

철근콘크리트 구조물에 대한 비국소 이방성 손상모델의 적용

Application of Nonlocal Anisotropic Damage Model for the Reinforced Concrete Structures

우상균* · 권용길** · 한상훈***

Woo, Sang Kyun · Kwon, Yong Gil · Han, Sang Hoon

Abstract

This paper proposed a nonlocal anisotropic damage model to simulate the behavior of plain and reinforced concrete structures that are predominantly tensile and compressive load. This model based on continuum damage mechanics, used a symmetric second-order tensor as the damage variable. For quasi-brittle materials, such as concrete, the damage patterns were different in tension and in compression. These two damage states were modeled by damage evolution laws ensuring a damage tensor rate proportional to the total strain tensor in terms of principal components. To investigate the effectiveness of proposed model, the double edge notched specimen experimented by nooru-mohamed and reinforced concrete bending beam were analyzed using the implementation of the proposed model. As the results for the simulation, the nonlocal anisotropic damage model with an adequate control of rupture correctly represented the crack propagation for mixed mode fracture. In the structural failure of reinforced concrete bending beam, the proposed model can be showed up to a very high damage level and yielding of the reinforcements.

Keywords : nonlocal damage, anisotropic damage, mesh sensitivity, mesh objectivity, mixed mode

요 지

이 논문에서는 인장과 압축하중에 놓은 무근 콘크리트와 철근콘크리트 구조물의 거동을 모사하기 위해 비국소화 이방성 손상모델을 제안하였다. 손상변수로서 대칭형의 이차 텐서를 사용한 연속체 손상모델에 기초한다. 콘크리트와 같은 준-취성 재료에 있어 손상양상은 인장부와 압축부에서 다른 양상을 나타낸다. 이러한 두 개의 손상영역은 전체 변형률 텐서의 주변 형률 성분을 손상텐서 속도에 비례하는 손상진전 법칙을 이용하여 모델링하였다. 제안된 모델의 유효성을 검토하기 위해 nooru-mohamed에 의해 실시된 이중 노치가 있는 시험체와 철근콘크리트 휨 시험체를 대상으로 해석을 수행하였다. 해석 결과, 비국소화 이방성 모델은 혼합모드 파괴에 대한 균열진전을 적절히 모사할 수 있었으며 철근콘크리트 휨 시험체의 구조적 파괴에 있어서도 높은 수준의 콘크리트 손상 및 철근의 항복까지를 해석할 수 있었다.

핵심용어 : 비국소화 손상, 이방성 손상, 체눈 민감도, 체눈 객관성, 혼합모드

1. 서 론

콘크리트와 같은 준-취성 재료의 비탄성 거동은 하중의 증가에 따라 재료의 이방성 효과, 체적팽창 효과 등이 발생하며 이로 인해 재료 내부에는 다수의 미세균열 및 거시균열 등의 손상이 점진적으로 증가하게 되며 발생한 손상은 재료의 강성을 저하시키고 최종적인 파괴가 발생하는 것이 일반적이다. 또한, 다양한 형태의 하중방향에 따라 미세균열의 열림 및 닫힘 등이 복잡하게 발생하게 되며 이로 인해 균열 내부에서는 골재사이의 마찰로 인한 저항력 증가 등을 야기시키는 등 매우 복잡한 현상들이 나타나게 된다. 이러한 점

진적 손상특성들은 일반적으로 등방성 손상모델이나 이방성 손상모델등과 같이 손상 연속체역학에 의해 모델화 된다 (Lemaitre, 1991; Carol *et al.*, 1994).

임의의 방향에서 발생하는 손상을 나타내기 위해 다축상태에서의 손상을 고려하기 위한 벡터형태의 손상모델 (Krajcinovic, 1996)과 각 방향의 손상이 일정하다고 가정하여 손상을 스칼라 형태로 단순화한 등방성 손상모델 등이 개발되었다(Mazars and Lemaitre, 1984; Mazars and Pijaudier-Cabot, 1989). 그러나, 콘크리트와 같은 준-취성재료의 경우, 인장영역에서의 거동과 압축영역에서의 비탄성거동이 매우 상이한 파괴특성이 나타나게 된다. 즉, 인장하중 상

*한국전력연구원 녹색성장연구소 선임연구원 · 공학박사 (E-mail : wskyun@kepri.re.kr)

**정희원 · 교신저자 · 충북대학교 건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사 (E-mail : ygkwon@chungbuk.ac.kr)

***정희원 · 충북대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : shhan@chungbuk.ac.kr)

태에서는 하중 작용 방향과 수직인 방향으로 균열이 발생하는 반면 압축하중 상태에서는 하중과 평행한 방향으로 발생하게 된다. 따라서 이러한 균열발생기구의 특징들로 인해 콘크리트는 이방성 파괴특성을 나타내며 이러한 파괴특성을 반영하기 위해 이방성 손상모델에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이방성 손상모델은 손상변수의 선택에 따라 매우 다양한 모델들이 제안되어 있다(Han and Chen, 1986; Simo and Ju, 1987; Ju, 1989; Carol and Willam, 1996; Dragon, 2000). 이와 같이 콘크리트의 연속체 손상모델에 관한 연구들이 활발히 진행되어 왔으나 주로 스칼라 손상모델에 기초한 등방성 손상모델들이 주로 연구되고 있으며 이방성을 고려한 모델에서도 불완전한 변형률 등가원리를 사용하거나 소성상태를 손상과정에 추가하는 과정에서 많은 제약조건을 가지게 된다(이기성, 1996).

