

## 시간의존성 균열 패턴을 고려한 탄산화에 노출된 콘크리트의 확률론적 내구수명 평가

# Service Life Evaluation of RC Column Exposed to Carbonation Considering Time-dependent Crack Pattern

권성준<sup>1\*</sup>

Seung-Jun Kwon<sup>1\*</sup>

(Received March 2, 2016 / Revised March 14, 2016 / Accepted March 15, 2016)

RC(Reinforced Concrete) structures exposed to carbonation in urban city have durability degradation with extended service life and cracks in concrete causes a local accelerated carbonation. In the present work, crack effect on carbonation depth is investigated and the service life of RC structure is evaluated considering cracks from early age and time-dependent cracks based on the previous field investigation. DFP(Durability Failure Probability), safety index, and the related service life are calculated considering the time to crack width reaches to maximum crack width(0.3mm). The results with time effect on crack width show lower DFP and longer service life, which seems to be reasonable compared with conservative results from crack effect from initial stage. Furthermore, crack effect is evaluated to be insignificant on DFP and service life. The technique with time-dependent crack effect on carbonation can be effectively used for RC structure containing cracking in use.

**키워드** : 탄산화, 균열, 시간의존적 균열, 철근 콘크리트, 내구수명

**Keywords** : Carbonation, Crack, Time-dependent crack, RC(Reinforced Concrete), Service life

## 1. 서론

콘크리트 구조물은 경제적이고 내구적인 건설재료지만, 다양한 환경에 노출되면서 내구성에 대한 문제가 발생된다. 매립된 철근의 부식의 관점에서는 염해 및 탄산화에 따른 철근부식이 중요하게 고려되는데, 최근 들어 대도시 및 지하 구조물의 이산화탄소 농도의 증가에 따라 탄산화에 대한 내구성 문제가 중요하게 대두되고 있다(Abe 1999; CEB 1997). 1990년대 이후 뚜렷하게 탄산화 문제는 야기되고 있는데, 탄산화란 외부 이산화탄소의 유입에 따라 콘크리트 내부의 공극수의 pH가 저감되어 매립된 철근이 부식되는 현상이다(Izumi et al. 1986; Ishida and Maekawa 2001). 실태조사 및 배합에 기초한 탄산화 모델링은 1950년대부터 제안되어 왔으며(Izumi et al. 1986), 최근 들어 물리-화학적인 모델링이 꾸준히 제안되어 포화도와 공극률과 같은 초기재령 모델링을 고려한

탄산화 해석 모델링도 제안되고 있다(Song et al. 2006, 2007; Kwon and Song 2010). 이러한 모델링은 수화도, 탄산화 반응, 이온의 해리 등을 고려한 해석이므로 국부적인 환경조건도 고려할 수 있는 연성해석 체계(system dynamics)를 기반으로 한다(Ishida and Maekawa 2003; Maekawa et al. 2009).

염해와 마찬가지로 탄산화에 대한 내구수명 평가 방법은 두 가지로 구분할 수 있다. 결정론적인 방법은 이론 또는 실태조사에 근거하여 목표내구수명동안 진행되는 탄산화 깊이가 피복두께를 초과하지 않도록 유도하는 방법이다(RILEM 1994; CEB 1997). 이미 각국의 시방서에서는 이에 대한 고려를 하고 있으며, 탄산화에 대한 합리적인 예측식을 구현하기위해 연구가 진행되고 있다(JSCE 2002). 확률론적 방법은 이러한 결정론 방법에 신뢰도를 고려하여 목표내구수명동안 내구적 파괴확률이 목표 내구적 확률보다 정해진 기간 동안 낮도록 유지하는 방법인데, 점차 확률론적

\* Corresponding author E-mail: jjuni98@hnu.ac.kr

<sup>1</sup>한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

인 설계로 발전하는 추세이다. 이는 좀 더 보수적인 방법이지만 결정론적 방법에서 고려할 수 없는 공학적 불확실성(uncertainties)를 고려하는 것이다(Kwon and Na 2011).

그러나 이러한 방법들 모두 건전부 콘크리트 대상으로 하고 있는데, 실제로 콘크리트 구조물은 균열부, 타설이음부 등 취약부를 가지고 있다. 국부적인 콘크리트 취약부에 대한 고려가 필요한데, 현재 공학적 수준으로는 이러한 영향을 고려하지 못하는 실정이다. 기존의 연구에서는 균열부에 대한 특성을 고려하여 염해 및 탄산화에 대한 연구가 활발하게 진행되었는데, 주로 균열 폭을 통한 확산성 증가를 이용하여 내구수명을 평가하였다(Kwon et al. 2009; Kwon and Na 2011; Kwon et al. 2007).

이러한 방법은 실태조사를 기본으로 이미 초기에 이러한 균열이 발생되었다는 점을 가정하였는데, 균열이 진행되는 경우를 가정하면 열화의 진전이 늦어지고 이에 따라 내구성 파괴확률 및 내구수명의 분포가 달라지게 된다.

본 연구에서는 기존의 실태조사를 이용하여 균열패턴을 분석하였다. 최대 균열 폭에 이르는 시간을 가정하여 확률론적인 내구수명 평가를 수행하였으며, 고정균열인 경우의 내구수명과 비교, 분석하였다.

