

중성화 및 철근 부식을 고려한 콘크리트 구조물에 관한 수명예측기법의 활용기술개발

Development of Use and Application to Prediction of Lifetime
considering of Carbonation & Steel Corrosion

김철호* 권영진** 이병훈*** 최롱**** 김무한*****
Kim, Chul Ho Kwon, Yeung Jin Lee, Byung Hun Choi, Long Kim, Moo Han

Abstract

The purpose of this study is to set up a proper repair plan and to extend the remaining lifetime of them by measuring the remaining lifetime of reinforced concrete structures quantitatively.

This method is based on the actual research on age deterioration, carbonation depth and covering depth of the reinforced concrete structures. Also, it measures the remaining lifetime through quantitatively defining the probability of steel corrosion by the damage of steel corrosion. By doing that, we proceed the proper repair plan after reviewing the possibility of lifetime extension.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 내구성을 저해하는 요인으로 가장 중요한 항목이라할 수 있는 것이 콘크리트의 중성화에 의한 철근의 부식이다. 최근 부실시공, 불량자재의 사용, 설계 잘못 등으로 60년 이상의 내구수명을 가진 철근콘크리트 구조물이 불과 10~20년 만에 콘크리트의 열화로 인하여 재건축을 한다든가 사용중에 많은 하자보수관리비가 들어가고 있는 것이 현실이다.

-
- * 쌍용안전기술사업단·보수사업팀
 - ** 김희원·쌍용안전기술사업단·과장·공학박사
 - *** 쌍용안전기술사업단·보수사업팀·팀장·기술사
 - **** 쌍용안전기술사업단·진단·보수사업팀·이사·공학박사
 - ***** 김희원·충남대학건축과교수·공학박사

그러나, 현재 국내의 진단·보수업계에서는 구조물의 진단 보수시 구조물의 열화에 대한 예측을 전혀 하지 않고 바로 기계적인 측정으로 결과를 도출 바로 보수·보강공사로 이어지는 플로어를 형성하고 있으며, 진단시 수명예측은 물론 보수공사후의 수명연장에 대해서도 정량적으로 언급하는 일은 거의 없으며, 수명예측에 대한 어떤 이론도 국내에는 연구된 바가 없었다.

당사에서는 이와같은 문제점을 인식하고 구조물의 진단에서 보수까지의 전과정을 하나의 시스템으로 구축하여 보다 효율적이고 정확한 구조물의 평가와 대책 마련을 계획하고 있다. 그러한 계획의 일환으로 이번에 일본의 I.IJUMI(和泉) 등에 의해서 제안된 잔존수명예측 기법과 아울러 무기계 보수공법인 R공법으로 보수한 후의 수명연장에 대하여 소개하여 내구성 진단 및 보수·보강공법 계획에 도움이 되고자 한다.

2. 기본개념 (1)

본 방법의 기본적인 개념은 실제의 경년열화 구조물에 있어서 콘크리트의 중성화 깊이, 철근의 부식상황 및 피복두께의 실제조사결과를 근거로 한 것으로서 신뢰성공학의 개념에 입각하여 철근콘크리트 구조물에 있어서 철근 부식에 의한 피해를 철근이 부식할 확률로써 정량적으로 정의하고 있다. 이것을 이용 잔여 수명을 측정 보수·보강 여부를 판단하여 필요시 적절한 보수·보강을 시행하는 것이다. 이방법은 구체적으로 다음 사항을 기본으로 한다. 첫째, 콘크리트의 중성화 깊이는 시간의 경과에 따라 증대한다. 둘째, 콘크리트의 중성화 및 철근의 피복두께에는 편차가 존재한다. 셋째, 콘크리트중의 철근부식상황은 환경조건에 따라 다르나 콘크리트의 중성화 깊이와 철근의 피복두께와의 상관관계에 의해 결정된다.

