

촉진양생조건에 따른 PC콘크리트의 내구성 조기 평가기법 연구

A Study on Early Evaluation Method of Durability of PC Concrete According to the Accelerated Curing Conditions

김 관호* 박 광수** 신 수균*** 이 준구* 장 문기****
Kim, Kwan Ho Park, Kwang Soo Shin, Su Gyun Lee, Joon Gu Jang, Moon Gi

ABSTRACT

We can consider that the study on early evaluation of compressive strength and durability of concrete is useful to raise safety of quality control of concrete. In this paper, was proposed to method early to predict strength and durability of concrete with parameter, such as Water/Cement(W/C) ratio and steam curing conditions. Through analyzing the relationship between the compressive strength and the amount of chloride penetration into concrete specimens, a new formula early estimating durability of the concrete structure was suggested.

1. 서론

콘크리트의 내구성 조기판정을 위한 실험과 연구는 이미 선진외국에서 1920년대부터 시작되어 많은 방법이 제안되었고 일부 국가에서는 실제 공사현장의 품질관리 수단으로 이용되고 있다. 그러나 우리나라에서는 이 분야에 대한 연구가 상당히 미흡한 실정이며, 경제적 성장에 따른 건설물량의 증가와 함께 우리공사의 여건들을 감안해 볼 때 보다 많은 연구가 필요하다. 이는 구조물의 안전성을 높이고 내구년수를 높여 경제적으로 유리할 뿐만 아니라 콘크리트의 품질관리면에서도 많은 잇점이 있다고 사료된다. 현장에 설치된 콘크리트제품의 품질을 평가하는 방법은 여러 가지 이유로 쉽지 않다. 국내·외 지방서에서 관련방법은 약간 언급이 되어 있으나, 거의 미비한 실정이다. 특히, 현장에 설치된 구조물의 동결융해에 대한 저항성을 알아볼 수 있는 방법은 아직까지 연구·보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 프리캐스트 수로구조물의 내구성 조기판정을 위한 연구의 일환으로 물-시멘트비와 증기양생조건, 혼화제 무침가와 첨가를 주요 변수로 하여 염소이온투과실험에 의한 염소이온투과량에 따른 압축강도와 내구성지수를 추정하여 콘크리트 품질에 대한 신속하고 간편한 방법을 판정할 수 있는 시험기법을 개발하는데 그 목적이 있다.

2. 연구배경 및 목적

프리캐스트 제품은 현장 반입시 강도나 외관 및 치수를 만족할 수 있으나 장시간이 소요된 이후에 그 품질을 확인할 수 없게 된다. 따라서 이미 제조된 프리캐스트 제품의 품질에 이상이 생겼을 경우에는 안전성이나 경제적으로 미치는 영향이 크다. 이러한 피해를 최소화시키거나 사전에 방지하기 위하여 내구성 조기판정법의 개발, 적용에 대하여 본 연구를 실시하였다. 또한 내구성 조기판정 시험방법은 조기에 시험결과를 획득함으로써 공정의 원활화를 이룩할 수 있어야 한다.

* 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원
** 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 수석연구원
*** 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원
**** 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 위촉연구원

내구성 조기판정 시험방법은 실용적이어야 하며 이를 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.
 ① 시험장치 및 시험기구가 간단 할 것 ② 시험방법이 간단하여 특별한 기술이 필요없이도 가능 할 것 ③ 측정시간이 짧아 극히 조기에 시험결과를 알 수 있을 것 ④ 시험방법이 명확 할 것 ⑤ 시험 결과가 소요의 정밀도를 만족 할 것 ⑥ 시험결과의 재현성이 있을 것 ⑦ 소요비용이 저렴할 것
 이와 같은 조건들을 갖춘 내구성 조기품질시험방법을 적용하기 위해서는 시험방법의 특징을 파악하여 적용성을 명확하게 실시해야 한다. 콘크리트의 압축강도에 대해서는 사전에 사용재료의 특성과 품질변동화 여부를 파악하고 측정값과 28일 압축강도와의 상관관계를 구하여 타당성 있는 관계식을 산출하여야 하며, 결과의 평가방법에 대해서도 사전에 설정해 두어야 한다. 본래 콘크리트란 내부 조직구조가 매우 복잡한 다공재료이며, 사용재료는 물론 시공방법 및 양생에 이르기까지 수많은 요인의 영향을 받으므로 조기에 그 품질을 판정하기란 어려운 일이 아닐 수 없다. 더구나 최근에는 사회적 기술적 발전과 함께 각종 콘크리트가 개발 적용되고 있어 내구성 조기추정은 더욱 어려운 실정이었다. 그럼에도 불구하고 내구성 조기판정에 대한 필요성 증대와 함께 높은 각종 측정방법이 개발되어 실용화되고 있다. 따라서 본 연구에서는 프리캐스트 수로구조물의 내구성을 조기에 판정할 수 있는 시험방법에 대한 연구를 수행하였다.

