

터널 라이닝 콘크리트의 초음파 속도를 이용한 강도 등급 제안

Suggestion for Concrete Strength Grade Using Ultrasonic Velocity for Tunnel Lining Concrete

강수태¹ · 이방연² · 권성준^{3*}

Su-Tae Kang¹ · Bang-Yeon Lee² · Seung-Jun Kwon^{3*}

(Received December 7, 2015 / Revised December 20, 2015 / Accepted December 23, 2015)

This study implicates a quality evaluation technique for lining concrete using the ultra-sonic technique and proposed a classification for quality evaluation. From the comparison of test results, an improved result comparable to the results by destructive test can be obtained by using averaged transmission velocity of velocities obtained at pure space and central space between two sensors of ultrasonic tester. It is also shown that strength evaluation by ultra-sonic method is not reliable and an evaluation according to the transmission velocities can be improved method for the strength evaluation of concrete.

키워드 : 라이닝 콘크리트, 초음파법, 품질평가, 현장시험

Keywords : Tunnel lining concrete, Ultra-sonic velocity method, Quality evaluation, Field test

1. 서론

콘크리트의 초음파에 의한 비파괴시험법은 제2차대전에 발달하여, 연구개시는 1945년경으로 알려져 있다. 1950년대에는 Whitehurst (1951) 및 Kaplan(1959) 등에 의해 많은 연구가 있었으며, 그 중에서도 Whitehurst의 연구성과는 콘크리트의 품질판정을 목표로 ASTM에서 채택하였다(ASTM 1990). 1960년대는 특히 강도추정에 있어서 추정정도에는 한계가 있다는 점 때문에 정량적이고 정확한 방법이 제시되지는 못하였다. 그러나 1960년대 말부터 1970년대 초에 들어와 다시 초음파에 의한 콘크리트의 비파괴시험에 관한 연구가 활발히 이루어져 두께측정, 균열의 검사, 균질성의 검정, 내구성의 판정, 강도의 추정 등에 관한 연구가 나타나고 있다.

Elvery(1971)는 휴대용 음속 측정장치를 개발하여 초음파 전파속도와 콘크리트 강도 사이의 실험적인 추정곡선의 적용성에 대하여 논하였고, 휴대용 음속 측정장치(PUNDIT)를 개발하였다. 한편 Johnes(1970)의 실험결과에서 공시체의 양생조건, 배합조건과 배

합정도에 따라 초음파속도가 다른 것을 규명하였으며, Akashi & Amasaki(1985)는 굵은골재의 최대치수 30mm, 슬럼프 25mm와 150mm를 가진 여러 배합에서 수중양생과 수중양생 후 공기중에 보관한 콘크리트의 성상에 대한 결과를 발표하였다. 또한 초음파 전파속도법은 강도추정 외에도 시멘트, 콘크리트의 응결과정과 경화콘크리트의 재료분리 현상 및 균열깊이 등의 측정도 가능하다. 국내에서는 1970년대 Oh(1971)가 시초로 초음파 전파속도법에 관한 연구를 발표하였고, 1973년 제정된 KS F 2418(콘크리트중의 펄스 속도 시험방법)이 비파괴검사와 관련한 유일한 KS규격으로 존재한다. 초기에는 콘크리트의 강도 및 품질관리 측면에서 비파괴 시험법중 초음파속도법에 대한 기초적인 실험연구 등이 이루어졌으며, Bahn(1987)은 그의 논문에서 초음파 전파속도법을 이용하여 각 지역별 레미콘의 강도추정식을 발표하였다. 또한 Kim & Lee(1998)은 탄성파를 이용하여 구조물의 결함을 검출하려는 시도를 하였다.

콘크리트부재의 균열에 대한 콘크리트의 조기강도 판정에 있어

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hnu.ac.kr

¹대구대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongbuk, 38453, Korea)

²전남대학교 건축학부 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea)

³한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

서 초음파속도법의 적용성에 대한 연구 등이 1990년대에 와서 보고 되었다. 초음파 전파속도법은 미국의 ASTM C 597(1990), 영국의 BS 1881 part203(1986), RILEM(1972) 등의 사용법이 규정되어 있다. 최근에는 이러한 탄성파(초음파)를 이용한 비파괴적 기법에 대한 연구가 빠르게 진행되고 있으며, 콘크리트 품질 평가 및 결함부 검출에 적용되고 있다(Bungey 1994; Chung 1978; Faccaoru 1970; Johnes 1970).

본 연구에서는 신속성과 습득 자료의 신뢰성이 동시에 요구되는 기존 초음파 속도법의 적용성 및 문제점을 분석하고, 현장 및 실내시험을 통해 실무에서 쉽게 적용할 수 있도록 무근 콘크리트 터널라이닝에 대해 개선된 초음파속도 측정 및 품질 평가 방법을 제시하고자 한다.

