

염소이온 투과시험에 의한 콘크리트 제품의 강도 추정

The Strength Estimation of Precast Concrete Products by the Chloride Ion Penetration Test

장 문 기* · 이 정 재** · 윤 성 수*
Jang, Moon Ki · Lee, Jeong Jae · Youn, Seong Soo

Abstract

This paper present the strength estimation of precast concrete products by chloride ion penetration method. The relation between the strength of precast concrete product and the ion passing charge is linear and a numerical model of $F_{ck}=515.96-0.201Q$. is proposed. The results show good agreement at about 9.0% error ratio with the estimated model results for real precast concrete product.

I. 서 론

콘크리트 제품은 구조물이 설치될 최종위치로부터 떨어진 곳에서 만들어진 콘크리트 구조요소로서, 공장에서 콘크리트를 타설하여 양생하므로 현장 타설 콘크리트와 비교해서 품질에 미치는 영향이 작으며, 조립·시공되므로 공사기간을 단축할 수 있는 장점이 있다.

또한 시공 후 보수, 관리 등이 용이하여 최근에 와서는 건설·산업분야 뿐만 아니라 공사기간이 한정되어 있는 농업토목분야에서도 그 사용이 다양화·보편화되는 반면 시공 전·후에 현장에서 완전히 파괴하지 않고 품질을 평가할 수 있는 방법이 미흡하여 콘크리트 제품의 품질확보를 위한 실용적인 품질평가방법이 시급히 필요한 실정에 있다.^{1,8)}

비파괴시험법을 이용하여 일반 콘크리트 구조물

인 경우 강도추정은 외국에서는 1930년대부터, 국내에서는 1960년 후반부터 시작되어 현재까지 비파괴시험의 종류, 사용방법 등이 다양하게 연구되고 있다.²⁾ 그러나, 최근에 제안된 비파괴시험법에 의한 콘크리트 강도추정은 콘크리트가 목재나 강재와 달리 시멘트골로 결합된 복합재료(composite material)로 이루어진 점을 충분히 반영하지 못하여 추정식에 의한 계산 값과 실제 강도사이의 오차가 큰 경우가 많다. 콘크리트 제품인 경우 두께가 얇은 것이 많아 비파괴시험기구의 여러 제약으로 일반 콘크리트의 경우와 같이 기존의 비파괴시험법을 그대로 적용할 수 없었으며, 현장에서 콘크리트 제품의 품질을 평가할 수 있는 비파괴시험법이 알려진 바 없다.¹¹⁾

현재 국내의 콘크리트 제품의 품질 평가는 공장 제품과 동등한 다지기 및 양생조건에 따라 제조한 재령 14일에서의 표준공시체를 이용한 압축강도시

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 농업생명과학대학

키워드 : 염소이온 투과시험, 압축강도 추정, 콘크리트 제품, 증기양생

험과 실물 제품 중에서 샘플링하여 휨강도시험을 통하여 간접적으로 품질을 평가해 왔다. 그리고 현장에서의 품질관정은 치수와 표면상태 등 육안 식별에 주로 의존하고 있어 구조물의 신뢰와 품질 평가, 유지관리에 대한 문제점이 발생하고 있으므로 현장에서의 종합적인 품질평가를 위한 과학적이고 합리적인 비파괴시험법의 필요성이 제기되고 있다.¹⁾

콘크리트의 강도는 구조물내의 공극 크기와 밀접한 관계를 이루고 있다. 현재 콘크리트 공극의 크기를 간접적으로 검사하기 위한 시험으로 콘크리트의 투수성에 관한 연구가 진행되고 있다. 그러나, 조직이 치밀한 콘크리트의 경우 투수되는 수량이 극히 적어 시험에 장시간이 요구되는 문제점이 있다. 이에 반하여 전위차에 의한 염소이온 투과시험은 각 시편들간의 뚜렷한 투수특성을 나타내며, 또한 빠른 시간 안에 콘크리트 시편의 투수성에 대한 상대적인 지표를 얻을 수 있는 장점