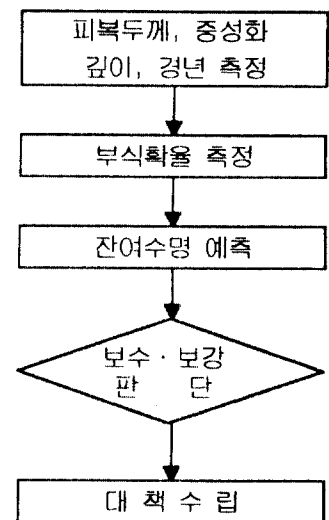


그림 1 잔여수명예측 기본개념도

3. 철근의 부식확율

철근의 부식확율이란 대상으로 하는 철근콘크리트 구조물중의 철근중 유해한 부식상태에 있는 철근의 확률로써 정의한다. 철근의 유해한 부식상태란 부식등급Ⅲ(단면결손이 육안관찰로는 확인되지 않으나, 철근의 둘레 또는 전 길이에 걸쳐 들뜬늑이 발생되어 있는 상태) 또는 부식등급Ⅳ(단면결손이 발생되어 있는 상태)의 상태로 정의한다.

3.1 입력조건

콘크리트 구조물의 중성화 깊이는 재령과 함께 커지며, 그 편차도 재령과 함께 커진다. 한편 철근의 피복두께는 재령과 관계없이 어느 편차를 가지고 존재한다. 그림 2에 어느 편차를 갖는 콘크리트 구조물의 중성화의 진행과 철근의 피복두께와의 관계를 개념적으로 나타낸다. 또한 그림.3에는 그림. 2에서 나타낸 시간적인 진행에 따른 중성화 깊이의 분포와 피복두께의 분포와의 관계를 더욱 알기쉽게 1차원적으로 나타낸다.

그림 3에서 중성화 깊이는 시간이 경과할수록 평균값이 커지며 또한 편차도 증대하며, 어느 시점에

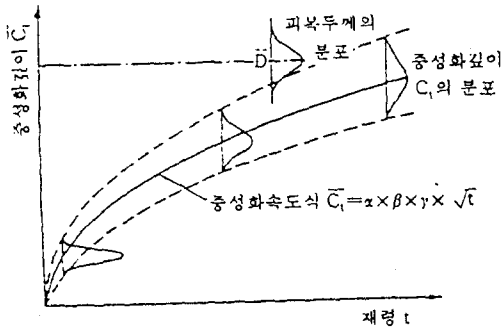


그림 2 중성화의 진행과 철근의 피복두께

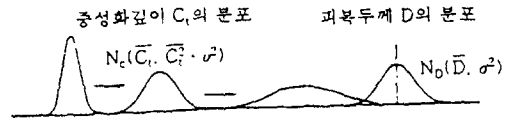


그림 3 중성화깊이의 분포와 피복두께와의 관계

서 중성화 깊이의 분포와 피복두께의 분포가 일부 겹치게 된다. 이 부분이 중성화 깊이가 철근의 피복 두께에 도달한 철근이 어떤 확률로서 존재한다는 것을 의미한다.

철근의 부식확율을 구하기 위해서는 중성화의 진행, 편차의 분포, 철근의 피복두께 분포, 철근부식을 정량적으로 구할 필요가 있기 때문에 실태조사를 근거로 다음의 4가지를 입력조건으로 제시한다.

첫째, 중성화 깊이의 평균치 \bar{C}_t 는 $\bar{C}_t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \sqrt{t}$ 로써 표현할 수 있다. 여기에서 α 는 환경조건, β 는 마감재에 의한 억제계수, γ 는 콘크리트의 품질계수이다. 둘째, 중성화 깊이의 값은 정규분포하며, 변동 계수 v 는 재령과 관계없이 일정하다. 셋째, 철근의 피복두께 값은 정규분포한다. 넷째, 실외면의 콘크리트중의 철근은 중성화영역이 철근표면에 도달하면 동시에 유해한 부식상태가 되며, 실내면의 콘크리트중의 철근은 중성화 영역이 20mm 통과한 시점에서 유해한 부식상태가 된다.