2. 초음파 속도 평가

2.1 측정원리

인간의 귀에 들리지 않는 주파수 30Hz 미만의 음을 초저음, 주파수 15,000Hz 이상의 것을 초음파라 부른다. 초음파의 파장은 수mm~수십mm이며, 초음파는 빛의 성질과도 거의 같다. 가장 특징적인 것은 지향성이 뛰어나 확산하지 않고 특정방향으로 직진하려는 성질이 있다는 것이다. 이 성질에 의해 기하 광학적으로 취급되어 물체의 결함과 위치를 정확히 찾아낼 수 있다. 따라서 이러한 초음파속도법은 피측정물의 형상, 치수 등에 거의 제약을 받지 않고 콘크리트의 강도평가, 거푸집제거 시기의 결정, 프리캐스트 콘크리트공사의 제조관리, 구조물의 품질평가 및 균열의 깊이 등을 측정하는데 사용되고 있다. 이러한 초음파속도의 측정원리는 시험대상 콘크리트에 초음파를 발생시켜 그 통과시간을 측정하는 것을 기본원리로 하고 있으며, 초음파속도 측정기의 기본구성은 Fig. 1과 같고, 그 측정방법을 살펴보면 다음과 같다.

측정방법에서 주의할 점은 탐촉자(발진자 및 수신자)와 콘크리트면의 접촉이 적당하지 않을 경우는 수진이 곤란하기도 하고 측정에 오차를 수반하기도 한다. 그러므로 측정면에 접촉매질을 발라 탐촉자를 압착시키는데 이때 접촉매질의 두께는 적을수록 좋고 1mm 이하의 두께이면 음속측정치에 미치는 영향은 거의 무시되어진다. 탐촉자를 콘크리트에 압착시킬때의 압력(사람 손에 의한 경우)에 따라 $\pm 0.25\mu s$ 정도의 차이가 생긴다. 적용주파수가 클수록 초음파의 지향성은 향상되나 감쇄는 커진다. 콘크리트의 경우 200kHz 이상인 초음파는 측정이 곤란하게 되고, 20kHz 이하로는 지향성이 저하하여 초음파속도 측정의 정도는 저하하게 된다.

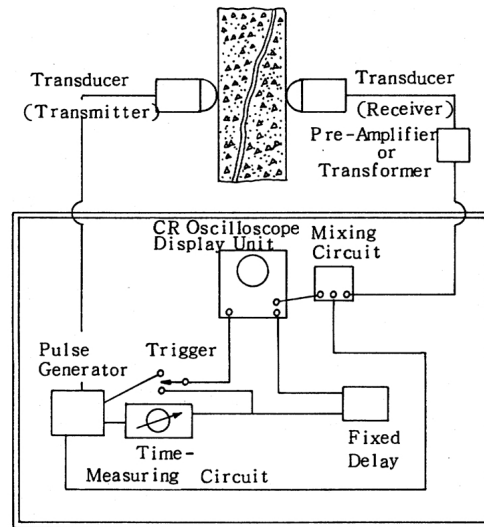


Fig. 1. Schematic diagram for ultrasonic device(ASTM 1990)

통상 콘크리트의 경우 금속재의 시험에 사용되는 주파수에 비해 매우 낮은 주파수를 사용한다. 적용주파수가 클수록 초음파의 지향성은 향상되나 감쇄가 크기 때문에 콘크리트의 시험에 사용되는 주파수는 대체로 20kHz에서 200kHz의 주파수를 사용하나 콘크리트의 경우 50kHz가 가장 적절한 것으로 알려져 있다. 콘크리트의 거동을 탄성적 거동으로 가정할 때 파의 전달속도는 식 (1)로 정의된다.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_D}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

여기서, V_p 는 파의 전달속도, E_D 는 콘크리트의 동탄성계수, ρ 는 콘크리트의 밀도, μ 는 콘크리트의 포아송비를 나타낸다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 파속의 영향인자는 콘크리트의 밀도, 탄성계수 및 포아송비로서, 파속은 탄성계수의 제곱근에 비례하며 밀도의 제곱근에 반비례한다. 따라서 파속은 압축강도의 4승근에 비례하게 되므로 압축강도의 변화가 커도 미소한 변화만을 나타내게 된다. 일반적으로 초음파 전달속도를 이용하여 동탄성계수를 산출하기 위해서는 동포아송비가 측정되어야 하므로, 초음파속도와 파괴에 의한 압축강도를 직접 연관시키는 상관식보다 큰 오차를 수반하게된다. 따라서 초음파전달속도의 측정치는 변동성이 1%미만으로서 콘크리트의 강도추정보다는 상대적인 품질평가에 활용함이 일반적인 경향이다. 한편, 초음파속도를 측정할 때 탐촉자(발진자와 수신자)의 배치방법은 Fig. 2와 같이 직접법, 반직접법, 간접법의 3가지 종류가 있다.

