

## 철근 콘크리트 구조물의 보수 우선순위를 위한 의사결정 모델

A Decision Model for Repair Priority of Reinforced Concrete Structures



박철우<sup>1)\*</sup>

Park, Cheol Woo



주민관<sup>2)</sup>

Ju, Min Kwan

본 논문은 철근 콘크리트 구조물의 유지관리 의사결정을 위한 새로운 기법을 소개한 논문이다. 국내 건설분야의 흐름상 기존 신축위주에서 향후 유지관리쪽으로는 점진적인 투자 전환을 고려하여 본 논문을 선정하였다. 내용은 다음과 같으며 원 저자들에게 감사의 뜻을 전하는 바이다.

### 서론

구조상태 평가는 건설분야에서 전문화된 영역으로서, 구조물의 대부분을 차지하고 있는 철근 콘크리트(RC) 구조물에 대해서는 일반적으로 다음 사항을 고려하게 된다.

- 구조부재들에 대한 결함, 열화 및 손상과 연관된 고려
- 승인된 기준에서의 변화에 따른 보강의 필요성

### 요성

- 구조물의 유지관리, 보수 및 보강의 요구

구조상태 평가를 위해 종종 요구되는 다른 요소들은 재사용의 적합성 여부, 구조물 소유주체의 변경 등을 포함한다(Ratay 2006). 상태평가는 어떠한 RC 구조물에 대해서 수행될 수 있다. 구조상태의 열화조짐이 분명해지는 구조물들이 최우선 고려대상이며 이는 열화가 점진적으로 구조성능을 저하시켜 결과적으로 구조물의 사용성을 위태롭게 할 수 있기 때문이다. 일반적으로 위해한 환경상태(하중 수준 포함)에 노출됨은 RC 구조물의 열화의 주요인자로 간주되어 왔다. 다양한 연계과정들(열화 메카니즘)이 규명되어 왔으며 구조상태에 대한 열화 메카니즘의 영향에 대한 이해도를 개선시키기 위한 많은 진전이 있어 왔다. 마찬가지로, 열화된 RC 구조물의 상태평가를 위한 몇몇의 기법들이 개발 또는 개선되어 왔다. 이 기법들은 크게 다음과 같이 분류된다.

1) 강원대학교 공학대학 토목공학과 교수

2) 강원대학교 공학대학 토목공학과 연구교수

\* E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr

- 상태평가 기법에 기초한 육안점검 : 분명한 손상을 통한 확인
- 일반 실험적 조사 : 콘크리트 강도 또는 품질 조사
- 열화 심화도에 대한 실험적 조사 : 특정한 열화 메카니즘과 연관된 비율/확장성/위험도 평가

사용상태에서 콘크리트의 육안점검을 수행하기 위해서는 체계적인 지침이 사용되고 있다 (ACI Committee 201, 2008). 유사하게도 실험적 조사를 수행하기 위해서는 몇몇의 비파괴 검사, 유사 비파괴검사 등이 현장과 실험실 환경에 맞추어 개발되어 왔다. 자세한 정보는 몇몇 참고문헌을 통해 소개된 바 있다(Bungey and Millard 1996; IAEA 2002). 가장 유용한 상태평가 기법(대안 기법 포함)을 선택하기 위한 합리적인 과정에 대해 Das et al(2004)가 소개한 바 있다. 그러나, 구조상태평가의 정량적 값은 적절한 상태평가 기법을 사용하여 얻어진 데이터의 분석과 이렇게 분석된 데이터를 상태평가 결정과 추천방안을 정확하게 하기위해 전문가적 의견을 반영하여 분석하는 그 다음 결정에 의존한다. 따라서, 열화된 RC 구조물의 상태를 특성화하기 위한 몇몇의 노력들이 수행되어 왔다. 미국 National Bridge Inventory(NBI, FHWA 1995)를 예를 들면, 다양한 구조부재들(예를 들면 바닥판, 상부구조 하부구조 등)의 상태를 0(failed)에서 9(excellent)까지로 정량적으로 평가하고 있으며 이는 교량의 육안점검의 체계적인 항목화를 가능하게 하고 있다. 지침은 또한 실험적 초음파 속도값의 분류(콘크리트 품질에 대한)를 위해서도 사용된다. half cell potential (HCP) 기법을 예를 들면, 콘크리트 저항도나 부식 전류밀도 등은 부식의 위험도나 철근의 상태를 항목화하기 위하여 지속적으로 사용되는 방

법이다(Song and Saraswathy 2007). 일반적으로 대부분의 지침들은 실험적 관찰이나 과거 데이터 분석 또는 몇몇 전문가들의 전문의견 수립 중 하나에 의존하여 제안되어 왔다. 이러한 지침들은 의사결정에 대한 합리적인 기본방안을 제공하며 중요하고 유용한 정보를 제공한다. 제공된 항목들의 대부분은 구체화되어있고 보수의 긴급성과 관련하여 적은 정보만을 제공하고 있다. 그러므로 차후 결정(보수 긴급성과 관련한)들은 일반적으로 구조상태 평가와 관련한 전문가 개개인의 전문성이나 지식, 판단 등에 의해 결정되어 왔다. 그러므로, 전문가적 경험과 공학적 판단은 보수의 긴급성 판단에 있어서 아주 중요한 역할을 수행한다. 하지만 이러한 주관적인 의사결정 과정은 지극히 정성적 판단결과(보수 우선순위가 낮음, 중간, 높음)이기에 범용적인 사용에 있어 주의를 요하는 부분이 많이 존재한다. 정성적 방법을 기반으로 한 의사결정 방법은 의견일치의 어려움과 정보공유의 제약을 가져온다. 정성적 데이터들의 주관적인 판단은 개개인의 차이에 의해 극단적으로 다를 수 있다(예를 들면, 전문가 두 명이 동일 구조물/구조형식 등에 대해 전혀 다른 보수 긴급도를 평가할 수 있다). 둘 또는 그 이상의 구조물의 보수 긴급성의 상호 호환성 평가는 역시 어려운 문제이다. 그러나, 주관적 의사결정은 상태평가 데이터를 갖는 보수 긴급성과 관련한 정보의 부족함이라는 이유로 인해 보수 긴급성의 정성적인 평가의 필수 불가결한 부분이다. 상태평가 정보의 부족은 다음과 같은 상황과 관련되어 있다.

