

# 철근이 부식된 철근콘크리트 구조물의 건전도 평가기술

## Integrity Estimation of The RC Members Damaged by Corrosion of Main Rebar

권대홍\*      유석형\*\*      노삼영\*\*\*  
Kwon, Dae Hong      Yoo, Suk Hyeong      Noh, Sam Young

### Abstract

It is necessary to guarantee the safety, serviceability and durability of reinforced concrete structures over their service life. However, concrete structures represent a decrease in their durability due to the effects of external environments according to the passage of time, and such degradation in durability can cause structural degradation in materials. In concrete structures, some degradations in durability increase the corrosion of embedded rebars and also decrease the structural performance of materials. Thus, the structural condition assessment of RC materials damaged by corrosion of rebars becomes an important factor that judges needs to apply restoration.

In order to detect the damage of reinforced concrete structures, a visual inspection, a nondestructive evaluation method(NDE) and a specific loading test have been employed. However, obscurities for visual inspection and inaccessible members raise difficulty in evaluating structure condition. For these reasons, detection of location and quantification of the damage in structures via structural response have been one of the very important topics in system identification research. The main objective of this project is to develop a methodologies for the damage identification via static responses of the members damaged by durability. Six reinforced concrete beams with variables of corrosion position and corrosion width were fabricated and the damage detections of corroded RC beams were performed by the optimization and the conjugate beam methods using static deflection. In results it is proved that the conjugate beam method could predict the damage of RC members practically.

키워드 : 건전도 평가, 비파괴검사, 내구손상, 철근부식

Keywords : Integrity Estimation, Nondestructive Test(NDT), Damage by Durability, Corrosion of Rebar

### 1. 서론

구조물의 손상을 검출하기 위하여 종래에 육안조사, 비파괴검사 및 재하시험 등을 수행하여 왔으나 이러한 방법들은 계측치의 모호함과 장비의 신뢰성 및 손상위치 접근의 난해함 등으로 인하여 손상진단에 어려움을 증가시키는 원인이 되어왔다. 따라서 최근에는 손상된 구조물의 정적·동적인 구조적 반응(고유주기, 진동모드 및 처짐)을 이용하여 구조물의 손상을 검출하기 위한 System Identification 기법이 활발히 연구되고 있다. SI기법의 개념은 20여년 전부터 토목분야에 적용되기 시작하여 왔으며, 최근에는 계측장비의 발전과 계측비용의 감소로 인하여

여 상당한 관심을 불러일으키고 있다. SI기법은 일반적으로 손상구조물의 고유주기나 진동모드와 같은 동적특성치를 이용하여 손상을 파악하는데 중점적으로 연구되고 있다. 그러나 동적계측을 통한 SI기법은 동적특성치를 계측할 만한 충분한 크기의 가진이 어렵고, 이러한 동적특성치들이 구조물의 손상에 대하여 민감도가 낮고, 또한 아직은 진동계측 장비의 신뢰성이 부족하다는 문제점이 남아있다. 정적 처짐을 이용할 경우 위와 같은 동적계측의 문제점이 상당부분 감소되어 손상검출에 대한 신뢰성이 높은 것으로 보고 이에 대한 연구가 국내외적으로 수행되었으나 아직 충분한 연구가 부족한 실정이다.

구조물의 내구성의 저하는 구조적 성능을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 특히, 콘크리트 구조물의 다양한 내구성 저하현상들은 철근부식을 중심으로 영향을 주고받으며 진행되며, 이와 같은 철근의 부식은 구조물의 내력 성능을 저하시키게 된다. 따라서 내구손상된 구조물의 강

\* 주저자, 한양대학교 건축환경공학과 석사과정

\*\* 교신저자, 한양대학교 BK21 계약교수 (piter31@hanyang.ac.kr)