3.3 계산방법

재령 t 에 있어서 중성화 깊이의 분포 $f(C_t)$ 는 평균값이 \bar{C}_t 이고, 표준편차가 $C_t v$ 인 정규분포 $N_c(\bar{C}_t, \bar{C}_t^2 v^2)$ 으로 하고, 피복두께의 분포 $f(D)$ 를 정규분포 $N_D(\bar{D}, \sigma^2)$ 로 한다. 또한 철근의 피복두께와 중성화 깊이와의 차의 분포 $f(D - C_t)$ 는 $(\bar{D} - \bar{C}_t)$ 를 평균값으로 하고 $\sqrt{(\bar{C}_t^2 v^2 + \sigma^2)}$ 을 표준편차로 하는 정규분포 $N_{D-C}[(\bar{D} - \bar{C}_t), (\bar{C}_t^2 v^2 + \sigma^2)]$ 가 된다.

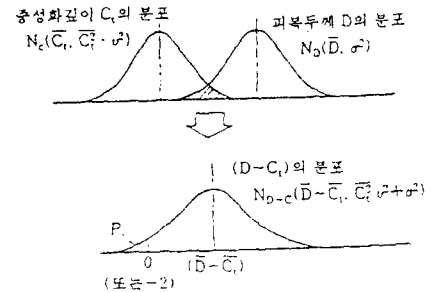


그림 4 피복두께와 중성화깊이와의 차분포

$$f(D-C_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\bar{C}_t^2 v^2 + \sigma^2)}} \cdot \exp\left[-\frac{\{(D-C_t) - (\bar{D} - \bar{C}_t)\}^2}{2(\bar{C}_t^2 v^2 + \sigma^2)}\right] \quad (1)$$

따라서, 앞에 기술한 입력조건 4에 의해, 재령 t 에 있어서 철근의 부식확율 P 는 그림 3에 나타난 정규분포 N_{D-C} 의 0cm이하(실외) 또는 -2cm이하의 면적으로 다음의 두 식으로 나타낸다.

$$P1 = \int_{-\infty}^0 f(D-C_t) d(D-C_t) \quad (\text{실외}) \quad (2) \quad P2 = \int_{-\infty}^{-2} f(D-C_t) d(D-C_t) \quad (\text{실내}) \quad (3)$$

이 식에 $\bar{C}_t, v, \bar{D}, \sigma$ 를 대입함으로써 철근의 부식확율 P 를 구할 수 있다.

4. 잔여수명 예측

잔여수명이란 현재의 조사시점으로부터 수명에 이르기 까지의 기간을 말하는 것으로써 철근콘크리트 구조물의 수명을 철근의 부식확율로써 정의하여 철근의 부식확율과 재령과의 관계를 구함으로써 잔여수명의 예측이 가능하다.

본 방법에 의한 잔여수명의 산정순서는 다음과 같다.

첫째, 대상으로하는 철근콘크리트 구조물의 조사결과 또는 설계도서를 근거로 D (철근의 평균피복두께), σ (철근피복두께의 표준편차), C_t (콘크리트의 평균중성화 깊이), v (콘크리트의 중성화 깊이 변동계수), t (조사시의 경과년수), P_0 (수명시의 철근의 부식확율)의 상수를 설정한다. 둘째, 중성화 깊이와 재령과의 관계 $C_t = A\sqrt{t}$ 를 구한다. 여기서 A 는 평균중성화 깊이를 \sqrt{t} 으로 나누면 얻어진다. 셋째, 철근의 부식확율 P 와 재령 t 의 관계를 앞에서 기술한 (1)~(3)식으로 구한다. 넷째, $P = P_0$ 와 $P = f(t)$ 와의 교점을 구해 그 시점의 경과년수 t_2 를 구한다. 다섯째, 잔여수명은 $t_2 - t_1$ 이 된다. 여섯째, 대상구조물의 요구수명 t_3 가 $t_2 > t_3 > t_1$ 의 경우이면 현재상태로서 요구수명을 만족할 수 있다고 판단하지만 $t_2 < t_3$ 이면 현재 상태로서 요구수명을 만족할 수 없다고 판단되기 때문에 적절한 보수대책을 세워 부식확율 $P = f(t)$ 를 작게 하여야 한다.

