

터널의 품질관리를 위한 슛크리트 초기강도의 현장강도 시험기술

Field Testing Methods on Early Shotcrete Strength for Tunnel Quality Control

홍의준* 장석부** 이성우*** 김기림**** 문상조*****
Hong, Eui-Joon Chang, Seok-Bue Lee, Sung-Woo Kim, Ki-Lim Moon, Sang-Jo

ABSTRACT

Generally, the strength of the field shotcrete is heavily dependent on the field mixing and spraying conditions so that it is different from the strength of the shotcrete mixed in laboratories. As a support member, the early strength of shotcrete unlike concrete as structural material is very important to the initial stabilization of the excavation face in tunnels. Therefore, the field methods to efficiently test the early strength of shotcrete have been highly required.

This paper aimed to verify the pneumatic pin penetration test and the point load test for measuring the early strength of the field shotcrete. Through a series of uniaxial compression, pin penetration, and point load tests for the range of the early shotcrete strength, two equations to estimate reliably the uniaxial compressive strength by the pin penetration and the point load tests were derived.

Field tests in working tunnel were carried out in order to estimate the economic efficiency. As a result, pin penetration method was proved to be the most effective method for testing the early strength of the field shotcrete.

1. 서 론

터널의 건설에 있어서 슛크리트는 안정성 확보에 가장 중요한 지보재이므로 시공중 품질관리에 많은 주의가 요구된다. 특히, 슛크리트의 초기강도는 구조적으로 취약한 막장 주변의 안정성에 매우 중요하므로 슛크리트의 품질관리를 위한 강도기준은 1일 강도와 28일 강도에 대해 규정되어 있다. 슛크리트의 초기압축강도는 원칙적으로는 갱내 굴착면에 타설된 슛크리트의 코어를 채취하여 측정되어야 하나 현장 시험상 많은 제약으로 인하여 실내시험결과로 평가되고 있는 실정이다. 그러나, 현장타설 조건의 슛크리트는 시험실내 배합조건에 비해 약 80% 정도 낮은 강도를 보이는 것이 일반적이며, 현장 품질관리 상태에 따라 더 큰 차이가 발생할 수도 있다(Melbye, 2001). 이에, 실질적인 현장타설 슛크리트의 초기강도를 효과적으로 측정할 수 있는 방법의 필요성이 요구되고 있다.

최근의 연구에 의하면, 현장타설 슛크리트의 초기강도시험 장비로 공기압식 핀관입시험기(Pneumatic pin penetration test)의 적용이 제안되었다(Iwaki et al., 2001, 이석원 등, 2003). 또한, 일축압축시험에 비해 시험이 매우 간편하고 갱내 시험이 가능한 점하중시험(Point load test)의 적용이 제안된 바 있다(장석부 등, 2005).

* (주)유신코퍼레이션, 터널부, 과장, 비회원

E-mail : y12865@yooshin.co.kr

TEL : (02)6202-0848 FAX : (02)6202-0829

** (주)유신코퍼레이션, 터널부, 이사, 정회원

*** (주)유신코퍼레이션, 터널부, 사원, 비회원

**** (주)유신코퍼레이션, 터널부, 과장, 비회원

***** (주)유신코퍼레이션, 터널부, 전무이사, 비회원

이에, 본 논문에서는 효율적인 현장타설 슛크리트의 초기강도시험기술 개발을 위해 핀관입시험과 점하중시험을 통한 일축압축강도를 산정하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 다양한 양생강도에 따른 일축압축시험, 핀관입시험, 점하중시험을 수행하여 일축압축강도에 대한 핀관입 깊이와 점하중지수(Point load index)의 상관관계를 도출하였다.

현장에서도 시험을 수행하여 세 시험법의 현장 적용성 및 효율, 시험 시간 등을 상호 비교하여 경제성 분석을 수행하였다. 그 결과, 경제적으로 가장 우수하고 기능상 효율적인 시험법으로 핀 관입 시험을 선정하였다.

