

천공저항시험에 의한 콘크리트 터널라이닝의 역학적 특성 추정

Estimation of the Mechanical Properties of the Concrete Tunnel Lining by Drilling Resistance Test

최 순 욱¹ Choi, Soon-Wook

장 수 호² Chang, Soo-Ho

성 연 창³ Sung, Yun-Chang

정 호 섭⁴ Cheong, Ho-Seop

Abstract

For the quick rehabilitation of a fire-damaged tunnel structure, it is the most important procedure to investigate the fire-induced damaged zone rapidly. This study aims to propose a new drilling resistance testing method by which mechanical properties of tunnel concrete lining altered by high temperature can be estimated easily and continuously. Especially, it aims to derive the relationships to estimate mechanical properties of mortar and concrete materials from drilling parameters. To obtain the optimum testing condition, a series of drilling resistance tests were carried out for mortar specimens. When the rotation per minute of drill bit, the penetration rate and the bit diameter were 1,300 rpm, 1.40 mm/sec, and 10 mm respectively, the deviation of measured drilling resistance forces was minimal. Under the optimum testing condition, the relationships between drilling resistance and mechanical properties of mortar specimens were shown to be very favorable. The concept of replacing a mean value of resistance forces measured during drilling with the resistance energy was proposed to consider the effects of randomly distributed aggregates inside a concrete material on drilling resistance. When the concept was applied to concrete materials, a favorable relationship between actual compressive strength and drilling resistance energy was also successfully derived.

요 지

화재 후 터널 구조물의 신속한 복구를 위하여 화재손상 구간을 정확하고 빠르게 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 화재로 인한 라이닝 콘크리트의 역학적 특성 변화를 라이닝의 두께방향으로 연속적으로 측정하기 위한 천공저항시험법을 제안하고, 천공시험으로부터 측정된 천공 변수들로부터 모르타르와 콘크리트의 역학적 특성을 추정하고자 하였다. 비교적 균질한 모르타르에 대하여 일련의 천공저항시험을 실시한 결과, 분당회전수가 1,300rpm, 관입속도가 1.40mm/sec, 그리고 비트직경이 10mm인 경우에 측정된 천공 반력값의 편차가 가장 작게 나타나 최적의 시험조건으로 판별할 수 있었다. 최적 시험조건에서 모르타르에 대해 천공저항시험을 실시한 결과, 천공반력과 모르타르의 압축강도 및 탄성계수 사이의 결정계수가 각각 0.91 및 0.93으로 나타나 양호한 상관관계를 도출할 수 있었다. 또한 콘크리트에 존재하는 골재의 영향을 고려하기 위하여 반력 에너지 개념을 제시하였고 실제 압축강도와의 결정계수는 0.94로서 역시 양호한 상관관계를 도출할 수 있었다. 이상과 같이 천공 비트의 관입과 동시에 연속적으로 재료의 역학적 특성을 추정할 수 있는 천공저항시험의 적용 가능성을 파악할 수 있었다.

Keywords : Damage, Drilling resistance test, Fire, Mechanical property, Tunnel

1 정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 연구원 (Member, Researcher, Underground Structure Research Division, KICT)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 책임연구원 (Member, Research Fellow, Underground Structure Research Division, KICT, sooho@kict.re.kr, 교신저자)

3 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 학생연구원 (Apprentice, Underground Structure Research Division, KICT)

4 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원 (Senior Researcher, Underground Structure Research Division, KICT)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 들어 국내외적으로 장대터널을 중심으로 대형 터널화재 사고가 빈번하게 발생하면서 화재를 사전에 예방하여 인명손실과 물적 피해를 최소화하기 위한 기술개발과 더불어, 화재 발생 후 화재손상을 받은 터널구조물의 신속한 진단과 복구를 통해 운행중단과 보수·보강 작업으로 인한 직간접적인 비용을 최소화하기 위한 기술 개발도 크게 요구되고 있다. 일례로 1999년 3월에 발생한 몽블랑(Mont Blanc) 터널 화재의 경우에는 3년간의 복구 기간 동안 2억7천3백만 달러라는 천문학적 비용이 소요되었으며, 국내에서도 2003년 2월의 대구 지하철 참사로 인해 8개월 동안 복구비용으로 약 1,000억 원이 소요된 바 있다(박해균 등, 2006).

일반적으로 터널 화재사고 후 화상구간을 평가하기 위한 조사기법으로는 파괴시험 방법인 코어채취 및 국부파괴법, 그리고 반발경도시험과 같은 비파괴시험 등으로 구분할 수 있다(장수호 등, 2006a). 이 가운데 화재 손상 구간에서 채취된 코어를 활용하여 수행되는 제반 역학적 시험, 시차열분석(DTA), X선회절분석(XRD), 열중량 분석, 중성화시험 등은 비교적 신뢰적이고 정확한 손상평가 결과를 산출할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 시차열분석, X선회절분석, 열중량 분석 등은 터널 구조물에 발생한 수열온도를 추정하는데 적용되며, 중성화 시험은 500°C 이상의 열이 가해지면 콘크리트가 알칼리성에서 중성으로 변한다는 사실에 근거하여 적용되고 있다. 하지만 이들 분석을 위한 코어 채취과정에서 시료의 추가적인 손상과 교란이 발생할 수 있으며, 코어 채취 후 분석까지 상당한 시간이 소요되므로 신속한 화상 구간 평가를 저해할 수 있다. 무엇보다도 채취된 코어로부터 터널 라이닝 두께 방향의 연속적인 화재손상 정도를 평가하기 어렵다는 한계를 가지고 있다. 또한 넓은 구간에 대해서도 신속한 비파괴조사가 가능한 슈미트 해머(Schmidt hammer)에 의해 콘크리트 반발경도를 측정하여 화상구간 표면의 압축강도를 추정하고 있으나, 콘크리트 라이닝 표면의 강도만 추정할 수 있고 실제 콘크리트 라이닝 내부의 강도 변화를 평가할 수 없다는 큰 문제점이 있다. 더욱이 반발경도로부터 고온을 받은 콘크리트의 압축강도를 추정하기 위한 관련 자료가 없는 관계로 콘크리트 라이닝의 잔존부 표면에 대한 상대적인 평가만이 가능한 상황이다. 인발시험 등과 같은 국부파괴법에 의해서도 콘크리트 라이닝 두께 방향으로

의 화상 평가가 불가능한 실정이다(한국건설기술연구원, 2006).

따라서 본 연구에서는 화재로 인해 손상이 발생한 터널 구조물의 깊이별로 연속적인 손상을 측정하기 위한 일종의 국부파괴시험법인 천공저항시험법과 시험장비를 제시하고자 하였다. 본 연구에서 제안한 천공저항시험법에서는 천공 중의 관입속도(penetration rate), 분당회전수(rotation per minute), 추력(thrust), 비에너지(specific energy)와 같은 천공변수를 연속적으로 측정하여 모르타르와 콘크리트의 역학적 특성을 추정하는데 활용하게 된다.