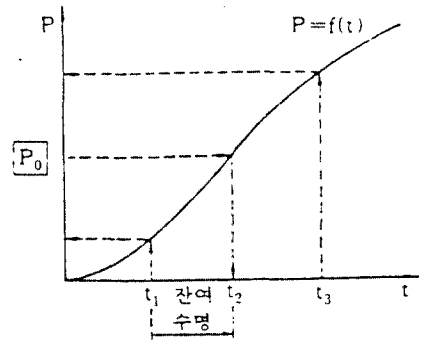


그림 5 잔여수명측정의 설명도

5. 무기계 보수공법인 R공법에 의한 잔여수명 연장(2)

앞에서도 기술했듯이 일반환경하에서도 철근콘크리트 구조물은 중성화가 진행되어 언젠가는 철근이 부식하게 된다. 하지만 최근에는 그 중성화 속도가 환경, 시공불량 등의 내·외적인 요인으로 빨리 진행하게 되어 수명연장의 필요성이 대두되고 있지만 현재까지 시행되고 있는 보수공법은 시행후의 수명연장에 대해서 정량적으로 밝혀주는 예가 없어 무기계 보수공법인 R공법을 사용하여 보수했을 경우의 수명연장에 대해 정량적으로 제시하고자 한다.

5.1 중성화 속도

일반적인 중성화 속도 측정식은 $t = 7.22X^2$ (또는 $X = 0.372\sqrt{t}$) 여기서 t 는 년수, X 는 중성화깊이 (cm)를 나타낸다. 하지만 일반적으로 대상 구조물은 이 일반식보다 더 빠르게 진행되는 것이 사실이다. 그래서 R공법으로 보수를 하게 되면 중성화 속도 증가 비율은 크게 하락하게 되어 본래의 속도로 진행하거나 오히려 더 늦게 진행하게 되어 목표수명을 달성하게 된다. 그림 6에 피복두께와 중성화 속도와와의 관계를 나타낸다.

5.2 R공법에 의한 중성화 속도 억제

R공법에서 사용하는 재료의 중성화 억제효과는 실험실조건 및 폭로조건에서의 실험을 근거로 다수의 보수공사 결과를 종합하여 그 산출방법을 제시한다. 그림 7은 R공법 처리전의 중성화와 처리후의

