

碩士學位 請求論文

수치해석에 의한 철근 콘크리트
구조물의 균열 거동에 관한 연구

慶州大學校大學院

土木工學科

李 姬 鎭

指導教授 姜 普 淳

2004 年 12 月

016748

수치해석에 의한 철근 콘크리트 구조물의 균열 거동에 관한 연구

指導教授 姜 普 淳

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

2004 年 12 月

慶州大學校大學院

土木工學科

李 姬 鎭

李妊鎡의 碩士學位論文을 認准함

審査委員長 黃 聖 春 印

審査委員 沈 亨 燮 印

審査委員 姜 普 淳 印

慶州大學校大學院

2004 年 12 月

목 차

표 목차	iv
그림 목차	v
제 1장 서론	1
1.연구배경	1
2.연구 목적과 기대효과	1
3.연구내용 및 범위	2
4.연구동향	3
5.논문구성	3
제 2장 기본이론	4
1. 콘크리트 파괴역학의 균열이론	4
1.1가상균열이론	5
1.1.1이론적배경	5
1.1.2가상균열이론의 특징	6
1.2균열띠이론	6
1.2.1이론적 배경	6
1.2.2균열띠 이론의 특징	7
2. 수치해석 기본이론	7
2.1콘크리트의 인장부와 압축부	7
2.2콘크리트의 2축 응력상태의 파괴영역	11
2.2.1압축파괴	11
2.2.2인장파괴	12
2.3등가 일축법	13
2.4콘크리트 균열모델	15

2.4.1 고정균열모델	15
2.4.2 회전균열모델	16
2.5 강섬유 보강시 균열모델	17
2.5.1 파괴에너지에 근거한 모델	17
2.5.2 변형률에 근거한 모델	18
3. 강섬유 보강 콘크리트의 특징	19
 제 3장 유한요소 해석방법	 22
1. 비선형 방정식 해법	22
1.1 Newton-Raphson Method	23
1.2 수정(Modified) Newton-Raphson Method	27
 제 4장 실험 및 결과	 28
1. 실험개요	28
2. 실험결과	30
 제 5장 수치해석	 32
1. 연구에 이용된 프로그램	32
2. 모델링	34
3. 해석 결과	36
3.1 균열 형상과 최대 균열 위치	36
3.2 변위 및 균열폭	38

제6장 비교분석	40
1.균열 분포 형상에 대한 비교	40
2.균열에 대한 결과비교	47
3.처짐에 대한 결과비교	49

제7장 결론	51
---------------	-----------

참고문헌

표 목차

표-1. 상수 K, A 값	13
표-2. 시편의 종류	29
표-3. B25, P=23kN, $\mu = 0.5\%$, (2 ϕ 10)시험결과	30
표-4. B25, P=42kN, $\mu = 1.0\%$, (2 ϕ 14)시험결과	31
표-5. 철근콘크리트와 관련된 재료	33
표-6. 수치해석의 매개변수	36
표-7. 2 ϕ 10일 때 균열폭에 대한 실험치 및 해석치와의 비교	48
표-8. 2 ϕ 14일 때 균열폭에 대한 실험치 및 해석치와의 비교	48
표-9. 2 ϕ 10일 때 처짐에 대한 실험치 및 해석치와의 비교	50
표-10. 2 ϕ 14일 때 처짐에 대한 실험치 및 해석치와의 비교	50

그림 목차

그림-1. 콘크리트 압축부 응력-변형률 곡선도	8
그림-2. 콘크리트 압축부 연화곡선 모델	9
그림-3. 인장부의 Crack- Opening 모델	10
그림-4. 2축 응력상태의 파괴영역	11
그림-5. 콘크리트의 인장-압축파괴계수	13
그림-6. 콘크리트에 대한 일축 응력-변형률 관계	14
그림-7. 고정균열모델	15
그림-8. 회전균열모델	16
그림-9. 파괴에너지에 근거한 SFRC 모델	18
그림-10. 변형률에 근거한 SFRC 모델	19
그림-11. 다양한 콘크리트의 하중-처짐 곡선	21
그림-12. 휨 부재의 균열단면에서 작용하는 강섬유 철근 콘크리트의 변형, 응력, 힘	22
그림-13. 접선법 (tangent method)	23
그림-14. 수렴의 가속화	25
그림-15. Newton-Raphson Method에 의한 해석과정	26
그림-16. 초기 강성법	27
그림-17. test set up	29
그림-18. 사용된 강섬유 Harex SF01 및 Dramix ZCR 50/0.6	29
그림-19. 실험치 하중-균열폭 곡선	31
그림-20. 실험치 하중-처짐 곡선	32
그림-21. 해석 단면	34
그림-22. 수치해석을 위한 모델링	35
그림-23. 균열 분포 형상	37

그림-24. 최대 균열 위치	37
그림-25. 하중-변위 곡선($\mu = 0.5\%$)	38
그림-26. 하중-균열폭 곡선($\mu = 0.5\%$)	38
그림-27. 하중-변위 곡선($\mu = 1.0\%$)	39
그림-28. 하중-균열폭 곡선($\mu = 1.0\%$)	39
그림-29. RC 일때 균열분포형상 비교($\mu = 0.5\%$)	41
그림-30. SFRC(D30)일 때 균열분포형상 비교($\mu = 0.5\%$)	42
그림-31. SFRC(D60)일 때 균열분포형상 비교($\mu = 0.5\%$)	42
그림-32. SFRC(H30)일 때 균열분포형상 비교($\mu = 0.5\%$)	43
그림-33. SFRC(H60)일 때 균열분포형상 비교($\mu = 0.5\%$)	44
그림-34. RC 일때 균열분포형상 비교($\mu = 1.0\%$)	44
그림-35. SFRC(D30)일 때 균열분포형상 비교($\mu = 1.0\%$)	45
그림-36. SFRC(D60)일 때 균열분포형상 비교($\mu = 1.0\%$)	46
그림-37. SFRC(H30)일 때 균열분포형상 비교($\mu = 1.0\%$)	46
그림-38. SFRC(H60)일 때 균열분포형상 비교($\mu = 1.0\%$)	47
그림-39. 하중-균열폭의 실험치 및 해석치와의 비교	49
그림-40. 하중-처짐의 실험치 및 해석치와의 비교	51

제 1장 서론

1.연구배경

철근콘크리트는 경제성, 내구성, 내화성 등의 장점으로 인하여 교량이나 건물 및 기타 구조물에 널리 활용되고 있다. 철근콘크리트는 구조용 강재와는 달리 콘크리트와 철근의 합성구조이고 사용하중에서도 균열이 발생할 수 있기 때문에 그 거동이 매우 복잡하다. 또한 철근 콘크리트는 압축강도에 비하여 인장강도가 상대적으로 매우 작으므로 인장강도의 증진을 위한 많은 연구가 수행되고 있으며, 인장강도 증진에 대한 연구의 일환으로 강섬유를 혼합한 철근콘크리트가 일반적인 철근콘크리트에 비하여 하중하에서의 초기 균열발생을 억제함은 물론 균열 발생 후에도 균열폭을 억제함으로 하중전달 능력을 향상시키는데 효과가 있는 것으로 검증되었다.(1998.강보순)

이와 같이 철근콘크리트의 균열특성에 대한 많은 실험적 접근이 시도되고 있고 유한요소법에 의한 구조물의 수치해석으로 구조물의 파괴거동 및 균열해석을 통해 시뮬레이션으로 구조물의 변형을 예측하기 위한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 철근콘크리트 부재의 사용성 즉, 균열발전, 처짐 및 강성의 변화에 대하여 실험적 연구와 수치해석의 결과를 비교하고자 한다.

2.연구 목적과 기대효과

구조물의 사용성에서는 균열상태와 처짐 변화의 관찰이 아주 중요하다. 특히 철근 콘크리트로 된 철도구조물과 도로구조물은 공용기간에 계속되는 반복하중이 받게 되므로 사용조건에 대한 균열발전은 구조물의 강성

을 감소시키고 처짐이 증가하는 현상을 가져오게 된다. 특히 이런 사용성의 문제를 간과하게 되면 급기야 콘크리트 구조물의 심각한 문제가 될 수 있으므로 철근 콘크리트 구조물에 보강방법으로 강섬유 본 논문에서는 철근콘크리트 부재의 사용성 즉, 균열발전, 처짐 및 강성의 변화에 대하여 실험적 연구와 수치해석의 결과를 비교하고자 한다.

3.연구내용 및 범위

콘크리트는 인장에 약하기 때문에 하중의 초기 단계에서 균열이 생기게 된다. 균열이 진행하게 되면 철근의 부식 등 사용성에 유해한 결과를 가져오게 된다. 콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 구조물을 파괴에 까지 다다르게 할 수 있으며 이때 파괴거동과 극한하중 등을 예측하기 위해서는 진행성 균열에 대한 이해가 필요하다. 특히 압축강도에 비하여 상대적으로 훨씬 낮은 콘크리트의 인장강도로 인하여 소홀히 되어왔던 콘크리트의 인장거동은 파괴역학의 도입으로 콘크리트 구조물의 진행성균열에 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다.⁽¹⁵⁾

콘크리트의 파괴는 인장 파괴에 국한 하였으며, 균열은 최대 주응력 방향에 수직으로 발생한다고 가정하여 각 증분 단계마다 가우스 적분점에서 최대 주응력이 인장강도를 초과하는 경우 요소 내에 균열이 등분포 상태로 생성된다고 가정하여 분산균열모델을 적용하였다.

유한요소 해석으로 콘크리트 부재의 파괴형태를 해석할 때에 해석의 정확도를 높이기 위하여 파괴역학을 고려한 해석이 수행되고 있다. 유한요소법을 이용한 구조물의 비선형 해석방법은 주로 하중을 단계적으로 증가시켜 해석하는 하중 제어법이 사용되고 있다. 그러나 하중 제어법은 변형경화현상을 보이는 구조물 해석에는 적합하나, 응력-변형률 곡선이 변형연화(Strain-softening)현상을 보이는 콘크리트 구조물 해석에는 최

대 하중으로부터의 거동에 관한 해석을 할 수 없으므로 콘크리트의 거동 예측을 위해서는 적합하지 않다. 그러므로 본 논문에서는 변위제어에 의한 비선형 해석방법을 사용하였다.

4.연구 동향

경제적이고 효율적인 구조물의 설계를 위해서는 보다 정확한 구조물의 거동파악이 요구되어지며, 이러한 노력의 일환으로 많은 실험적 연구와 구조해석 기법이 개발되어 왔다. 철근콘크리트(RC) 구조물의 경우 재료 자체의 복잡성으로 인하여 많은 연구가 실험에 전적으로 의존하다가 1960년대 컴퓨터의 개발과 유한요소법을 비롯한 해석기법의 발전에 힘입어 수치해석에 의한 거동파악이 널리 행해지고 있다. 근자에는 구조물의 재료 비선형 동적해석과 파괴역학의 개념을 도입한 해석기법의 개발이 활발히 진행되고 있으며, 콘크리트의 균열폭을 억제함으로 하중전달능력을 향상시키는데 효과가 있는 강섬유 철근콘크리트(SFRC)에 관한 연구 논문도 많이 발표되고 있다.

5.논문 구성

철근 콘크리트와 강섬유를 보강한 철근 콘크리트 사이의 관계를 알아보기 위해 실험과 수치해석을 통해 알아본다.

첫째, 콘크리트의 파괴역학을 기초한 철근 콘크리트의 균열이론을 기본이론을 배경으로 한다.

둘째, 수치해석에 사용된 유한요소법에 의해 해석의 과정을 파악한다.

셋째, 기존 실험에 의한 결과를 파악하여 수치해석과 비교할 수 있는 결과를 사용한다.

넷째, 실험에 적용한 물성치로 수치해석에 모델링하여 결과를 산출한다.
다섯째, 수치해석 결과와 실험의 결과를 비교 분석하여 수치해석과 실험치의 균열경향을 파악한다.

제 2장 기본이론

1. 콘크리트 파괴역학의 균열이론

철근 콘크리트 부재의 역학적인 거동이 콘크리트의 균열에 의해 좌우되기 때문에 부재의 파괴거동을 분석하기 위해서 파괴역학 개념의 도입이 필요하다. 현재까지 다중균열을 고려한 철근콘크리트 인장부재의 파괴역학 해석방법 중에는 Bazant과 Oh⁽¹⁾ 및 Ouyang과 Shah⁽²⁾ 등이 제시한 방법이 있다.

이 중에서 Ouyang과 Shah의 방법에서는 콘크리트를 준취성(quasi-brittle) 재료로 간주하여 파괴진행대의 존재를 R-곡선으로 표현하였고 여기서 얻은 재료의 특성치를 동일한 형상과 물성치를 지닌 유한 크기의 철근콘크리트 인장 부재에 적용하여 균열성장해석을 고찰하였다. 또한, 크기효과법칙(SEL)을 사용하여 R-곡선의 관계식으로부터 철근콘크리트 인장부재의 균열성장 해석에 대한 연구가 있었다.⁽⁴⁾

또한, 재료에 손상이 생기는 부분 즉, 파괴영역은 부분적으로는 부서지지만 응력을 전달할 수는 있다. 응력전달능력은 파괴의 국소변형이 증가할 때, 즉 미세 균열의 수가 증가함에 따라 감소하게 된다. 이렇게 응력을 전달할 수 있는 균열은 실제의 균열이 아니므로 “가상균열”이라 하고 이 가상균열을 도입한 콘크리트의 파괴해석을 Hillerborg 등⁽⁵⁾이 제안하였다.

1.1가상균열이론

1.1.1이론적배경

균열이 있는 탄성재료에 하중이 가해질 때, 균열 선단의 응력은 이론적으로 무한대가 된다. 그러나 실제 구조물은 무한대의 응력을 저항할 수 없으며 콘크리트의 경우 균열 선단의 응력이 인장강도에 도달하면 인장 균열이 발생한다.

콘크리트의 균열선단에서 실제 균열이 진전하기 전에 미세균열들이 발생, 이러한 미세균열들이 발생한 영역은 아직까지는 어느 정도의 응력을 전달할 수 있으며, 그 응력 전달의 능력은 균열선단의 개구변위(CTOD)에 따라 영향을 받는다.

이와 같이 미세한 균열이 진전되는 영역을 파괴진행대라고 부른다. 균열선단에서의 파괴진행대는 일반적으로 인장응력이 발생하는 영역에서 발생한다. 이러한 파괴진행대의 특성은 직접인장시험에서 파괴진행대와 비슷한 양상을 보인다. 따라서 콘크리트의 경우 인장응력 및 변위관계는 직접인장시험에서 결정할 수 있다.

콘크리트의 변형 특성은 파괴진행대 그 이외의 영역의 응력을 전달할 수 있는 균열은 실제균열이 아니므로 가상의 균열로 생각할 수 있으며, 이러한 가상균열로 파괴진행영역을 설명한 이론이 가상균열이다.

가상균열이론은 1976년 Hillerborg & Petersson⁽³⁾에 제안되었으며, 그 기본적인 가정은 다음과 같다.

- (1) 파괴진행대는 주응력이 콘크리트의 인장응력에 도달하였을 때 발생하기 시작한다.
- (2) 파괴진행대는 처음으로 발생하는 초기 주응력이 수직으로 발생한다.

(3) 파괴진행대는 내부의 재료는 부분적으로 균열이 일어났지만 응력을 전달할 수 있다.

파괴진행대의 응력전달능력은 파괴진행대의 국부 변형에 관계된다.

(4) 파괴진행대의 폭은 균열이 발생한 순간에는 0이 된다.

1.1.2가상균열이론의 특징

콘크리트 내부의 주인장 응력이 콘크리트의 인장강도에 도달하게 되면 파괴진행대가 형성되기 시작한다. 이것은 가상균열이 순수한 파괴역학 개념뿐만 아니라 균열이 발생하지 않는 부재의 해석도 가능하다는 것을 설명하여 주는 것이며, 다른 해석방법과의 차이점이기도 한다.

가상균열은 파괴진행대의 생성, 균열의 발생, 균열의 진전 등의 상황을 가능케 한다. 또한 기존의 파괴역학의 이론과 비슷하나 균질재료에 제한되어 사용되고, 가상균열이론은 비균질 재료에 적용이 가능하다.

1.2균열띠이론

1.2.1이론적 배경

균열띠 이론은 균열이 발생한 파괴영역을 하나의 연속체로 생각하는 개념이다. 근래에 들어 파괴진행대의 미세 균열의 형성에 관한 많은 관찰들이 이루어져 왔다.

이러한 관찰을 통해 파괴는 하나의 단일한 균열에 의해 이루어지는 것이 아니라 많은 미세한 균열이 띠와 같은 형상으로 발전하여 파괴가 일어나는 것을 알 수 있다. 이러한 균열을 실제로 해석에 이용하고자 개발한 것이 균열 띠 이론(Crack Band)으로 Barent & Oh⁽¹⁾에 의해 제안 되었

다.

균열 띠 이론은 균열 선단에서의 미세 균열 발생을 실제적으로 고려하여 모델링하는 것으로 응력-변형도 관계식에 직접 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

1.2.2 균열 띠 이론의 특징

균열 띠 이론은 미세균열영역을 직접적으로 고려하고자 개발된 이론으로써 가상균열이론과 비교해 결과치는 거의 유사하며 계산상의 효율성이 높은 장점을 가지고 있다.

