

초음파법을 이용한 무근콘크리트 터널라이닝의 품질평가

Evaluation of Tunnel Lining Concrete Using Ultrasonic Pulse Velocity Method

최홍식^{*} 이상민^{**} 이시우^{***} 신용석^{****} 오영석^{*****} 오광진^{*****}

Choi, Hong Shik Lee, Sang Min Lee, Si Woo Shin, Yong Suk Oh, Young Suk Oh, Kwang Chin

ABSTRACT

Two evaluation techniques of the tunnel lining concrete using ultra sonic velocity method are developed. Modified linear regression technique is proposed to enhance the correlation between the pulse velocity and the compressive strength of core specimens. And bivariate normal distribution is assumed to evaluate the quality of concrete as a terms of compressive strength. A simple correlation table between the pulse velocity and the compressive strength of core specimens are proposed.

1. 서론

터널라이닝과 같이 주변여건에 따라 함수비가 높고, 성능저하 가능성이 높은 콘크리트의 품질평가 방안으로 초음파속도법이 효과적인 것으로 알려져 있으나, 국내의 경우에는 표준화된 평가방법의 정립이 미흡하여 신뢰성에 문제가 있는 것으로 인식되어 왔으며, 측정자료가 대부분 사장되는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 라이닝 콘크리트의 비파괴방법 중 강도, 열화진전도, 미세균열, 수화조직 상태 등을 포괄적으로 반영시킬 수 있는 초음파속도법을 대상으로 자료의 축적과정을 표준화하고 통계적 기법을 이용하여 무근콘크리트 터널라이닝의 품질평가방안을 제시하고자 한다.

2. 기존 터널정밀안전진단시 얻어진 코어강도 자료의 분석

터널라이닝 콘크리트는 터널이 시공연도, 형식 및 설계기준강도에 따라서 재료의 배합방식 및 시공 조건이 각기 다르므로, 일률적으로 동일한 기준하에서 그 품질 상태를 평가하는 것은 유지관리 측면에서 무리한 평가가 될 수 있다.

- * 정회원, 충청대학 토목공학과 교수, 공학박사
- ** 정회원, 충청대학 토목공학과 겸임교수, 공학박사, 비엔티엔지니어링(주) 대표이사
- *** 정회원, 충청대학 건축공학과 부교수, 공학박사
- **** 정회원, 시설안전기술공단 기술지원실 부장
- ***** 정회원, 시설안전기술공단 기술지원실 차장,
- ***** 정회원, 시설안전기술공단 기술지원실 차장, 공학박사

따라서 대상터널의 설계 및 시공시의 조건을 고려한 정성적인 품질평가 기준을 제시하기 위해서는 기존의 터널 정밀안전진단시 얻어진 코어강도자료를 분석하여 터널 유형별 코어강도에 대한 실측결과와 분포범위를 분석하여 상대적으로 양호 또는 보통 등의 기준을 상대적인 기준으로 나타내도록 하였다.

2.1 코어강도를 통한 초음파속도 측정시 직접법과 간접법의 비교

도로터널과 철도터널에 대한 터널 유형별 분석결과에 의하면 터널별로 시험위치의 선정기준이 다소 모호하고, 분석방법이 표준화되지 않은 상태에서 도출된 결과이기는 하나, 대체적으로 직접법의 경우가 간접법에 비해 초음파속도와 코어강도와의 상관관계가 다소 양호한 것으로 나타났으나 직접법과 간접법의 상관관계가 오차범위 이내에서 근소한 차이를 보이는 정도이며, 신뢰도 높은 자료의 축적으로 간접법을 이용한 분석이 가능함을 보여주고 있다.

2.2 기존터널의 품질상태 분포특성

표 1은 실측된 코어강도를 기준으로 분류한 품질상태의 분포이며 유지관리시 평가대상 터널의 상대적인 평가에 활용될 수 있는 자료를 제공한다. 터널 유형별 초음파속도와 코어강도 분포특성의 분석결과는 표 2와 같다. 이 때 도로터널의 경우 설계기준강도 240kgf/cm²인 터널이 180kgf/cm²인 경우에 비해 약 9.6%정도 감소된 것으로 나타났다. 즉 준공년도가 오래된 터널의 경우 라이닝의 배합설계의 기준이 최근의 경우와 많은 차이가 있는 것으로 판단된다. 측정된 데이터의 수가 많은 철도터널의 경우가 도로터널에 비하여 데이터 분산폭도 작은 것을 보여 주고 있으며, 이는 자료의 축적이 갖는 중요성을 보여주는 예라고 판단된다.