본 논문에서는 콘크리트의 손상의 방향성을 고려하여 콘크리트의 이방성 손상거동을 해석할 수 있는 이방성 손상모델을 제안하고 제안된 모델의 적용성 및 유효성, 그리고 해석 결과의 타당성을 검토하는 것을 목적으로 한다. 콘크리트 구성방정식에 손상상태를 고려하기 위해 에너지 등가원리(the principle of energy equivalence)를 사용하고 콘크리트의 재료이방성 특징을 반영하기 위해 Carol *et al.*(2001a)이 제안한 대칭형 2차 손상텐서(2nd-order symmetric damage tensor)를 이용하여 손상의 직교성을 고려하였다. 또한, 손상주축방향에서의 압축과 인장 손상상태를 반영하기 위해 개별적인 손상결정합수를 제안하였다. 마지막으로 파괴진행 과정에서 발생하는 국소화 문제로 인해 나타나는 체논의존성 문제를 해결할 수 있는 방법들 중 적분형 비국소화 기법을 이용하여 요소크기에 따른 하중-변위관계 및 손상영역을 비교하여 비국소화 손상모델의 타당성을 검토하였다.

2. 비국소화 이방성 손상모델

2.1 이방성 손상모델

2.1.1 개요

콘크리트의 손상은 일반적으로 재료의 이방성을 고려한 유효손상텐서(damage effect tensor)에 의해 표현된다. 유효손상텐서는 공칭응력 σ_{ij} 과 공칭변형률 ε_{ij} 로 표현되는 재료의 공칭상태(nominal material state)와 유효응력 σ_{ij}^{eff} 과 유효변형률 ε_{ij}^{eff} 로 표현되는 유효상태(effective material state)와의 관계를 결정한다. 이들 관계는 일반적으로 선형적 관계로 가정한다(Carol *et al.*, 2001). 따라서 σ_{ij}^{eff} 와 ε_{ij}^{eff} 의 관계 역시 식 (1)과 같이 등방성 선형탄성 재료로 가정할 수 있다.

$$\sigma_{ij}^{eff} = E_{ijkl}^e \varepsilon_{kl}^{eff} \quad (1)$$

또한, 일반적인 손상변수 D 에 종속된 손상텐서 E_{ijkl} 을 가지는 재료의 손상 구성관계식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 손상텐서 E_{ijkl} 은 4차텐서이다.

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}(D, E_{ijkl}^e) \varepsilon_{kl} \quad (2)$$

공칭응력과 유효응력, 공칭변형률과 유효변형률사이의 관계는 텐서의 선형변환관계에 기초하여 다음과 같은 관계를 만족시킨다.

$$\sigma_{ij}^{eff} = \Phi_{ijkl}^{\sigma} \sigma_{kl} \quad (3a)$$

$$\varepsilon_{ij}^{eff} = \Phi_{ijkl}^{\varepsilon} \varepsilon_{kl} \quad (3b)$$

일반적으로 이들 사이의 관계를 결정하는 Φ_{ijkl}^{σ} 및 $\Phi_{ijkl}^{\varepsilon}$ 는 손상강성텐서의 대칭성을 보증할 수 있는 에너지 등가 원리(the principle of energy equivalence)를 이용하여 나타낼 수 있다(Lemaitre, 1991). 즉, 공칭상태와 유효상태에서 재료에 축적된 탄성에너지 u 는 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$u = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \sigma_{ij}^{eff} \varepsilon_{ij}^{eff} = \frac{1}{2} \Phi_{ijkl}^{\sigma} \sigma_{kl} \Phi_{ijmm}^{\varepsilon} \varepsilon_{mm} \quad (4a)$$

$$u = \frac{1}{2} \sigma : \varepsilon = \frac{1}{2} \sigma : \Phi^T : \Phi^{\varepsilon} : \varepsilon \quad (4b)$$

식 (4b)로부터 식 (5)와 같은 관계를 유도할 수 있다. 여기서, I 는 4차 단위 텐서이다.

$$\Phi^{\sigma T} : \Phi^{\varepsilon} = I \quad (5a)$$

$$\Phi^{\varepsilon} = \Phi^{\sigma T} \quad (5b)$$

따라서, 식 (3)는 식 (6)과 같이 다시 쓸 수 있다. 이를 이용한 최종적인 구성방정식은 식 (7)과 같다.

$$\sigma_{ij}^{eff} = \Phi_{ijkl}^{\sigma}(D) \sigma_{kl}, \quad \varepsilon_{ij}^{eff} = \Phi_{klij}^{\varepsilon}(D) \varepsilon_{kl} \quad (6)$$

$$\sigma_{ij} = \Phi_{ijkl}^{\sigma-1}(D) \sigma_{kl}^{eff}, \quad \varepsilon_{ij} = \Phi_{ijkl}^{\varepsilon}(D) \varepsilon_{kl}^{eff} \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = \Phi_{ijkl}^{\sigma-1}(D) E_{klmn}^e \Phi_{opmn}^{\sigma-1}(D) \varepsilon_{op}$$

$\Phi^{\sigma-1}$ 를 $\bar{\Phi}^{\sigma}$ 으로 다시 표현하고 $\bar{\Phi}^{\sigma}$ 의 성분 내에 콘크리트의 이방성 손상특성을 표현하기 위해 변환행렬 $\bar{\psi}_{ij} = \delta_{ij} - D_{ij}$ 를 도입하여 간략히 표현할 수 있다(Valanis, 1990; Carol *et al.*, 2001a) 여기서, D_{ij} 는 손상주축 상에서 발생하는 손상행렬을 나타낸다. $\bar{\psi}_{ij}$ 은 대칭성을 확보하기 위해 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

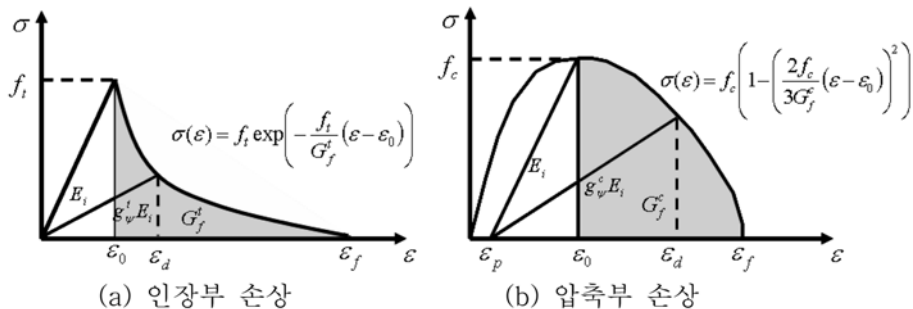


그림 1. 지수 및 포물선 형태의 열화

$$\bar{\psi}_{ij} = \bar{w}_{ik} \bar{w}_{kj}, \bar{\psi}_{ik} \psi_{kj} = \psi_{ik} \bar{\psi}_{kj} = \delta_{ij}, \quad (8)$$

$$\psi_{ij} = w_{ik} w_{kj}, \bar{w}_{ik} w_{kj} = w_{ik} \bar{w}_{kj} = \delta_{ij}$$