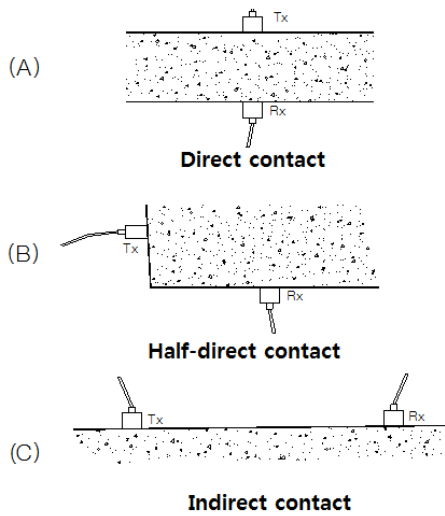


Fig. 2. Measurement for ultrasonic velocity(ASTM 1990)

2.2 콘크리트용 초음파 측정장비

본 연구에서는 철도교 및 도로교 터널에 대하여 현장적용을 위해 TR-300과 PUNDIT를 사용하였는데, 측정 장비의 특징은 Table 1에, 제품 사진은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1. Type and specification for ultrasonic device

Product	Type	Specifications
PUNDIT	C.N.S Electronics LTD	<ul style="list-style-type: none"> · Detection time: 0.1 ~ 9999 μs · Frequency: 54kHz · Weight: 3kg
TR-300	Techno Research	<ul style="list-style-type: none"> · Temp.: 0~45$^{\circ}$C · Resolution: \pm0.1 μs

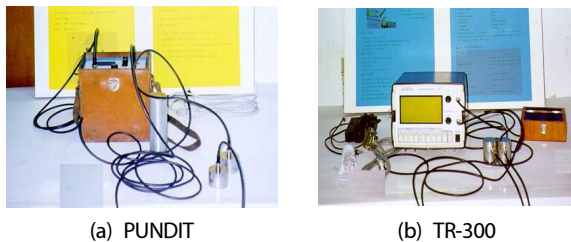


Fig. 3. Photos for ultrasonic device

3. 현장시험을 통한 초음파속도 평가

3.1 현장시험의 개요

본 연구에서는 철도터널인 A현장 및 도로교 B현장을 대상으로

Table 2. Tunnel and number of tests

Types	Ultrasonic		Schmidt hammer NR-Type	Core numbers	Sum
	TR-300	PUNDIT			
A tunnel	21	47	45	48	161
B tunnel	26	22	18	40	106
Sum	47	69	63	88	267

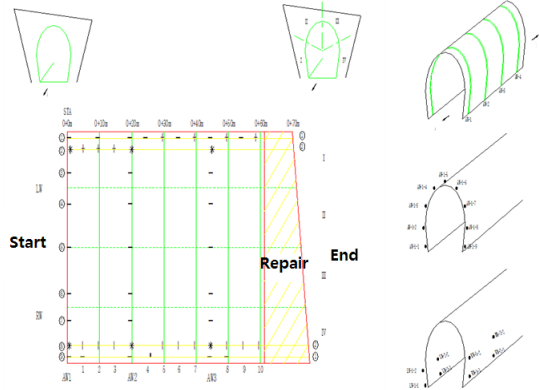


Fig. 4. Location of measurement for tunnel A and B

라이닝 콘크리트에 대하여 현장시험을 수행하였으며, 코어강도와 의 비교를 수행하였다. 비파괴 평가를 통한 강도 비교이므로 배합 강도는 제외하도록 한다. 현장조사는 종단면 및 횡단면의 품질 변동성에 대한 분석을 위하여 수행하며, 비파괴 측정으로는 초음파 속도법과 반발경도(NR Type)를 수행하였다. 강도와 의 비교를 위해 지름 100mm의 코어를 채취하였다. Table 2에서는 터널별 시험 수 및 코어채취개수를 나타내고 있다. Fig. 4에서는 터널 A 및 평가 위치를 나타내고 있다.