Stavropoulou(2006)와 Reddish & Yasar(1996)도 이와 유사한 천공저항시험에 대한 연구를 수행한 바 있으나 콘크리트 재료가 아닌 암석의 압축강도를 추정하기 위한 것이었으며, RILEM(2004)에서도 천공에너지법에 의한 표면강도 추정방법을 제시하였으나 조적식(masonry) 모르타르 구조물에 대한 것으로서 콘크리트 재료에 대해서는 전혀 고려가 이루어지지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 쉽게 사용할 수 있으며 각종 천공변수를 조절할 수 있는 소형의 천공저항시험장비를 제작하고 이를 콘크리트 및 모르타르 재료에 적용하여, 측정된 천공 반력과 압축강도의 상관관계를 도출하고자 하였다. 이상의 상관관계를 기반으로 하여 화재로 인한 터널 콘크리트 라이닝의 역학적 특성 변화를 신속하고 연속적으로 추정하는데 활용할 수 있는 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 천공저항시험법의 제안과 천공저항시험장비의 제작

2.1 천공저항시험법의 개념

천공저항시험법에서는 천공 관입속도, 분당회전수, 추력, 비에너지와 같은 천공변수 가운데 일부항목을 일정하게 유지한 상태에서 나머지 항목의 변화를 측정하여 천공대상의 특성을 파악하게 된다. 예를 들면 천공 변수 중 드릴비트의 추력과 분당회전수를 일정하게 한 상태에서 관입속도의 변화를 측정하여 천공대상의 특성을 파악하는 방법이 있을 수 있으며, 드릴비트의 관입속도와 분당회전수를 일정하게 한 상태에서 추력과 비에너지의 변화를 측정하여 천공 대상의 특성을 파악하는 방법이 있다.

전자의 방법은 몽블랑 화재사고 후 프랑스와 이탈리아

아에서 화재조사시 적용한 방법이다(Faure et al., 2002). 이 조사방법에서는 발파천공용 드릴장비(비트직경: 40mm)가 사용되었고 그림 1과 같이 드릴비트의 관입시 화재 손상부와 건전부에서의 관입속도(천공변수)의 차이를 측정하여 열화손상부를 파악한 후, 코어링에 의해 채취된 공시체를 대상으로 측정된 압축강도와 관입속도를 비교하여 관입속도와 압축강도의 관계를 도출한 바 있다. 이 방법과 같이 비트직경이 큰 경우에는 비트를 시험체에 관입시키기 위해 큰 힘의 추력이 요구된다. 따라서 이러한 큰 힘의 추력을 유지하기 위해서는 발파천공용 드릴장비와 같이 자체중량이 큰 장비를 사용해야 한다는 한계가 있다. 특히 화재 후 심각한 화재손상이 발생한 터널 내로 대형의 발파천공 드릴장비의 진입이 어려울 수도 있다.

후자의 방법으로는 EU의 Framework 프로그램의 일환으로 수행된 Stavropoulou(2006)의 연구를 들 수 있다. EU에서는 유럽지역의 석재 유적 보수를 위한 조사방법을 개발하기 위하여, 압축강도가 1~110MPa 범위인 암석시험편에 대하여 천공저항시험을 수행하였고 이로부터 천공변수와 암석강도와의 관계를 도출하였다. 이 연구에서는 직경이 2~5mm인 드릴비트를 사용하였고, 관입속도와 분당회전수를 일정하게 한 상태에서 대리석 및 사암 등을 천공할 때 발생하는 반력과 토크를 측정하였다. 이 연구는 암석에 대해서 수행한 것이므로 콘크리트 재료로 이루어진 터널 구조물에 직접 적용될 수는 없지만, 암석과 같은 비교적 높은 강도의 재료를 대상으로 관입속도와 분당회전수를 제어하여 장비의 소형화를 이루었다는 점에서 큰 의의를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 소형 시험방법을 제안하기 위하여 Stavropoulou(2006)의 연구와 마찬가지로 관입속도와 분당회전수를 고정

시킨 상태에서 측정된 반력과 토크로부터 재료의 역학적 특성을 추정하는 개념을 적용하였다.

2.2 천공저항시험장비의 제작

본 연구에서는 구조물의 손상평가에서 가장 일반적인 평가요소인 일축압축강도를 추정하기 위한 현장강도 추정용 천공저항시험 장치를 개발·제작하여 적용하였다. 개발된 장치는 국부파괴조사방법으로 분류할 수 있으며 파괴부위를 최소화 할 수 있도록 천공 비트의 선정에 유의하였다.

개발된 장치의 적용 가능성을 평가하고 모르타르 및 콘크리트의 역학적 특성과 천공변수들과의 관계를 도출하기 위하여 그림 2와 같이 시험시료와 천공저항시험 장치가 일체화된 구조의 실내시험용 장비를 제작하였다. 또한 이상과 같이 제작된 천공저항시험 장치의 주요 사양을 정리하면 다음의 표 1과 같다.

천공저항시험장비에서는 드릴모터(그림 2b)에 의해 0~1,550rpm 범위로 분당회전수를 제어할 수 있으며, 제어판(controller)에 장착된 스피드모터(speed motor)에 의해 최대 4mm/sec까지 드릴비트의 관입속도를 조절할 수 있다(그림 2a). 이때 분당회전수와 관입속도는 시험 전에 제어부에서 설정된 값으로 유지된다. 또한 실제 드릴비트(drill bit)의 관입으로 인해 발생하는 반력(reaction force), 토크(torque) 및 관입깊이(penetration depth)는 각각 로드셀(load cell), 토크셀(torque cell) 및 LVDT에 의해 측정된다(그림 2b).

드릴비트의 형상도 천공시험 결과에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되나 개발된 천공저항시험 장치의 활용성을 높이고 드릴비트 형상에 대한 추가적인 연구노력을 최소화하고자 기존의 상용 제품을 적용하였다. 본 연

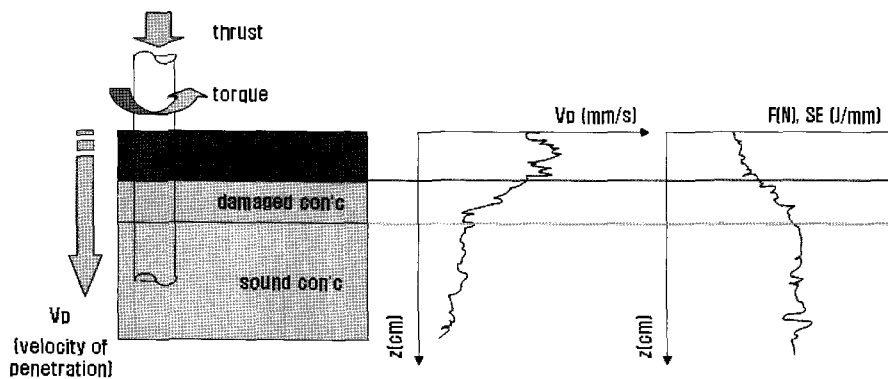
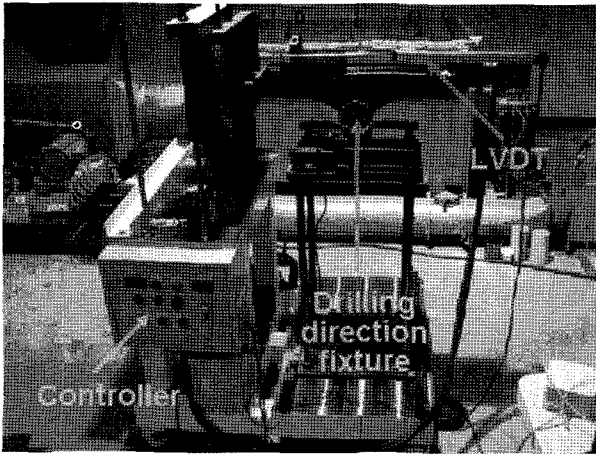
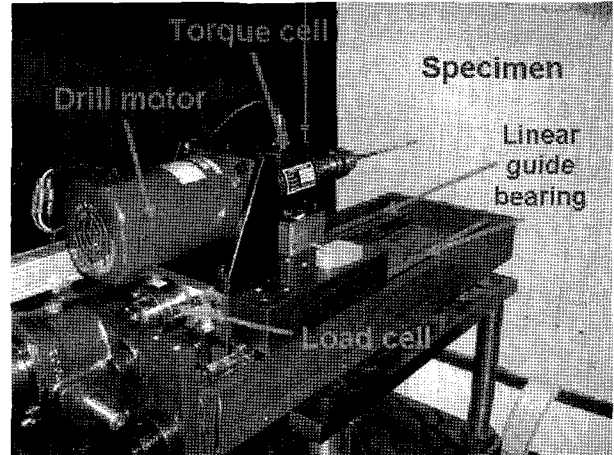