- 보수 긴급성 자체는 정성적이며 주관적인 측정이다.
- 노후화 및 열화 메카니즘의 효과는 정확하게 구분될 수 없다.
- 최신 상태평가 지식조차도 다양한 열화 메카니즘의 정확한 영향을 평가하기에는 어려

움이 있으며, 이는 상태들과 연관된 국부적인 변수와 콘크리트 그 자체 때문이다.

그러므로 노후화된 RC 구조물(부재)의 상태 평가 데이터와 일치하는 보수 긴급성과의 명백한 관계들은 규정되기가 어려우며 명백하지 않아 보이는 관계들조차 얻어내기 힘들 수 있다. 따라서, 지속적인 의사결정 접근 그 자체의 형상화는 매우 유용한 방법이며 합리적인 비교를 위해서도 사용될 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 노후화된 RC 구조물의 보수 긴급성의 평가에 대해 합리적이고 정량적인 부분에 기반한 의사결정을 얻기 위한 혁신적인 방법이 제안되었다. 이 제안된 방법론은 일관된 유지보수 스케일을 사용한다. 다양한 기법들을 사용하여 얻어진 상태평가 데이터에 대한 적절한 항목들이(선택된 유지보수 스케일에 대한) 제안되었다. 정의된 항목들을 위해 표준화된 보수 긴급성에 대한 상대적인 중요도 측정을 위해 상태지수 함수가 제안되었다. 각각의 부재 또는 구조물에 대한 통합된 보수 긴급도를 얻기 위한 도출규정 또한 제안되었다. 계산된 보수 긴급도는 노후된 몇몇의 RC 구조물 중에서 합리적인 보수 우선순위를 얻어내기 위해 사용될 수 있다. 제안된 방법론의 적용성을 입증하기 위한 세부 Case study가 소개되었다. 제안된 방법론은 구조상태의 다양한 측정을 사용한 보수 우선순위 결정에 대한 신개념의 방법론이다. 이 방법론은 보수 우선순위 결정과 관련한 실무사례에서 진보적인 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 제안된 방법론

외관검사의 정성적이고 주관적인 처리를 위해, Jain 와 Bhattacharjee에 의해 제안된 방법론은 2012년에 실무에 채택되었다. 채택된 방법론은

Table 1 보수 우선순위 (등급) 상태지수의 기준으로 정의 (CI) (Jainand Bhattacharjee 2012년 ASCE)

상태 지수	정의 (보수 우선순위 등급 기준)
0	보수 필요없음
1	매우 낮은 우선순위 Repair can be delayed for long span of time
2	낮은 우선순위 Repair actions may be delayed for significant time
3	중간 우선순위 Repair actions may be delayed for some time
4	높은 우선순위 Urgent repair actions might be required
5	매우 중요한 상태 Repair actions must be carried out immediately

노후 RC구조물의 외관검사 기반의 상태평가에 퍼지 개념의 적용을 위해 만들었다. 외관검사 데이터의 일관성 정량화에 사용되는 보수우선순위 기반의 상태평가 척도는 이 업무에서 실험데이터의 분류에 채택되어 있다. 채택조건 평점은(긴급보수를 기준으로 정의) Table 1과 같다.

### 보수 긴급성을 결정함에 있어 실험데이터의 항목화

노후 RC구조물의 상태평가에서 일반적으로 외관검사를 보완하는데 사용되는 실험조사의 평가는 다음과 같다. 현장 타설 콘크리트강도, 콘크리트 품질, 내구성 매개 변수 및 노후 매개 변수 (예 :반전지전위 (HCP), 중성화 깊이, 부식에 대한 부식전류 밀도 등, 그리고 표준 강도 무게/ 길이/ 알칼리 골재반응(AAR)과 황산염 침투). 제안된 방법론은 노후 RC구조의 구조상태 평가를 통해 얻은 정보를 활용할 수 있다. 그러나 철근 부식에 따라 RC구조에 대한 모델개발 프로세스에 따라 정보를 설명하는 것은 이 업무에 사용된다.

- 외관 검사
- 현장 타설 콘크리트

- 콘크리트 품질
- 반전지 전위(HCP)
- 중성화 깊이/ 콘크리트 피복

HCP 및 중성화 깊이의 선택(즉, 상태의 명확한 노후도 측정)은 RC구조에서 철근부식은 가장 자주 관찰되는 노후 메커니즘 중 하나 인 것과 관련이 있다. 앞서 언급된 것과 같이, 외관검사에 대한 합리적인 분류는 2012년 Jain과 Bhattacharjee에 의해 제안된 방법론에서 이미 사용할 수 있다. 제안된 모델에 사용된 개별 접근방법, 따라서, 외관검사를 통해 얻은 상태지수(CI)는 Table 2에 제시된 것과 같이 선택된 보수 규모의 가장 가까운 정수로 반올림된다. 선택한 매개변수와 선택한 보수 규모의 후속분류의 평가를 위한 기술은 아래에 설명되어 있다.

현장 타설 콘크리트 강도

현장타설 콘크리트 강도는 직접(코어) 또는 간접적(예. USPv, 리바운드 해머, 폴 아웃 시험

등) 방법을 사용하여 얻을 수 있다. 간접적인 방법의 적용에 대한 상관관계는 먼저 코어를 사용하는 것과 동일한 절차는 문헌(BS EN 13791 2007)에서 사용할 수 있다. 각 방법에 대한 자세한 절차는 문헌(Bungey and Millard 1996)에서 찾을 수 있다. 상태평가 항목에서 현장 타설 콘크리트의 예상 강도 값이 허용 기준에 대해 만족하는지를 확인해야 한다. 이 업무에서, 영국(유럽) 표준(BS EN 13791 2007)에서 허용기준은 초기 가이드라인으로 채택하고 있다. 만약, 현장 타설 콘크리트의 모든 값(추정)에 대한 경우, 다음에 적용된 범주에서 어떠한 범위에서의 콘크리트 강도는 적절한 것으로 간주될 수 있다 ( $f_{in-situ}$ ).

$$f_{in-situ} \geq 0.85 (f_{ck} - 4) \quad (1)$$

여기서,  $f_{ck}$  = 콘크리트의 큐브압축강도 특성 (MPa)