3.2 현장시험 비파괴 평가 결과 및 분석

3.2.1 A 터널 현장평가 및 분석

Table 3 및 4에서는 터널 A과 횡단면 및 종단면의 평가결과를 나타내고 있다. A터널 횡단면에 대해서는 3곳에서 터널의 전단면을 8개소로 분할하여 좌측→천단→우측에 이르는 초음파속도를 측정하였다. 갭문부(STA 0+0m)에서는 비교적 초음파 전파속도가 균등한 분포를 나타냈다. 이는 라이닝 부분과 비교하여 손상이 없는 건전한 상태를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 비교적 열악한 상태인 터널 내부(STA 0+20m, STA 0+45m)의 경우 변동폭은 매우 큰 양상을 보였으며, 좌, 우, 천단 등 부위별 특성은 보이지 않았다. 종단면에 대해서는, 동일 위치에서의 측벽부의 좌, 우의

Table 3. Test results for tunnel A(lateral)

	UV(km/sec)				Rebound (MPa)	Core (MPa)
	PUNDIT		TR-300			
	0℃	90℃	0℃	90℃		
STA 0+0.0m	4.0362		4.1429		27.3	
	3.2151	3.7203	4.0845	3.7662	30.5	24.1
	3.9031		3.6250		28.6	
	4.3446				36.5	
	3.9005				28.3	
	3.9031				33.7	
	3.9189		3.8158		25.1	
	2.6740	2.3482	3.5366	3.5366	29.5	
	3.8133		4.2029		26.1	
STA 0+20.0m	3.1956		3.1868		20.6	
	4.0390	3.5648	4.1429	4.4615	28.3	21.8
	2.9517					
	3.8692				21.8	
	4.0960				23.1	
	2.5163				21.3	
	3.5648		3.0526		18.6	
	3.9483	3.9563	4.0845	4.000	29.1	26.1
	2.3284		3.3143		16.8	
STA 0+45.0m	3.6802		2.1091		19.9	
	2.6703	3.3760			18.1	17.3
	3.8978		4.0559		11.4	
	3.8978		2.3482		22.9	
	2.1053				28.1	
	2.8101		2.5778		21.4	
	3.6115		2.4786		20.4	
	3.3819	3.4689				16.4
	3.9189					

편차가 발생하였으며, 콘크리트의 외관상태를 반영하듯 매우 분산이 크게 평가되었다. 횡단면 및 종단면의 측정결과를 도시하면 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타낼 수 있다.

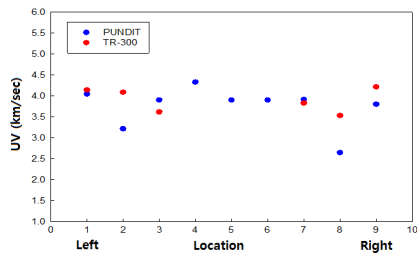
3.2.2 B 터널 현장평가 및 분석

Table 5에서는 터널 B의 횡단면 및 종단면의 평가결과를 나타내고 있다. B터널의 라이닝 콘크리트의 횡단면상의 초음파속도 변동을 측정하기 위하여 3곳에서 터널의 전단면을 5개소로 분할하여 좌측→전단→우측에 이르는 초음파속도를 측정하였다. 내부는 누수가 심하였으나 노후정도는 그다지 심하지 않은 편이었다. STA 0+10m와 STA 0+40m의 경우 횡단면의 분포는 거의 변화가 없이

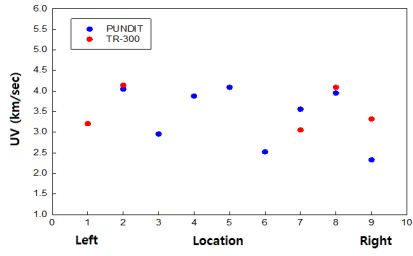
Table 4. Test results for tunnel A(directional)

	UV(km/sec)				Rebound (MPa)	Core (MPa)
	PUNDIT		TR-300			
	0℃	90℃	0℃	90℃		
STA 0+5.0m						
	2.6173	2.0582	4.0278	4.0845	22.2	
STA 0+10.0m			4.6774			10.6
	2.2533	2.3616	4.5313	3.7391	21.3	
STA 0+25.0m						10.5
	3.5627				18.3	
STA 0+30.0m						
	2.0139	2.0251			15.4	
STA 0+40.0m						20.2
	3.7037	3.5583	3.7419	3.7179	19.4	
STA 0+50.0m						
	3.7711	3.4835			17.5	
STA 0+55.0m						
	3.7444				20.7	
STA 0+60.0m						
	3.9627	3.6432			22.0	
STA 0+5.0m	4.0028		4.2336		27.8	
	3.6849	2.8390	4.0268	4.0278	28.4	
STA 0+10.0m						19.6
	3.7859	3.5616	4.4961	3.9091	20.6	
STA 0+30.0m						9.4
	2.8813	2.9087			15.4	
STA 0+35.0m						
	3.5758	3.3682			19.4	
STA 0+40.0m						
	3.6250	3.1267	4.0559	4.0845	18.9	
STA 0+50.0m						
	3.7395	3.6547			19.2	
STA 0+55.0m						21.9
	3.9242	3.7958			25.3	
STA 0+60.0m						25.5
	3.8334	3.5714			22.0	
Start	3.8667	3.9536			22.9	
	3.6501	4.0055			27.0	
	4.2243	3.7638	4.5313	4.0278	29.8	

