

부등침하의 영향이 반영된 철근콘크리트 구조물 잔존수명 평가모델

이상훈¹, 한선진², 조해창³, 이윤정¹, 김강수^{4*}

Remaining Service Life Estimation Model for Reinforced Concrete Structures Considering Effects of Differential Settlements

Sang-Hoon Lee¹, Sun-Jin Han², Hae-Chang Cho³, Yoon Jung Lee¹, Kang Su Kim^{4*}

Abstract: Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC) specifies that the safety inspection and precise safety diagnosis of concrete structures shall be conducted in accordance with the 'Special Law on Safety Management of Infrastructure'. The detailed safety inspection and precise safety diagnosis guidelines presented by KISTEC, however, gives only the grade of members and structures, and thus it is impossible to quantify remaining service life (RSL) of the structures and to quantitatively reflect the effect of differential settlements on the RSL. Therefore, this study aims to develop a RSL evaluation model considering the differential settlements. To this end, a simple equation was proposed based on the correlations between differential settlements and angular distortion, by which the angular distortion of structures was then reflected in nominal strengths of structural members. In addition, the effects of the differential settlements on the RSL of structures were analyzed in detail by using the safety diagnosis results of actual concrete structure.

Keywords: reinforced concrete, remaining service life, differential settlement, angular distortion

1. 서론

국내 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 구조물은 '시설물의 안전관리에 관한 특별법 (국토교통부, 2016)'에 따라 안전점검 및 정밀안전진단이 실시된다(시설물유지관리지침, 2012). 국외 안전진단 방법(JSCE, 1995, ICC, 2012)과 비교하여 한국시설안전공단에서 제시하는 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(한국시설안전공단, 2011)은 퍼지이론을 도입하여 진단자의 주관적인 판단을 최소화하고 있다. 퍼지이론은 주로 인공지능분야에 사용되는 이론이며, 최근에는 공학분야에서 수치 해석이 어려운 문제들을 해결하기 위하여 널리 사용되고 있다(Kim et al., 2006). 한국시설안전공단의 평가방법은 평가결과를 등급의 형태로 제시하지만, RC 구조물의 잔존수명을 제공하지는 않는다. 구조물의 잔존수명은 구조물의 목표수명에서 사용 연수를 제외하여 산정할 수 있으며, 목

표수명은 콘크리트 표준시방서(2009)에서 구조물의 내구 등급 및 시설물의 용도에 따라 30, 65, 100년 등으로 설정할 수 있다.

한편, RC구조물의 잔존수명을 정량적으로 평가하기 위하여 Cho(2017)의 연구에서는 ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, Jang et al., 1997) 및 구조신뢰성이론(Szerszen, 2003)을 도입하였다. Cho(2017)의 제안모델은 콘크리트 압축강도, 물-결합재비, 균열폭, 염소이온농도, 염소이온 확산계수, 콘크리트 탄산화 깊이 및 표면상태 등이 종합적으로 고려된 복합열화현상 뿐만 아니라, 구조신뢰성 이론에 근거하여 산정된 부재의 파괴확률이 내구성능에 미치는 영향을 반영할 수 있고, 부재 뿐만 아니라 층 및 구조물 전체의 잔존수명을 평가할 수 있다. Cho(2017)의 모델은 기둥, 보, 슬래브, 벽체 등 지반 위에 위치한 부재들에 발생된 구조성능 저하가 구조물의 잔존수명에 미치는 영향을 반영할 수 있다는 장점이 있지만, 지반의 부등침하가 구조물의 잔존수명에 미치는 영향을 반영할 수 없다. 구조물에 발생된 부등침하는 지반에 위치한 기초뿐만 아니라, 구조물을 구성하고 있는 부재 전반에 걸쳐 내구성능 및 구조성능을 저하시킬 수 있다. 부등침하는 구조물 전체적으로 각변위를 발생시켜 기초, 기둥, 보 등의 부재에 균열 등의 손상을 유발하며, 이로 인해 콘크리트 탄산화, 염화이온 침투 등의 콘크리트 열화가 가속화될 뿐만 아니라 구조체의 휨 및 전단 성능이 감소되어 구조물 전체의 잔존수

¹정회원, 서울시립대학교, 건축공학과, 석사과정

²정회원, 서울시립대학교, 건축공학과, 박사과정

³정회원, 드림구조 기업부설연구소, 선임연구원

⁴정회원, 서울시립대학교, 건축공학부, 교수, 교신저자

*Corresponding author: kangkim@uos.ac.kr

Department of Architecture, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

명에 영향을 미친다.

한국시설안전공단에서는 안전진단 종합평가에 구조물의 부등침하를 반영하도록 규정하고 있다 (한국시설안전공단, 2011). 따라서, 부등침하는 RC 구조물의 잔존수명 평가에도 반영되는 것이 합리적이라고 볼 수 있을 것이다. 이 연구에서는 RC 구조물의 각변위를 잔존수명 평가모델에 반영함으로써 부등침하가 RC 구조물의 잔존수명에 미치는 영향을 고려하고자 하였다.

