (kgf·mm)	기본값 이하의 면적[㉢] (kgf·mm)	골재에 의한 영향 면적[㉡]=(㉠-㉢)/골재개수 (kgf·mm)	골재를 고려한 변화면적[㉢+㉡] (kgf·mm)
5	2,942.86	293.85	509.61	803.46
6	2,723.84	638.55	239.95	878.50
7	3,689.01	596.84	497.98	1,094.82
9	2,294.20	362.18	394.04	756.22
10	2,900.66	609.63	293.39	903.02

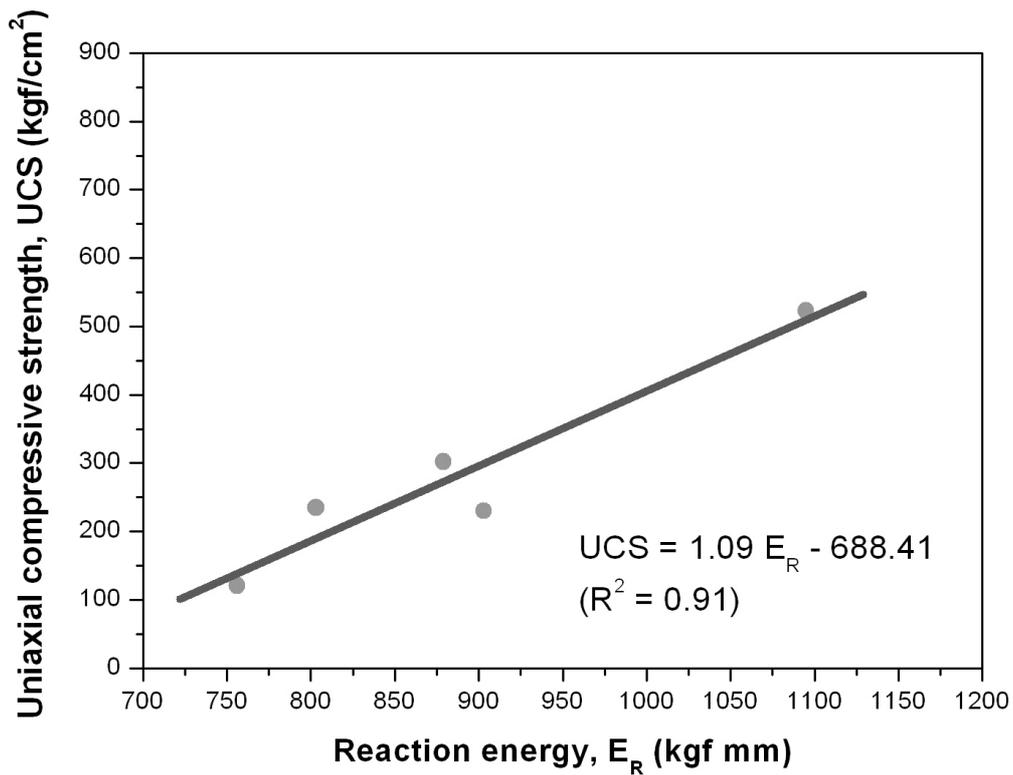


그림 12. 콘크리트 블록시험편에 대한 천공저항시험의 반력에너지와 탄성계수의 상관관계

그림 12는 콘크리트 블록시험편에 대한 천공저항시험의 반력에너지와 탄성계수의 상관관계를 보여준다. 그림에서와 같이 상관계수가 0.91로 나타나 상관관계가 우수한 것을 확인할 수 있다.

