

철근콘크리트기둥의 손상지표 설정과 손상도 평가 Damage Assessment and Establishment of Damage Index for Reinforced Concrete Column

윤일로*, 권용길**
IL-Ro Youn*, Yong-Gil Kwon**

<Abstract>

Damage assessment and Damage index for RC members failed in flexure was investigated by using the nonlinear finite element analysis, included with nonlocal constitutive law, which is analyzed for the localization of the failure on the post-peak region. In the nonlocal constitutive law, The local strains obtained at gauss points were averaged over a particular length, i.e. characteristic length and it was used to evaluate the damage of RC column member. As the analysis results, The value of nonlocal strain shows less mesh sensibility. In the damage assessment, It was confirmed that evaluations of damage of RC member were able to use nonlocal compressive strain on a cover concrete and a core concrete of the member. Moreover it was confirmed that damage process for the statically indeterminate structure was able to evaluate the damage context of the component members of the structure.

Keywords : *Nonlocalization, Damage Index, Damage Assessment, Bending Failure, Post-peak Regime*

1. 서 론

RC 구조를 대상으로 하는 비선형 해석은 해석이론의 발전과 해석기술의 향상으로 인해 최대하중뿐만 아니라 최대하중이후의 post-peak 영역까지도 예측이 가능하게 되었다. 특히 유한 요소법을 이용한 비선형 해석은 부재Level의 해석은 물론 구조Level의 해석까지도 충분히 신뢰할 수 있는 해석기법으로써 인식되어지고 있다. 이에 발맞추어 일본 등의 여러 국가의 콘

크리트표준시방서의 내진성능조사에서는 비선형해석을 성능조사기법의 원칙으로 정하고 콘크리트의 응력-변형률관계를 파괴이후의 연화영역(softening regime)까지 고려하도록 명시하고 내진성능을 구조물의 복구성과 손상 정도를 결부시켜 정의하고 있다.

일반적인 공학적 재료의 응력-변형률 곡선에서 재료의 파괴진전 시 나타나는 변형률연화(strain softening) 현상은 국부의 집중소성변형 현상과 밀접한 관계가 있으며 이러한 변형률연

* 교신저자, 정회원, 상주대학교 토목공학과 교수, 工博
E-mail : youn@sangju.ac.kr

** 충북대학교 토목공학과 연구원, 工博

* Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil Engineering, Sangju National University.

** Researcher, Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University.

화는 음의 기울기를 가지는 응력-변형률곡선을 의미한다.

이러한 변형률연화 재료에 대한 파괴이후의 유한요소법의 해석적 결과는 요소크기에 따라 수렴점이 다르게 평가되는 요소의존성을 나타낸다. 이와 같은 요소의존성은 유한요소법에서 발생하는 오차와는 근본적으로 다른 문제이다⁷⁾.

따라서, post-peak영역에서 발생하는 손상 정도를 해석적으로 적절히 평가하기 위해서는 이와 같은 요소의존성을 적절히 제거하거나 저감시킬 수 있는 해석기법의 확립과 필요성이 대두되고 있는 실정이다^{4,5,6)}.

일반적으로 RC부재에 발생하는 손상, 즉, 파괴는, 대부분의 경우 소성현지와 같은 국소화된 영역에서 발생한다. 이러한 국소화영역에서의 손상정도를 적절히 평가하기 위해서는 국소화영역을 명확히 규정함과 동시에 국소화영역에서 발생하는 변형률연화 현상에 의한 요소의존성을 저감시킬 필요성이 있다.

더욱이, 국소화영역에서의 손상을 표현할 수 있는 손상지표로서는 국소화영역에서의 변형률 값에 의해 정의하는 것이 합리적이다.