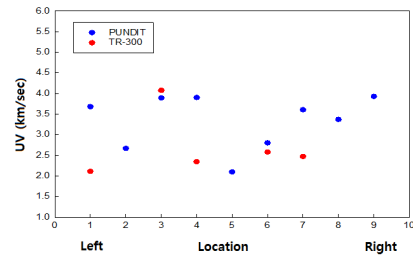
균등한 것으로 나타났지만 STA 0+25m의 경우 천단부에서 PUNDIT에 의한 측정결과와 거의 불량한 것으로 평가되었다. 종단면상에서는 좌, 우측벽을 따라 총 12개소의 측정을 실시하였다. 동일 위치에서의 측부의 좌, 우의 편차는 크지 않은 것으로 조사 되었다.



(a) STA 0+0.0m

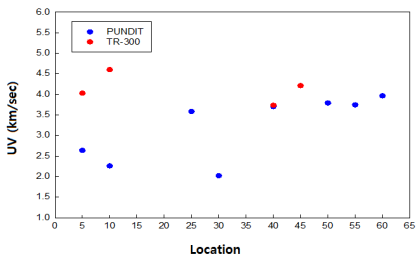


(b) STA 0+20.0m

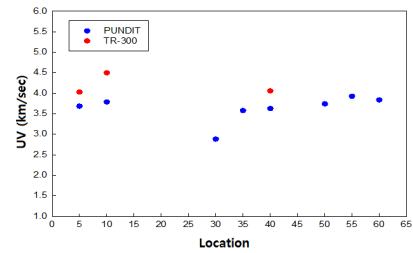


(c) STA 0+45.0m

Fig. 5. Ultrasonic velocity of A tunnel(lateral)



(a) Left wall(1.5m from bottom)



(b) Right wall(1.5m from bottom)

Fig. 6. Ultrasonic velocity of A tunnel(directional)

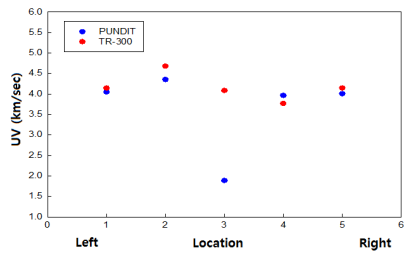
Table 5. Test results for B tunnel(lateral and directional)

	UV (km/sec)				Rebound (MPa)	Core (MPa)
	PUNDIT		TR-300			
	0°C	90°C	0°C	90°C		
STA 0+10.0m	4.0475	3.9189	4.1429	4.0278	21.1	20.8
	4.3511	4.2059	4.6774	4.4615		
	1.8880	1.5596	4.0845	3.4146		
	3.9645	3.5258	3.7662	3.0714		
	4.0055	4.2090	4.1429	4.0845	28.2	28.9
STA 0+25.0m	5.8000	5.4976	4.7541	4.6774	28.5	
	2.7141	2.9234	2.9452	2.7215		
	1.8950		4.0907			
	2.8526	3.7736	4.2029	2.8667		
	3.9295	4.1607	4.1429	4.3939	19.5	22.2
STA 0+40.0m	4.1847	3.7444	3.9726	3.8667	20.6	18.3
	3.1351	2.2053	3.4524	2.6852		
	3.5583	2.8870	3.5802	3.5246		
	4.000	3.6943	4.3939	3.3721		
	3.6160	3.7108	3.8667	3.5366	18.0	
0+0.0m	4.0730	4.2836	4.1429	4.2029	20.1	19.7
0+5.0m	3.8133	3.9590	4.0845	3.7662	16.4	
0+15.0m	5.1011	5.2536	4.1429	4.2029	21.1	
0+20.0m	4.2710	4.5207	4.1429	4.5313	27.3	27.5
0+30.0m	4.0028	3.9563	4.1429	4.1429	23.0	22.8
0+35.0m	3.9672	4.0306	4.2647	4.0278	17.4	
0+0.0m	4.0362	4.0759	4.2647	4.2029	18.4	
0+5.0m	3.7638	3.9429	3.9189	4.0278	17.4	18.1
0+15.0m	4.0559	3.9456	4.1429	4.0845	20.7	22.2
0+20.0m	4.5850	4.8213	4.1429	4.1429	20.6	
0+30.0m	3.9972	4.0531	4.1429	4.0278	19.0	
0+35.0m	4.3840	3.9216	4.2647	4.1429	19.7	23.2

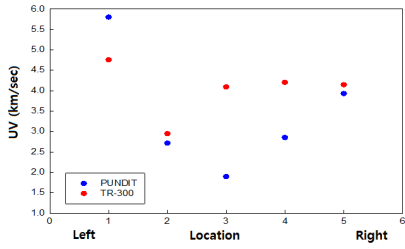
Fig. 7과 8에서는 횡단면 및 종단면의 초음파 속도 분포를 나타내고 있다.

