

## 초음파법을 이용한 무근콘크리트 터널라이닝의 품질평가 방법



오영석  
시설안전기술공단 지하시설실 차장

### 1. 서론

콘크리트 구조물의 품질 및 강도평가를 위해 널리 사용되는 초음파속도법은 측정결과의 재현성(repeatability)이 높고 타 방법에 비해 함수비의 영향을 비교적 적게 받는 이유로 무근콘크리트의 품질평가 방법으로 주목되어 왔다. 그러나 초음파속도법은 탄성파의 전달시간에 미치는 영향인자가 엄밀히 규명되지 않은 상태이고, 측정방법이나 측정자의 숙련도에 따라 측정결과의 변동성이 존재하여 측정결과에 대한 신뢰성과 활용여부에 대한 논란이 있었던 것도 사실이다. 더욱이 대상 구조물의 형상을 고려할 때 터널라이닝의 경우는 간접법에 의해 품질평가 및 강도 추정이 이루어지고 있어 직접법에 의한 결과에 비해 그 신뢰도가 낮고 각기 판정기준이 상이하여 통일된 평가방법의 정립이 절실히 요구되어 왔다.

따라서 우리 공단에서는 기 수행한 바 있는 초음파속도법에 관한 연구에서 라이닝 콘크리트의 비파괴시험 중 강도, 열화진전도, 미세균열, 수화조직상태 등을 포괄적으로 반영시킬 수 있는 초음파속도법을 대상으로 자료의 축적 과정을 표준화하고 이를 통계적 기법을 이용하여 무근콘크리트 터널라이닝의 품질평가 방안을 제시하였다.

아울러 기존의 콘크리트 강도 추정을 위해 제안된 공식 가운데 본 연구를 통해 도출된 방법과 함께 터널 구조물의 강도평가에 가장 신뢰도가 높은 공식을 찾아 그 결과를 터널 라이닝 콘크리트의 강도평가를 위한 초음파 측정법의 관리기준으로 제시하였다.

본고에서는 우리 공단에서 연구한「초음파법을 이용한 무근콘크리트 터널라이닝의 품질평가를 위한 현장적용성 연구」의 개략적인 설명과 함께 연구의 결과를 요약한「터널 라이닝 콘크리트의 품질평가 절차서」를 소개하고자 한다.

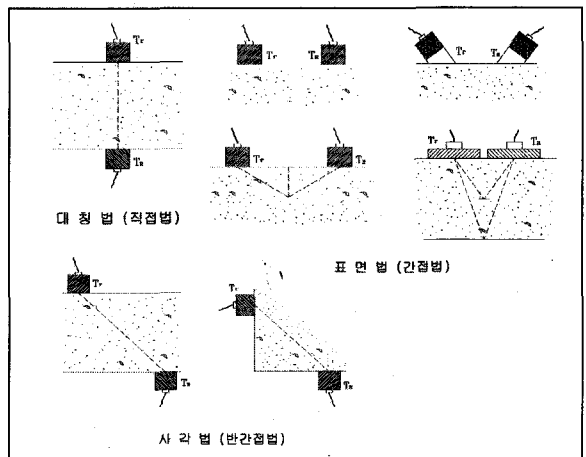


그림 1. 각종 초음파 속도 측정방법

## 2. 초음파속도법

### 2.1 시험법의 현황

일반적으로 터널의 정밀점검이나 정밀안전진단시에 널리 활용되고 있는 비파괴시험법인 초음파속도법은 콘크리트 구조물의 강도 및 품질평가, 균열깊이 등을 판단하기 위해 매질을 통과하는 초음파(탄성파), 특히 종파(P파)의 특성을 이용하는 시험법이다.

현재 국내에서 콘크리트 구조물의 품질평가를 위해 가장 보편적으로 사용되고 있는 초음파속도 측정방식으로는 포화중폭방식과 수진파관찰방식을 들 수 있는데 이들 방식을 채택한 장비의 특성은 표 1에 나타낸 바와 같다.

일반적으로 이들 장비를 이용하여 터널 라이닝의 품질상태를 평가하는 경우 측정된 결과의 신뢰성이 낮아 이를 단독적으로 활용하기보다는 다른 비파괴시험 결과와의 복합법을 통한 구조물의 품질평가에 활용하고 있는 실정이다.

표 1. 초음파 측정 장비

	
<p>〈포화중폭방식〉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶장비명 PUNDIT</li> <li>▶용도 비파괴시험</li> <li>▶생산자 영국 C.N.S Elec. Ltd.</li> <li>▶특기사항 감지범위 : 0.1~9999<math>\mu</math>s 진동수 : 54kHz 온도범위 : 0~45<math>^{\circ}</math>C 사용전 표준교정자로 검교정</li> </ul>	<p>〈수진파 관찰방식〉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶장비명 TR-300</li> <li>▶용도 비파괴시험</li> <li>▶생산자 일본 Techno Res.</li> <li>▶특기사항 수진파 관찰방식(정밀표시) Cursor 이동으로 수진파형의 해석이 용이하다. 수진파의 배율설정이 14단계</li> </ul>

초음파 측정결과의 신뢰성을 떨어뜨리는 요인으로는 많은 것들이 있겠지만 특히 콘크리트의 재료적인 특성과 기존 초음파 측정법의 터널 라이닝에서의 적합성 등을 들 수 있는데, 콘크리트의 재료적인 특성은 기존의 실내시험 연구에서도 고려되어 표 2와 같은 결과들을 도출하였을 것이고, 초음파 측정법의 터널 라이닝에서의 적합성은 기존에 제안된 공식들이 터널 라이닝을 대상으로 실시된 것이 아니기 때문에 구조물의 기하학적인 특성과 초음파의 원리를 감안할 때 초음파 측정결과의 신뢰성에 상당한 영향을 미치리라고 판단할 수 있다.