## 2. 균열부 탄산화에 대한 확률론적인 내구성

### 2.1 측정원리

균열부에서는 국소적인 이산화탄소의 추가적인 유입으로 인해 탄산화 깊이가 증가한다. 이미 다양한 실태조사 결과를 통하여 탄산화 깊이는 균열 폭의 제곱근에 비례한다는 연구결과가 보고되고 있으며(Abe 1999), 해석적으로 대표체적에 대한 평균화기법을 통하여 연구가 진행되고 있다(Song et al. 2007). Fig. 1에서는 기존의 연구에서 제안된 확률론적인 탄산화 수명 평가의 예를 나타내고 있다(Izumi et al. 1986).

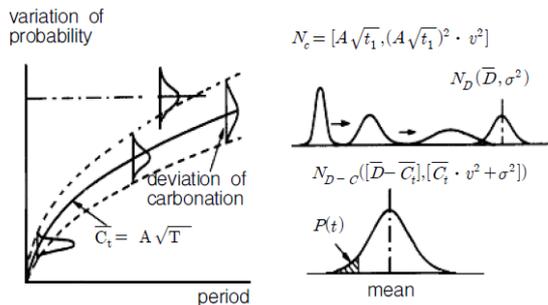


Fig. 1. Concept of durability failure probability for carbonation

또한 정규분포를 가진 피복두께가 일정하고 탄산화깊이가 정규분포를 가지면서 시간에 따라 증가할 경우, 식 (1) 및 식 (2)에 따라 내구적 파괴확률이 산정된다고 제안하였다(Izumi et al. 1986).

$$f(D - C_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(A^2tv^2 + \sigma^2)}} \times \exp\left[-\frac{[(D - C_t) - \bar{D} - A\sqrt{t}]^2}{2(A^2tv^2 + \sigma^2)}\right] \quad (1)$$

$$P(t)_f = \int_{-\infty}^0 f(D - C_t)d(D - C_t) \quad (2)$$

여기서,  $D$ 는 피복두께,  $C_t$ 는 탄산화 시간의존성 탄산화 깊이,  $A$ 는 탄산화속도계수,  $v$ 는 탄산화 깊이의 변동계수,  $\bar{D}$  및  $\sigma$ 는 피복두께의 평균 및 표준편차를 나타낸다. 이러한 기법은 균열부 또는 타설이음부의 내구성 파괴확률을 제시할 때 많이 사용되어 왔으나 모두 균열 폭이 초기부터 있다고 가정하여 매우 엄격하게 탄산화 진행을 평가하였다(Kwon et al. 2007).

## 3. 실태조사를 통한 확률분포 구성

### 3.1 실태조사의 개요(Kwon and Na 2011)

대상 구조물은 공용기간이 18년 경과한 대도시에 있는 고가교 RC 교각이며 설계강도는 24MPa로 조사되었다. 반발경도에 의한 강도환산치는 26~30MPa 수준이며, 표면에 0.1~0.3mm의 균열 폭을 가지고 있었다. Table 1에서는 대상구조물의 노출환경을 요약하였으며, Fig. 2에서는 대상구조물을 사진 및 대표적인 외관조사망도를 나타내고 있다.

### 3.2 균열부의 확률분포구성

건전부 및 균열부의 탄산화 특성을 확률론적으로 고려하기 위해서는 실태조사를 통한 확률분포의 구성이 매우중요하다. Table 2에서는 실태조사를 통한 건전부 및 균열부의 확률분포를 나타내고 있는데, 측정된 균열 폭은 0.1~0.3mm수준이었다(Kwon and

Table 1. Exposure conditions for target structure

CO <sub>2</sub> concentration	Average R.H.	Average temp.	Note
353ppm	69%	12.2°C	· RC columns · Contamination of surface · Roughly sheltered from rain

Na 2011). 탄산화 속도는 시간의 제곱근에 비례한다는 가정 하에 주로 사용되는데, 이는 물리적 모델링으로도 증명되었으며, 실험 조사결과에서도 유효하게 사용된다(Izumi et al, 1986; Saeki et al, 1991; Papadakis et al, 1991).

탄산화에 대한 확률론 해석을 수행하기 위해서는 건전부 및 균열부의 탄산화 예측식이 필요하다. 건전부에 대해서는 Table 2를 기초로 식 (3)과 같이 건전부 콘크리트의 탄산화식을 나타낼 수 있다.

$$C_s = 2.778 \sqrt{t} \tag{3}$$

여기서  $C_s$ 는 건전부의 탄산화 깊이를 나타낸다.

탄산화 깊이는 균열 폭( $w$ )의 제곱근에 비례하므로(Abe 1991), 식 (4)와 같이 가정할 수 있다.

$$C_w = A \sqrt{w} \sqrt{t} \tag{4}$$

여기서,  $C_w$ 는 균열부의 탄산화 깊이이다. Table 2의 균열부 탄산화식은 0.1~0.3mm에 해당하는 탄산화 진행이므로 평균을 가정하여 0.2mm에 해당하는 탄산화 깊이로 가정하였다. 이후 경과연수인 18년과 균열 폭 0.2mm를 대입하면 탄산화 깊이  $A$ 는 12.965를 가지게 된다.