식 (8)를 이용하면 $\bar{\Phi}^\sigma$ 는 $\bar{\Phi}_{ijkl}^\sigma = \frac{1}{2}(w_{ik} \bar{w}_{jl} + \bar{w}_{il} w_{jk})$ 으로 대치시킬 수 있다. $\bar{\Phi}_{ijkl}^\sigma$ 을 손상주축 방향에 대해 행렬형태로 표현하면 식 (9)와 같다(Carol *et al.*, 2001a).

$$\bar{\Phi}^\sigma = \begin{bmatrix} \bar{\psi}_1 & & & & & \\ & \bar{\psi}_2 & & & & \\ & & \bar{\psi}_3 & & & \\ & & & \sqrt{\psi_3 \psi_1} & & \\ & & & & \sqrt{\psi_2 \psi_3} & \\ & & & & & \sqrt{\psi_1 \psi_2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (7)과 식 (9)을 이용하여 활선강성(secant stiffness)과 활선컴플라이언스(secant compliance)를 나타내면 식 (10)과 같다.

$$E_{ijkl} = \bar{\Phi}_{ijpq}^\sigma E_{pqrs}^e \bar{\Phi}_{klrs}^\sigma \quad (10a)$$

$$C_{ijkl} = \bar{\Phi}_{pqij}^\sigma C_{pqrs}^e \bar{\Phi}_{rskl}^\sigma \quad (10b)$$

식 (10)을 이용하여 손상주축(the principal axes of damage)에 있어 활선 컴플라이언스를 표현하면 할 수 있다. 식 (10)의 C_{ijkl} 은 4차텐서를 나타내며 이를 손상주축으로의 변환행렬을 적용하여 행렬형태로 간략히 표현하면 식 (11)의 C_{ij} 같다

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{\psi}_1 E^e} & \frac{-\nu}{\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2 E^e} & \frac{-\nu}{\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_3 E^e} \\ \frac{-\nu}{\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_3 E^e} & \frac{1}{\bar{\psi}_2 E^e} & \frac{-\nu}{\bar{\psi}_2 \bar{\psi}_3 E^e} \\ \frac{-\nu}{\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_3 E^e} & \frac{-\nu}{\bar{\psi}_2 \bar{\psi}_3 E^e} & \frac{1}{\bar{\psi}_3 E^e} \end{bmatrix} \quad i, j = 1, 2, 3$$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{2(1+\nu)}{\bar{\psi}_3 \bar{\psi}_1 E^e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2(1+\nu)}{\bar{\psi}_2 \bar{\psi}_3 E^e} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2 E^e} \end{bmatrix} \quad i, j = 4, 5, 6 \quad (11)$$

2.1.2 손상함수

하중의 증가에 따라 콘크리트 내의 미세균열은 생성되고 성장한다. 이러한 손상(미세균열)의 진행정도를 평가하는 방법으로 손상의 비가역적 특징을 고려한 열동역학적 공액력(thermodynamically conjugate forces)를 이용하여 손상변수에 대한 흐름법칙을 정의할 수 있다. 그러나 이러한 공액력은 어떠한 물리적 의미도 내포하고 있지 않으며 콘크리트에서 요구하는 하중면/loading surface)을 정식화하는 것이 어려운 단점이 있다(Ananiev, 2004; Carol *et al.*, 2001a). 이러한 문제를 극복하기 위해 Carol *et al.*(2001a)은 식 (12)를 이용하여 응력공간상에 Rankine 하중면을 도입하고 손상의 진행정도를 물리적으로 명확히 하였다.

$$\bar{\psi}_i = \frac{1}{\psi_i} = g_\psi(\varepsilon_i) \quad (12)$$

$$g_\psi^t(\varepsilon_i) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{0t}} \exp\left(\frac{f_t}{G_f^t}(\varepsilon_i - \varepsilon_{0t})\right)}} & \varepsilon_i \leq \varepsilon_{0t} \\ \frac{1}{\sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{0t}} \exp\left(\frac{f_t}{G_f^t}(\varepsilon_i - \varepsilon_{0t})\right)}} & \varepsilon_i > \varepsilon_{0t} \end{cases} \quad (13a)$$

$$g_\psi^t(\varepsilon_i) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{\frac{E_i \varepsilon_i}{G_f^t}}} & \varepsilon_i \geq \varepsilon_{0c} \\ \frac{1}{\sqrt{f_c \left(1 - \left(\frac{2f_c}{3G_f^t}(\varepsilon_i - \varepsilon_{0c})\right)^2\right)}} & \varepsilon_i < \varepsilon_{0c} \end{cases} \quad (13b)$$

본 논문에서는 손상의 진행정도를 평가하기 위해 식 (12)의 관계를 이용하여 주변형률의 주축방향에 대한 손상 $\bar{\psi}_i$ 을 계산하고 이를 이용하여 $\bar{\psi}_{ij}$ 를 구하였다. 또한, $\bar{\psi}_i$ 의 계산에 있어 인장과 압축 상태를 구분하여 평가하였다. 인장부의 경우, 식 (13a) 및 그림 1과 같이 균열 이후의 거동을 지수형태로 가정하였다. 또한, 콘크리트의 압축부 거동은 일반적으로 경화단계(소성단계)와 연화단계(손상단계)로 구분하였다. 즉, 소성변형률(ε_p)는 경화단계에서만 영향을 미치며 경화현상은 압축응력 하에서만 발생한다고 가정하였다(Feenstra, 1993). 이러한 가정은 소성과 손상이 서로 독립인 관계가 있다는 것을 의미한다.