2. 슛크리트 현장강도 시험방법

2.1 개 요

스�크리트 현장강도 측정을 위한 방법으로는 인발시험(Pull-out test), 핀관입시험 및 점하중시험 등을 들 수 있다.

인발시험은 슛크리트 타설 전에 볼트를 삽입한 후 인발하여 그 저항력을 측정하는 방법으로 여러나라에 시험기준이 마련되어 있다. 그러나, 실제 터널현장에서는 시험방법이 복잡하고 시공에 지장을 주기 때문에 별도 형틀에 슛크리트를 타설하여 시험되고 있어 엄밀한 현장시험방법으로 간주하기엔 어려운 점이 있다.

핀관입시험에는 Windsor probe method, Spring-loaded method, 공기압식 핀관입시험이 있다. 본 연구에서는 공기압식 핀관입시험이 화약을 사용하지 않고 폭 넓은 강도범위에 용이하게 적용될 수 있는 장점을 고려하여 본 방법을 채택하였다. 비록 현재 설계기준상으로 슛크리트의 초기강도는 낮은 편이나 최근 슛크리트 고강도화가 세계적인 추세이며 국내에서도 이에 대한 연구의 필요성이 부각되고 있으며 지속적인 연구가 이루어지고 있기 때문에 초기강도시험법의 선정에도 이를 고려할 필요가 있다.

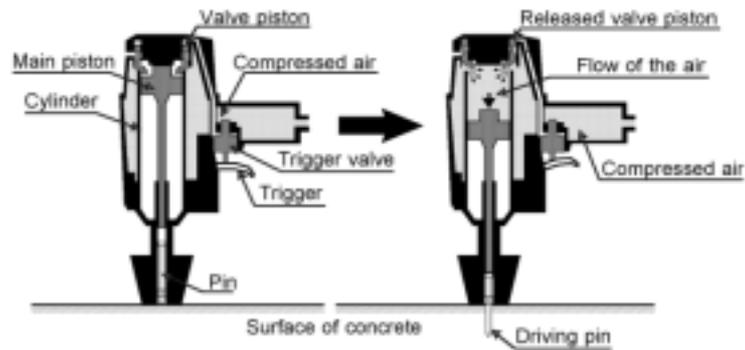
점하중시험은 많은 암석에 대한 시험결과에 대해 압축강도를 산정하기에 손쉬운 방법으로 평가되고 있다. 암석에 비해 슛크리트는 인공재료이기 때문에 상대적으로 점하중시험과 일축압축시험간의 상관성이 높을 것으로 예상되었다.

따라서, 본 절에서는 공기압식 핀관입시험과 점하중시험에 대한 특징 및 개요를 간단히 소개하였다.

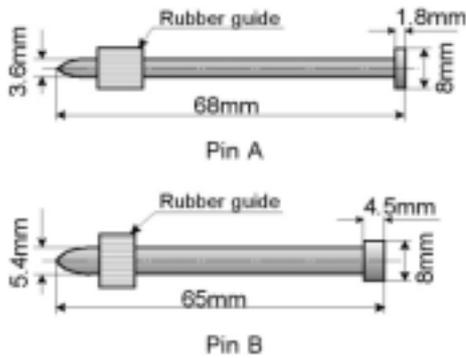
2.2 공기압식 핀관입시험

공기압식 핀관입시험은 압축공기를 이용하므로 안전하다는 장점이 있으며 강도측정범위에 따라 핀을 교체하면서 시험하기 때문에 슛크리트의 초기강도에서 최대 30 MPa 까지의 넓은 범위를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

핀은 일반적인 공기압식 네일러(Nailer)를 사용하여 슛크리트에 발사된다. 공기압식 네일러의 작동원리는 그림1(a)와 같다. 공기압은 기본적으로 15.0 kgf/cm²로 설정되어 있으나, 시험전에 폴리에틸렌 재질의 테스트 앤빌(Anvil)에 대한 검증을 통해 결정한다. 그림1(b)와 같이 강도 추정범위를 넓히기 위해 지름과 길이가 다른 Pin A, Pin B를 사용한다. 시험 후 깊이 측정기로 핀의 관입깊이를 측정한다. 그림1(c)와 같이 핀관입시험은 시험할 지점에서 일반적으로 10회 이상 수행하며, 측정된 핀 관입깊이가 평균 관입깊이의 ± 5 mm 이상이 되었을 때 이를 이상 값으로 규정하여 소정의 시험회수(표준10회)가 이루어지도록 측정값을 보충하도록 한다.