2. 기존의 안전진단 방법

2.1 한국시설안전공단 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 의한 평가방법

한국시설안전공단에서 제시하고 있는 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에서는 진단자의 주관적인 판단에 의해서 결정되는 안전진단방법과는 달리 퍼지이론을 도입함으로써 객관적인 평가결과를 얻을 수 있는 체계적이고 합리적인 평가방법을 제공하고 있다. 세부지침에 따른 평가결과인 안전진단등급은 구조물의 안전성, 상태, 기울기 및 침하를 부재 개별적으로 평가한 후 이를 종합하여 산정되며, Table 1에 나타난 바와 같이 총 5개의 등급으로 구분된다. RC 구조물을 구성하고 있는 기둥, 벽, 보, 슬래브 등 각 부재의 내력과 작용하중의 비율 등을 이용하여 구조물의 안전성을 평가할 수 있으며, 콘크리트 탄산화 깊이, 표면 염화이온 농도, 균열폭 등의 내구성 저하요인이 RC 구조물의 내구성에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 구조물의 기울기는 구조물에 발생된 각변위를 이용하여 평가되며, 부등침하로 인한 각변위는 구조물 최상단에서 측정된 수평변위 (δ)를 구조물의 높이 (l)로 나누어 산정할 수 있다. 다만, 앞서 언급한 바와 같이 한국시설안전공단에서 제시하고 있는 안전진단 평가방법은 평가결과를 등급으로만 제공하기 때문에 구조물의 잔존수명을 알 수는 없다.

2.2 잔존수명평가 모델

시간이 지남에 따라 RC 구조물의 내구성능은 복합열화현상에 의해 감소되며, 복합열화 메커니즘은 매우 복잡하기 때문에 내구성능 저하현상을 수치해석적으로 예측하기는 매우 어렵다 (Cho et al., 2016). 따라서, Cho(2017)는 Figs. 1 and 2에 나타난 바와 같이 ANFIS 및 구조 신뢰성이론을 활용하여 RC 구조물의 잔존수명을 정량적으로 평가할 수 있는 모델을

Table 1 Evaluation results on safety inspection of RC structures (Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, 2011)

Grade	Evaluation	Score Range
A	The structures are on best conditions without any damage.	$0 \leq X < 2$
B	There are minor damages, but they do not affect performances of structures, and some repairs are necessary.	$2 \leq X < 4$
C	There are minor damages in major structural members, but they do not affect safety of entire structures, and some repairs and reinforcements are necessary.	$4 \leq X < 6$
D	There are noticeable damages in major structural members, and thus urgent repairs and reinforcements are necessary. In addition, the availability of the structures shall be determined.	$6 \leq X < 8$
E	There are serious damages in major structural members, and thus the use of structures shall be prohibited because of its safety risks.	$8 \leq X < 10$

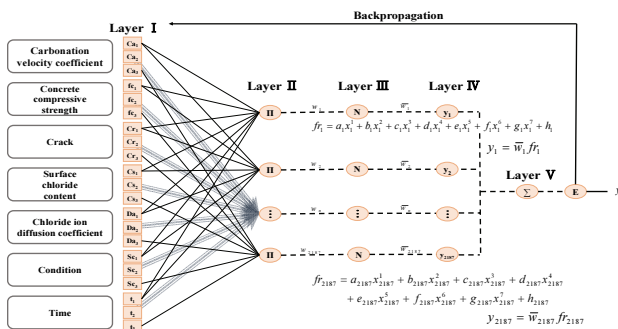
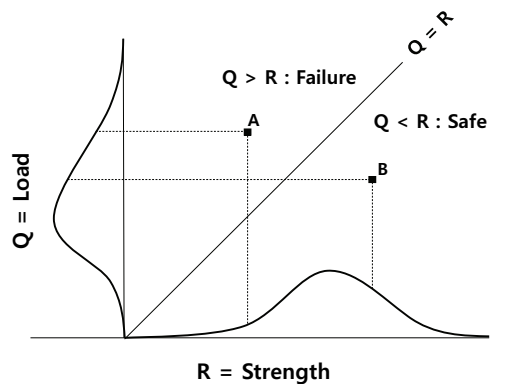
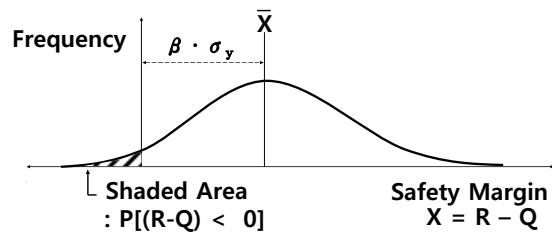


Fig. 1 ANFIS algorithm



(a) Random variable of strength and load



(b) Failure probability

Fig. 2 Structural reliability theory

개발하였다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 강도(R)와 하중(Q)을 확률변수로 나타내어 강도와 하중이 같은 경우를 한계상태로 정의하였으며, Fig. 2(b)에 나타난 것과 같이 확률밀도함수를 이용하여 각 부재별 파괴확률 (failure probability)을 산정하고, 이를 부재의 중요도 계수에 반영하여 구조물 잔존수명 평가에 적용하였다. Cho(2017)의 모델은 구조물의 내력비와 내구성능을 모두 잔존수명 평가에 반영할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 부등침하로 인해 구조물에 발생하는 각변위를 반영하지 못하기 때문에 침하가 심하게 발생된 RC 구조물의 잔존수명을 과대평가 할 수 있다.