표 1 터널 유형별 품질수준의 분포상태 검토결과 (코어강도)

등급	확률분포	비율(%)	도로터널 (180kgf/cm ²)	도로터널 (240kgf/cm ²)	철도터널 (150kgf/cm ²)
		강도			
I	1.5σ 이상	비율(%)	6.12	10.53	4.35
		강도	$f_{ck} \geq 430.8$	$f_{ck} \geq 348.4$	$f_{ck} \geq 276.2$
II	0.5σ ≤ v < 1.5σ	비율(%)	22.45	21.05	27.83
		강도	$329.8 \leq f_{ck} < 430.8$	$284.6 \leq f_{ck} < 348.4$	$208.4 \leq f_{ck} < 276.2$
III	-0.5σ ≤ v < 0.5σ	비율(%)	36.73	36.84	31.30
		강도	$228.9 \leq f_{ck} < 329.8$	$220.8 \leq f_{ck} < 284.6$	$140.6 \leq f_{ck} < 208.4$
IV	-1.5σ ≤ v < -0.5σ	비율(%)	28.57	26.32	32.17
		강도	$128.0 \leq f_{ck} < 228.9$	$157.0 \leq f_{ck} < 220.8$	$72.8 \leq f_{ck} < 140.6$
V	-1.5σ 미만	비율(%)	6.12	5.26	4.35
		강도	$f_{ck} < 128.0$	$f_{ck} < 157.0$	$f_{ck} < 72.8$

표 2 기존터널의 코어강도 분포 분석

터널유형	설계강도 (kgf/cm ²)	초음파 속도			코어 강도시험		
		평균 속도 (km/s)	표준편차	측정개소	평균강도 (kgf/cm ²)	초음파 환산속도	채취개소
도로터널	180	3.251	0.778	344	279.4	4.183	49
	240	3.524	0.710	248	252.7	4.060	57
철도터널	150	3.653	0.652	706	174.5	3.700	115

3. 자료의 분석 기법의 개발

재현성이 우수한 초음파 속도법의 경우 그 신뢰도에 영향을 주는 인자는 결과의 해석방법에 있다.

간접법에 의한 측정에서 가장 큰 영향을 주는 인자는 거리가 45cm, 또는 60cm로 멀어지면서, 측정치의 input signal이 감소하면 디지털 디스플레이 장비의 경우 트리거값이 초기 파형을 읽지 못하는 기계적 한계나, 수신과관찰 방식의 경우 파형관찰의 오류에 의한 오차가 더욱 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 데이터의 분석과 관찰에서 장점을 갖는 수신과관찰형 장비에 의한 데이터를 이용하여 모집단으로 축적하도록 하였다.

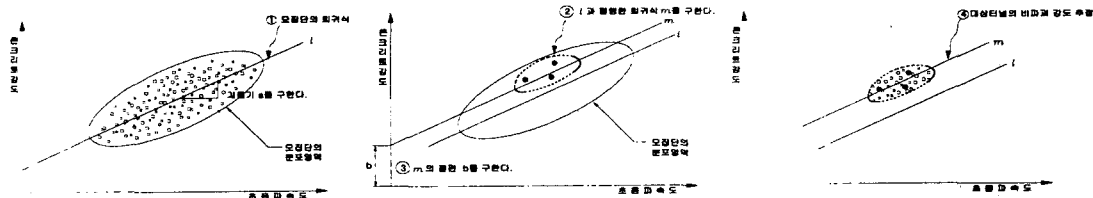
또한 분석법에 따라서도 초음파의 전달속도산정 기준을 센서의 중심간거리와 순간격의 평균값으로 통일하였다.

3.1 수정된 직선회귀식에 의한 분석

단일터널에서의 단지 3개 또는 그 이상의 제한된 초음파자료만을 통하여 터널의 품질을 분석한다는 것은, 회귀식의 기울기 산정이 span이 좁은 구간에서 이루어지므로, 그 대상 터널에 대한 대표성을 갖는 기울기 산정에 어려움이 클 수밖에 없다.