또한 초음파속도 측정에 사용되는 장비에 대한 사용자의 이해도에 따라 품질평가 결과가 상이해지는 것 알 수 있는데, 그 일례로서, 그림 2와 그림 3에 나타난 바와 같이 포화중폭방식형 장비의 경우 사용자의 개인차를 줄이기 위한 필터링층을 갖고 있어 사용자의 부주의로 인해 수신된 초기값을 읽을 수 없게 되면, 종전의 선형회귀분

표 2. 초음파속도에 의한 콘크리트 강도추정식

구분	제안식	비고
일본건축학회식	$F_c = 215V - 620$	★
일본재료학회식	$F_c = 102V - 117$	
J. Pyszniak 식	$F_c = 92.5V^2 - 508V + 782$	
谷川 식	$F_c = 172.5V - 499.6$	
스위스	$\log \delta_{ek} = (0.3794V + 0.01149R - 0.5668) \times C_t$	
Proceq 연구소		

\*  $F_c$  : 압축강도(kg/cm $^2$ ), V : 초음파속도(km/sec), R : 반발경도

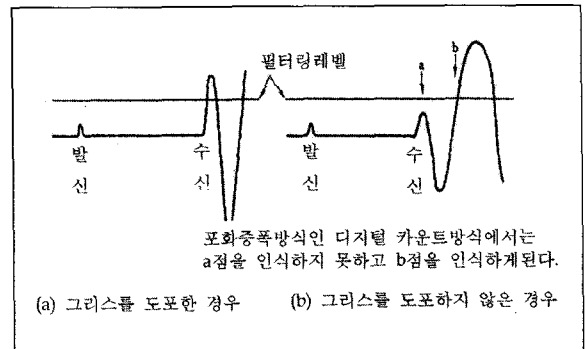


그림 2. 발·수신 펄스의 형태

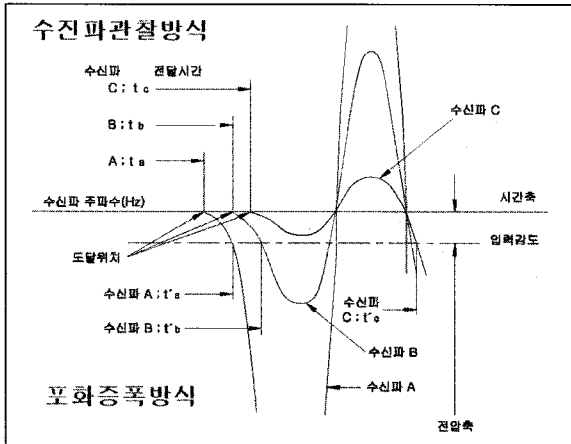


그림 3. 측정방식에 따른 수신파의 증폭

석법에 의해 전혀 다른 결과를 얻을 수밖에 없다.

이밖에도 터널라이닝 콘크리트는 터널의 시공연도, 형식 및 설계기준강도에 따라 재료의 배합방식 및 시공조건이 각기 다름에도 불구하고 동일한 기준 하에서 콘크리트 구조물의 품질상태를 평가하는 것은 유지관리 측면에서 무리한 평가가 될 수밖에 없다.

따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 국내에서 가장 보편적으로 사용되는 장비의 특성을 분석하고, 초음파속도 측정방법의 개선 및 재정립, 대상터널의 설계 및 시공시의 조건을 고려한 정성적인 품질평가를 위한 분석기법의 현장적용성 검증, 도로 및 철도터널을 대상으로 코어강도와 초음파속도의 상관관계에 대한 통계·확률적인 개념을 도