천공저항시험 결과의 신뢰성을 판단하기 위하여 반발경도시험과 초음파속도시험을 병행하여 실험을 실시하였다. 그 결과 반발경도시험은 압축강도와 상관계수가 0.85로 상관관계가 높게 도출되었지만, 천공저항시험 결과에 비해 낮은 상관관계를 보였고, 초음파속도시험에서는 0.44로 낮은 상관관계를 보였다. 압축강도를 추정하는 기존의 다른 방법들을 모두 검증한 것은 아니지만 이상의 결과로부터 천공저항시험결과로부터 신뢰성 있는 압축강도 추정을 위한 가능성은 보여줬다고 판단되어진다. 또한 드릴링 저항시험은 관입깊이에 따른 연속적인 강도추정이 가능하다는 점에서 UTM 등의 시험 장비를 이용하여 측정하는 압축강도나 1장에서 언급한 여러 방법들과 차별성을 가질 뿐 아니라 시간과 비용절감이라는 경제적인 면에서도 우수하므로 기존의 방법들과 같이 실험자료가 구축된다면 화재로 손상된 구조물의 압축강도 추정을 위한 좋은 시험방법이 될 것으로 사료된다.

5. 천공저항시험에 의한 화재손상구간 추정

5.1 다층 모르타르 시험편의 경계지점 추정

본 절은 화재로 손상된 구간을 분석하기 위한 예비 실험으로 그림 13과 같이 서로 다른 강도를 가진 모르타르를 3층으로 타설하여 다층 모르타르 시험편을 제작하였다. 화재로 손상된 구간의 경계 지점은 강도변화가 미미할 것으로 예상되므로 본 시험편에 대한 분석은 누적반력곡선과 점이동 회기분석 기법을 활용하였으며, 그 활용도를 평가하였다. 누적반력곡선은 말 그대로 반력 값을 누적시켜 관입깊이에 대한 그래프를 그리고 이 그래프로부터 기울기가 변화하는 지점을 찾는 방법이다(그림 14). 그러나 그림 15와 같이 누적반력곡선의 기울기 변화가 너무 미미하여 누적반력곡선으로부터 손상경계지점을 찾아낼 수 없을 경우, 점이동 회기분석을 활용하면, 보다 쉽게 기울기의 변곡점을 확인할 수 있다.

