

## 고강도 철근 기술기준개발



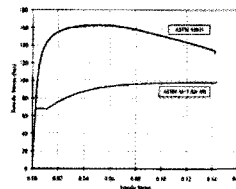
이재훈 교수  
영남대 건설시스템공학과



박홍근 교수  
서울대 건축학과

### 철근 현황 - 항복강도

- 유럽
  - 460 MPa 철근(일반적), 500 MPa 과 600 MPa 철근 사용
- 미국
  - ASTM A615 : 60 ksi, 75 ksi (520 MPa), 80 ksi
  - ASTM A706 : 60 ksi (420 MPa), 80 ksi (550 MPa)
  - ASTM A1035 : 80 [100] ksi (550 [690] MPa), (MMFX 철근) 90 [120] ksi (620 [830] MPa)
  - MMFX 철근 적용 연구(NCHRP 679) 수행, chemical composition 방식의 고가 생산으로 적용 연구 많지 않음.
- 한국
  - 400 MPa 철근(일반적), 500 MPa 사용, 600 MPa 철근 사용 예정
  - Temperature control 방식의 자가 생산으로 적용 연구가 활발함.



## 설계기준의 철근 항복강도 제한

1. Eurocode 2 : 모든 철근에 대하여 600 MPa (85,000 psi)
2. ACI 318 Building Code
  - 일반, 주철근 : 550 MPa (80,000 psi)
  - 전단철근 : 420 MPa (60,000 psi)
  - 압축부재 횡철근 : 550 MPa(띠철근), 700 MPa(나선철근)  
(80,000 psi) (100,000 psi)
3. ACI 349 Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures
  - 모든 철근에 대하여 420 MPa (60,000 psi)

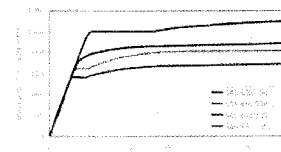
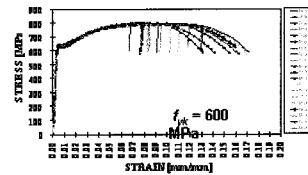
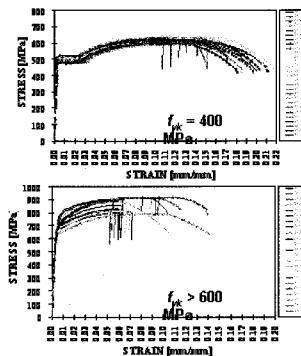
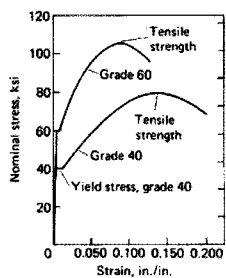
## 고강도 철근 적용의 예상 문제점 - 연신율

- 철근 연신율에 따른 철근콘크리트구조의 파괴모드

- 고강도 철근의 연신율 감소
- 표준(KS, ASTM, ISO 등)제품의 철근을 사용하면 콘크리트가 압축파괴

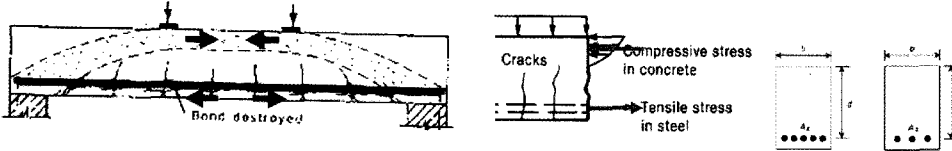


되기 전에 철근이 파단 되는 일은 발생하지 않는다. (연구결과)



## 고강도 철근 적용의 예상 문제점 - 휨연성

- 고강도 철근을 수평부재 주철근으로 사용하는 경우 - 1



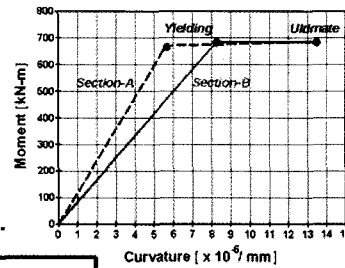
- 휨 연성능력 감소 :

$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$     $b = 300 \text{ mm}$     $d = 550 \text{ mm}$

단면-A :  $f_y = 300 \text{ MPa}$     $A_s = 5,000 \text{ mm}^2$

단면-B :  $f_y = 500 \text{ MPa}$     $A_s = 3,000 \text{ mm}^2$

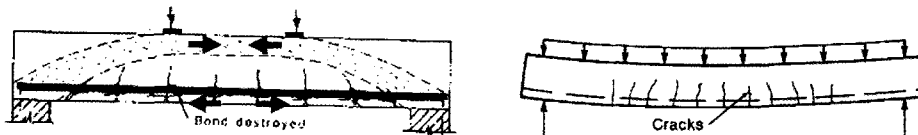
- 휨강도는 동일하지만 연성도는 단면 B가 낮음.