균열 띠 이론은 원래 유한 요소 망을 계속해서 유지하면서 균열의 방향에 전혀 제약이 없다는 것이 미세 영역을 설명하는 컴플라이스 매트릭스를 사용하기 때문에 가상균열이론처럼 강성매트릭스를 재구성할 필요가 없는 것이 장점이다.

2. 수치해석 기본이론

2.1 콘크리트의 인장부와 압축부

콘크리트의 응력-변형률 관계는 인장부와 압축부로 구분하여 나타낼 수 있다. 압축부는 콘크리트 최대압축응력까지의 응력-변형률 곡선도 (Stress-Strain Curve)의 상승부는 CEB-FIP Code 90⁽⁵⁾의 제안식인 식 (2.2.1)을 사용하였다. 그림-1은 압축부의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이며 그림-2는 압축부 연화곡선모델을 나타낸 것이다.

$$f_c = f_{cm} \cdot \frac{kx - x}{1 + (k-2)x} \quad (2.2.1)$$

$$x = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_c} \quad , \quad k = \frac{E_0}{E_c}$$

여기서, f_c :콘크리트의 압축응력

f_{cm} :콘크리트의 최대 압축응력

$\mathcal{E}_c$:최대압축응력의 변형률

E_0 :초기 접선 탄성계수

E_c :할선탄성계수

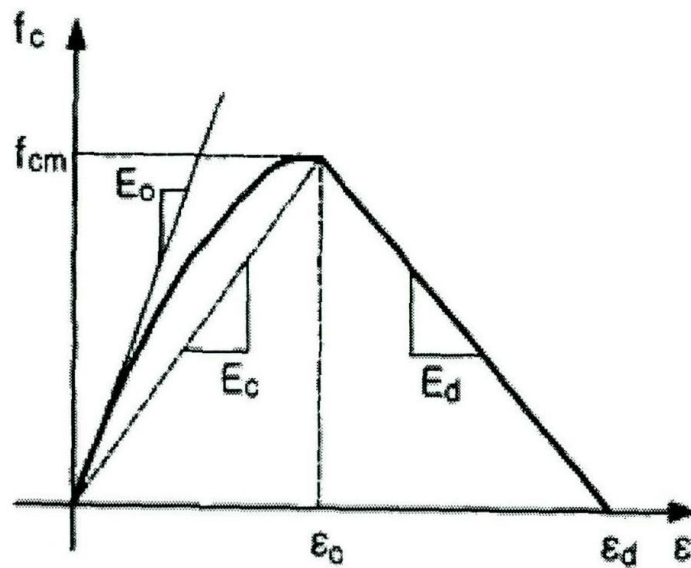


그림-1. 콘크리트 압축부 응력-변형률 곡선도

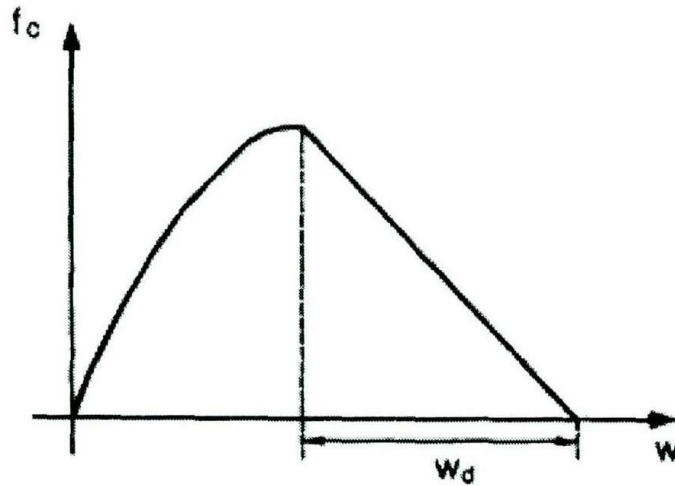


그림-2. 콘크리트 압축부 연화곡선 모델

최대압축응력 이후 응력의 연성화는 선형으로 가정하였으며, 가상 압축면 모델(Van Mier, 1986)⁽⁶⁾에 근거하였다. 즉 압축 파괴는 압축 주응력의 방향에 대해 수직면에서 국부적이며 모든 최대압축응력 후의 변위와 에너지 방출은 이 면에서 국부적이다. 이러한 가정은 구조물의 크기에 영향을 받지 않는다는 가정을 바탕으로 한다. 연화 곡선의 마지막 점은 소성변위(W_d)로 표현하며 Van Mier의 실험에 의해 W_d 는 보통콘크리트 강도에서 약 0.5mm 정도로 제안되었으며, 이 값을 사용하여 압축부의 연성거동을 식(2.2.2-a,b)와 같이 나타내었다. 또한 그래프로 나타내면 그림-3과 같다.

$$\varepsilon_d = \varepsilon_c + \frac{W_d}{L_d} \quad (2.2.2-a)$$

$$E_d = \frac{f_{cm}}{\varepsilon_d - \varepsilon_c} \quad (2.2.2-b)$$

여기서, ε_d : 압축응력이 0 일 때의 변형률

L_d : 균열 방향에 대한 요소의 길이

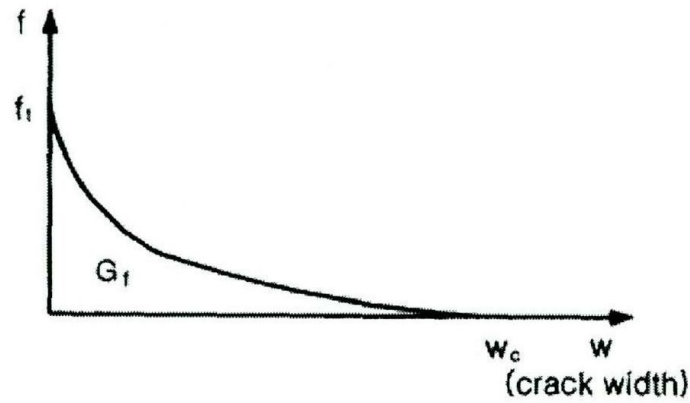


그림-3. 인장부의 Crack- Opening 모델

콘크리트 인장부는 균열이 발생하기 전까지 선형 탄성으로 가정하며, 균열 발생 후의 콘크리트 인장부의 거동은 파괴에너지와 Crack-Opening 법칙을 바탕으로 하는 가상균열 모델에 근거한다. 이 모델은 콘크리트에서 안정적인 균열의 진행을 형성하게 하며 균열띠(Crack Band)이론과 조합하여 사용된다. 여기서는 Hordijk(1991)⁽⁷⁾의 Crack-Opening 모델을 사용하였다.

$$\frac{f}{f_t} = \left\{ 1 + c_1 \left(\frac{w}{w_c} \right) \right\} \exp \left(-c \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (2.2.3)$$

여기서, $w_c = 5.14 \frac{G_f}{f_t}$ (mm)

$$c_1 = 3 \quad c_2 = 6.93$$

G_f : 파괴에너지

w : Crack- Opening

f : 콘크리트 인장응력

f_t : 콘크리트 인장강도

2.2 콘크리트의 2축 응력상태의 파괴영역

2.2.1 압축파괴

Kurfer et. al (1969)에 의한 2축 응력의 파괴영역은 그림-6에 보이는 것처럼 사용된다.

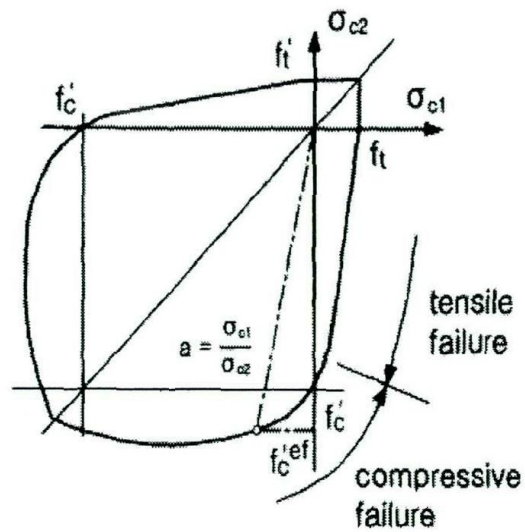


그림-4. 2축 응력상태의 파괴영역

$$f'_c{}^{ef} = \frac{1 + 3.65a}{(1 + a)^2} f'_c a = \frac{\sigma_{c1}}{\sigma_{c2}} \quad (2.2.4)$$

여기서, σ_{c1} , σ_{c2} 는 콘크리트의 주응력들이고, f'_c 는 원통공시체의 일축강도이다. 2축 응력상태에서 콘크리트 강도는 비례적인 응력 경로의 가정 이하로 예측된다. 인장-압축영역에서 파괴함수는 인장 -압축영역내의

$\sigma_{c1} = 0, \sigma_{c2} = f'_c$ 로부터 선형적으로 연속적이다.

$$f'_c{}^{ef} = f'_c \gamma_{ec} \quad , \quad \gamma_{ec} = (1 + 5.3278 \frac{\sigma_{c1}}{f'_c}) \quad , \quad 1.0 \geq \gamma_{ec} \geq 0.9 \quad (2.2.5)$$

여기서, γ_{ec} 는 주방향 1의 인장응력에 기인한 주방향 2에서의 압축강도의 감소계수이다.

2.2.2인장과괴

인장-압축영역에서 인장강도는 일정하며, 일축 인장강도 f'_t 와 동일하다.

인장 -압축영역에서 인장강도는 다음 관계에 의해 감소된다.

$$f'_t = f'_t \gamma_{et} \quad (2.2.6)$$

여기서, γ_{et} 는 주방향 2의 압축응력에 기인한 1방향 인장강도의 감소계수이다. 감소함수는 그림-5에 대한 다음의 여러 식 중에서 하나이다.

$$\gamma_{et} = 1 - 0.8 \frac{\sigma_{c2}}{f'_c} \quad (2.2.7)$$

$$\gamma_{et} = \frac{A + (A-1)B}{AB} \quad , \quad B = Kx + A \quad , \quad x = \frac{\sigma_{c2}}{f'_c} \quad (2.2.8)$$

식(2.2.7)는 인장강도의 선형감소식이고, 식(2.2.8)는 쌍곡선 (hyperbolic) 감소식이다. 쌍곡선 형태의 두 가지로 예측되는 형태는 중간점 γ , x 의 위치에 의해 주어진다. 상수 K , A 는 쌍곡선의 모양을 정의 하며, 중간점의 두 위치에 대한 상수 값들은 다음 표-1과 같다.

표-1. 상수 K, A 값⁽¹⁴⁾

type	Point		Parameters	
	γ	χ	A	K
a	0.5	0.4	0.75	1.125
b	0.5	0.2	1.0625	6.0208

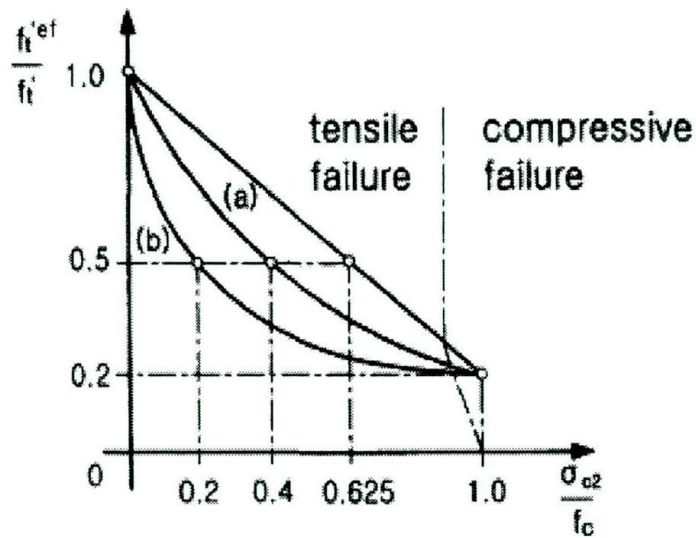


그림-5. 콘크리트의 인장-압축파괴계수

2.3등가 일축법

이축응력상태에서 콘크리트 비선형거동은 유효응력 f_c^{ef} 과 등가일축변형률 ϵ^{ef} 으로 표현된다. 유효응력은 대부분의 경우에서 주응력으로 나타난다. 등가일축변형률은 평면응력상태에서 Poisson의 영향을 제거하기 위하여 도입된다.

$$\varepsilon^{eq} = \frac{f_{ci}}{E_{ci}} \quad (2.2.9)$$

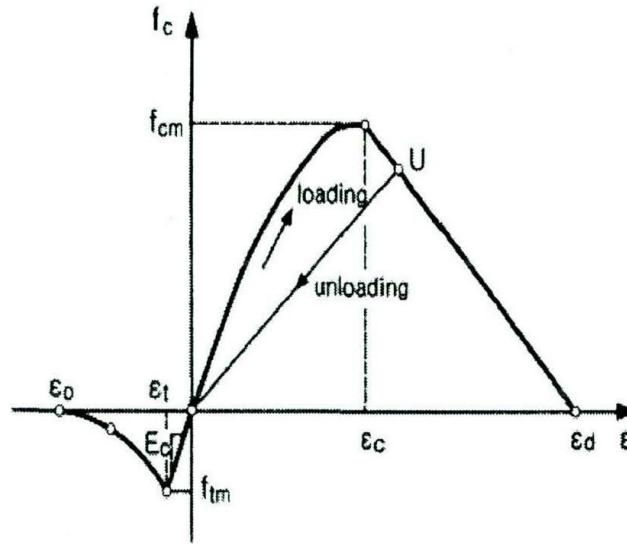


그림-6. 콘크리트에 대한 일축 응력-변형률 관계

등가일축변형률은 i 방향의 E_{ci} 을 가지는 일축 시험에서 응력 f_{ci} 에 의해 얻어지는 변형률이다. 이 가정 내에서 손상을 나타내는 비선형은 지배적인 응력 f_{ci} 에 의해서 생긴다. 콘크리트의 완전한 등가일축 응력-변형률 곡선은 그림-6에서 보여준다.

하중 제거시 원점에 대하여 선형적으로 감소한다. 하중 제거점 (unloading)U은 그림-6에서 보여준다. 그러므로 콘크리트 응력 f_c 와 변형률 ε 사이의 관계는 정해져 있지 않으며 하중재하에 따라 결정된다.

유효변형률 증가분의 부호가 변화할 때 하중재하부터 하중제거로의 변화가 생긴다. 다시 하중을 재하시 마지막 하중재하 점 U에 다시 도달될 때까지 하중제거 과정을 따라간다.

압축부에서의 최대 응력값 f_{cm} 과 인장부에서의 f_{tm} 은 이축응력상태에

따라 계산된 것이다. 그러므로 ,등가 일축 응력-변형률법은 이축응력상태를 반영한다.

2.4콘크리트 균열모델

콘크리트의 균열 대한 모델은 분산균열모델(Smeared Crack Model)을 사용하였다. 분산균열모델은 고정균열모델과 회전균열모델로 구분된다. 균열이 발생하기 전에 콘크리트는 등방성으로 가정하며, 주응력이 콘크리트의 인장강도를 초과할 경우 균열로 인하여 요소의 재료는 구성모델(Orthotropic Constitutive Model)로 대체하게 된다.

2.4.1고정균열모델^{(8),(10)}

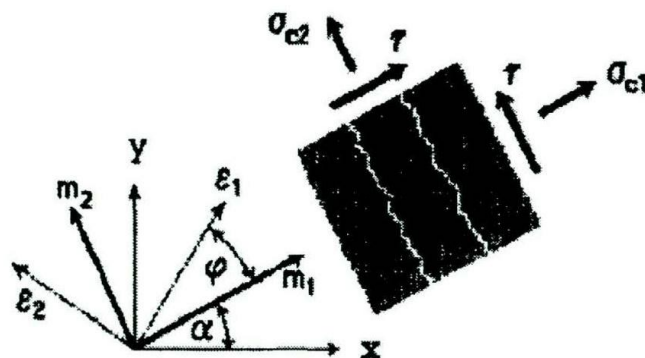


그림-7. 고정균열모델

그림-7에서 보는 바와 같이, 고정균열모델에서의 균열방향은 초기균열의 발생지점에서의 주응력 방향에 의해 결정되고, 초기균열의 직각방향을 m_1 축, 평행방향을 m_2 축으로 한다. 그리고 ,하중이 증가하는 동안에도 요소 내 균열방향은 초기균열과 동일한 방향으로 고정시키므로 축 m_1 , m_2 는 변하지 않는 요소모델의 축이 된다. 그런데 하중증가에 의해 추가 균

열발생 및 기존 균열진전으로 인해서 주변형률 ε_1 과 ε_2 이 회전하여 m_1, m_2 축과 일치하지 않게 되므로 균열 면에 전단응력이 발생하며, 이때의 m_1, m_2 축방향의 수직응력 σ_{c1}, σ_{c2} 는 주응력이 아니게 된다. 이러한 경우, 전단탄성계수는 Kolmar(1986)⁽⁹⁾에 의해 제안된 식 (2.2.10-a,b)에 의해 결정된다.

$$G = \gamma_g G_c \quad (2.2.10-a)$$

$$\gamma_g = c_3 \frac{-\ln\left(\frac{\mathcal{E}_u}{c_1}\right)}{c_2} \quad (2.2.10-b)$$

여기서, $c_1 = 7 + 333(\rho - 0.005)$

$$c_2 = 10 - 167(\rho - 0.005)$$

$$c_3 = 1, \quad 0 \leq \rho \leq 0.02$$

여기서 G 는 균열 후 전단계수, γ_g 는 전단유지계수, G_c 는 선형탄성계수이며, c_1, c_2 는 균열이 통과하는 철근에 의해 결정되는 상수이며, ρ 는 균열면을 통과하는 철근에 대한 철근비이다.