\*\*\* 한양대학교 건축학부 조교수

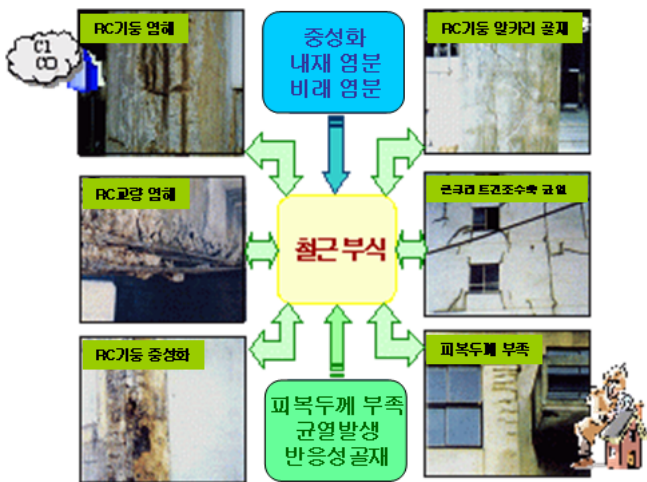


그림 1. 철근의 부식과 내구성저하

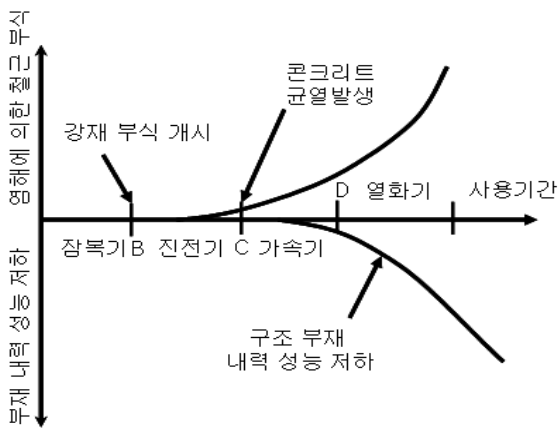


그림 2. 철근부식과 내력성능저하관계

성 및 처짐 등 구조적 거동특성을 계측함으로써 내구손상을 검출할 수 있다.

따라서 본 과제에서는 내구손상된 구조물의 정적처짐 계측을 통하여 손상위치와 정도를 파악할 수 있는 알고리즘을 구축함으로써 내구손상된 구조물의 건전도 평가 기술을 정립하고자한다.

## 2. 철근부식된 보의 구조실험

### 2.1 철근부식 촉진실험

철근이 부식된 RC보의 정적하중에 의한 처짐을 이용하여 손상을 검출하고 부식에 따른 내력성능을 평가하기 위하여 표 1과 같이 부식의 위치와 부식의 폭을 변수로 하는 실험체를 제작하였으며, 실험체 상세 및 철근부식 위치는 그림3과 같다. 휨파괴를 유도하기 위하여 전단보강을 충분히 한 후 인장철근에는 각 부식위치 및 폭에 따라 스트레인 게이지와 전선을 부착하고 절연 및 방수처리를 하였다. 철근의 부식은 그림4와 같이 전위차 인공부식 촉진법을 이용하여 강제부식을 유도하였다. 부식폭에

맞는 수조를 제작한 후 3%의 NaCl용액을 넣고 실험체의 인장철근에 (+)극, 콘크리트 표면에서 약 2cm 이격시킨 동판에 (-)극을 연결하여 직류전류가 흐르게 하였다. 계획된 부식율의 유도는 식(1)과 같이 패러데이 전기분해 법칙(Faraday's Law of Electrolysis)에 의한 이론적인 근거를 바탕으로 부식시간을 산출함으로써 부식율을 예상하였다.

$$\text{부식중량손실} = \frac{\text{전류} \times \text{시간} \times \text{철근의원자질량}}{\text{반응전자수} \times \text{패러데이상수}} \quad (1)$$

전류를 공급하고 2시간정도 흐른 뒤부터 녹물이 발생하기 시작하였으며, 초기에는 급속하게 부식이 진행되고 점차 부식의 속도가 낮아졌다. 최종적으로 균열은 발생하지 않았으나, 콘크리트 공극을 통하여 부식생성물이 분출되었다.