현장 타설 강도를 평가할 때는  $0.85(f_{ck} - 4)$

Table 2 상태평가 데이터의 분류

CI <sup>1</sup>	외관 검사			강도 (MPa)			USPV (Km/sec)			HCP (mV CSE)			탄산화 깊이 /콘크리트 피복		
	LB <sup>2</sup>	UB <sup>2</sup>	CIN <sup>4</sup>	LB	UB	CI <sub>N</sub>	LB	UB	CI <sub>N</sub>	LB	UB	CI <sub>N</sub>	LB	UB	CI <sub>N</sub>
0	-	0.5	0	-	1.02* ( $f_{ck}-4$ )	0	-	3.50	0.000	-	-100	0.000	0	0.50	0
1	0.5	1.5	0.125	-	-	-	3.50	3.25	0.083	-100	-200	0.200	0.50	0.75	0.179
2	1.5	2.5	0.375	-	-	-	3.25	3.00	0.250	-200	-275	0.552	0.75	0.90	0.464
3	2.5	3.5	0.625	1.02* ( $f_{ck}-4$ )	0.85* ( $f_{ck}-4$ )	0.50	3.00	2.50	0.500	-275	-300	0.752	0.90	1.00	0.643
4	3.5	4.5	0.875	-	-	-	2.5	2.00	0.833	-300	-350	0.900	1.00	1.20	0.857
5	4.5	-	1	0.85* ( $f_{ck}-4$ )	-	1	2.00	-	1.000	-350	-	1.000	1.20	-	1

참고사항:

<sup>1</sup> 상태지수 (CI)는 각 기준에 대해 개별적으로 정해진 범위의 지정데이터에 해당하는 할당 긴급보수를 나타낸다.

<sup>2</sup> LB : CI값과 연관된 데이터 범위에서의 하한치

<sup>3</sup> UB : CI값과 연관된 데이터 범위에서의 상한치

<sup>4</sup> CI<sub>N</sub> : 가장 중요한 CI와 관련하여 관련 CI 값의 상대적 중요성을 나타낸다.

미만 설계의 가정이 유효한지에 대한 구조적 타당성 평가를 해야 한다. 보수 작업은 예상되는 콘크리트 강도 값이 설계에 사용되는 안전계수를 고려하여 허용기준을 만족하는 경우에는 필요하지 않다. 영국 표준 (BS 6089 1981)에서 추정된 것과 같이, 안전범위 값의 요소가 일반적으로 1.2 미만인 아니므로 콘크리트의 현장타설 예상강도에서 기초콘크리트 허용치 기준은 다음과 같다.

$$f_{in-situ} \geq (1.2 \times 0.85)(f_{ck} - 4) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에 선택한 보수 규모로서 현장 타설 콘크리트강도의 예상되는 값을 분류하는데 사용된다. 적절한 콘크리트는 공식 (2)에 만족하고, 상태지수는 "0" (as per the definition)인 콘크리트에 대한 것이므로 보수가 필요하지 않다. 현장 타설 콘크리트의 예상 강도 값이  $0.85(f_{ck} - 4)$  이하인 콘크리트 즉, 콘크리트 공식 (1)에 주어진 기준에 부합하지 않는 콘크리트는 보수작업을 즉시 시행해야 하므로 상태지수는 "5"로 지정된다. 이 두 가지 조건(즉, 공식 (1)과 (2)사이) 사이의 현장 타설 콘크리트의 예상 강도 값에 대한 콘크리트는 중간 보수우선순위를 요구하며, 따라서 향후의 노후화로 인해 긴급 보수작업의 필요성을 발생시킬 수 있기 때문에 상태지수는 "3"으로 지정한다. 선택한 보수 규모의 강도 데이터의 제안 분류는 Table 2에 명시되어 있다.

**초음파 펄스 속도(USPV) 방법을 사용한 콘크리트 품질검사**

초음파 펄스 속도(USPV) 방법이 주로 RC구조의 콘크리트의 품질을 평가하는데 사용되며, 자세한 절차는 문헌(CPWD 2002; IS 13311

(Part 1) 1992)에서 찾아볼 수 있습니다. 추가로 보고된 가이드라인은 콘크리트 품질은 다음과 같이 추정할 수 있다고 제안한다.

- 우수 : USPV 값 4.5 (km/s) 이상
- 좋은 : USPV 값 3.5~4.5 (km/s) 사이
- 중간 : USPV 값 3.0~3.5 (km/s) 사이
- 불량 : USPV 값 3.0 (km/s) 미만

따라서, USPV 값이 3.5(km/s) 보다 크면 보수작업이 전혀 필요하지 않으며, 상태지수는 "0"으로 지정된다. 3.0~3.5(km/s)의 범위(중간)에서 콘크리트 품질의 만족스러운 USPV 값을 나타내지만 무결성의 손실로 간주될 수 있다 (CPWD 2002). 따라서, 이 범위에서 USPV값은 예를 들어 "낮은"은 긴급보수에 "매우 낮은"은 상태지수가 "1"과 "2"로 지정된다. 콘크리트 품질이 3.0(km/s) 이하인 USPV값에 대해서는 doubtful / poor 와 무결성의 손실로 간주된다. 그러므로, USPV 값이 2.0~3.0(km/s)인 값들은 직선보간법에 의해 "중간"~"즉시"는 상태지수 3~5이므로 긴급보수로 지정된다. USPV 값이 2.0(km/s) 이하인 값들은 상태지수가 5에 해당하므로 긴급 보수작업을 필요로 한다. 보수 규모로 선택한 USPV값의 제안된 분류는 Table 2에 소개되어 있다.

**Deterioration Specific Parameters (노후화 특정변수)**

노후화된 RC 구조물의 상태평가에서 추정과정을 향한 변수와 연관된 열화의 중요성은 잘 정립되어 있다. 제안하는 모델을 설명하기 위하여, RC 구조에서 가장 일반적으로 관찰된 노후화 즉, 철근부식은 품질저하를 평가하는데 사용된다. 따라서 선택된 변수의 항목화로서 반전지전위(HCP)와 탄산화 깊이가 제안된다. 다음으로,

제안된 분류에 대한 설명이다.