본 연구에서는 식 (3)의 건전부 탄산화 깊이식과 식 (4)의 균열

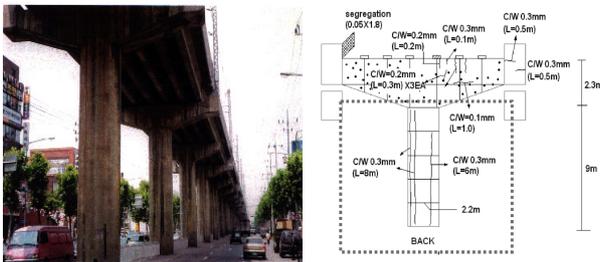
부 탄산화식을 이용하여 내구적 파괴확률과 신뢰성지수를 분석하고 이에 따른 내구수명을 도출하도록 한다.

## 4. 시간의존성 취약부 패턴에 따른 내구수명

### 4.1 고정균열인 경우 내구수명 평가

본 절에서는 고정균열인 경우에 대한 내구적 파괴확률과 신뢰도 지수를 Table 2의 확률분포를 이용하여 도시하도록 한다. 탄산화 깊이 진행과 피복두께는 모두 정규분포를 따른다.

내구적 파괴확률의 도출은 Fig. 3의 flowchart와 같다. 건전부에 대해서는 식 (3)의 탄산화 예측 식을, 균열부에 대해서는 식 (4)의 탄산화 예측 식에 균열 폭 0.1mm~0.3mm를 대입하여 사용하였다. 탄산화 깊이 및 피복두께의 분포는 정규분포를 가정하였으며, 피복두께의 변동성은 Table 2의 조사 자료를 참고하였다. 일반적으로 염해 및 탄산화에 대한 목표 내구성 확률은 10.0%로 가정하였는데, 국내의 시방서에서 제안되는 확률 한계치이다(Sudret et al, 2005; CEB-FIP 2006; KCI 2004). 즉 시간의 증가에 따라 식 (4)에서 제시된 탄산화식으로부터 탄산화 깊이가 도출되고 각각의 변동계수를 고려한 Monte Carlo Simulation을 통하여 탄산화 깊이가 피복두께를 초과할 확률을 계산하게 된다. 이렇게 내구적으로 증가하는 파괴확률이 목표내구성 파괴확률을 초과할 때까지를 내구수명으로 정의하였으며, 이러한 확률 계산은 시간을 200년까지 계속 증가시키면서 내구적 파괴확률을 계산하게 된다. Fig. 4에서는 건전부 및 균열부에 따른 내구적 파괴확률의 변화와 신뢰도 지수의 변화를 나타내고 있다. Fig. 5에서는 목표내구성 확률이 10%



(a) Photo for RC structures (b) Typical investigation results

Fig. 2. Photo and crack mapping for target structure

Table 2. Random variables from field investigation

Types	COV	Mean (mm)	Carbonation velocity (mm/year <sup>0.5</sup> )	Number of sample
Sound	0.21	11.7	2.778	56
Cracked	0.15	24.6	5.798	24
Cover depth	0.22	57.5	-	30

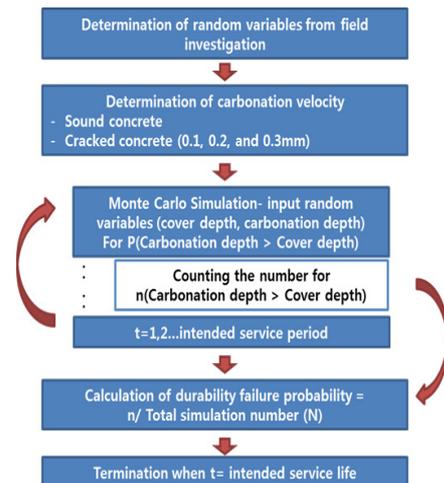


Fig. 3. Flowchart for service evaluation

인 경우의 내구수명을 나타내고 있다.

Fig. 4 및 Fig. 5의 결과에서 알 수 있듯이, 균열폭이 0.3mm로 증가할수록 내구수명은 187년에서 86년, 42년, 28년으로 크게 감소하였다. 내구적 파괴확률은 균열이 0.1mm가 되는 순간 속도계수가 2.778에서 4.100으로 1.48배 증가하므로 크게 증가하였으며, 0.2mm에서는 5.798로 증가를, 0.3mm에서는 7.101로 증가하였다. 뚜렷하게 증가하는 내구적 파괴확률에 대하여 신뢰성 지수 역시 크게 감소하였다. Fig. 5에서 언급된 내구수명은 균열 폭이 발생한

부분만을 나타낸 것이므로 구조물 전체에 대한 내구수명은 아니고 보수 후 유지관리를 통한사용이 가능하다.

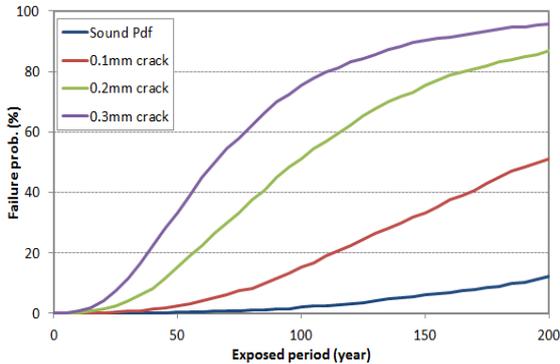
#### 4.2 시간의존성 균열에 대한 내구수명 평가

4.1절에서는 균열 폭이 초기 재령에서 발생한 경우를 가정한 경우이다. 본 절에서는 균열 폭이 최대 0.3mm까지 진전하는 시간에 따라 증가하는 경우를 가정하여 해석을 수행하였다. 균열 폭이 증가하는 속도에 대한 영향을 고려하기 위해 최대 균열 폭 도달시간을 20년에서 100년까지 변화시키면서 해석을 수행하였다.