표 1. 실험체 일람표

구분	부식율 (%)	부식 위치	부식폭 (cm)	실험체명
건전	0		0	N
부식	3	중앙	5	C3-5
			40	C3-40
		측면	5	E3-5
			40	E3-40
전면	-	A3		

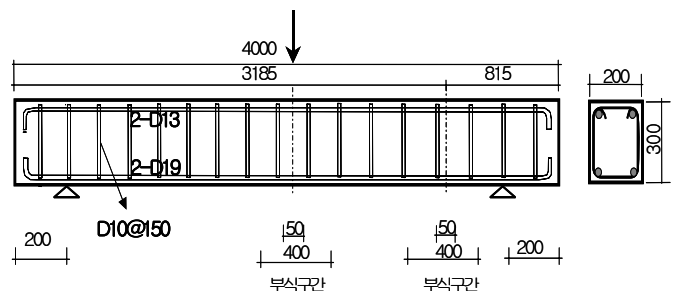


그림 3. 실험체 상세 및 부식위치

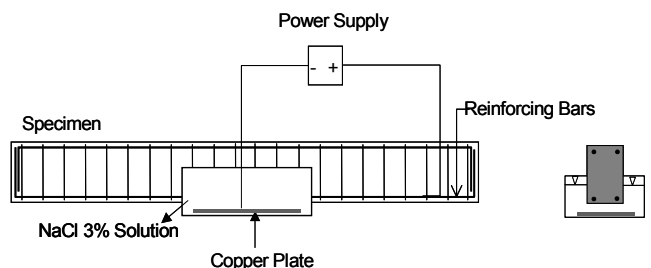


그림 4. 전위차 인공부식 촉진법

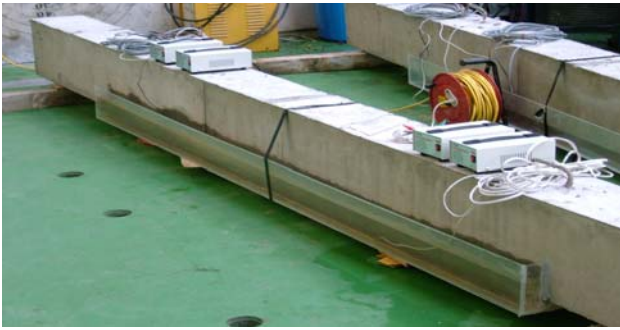


그림 5. 국부부식촉진상황

2.2 하중재하

하중의 재하는 정적하중에 의한 처짐을 계측하기 위하여 사용하중을 정적으로 1점 가력하여 처짐을 측정하였다. 사용하중의 크기는 철근 콘크리트 보 실험체가 탄성 거동을 하는 범위 내에서 처짐을 측정하여야 하므로 예상최대하중의 60%수준(4tf)으로 가력하였다. 이는 균열모멘트를 유발하는 하중보다 큰 값이지만 RC보에 대하여 균열이후에도 균열단면에 대한 단면2차모멘트를 이용한 유효등가강성에 의한 탄성해석이 가능하므로 사용하중으로서 크기가 적절할 것으로 판단된다.

실험체의 가력은 그림 6과 같이 단순지지된 상태에서 정적하중으로 1점 가력하였으며, 이는 3.2절에서 소개하는 공액보법을 이용한 손상검출 시 강성의 감소에 의한 공액보에서의 탄성하중에 대한 모멘트도와 유사한 형태의 실구조물에서의 처짐곡선을 유도하기 위함이다. 또한 하중 위치를 달리하는 각각의 Load Case에 따른 정적 처짐자료를 확보하기 위하여 4가지 하중재하조건에 대하여 처짐을 측정하였다. 처짐의 계측은 LVDT를 이용하여 중앙으로부터 손상위치방향으로 45cm 간격으로 각 위치에서의 처짐을 계측하였으며, 계측의 신뢰도를 높이기 위하여 계측전 LVDT를 1/100mm 단위에서 보정하여 처짐계측을 수행하였다.