본 연구에서는 RC기둥을 대상으로 비선형 유한요소법을 이용하여 post-peak영역에서의 손상도를 해석적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 먼저 비선형 유한요소법을 이용하여 post-peak영역 해석 시 발생하는 요소크기에 대한 의존성을 저감시킬 수 있는 적분형 비국소화 기법의 적용성을 검토하고 post-peak영역의 손상도 평가 시 손상지표로써의 비국소화변형률에 대한 적합성을 검토하였다.

2. 적분형 비국소화 기법

2.1 개요

본 논문에서는 post-peak영역에서의 해의 유일성과 요소 크기에 대한 의존성을 저감시킬 수 있는 적분형 비국소화기법을 이용하여 post-peak영역에서의 하중-변위관계와 변형률의 요소크기에 대한 비의존성을 검토하였다.

적분형 비국소화 기법은 임의 점의 역학적 정보는 그 점의 역학적 정보뿐만이 아니라 이웃하는 점의 정보에도 의존한다고 가정한다. 즉, 요소크기에 의존하는 국소적인 역학적 정보를 이용하는 국소해석기법과는 다르게 길이스케일

을 가지는 재료의 고유크기(특성길이)를 정의하고 그 영역 내에서 얻어지는 비국소량을 이용하여 임의 점의 역학적 정보를 계산 한다^{1,2,5,6)}.

Bazant¹⁾, Jirasek⁶⁾등은 3차원 변형률공간상의 임의점 x 에 대한 비국소 변형률량 $\bar{f}(x)$ 을 식(1)과 같이 정의 하였다.

$$\begin{aligned} \bar{f}(x) &= \int_V W(x, \xi) f(\xi) dV(\xi) \\ &\cong \bar{f}_i = \Omega_{ij} f_j \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$W(x, \xi)$: 비국소화연산자(Nonlocal Operator)

Ω_{ij} : 비국소화 연산자의 이산화에 따른 비국소화 변환매트릭스

i, j, x, ξ : 전체해석 영역 내에 존재하는 적분점의 좌표

V : 적분 영역, $f(\xi)$: 국소 변형률량

비국소화 연산자 $W(x, \xi)$ 와 대표체적 $V_r(x)$ 은 다음의 식(2), 식(3)과 같이 정의할 수 있다.

$$W(x, \xi) = \frac{\alpha(\|x - \xi\|)}{\int_V \alpha(\|x - \zeta\|) dV(\zeta)} \quad (2)$$

$$V_r(x) = \int_V \alpha(\|x - \zeta\|) dV(\zeta) \quad (3)$$

여기서,

$\alpha(x, \xi)$: 비국소화 영역내의 가중평균을 결정하는 형상함수

$\|x - \xi\|$: x 점과 ξ 점의 위치벡터의 크기

ζ : 대표체적($V_r(x)$)에 존재하는 적분점의 좌표

2.2 적분영역의 정의 및 특성길이

비국소화 영역내의 가중평균을 결정하는 형상함수 $\alpha(x, \xi)$ 은 손상영역을 결정하는 중요한 함수이다. 비국소화영역의 가중치를 결정하는 형상함수 $\alpha(x, \xi)$ 는 임의점 x 에 대해 대칭형상을 가지는 함수를 사용하는 것이 일반적이다.

형상함수는 일반적으로 길이스케일을 가지는

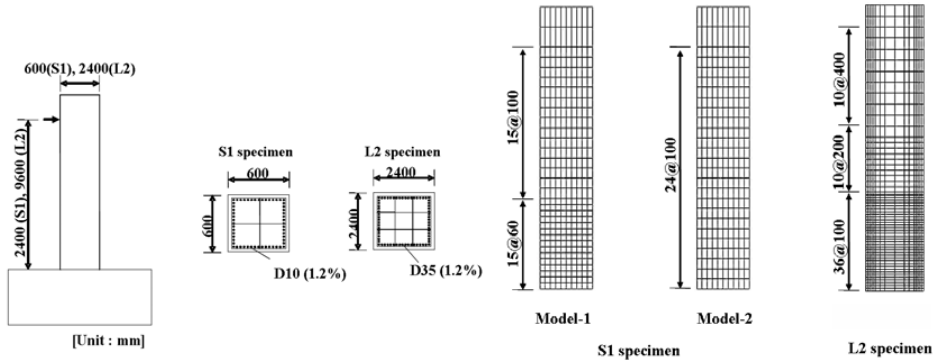


Fig. 1. Analysis model and Mesh figuration.

