

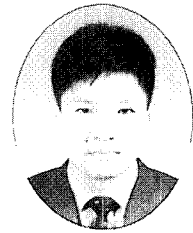
특 집

|| ACI 318 Code 주요 개정내용 분석 ||

하중계수 및 강도감소계수 - Load Factors and Strength Reduction Factors -



이재훈*
Lee, Jae-Hoon



박홍근**
Park, Hong-Gun

1. 안전성 관련 계수의 개정 배경 및 내용

1.1 강도 설계법 및 하중-저항계수 설계법

1950년대 중반에 유럽과 미국에서 이루어진 콘크리트 구조물에 대한 강도설계법의 도입은 구조물 설계개념의 중대한 전환점이 되었으며, 한계상태설계법으로의 발전에 전기가 되었다. 그 이전에 사용하던 허용응력 설계법과 차별되는 가장 중요한 변화는, 설계하중을 초과하는 확률 분포를 고려하여 계수하중을 정의하고 구조요소별 단면강도로 표현한 구조물의 저항능력이 계수하중을 지탱할 수 있도록 설계하는 것이라고 할 수 있다. 따라서 계수하중을 정의하기 위하여 유럽 각 국과 미국은 자국의 상황에 적합한 하중계수와 하중조합을 결정하였다. 그러나 단면의 설계 강도를 결정하는 방법에 있어서 유럽과 미국은 각기 다른 개념을 채택하였다. 유럽은 BS, CEB, DIN 등의 설계기준에서 재료별로 강도감소계수를 달리 적용하는 부분안전계수(partial safety factor)의 개념을 채택하였고, 미국은 ACI 318-56 code의 개정 초안에서 유럽과 같이 부분안전계수의 개념을 제안하였으나¹⁾ 많은 논란 끝에 최종적으로 공칭강도에 부재거동별로 강도감소계수를 달리 적용하는 개념을 채택하였다.²⁾

이에 따라 ACI는 확률 분포와 더불어 다소 경험적인 사항을 고려하여 하중계수 및 하중조합과 강도감소계수를 결정하였고³⁾

2002년 개정까지 큰 변화 없이 사용되었다.

한편 강도설계법 개념은 강구조(철골구조)설계에도 채택되어 1986년 AISC는 하중-저항계수(LRFD)설계기준 초판⁴⁾을 발간하였다. 여기서 AISC의 저항계수(resistance factor)는 ACI의 강도감소계수와 다른 값을 채택하였으나, 이 것은 재료성질과 구조적 거동에 따른 신뢰성의 차이에 따른 것이므로 논란의 여지가 없을 것이다. 그러나 하중계수 및 하중조합에 대하여는 AISC가 ANSI Standard⁵⁾의 내용을 채택함으로써 ACI와는 다른 하중계수 및 하중조합으로 강구조(철골구조)를 설계하게 되었다.

1.2 하중계수 및 하중조합

1986년에 AISC의 하중-저항계수(LRFD) 설계기준이 제정된 이후, 강구조(철골구조)는 AISC-LRFD에 따라 설계하고 콘크리트구조는 ACI에 따라 설계하여 각 형식의 구조설계가 큰 무리 없이 진행되어 왔다. 그러나 동일한 용도의 구조물을 설계할 때 강구조(철골구조)형식을 채택하는 경우와 콘크리트구조형식을 채택하는 경우에 각기 다른 하중계수를 사용하는 것에 대한 논란이 구조공학자들 사이에서 제기되었으며, 또한 AISC와 ACI의 하중계수가 상이하여 콘크리트-강(철골) 합성구조에 대한 하중계수의 적용 방법이 모호하다는 것이 문제점으로 제기되었다.

이러한 문제점으로 인하여 1998년에 미국 토목학회(ASCE)는 ASCE 7-98⁶⁾을 발간하여 콘크리트구조 및 강(철골)구조에 대한 하중계수와 하중조합을 통일하였으며, IBC 2000⁷⁾도 동일

* 정회원, 영남대학교 토목도시환경공학부 교수

** 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

한 하중계수와 하중조합을 채택하였다.

ASCE 7-98⁶⁾의 통일된 하중계수와 하중조합은 기본적으로 ANSI Standard를 기반으로 하고 있으므로, AISC-LRFD⁴⁾의 하중계수 및 하중조합과 유사하지만 풍하중과 지진하중 등 횡하중에 대해서는 AISC-LRFD⁴⁾와 동일하지 않다. ACI도 ASCE 7-98⁶⁾의 통일된 하중계수와 하중조합을 채택하여 ACI 318-02에서 다음과 같이 개정하였다.

◎ ACI 318-02의 하중계수 및 하중조합

$$U = 1.4(D + F) \quad (\text{ACI 9-1})$$

$$U = 1.2(D + F + T) + 1.6(L + H) + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R) \quad (\text{ACI 9-2})$$

$$U = 1.2D + 1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R) + (1.0L \text{ or } 0.8W) \quad (\text{ACI 9-3})$$

$$U = 1.2D + 1.6W + 1.0L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R) \quad (\text{ACI 9-4})$$

$$U = 1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S \quad (\text{ACI 9-5})$$

$$U = 0.9D + 1.6W + 1.6H \quad (\text{ACI 9-6})$$

$$U = 0.9D + 1.0E + 1.6H \quad (\text{ACI 9-7})$$

여기서, D = 고정하중

E = 지진하중

F = 유체의 중량 및 압력에 의한 하중

H = 흙, 지하수 또는 기타 재료의 중량과 압력

L = 활하중

L_r = 지붕 활하중

R = 강우하중 (rain)

S = 설하중 (snow)

T = 온도, 크리프, 건조수축 및 부등침하의 영향

W = 풍하중

이러한 하중조합을 기본으로 할 때의 하중계수 적용방법과 추가사항을 규정하고 있는데, 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 주차장, 공공시설물이 설치되는 장소, 활하중이 4.5 kN/m² 이상인 장소를 제외하고는, 식(9-3) ~ 식(9-5)에서 활하중 L 에 대한 하중계수는 0.5를 사용할 수 있다.
- (2) 식(9-4)와 식(9-6)에서 풍하중 W 에 대한 하중계수는 방향성 계수(directionality factor)의 적용 여부에 따라 1.3 또는 1.6을 적용한다.
- (3) 식(9-5)와 식(9-7)에서 지진하중 E 에 대한 하중계수는

지진하중의 수준에 따라 1.0 또는 1.4를 적용한다.

