

## 유한요소법에 의한 철근콘크리트 부재의 거동해석



이 재 홍\*

### 1. 개 요

본문에서는 유한요소법에 의한 철근콘크리트 구조해석에 관한 지난 20여년간의 연구현황에 대해 일리노이대학의 Schnobrich교수가 쓴 글 (Behavior of Reinforced Concrete Members by Finite Element, APCOM, Sep. 16, 1996, Korea) 의 일부를 번역하여 소개한다.

### 2. 서 론

콘크리트 구조물의 유한요소해석 연구가 근 20년이 지난 현재에도 유한요소해석으로 철근콘크리트구조의 거동을 직관할 수 있으며 파괴모드를 정확히 예측하여 파괴가 발생하기 전에 미리 막을 수 있는가 하는 의문이 남아있다. 유한요소해석을 철근콘크리트구조에 사용하는 사람은 다음의 두 부류일 것이다. 첫째, 새로운 구조시스템의 파괴성격을 조사하고, 이 구조디테일과 관련된 파괴모

드를 알아내려는 연구원이 있을 수 있다. 두번째는 흔히 쓰이지 않는 구조시스템의 파괴과정을 알아보려는 설계자가 있을 것이다.

유한요소법이 발달함에 따라 이제 해석자는 비정형 형상이나 비정형 지지와 같은 것들을 잘 설명할 수 있는 해석도구를 갖게되었다. 이로써 형상 및 재료비선형성까지 포함한다면 전체 구조물의 거동까지 정확히 예측할 수 있게 되었다. 이러한 방법의 성공여부는 철근콘크리트의 재료적 특성을 어떻게 설명할 수 있는가에 달렸다고 할 수 있다. 그러나 실험실에서 이러한 재료성질을 알아내기 위해 다축응력을 받는 콘크리트를 실험하는 일은 간단한 일이 아니다. 이는 실험결과를 좌우할지도 모를 경계효과를 배제하며 등질 다축응력장을 생성하는 것은 매우 어렵기 때문이다. 지금까지 행해진 실험들이 과연 끝단효과의 영향을 전혀 받지 않았는가 하는 것은 아직도 의문으로 남는다.

비선형 유한요소법이 철근콘크리트구조에 응용

\* 정회원 · 현대건설 기술연구소 건축구조 팀장

됨에 따라 실험연구가 불가능했던 모델들을 수치적 실험(컴퓨터 시뮬레이션)을 통해 할 수 있게 되었다. 스패인 수백 피트이며 두께가 불과 3, 4인치되는 박막 셸지붕등이 그 예일 것이다. 이런 구조물은 적절한 축소모델로 실험될 수 없으며, 그 결과 또한 신뢰도가 떨어진다. 그러나 비선형 유한요소법이 일반화 되면서 이러한 구조물의 파괴모드를 예측할 수 있게 되었다. 그렇지만 이러한 비선형 해석은 쉬운 일이 아니다. 해석자는 유한요소법에 정통해야함은 물론 콘크리트의 거동도 잘 알고있어야 하며, 파괴모드에 대해서도 어느 정도의 지식은 있어야 한다.

비선형 콘크리트거동과 보강물의 성질을 유한요소법에 사용한 것은 거의 30여년전의 일이다. 초기의 연구에서는 해당 절점을 분리시켜 균열을 모델링하는 이산모델을 사용하였다. 그리고 그 절점 근처에서는 등변형도 삼각형(constant strain triangle) 요소의 응력편향의 효과를 최소화하기 위해 상대적으로 미세한 요소가 사용되었다. 그러나 아무리 미세한 요소를 사용하여도 응력장이 요소크기에 좌우되기 때문에 균열끝에서의 응력장은 정확하지 않은 것으로 간주되었다.

상이균열(discrete crack) 개념의 위상변화와 관련해서 재료적 특성을 수정하여 비선형 균열을 포함시키는 연구 또한 진행되었다. Cervenka (1970)는 이러한 문제를 평면응력 문제에 최초로 시도하였다. 균열이 발생하면 콘크리트는 균열과 직각방향으로 인장강도가 저하되는 것으로 가정되어 재료는 직방성으로 간주된다. 반면 압축거동은 여전히 고전적 본 미세소성법칙을 따르는 것으로 본다. 수많은 문제에 있어 이러한 재료모델링 기법이 좋은 결과를 나타냈으나 하중-변위 곡선의 중간과정에 있어서는 실험결과와 많은 차이를 보였다. 이러한 차이는 인장강성(tension stiffening) 효과를 해석에 포함시킴으로써 많이 좁힐 수 있을 것이다.