(a) 공기압식 네일러의 작동원리



(b) 핀의 제원



(c) 핀관입시험

그림1. 공기압식 핀관입시험 (Iwaki et al., 2001)

2.3 점하중 시험

점하중 시험장비의 구성은 그림2와 같이 점하중 시험기, 유압잭, 그리고 하중 측정 장치로 구성이 되어있다. 암석을 단단한 강철 콘(Cone) 사이에 넣고 하중을 가하여 하중방향과 평행하게 인장 균열이 생기도록 하여 파괴를 유도한다. 이 시험법은 불규칙한 암석의 형상과 크기의 효과가 상대적으로 적은 장점이 있다. 시료는 임의의 형상을 가져도 무방하나 점하중 축상의 시편의 크기를 측정하여 시험후 그 값을 계산식에 이용한다

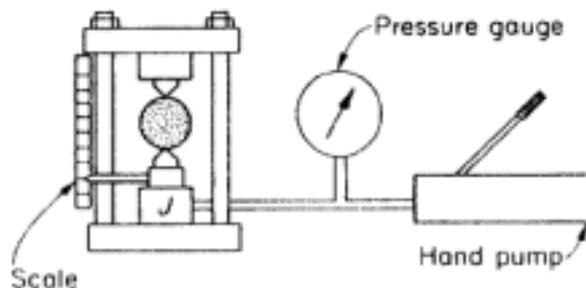


그림2. 점하중시험(Brown, 1981).

점하중 강도지수는 다음과 같은 식으로 정의할 수 있으며, 여기서, P는 파괴시 하중, D는 점하중 간의 거리이다.

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (1)$$

시험시편의 크기와 모양은 특별하게 지정된 것은 아니나 직경의 1.4배 이상 되는 길이의 시편에 대해 이루어져야한다. 실제로 강도/크기 효과는 일반적인 크기에 대한 결과로 보정되어야 한다. 이 점하중지수로부터 암석의 압축강도를 추정할 수 있으며 다음과 같은 식으로부터 압축강도의 추정이 가능하다.

$$q_u = K I_s(50) \quad (2)$$

여기서, q_u 는 암석의 일축압축강도이며 $I_s(50)$ 은 직경 50mm에 대해 보정된 점하중강도지수이다.

3. 실내실험 및 결과분석

3.1 시료준비

실내실험을 위한 재료는 골재, 시멘트, 물, 그리고 모래로서, 도표1과 같은 비로 배합되었다. 골재는 10mm 이하를 사용하였고 골재 표면에 부착되어 있는 세립자를 제거하기 위하여 세척 후 건조시켰다. 시멘트는 포틀랜드 시멘트, 모래는 석영사를 사용하였다. 슛크리트는 급결제를 혼합해야 하나, 실험경험상 초기 급결에 의해 실험시간이 제한되는 문제가 있어 본 실험에서는 급결제를 배제하였다.

도표1. 시험배합비

Aggregate	Portland cement	Water	Sand
568 kg/m ³	450 kg/m ³	194 kg/m ³	1,054 kg/m ³

현장 실험과 같은 조건을 구현하기 위하여 그림3과 같이 가로 2.6m, 세로 1.3m, 높이 20cm인 일체형 거푸집을 제작하여 슛크리트를 타설하였다. 일축압축강도 시료와 점하중강도 시료는 시료 추출 비트를 시료 추출기에 결합하여 채취하였다. 각 압축시험과 동일한 조건에서 편관입시험이 수행되도록 시료채취 주변에서 10회 이상을 수행하도록 계획하였다.