반전지 전위(HCP)

HCP측정 및 추정과정에 대한 지침을 수행하기 위한 자세한 절차는 ASTM C 876-911999의 표준 양식에서 사용할 수 있다. HCP는 RC구조의 철근부식의 위험(확률)에 대한 유용한 정보를 제공하며 ASTM C-876은 다음의 경우에 권장된다.

- 잠재 가능성이 있는 범위는  $-0.2$  V CSE 보다 더 양수이며, 그 범위에서는 보강 철근의 부식이 발생하지 않을 가능성이 90% 이상이다.
- 잠재 가능성이 있는 범위는  $-0.20 \sim -0.35$  V CSE 의 범위이며, 그 범위에서는 보강 철근의 부식활동은 불확실하다.
- 잠재 가능성이 있는 범위는  $-0.35$  V CSE 보다 더 음수이며, 그 범위에서는 보강 철근의 부식이 일어날 가능성이 90% 이상이다.

노후화의 구체적인 조사는 특별한 품질저하가 발생할 경우에만 실시된다(외관 검사에 기초/ 노출상태에 대한 정보/ 보수등의 과거 정보). 따라서, HCP은 구조적인 상태의 지표로 사용된다. HCP는 활동적인 부식발생을 나타내거나 그렇지 않을 수도 있지만, 주로 보강철근의 부식 활동에 대한 지표이다. 또한, 부식증가를 나타내는 경우에 음수값쪽으로의 많은 HCP값 변화가 이미 보고되어왔으며, HCP값을 사용한 부식(염화유도)의 가능한 정량화가 동시에 논의 되었다. 그 후, 참고문헌으로 ASTM C-876 지침을 이용하여 HCP 값은 선택된 보수 규모에 분류되며 Table 2에 나타나있다.

Carbonation Depth / Cover  
(콘크리트 피복과 탄산화 깊이의 비)

대기의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 침입에 의한 콘크리트의 탄산화는 콘크리트의 알칼리성의 감소로 이어진다. 콘크리트 알칼리성의 점진적인 감소(탄산화가 철근 수준에 도달)가 철근의 부동태막의 소멸(depasseivation)로 이어지므로 RC구조의 철근부식의 위험을 증가시킨다. 따라서, 피복과 탄산화 깊이의 비는 부식위험의 지표로 사용된다. 철근부식의 시작은 부동태막의 소멸(depasseivation)과 관련되고, 탄산화 깊이 관점에서 탄산화가 철근 수준에 도달한 것을 의미한다. 즉, 탄산화 깊이/ 피복 = 1. 그러나, 결국에는 철근수준에 도달하므로 부동태막의 소멸(depasseivation)이 발생할수 있기 때문에, 탄산화의 점진적인 증가 깊이는 무시하지 않는다. 따라서, 개인적인 경험을 활용하여, 탄산화 깊이/ 피복의 비율에 대한 값이 선택한 보수 규모로 분류되며 Table 2에 나타나있다. 제안된 분류가 0.9~1의 범위 내에서 중성화 깊이/ 피복의 값에 대하여 “중간”(상태지수=“3”)과 같이 긴급보수로 지정하는 것이 적절할 것이라고 판단된다. 이러한 고려사항은 “긴급” 보수작업에 대한 필요성을 요하는 즉, 부식이 시작되는 것과 부식이 증가하는 것으로 구성되어 있다.

선택된 보수 규모의 실험데이터를 분류한 것으로, 요소의 긴급보수는 현재 가능한 모든 상태 평가 변수의 결합된 결과를 고려하여 얻어진다. 그러나 조사 / 관찰에서 얻은 상태지수 (CI)의 함축된 의미는 서로 다를 수 있으며, 따라서 최종 보수결정의 맥락에서 상대적 중요도(선택된 규모 이상)로 한다. 이를 구체화하기 위해, 상태지수에 대한 표준화된 함수의 개념은 제안된 모델에서 도입된다. 또한 그 밖의 특별한 상태평가 측정의 상대적 중요성은 적절한 가중치를 통해

고려된다. 표준화된 상태지수의 함수와 각각의 상태평가 측정의 상대적 가중치에 대한 논의는 다음 절에서 소개된다.

### 표준화된 상태지수 함수

긴급보수에 선정된 범위는 가능한 모든 상태 평가의 방법이 일정하게 유지되지만, CI값에 이르는 데이터는 다른 측정 범위에 속한다. 또한, 서로 다른 항목에 대해서는 다양한 방법을 채택할 필요가 있으며, 따라서 CI값은 보수 긴급성에 따른 상수값들만의 변화를 나타내지 않는다. CI 값 1에서 2까지 가정한다면 USPV값은 n배 증가한 값을 나타낸다. 그러나 탄산화에 대한 CI값은 m배의 증가한 값을 나타낸다. 합리적인 비교와 부재에 대한 통합 CI에 이르기 위해, 표준화된 상태지수 값은 관련된 모든 상태평가를 통해 개별적으로 얻을 수 있다.

따라서, CI=0은 0.0의 표준화된 상태지수 값이 할당되며, CI=5 (CI에서 보수등급을 선택할 때 CI의 최대 값이 가장 중요함)는 표준화된 상태지수 값인 1.0이 지정된다. CI의 중간 값에 대한 표준화 된 조건 지수 값은 다음 식 (3)을 이용하여 얻을 수 있다.

$$CI_{N_i} = \frac{U^0 - 0.5(U_i + L_i)}{(U^0 - L^1)} \quad (3)$$

여기서,

$CI_{N_i}$  = i<sup>th</sup> 기준에 대한 표준화된 상태지수

$U^0$  = 데이터의 상한치에 해당하는 범위 CI=0(i.e.

표준화된 상태지수=0)

$L^1$  = 데이터의 하한치에 해당하는 범위 CI=5

(i.e. 표준화된 상태지수=1)

$U_i$  = 데이터의 상한치에 해당하는 범위 CI=i

$L_i$  = 데이터의 하한치에 해당하는 범위 Ci=i

표준화된 상태지수 값은 각 상태평가 측정을 (개별적으로) 계산하고 각각의 CI값과 관련된 해당실험 데이터 범위와 함께 Table 2에 나타내었다.

