

비파괴시험에 의한 콘크리트 초음파속도의 재령계수 산정

Calculation of Aging Effects of Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete by Non-Destructive Test

조 창 호*

Cho, Chang-Ho

Abstract

This paper aims to calculate age coefficient of ultrasonic pulse velocity by non-destructive test. When concrete compressive strength is measured by non-destructive test, rebound test hammer method is applied to estimate age coefficient depending on the course of time after concrete casting, but ultrasonic pulse velocity method is not applied in the process. Although it is necessary to consider age coefficient with change of ultrasonic pulse velocity of concrete depending on aging, there have been little attempts to apply that method. The experiments were conducted to calculate aging effects which will be applied to establish the formula of measuring concrete strength. As a result of experiments, it was found that ultrasonic pulse velocity showed radical changes depending on concrete hardening in comparison with initial standard values. So, it was concluded that age coefficient must be applied to calculate strength. In conclusion, age coefficient of ultrasonic pulse velocity of concrete was suggested on the basis of experimental results.

요 지

비파괴시험에 의한 콘크리트 압축강도 추정시 반발경도법은 콘크리트 타설 후 시간경과에 따라 재령계수를 적용하고 있으나 초음파속도법은 적용되지 않고 있다. 재령경과에 따른 콘크리트 초음파속도의 변화에 대한 재령계수 적용의 필요성에 대하여 검토해야함에도 불구하고 그에 대한 연구가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 콘크리트 초음파속도를 측정하여 강도 추정식에 적용될 재령계수를 산정하기 위한 실험을 실시한 결과, 초음파속도는 콘크리트 경화에 따라 재령 초기 기준치에 비교하면 급격한 변화를 보여 재령계수를 반드시 적용해야 한다는 것을 알 수 있었으며 실험결과에 의해 콘크리트 초음파속도의 재령계수를 제안하였다.

Keywords : Age coefficient, Non-destructive test, Ultrasonic pulse velocity(UPV)

핵심 용어 : 재령계수, 비파괴시험, 초음파속도

* 정희원, 전남도립대학 건축·인테리어과 교수, 공학박사

E-mail : chcho@dorip.ac.kr 061-380-8682

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트 구조물을 사용중이거나 시공중일 때 또는 기존 구조물의 내력을 판단하기 위하여 콘크리트 압축강도는 중요한 요소이며 측정은 반드시 필요하다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 구조물의 콘크리트 압축강도 측정방법으로 구조체에 손상을 끼치지 않은 비파괴시험의 유용성에 대하여 수많은 방법이 제안되었다.⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ 이러한 제안의 토대로 현재 국내에서 사용하고 있는 단일법이나 복합법은 반발경도법과 초음파속도법이 주로 사용되고 있으며 두 방법을 혼용한 복합 비파괴시험법이 많이 사용되고 있다. 이 방법은 하나의 시험법 보다 두 가지 이상의 방법을 사용함에 따라 통계적으로 시험자료의 모집단을 증가시키기 때문에 상관계수 및 결정계수가 높아져 강도 추정 정도가 향상되어 신뢰성이 있다고 간주되고 있다.⁽³⁾

한편 콘크리트 압축강도의 추정시 단일법으로서 반발경도법을 사용할 때에는 콘크리트 타설 후 시간경과에 따라 재령계수를 적용하고 있고 이에 관한 연구결과⁽¹⁾도 발표되고 있지만 초음파속도법은 적용되지 않고 있다. 콘크리트의 재령경과에 따른 초음파속도의 변화에 대한 재령계수 적용의 필요성에 대하여 반드시 검토해야함에도 불구하고 그에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

또한 기존 연구결과⁽⁴⁾에서 Fig. 1과 같이 반발경도법과 초음파속도법을 병행한 복합법을 이용할 때 두 시험법은 콘크리트가 일정 기간의 재령경과와 더불어 반발도는 증가되나 초음파속도는 감소되어 상쇄관계가