3. 제안모델

3.1 구조물 부등침하와 각변위의 상관관계

부등침하는 구조물 기초부에 작용하는 불균등 하중 또는 자연환경의 변화로 인하여 기초지반이 약화됨에 따라 발생하는 현상이다. 부등침하가 발생한 경우에는 구조물의 하중전달 메커니즘이 변화하고, 구조체에 균열이 발생하므로 구조물 전체의 내구성능 및 구조성능이 감소한다 (Jeong et al., 1995).

Skempton and Macdonald(1956)는 북미 및 유럽 지역에 위치한 오피스 및 창고형태 구조물의 침하량과 각변위를 측정하여 이들의 상관관계를 분석하였다. 측정된 구조물은 온통기초로 이루어져 있으며, 구조물을 지지하고 있는 지반은 점토질과 사질로 구성되어 있었다. 점토질 지반의 구조물에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 침하에 의한 기울기가 대략 1/1250으로 나타났으며, 사질 지반에서는 약 1/750으로 나타났다. 또한, Skempton and Macdonald는 구조물에 발생한 각변위에 따른 구조물의 손상여부를 내력벽구조와 프레임구조로 구분하여 Fig. 4와 같이 제시하였으며, 1/300의 각변위 부터는 균열 등과 같은 결함이 발생하

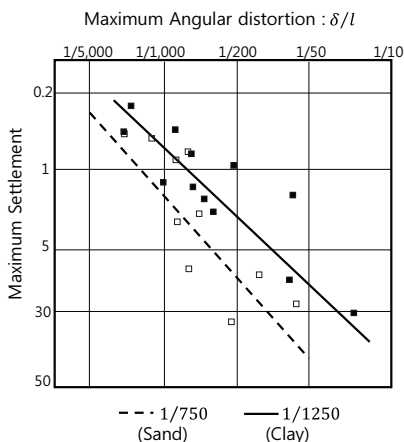


Fig. 3 Correlation between settlements and angular distortions(Skempton and Macdonald, 1956)

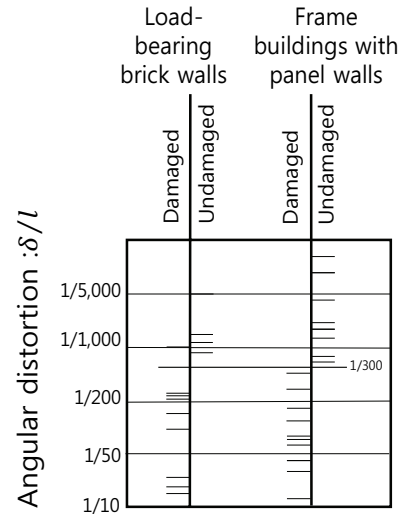


Fig. 4 Structure damages in accordance with angular distortions(Skempton and Macdonald, 1956)

Table 2 Evaluation results on angular distortions of RC structures (Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, 2011)

Grade	Angular distortion limits	Condition
A	~ 1/750	Limit for sensitive machine foundations
B	~ 1/500	Cracking limit of structures
C	~ 1/250	Detection of inclination of structures
D	~ 1/150	Limit for structural damage
E	1/150 ~	Safety limit of all structures

여 구조물의 구조안전성에 큰 영향을 미친다고 보고하였다. Bjerrum(1963)도 Skempton and Macdonald(1956)와 유사한 연구결과를 보고하였으며, 한국시설안전공단에서는 그들의 연구결과를 근거로 부등침하 및 각변위에 대한 평가등급을 Table 2와 같이 5개 등급으로 규정하였다. 구조물의 시공오차 범위에 해당하는 기울기 1/750 이내일 경우에는 A등급으로 분류되고, 기울기가 1/250을 초과하는 경우에는 구조물의 안전성에 위협이 있다고 판단하여 최저등급인 E등급으로 분류된다.

3.2 구조물 기울기의 영향을 반영하기 위한 변수분석

이 연구에서는 각변위가 구조 안전성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 한국시설안전공단의 평가방법을 기반으로 변수분석을 실시하였다. Fig. 5는 안전성평가등급 (구조 안전성 및 내구성 상태평가 등급)을 고정하고, 구조물의 각변위에 따른 종합평가등급을 산정한 결과이다. 그래프 내에서 실선으로 표현된 선은 한국시설안전공단의 평가방법을 이용하여 산정한 평가등급이며, 종합평가등급은 각변위가 증가함에 따라 낮아지는 것을 알 수 있다. 이 연구에서는 부등침하에 의한 각

변위가 구조물 전체 종합평가 등급에 미치는 영향을 간략히 반영하기 위하여 Fig. 5의 점선으로 표현된 바와 같이 각변위와 구조물 종합평가 등급 사이의 관계식을 아래와 같이 도출하였다.

$$P = a - a(125 \frac{\Delta}{l})^2 \quad (1)$$

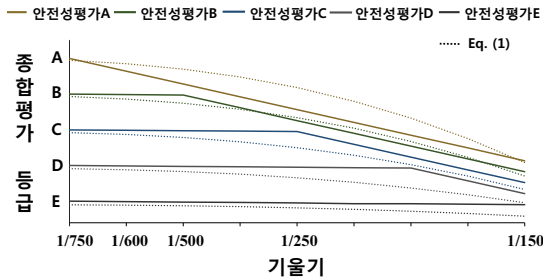


Fig. 5 Comparison of evaluation results using safety diagnosis guidelines and equation 1