2.4.2회전균열모델^{(11),(12)}

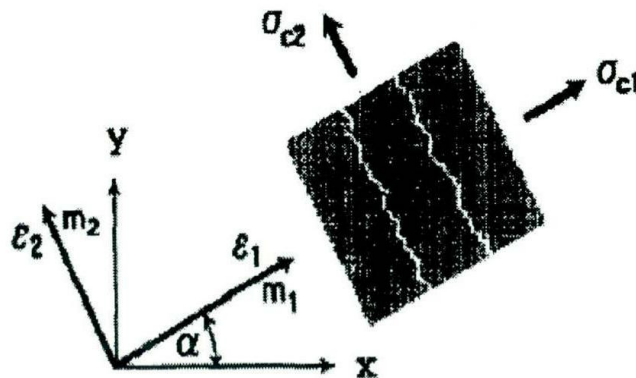


그림-8. 회전균열모델

회전균열모델은 균열 후 콘크리트 재료의 이방성 축이 주변형률의 방향과 일치한다. 따라서 주응력 방향과 주변형률 방향이 일치하여 균열면에 전단응력이 발생하지 않으며, 그림-8에서처럼 단지 두개의 수직응력 성분만이 정의될 수 있다. 하중이 증가하는 동안 주변형률이 회전한다면 균열방향 역시 회전한다. 재료의 이방성 축과 주변형률이 일치하기 위해서 접선전단계수 G_t 은 Crisfield⁽¹¹⁾ 가 제안한 다음 식 (2.2.11)에 의해 계산한다.

$$G_t = \frac{\sigma_{c1} - \sigma_{c2}}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \quad (2.2.11)$$

2.5강섬유 보강시 균열모델

2.5.1 파괴에너지에 근거한 모델

파괴에너지에 근거한 강섬유 콘크리트(강섬유 보강 콘크리트) 프리프로세스에서는 매개변수 c_1 , c_2 , G_f 를 입력할 필요가 있다. 다음 식으로 정의 된다.

$$c_1 = \frac{f_1}{R_t^{ef}}, \quad c_2 = \frac{f_2}{R_t^{ef}}, \quad w_c = \frac{2G_f}{f_1 + f_2} \quad (2.2.12)$$

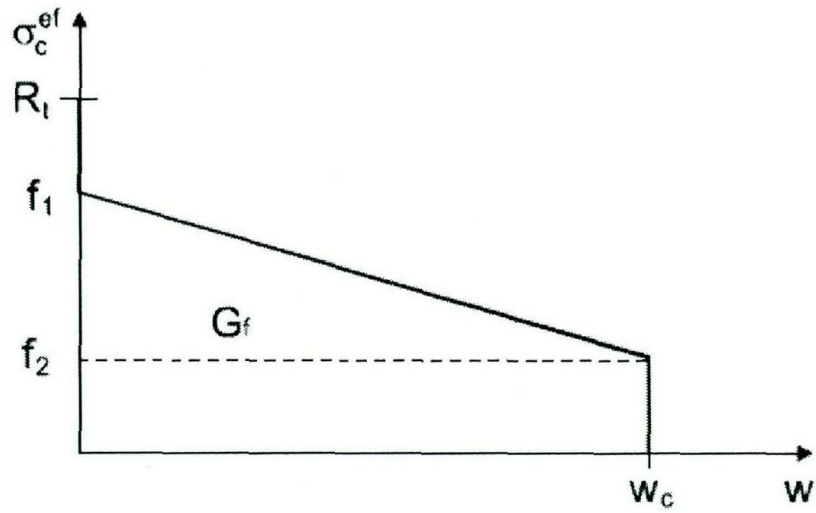


그림-9. 파괴에너지에 근거한 SFRC 모델

2.5.2 변형률에 근거한 모델

변형률에 근거하는 섬유 콘크리트(강섬유 보강 콘크리트) 프리프로세서에서는 매개변수 c_1 , c_2 를 입력한다.

$$c_1 = \frac{f_1}{R_t}, \quad c_2 = \frac{f_2}{R_t} \quad (2.2.13)$$

여기서 c_1 , c_2 는 응력레벨의 상대적 위치를 나타내고, 그림에서 c_3 는 한계변형률이다.

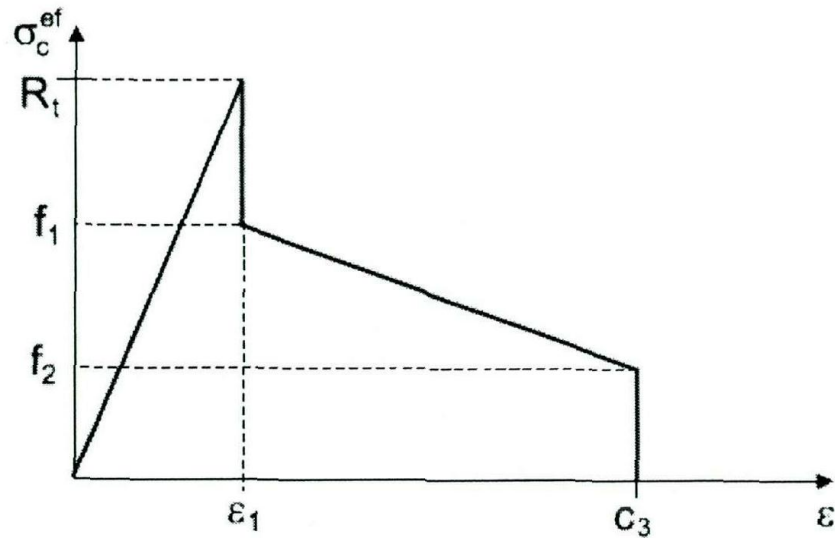


그림-10. 변형률에 근거한 SFRC 모델

3. 강섬유 보강 콘크리트의 특징

강섬유 보강 콘크리트의 균열특성은 균열형성 및 균열발전에서 섬유효과와 균열발생후의 섬유효과 사이에서 나눌 수 있다. 비균열 상태에서의 강섬유 효과는 자체응력 및 하중에 의한 마이크로 균열발생을 억제하고 균열발생 후 강섬유 효과는 균열폭 사이에 힘을 전달하여 균열폭을 제한한다.

강섬유는 콘크리트에서 미세한 내부균열을 억제하고 균열의 뿌리가 강섬유를 도달할 때까지 발전된다. 강섬유는 그 균열 및 발전하는 다른 균열을 안정시킨다. 전체적으로 같은 변위가 일어날 경우에는 더 작은 균열들이 발생한다. 따라서 건조수축 균열발생률이 작아지며 가스 및 액체 침투경과가 어렵고 건조경과(및 건조수축경과)는 서서히 종료되어 발생하는 응력집중을 완화시키는 결과를 가져온다. 그리고 또한 콘크리트 길이방향에서 강섬유의 기하학적 변화는 균열발생에 큰 영향을 미치지 못하지만(예를 들어 파선모양, 후크처리된 모양의 섬유) 큰 섬유표면적을

갖고 있는 섬유는 특별히 효과적이다⁽¹⁷⁾. 즉 같은 혼입량일 경우 균일하게 분포된 작은 섬유가 더 좋은 효과를 가져온다.

구조물의 단면을 완전히 지나는 균열이 발생할 경우에도 강섬유는 균열 폭 사이에서 힘을 계속 전달하므로 벌써 균열발전 시 적어도 부분영역에서 균열을 분산시키는 결과를 가져오고 좀더 확대해서 보면 강섬유의 전 길이에 여러 개의 미세한 균열로 분산된다. 발생한 균열 폭의 합계는 강섬유가 없는 일반 콘크리트와 거의 같지만 각각 하나의 균열폭을 살펴보면 뚜렷하게 작은 것을 알 수 있다. 균열 폭에서 강섬유의 계속적인 힘의 전달은 보의 경우 단면내의 중립축의 이동이 작아져 균열 깊이를 감소시킨다.⁽¹²⁾

균열 발생후 섬유와 콘크리트사이에서는 상대변위가 발생한다. 충분한 섬유 자체강성이 수반된 강섬유의 길이 방향의 변형은 생성된 우회적으로 전달되는 힘에 좋은 영향을 끼친다. 균열 면적을 통과해 충분한 힘의 전달을 위해서는 길고, 끝부분을 후크 처리하여 기하학적으로 변화를 준 그리고 충분한 유연성이 있는 강섬유의 사용이 권장될 수 있다.

강섬유의 영향들은 콘크리트 구조물의 조밀성에 대하여 긍정적인 효과를 보여줌에 따라 철근 콘크리트 구조물에 강섬유의 혼입은 균열폭의 제한을 위해 효과적인 대책으로 보여주고 있다. 이런 강섬유의 효과는 균열제한을 위한 인장실험에서 하중과 변형의 진행을 그림-11에서 보여주고 있다. 강섬유 철근콘크리트의 진행이 철근콘크리트에 강섬유 보강 콘크리트를 합한 값에 거의 일치하는 것을 알 수가 있다. 이때 균열 발생 부분에 첫 균열 발생 후 강섬유 철근 콘크리트는 철근 콘크리트 보다 큰 강성을 가지고 있다. 이것은 같은 변위조건 일 경우 더 많은 균열수를 갖고 있는 것을 의미한다. 강섬유의 영향은 부착 시스템의 성분에 대한 인장하중의 분할로부터 유도될 수 있다. 발생한 균열폭은 하중분할의 변화에 따라 달라지는 것을 볼 수 있다.

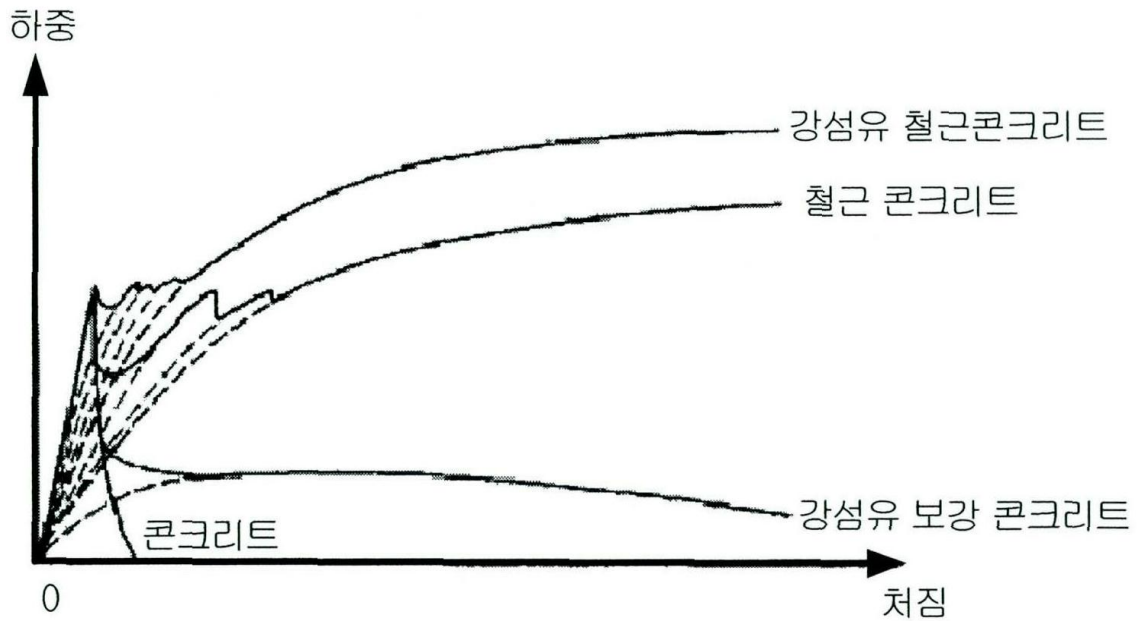


그림-11. 다양한 콘크리트의 하중-처짐 곡선

일반적으로 순수한 인장이나 휨 하중하에 있는 철근 콘크리트 구조물의 균열발생은 인장부분의 가장 취약한 곳에서 콘크리트의 인장강도를 초과할 때 발생한다. 이곳의 콘크리트 단면의 응력은 없다고 가정하고 철근이 인장력을 받으므로 철근응력이 큰 폭으로 증가하게 된다. 그러나 강섬유 철근 콘크리트에서는 균열 단면에서 우회하는 응력의 일부분을 강섬유가 부담하게 되어 균열 단면의 콘크리트의 응력이 없어지는 것이 아니라 일정량의 강섬유 응력이 콘크리트 응력을 대신하여 유지하게 된다. 따라서 균열 단면의 철근은 상대적으로 작아져 그에 상응하는 철근과 콘크리트의 유효 부착길어도 작아지므로 균열폭이 작아지게 된다. 그리고 강섬유 철근 콘크리트의 중립축의 위치가 콘크리트 압축방향으로 작게 이동하게 되어 같은 하중에 강섬유 철근 콘크리트의 균열 깊이가 강섬유가 없는 철근콘크리트보다 작아져 강성을 증가시키고 처짐을 감소시킨

다. 이러한 균열 특성의 변화를 강섬유를 보강함으로써 철근콘크리트 구조물의 변위와 사용성에 영향을 줄 수 있다. 강섬유 철근 콘크리트에서는 균열단면에서 응력의 일부분을 강섬유가 부담하게 되는 것을 고려하여 감소된 철근응력을 결정한다.

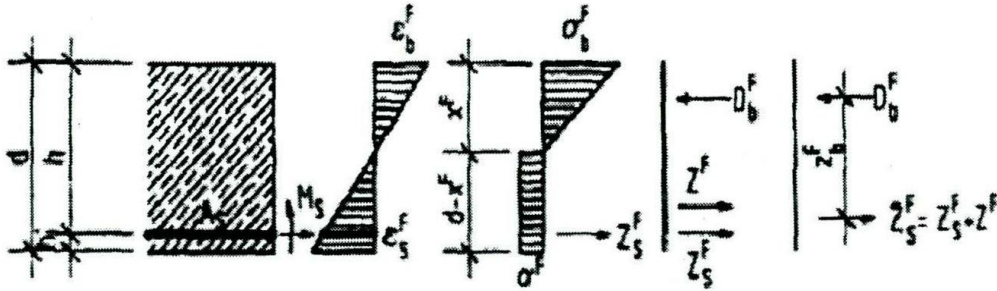


그림-12. 휨 부재의 균열단면에서 작용하는
강섬유 철근 콘크리트의 변형, 응력, 힘

제 3장 유한요소 해석방법

1. 비선형 방정식 해법

재료 비선형 또는 기하학적 비선형을 포함하는 구조해석문제의 경우, 강성행렬이 비선형 항을 포함하고 있으므로 일반적으로 반복해석(iteration)을 통해서만 문제의 해를 구할 수 있다. 즉 비선형 문제를 소구간마다 선형화 하여 이를 연속적으로 푸는 방법이다.

1.1 Newton-Raphson Method

Newton-Raphson Method는 일명 간접강성법(tangent stiffness method)이라고도 하는데 이 방법에 의한 해석 과정은 다음 그림-13에 나타난 바와 같다.