이 있다.^{1,4,6)}

본 연구에서는 두께가 얇아 기존의 비파괴시험법으로 강도 추정이 불가능한 콘크리트 제품의 품질평가를 위한 신뢰있는 강도 추정식을 개발하고 현장제품에 적용·검토하여 현장에서 직접 이용될 수 있는 시험법의 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

II. 실험재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 화학적·물리적 성질은 Table 1, Table 2와 같다.

나. 골재

잔골재는 경기도 여주지역에서 채취한 모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 경기도 안성지역의 부

Table 1. Chemical composition of normal portland cement(%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Ins O1	Ig. less
20.40	6.30	62.40	3.20	2.80	3.00	0.5	1.4

Table 2. Physical properties of normal portland cement

Specific gravity	Setting time(h-min)		Fineness	Compressive strength (kgf/cm ²)		
	Initial	Final		σ_3	σ_3	σ_{28}
3.12	3.8	6.15	3,338	194	219	308

Table 3. Physical properties of fine aggregate

Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (kgf/m ³)	Passing percentage of No. 200 (%)	Fineness modulus
2.55	1.08	1,558	1.8	2.69

Table 4. Physical properties of coarse aggregate

Max. size of coarse aggregate(mm)	Specific gravity	Absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)	Fineness modulus	Abrasion (%)
19	2.71	0.6	1,551	6.57	28.5

Table 5. Mixing design of concrete

W/C (%)	Slump (cm)	S/a (%)	Unit weight(kgf/m ³)			
			Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate
53.8	3.5±1	44.5	167	310	792	988
45.0	3.5±1	41.3	171	380	734	1,044
35.4	3.5±1	41.9	177	500	671	931

순돌을 사용하였다. 그 물리적 성질은 Table 3, Table 4와 같다.

2. 공시체 제작

가. 콘크리트 배합

콘크리트 제품에 대한 배합설계는 제품의 종류, 제조방법 등에 따라 다소 차이가 있으므로 본 연구에서는 예비실험을 통하여 단위시멘트량(310, 380, 500kgf/m³) 각각에 대하여 목표 슬럼프와 최고 강도 및 시공성 확보를 위하여 최적의 단위수량 및 잔골재율을 결정하였으며, 그 배합표는 Table 5과 같다.

나. 공시체 수 산정 및 제작

공시체수는 염소이온 투과량과 압축강도의 실험 결과가 신뢰수준 95%(표준편차 4, 표준오차 0.8)의 유의성을 갖도록 단위시멘트량 각각에 대하여 99조, 3셋트로 총 594개 산정하였다. 공시체 제작은 KS F 2402에 의거하여 슬럼프 실험을 3회(3.0±1cm)와 공기량측정(5.0±1%)을 실시 후, KS F 2403에 따라 Ø10×20cm의 원주형 공시체를 제작하였으며, 다짐은 KS F 8005에 준하여 9±1초동안 진동테이블을 사용하였다.

다. 증기양생

본 연구에서는 조기강도와 장기강도를 고려하여 최고온도를 50~90℃ 사이를 10℃ 간격으로 변화시키면서 단위시멘트량별 최고온도 70℃, 소요시간 10h으로 결정하였다. 양생싸이클을 살펴보면

공시체 제작 후 전양생 2h 실시 후, 증기양생실로 옮겨 Fig. 1과 같은 프로그램에 따라 3시간 동안 70℃로 승온시킨 후 4h동안 70℃를 유지시켰으며, 계속해서 3h동안 하강시켰다.