여기서, P 는 구조물 각변위가 반영된 종합평가점수, a 는 구조 안전성 및 내구성 상태평가 등급, Δ/l 는 구조물의 각변위이다. 다만, 각변위가 1/150 이상인 구조물은 붕괴 직전의 매우 위험한 상태이기 때문에 각변위가 1/150을 초과하는 경우에 대해서는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 종합평가점수가 0에 근접하도록 Eq. (1)을 다음과 같이 수정하였다.

$$P = a - a[(150 \frac{\Delta}{l})^3 - \frac{1}{125}] \quad (2)$$

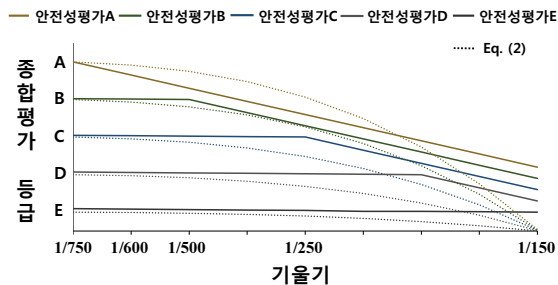


Fig. 6 Comparison of evaluation results using safety diagnosis guidelines and equation 2

3.3 구조물 기울기의 영향이 반영된 잔존수명 평가 모델

Cho(2017)가 제안한 잔존수명평가모델은 부재별 소요강도가 공칭강도를 초과하는 경우에는 잔존수명이 없는 것으로 간주한다. 이 연구에서는 구조물의 각변위의 영향을 부재의

공칭강도에 반영함으로써 부등침하가 구조물 잔존수명에 미치는 영향을 고려하고자 하였다. 구조물의 각변위에 따른 공칭강도 ($\phi R_n'$)는 앞서 제시한 Eq. (2)를 사용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi R_n' = \phi R_n - \phi R_n [(150 \frac{\Delta}{l})^3 - \frac{1}{125}] \quad (3)$$

여기서, ϕR_n 은 각변위의 영향이 반영 되지 않은 공칭강도이다. 부재의 잔존수명을 평가하기 위하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 콘크리트 압축 강도, 물-결합재비, 균열폭, 표면 염소이온농도, 염소이온 확산계수, 콘크리트 탄산화 깊이 및 표면 상태를 입력변수로 설정하여 ANFIS 해석을 수행하였으며, 이를 위하여 각각의 입력변수를 아래와 같이 종형 소속함수를 이용하여 퍼지화 하였다.

$$bell(x; x_c, x_w, x_q) = \frac{1}{1 + \frac{x - x_c}{x_w}}^{2x_q} \quad (4)$$

여기서, x 는 입력변수, x_c 는 퍼지집합의 중앙값, x_w 는 퍼지집합의 폭, x_q 는 퍼지집합의 형상계수이다. 이 연구에서는 Macqueen(1967)이 제시한 방법 (k-means clustering)을 이용하여 초기 값을 가정하였다. 총 7개의 입력변수에 대한 퍼지 집합을 3개씩 구성하여 2187 ($=3^7$)개의 퍼지규칙을 구성하였으며, 각각의 퍼지규칙 (fr_i)은

$$y_i = \overline{w_i} fr_i = \overline{w_i} (a_i x_i^1 + b_i x_i^2 + c_i x_i^3 + d_i x_i^4 + e_i x_i^5 + f_i x_i^6 + g_i x_i^7 + h_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 2187) \quad (5)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 y_i 는 복합열화가 반영된 콘크리트 탄산화 깊이를 의미하며, 콘크리트의 잔존수명을 예측하는데 사용된다. $\overline{w_i}$ 는 각 퍼지규칙에 대한 정규화된 소속함수이며, x^1 은 물결합재비, x^2 는 콘크리트 압축강도, x^3 은 균열폭, x^4 은 콘크리트 표면염소이온농도, x^5 는 염화물이온 확산계수, x^6 은 표면노후 상태, x^7 은 시간, $a_i \sim h_i$ 는 ANFIS 학습 과정에서 최소제곱법을 통하여 산정되는 상수항으로써 ANFIS 결론부 인자로 활용된다.

퍼지규칙의 결과 값은 퍼지 값 (fuzzy values)으로 이루어져 있기 때문에 정량화된 크리스프 값 (crisp values)으로 변환하기 위해서는 아래와 같은 비퍼지화 (defuzzification) 과정을 거쳐야 한다 (Cho et al., 2015).

$$y = \sum_{i=1}^{2187} y_i = \sum_{i=1}^{2187} w_i f r_i \quad (6)$$

ANFIS는 Figure 1에 나타난 바와 같이 도출된 결과 값과 실측값의 오차가 최소가 될 때까지 최소제곱법과 역전파알고리즘으로 반복 학습을 한다.