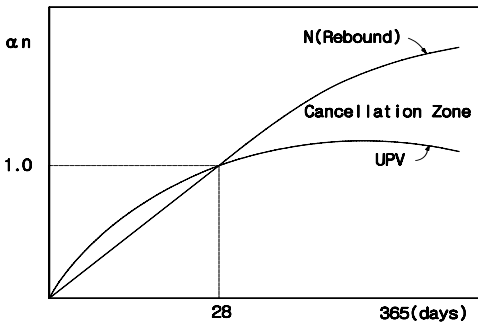


Fig. 1 Cancellation relation

성립한다. 그 원인으로 초음파속도는 콘크리트의 재령이 경과함에 따라 콘크리트 내부에 함유되어 있는 자유수, 결합수, 겔수가 증발할 때 생기는 미세한 공극의 영향이라고 하였는데, 상쇄관계의 규명은 실험결과로 예상하여 계속에 의한 물리적인 평가에 근거하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 초음파속도의 재령계수 산정과 재령경과에 따른 콘크리트 중량변화를 계속하여 상쇄관계의 물리적인 규명을 함으로써 적합한 콘크리트 압축강도 산정에 도움이 될 수 있는 참고자료를 제안하는데 있다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

콘크리트 강도 추정에 있어 구조물을 보다 신뢰성을 갖는 강도추정을 하기 위한 초음파속도의 재령계수 산정에 관한 일련의 실험을 실시하였다. 아크릴을 이용, 몰드를 제작하고 콘크리트를 타설한 후 재령 1년까지 콘크리트 초음파속도와 중량 변화를 측정하였다. 본 연구의 실험요인 및 수준은 Table 1과 같이 W/C비 30%~60%, 잔골재율(S/A) 30%~60%로 하였다.

2.2 사용재료 및 시험체 제작

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트(밀도 : 3.15g/cm³, 분말도 3,256cm²/g)를 사용하고, 골재로써 전남 곡성산 강모래(밀도 : 2.50g/cm³, 조립률 : 2.65)를 사용하였으며 굵은 골재는 전남 곡성산 25mm 강자갈(밀도 : 2.65g/cm³, 조립률 : 7.02)을 사용하였다. 혼화제로 유동화제를 사용하였으며 콘크리트 사용 배합은 Table 2와 같다. 콘크리트 혼합은 강제식 팬

Table 1 Test variables

Test variables	Levels
w/c(%)	30, 40, 50, 60
S/A(%)	30, 45, 60
Testing ages(days)	1, 2, 3, ..., 30, 32, 34, ..., 90, 120, 150, ..., 365

Table 2 Mixture proportions of concrete

No.	w/c	S/A (%)	Mixture proportion(kg/m ³)				
			Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super-plasticizer
C1	0.3	30	169	578	501	1165	8.68
C2		45			752	915	
C3		60			1002	666	
C4	0.4	30	197	500	501	1165	4.99
C5		45			752	915	
C6		60			1002	666	
C7	0.5	30	219	440	501	1165	2.20
C8		45			752	915	
C9		60			1002	666	
C10	0.6	30	235	392	501	1165	0.98
C11		45			752	915	
C12		60			1002	666	

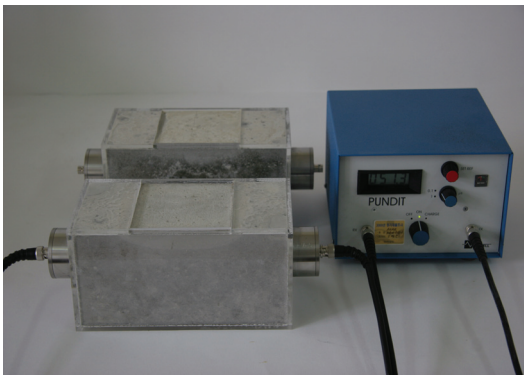


Photo 1 Testing of UPV

타입 믹서를 사용하여 혼합하였다.

시험체의 제작은 Photo 1과 같이 아크릴 재료를 이용하여 몰드 크기 100×100×200mm로 하고 콘크리트 경화 후 초음파 탐촉자 측정부위의 표면은 Ø55mm 오픈이 가능하여 접촉면을 밀실하게 제작하였으며 콘크리트 양생조건은 현장콘크리트와 유사하게 실험실에서 기중양생을 하였다.