3. 실험방법

3.1 배합설계 자료조사 및 분석

본 연구에서는 국내 콘크리트 공장제품 약 20여개 생산업체 콘크리트 배합설계표를 수집·분석하여 슬럼프, 공기량, 강도등의 적정성을 확인하는 예비배합을 KS 규정에 따라 실시한 결과 공장제품의 물-시멘트비는 현실적으로 배합설계와 일치하지 않는 결과를 나타내었다. 따라서 콘크리트 배합설계를 현실화 시키기 위하여 잔골재율 및 단위시멘트량은 동일하게 설정하고, 물-시멘트비만을 변화시키면서 목표 슬럼프치와 공기량을 일치시키기 위해 반복실험을 수행하였다. 표 1은 가장 많이 사용되고 있는 공장제품의 콘크리트 배합설계표를 선정하여 예비실험 한 결과 본 연구에 사용된 수정된 콘크리트 배합설계표를 나타낸 것이다.

표 1 PC 콘크리트 배합설계표

구 분	굵은골재 최대치수 (mm)	물-시멘트비 (%)	배 합 설 계 표				
			잔골재율 (%)	물(kg)	시멘트량 (kg)	잔골재 (kg)	굵은골재 (kg)
A사	25	50.8	42.5	204.1	401	720.0	1007.9
B사	25	53.3	42.0	195.1	366	733.5	1048.0
C사	25	48.1	39.0	187.7	390	681.0	1102.0

3.2 혼합 및 타설

본 실험에는 $\Phi 150 \times 300$ mm 원주형 공시체를 제작하였다. 비빔에는 공칭용량 60리터의 가경식 믹서를 사용하였다. 재료의 투입은 굵은골재, 잔골재, 시멘트의 순으로 하였으며, 먼저 1분간 건비빔한 다음 혼합수를 투입하여 3분간 비벼 혼합 한 후 다짐은 진동기를 사용하였다. 타설된 공시체는 수분의 증발을 막기 위해 타설후 사전양생시간을 거친 후 양생조로 이동하여 형궤으로 공시체를 덮어 씌었다. 공시체 제작시 콘크리트의 타설온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 가 되도록 하였다.

3.3 강도 실험

강도 측정은 촉진양생을 끝마친 후 항온항습실에서 후양생을 실시하였으며, 재령 1일, 7일, 14일에 KS F 2403(콘크리트의 압축강도 시험방법), KS F 2408 (콘크리트의 휨강도 시험방법), KS F 2423 (콘크리트의 인장강도 시험방법)에 따라 강도시험을 실시하였다. 실험결과는 각 3개 공시체의 평균값으로 하였으며, 강도시험에 사용된 기기는 150톤 용량의 압축강도 시험기를 사용하였다.

3.4 염소이온 투과실험

본 실험은 전위차를 이용한 염소이온의 이동을 알 수 있는 T. Zhang 와 O. E. Gjov등에 의해 제안된 전기적 방법을 응용하였으며, 염소이온투과시험은 ASTM C 1202에 따라 장치를 구성하였다. 원주형 공시체를 재령 14일 강도에서 측정하였으며, 측정값의 신뢰도를 높이기 위하여 중간부분에서 5±0.2 cm 높이를 갖도록 절단하였다. 준비된 시편을 Applied Voltage Cell에 정착한 후 A.V. Cell (+)전극 쪽에는 0.3 N의 수산화나트륨(NaOH)을, (-)전극 쪽에는 3.0%의 염화나트륨(NaCl)의 전해질용액을 주입하여 실험하였다. 그림 1은 염소이온투과시험전경을 나타낸 것이다.

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

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

여기서,

I = 전류(A), V = 전압(V), R = 저항(Ω).

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

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

여기서,

Q = 통과 전하량 (coulombs), I₀ = 전압이 걸린 직후 전류 (amperes)

I_i = 전압이 걸린 지 i 분후 전류 (amperes)

ASTM의 규정에는 표 2와 같이 본 실험에서 산정된 투과전하량을 염소이온투과성과 비교하는 자료를 제시하고 있다.