일축압축 강도시험과 점하중강도시험을 위한 코어는 각각 지름 10cm와 5cm 비트를 이용하여 그림4와 같이 추출되었다. 점하중 코어는 세로 길이가 20cm로 추출되어 절단기(Cutter)를 이용하여 10cm로 성형하고 점하중 실험을 수행하였다.

비트에 의하여 추출된 시료를 비트로부터 안전하게 분리하기 위하여 더블튜브 코어바렐(Double tube core barrel)을 사용하여 순환수를 튜브 사이로 통과시켜 비트 내부에서 코어를 분리하도록 하였다.



그림3. 대형 시험물드



그림4. 점하중 및 압축강도시험용 코어

3.2 실험결과

숏크리트의 재령일에 따른 일축압축강도, 핀관입깊이, 점하중시험은 약 27 MPa의 압축강도에 이를 때까지 10회 수행하였다. 그림5는 재령일에 따른 일축압축강도, 핀관입깊이 및 점하중지수를 나타낸 것으로 일축압축강도의 경우 약 20일의 재령일을 기준으로 증가추세가 감소하는 경향을 전형적인 콘크리트 양생과정을 보여주고 있다. 관입깊이는 양생시간에 따라 대체로 선형적으로 반비례하는 양상을 보이고 점하중 지수는 일축압축강도와 유사한 경향을 보여주고 있다.

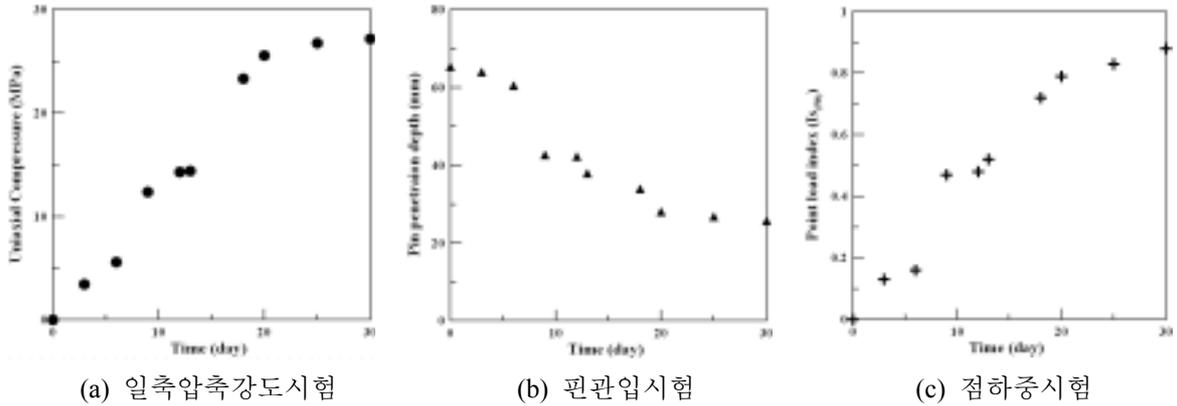


그림5. 각 시험방법에 따른 시험결과

일축압축강도와 핀관입깊이의 상관성 분석결과, 식(3)과 같이 높은 상관성을 보이는 선형 상관식을 구할 수 있었다.

$$q_u = -0.64 D + 42.53 \quad (\text{결정계수 } 0.98) \quad (3)$$

Iwaki 등(2001)은 10MPa를 기준으로 2종류의 핀을 사용할 것을 제안하였으나, 최근 숏크리트의 고강도화에 따라 초기 1일강도를 10MPa 이상을 제안하는 추세이다. 따라서, 10 MPa 이상에 대한 핀 A에 대해서 상관성 분석을 수행하였으며, 실제로 10MPa 이하에 대해서도 큰 오차 없이 압축강도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