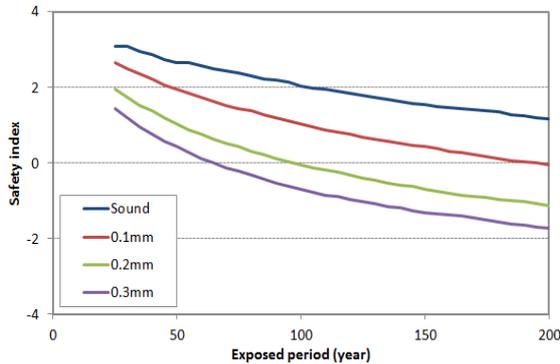
즉 공용개시후 부터는 건전부의 탄산화 속도계수에서 시작하지만  $n$ 년 후에는 0.3mm의 균열 폭을 가지는 탄산화 속도계수로 선행적으로 증가하도록 모델링하였다. 여기서  $n$ 은 20년, 40년, 60년, 80년, 100년으로 가정하였으며,  $n$ 년 이후에는 최대 탄산화 속도인 7.101을 일정하게 가지도록 구성하였다.

Fig. 6에서는 시간의 변화에 따른 탄산화 속도계수, 내구적 파괴확률, 신뢰도 지수 및 도출된 내구수명의 변화를 나타낸다.

Fig. 6(a)에서의 탄산화 깊이는 20년~80년 이후 0.3mm까지 진전한다고 가정하였으므로 고정된 시점 이후의 탄산화 속도계수는 일정하다. 또한 이로 인해 내구성 파괴확률의 변화는 정해진 시점에 이르면 일정하게 평가된다. 이에 따라 신뢰도 지수 역시 중첩되어 발생하였다. 중복되는 파괴확률은 초기부터 0.3mm의 균열이 발생되었다는 가정한 파괴확률로 Fig. 4의 0.3mm 균열 폭에 해당하는 파괴확률과 동일하다. 기존의 연구에서는 초기재령에서 발생한 균열을 고려하여 염해 및 탄산화 해석을 수행하였으므로 매우 보수적으로 평가하게 된다. Fig. 6(d)에서는 20년 경과 후 균열이 발생할 경우는 27년으로 내구수명이 평가되었으나 100년 이후 균열이 발생할 경우 내구수명은 53년으로 2배 가까이 증가하였다.



(a) Variations in durability failure probability



(b) Variations in safety index

Fig. 4. Variations in DFP and safety index

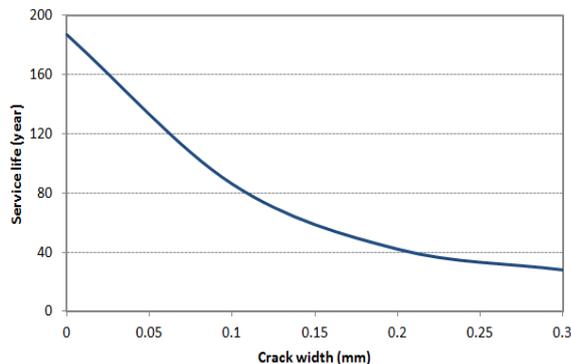


Fig. 5. Changes in predicted service life

#### 4.3 피복두께 변화에 따른 내구수명 Simulation

##### 4.3.1 고정균열인 경우

피복두께는 열화에 대하여 가장 적극적으로 대응하는 방어기재이다. 본 절에서는 피복두께의 변화에 따라 변화하는 내구적 파괴확률과 내구수명의 변화를 분석하도록 한다. 실태조사 결과시의 피복두께인 57.5mm와 0.22의 변동계수는 동일하게 가정하였으며, 피복두께를 40~70mm로 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 7에서는 내구적 파괴확률의 변화와 신뢰도 지수의 변화를 나타냈으며, Fig. 8에서는 피복두께와 균열 폭의 변화에 따른 내구수명의 변화를 나타내고 있다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 피복두께가 증가하더라도 균열 폭