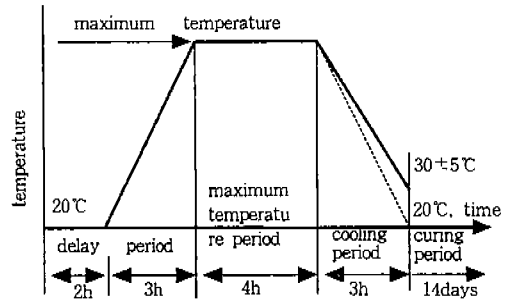


Fig. 1. Procedure of the optimum steam curing

3. 측정방법

가. 염소이온 투과실험

본 실험은 전위차를 이용한 염소이온의 이동을 알 수 있는 T. Zhang 와 Giov O. E.¹¹⁾에 제안된 전기적 방법을 응용하였으며, 장치는 Fig. 2, Fig. 3과 같다. 염소이온 투과시험은 ASTM C 1202⁶⁾에 따라 Fig. 4와 같이 장치를 구성하였다. 시편은 Ø10×20cm인 원주형공시체를 측정값의 신뢰도를 위하여 중간부분에서 5±0.2cm 높이를 갖도록 절단하였다. 준비된 시편을 Applied Voltage Cell(이하 A.V. Cell)에 정착한 후 A.V. Cell (+)전극 쪽에는 0.3N의 수산화나트륨(NaOH)을, (-)전극 쪽에는 3.0%의 염화나트륨(NaCl)의 전해질용액을

Table 6. Chloride ion penetrability based on charge passed⁶⁾

Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
>4,000	High
2,000~4,000	Moderate
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very low
<100	Negligible

주입하였다.

실험 중 30분마다 저항 0.2Ω에 걸리는 전압은 데이터로거(Data logger)장치를 이용하여 측정하였으며, 측정값은 식(1)에 의하여 전류값으로 환산하였다.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{0.2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, I는 전류(A), V는 전압(V), R은 저항(Ω)

염소이온 투과시험은 매 시편마다 6시간이 소요되고 30분 간격으로 전압값을 측정하였으며, 측정된 전압은 전류로 환산한 후 (2)를 이용하여 회로를 통과한 총 전하량을 계산하였다.

$$Q=900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \dots(2)$$

여기서, Q는 전하투과량(C), I₀은 환산된 전류값(A)

ASTM의 규정에는 Table 6와 같이 본 실험에서 산정된 전하량을 염소이온 투과성과 비교하는 자료를 제시하고 있다.

나. 압축강도시험

염소이온 투과시험 결과와 상관관계 도출을 위해 수행된 압축강도시험은 KS F 2405에 따라 14일 재령의 표준원주형공시체에 염소이온 투과시험과 동시에 수행하였다. 본 실험에 사용한 콘크리트강도

