

# 탄산화에 노출된 콘크리트 취약부의 확률론적 내구수명 평가

A Service Life Prediction for Unsound Concrete Under Carbonation Through Probability of Durable Failure

권 성 준\*

박 상 순\*\*

남 상 혁\*\*\*

노 병 철\*\*\*\*

Kwon, Seung Jun Park, Sang Soon Nam, Sang Hyeok Lho, Byeong Cheol

## Abstract

Generally, steel corrosion occurs in concrete structures due to carbonation in down-town area and underground site and it propagates to degradation of structural performance. In general diagnosis and inspection, only carbonation depth in sound concrete is evaluated but unsound concrete such as joint and cracked area may occur easily in a concrete member due to construction process. In this study, field survey of carbonation for RC columns in down-town area is performed and carbonation depth in joint and cracked concrete including sound area is measured. Probability of durable failure with time is calculated through probability variables such as concrete cover depth and carbonation depth which are obtained from field survey. In addition, service life of the structures is predicted based on the intended probability of durable failure in domestic concrete specification. It is evaluated that in a RC column, various service life is predicted due to local condition and it is rapidly decreased with insufficient cover depth and growth of crack width. It is also evaluated that obtaining cover depth and quality of concrete is very important because the probability of durable failure is closely related with C.O.V. of cover depth.

## 요 지

대도시 및 지하구조물에서 주로 발생하는 탄산화는 사용기간의 증가에 따라 철근부식이 발생하며, 이러한 철근부식은 구조물의 성능저하로 진전된다. 하나의 RC 구조물이라 하더라도, 콘크리트 시공에 의해 건전부 뿐 아니라 시공이음부 또는 균열부와 같은 취약부가 발생하기가 쉽지만, 진단시에는 일반적으로 건전부만을 대상으로 탄산화 거동을 분석하고 있다. 본 연구에서는 대도시에서 사용중인 고가교의 RC 교각을 대상으로 하여 건전부, 균열부, 시공이음부 콘크리트의 탄산화 실태조사를 수행하였다. 조사된 탄산화 깊이와 측정된 피복두께를 확률변수로 하여, 사용기간에 따라 증가하는 내구적 파괴확률을 도출하였다. 한편 국내 시방서에서 제시하는 목표파괴확률을 기준으로 대상구조물의 내구수명을 평가하였다. 동일한 기둥부재라 하더라도 건전부, 균열부, 시공이음부 콘크리트에 따라 도출된 내구수명은 각각 다르게 평가되었으며, 피복두께가 작고 균열폭이 큰 경우에는 매우 빠르게 감소함을 알 수 있었다. 피복두께의 변동계수에 따라서도 내구적 파괴확률의 변화가 크므로 적절한 시공과 품질확보가 중요함을 알 수 있다.

**Keywords :** Carbonation, Crack, Joint, Probability of durable failure

**핵심 용어 :** 탄산화, 균열, 시공이음, 내구적 파괴확률

\* 정희원, 비엔티 엔지니어링 차장, 공학박사

\*\* 정희원, 한국전자제시험연구원 선임연구원, 공학박사

\*\*\* 정희원, 연세대학교 토목공학과 연구교수, 공학박사

\*\*\*\* 정희원, 상지대학교 건설시스템 공학과 부교수, 공학박사

E-mail : parkss87@kicm.re.kr 019-255-7255

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

탄산화는 대도시 또는 지하구조물에서 주로 발생하는 열화기구이며, 증가하는 이산화탄소로 인해 그 피해는 증가하고 있는 실정이다. 탄산화에 대한 내구수명 예측은 일반적으로 시간에 따라 증가하는 탄산화 깊이와 피복두께와의 비교를 통하여 내구수명을 평가하고 있으며, 피복두께와 탄산화 깊이가 같아지는 시점을 내구한계상태로 정의한다.<sup>(2)(8)</sup> 그러나 동일한 콘크리트 부재라 하더라도 균열부, 시공이음부와 같은 취약부가 발생하게 되며, 이에 따라 탄산화 깊이는 다르게 평가된다. 기존의 탄산화에 대한 내구성 설계는 목표내구수명동안 탄산화 깊이가 철근위치에 도달하지 않는 것으로 설정하고 있다.<sup>(2)</sup> 그러나 이러한 정량적인 설계기법은 재료의 배합, 시공시의 다양한 변동성을 고려할 수 없으며, 다수의 생산된 콘크리트 품질의 변동성을 고려할 수 없으므로, 최근들어 신뢰성 이론을 기본으로 한 내구수명 평가방법이 제시되고 있다.