압축부의 손상으로 인한 열화는 식 (13b)와 같이 포물선 형태를 가지는 것으로 가정하였다. 여기서, f_t 는 인장강도, f_c 는 압축강도, G_f^t 는 인장파괴에너지, G_f^c 는 압축파괴에너지, $\varepsilon_0^t = f_t/E^e$ 는 최대인장응력시의 변형률을 나타내며 ε_0^c 는 f_c 일 때의 압축변형률을 나타낸다. 재하-제하조건/loading-unloading conditions)은 $\varepsilon_i - \kappa_i \leq 0$, $\kappa_i \geq 0$, $\kappa(\varepsilon_i - \kappa_i) = 0$ 와 같은 쿨-터커 필요조건을 이용하였다. 여기서, κ_i 는 이력변수로써 이전하중단계에서 도달된 각 방향별 최대 주변형률을 나타낸다. 그림 2에 인장과 압축부의 손상추이를 나타내었다.

2.2 적분형 비국소화 기법

파괴에너지의 소산과정에서 나타나는 국소화 문제를 해결하기 위해 많은 다양한 모델들이 제안되었다(Bazant, 1976;

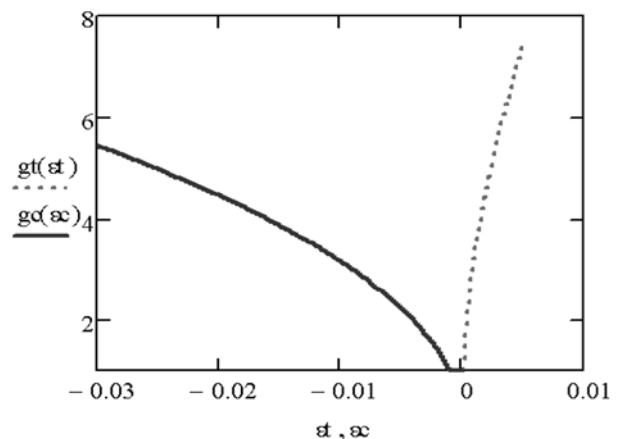


그림 2. 인장부 및 압축부의 손상추이

Saouridis and Mazars, 1992; Aifantis, 1984).

본 논문에서는 적분형 비국소화 모델을 이용하였다. 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 달리 길이스케일(length scale)을 가지는 재료의 고유크기(특성길이)를 정의하고 그 영역 내에서 얻어지는 비국소량을 이용하여 임의점의 역학적 정보를 계산한다. 일반적으로 국소 역학적 정보는 등가변형률 (equivalent strain) 혹은 손상에너지 해방율(damage energy release rate)을 주로 사용하나 본 논문에서는 주축의 각 방향에서 발생하는 전체손상량 $\bar{\psi}_i(x)$ 을 비국소변수로 선택하였다.

2차원 손상공간상의 임의점 x (해석상에서는 적분점의 위치를 나타냄)의 주축상에 나타난 비국소손상량 $\bar{\psi}_i(x)$ 은 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

여기서, $W(x, \xi)$ 는 국소량을 비국소량으로 변환시키는 비국소연산자 (Nonlocal Operator), $\bar{\psi}_i(x)$ 는 국소 손상량을 나타낸다.

$$\bar{\psi}_i(x) = \int_A W(x, \xi) \bar{\psi}_i(\xi) dA(\xi) \quad (14)$$

비국소 연산자 $W(x, \xi)$ 와 대표면적 $A_r(x)$ 은 식 (15)과 같이 정의할 수 있다. 여기서, $\alpha(x, \xi)$ 은 비국소화 영역내의 가중평균을 결정하는 형상함수를 나타낸다. 일반적으로 형상함수는 특성길이(l_{ch})을 포함하며 본 논문에서는 식 (16)과 같은 가우스함수를 사용하였다.

$$W(x, \xi) = \frac{\alpha(|x - \xi|)}{\int_A \alpha(|x - \xi|) dA(\xi)} \quad (15a)$$

$$A_r(x) = \int_A \alpha(|x - \xi|) dA(\xi) \quad (15b)$$

$$\alpha(|x - \xi|) = e^{-\left(\frac{|x - \xi|}{l_{ch}}\right)^2} \quad (16)$$

3. 비국소화 이방성 손상모델의 적용

3.1 이중노치가 있는 실험체

3.1.1 해석대상

본 논문에서 제안한 비국소화 손상모델의 타당성을 검증하기 위해, 먼저 재료수준에서의 실험을 대상으로 해석을 수행하였다. Nooru-Mohamed(1992)에 의해 실시된 이중노치가 있는 실험체에 대한 실험결과 중 하중경로 4B실험체를 대상으로 하였다. 해석대상은 많은 연구자들에 의해 혼합모드 균열진전을 모사하기 위해 사용되고 있는 실험체이다(Di Prisco, 2000; Pazak, 2003; Cervera, 2006).

실험체의 크기는 200x200 mm의 정사각형 시험체이며 두께는 50 mm 이다. 좌우 양쪽에 깊이 25 mm 폭 5 mm의 이중노치를 제작하였으며 기하학적 형상을 그림 3에 도시하였다. 다양한 하중재하가 가능하도록 좌측상단과 상단에 강판을 부착하였다.