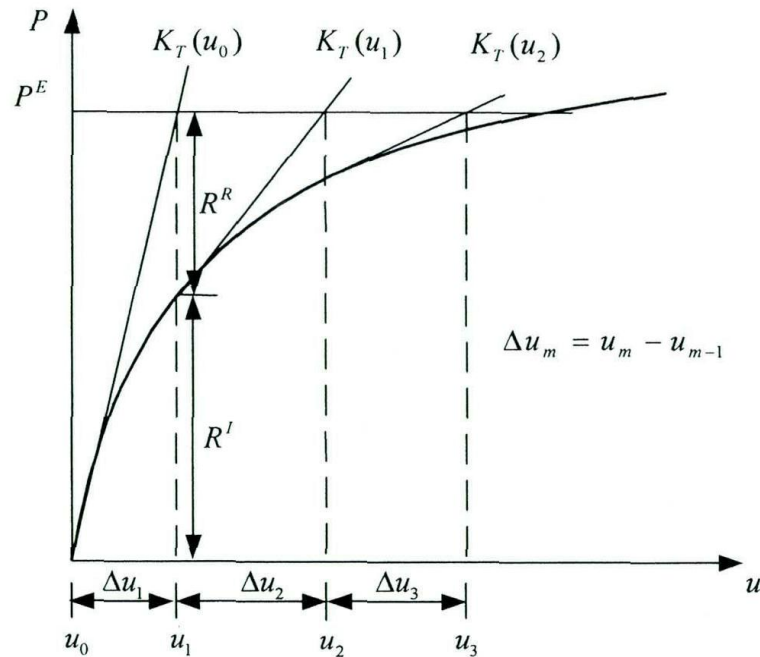


그림-13. 접선법 (tangent method)

위의 그림에서와 같이 반복해석 중 하중과 변위의 관계식 또는 관계곡선의 기울기를 이용하여 매 반복해석 때마다 강성행렬을 새로 구성한 후 반복해석을 수행하는 방법으로 수렴속도가 빠른 반면 하중-변위 곡선형태에 따라 수렴의 여부를 보장할 수 없는 경우도 있다.

m 번째 반복과정에서 구한 변위로부터 상태 $m+1$ 에서의 하중-변위 관계를 식(3.1.1)같이 쓸 수 있다.

$$K(u_m)(u_m + \Delta u_{m+1}) = P_{m+1} \quad (3.1.1)$$

Taylor⁽¹⁶⁾의 전개식에 의해 위의 식(3.1.1)의 좌변을 전개하면 다음과 같다.

$$K(u_m)(u_m + \Delta u_{m+1}) = K(u_m)u_m + \frac{dP}{du_m} \Delta u_{m+1} \quad (3.1.2)$$

여기서 , $\frac{dP}{du_m} = K_T(u_m)$ 이므로 이 관계식을 식(3.1.2)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 Newton-Raphson Method에 의한 반복해석을 위한 평형방정식을 얻을 수 있다.

$$K_T(u_m)\Delta u_{m+1} = P_{m+1} - P_m = R^R \quad (3.1.3)$$

여기서 P_{m+1} 은 외력 P^E 이고 P_m 은 구조체의 내부저항력 R^I 이므로 R^R 은 여력(Residual force)이 된다.

일단 ΔU_{m+1} 이 구해지면 변위 U_{m+1} 은 다음 식으로 구한다.

$$U_{m+1} = U_m + \Delta U_{m+1} \quad (3.1.4)$$

반복해석이 진행됨에 따라 변위 증분 이 점점 작아져 0에 접근하게 되어 (이때 여력 R 도 0에 접근한다.)허용치 범위 내에 들어가면 해가 수렴한 것으로 간주하고 해석을 마치게 된다.

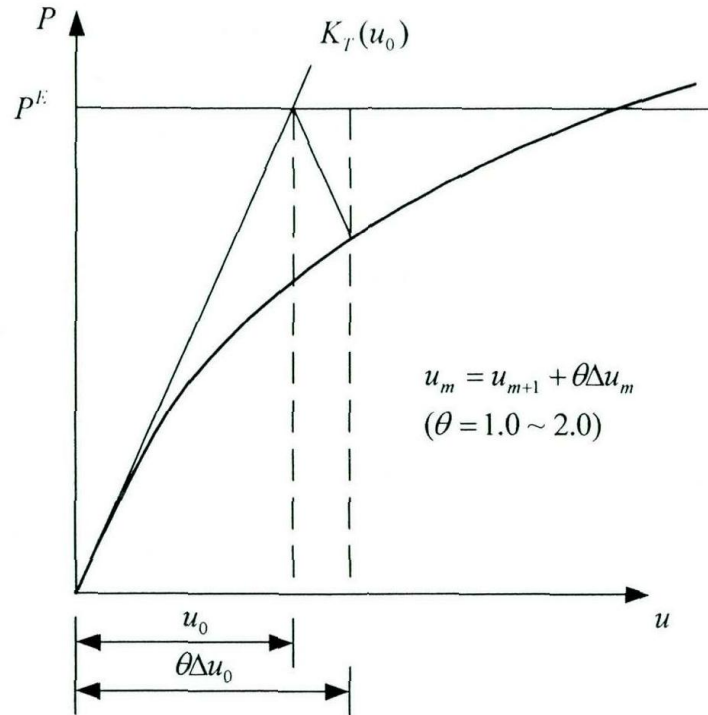


그림-14. 수렴의 가속화

반복해석 과정에서 수렴속도를 빠르게 하기 위해 변위의 증분에 상수를 곱하는 경우도 있다. 즉, 수렴속도를 가속시키는 계수 θ 를 (1.0~2.0 사이의 값) Δu_{m+1} 에 곱하는 경우 그림-14에서와 같이 통상적인 점 A보다 훨씬 수렴이 빠른 점 B를 취하여 반복해석을 계속하게 된다.

즉,

$$U_{m+1} = U_m + \theta \Delta U_{m+1} \quad (3.1.5)$$

수렴과정에서 여력 R이 존재할 경우 요소별 두 번째 강성행렬 계산치를 가지고, 강성행렬의 조합과정으로 다시 돌아가 해석을 반복한다.

Newton-Raphson방법에 의한 해석과정을 흐름도(flow chart)로 표시하면 그림-15와 같다.

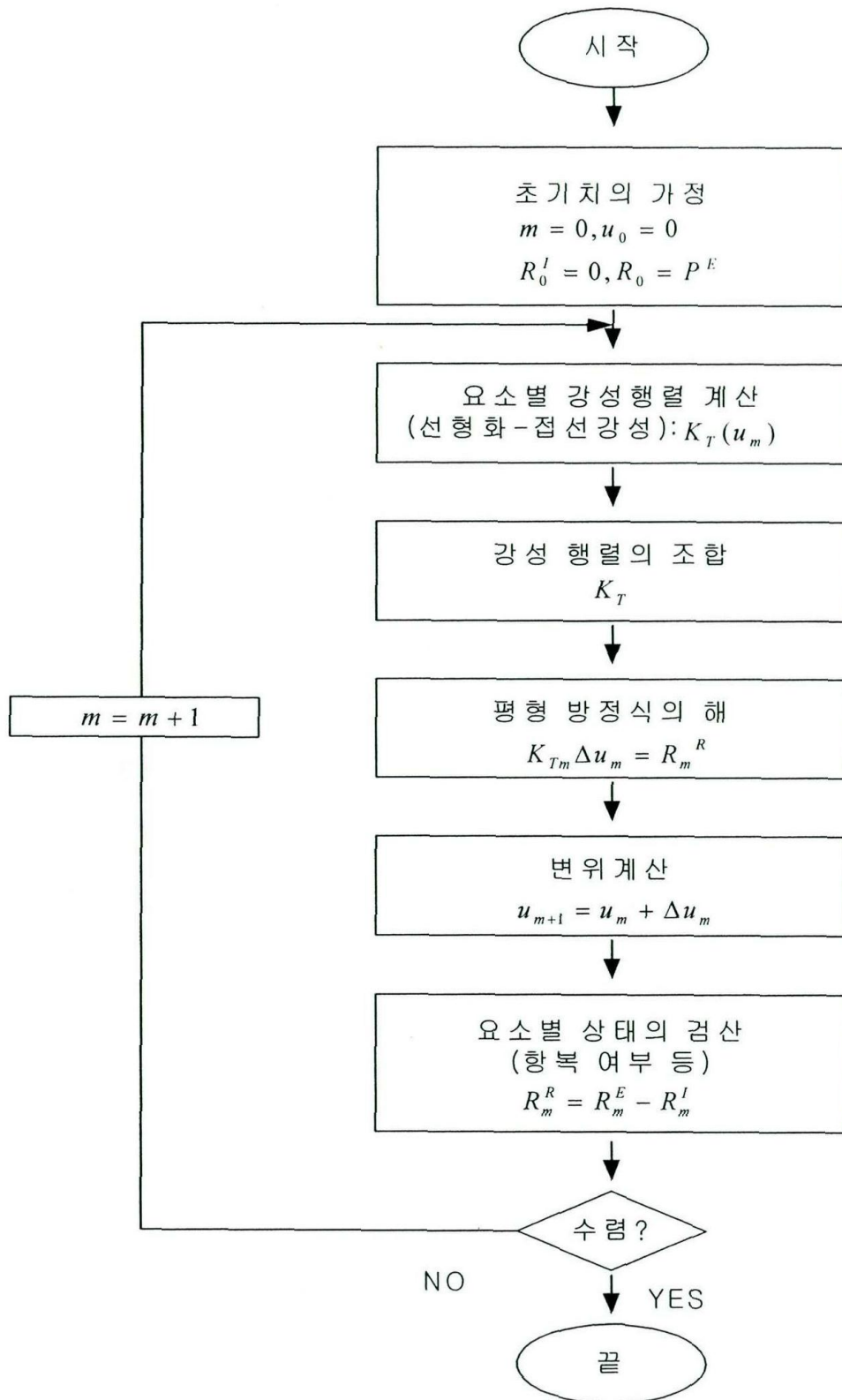


그림-15. Newton-Raphson Method에 의한 해석과정

1.2수정(Modified) Newton-Raphson Method

이 방법은 일명 초기강성법(initial stiffness method)라고 불리우는 방법으로 반복해석의 처음부터 마지막까지 처음에 가정했던 강성행렬 K_0 을 계속 사용한다는 것 이외에는 앞에서 설명한 접선강성법(tangent stiffness method)과 동일하다. 이 방법에 의한 반복과정은 그림-16에 나타나 있다.

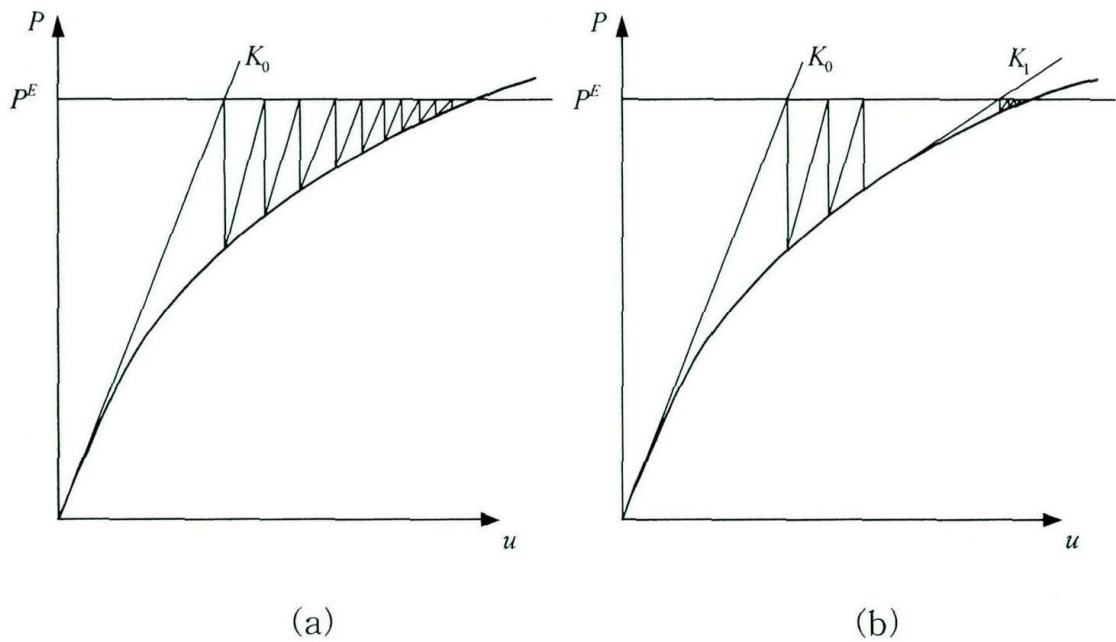


그림-16. 초기 강성법

이 방법을 수식으로 표현하기 위해 식 (3.1.3)의 K_T 를 K_0 로 바꾸면 다음과 같다.

$$K_0 \Delta u_{m+1} = R_{m+1} - R_m = R^R \quad (3.1.6)$$

이 방법은 접선강성법에 비해 반복횟수가 많아져 계산속도가 늦은 반면
때 반복해석 때마다 강성행렬을 재구성하지 않기 때문에 경제적이기도
하다. 처음부터 끝까지 같은 강성 행렬을 접선 강성행렬 대신 사용 할
수도 있겠으나 몇 번의 반복해석 후 강성행렬을 접선강성행렬로 수정하
여 계산을 수행할 수도 있다(그림 16(b)).

제 4장 실험 및 결과

1. 실험개요

본 논문에서 비교자료로 사용된 실험값은 1998년 독일Ruhr-Univ. Bochum
대학에서 시행된 실험이다. 하중에 대한 철근 콘크리트보의 기본적인 휨
실험으로 시편의 크기는 길이 159cm, 높이 20cm, 폭은 15cm 이다. 하
중은 정적으로 재하시켰다. 균열거동에서는 균열폭, 균열간격 및 균열수
를 관찰하게 된다. 이 크기는 실험이 수행되는 동안에 특별히 다음 하중
단계로 넘어갈 때 연속적으로 측정되었다. 사용된 강섬유의 종류로는
Dramix, Harex 이다. 강섬유 Dramix는 모양이 후크처리되어 콘크리트
의 균열이 생겼을때 균열의 크기가 증가하지 않도록 잡아주는 효과를 가
지고 있고, 강섬유 Harex는 표면이 거칠어서 부착특성을 보강하여 콘크
리트의 사용성을 높여준다. 강섬유의 혼입량은 30kg/m^3 , 60kg/m^3 를 사용
하였다. 이는 일반 터널이나 슬래브에 많이 사용되는 양이다.

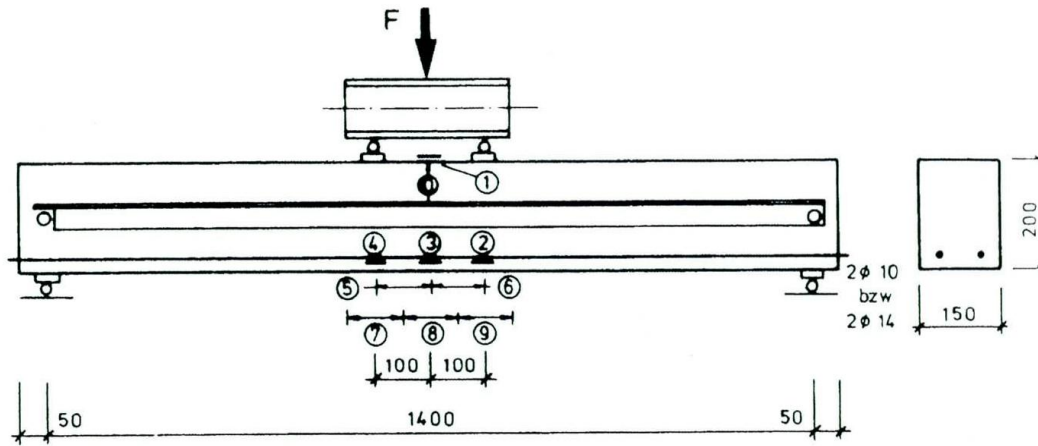


그림-17. test set up

표-2. 시편의 종류

시편의 종류	강섬유 혼입량(kg/m ³)	시편수	시편수조건	
RC	0	2	P=23kN $\mu = 0.5\%$ (2φ10)	P=42kN $\mu = 1.0\%$ (2φ14)
Dramix	30	2		
Dramix	60	2		
Harex	30	2		
Harex	60	2		

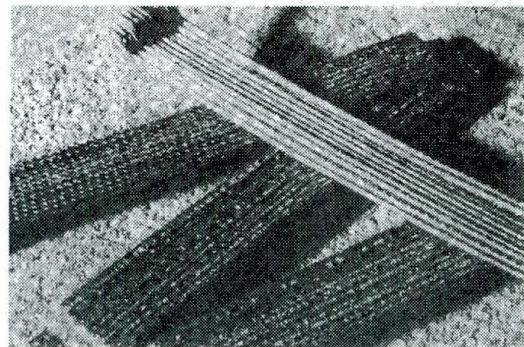
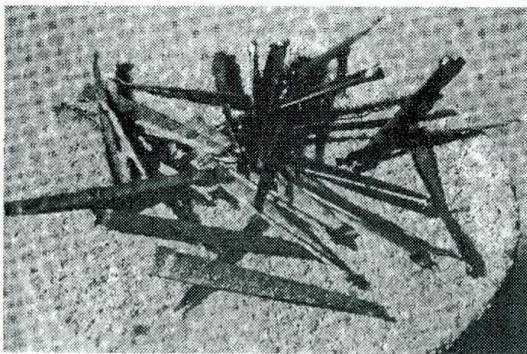


그림-18. 사용된 강섬유 Harex SF01 및 Dramix ZCR 50/0.6

실험결과로는 다음과 같은 것을 얻었다.

- 균열거동(균열폭, 균열간격 및 균열수)
- 힘 시편의 압축부에 콘크리트의 변형률
- 철근의 변형률
- 처짐

2. 실험결과

실험조건은 그림-17의 해석 단면에 하중과 철근비, 강섬유의 종류 및 혼입량에 의해 두가지로 나누어 실험결과를 정리한다. 그리고 표-3의 결과를 그림-19,20에서 하중-균열폭 곡선, 하중-처짐 곡선을 정리하였다.