### 3. 평판휨

평판 구조물은 해석적 접근이 워낙 복잡하고 계

한되기 때문에 유한요소개발에 있어서 가장 활발한 분야중 하나가 되어왔다. 실제 구조물의 복잡한 형상과 지지조건 때문에 해석적 방법이 때로는 불가능 하였다. 철근콘크리트 슬래브의 초기 유한요소해석(Jofriet, 1971)에서는 슬래브에 발생하는 균열을 설명하기 위해 유효단면개념을 사용하였으며, 균열이 발생하기 전과 발생한 후의 휨강성을 이용하여 접선탄성행렬을 생성했다. 이 해석에서는 각 요소의 상태에 따라서 이미 결정된 E와 I 값을 사용하여 표준평판요소를 구성했다. 한편, 평판시스템을 모델링하기 위해 평면응력상태의 면을 층별로 배열하는 기법이 Hand(1973)와 Lin(1975)에 의해 각각 개발되었다. 이 유한요소는 두께방향으로 접선변위의 선형변화를 허용하는 키리호프(Kirchhoff) 유형의 요소였다. 이러한 모델링 방법은 일반 슬래브의 휨거동에는 매우 적절하였으나 돌림전단에는 부적절하였다.

Scanlon(1971)은 무균열 콘크리트에 대해 인장강성효과를 포함시켰다. Gilbert(1977)는 인장강성효과를 이용하여 콘크리트의 응력-변형도 관계와 철근의 E값을 수정하는등의 문제를 연구하였다. 이 인장강성효과를 이용하면 하중부족거동이 발생하는데, 이는 균열이 발생한 후에 인장강도가 0이되는 강성손실현상이 나타나지 않음을 의미한다. 따라서, 균열이 발생한 후에 콘크리트 인장강도가 급격하게 저하되지 않는다면 이 모델이 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 만일 철근보강이 콘크리트 균열응력을 받아들일 수 없이 작게 되었다면 이 모델은 비효율적이다. 양방향으로 철근량이 달리 배근되어있는 슬래브에 있어서는 최초의 균열에 대해 몇도의 각도를 가지는 후속 균열들이 계속 발생하는 현상이 일어난다. 이러한 균열의 방향성을 설명하기 위해 유한요소모델을 회전시키려는 시도 또한 이루어졌다. 균열의 최초 생성에 따라 방향을 고정시키는 초기의 모델들을 이용하면 실제보다 과다한 강도나 강성이 예측되어 문제가 있었다. 또다른 수정방법은 수치적 불안정 현상이 나타나지 않도록 균열 후에도 어느 정도의 전단능력을 지탱할 수 있는 모델이다. 이 방법은 Hand에 의하여 최초로 제시되었는데 어느정

도의 전단력이 없이는 슬래브가 균열후에 비틀림 모멘트를 전혀 받지 못하는 것으로 나타났다.

민들린(Mindlin) 평판 휩요소(Milford 1986)는  $\theta_x, \theta_y$  두개의 개별적인 미지수를 도입함으로써 변위장의  $C^\circ$  연속성만을 필요로 하는 요소이다. 이 모델에서는 평균 전단변형도 정의될 수 있다. 편심을 받는 보-평판 모델에서는 원칙적으로 접합선을 따라 적합성이 유지되나 드릴링모드 없이는  $\theta_z$  회전에 상응하는 비적합성이 여전히 존재한다. 또한 보의 편심효과를 고려하기 위해서는 평판의 면내 강성이 평판요소에 포함되어야 한다. 한편 Kirchhoff평판에서는 편심보와의 접촉선을 따라 적합성을 유지하기가 불가능하다. 그 이유는 경계면을 따른 면내 변위가 보와 같이 작용하는 변위와 상응하지 못하기 때문이다.

층개념을 도입한 해석에 의해 그간 불가능했던 3차원 보 거동의 일반적인 경우와 같은 평판-보 합성작용을 모델링할 수 있게 되었다. 약축의 보 휨과 평판의 합성거동이 평판에서는 단지 드릴링모드의 형태로 제한되어 있는 직 자유도의 회전에 해당한다. 그러나 해석시 이러한 모순은 보통 무시된다. 또한 콘크리트의 압축성질을 변경하여도 휨거동이 지배하는 구조에서는 결과에 미치는 영향이 크지않은데 그 이유는 그런 구조물은 보통 과소 철근보강되어 있으며 그 경우 철근의 양과 위치에 거동이 좌우되기 때문이다.