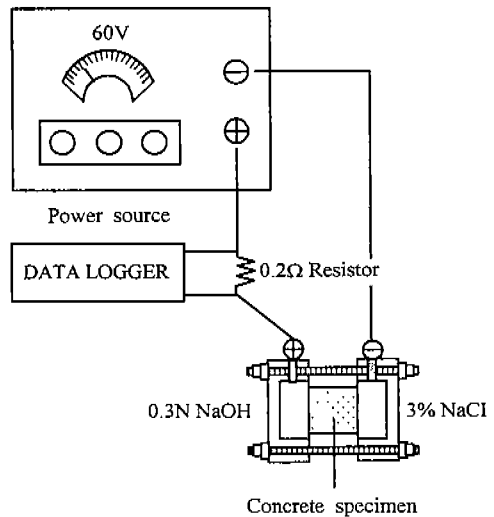


Fig. 2. Electric block diagram

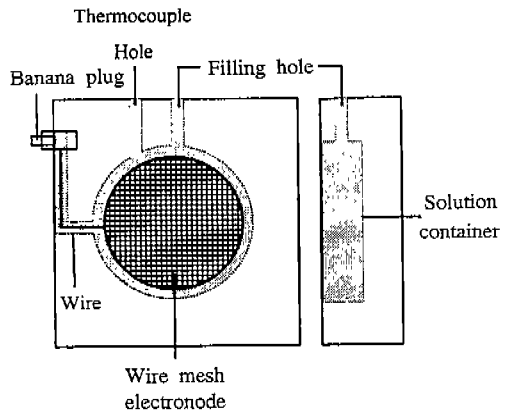


Fig. 3. Applied voltage cell

시험기는 200 tf 용량의 만능시험기(Universal Testing Machine)이며, 가압속도는 2(kgf/cm²)/s로

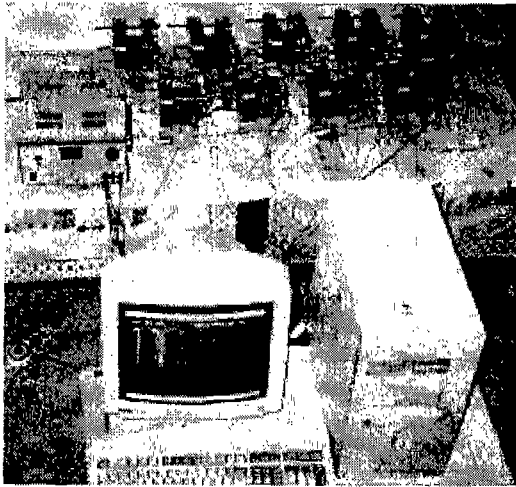


Fig. 4. Data logging sets of chloride ion penetration

재하하였다.

Ⅲ. 실험결과와 고찰 및 적용

1. 실험결과

본 연구에서는 콘크리트 제품인 농업수리구조물로 많이 이용되는 플름과 흙관을 생산할 때의 범위를 갖는 단위시멘트량을 310, 380, 500kgf/m³으로 각각 달리하여 단위시멘트량별 198개씩, 총 594개의 표준원주형공시체를 제작하여 동일 재령의 표준원주형공시체에 염소이온 투과시험과 압축강도시험을 병행하였으며, 그 결과는 Table 7과 같다.

Table 7에서와 같이 단위시멘트량 310kgf/m³에

대해 염소이온 투과량의 평균은 1,203 Coulombs, 표준편차 118 Coulombs이었으며, 압축강도의 평균은 277kgf/cm²로 설계기준강도보다 15%가 크게 나타났으며, 변동계수는 각각 9.8%, 6.8%로 나타났다. 단위시멘트량 380kgf/m³에서 염소이온 투과량의 평균은 895 Coulombs, 표준편차 9.1%이었으며, 압축강도의 평균은 318kgf/cm²로 설계기준강도보다 6% 크게 나타났으며, 변동계수는 8.4%로 나타났다. 그리고 단위시멘트량 500kgf/m³에 대해서 염소이온 투과량의 평균 723 Coulombs, 표준편차 78 Coulombs이었으며, 압축강도의 평균값은 389 kgf/cm²로 설계기준강도보다 8% 크게 나타났고 변동계수는 7.4%로 나타났다.

콘크리트의 강도는 설계기준강도에 따라 그 측정값의 평균 변동계수가 10, 15, 20%이하일 때 우수, 보통, 불량품질 관리로 각각 판정하고 있는데, 압축강도실험 결과의 값들은 문헌과 비교하였을 때 우수 또는 보통으로 나타났다.

2. 결과분석

각 단위시멘트량에 따라 나타난 염소이온 투과 실험과 압축강도실험 결과를 단위시멘트량별로 분류시켜 이들을 이항분포(binomial distribution), χ^2 분포(χ^2 distribution), 정규분포(normal distribution)등 여러 수학적 모델에 적용시켜 본 결과, 실험결과가 정규분포곡선을 나타냈고, 염소이온 투과시험결과도 단위시멘트량별 압축강도와 동일하게 나타났다.