표-3. B25, P=23kN, $\mu = 0.5\%$, ($2\phi 10$) 실험결과

B25 P=23kN $\mu = 0.5\%$ ($2\phi 10$)	평균 균열폭 (mm)	최대 균열폭 (mm)	콘크리트 압축변형률 (%)	철근 변형률 (%)	처짐 (mm)
RC	0.105	0.133	0.0413	0.0878	0.977
SFRC(D30)	0.072	0.098	0.0370	0.0641	0.876
SFRC(D60)	0.061	0.084	0.0370	0.0574	0.799
SFRC(H30)	0.083	0.109	0.0409	0.0736	0.943
SFRC(H60)	0.062	0.085	0.0375	0.0576	0.788

표-4. B25, P=42kN, $\mu = 1.0\%$, ($2\phi 14$) 시험결과

B25 P=42kN $\mu = 1.0\%$ ($2\phi 14$)	평균 균열폭 (mm)	최대 균열폭 (mm)	콘크리트 압축변형률 (%)	철근 변형률 (%)	처짐 (mm)
RC	0.114	0.156	0.0718	0.1224	1.884
SFRC(D30)	0.099	0.128	0.0753	0.1122	1.901
SFRC(D60)	0.090	0.124	0.0711	0.1119	1.854
SFRC(H30)	0.096	0.147	0.0675	0.1057	1.765
SFRC(H60)	0.094	0.132	0.0677	0.1071	1.657

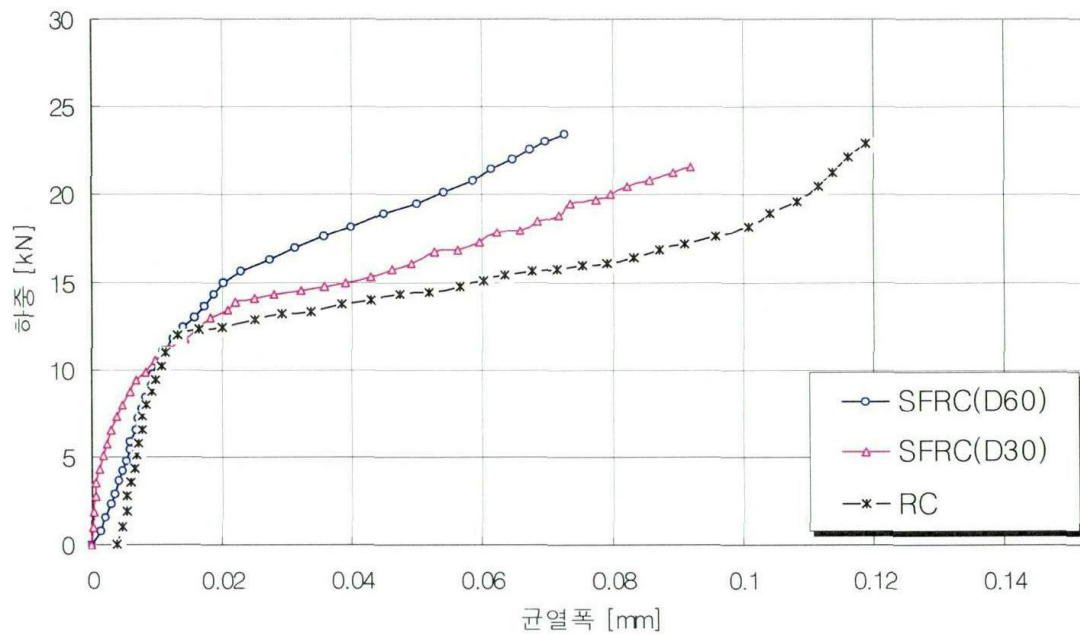


그림-19. 실험치 하중-균열폭 곡선

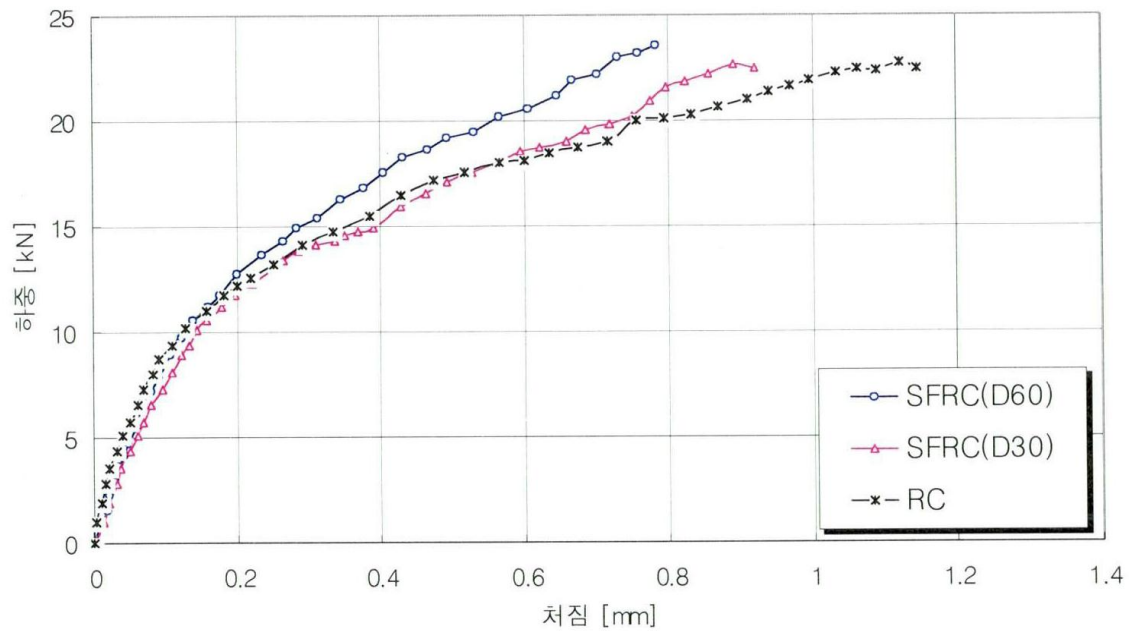


그림-20. 실험치 하중-처짐 곡선

그림-19,20에 철근비에 따른 하중, 균열폭, 처짐의 상관관계를 나타내고 있다. 하중 초기에는 강섬유를 보강한 보나 일반 보나 큰 차이점은 없지만, 균열폭의 경우 하중이 10kN 이상부터 20%정도 균열폭이 감소하였다.

제 5장 수치해석

1.연구에 이용된 프로그램

본 연구에 이용한 프로그램은 Cervenka Consulting 의 ATENA 프로그램을 이용하였다.

ATENA 2D 에서는 자동 메쉬 기능 작성을 포함한 프리프로세서와 그래픽 출력을 실시하는 포스트 프로세서가 있다.

프리프로세서의 특징은 마우스에 의한 기하형상의 작성, 좌표값 입력에 의한 형상의 작성, 자동 메쉬 작성기능에 의해 쉽게 메쉬를 작성할 수 있다. 물성값은 각 항목마다 설명도를 보면서 입력할 수 있다.

본 논문에 사용된 각 재료의 특성에 맞게 모델을 설정한다. 철근 콘크리트와 관련된 재료를 정리하면 아래와 같다.

표-5. 철근콘크리트와 관련된 재료

재료명	입력 데이터	특징
concrete	콘크리트의 인장강도	콘크리트의 비선형 재료특성을
	콘크리트의 압축강도	입력하여 2차원 콘크리트의 실제
	콘크리트의 탄성계수	거동을 파괴역학이론에 의하여
	압축연화 특성	정확하게 해석
	인장연화 특성	균열폭과 균열의 진행 파악
Reinforcement	철근의 탄성계수	철근의 선형.비선형 거동 해석
	철근의 항복강도	

이 프로그램에서 사용가능한 요소(Element)는 2차원 solid요소 (사절점, 삼각형요소), Bar요소(reinforcement, smeared reinforcement), 선형 비선형스프링, 3차원 solid모델이 있다. 각 요소는 두개의 절점에 의해 발생된 라인이나 라인을 연결하여 발생된 영역을 설정하면 자동으로 요소가 생성된다. 따라서 복잡한 모델에서 절점이나 요소생성에 소요되는 시간을 크게 감소시킨다.⁽¹⁴⁾

포스트 프로세서의 특징은 이하 형식에서 해석 결과를 표시할 수 있다.

-분포도

-벡터 Tensor도

-변형도

-균열폭 표시

- 철근의 응력-변형률 다이어그램
- 축력, 전단력, 굽힘 모멘트 다이어그램

2.모델링

철근 2본을 인장측에 배치하고 지점부근 및 재하점에 Steel Plate가 배치되어 있다.

지지조건, 형상이 좌우 대칭이므로 해석 모델은 1/2모델로 한다.

또한 하중조건으로 변위제어를 이용한다.

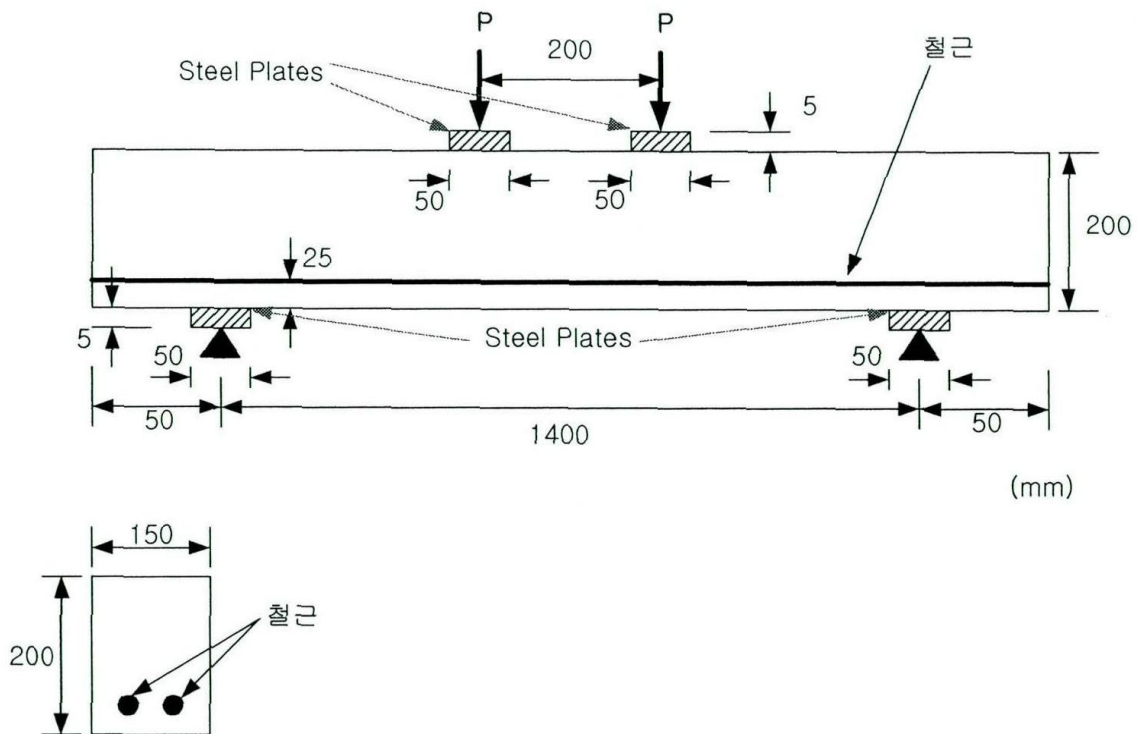


그림-21. 해석 단면

철근 콘크리트 보를 대상으로 철근비, 강섬유 종류 및 혼입량에 따른 문헌⁽¹³⁾ 실험치에 사용된 물성치를 나누어 해석 종류를 정한다.

(1) $2\phi 10, \mu = 0.5\%$

i) 철근 콘크리트 (이하부터는 RC라고 표현한다.)

ii) 강섬유 보강 ; Dramix 30 = 강섬유 Dramix를 30kg/m^3 보강한 RC보
(이하부터는 SFRC(D30)라고 표현한다.)

iii) 강섬유 보강 ; Dramix 60 = 강섬유 Dramix를 60kg/m^3 보강한 RC보
(이하부터는 SFRC(D60)라고 표현한다.)

iv) 강섬유 보강 ; Harex 30 = 강섬유 Harex를 30kg/m^3 보강한 RC보
(이하부터는 SFRC(H30)라고 표현한다.)

v) 강섬유 보강 ; Harex 60 = 강섬유 Harex를 60kg/m^3 보강한 RC보
(이하부터는 SFRC(H60)라고 표현한다.)

(2) $2\phi 14, \mu = 1.0\%$

i) 철근 콘크리트 (RC)

ii) 강섬유 보강 ; Dramix 30 = 강섬유 Dramix를 30kg/m^3 보강한 RC보

iii) 강섬유 보강 ; Dramix 60 = 강섬유 Dramix를 60kg/m^3 보강한 RC보

iv) 강섬유 보강 ; Harex 30 = 강섬유 Harex를 30kg/m^3 보강한 RC보

v) 강섬유 보강 ; Harex 60 = 강섬유 Harex를 60kg/m^3 보강한 RC보

위와 같이 분류된 물성치를 그림-22의 모델로 해석한다.

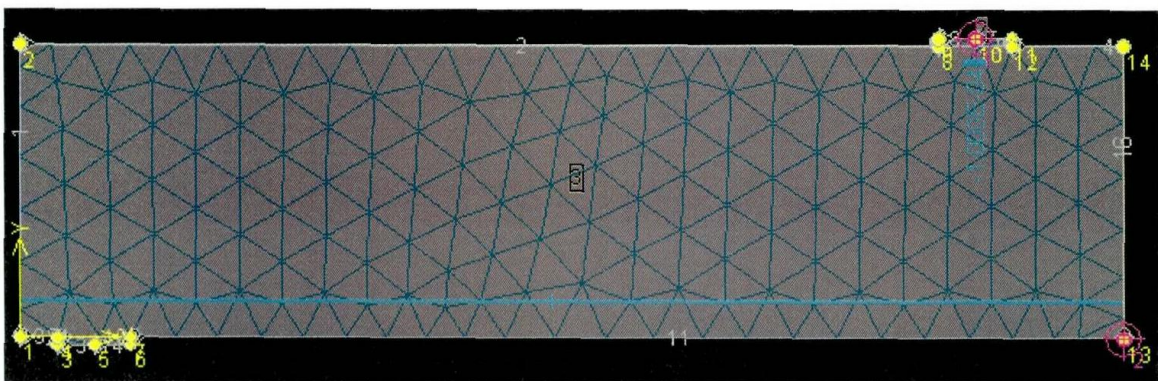


그림-22. 수치해석을 위한 모델링

표-6. 수치해석의 매개변수

	콘크리트	SFRC (D30)	SFRC (D60)	SFRC (H30)	SFRC (H60)	철근	Steel plate
탄성 계수 (MPa)	35000	35000	35000	35000	35000	210000	210000
포아 송비	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	-	0.3
압축 강도 (MPa)	43	42	43	48	49	-	-
인장 강도 (MPa)	4.3	4.62	5.51	4.94	4.91	-	-
균열후 인장 강도	-	1.09	1.86	0.71	1.22	-	-
항복 응력 (MPa)	-	-	-	-	-	500	-
항복 강도	Hyperbola A형						

3. 해석 결과

3.1 균열 형상과 최대 균열 위치

그림-19은 철근비에 따른 균열분포형상과 최대균열위치를 비교한 것이다. 균열의 형상은 메쉬 한 칸에 하나로 나타나며 눈으로 잘 보이지 않는 균열까지 표시되어 있다. 폭이 큰 균열보다는 많은 수의 미세한 균

열이 바람직하다. 균열의 수가 문제가 아니라 균열의 폭이 문제가 되는 것이다. 여기서는 눈으로 확인이 힘든 정도의 미세한 균열도 표시가 되어 있다. 아래 그림들의 균열중 굵은 선으로 표시 되어있는 균열이 육안으로 구분이 가능한 $10^{-2}(\text{mm})$ 정도의 크기이다. 나머지 균열은 확대하여 볼 수 있는 기구를 사용하지 않는 한 식별하기가 어려움으로 무시한다. 프로그램에서는 각 균열마다 수치를 표시할 수 있었으며 RC보와 SFRC보의 최대 균열 위치를 비교해본 결과 최대균열은 전반적으로 보의 중앙에 위치한 것을 확인할 수 있었다.