3.3 초음파 속도와 코어와의 비교 분석

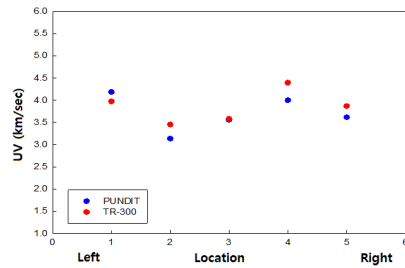
A터널의 현장시험결과를 요약하면 다음 Table 6 및 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. A터널의 콘크리트 표면상태와 같이 코어의 상태도 비교적 열악한 상태였으며, 초음파속도의 산포가 크고 코어의 강도는 10.5~26.1MPa로 매우 넓은 분포를 보였다. 또한, 전체적으로 코어강도와 간접법에 의한 초음파 전파속도의 상관관계는 비례적인 관계를 띠는 것으로 나타났다. 일반적인 라이닝 강도인 20MPa를 기준으로 볼 때 3,742km/sec이상인 8개중에서 7개



(a) STA 0+10.0m

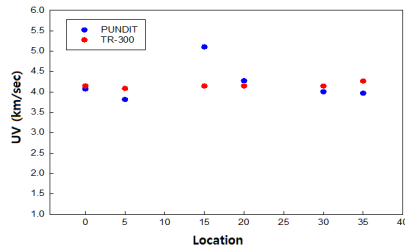


(b) STA 0+25.0m

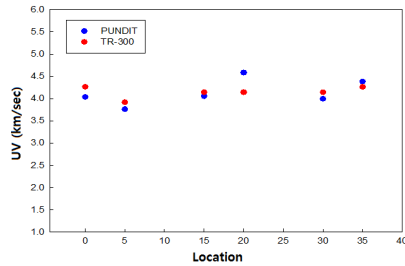


(c) STA 0+40.0m

Fig. 7. Distributions for ultrasonic velocity(B tunnel, lateral)



(a) Left wall(1.5m from bottom)



(b) Right wall(1.5m from bottom)

Fig. 8. Distributions for ultrasonic velocity(B tunnel, directional)

Table 6. Comparison of ultrasonic and core strength(A tunnel)

Location	AW 1-2	AW 2-2	AW 2-8	AW 3-2	AW 3-8	LW 2-2	LW 4-2	LW 7-2	RW 2-2	RW 5-2	RW 9-2	RW 10-2
Core (MPa)	24.1	21.8	26.1	17.3	16.4	10.6	10.5	20.2	19.6	9.4	21.9	25.5
UV (km/sec)	4.08	4.14	4.08	2.67	3.38	4.53	3.56	3.74	4.49	2.88	3.92	3.83
15cm (μ s)	27	29	33	36	42	27	37	38	30	40	35	39
30cm (μ s)	70	67	70	74	79	70	80	66	68	83	75	77
45cm (μ s)	106	101	100	127	119	93	120	111	100	162	110	116
60cm (μ s)	142	140	142	217	171	128	162	155	129	201	147	151

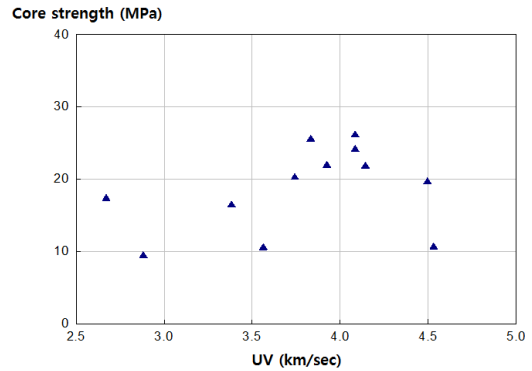


Fig. 9. Ultrasonic velocity and core strength(A tunnel)

Table 7. Comparison of ultrasonic and core strength(B tunnel)

Location	AW 1-1	AW 1-5	AW 2-5	AW 3-1	LW 1	LW 4	LW 5	RW 2	RW 3	RW 6
Core (MPa)	20.8	28.9	22.2	18.3	19.7	27.5	22.8	18.1	22.2	23.2
UV (km/sec)	4.14	4.14	4.14	3.97	4.14	4.14	4.14	3.91	4.14	4.26
15cm (μ s)	33	32	31	33	33	30	33	33	32	31
30cm (μ s)	73	68	72	70	69	65	71	65	68	68
45cm (μ s)	114	104	106	104	105	106	114	104	104	98
60cm (μ s)	140	140	140	146	140	140	140	148	140	136

소에서 20MPa를 넘거나 거의 같은 값을 나타냈으며, 1개소만 10.6MPa의 코어강도를 나타냈다.