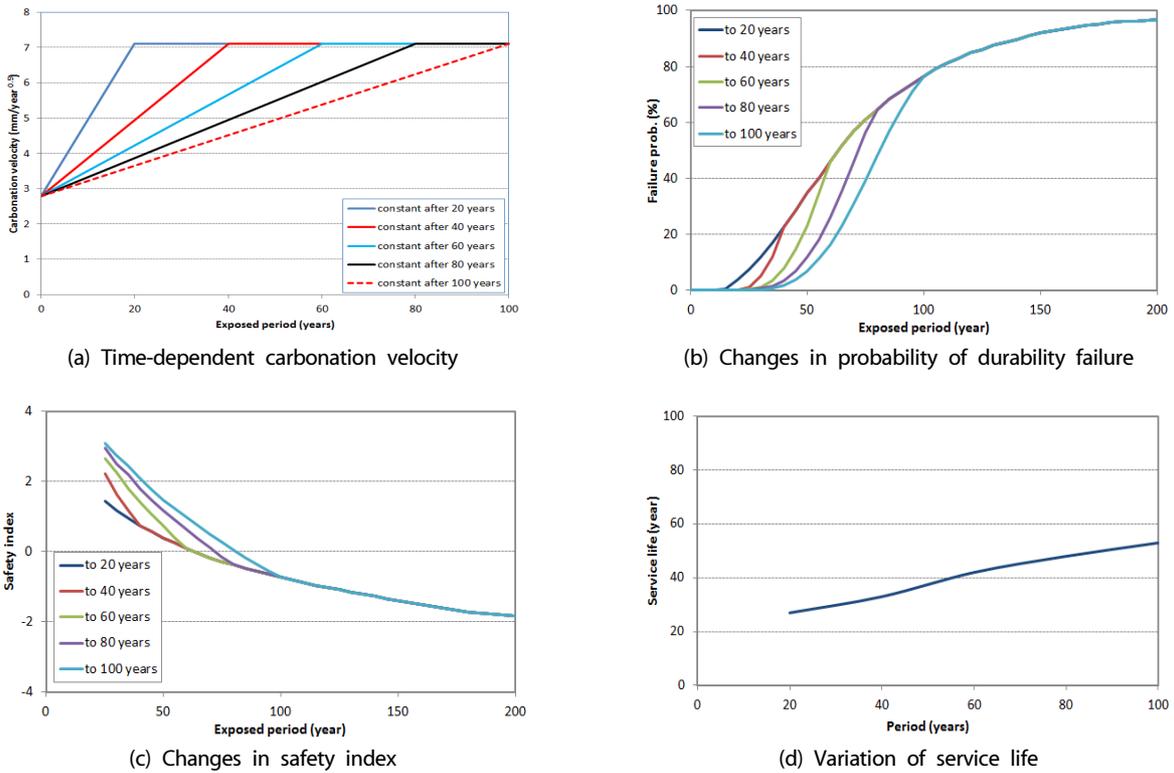


Fig. 6. Changes in probability behavior using time-dependent carbonation velocity

0.1mm까지 빠르게 내구수명이 감소하고 있음을 알 수 있다. 내구 수명 50년을 만족하는 경우는 피복두께 40mm인 경우 0.07mm, 60mm인 경우는 0.13mm, 80mm인 경우는 0.23mm, 그리고 100mm의 경우는 0.27mm 수준이었다.

#### 4.3.2 시간의존성 균열인 경우

본 절에서는 균열 폭이 0.0mm에서 0.3mm로 진전을 가정하여 해석을 수행하였으며, 피복두께를 40mm에서 70mm로 증가시키면서 확률론적인 변동성을 분석하였다. Fig. 9에서는 균열의 진전과 피복두께의 변화에 따른 확률분포의 거동을 나타내고 있으며, Fig. 10에서는 이에 따른 내구수명을 나타내고 있다.

균열이 고정화되는 시기가 20년에서 100년으로 증가될수록 내구수명은 점진적으로 증가하게 된다. 특히 피복두께가 증가할수록 이 효과는 감소하게 되는데, 이는 초기에 내구적 파괴확률이 매우 작게 발생하기 때문이다. Fig. 10의 결과에서는 균열이 진전하여 20년 경과 후 0.3mm에 도달하는 경우와 80년 경과 후 0.3mm에 도달하는 경우 모두 피복두께가 충분히 큰 경우 내구수명의 변화는 발생하지 않았다.

#### 4.3.3 균열효과와 피복두께와의 관계 분석

균열이 시간의존성을 가지게 되면 균열이 고정화되기 전까지는 최대 탄산화 속도계수보다 낮으므로 초기부터 균열이 있는 경우보다 높게 내구수명을 평가하게 된다. Fig. 11~Fig. 14에서는 각 피복두께와 균열조건에 따른 내구수명의 변화를 정리하였다.

균열 폭이 일정한 경우 피복두께가 40mm에서 100mm로 증가함에 따라 건전부는 6.07배, 0.1mm 균열폭에서는 3.02배, 0.2mm 균열폭에서는 2.90배, 0.3mm 균열 폭에서는 4.67배로 증가하였다. 그러나 균열 폭이 변하는 경우에는 20년에 0.3mm까지 진전하는 경우는 5.17배로 평가되었으며, 100년에 0.3mm까지 진전하는 경우는 2.48배의 증가를 나타내었다. 또한 시간의존성 균열은 0.2~0.3mm의 균열 폭이 초기에 발생한 경우와 거의 비슷한 내구수명을 예측함을 알 수 있다. 유지관리를 통해서 균열발생시기를 알 수 있으면 과다한 내구수명예측을 피할 수 있으며 합리적인 내구성 파괴확률을 도출할 수 있다고 판단된다.