각 단위시멘트량에 따라 나타난 염소이온 투과량

Table 7. Results from cylinder specimen

Unit cement (kgf/m ³)	Number of specimen	Design strength (kgf/cm ²)	Charge passed			Compressive strength		
			Average (Coulombs)	S.D ¹⁾ (Coulombs)	C.V ²⁾ (%)	Average (kgf/cm ²)	S.D (kgf/cm ²)	C.V (%)*
310	198	240	1203	118	9.8	277	19	6.8
380	198	300	895	81	9.1	318	27	8.4
500	198	360	723	78	10.7	389	29	7.4

1) Standard deviation

2) Coefficient of variance

을 Table 2의 ASTM기준이 제시하는 범위 값과 비교할 경우 단위시멘트량 310kgf/m³에 대해서는 투수성이 낮은 것으로, 단위시멘트량 380kgf/m³과 500kgf/m³에 대해서는 모두 매우 낮은 것으로 본 실험에 사용되었던 공시체의 투과성에 대한 저항은 우수한 것으로 나타났다.

라 콘크리트를 구성하는 조직은 시멘트풀로 인하여 다른 재료들과의 결합력이 커져 압축강도를 증가시키고 상대적으로 콘크리트내의 미세한 공극의 크기가 줄어 염소이온 투과량이 감소하는 것으로 볼 수 있으며, 압축강도와 염소이온 투과량은 서로 반비례관계를 확인할 수 있었다.

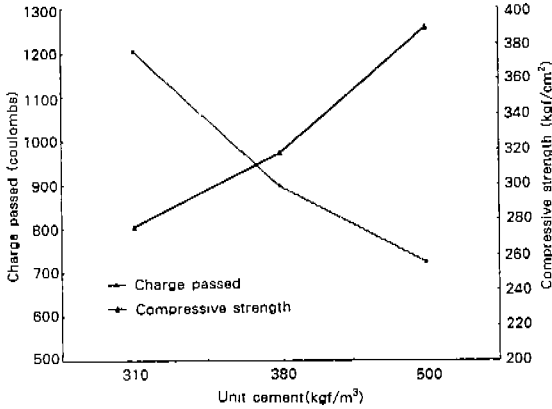


Fig. 5. Charge passed and compressive strength with each unit cement content

단위시멘트량(kgf/m³)의 변화에 따른 염소이온 투과량과 압축강도의 변화를 Fig. 5에 도시하였는데 단위시멘트량이 증가함에 따라 염소이온 투과량은 계속 감소하였다. 이것은 단위시멘트량이 증가함에 따라 A. N. Talbot의 공극설의 이론에 따

3. 회귀분석 및 추정식 제안

본 연구에서는 압축강도를 종속변수로 설정하고, 염소이온 투과량을 독립변수로 설정하여 변수들간의 함수관계를 규명하고자 SAS(statistical analysis system)와 EXCEL 통계프로그램을 이용하여 다양한 단순회귀분석(simple regression analysis) 모델을 통하여 콘크리트 제품의 품질 평가를 위한 강도 추정식을 제안하였다.

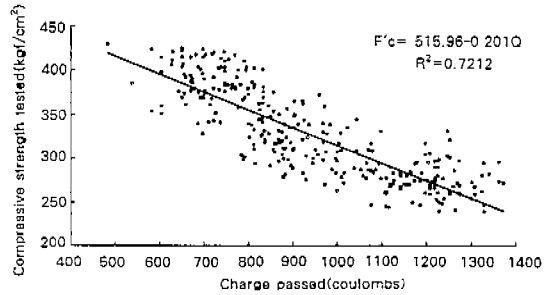


Fig. 6. Relationship between charge passed and compressive strength

Table 8. Results of regression analysis of concrete compressive and passed charge