또한 B터널의 현장시험결과를 요약하면 Table 7 및 Fig. 10과 같다. 도로터널인 B터널의 콘크리트 표면은 누수가 심한 편이었

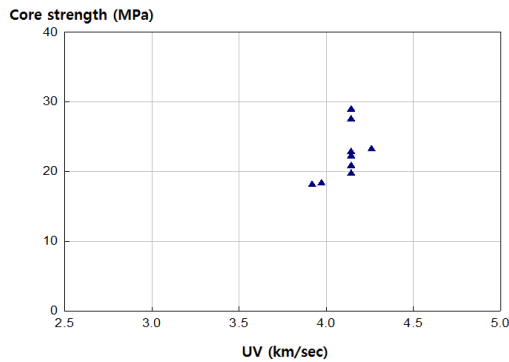


Fig. 10. Ultrasonic velocity and core strength(B tunnel)

나 코어의 채취상태로 본 콘크리트 타설상태는 A터널에 비하여 상대적으로 양호한 편이었다. 코어강도의 분포는 18.1~28.9MPa 이었으며, 초음파 전파속도는 3.919~4.265km/sec로 좁은 폭을 형성하고 있음을 알 수 있다. 이는 다짐 등의 정도에 따라 코어강도에는 차이가 크더라도 표면파의 차이로 그다지 크지 않은 경우를 나타내는 예라 하겠다. 20MPa를 기준으로 볼 때 총 8개소 중에서 코어강도가 기준강도를 넘거나 근처값을 보였으며, 대부분이 초음파 전파속도가 4.143km/sec 근처에 밀집하는 상태를 나타냈다.

4. 초음파 속도 평가에 따른 문제점 분석 및 개선방안

4.1 문제점 분석 및 평가방법개선

서로 크기가 다른 부재 또는 구조물에 대하여 측정된 자료를 바탕으로 만들어진 자료를 통하여 상관식을 도출하는 것은 그 신뢰성이 떨어지게 된다. 또한 서로 다른 측정 방식에 의한 데이터의 자료는 직접 비교할 경우 차이가 큼을 알 수 있다. 포화중폭방식의 PUNDIT는 수진파의 진폭이 미약할 때 도달시간이 예상 측정치의 2배 이상 걸리는 경우가 발견되어 데이터의 오류가능성이 있으며, 간접법에서의 초음파 전달속도는 파의 전달경로를 가정하는 방식에 따라 다르게 계산될 수 있다.

4.2 초음파를 이용한 품질평가방안의 개선점 및 제안

4.2.1 초음파속도 및 품질측정방법

노후된 터널의 무근라이닝 콘크리트의 경우, 표면의 열화와 배면으로 부터의 누수로 인하여 표면에서 간접법으로 초음파 전파속도를 구할 때 표면의 처리에 세심한 주의가 필요하다. 현장조건에

대한 개선점은 다음과 같이 분석되었다.

1. 가급적 요철이 없는 부분을 택하여 표면을 연마석으로 연마 하되 60cm정도를 길이방향으로 전체를 연마
2. 표면의 물기는 초음파 전파속도에 매우 큰 영향을 주므로 토치램프 등으로 표면의 물기를 제거하여 콘크리트 본래의 색상이 나오도록 3~5분 정도 표면건조
3. 접착매질로는 표면상태 및 온도에 따라 그리스, 실리콘 오일, 당류 등을 선택해 사용하여 가급적 얇게 충전
4. 동일위치에서 반복측량시 가장 도달시간이 빠른 것을 측정치로 평가
5. 수평으로 측정된 데이터의 경우 150mm, 300mm, 450mm, 600mm에서의 측정결과가 비교적 선형관계를 유지하므로, 그 결과치의 분포가 위 또는 아래로 볼록한 곡선으로 비정상적인 분포를 보일 경우 수진자와 발진자의 위치를 바꿔 확인
6. 거리의 측정은 정도에 매우 중요한 인자이므로 미리 구멍을 뚫어 놓은 아크릴 판 등의 위치 표시자(marking plate) 등을 이용
7. 코어채취 위치에서의 실험을 할 경우 그 상태를 잘 스케치하여 결과치의 정성적 평가에 활용
8. 측정된 데이터는 현장에서 그 경향을 미리 파악

초음파장비의 영향을 고려하면 다음과 같은 개선점이 분석되었다.

