

콘크리트 구조물의 수명예측을 위한 모델 분석 및 평가에 관한 연구 (I)

Evaluation of Service Life Prediction Models for Concrete Structure (I)

김도겸* 이종석* 이장화** 송영철*** 조명석****
Kim, Do Gyeum Lee, Jong Suk Lee, Jang Hwa Song, Young Chul, Cho, Myoung Sug

ABSTRACT

Deteriorations of concrete are governed by combined factors such as environmental stressors, processes and rates of deteriorations. Due to this reason, it's very difficult and important issue to predict quantitatively the service life of concrete structure. From this point of views, the purpose of this study is to propose the approaches on the further development for predicting the remaining service life of concrete by analyzing the deteriorations mechanism and evaluating the existing models.

1. 서론

콘크리트 구조물의 건진성에 영향을 미치는 각종 열화현상은 많은 요인들에 의해 복합적으로 나타나며, 적용되는 설계법규와 표준규격의 차이, 과거의 측정치와 기록의 부족, 전체 구조물 또는 각 구성요소들의 파괴에 대한 열화의 영향을 정량화하는데 사용되는 시간의존성 수명예측모델의 적용한계, 유지관리방법 및 프로그램의 부적절성 등에 의해 사용수명예측에 대한 불확실성을 야기시키고 있다. 따라서, 본 고에서는 콘크리트 구조물의 정량적 잔존수명 예측을 위한 시도로서 주요 열화요인의 분석, 열화요인에 대한 기존 모델식의 검토 및 평가, 해안구조물을 대상으로 조사된 염분확산계수 및 중성화에 대한 정량적 평가를 실시하였다.

2. 철근콘크리트 구조물의 열화손상

2.1 물리·화학적 열화 메카니즘별 영향분석

그림 1은 지난 10여년간 발간된 400여종의 외국자료를 통해 철근콘크리트 구조물의 물리·화학적 열화 메카니즘별 영향을 분석한 것이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 물리·화학적으로 철근 콘크리트 구조물의 수명에 영향을 미치는 요인은 온도변화, 계절변화, 동결융해, 강우·습도, 대기조건, 토양의 화학물질 농도 등 환경적인 것으로서, 이로 인한 열화현상은 중성화(Carbonation), 염화물침해(Chloride attack),

* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

*** 정회원, 전력연구원 책임연구원

**** 정회원, 전력연구원 선임연구원

철근부식(Corrosion), 동결융해, 황산염 침해(Sulphate attack), 알칼리-골재반응(Alkali- aggregate reaction) 등의 순으로 나타나고 있다. 이와 같이 대부분의 콘크리트 구조물에서 발생하는 열화현상은 여러 가지 요인중 두세가지 열화요인이 복합적으로 작용하여 나타나며 시공후 사용기간이 경과함에 따라 심해진다.

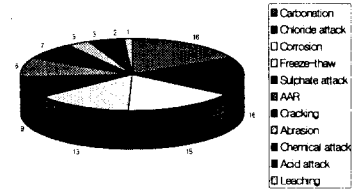


그림 1 열화메카니즘별 영향분석 (외국)

2.2 점검결과에 따른 영향분석

본 연구의 대상이 된 해안 콘크리트 구조물의 정밀점검 자료 103건에 대한 분석 결과 주요 열화요인은 수화열, 건조수축, 시공이음, 동결융해, 중성화, 다짐불량, 블리딩, 진동의 8가지 열화원인으로 나타났다. 특히, 수화열, 건조수축, 시공이음 등 시공중 발생한 요인이 각각 22%, 47%, 13%를 차지하고 있었으며, 이외에도 동결융해, 중성화 등의 열화요인이 각각 8%, 5%로 나타나 상대적으로 높은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다.

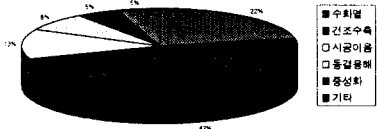
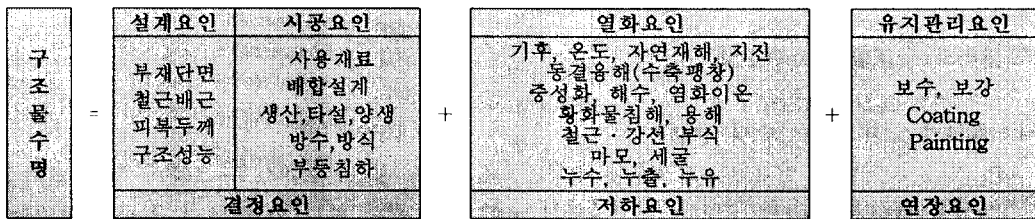