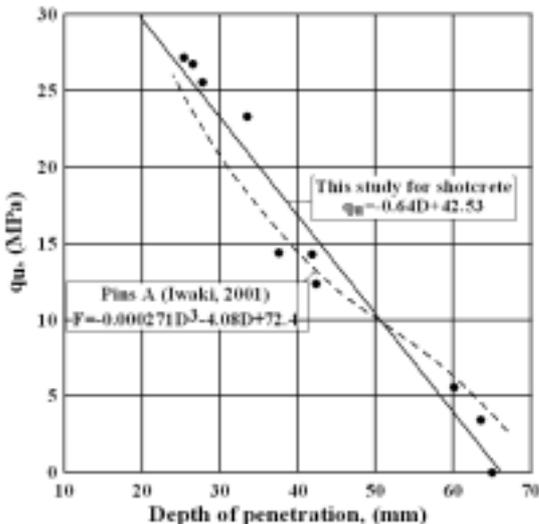


그림6. 핀관입깊이와 일축압축강도와의 상관관계

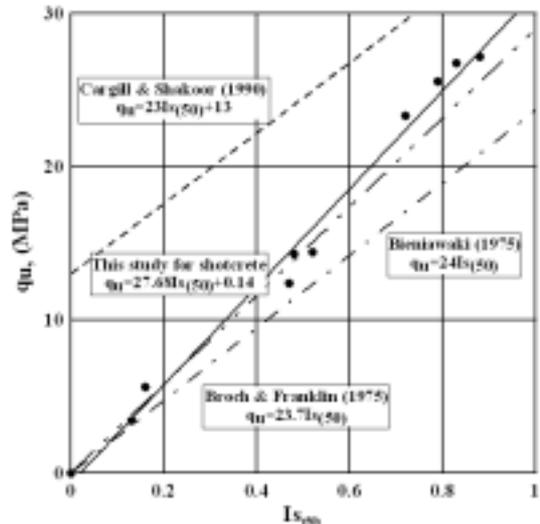


그림7. 점하중지수와 일축압축강도와의 상관관계

그림6은 일축압축강도와 편관입깊이의 상관성을 그래프로 나타낸 것으로 참고로 Iwaki 등(2001)의 결과를 함께 도시하였다. Iwaki의 상관식은 3차원 회귀식으로 본 연구에서 구한 식(4)의 선형식과 비교하여 정밀도에 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.

일축압축강도와 점하중지수의 상관성 분석결과, 식(4)와 같이 높은 상관성을 보이는 선형 상관식을 구할 수 있었다.

$$q_u = 27.68 I_s(50) + 0.14 \quad (\text{결정계수 } 0.96) \quad (4)$$

그림7은 식(4)과 기존 연구자들의 상관관계식(Grasso 등, 1992)을 함께 도시한 것으로 본 연구의 상관식의 기울기는 기존 연구에 비해 다소 급하나 여러 암석 시험결과와 중간에 위치함을 볼 수 있다. 또한, 기존 연구에 비해 상관계수가 높은 이유는 자연에서 채취한 암석에 비해 상대적으로 균질한 시료에 대해 시험이 이루어졌기 때문이다.

4. 현장시험 및 경제성 분석

4.1 현장 적용성 분석

일축압축강도시험, 편관입시험, 및 점하중시험의 현장 적용성 및 경제성을 비교하기 위하여 서울시내의 터널공사현장(신공항철도 00공구)에서 현장시험을 수행하였으며 도표2에 정리하였다. 본 시험은 정량적 결과의 취득이나 시험결과와 상호비교에 의한 시험방법의 우수성 평가가 목적이 아니라, 각 시험에 대한 현장 적용성 및 경제적인 우수성을 비교하기 위함이다. 그러므로 시험을 통한 정량적인 결과의 비교는 본 연구에서 제외하였다.