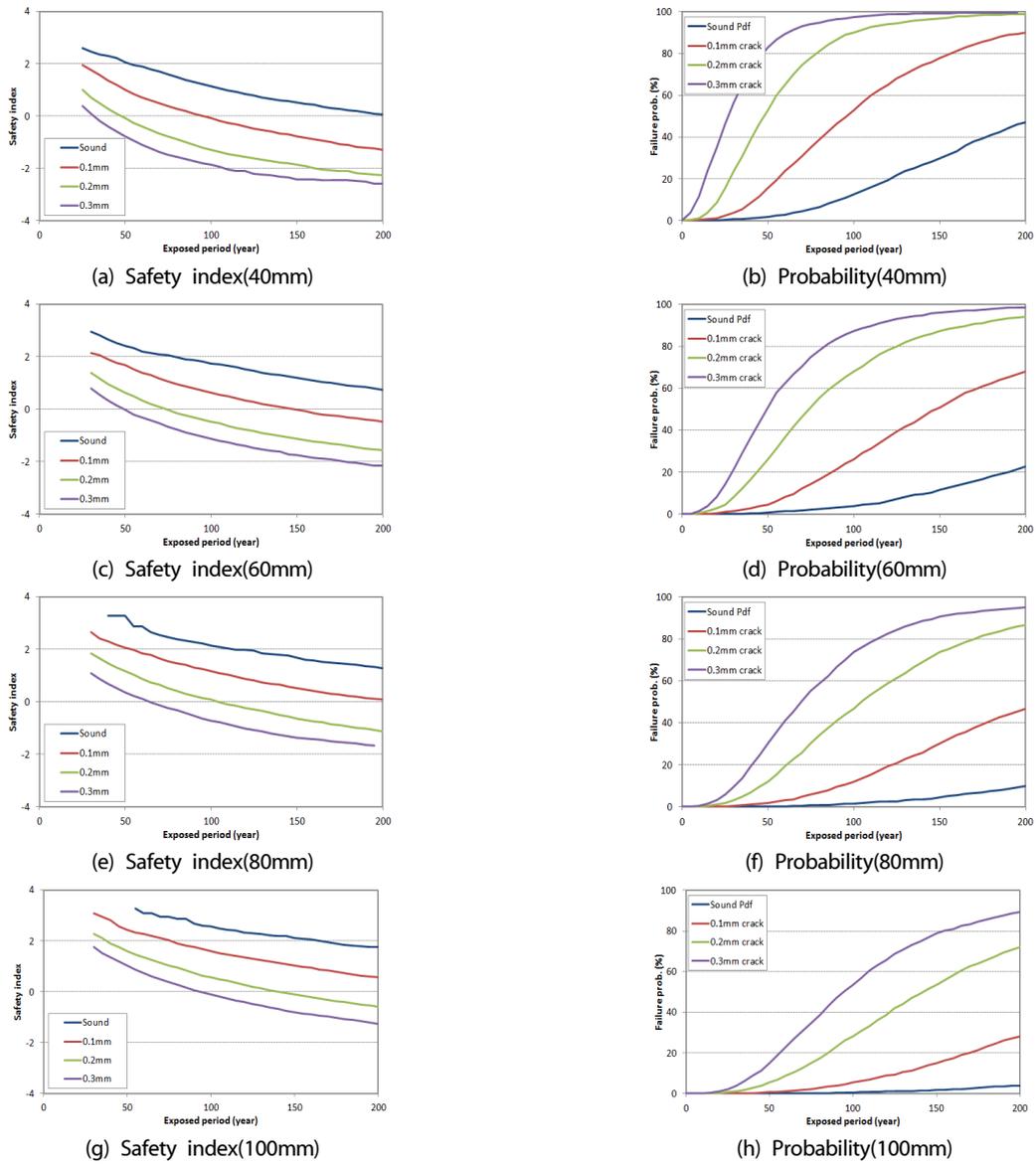


Fig. 7. Crack effect on DFP and safety index with cover depth(constant crack width)