표 2 투과된 전하량을 통한 염소이온 투과성 평가

투과 전하량 (coulombs)	염소이온 투과성
> 4,000	High
2,000~4,000	Moderate
1,000~2,000	Low
100~1,000	Very Low
< 100	Negligible

3.5 동결융해시험

동결융해 시험은 KS F 2456에 의한 공기중 급속동결 및 수중 급속융해 시험방법에 의하였으며, 공시체는 재령 14일에서 실험하였다. 각 공시체는 시험전에 초기동탄성계수를 측정하고 시험이 진행됨에 따라 10~30 cycle 마다 동탄성계수를 측정하며 최종 사이클수는 300회를 기준하였다. 다만, 시험도중에 상대동탄성계수가 60이하인 경우에는 60에서 시험을 종료하였다. 콘크리트의 동결융해에 대한 내구성지수는 다음 식으로 계산하였다.

$$DF = \frac{C \times N}{M} (\%) \text{ 여기서, DF : 내구성 지수, C : N사이클에서의 상대동탄성 계수, N : 동결융해 시험을 마친 사이클 수, M : 동결융해시험목표 사이클수}$$

3.6 실험방법

양생조건은 사전양생시간, 온도상승속도, 최고등온온도, 등온지속시간, 온도하강시간을 변수로 하였으며, 여기에 공기량을 각각 1.5%와 4.5%로 하여 실험을 실시하였으며, 총 조건수는 30가지 였다. 공기량 1.5%을 OPC(Ordinary Portland Concrete), AE제를 첨가하여 공기량이 4.5%인 경우는 AEC (AE Concrete)라 표시하였다. 표 3 은 촉진양생조건을 나타낸 것이고, 그림 2는 촉진양생조건 사이클을 보여 주고 있다.

4. 사용재료

4.1 시멘트

본 실험에서 사용된 시멘트는 시중에서 구입한 보통 포틀랜드 시멘트로서 그 물리적 특성은 표 4와 같다.

표 3 축진양생조건

양생조건	사전양생 시간(hr)	온도상승속도 (온도상승시간) °C/hr (hr)	최고등온 온도(°C)	등온지속 시간(hr)	온도하강 시간(hr)	1차 총양생 시간(hr)
A	1.0	13 (3.5)	65	2.0	1.5	8.0
B	2.5	15 (3.0)	65	4.0	2.5	12.0
C	3.5	20 (2.3)	65	7.0	3.2	16.0
D	4.5	25 (1.8)	65	9.0	4.7	20.0
E	5.5	30 (1.5)	65	11.0	6.0	24.0

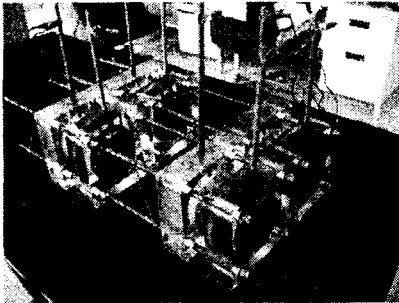


그림 1 염소이온투과량 실험 전경

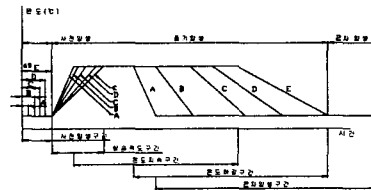


그림 2 증기양생조건

표 4 보통 포틀랜드 시멘트의 물리적 특성

종 류	평균 비중	응결시간		분말도 (cm ² /g)	평균 입경 (μm)	압축강도(kgf/cm ²)		
		초결(min)	종결(hr)			3일	7일	28일
보통 포틀랜드	3.15	228	6.15	3,338	8~10	194	219	308

4.2 골재

본 실험에 사용된 잔골재와 굵은골재는 각각 경기도 여주군 남한강산 하천사 및 경기도 안성군에서 생산된 부순돌로서 그 물리적 특성은 표 5 및 표 6과 같다.