유한요소해석으로 부터 좋은 결과를 얻을 수 있는 철근콘크리트 거동중의 하나는 평판바닥의 돌림전단에 관한 것이다. 평판모델로 이 문제에 관해 잘 정돈된 결과를 얻기에는 다음과 같은 여러 어려움이 있다. 첫번째, 평판요소에 의해 얻은 전단력의 정확성이 문제다. 특히 면외 전단력은 보통 잘 정의되지 않는다. 두번째, 이런 유형의 전단력의 균열양상은 한 균열이 지배적인 상황이 되어 국부적 연화의 분포균열(smearred crack)개념으로는 균열진행을 설명하기 어렵다. 분포균열모델은 파괴역학에 근거해 국부화와 균열진행을 설명할 수 있어야한다. 이런 관점에서 볼때 앞서 언급한 문제에 적합한 분포균열모델은 Bazant(1983)가 제시한 거친균열(blunt crack)모델이다. 상이

균열은 거동을 더욱 잘 나타내나 위상변화에 따른 전산해석적 문제가 있을 수 있다. 돌림전단현상에 의한 균열진행을 추적하기에는 평판모델보다는 3차원 모델이 훨씬 합당하며 이때 균열의 진행을 제한하지 않도록 요소망을 생성하려면 균열양상에 대한 지식이 필요하다. 전체 평판을 복잡한 3차원 요소의 다층으로 모델링하지 않으려면 전이요소(transitional element)의 도입이 필요하다. 이 요소는 한쪽면은 3차원 요소의 형태이며 다른쪽면은 평판이나 셸의 자유도를 가지는 2차원의 형태이다. 유한요소망의 형태는 균열이 진행되는 지역의 바깥에는 최소한 1개의 3차원 요소가 있어야 한다. 두께방향으로는 20개의 노드를 가진 3차원 요소가 최소한 2개가 필수적이며, 이 갯수로도 충분하지 않을 것이다.

#### 4. 얇은 셸

콘크리트의 비선형 해석에 셸에 관한 몇몇 연구가 진행되어 왔다. PS 콘크리트 냉각 원자로 해석은 비선형 콘크리트셸 유한요소가 최초로 사용된 분야중의 하나이다. 균열을 모델링하기 위해서 Rashid(1968)는 분포균열모델을 사용하였다. Lin과 Hand는 콘크리트와 철근을 층별 모델링한 콘크리트 모델을 개발하였으며, Mang(1981)은 해석시 인장강성을 고려하여 결과를 제시하였다. Gupta와 Milford는 실험결과를 설명하기 위해 회전균열모델을 제시하였다. 이와같은 연구결과 형상 비선형이 어떤 경우의 셸에 있어서는 매우중요한 해석요소가 된다는 사실이 밝혀졌다. Kabir와 Gallegos는 쌍곡선 셸의 크립과 수축의 영향을 예측하기 위해 하중이력 및 시간의 효과를 해석에 포함시켰다. 셸구조에 있어서는 아주 미세한 형상 변화도 하중지지능력에 큰 영향을 줄 수 있다. Kabir, Chan 과 Gallegos는 크립처짐이 얇은 쌍곡선 셸의 하중지지능력을 크게 떨어뜨림을 알아냈다.

셸-보 상호작용 문제도 평판 모델링할때 발생하는 같은 종류의 문제점이 있으나 많은 경우에 있어서 보는 셸이 받는 하중을 지지점으로 전달하

는 중요한 역할을 하기 때문에 매우 중요한 문제로 여겨진다. 경우에 따라 약축의 휨과 비틀림이 가장자리보에 있어서는 중요한 문제이나 현재로서는 완전 3차원 모델링 이외에는 적절한 방법이 없다.

원자로 용기셸에 대해 몇몇 유한요소모델을 상용프로그램 및 실험결과와 비교하는 작업도 이루어졌다. 다양한 모델에 의한 전체거동(변위 대 압력) 예측은 일반적으로 실험결과와 잘 일치하였으나 변형도와 국부적 거동 비교는 많은 차이를 보였다. 이는 실험조건과 균열부위등이 해석에 포함되지 않았기 때문인 것으로 보인다. 즉, 실험 초기의 저압에 의해 발생한 균열로 인해 수치모델과 실험결과와의 비교가 무의미해지는 일이 많다. 연구결과 비인장 콘크리트 모델이 실험결과와 가장 잘 일치하였다. 이는 본격 실험전에 이미 많은 균열이 발생하였기 때문으로 보인다.