표 3. 콘크리트 초음파시험법의 비교 분석

Spec. 내용	ASTM C 597-83	BS 1881	RILEM NDT 1	日本 材料試驗協會
적용범위	탄성파의 전달속도	탄성파의 전달속도	탄성파의 전달속도	탄성파의 전달속도
공명주파수 (kHz)	10~150(50을 추천)	20~150(10~200 가능)	24~150	
센서의 측정간격	50mm~15m	직접법 : 150mm 이상 간접법 : 400mm 이상	G <sub>max</sub> =30~100mm G <sub>max</sub> =45~150mm	
속도에 미치는 영향인자	<ul style="list-style-type: none"> <li>케이블 길이</li> <li>-발진자 전압에 0.5% 이내의 영향을 미칠 것</li> <li>센서 측정간격</li> <li>-센서간격과 측정간격은 0.5% 이내의 정밀도 요구</li> <li>전달시간 측정</li> <li>-0.5% 이내의 정확도 요구</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>표면상태</li> <li>함수비</li> <li>-포화 2% &gt; 건조</li> <li>-저강도일수록 영향이 큼</li> <li>표면온도</li> <li>-5~30℃ 내에서 영향이 적음</li> <li>측정길이</li> <li>-G<sub>max</sub> = 20~40mm로 150mm 이상</li> <li>시편크기, 형상</li> <li>-폭 80mm 이상이면 편차 적음</li> <li>철근배근상태 영향 적음</li> <li>작용응력</li> <li>-0.6 f<sub>ck</sub> 이하면 영향 적음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>함수비</li> <li>-포화 &gt; 건조</li> <li>-저강도일수록 영향이 큼</li> <li>표면온도</li> <li>-5~30℃ 내에서 영향이 적음</li> <li>-40℃ : +2%(건조)</li> <li>+1.7%(포화)</li> <li>-0℃ : -0.5%(건조)</li> <li>-1.0%(포화)</li> <li>시편크기, 형상</li> <li>-폭 68mm 이상이면 편차 적음</li> <li>철근배근상태</li> <li>작용응력</li> <li>-0.65 f<sub>ck</sub> 이하면 영향 적음</li> </ul>	
기타	<ul style="list-style-type: none"> <li>접착매질</li> <li>-water, grease, oil, jelly 등</li> <li>접성재료 가능</li> </ul>			반발경도법과의 조합법 적용

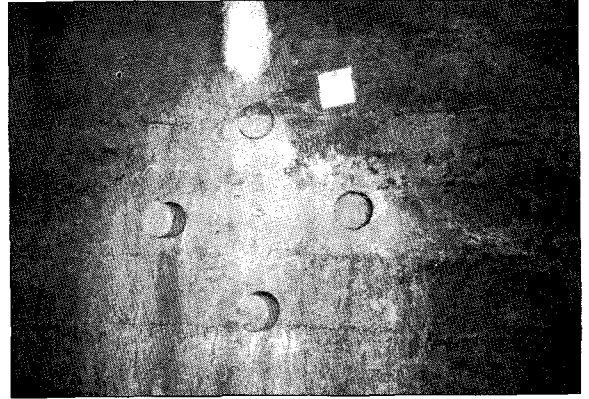
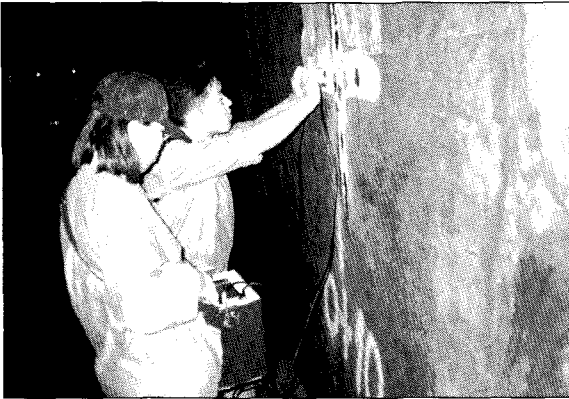


사진 1. 현장시험 및 코어채취



사진 2. 공시체 제작 및 모형시험

입한 분석을 실시하여 라이닝콘크리트의 품질평가 기준 및 지침서를 제시하였다.

## 2.2 분석기법의 개발

ASTM C-597에서는 통상적으로 동일한 지점에서 장비와 시험자(者)를 달리하여 초음파 측정하는 경우 약 2% 정도의 오차가 있다고 평가하고 있다. 이와 같이 콘크리트 구조물의 품질평가에 있어 측정결과의 재현성이 우수한 초음파속도법의 경우 그 신뢰도에 영향을 주는 인자는 측정결과와 분석기법에 있다고 할 수 있다.

한편, 터널 라이닝의 경우 간접법에 의한 측정에 가장

큰 영향을 주는 인자로는 탐촉자간 거리가 45cm, 또는 60cm로 멀어지면서, 측정치의 Input Signal이 감소하게 되어 디지털 디스플레이 장비의 트리거값이 초기 파형을 읽지 못하는 기계적 한계(필터링)나, 수신파관찰 방식에서 파형관찰의 오류에 의한 오차가 더욱 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 따라서 새로운 분석기법을 위해 측정데이터의 분석과 관찰에 있어 장점을 갖는 수신파관찰방식의 장비에 의해 측정된 데이터를 이용하여 모집단을 축적하도록 하였다.

또한 분석법에 있어서도 초음파의 전달속도 산정기준을 센서의 중심간거리와 순간격의 평균값으로 통일하였다.