확률론을 고려한 설계방법은 단순히 시간에 따른 열화 깊이와 피복두께와의 비교가 아니라, 대상 구조물의 중요도를 고려하여 목표 내구적 파괴확률( $P_{fmax}$ )을 제안하고 사용기간동안 발생가능한 내구적 파괴확률이 목표 내구적 파괴확률보다 작도록 설계하는 것을 의미한다.<sup>(13)</sup> 이미 염화물 침투에 대해서는 다양한 방법으로 이러한 신뢰성 기법이 제시되고 있으며,<sup>(9)(14)</sup> 다중 확률변수를 도입하여 Monte Carlo Simulation (MCS) 기법을 도입한 평가방법이 제시되고 있는 실정이다.<sup>(1)(10)(11)</sup> 최근 제정된 국내의 콘크리트 표준시방서에서도 건전부 콘크리트의 신뢰도지수 및 내구적 파괴확률을 도입하고 있다.<sup>(2)</sup>

탄산화에 대한 신뢰성 해석은 이미 1980년대, 피복두께와 탄산화 깊이를 확률변수로 설정하여 내구수명을 예측하는 평가방법이 제시되었으나,<sup>(3)</sup> 건전부 콘크리트만을 대상으로 하고 있다. 최근들어 MCS를 이용하여 균열폭, 피복두께, 배합특성 등 다양한 확률변수를 도입한 해석기법이 제시되었으나, 탄산화 실태조사에 따른 정보를 이용하지 않고 있으며, 해석적인 접근에 불과하였다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 대도시에서 탄산화 환경에 노출된 교각을 대상으로 건전부, 시공이음부, 균열부에 대한 실태조사를 수행하였다. 실태조사 결과 건전부 콘크리트, 시공이음부 콘크리트, 균열부 콘크리트에 대한 탄산화 속도계수를 도출하였으며, 사용기간에 따른 내구수명을 산정하였다. 한편 실태조사자료를 기본으로 한 피복두께뿐 아니라 피복두께의 변화와 균열폭의 변화에 따른 탄산화 속도계수를 이용하여 건전부 및 취약부 콘크리트의 내구적 파괴확률을 도출하였다. 이러한 확률론을 고려한 내구수명 도출기법은 시공 또는 설계상의 많은 변동성을 고려할 수 있으며, 대규모의 실태조사를 통하여 다양한 확률변수를 고려할 수 있다면 합리적인 설계기법이 될 것이라고 예상된다.

## 2. 확률론적인 내구수명 평가방법

최근들어 다중의 확률변수를 이용하기 위하여 MCS 기법이 많이 사용되고 있지만 각각의 확률변수에 대한 평균 및 표준편차의 가정에는 많은 어려움이 있다. 즉 피복두께, 탄산화 깊이 등의 확률변수를 어떠한 정규분포를 가정해야 하는지, 어떠한 표준편차범위를 사용해야 하는지에 대한 연구는 연구자마다 다양하며, 실태조사값도 다양하게 나타난다. 본 연구에서는 和泉<sup>(3)</sup>의 신뢰성 해석을 기본이론으로 하고 있는데, 시간에 따라 증가하는 탄산화 깊이의 변동성과 피복두께의 변동성을 정규분포로 고려하고 있다. Fig. 1에서는 피복두께와 시간에 따라 변화하는 탄산화 깊이의 변동성에 관한 확률분포를 나타내고 있으며 이 경우, 파괴확률분포는 식(1), 파괴확률은 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

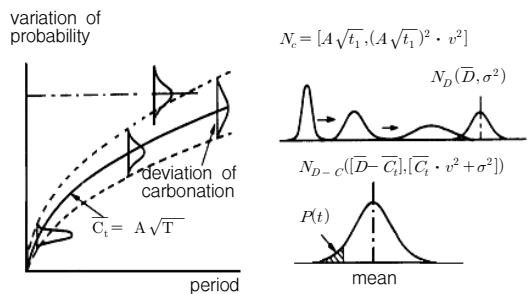


Fig. 1 탄산화 깊이 변동성에 따른 확률분포<sup>(3)</sup>

$$f(D-C_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(A^2t v^2 + \sigma^2)}} \times \text{EXP} \frac{-[(D-C_i) - (\bar{D} - A\sqrt{T})]^2}{2(A^2t \cdot v^2 + \sigma^2)} \quad (1)$$

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

여기서,  $C_i$ 는 탄산화 깊이,  $A$ 는 탄산화 속도계수,  $T$ 는 시간,  $t_1$ 는 측정시간,  $v$ 는 탄산화깊이 변동계수,  $\bar{D}$ 는 피복두께의 평균,  $\sigma$ 는 피복두께의 표준편차,  $N_C$ 는 탄산화깊이의 확률분포,  $N_D$ 는 피복두께의 확률분포,  $P(t)_f$ 는 시간에 따른 내구적 파괴확률을 나타낸다.

그러나 위의 확률변수식은 건전부에 대한 내구적 파괴확률식이며 실태조사를 기본으로 한 건전부 및 균열부의 파괴확률식은 다음과 같은 과정을 통하여 도출할 수 있다. Fig. 2에서는 본 연구의 흐름도를, Fig. 3에서는 내구적 파괴확률 및 내구수명 도출과정을 나타내고 있다.