Table 1. Material Properties of RC column⁴⁾

	콘크리트의 재료특성			철근의 재료특성	
	압축강도(MPa)	인장강도(MPa)	탄성계수(GPa)	탄성계수(GPa)	항복강도(MPa)
S1	39.0	2.65	31	178	395
L2	32.6	2.35	29	177	424

특성길이의 함수이며, Bell 형태의 함수(식(4)) 또는 가우스 함수(식(5))를 사용 한다^{10,11,12,13,14,15)}. Bazant등은 2차원변형률공간에서 다음과 같이 Bell형태의 함수를 제안하였다^{1,2,9)}.

$$\alpha(\|x - \xi\|) = \begin{cases} \frac{15}{16R} \left(1 - \frac{\|x - \xi\|^2}{R^2}\right)^2, & \|x - \xi\| \leq R \\ 0.0, & \|x - \xi\| \geq R \end{cases} \quad (4)$$

여기서, R : 작용반경

혹은 다음과 같은 가우스 함수를 이용하여 형상함수를 정의 할 수 있다.

$$\alpha(\|x - \xi\|) = e^{-\left(\frac{\|x - \xi\|}{l^*}\right)^2} \quad (5)$$

여기서, l^* : 특성길이

본 논문에서는 압축응력상태의 특성길이를 결정하기 위해 실험결과³⁾를 통해 얻어진 압축강도와 특성길이의 상관관계를 이용하였으며, 약 300mm의 일정한 값으로 특성길이를 결정

하였다.

또한, 인장응력상태에서의 특성길이는 기존 연구자들^{1,5,6,9)}에 의해 제안된 골재크기의 약 3 배되는 값을 사용하였다. 함수의 형태는 수치해석상의 간편성을 위해 직사각형 형태의 단순한 함수형태를 가진다고 가정하였다.

2.3 재료모델

재료의 특성을 결정하는 응력-변형률관계는 식(6)와 같은 손상모델에 기초하여 결정하였다. 손상정도를 나타내는 $\Omega_{nonlocal}$ 은 0부터 1까지 변하는 손상매개변수이며 단조증가하는 비국소화 변형률의 함수이다. E_0 는 초기 접선탄성계수이다.

$$\sigma = (1 - \Omega_{nonlocal}) E_0 \epsilon_{local} \quad (6)$$

본 논문에서는 압축응력상태의 손상도와 인장응력상태의 손상도를 구분하기 위해 식(7), 식(8)과 같은 손상매개변수를 새로이 정의하였다. 식(7)는 Saenz의 등가일축압축응력-변형률 관계로부터, 식(8)은 인장응력상태에서의 손상매개변수로써 인장강성모델로부터 정의하였다⁴⁾.

$$\Omega_{nonlocal} = 1.0 - \frac{1.0}{1.0 + a \frac{\epsilon_{nonlocal}}{\epsilon_c} - b \left(\frac{\epsilon_{nonlocal}}{\epsilon_c} \right)^2 + c \left(\frac{\epsilon_{nonlocal}}{\epsilon_c} \right)^3} \quad (7)$$

$$\Omega_{nonlocal} = 1.0 - \frac{f_t}{E_0 \epsilon_{nonlocal} (1.0 + C \sqrt{200.0 (\epsilon_{nonlocal} - \epsilon_c)})} \quad (8)$$

여기서,

$$a = \left(R + \frac{E_0}{E_s} - 2 \right), \quad b = 2R - 1, \quad c = R,$$

$$R = \frac{E_0 (\sigma_f / \sigma_f - 1)}{E_s (\epsilon_f / \epsilon_c - 1)^2} - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_f}$$