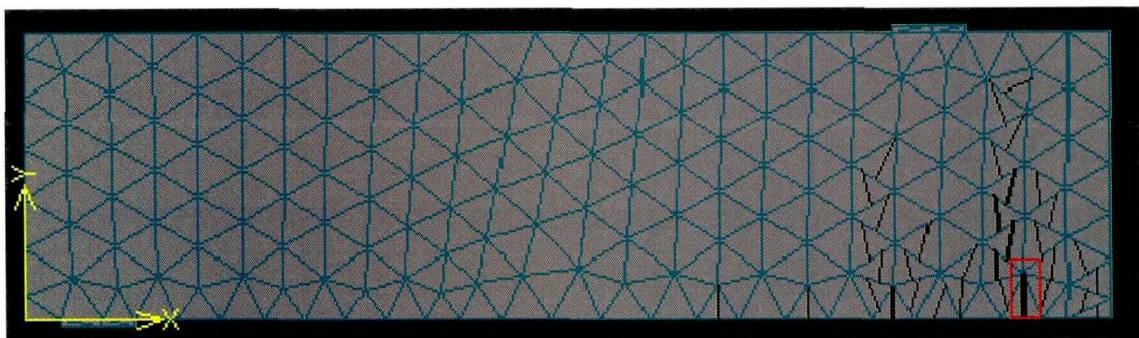


그림-23. 균열 분포 형상

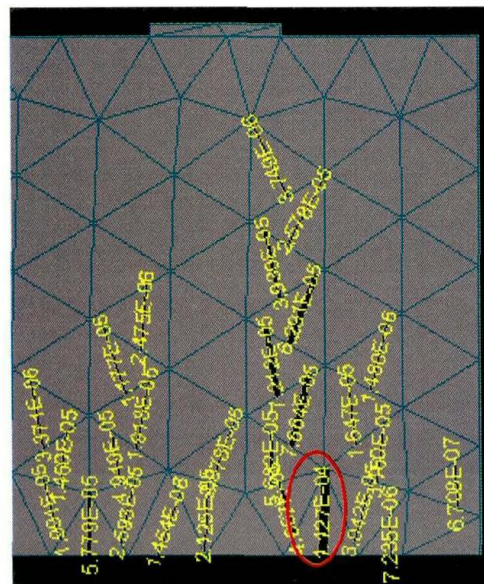


그림-24. 최대 균열 위치 (m)

3.2변위 및 균열폭

$2\phi 10$, $\mu = 0.5\%$, RC, SFRC(D30), SFRC(D60), SFRC(H30), SFRC(H60)

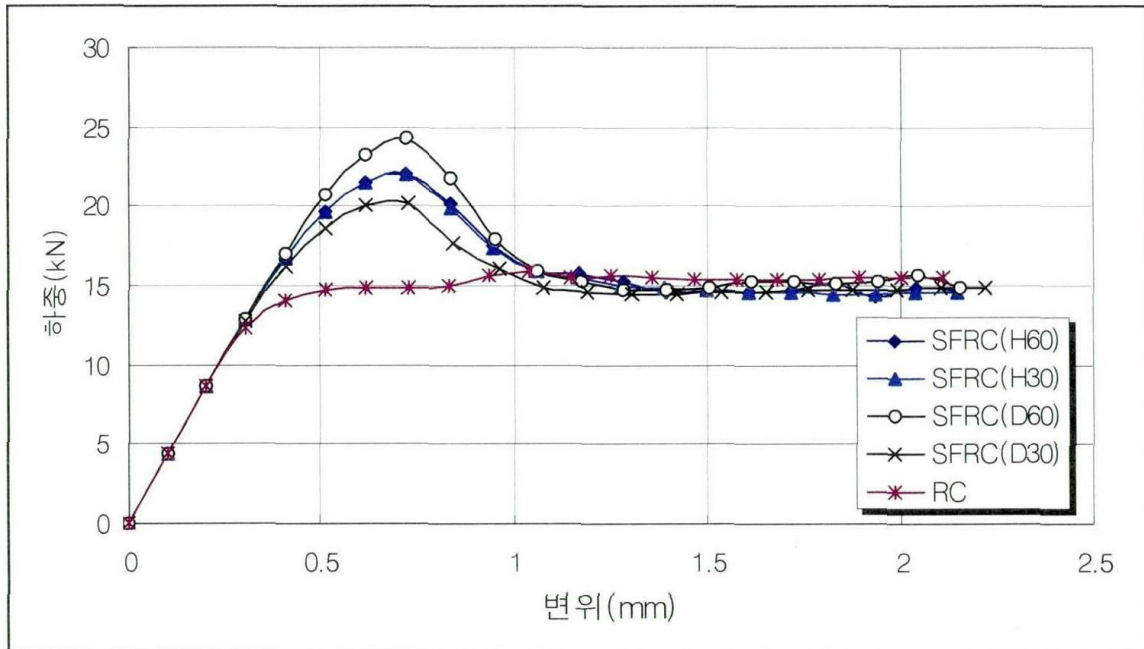


그림-25. 하중-변위 곡선

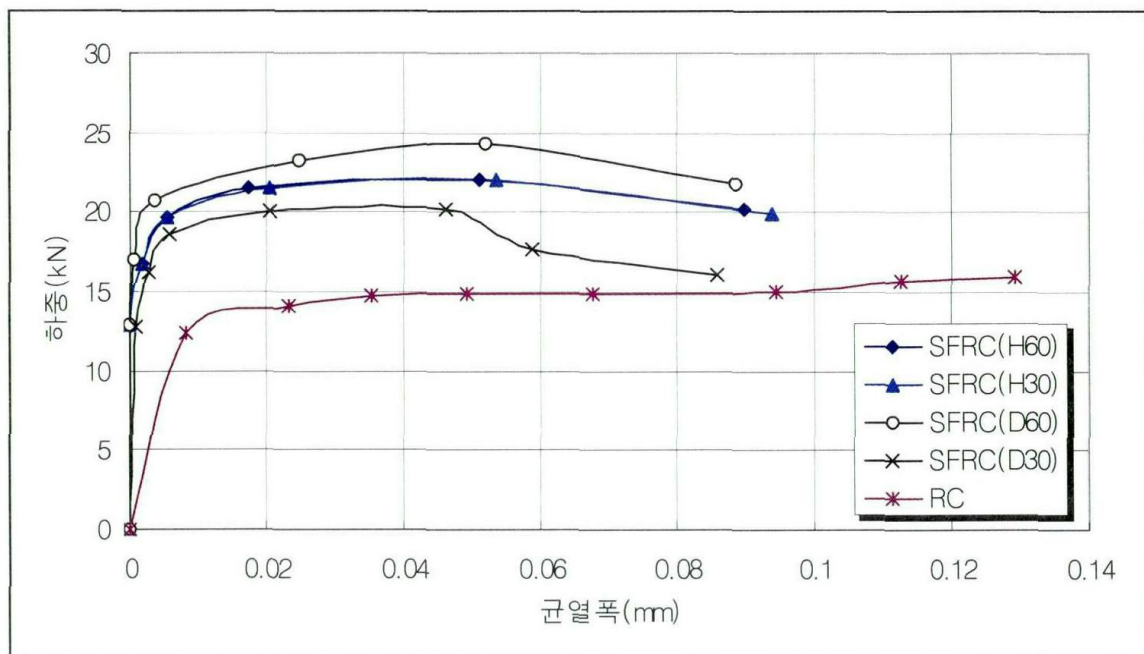


그림-26.하중-균열폭 곡선

2 ϕ 14 , $\mu = 1.0\%$, RC, SFRC(D30), SFRC(D60), SFRC(H30), SFRC(H60)

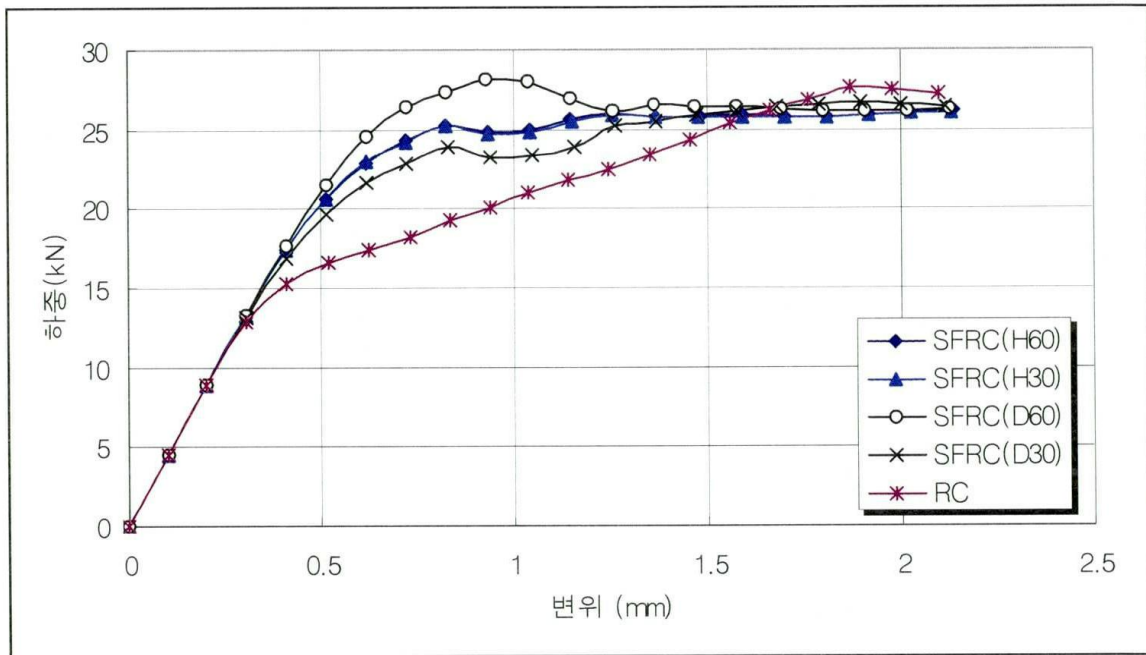


그림-27. 하중-변위 곡선

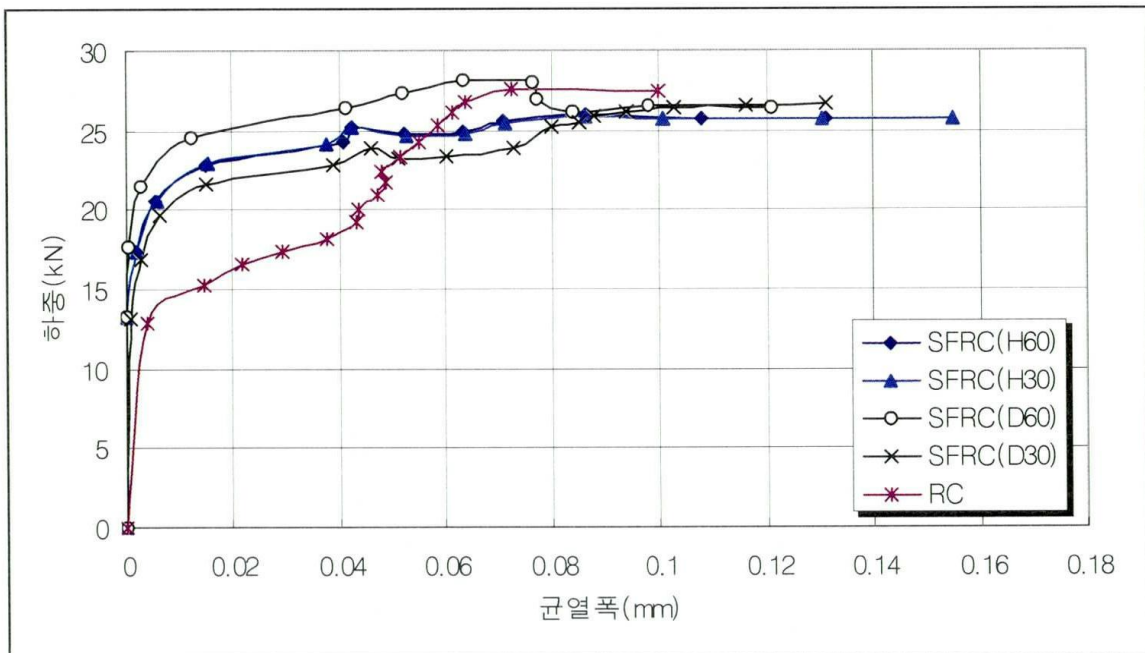


그림-28. 하중-균열폭 곡선

그림-19,20와 그림-25,26에서 보여지듯, 실험치의 하중-처짐 및 하중-균열폭 그래프와 해석치의 하중-변위 및 하중 균열폭 그래프는 그 경향이 다르다. 이것은 실험에서 사용한 하중재하 방식은 하중제어 방식으로 설계하중이 최대하중이 되도록 하중재하를 하였고, 해석에서 사용한 하중재하 방식은 변위제어 방식으로 파괴하중이 최대하중이 되도록 하중재하를 한 결과이다.

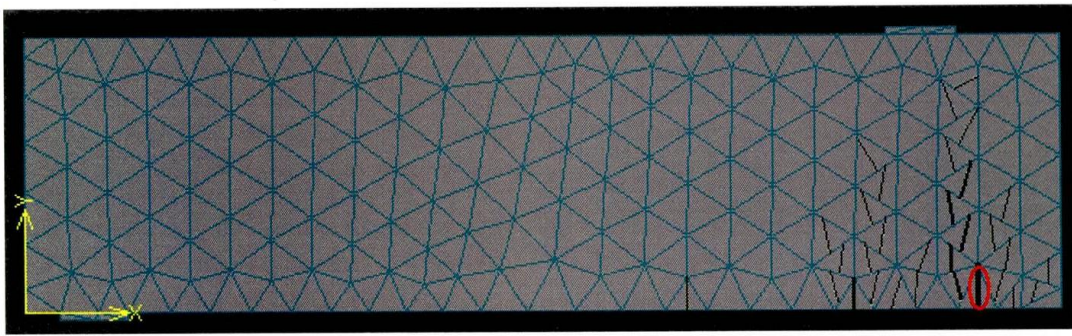
철근비 0.5%와 1.0%에 대한 해석결과, 강섬유 Dramix를 보강하였을 때 파괴에 대한 강도증가가 가장 크게 나타났으며 균열폭 또한 강섬유를 포함하지 않은 철근콘크리트 보에 비해 작게 나타났다. 철근비 0.5%와 1.0%의 해석결과를 비교해 볼 때, 철근비가 낮은 강섬유를 보강한 철근콘크리트 보가 균열폭이 작게 나타나 철근비가 0.5%일 때가 1.0%일 때보다 강섬유의 보강이 효과적인 것으로 나타났다.

제6장 비교분석

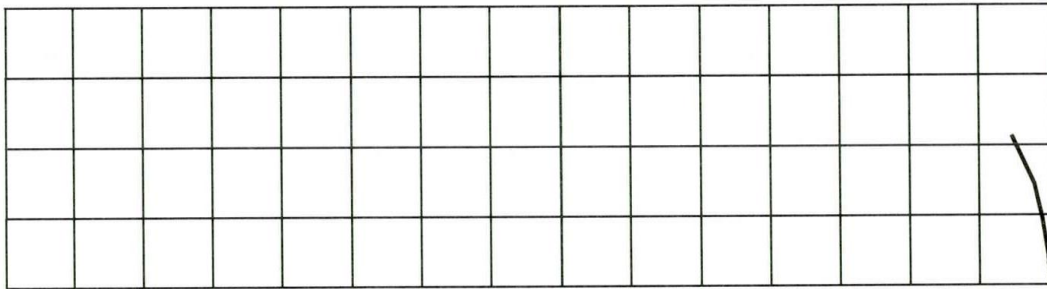
1. 균열 분포 형상에 대한 비교

해석의 균열분포 형상에는 아주 미세한 균열까지 표시되어진다. 최대균열폭과 보이는 균열폭은 굵은 선으로 표시되어있다. 그 외 가는 선은 눈에 보이지 않는 아주 미세한 균열이다. 최대 균열폭의 위치와 균열 분포 형상을 실험한 보와 비교한다. 균열의 크기는 10^{-2} mm 까지 표시한다.