구분	$\phi_y$	$M_y$	$\phi_U$	$M_{Ult}$	$\mu_\phi$	$\mu_E$
A	$5.63 \times 10^{-6}$	670	$13.5 \times 10^{-6}$	686	2.40	2.95
B	$8.26 \times 10^{-6}$	685	$13.5 \times 10^{-6}$	686	1.64	1.77

## 고강도 철근 적용의 예상 문제점 - 사용성

- 고강도 철근을 수평부재 주철근으로 사용하는 경우 - 2



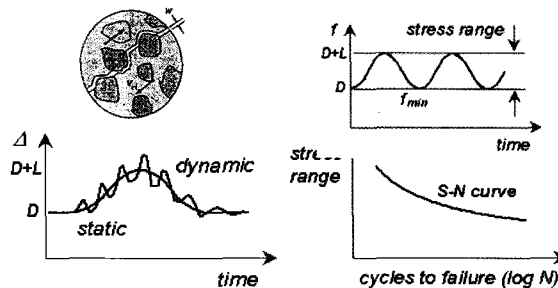
- 사용하중 (설계하중) 상태에서 과도한 반응으로 구조물로서의 성능 저하

- [1] 균열 (Cracks)   [2] 처짐 (deflection)   [3] 진동 (Vibration)
- [4] 피로 (Fatigue)

예) A : 60 ksi 철근 8개

B : 80 ksi 철근 6개

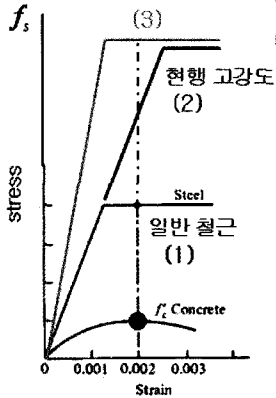
- 휨강도는 동일하지만, 균열폭은 약 1.3배



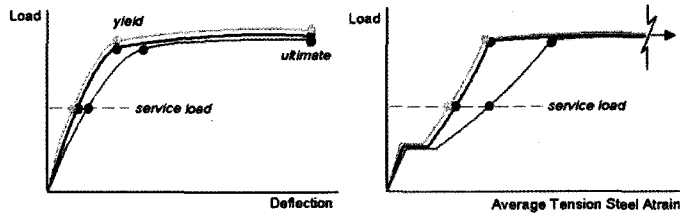
### 고찰 - 휨연성, 균열, 처짐

- 비교 단면 특성 : (1) 항복강도 1, 탄성계수 1, 단면적 1  
 (2) 항복강도 2, 탄성계수 1, 단면적 1/2  
 (3) 항복강도 2, 탄성계수 2, 단면적 1/2

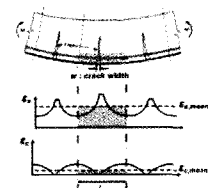
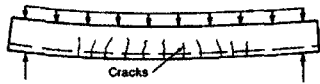
동일 휨강도



- 구조 특성 : 휨연성, 처짐, 균열

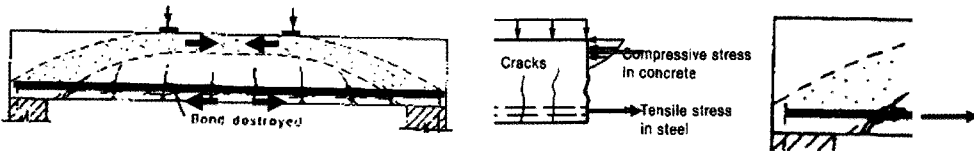


- 휨연성 : (1) ≈ (3) >> (2)
- 처짐 : (1) ≈ (3) < (2)
- 균열 : (1) ≈ (3) <<< (2)
- 균열폭 ∝ 평균철근변형률