## 5. 철근콘크리트의 비선형 유한요소해석

철근콘크리트구조의 기본해석은 일반적으로 구조물의 전체 단면특성을 고려해 탄성적으로 수행된다. 철근콘크리트에서 구조물이 비선형 재료거동—특히 인장균열과 같은—의 어떤 형태로 발전되는 경우 탄성의 범위를 벗어난다. 철근콘크리트 구조에서 보통 고려되어지는 비선형성은 다음과 같다: (1) 콘크리트의 인장균열, (2) 비선형 압축 거동, (3) 정착을 포함한 보강철볼의 거동과 전단 마찰에의 기여, 그리고 (4) 크립과 수축을 포함하는 시간에 따른 효과와 온도효과, 하중이력등이다. 비선형거동의 처음 두가지 형태는 단기하중—재하된 후 곧 파괴되는 것을 의미한다—에 지배되는 구조물에 대해 그 거동을 결정하는 것과 관련된다. 사실상 이는 어느정도 단순화된 실제 구조물에 대한 실험을 수행하는 것과 유사하다.

기하학적 비선형성은 구조물이 거동하는 하중의 종류를 결정하는데 형상을 이용하는 유희의 특수한 구조물에 있어서는 매우 중요한 요소이다. 얇은 셸과 아치는 수직변위를 막이나 축하중으로 연결시키는데 달려있다. 만일 수직변위의 결과로

표면의 곡률에서 상당한 감소가 있다면 기하학적 비선형거동을 고려하는 편이 적절할 것이다.

실제 철근콘크리트 구조물을 해석모델로 치환한 후 이 모델은 해답을 얻을 수 있는 이산모델을 구하기 위하여 유한요소과정에 의해 나누어진다. 이 변환에서 제시되는 근사치는 재료적 특성을 고려하는 가정과 구조적 거동에 대한 가정을 모두 포함한다. 그 결과인 해석모델은 평면응력, 평판휨, 일반적인 셸시스템등을 수반한다. 이 변환에서 제시되는 재료특성 근사치는 해석을 하는동안 변경될 수 있다. 반면 기본적인 구조거동모델을 변화시키는 것은 바람직하지 않을 수 있다. 이는 그 후의 유한요소모델망, 더 나아가 요소유형에서 전체적인 변화를 일으킬 수 있기 때문이다. 이러한 구조물의 변환으로 다음과 같은 두 가지의 발생가능한 오차가 발생할 수 있다. 하나는 사용하는 요소망이 조악할때 발생하는 선택된 부재와 관련된 기본적인 오차이다. 단순한 저차요소의 그리드를 사용하는 과정에서 큰 오차가 발생할 수 있으며, 어떤 특정부재와 관련된 오차의 크기는 구해지는 특정 응력에 따라 변한다. 전단응력은 보통 직응력보다 작은 값인데 면의 휨이 포함된다면 면의 전단응력은 보통 매우 부정확하다. 두번째 오차는 계산과정과 관련된다. 증감해법과정으로 해석시에 이 오차는 특히 주의를 요한다.

비선형 재료거동을 포함하는 철근콘크리트 구조에 대한 해석모델은 일반적으로 실제 합성 연속체를 콘크리트와 철근요소로 분리하며, 각 분리된 재료들의 재료적 특성은 이 요소들에 따른다. 콘크리트의 경우, 균열은 각 균열을 따라 변위 불연속성을 갖는 물리적으로 분리된 이산개별균열이나 각 요소내에서 분포균열계로 취급된다. 이 두가지 균열개념에 대한 찬반양론은 오랫동안 논의되어져 왔다. Rots 와 Blaauwenraad(1989)는 이 평가법에 대한 가장 포괄적인 접근을 하였다. 이로부터 얻은 결론은 어떤 문제를 연구하느냐에 따라 선택이 다르다는 것이었다. 그러나 일반적으로 분포균열개념의 경우가 하중에 의해 구조물이 비선형 영역으로 이동할 때 철근 콘크리트구조물의 전체 강성변화를 결정하는데 더 적당하다고 제시

되었다. 일반적으로 분포균열은 균열부위가 연속체로 남아있다고 가정하지만 그 초기 등방성은 균열초기에 직방성 매개물로 변환된다. 수치계산적 측면에서 보는 한 분포균열의 잇점은 부인하기 어렵다. 균열개념을 물리적인 파괴진행현상과 연관시킨다면 기하학적 불연속성은 이산 균열정의에 가깝다.