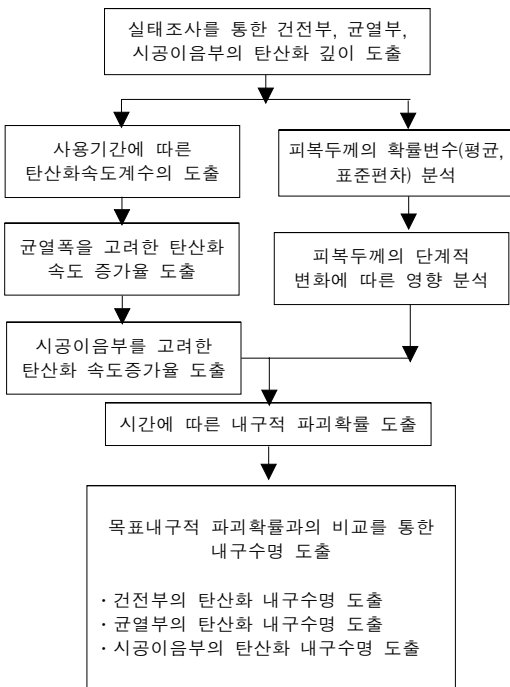


Fig. 2 연구 흐름도

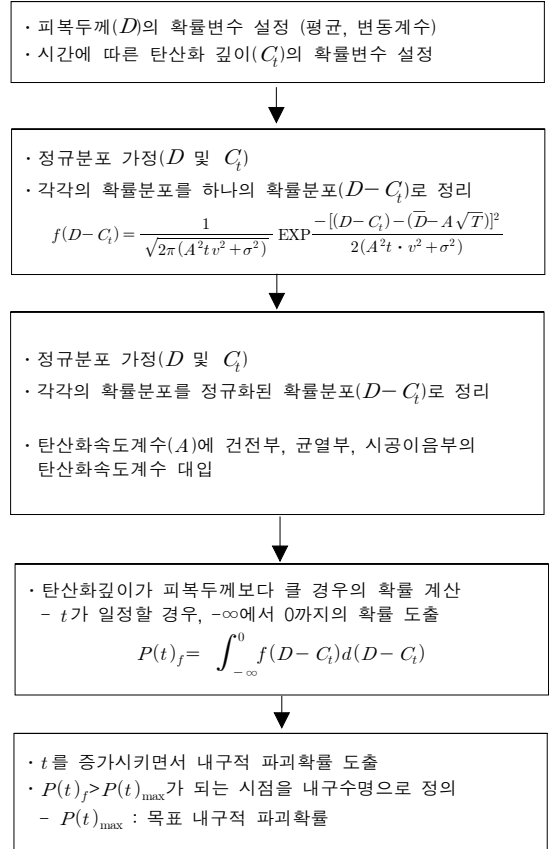


Fig. 3 내구적 파괴확률 및 내구수명 도출과정<sup>(3)</sup>

### 3. 건전부 및 시공이음부에서의 탄산화 속도 평가

#### 3.1 실태조사의 개요

대상구조물은 국내 대도시에서 있는 RC 교각으로 준공후 18년간 사용되고 있는 구조물이다. 시공당시의 정확한 배합은 알 수 없었으나, 설계도서로부터 설계강도는 24MPa였으며, 반발경도에 의한 환산 강도값은 26~30MPa의 범위를 나타내고 있었다. Table 1에서는 대상구조물의 노출환경을 나타내고 있으며, 탄산화 깊이 측정시 페놀프탈레인 1% 용액과 디지털 버어니어 캘리퍼스를 사용하여 0.05mm 단위로 측정하였다.<sup>(7)</sup>

Table 1 대상 구조물의 노출환경

이산화탄소 농도	평균 습도	평균온도	특징
300ppm 이상	69%	12.2℃	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 하부구조인 교각</li> <li>· 표면 오염</li> <li>· 비교적 강우로부터 보호됨</li> </ul>

대상구조물인 RC 교각에는 연직방향으로 0.1~0.2 mm의 균열폭이 존재하였고, 시공이음부를 가지고 있었으므로, 건전부 뿐 아니라 균열부와 시공이음부에도 탄산화 깊이를 측정하였다.

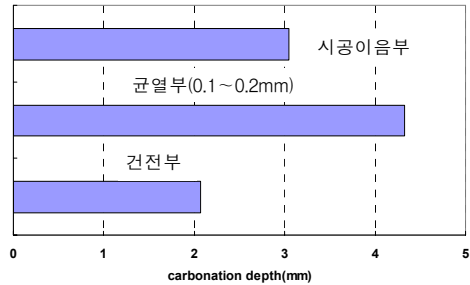
균열부의 탄산화 깊이 측정시, 균열면을 끌을 이용하여 쪼아낸 후 탄산화 깊이를 측정하였으며, 시공이음부에 대해서는 최대한 신구콘크리트의 표면차이가 없는 부위를 기준으로 하여, 표면을 쪼아낸 후 시공이음면의 탄산화 깊이를 측정하였다.