일축압축강도시험과 점하중시험은 시험을 위하여 코어를 채취해야 하며 소요시간은 코어 1개당 최소 30분에서 1시간이상 소요된다. 또한 초기강도를 측정하기 위한 1일 이전 코어채취는 거의 불가능하며 1일 이후에라도 강섬유 슛크리트의 경우 강섬유의 영향으로 코어채취가 매우 불편한 문제가 발생한다. 그러므로 실제적으로 현장에서는 터널내에서 슛크리트를 채취하는 방법보다 시험을 위하여 따로 타설하는 방법을 사용하고 있다. 또한 일축압축강도시험의 경우 코어채취 후 코어의 상하부를 다시 재성형해야 하는 추가작업이 있어 코어채취부터 시험완료까지 시간이 상당히 많이 소요된다. 그러므로 시간에 따라 강도가 빠르게 변하는 초기강도의 측정에 있어서는 바람직하지 않은 방법으로 평가된다.

도표2. 각 시험에 대한 시험 편의성 및 현장 적용성 비교

구분	편관입시험	일축압축강도시험	점하중시험
시험시간	<ul style="list-style-type: none"> •컴프레서 가압:25분 •본 시험:5분 •총 소요시간:30분 	<ul style="list-style-type: none"> •코어채취:50분 •본 시험:40분 •총 소요시간:90분 	<ul style="list-style-type: none"> •코어채취:50분 •본 시험:10분 •총 소요시간:60분
편의성	<ul style="list-style-type: none"> •장비 조작 및 이동이 비교적 수월함 •전원 없이 단기적인 시험 가능 •시료채취 없이 바로 갱내에서 시험 가능 	<ul style="list-style-type: none"> •갱내 시험 불가능 •코어 채취후 시험실로 이동하여 실내시험 수행 •코어 재성형 필요 	<ul style="list-style-type: none"> •장비 무게 및 조작법이 매우 간단함 •갱내 전원 불필요 •초기재령에서 코어 채취 불가
초기강도 측정범위	1.5~30MPa	10MPa 이상 (코어채취 가능한 강도)	10MPa 이상 (코어채취 가능한 강도)

점하중시험기는 휴대 및 운반이 편리하고 전원의 공급이 필요 없으므로 현장에의 접근이 용이하다. 그러나 일축압축시험기의 경우 시험기가 현장으로 반입되는 것이 불가능하다. 그러므로 현재 설계기준에 적용되어 있는 일축압축강도시험은 초기강도의 측정 면에서나 진정한 의미의 현장시험법으로서도 적합하지 않은 방법으로 판단된다.

이에 반하여, 핀관입시험은 코어채취를 하지 않고 숏크리트 벽면에 직접 시험을 하기 때문에 그만큼 작업시간이 단축되는 장점이 있다. 작업인원은 2인 1조로 시험하는 것이 가장 효율적이며 작업시간은 표준 10회 시험시 약 30분 정도 소요된다. 장비는 비교적 간소하여 시험현장까지 운반이 용이하고 에어컴프레셔의 작동을 위하여 전원이 기본적으로 필요하나 무전원의 경우에도 단기적인 시험은 가능하다.

결론적으로 초기강도를 측정하기에 부적절하고 실제적으로 현장강도를 측정하지 못하고 있는 일축압축강도 시험법에 대한 대체 시험법으로 핀관입시험이 적절하며 이에 대한 보완적 시험방법으로 점하중 시험법을 1일강도 이후에 동시에 수행하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4.2 경제성 분석

경제성 분석을 위한 항목으로 초기투자비용, 시험시간, 소모품비용 및 기타 추가 장비비용을 각각의 시험에 대하여 조사하여 도표3에 정리하였다. 초기투자비용의 경우 장비의 가격이 대부분을 차지하며 일축압축강도시험 및 점하중시험의 경우 코어채취를 위한 장비의 가격이 추가되었다.

시험시 필요한 인원 및 시험시간의 산정 기준은 핀관입시험의 경우 현장시험에 의한 결과를 기준으로 하였으며 나머지 시험의 경우는 현재 현장에서 이용중인 시험법이므로 현장에서의 경험적인 결과를 토대로 시험 인원 및 시험 시간을 산정하였다.