- (4) 식(9-5)와 식(9-7)에서 흙, 지하수 또는 기타 재료의 중량과 압력에 의한 하중 H 의 작용이 풍하중 W 와 지진하중 E 의 작용방향과 반대방향일 때는 H 에 대한 하중계수는 0을 적용한다. 다른 하중에 의한 구조물의 작용에 대하여 횡도압이 저항하는 경우에는 H 에 횡도압을 포함시키지 않고 저항작용으로 횡도압을 고려한다.
- (5) 충격의 영향(동적 거동의 영향)을 고려할 때에는 충격의 영향을 활하중 L 에 포함시킨다.
- (6) 부등침하, 크리프, 건조수축, 수축저감 콘크리트의 팽창(expansion of shrinkage compensating concrete), 온도변화의 영향을 고려할 때에는 실제로 발생할 값을 예측하여 사용한다. 즉, 예측되는 상한치(upper bound)를 사용하지 않는다.
- (7) 홍수지역의 홍수관련 하중(flood load) 및 하중조합은 ASCE 7에 따른다.
- (8) 포스트텐션 정착구역은 최대 긴장력에 1.2의 하중계수를 적용한다.

한편, 1971년부터 사용하고 있던 기존 ACI 318의 하중계수 및 하중조합은 다음과 같이 식(9-1) ~ 식(9-6)을 기본으로 하고 있으며, 지진하중 E , 유체의 중량 및 압력에 의한 하중 F , 흙, 지하수 또는 기타 재료의 중량과 압력에 의한 하중 H 에 대한 적용방법을 규정하여 별도의 식 번호를 부여하지 않은 하중조합을 추가하여 사실상 총 11개의 하중조합을 사용하고 있다.

◎ ACI 318-99의 하중계수 및 하중조합

$$U = 1.4D + 1.7L \quad (\text{ACI 9-1})$$

$$U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W) \quad (\text{ACI 9-2})$$

$$U = 0.9D + 1.3W \quad (\text{ACI 9-3})$$

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.7H \quad (\text{ACI 9-4})$$

$$U = 0.75(1.4D + 1.4T + 1.7L) \quad (\text{ACI 9-5})$$

$$U = 1.4(D + T) \quad (\text{ACI 9-6})$$

$$U = 0.75[1.4D + 1.7L + 1.7(1.1)E]$$

$$U = 0.9D + 1.3(1.1)E$$

$$U = 0.9D + 1.7H$$

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.4F$$

$$U = 0.9D + 1.4F$$

ACI 319-99와 ACI 319-02의 하중계수 및 하중조합을 비교하기 위하여, 유체의 중량 및 압력에 의한 하중 F , 흙, 지하수 또는 기타 재료의 중량과 압력 H , 지붕 활하중 L_r , 강우하중

표 1. 단순화된 하중조합

하중	ACI 318-99	ACI 318-02
[하중조합-1] 고정하중 + 활하중	$U = 1.4D + 1.7L$	$U = 1.4D$ $U = 1.2D + 1.6L$
[하중조합-2] 고정하중 + 활하중 + 풍하중	$U = 1.05D + 1.28L + 1.28W$ $U = 0.9D + 1.3W$	$U = 1.2D + 1.6L + 0.8W$ $U = 1.2D + 1.0L + 1.6W$ $U = 0.9D + 1.6W$
[하중조합-3] 고정하중 + 활하중 + 지진하중	$U = 1.05D + 1.28L + 1.40W$ $U = 0.9D + 1.43E$	$U = 1.2D + 1.0L + 1.0E$ $U = 0.9D + 1.0E$

R, 설하중 S를 생략하고 단순화하여 정리하면 <표 1>과 같다. <표 1>에서 중력방향 하중의 조합인 [하중조합-1]의 경우, ACI 318-02는 고정하중과 활하중에 대하여 ACI 319-99보다 작은 값의 하중계수를 채택하고 있다. 그러나 고정하중이 지배적인 경우(활하중의 작용이 매우 작은 경우)에는 1.2의 고정하중계수로는 충분하지 않으므로 $U = 1.4D$ 를 추가하여 사용하도록 하였다.

풍하중과의 조합인 [하중조합-2]의 경우, 0.9D에 대하여 ACI 318-99에서는 1.3W를 추가하던 것을 ACI 318-02에서는 1.6W를 추가하므로 외형상으로는 풍하중계수가 증가한 것으로 보이지만, 사실상 계수 풍하중은 거의 동일하다. 이 것은 방향성 계수(directionality factor)의 적용에 관한 통일을 목적으로 한 것이다. ASCE 7-98⁶⁾과 IBC 2000⁷⁾에서는 풍향을 고려하여 0.85의 계수를 적용한 설계풍하중을 사용하도록 하였기 때문에, 0.85의 계수를 적용한 설계풍하중에 1.6을 곱한 계수풍하중과 0.85의 계수를 적용하지 않은 설계풍하중에 1.3을 곱한 계수풍하중은 큰 차이가 없음을 유의하여야 한다. 따라서 0.85의 방향성 계수를 적용하지 않고 설계풍하중을 결정하는 경우에는 1.3의 풍하중계수를 적용하여야 한다.