### 3.2 대상 구조물의 탄산화 깊이 분포

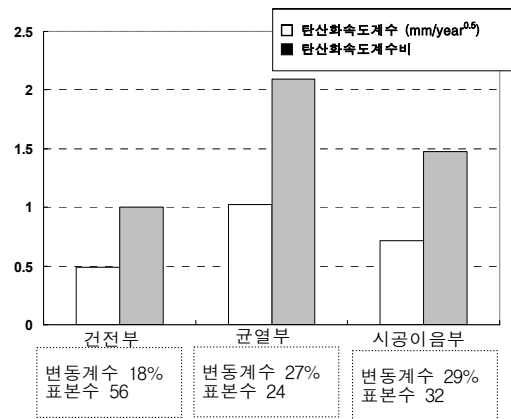
RC 교각의 경우, 동일한 배합을 가지고 있다 하더라도, 시공중 발생한 균열부, 시공이음부 등을 가지게 되며, 이러한 취약부에서 발생한 탄산화 깊이는 건전부에 비하여 크게 증가되는 것으로 알려져 있다.<sup>(4)</sup> Fig. 4에서는 대상구조물의 탄산화 측정결과를 나타내고 있는데, 교각 하부의 잦은 강우 및 상대적으로 높은 습도로 인해, 탄산화 깊이는 매우 낮은 수준으로 측정되었다. 일반적으로 탄산화 깊이는  $A\sqrt{t}$  와 같이 탄산화 속도계수( $A$ )와 시간의 제곱근의 곱으로 나타낼 수 있다. Fig. 4의 (b)에서는 탄산화 속도계수( $A$ ) 및 탄산화속도계수의 비(건전부/건전부, 균열부/건전부, 시공이음부/건전부)를 나타낸 것이다. 한편 균열부의 탄산화 깊이는 균열폭 0.1~0.2mm를 대상으로 하였는데, 미세균열이었으므로 정확한 균열폭을 측정하기가 어려웠다.

## 4. 확률론을 이용한 대상구조물의 내구 수명평가방법

### 4.1 내구적 파괴 확률식의 구성



(a) 평가된 탄산화 깊이 분포



(b) 탄산화 속도계수 및 비율

Fig. 4 대상 구조물의 탄산화 깊이 및 특성

본 장에서는 탄산화에 따른 내구적 파괴확률을 산정하기 위해 건전부, 균열부, 시공이음부의 탄산화 속도식을 식(3)~(5)와 같이 도출하였다.

$$\text{건전부} \quad C = 0.4879 \sqrt{T} \quad (3)$$

$$\text{균열부} \quad C = 1.0210 \sqrt{T} \quad (4)$$

$$\text{시공이음부} \quad C = 0.7189 \sqrt{T} \quad (5)$$

여기서,  $C$ 는 탄산화 깊이(mm)를,  $T$ 는 사용기간(년)을 나타낸다.

기존의 연구에 의하면 탄산화 깊이는 동일한 시간조건에서 균열폭의 제곱근에 비례하게 증가한다고 알려져 있다.<sup>(4)(5)(6)</sup> 균열부의 균열폭을 평균 0.15mm로 가정한 뒤 탄산화 증가분을 고려하면 균열부의 탄산화

깊이는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 한편 건전부를 기준으로 한 시공이음부의 탄산화 깊이는 식(7)에 나타내었다.

$$C = (2.8195 \cdot \sqrt{w+1}) \cdot A_1 \cdot \sqrt{T} \quad (6)$$

$$C = 1.4736 \cdot A_1 \sqrt{T} \quad (7)$$

여기서,  $A_1$ 는 건전부의 탄산화 속도계수,  $w$ 는 균열 폭(mm)을 나타낸다.

시간에 따라 증가하는 탄산화깊이와는 다르게, 피복 두께는 일정하게 가정하고 있는데, 본 연구에서는 실험조사 결과를 이용한 피복두께의 확률분포를 도출하였다. Table 2에서는 정규분포를 가정한 피복두께의 측정결과를 나타내고 있다.

#### 4.2 부재 특성에 따른 내구적 파괴확률의 평가

본 장에서는 식(1) 및 식(2)를 이용하여 건전부, 균열부, 시공이음부 콘크리트의 내구적 파괴확률을 분석하도록 한다. Table 3에서는 건전부, 균열부, 시공

Table 2 정규분포를 가정한 피복두께의 측정결과

측정개소	평균	표준편차
30	6.85cm	3.55

Table 3 대상 구조물의 내구적 파괴확률

사용기간(년) (준공후 기간)	내구적 파괴확률(%)		
	건전부	균열부	시공이음부
10	2.96	3.30	3.11
20	3.09	3.59	3.30
30	3.19	3.83	3.46
40	3.27	4.04	3.59
50	3.35	4.24	3.71
60	3.42	4.42	3.83
70	3.48	4.60	3.94
80	3.54	4.76	4.04
90	3.60	4.92	4.14
100	3.66	5.08	4.23

· 기본정보 : 피복두께(D)=68.5mm, 표준편차=35.5mm  
 · 탄산화 깊이의 변동계수(v) : 0.18(건전부), 0.27(균열부), 0.29(시공이음부)

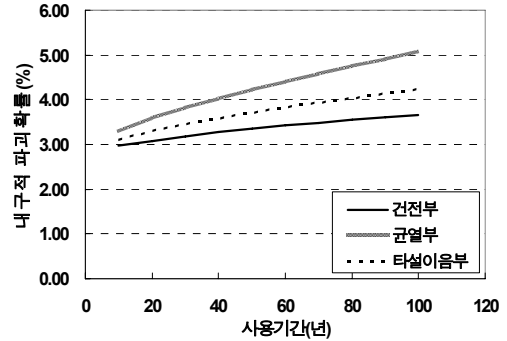


Fig. 5 내구적 파괴확률의 변화

이음부의 내구적 파괴확률을 나타내고 있으며, 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 본 논문에서 사용기간은 준공후 경과시간으로 구조물이 탄산화에 노출되어 있는 기간을 의미한다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 피복두께에 비하여 탄산화 깊이가 매우 작으므로 이에따라 내구적 파괴확률이 매우 작은 수준에서 증가함을 알 수 있다. 100년 경과후, 균열부에서는 건전부에 비하여 38.8%를, 시공이음부는 건전부에 비하여 15.6%의 내구적 파괴확률 증가를 나타내고 있다.