### 고강도 철근 적용의 예상 문제점 - 부착

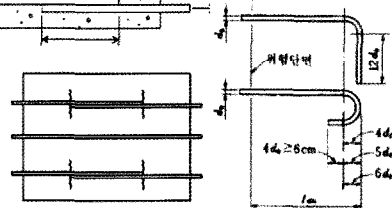
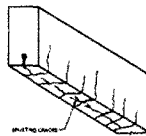
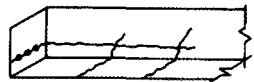
- 고강도 철근을 수평부재 주철근으로 사용하는 경우 - 3



- 부착 및 정착 성능과 철근 상세 규정의 적용성 불확실

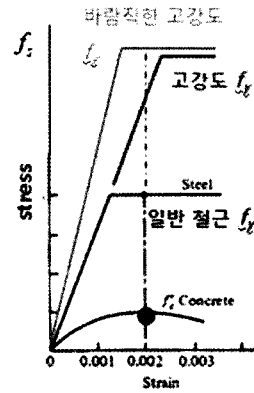
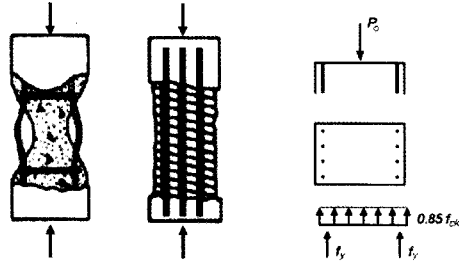
[1] 정착길이 [2] 겹침이음길이 [3] 철근 간격 [4] 피복두께 등  
 실험결과 현 정착길이는 강도에 비례하지 않음

$$l_d = \frac{0.90 d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \left( \frac{\alpha \beta \gamma \lambda}{c + K_{tr}} \right) \frac{1}{d_b}$$



## 고강도 철근 적용의 예상 문제점 - 축압축

- 고강도 철근을 일반구조의 수직부재 주철근으로 사용하는 경우



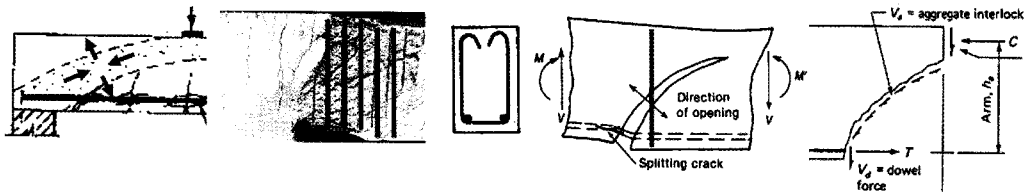
- 순수 축강도 해석 모델의 적용성 불확실

$$P_n = P_c + P_s = 0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + (f_y)A_{st}$$

- 고강도 철근의 항복변형률이 크므로, 압축력을 받는 기둥에서 콘크리트가 1축 강도(최대응력)에 도달하였을 때 고강도 철근이 항복하지 않는다면 축강도 계산식을 적용할 수 없음.
- 그러나 설계시 변형을 적합조건 사용 + 최소편심사용

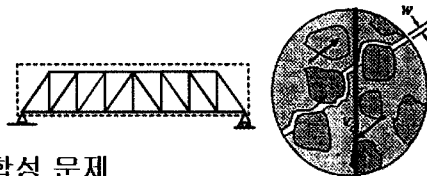
## 고강도 철근 적용의 예상 문제점 - 전단

- 고강도 철근을 수평부재 횡철근(전단철근)으로 사용하는 경우



- 전단강도 해석 모델의 적용성 불확실

$$V_n = V_c + V_s = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d + \frac{A_s f_y d}{s}$$



- 현행 설계기준 전단 강도 모델의 적합성 문제
  - 45° 트러스 전단 모델의 적합성 : 인장 주철근과도 관계 있음.
  - 골재 맞물림 작용을 고려한 전단강도해석의 적합성 :
    - 고강도 철근의 항복변형률이 크므로 골재 맞물림 효과가 감소
- 실험결과 큰 문제점은 없음

## 고강도 철근 적용의 문제점 및 결과

- **현행 설계기준 적용의 문제점**

1. 설계기준의 사용성 및 연성능력 문제

- 과도한 처짐 및 균열 : 기준상에 검토하도록 규정됨. 철근강도의 문제가 아님. 실험결과 큰 문제점은 없음.