3. 해석대상

본 논문에서는 RC기둥⁴⁾을 대상으로 손상도를 평가하고 손상지표로써 비국소화 변형률에 대한 적합성을 검토하였다. 적합성을 검토하기 위한 해석 대상의 구조재원과 요소분할형상을 Fig.1에 나타내었으며, 해석에 사용된 재료특성은 표 1.에 나타내었다. 해석대상의 단면크기는 S1실험체의 경우, 600×600(mm)이며, 대형단면인 L2실험체의 경우는 2400×2400(mm)이다. 두 종류의 실험체 모두 축방향철근비는 1.2%, 전단스팬비는 4.0이며 띠철근을 충분히 배근시켜 휨파괴에 의한 파괴형태를 유도하였다. S1실험체의 경우, 손상지표가 요소크기에 대한 의존성을 확인하기 위해 2종류의 요소분할형상을 이용하였다. 해석방법으로는 비선형 유한요소법을 이용하여 일방향 정적재하 해석을 수행하였다. 해석코드로는 나고야대학에서 철근콘크리트진용으로 개발된 철근콘크리트구성모델인 Lattice Equivalent COntinuum Model (LECOM)⁸⁾을 사용하였으며 비국소화모듈을 탑재하여 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

휨파괴가 발생하는 RC기둥부재 경우, 압축을 받는 콘크리트의 변형률응답은 압축축의 축방향 철근의 인발과 좌굴의 영향뿐만이 아니라 내부 콘크리트의 경우, 띠철근의 구속효과로 인

해 내부콘크리트의 손상도는 피복 콘크리트와 차이를 보일 수 있다. 따라서, RC기둥의 파괴진행상태에 대한 손상도 평가는 피복콘크리트와 내부콘크리트 각각에 대하여 평가되어야만 한다. 지금까지의 대부분의 연구자들에 의해 수행된 연구에서는 내부콘크리트와 피복콘크리트의 응력-변형률관계를 다르게 고려하여 이러한 구속효과를 표현하고 있다⁴⁾. 본 연구에서는 압축응력상태에서의 응력-변형률관계를 2.3절의 식(7)에 나타낸 일반적인 응력-변형률관계로부터 유도된 압축손상도를 이용하여 해석을 수행하였으며 이에 따른 내부콘크리트와 피복콘크리트의 손상정도를 각각 평가하였다. Fig.2에 S1실험체를 대상으로 요소크기에 따른 Model-1과 Model-2의 하중-변위관계를 도시하였다. 본 해석에서는 축방향철근의 인발에 의한 급격한 철근의 좌굴거동을 고려하지 않았기 때문에 최종파괴 시에 발생하는 하중저하를 적절히 표현하지 못하였으나 최대하중과 post-peak영역에서의 거동을 적절히 평가하고 있는 것을 알 수 있다.

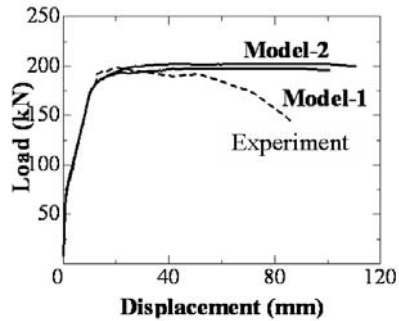
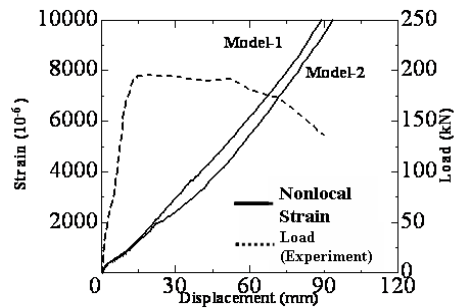
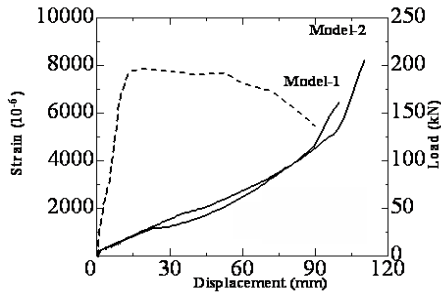


Fig. 2. Load-Displacement curve(S1).