지진하중과의 조합인 [하중조합-3]의 경우, ACI 318-99에서 1.4 또는 1.43의 지진하중계수를 적용하던 것을 ACI 318-02에서는 1.0의 지진하중계수를 적용하므로 외형상으로는 지진하중계수가 감소한 것으로 보이지만, 사실은 그렇지 않다. 이 것은 설계지진하중 E의 산정방법이 다르기 때문이다. 즉, ACI 318-99에서는 기능수행수준의 지진하중(사용하중)을 설계지진하

중으로 하고 붕괴방지수준의 지진하중(계수하중)을 산정하기 위하여 1.0보다 큰 값의 지진하중계수를 적용하여 왔다. 그러나 BOCA National Building Code, Standard Building Code, Uniform Building Code, IBC 2000 뿐만 아니라, 미국 도로교설계 기준(AASHTO의

Standard Specifications for Highway Bridges와 LRFD Bridge Design Specifications)의 내진설계 규정은 붕괴방지수준의 지진하중(계수하중)을 기준으로 하여 1.0의 지진하중계수를 적용하고 있다. 이에 따라 ACI 318-02에서도 통일을 기하기 위하여 붕괴방지수준의 지진하중(계수하중)을 기준으로 하여 1.0의 지진하중계수를 적용한 것이다. 따라서 기능수행수준의 지진하중(사용하중)을 설계지진하중으로 결정한 경우에는 1.4의 지진하중계수를 적용하여야 한다.

1.3 강도감소계수

1.2에서 소개한 바와 같이 하중계수가 변화하게 됨에 따라 안전성 유지를 목적으로 강도감소계수를 조정할 필요가 있었다. 특히 중력방향의 고정하중과 활하중에 대하여 1.4D와 1.7L을 사용하던 ACI 319-99에 비하여 낮은 하중계수인 1.2D와 1.6L을 사용하므로 기존의 강도감소계수를 그대로 유지하는 경우 안전성이 감소하게 된다. 따라서 Calibration을 통하여 강도감소계수를 하향 조정하게 되었다. 강도감소계수는 단면력에 따라 전반적으로 0.05가 작아졌으며, 특히 전단과 비틀림에 대한 강도감소계수는 0.1이 작아졌다. 그러나, 휨 작용에 대한 강도감소계수는 기존의 값 0.9를 유지한다고 해도 안전성에 큰 무리가 없다는 연구결과⁸⁾를 반영하여 인장지배 단면에 대한 강도감소계수를 기존의 값과 동일한 값으로 규정하였고, 포스트텐션 정착구역에 대한 강도감소계수도 기존의 값 0.85를 유지하였다.

<표 2>와 <표 3>은 ACI 318-99와 ACI 318-02의 강도감소

표 2. ACI 318-99의 강도감소계수

하중작용	ACI 318-99의 ϕ
휨, 인장, 인장+휨	0.90
압축, 압축+휨	
- 나선철근 부재	0.75
- 기타 (띠철근 부재)	0.70
전단과 비틀림	0.85
지압 (포스트텐션 정착구역 제외)	0.70
포스트텐션 정착구역	0.85

표 3. ACI 318-02의 강도감소계수

하중작용 및 대상 단면	ACI 318-02의 ϕ
인장지배 단면	0.90
압축지배 단면	
- 나선철근 부재	0.70
- 기타 (띠철근 부재)	0.65
전단과 비틀림	0.75
지압 (포스트텐션 정착구역과 스트럿-타이 모델 제외)	0.65
포스트텐션 정착구역	0.85
스트럿-타이 모델	0.75

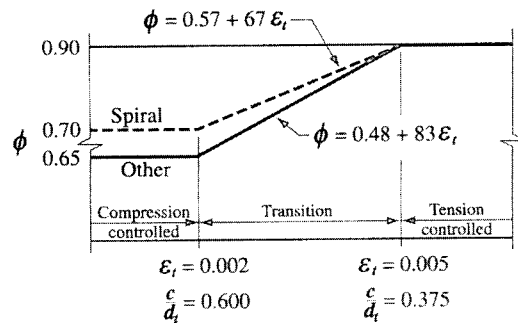
계수를 나타낸 것으로서, ACI 318-02에서는 1.4에 소개하는 강도감소계수의 적용방법에 따라 인장지배 단면과 압축지배 단면으로 구분하여 강도감소계수를 규정하고 스트럿-타이 모델에 대한 강도감소계수를 규정한 것이 특징이다.