- 연성능력 : 실험결과 다소 연성이 감소되지만 안전에는 큰 문제는 없음. 중진지역을 감안하면 내진성능에 큰 문제는 없음.

2. 설계기준의 강도 문제

- 철근이 인장 및 휨인장을 받는 경우: 고강도철근사용은 문제 없음.

- 철근이 압축력을 받는 경우: 변형율적합조건을 사용하고 최소편심을 사용하기 때문에 큰 문제 없음.

## 고강도 철근 적용의 문제점 및 결과

- **현행 설계기준 적용의 문제점**

3. 설계기준 철근상세 규정의 적용 문제

- 철근간격, 피복두께 : 관계없음.

- 정착길이, 겹침이음길이, 후크정착 : 실험결과 강도가 증가할 수록 비례적이 아닌 더 긴 길이의 정착 및 이음길이가 필요함.

## 철근 관련 연구

### ● 한국콘크리트학회 2007년 ~ 현재

1. 고장력 철근의 적용성 : 지식경제부, 산업기술평가원, SD600, SD700
2. 고강도 전단철근 : 주택공사, SD500
3. Ultra-Bar : LH공사, SD600(주철근), SD500(띠철근, 전단철근)
4. 코일철근 기동구조성능 : 포항산업과학연구원, SD600(나선철근)
5. 고부착 철근 : 건설교통기술평가원, SD500, 우봉철근
6. 코일철근 마디형상 : 대한제강, SD300~SD500
7. 원자력발전소 적용 : 지식경제부, 에너지기술평가원, 한수원, SD550

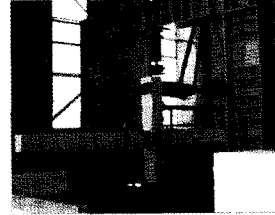
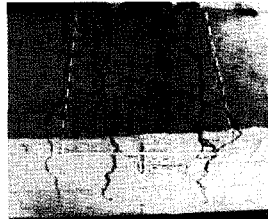
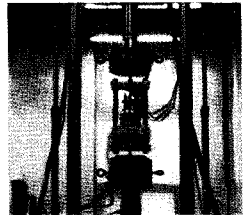
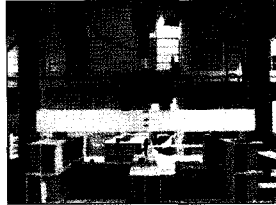
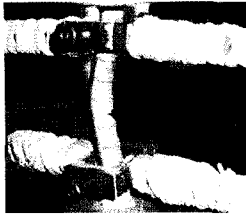
## 기존 연구 : 한국콘크리트학회 수행

### ● 고장력 철근 적용성 연구(지식경제부) 수행 실험-1

1. 철근 (단조 증가) 인장 시험 : 128 개 시험체
2. 철근 압축-인장 반복 시험 : 25 개 시험체
3. 보의 휨 실험(주철근) : 14 개 실험체
4. 보의 전단 실험(전단철근) : 26 개 실험체
5. 겹침이음 보 실험(주철근 겹침이음) : 6 개 실험체
6. 철근 부착 실험(정착성능) : 48 개 실험체
7. 내진 교각 실험(축방향 철근, 횡방향 철근) : 20 개 실험체
8. 보-기둥 접합부의 내진성능 실험(건물) : 12 개 실험체

## 기존 연구 : 한국콘크리트학회 수행

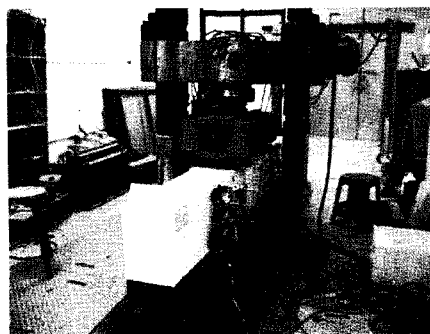
- 고장력 철근 적용성 연구(지식경제부) 수행 실험-1 일부



14

## 기존 연구 : 한국콘크리트학회 수행

- 고강도 전단철근 연구 (주택공사) 수행 실험-2  
- 500MPa 전단철근을 적용한 보의 구조성능



15



## 기존 연구 : 한국콘크리트학회 수행

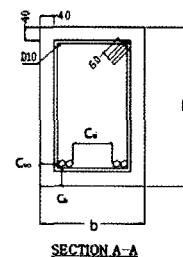
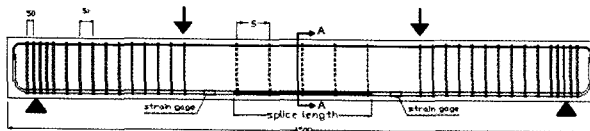
### ● Ultra-Bar 연구(LH공사) 수행 실험-3