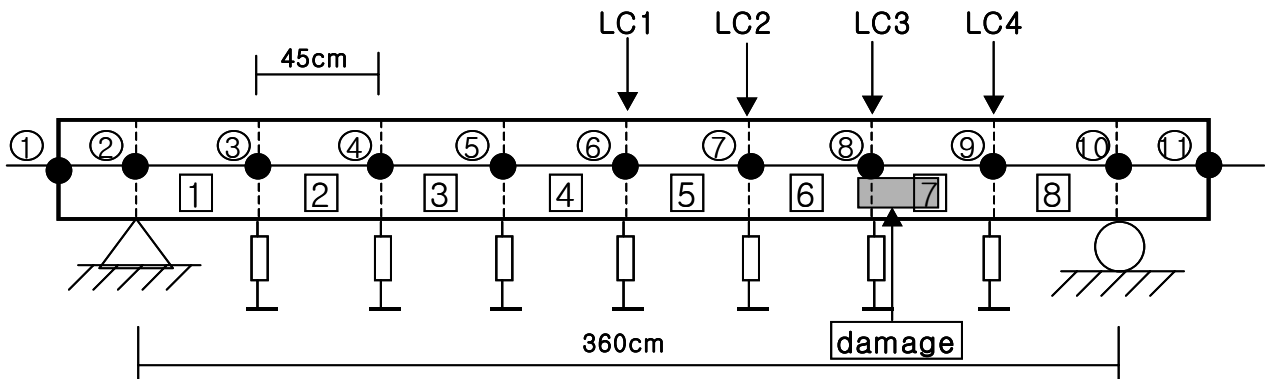


그림 6. 가력 및 처짐 계측위치

3. 손상검출

3.1 Optimization

정적처짐을 이용한 손상검출을 위하여 최적화 기법을 적용할 수 있다. 구조물의 손상은 요소의 강성비로서 정의될 수 있기 때문에 정적처짐에 대한 계측치와 계산치의 최적화 과정을 통하여 요소의 강성을 개선시킬 수 있다. 최적화를 위한 목적함수는 건전상태 구조물의 FEM 해석에 의한 처짐  $D^C$  와 손상구조물로부터 계측된 처짐  $D^M$  을 이용하여 다음 식(2)와 같이 구성되며 그림 7과 같은 과정을 통하여 해석모델을 개선함으로써 손상을 검출할 수 있다.

$$F = \sum_{i=1}^m \left| \frac{D_i^M}{D_i^C} - 1 \right| \tag{2}$$

본 연구에서는 Automatic Design Synthesis(ADS) 최적화 프로그램을 이용하여 손상검출을 수행하였으며, 해석은 그림 6과 같이 보 실험체를 모델링하여 탄성해석을 수행하였다. 실험을 통하여 계측된 3%부식된 실험체의 처짐 및 하중 값을 이용하여 최적화 과정을 수행하여 도출된 각 요소에서의 건전도 지수(Health Index, Kd/Ko)는 그림 8과 같다. 3%의 부식율은 건전실험체와 비교하여 강성의 저하가 미소하여 건전도 지수에서 손상이 뚜렷하게 파악되지 않고 있으나, LC1과 LC2에 비하여 상대적으로 LC3과 LC4에서 손상검출이 잘 나타나고 있다. 철근의 부식으로 인한 균열이 발생할 정도로 부식이 진행될 경우 강성의 저하가 뚜렷하게 나타나게 되고, 또한 처짐계측의 정밀도를 향상시킴으로써 건전도 지수 그래프를 통하여 손상위치와 정도를 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

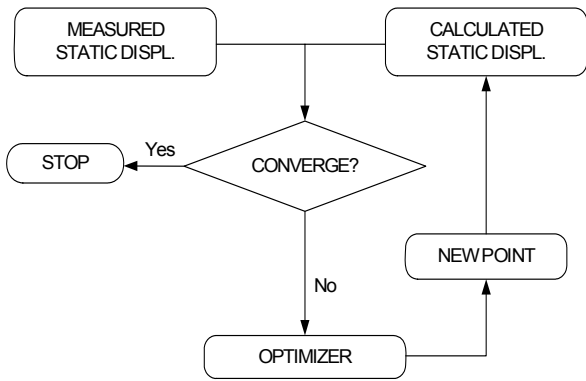
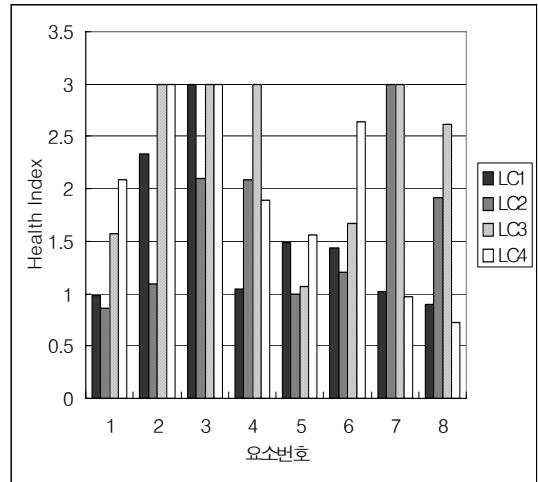
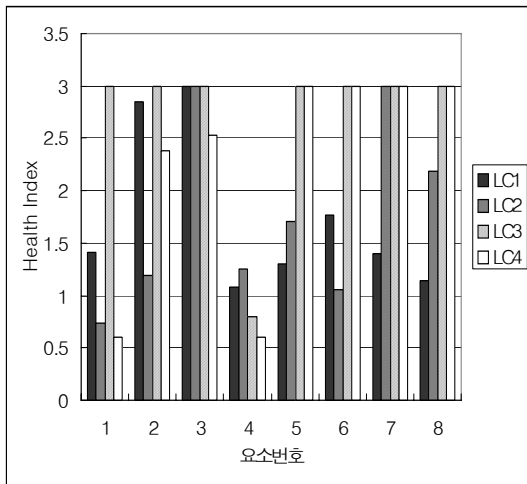