구획의 잔존수명은 구획에 위치한 보, 기둥 및 슬래브 부재의 잔존수명에 각 부재별 중요도를 반영하여 산정한다. Cho(2017)는 구획의 잔존수명 평가 시 기둥 (C), 내력벽 (W), 큰보 (G), 작은보 (B), 슬래브 (S)에 대한 중요도를 다음과 같이 제안하였다.

$$g'_C = 0.27 \quad g'_W = 0.27 \quad g'_G = 0.21 \quad g'_B = 0.15 \quad g'_S = 0.09 \quad (7)$$

구조물의 열화 또는 각변위에 따른 부재의 구조성능 감소를 고려한 수정 중요도 (\bar{g}_i)는 중요도 수정계수 (α_1, α_2)를 반영하여 산정할 수 있다.

$$\bar{g}_i = \frac{g'_i}{2} (1 + \alpha_1 + \alpha_2) \geq g'_i \quad (8)$$

$(i = C, W, G, B, S)$

여기서, α_1 은 구조성능 저하를 고려한 중요도 수정계수이며,

$$\alpha_1 = 1 - \frac{\beta_m}{\beta_t} \quad (9)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, β_m 은 부재의 신뢰도 지수 (reliability index), β_t 는 목표신뢰도 지수로써 휨 지배 부재일 경우에는 3.0, 전단 및 축력 지배 부재일 경우에는 3.5를 적용한다. 부재의 신뢰도 지수는 부재의 파괴확률을 나타내는 지표이며 기둥 (C), 내력벽 (W), 큰보 (G), 작은보 (B), 슬래브 (S) 각각에 대해서

$$\beta_m = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_Q^2}} \quad (i = C, G, B, S) \quad (10)$$

와 같이 산정할 수 있다. 여기서, μ_R 과 μ_Q 는 각각 공칭강도 및 작용하중의 평균, σ_R 과 σ_Q 는 각각 공칭강도 및 작용하중의 표준편차이다. 부등침하로 인해 발생하는 구조물의 각변위와 부재의 공칭강도에 미치는 영향을 반영하기 위하여 이 연구에서는 Equation 2를 공칭강도에 대한 평균과 표준편차인 μ_R 및 σ_R 에 적용하였다. 따라서, 구조물의 각변위의 영향이 반영

된 공칭강도의 평균 (μ_R')과 표준편차 (σ_R')는

$$\mu_R' = \frac{R_{normal} - R_{normal} \left[\left(150 \frac{\Delta}{l}\right)^3 - \frac{1}{125} \right]}{\lambda}$$

$$\sigma_R' = \frac{R_{normal} - R_{normal} \left[\left(150 \frac{\Delta}{l}\right)^3 - \frac{1}{125} \right]}{V\lambda} \quad (11)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, R_{normal} 은 부재의 공칭강도를 의미한다. 작용하중 및 공칭강도의 bias factor (λ) 및 COV (V)는 Table 3 및 Table 4에 나타난 바와 같이 Nowak and Szerszen(2003)의 연구결과를 참고하여 적용하였다.

Table 3 Bias factors and COV depending on member types (Nowak and Szerszen, 2003)

Type of structure and limit state	λ	V
Reinforced concrete beam, cast-in-place, flexure	1.114	0.119
Reinforced concrete beam, precast, flexure	1.128	0.113
Reinforced concrete beam, cast-in-place, shear	1.159	0.120
Reinforced concrete beam, precast, shear	1.170	0.116
Reinforced concrete slab, cast-in-place	1.052	0.169
Reinforced concrete slab, precast	1.146	0.116
Reinforced concrete column, cast-in-place, stirrup	1.107	0.136
Reinforced concrete column, precast, stirrup	1.102	0.134
Reinforced concrete column, cast-in-place, spiral hoop	1.163	0.124
Reinforced concrete column, precast, spiral hoop	1.156	0.122
Plain concrete, flexure, shear	1.004	0.082

Table 4 Bias factors and COV depending on types of loads (Nowak and Szerszen, 2003)

Type of load	λ	V
Dead load (cast-in-place)	1.05	0.10
Dead load (precast)	1.03	0.08
Live load	1.00	0.18
Snow load	0.82	0.26
Wind load	0.78	0.37
Seismic load	0.66	0.56

Eq. (8)에서 α_2 는 내구성능 저하를 고려한 중요도 수정계수이며, 다음과 같이

$$\alpha_2 = 1 - \frac{RSL_m}{RSL_t} \quad (12)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, RSL_m 은 부재의 잔존수명이며 RSL_t 는 구조물의 목표수명이다. 결과적으로, 구획의 잔존수명 평가방법은 구획을 구성하고 있는 부재의 잔존수명 평가결과와 각 부재의 중요도를 사용하여 산출한 기댓값(expectation value)으로 결정할 수 있다. 기댓값은 퍼지측도(Banon, G. 1981, Grabisch et al., 2007) 및 퍼지적분(Choquet, 1954)을 사용하여 산정할 수 있으며, 퍼지측도는