그림 1. 천공저항시험에 의한 화재 손상구간의 평가개념



(a) 천공저항시험 장치 전경



(b) 천공저항시험 장치 상세

그림 2. 실내시험용 천공저항시험 장치

표 1. 제작된 천공저항시험 장치의 주요 사양

구분	주요 사양
로드셀	· 최대용량: 1,962N
토크셀	· 최대용량: 490.5N·cm
드릴모터	· 전력: 200W · 전압: 220V · 주파수: 60Hz · 전류: 1.20A · 분당회전수: 최대 1,550rpm
관입속도 조절용 스피드모터	· 전력: 90W · 전압: 220V · 주파수: 50Hz · 전류: 0.97A · 분당회전수: 최대 1,250rpm
LVDT	· 비선형성: ± 0.05% · 최대 용량: 30cm

구에서는 BOSCH사의 SDS-plus 햄머드릴(hammer drill) 용 비트를 선정하여 사용하였으며, 드릴비트를 일반 회전식 드릴비트 물림쇠에 단단히 고정시키기 위해 드릴 비트 물림쇠 쪽의 일부를 절단한 후 시험에 사용하였다.

3. 시험체 제작 및 시험방법

3.1 시험체 제작

본 연구에서는 천공저항과 재료의 역학적 특성 사이의 상관관계를 도출하기 위하여 천공저항시험용으로 600×600×400mm의 직육면체 시험체 9개를 제작하여 시험에 활용하였다(표 2 및 표 3). 제작된 직육면체 시험체

표 2. 천공저항시험에 적용된 모르타르 배합조건

시험조건	W/C (%)	시멘트 (g)	물 (g)	모래 (g)	고성능감수제 (g)	비고
CASE 1	70	300	210	1035	3.6	모르타르
CASE 2	55	510	280.5	1530	0	모르타르
CASE 3	55	300	165	1035	3.6	모르타르
CASE 4	사전 제작된 고강도 모르타르					고강도 모르타르
CASE 5	75	280	210	1120	3.36	모르타르

표 3. 천공저항시험에 적용된 콘크리트 배합조건

시험조건	굵은 골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/a (%)	물	단위중량(kg/m ³)				비고
							시멘트	모래	자갈	고성능감수제	
CASE 6	25	15±2.5	4.5±1.0	0.65	42.0	187.0	287.7	724.4	1000.4	2.3	콘크리트
CASE 7	25	15±2.5	4.5±1.0	0.50	42.0	187.0	374.0	695.0	959.7	3.0	콘크리트
CASE 8	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

는 모르타르 시험체 4개와 콘크리트 시험체 5개로서, 물-시멘트비를 위주로 배합조건을 달리하여 다양한 강도 조건에 대한 시험을 수행할 수 있도록 하였다. 이때 표 2에서 Case 4는 비교적 강도가 큰 조건에 대한 적용 가능성을 파악하고자 재령 2년 이상인 사전에 제작된 모르타르 시험체이다.

또한 각 배합조건의 압축강도 및 탄성계수를 측정하기 위하여, $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 공시체를 직육면체 시험체와 같은 조건에서 제작하였다. 고강도 모르타르 직육면체 시험체에 대해서는 코어 보링을 실시하여 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ 공시체를 회수하여 이를 압축시험에 활용하였다.

3.2 시험방법

양생 후 기건상태에서 시험체에 수행된 시험은 천공저항시험, 반발경도시험, 초음파속도측정, 그리고 압축시험의 네 가지이다. 천공저항시험과 반발경도시험은 각각 그림 3 및 그림 4와 같이 직육면체 시험체에 수행되었고, 초음파속도시험과 압축강도시험은 원주형 공시

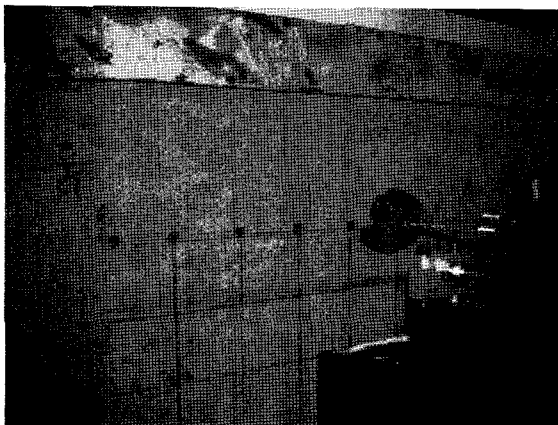


그림 3. 천공저항시험

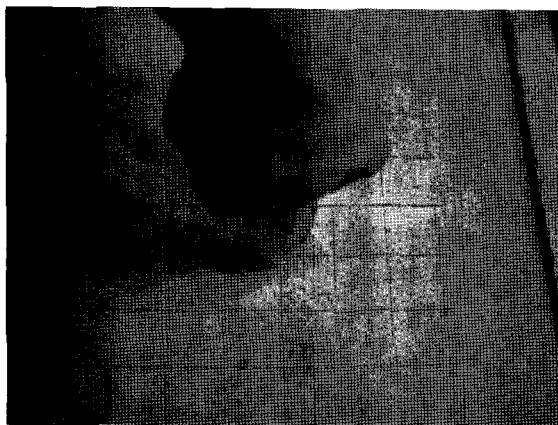


그림 4. 반발경도시험

체에 대해 수행되었다. 이때 반발경도시험과 초음파속도측정을 병행한 이유는 천공저항시험에 의한 압축강도 추정관계식의 정확성을 비교·평가하기 위해서였다.

시험 전에 각 직육면체 시험체의 한쪽 표면을 연마기로 평탄하게 연마한 후, 동일 평면상에서 5cm 간격으로 20개 지점에 대해 반발경도를 측정하였다. 천공저항시험은 반발경도시험을 수행한 20개 지점 가운데 총 5개 지점에 대하여 수행되었으며, 천공저항시험 중 얻어지는 천공저항 반력, 토크 및 관입깊이를 20Hz의 샘플링 속도로 측정하였다.