#### 4.3 균열폭의 증가에 따른 내구적 파괴확률의 변화

균열부 탄산화 예측식인 식(6)을 이용하면 균열폭의 증가에 따른 내구적 파괴확률을 도출할 수 있다. 즉 피복두께의 평균과 변동계수를 그대로 사용하고, 식(1) 및 식(2)에서 사용되는 탄산화 속도계수(A)에 식(6)에서 도출된  $(2.8195 \sqrt{w+1})A_1$ 를 대입한 것이다. 광범위한 실험조사를 수행하여, 균열폭에 대한 탄산화 회귀분석식을 사용하는 것이 가장 바람직하지만, 본 연구에서는 0.1~0.2mm의 균열폭을 대상으로 하였으며, 이 결과를 이용하여 균열폭의 함수로 탄산화 깊이를 가정한 것이다.

Table 4에서는 균열폭에 따른 내구적 파괴확률의 변화를 나타냈으며, 이를 Fig. 6에 도시하였다.

Table 4 대상 구조물의 내구적 파괴확률

사용 기간 (년)	내구적 파괴확률(%)				
	건전부	균열부 0.1mm	균열부 0.2mm	균열부 0.3mm	균열부 0.4mm
10	2.96	3.24	3.36	3.45	3.53
20	3.09	3.50	3.68	3.82	3.95
30	3.19	3.71	3.94	4.13	4.30
40	3.27	3.89	4.18	4.41	4.61
50	3.35	4.06	4.39	4.66	4.90
60	3.42	4.22	4.60	4.90	5.18
70	3.48	4.37	4.79	5.14	5.44
80	3.54	4.52	4.98	5.36	5.70
90	3.60	4.66	5.16	5.58	5.95
100	3.66	4.79	5.34	5.79	6.19

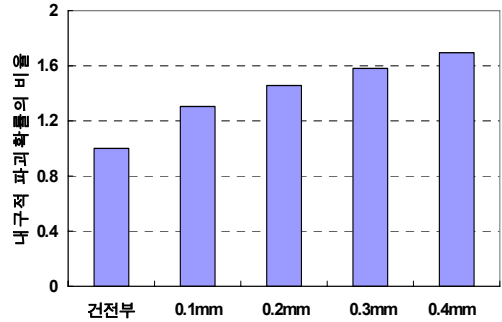


Fig. 7 균열폭에 따른 내구적 파괴확률의 비율

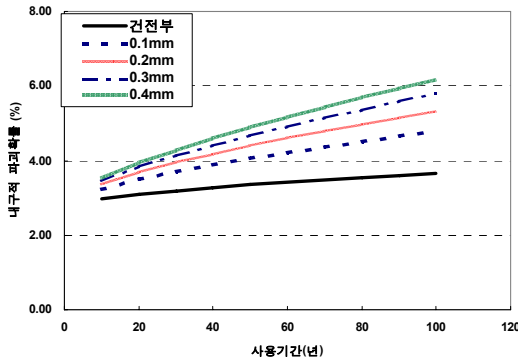


Fig. 6 균열폭에 따른 내구적 파괴확률의 변화

Fig. 6의 결과에 따르면 균열폭이 증가함에 따라 또 사용기간이 증가함에 따라 내구적 파괴확률이 최대 6.19%까지 증가함을 알 수 있다. 100년 경과후 내구적 파괴확률의 비율은 Fig. 7에 나타내었는데, 건전부에 비하여 균열폭 0.4mm인 경우 최대, 69%의 파괴확률 증가를 알 수 있다. 즉 동일한 부재라 하더라도 균열폭이 증가하면 내구적 파괴확률값이 크게 증가한다.

#### 4.4 피복두께에 따른 내구적 파괴확률의 변화

이러한 내구적 파괴확률의 변동성은 피복두께의 변화에 매우 민감한데, 피복두께의 감소에 따라 빠르게 내구적 파괴확률이 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 피복두께에 대한 영향을 분석하기 위하여 30mm,

50mm로 감소시켜 내구적 파괴확률을 조사하였다. 동일한 상태를 가정하기 위하여 변동계수(표준편차/평균)는 실태조사 결과인 0.52를 사용하였으며, 탄산화 변동계수 역시 건전부, 균열부, 시공이음부를 Table 3과 같이 고려하였다.

#### 1) 건전부, 균열부, 시공이음부의 내구적 파괴확률 변화

실태조사를 통하여 조사된 탄산화 속도를 기준으로 하고, 피복두께를 변화시키면서 내구적 파괴확률의 변화를 분석하였다. 계산결과는 실태조사의 탄산화 속도 계수에 피복두께의 변화만 고려한 것이며 그 결과를 Table 5 및 Fig. 8에 도시하였다.