표 5 잔골재의 물리적 특성

평균 비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (tonf/m ³)	200번체 통과량(%)	조립율
2.55	1.08	1.558	1.8	2.69

표 6 굵은골재 물리적 특성

평균 비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (tonf/m ³)	마모율 (%)	조립율
2.71	0.60	1.551	28.5	6.57

5. 결과 및 고찰

5.1 압축강도와 염소이온투과량 관계

그림 3은 OPC에서 염소이온투과량과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이고, 그림 4는 AEC에서 염소이온투과량과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 압축강도를 종속변수로 설정하고, 염소이온투과량을 독립변수로 설정하여 변수들간의 함수관계를 규명하고자 통계프로그램을 이용하여 다양한 회귀분석모형을 통하여 콘크리트제품의 조기품질평가를 위한 압축강도 추정식을 제안하였다. 사용된 회귀모형은 콘크리트의 압축강도와 공극과의 물리적 관계, 사용자의 편리성을 고려하였으며, 선형회귀모형이 콘크리트 제품의 품질평가를 위한 강도추정식으로 타당하다고 생각된다. 또한 일반적인 사용성을 고려하여 물-시멘트비와 양생조건에 관계없이 분석을 실시하였으며, AE제의 첨가유무에 따라 압축강도가 차이가 나타났으므로 이들을 각각 구분하여 분석하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 콘크리트의 강도와 염소이온투과량과의 관계는 서로 반비례적임을 쉽게 볼 수 있다. 이러한 이유는 염소이온투과량이 증가할수록 공극량을 많이 내포하고 있어 강도저하가 발생하는 것으로 판단된다, 또한 OPC에서 염소이온 투과량 범위는 500 ~ 2,800 coulombs 범위의 값을 나타냈고, AEC에서의 염소이온 투과량 범위는 1,000 ~ 3,500 coulombs 범위의 값을 나타남을 알 수 있었다. 산점 위에 회귀모형에 대해서 상관계수를 나타내었던 바 OPC에서 염소이온투과량과 압축강도에 대해서는 $r^2 = 0.85$, AEC에서는 $r^2 = 0.71$ 정도로 나타나 염소이온투과량을 알면 압축강도를 추정할수 있는 상관식이라고 판단된다.

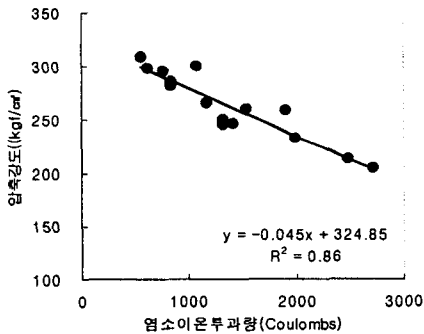


그림 3 OPC에서 염소이온투과량과 압축강도와의 관계

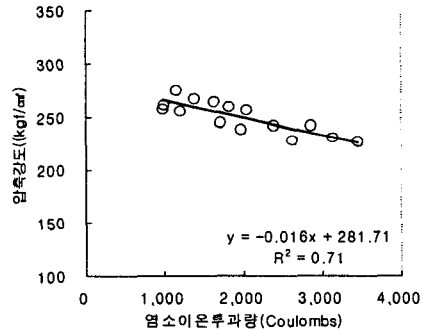


그림 4 AEC에서 염소이온투과량과 압축강도와의 관계

5.2 내구성지수와 염소이온투과량 관계

염소이온투과실험을 통한 내구성지수 추정식에는 콘크리트의 강도와 공극과의 물리적 관계가 상당히 밀접한 관계가 있어 이를 고려하여 분석하였다. 그림 5는 OPC에서 내구성지수와 염소이온투과량과의 관계를 나타낸 것이고, 그림 6은 AEC에서 내구성지수와 염소이온투과량과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 촉진양생조건에 따른 물-시멘트비별 상관관계를 분석하였다. OPC와 AEC에 상관없이 물-시멘트비가 증가할수록 염소이온투과량이 증가하였고, 내구성 지수는 낮게 나타나는 경향을 보이고 있었으며, 양생조건, 즉 사전양생시간이 길수록, 온도상승속도가 느릴수록, 온도 지속시간이 길수록 염소이온투과량 값은 낮게 나타나는 경향을 보이고 있었다. 또한 OPC보다 AEC인 경우가 내구성지수가 90 이상으로 나타나 콘크리트의 촉진양생시 적당한 공기연행을 시켜야 할 것으로 사료된다. OPC의 경우 상관계수가 각각 0.91 ~ 0.94, AEC인 경우는 상관계수가 0.80~0.97로 높게 나타났으며, 염소이온투과량과 내구성지수와의 관계를 통하여 적정 물-시멘트비와 촉진양생조건을 구명할수 있을 것으로 판단된다.