2.3 실험방법

콘크리트 시험체를 실리콘계 그리스로 얇게 도포하고 발진자와 수신자의 축이 일직선상에 오도록 제작된

콘크리트 몰드 시험체와 탐촉자간의 일정한 압력을 주어 직접법으로 초음파속도를 측정하고, 또한 C2 시험체, C8 시험체는 Photo 1과 같이 검정용으로 추가 제작하여 초음파시간의 측정 오차를 비교할 수 있도록 탐촉자 5mm를 콘크리트 타설 전에 시험체에 매설시켜 측정하였다.

초음파속도 측정기기의 탐촉자는 54kHz의 주파수를 갖는 영국 C.N.S. 회사의 제품을 사용하여 초음파속도 v 는 변화 시간인 Δt 를 측정하여 식(1)과 같이 산정하였다.

$$v = \frac{D}{\Delta t} \quad (1)$$

여기서, D 는 콘크리트 몰드 시험체에 초음파가 투과되는 길이를 나타낸다.

콘크리트의 초음파속도가 재령경과에 따라 증가하다 일정 시간이 지나면 내부에 함유하고 있는 수분이 증발하여 공극이 발생하면서 초음파시간을 지연시켜 중량감소와 함께 반발경도의 증가와 더불어 상쇄되는 특성을 규명하기 위하여 콘크리트의 중량변화를 측정하였다. 중량측정은 1mg 정밀도와 최대 측정범위 5000g이 가능한 독일 싸토리우스(Sartorius)회사의 밸런스를 사용하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 초음파속도

본 실험에서 계획한 시험체의 콘크리트 타설이 24시간 경과 후 24시간마다 측정된 초음파 시간을 식(1)에 의해 산출한 결과 Table 3과 같다. 초음파속도 시험은 시험장치에 콘크리트 타설과 동시에 초음파 시간을 측정하였는데 타설 직후 10시간 정도 경과하면서 콘크리트의 물성이 안정화되고 초음파 시간의 변화를 보여 계측이 가능하였다. 전체 시험체의 재령별 초음파속도의 변화는 Fig. 2와 같다. 초음파속도는 콘크리트 타설 후 재령 7일까지 기준치에 비교하여 급격히 증가하고, 재령 28일 전후로 속도의 변화가 완만하게 나타나는 경향을 보이며 재령 3개월 이후에서는 초기 재령에 비하여 큰 변화가 나타나지 않았다. 또한 기존

의 연구결과⁽³⁾와 달리 초음파속도가 감소하는 경향이 나타나지 않았는데 그러한 이유는 기존연구 실험결과와는 항온이 되지 않아 양생조건 차이라고 간주된다. 본 실험결과 초음파속도가 재령 1년을 경과하면서 거의 변화가 없이 나타나 정점에 도달한 것으로 판단된다.

또한 S/A 차이에 따라서 초음파속도는 Fig. 3~Fig. 5와 같다. 그림과 같이 동일한 S/A에서 초음파속도는 W/C가 낮을수록 증가하여 초음파속도의 결정 인자는 S/A의 변수보다 W/C에 큰 영향을 받는 결과를 나타냈다.

3.2 중량변화

콘크리트 시험체의 재령 변화에 따른 중량감소는 Fig. 6과 같다. 중량감소는 W/C비가 50%인 D8 시험체가 W/C비가 30%인 D2 시험체보다 중량이 현격

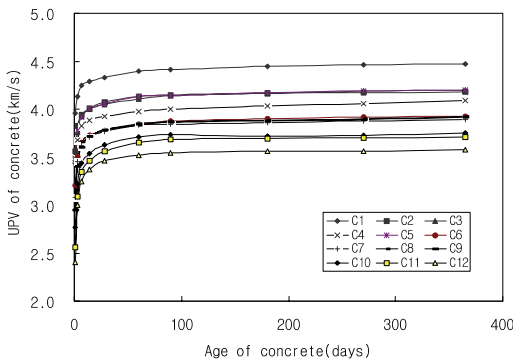


Fig. 2 UPV of concrete

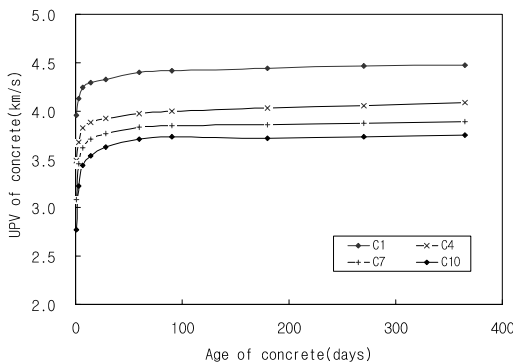


Fig. 3 UPV of concrete(S/A=30%)