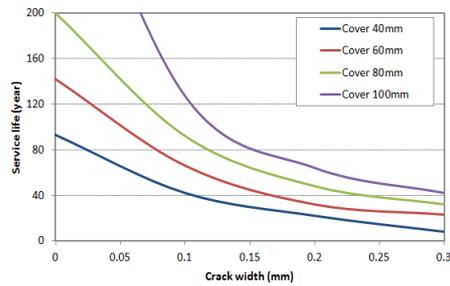


Fig. 8. Service life with fixed crack width and cover depth

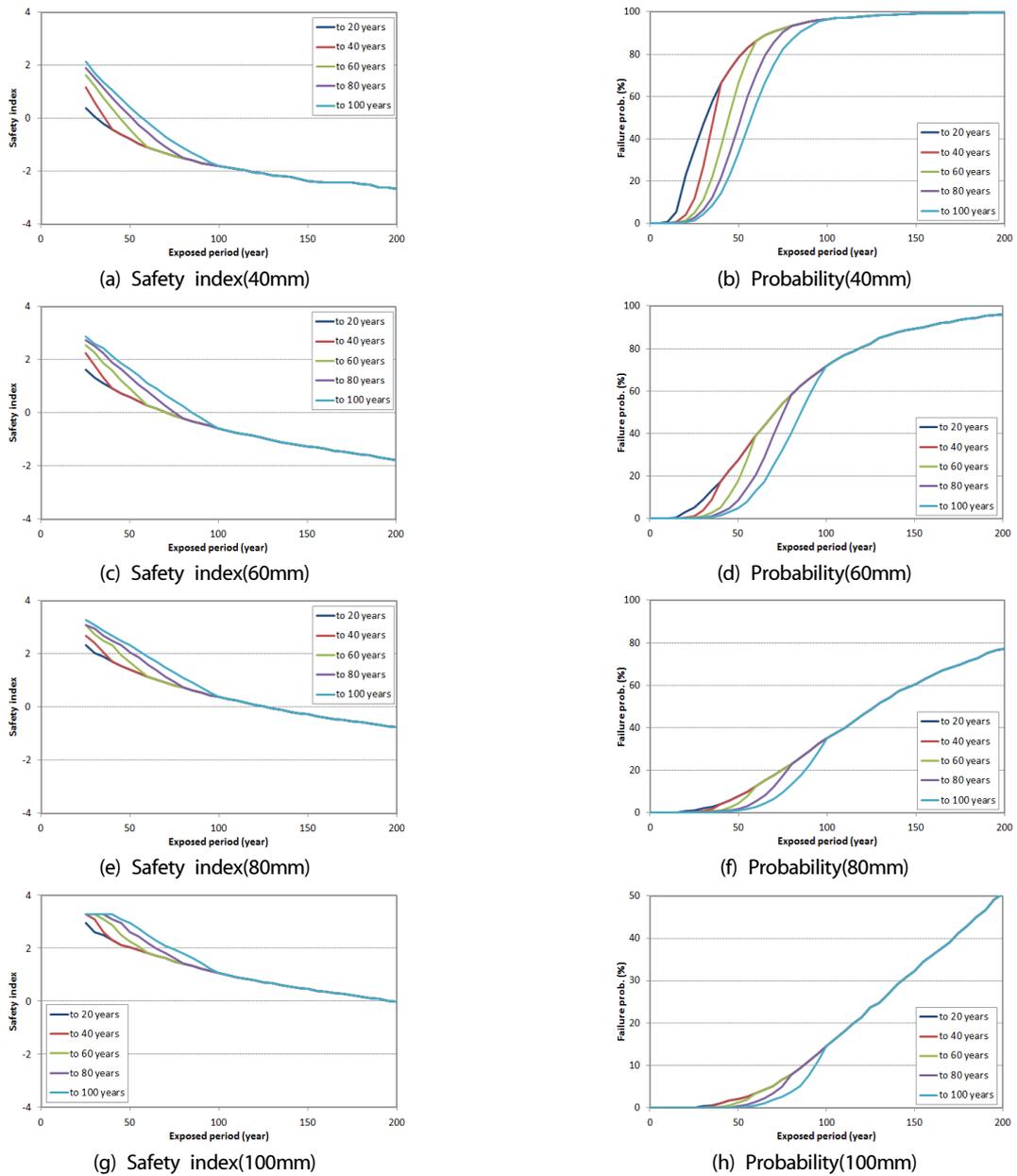


Fig. 9. Crack effect on DFP and safety index with cover depth(time-dependent crack width)