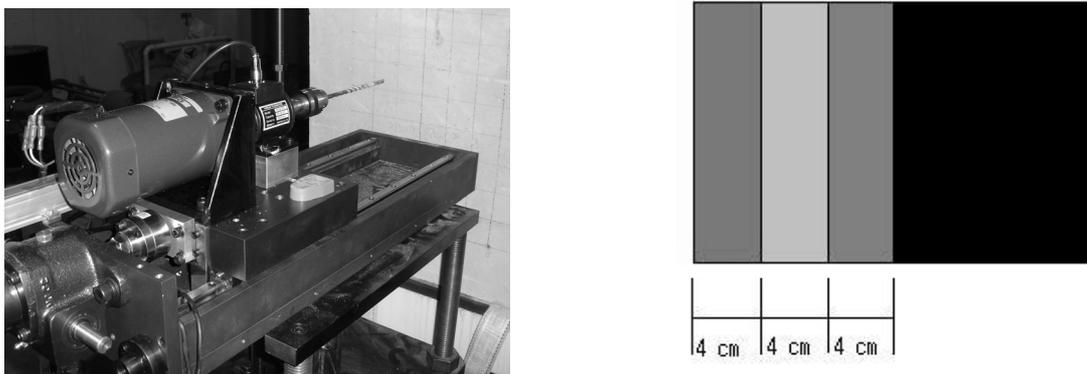


그림 13. 다층 모르타르시험편에 대한 드릴링저항시험

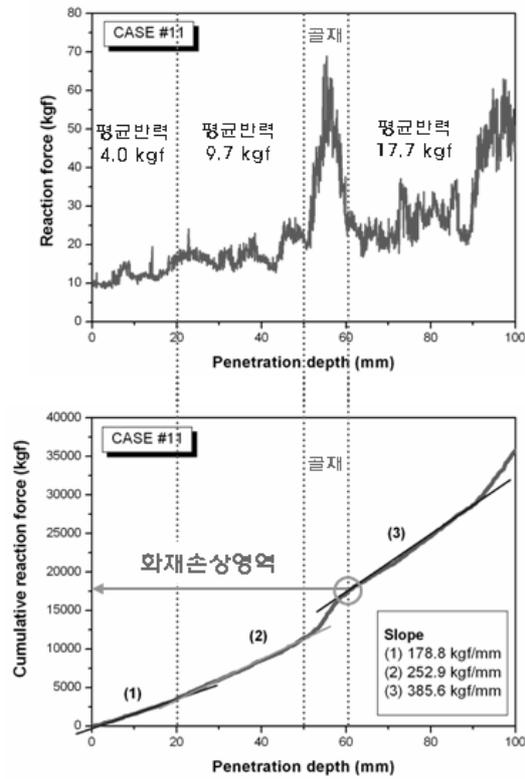


그림 14. 화재손상구간을 분석하기 위한 누적반력곡선의 활용 예

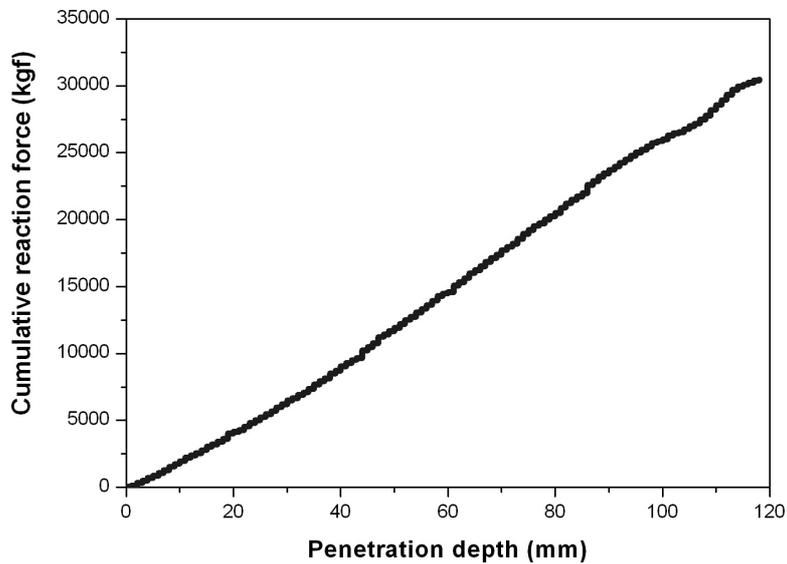


그림 15. 다층 모르타르 블록시험편에 대한 누적반력곡선

점이동 회귀분석이란, 그림 16과 같이 누적반력곡선의 임의의 점(X_t, Y_t)에서 $\pm n$ 개 데이터에 대한 기울기를 산정한 다음(이때 n 치는 임계지점을 가장 잘 보여줄 수 있는 값을 사용함), 그 기울기를 시작점부터 순차적으로 표시하는 방법이다(Eberhardt E. et al., 1998).