또한 공시체 연마기에 의해 원주형 공시체의 상하면을 연마한 후, 각 공시체에 대해서 초음파(P파)속도를 3회씩 측정하였다. 초음파속도를 측정한 후 동일한 공시체에 대해 일축압축시험을 수행하였다. 압축시험은 하중제어방식으로 수행되었으며 이때 하중속도를 0.3MPa/sec로 설정하였다.

4. 천공저항시험의 최적측정조건 도출

본 연구에서는 천공저항시험의 정확성을 높이고 시험결과의 편차를 최소화할 수 있는 최적 시험조건을 도출하기 위하여, 천공저항시험의 주요 변수인 비트크기, 분당회전수 그리고 관입속도를 각각 변화시키면서 그에 따른 시험결과를 분석하였다.

4.1 최적 분당회전수의 결정

최적의 분당회전수를 결정하기 위하여 모르타르 직육면체 시험체(CASE 2, 표 1 참조)에 대해서 비트직경과 관입속도를 각각 10mm와 1.4mm/sec로 일정하게 설정한 후, 분당회전수를 변화시키면서 반력과 토크를 측정하였다(그림 5 및 그림 6).

분석결과, 반력의 경우와 달리 관입깊이에 따른 토크 측정결과는 편차가 매우 크게 나타나 재료 특성에 따른 뚜렷한 상관관계를 도출하기 어려울 것으로 판단되었다(그림 5). 이는 비트 회전에 따른 미세한 충격이나 재료 내부의 미세 조직에 의해 토크가 상당히 민감하게 측정되기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 천공저항에 따른 재료의 역학적 특성을 도출하는데 주된 목적이 있으므로, 결과분석 시에는 토크 측정결과를 배제하고 반력 측정결과만을 활용하였다.

반면, 그림 6에서는 분당회전수가 높아질수록 드릴비

트의 최대 관입 가능깊이가 길어지는 것을 확인할 수 있다. 특히 분당회전수가 500rpm과 1,000rpm인 경우에는 관입깊이가 각각 12mm 및 62mm인 위치에서 드릴비트의 회전이 정지되어 천공저항시험을 더 이상 수행하지 못하였다. 이는 분당회전수가 작아서 재료의 회전저항을 극복할 수 없었기 때문인 것으로 판단된다. 반면, 분당회전수가 1,300rpm이상인 경우에는 100mm 이상의 깊이까지 천공저항시험을 원활히 수행할 수 있었다.

장수호 등(2006b)은 독일의 RABT(Richtlinien für die

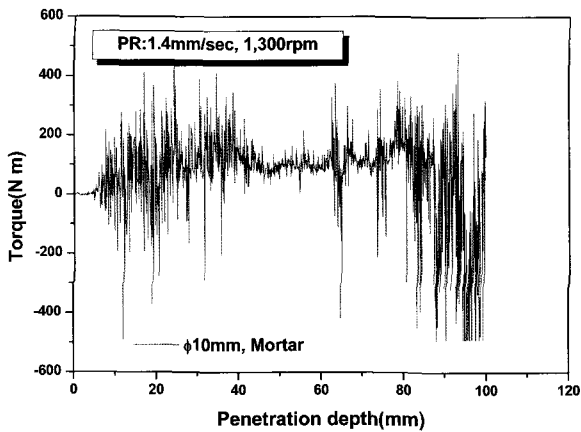


그림 5. 드릴비트의 관입에 따른 토크 변화

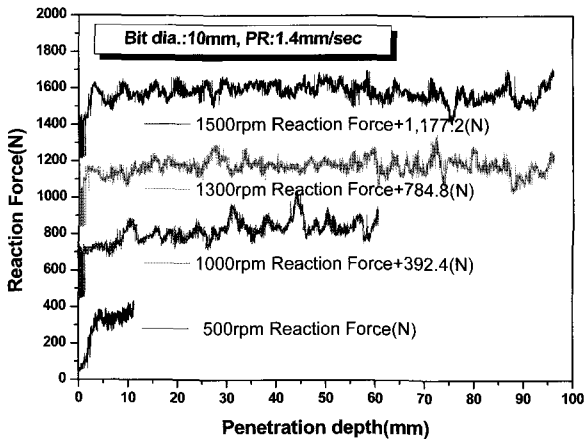


그림 6. 분당회전수에 따른 천공반력의 변화

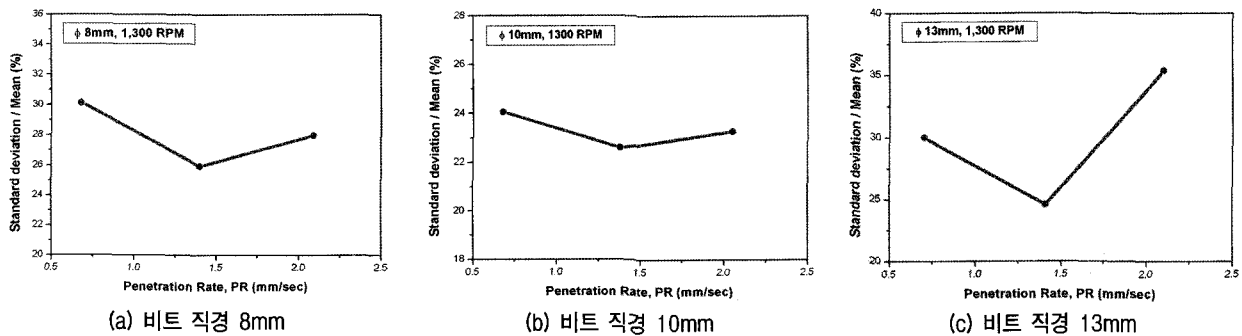


그림 7. 비트직경별 관입속도와 측정 편차와의 관계

Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) 및 네덜란드의 RWS(RijksWaterStaat) 화재시나리오 하에서 터널구조물의 시공재료별 화재손상 특성을 규명한 결과, 화재 발생 후 잔존부의 화재 손상깊이는 최대 약 10cm인 것으로 보고하였다. 따라서 화재손상에 의한 잔존부 조사를 위해서는 10cm 이상의 천공저항시험이 가능해야 하고 본 연구에서 제작한 천공저항시험장비에 적용된 드릴모터의 최대 분당회전수가 1,550rpm임을 고려하여, 천공저항 시험에 적용할 최적 분당회전수를 추력발생모터가 안정적으로 작동할 수 있는 1,300rpm으로 설정하여 적용하였다.

4.2 최적 비트직경 및 관입속도의 결정

앞서 4.1절에서 도출한 분당회전수 1,300rpm 조건하에서 최적의 비트크기와 관입속도를 결정하기 위하여 모르타르 직육면체 시험체(CASE 2, 표 1 참조)에 대해 총 9가지 조건의 천공저항시험을 수행하였고 반력 측정 결과의 평균, 표준편차 및 분산계수를 분석하였다.