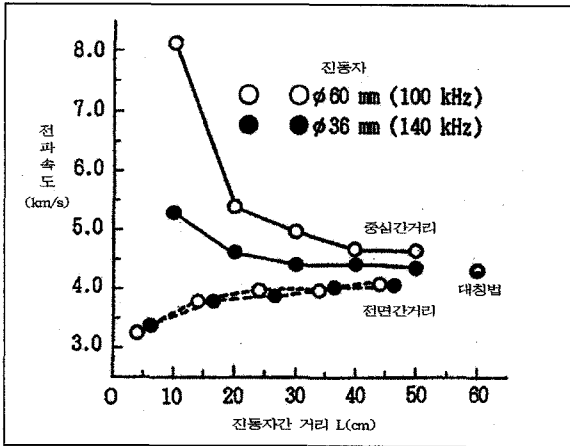


그림 4. 측정거리에 대한 전파속도의 변화

(1) 수정된 직선회귀식에 의한 분석

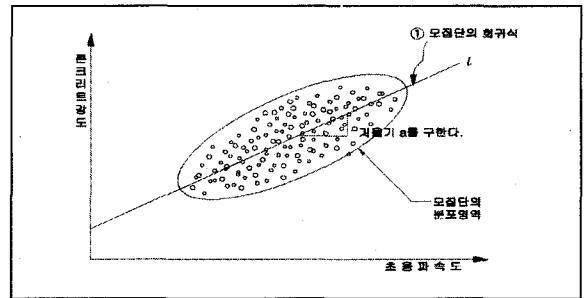
단일터널에서 단지 3개 또는 그 이상의 제한된 초음파 속도 자료만을 가지고 터널의 품질을 분석한다는 것은, 그 대상 터널에 대한 대표성을 갖는 회귀식의 기울기 산정에 어려움이 클 수밖에 없다.

따라서 그동안 우리 공단과 민간업체에서 축적된 측정 결과의 모집단에 대한 추정회귀식의 형상을 반영하기 위해서 모집단의 기울기를, 채취한 코어에 대한 추정회귀식의 기울기로 가정하였으며, 그 과정은 다음과 같다.

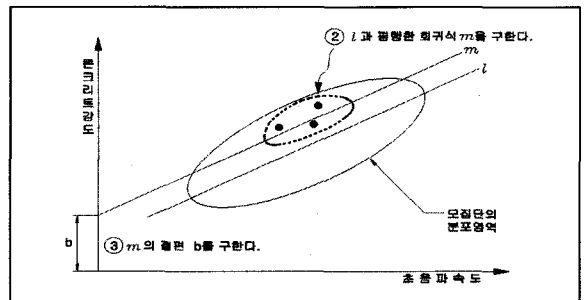
- ① 모집단(기존의 축적된 데이터)을 회귀분석 하여 기울기를 얻는다.
- ② 대상 터널에서 비파괴시험을 n개소에서 실시한다.
- ③ 초음파속도의 측정치가 가장 큰 곳, 중간인 곳, 가장 작은 곳의 코어를 채취한다.
- ④ 코어의 강도를 측정한다.
- ⑤ 초음파속도와 강도에 대한 표표상의 세 점(1)에서 구한 기울기를 가지면 잔차가 최소로 되는 회귀식을 구한다.
- ⑥ 나머지 비파괴자료에 의한 추정강도를 구한다.

(2) 등급에 의한 확률적 분석

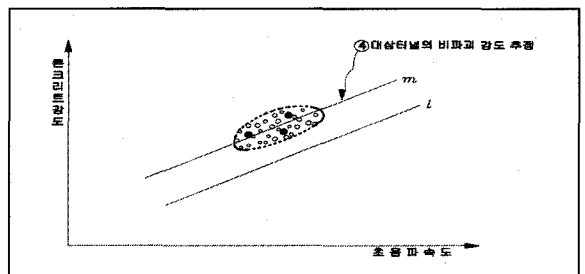
초음파 전달속도의 측정은 그 신뢰성과 신속성에 의하여 콘크리트의 품질평가에 널리 사용되어 왔다. 특히 강도



(a) 모집단의 회귀식에서 기울기 산정



(b) 최소 잔차 수정회귀식의 절편 산정



(c) 수정회귀식의 도출 및 해당터널의 평가

그림 5. 기울기가 확정된 수정회귀식의 도출

평가에 있어서는 직선회귀식에 의한 강도추정보다는 보통 5단계로 구분된 강도에 의해 품질을 평가하였다. 그러나 국내에서 범용의 평가기준으로 사용되는 외국의 품질등급의 경우 다른 형상의 콘크리트 구조물의 등급을 평가하기에는 다소의 무리가 있기에 금번 연구를 통해 터널 라이닝에 대한 적절한 범위의 강도 또는 내구성의 척도로서의 밀실성을 나타내는 평가방안을 제시하였다.

그림 6은 측정자료의 축적에 따라 모집단 분포의 변화

표 4. 평가 등급의 분할 기준

구간의 분할	비고 (확률분포)	속도의 영역 (km/s)	수정된 속도의 영역(km/s)
I	1.5 $\sigma$ 이상	4.495이상	4.5이상
II	0.5 $\sigma \leq v < 1.5\sigma$	3.823~4.495	3.8~4.5
III	-0.5 $\sigma \leq v < 0.5\sigma$	3.151~3.823	3.2~3.8
IV	-1.5 $\sigma \leq v < -0.5\sigma$	2.143~3.151	2.1~3.2
V	-1.5 $\sigma$ 미만	2.143이하	2.1이하
비고	표준편차에 의한 분할		소수점 1자리 반올림

를 단계별로 나타낸 것으로서, 데이터의 축적에 따라 선형 회귀직선을 중심으로 비교적 폭이 좁은 타원의 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. 통계처리시 측정된 특이치는 제외시키고 모집단을 구성하여 등급화에 의한 정성적 및 정량적 평가를 실시하였다.