시험비용의 산정시, 각 시험의 난이도 및 숙련도에 따라 비용의 차이를 가져올 수 있으며 시험장비의 가격 및 최대 사용 가능 횟수, 그리고 시방서 기준에 따른 시험의 중요도에 차이가 있다. 특히 핀관입시험의 경우, 현재 국내에서는 시험 실적이 전무하므로 객관적인 시험비용의 산정은 불가능 하였다. 그러므로 각 시험의 난이도는 일정하다고 가정하고 시험 시간과 시험 인원을 가중치로 하여 시험비용을 산정하였다. 또한, 핀관입시험의 경우에는 1회 시험시 표준 10회에 추가적인 타입을 5회로 예상하여 그만큼의 핀을 소모품으로 하여 기타 소요비용에 추가로 산정하였다.

도표3. 각 시험에 대한 경제성 분석시 고려 요소

구 분	핀관입시험	일축압축강도시험	점하중시험
장비가격 (천원)	핀 관입시험기 8,000	일축강도시험기 7,000 코어드릴 350 코어비트 50	점하중시험기 4,000 코어드릴 350 코어비트 50
시험인원	2인	코어채취 2인 시험 1인	코어채취 2인 시험 1인
1회 시험 소요시간	30분(0.5시간)	90분(1.5시간) 코어채취 50분 시험 40분	60분(1.0시간) 코어채취 50분 시험 10분
시험비용 (시간당 노무비 x 소요인원 x 1회 시험시간)	$10,000 \times 2 \times 0.5$ = 10,000원	$(10,000 \times 2 \times 0.8)$ + $(10,000 \times 1 \times 0.7)$ = 23,000원	$(10,000 \times 2 \times 0.8)$ + $(10,000 \times 1 \times 0.2)$ = 18,000원
기타 소요비용	핀 (1회시험시 평균15개) 1,000원/개 x 15개 =15,000원	-	-

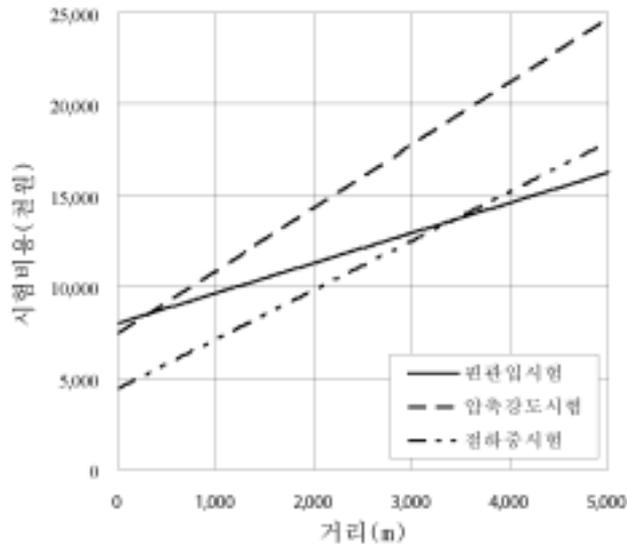


그림8. 터널연장에 따른 각 시험의 소요비용

각 시험에 대한 분석을 수행한 결과, 초기투자비용의 경우 타 시험에 비하여 상대적으로 고가의 장비를 사용하는 핀관입시험이 높게 나타났다. 시험비용은 시험인원이 적게 들고 시험시간이 짧은 이유로 타 시험법에 비하여 핀관입시험의 시험비용이 절반정도 적게 나타났다.

현재 28일 재령의 코어압축강도 시험기준은 구간내 임의 위치에서 3공/20m를 실시하게 되어있다. 이를 점하중시험 및 핀관입시험에 동일하게 적용하여 터널연장에 대한 각 시험의 소요비용을 비교한 결과 그림8과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 터널의 연장이 증가할수록 1회당 시험비용이 저렴한 핀관입시험이 경제적인 이익을 보는 것으로 나타났다. 터널연장이 약 340m이상인 경우에는 핀관입시험을 수행하는것이 압축강도시험을 수행하는 것보다 경제적인 효과를 보는 것으로 나타났다. 터널연장이 약 3,500m이상인 경우에는 점하중시험에 비하여도 비용의 절감을 가져오는 것으로 나타났다.