그림 7은 각 비트크기 조건별로 3가지 관입속도 조건에서 측정된 반력 측정결과와 분산계수를 보여준다. 모든 비트크기 조건에서 관입속도가 1.40mm/sec일 경우에 분산계수가 가장 낮게 나타났다. 따라서 시험결과와 편차를 최소화하기 위하여 관입속도를 1.40mm/sec로 설정하는 것이 적절할 것으로 판단되었다.

또한 최적 분당회전수 조건인 1,300rpm하에서 모든 9가지 시험조건으로부터 얻어진 분산계수를 도시하면 그림 8과 같으며, 비트 직경이 10mm일 경우가 비트 직경이 8mm 및 13mm일 경우보다 측정결과와 분산이 작게 나타남을 확인할 수 있다.

이상으로부터 분당회전수가 1,300rpm, 관입속도가 1.40mm/sec, 그리고 비트직경 10mm일 경우를 본 연구

에서 개발한 천공저항시험장비의 최적 시험조건으로 선정하여 시험을 수행하였다.

4.3 비트마모의 영향

1개의 드릴비트를 반복적으로 사용할 경우 그림 9와 같이 모든 시험조건에서 시험이 반복됨에 따라 측정된 천공저항 반력의 평균값이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 비트를 반복적으로 사용할 경우 비트가 마모됨으로 인해 마모되지 않은 비트를 사용할 경우와 비교하여 동일한 조건에서 큰 반력이 작용한 것으로 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 천공저항시험의 적용시에는 이러한 비트 마모의 영향을 배제하기 위하여 각 시험별로 새로운 드릴비트로 교환하여 사용하였다.

5. 천공저항시험결과

앞선 4장에서 최적 조건으로 도출된 비트직경 10mm, 분당회전수 1,300rpm, 관입속도 1.40mm/sec의 시험조건

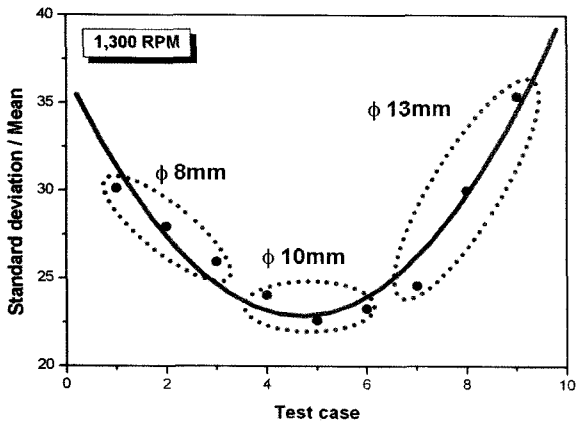


그림 8. 각 시험조건별 측정 반력결과의 평균 분산계수

하에서, 천공저항과 역학적 특성사이의 상관관계를 도출하기 위한 일련의 시험을 실시하였다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 각 천공저항시험시에 드릴비트를 새롭게 교환하여 사용함으로써 비트 마모로 인한 시험결과의 편차를 최소화하고자 하였다.

5.1 일축압축시험결과

본 연구에서는 각 배합조건별로 3개의 공시체에 대해 압축강도와 탄성계수를 측정하였으며(표 4), 측정결과와 평균값을 천공저항시험으로부터 추정하고자 하는 역학적 특성의 참값으로 활용하였다.

5.2 반발경도시험 및 초음파속도시험결과

반발경도시험은 각 배합조건별로 그림 4와 같이 격자망 형태의 20개 지점에 대해 실시되었으며, 식 (1)의 일분재료화회식과 재령에 의한 보정을 실시하여 강도를 산출하였다(표 4).

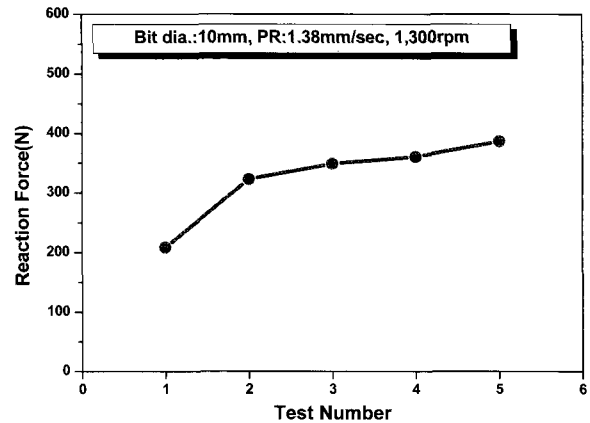


그림 9. 드릴비트의 반복 사용에 따른 반력증가 (Case 2)

표 4. 각 배합조건별 모르타르 및 콘크리트의 역학적 특성과 반발경도시험 결과

배합 조건	압축강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	반발경도 (R_o)	추정 강도 (F_c , MPa)	재령계수 (α)	보정된 강도 (F_{c28} , MPa)	재령일수
CASE 1	20.11	12.91	35.00	26.59	1.40	37.22	13일
CASE 2	25.85	15.59	47.60	42.65	1.06	45.21	24일
CASE 3	29.80	15.68	40.40	33.47	1.40	46.86	13일
CASE 4	80.84	34.76	56.20	53.62	0.70	37.54	2년 이상
CASE 5	7.95	9.40	2.10	-	2.36	-	7일
CASE 6	23.51	16.55	34.95	26.52	1.36	36.07	14일
CASE 7	30.24	22.67	38.60	31.18	1.4	43.65	13일
CASE 8	52.31	19.49	47.75	42.85	1.36	58.27	14일
CASE 9	12.14	13.34	23.10	11.41	3.36	38.33	7일
CASE 10	22.99	14.28	26.30	15.49	4.36	67.54	7일

$$F_c = 1.27 \times R_o - 18.05 \quad (1)$$

여기서 R_o 는 반발경도, 그리고 F_c 는 반발경도로부터 추정된 재료의 압축강도(단위: MPa)이다.

표 4와 같이 재령에 대한 보정을 실시하여 추정된 압축강도와 실제 압축시험에 의해 측정된 압축강도와의 상관관계를 파악하였다. 그러나 분석결과 재령에 대한 보정을 실시한 결과는 실제 압축강도와의 상관성이 낮은 것으로 나타나, 그림 10과 같이 재령에 대한 보정을 실시하지 않은 추정 압축강도와 실제 압축강도를 비교하였으며 최적 회귀곡선에 의한 결정계수는 0.78로 나타났다. 이때 평균 반발경도가 2.10이었던 배합조건 CASE 5에서는 강도 추정식을 적용할 경우 추정된 압축강도값이 음수로 나타나 적용이 불가능하여 분석에서 제외하였다. 반면, 추정 압축강도가 아닌 반발경도와 실제 압축강도의 상관관계를 조사한 결과, 결정계수가 0.88인 지수 함수형태로 나타나 보다 양호한 상관관계를 도출할 수 있었다(그림 11).