### 각각의 상태평가 방법의 상대적 가중치

관련 조치(육안검사, 강도와 콘크리트의 품질, 부식의 위험 등)의 가중치는 보수 우선순위에 대한 의사결정에 중요한 요소가 된다. 보통, 이러한 가중치는 특정한 영역 따라 제공된다. 분석 계층과정(AHP)과 같은 특정 응용 프로그램의 경우 이러한 가중치를 얻기 위해 고려된다. (Sasmal and Ramanjaneyulu 2008)

제안된 분류, 표준화된 상태지수 값과 각각의 상대적 가중치는 현재 긴급보수의 포괄적인 결정을 내릴 수 있도록 상태평가 데이터로 사용된다. 다음과 같은 공식은 각 부재의 통합적인 긴급보수를 선정하는데 사용된다.

### 개별요소의 통합적인 긴급보수

CI의 다른 값은 해당하는 상태평가기준을 사용하여 얻은 정보를 기반으로 각 부재들에 부여 (Table 2를 사용하여) 할 수 있다. 통합된 결과는 결합된 상태지수의 관점에서 부재에 대하여 정의된다.

- $CI_{combined}$  는 두 개 이상의 매개 변수에 대한 통합효과는 개별요소에 의한 것 보다 심각할 수 없기 때문에 보다 크거나 각각의 상태측정에 해당하는 모든 CIs의 최대 CI와 같다.
- $CI_{combined}$  는 모든 상태측정의 특정 CI값의 효과를 포함 (표준화된 상태지수 값 및 상대적 가중치의 방법)
- $CI_{combined}$  는 선정된 범위에 포함되고 남은

것 즉,  $0 \leq CI_{combined} \leq 5$

따라서, 다음과 같은 공식은 통합된 요소 CI의 산출을 위해 제안되었다.

$$CI_{combined}^j = (CI_{i,Max}^j) + (1 - \frac{CI_{i,Max}^j}{CI_A}) (1 - \frac{(w_i v_i^j)^{Max}}{\sum_i w_i v_i^j}) \quad (4)$$

여기서,

$CI_{combined}^j$  =  $j^{th}$  부재의 결합 CI

$CI_{i,Max}^j$  =  $j^{th}$  부재에 대한 최대 CI (모든 CIs의 다양한 상태평가 방법 해당)

$CI_A$  = 선정된 보수등급의 최대 절대 값(가장 중요한) CI값 = 5

$w_i$  =  $i^{th}$  상태평가 방법의 상대적 가중치 (모든 요소에 대한 상수)

$v_i^j$  =  $i^{th}$  상태등급조치에 해당하는  $j^{th}$  요소에 대한 표준화된 상태지수 값

$(w_i v_i^j)^{Max}_{CI_{i,Max}^j}$  =  $j^{th}$  요소에 대한  $w_i v_i^j$ 의

최대 값(모든 상태평가 방법에 따라  $CI_i = CI_{i,Max}$ ) 수식 (4)는  $j^{th}$  요소에 대한 통합 CI(긴급 보수를 제공한다. 구조적 긴급보수를(CI의 관점) 선정하기 위해 가중치 평균 방법(WAM)이 사용된다. 구조적 상태지수(SCI)는 다음 수식 (5)를 이용하여 계산된다.

$$SCI = \frac{\sum_{j=1}^n w^j CI_{combined}^j}{\sum_{j=1}^n w^j} \quad (5)$$

여기서,

$w^j$  =  $j^{th}$  요소의 상대 가중치,  $n$  = 평가한 부

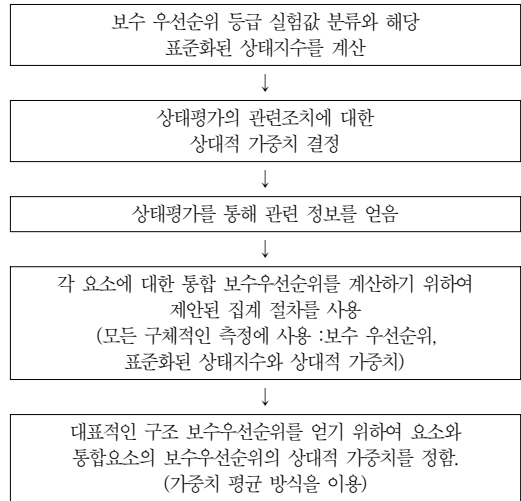


Fig. 1 제안된 모델에 의한 상태평가 흐름도

### 재의 번호

Fig. 1에 주어진 흐름도는 제안된 모델의 평가 흐름도이다. 따라서 제안된 모델의 응용프로그램을 설명하는 자세한 사례 연구가 다음 절에서 소개된다.

### 사례 연구

제안된 방법론을 설명하기 위하여 채택된 사례 연구는 세 가지의 노후화된 RC구조를(건물) 고려하였다. 이 건물들은 구조물 A, B, C로 표시된다. 이러한 구조물의 수명은 A구조는 40-42년, B조는 12-14년, C구조는 15-16년이다. 콘크리트의 큐브 압축강도 특성( $f_{ck}$ )(설계 단계에서 명시)에 대한 정보는 다음과 같다.

- “A”구조의 경우 :  $f_{ck} = 15\text{MPa}$
- “B”구조의 경우 :  $f_{ck} = 25\text{MPa}$
- “C”구조의 경우 :  $f_{ck} = 15\text{MPa}$

누수 흔적, 녹 얼룩, 종방향 균열과 콘크리트의 스폴링(박리)은 구조물의 일부 부재에서 관



찰되며, 노후화의 원인은 철근부식이다.

따라서 상태평가는 이러한 건물들 각각에 대해 수행한다. 다양한 조사는 일부 적합한 대표 부재에서 수행되며, 12, 20, 23의 부재는 각 구조물 A, B, C에 대해 평가된다. 구조에 대한 “A”, “C”에 대한 정보는 외관검사와 평가를 통하여 얻을 수 있다 : 현장 타설 콘크리트(코어/리바운드 망치를 사용), 콘크리트 품질(USPV), HCP, 탄산화 깊이/피복. 그러나 구조 “B”에 대해 HCP의 측정은 상태평가에 포함되지 않는다. 제안된 분류(Table 2)는 다양한 평가기준에 해당하는 부재 CI 및 표준화된 상태지수 값을 얻기 위해 사용된다. 정보를 수집하는 동안 상태평가, 해당 CI, 상태지수 값(제안된 모델에 따라)은 Table 3에 구조물 A, Table 4에 구조물 B, Table 5에 구조물 C로 나타내었다.