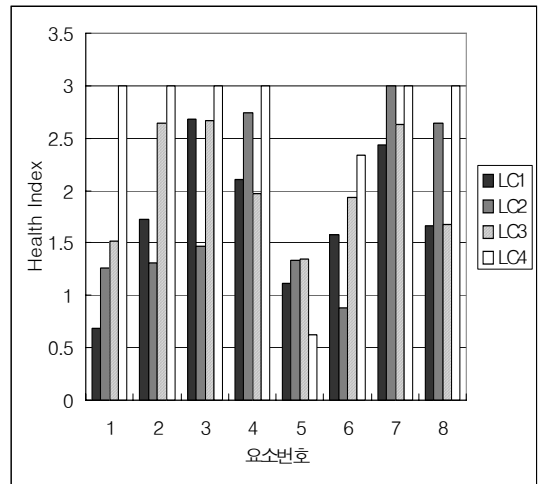
그림 7. 최적화에 의한 손상검출 과정



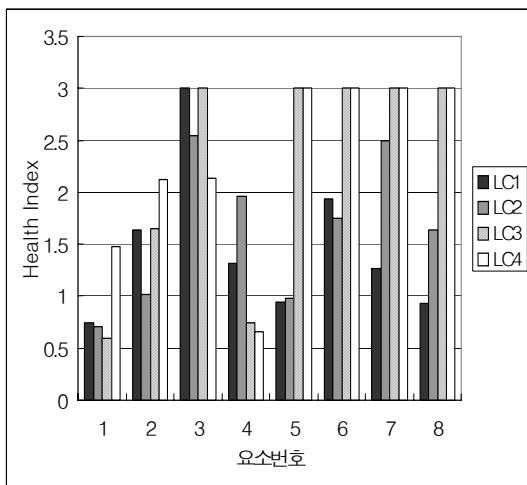
(c) E3-5



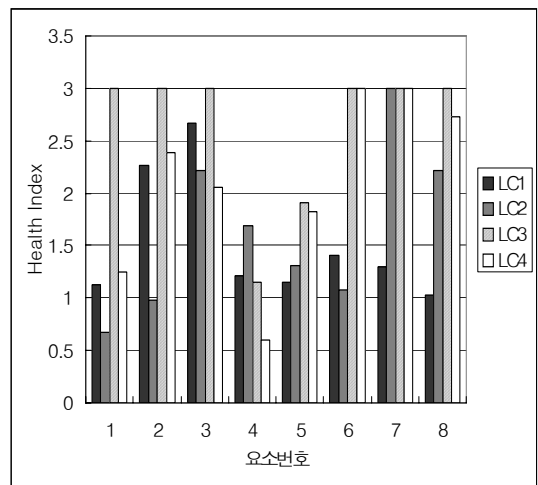
(a) C3-5



(d) E3-40



(b) C3-40

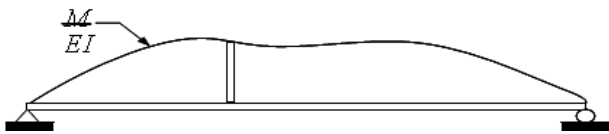


(e) A3

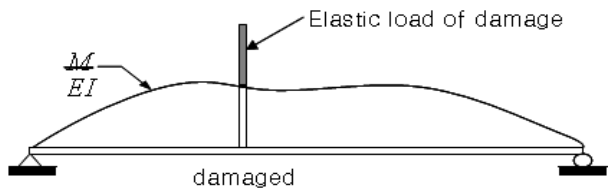
그림 8. 건전도 지수

3.2 공액보법

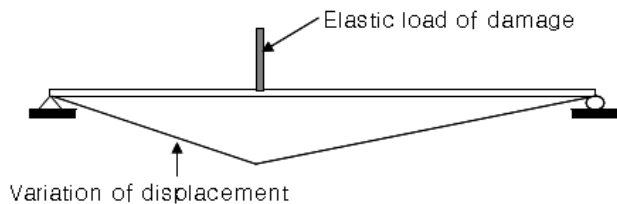
공액보의 이론에 따라 실구조물에 국부적인 손상이 발생하면 그림 9(b)에서와 같이 공액보에서는 탄성하중이 추가적으로 발생한다. 또한 그림 9(c)와 같이 손상위치에서의 모멘트 영향선은 손상위치에서 최대가 되며, 이러한 영향선은 결국 실구조물의 손상에 의한 추가처짐곡선과 유사한 형태를 지니므로 손상에 의한 추가처짐 곡선을 알면 손상의 위치를 파악 할 수 있다. 손상에 의한 추가 처짐을 이용한 손상검출기법은 비교적 간단하며, 또한 손상에 대한 민감도가 높아 실용적으로 활용 될 수 있다. 실구조물에서 손상에 의한 추가처짐곡선은 구조물의 준공 이후부터 지속적인 변형관측을 통하여 구할 수 있다. 철근이 3% 부식보 실험을 통하여 계측된 손상에 의한 추가처짐곡선은 그림 10과 같다. 그림 6의 4가지 Load case 에 대한 각각의 추가 처짐곡선을 그림 10에서 나타내고 있으며, 손상위치에서 추가처짐이 최대로 발생하는 것을 알 수 있다. 최적화 기법을 이용한 손상검출 결과보다 손상위치를 정확하게 파악할 수 있으며, 부식율이 높고 처짐계측의 정밀도를 높인다면 더욱 신뢰성있는 손상검출 결과를 얻을 것으로 판단된다.