그러므로 그동안 축적된 모집단의 추정회귀식의 형상을 반영하기 위해서 모집단의 기울기를 채취한 코어에 대한 추정회귀식의 기울기로 가정하였으며, 그 과정은 다음과 같다.

- ① 모집단(기존의 축적된 데이터)을 회귀분석하여 기울기를 얻는다.
- ② 대상 터널에서 비파괴시험을 n개소에서 실시한다.
- ③ 초음파속도의 측정치가 가장 큰 곳, 중간인 곳, 가장 작은 곳의 코어를 채취한다.
- ④ 코어의 강도를 측정한다.
- ⑤ 초음파속도와 강도에 대한 좌표상의 세점이 ①에서 구한 기울기를 갖으며 잔차가 최소로 되는 회귀식을 구한다.
- ⑥ 나머지 비파괴자료에 의한 추정강도를 구한다.



(a) 모집단의 회귀식에서 기울기 산정 (b) 잔차를 최소화하는 수정회귀식의 절편 산정 (c) 수정된 회귀식의 도출 및 해당터널의 평가

그림 1. 기울기가 확정된 수정회귀식의 도출

3. 정성적 및 정량적 품질평가의 기준 정립

3.1 모집단의 평가

그림 2는 자료의 축적에 따라 모집단 분포의 변화를 단계별로 나타낸 것이다. 모집단의 형상은 데이터의 축적에 따라 선형회귀직선을 중심으로 폭이 좁은 타원의 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다.

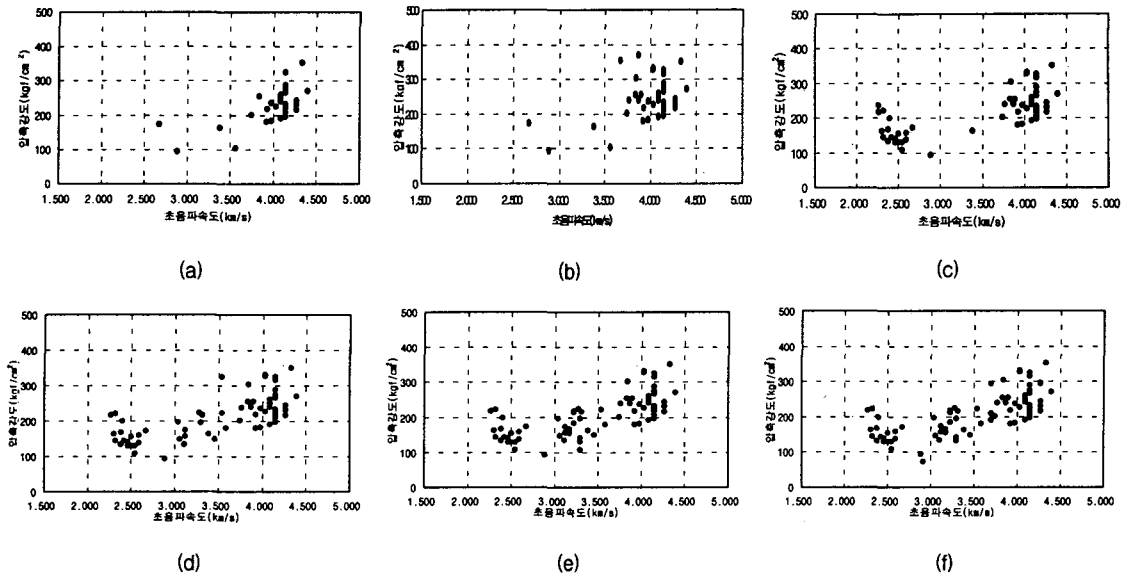


그림 2. 자료의 축적에 따른 모집단의 분포 변화

3.2 초음파속도의 확률적 분포

표 3 등급의 분할 기준

구간의 분할	비고 (확률분포)	속도의 영역 (km/s)	수정된 속도의 영역(km/s)
I	1.5σ 이상	4.495이상	4.5이상
II	0.5σ ≤ v < 1.5σ	3.823~4.495	3.8~4.5
III	-0.5σ ≤ v < 0.5σ	3.151~3.823	3.2~3.8
IV	-1.5σ ≤ v < -0.5σ	2.143~3.151	2.1~3.2
V	-1.5σ 미만	2.143이하	2.1이하
비고	표준편차에 의한 분할		소수점1자리 반올림

초음파속도의 영역은 표 3과 같이 초음파속도의 표준편차를 구하고 이를 기준으로 중앙에서 1σ 간격을 유지하게 조정하였다.