Table 5 대상 구조물의 내구적 파괴확률

사용 기간 (년)	피복두께 30mm			피복두께 50mm		
	내구적 파괴확률(%)			내구적 파괴확률(%)		
	건전부	균열부	타설 이음부	건전부	균열부	타설 이음부
10	3.41	4.33	3.79	3.12	3.61	3.32
20	3.74	5.20	4.33	3.30	4.04	3.61
30	4.00	5.97	4.78	3.44	4.41	3.84
40	4.24	6.68	5.20	3.56	4.74	4.04
50	4.46	7.37	5.59	3.67	5.04	4.23
60	4.66	8.03	5.96	3.78	5.33	4.40
70	4.86	8.68	6.33	3.88	5.61	4.57
80	5.05	9.32	6.68	3.97	5.88	4.73
90	5.23	9.95	7.02	4.06	6.14	4.89
100	5.41	10.58	7.36	4.14	6.40	5.04

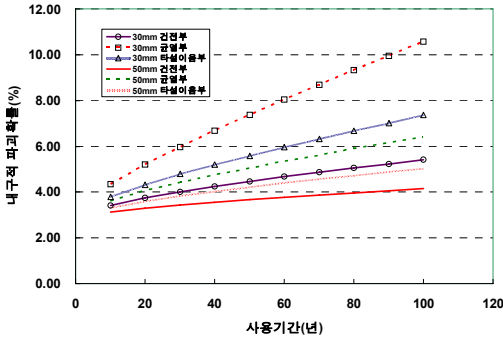


Fig. 8 피복두께의 변화에 따른 내구적 파괴확률의 변화

100년 경과시 피복두께가 30mm, 50mm인 경우, 취약부(균열부, 시공이음부)의 내구적 파괴확률은 건전부에 비하여 각각 36~95%, 21~54% 정도 증가함을 알 수 있다. 피복두께는 가장 적극적으로 열화인자에 대처할 수 있는 방안이며 피복두께가 낮을수록 내구적 파괴확률의 증가가 빨라지므로 이의 확보가 매우 중요함을 알 수 있다.

2) 피복두께와 균열폭에 따른 내구적 파괴확률의 변화  
 균열폭의 증가에 따라 내구적 파괴확률은 빠르게 증가하며, 이러한 경향은 피복두께가 작아질수록 더욱 커진다. Table 6에서는 균열폭과 피복두께(3cm, 5cm)의 변화에 따른 내구적 파괴확률의 변화를 나타내고 있으며 이를 Fig. 9에 나타내었다. 피복두께 3cm인 경우, 균열폭이 0.1~0.4mm로 증가하면서

Table 6 피복두께와 균열폭에 따른 내구적 파괴확률의 변화

사용 기간 (년)	피복두께 3cm				사용 기간	피복두께 5cm			
	균열부 0.1 mm	균열부 0.2 mm	균열부 0.3 mm	균열부 0.4 mm		균열부 0.1 mm	균열부 0.2 mm	균열부 0.3 mm	균열부 0.4 mm
10	4.15	4.49	4.77	5.02	10	3.52	3.69	3.83	3.95
20	4.90	5.47	5.94	6.36	20	3.90	4.17	4.39	4.59
30	5.56	6.33	6.99	7.57	30	4.22	4.58	4.87	5.13
40	6.17	7.14	7.98	8.73	40	4.50	4.94	5.31	5.63
50	6.74	7.92	8.94	9.86	50	4.76	5.29	5.72	6.11
60	7.30	8.69	9.87	10.97	60	5.01	5.61	6.11	6.56
70	7.85	9.43	10.80	12.06	70	5.25	5.93	6.49	7.00
80	8.38	10.17	11.72	13.14	80	5.48	6.23	6.86	7.43
90	8.91	10.90	12.62	14.22	90	5.71	6.53	7.23	7.86
100	9.43	11.62	13.53	15.28	100	5.93	6.83	7.58	8.27

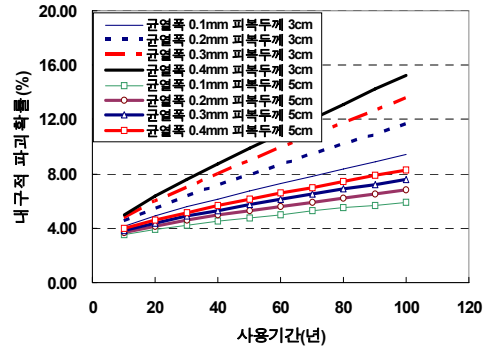


Fig. 9 균열폭과 피복두께에 따른 내구적 파괴확률의 변화

최대 62%의 파괴확률의 증가를 나타내고 있으며 5cm인 경우 40%의 파괴확률의 증가를 나타내고 있다. 한편 피복두께가 3cm, 균열폭 0.1mm의 내구적 파괴확률이 피복두께 5cm, 균열폭 0.4mm보다 높은 내구적 파괴확률을 나타내고 있었다. Fig. 9에서 파괴확률이 거의 일정하게 증가하는 것처럼 보이는 것은 변동계수가 0.52로 비교적 큰 조건의 확률분포가 가지는 특성으로, 초기에는 완만한 파괴확률의 증가를 보이다가, 사용기간의 증가에 따라 일정하게 증가하게 된다. 한편 변동계수가 0.1~0.2정도의 작은 조건에서는 초기에는 급격한 확률증가를 보이지만, 이후 완만한 확률이 증가하는 특성을 가지고 있다.