(a) 건전상태 공액보의 탄성하중

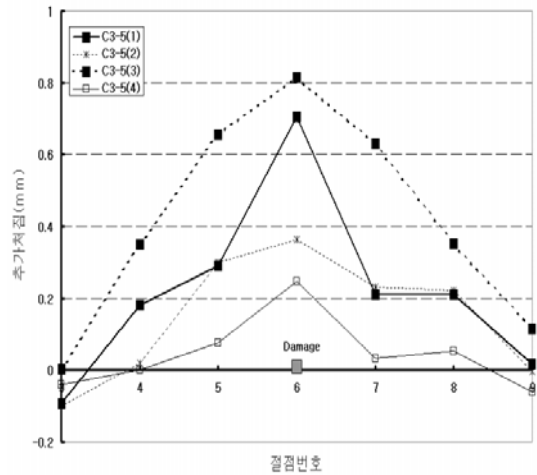


(b) 국부손상위치에서 탄성하중 증가

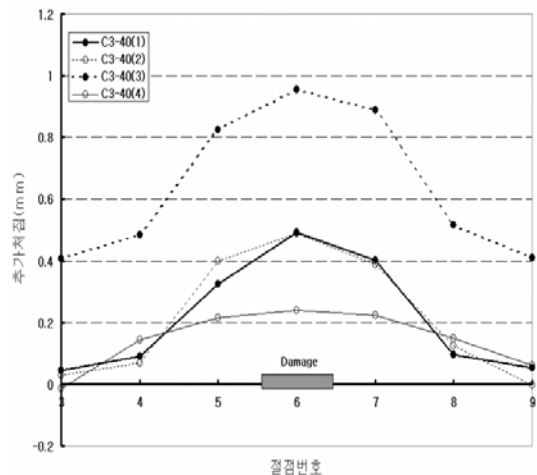


(c) 공액보와 실구조물 처짐

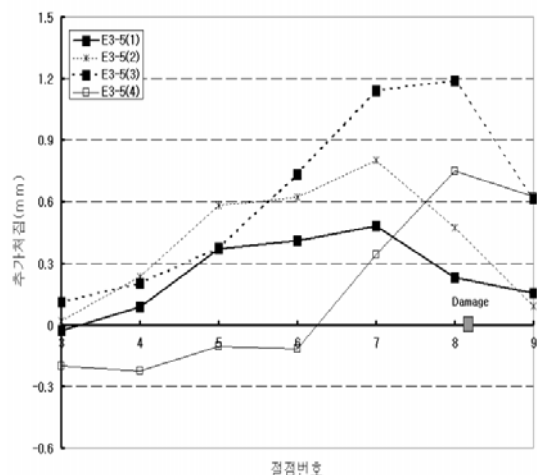
그림 9. 국부손상 구조물의 공액보



(a) C3-5



(b) C3-40



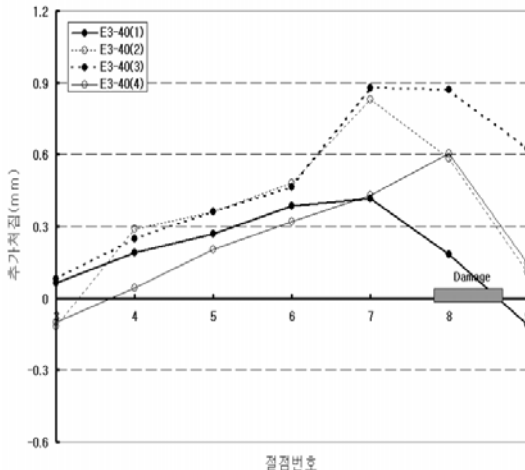
(c) E3-5

감사의 글

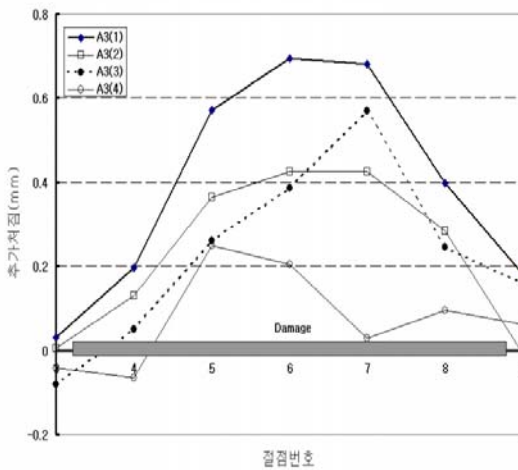
이 연구는 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: 04핵심기술C02-02) 및 과학기술부 우수연구센터육성사업(R11-2005-056-01003-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. P. Hajela and F.J. Soeiro, "Structural Damage Detection based on Static and Modal Analysis", AIAA J., Vol. 28, 6, pp. 1110-1115, 1989.