3.3 초음파속도별 강도의 범위 산정

그림 3은 초음파 속도별 콘크리트의 추정강도 확률분포 영역추정 흐름도를 나타낸 것이다.

신뢰율의 계산은 모집단의 분석을 통하여 구한 확률분포곡선의 중적분을 통하여 이루어졌다. 통산 2~3회의 수렴과정을 통하여 85%신뢰율을 갖는 강도의 등급이 정해졌으며 그 결과는 표 4와 같다.

표 4 제안된 초음파 속도별 등급의 평가(안)

등급	초음파속도 (km/s)	강도의 범위 (kgf/cm²)	신뢰율 (%)	등급별 분포도 (%)
I	4.5이상	2400이상	85	6.7
II	3.8~4.5	2000이상	85	24.2
III	3.2~3.8	1600이상	85	38.3
IV	2.1~3.2	1150이상	85	28.6
V	2.1이하	1150이하	57	2.2
				100%

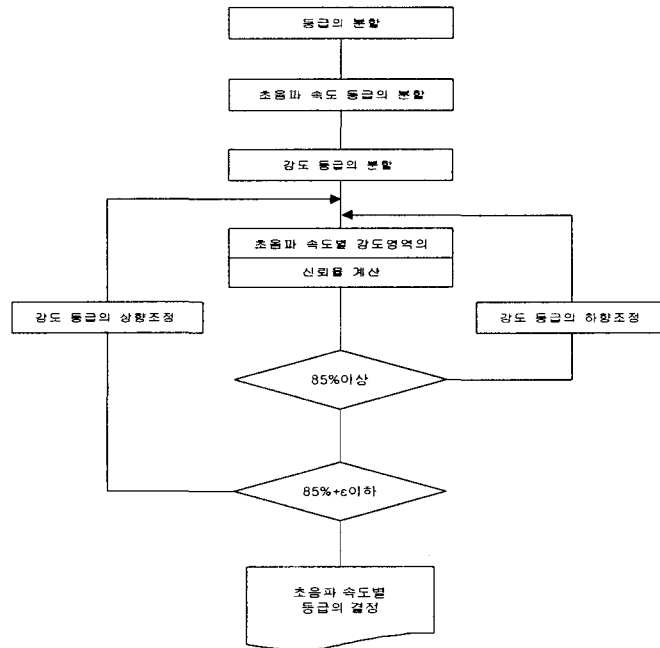


그림 3 초음파 속도별 콘크리트의 추정강도 확률분포 영역추정 흐름도

4. 개선된 물성평가 방법의 현장적용

도로터널 2개소(H, M-2터널) 철도터널 3개소(M-1, B, G터널)를 대상으로 수정된 회귀직선에 의한 평가 및 그룹핑에 의한 평가방법을 통하여 무근콘크리트 터널라이닝 품질평가 방법의 현장적용성을 검토하였다.

4.1 수정된 직선회귀식에 의한 평가방법

실내실험, W터널, C터널에서 얻은 데이터를 모집단으로 하고 시험대상 터널의 초음파 속도 및 코어 압축강도 시험을 통해 획득한 데이터를 축적하여 새로운 모집단을 만들었다. 새로운 모집단에 대해서는 회귀분석을 통하여 잔차가 정규분포 1.5σ 범위를 벗어나는 데이터는 제외시키고, 여기에 새로운 데이터를 추가함으로써 터널의 평가자료 축적이 진행되면서 지속적으로 모집단이 수정되도록 하였으며, 추정된 각 터널별 회귀직선식은 다음과 같다.