$2\phi 10, \mu = 0.5\%, P=23\text{kN}$



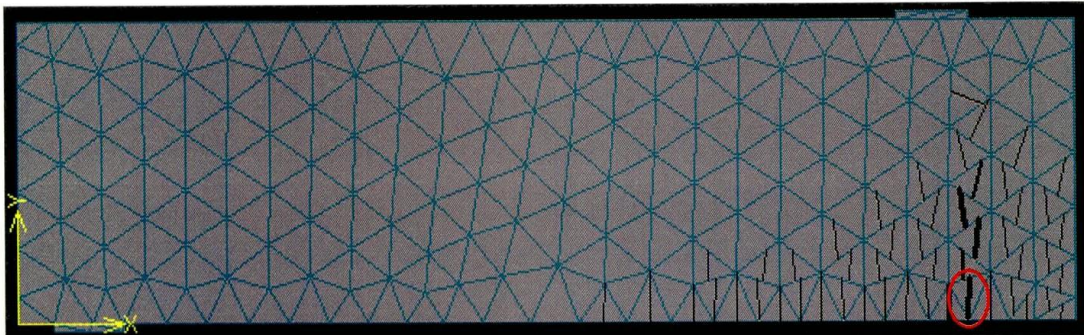
(a) 해석 균열분포형상 (최대 균열폭; 0.129 mm, 균열 1개)



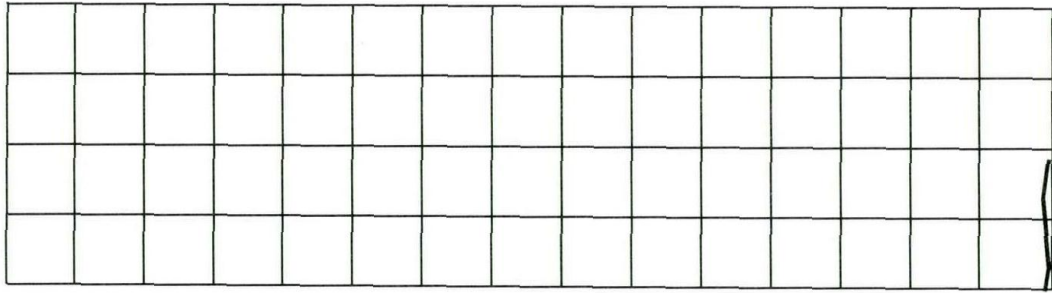
(b) 실험 균열분포형상 (최대 균열폭; 0.133 mm)

그림-29. RC 일때 균열분포형상 비교

$2\phi 10, \mu = 0.5\%, P=23\text{kN}$



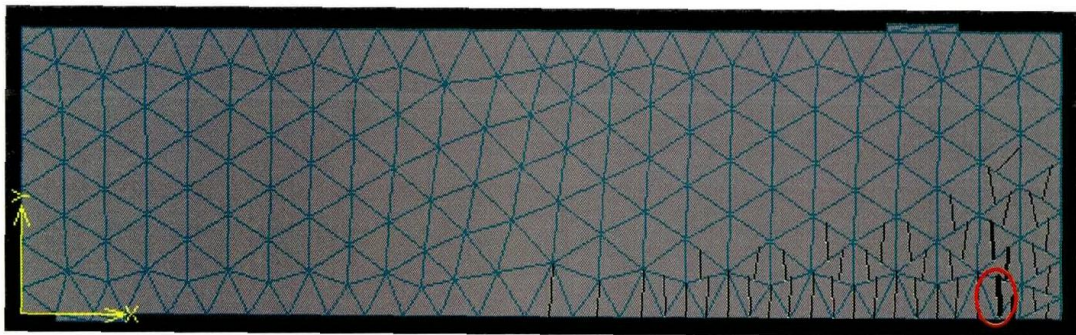
(a) 해석 균열분포형상 (최대 균열폭; 0.085 mm, 균열 1개)



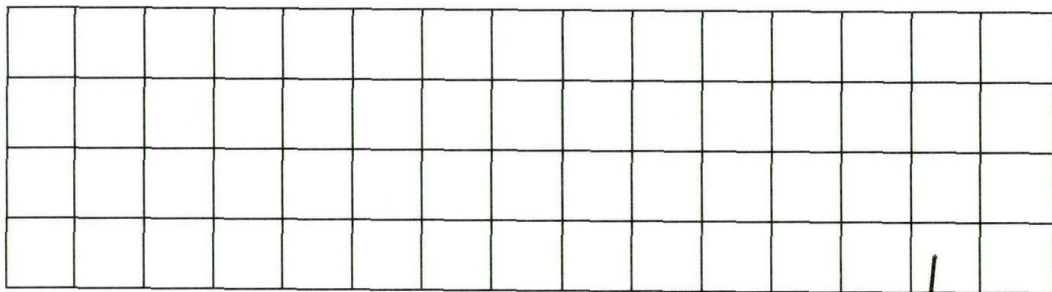
(b)실험 균열분포형상(최대 균열폭; 0.098 mm)

그림-30. SFRC(D30)일 때 균열분포형상 비교

$2\phi 10, \mu = 0.5\%, P=23\text{kN}$



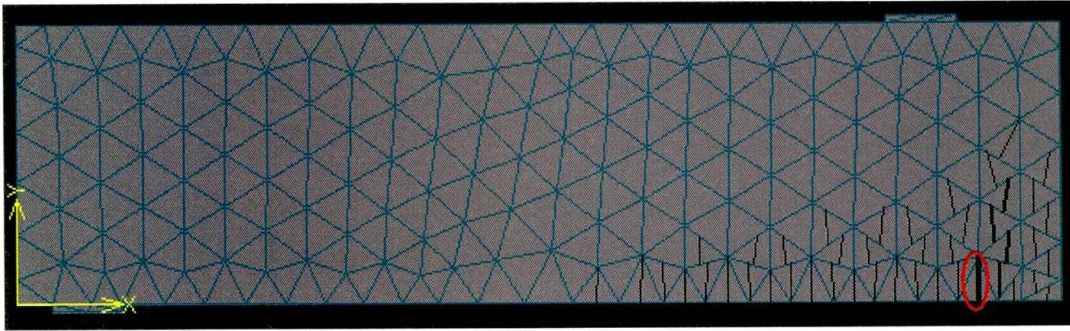
(a)해석 균열분포형상(최대 균열폭; 0.088 mm, 균열 1개)



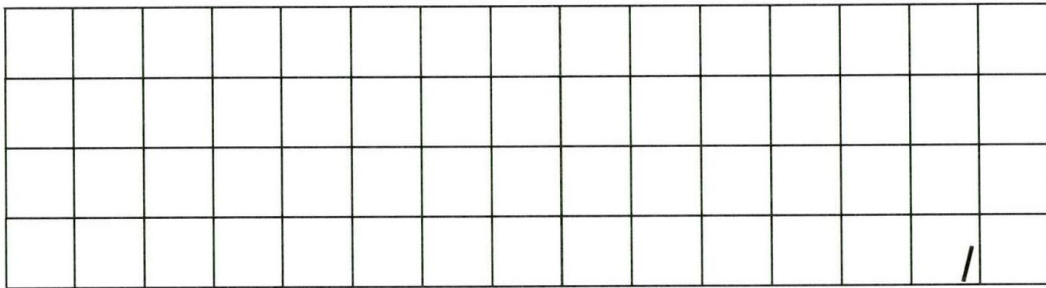
(b)실험 균열분포형상(최대 균열폭; 0.084 mm)

그림-31. SFRC(D60)일 때 균열분포형상 비교

$2\phi 10, \mu = 0.5\%, P=23\text{kN}$



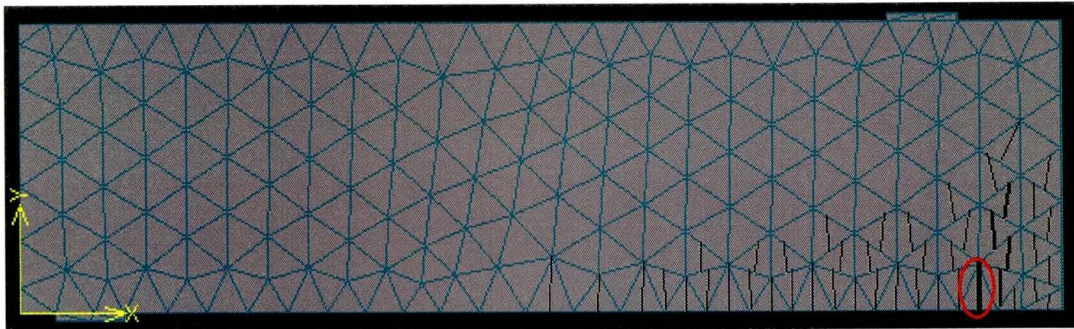
(a) 해석 균열분포형상(최대 균열폭; 0.093 mm, 균열 1개)



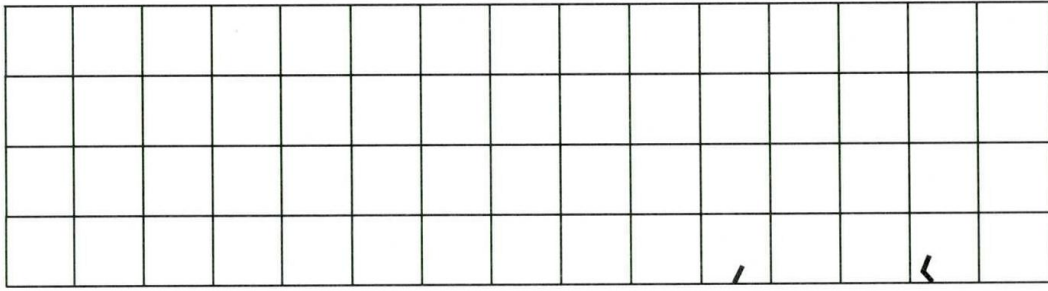
(b) 실험 균열분포형상(최대 균열폭; 0.109 mm)

그림-32. SFRC(H30)일 때 균열분포형상 비교

$2\phi 10, \mu = 0.5\%, P=23\text{kN}$



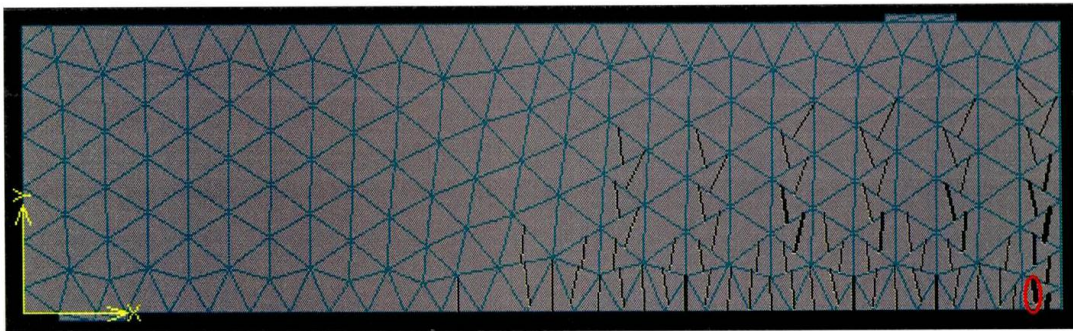
(a) 해석 균열분포형상(최대 균열폭; 0.089 mm, 균열 2개)



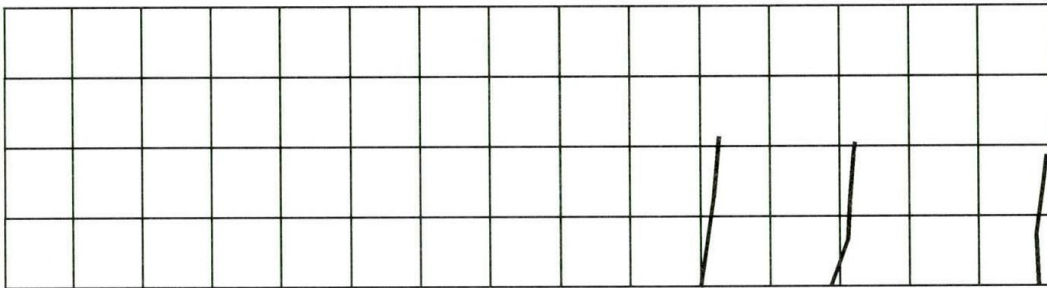
(b)실험 균열분포형상(최대 균열폭; 0.085 mm)

그림-33. SFRC(H60)일 때 균열분포형상 비교

$2\phi 14$, $\mu = 1.0\%$, $P=42\text{kN}$



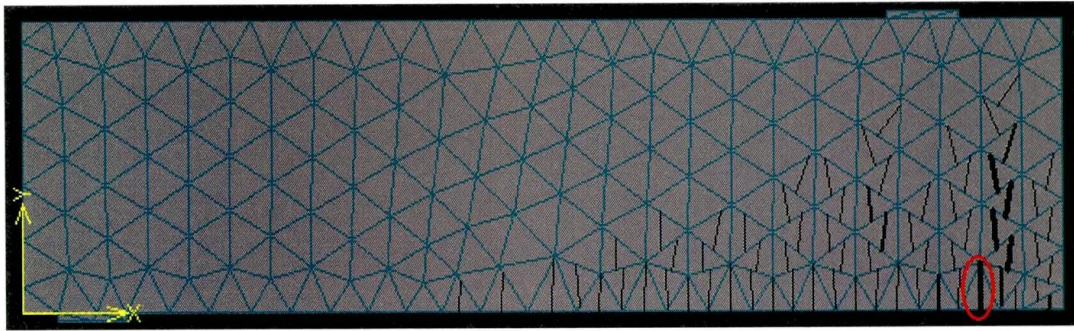
(a)해석 균열분포형상(최대 균열폭; 0.162 mm, 균열 3개)



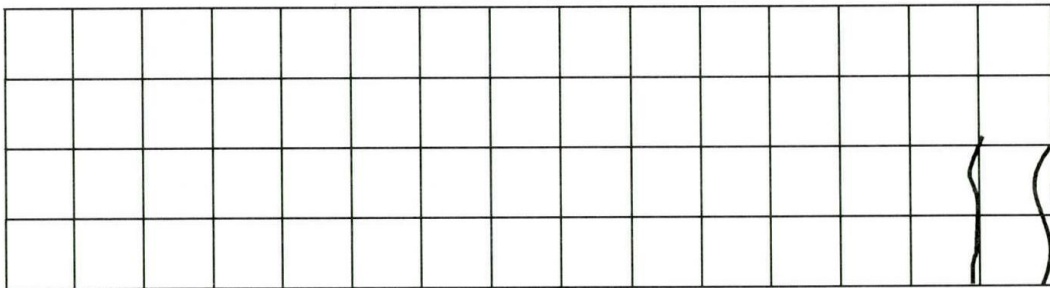
(b)실험 균열분포형상(최대 균열폭; 0.156mm)

그림-34. RC 일때 균열분포형상 비교

$2\phi 14$, $\mu = 1.0\%$, $P=42\text{kN}$



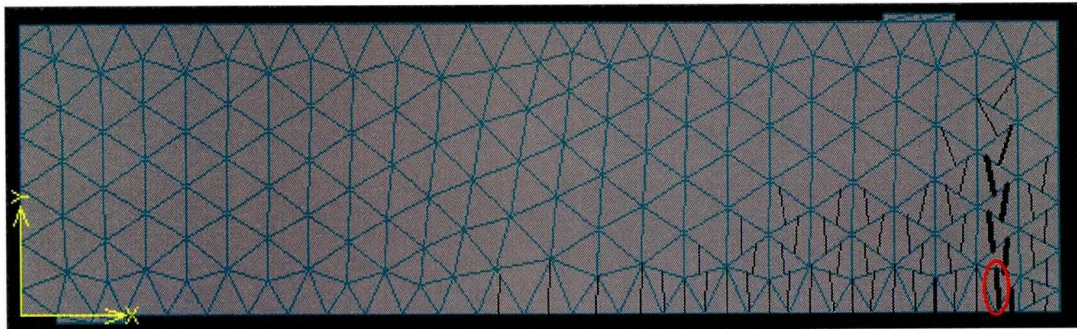
(a) 해석 균열분포형상(최대 균열폭; 0.131 mm, 균열2개)



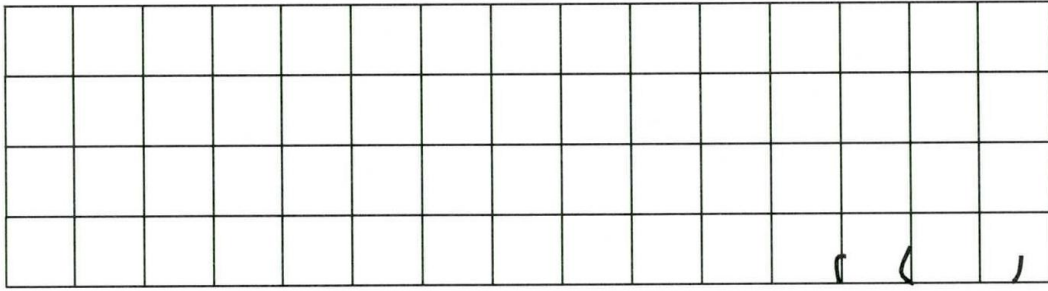
(b) 실험 균열분포형상(최대 균열폭; 0.128 mm)

그림-35. SFRC(D30)일 때 균열분포형상 비교

$2\phi 14$, $\mu = 1.0\%$, $P=42\text{KN}$



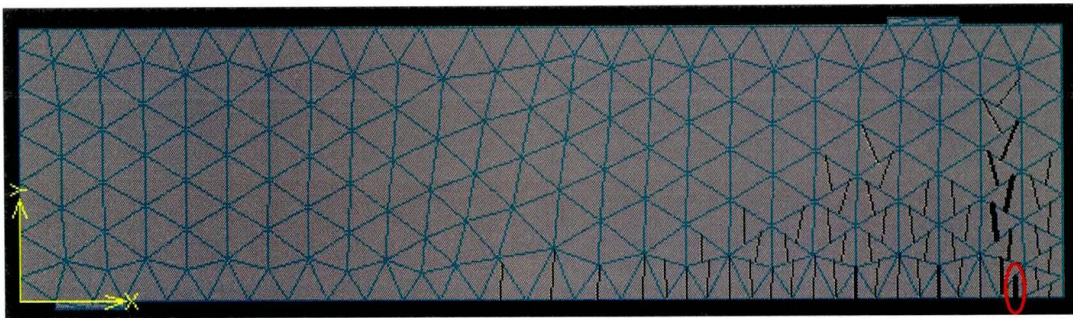
(a) 해석 균열분포형상(최대 균열폭; 0.121 mm, 균열 3개)



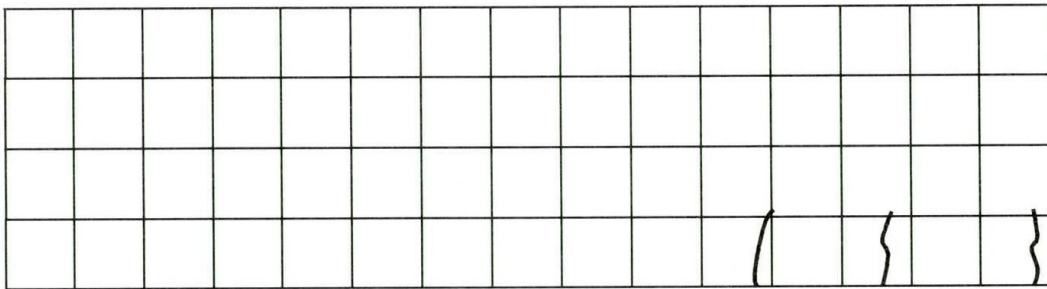
(b)실험 균열분포형상(최대 균열폭; 0.124 mm)