초음파속도시험은 각 배합조건별로 제작된 원주형공

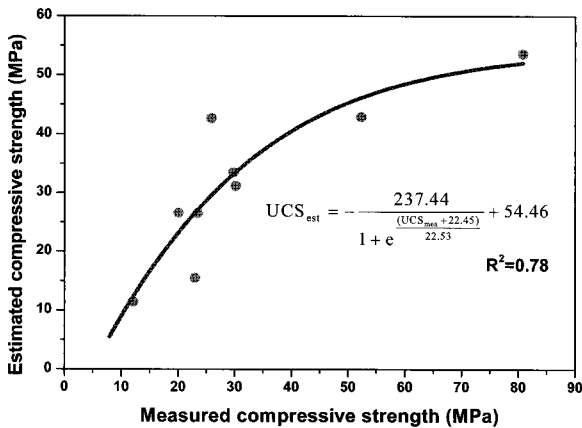


그림 10. 반발경도로 추정된 압축강도와 실제 측정된 압축강도의 상관관계

시체의 상하단에 가진자와 수신자를 설치한 후 직접법에 의해 수행되었고, 식 (2)와 같이 RILEM CNDT 소위 원회의 추천식을 사용하여 강도를 추정하였다(표 5).

$$F_c = 21.5 \left(\frac{V_p}{1000} \right) - 62 \quad (2)$$

여기서 V_p 는 초음파속도(단위: m/sec)이며, F_c 는 초음파속도에 의한 추정 압축강도(단위: MPa)이다.

그림 12는 실제 압축강도 측정값과 초음파속도와의 관계를 나타낸 것이다. 초음파속도 역시 반발경도의 경우와 마찬가지로 초음파속도에 의해 추정된 압축강도와 실제 압축강도가 큰 차이를 나타내어 초음파속도와 압축강도를 직접적으로 비교하였다. 하지만 초음파속도와 압축강도 측정결과와의 결정계수는 0.44로 나타나 양호한 상관관계를 도출하기 어려웠다.

5.3 모르타르에 대한 천공저항시험 결과

총 5가지 종류의 모르타르 배합조건에 대하여 수행된 천공저항시험으로부터 얻어진 반력 측정결과를 정리하

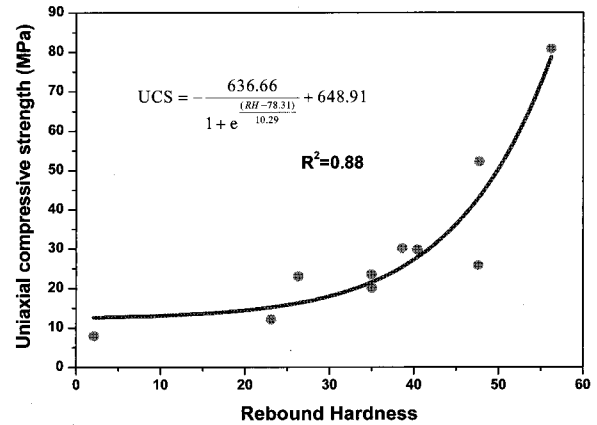


그림 11. 반발경도와 실제 측정된 압축강도와의 상관관계

표 5. 각 배합조건별 초음파속도 시험결과

배합조건	압축강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	초음파속도 (m/sec)	추정압축강도 (F_c , MPa)	재령일수
CASE 1	20.11	12.91	3,334	9.67	재령 13일
CASE 2	25.85	15.59	3,460	12.39	재령 24일
CASE 3	29.80	15.68	3,598	15.35	재령 13일
CASE 4	80.84	34.76	4,066	25.42	2년 이상
CASE 5	7.95	9.40	2,799	-	재령 7일
CASE 6	23.51	16.55	3,817	20.07	재령 14일
CASE 7	30.24	22.67	3,927	22.43	재령 13일
CASE 8	52.31	19.49	4,260	29.58	재령 14일
CASE 9	12.14	13.34	3,944	22.80	재령 7일
CASE 10	22.99	14.28	3,821	20.16	재령 7일

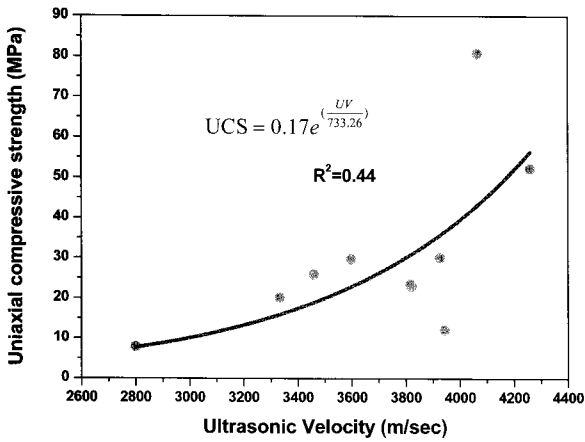


그림 12. 일축압축강도와 초음파속도의 관계

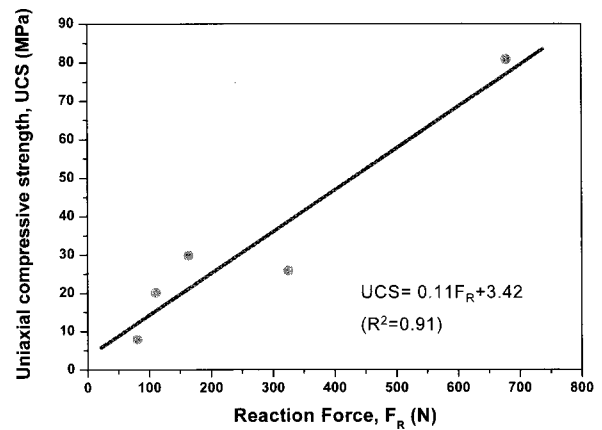


그림 13. 천공 반력과 압축강도와의 상관관계 (모르타르)

표 6. 모르타르 시험편에 대한 천공저항시험 결과

배합 조건	시험 회수	반력 측정결과			재령 일수
		평균(N)	표준편차(N)	분산계수(%)	
CASE 1	1	110.56	29.82	26.97	13일
	2	110.36	37.87	34.31	
	3	103.20	25.80	25.00	
	4	113.89	29.53	25.93	
	5	114.78	27.86	24.27	
평균		110.56	30.18	27.30	
CASE 2	1	208.46	63.57	30.49	24일
	2	322.55	85.84	26.61	
	3	348.65	68.08	19.53	
	4	360.32	62.88	17.45	
	5	386.51	72.89	18.86	
평균		325.30	70.65	22.59	
CASE 3	1	148.12	54.94	37.09	13일
	2	151.96	60.82	40.03	
	3	191.98	39.53	20.59	
평균		164.02	51.76	32.57	
CASE 4	1	488.44	84.27	17.25	2년 이상
	2	629.70	105.46	16.75	
	3	681.69	79.46	11.66	
	4	754.29	92.70	12.29	
	5	837.28	63.27	7.56	
평균		678.28	85.03	13.10	
CASE 5	1	65.92	34.83	52.83	7일
	2	64.65	20.50	31.71	
	3	94.18	56.21	59.69	
	4	71.02	57.19	80.52	
	5	109.58	59.15	53.98	
평균		81.07	45.58	55.75	

면 표 6과 같다.