결론적으로, 일축압축강도시험은 비용적인 면에서나 시험시간의 절감 면에서 타 시험으로 대체하는 것이 옳바르다고 판단되며, 초기투자비용면에서 고가이나 터널의 연장이 장대화 되는 추세를 볼 때, 핀관입시험이 대체시험법으로 적절하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 터널의 품질관리를 위한 쏫크리트 초기강도 시험법으로서 핀관입시험법과 점하중시험법의 적용성에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과 및 결론은 다음과 같다.

- 1) 일축압축강도와 핀관입깊이의 상관성을 분석한 결과 Iwaki가 제안한 상관식보다 간편하고 실용적인 선형관계식을 구하였다. 또한, 최근의 고강도 쏫크리트의 추세를 고려하여 핀 A에 대한 관입시험만으로 쏫크리트의 초기압축강도를 충분히 평가할 수 있는 상관식을 구할 수 있었다.
- 2) 일축압축강도와 점하중지수 상관성을 분석한 결과, 기존 암석시험사례에 비해 높은 상관성을 보이는 상관식을 구할 수 있었다. 즉, 점하중시험만으로 신뢰성 높은 쏫크리트의 일축압축강도를 산정할 수 있을 것으로 예상된다. 점하중시험은 일축압축시험에 비해 시험이 간편하고 저렴하기 때문에 쏫크리트의 일축압축강도시험을 대체하는 경우 현장 품질관리비용과 시간의 큰 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 현장시험을 통하여 세 시험의 현장 적용성을 평가한 결과, 기존의 일축압축강도시험에 비하여 점하중시험이나 핀관입시험이 현장시험에 유리한 것으로 나타났다. 특히 핀관입시험의 경우 시료를 채취하지 않고 슛크리트 타설면에 직접 시험을 수행하기 때문에 타 시험에 비하여 시간과 인력이 적게 소요되며 장비의 운반이 수월하여 현장 적용성이 우수하다.
- 4) 경제성 분석 결과, 초기투자비용면에서는 핀관입시험장비의 가격이 타 시험에 비하여 상대적으로 높으나 1회 시험비용이 타 시험에 비하여 저렴하므로 터널의 연장이 증가할수록 전체적인 시험비용이 상대적으로 적게 소요되었다.
- 5) 결론적으로, 핀관입시험법은 운반이 쉽고 초기강도의 측정이 용이하고 슛크리트 타설면에 직접 시험이 가능하여 터널의 품질관리 측면에서 뛰어난 시험법이며 경제적인 측면에서도 장기적으로 볼 때에도 효과적인 시험법이다. 향후 국산화 장비의 보급이 이루어지면 상대적으로 높은 초기투자비용을 절감할 수 있는 시험법으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 04핵심기술 C01)에 의하여 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 이석원, 배규진, 장수호, 박해균, 이명섭, 김재권(2003), “스�크리트의 압축강도를 추정하기 위한 공기압식 핀관입시험의 적용성 평가”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.4723-4728.
2. 장석부, 홍의준, 문상조(2005), “스�크리트 품질관리를 위한 현장 압축강도시험법에 관한 연구”, 한국터널공학회 춘계학술발표회 논문집, pp.175-186.
3. Brown E. T.(1981), “Rock characterization testing & monitoring”, ISRM
4. Iwaki, K, A. Hirama, K. Mitani, S. Kaise, K. Nakagawa(2001), “A quality control method for shotcrete strength by pneumatic pin penetration test”, NDT & E International 34, pp.395-402
5. Grasso, P. et. al.(1992), “Problem and promises of index testing of rocks”, Rock Mechanics, Tillerson & Wawersik(eds), pp.879-888
6. Melbye, T.(2001), “Sprayed concrete for rock support”, MBT International, pp.154-155