3) 목표내구적 파괴확률을 고려한 내구수명의 변화  
 본 장에서는 도출된 내구적 파괴확률과 사용기간의 관계를 통하여, 내구수명을 도출하도록 한다. 기존의 이론에서는, <sup>(13)</sup> 일정시점에서 외부작용외력과 내부저항응력과의 절대치 비교를 통한 결정론적 설계방법(deterministic design method)이 있으며, 목표내구수명동안 목표파괴확률을 넘지 않게 하는 확률론적 설계방법(stochastic design method)으로 크게 분류할 수 있다. 본 연구에서는 확률론적 설계방법을 따르며 하며 식(8)과 같이 정리할 수 있다.

$$P(\text{failure})_t = P(R - S < 0)_t < P_{fmax} \quad (8)$$

여기서,  $P(\text{failure})_t$ 는 시간의존적인 내구적 파괴확

률로서 확률변수인 외력( $S$ )이 확률내력 내력( $R$ )보다 클 경우를 의미하며,  $P_{fmax}$ 는 내구적 파괴확률의 최대치, 즉 목표 내구적 허용확률을 나타낸다.

일반적으로 정규분포함수와 파괴확률과의 관계는 신뢰도지수( $\beta$ )로 정리할 수 있는데  $-\infty$ 에서  $\beta$ 까지의 정규분포값을 적분한 값이 파괴확률이 된다. 구조안전성 설계에서는 1.75~3.2정도의 신뢰도 지수( $\beta$ )를 가지도록 하고 있으며, 이는 4.00%~0.07%의 수준을 나타내고 있다.<sup>(12)</sup> 그러나 이러한 값을 내구성에 고려하기에는 너무 보수적인 값으로 평가되며, 국내시방서(2004)에서는 탄산화에 대하여, 안전률 1.2, 즉 목표 신뢰도 지수를 1.3으로 정하고 있다. 신뢰도 지수 1.3은 정규분포표(1- $\phi(\beta)$ )를 이용하면 9.68%의 내구적 파괴확률( $P_f$ )을 가지게 된다.

실태조사시의 탄산화 속도를 사용하고 피복두께를

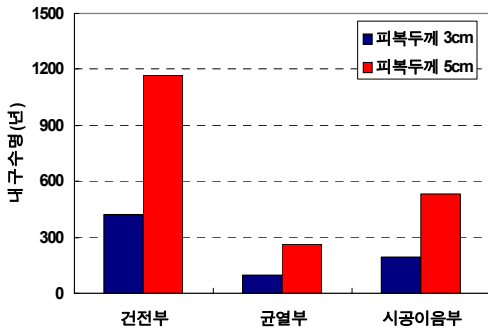


Fig. 10 피복두께 변화에 따른 내구수명 분포

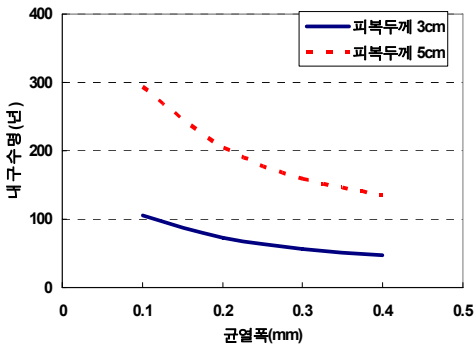


Fig. 11 균열폭과 피복두께에 따른 내구수명 분포

변화시킨 Fig. 8과 균열폭이 증가했을 경우를 가정한 Fig. 9에 대하여 내구수명을 평가하면 Fig. 10 및 Fig. 11와 같이 내구수명 변화를 도출할 수 있다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 탄산화 속도가 매우 낮은 수준이므로 내구수명은 매우 크게 평가되었으나, Fig. 11과 같이 피복두께가 작고 균열폭이 큰 경우에는 내구수명이 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있었다. 특히 피복두께 3cm, 균열폭 0.2mm 이상인 경우는 모두 내구수명 100년을 확보하지 못하는 결과를 알 수 있다. 피복두께가 3cm 이하인 부재에서 발생한 0.2mm 이상의 균열폭에 대해서는 적절한 보수를 선택하여 탄산화의 진전을 제어할 필요가 있다.

4) 변동계수의 변화에 따른 내구적 파괴확률  
5장에서 분석한 확률분포 및 내구수명 분포는 변

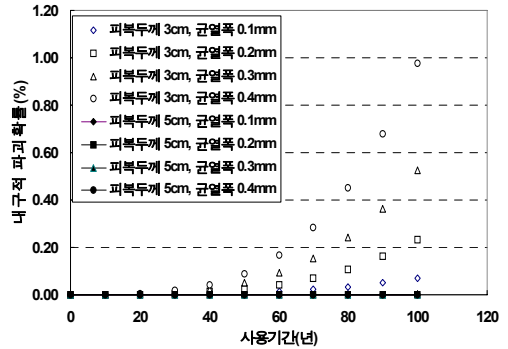


Fig. 12 균열폭과 내구적 파괴확률(C.O.V.=0.2)

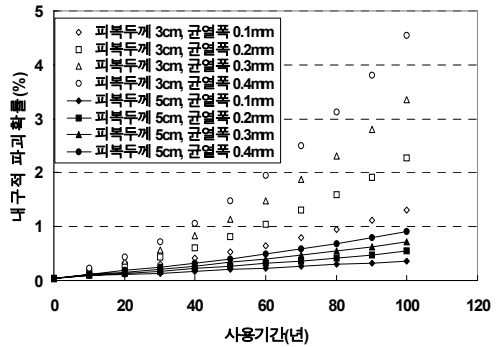


Fig. 13 균열폭과 내구적 파괴확률(C.O.V.=0.3)



동계수를 0.52를 사용하였으므로, 대상 구조물에만 적용될 뿐 일반적인 확률분포를 나타내지 못하고 있다.