(a) Progress of Strain at cover concrete



(b) Progress of Strain at core concrete
Fig. 3. Progress of Nonlocal Strain (S1).

4.1 요소크기가 손상지표에 미치는 영향

Fig.3에는 특성길이 300mm로 계산된 기둥 기저부 압축영역에서의 피복콘크리트의 변형률 및 축방향철근 위치(내부콘크리트)에서의 비국소화변형률과 하중의 진정상황을 나타내었다.

해석결과, 파괴이후, 피복콘크리트 및 내부콘크리트의 변형률 모두 요소크기에 크게 영향 받지 않고 일정한 것을 알 수 있다.

또한, 실험결과와 비교할 경우, 최대하중(변위 20mm)시 피복콘크리트의 비국소화변형률이 약

트의 탈락에 의해 하중의 저하가 발생하고 내부콘크리트의 손상에 의해 급격한 하중저하를 보이므로 위의 대응관계는 콘크리트의 파괴현상이 요소크기에 무관하게 적절히 평가할 수 있는 의미 있는 지표라 생각된다.

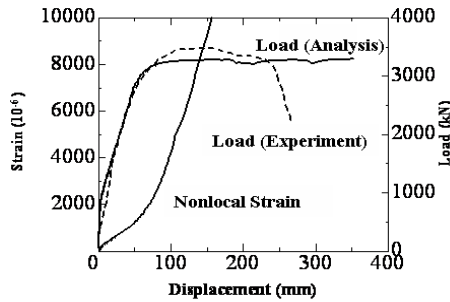
4.2 특성길이가 손상지표에 미치는 영향

비국소화변형률을 손상지표로써 사용하는 경우, 평균화길이, 즉 특성길이를 적절히 설정하는 것이 필요하다.

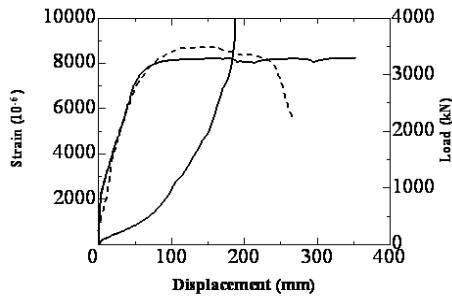
본 연구에서는 평균화길이를 실험에서 시작적으로 관찰된 길이 및 등가소성힌지길이를 이용하여 해석한 비국소화변형률과 본 연구에서 사용된 평균화길이(300mm)의 해석결과와 비교하여 평균화길이의 적절성을 검토하였다. 등가소성힌지길이는 식(9)을 이용하여 계산하였다.

$$L_p = 0.5d + 0.05L_u \quad (9)$$

실험에 의해 관찰된 파괴영역 길이는 실험이 종료된, 즉, 완전 파괴이후 시각적으로 관찰된



(a) Progress of Strain at cover concrete



(b) Progress of Strain at core concrete

Fig. 4. Progress of Nonlocal Strain (L2).

-2000 μ , 하중저하 시에는(7 δ_y , 변위60mm) 약 -5000 μ , 내부콘크리트의 비국소화변형률은 -2500 μ 에 대응하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 급격한 변위증가가 발생할 경우(8 δ_y , 변위 70mm), 내부콘크리트의 비국소화변형률이 약 -5000 μ 에 상응하였다. 또한, 대형단면을 가지는 L2의 경우, 최대하중시(변위100mm)의 피복콘크리트의 변형률은 약 -4500 μ , 내부콘크리트의 변형률은 -2500 μ 을 나타내었다.