럼과정을 통해 강도의 등급을 결정하였고 그 결과는 다음의 표 5에 나타낸 바와 같다.

표 5. 제안된 초음파 속도별 등급의 평가안

등급	초음파속도 (km/s)	강도의 범위 (kgf/cm <sup>2</sup> )	신뢰율 (%)	등급별분포도 (%)
I	4.5이상	240이상	85	6.7
II	3.8~4.5	200이상	85	24.2
III	3.2~3.8	160이상	85	38.3
IV	2.1~3.2	115이상	85	28.6
V	2.1이하	115이하	57	2.2
				100%

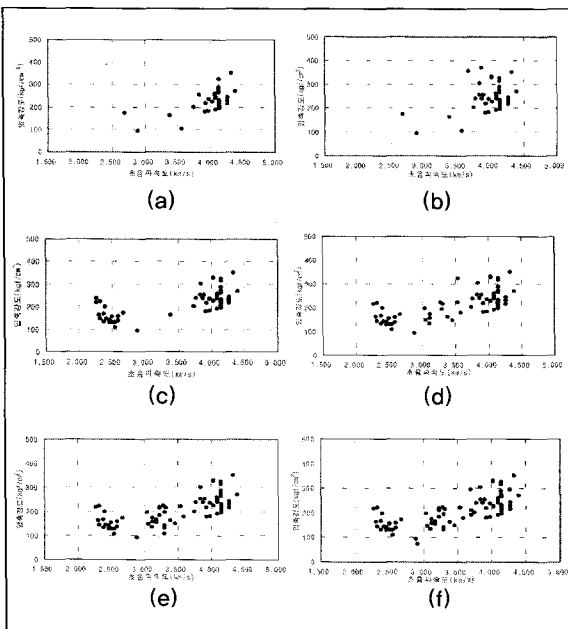


그림 6. 자료축적에 따른 모집단의 분포 변화

### (3) 초음파속도별 강도의 범위 산정

초음파속도별 강도의 분포구간은 신뢰율 85%를 기준으로 하여 결정하였으며, 신뢰율의 계산은 모집단의 분석을 통해 구한 확률분포곡선의 중적분으로 통상 2~3회의 수

## 3. 개선된 물성평가 방법의 현장적용

금번 연구를 통해 구한 수정된 회귀직선에 의한 평가 및 그룹핑에 의한 무근콘크리트 터널라이닝 평가방법을 정밀 안전진단을 실시한 도로터널 2개소(H, M-2터널), 철도터널 3개소(M-1, B, G터널)에 대해 현장적용성을 검토하였다.

### 3.1 수정된 직선회귀식에 의한 평가방법

실내실험, W터널, C터널에서 얻은 데이터로 초기모집단을 구성하고 시험대상 터널의 초음파 속도 및 코어 압축 강도 시험을 통해 획득한 데이터를 축적하여 새로운 모집단을 만들었다. 새로운 모집단에 대해서는 회귀분석을 통

하여 잔차가 정규분포 1.5σ범위를 벗어나는 데이터는 제외시켰으며, 여기에 새로운 데이터를 추가함으로써 터널의 평가자료 축적이 진행되면서 지속적으로 모집단이 수렴되도록 하였다.

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) :  $y=65.80x-24.99$

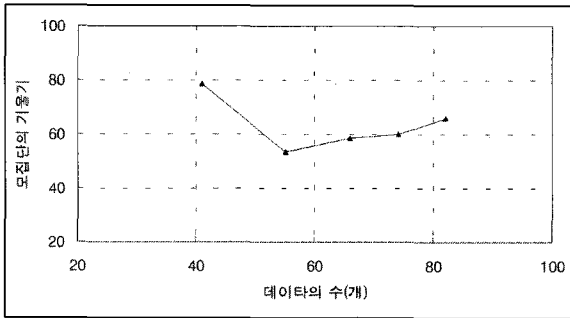


그림 7. 모집단의 기율기 수렴 경향

그림 7은 수정된 회귀직선식에 의한 평가방법으로 추정된 각 터널별 회귀직선식으로부터 구한 모집단의 기율기 변화 추세를 나타낸 것으로서, 터널의 초음파속도 측정 데이터 수가 점차적으로 축적됨으로써 그래프의 변동폭이 줄어들고 어떤 값에 수렴될 것으로 판단된다.

### 3.2 등급화에 의한 평가방법

등급화에 의한 평가방법에 의해 총 5개의 도로 및 철도 터널을 대상으로 56개소에서 코어를 채취하여 품질평가를 실시한 결과, 측정등급 II등급이 9개소, III등급이 19개소, IV등급이 28개소로 나타났으며, 이 가운데 신뢰율 85%에서의 각 등급별 압축강도에 미달하는 곳은 II등급 0개소, III등급 4개소, IV등급 4개소로 나타났다.