1.4 휨부재 및 휨-압축부재의 강도감소계수 적용방법 (통합설계법)

ACI 318-99에서는 휨모멘트와 압축력이 동시에 작용하는 부재는 설계축력강도(ϕP_n)를 기준으로 하여 강도감수계수를 적용한다. 즉, $0.1f_c' A_g$ 또는 ϕP_b (설계균형하중)의 설계축력강도(ϕP_n)를 기준으로 하여, 그 이상의 축력에 대하여는 압축에 대한 강도감수계수를 적용하고 그 이하의 축력에 대하여는 강도감수계수의 변화구간으로서 축력의 크기에 따라 휨에 대한 강도감수계수까지 직선보간한다. 구체적으로 말하면, 철근의 항복강도 f_y 가 420 MPa 이하이고 철근의 배치가 대칭이며 인장철근과 압축철근 사이의 거리가 $0.7h$ 이상인 부재에 대해서는 $0.1f_c' A_g$ 의 축력이 작용하는 점에서부터 축력이 0인 점(휨부재)까지 직선보간하며, 그 이외의 부재에 대해서는 $0.1f_c' A_g$ 와 ϕP_b 중 작은 값을 강도감수계수 변화구간의 기준점으로 한다. 이와 같은 강도감수계수 변화구간의 기준인 $0.1f_c' A_g$ 는 부재의 단면적과 콘크리트 강도만을 변수로 취하고 있으므로, 철근비, 철근의 항복응력, 철근의 배치형태 등과 같은 철근에 관한 변수를 무시한 경험적인 값이라고 할 수 있다. 따라서 기존(ACI 318-99까지)의 적용방법은 단면력 작용에 따라 강도감수계수를 적용함으로써 휨모멘트와 압축력이 동시에 작용하는 부재에 대한 강도감수계수의 적용방법이 다소 비논리적이었으며, 휨부재에 있어서도 연성능력을 실질적으로 고려하여 강도감수계수를 적용하지는 않는다고 할 수 있다.

이에 대한 대안으로 ACI 318-95와 ACI 318-99에서는 Appendix B에 통합설계법(Unified Design Provisions)을 채택하였고, ACI 318-02에서는 ACI 318-99 Appendix B 통합설계법의 강도감수계수를 일부 수정하여 본문 9장에 채택하였다.

ACI 318-02의 강도감수계수 적용은 강도감수계수 변화구간을 $0.1f_c' A_g$ 로 하는 대신에 단면의 최외곽 인장철근의 변형률을 기준으로 한다. 즉, 콘크리트 압축연단의 변형률이 0.003으로 가해진 변형률 한계에 도달할 때 단면의 최외곽 인장철근의 순인장변형률(net tensile strain)이 압축지배 변형률한계 이하인 경우를 압축지배단면(compression controlled section), 인장지배 변형률한계 이상인 경우를 인장지배단면(tension controlled section)이라 하며, <그림 1>과 같이 순인장변형률이 압축지배 변형률 한계와 인장지배 변형률한계 사이에 있는 경우에는 변화구간(transition region)으로서 순인장변형률에 따라 직선보간법



Interpolation on c/d_t : Spiral $\phi = 0.37 + 0.20/(c/d_t)$
 Other $\phi = 0.23 + 0.25/(c/d_t)$

그림 1. ACI 318-02의 강도감수계수 적용⁹⁾

을 적용한다.

여기서, 공칭강도해석에 의하여 구하는 순인장변형률은 프리스트레스에 의한 변형률을 제외한 최외곽 인장철근의 순인장변형률이며, 압축지배변형률 한계는 0.002이고 인장지배변형률 한계는 0.005이다. 이와 같은 압축지배 변형률한계와 인장지배 변형률 한계는 Grade 420 철근($f_y = 420$ MPa)을 기준으로 하여 결정되었으며, 압축지배변형률 한계 0.002는 Grade 420 철근의 항복변형률(0.00206)과 거의 동일한 값이므로 인장지배변형률 한계 0.005는 변형률 연성도 2.5에 해당하게 된다.

이러한 강도감수계수 적용방법을 채택함에 따라, 휨부재와 기둥부재를 구분하고 또 축력에 따라 강도감수계수를 달리 적용하던 기존의 방법 대신에 휨모멘트, 인장력, 압축력이 각각 작용하거나 혹은 이들 힘이 조합하여 작용하는 경우에도 공칭강도에 도달할 때의 철근의 순인장변형률을 기준으로 하여 일관되게 강도감수계수를 적용하도록 하였다. <그림 1>에서는 철근의 항복강도 f_y 가 420 MPa인 경우, 순인장변형률 0.002와 0.005는 최외곽 인장철근의 유효깊이 d_t 에 대한 중립축의 비율(c/d_t)이 각각 0.6과 0.375임을 나타낸다.

ACI 318-02에서는 이러한 통합설계법과 더불어, 축력을 기준으로 하여 강도감수계수를 적용하는 기존의 방법도 적용할 수 있도록 하였으나 실무 설계자들을 위한 잠정적인 조치이다.

1.5 관련 규정 개정 사항

1.5.1 휨부재의 최대철근량 및 최소철근량

휨부재 및 휨모멘트와 압축력이 동시에 작용하는 부재에 대하여 최외곽 인장철근의 순인장변형률(net tensile strain)을 기준으로 강도감수계수를 적용함에 따라, 휨부재의 최대철근비에 대한 규정도 다음과 같이 개정하였다.

© ACI 318-99 : 휨부재의 최대철근비

$$\rho_{max} = 0.75 \rho_b$$

◎ ACI 318-02 : 휨부재의 최소 순인장변형률

$$(\epsilon_t)_{\min} = 0.004$$

즉, $0.1f_c' A_g$ 이하의 축력이 작용하는 휨부재에 대하여 기존에는 균형철근비의 75%를 최대철근비로 규정하였으나, ACI 318-02에서는 철근비의 향으로 규정하는 대신에 파괴 시 순인장 변형률이 0.004 이상이 되도록 규정(10.3.5)하였다. 따라서 파괴 시 최외곽 인장철근의 순인장변형률 0.004에 해당하는 철근비를 최대철근비라고 할 수 있다.