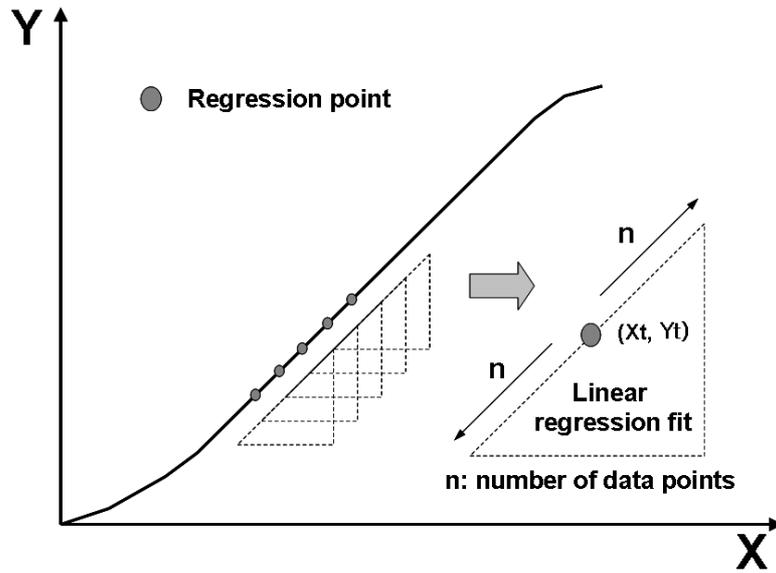


그림 16. 점이동 회귀분석의 개념

다층 모르타르 블록시험편에 대한 점이동 회귀분석을 하면, 그림 17과 같다. 그림 17은 그림 16에서 확인하기 어려운 기울기의 변곡점을 쉽게 확인할 수 있다. 그림에서 변곡점의 위치가 대략 40 mm와 80 mm 임을 확인할 수 있는데, 본 연구에서 사용한 다층 모르타르 블록시험편의 강도변화 조건과 거의 일치함을 알 수 있다. 참고로 관입깊이가 100 mm부분에서 급격히 하락한 이유는 실험 종료로 인한 것이다.