## 4. 결론

우리 공단에서는 초음파속도법을 이용해 보다 효과적인 무근콘크리트 터널라이닝의 품질평가하기 위해 각종 실내모형시험과 현장시험을 통한 연구를 수행함으로써, 표준화된 현장시험 기법 및 신뢰성 높은 분석기법과 품질평가방안에 대한 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 그 동안 직선회귀에 의해 수행하던 초음파강도(간접법)의 추정식을 수정된 회귀직선식을 도입함으로써 신뢰도를 더욱 높일 수 있는 방안을 제안하였으며, 현장 적용사례를 통하여 그 적용성을 검증하였다.
- (2) 이변량 정규분포로 가정한 확률분포함수를 적분을 통해 평가하도록 함으로써 초음파속도별 품질평가등급을 신뢰율 85% 기준으로 제안하고 현장시험 자료의 검증을 통해 타당성을 확인하였다.
- (3) 제안된 평가등급과 기존의 터널의 코어강도 분석에 의하여 설계등급별로 터널의 관리 및 평가주체의 판단에 의해 양호, 보통, 불량 등의 등급으로 판단이 가능하도록 제시하였다.
- (4) 연구에 사용된 모집단의 경우, 지속적인 데이터 축적과 관리를 통하여 품질평가 결과의 신뢰도를 높일 수 있도록 하였으며, 효율적인 관리를 위해 프로그램화하여 손쉽게 관리가 가능하도록 하였다.
- (5) 수정된 회귀직선법에 의한 평가방법의 경우, 프로그램화하여 실무에서 손쉽게 자료의 입력을 통하여 결과물의 출력이 가능하도록 하였다.

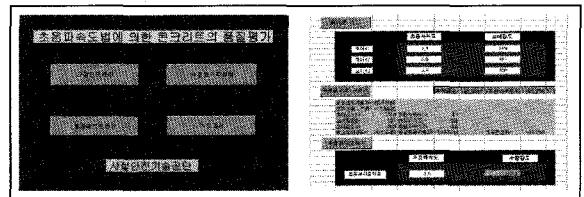


그림 8. 터널라이닝의 품질평가 프로그램

# 터널라이닝 콘크리트의 품질평가 절차서

## 1. 적용범위

본 품질평가 절차서는 공용중인 시설물 중 터널라이닝 무근콘크리트의 품질평가에 적용함을 원칙으로 한다.

## 2. 품질시험 위치의 선정기준

- (1) 종방향 기본단위 : 터널 연장 50m를 기본단위로 1개 단면을 선정한다.
- (2) 횡방향 기본단위 : 단면별로 벽체 2개소(좌·우), 천단부 1개소를 선정한다.
- (3) 본 절차서에서는 일반적인 선정기준을 제시한 것이므로 성능저하가 심한 개소, 조인트부, 누수부, 백태

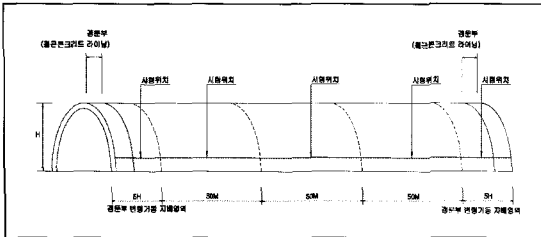


그림 9. 종방향 품질평가 기본단위

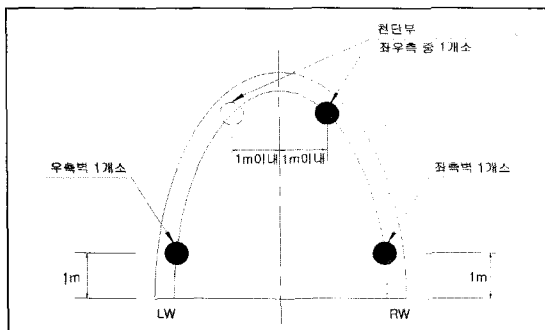


그림 10. 횡방향 품질평가 기본단위

발생부, 동해로 인한 표면탈락부, 유리석회 유출부, 방수재 도포부는 시험위치 선정시 피하여야 하며, 품질 변동성이 심한 개소는 별도로 시험위치를 선정하여 실시하여야 한다.

## 3. 초음파 측정용 시험기의 기본사양

### (1) 기본사양

- 시간감지범위 : 0.1~9999 $\mu$ s
- 공명주파수 : 50 KHz 이상
- 사용온도범위 : 0~45 $^{\circ}$ C
- 정밀도 :  $\pm 0.1\mu$ s 이하(고속 스위치회로의 작동시부터 수신파가 감지되는 시간을 0.1 $\mu$ s까지 측정가능한 정도)

### (2) 초음파시험기의 구성

- 진동자 : 단결정 광물 또는 티탄산바륨계 자기, 지르콘산 티탄산납계 자기(lead zirconate-titanate group of ceramics) 또는 니오븀(niobium)산납계 자기 등의 각종 압전체를 적당한 보호용기에 넣은 것.
- 직류전압의 인가에 의해 압전체에 충전된 전압을 방전하기 위한 위치 회로
  - ① 인가전압은 500V 이상으로 하고 가능한 고전압이 바람직함.
  - ② 스위치회로 작동시간은 3  $\mu$ s이하인 것이 바람직함.
- 전달시간 계측장치 : 수신센서 관찰방식에서 수신센서 관찰장치 및 파의 도달위치를 지정할 수 있는 장치. 포화 증폭방식에서는 입력강도가 명시되어야 함.