$$1 = (\overline{g}'_C \cup \overline{g}'_G \cup \overline{g}'_B \cup \overline{g}'_S) \\ = \overline{g}'_C + \overline{g}'_G + \overline{g}'_B + \overline{g}'_S \\ + \lambda(\overline{g}'_C \times \overline{g}'_G + \overline{g}'_C \times \overline{g}'_B + \overline{g}'_C \times \overline{g}'_S + \dots) + \dots \\ + \lambda^3(\overline{g}'_C \times \overline{g}'_G \times \overline{g}'_B \times \overline{g}'_S) \quad (13)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 λ 는 측도값으로, 모든 중요도의 합을 1로 정규화 시키는 계수이며, $\overline{g}'_C, \overline{g}'_G, \overline{g}'_B, \overline{g}'_S$ 는 각각 수정된 기둥, 큰보, 작은보 및 슬래브의 중요도이다. 그러나, 퍼지측도를 사용하는 경우에는 가중치(g_1, g_2, g_3)와 부재 잔존수명을 곱한 값들의 가법성이 성립되지 않으므로, 일반적인 기댓값 산정방법으로 가중평균값을 도출할 수 없다. 따라서, 이 연구에서는 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 Choquet 적분법을 적용하여 가중평균값을 산출하였다. Eq. (13)에 나타낸 퍼지측도법으로 산정한 측도값(λ)을 사용하여 가중치(g_1, g_2, g_3)들의 합집합을 구한 후 Fig. 7에 나타낸 ①~④의 각 면적을 산정하고 이를 더해주면 가중평균값이 산정되며, 이것이 곧 구획의 잔존수명이 된다.

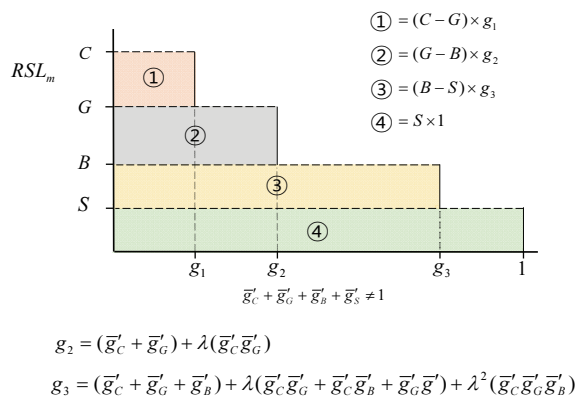


Fig. 7 Choquet integral method(Cho, H. C., 2017)

층 및 구조물 전체의 잔존수명도 구획의 잔존수명 산정방

법과 동일한 방법으로 퍼지측도 및 Choquet 적분을 이용하여 산정할 수 있으며, 구획 (I'_c) 및 층 (I'_f) 중요도는 다음과 같이

$$I'_c = \frac{A_c}{2} \times (1 + \alpha_{1,\max} + \alpha_3) \\ I'_f = \frac{I_f}{2} \times (1 + \alpha_{1,\max_f} + \alpha_4) \quad (15)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, A_c 는 구획이 속한 층 면적에 대한 구획의 면적 비율, $\alpha_{1,\max}$ 는 해당 구획에 위치한 부재들의 값 중 최대값, α_{1,\max_f} 은 해당 층에 위치한 부재들의 $\alpha_{1,\max}$ 값 중 최대값이며, I_f 는 층의 중요도로써

$$I_f = \frac{N - (n - 1)}{N} \quad (16)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, N 은 지하층을 포함한 구조물의 전체 층수, n 은 지하층을 포함한 해당 층수이다. α_3 및 α_4 는 각각 구획 및 층의 내구성능을 고려한 중요도 수정계수이며

$$\alpha_3 = 1 - \frac{RSL_c}{RSL_t} \\ \alpha_4 = 1 - \frac{RSL_f}{RSL_t} \quad (17)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, RSL_c 는 구획의 잔존수명이며, RSL_f 는 층의 잔존수명이다.

4. 구조물의 기울기를 반영한 구조물 수명평가

4.1 구조물 현장데이터

Table 5에는 제안모델을 검증하기 위한 현장 구조물의 진단결과를 나타내었으며, 대상 구조물은 Cho(2017)의 연구를 참조하여 선정하였고 구조물의 목표수명은 65년이다. 다만, 진단결과에서 부등침하에 대한 측정 데이터가 누락되어 있어 제안모델을 통한 평가시에는 시설안전공단의 부등침하 평가 기준을 참조하여 각변위에 따른 잔존수명의 변화를 상세히 분석하고자 하였다.

구조물 A는 지하 1층 지상 4층으로 이루어진 철근콘크리트 구조물이며, 이 구조물에 대한 현장조사는 준공 후 35년이 지난 시점에서 실시되었다. 진단결과, 콘크리트 평균 압축강도는 28.18 MPa이었으며, 표면상태는 비교적 양호한 것으로 나

Table 5 Field data for estimating remaining service life

Structure	A	B
Period of use (year)	35	34
Floor information	1 basement, 4 floors	1 basement, 4 floors
Surface chlorine ion concentration (kg/m ³)	0.27	0.67
Compressive strength of concrete (MPa)	28.18	23.58
Chlorine ion diffusion coefficient (m ² /year)	3.19×10^{-6}	8.89×10^{-6}
Surface condition of concrete (good, normal, bad)	normal	bad
Measured maximum crack width (mm)	0.3	0.4