4B시험체의 경우, S=10 kN의 수평하중을 좌측상단에서 재하한 후 이어서 상단부에 수직하중 T를 재하하여 파괴 시까

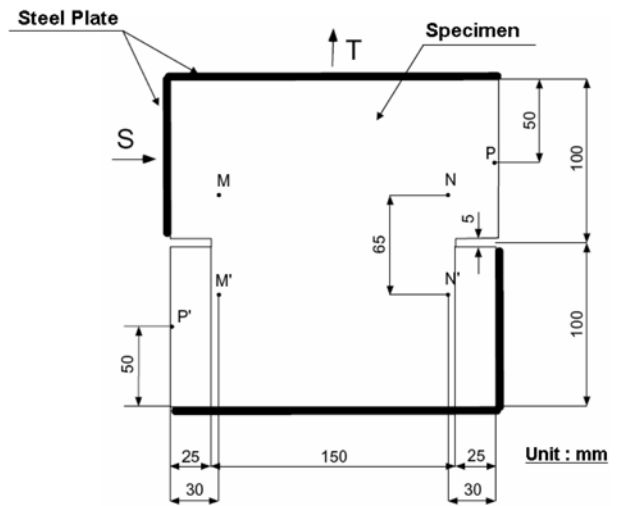


그림 3. 이중노치 시험체의 기하형상

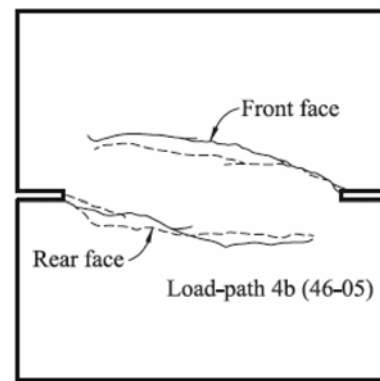


그림 4. 4B시험체의 최종 균열진전 상황(Nooru-Mohamed, 1992)

지의 균열진전을 관찰하였다. 실험에서 나타난 최종적인 균열진전 상태는 그림 4에 나타내었다. 해석에 사용된 콘크리트의 재료특성은 탄성계수 30,000 MPa, 포아송비 0.2, 압축강도 46 MPa, 인장강도 3.0 MPa, 인장 파괴에너지 0.11 N/mm 이며 압축파괴에너지는 인장파괴에너지의 약 10배를 사용하였다. 비국소 매개변수인 특성길이(l_{ch})는 노치의 폭인 5 mm를 사용하였다.

비국소화 기법의 유효성 및 해석결과의 타당성을 알아보기 위해 5,639개, 10,469개, 28,003개의 요소를 가지는 3개의 해석모델을 작성하였다. 이는 요소가 노치폭 당 1개, 2개, 4개의 요소가 포함되도록 작성한 것이다. 요소 수에 따른 해석모델은 그림 5와 같다. 해석모델의 거동을 합리적으로 묘사하기 위해 하단과 우측하단은 고정시켰다. 수평하중 S의 작용 시 상단의 회전을 방지하기 위해 수평 수직하중의 재하점과 상단 및 우측상단이 일체 거동하도록 하였으며 수평하중 S가 10 kN에 도달한 후 수직하중 T를 작용하였다. 비선형 정적 비탄성 해석을 위해 호장법(arc-length method)을 사용하였다.

3.1.2 해석결과

해석이 완료된 시점에서의 변형형상을 그림 6에 나타내었으며 주손상량(D11)의 분포를 그림 7에, 그리고 주변형률분포를 그림 8에 나타내었다.

변형형상의 경우, 대칭형태의 변형 형상을 나타냄과 동시

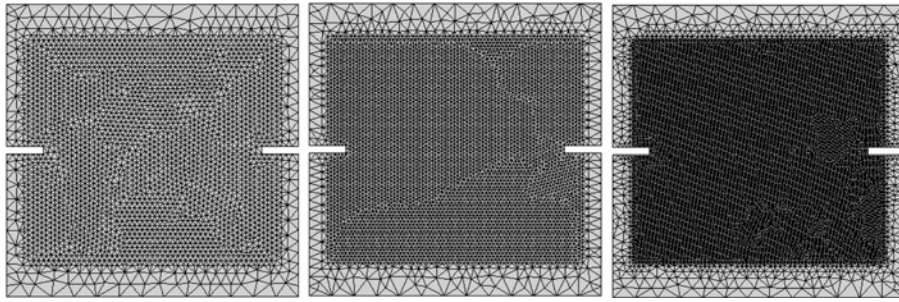
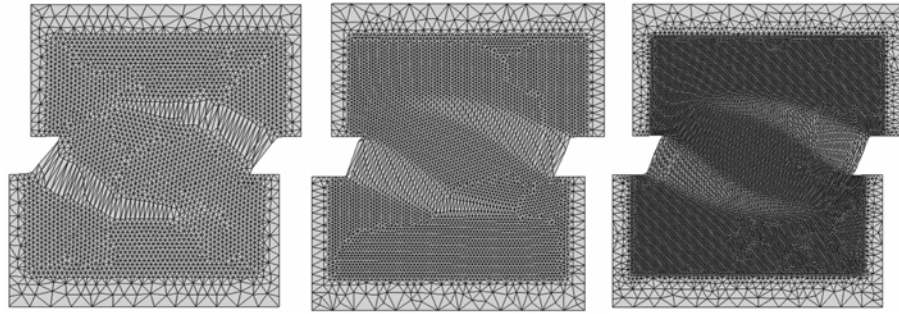
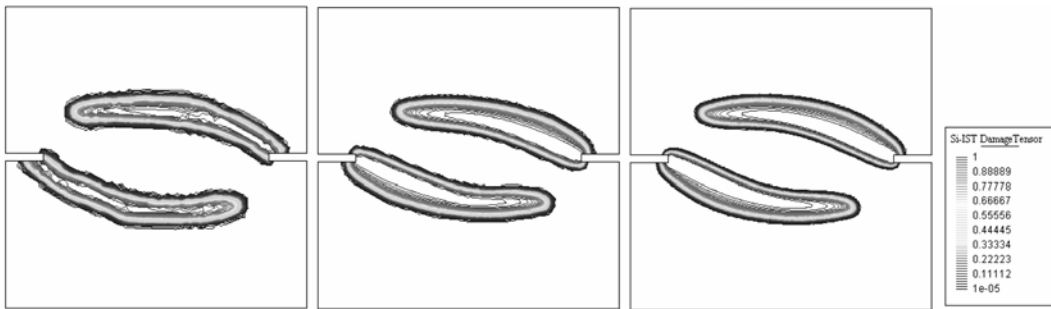


