

원전구조물의 고강도철근 적용을 위한 구조적 목표성능분석

Analysis of the Structural Target Performance in order to Apply High-Strength Reinforcing Bars for the Nuclear Power Plant Structures

이 병 수* 방 창 준** 이 한 우*** 임 상 준***
 Lee, Byung-Soo Bang, Chang-Joon Lee, Han-Woo Lim, Sang-Joon

Abstract

Because of the high level of the safety and durability, a lot of reinforcing bars is placed in the concrete structure of the Nuclear Power Plant. But the overcrowding re-bars cause some problems during the construction as the diseconomy, construction delay, quality deterioration, and so on. These problems can be solved by applying the high-strength reinforcing bars to NPP structure. To achieve this, after analysing the structural target performance like the control of cracks, adherence, shear, torsion, development of reinforcement and earthquake-resistance, the results of the analysis will be reflected in the structural performance evaluation test.

키 워 드 : 고강도철근, 구조적 목표성능, 원전구조물
 Keywords : High-Strength Reinforcing Bar, Structural Target Performance, Nuclear Power Plant Structure

1. 서 론

원전구조물은 높은 수준의 안정성과 내구성을 확보하기 위하여 매우 많은 양의 철근이 사용되고 있으나, 이러한 철근의 과다배근은 과도한 철근량 사용으로 인한 비경제성, 배근작업소요일수 증가로 인한 공기지연, 과밀배근에 따른 콘크리트 타설의 어려움 등 여러 문제점이 있는 실정이다.

원전에 사용되는 철근의 최대항복강도를 420MPa (60,000 psi)에서 550MPa (80,000 psi)로 상향조정하여 이러한 문제점을 해결하고자 지식경제부 원자력 융합원천 기술개발사업으로 추진 중인 “원전 구조물의 고강도 철근 적용 기술개발” 연구과제를 착수하였다.

2. 원전 설계기술기준 현황

ASME Sec. III, ACI 318, ACI 349 등 해외 설계기술기준과 KEPIC SNB, SNC 등 국내 설계기술기준이 함께 원전구조물에 적용되고 있다.

고강도철근 적용이 제한되고 있는 규정을 파악하고 개정이 필요한 요건을 도출하여 구조물성능평가 실험계획에 반영하고자 상 기 설계기술기준을 분석하였다.

* 한국수력원자력(주), 주임, 교신저자(lbs@khnp.co.kr)
 ** 한국수력원자력(주), 부장
 *** 한국수력원자력(주), 차장
 **** 한국수력원자력(주), 주임

3. 균열 및 부착

ASME Sec. III Div.2와 KEPIC SNB에서는 최소 표면철근량을 응단면적의 0.002배 이상으로 규정하여 균열을 제어하고 있는 반면, ACI 318과 ACI 349에서는 최대 철근간격을 부재두께의 3 배 및 450mm 이내로 규정하여 균열을 제어하고 있다.

부착을 위한 정착길이를 살펴보면, ASME Sec. III Div.2와 KEPIC SNB에서는 #11(35mm)이하, #14(44mm), #18(57mm)로 구분하여 규정하고 있는 반면, ACI 318과 ACI 349에서는 응력 계산값(f_s)을 $2/3f_y$ 또는 $0.4f_y$ 로 제한하고 있으며 ACI 408은 횡방강근 유무로 제안식을 구분하고 있다.

겹침이음은 ASME Sec. III Div.2, KEPIC SNB, ACI 318 및 ACI 349 모두 #11(35mm) 철근까지만 허용되고 있다.

표 1. 균열 및 부착관련 설계기술기준

	균열 제어	정착 길이	겹침 이음
ASME III Div. 2 (KEPIC SNB)	CC-3535 최소 표면 철근량 규정 (중단면적의 0.002배 이상)	CC-3532.1.2(i) #11이하, #14, #18로 구분하여 규정	CC-3532 (b) #11(35mm) 이하만 허용
ACI 318 (11)	철근 최대간격 규정(7.65형) (부재두께 3배, 450mm)	응력 계산값 제한 (10.6.4형) (f_s 를 $2/3f_y$ 로 간주)	#11(35mm) 이하만 허용 (12.14.2.1형)
ACI 349 (06)	상 동	응력 계산값 제한 (10.6.4형) (f_s 를 f_y 의 40%로 간주) 원전 구조물 특성 반영	상 동
ACI 408 (03)	-	횡방향 철근 유무로 제안식 제시 (3.3형)	-

4. 전단 및 비틀림

전단철근의 최대항복강도는 ASME Sec. III Div.2, KEPIC SNB, ACI 318 및 ACI 349 모두 420MPa (60,000 psi)로 제한되고 있다. 참고로 전단철근의 최대항복강도를 유럽(EC2)은 600MPa, 캐나다(CSA)는 500MPa로 제한하고 있다.

ACI 318과 ACI 349에 규정된 비틀림 보강철근의 최대항복강도는 콘크리트의 비틀림 저항을 배제하고 철근 내력(420MPa)만으로 계산하도록 규정되고 있다.