그림 2 열화메카니즘별 영향분석(국내)

2.3 철근콘크리트 구조물의 수명지배요인

철근 콘크리트 구조물의 사용수명을 구성하는 요인에 대해 현재까지 특별히 정의된 적은 없다. 따라서, 본 연구에서는 철근 콘크리트 구조물의 수명 구성요인을 설계, 시공, 사용 및 유지관리 측면에서 표 1과 같이 구성하였다. 표 1의 개념을 간략히 기술하면 구조물은 수명결정요인 즉, 설계시공에 의해 균열, 투수·투기성 및 강도가 결정되어 구조물 품질에 따라 일정한 수명(품질상 수명)이 주어지게 되나, 구조물의 품질에 따라 수명이 주어지더라도 아무런 장애 없이 그 수명을 다하게 되는 것은 아니다. 구조물은 수명저하요인 즉, 처해있는 주변환경, 지역적인 자연환경 및 사용(가동)환경에 따라 서서히 열화되어 그 수명이 초기에 주어진 품질상의 수명보다도 짧아지게 된다. 이러한 열화요인에 따른 수명저하를 최소화시키고 초기에 주어진 수명상태를 회복하기 위하여 보수 및 보강을 하게 되며, 이러한 효율적인 유지관리는 구조물의 수명연장을 가능하게 한다.

표 1 철근콘크리트 구조물의 수명구성



3. 열화손상 모델 분석 및 평가

3.1. 중성화모델

3.1.1 기존 모델식의 검토

Tuutti는 중성화를 확산에 의한 진행과정으로서 $x(t) = K\sqrt{t}$ 로 표현하였다. 한편, Vesikari는 콘크리

트 구조물에서의 균열 발생은 콘크리트의 압축강도에는 거의 영향을 미치지 않지만, 대기중의 이산화탄소를 훨씬 더 쉽게 침투시킨다고 보았다. 또한, Baker는 중성화 깊이에 대한 전형적인 확산모델로서 $x = [2D_c(c_1 - c_2)t]^{1/2}$ 를 제안하였다.

3.1.2 중성화 모델의 평가

기존 연구자들의 중성화 예측 모델은 확산 및 주변 환경의 CO₂농도, 온·습도, 콘크리트의 균열 등에 영향을 받고 있는 것으로 공통적으로 인식하고 있지만, 중성화에 영향을 미치는 각 인자들 중에서 모델에 따라서 그 중요도는 달라지는 경향을 나타내고 있다. 따라서 우리나라의 환경에 적합한 모델을 구성하기 위해서는 이들 인자중 가장 적합한 인자를 도출한 후, 현장 분석 자료나 필요한 경우 직접 실험값을 찾아 새로운 모델을 제안하여야 한다.

3.1.3 예측모델의 구성

중성화는 시간 의존적 공식인 $x(t) = K\sqrt{t}$ 에 의존하므로 실제 구조물에서 채취한 시료로부터 중성화 깊이, 깊이별 pH의 변화등을 분석한 후, 상수 K를 도출할 수 있다. 또한, 채취된 시료 및 제작 공시체 등에 대한 촉진시험을 통하여 CO₂ 확산계수 및 기타 품질계수 등을 정의할 수 있으며, 사용환경계수를 정의할 수 있다. 이들 계수를 기존의 모델식에 적용하여 도출된 결과를 촉진시험에 의한 경시변화와 비교하므로써 우리나라 환경에 적합한 계수의 도출 및 새로운 예측모델의 구성이 가능하게 된다.

3.2 염해 모델

3.2.1 기존 모델식의 검토

Browne의 연구는 염화물에 노출된 사용중인 RC구조물의 잔존수명예측을 위한 절차와 확산에 기초한 모델확립을 위한 것으로서 개발된 모델은 초기기간을 고려한 것이며, 염화물이온의 확산이 rate controlling process라고 가정하였다. Stratfull은 소금물에 노출시킨 철근 콘크리트의 부식으로부터 경험모델을 개발하였으며, 캘리포니아주에서 실시한 교량의 부식연구로부터 현장시험의 결과를 기초로 제시하였다.