실험체의 실제거동을 고려할 경우, 피복콘크리

파괴영역의 길이를 사용하였으며 S1실험체의 경우에는 400mm, L2실험체의 경우에는 800mm로 측정되었다.

이들 파괴영역길이를 이용한 최대하중시, 피복콘크리트의 탈락시, 하중저하개시 및 급격한 하중저하, 즉 주철근의 인발과 좌굴로 인한 급격한 하중저하가 발생하는 시점에서의 비국소화변형률 값을 표2 및 표3에 나타내었다.

Table 2와 Table 3에서 보듯, 평균화길이의 길이가 길어질수록 변위Level에 있어서의 비국

소화변형률이 작아지는 것을 알 수 있다. 특히, L2실험체의 경우, 평균화길이에 의한 각 손상 Level에 대한 변형률 값이 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, 평균화길이는 비국소화변형률에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

따라서, 철근콘크리트 기둥의 손상도를 평가하기 위해 비국소화변형률을 이용하여 손상정도를 파악하고 신뢰할 수 있는 손상지표로 사용하기 위해서는 평균화길이를 적절히 설정하고 손상 정도를 정량적으로 나타내기 위한 비국소화변형률Level를 결정할 필요가 있다.

본 연구의 연구범위 내에서 평균화 길이의 영향을 고려한 피복콘크리트 및 내부콘크리트의 비국소화변형률은 $-2000 \sim -3500\mu$ 에 도달하는 경우가 부재의 최대하중점, 피복콘크리트의 탈락이 시작되는 시점에서의 피복콘크리트의 비국소화변형률은 $-3000 \sim -5000\mu$, 이때의 내부콘크리트의 비국소화변형률은 $-2000 \sim -3000\mu$ 정도인 것으로 판단할 수 있다.

또한, 하중저하가 개시하는 시점에서는 내부콘크리트의 비국소화변형률이 $-2000 \sim -5000\mu$, 급격한 하중저하가 발생할 경우 $-3000 \sim -7000\mu$ 등으로 각각의 시점별로 발생하는 비국소화변형률을 이용하여 손상도를 평가하는 것이 가능하다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 비선형 유한요소법을 이용한 post-peak영역의 해석시 발생하는 요소크기 의존성을 저감시킬 수 있는 적분형 비국소화 기법의 적용성을 검토하고 post-peak영역의 손상도 평가를 위한 손상지표로써 비국소화변형률을 선정하고 비국소화변형률의 적합성을 검토하였다.

검토결과, 적분형 비국소화기법을 적용한 유한요소해석 결과, 요소크기에 따른 하중-응답변위의 요소크기에 대한 의존성이 감소됨을 확인하였다. 따라서, 적분형 비국소화기법을 사용할

Table 2. Nonlocal Strain correspond with Damage Level(S1)
the top position : at cover, the lower position : at core

손상Level	MODEL-1		MODEL-2	
	300mm	파괴영역길이	300mm	파괴영역길이
최대하중 (δ_y , 변위25mm상당)	-2400μ -1300μ	-2000μ -1200μ	-2000μ -1100μ	-1700μ -1000μ
피복콘크리트의 탈락 ($6\delta_y$, 변위50mm상당)	-5100μ -2300μ	-4100μ -1900μ	-4300μ -2000μ	-3400μ -1600μ
하중저하개시 ($7\delta_y$, 변위60mm상당)	-6200μ -2800μ	-5000μ -2300μ	-5500μ -2500μ	-4200μ -2000μ
급격한 하중저하 발생 ($8\delta_y$, 변위70mm상당)	-7400μ -3200μ	-5900μ -2700μ	-6800μ -3100μ	-5000μ -2400μ

Table 3. Nonlocal Strain correspond with Damage Level(L2)
the top position : at cover, the lower position : at core