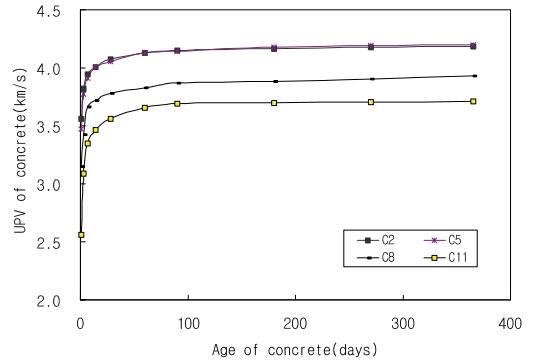


Fig. 4 UPV of concrete(S/A=45%)

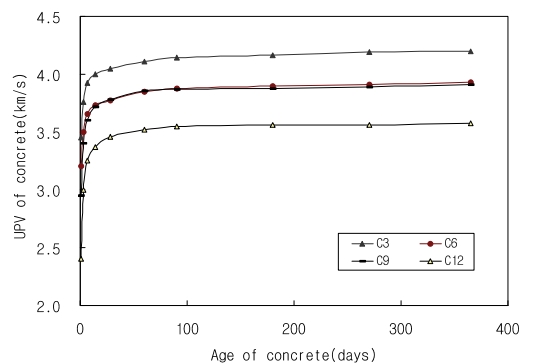


Fig. 5 UPV of concrete(S/A=60%)

Table 3 Measured UPV of concrete specimens

No.	UPV of concrete specimens, km/s									
	1day	3days	7days	14days	28days	60days	90days	180days	270days	365days
C1	3.960	4.132	4.246	4.292	4.329	4.396	4.415	4.444	4.464	4.474
C2	3.559	3.824	3.945	4.008	4.073	4.132	4.149	4.167	4.175	4.184
C3	3.454	3.759	3.922	4.000	4.049	4.107	4.141	4.167	4.193	4.202
C4	3.490	3.676	3.824	3.883	3.922	3.976	4.000	4.032	4.057	4.090
C5	3.472	3.774	3.914	4.008	4.057	4.132	4.141	4.175	4.193	4.202
C6	3.205	3.503	3.656	3.731	3.774	3.846	3.876	3.899	3.914	3.929
C7	3.082	3.454	3.617	3.711	3.766	3.831	3.846	3.861	3.876	3.891
C8	3.154	3.425	3.663	3.717	3.781	3.831	3.868	3.883	3.901	3.929
C9	2.954	3.407	3.604	3.717	3.781	3.853	3.868	3.876	3.891	3.914
C10	2.770	3.226	3.436	3.534	3.630	3.711	3.738	3.717	3.731	3.752
C11	2.561	3.091	3.350	3.466	3.565	3.656	3.690	3.697	3.704	3.710
C12	2.404	2.999	3.252	3.373	3.460	3.521	3.546	3.559	3.565	3.578

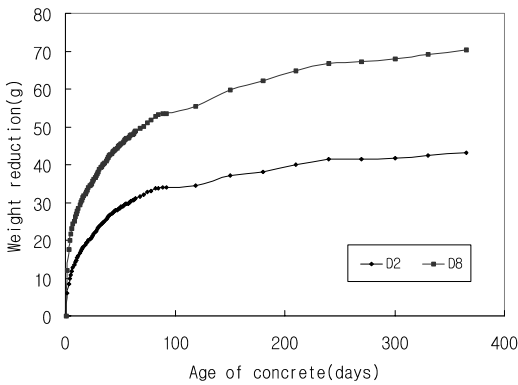


Fig. 6 Weight reduction contents

히 감소하고 단위수량이 높을수록 수분의 증발량도 비례하여 콘크리트의 내부 공극이 차지하는 비율이 높아 초음파속도를 지연시키는 특성을 보인다. 재령 1년까지의 실험결과로 콘크리트의 중량감소의 정점에 이르지 못하여 상쇄관계의 정량적 해석을 하기 위해서는 콘크리트의 재령경과가 더 필요한 것으로 나타났다.