3.2.2 염해 모델의 평가

Browne의 모델은 현장적용에 유리한 모델이며, Stratfull과 Clear가 제시한 모델은 경험적인 모델로서 현장시험이나 실험을 통하여 얻은 데이터로부터 제안된 모델식으로, 염화물에 의한 부식에 저항하는 주요인자로서 W/C를 들고 있다. 그러나, 염해모델은 구조물의 특성 및 사용환경적 요인에 의해 크게 지배를 받지만, 현재까지 제안된 모델식에는 이들에 대한 명확한 정의가 없이 이루어지고 있다.

3.2.3 예측모델의 구성

예측모델의 구성을 위해서는 염분확산계수의 산출에 의해 철근의 부식임계치 이상의 염화물이 용집하는 시점을 분석하므로써 사용수명을 평가하여야 한다. 이때 사용하는 모델식은 Browne의 모델이며, Stratfull과 Clear가 제안한 부식모델로의 적용성을 검토함과 아울러 Tuutti의 개념적 모델과 Clifton 등의 수학적 모델에 실증적 DATA를 적용하므로써 사용성을 증대시켜야 한다.

3.3 황화물 침해

3.3.1 기존 모델식의 검토

Atkinson과 Hearne의 모델은 황산염을 함유한 지하수에 노출된 콘크리트의 사용수명을 예측하기 위한 경험적 모델로서 실험실에서 콘크리트 시편을 0.19mol의 황산용액(알칼리와 황산마그네슘을 혼합)에 침적후 5년간의 관찰 실험을 통하여 visible deterioration zone(Xs)를 결정한 것이다. Shuman의 연구는 콘크리트에서의 황산염 확산계수를 $3 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ 로 가정하여 시멘트 성분에서의 $\text{C}_3\text{A}, \text{Mg}, \text{SO}_4$ 의 구성비로부터 황산염에 의한 침해깊이를 계산한 것이다.

3.3.2 황화물 침해 모델의 평가

Atkinson과 Hearne의 경험적 모델식에서는 시멘트의 C_3A 함량, 실험에 사용된 황산과 마그네슘의 mol량 및 실험기간의 3가지 요인과 자체 실험결과에 의한 계수에 의해 황산염 침해에 의한 깊이를 산정하고 있다. 또한 Shuman의 모델에서는 시멘트의 C_3A 함량, 실험에 사용된 황산과 마그네슘의 mol량 및 실험기간, 실험계수 외에 콘크리트에서의 황산염 확산계수를 제시하고 있다. 경험적 모델에서는 황산염의 침식깊이가 시간에 대하여 선형이며, 지하수의 황산염 농도로서 콘크리트의 사용수명을 예측하였다.

3.3.3 예측모델의 구성

모델의 구성을 위해서는 촉진시험을 통하여 실험기간별로 표면부와 황산염의 침입깊이에 따른 황산염 농도를 분석하여 황산염의 확산계수를 산정할 수 있으며, 실험에 사용된 용액의 mol량과 사용된 시멘트의 C_3A 함량을 분석하여 제시된 경험모델에 적용하여 해안콘크리트의 배합에 적합한 실험계수를 구할 수 있다. 한편, 우리나라의 해안구조물은 바닷물과 인접해 있으나, 침적되어 있지는 않으므로 황화물 침해의 형태는 표면부 밖리로 나타난다고 판단되며, 황화물 침해와 가장 밀접한 관계를 가지고 있는 시멘트의 C_3A 함유량, 황산염 농도, 황산염 확산계수 등을 현장자료로서 확보하여 적용한다면 가장 우리 실정에 맞는 모델을 제시할 수 있을 것이다.

3.4 동결융해모델

3.4.1 기존모델식의 검토

동결융해에 대한 기존 모델식으로는 Shuman의 모델식이 있다. Shuman은 동해저항성이 AE량, 물 시멘트비, 동결융해 사이클 수에 따르는 콘크리트의 동탄성계수 지하로 표현이 가능하다고 하였으며, 경험적 결과에 근거하여 동탄성계수의 변화는 동결융해사이클수가 50을 넘을 경우 직선적인 경향을 지닌다고 발표하였다.

3.4.2 동결융해 모델의 평가

Shuman의 모델은 동결융해사이클수가 해마다 같을 경우 열화의 비율은 직선적이라고 예측한 것으로 모델의 기본가정은 콘크리트가 지속적으로 물과 접해있다는 것이다. 그러나, 대부분의 콘크리트는 지속적으로 포화된 모델이 아니므로 일반적으로 적용할 수 있도록 재구성 하여야 한다.