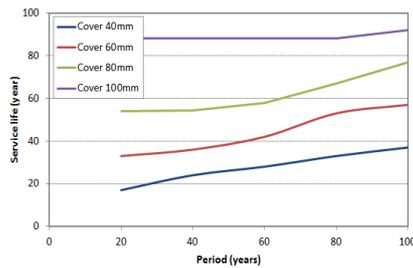


Fig. 10. Service life with varying crack width and cover depth

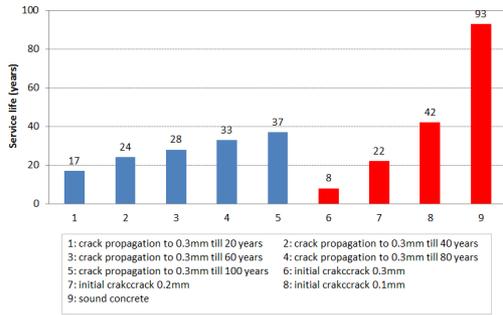


Fig. 11. Service life variation in cover depth 40mm

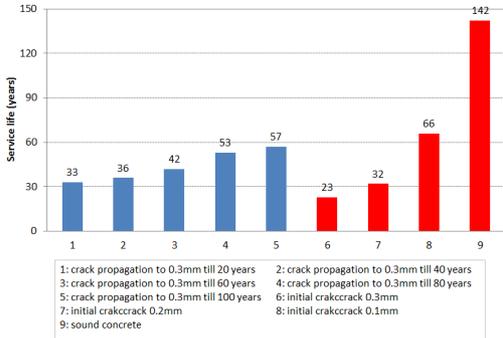


Fig. 12. Service life variation in cover depth 60mm

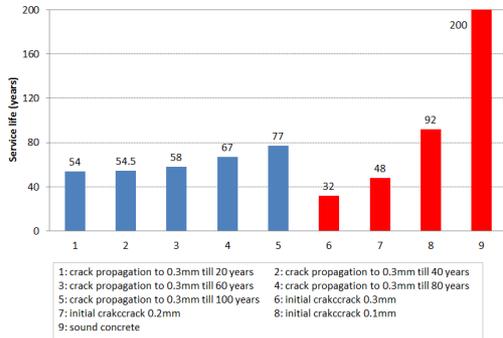


Fig. 13. Service life variation in cover depth 80mm

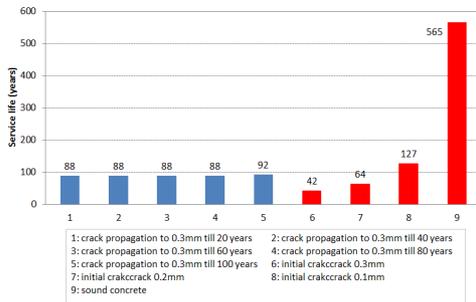


Fig. 14. Service life variation in cover depth 100mm

## 5. 결론

본 연구에서는 초기부터 발생한 균열이 아닌 균열이 진전하는 것을 가정하여 탄산화에 대한 내구수명을 분석하였다. 본 연구 범위 내에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 국내 대도시 환경에서 탄산화에 노출된 RC교각 구조물에 대하여 실태조사 결과를 이용하여 내구성 파괴확률, 신뢰도 지수, 그리고 내구수명을 분석하였다. 건전부에서는 187년의 내구수명이 도출되었으나, 급격하게 감소하여 균열 폭 0.3mm가 28년으로 감소하였다.
2. 균열이 20년에서 100년까지 점차적으로 증가하여 0.3mm까지 이른다고 가정하면 그 기간 동안 내구수명을 평가할 때는 균열 폭이 고정되는 기간이 늦어질수록 내구수명은 증가하게 된다. 0.3mm균열 발생 시기에 따라 내구수명은 변화하였는데, 20년 경과후 0.3mm균열 발생시는 27년이, 100년 이후 균열이 발생할 경우는 53년으로 내구수명은 증가하였다.
3. 피복두께를 40mm에서 100mm로 증가시키면서 시간 의존적 균열패턴을 고려한 내구수명을 평가하였다. 내구수명은 균열이 고정되는 시간이 증가할수록 완만하게 증가하였는데, 피복두께가 100mm 인 경우는 내구수명에 거의 영향을 받지 않았다. 이는 균열에 의한 탄산화 속도의 증가보다 증가된 피복두께의 영향이 지배적이기 때문이다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-286 2013R1A1A2060114)이며 저자는 이에 감사드립니다.

## References

Abe, T. (1999). "Result of reference review on crack width effect to carbonation of concrete", Proceedings of Symposium on Rehabilitation of Concrete Structures, **1(1)**, 7-14.

CEB. (1997). New Approach to Durability Design, CEB Bulletin 238, 96-102.

CEB-FIP. (2006). Model Code for Service Life Design, The International Federation for Structural Concrete, Task Group 5.6, 28-53.

- Ishida, T., Maekawa, K. (2001). Modeling of ph profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory, Concrete Library of JSCE, **37(6)**, 151-166.
- Ishida, T., Maekawa, K. (2003). "Modeling of durability performance of cementitious materials and structures based on thermo-hygro physics", RILEM Proceedings PRO 29: Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, 39-49.
- Izumi, I., Kita, D., Maeda, H. (1986). Carbonation, Kibodang Publication, 35-88.
- JSCE Concrete Committee. (2002). Standard Specification for Concrete Structures.
- Korea Concrete Institute. (2004). Concrete Standard Specification-Durability Part, 36-69.
- Kwon, S.J., Na, U.J. (2011). Prediction of durability for rc columns with crack and joint under carbonation based on probabilistic approach, International Journal of Concrete Structures and Materials, **5(1)**, 11-18.
- Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S., Jung, S.H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: probabilistic approach for chloride diffusion, Structural Safety, **31(1)**, 75-83.
- Kwon, S.J., Park, S.S. (2007). A study on estimation for chloride diffusivity in cracked concrete in harbor structures through field survey, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, **27(5A)**, 745-752 [in Korean].
- Kwon, S.J., Park, S.S., Nam, S.H., Cho, H.J. (2007). A study on survey of carbonation for sound, cracked, and joint concrete in rc column in metropolitan city, Journal of Korea Structure Maintenance Institute, **11(3)**, 116-122 [in Korean].
- Kwon, S.J., Song, H.W. (2010). Analysis of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation modeling, Cement and Concrete Research, **40(1)**, 119-127.
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2009). Multi-scale Modeling of Structural Concrete, Taylor&Francis, 86-105.
- Papadakis, V.G., Vagenas, C.G., Fardis, M.N. (1991). Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, ACI Materials Journal, **88(2)**, 186-196.
- RILEM. (1994). Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 28-52.
- Saeki, T., Ohga, H., Nagataki, S. (1990). Change in micro-structure of concrete due to carbonation, Concrete Library of JSCE, **18(12)**, 1-11.
- Song, H.W., Kwon, S.J. (2007). Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, Cement and Concrete Research, **37(6)**, 909-915.
- Song, H.W., Kwon, S.J., Byun, K.J., Park, C.K. (2006). Predicting carbonation in early-aged cracked concrete, Cement and Concrete Research, **36(5)**, 979-989.
- Sudret, B., Defaux, G., Pendola, M. (2005). Time-variant finite element reliability analysis-application to the durability of cooling towers, Structural Safety, **27(2)**, 93-112.

**시간의존성 균열 패턴을 고려한 탄산화에 노출된 콘크리트의 확률론적 내구수명 평가**

대도시의 콘크리트 구조물은 탄산화에 노출되며 사용기간의 증가로 인해 내구성 저하를 나타내며 콘크리트에 발생하는 균열은 국부적인 탄산화 증가를 야기한다. 본 연구에서는 실태조사를 통하여 균열부의 탄산화속도를 분석하였으며, 이를 시간의존성균열과 초기재령균열로 구분하여 탄산화에 노출된 RC교각의 내구수명을 분석하였다. 실태조사 결과를 기본으로 균열이 최대 0.3mm까지 진전하고 여기에 최대 균열폭에 이르는 시간을 변수로 하여 내구성 파괴확률, 신뢰성 지수, 내구수명 등이 평가되었다. 시간의존성균열 패턴은 초기재령부터 발생한 균열보다 낮은 내구성파괴확률과 높은 내구수명을 나타내었는데, 이는 지나치게 보수적인 해석기법보다 합리적이다. 또한 피복두께가 100mm보다 클 경우, 균열에 대한 시간효과는 내구성 파괴확률 및 내구수명에 큰 영향을 미치지 못하였다. 고정 균열이 아닌 시간의존적균열을 고려한 확률론적 내구수명 해석기법은 운용 중 발생하여 균열이 발생한 구조물에 효과적으로 사용될 것이다.