## 터널라이닝 콘크리트의 품질평가 절차서

- 교정장치 : 센서의 인가전압, 방전시간 및 전달시간을 교정하는 장치
- (3) 정밀도 향상을 위한 추천사항
  - 파형 획득방법 : 포화 증폭방식 보다는 수신과 관찰방식이 효과적임
  - 커서의 이동을 통해 수신파형의 해석이 가능한 장비
  - 수신파의 배율설정이 10단계로 세분되어 정도가 향상된 장비

### 4. 시험준비

- (1) 시험위치의 표면에 부착된 각종 이물질 제거한다.
- (2) 초음파시험의 실시방향은 종방향을 원칙으로 한다.
- (3) 시험위치는 폭5cm×길이70cm 횡방향으로 라이닝 표면을 연마하며, 시험영역 내에서 0.01mm 이상의 가시균열이 발견될 경우에는 시험위치를 변경한다.
- (4) 일정한 수평거리위치 표시를 위하여 Marking용 자를 준비한다.

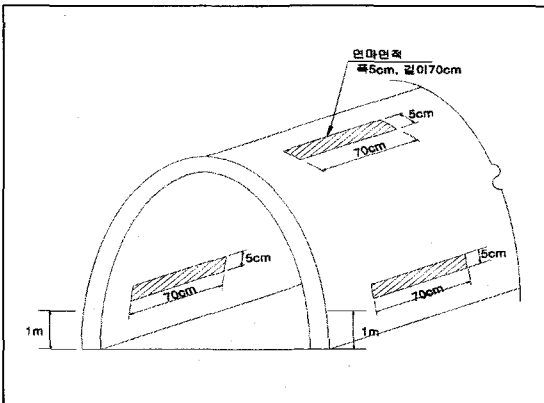


그림 11. 시험위치의 연마방법

### 5. 시험방법

- (1) 초음파시험기의 센서와 라이닝 표면의 접촉면에는 그리스 및 실리콘 오일 등의 접촉매질을 도포하며, 접촉매질은 반복하여 사용하지 않는다.
- (2) 시험시 발진센서와 수신센서의 측정간격을 15cm씩 이격시키면서 15, 30, 45, 60cm 간격으로 일정하게 유지시켜야 한다.
- (3) 시험결과는 최소 2회 이상 반복 측정하여 신뢰성을 높이고, 측정결과 중 재현성이 높은 자료를 취하도록 한다.
- (4) 초음파전달시간의 측정
  - 초음파전달시간  $T_1$ 은 그 위치에서 몇 차례 측정된 뒤 최소시간을 적어도 유효숫자 3자리까지 구한다. 콘크리트의 전파시간  $T$ 는  $T_1$ 에서 zero보정치  $T_0$ 를 뺀 값이다. 이때 장치 내에 zero보정을 내장한 경우  $T=T_1$ 이다.
  - 콘크리트의 임의위치의 전파시간 또는 교정봉의 전파시간을 여러 번 측정한 후 측정치의 재현성을 확인한다. 측정치의 재현정도는 아래의 식으로 구하여, 1% 이하로 한다.