3.4.3 예측모델의 구성

동결융해에 의한 손상과 같이 명확한 주기를 포함하고 있는 열화과정의 결과는 콘크리트가 받았던 열화사이클의 수를 평가하므로서 예측가능하다. 동결융해에 의한 손상은 사용기간중의 온도 기록이 있다면 콘크리트가 동결온도에 노출되었던 회수를 평가하므로서, 열화의 양을 상호 연관 지을 수 있으며, 미래의 온도패턴을 대략적으로 가정하므로서 수명종결시까지의 소요기간을 추정할 수 있다.

4. 해안구조물의 염분 확산계수 및 중성화 확산계수 분석

4.1 시험방법

해안구조물은 환경특성상 해안의 파도에서 발생하는 직경 4mm이하의 해수입자에 의해 유입되는 비래염분에 노출되어있다. 조사 대상 해안구조물의 기본적인 배합은 표 3과 같으며, 구조물별 사용재령은 표 4와 같다. 시험방법은 20개의 구조물로부터 코어를 채취하여 중성화 깊이 측정용 코어공시체는 할렬인장후 페놀프탈레인 1%용액을 분무하여 선흥색으로 발색하는 부위까지의 깊이를 측정하였으며, 깊이별 pH 및 염화물함유량 측정용 코어공시체는 1.5cm 간격으로 절취 분쇄하여 #100번체로 채가름한후 사용하였다. 깊이별 염화물 함유량은 분말 시료 3g을 채취하여 20ml의 분석용시약에 넣어 3분간 교반한후, 미국 J.S사의 CL-1000 chloride test system을 사용하여 측정하였다. 또한, 깊이별 pH측정은 분말 시료 5g을 선취하여 5cc의 증류수에 3분간 교반한 후, portable pH meter를 사용하여 측정하였다.

표 3. 조사 대상 해안구조물의 배합설계표

강도 (kg/cm ²)	W/C	s/a	W(lb)	C(lb)	S(lb)	G(lb)	WRA (ml)	AEA (ml)
280	48	46	300	625	1303	1505	852	16
210	62	45	278	448	1359	1657	813	31

4.2 시험결과 및 고찰

4.2.1 염분확산계수 및 염화물 함유량

20개의 해안구조물에 대한 염화물 함유량 시험결과는 표 5와 같다. 표 5에서 보는바와 같이 비래염분에 의한 표면부의 염화물 함유량은 0.036~0.009%로 나타났으며, 구조물별 염분확산계수는 1.15×10^{-9} ~ 1.65×10^{-7} 의 범위에 있는 것으로 분석되었다. 또한, 표면으로부터 5cm 이상의 깊이에서는 대부분 염화물 함유량이 0.005% 이하로 나타났다.

표 5 구조물별 염분확산계수

구조물	염분확산계수	구조물	염분확산계수
A1	4.13×10^{-8}	C1	8.47×10^{-9}
A2	4.48×10^{-9}	C2	2.39×10^{-9}
A3	6.35×10^{-9}	C3	2.12×10^{-9}
A4	1.65×10^{-7}	C4	2.12×10^{-9}
A5	1.38×10^{-9}	C5	2.88×10^{-9}
B1	1.17×10^{-7}	D1	2.71×10^{-8}
B2	2.94×10^{-8}	D2	2.86×10^{-9}
B3	1.21×10^{-8}	D3	2.54×10^{-9}
B4	2.75×10^{-9}	D4	4.98×10^{-9}
B5	4.70×10^{-9}	D5	1.15×10^{-9}

표 4 구조물별 사용재령

위치	구조물명	재령
서해	A1~A5	12년 9월
서해	B1~B5	12년
남해	C1~C5	13년 9월
남해	D1~D5	13년

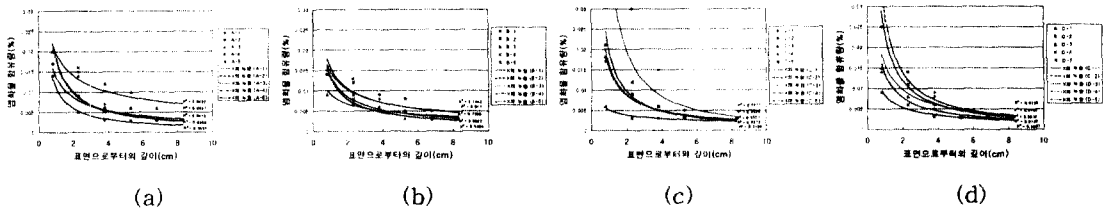


그림 3 깊이별 염화물 함유량

4.2.2 깊이별 pH 변화 및 중성화 깊이

20개의 해안구조물에 대한 깊이별 pH 변화 및 중성화 깊이 시험결과는 그림 4 및 그림 5와 같다. 구조물별 pH는 콘크리트 표면부의 경우 8.67~11.29의 범위로 나타났으며, 내부로 들어갈수록 pH가