1. 휨부재 성능실험 : 보의 최대철근비, 균열, 처짐
2. 전단 성능 실험 : 보의 전단강도
3. 압축부재 성능실험 : 기둥, 순수압축, 편심하중
4. 철근 정착 성능실험 : 표준갈고리 정착성능
5. 철근 이음 성능실험 : 기계적 연결장치(coupler) 성능
6. 내진 성능실험 : 보-기둥 접합부

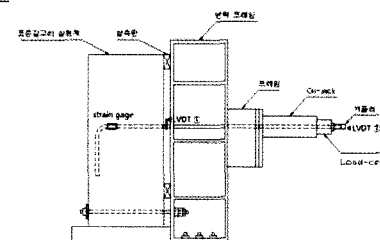
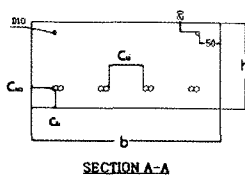
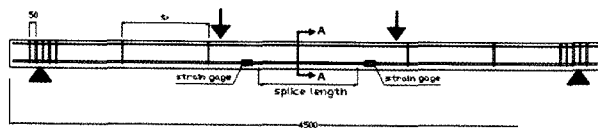
실험 개요

### (1) 검침이음

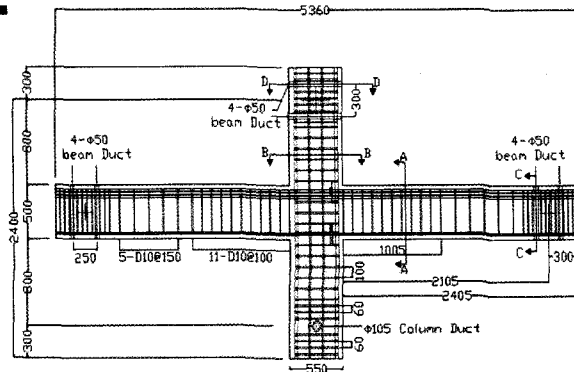
#### 보 실험체



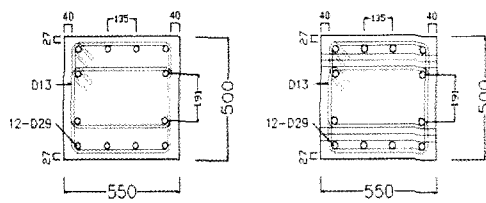
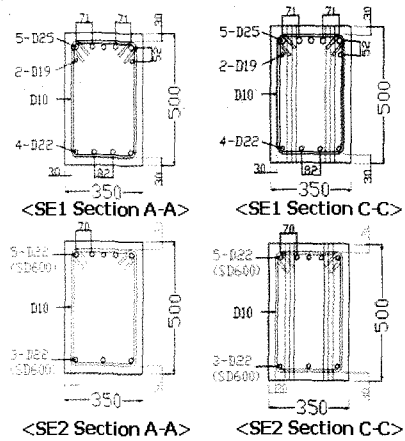
#### 슬래브 실험체