2. K.D. Hjelmstad and S. Shin, "Damage Detection and Assessment of Structures from Static Response", J. of Engineering Mechanics, Vol. 123, 6, pp. 568-576, 1997.
3. C. Il Yoon, "Damage Identification Techniques for Bridges Using Static Response", PhD Dissertation, Dept. of civil engineering, Hanyang University, Korea, 2002.



(d) E3-40



(e) A3

그림 10. 손상에 의한 추가처짐 곡선

4. 결론

- 1) 부식율 3% 실험체에서 부식에 의한 균열은 발견되지 않았으며, 건전한 부재에 비하여 부재의 강성 및 휨내력이 감소하였으나, 큰 차이는 나타나지 않았다. 그러나 부식에 의한 균열이 발생할 정도로 부식이 진행될 경우 부재의 손상에 따른 강성 및 휨 내력의 차이가 뚜렷하게 나타날 것으로 판단된다.
- 2) 부식폭이 5cm인 경우에 비하여 부식폭이 40cm인 경우에 손상검출이 잘 나타나고 있으며, 부식율이 증가 할수록 손상검출 기법의 신뢰도가 높아질 것으로 판단된다.
- 3) 부식율 3% 실험체는 강성저하가 미소하여 정적계측을 통하여 부재의 손상이 뚜렷하게 검출되지 않았으나, 균열이 발생할 정도의 부식이 진행할 경우 정적 처짐을 이용한 손상검출이 가능할 것으로 판단된다.