Estimation equation	Derived coefficients			R ²
	a ₀	a ₁	a ₂	
¹⁾ $F'_c = a_0 + a_1 Q^{2)}$	515.96	-0.201	-	0.72
$F'_c = a_0 + a_1 \ln(Q)$	1610.7	-188.23	-	0.72
$F'_c = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2$	673.09	-0.5441	0.0002	0.73
$F'_c = a_0 Q^{a_1}$	16315	-0.575	-	0.73
$F'_c = a_0 e^{a_1 Q}$	577.03	-0.0006	-	0.72

1) F'_c : strength estimated (kgf/cm²)

2) Q : charge passed(Coulombs)

Fig. 6에서 나타난 것과 같이 콘크리트의 강도와 염소이온 투과량은 서로 반비례한다. 그리고 여러 회귀모형에 대해서 각각의 회귀계수와 결정계수를 구하였으며, 그 결과는 Table 8과 같다.

Table 8에서 제시된 여러 회귀모형 중에서 직선 회귀식은 로그식이나 다항식, 지수식보다 결정계수(R^2)는 1% 낮지만, A. N. Talbot⁽¹⁹⁾가 제창한 콘크리트의 강도와 공극과의 물리적 관계를 잘 설명하고 있으므로, 그리고 사용자의 편리성을 고려하여 선형회귀모형(linear regression model)이 콘크리트 제품의 품질평가를 위한 강도추정식으로 가장 타당하다고 판단된다. 본 연구에서 분석한 결과는 콘크리트 제품의 강도 추정에 식(3)으로 결정하였다.

$$F_c' = 515.96 - 0.201 Q \dots\dots\dots(3)$$

여기서, Q는 시료에 투과된 염소이온 투과량(Coulombs)이고 F_c' 는 염소이온 투과량에 의해 추정된 압축강도(kgf/cm²)이다.

4. 표준공시체에 의한 제안식 검증

제안식의 검증을 위하여 설계기준강도 250, 310kgf/cm²인 표준원주형공시체를 각각 45개씩 전체 90개를 적용하여 유도된 강도추정식에 의한 추정강도와 실제강도와의 오차를 비교하였다. Table 9 은 표준원주형공시체에 염소이온 투과시험을 실시

Table 9. Error comparison of strength

(Unit : kgf/cm²)

f_{ck} ¹⁾	Strength estimated	Strength tested	Error (%)
250	266	270	2
310	324	337	4

1) f_{ck} = design compressive strength

한 후 제안식을 이용하여 추정강도와 실제강도를 나타내고 있는데, 설계기준강도 250kgf/cm²에서는 2%, 310kgf/cm²에서는 4%의 오차가 나타났으며, 이는 무시할 만큼의 작은 오차로 판단된다.

5. 추정식의 적용

콘크리트 제품을 생산하는 공장(B, M사)에서 농업수리구조물로 많이 사용되고 있는 재령 14일의 벤치플롭(300C)에서 코어를 절취한 후, 염소이온투과시험을 실시하였다. 또한, 추정강도의 정도를 알아보기 위해서 제품생산과 동일한 방법으로 각 회사별 표준원주형공시체 7개씩을 준비하여 재령 14일이 되었을 때 압축강도를 실시하였으며, 그 결과는 Table 10과 같다.

압축강도를 분석한 결과 변동계수는 11.5~12.1%로 나타났으며, 반면 염소이온투과시험의 결과는 5.8~6.8%로 압축강도 결과보다 낮은 변동계수 값을 나타내어 염소이온투과시험결과가 압축강도시험결과보다 오차가 더 적음을 알 수 있었다.