손상Level	300mm	파괴영역길이	등가소성힌지길이
최대하중 (δ_y , 변위100mm상당)	-4500μ -2500μ	-2800μ -1700μ	-2000μ -1300μ
피복콘크리트의 탈락 ($4\delta_y$, 변위150mm상당)	-9300μ -4900μ	-4800μ -2800μ	-3200μ -2000μ
하중저하개시 ($5\delta_y$, 변위190mm상당)	-18000μ -11000μ	-8000μ -5200μ	-5000μ -3300μ
급격한 하중저하 발생 ($6\delta_y$, 변위230mm상당)	-24000μ -15000μ	-11000μ -7300μ	-6600μ -4500μ

경우, 연화거동을 보이는 재료에 있어, 요소크기에 따른 post-peak영역의 수렴점이 달라지는 단점을 보완할 수 있는 방법으로 사료된다.

또한, 실험을 통해 결정된 압축응력상태에서의 평균화길이(특성길이)를 사용할 경우, 압축부 post-peak영역의 적절한 해석이 가능하다는 것을 확인하였다.

post-peak영역에서의 손상도 평가를 위한 비국소화변형률의 적합성을 검토한 결과 요소크기와 무관하고 합리적인 파괴상태를 적절히 표현할 수 있는 손상지수로써 비국소화변형률을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Bazant, Z. P., and Pijaudier-Cabot, G. "Nonlocal continuum damage, localization instability and convergence." J. Appl. Mech., 55, p.p. 287-293, 1988.
- 2) Bazant, Z. P., and Cedolin, L. Stability of structures, Oxford University Press, New York, 1991
- 3) Nakamura, H., Higai, T." Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete". Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, 2001
- 4) Kwon, Y. G., "Damage Evaluation of RC Members Based on the Non-local Constitutive Law and Averaged Strain", Ph.D thesis, Nagoya University, 2006
- 5) Jirasek, M., and Bazant, Z. P. Inelastic analysis of structures, Wiley, Chichester, U.K. 2001.
- 6) Jirasek, M. "Computational aspect nonlocal models" Solids, Structures, and Coupled Problems in Engineering, ed. W. Wunderlich, Proceedings of the Europea Conference on Computational Mechanics, Munich, Germany, 1999.
- 7) de Borst, R., A tutorial on localization and regularisation, III Congreso de Methodos Numericosen Ingenieria, 1996
- 8) Tanabe,T., Ishtiaq, A.H., "Development of Lattice Equivalent Continuum Model for Analysis of Cyclic Behavior of Reinforced Concrete", Proc. of Japan-US Science Seminar on Post Peak Behavior of RC Structure subjected to Seismic Loads, Vol.2, JCI, p.p., 105-124, Oct., 1999.
- 9) Bazant, Z. P. and Jirasek, M."Non-local Integral Formulations of Plasticity and Damage: survey of Progress", J.Eng. Mech-ASCE, 128(11), pp. 1119-1149, 2002.
- 10) Jirasek, M., and Rolshoven, S. "Comparison of integral-type nonlocal plasticity models for strain-softening materials." Int. J. Eng.Sci., 41(13-14), 1553-1602, 2002.
- 11) Jirasek, M., and Rolshoven, S. "Comparison of integral-type nonlocal plasticity models for strain-softening materials." Int. J. Eng.Sci., 41(13-14), 1553-1602, 2002.
- 12) Eringen, A. C. "Linear theory of non-local elasticity and dispersion of plane wave s." Int. J. Eng. Sci., 10, 425435, 1972.
- 13) Eringen, A. C. "On nonlocal plasticity." Int. J. Eng. Sci., 19, 14611474, 1981.
- 14) Eringen, A. C. "Theories of nonlocal plasticity." Int. J. Eng. Sci.,21, 741751, 1983.
- 15). di Prisco, M., and Mazars, J. "Crush crack: A nonlocal damage model for concrete." J. Mech. Cohesive Frict. Mater., 1, 321347, 1996.

(2007년 1월 30일 접수, 2007년 8월 24일 채택)