1. 현재 가장 널리 사용되는 장비인 포화중폭방식의 PUNDIT과 수진파 관찰방식인 TR-300의 경우 대부분의 실험조건에서 반복실험을 한 경우, 대체로 값이 큰 차이를 보이지는 않음
2. 상대적으로 수진파 관찰방식이 경험이 누적될수록 신뢰도를 높이며, 데이터의 경향을 직접 파악하는데 큰 도움이 됨
3. 일부의 경우이지만, 포화중폭방식에서는 수진파의 진폭이 미약할 때 도달시간이 예상 측정치의 2배이상 걸리는 경우가 발견되어 데이터의 오류가능성이 있으므로 주의를 요할 필요

4.2.2 초음파속도 및 품질평가방법 제안

터널 라이닝 콘크리트의 비파괴시험 중 간접법에 의한 초음파 속도법으로 얻은 자료는 대체적으로 콘크리트의 코어강도와 선형의 관계를 갖는 것으로 나타나고 있으나, 기존의 직선회귀로는 매우 큰 오차를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 직선 회귀식으로 평가하는 방법보다는 ASTM 제안범위를 고려하여 강도와 함께 라이닝 콘크리트 품질관리 평가방법을 제안하는 바이다.

5. 결론

터널 라이닝 콘크리트의 초음파 속도를 이용한 강도 등급 제안을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 기존 무근 콘크리트 터널라이닝의 품질평가 방안을 개선하기 위해 기존 초음파속도법의 적용성 고찰, 기존터널 품질평가 자료의 분석, 현장시험을 실시하여 초음파 전달속도의 측정방법 정립 및 개선된 품질평가 방안을 분석하였다.
2. 초음파속도에 의해 콘크리트 강도를 정량적으로 평가하는 방안은 신뢰성이 부족한 것으로 판단되기 때문에 초음파 전달속도에 따라 강도 등급별로 콘크리트를 평가하는 방안이 보다 합리적인 평가 방안으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2015R1A5A1037548)이며 저자는 이에 감사드립니다.

References

Akashi, T., Amasaki, S. (1985), State-of-the-art on nondestructive testing of concrete, *Concrete Journal*, **23(12)**, 11–20.
 ASTM C 597–83. (1990). Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, American Society for Testing and Materials, 1–24.
 Bahn, H.Y. (1987). A Study on Influence of Compressive Strength of Concrete by Ultrasonic Testing, Ph.D Thesis, Hanyang University, Korea, 25–48 [in Korean].

BS 1881 : Part 203 (1986), Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, British Standards Institution, 1–42.
 Bungey, J.H. (1994). *The Testing of Concrete in Structure*, 2nd Ed., Chapman&Hall, London.
 Chung, H.W. (1978). Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete, *Magazine of Concrete Research*, **30(102)**, 19–25.
 Elvery, R.H. (1971). Non-destructive testing of concrete and its relationship to specifications, *Journal of the Concrete Society*, **5(4)**, 28–59
 Facaoaru, I. (1970). Non-destructive Testing of Concrete in Romania, Institution of Civil Engineers and the British National Committee for Non-destructive Testing, 39–49.
 Johnes, R. (1970). A Review of the Non-destructive Testing of Concrete, Institution of Civil Engineers and the British National Committee for Non-destructive Testing, 1–7.
 Kaplan, M.F. (1959). Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates, *Journal of ACI*, **55(5)**, 1193–1208.
 Kim, D.S., Lee, K.M. (1998). Nondestructive testing of concrete structures using stress wave techniques, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **10(2)**, 40–49 [in Korean].
 Oh, C.H. (1971). A study of the non-destructive testing of high strength concrete by ultrasonic methods, *Journal of Architectural Institute of Korea*, **15(4)**, 5–7 [in Korean].
 RILEM. (1972). *Testing Concrete by the Ultrasonic Pulse Method*, 1–52.
 Whitehurst, E.A. (1951). Sonicscope tests concrete structures, *Journal of ACI*, **47(2)**, 433–444.

터널 라이닝 콘크리트의 초음파 속도를 이용한 강도 등급 제안

본 연구에서는 무근 콘크리트 터널 라이닝의 품질 평가를 위해 초음파법을 사용하여 현장시험을 실시하였으며, 라이닝 콘크리트의 품질을 평가하였다. 초음파 탐사기의 센서 중심간격과 센서의 순간격을 기준으로 각각의 전달속도를 평가한 후 평균값에 대한 수렴정도를 예측하여 평균값을 초음파 전달속도로 구하면 직접법에서 얻어지는 결과만큼 신뢰성 있게 얻어질 수 있음을 보였다. 초음파속도에 의해 콘크리트 강도를 정량적으로 평가하는 방안은 신뢰성이 부족하며 초음파 전달속도에 따라 등급별로 콘크리트를 평가하는 방안이 보다 합리적인 평가 방안임을 나타내었다.