Table 10에서 B사와 M사 각각 8.7%와 9.0%으

Table 10. Results for application of actual precast concrete products

	B company				M company			
	Charge passed (Coulombs)	Strength estimated (kgf/cm ²)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Error (%)	Charge passed (Coulombs)	Strength estimated (kgf/cm ²)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Error (%)
Average	1321.3	250.4	229.8	8.7	1374.5	239.7	220.2	9.0
Median	1341.0	246.4	231.0		1385.5	237.5	220.0	
Standard deviation	90.4	18.2	26.4		80.3	16.1	26.6	
C.V.(%) ¹⁾	6.8	7.3	11.5		5.8	6.7	12.1	

C.V : coefficient of variance (%)

로 추정강도가 오차는 나타냈지만 Fig. 7에서 보는 바와 같이 추정식 선상에 모든 추정값과 실제 강도가 큰 차이를 나타내지 않고 콘크리트 설계기준강도의 허용오차내에 있으므로 본 연구에서 제안된 추정식에 의한 추정강도는 잘 일치하는 것으로 판단된다.

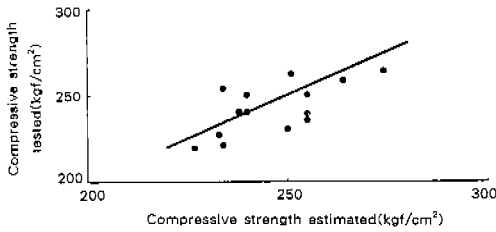


Fig. 7. Relationship between estimated strength and tested strength

IV. 결 론

최근 들어 콘크리트 제품의 사용이 증가되고 있으나 품질평가방법이 미흡하여 현장의 제품에 대한 신뢰도와 소요의 품질확보에 많은 어려움이 나타나고 있어 현장에서의 품질을 평가할 수 있는 비파괴시험 방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 콘크리트 제품의 품질평가를 위해 제품의 생산 규준범위에 따라 동일하게 제작한 표준원형 공시체에 염소이온 투과시험과 압축강도 시험을 동시에 수행한 후, 그 결과로부터 과학적이고 합리적인 강도 추정식을 구성하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단위시멘트량에 따라 좋은 콘크리트 제품 생산을 위한 최적의 배합표를 도출하였다.
2. 증기양생시스템의 빠른 회전을 고려한 증기양생의 최고온도를 결정하였다.
3. 표준원주형공시체를 이용하여 현장 콘크리트 제품에 적용가능한 합리적인 강도 추정식을 유도하였다.

본 연구에서 제시된 강도 추정식은 단면이 얇은 콘크리트 제품을 대상으로 현장에 있는 제품의 품질평가를 위한 추정식으로 유용하게 사용될 수 있

을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설부, 1996, 콘크리트표준시방서, 대한토목학회.
2. 구봉근 외, 1994, 비파괴시험에 의한 기존 콘크리트 구조물의 압축강도 추정, 콘크리트학회 논문집, 6(6), pp. 231~244.
3. 주택연구소, 1994, 비파괴시험법에 의한 P.C 접합부의 품질평가 기술설정에 관한 연구.
4. 차수원, 1996, 콘크리트의 투수성 측정 및 고저투수성 콘크리트의 개발 연구, 콘크리트학회 논문집, 8(5), pp. 189~200.
5. 한국콘크리트학회, 1995, 콘크리트구조물의 비파괴검사 및 안전진단, pp. 15~61.
6. ASTM C 1202, 1994, Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.
7. Mage, M., S. Helland, J. E. Carlsen, 1996, Service life prediction of high strength concrete in the shore approach, 4th International Symposium on Utilization on High-Strength/High-performance concrete, Paris.
8. Shore, A. T., 1911, Property of handness in metals and materials, Proceedings. ASTM, v.11, pp. 733~739.
9. Page, C. L., N. R. Short, A. E. Tarras, 1996, Diffusion of chloride ions in harden cement paste, cement paste, Cement and Concrete Research, v. 11, No. 3, pp. 395~406.
10. Whiting, D., 1981, Rapid determination of the chloride permeability of concrete, Final Report No. FHWA/RD-81/119, Federal Highway Administration, NTIS No. PB 82140724.
11. Zhang, T., O. E. Gjorv, 1994, An electrochemical method for accelerated testing of chloride diffusivity in concrete, Cement and Concrete Research, v.24, No.8 pp. 1534~1548.