본 절에서는 일반적으로 나타나는 피복두께 변동계수 수준인 0.2 및 0.3을 적용하여 내구적 파괴확률의 변화를 분석하도록 한다. 0.52에서 0.2 및 0.3으로 변동계수가 감소함에 따라 내구적 파괴확률은 매우 작게 감소하였다. Fig. 12에서는 변동계수 0.2에 대하여 도시하였는데, 피복두께가 5cm인 경우는 내구적 파괴확률이 매우 작은 수준으로 평가되어서 값의 차이가 명확하지 않지만, 피복두께가 3cm인 경우에는 균열폭 0.4mm, 사용기간 100년시 최대 0.976%의 내구적 파괴확률이 평가되었다.

Fig. 13에서는 변동계수 0.3에 대하여 도시하였는데, 피복두께 3cm, 균열폭 0.4mm, 사용기간 100년시, 4.554%의 내구적 파괴확률을 보임으로서, 5배 가량 증가함을 알 수 있다. 콘크리트 구조물의 변동계수는 콘크리트의 시공성을 나타내고 있으므로 정확한 시공과 재료의 품질확보가 필수적임을 알 수 있다.

## 5. 결 론

탄산화에 노출된 콘크리트 취약부의 확률론적 내구수명 평가를 통해 도출된 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 대도시에 노출된 RC 교각에 대하여 탄산화에 관련된 실태조사를 수행하였으며, 건전부, 균열부, 시공이음부의 탄산화 거동을 분석하였다. 한편 시간에 따른 탄산화 깊이와 실태조사 결과를 기본으로 한 피복두께를 확률변수로 선정하여 내구적 파괴확률을 평가하였다.
- 2) 국내의 내구성 평가기준인 목표내구적 파괴확률과의 비교를 통하여, 대상구조물의 내구수명을 평가하였다. 내구수명은 균열폭의 진전에 따라서 크게 감소하였는데, 균열폭이 0.1에서 0.4mm로 증가할 경우, 내구수명은 피복두께가 3cm일때 105년에서 48년으로, 5cm일때 292년에서 135년으로 감소하였다.

- 3) 변동계수를 변화하면서 해석한 결과, 변동계수가 낮을수록 내구적 파괴확률은 매우 빠르게 감소하였으므로, 콘크리트의 피복두께 확보와 품질확보가 내구성 설계에서 매우 중요한 인자임을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 권성준, 송하원, 변근주, "탄산화에 노출된 균열 콘크리트 구조물의 확률론적 내구설계", 대한토목학회논문집, 제25권, 5A호, 2005, pp. 741-750.
2. 건설교통부, "콘크리트 표준시방서(내구성편)", 2004.
3. 和泉意登志, "構造物の耐久性設計手法例—鐵筋のがぶり厚さの信頼性設計手法—", 콘크리트工学, 26, No. 11, 1988, Nov., pp. 38-42.
4. 阿部保彦, "ひび割れ幅がコンクリートの中性化深さに及ぼす影響に関する文獻調査結果", 콘크리트構造物のリハビリテーションに 關するシンポジウム論文集, 1999, Jan., pp. 7-14.
5. 和泉意登志, 嵩英雄, "コンクリートのひび割れ, 打継ぎ, 豆板部における中性化の進行", セメント・コンクリート, No. 448, 1984, pp. 50-55.
6. 日本土木學會, "コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と對策", 土木學會, 콘크리트라이ブラリー 103, 2000.
7. 和泉意登志, 喜多達夫, 前田熙信, 中性化, 技報堂出版, 1986.
8. CEB, General Task Group 20, "Durable concrete structure-Design Code", CEB, Thomas Telford, 1989.
9. CEB Task Group 5.1, 5.2, "New Approach to Durability Design", Sprint-Druck, Stuttgart, 1997, May.
10. Gjørv, O. E., "Steel Corrosion in Concrete Structures Exposed to Norwegian Marine Environment", Concrete International, Vol. 16, No. 4, 1994, pp. 35-39.
11. Gjørv, O. E., "Durability Design and Construction Quality of Concrete Structures", Proceedings of the 4th International Conference on Concrete, Seoul, Korea, CONSEC04, 2004, Vol. 1, pp. 44-55.
12. Nawy, E. G., "Reinforced Concrete-A Fundamental Approach", Prentice Hall, Inc. 2nd Edition, 1990, pp. 69-72.

- 
13. RILEM, "Durability Design of Concrete Structures", Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN SPON, 1994.
  14. Vesikari, E., "Service Life of Concrete Structures with regard to Corrosion of Reinforcement",

Technical Reports 533, Technical Report Center of Finland, 1988.

(접수일자 : 2006년 10월 9일)