그림 5. 체눈 형상(좌측부터 요소 수 : 5,639개, 10,469개, 28,003개)



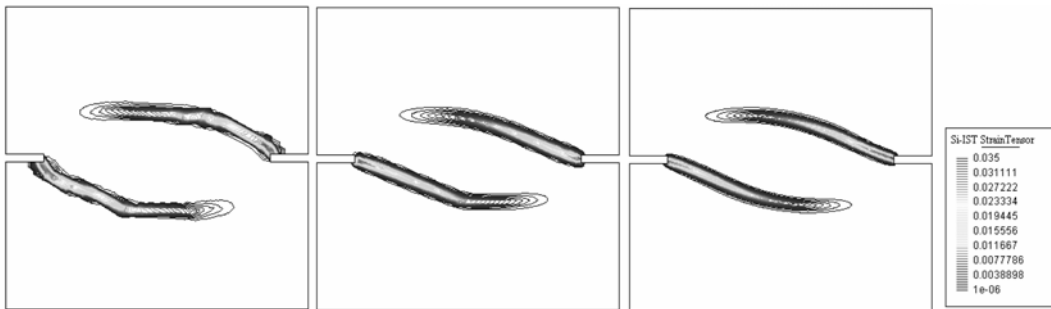
(a) 요소 수 5,639개 (b) 요소 수 10,469개 (c) 요소 수 28,003개

그림 6. 최종 변형형상



(a) 요소 수 5,639개 (b) 요소 수 10,469개 (c) 요소 수 28,003개

그림 7. 주손상(D_{11}) 분포



(a) 요소 수 5,639개 (b) 요소 수 10,469개 (c) 요소 수 28,003개

그림 8. 주인장변형률 분포

에 요소 수의 변화와 관계없이 일정한 변형 형상을 나타내었다. 주손상량(D_{11})의 분포를 살펴보면 실험(그림 4)에서 나타난 곡선형태의 균열 형상과 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한, 요소 수와는 무관하게 손상이 분포하며 상하 대칭형태의 손상을 나타내었다. 특성길이를 노치폭과 같은 5 mm로 설정하였으며 이로 인해 완전 손상상태(즉, $D_{11}=1.0$)의 영역도 노치폭과 같은 영역 내에서 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 주 변형률의 분포 역시 손상분포와 유

사한 경향을 나타내었는데 분포영역이 요소 수와 무관하게 일정한 영역 내에서 분포되는 것으로 보아 국소해석에서 나타나는 요소의존적인 손상경향은 나타내지 않는 것으로 판단된다.

그림 9에 수직하중의 증가에 따른 수직변위 관계를 도시하였다. 요소 수 5,639개의 경우, 최대하중 값이 실험 값보다 큰 경향을 나타내었으나 10,469개, 28,003개의 경우에는 요소 수에 무관하게 일정한 값으로 수렴하는 것을

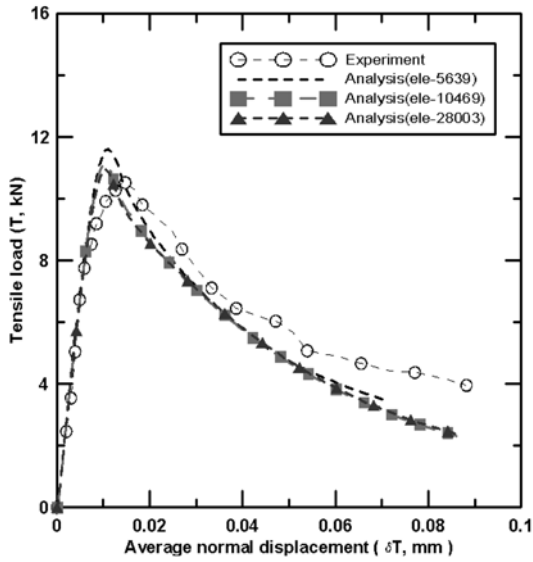


그림 9. 수직하중-수직변위 관계

알 수 있다.

이로부터, 비국소화 기법을 적용한 이방성 손상모델의 해석결과는 특성길이 내에서 주손상, 주변형률 뿐만 아니라 수직하중에 따른 수직변위 역시 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

따라서, 적분형 비국소화 기법을 적용한 이방성 손상 모델은 요소의 크기와 무관한 객관적인 응답을 나타내는 것으로 판단된다.

3.2 휨 RC보

3.2.1 해석 대상

이 절에서는 제안된 비국소화 이방성 손상모델을 이용한 철근콘크리트 휨 부재의 파괴거동 해석을 수행하고 제안된 모델의 부재수준에서의 적용 가능성을 검토하였다. 해석 대상은 박중열(2003)에 의해 수행된 4점 휨 시험체를 대상으로 하였다. 시험체의 기하학적 형상 및 하중재하 위치 그리고 사용된 철근종류 등을 그림 10에 나타내었다. 일반적으로