본 실험결과 국내 프리캐스트 수로구조물의 물-시멘트비의 범위가 48.1 % ~ 53.3 %인 점을 감안한다면 본 실험의 물-시멘트비를 사용하였을 경우에는 보간법을 적용한다면 큰 무리없이 염소이온투과량실험을 통하여 내구성지수를 조기에 판정할수 있을 것으로 판단되며, 내구성지수에 영향을 미치

는 요인들을 반영할수 있는 분석절차가 필요하며 또한 여러 가지 촉진양생조건과 염소이온투과량에 대한 보다 많은 자료 축적이 필요하다고 사료된다.

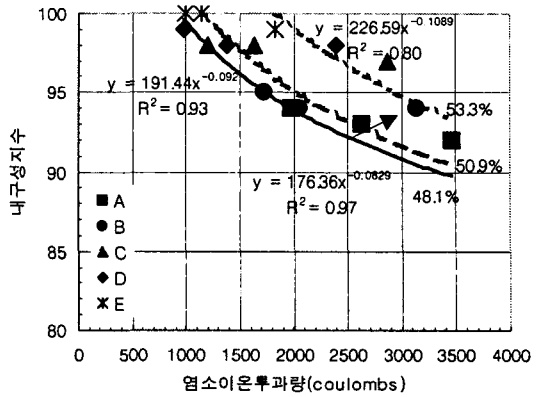
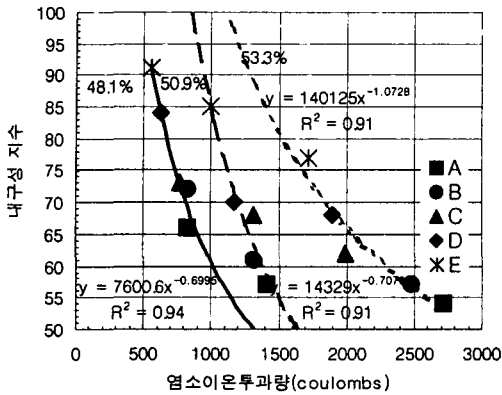


그림 8 OPC에서 내구성지수와 염소이온투과량과의 관계 그림 9 AEC에서 내구성지수와 염소이온투과량과의 관계

6. 결론

- 1) 염소이온 투과시험은 복합재료의 투수성을 평가하는 방법으로 기존의 알려져 있는 방법 중에서 제일 간단하며, 단시간에 결과를 얻을수 있는 시험방법이라고 판단된다.
- 2) 혼화제를 첨가하지 않은 경우와 첨가한 경우 모두 염소이온투과량이 증가함에 따라 압축강도는 낮게 나타났으며, 염소이온투과량에 따른 압축강도를 추정할 수 있는 식을 제안하였다.
- 3) 물-시멘트비와 촉진양생조건에 따른 염소이온투과 실험을 통하여 염소이온투과량에 따른 내구성 지수를 판정할 수 있는 추정식을 제안하였으며, 이에 따라 내구년한을 만족시킬 수 있는 촉진양생 씨 이클과 물-시멘트비를 제안 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 향후 내구성 지수에 영향을 미치는 다양한 촉진양생조건등을 변수로 하여 보다 많은 자료가 축적되면 단기간에 내구성 지수를 추정할 수 있는 평가기법을 개발 할 수 있을 것이라고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2001년 농림부 지원에 의한 "경지정리 공장제품 수로구조물 품질향상에 관한 연구"의 일환으로 수행되었으며, 농림부 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. ACI, "Effect of curing on durability," Concrete international Design & Construction, Vol., 12, No.1, pp. 47-54, 1990.
2. 박 광수 외1인, "왕겨재를 이용한 고내구성 프리캐스트 제품화 연구," 농어촌진흥공사 농어촌연구원, 1992.
3. 최 세규 외3인, "촉진양생이 콘크리트의 28일 압축강도에 미치는 영향에 관한 연구," 한국콘크리트 학회지, Vol.8, No. 4, pp. 141-148, 1996.
4. 이 준구 외4인, "양생방법에 따른 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 학술발표회, 제10권, 제1호, pp. 695-702, 1998.
5. ASTM C 1202, "Standard test method for electrical indication of concrete's ability resist chloride ion penetration," 1998.
6. ACI, "Effect of curing on durability," Concrete international Design & Construction, Vol.12, No.1, pp. 47-54, 1990.