요소의 통합 CI를 계산하려면, 동일한 가중치는

다양한 평가 기준에 할당 된다. 즉,  $w_i=1/n_{criteria}$  (단순화를 위해, 가중치는 달라질 수 있음) 식 (4)는 통합 요소 CI를 계산하는데 사용되며, 얻어진 값들은 구조물에 대한 각각의 표에 주어진다. 즉, Table 3의 A, Table 4의 B, Table 5의 C. 또한, 구조물의 CI값을 계산하기 위하여, 다른 부재(각 구조)에 동일한 가중치를 부여한다. 즉,  $w^j = 1/n_{elements}$  (이 가중치 역시 달라질 수 있음) 선정된 구조물의 CI의 값은(식 (5)를 사용하여) 각각의 표에 나타나있다. 본 연구에서 제안된 모델로부터 얻어진 CI값과 분석을 통해 도출한 결론은 다음 절에 정리하였다.

결론

Table 3~5에 나타난 CI값에 따른 결론은 다음과 같다. 긴급 보수는 구조물 A와 C에서는

Table 3 구조 “A”에 대한 상대적 보수 우선순위 평가

상태평가 데이터(특정 기준), 관련 CI <sup>2</sup> 값 및 각 부재에 대한 CIN <sup>3</sup> 값																
외관 검사				강도 (MPa)			USPV (Km/sec)			HCP (mV CSE)			탄산화 깊이 / 피복			통합부재 CI
부재 번호	Data	CI	CIN	Data	CI	CIN	Data	CI	CIN	Data	CI	CIN	Data	CI	CIN	
1	3.52	4	0.88	18.1	0	0.00	3.71	0	0.00	-234	2	0.55	0.00	0	0.00	4.08
2	2.34	2	0.38	18.2	0	0.00	4.00	0	0.00	-298	3	0.75	0.43	0	0.00	3.13
3	3.52	4	0.88	9.7	3	0.50	2.90	3	0.50	-122	1	0.20	1.00	4	0.86	4.14
4	3.21	3	0.63	13.4	0	0.00	3.14	2	0.25	-175	1	0.20	0.50	1	0.18	3.20
5	2.88	3	0.63	16.3	0	0.00	3.23	2	0.25	-277	3	0.75	0.33	0	0.00	3.22
6	2.88	3	0.63	10.4	3	0.50	3.52	0	0.00	-297	3	0.75	0.05	0	0.00	3.24
7	2.96	3	0.63	10.7	3	0.50	3.54	0	0.00	-390	5	1.00	0.45	0	0.00	5.00
8	3.52	4	0.88	14.7	0	0.00	3.60	0	0.00	-336	4	0.90	0.05	0	0.00	4.10
9	3.21	3	0.63	15.2	0	0.00	3.44	1	0.08	-390	5	1.00	0.90	3	0.64	5.00
10	3.21	3	0.63	14.1	0	0.00	3.39	1	0.08	-211	2	0.55	0.95	3	0.64	3.26
11	2.49	2	0.38	15.7	0	0.00	3.88	0	0.00	-235	2	0.55	0.27	0	0.00	2.24
12	3.52	4	0.88	15.7	0	0.00	3.92	0	0.00	-371	5	1.00	3.35	5	1.00	5.00
구조의 조건지수 (주어진 보수 단계로)																3.80

참고사항 :

<sup>1</sup> 모든 관련된 상태평가 매개변수(기준)에 대한 상대적 가중치는 이 구조물에서 동일하다 (0.2)

<sup>2</sup> 상태지수 (CI)는 정의에 따라 관련 긴급보수를 나타낸다. (선택한 보수등급에 따라)

<sup>3</sup> 상태평가 데이터에 대한 다양한 CIN 값은 Table 2를 이용하여 얻을 수 있다.

Table 4 구조 “B”에 대한 상대적 보수 우선순위 평가

상태평가 데이터, 관련 CI 값 및 각 부재에 대한 CI <sub>N</sub> 값													
외관 검사				강도(MPa)			USPV (Km/sec)			탄산화 깊이 / 피복			통합부재 CI
부재 번호	Data	CI	CI <sub>N</sub>	Data	CI	CI <sub>N</sub>	Data	CI	CI <sub>N</sub>	Data	CI	CI <sub>N</sub>	
1	1.54	2	0.38	27.56	0	0.00	4.16	0	0.00	0.40	0	0.00	2.00
2	1.54	2	0.38	24.34	0	0.00	4.28	0	0.00	0.35	0	0.00	2.00
3	1.54	2	0.38	29.98	0	0.00	4.12	0	0.00	0.32	0	0.00	2.00
4	2.70	3	0.63	20.90	3	0.50	3.84	0	0.00	4.38	5	1.00	5.00
5	3.16	3	0.63	20.67	3	0.50	3.12	2	0.25	2.50	5	1.00	5.00
6	1.54	2	0.38	23.43	0	0.00	3.37	1	0.08	0.00	0	0.00	2.11
7	1.54	2	0.38	18.60	3	0.50	3.14	2	0.25	0.40	0	0.00	3.22
8	3.28	3	0.63	19.86	3	0.50	2.79	3	0.50	0.25	0	0.00	3.25
9	1.54	2	0.38	29.75	0	0.00	3.82	0	0.00	0.24	0	0.00	2.00
10	1.54	2	0.38	27.56	0	0.00	3.36	1	0.08	0.71	1	0.18	2.25
11	1.82	2	0.38	29.17	0	0.00	3.44	1	0.08	0.44	0	0.00	2.11
12	3.18	3	0.63	27.91	0	0.00	3.61	0	0.00	0.11	0	0.00	3.00
13	1.54	2	0.38	3055	0	0.00	3.23	2	0.25	0.10	0	0.00	2.24
14	1.54	2	0.38	27.91	0	0.00	3.46	1	0.08	0.20	0	0.00	2.11
15	1.54	2	0.38	28.83	0	0.00	4.08	0	0.00	0.20	0	0.00	2.00
16	2.70	3	0.63	25.38	0	0.00	3.21	2	0.25	0.20	0	0.00	3.11
17	1.82	2	0.38	30.44	0	0.00	3.61	0	0.00	0.20	0	0.00	2.00
18	3.67	4	0.88	24.46	0	0.00	2.79	3	0.50	1.35	5	1.00	5.00
19	2.70	3	0.63	25.49	0	0.00	2.65	3	0.50	1.50	5	1.00	5.00
20	3.67	4	0.88	19.98	3	0.50	3.30	1	0.08	2.60	5	1.00	5.00
구조물의 상태지수													3.02