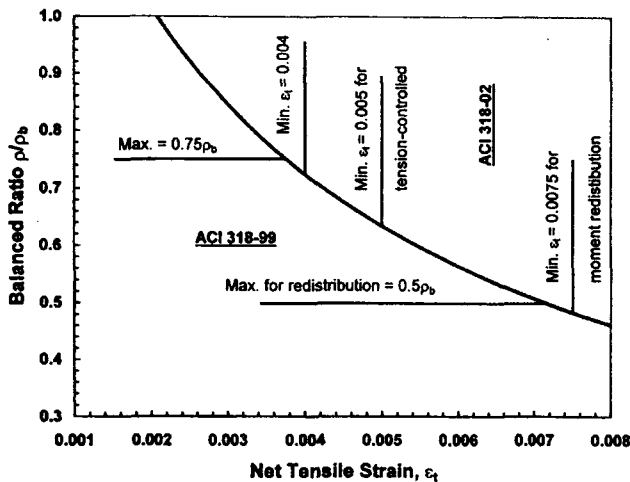


그림 2 직사각형단면의 순인장변형률과 인장철근비의 관계⁹⁾

〈그림 2〉는 직사각형단면의 순인장변형률과 인장철근비의 관계를 나타내는데, ACI 318-99의 최대철근비 $0.75\rho_b$ 는 순인장 변형률 0.00376에 해당되며 ACI 318-02의 순인장변형률 0.004는 $0.72\rho_b$ 에 해당됨을 보인다. 즉, 최대철근비는 기존 규정에 비하여 작아졌다고 할 수 있으나, 실무설계에서 최대철근비와 유사한 철근량을 사용하여 휨부재를 설계하는 경우가 많지 않으므로 실제적으로 크게 영향을 주지는 않을 것이다.

휨부재의 최소철근량은 표현을 일부 수정하였으나 결과적으로 내용은 ACI 318-99와 동일하다.

1.5.2 휨부재의 모멘트 재분배

휨부재의 모멘트 재분배에 대한 규정(8.4)도 역시 최외곽 인장철근의 순인장변형률(net tensile strain)을 기준으로 결정하도록 〈표 4〉와 같이 개정하였다. ACI 318-99에서는 철근비를 기준으로 하여 10~20%의 비율을 재분배하였으나, ACI 318-02에서는 순인장변형률을 기준으로 하여 7.5~20%의 비율을 재분배한다. 재분배의 조건을 비교해 보면, 〈그림 2〉에 나타난 바와 같이, ACI 318-99의 조건인 균형철근비에 대한 철근비의 비율 0.5는 약 0.0071의 순인장변형률에 해당되며, ACI 318-02의 조건인 순인장변형률 0.0075는 균형철근비에 대한

표 4. 모멘트 재분배

항 목	ACI 318-99	ACI 318-02
재분배 조건	$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b} \leq 0.5$	$\epsilon_t \geq 0.0075$
재분배 비율 계산식 [%]	$20 \left(1 - \frac{\rho - \rho'}{\rho_b} \right)$	$1000 \epsilon_t$
재분배 비율 범위	10 ~ 20 %	7.5 ~ 20 %

철근비의 비율 약 0.49에 해당된다.

2. 국내 설계기준 안전성 관련 계수의 변천

2.1 토목 분야

국내 토목 분야에서는 대한토목학회에서 제정한 1968년 철근 콘크리트표준시방서에 강도설계법이 부록에 수록된 후 1983년의 개정판부터 주된 설계법으로 채택되었다. 1983년 콘크리트표준시방서에서 강도설계법의 설계편을 처음 제정할 때 ACI 318의 하중계수 및 하중조합과 강도감소계수를 참조하고 국내의 여건을 감안하여 경험적으로 계수들을 선택한 후 분석과정을 거쳐서 결정하였다. 그 후 1988년과 1996년에 개정하는 과정에서 하중계수 및 하중조합과 강도감소계수의 값에 변화가 있었으며, 1999년 건축분야와의 통합하여 콘크리트구조설계기준을 제정하는 과정에서 다시 하중계수 및 하중조합과 강도감소계수의 값에 변화가 있었다. 그러나 이러한 계수값 등 몇 가지 항목을 제외하고는 기본적으로 ACI 318과 거의 유사하다. 표 5는 국내 토목 분야에서 사용하여 온 콘크리트구조설계기준의 하중계수 및 하중조합과 강도감소계수 일부를 나타낸다. 단, 교량설계에 적용하는 도로교설계기준의 하중계수 및 하중조합은 이와 다름을 밝혀둔다.

표 5. 토목 분야 콘크리트구조설계기준의 안전성 관련 계수

항 목	하중계수 및 조합	강도감소계수*
콘크리트표준시방서 설계편(1983)	$U = 1.5D + 1.8L$	휨 - 0.90
		압축 - 0.70 (0.75)
		전단 - 0.85
콘크리트표준시방서 설계편(1988)	$U = 1.2D + 1.8L$	휨 - 0.85
		압축 - 0.65 (0.70)
		전단 - 0.70
콘크리트표준시방서 설계편(1996)	$U = 1.5D + 1.8L$	휨 - 0.85
		압축 - 0.65 (0.70)
		전단 - 0.80
콘크리트구조 설계기준(1999)	$U = 1.4D + 1.7L$ $U = 1.4(1.1)D$	휨 - 0.85
		압축 - 0.70 (0.75)
		전단 - 0.80

* 압축부재의 팔호 안의 값은 나선철근 부재에 적용

2.2 건축 분야

국내 건축 분야에서는 1988년 대한건축학회에서 제정한 「극한

강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산 기준 및 해설」을 통하여 처음으로 강도설계법이 도입되었으며, 이후 1994년에 1차 개정되었다. 이 기준에서 사용된 하중계수와 강도감소계수는 전통적으로 ACI 318 기준에서 사용하였던 것을 그대로 수용하고 있다. 이는 기본적으로 ACI 318이 Building Code인 점을 감안하였기 때문이다. 이후 토목분야와의 콘크리트 기준의 통합에 대한 필요성에 따라서 1999년에 「콘크리트구조설계기준」이 제정되었으며, 이 과정에서 토목 분야의 특수성을 고려하여 하중계수의 적용에 대한 약간의 조정과 강도감소계수의 하향조정이 있었으나, 건축분야에 대해서는 기존의 하중계수와 강도감소계수를 사용할 수 있도록 허용하였다. 그러나 2003년 개정된 「콘크리트구조설계기준(SI 단위의 설계기준)」에서는 혼란을 피하기 위하여 하중계수에 대해서는 ACI 318-95의 하중계수로 환원되었다.