벽체용 전단철근은 ASME Sec. III Div.2, KEPIC SNB, ACI 318 및 ACI 349 모두 420 MPa (60,000 psi)로 제한되고 있으며, 다만 ACI 318과 ACI 349에서는 용접철망에 한해서 550MPa (80,000 psi)로 완화되고 있다.

- b) 철근 직경 : #11(35mm) 철근 이하
- c) 콘크리트 종류 : 보통중량 콘크리트
- d) 순지압면적(A_{brg}) : 철근 단면적의 4배($4A_b$) 이상
- e) 순피복 두께 : 철근 직경의 2배 이상($2d_b$)
- f) 철근 순간격 : 철근 직경의 4배 이상($4d_b$)

표 3. 전단 및 비틀림 관련 설계기술기준

	ASME III 2-10	ACI 349-06	ACI 318-08
현황	· 기계적정착 사용 허용 · 구체적인 설계식 부재	· 기계적정착 사용 허용 · 앵커와 동일하게 설계	· 갈고리 정착길이 80% · $f_y \leq 420\text{MPa}, f'_c \leq 42\text{MPa}$ · $d_s \leq 35\text{mm}, s_s \geq 4d_s$
문제점	정착부형상, 정착길이 결정 어려움 → 적용기피	· 너무 보수적인 설계 · 과도한 정착길이	강도, 지름 제한으로 원전구조물에 적용 불가

표 2. 전단 및 비틀림 관련 설계기술기준

	전단철근 최대 항복강도	비틀림 설계 (보강인 항복강도)	벽체 전단강도
ASME III Div. 2 (KEPIC SNB)	CC-3424.5 60,000psi (420 Mpa)	-	60,000psi (420 Mpa)
ACI 318 (11)	60,000 psi (420 Mpa)	11.5.3.4 ~11.5.3.6항 Con'c 비틀림 저항 배제 철근 내력만 계산 (420 Mpa)	11.4.2항, 21.1.5.5항 60,000 psi (일반철근) 80,000 psi (용접철망)
ACI 349 (06)	420 MPa	11.6.3.4 ~11.6.3.6항 Con'c 비틀림 저항 배제 철근 내력만 계산 (415 Mpa)	9.4항, 11.5.2항, 21.2.5항 415 Mpa (일반철근) 550 Mpa (용접철망)

* EC2 (02): 전단철근 최대 항복강도를 600MPa로 제한
 * CSA (04): 전단철근 최대 항복강도를 500MPa로 제한

5. 기계적 정착

ASME Sec. III Div.2에서는 정착부와 철근의 이음이 설계기준 강도의 125% 이상을 발휘하도록 규정하고 있으나 설계를 위한 구조상세 등 구체적인 설계규정은 없다.

ACI 349-06에서는 콘크리트에 손상을 주지 않는 기계적정착의 사용이 허용되나 부록 D-Anchor to Concrete의 앵커설계법에 따라 설계하도록 지나치게 보수적으로 규정하여 실제 구조물의 적용에는 한계가 있다.

국내 설계기술기준인 KEPIC SNB/와 SNC에도 상기의ASME Sec. III Div.2와 ACI 349-06 설계기준과 다르지 않다.

반면, ACI 318-11에는 구체적인 정착길이를 갈고리 정착길이의 80% 수준으로 규정하고 있으나, 다음과 같이 철근 직경 및 설계 기준항복강도, 피복두께 및 순간격에 대한 제한사항으로 인해 원전구조물 적용에 한계가 있는 실정이다.

- 1) 계산식 : 정착길이(l_{dt})= $0.016 \times \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \times d_b$ [psi]
- 2) 적용시 제한사항
 - a) 철근의 설계기준항복강도(f_y) : 60,000 psi 이하

6. 내진관련 특별규정

ACI 318과 ACI 349의 21장 내진관련 특별규정에는 ASTM A615 (또는 A706)의 Gr.40과 Gr.60 철근 사용만을 허용하고 있으며 다음의 추가요건도 규정하고 있다.

- 1) 실제 인장강도 \leq 설계기준항복강도(f_y)+18,000psi
- 2) 실제 인장강도 $\geq 1.25 \times$ 실제 항복강도

7. 결론

위에서 살펴본 바와 같이 원전구조물에 적용되는 국내의 설계 기술기준의 주철근, 전단/비틀림 보강철근 및 기계적정착의 설계 기준과 내진관련 특별규정까지 고려하여 실험계획을 수립하고 실험을 수행하여 최대항복강도 550MPa (80,000 psi) 고강도철근의 원전구조물 적용이 가능하도록 구조물성능평가 실험과 분석을 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었으므로 이에 감사드립니다. (No.2011T100200162)

참고 문헌

1. ACI 318-11 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2011
2. ACI 349-06 Code Requirements for Nuclear Safety- Related Concrete Structures and Commentary, 2006
3. ASME III Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Division 2 Code for Concrete Containments, 2011
4. KEPIC SNB 격납구조, 대한전기협회, 2007
5. KEPIC SNC 철근콘크리트, 대한전기협회, 2005