표 6의 천공저항시험 결과와 배합조건별로 실제 측정된 모르타르의 역학적 특성과의 상관관계를 도시하면 그림 13 및 그림 14와 같다. 압축강도와 탄성계수에 대

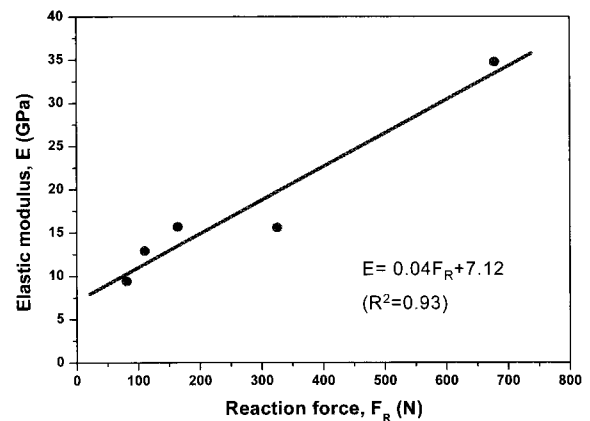


그림 14. 천공 반력과 탄성계수와의 상관관계 (모르타르)

한 결정계수는 각각 0.91과 0.93으로 나타나 반발경도의 경우보다 우수한 상관관계가 도출되었다. 더욱이 반발 경도는 탄성계수를 추정할 수 있는 관계식이 제시되어 있지 않으나, 본 연구결과로부터 천공저항에 의해서 천공 대상 재료의 탄성계수의 추정도 가능할 것으로 나타났다. 이상과 같이 천공저항시험으로부터 측정된 평균 반력으로부터 모르타르의 역학적 특성을 추정하기 위한 관계식을 정리하면 다음의 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

$$UCS = 0.11F_R + 3.42 \quad (R^2=0.91) \quad (3)$$

$$E = 0.04F_R + 7.12 \quad (R^2=0.93) \quad (4)$$

여기서 UCS는 모르타르의 추정 압축강도(단위: MPa), E는 모르타르의 추정 탄성계수(GPa), 그리고 F_R 은 천공 저항시험으로부터 측정된 반력의 평균값(단위: N)이다.

5.4 콘크리트에 대한 천공저항시험 결과

모르타르와 달리 콘크리트에는 굵은 골재가 포함되

어있어 그림 15와 같이 골재가 존재하는 것으로 추정되는 지점에서 천공 반력값의 변화가 크게 나타나, 모르타르와는 다른 분석방법이 필요할 것으로 판단되었다. 또한 드릴비트의 크기에 의해서도 반력값의 변화경향이 상이하였다. 직경이 10mm인 드릴비트의 경우에는 골재의 영향이 뚜렷하게 나타나지 못하였으며, 직경이 6mm인 드릴비트의 경우에는 골재의 영향은 뚜렷하게 나타났지만 골재가 아닌 콘크리트 매트릭스를 관입할 때의 절대적인 반력값이 작게 나타나 강도에 따른 반력값의 변화를 반영하기 어려운 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 직경 8mm의 드릴비트가 골재의 영향과 강도에 따른 반력값의 변화를 상대적으로 비교적 잘 반영하는 것으로 판단하여, 콘크리트 시험체에 대해서는 드릴비트 직경 8mm, 분당회전수 1,300rpm, 1.40mm/sec의 조건 하에서 천공시험을 실시하였다.

앞서 설명한 바와 같이 콘크리트에서는 드릴비트가 굵은 골재를 만나게 되면 반력이 급속히 커지게 되어 굵은 골재의 영향을 고려해야 하기 때문에, 모르타르의 경우처럼 역학적 특성을 추정하기 위하여 평균 반력값을 적용할 수 없을 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 골재의 영향을 고려하여 콘크

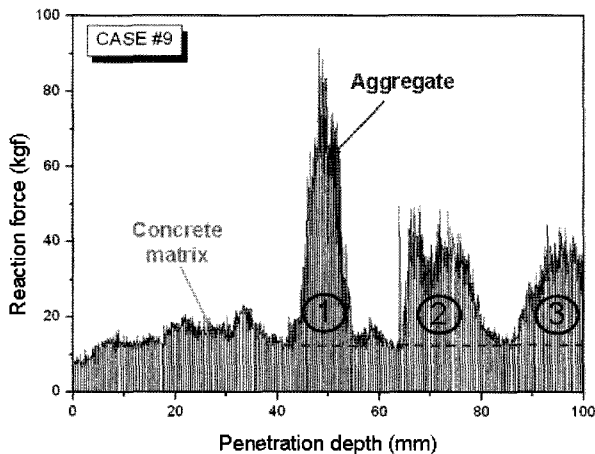


그림 15. 콘크리트에 대한 천공저항시험결과의 분석시 굵은 골재의 고려방법

리트의 역학적 특성을 추정하기 위하여 다음과 같은 방법을 적용하였다. 먼저 골재를 만나지 않았을 때의 콘크리트 매트릭스에 대한 평균 반력값을 기본값(그림 15의 점선)으로 설정한다. 그 다음 관입깊이에 따른 반력 그래프의 전체 면적(total area, ①)을 계산한 후, 기본값 하부의 면적(base area, ②)을 별도로 계산한다. 이상과 같이 계산된 전체면적에서 기본값 하부의 면적을 빼면 그림 15와 같이 골재에 의해 발생된 반력의 면적(①-②=③)을 구할 수 있다. 실제로 골재에 의한 반력면적은 드릴비트가 만나게 되는 굵은 골재의 개수에 따라 달라지므로 골재에 의한 반력부분(①+②+③)의 면적을 추정 골재 개수(그림 15에서는 3개)로 나누어주면 굵은 골재의 개수를 고려한 골재의 영향면적[(①-②)/골재개수=④]을 구할 수 있다. 마지막으로 콘크리트 매트릭스의 천공저항인 기본값 하부의 면적과 골재 개수를 고려하여 산정된 골재의 천공저항을 더하면, 골재를 고려한 단위 반력 에너지(⑤+④=⑥)를 구할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 에너지 개념을 사용하여 콘크리트에 대한 관입깊이에 따른 반력값의 변화면적을 산정하였다. 이때 골재는 콘크리트 내부에서 무작위로 분포되어 있다고 가정한다. 이상과 같이 굵은 골재를 고려하여 산정된 반력 에너지를 정리하면 표 7과 같다.

그림 16은 실제 측정된 압축강도와 굵은 골재의 영향을 고려하여 계산된 천공 반력에너지의 관계를 도시한 것이다. 천공 반력에너지와 압축강도의 결정계수는 0.94로서 양호한 상관관계가 얻어졌으나, 실제 측정된 콘크리트의 탄성계수와 천공 반력에너지의 상관관계는 뚜렷하게 나타나지 않은 관계로 본 연구의 분석에서 제외하였다. 이상과 같이 본 연구에서 도출된 콘크리트의 압축강도와 천공저항시험으로부터 얻어진 반력에너지 사이의 상관관계를 정리하면 다음의 식 (5)와 같다.

$$UCS_{estimated} = 0.003E_R - 33.21 \quad (R^2=0.94) \quad (5)$$

여기서 E_R 은 굵은 골재의 영향을 고려하여 계산된 반

표 7. 콘크리트에 대해 수행된 천공저항시험으로부터 계산된 단위 반력 에너지

CASE	전체면적[①] (N·mm)	기본값 하부의 면적[②] (N·mm)	골재에 의한 영향 면적 [(①-②)/골재개수=③] (N·mm)	골재를 고려한 단위 반력 에너지 [⑤+④=⑥] (N·mm)	재령일수
6	28,869.45	16,790.66	4,026.26	20,816.93	14일
7	26,720.87	19,113.08	1,267.97	20,381.04	13일
8	36,189.19	27,432.11	2,909.03	30,351.14	14일
9	22,506.10	14,528.99	2,659.04	17,188.03	7일
10	28,455.47	17,365.15	1,848.39	19,213.54	7일