2.3 강도감소계수 적용에 관한 국내 연구

1999년 손혁수 등¹⁰⁾은 ACI 318-95와 99의 Appendix B와

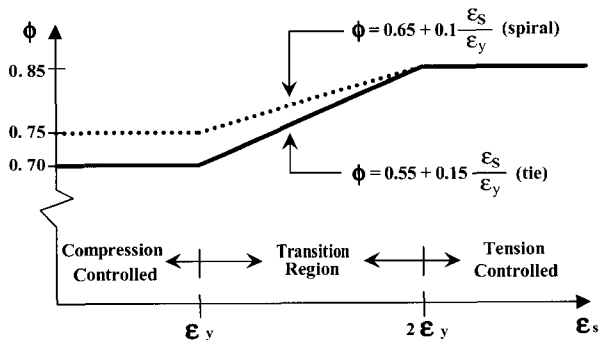


그림 3. 손혁수 등의 강도감소계수 적용방법¹⁰⁾

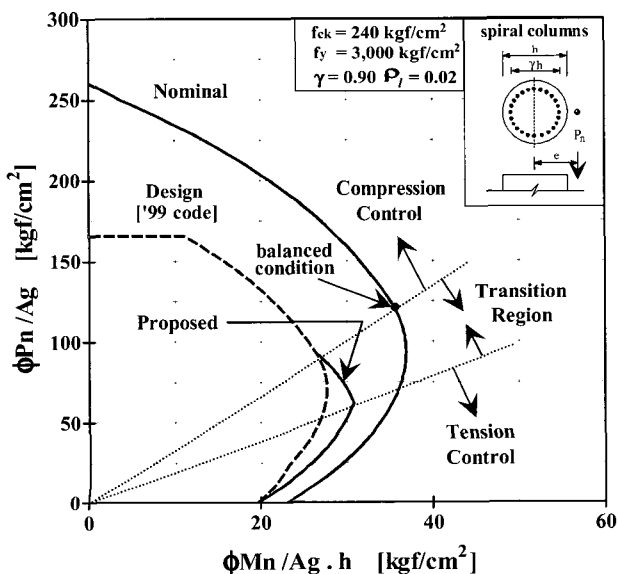


그림 4. 손혁수 등의 강도감소계수 적용법에 따른 기둥 설계강도¹⁰⁾

ACI 318-02의 본문규정으로 채택하고 있는 통합설계법 (Unified Design Provisions) 개념의 국내 적용성에 관한 연구 결과를 발표하였다. 휨부재 및 휨모멘트와 압축력이 동시에 작용하는 부재에 대한 강도감소계수는 1999년 콘크리트구조설계기준의 값을 채택하였고 Calibration을 통하여 강도감소계수의 적용 방법을 제안하였다. <그림 3>은 손혁수 등¹⁰⁾이 제안한 강도감소계수의 적용방법을 나타내는데, SD30, SD35, SD40의 다양한 종류의 철근을 사용하는 국내 현실을 감안하여 압축지배변형률 한계를 항복변형률로 정의하고 인장지배변형률 한계는 항복변형률의 2배로 할 것을 제안하였다.

<그림 4>는 손혁수 등이 제안한 강도감소계수의 적용방법을 원형 나선철근기둥에 적용한 결과⁹⁾인데, 인장지배구역의 설계강도가 「콘크리트구조설계기준(1999)」에 의한 설계강도보다 크며 압축지배구역의 설계강도는 동일하다는 것을 보인다.

3. 강도감소계수의 비교 및 안전성 분석

3.1 휨부재에 대한 강도감소계수

ACI 318-02에서는 강도감소계수의 적용방법과 인장철근량의 제한에 대한 규정이 개정되어, 휨부재에 대한 강도감소계수는 인장철근량에 따라 다른 값이 적용된다. 즉, <표 6>에 나타난 바와 같이, 파괴 시에 순인장변형률이 0.005 이상인 경우($0.63 \rho_b$ 이하의 인장철근비를 갖는 단면)에는 0.9를 적용한다. 순인장변형률이 0.005 이하인 경우에는 직선보간하여 0.9보다 작은 값을 적용하며, 순인장변형률이 최소허용치인 0.004인 경우($0.72 \rho_b$ 인 인장철근비를 갖는 단면)에는 0.812를 적용하게 된다.