시험 개요

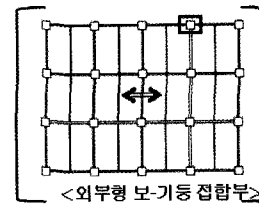


<SE1, SE2>



<SE1, SE2 Section B-B>

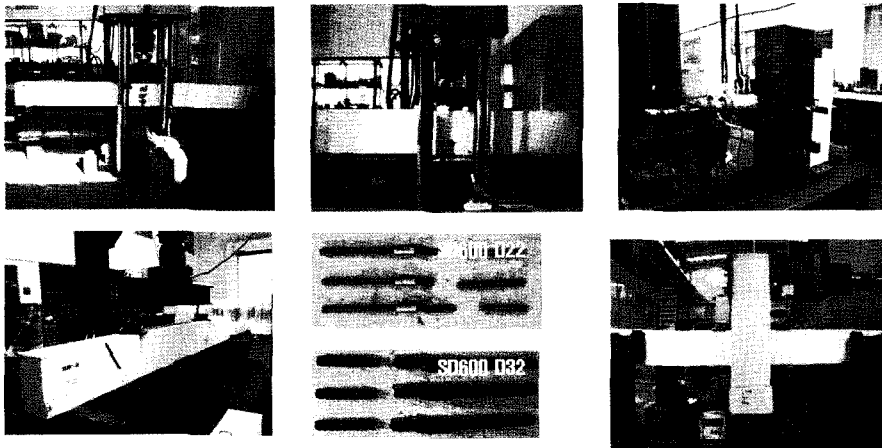
<SE1, SE2 Section D-D>



<외부형 보-기둥 접합부>

기존 연구 : 한국콘크리트학회 수행

- Ultra-Bar 연구(LH공사) 수행 실험-3 일부



## 연구결과 - 구조 성능 및 설계기준 적용

- 일반구조 적용에 600 MPa (85,000 psi) 철근까지는 큰 문제 없음.
- 700 MPa (100,000 psi) 철근은 추가 연구 필요.
- 콘크리트구조설계기준 개정에는 다소 점진적으로 적용.
- 도로교설계기준(2005) : 400 MPa
- 콘크리트구조설계기준(2007) : 550 MPa (80,000 psi)  
단, 전단철근은 400 MPa
- 도로교설계기준(2010) : 500 MPa (단, 전단철근은 400 MPa)
- 콘크리트구조설계기준 (2011) 안 : 600 MPa (85,000 psi)  
단, 전단철근은 500 MPa (70,000 psi)
- 도로교설계기준 한계상태설계법(2011) 안 : 600 MPa (전단철근 포함)

## 콘크리트구조설계기준(2011)의 개정사항

장.절.항	기존	개정
제 2장 재료 2.2.3	철근, 철선 및 용접철망의 설계기준항복강도 $f_y$ 가 400를 초과하여 항복마루가 없는 경우 $f_y$ 값은 변형률 0.0035에 상응하는 응력의 값으로 사용하여야 한다.	수정사항 없음
제 3장 설계 하중 및 하중조합 3.3.4	긴장재를 제외한 철근의 설계기준항복강도 $f_y$ 는 550MPa를 초과하지 않아야 한다.	긴장재를 제외한 철근의 설계기준항복강도 $f_y$ 는 600MPa를 초과하지 않아야 한다.
제 4장 사용성 및 내구성 4.3.2	내부에 보가 없는 슬래브의 최소 두께	내부에 보가 없는 슬래브의 최소 두께

설계기준 항복강도 $f_y$ (MPa)	지량이 없는 경우		지량이 있는 경우	
	외부 슬래브	내부 슬래브	외부 슬래브	내부 슬래브
300	32	35	35	38
350	33	36	36	39
400	34	37	37	40
450	35	38	38	41
500	36	39	39	42
550	37	40	40	43
600	38	41	41	44

경로

콘크리트구조설계기준(2011)의 개정사항

장.절.항	기존	개정
제 4장 사용 성 및 내구 성 4.4.2	표 4.4.1 피로를 고려하지 않아도 되는 철근과 긴장재의 용역범위	표 4.4.1에 단서조항 추가 단, $f_y=400\text{MPa}$ 이상의 경우 SD400에 준함
제5장 철근 상세 5.7.2	(1) 수축, 온도철근으로 배치되는 이형철근은 다음의 철근비 이상으로 하여야 하나, 어떤 경우에도 0.0014 이상이어야 한다. 여기서, 수축, 온도철근비는 콘크리트 전체 단면적에 대한 수축, 온도철근 단면적의 비로 한다. ① 설계기준항복강도가 400MPa 이하인 이형철근을 사용한 슬래브 ---- ----0.0020 ② 0.0035의 항복변형률에서 측정 한 철근의 설계기준항복강도가 400MPa를 초과한 슬래브 ---- 0.0020*400/ $f_y$	수정사항 없음