그림-36. SFRC(D60)일 때 균열분포형상 비교

$2\phi 14$, $\mu = 1.0\%$, $P=42\text{kN}$



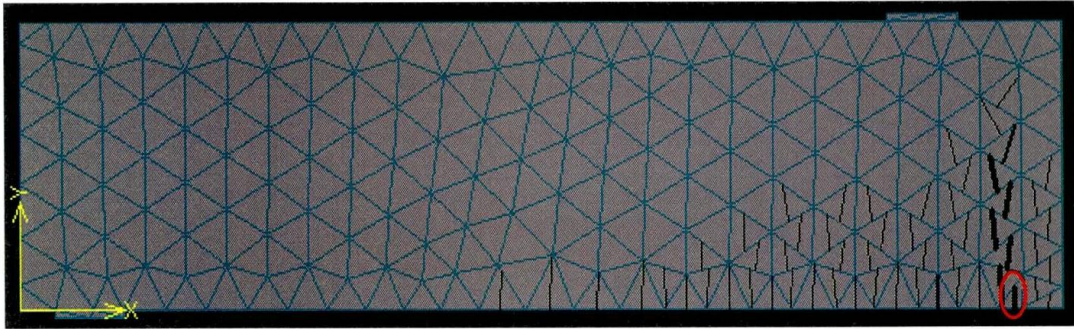
(a)해석 균열분포형상(최대 균열폭; 0.151 mm, 균열 3개)



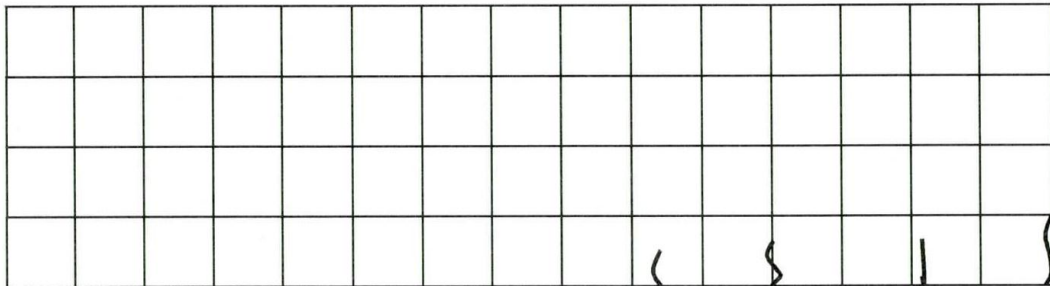
(b)실험 균열분포형상(최대 균열폭; 0.147 mm)

그림-37. SFRC(H30)일 때 균열분포형상 비교

$2\phi 14$, $\mu = 1.0\%$, $P=42\text{kN}$



(a) 해석 균열분포형상(최대 균열폭 ; 0.133 mm, 균열3개)



(b) 실험 균열분포형상(최대 균열폭; 0.132 mm)

그림-38. SFRC(H60)일 때 균열분포형상 비교

2. 균열에 대한 결과비교

평균 균열폭은 구조물의 중앙점에서 100mm 구간의 균열의 평균을 말한다. 두 개의 하중사이간격이 200mm이므로 해석모델에서는 1/2사용하였기 때문에 평균 균열폭의 구간을 100mm로 정하였다. 실험치와 해석치를 비교한 결과, 표 4, 5에서 나타난 것처럼 균열폭에 대한 실험치와 해석치가 허용할 수 있을 만큼 일치하는 것을 알 수가 있다.

표-7. 2 ϕ 10일 때 균열폭에 대한 실험치 및 해석치와의 비교

	실험치		해석치		실험치/해석치 (평균 균열폭)
	평균 균열폭 (mm)	최대 균열폭 (mm)	평균 균열폭 (mm)	최대 균열폭 (mm)	
RC	0.105	0.133	0.112	0.129	0.94
SFRC (D30)	0.072	0.098	0.080	0.085	0.9
SFRC (D60)	0.061	0.084	0.052	0.088	1.17
SFRC (H30)	0.083	0.109	0.081	0.093	1.02
SFRC (H60)	0.062	0.085	0.072	0.089	0.86

표-8. 2 ϕ 14일 때 균열폭에 대한 실험치 및 해석치와의 비교

	실험치		해석치		실험치/해석치 (평균 균열폭)
	평균 균열폭 (mm)	최대 균열폭 (mm)	평균 균열폭 (mm)	최대 균열폭 (mm)	
RC	0.114	0.156	0.100	0.162	1.14
SFRC (D30)	0.099	0.128	0.093	0.131	1.06
SFRC (D60)	0.090	0.124	0.084	0.121	1.07
SFRC (H30)	0.096	0.147	0.107	0.130	0.90
SFRC (H60)	0.094	0.132	0.098	0.133	0.96

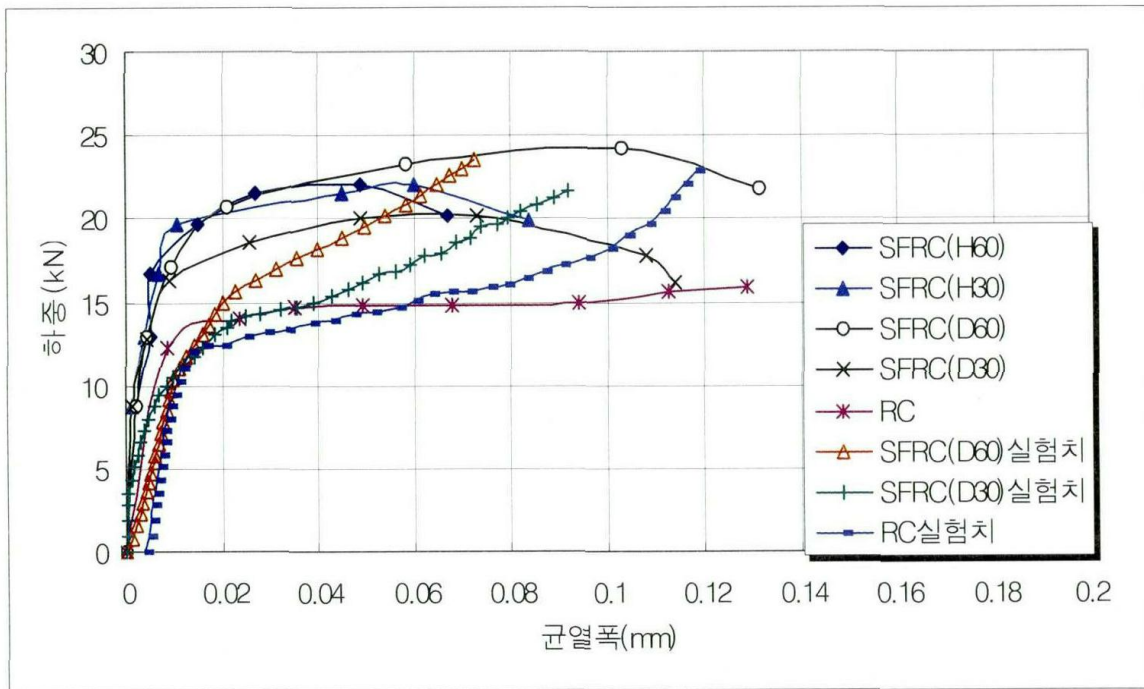


그림-39. 하중-균열폭의 실험치 및 해석치와의 비교

3.처짐에 대한 결과비교

실험치와 해석치를 비교한 결과 표-9,10에서 나타난 것처럼 처짐에 대한 실험치와 해석치가 허용할 수 있을 만큼 일치하는 것을 알 수가 있다.

표-9. 2 ϕ 10일 때 처짐에 대한 실험치 및 해석치와의 비교

	실험치(mm)	해석치(mm)
RC	0.977	1.042
SFRC(D30)	0.876	0.844
SFRC(D60)	0.799	0.834
SFRC(H30)	0.943	0.948
SFRC(H60)	0.788	0.836

표-10. 2 ϕ 14일 때 처짐에 대한 실험치 및 해석치와의 비교

	실험치(mm)	해석치(mm)
RC	1.884	1.870
SFRC(D30)	1.901	1.896
SFRC(D60)	1.854	1.799
SFRC(H30)	1.765	1.700
SFRC(H60)	1.567	1.596

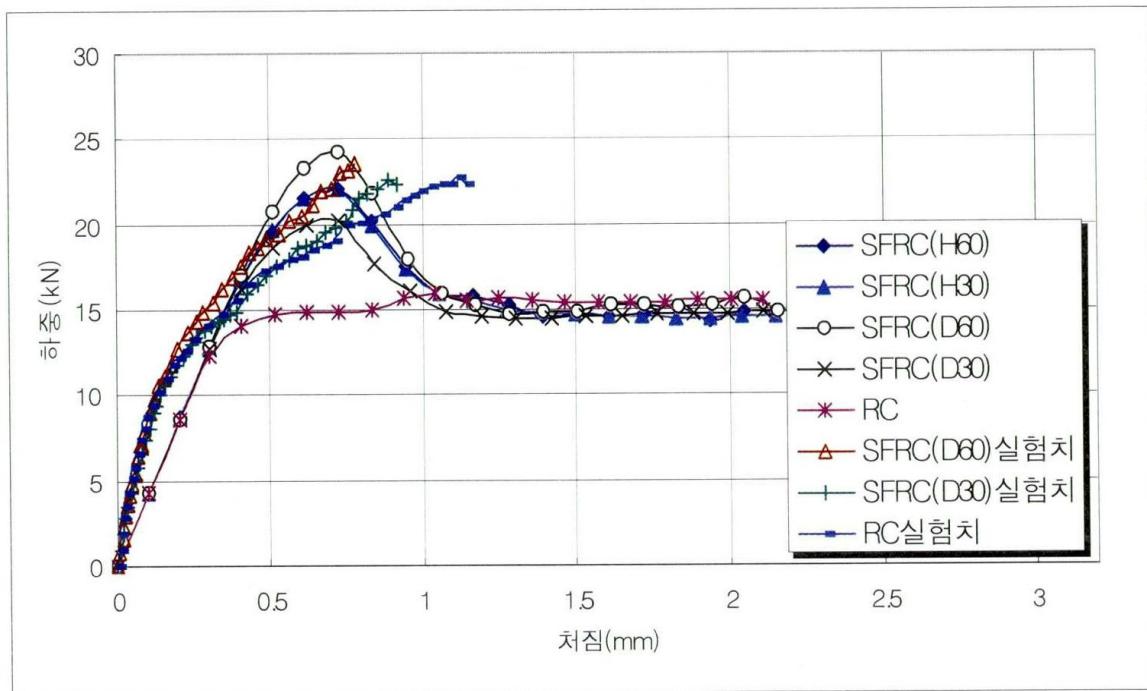


그림-40. 하중-처짐의 실험치 및 해석치와의 비교

실험과 해석치의 차이는 하중재하 방식이 하중제어와 변위제어의 차이로 인하여 다르게 보이지만 철근 콘크리트와 강섬유 보강 콘크리트의 보강 효과 성향은 거의 유사하게 나타났다. 어느 한시점을 기준으로 비교하였을 때 거의 일치함을 보였다.

제7장 결론

본 논문에서는 수치해석 프로그램(ATENA 2D)을 사용하여 철근 콘크리트 구조물과 강섬유를 보강한 구조물의 균열발생, 진전 및 파괴에 이르는 균열 거동에 대한 연구를 수행 하였다. 해석적 모델링을 비선형 유한요소법을 통해 콘크리트 파괴역학의 이론을 바탕으로 하여 철근 콘크리트 보의 균열거동을 확인 할 수 있었다. 철근 콘크리트의 철근비와 강섬유의 종류와 혼입량에 따른 균열 분포와 특성을 비교 분석하여 적용을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1)철근 콘크리트에 보강된 강섬유는 균열단면에서 섬유 혼입량의 증가에 따라 철근응력 감소로 균열폭이 감소한다. 강섬유 보강은 균열억제와 강성이 증가되어 강섬유 콘크리트 구조물의 사용성이 향상되었음을 보였다.

2)큰 하중과 파괴하중에서는 강성이 좋고 섬유 끝이 후크처리가 된 강섬유 Dramix가 더 효과적이고 하중-변위 곡선과 하중-균열폭 곡선을 통해 강섬유의 보강효과는 철근비가 0.5%일 때 더욱 효과적임을 볼 수 있었다.

3)설계하중에 대한 균열폭 및 처짐의 실험 결과와 수치해석 결과가 거의 유사하게 일치하였다.

4)강섬유 철근 콘크리트 보의 균열거동을 최초로 수치해석을 통해 평가할 수 있었으므로 실무에서 철근 콘크리트 및 강섬유 콘크리트 구조물의 사용성 평가에서 균열예측이 가능하다.

본 논문에서는 철근과 콘크리트 사이의 상호작용 및 부착특성에 대해서는 완전부착으로 가정하여 결과를 얻었다. 부착 특성을 고려한 균열거동에 대한 연구가 필요하다. 그리고 동적하중에 대한 3차원적인 해석을 통해 균열진전해석에 대한 향후 연구가 요망된다.

참고문헌

- 1)Bazant. Z.P.. and Oh, B., "Spacing of cracks in reinforced concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109 ,No. 9 , pp. 2066 ~ 2086 , 1993
- 2)Ouyang, C., and Shah, S.P., "Fracture energy approach for predicting cracking of reinforced concrete tensile members" ACI Structural Journal, Vol, 91 , No. 1, pp. 69 ~ 78 , 1994
- 3)Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.E., " Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Element", Cement Concr. Res., 6, pp. 773 ~ 782 , 1976
- 4)Bazant, Z.P., and Cedolin, L., "Approximate linear analysis of concrete fracture by R- curves" Journal of Structural Engineering, Vol. 110 , No. 6 , pp. 1136 ~ 1355 , 1984
- 5)CEB-FIP Model Code 1990, First Draft Committee Euro-International du Beton. Bulletin d'information No. 195, 196, Mars
- 6)Van Mier J.G.M. "Multi-axial strain softening of concrete, Part I ;fracture", Materials and structures, RILEM, 1986
- 7)Hordijk, D.A. "Local Approach to Fatigue of concrete, Doctor dissertation, Delft University of Technology", The Netherlands, ISBN90/9004519-8, 1991
- 8)Cervenka, V. "Constitutive Model for Cracked Reinforced Concrete", Journal ACI Proc. Vol. 82, Nov.~Dec., 1985. No.6. pp877-882
- 9)Kolmar, W. "Beschreibung der kraft uebertragung über Risse in nichtlinearen Finite Element Berechnungen von Stahl-

betontragwerken", Dissertation, T.H. Darmstadt. 1986, pp.94

10) Darwin, D. Pecknold, D.A.W. "Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete", Civil Engineering Studies, University of Illinois, July, 1974

11) Crisfield, M.A., Wills, J. "The Analysis of Reinforced Concrete Panels Using Different Concrete Models", Jour. of Engng. Mech., ASCE, Vol.115, No. 3, March, 1989, pp. 578~597

12) Vecchio, F.J., Collins, M.P. "Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear," ACI Journal, Proc. Vol/ 83, No.2, Mar.~Apr., 1986, pp. 219~231.

13) Kang, B.S. "Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärkter Stahlbeton unter Schwellbeanspruchung.", Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1998

14) Cervenka, ATENA Program Documentation, Revision 05/2001

15) 강성후, 박선준 "콘크리트 파괴역학", 구미서관

16) 최창근, "유한요소법", 테크노 프레스

17) 강보순, "강섬유 보강 철근콘크리트 구조물에 있어서 균열폭 계산", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제 13권 1호, 2001

18) 권오주, "철근 콘크리트 보의 균열형상에 대한 고찰", 경희대학교 석사학위 논문, 2002

Abstract

A Study on Crack Behavior of Reinforced Concrete Structures by Numerical Analysis

Jung-Young, Lee

Dept. of Civil Engineering
School of Construction & Environment System Engineering
Graduate School, Gyeongju University
Gyeongju City, Gyeongbuk, Korea

In this paper, Structural analysis program is applied to evaluate the crack width and crack shape of reinforced concrete beams and steel fiber reinforced concrete.

Based on the parametric study, the ratio of steel, kind of steel fiber and mixing volume were compared with the test results of references. The ATENA of cervenka consulting is used as the nonlinear finite element method to investigate the character of crack distribution and the application.

The result of this study can be summarized as follows:

1) The ratio of steel is 0.5% and 1.0% ,the result which gets from the result of an each interpreting to compare the price with

experiment. However experiment coincided almost with interpreting the crack width and decapitation.

2)The kind of the steel fiber is Dramix and Harex, A maximum crack came out an interpreting result Dramix so that it was when it mixed the 60kg/m^3 .

3)I could see be more efficient in low a steel fiber reinforced concrete through load-displacement and load-crack width.