참고로, <표 7>은 국내 기준에 대하여 휨부재의 순인장변형률 최소허용치를 항복변형률의 2배(변형률 연성도 2.0)로 제한하고

표 6. 휨부재에 대한 ACI 318-02의 강도감소계수 적용

지배단면	순인장변형률	인장철근비	강도감소계수
인장지배단면	0.005 이상	$0.63 \rho_b$ 이하	0.90
지배단면 변화구간	0.005 이하 0.004 이상	$0.63 \rho_b \sim$ $0.72 \rho_b$	$0.90 \sim$ 0.812
	0.004 (최소허용값)	$0.72 \rho_b$ (최대허용값)	0.812

표 7. 국내기준에 대한 휨 강도감소계수 적용의 예

철근 종류	항복변형률 ϵ_y	최소허용 $\epsilon_t = 2 \epsilon_y$	최대허용 인장철근비	강도감소 계수
SD 30	0.0015	0.003	$0.75 \rho_b$	0.85
SD 35	0.00175	0.0035	$0.731 \rho_b$	0.85
SD 40	0.002	0.004	$0.714 \rho_b$	0.85

손력수 등¹⁰⁾이 제안한 강도감소계수의 적용방법을 사용하는 경우를 나타낸다. 이 경우, 철근 종류에 따라 최대인장철근비가 현행 기준과는 다소 차이가 있지만, 철근량에 따라 각기 다른 강도감소계수를 사용하는 ACI 318-02와는 달리, 철근의 종류나 인장철근량과는 관계없이 휨부재에 대하여는 항상 일정한 값 0.85를 적용하게 됨으로써, 실무설계가 간편해질 수 있음을 나타낸다.

3.2 휨 파괴에 대한 안전성

〈표 8〉은 고정하중과 활하중의 크기가 같은 경우에 대하여, ACI 318-02와 ACI 318-99, 그리고 국내기준인 KCI-99의 휨 파괴 안전율을 나타낸다. ACI 318-02는 ACI 318-99에 비하여 하중계수가 감소하였으나, 파괴 시 순인장변형률이 0.005 이상인 단면(인장철근비 0.63 ρ_b 이하)에는 기존과 같은 0.9의 ϕ 를 적용하게 되므로 안전율이 1.56으로 낮아졌음을 알 수 있다.

표 8. 설계기준별 휨 파괴에 대한 안전율 (D = L 인 경우)

기준	하중조합	강도감소계수	안전율 U/ϕ
ACI-02	1.2D+1.6L	0.812 ~ 0.9	1.56 ~ 1.72
ACI-99	1.4D+1.7L	0.90	1.72
KCI-99	1.4D+1.7L	0.85	1.82

〈표 9〉는 참고자료로서, 휨부재의 순인장변형률 최소허용치를

표 9. 적용방법에 따른 휨 파괴 안전율 (D = L 인 경우)

적용방법	방법-A	방법-B
하중조합	ACI-02 하중조합	KCI-99 하중조합
강도감소계수	KCI-99 계수	KCI-99 계수
ϕ 적용방법	손력수 등의 제안	손력수 등의 제안
최대철근량 제한	$\epsilon_t = 2\epsilon_y$ 0.714 ρ_b (SD 40)	$\epsilon_t = 2\epsilon_y$ 0.714 ρ_b (SD 40)
안전율 U/ϕ	1.65	1.82

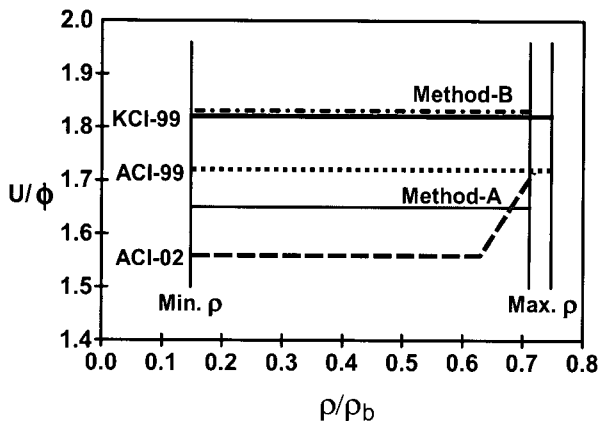


그림 5. 인장철근량(균형철근비에 대한 비율)에 따른 안전율

항복변형률의 2배(변형률 연성도 2.0)로 제한하고 손력수 등¹⁰⁾이 제안한 강도감소계수의 적용방법을 사용할 때, 하중조합으로 ACI 318-02를 적용하는 경우(방법-A)와 KCI-99를 적용하는 경우(방법-B)의 안전율을 나타낸다. 〈그림 5〉도 역시 참고자료로서, 세 가지의 설계기준과 표 9의 적용 방법의 휨 파괴 안전율을 인장철근량(균형철근비에 대한 비율)에 따라 나타낸 것이다.

ACI 318-02는 인장철근량에 따라 다른 강도감소계수를 적용하므로 안전율도 이에 따라 달라진다. 〈그림 6〉은 L/D 비율에 따른 안전율을 나타낸 것으로, 순인장변형률(ϵ_t)이 0.005 이상인 단면(인장철근비 0.63 ρ_b 이하)은 ACI 318-02의 안전율이 ACI 318-99보다 작고, ϵ_t 가 0.004인 단면(철근비 0.72 ρ_b)은 ACI 318-99와 안전율이 유사함을 나타낸다.

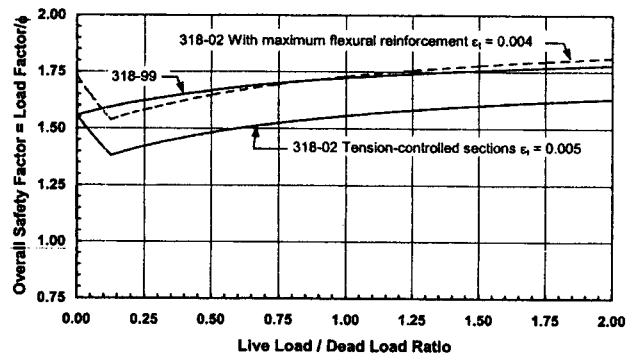


그림 6. 활하중과 고정하중 비율에 따른 ACI 318의 안전율⁹⁾

〈그림 7〉은 참고자료로, 5 가지의 휨 파괴 안전율을 하중비율에 따라 나타낸 것이다.