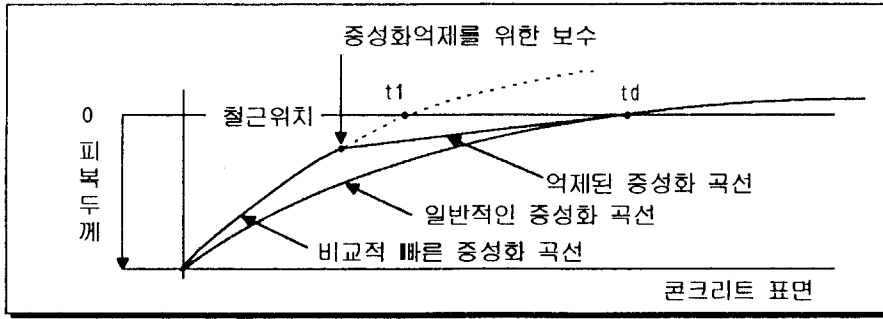


그림 6 피복두께와 중성화 속도와의 관계

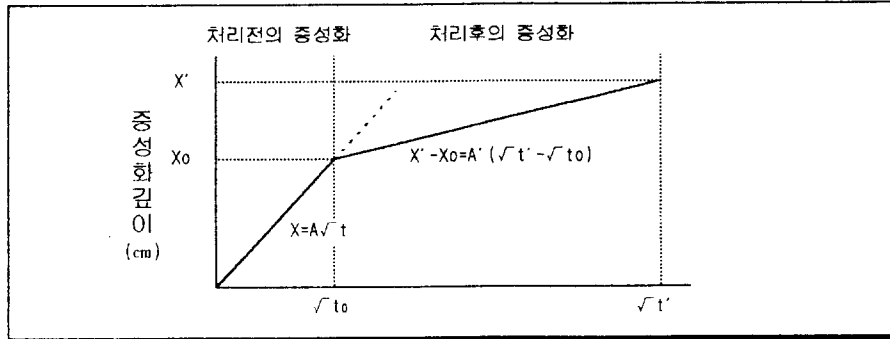


그림 7 R공법 처리전·후의 중성화 속도 변화

중성화 진행의 개념도로서 그림중의 식에 의해 실제의 대상물에서의 현상의 중성화 진행계수와 R공법 보수후의 진행억제를 구하는 것이 가능하다.

6. 적용 예

현재 진단시 피복두께가 3cm, 중성화 깊이가 20mm 경과년수가 15년이 되는 철근콘크리트 구조물을 예를 들어 중성화 속도와 보수시의 중성화 속도를 비교 수명연장이 얼마나 되는지 정량적으로 나타내고자 한다.

6.1 현재 상태의 중성화 속도 계산

$X=A\sqrt{t}$ 에서 $X=2$, $t=15$ 를 대입하면, $A=0.516$ 이 되므로 이 대상물에 대한 중성화 진행식은 $X=0.516\sqrt{t}$ ($t=3.76X^2$)가 된다. 이것은 일반식 $t=7.22X^2$ 과 비교해서 약 2배 빠르게 진행되고 있는 것이 된다. 또한 이식에 경과년수를 대입하면 향후의 중성화 진행을 추정해 20년후에는 중성화 깊이가 2.31cm, 40년후에는 피복두께를 지나 3.27cm가 되어 철근의 부식이 상당히 진전될 것으로 예상된다.

6.2 현재상태와 향후의 부식확률

평균중성화 깊이는 2cm, 변동률은 0.14, 평균피복두께는 3cm, 표준편차는 0.2이므로 철근의 부식 확률과 경과년수와의 관계 $P=f(t)$ 를 정규분포표를 이용하여 구하면 표 2, 그림 8과 같이 된다.

표 2 정규분포표에 의한 부식확률과 경과년수 관계

t(년)	10	20	30	40	50	60	15
$\bar{C}_t=0.516\sqrt{t}$	1.63	2.31	2.83	3.27	3.65	4.00	2.00
$\bar{D}-\bar{C}_t(\text{cm})$	1.37	0.69	0.17	-0.27	-0.65	-1.00	1.00
$\sqrt{(\bar{C}_t^2 \nu^2 + \sigma^2)}$	0.29	0.37	0.43	0.49	0.54	0.58	0.33
$ \bar{D}-\bar{C}_t /\sqrt{(\bar{C}_t^2 \nu^2 + \sigma^2)}$	4.71	1.88	0.40	0.55	1.22	1.72	3.02
P(%)	0.1	3.0	34.5	70.9	88.9	95.7	0.13

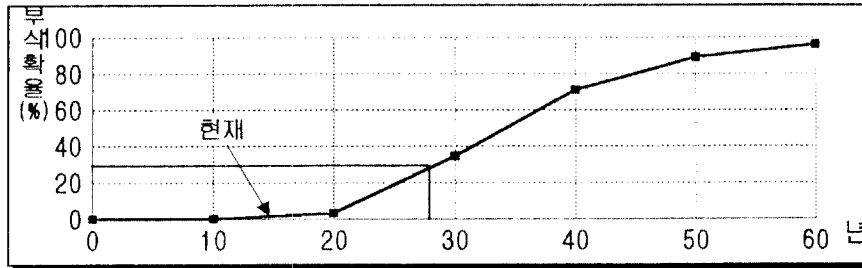


그림 8 부식확률과 경과년수

위 결과로부터 현재의 부식확률이 0.13%로 우려할 만한 수준은 아니나 계속해서 이런수준으로 진행된다면 상한 부식확률을 30%로 했을 경우 수명이 약 29년이 되서 앞으로 약 14년 정도 밖에 남아 수명을 연장시키기 위한 보수가 필요하다고 판단된다.