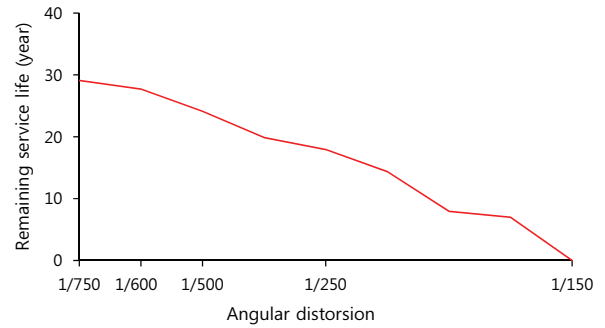
타났고, 균열 폭은 총 38개의 부재에서 약 0.05 ~ 0.3 mm 범위로 계측되었다. 또한, 콘크리트 부재의 한 부위를 드릴로 천공하여 깊이별로 콘크리트 시료를 채취하였으며, 이들의 염소이온 농도를 측정함으로써 염소이온 확산계수를 산출하였다.

구조물 B의 경우, 규모는 구조물 A와 거의 유사하며 현장 조사는 준공 후 34년이 지난 시점에서 실시되었다. 콘크리트 평균 압축강도는 23.58 MPa이었으며, 표면상태는 다소 보수가 필요한 것으로 나타났고, 균열 폭은 총 47개의 부재에서 약 0.1 ~ 0.4 mm 범위로 계측되었다.

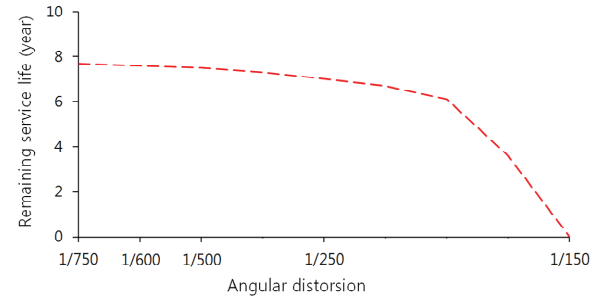
4.2 잔존수명 평가결과

Figure 8(a)에는 각변위의 크기에 따른 구조물 A의 잔존수명 평가결과를 나타내었다. 구조물의 각변위가 시공오차인 1/750이하로 매우 작은 경우에는 구조물의 잔존수명이 약 30년으로 평가되었다. 이는 현재 구조물 A의 사용연한이 35년이고, 목표수명이 65년인 점을 고려할 때 구조물 A는 목표연한까지 사용하는데 무리가 없음을 의미한다. 다만, 구조물에 부등침하가 발생하여 각변위가 증가하면 구조물 전체의 잔존수명은 감소하는 것으로 나타났다. 각변위 1/600에서 계산된 구조물 A의 잔존수명은 각변위의 영향을 고려하지 않은 잔존수명 평가결과에 비하여 약 4.8% 감소한 27.7년이었다. 구조물 전체의 잔존수명은 각변위 1/600 이후에 더욱 급격히 감소하는 경향을 나타내었으며, Table 2에 나타난 구조물 위험기준인 1/250 각변위에서는 잔존수명이 11.2년까지 감소되는 결과를 나타내었다. 특히, 1/150의 각변위에서는 구조물의 잔존수명이 0에 수렴하는 결과를 보였으며, 이는 Equation 11에 나타난 바와 같이 공칭강도가 각변위 1/150 시점에서 0에 근접하기 때문이다.

Figure 8(b)에는 각변위의 크기에 따른 구조물 B의 잔존수명 평가결과를 나타내었다. Table 5에 나타난 것과 같이 구조



(a) Evaluation results of A structure



(b) Evaluation results of B structure

Fig. 8 Remaining service life according to angular distortion

물 B의 경우에는 구조물 A에 비해 상당한 열화가 진행된 상태였으며, 이에 따라 구조물의 각변위가 1/750 이하인 경우에도 잔존수명이 약 8년에 불과한 것으로 나타났다. 다만, 구조물 B는 각변위가 약 1/200까지 증가하더라도 잔존수명이 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 이는 각변위 1/200 시점까지는 구조물에서 발생된 내구성능 감소가 구조물 전체의 잔존수명을 지배하기 때문이다. 각변위가 1/200을 초과하는 경우에는 구조물 A와 유사하게 잔존수명이 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 1/150의 각변위에서는 구조물의 잔존수명이 0에 수렴하는 결과를 보였다.