높아져서 최대 12.74까지 나타나는 것으로 분석되었다. 또한, 중성화 깊이는 1~40mm의 범위로 구조물별로 편차가 있는 것으로 나타났으며, A4와 D3의 경우가 타 구조물에 비하여 중성화 깊이가 깊게 나타났다. 한편, A4의 표면부 pH는 8.67이며 D3의 표면부 pH는 8.43으로 나타났고, 표면으로부터 5cm 이상의 깊이에서는 대부분의 구조물에서 pH가 12.5이상으로 분석되었다.

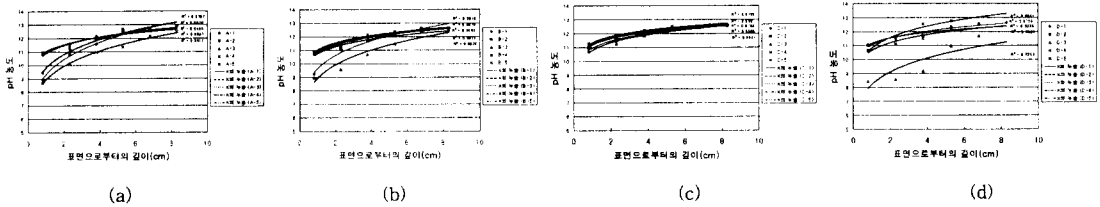


그림 4 깊이별 pH 변화

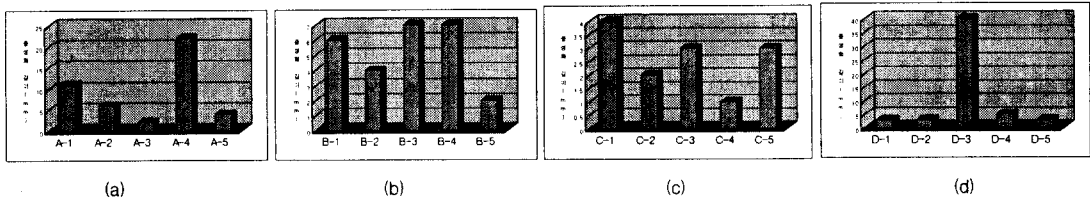


그림 5 구조물별 중성화 깊이

5. 결론

본 연구는 콘크리트 구조물의 열화요인 분석 및 기존 수명저하모델을 비교·검토하여 평가하므로써 콘크리트 수명관리 및 예측의 기본개념을 정립하고, 기존 해안구조물에 대한 정밀점검결과를 통한 정량적인 평가로부터 우리 실정에 맞는 수명예측모델 구성 방향의 기초자료를 획득코자 실시한 연구(I)단계로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 400여종의 외국자료 및 실제 구조물의 정밀점검자료를 분석한 결과 RC구조물의 주요열화요인은 수화열, 건조수축, 시공이음등의 시공상요인과 중성화, 염해, 철근부식등의 사용환경적 요인으로 분석되었다.

(2) 열화손상모델에 대한 기존의 모델식을 검토한 결과, 실제 구조물에 대한 수명예측모델을 구성하기 위하여는 촉진시험 및 현장 정밀점검을 통한 자료확보를 통하여 열화 확산 계수를 산출하는 것이 필수적이다

(3) 기존 해안구조물에 대한 조사 결과 표면으로부터 5cm 이상의 깊이에서는 비래 염분 및 중성화에 의한 철근 부식 염려가 없는 것으로 판단된다. 따라서, 해안구조물의 열화피해를 최소화 하기 위해서는 적정 피복두께를 확보하는 것이 필수적이라고 하겠다.

참고문헌

1. 전력연구원, "콘크리트 구조물 열화에 관한 연구" 최종보고서, 1996
2. James R. Clifton, "Predicting the Remaining Service Life of Concrete", 1991