참고사항 : 모든 관련된 상태평가 매개변수(기준)에 대한 상대적 가중치는 이 구조물에서 동일하다. (0.25)

“중간”에서 “높음”으로, 구조물 B에서는 “중간”으로 평가되었다. 구조물 A의 구조적 상태지수가 가장 높고, 이러한 이유로 보수의 우선권이 가장 높다. 반면에 구조물 C는 구조물 B 보다 더 높은 우선권 부여의 장점을 가지고 있다. 또한 이것들은 지켜져야 하는 반면, 구조물 B와 C 역시 몇몇 요소들의 CI 값은 “중간” 이상의 긴급 보수를 나타내지만, 구조적 범위에서 앞에서 언급한 요소들의 비율은 구조물 A에서 가장 높다(92% 즉, 12개의 결합 요소 중 11개의 CI >=3.0). 유사하게 구조 C에서 87%(23개 중 20개)의 요소들은 구조물 B의 45%(20개 중 9개)와 비교할 때

“중간” 이상의 긴급 보수를 나타낸다.

또한 각 부재의 CI 값들은 노후화와 관련된 문제점의 맥락에서는 아니지만 긴급 보수를 나타낸다. 이는 구조적 안정성 면에서는 즉각적인 위협인자는 아니다. 그러나 이를 장기적으로 방치하는 것은 기하급수적 증가하는 보수비용 상승 등의 심각한 우려가 발생할 수 있다. 그러므로 노후화된 부재들은 지속적이고 주의깊은 관리가 필요하다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 노후화된 부재들은 개별적으로 더 높은 가중치가 할당될 수 있다. 또한, AHP 기반의 기법은 여러 기준을 고려하면서 부재의 상대적 중요성(가중

Table 5 구조 “C”에 대한 상대적 보수 우선순위 평가

상태평가 데이터(특정 기준, 관련 CI 값 및 개별 요소에 대한 CI <sub>N</sub> 값)																
육안 검사				강도(MPa)			USPV (Km/sec)			HCP (mV CSE)			탄산화 깊이 / 피복			통합요소 CI
요소 번호	Data	CI	CI <sub>N</sub>	Data	CI	CI <sub>N</sub>	Data	CI	CI <sub>N</sub>	Data	CI	CI <sub>N</sub>	Data	CI	CI <sub>N</sub>	
1	1.54	2	0.38	10.92	3	0.50	3.19	2	0.25	-226	2	0.55	0.91	3	0.64	3.29
2	1.42	1	0.13	10.84	3	0.50	3.1	2	0.25	-226	2	0.55	0.85	2	0.46	3.29
3	1.42	1	0.13	13.72	0	0.00	3.53	0	0.00	-240	2	0.55	0.71	1	0.18	2.21
4	1.75	2	0.38	9.19	5	1.00	3.03	2	0.25	-203	2	0.55	0.43	0	0.00	5.00
5	3.16	3	0.63	15.42	0	0.00	3.81	0	0.00	-196	1	0.20	1.00	4	0.86	4.10
6	1.42	1	0.13	10.88	3	0.50	3.12	2	0.25	-233	2	0.55	0.71	1	0.18	3.28
7	1.42	1	0.13	13.57	0	0.00	3.36	1	0.08	-123	1	0.20	0.38	0	0.00	1.41
8	1.82	2	0.38	16.9	0	0.00	3.53	0	0.00	-240	2	0.55	0.63	1	0.18	2.30
9	1.42	1	0.13	16.1	0	0.00	3.56	0	0.00	-223	2	0.55	0.94	3	0.64	3.21
10	2.70	3	0.63	19.34	0	0.00	3.32	1	0.08	-379	5	1.00	0.93	3	0.64	5.00
11	1.42	1	0.13	14.76	0	0.00	3.1	2	0.25	-470	5	1.00	0.91	3	0.64	5.00
12	1.42	1	0.13	10.54	3	0.50	3.9	0	0.00	-236	2	0.55	0.85	2	0.46	3.28
13	1.42	1	0.13	15.77	0	0.00	3.72	0	0.00	-397	5	1.00	0.71	1	0.18	5.00
14	1.42	1	0.13	14.75	0	0.00	3.12	2	0.25	-452	5	1.00	0.43	0	0.00	500
15	2.70	3	0.63	16.39	0	0.00	3.13	2	0.25	-217	2	0.55	1.00	4	0.86	4.12
16	2.70	3	0.63	11.54	0	0.00	2.81	3	0.50	-310	4	0.90	0.71	1	0.18	4.12
17	2.88	3	0.63	15.43	0	0.00	3.61	0	0.00	-139	1	0.20	0.38	0	0.00	3.10
18	1.42	1	0.13	11.73	0	0.00	2.82	3	0.50	-350	5	1.00	0.80	2	0.46	5.00
19	1.82	2	0.38	15.05	0	0.00	3.43	1	0.08	336	4	0.90	1.29	5	1.00	5.00
20	1.42	1	0.13	9.65	3	0.50	2.48	4	0.83	-278	3	0.75	0.39	0	0.00	4.12
21	1.54	2	0.38	11.38	0	0.00	3.12	2	0.25	-298	3	0.75	0.56	1	0.18	3.21
22	1.54	2	0.38	11.2	3	0.50	3.16	2	0.25	-234	2	0.55	0.44	0	0.00	3.28
23	1.54	2	0.38	10.83	3	0.50	2.95	3	0.50	-256	2	0.55	0.73	1	0.18	3.31
구조물의 상태지수																3.77

Note : 모든 관련된 상태평가 매개변수(기준)에 대한 상대적 가중치는 이 구조물에서 동일하다 (0.2)

치)을 획득하기 위해 채택할 수 있다.(예를 들어, 보수비용, 상태, 구조적 중요성 등) 유사하게도 다양한 상태평가 기법을 사용한 상대적인 중요성(가중치)은 적절하게 결정될 것이다.