5. 결론

이 연구에서는 구조물의 부등침하로 인해 발생하는 각변위가 구조물 전체의 잔존수명에 미치는 영향을 정량적으로 규명하기 위한 해석적 연구를 수행하였으며, 이 과정에서 한국 시설안전공단에서 제시하고 있는 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 근거하여 구조물의 각변위가 구조부재의 공칭강도에 미치는 영향을 반영하기 위한 간략식을 제안하였다. 이 연구로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기존의 한국시설안전공단에서 제시하고 있는 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침은 평가결과를 등급의 형태로 제시하기 때문에 RC 구조물의 잔존수명을 정량적으로 파악할 수 없다는 한계점이 존재하였다. 반면, 이 연구에서 제시한 잔존수명 평가모델은 부재의 내구성 및 구조 안전성 뿐만 아니라 부등침하가 구조물 전체의 잔존수명에 미치는 영향을 정량적으로 산정할 수 있다는 장점이 있다.
2. 기존의 실제 구조물 현장조사 데이터를 활용하여 구조물의 각변위에 따른 잔존수명을 평가한 결과, 열화가 심하게 발생되지 않은 구조물에서는 부등침하에 의한 각변위가 구조물 잔존수명에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 이는 이 연구에서 제안한 각변위의 영향이 반영된 부재 공칭강도가 각변위가 증가함에 따라 급격하게 감소하기 때문이다.
3. 반면에, 열화가 심하게 발생한 구조물에서는 구조물에서 발생한 내구성능 감소가 구조물 전체의 잔존수명을 지배하는 것으로 나타났으며, 이 경우에는 부등침하에 의한 각변위가 구조물 잔존수명에 미치는 영향이 상대적으로 매우 작은 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2018R1A4A1025953).

References

1. ACI 201.2R-08, Guide to Durable Concrete (2008), ACI Manual of Concrete Practice, Part 7: Materials and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan, USA, 41.
2. Banon, G. (1981), Distinction between several subsets of fuzzy measures, *Fuzzy Set and Systems*, 5(3), 291-305.
3. Bjerrum L. (1963), Discussion on Section 6, Europe, *Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wiesbaden, 2, 135-137.
4. Cho, H. C., Lee, D., Ju, H., Kim, K. S., Kim, K. and Monteiro, P. (2015), Remaining service life estimation of reinforced concrete buildings based on fuzzy approach, *Computers and Concrete*, 15(6), 879-902.
5. Cho, H. C., Ju, H., Oh, J. Y., Lee, K. J., Hahm, K. W. and Kim, K. S. (2016), Estimation of Concrete Carbonation Depth Considering Multiple Influencing Factors on the Deterioration of Durability for

- Reinforced Concrete Structures, *Advances in Material Science and Engineering*, 2016(Article ID 4814609) 1-18.
6. Cho, H. C. (2017), Remaining Service Life Estimation of Concrete Structures Using Neuro-Fuzzy Theory, Ph. D. Dissertation, University of Seoul.
7. Choquet, G. (1954). Theory of capacities. In *Annales de l'institut Fourier* (Vol. 5, pp. 131-295).
8. Murofushi, T., & Sugeno, M. (2000). Fuzzy measures and fuzzy integrals. *Fuzzy Measures and Integrals: Theory and Applications*, 3-41.
9. International Code Council(2012), *International Building Code 2012*, ICC, 569-585.
10. Jang, J. S. R., Sun, C. T., & Mizutani, E. (1997). MATLAB curriculum series. *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence.*, xxvi-614.
11. Jeong, J. H., Kim, J. O., Kim, J. M., Kim, Y. S. and Cho, C. H. (1995), A Study on the Stress Analysis of Structures Subjected to Differential Settlement, *Journal of Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, 15(2), 479-482.
12. JSCE(1995), Durability Design Guide of Concrete Structures, Japan Society of Civil Engineers.
13. Kim, Y. M., Kim, C. K. and Hong, S. G. (2006), Fuzzy Based State Assessment for Reinforced Concrete Building Structures, *Engineering Structures*, 29(9), 1286-1297.
14. Korea Concrete Institute(2009), Design Specifications for Concrete Structures, 66.
15. Safety, K. I. Technology Corporation (KISTC), 2017. *Detailed Guidelines for Safety Inspection and Precision Safety Diagnosis*.
16. Macqueen, J. B. (1967), Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statics and Probability*, University of California Press, 281-297.
17. Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2012), Facility maintenance guidelines.
18. Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2016), Special Act on the Safety Control of Public Structures.
19. Nowak, A. S., & Szerszen, M. M. (2003). Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 1-Statistical models for resistance. *ACI Structural Journal*, 100(3), 377-382.
20. Skempton, A. W., & MacDonald, D. H. (1956). The allowable settlements of buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(6), 727-768.
21. Szerszen, M. M., & Nowak, A. S. (2003). Calibration of design code for buildings (ACI 318): Part 2-Reliability analysis and resistance factors. *ACI Structural Journal*, 100(3), 383-391.

Received : 01/03/2020

Revised : 02/05/2020

Accepted : 02/07/2020

요 지 : 한국시설안전공단에서는 ‘시설물의 안전관리에 관한 특별법’에 따라 철근콘크리트 구조물의 안전점검 및 정밀안전진단을 실시하도록 제시하고 있다. 그러나 한국시설안전공단 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침의 평가방법에서는 평가결과를 등급으로 제시하기 때문에 구조물의 잔존수명을 알 수 없으며 부등침하가 구조물의 잔존수명에 미치는 영향을 반영하지 못한다. 따라서, 이 연구에서는 부등침하의 영향이 반영된 구조물의 잔존수명 평가모델을 제시하고자 하였다. 부등침하와 각 변위의 상관관계를 나타내는 기존의 연구를 바탕으로 부재의 공칭강도에 부등침하의 영향을 반영시키기 위한 식을 제시하였으며, 실제 철근콘크리트 구조물의 현장데이터를 활용하여 부등침하가 구조물의 잔존수명에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어 : 철근콘크리트, 잔존수명, 부등침하, 각변위