6.3 R공법 시공후의 중성화 진행억제효과

이 계산에서는 $X' - X_0 = A'(\sqrt{t} - \sqrt{t_0})$ 식을 이용한다. 여기에서 A' 는 보통콘크리트의 중성화속도 계수(R)에 대한 각 보수재료를 시공하는 경우의 중성화 속도지수(K)를 곱한 계수가 되며, $A' = R \times K$ 의 식을 이용하여 구한다. 여기에서 일반식 $X = 0.372\sqrt{t}$ 에서 $R = 0.372$ 를 적용하면 K는 표.3과 같이 된다.

표 3 R공법 사용재료의 중성화 속도지수

시 험 재 료	중성화 속도지수(%)
보수전의 상태	100
침투성 알카리부여제 도포	66
침투성 알카리부여제 강제함침	58
방청페이스트 도포(2mm)	56
폴리머모르티(단면복구용)	26
침투성알카리부여제+방청페이스트	51
침투성알카리부여제+방청페이스트+폴리머모르티	17

여기서 보수재료를 침투성알카리부여제, 방청페이스트를 사용하였을 경우에는 $A' = 0.372 \times 0.51 = 0.190$ 이 되어 이것을 상기식에 대입하면, $X' - 2 = 0.19(\sqrt{t} - \sqrt{15})$ 가 되서 $X' = 0.19\sqrt{t} + 1.26$ 의 식이 산출되게 된다. 그래서 보수후 5년(건축20년)에는 중성화 깊이가 2.11cm, 보수후 25년(건축40년)에는 중성화 깊이가 2.46cm가 되어 보수를 하지 않을경우와 비교할 때 중성화 속도가 현저히 감소되어 구조물의 수명이 증가 하게 된다. 이것을 그래프로 나타내면 그림 9와 같이 된다.

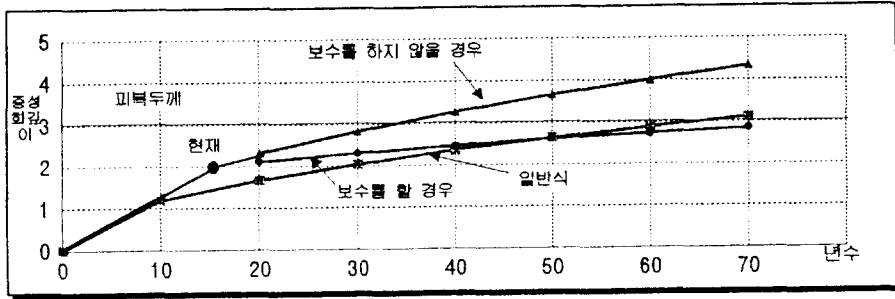


그림 9 보수하지 않을 경우와 R공법 보수후의 중성화 속도 변화

7. 결론 및 향후계획

이상과 같이 철근콘크리트 구조물의 수명예측방법과 무기계 폴리머 보수공법인 R공법 보수후의 수명연장에 대하여 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철근콘크리트 구조물의 내구성 진단 평가시 본 수명예측기법을 활용하면 정량적으로 구조물의 수명을 예측할 수 있어 적절한 보수대책을 수립할 수 있다.
- 2) 보수공법의 일환으로 무기계 폴리머 보수공법인 R공법을 사용하여 보수후 효과를 정량적으로 나타내었다.
- 3) 현재 이러한 수명예측과 보수시 수명연장에 대한 과정을 프로그램화하는 작업을 하고 있으며, 이를 더욱 발전시켜 진단 및 보수시 활용할 계획이다.

또한 현재 바닷모래 사용 등으로 인한 철근콘크리트 구조물의 철근부식 문제가 많이 대두되고 있는 상황이기 때문에 향후 염분침투에 대한 구조물의 수명예측기법도 연구하여 발표할 예정이다.

● 참고문헌 ●

1. 岸谷孝一·西澤紀昭, "중성화" 技報堂 출판, 1986
2. 권영진외, "중성화 및 염해를 입은 콘크리트구조물의 보수시공기술", '96콘크리트학회 봄학술발표대회, 1996