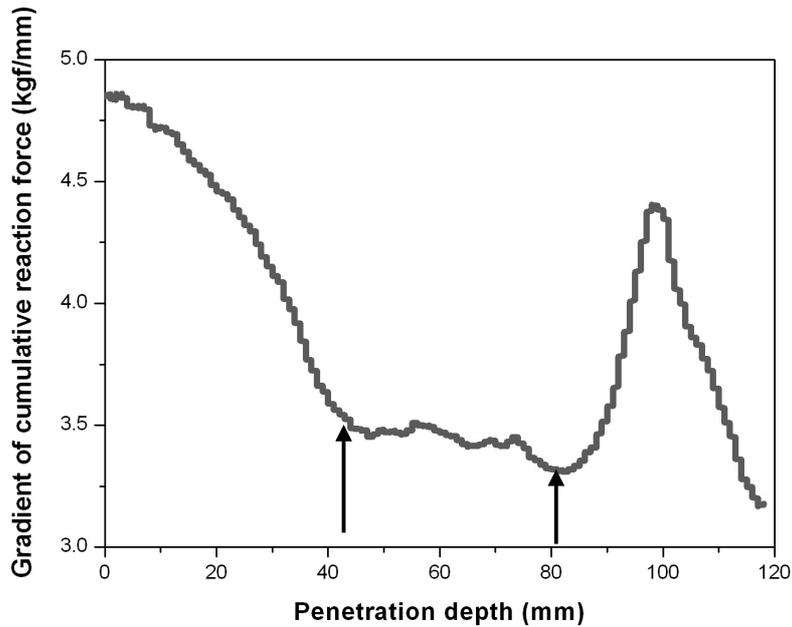


그림 17. 다층 모르타르 블록시험편의 점이동 회귀분석에 의한 임계지점 식별

6. 결론

터널에서 화재로 손상된 구간을 신속하고 빠르게 추정하는 것은 보수·보강 작업에서 가장 중요한 작업이다. 본 연구에서는 현장에서 손상구역을 두께방향으로 연속적이고 신속하게 측정할 수 있는 천공저항시험법을 제안하여, 그 적용성을 평가·검토하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 본 연구에 사용된 천공저항시험기의 적정 시험조건을 도출한 결과, 모르타르 블록시험편의 경우 분당회전수 1,300 rpm, 관입속도 1.40 mm/sec이고 비트직경이 10 mm임을 확인하였고, 콘크리트 블록시험편은 분당회전수 1,300 rpm, 관입속도 1.40 mm/sec이고 비트직경이 8 mm임을 확인하였다. 또한 드릴비트의 마모로 인한 반력값의 과대평가를 배제하기 위하여 비트는 모르타르 블록시험편에서는 5회, 콘크리트 블록시험편에서는 1회 사용 후 교환하였다.
- 2) $\varnothing 100 \times 200$ 공시체에 실시한 일축압축강도를 참 값으로 가정하고 각 시험결과와 비교하여 상관관계를 도출한 결과, 반발경도시험의 상관계수는 0.85, 초음파시험은 0.44, 천공저항시험은 0.91로 나타나 천공저항시험의 상관관계가 높음을 확인할 수 있었다. 이로써 천공저항시험의 타당함을 확인하였다.
- 3) 콘크리트 블록시험편에 실시한 천공저항시험은 골재의 영향으로 모르타르 블록시험편과 같은 방법으로 데이터를 분석할 수 없었다. 이에 따라 에너지 개념을 응용한 반력 값의 변화면적을 활용하여 굵은 골재의 영향을 고려하였으며, 압축강도와 반력 값의 변화면적과의 상관관계를 도출한 결과, 상관계수가 0.91로 나타나 데이터의 처리 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.
- 4) 화재에 의해 손상을 입은 콘크리트의 손상깊이를 추정하기 위하여 다층 모르타르시험편을 제작하여 예비시험을 실시하였다. 시험 결과는 물성변화가 미미하여 기존 문헌들에서 앞서 제안한 방법으로 다층 모르타르시험편의 물성 변곡점을 추정하기에 어려운 점이 많았다. 그래서 누적반력곡선과 점이동 회귀분석법을 활용한 결과 물성변화가 미미한 상황에서 화재로 손상된 부분을 추정할 수 있었다.
- 5) 본 연구는 다른 조사 방법과는 달리 천공저항을 활용하는 방법으로 화재로 손상된 부분을 두께방향으로 연속적이고 신속하게 추정할 수 있는 방법을 제안하는데 목적을 두고 있다. 그러나 아직 실제 화재로 손상된 구간에서 채취한 시험편에 대해서는 적용이 되지 못한 상황이다. 앞으로 더 많은 실험을 실시하여 데이터베이스 구축한 후, 화재로 손상된 시험편에 그 적용성을 확인할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2003 건설핵심기술연구개발사업인 “지하공간 환경조성 및 방재기술 개발 - 지하구조물 재해손상 대응기술 개발(과제번호: C03-02)” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2006, 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업.
2. 대구지하철공사, 2003, 대구지하철 1호선 중앙로역 정밀안전진단보고서.
3. 서울시도시철도공사, 2005, 7호선 온수역 종점부 유치선터널 차량화재 영향에 대한 터널 구조물 안전진단보고서.
4. 장수호, 최순욱, 권종욱, 배규진., 2006, 화재에 의한 터널구조물 시공재료의 손상 평가. 대한토목학회논문집, 제26권 제3C호, pp. 219-228.
5. Eberhard, E., stead, D., stimpson, B., and Read R.S., 1998, Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock, *Can. Geotech. J.*, Vol. 35, pp. 222-233.
6. Felicetti, R.. 2006, The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 321-329.
7. Gussi, N., and Barsotti, R., 1995, A non-destructive technique for the determination of mortar load capacity in situ, *Materials and Structures*, 28, pp. 276-283.
8. Marche, R., Lapierre, J.Y., Pozzi, V., and Mayu, P., 2003, Mont Blanc Tunnel - a method to evaluate damage by fire to the concrete shell, *Proc. of ITA-AITES 2003*.
9. Stavropoulou, M., 2006, Modeling of small-diameter rotary drilling tests on marbles, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 43, pp. 1034-1051.
10. TC 177-MDT., 1995, Rilem Recommendation MDT.D.1-Indirect determination of the surface strength of unweathered hydraulic cement mortar by the drill energy method, *Materials and Structures*, Vol. 37, pp. 485-487.