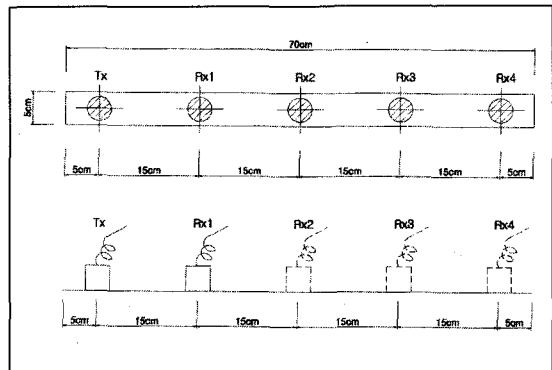


그림 12. 발진센서와 수신센서와 측정간격

## 터널라이닝 콘크리트의 품질평가 절차서

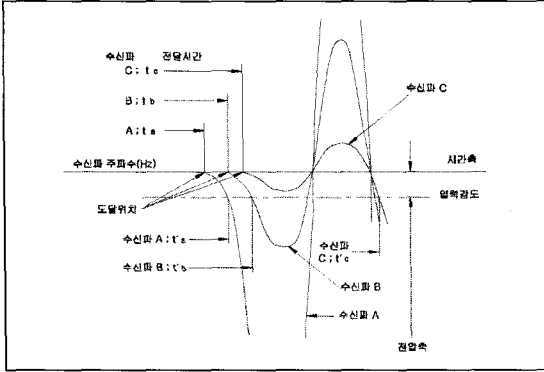


그림 13. 수신전압에 따른 전달시간의 변화 예

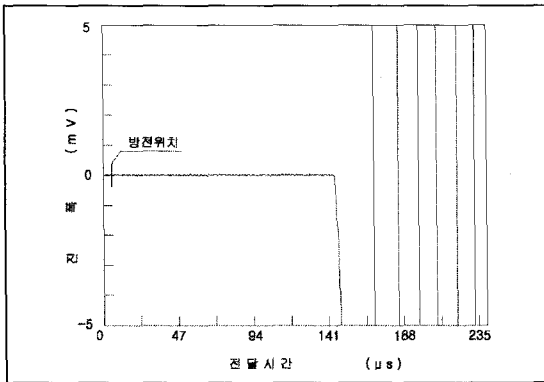


그림 14. 수신파관찰방식에 의한 수신파의 증폭

$$\text{재현정도} = \frac{2(T_1 - T_2)}{T_1 + T_2} \leq 0.01$$

- 여기서  $T_1$  및  $T_2$ 는 여러 번 측정된 전파시간의 최대치 및 최소치이다.
- (5) 초음파전달거리  $L$ 은 센서 중심거리로서  $\pm 0.5\%$ 의 정도로 측정한다.

### 6. 시험결과와 검증

- (1) 동일개소에서 측정한 초음파전달시간의 재현성이 낮은 경우나 수신센서의 측정간격별 측정결과가 비례하지 않고 2계 선형(bi-linear)으로 급격히 변할 경우, 균열 존재유무 및 연마상태를 재확인하고, 초기치를 보정한 후 재측정하고, 실측자료의 신뢰성이 낮다고 판단되면 측정위치를 재선정한다.
- (2) 일반적으로 동일개소에서 발진센서 및 수신센서의 위치를 바꾸어 측정한 결과가 일치하는 경우에는 측정결과와 재현성이 있는 것으로 간주한다.

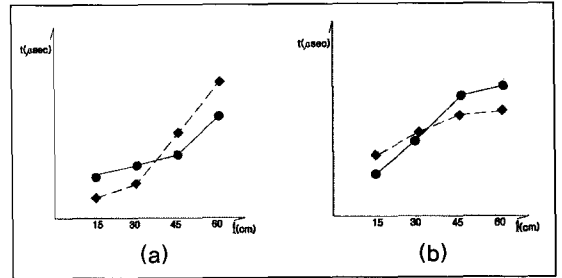


그림 15. 측정결과와 분석 예

### 7. 시험결과와 분석

- (1) 초음파전달속도( $V_p$ )는 센서중심간 거리와 센서간의 순간격을 적용하여 계산한 값 중 수렴성이 높은 값으로 정의한다.
- (2) 콘크리트의 전파속도  $V$ (km/s)는 다음 식에 따라 계산하며, 유효숫자 3자리에서 반올림한다.

$$V = \frac{L}{T}$$

## 터널라이닝 콘크리트의 품질평가 절차서

여기서, L: 센서 사이의 거리 (km),

T: 콘크리트 중의 전달시간으로, 전달시간  $T_1$ 에서 영점보정치  $T_0$ 를 뺀 유효전달시간 (sec)이다.

여기서, 시험기 내에 zero보정을 위한 교정장치를 내장한 경우  $T = T_1$ 이다.

### 8. 품질상태의 판정

(1) 터널라이닝 무근콘크리트의 초음파전달속도에 따

라 I, II, III, IV, V의 5단계로 정의하여 품질상태를 판정한다.

(2) 품질상태 판정기준

등급	초음파속도 (km/s)	강도의 범위 (kgf/cm <sup>2</sup> )	신뢰구간 (%)	등급별분포도 (%)
I	4.5이상	240이상	85	6.7
II	3.8~4.5	200이상	85	24.2
III	3.2~3.8	160이상	85	38.3
IV	2.1~3.2	115이상	85	28.6
V	2.1이하	115이하	57	2.2
				100%

### 참고문헌

- 최홍식, 이상민, 이시우, 오영석 등, "초음파법을 이용한 무근 콘크리트 터널라이닝의 품질평가", (사)한국콘크리트학회 2001년도 봄학술발표회, Vol.13, pp.795~800, 2001. 5.
- 시설안전기술공단, "초음파법을 이용한 무근콘크리트 터널라이닝의 품질평가를 위한 현장적용성 연구", 2000. 12.
- 한국전력공사 전력연구원, "콘크리트 비파괴 검사기술 개발", KRC-86H-JOI, 한국에너지연구소, 1987.
- 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.
- 日本建築學會 材料施工委員會, "コンクリートの非破壊試験法に関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.

- 谷川 恭雄, 童 壽興, 中村 正行, "非破壊試験法によるコンクリートの強度推定に関する研究", 콘크리트의非破壊試験法に関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.
- 柏 忠二 編著, "콘크리트의非破壊試験法-日·歐美의論文·規格·文獻-", 1980.
- 笠井 芳夫, 池田 尚治, "콘크리트의試驗方法(下)", 技術書院, 1993. 4, pp. 245~282.

### [약 력]

#### 오영석

- 명지대학교 대학원 토목환경공학과 박사수료
- (전)쌍용엔지니어링주식회사 지반공학부 근무
- (현)시설안전기술공단 진단본부 지하시설실 차장
- 토질 및 기초기술사