지금까지 가장 주목을 받아온 균열 거동의 두가지 측면은 회전(rotating) 또는 스윙(swinging) 균열모델이라고 불리는 것으로 연속적인 균열이 진행되는동안 균열의 방향변화와 인장경화 및 연화의 가능성이다. 비교를 통해서 고정균열(fixed crack)모델은 두 방향으로 현저하게 다른 철근비를 가진 경우에 대해 강도를 과대평가하거나 비례하지 않는 특성의 하중에 종속되는 것으로 나타났다. 반면 회전균열모델은 실험결과와 잘 맞는다.

Scanlon에 의해 소개된 인장강성효과는 균열의 초기상태와 관련해 급격한 강성저하를 줄임으로써 하중-변형곡선을 작성하는데 중요한 역할을 한다. 이 인장강성효과는 유한요소망이 조악할때 특히 필요한데 왜냐하면 이는 절점에서, 강성행렬이 그 적분영역에서 균열이 있는 콘크리트뿐 아니라 균열이 없는 콘크리트 영역도 포함하고 있기 때문이다. 그러므로 범위내에서 이러한 종류의 인장강성효과는 균열이 진행될 때 근본적으로 사라져야 한다.

콘크리트 재료를 다양하게 모델링하여 콘크리트의 압축특성을 나타내는 연구가 많이 진행되었다. 이들 연구에서는 비선형탄성, 저탄성, 등방성경화(isotropic hardening)나 운동성경화(kinematic hardening)의 특성 등이 소성범칙과 연관해서 개발되었다. 소성 해석시 비연계된 유동범칙(flow rule)을 이용하면 재료의 거동을 잘 나타낼 수 있지만 비대칭 강성행렬이 구성되어 해석절차는 훨씬 더 복잡해진다. 대부분의 문제에서 응력레벨이 탄성거동의 한계를 넘어설 때 어떤 형태의 연화를 포함하고 있는 한 어떤 콘크리트 모델을 사용하였는가는 그다지 중요하지 않다. 인장균열과 일단 발생한 균열이 진행되는 방법은 철근콘크리트의 유한요소해석에서 매우 중요한 사항이다.

## 6. 재료모델의 검증

유한요소해석에서의 사용을 위해 제시되는 각 재료모델은 사용하기 전에 검증되어야 한다. 즉, 해석이 필요없이 그 실험의 결과로 재료거동 관계를 직접 정의하기위한 실험을 수행할 수 있어야 한다는 점이다. 이는 등질응력장에서의 결정론적인 실험을 의미한다. 그러나 다축응력상태에서 그런 상황을 얻기위한 과정은 수행하기가 매우 어렵다.

평면응력상태에 대해서 Vecchio와 Collins (1982)의 실험은 모든 해석모델을 조정할 때의 표준이 되었다. 그 실험은 등질성으로 가정되므로 단일요소가 해석되고 그 결과는 실험값으로 조절되었다. 또한 실험은 결정적인(determinate) 것으로 가정되어 응력이 구해지고 변위가 측정된다. 이 테스트의 조사결과 많은 시험체가 경계면 근처에서 파괴되었는데, 이는 원했던 것 만큼 이상적인 등질응력장을 만들지 못했다는 말이 된다, Dyngeland(1989). 만일 응력장이 정확한 등질성이 아니라면 응력상태는 결정될 수 없으며 응력-변형관계는 해석에 따르게 된다. 비록 완전한 것은 아니지만 이 테스트는 여전히 가장 널리 쓰이며, 지금까지 연구된 것 중에서는 최상의 실험구성이다. 그러나 이상적인 실험구성의 확립은 여전히 요원한 상태이다. 재료모델선택의 독자적 기초를 형성하기 위한 이 테스트에 대한 완전한 신뢰는 아마도 불가능할지도 모른다. Vecchio와 Collins의 실험은 용접된 철물로 된 보강물을 이용한 반면, 일반 붕 보강물로 수행된 실험은 약간 다른 콘크리트의 균열상태를 보여준다. 이 두가지 다른 보강물 유형은 그 결과 대각선 방향의 압축저하에서 콘크리트 강도에 대해 각각 다른 영향을 미치는 것으로 드러났다. 