3.3 재령계수

기존에 발표한 초음파속도와 반발도의 재령계수는 Table 4, Table 5와 같고 본 실험에서 전 시험체를 대상으로 산정한 콘크리트 초음파속도의 재령계수(β_n)

는 Table 6과 같다. 기존의 연구결과와 본 실험결과를 비교하면 Table 4의 결과에서 초기 재령시 재령계수의 차이는 큰 변화를 보이고 있으나 재령과 재령사이의 실험결과와는 없고, 콘크리트 배합 수준인 W/C와 S/A은 극히 제한적이어서 계수 산정의 경향을 판단하는 자료일 뿐 콘크리트 강도 추정식에 적용하기에는 적합하지 않다. 또한 본 연구의 초음파속도 실험결과와 기존⁽⁶⁾의 반발경도 실험결과를 예를 들어 비교하면, 재령 300일 때 초음파속도는 3.2%, 반발경도는 30% 증가를 보이고 있어 계수의 차이가 크게 나타내고 있다.

따라서 이러한 결과와 본 실험결과와 초음파속도가 정점에 도달된 것으로 보여 기존 연구결과를 고려한다면 장기 재령 경과시 반발경도는 증가하나 초음파속도는 감소하여 상쇄관계가 성립됨을 예측할 수 있다. 또한 재령계수를 검토하면 초기재령 3일까지는 10%, 6일까지 5%이상의 계수차가 나타난 반면 재령 3주 이

Table 4 Age Coefficient of UPV⁽³⁾

재령	3일	7일	28일	91일	182일	365
(k_2)	1.036	1.008	1.000	0.997	1.007	1.047

Table 5 Age Coefficient of Rebound⁽⁶⁾

재령	4일	7일	28일	90일	200일	300일
an	1.90	1.72	1.00	0.80	0.72	0.70

Table 6 Age Coefficient of UPV

Ages(days)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
β_n	1.232	1.138	1.097	1.075	1.055	1.050	1.041	1.036	1.031	1.028
Ages(days)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
β_n	1.025	1.022	1.019	1.017	1.015	1.012	1.011	1.010	1.009	1.009
Ages(days)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
β_n	1.009	1.008	1.007	1.007	1.006	1.004	1.003	1.000	0.999	0.997
Ages(days)	31	32	34	36	38	40	42	44	46	48
β_n	0.996	0.996	0.995	0.994	0.993	0.991	0.990	0.988	0.986	0.986
Ages(days)	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68
β_n	0.986	0.986	0.984	0.983	0.983	0.983	0.982	0.982	0.981	0.981
Ages(days)	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88
β_n	0.980	0.980	0.980	0.979	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977
Ages(days)	90	120	150	180	210	240	270	300	330	365
β_n	0.976	0.976	0.974	0.972	0.971	0.971	0.969	0.968	0.966	0.965

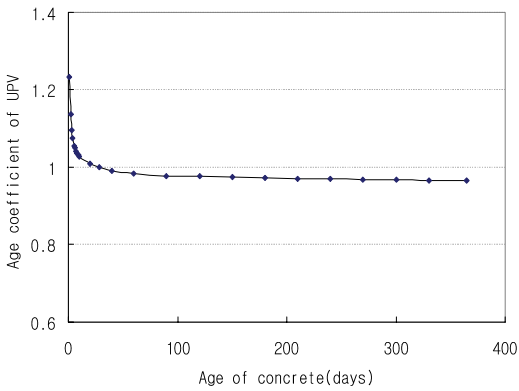


Fig. 7 Age coefficient development of UPV

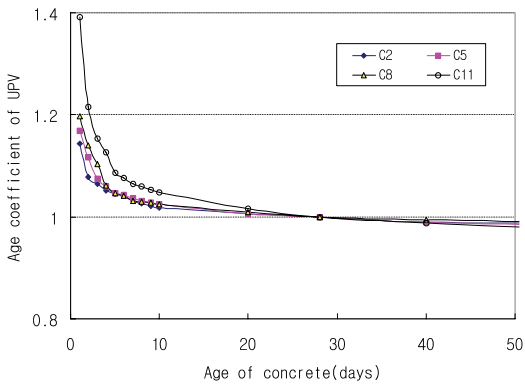


Fig. 8 Age coefficient of UPV(S/A=45%)

후부터 재령 6주까지는 1% 이내의 변화를 보이고 장기재령인 3개월에서 2.4%, 9개월 이후부터는 3%이상의 계수차이를 나타내어 단일법으로 초음파속도법을 이용하여 콘크리트 강도를 추정할 때에는 초기재령에 있어 재령계수의 적용이 반드시 필요하다는 것을 알 수 있다.