이 모델에 제안된 체계적이고 일관된 접근은 긴급보수의 비교 평가를 가능하게 한다. 이러한 이유로 여러 구조물의 보수 우선순위를 결정함에 있어 많은 도움을 준다. 실험적 상태평가 데이터의 항목화는 실제 적용을 통해 얻은 유지관

리 경험을 통해 검토되고 수정될 수 있다. 이러한 항목화는 여러 전문가들의 참여를 통해 개선될 수 있다. 데이터 유용성에 기초를 둔 계획은 다양한 다른 평가 매개 변수(예를 들어 투수성, 콘크리트 저항성 등)와 다른 노후화 매커니즘(예를 들어 AAR, 황산염 등)에 의해 만들어질 수 있다. 일관된 결론은 제한된 상태 매개변수(구조물 B와 같은, HCP 데이터는 이용할 수 없음)와 제한된 항목화(예를 들어, 현장 타설 콘크리

트 강도, 유리한 세 개의 보수 항목)를 적용함으로써 정리될 수 있다.

### 제안된 방법론의 제약사항

기술자의 판단은 본질적으로 주관적이고, 우선 순위 결정에 영향을 주는 다양한 요소들로 구성되어 있다. 주관적인 결정과 관련된 몇몇의 우려 사항들은 다음과 같다. 다양한 요소/상태평가 측정을 위한 상대적인 가중치 그리고 확실치 않은 데이터로부터의 추론 등 주관적인 결정은 결정 과정에서 완전히 배제될 수 없지만 조직/기관의 기구에서 분석, 평가 등의 방식을 사용함으로써 일관된 방식으로 사용될 수 있다.

불확실한 데이터 측정과 관련된 우려사항들은 증가하는 데이터의 가용성이 고려될 수 있다. 예를 들어, 만약 데이터가 HCP 데이터(예를 들어 누수상태, 콘크리트 피복의 저항성)의 불확실성에 관한 다양한 요소를 적용할 수 있다면, 그때 상응하는 항목은 다양한 상태(예를 들어, 누수상태의 습윤/건조, 콘크리트 저항성의 높음/보통/낮음)를 각기 정의할 수 있고, 더 좋은 의사결정 모델을 도출할 수 있다.

또한 제안된 방법론의 공식화는 이해도, 요구도, 그리고 데이터 유용성에 따라 정립될 것이다. 예를 들어, 표준화된 CI의 계산을 위해 수식 (3)은 다음과 같은 다양한 (단조로운) 함수(각각의 다양한 매개변수)를 개발할 수 있다. 선형, 다항, 지수 등 또한, 이러한 가능성은 다음과 같은 기준에 기본을 둔다. 즉, 노후화 예상 모델, 구조물 결정에서 각각의 긴급보수 그룹의 상대적 가중치, 그리고 보수비용의 단계적 확대 등이다. 그러나 본 연구에서는 계산상의 편의를 위해 선형보간법 모델을 사용하였다.

제안된 모델은 다양한 상태평가를 적용한 다양한 구조물 중에서 보수 우선순위에 대한 체계

적인 접근법을 제공한다. 이러한 이유로 정량적 중요 결정과 관련 있는 유지보수 정책의 표준화, 보수 예산의 할당 등에 매우 유용하다는 것을 입증할 수 있다. 뿐만 아니라 주기적인 점검을 통해 얻은 CI 값은 추가적인 정보가 업데이트 될 수 있고, 적절한 예측 모델은 노후화된 RC 구조물에서 긴급보수를 가능하게 할 수 있다.

### 참고문헌

1. ACI Committee 201, "Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service", ACI 201.1R-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008.
2. ASTM C876-91, "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 1999.
3. BS 6089, "Guide to Assessment of Concrete Strength in Existing Structures", British Standards Institution, UK, 1981.
4. BS EN 13791, "Assessment of In-Situ Compressive Strength in Structures and Precast Concrete Components", British Standards Institution, UK, 2007.
5. Bungey, J. H. and Millard, S. G., Testing of Concrete in Structures, Blackie Academic & Professional, Glasgow, Scotland, 1996.
6. CPWD, "Handbook on Repair and Rehabilitation of RCC Buildings", Central Public Works Department (CPWD), Govt. of India, New Delhi, India, 2002.
7. Das, S., Ojha, P. N. and Bhattacharjee, B., "Test Selection for In-situ Testing of Concrete in Structures using Analytical Hierarchy Procedure", Indian Concrete Journal, 78(4), 2004, 22-28.
8. Dhir, R. K., Jones, M. R. and McCarthy, M. J., "Quantifying chloride-induced corrosion from half-cell potential", Cement and Concrete Research, 23(6), 1993, 1443-1454.
9. FHWA, "Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges", Rep. No.: FHWA-PD-96-001, Federal Highway Administration, U.S. Dept. of Transportation, Washington, D.C., 1995.
10. IAEA, "Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures", Training Course Series No. 17, IAEA--TCS--17, International Atomic

- Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria, 2002.
11. IS 13311 (Part 1), "Non-Destructive Testing of Concrete - Methods of Test: Part 1 Ultrasonic Pulse Velocity", IS 13311 (Part 1): 1992 (Reaffirmed 1999), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 1992.
  12. Jain, K. K. and Bhattacharjee, B., "Application of Fuzzy Concepts to the Visual Assessment of Deteriorating Reinforced Concrete Structures", *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(3), 2012, 399-408.
  13. Ratay, R. T., "Structural Condition Assessment - An Introduction", Proc., Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety, ASCE, Reston, VA, 2006, 106-106.
  14. Sasmal, S. and Ramanjaneyulu, K., "Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach", *Expert Syst. Appl.*, 35(3), 2008, 1430-1443.
  15. Song, H.-W. and Saraswathy, V., "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review", *International Journal of Electrochemical Science*, 2(1), 2007, 1-28.

담당 편집위원: 박철우  
 (강원대학교 토목공학과 교수)  
 tigerpark@kangwon.ac.kr