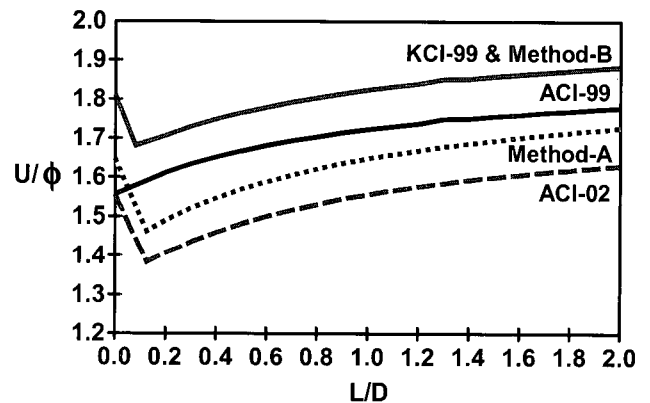


그림 7. 활하중과 고정하중의 비율(L/D)에 따른 안전율

3.3 휨-압축 파괴에 대한 안전성

ACI 318-02는 하중계수의 감소에 따라 압축지배단면의 강도감소계수도 감소시켰으나, 인장지배단면의 강도감소계수는 변함이 없고, 특히 강도감소계수 적용방법(통합설계법)으로 인하여

인장지배구역의 설계강도가 기존보다 크게 된다. 따라서 휨-압축 파괴의 안전율이 전반적으로 감소했다고 말할 수 있으나, 연성을 고려한 합리적인 설계강도의 결정과정으로 이해해야 할 것이다.

3.4 전단 파괴에 대한 안전성

ACI 318-02에서는 하중계수가 이전보다 감소하게 됨에 따라 전단에 대한 강도감소계수도 역시 감소시킴으로서, 표 10과 같이 전단 파괴에 대한 안전율을 ACI 318-99와 유사하도록 하였으나 결과적으로 안전율이 다소 증가하였다. ACI 318-99는 D와 L에 대하여 하나의 하중조합을 사용하므로 활하중의 비율이 감소함에 따라 전단에 대한 안전율이 1.65까지 감소하지만, ACI 318-02와 KCI-99의 전단안전율은 L/D 비율에 따른 변동이 매우 작다.

표 10. 설계기준별 전단 파괴에 대한 안전율

기준	하중조합	전단 강도감소계수	안전율 U/ϕ	
			L=D 인 경우	L=0 인 경우
ACI-02	1.2D + 1.6L 1.4D	0.75	1.87	1.87
ACI-99	1.4D + 1.7L	0.85	1.82	1.65
KCI-99	1.4D + 1.7L 1.4(1.1)D	0.80	1.94	1.93

4. 맺음말

ACI 318 Code는 1956년도에 강도설계법을 도입한 이후, 그 간의 연구결과 및 경험적 지식을 바탕으로 지속적으로 개정하였으며, 2002년도에 이르러 안전성에 관련된 계수 및 적용방법에 대한 중대한 개정을 하게 되었다. 이에 관련된 규정은 구조물의 안전성은 물론이고 전체적인 설계과정 및 설계결과에 절대적인 영향을 주게 된다. 따라서 국내기준의 개정 시 안전성에 관련된 계수 및 적용방법에 대한 규정은 안전성과 합리성에 대한 면밀한 검토를 거쳐서 신중하게 이루어져야 할 것이다. □

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Proposed Revision of Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-56)," ACI Journal, Proceedings, Vol.59, No.2, February 1962, pp.145~276.
2. ACI Committee 318, "Proposed Revision of Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-56) - Amendment," ACI Journal, Proceedings, Vol.59, No.12, December 1962, pp.1821~1847.
3. W. L. Gamble., " ϕ -Factors and Other Anomalies," Concrete International, August, 1988, pp.56~58.
4. AISC, Load & Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, IL, AISC, Sept. 1, 1986.
5. ANSI, American National Standard Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, A58.1-1982, American National Standard Institute, NY, 1982.
6. ASCE 7-98, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 1998.
7. International Building Code, 2000 ed. (IBC 2000), International Building Council, Inc., Falls Church, VA, 2000.
8. M. M. Szerszen and A. S. Nowak, "Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 2 - Reliability Analysis and Resistance Factors," ACI Journal, Proceedings, Vol. 100, No. 3, May-June 2003, pp.383~391.
9. PCA, Notes on ACI 318-02 Building Code Requirements for Structural Concrete, Portland Cement Association, Skokie, Il, 2002.
10. 손혁수, 이재훈, "연성을 고려한 철근콘크리트 기둥의 강도감소계수 적용에 관한 연구", 한국콘크리트학회논문집, 제11권, 제4호, 1999년 8월, pp.149~158.

"콘크리트진단 및 유지관리"

◆ 소개

이 책은 콘크리트구조물의 안전진단 및 유지관리에 관하여 이해하기 쉽고, 현장적용에 도움이 되도록 노력했으며, 이는 관련 분야에 종사하고 있는 실무기술자들의 참고서로 뿐만 아니라 관련자격시험 등에 필요한 필독서로도 유용할 것이다.

- 제 목 : 콘크리트진단 및 유지관리
- 저 자 : 한국콘크리트학회 편
- 출판일 : 2003년 4월
- 정 가 : 25,000원
- 출판사 : 기문당
- 페이지 : 578쪽
- ISBN : 89-7086-490-3

콘크리트진단 및 유지관리