재령계수에 대한 변화는 Fig. 7과 같이 재령 초기 기울기가 급격히 변화한 반면 기준치인 재령 28일 전후로 큰 변화를 나타내지 않는 경향을 보였으며, 이후 계수차이의 변화가 거의 없어 정점에 도달한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 S/A이 45%이고 W/C가 다른 시험체별 재령계수의 비교이다. 시험체의 W/C가 높을수록 재령계수의 변동치는 크게 나타났다. 이는 콘크리트 내부의 수분 함유량이 많을수록 초음파속도가 늦어져 재령계수의 수치가 상대적으로 높게 나타나 W/C비가 높은 콘크리트의 강도를 추정할 경우 재령계수의 적용은 더욱 필연적이라 할 수 있다.

4. 결 론

비파괴시험에 의한 콘크리트 초음파속도를 측정하여 강도 추정식에 적용될 재령계수를 산정하기 위한 일련의 실험을 실시하였는데 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 초음파속도는 기준치에 비교하면 재령 초기 급격한 변화를 보여 단일법으로서 초음파속도법을 이용한 콘크리트 강도를 추정할 때에는 초기 재령에 있어 재령계수의 적용이 반드시 필요하다는 것을 알 수 있다.
- 2) 초음파속도의 재령계수를 노후된 콘크리트 구조물에 적용하기 위해서는 이후 장기적 실험을 통하여 초음파시간의 변화를 검토하고 계수를 산정하여 적용하는 것이 필요하다.
- 3) 콘크리트 초음파속도는 동일한 S/A에서 W/C가 낮을수록 증가하여 초음파속도의 결정인자는 잔골재율의 변수보다 W/C에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.
- 4) 콘크리트의 재령경과에 따라 중량감소와 더불어 초음파속도가 늦어지는 특성을 나타내는 상쇄관계의 정량적인 규명을 하기 위해서는 장기 재령의 실험 결과가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 김민수, 윤영호, 김진근, 권영웅, 이승석, "비파괴 시험법에 의한 콘크리트 압축강도 및 반발도의 재령계수 추정", 한국콘크리트학회 논문집, 14권 5호, 2002, pp. 782-788.
2. 조창호, "콘크리트 초음파속도의 재령계수 산정" 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 27권 1호, 2007,

pp. 619-622.

3. 조창호, "현장콘크리트 강도추정을 위한 복합비파괴시험법의 신뢰도에 관한 연구,"대한건축학회 논문집, 12권 1호, 1996, pp. 169-179.
4. 조창호, "콘크리트 강도추정에 따른 초음파속도와 반발경도의 상쇄효과에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 12권 11호, 1996, pp. 201-210.
5. 谷川恭雄・山田和夫, "複合非破壊試験法によるコンクリートの強度の推定,"セメント・コンクリート, No. 393, 1979. 11. pp. 10-17.
6. 日本建築學會, "コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル," 1983.
7. Yiching Lin, Chao-Peng Lai, and Tsong Yen, "Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity(UPV) in Concrete," ACI Materials Journal V. 100, No. 1, Jan.-Feb. 2003, pp. 21-28.
8. Sandor Popovics, Joseph L. Rose, John S. Popovics, "The Behavior of Ultrasonic Pulses in Concrete," Cement and Concrete Reseach. V.20, 1990, pp. 259-270.
9. Brithish Standard BS 4408, Part 5 : "The measurement of the velocity of ultrasonic pulse in concrete", 1974.
10. RILEM, Recommendation NDT 1 : "Testing concrete by the ultrasonic pulse method", 1972.

(접수일자 : 2008년 8월 12일)

(심사완료일자 : 2008년 9월 2일)