경로

콘크리트구조설계기준(2011)의 개정사항

장.절.항	기존	개정
제 6장 휨 및 압축 6.6.2	(4) 압축 콘크리트가 가정된 극한변형률인 0.003에 도달할 때 최 외단 인장철근의 순인장변형률 가 0.005의 인장지배 변형률 한계 이상인 단면을 인장지배 단면이라고 한다. 다만 철근의 항복강도가 400MPa를 초과하는 경우에는 인장지배 변형률 한계를 철근 항복변형률의 2.5배로 한다. 순인장변형률 가 압축지배 변형률 한계와 인장지배 변형률 한계 사이의 단면은 변화구간 단면이라고 한다.	수정사항 없음
제 6장 휨 및 압축 6.6.2	(5) 프리스트레스를 가하지 않은 휨부재 또는 휨모멘트와 축력을 동시에 받는 부재로서 계수축력이 0.10 $f_{ck}A_g$ 보다 작은 경우, 공칭축강도 상태에 있어서 순인장변형률 는 휨부재의 최소허용변형률 이상이어야 한다. 휨부재의 최소허용변형률은 철근의 항복강도가 400MPa 이하인 경우 0.004로 하며, 철근의 항복강도가 400MPa를 초과하는 경우 철근 항복변형률의 2배로 한다.	수정사항 없음

결론

### 콘크리트구조설계기준(2011)의 개정사항

장.절.항	기존	개정
제 7장 전단과 비틀림 7.4.1	(3) 전단철근의 설계기준항복강도는 400MPa를 초과할 수 없다. 다만, 용접 이형철망을 사용할 경우 전단철근의 설계기준항복강도는 550MPa를 초과할 수 없다.	(3) 전단철근의 설계기준항복강도는 500MPa를 초과할 수 없다. 다만, 용접 이형철망을 사용할 경우 전단철근의 설계기준항복강도는 600MPa를 초과할 수 없다.
제 7장 전단과 비틀림 7.6.1	(4) 비틀림철근의 설계기준항복강도는 400MPa를 초과해서는 안된다.	(4) 비틀림철근의 설계기준항복강도는 500MPa를 초과해서는 안된다.
제 7장 전단과 비틀림 7.7.2	(5) 전단마찰철근의 설계기준항복강도는 400MPa 이하로 하여야 한다.	(5) 전단마찰철근의 설계기준항복강도는 500MPa 이하로 하여야 한다.

결론

### 콘크리트구조설계기준(2011)의 개정사항

장.절.항	기존	개정
제 8장 정착과 이음 8.2.2	기본 정착길이 $l_d = \frac{0.9d_s f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \frac{\alpha \beta \gamma \lambda}{(c + k_{tr}) d_b}$	(5) 설계기준항복강도가 550MPa를 초과하고 철근직경 D22 이상의 철근에 대해서는 최소피복두께가 60mm이거나 또는 최소피복두께가 40mm이고 전 구간에서 이 기준에서 규정된 최소 철근량 이상의 스티럽 또는 피철근을 배치하여야 한다.
제 8장 정착과 이음 8.2.5	90도 표준갈고리 $l_{90} = \frac{100d_b}{\sqrt{f_{ck}}}$	(6) 설계기준항복강도 550MPa를 초과하는 철근을 사용하는 경우에는 (3)③의 보정계수 0.8을 적용하지 않아야 한다.
부록 II 내진설계를 위한 대체 고려사항 II.6.1 (21장으로 개편)	(4) 보의 종방향 철근이 보-기둥 접합부를 통과하여 연장되는 경우에 보의 종방향 철근에 평행한 기둥변의 길이는 보통콘크리트인 경우 종방향 철근의 가장 큰 지름의 20배보다 작지 않아야 한다. 경량 콘크리트인 경우 철근 지름의 26배보다 작지 않아야 한다.	(4) 보의 종방향 철근이 보-기둥 접합부를 통과하여 연장되는 경우에 보의 종방향 철근에 평행한 기둥변의 길이 h는 보통콘크리트인 경우 다음 식을 만족하여야 한다. $\frac{h}{d_b} \geq 20 \frac{f_y}{400} \geq 20$ 경량콘크리트인 경우는 다음 식을 만족하여야 한다. $\frac{h}{d_b} \geq 26 \frac{f_y}{400} \geq 26$