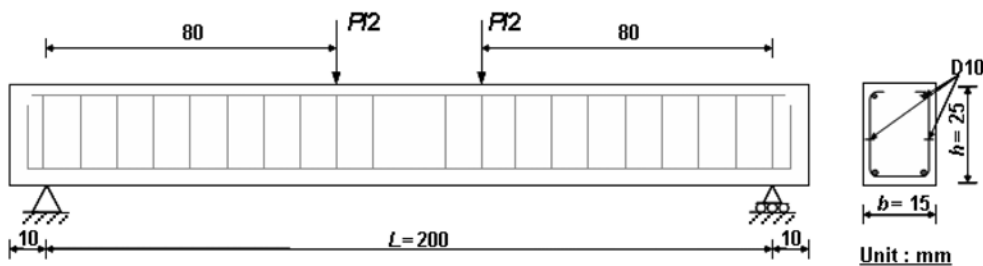


그림 10. RC 휨 시험체의 기하형상

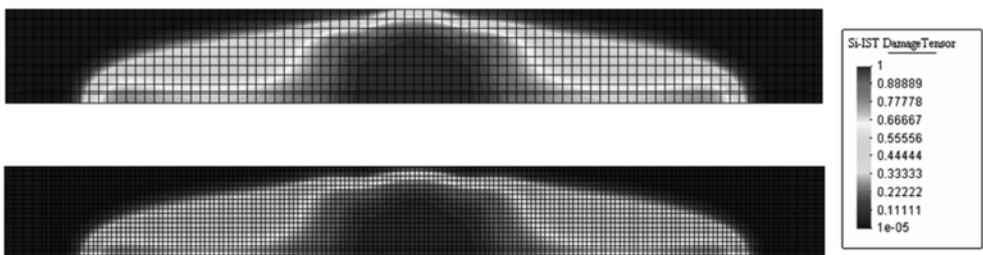


그림 11. 요소 수에 따른 주손상(D_{11})의 분포 (상 : 요소 수 966개 하 : 요소 수 3,526개)

부재의 파괴거동은 하중의 증가에 따라, 다양한 응력상태에 놓이게 된다. 즉, 부재 하단부에서의 인장, 상단부에서의 압축, 그리고 철근과 콘크리트 사이에서의 부착으로 인한 전단 응력 등이 하중이 증가함에 따라 동시에 발생하게 된다. 이러한 각종 응력 상태는 구성모델 내에서 적절히 묘사되어야만 해석과정에서의 수렴성을 보장할 수 있다.

해석과정 중 사용된 재료특성들은 다음과 같다. 콘크리트의 탄성계수는 21,700 MPa, 포아송비 0.2, 압축강도 21 MPa, 인장강도 2.0 MPa, 인장 파괴에너지 0.14 N/mm을 사용하였으며 압축파괴에너지는 이중노치가 있는 시험체에서와 같이 인장파괴에너지의 약 10배를 사용하였다. 철근의 경우는 탄성-완전소성 재료로 가정하고 탄성계수는 200,000 MPa, 포아송비 0.2, 항복강도 350 MPa를 이용하였다. 2차원 평면응력상태를 가정하였으며 콘크리트요소는 4절점평면응력요소를, 철근요소는 트러스요소를 사용하였다. 또한, 콘크리트와 철근요소는 추가절점(hanging node)을 이용하여 결합하였고 두 재료는 완전 부착한 것으로 가정하였다. 제안된 비국소화 이방성 손상모델의 해석 매개변수인 특성길이(l_{ch})는 75 mm를 사용하였다. 이 값은 실험에서 사용된 굵은 골재 최대치수의 약 3배에 해당된다. 비국소화 기법의 요소크기에 따른 객관적 응답을 알아보기 위해 966, 3526개의 요소 수를 이용하여 해석을 수행하였다.

3.2.2 해석 결과

그림 11은 최종 파괴시의 요소 수에 따른 주손상(D_{11})의 분포를 나타낸 것이다. 요소 수가 변화하여도 손상 분포는 일정한 것을 알 수 있다. 손상의 주된 분포 영역이 휨-인장 발생영역을 적절히 예측하는 것으로 판단된다. 그림 12에는 부재의 수직하중-수직변위 관계를 도시하였다. 실험결과와 비교하여 해석결과가 비교적 정확히 부재의 거동을 예측하는 것으로 판단된다. 초기 균열시점 이후 부재 강성저하뿐만 아니라 최대하중 이후의 거동도 적절히 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 요소의 변화와 상관없이 일정한 구조응답

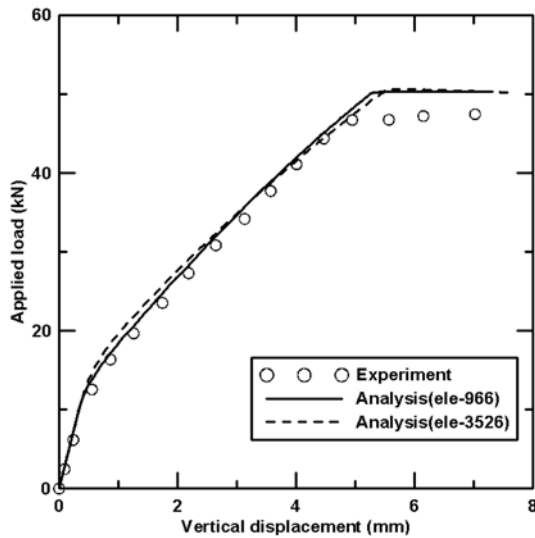


그림 12. 수직하중-수직변위 관계

을 보이는 것으로 보아, 이 논문에서 제안된 해석모델이 매우 타당한 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 비국소화 이방성 손상모델을 제안하고 제안된 모델의 적용성 및 타당성을 검토하였다. 이를 위해 이중노치가 있는 시험체와 철근콘크리트 휨 시험체를 대상으로 제안된 모델을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트의 경우 인장영역과 압축영역에서 매우 다른 역학적 거동을 보인다. 이를 위해 본 논문에서는 Carol *et al.*(2001)에 의해 제안된 이차 손상텐서에 기초한 이방성 손상모델을 제안하고 인장영역과 압축영역에서의 손상을 적절히 묘사할 수 있는 손상함수를 제안하였다.
2. 준취성재료의 국소화 문제를 다루기 위해 제안된 이방성 손상모델에 적분형 비국소화 기법을 적용하였다. 적분형 비국소화 기법의 적용에 있어 각 주손상 방향에서의 전체 손상량을 비국소화 변수로 선택하였다.
3. 제안된 모델을 이용하여 Nooru-Mohamed(1992)에 의해 실시된 혼합모드에서의 이중노치가 있는 시험체에 대한 파괴거동을 해석적으로 보였다. 비국소화 매개변수인 특성길이(l_{ch})는 노치폭과 같은 값을 사용하였다. 해석결과, 실험에서 나타난 혼합모드 균열진전을 적절히 예측하는 것이 가능하였으며 요소 수의 변화에 대해서도 손상분포, 변형률 분포 그리고 수직하중-수직변위관계 등이 요소 수에 무관하게 예측가능하다는 것을 확인하였다.
4. 부재수준에서의 비국소화 매개변수인 특성길이(l_{ch})는 사용된 굵은 골재 최대치수의 약 3배의 값을 사용한 결과, 요소 수에 무관하게 일정한 해석결과를 보장할 뿐만 아니라 부재수준에서 나타나는 다양한 응력상태를 적절히 묘사할 수 있다는 것을 사료된다.