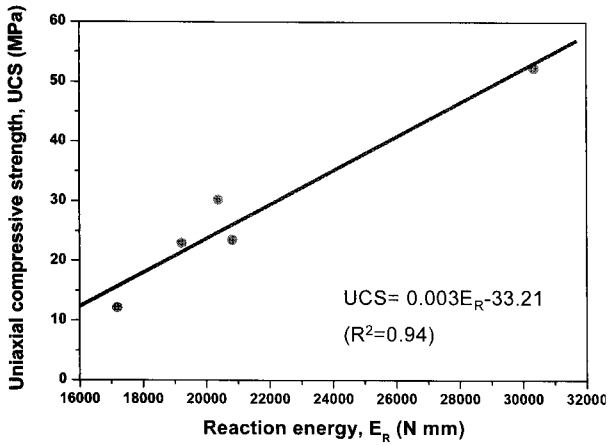


그림 16. 콘크리트의 압축강도와 천공 반력에너지 사이의 상관관계

력에너지 (단위: N·mm)이며, $UCS_{estimated}$ 은 천공저항시험으로부터 추정되는 콘크리트의 압축강도 (단위: MPa)이다.

이상과 같이 표면 강도만을 추정할 수 있는 반발경도 시험법과 같은 대부분의 비파괴 조사와는 달리, 본 연구에서 제안한 천공저항시험법은 재료의 두께 방향으로 연속적인 강도 추정결과로부터 화재손상 또는 열화 구간의 파악이 가능할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 코어 회수에 의한 압축강도 측정과정과 비교해서도 구조물에 대한 추가적인 손상을 최소화할 수 있으며 천공 후 신속하게 역학적 특성 추정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 더욱이 손상 부위에 대해서 코어링을 실시할 경우, 압축시험은 코어 회수가 불가능하거나 코어링에 의해 추가적인 손상이 코어에 발생할 수 있다는 한계가 있다.

하지만 본 연구 결과는 터널구조물의 화재손상을 평가하기 위한 천공저항시험법을 제안하고 그 적용 가능성을 평가하는데 목적을 둔 기초 자료로서 총 10가지 배합조건에 대해서만 실시되었기 때문에, 보다 정확하게 재료의 역학적 특성을 추정하기 위해서는 추가적인 데이터베이스 구축에 의한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

화재발생후 터널 구조물을 신속하게 보수보강하기 위해서는 손상구간의 범위와 정도를 신속하게 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 터널 구조물의 두께 방향으로 화재손상 정도를 신속하고 연속적으로 조사하기 위한 천공저항시험법을 새롭게 제안하였

고 그 적용 가능성을 평가하기 위한 일련의 기초 시험들을 실시하였다. 이상과 같이 수행된 본 연구로부터 얻어진 주요 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 시험장비를 소형화할 수 있도록 관입속도와 분당회전수를 일정하게 고정된 상태에서 천공 관입시에 측정된 반력으로부터 재료의 역학적 특성을 추정하기 위한 개념을 제시하고 시험장비를 제작하였다. 이상과 같이 제작된 천공저항시험장비를 천공조건을 달리하며 비교적 균질한 모르타르 시험체에 대해 적용한 결과, 분당회전수 1,300rpm, 관입속도 1.40mm/sec, 그리고 비트직경이 10mm인 경우에 시험결과의 편차가 가장 작게 나타나 최적의 시험조건으로 판별할 수 있었다.
- (2) 본 연구에서 제작된 천공저항시험장비에서는 천공저항에 대한 지표로서 반력과 토크를 연속적으로 측정할 수 있도록 설계되어 있으나, 실제 적용결과 반력과 달리 토크는 비트 회전에 따른 미세한 충격이나 재료 내부의 미세 조직에 의해 상당히 민감하게 좌우되고 결과의 편차가 매우 크게 나타났다. 따라서 천공저항에 따른 재료의 역학적 특성을 추정하기 위한 상관관계의 도출 시에는 토크 측정결과를 배제하고 반력 측정결과만을 활용하였다.
- (3) 1개의 드릴비트를 반복적으로 사용할 경우, 드릴비트의 마모로 인해 모든 배합조건에서 시험이 반복됨에 따라 천공저항이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 비트 마모의 영향을 배제하기 위하여 각 시험시에 새로운 드릴비트로 교환하여 사용하는 것이 타당할 것으로 사료되었다.
- (4) 천공저항시험으로부터 얻어진 반력 측정결과와 모르타르의 압축강도 및 탄성계수 사이의 결정계수는 각각 0.91과 0.93으로서 반발경도의 경우와 거의 유사하거나 약간 크게 나타나 양호한 상관관계를 도출할 수 있었으며 본 연구에서 제안한 시험방법의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.
- (5) 콘크리트에 포함되어 있는 굵은 골재의 영향을 고려하기 위하여 천공깊이에 따른 반력 에너지 개념을 적용한 결과, 골재를 고려한 반력 에너지와 콘크리트의 압축강도의 결정계수가 0.94로 얻어져 역시 양호한 상관관계를 도출할 수 있었다.
- (6) 본 연구결과는 터널구조물의 화재손상을 신속하고 연속적으로 평가하기 위한 천공저항시험법의 적용

가능성을 평가하는데 목적을 둔 기초자료로서 보다 다양한 배합조건에 대한 추가적인 데이터베이스의 구축을 통한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 박해균, 원종필, 장수호 (2006), “최근 터널 콘크리트 내화대책 연구동향”, *구조물진단학회지*, 한국구조물진단학회, 제10권, 제6호, pp.22-32.
2. 장수호, 윤태국, 최순욱, 배규진 (2006), “화재로 인한 터널 구조물의 피해와 대책”, *한국지반공학회지*, 제22권, 제3권, pp.7-19.
3. 장수호, 최순욱, 권종욱, 배규진 (2006), “화재에 의한 터널구조물 시공재료의 손상 평가”, *대한토목학회논문집*, 제26권, 제3C호, pp.219-228.
4. 한국건설기술연구원 (2006), *지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업 제6 세부과제 - 구조물 재해손상 대응기술 개발*, 2003 산학연 공동연구개발사업 중점연구과제 제3차년도 최종보고서.
5. Faure, R.M., Pozzi, V., Trasino, C. and Hemond, G. (2002), “Colour and speed drill measurement for risk mitigation of a lining after a fire. The experience of Mont Blanc Tunnel”, *Proc. of ITA-AITES*, Paper No. TS4A.4.
6. Reddish, D.J. and Yasar, E. (1996), “A new portable rock strength index test based on specific energy of drilling”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.33, No.5, pp.543-548.
7. RILEM (2004), “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.
8. Stavropoulou, M. (2006), “Modeling of small-diameter rotary drilling tests on marbles”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.43, pp.1034-1051.

(접수일자 2007. 5. 4, 심사완료일 2007. 11. 6)