- 도로터널 I (실내, W, C + H터널) : $y = 78.69x - 69.43$
- 철도터널 I (M-1터널 추가) : $y = 53.56x + 27.67$
- 도로터널 II (M-2터널 추가) : $y = 58.65x + 6.85$
- 철도터널 II (B터널 추가) : $y = 60.04x - 3.31$
- 철도터널 III (G터널 추가) : $y = 65.80x - 24.99$

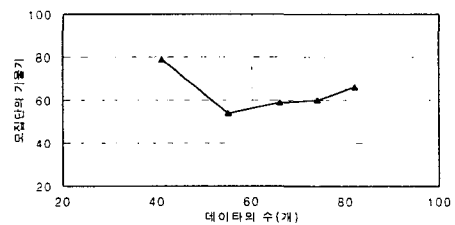


그림 4 모집단의 기울기의 수렴 경향

그림 4는 수정된 회귀직선식에 의한 평가방법에 의해 추정된 각 터널별 회귀직선식에서 구한 모집

단의 기술품 변화 추세를 나타낸 것으로 터널에 대한 시험이 계속 진행되어 데이터의 수가 점차적으로 누적됨으로써 변동의 폭이 줄어들고 어떤 값에 수렴될 것으로 판단된다.

4.2 등급화에 의한 평가방법

등급화에 의한 방법에 따라 총 5개의 도로 및 철도터널을 대상으로 56개소에서 코어를 채취하여 평가를 실시한 결과 측정등급 II등급이 9개소, III등급이 19개소, IV등급이 28개소로 나타났으며, 이중 신뢰율 85%에서의 각 등급별 압축강도에 미달하는 곳은 II등급 0개소, III등급 4개소, IV등급 4개소로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 초음파법을 이용한 무근콘크리트 터널라이닝의 품질평가 방법의 현장적용성을 파악하기 위하여 초기 모집단(모형실험, W, C터널)과 도로터널 2개소(H, M-2터널), 철도터널 3개소(M-1, B, G터널)를 대상으로 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 그 동안 직선회귀에 의하여 수행하던 초음파강도(간접법)의 추정식을 수정된 회귀직선식을 도입함으로써 신뢰도를 더욱 높일 수 있는 방안을 제안하였으며, 현장 적용 예를 통하여 적용성을 검증하였다.

2) 이변량 정규분포로 가정한 확률분포함수를 적분을 통하여 평가하도록 함으로써 초음파속도별 품질평가등급을 신뢰율 85%를 기준으로 제안하고 현장시험 자료의 검증을 통해 타당성을 확인하였다.

3) 제안된 평가등급과 기존의 터널의 코어강도 분석에 의하여 설계등급별로 터널의 관리 및 평가 주체의 판단에 의하여 양호, 보통, 불량 등의 등급으로 판단이 가능하도록 제시하였다.

4) 본 연구에서 사용된 모집단의 경우, 지속적인 축적과 관리를 통하여 신뢰도를 높일 수 있으므로 효율적인 관리를 위하여 프로그램화하여 손쉽게 관리가 가능하도록 하였다.

5) 수정된 회귀직선법에 의한 평가방법의 경우, 프로그램화하여 실무에서 손쉽게 자료의 입력을 통하여 결과물의 출력이 가능하도록 하였다.

참고문헌

- 1) Anderson, D. A. and Seals, R. K., "Pulse Velocity as a Predictor of 28-days and 90-days Strength", Technical Paper, ACI Journal, March-April 1981, pp. 116~122.
- 2) 日本建築學會 材料施工委員會, "콘크리트의 비파괴시험법에關する研究の現況と問題點", 日本建築學會, 昭和56年5月(1981), pp. 1~6.
- 3) 谷川 恭雄, 童 壽興, 中村 正行, "非破壞試驗法によるコンクリートの強度推定に關する研究", 콘크리트의 비파괴시험법에關するシンポジウム論文集, 日本콘크리트工學協會, 1991年4月, pp. 1~6.
- 4) 柏 忠二 編著, "콘크리트의 비파괴시험法-日·歐美의論文·規格·文獻-", 1980.
- 5) 笠井 芳夫 池田 尙治, "콘크리트의 시험方法(下)", 技術書院, 1993. 4, pp. 245~282.
- 6) 한국전력공사 전력연구원, "콘크리트 비파괴 검사기술 개발", KRC-86H-JOI, 한국에너지연구소, 1987.