참고문헌

박중열(2003) 탄소섬유 보강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 거동 특성 및 보강설계, 박사학위논문, 충북대학교.

이기성, 송하원(1996) 콘크리트의 탄-소성 이방성 손상모델, 전산 구조공학회논문집, 한국전산구조공학회, 제8권 제1호, pp. 65-76.

Aifantis, E.C. (1984) On the microstructural origin of certain inelastic models. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 106, pp. 326-330.

Ananiev, S. and Ozbolt, J. (2004) Plastic-damage model for concrete in principal directions, Li, V. et al. (eds.). *FraMCoS-5 Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*.

Bazant, Z.P. (1976) Instability, ductility and size effect in strain-softening concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 102, No. 2, pp. 331-344.

Bazant Z.P. and Oh B-H. (1983) Crack band theory for fracture of concrete. *Mater Struct*, Vol. 16, pp. 155-157.

Carol, I. and Bazant, Z.P. (1997) Damage and plasticity in microplane theory. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34, pp. 3807-3835.

Carol, I., Rizzi, E., and Willam, K. (1994) A unified theory of elastic degradation and damage based on a loading surface. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 31, No. 20, pp. 2835-2855.

Carol, I., Rizzi, E., and Willam, K. (2001a) On the formulation of anisotropic elastic degradation. I. Theory based on a pseudo logarithmic damage tensor rate, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 4, No. 38, pp. 491-518.

Carol, I., Rizzi, E., and Willam, K. (2001b) On the formulation of anisotropic elastic degradation. II. Generalized pseudo-Rankine model for tensile damage, *International Journal of Solids and Structures*, No. 4, No. 38, pp. 519-546.

Carol, I. and William, K. (1996) Spurious energy dissipation/generation in modeling of stiffness recovery for elastic degradation and damage. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 33, No. 20-22, pp. 2939-2957.

Cervera, M. and Chiumenti, M. (2006) Smearred crack approach: back to the original track *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*. Vol. 30, pp. 1173-1199.

Di Prisco, M., Ferrara, L., Meftah, F., Pamin, J., de Borst, R., Mazars, J., et al. (2000) Mixed mode fracture in plain and reinforced concrete: some results on benchmark tests. *International Journal of Fractures* (103), pp. 127-148.

Dragon, A., Halm, D., and Desoyer, T. (2000) Anisotropic damage in quasi-brittle solid: modelling, computational issues and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 183, pp. 331-352.

Feenstra, P. (1993) *Computational aspects of biaxial stress in plain and reinforced concrete*. Ph.D. Thesis, Technical University of Delft, The Netherlands.

Galvez, J.C., Elices, M., Guinea, G.V., and Planas, J. (1998) Mixed mode fracture of concrete under proportional and nonproportional loading. *International Journal of Fractures*, Vol. 94, pp. 267-284.

Grassl, P. and Jirasek, M. (2005) Plastic model with nonlocal damage applied to concrete, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 30, pp. 71-90.

Han, D.J. and Chen, W.F. (1986) Strain-space plasticity formulation for hardening-softening materials with elasto-plastic coupling. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 22, pp. 935-950.

Jirasek, M. and Bazant, Z.P. (2002) *Inelastic Analysis of Structures*, John Wiley and Sons, Chichester.

Ju, J.W. (1989) On energy-based coupled elastoplastic damage theories: constitutive modeling and computational aspects. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, No. 7, pp. 803-833.

Krajcinovic, D. and Fonseka, G. (1981) The continuous damage

- theory of brittle materials; part 1. General theory, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 48, pp. 809-815.
- Krajcinovic, D. (1996) *Damage mechanics*, Vol. 41 of North-Holland Series In Applied Mathematics and Mechanics, Elsevier.
- Lemaitre, J. (1991) *A Course on Damage Mechanics*. Springer.
- Mazars, J. and Lemaitre, J. (1984) Application of continuous damage mechanics to strain and fracture behavior of concrete. In: Shah, S.P.(Ed.), *Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites*, Evanston, IL, pp. 375-378.
- Mazars, J. and Pijaudier-Cabot, G. (1989) Continuum damage theory : Application to concrete. *ASCE J. Engng. Mech.* Vol. 115, pp. 345-365.
- Nooru-Mohamed, M.B. (1992) *Mixed-mode fracture of concrete: an experimental approach*. Ph.D thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Ozbolt, J. and Ananiev, S. (2003) Scalar damage model for concrete without explicit evolution law. In: Bicanic, N., et al (eds.). *Proceedings of the EURO-C 2003 Conference on Computational Modelling of Concrete Structures*. Swets & Zeitlinger B.V., Lisse.
- Pazak, B. and Jirasek, M. (2003) Adaptive simulation of quasi-brittle failure. In *Computational Modelling of Concrete Structures, Proceedings of EURO-C 2003 Conference*, Bicanic N, de Borst R, Mang H, Meschke G (eds). St. Johann im Pongau, Austria. A.A. Balkema Publishers: Rotterdam.
- Saouridis, C. and Mazars, J. (1992) Prediction of the failure and size effect in concrete via bi-scale damage approach. *Engineering Computations* (9), pp. 329-44.
- Simo, J.C. and Ju, J.W. (1987) Stress and strain based continuum damage models, Part I and II. *International Journal of Solids and Structures*. (23), pp. 375-400.
- Valanis, K.C. (1990) A theory of damage in brittle materials. *Engng. Fract. Mech.* (36), pp. 403-416.

(접수일: 2009.8.20/심사일: 2009.11.10/심사완료일: 2010.5.8)