



원전구조물의  
**KS D3504 철근자재 적용성 연구**

2019. 8. 27



한수원(주) 중앙연구원  
구조설계그룹 이병수

# 발표순서

고강도철근 사용을 위한  
원전구조물 설계검토

I . 코드개정 추진

II . 현행 기술기준

III . 설계검토 및 향후계획

# I

## 코드개정 현황

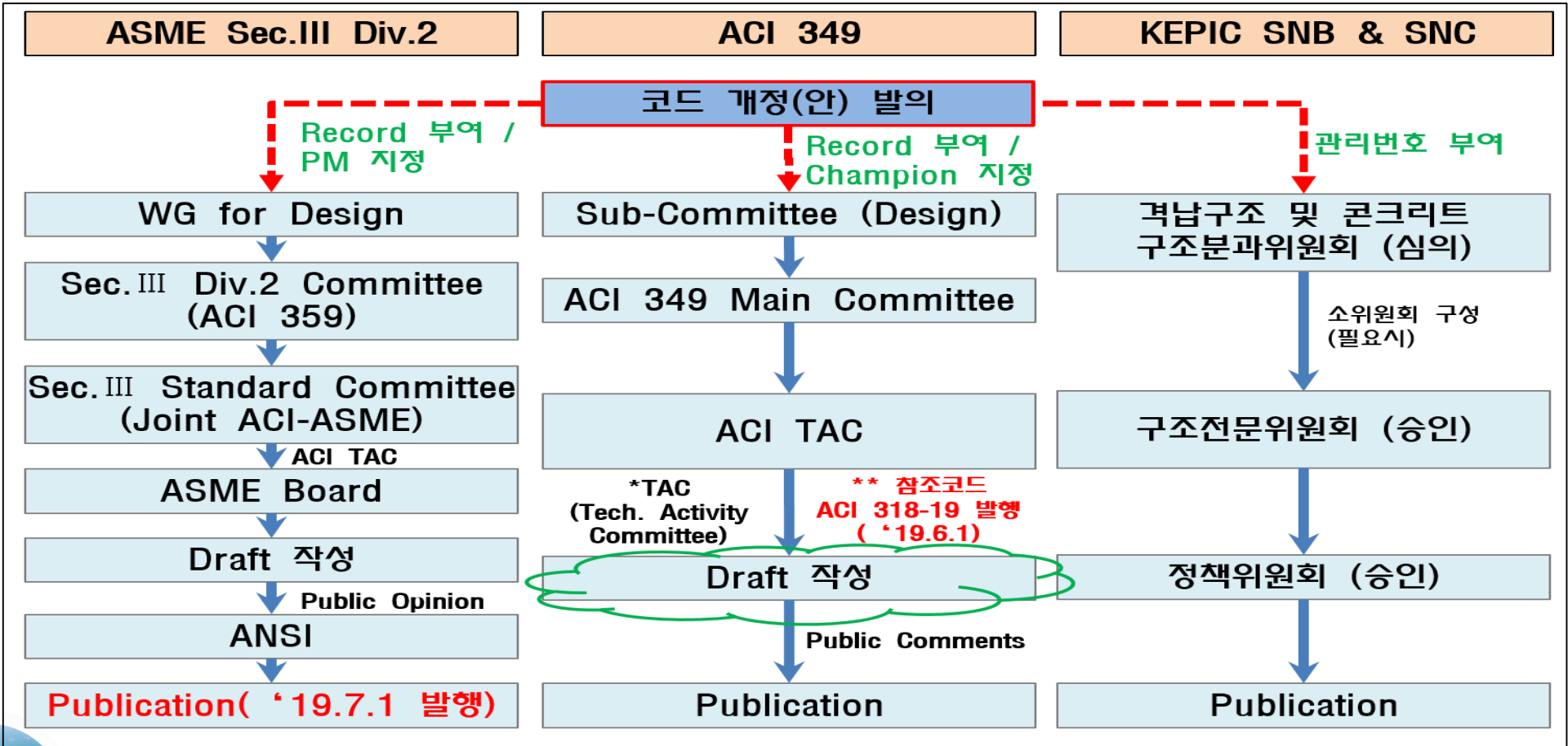
1.1 코드개정 요약

1.2 ASME-CC (2019 개정판)

1.3 ACI 349 (2019 개정예정)

1.4 ACI 318 (2019 개정판)

- ASME Sec. III Div.2 : 2019년판 반영 완료 ( '19.7.1)
- ACI 349 : 2019년판 개정 작업중 / 참조코드 ACI-318-19 개정 완료( '19.6)
- KEPIC : Reference Code 개정과 연계한 코드개정 (SNB, SNC)





## ASTM A615 철근의 기계적특성 요건 추가 (ASTM A706 준용)

### 1. 최대 항복강도

$$f_{y\_max} \leq f_y + 18,000 \text{ psi (125MPa)}$$

### 2. 최소 실제 인장강도

$$f_{tk} \geq 1.25 f_{yk}$$

### 3. 파단 연신률(8", %)

직경( $d_b$ )	Gr.60 (420MPa)	Gr.80 (550MPa)
#3 ~ #6	14%	12%
#7 ~ #11	12%	
#14, #18	10%	

**CC-2331.2 Acceptance Standards.** The acceptance standards shall be in conformance with the tensile requirements of ASTM A615 or ASTM A706, as applicable. If a test specimen fails to meet the tensile requirements, two additional specimens from the same heat and of the same bar size shall be tested. If either of the two additional specimens fails to meet the tensile requirements, the material represented by the tests shall not be accepted.

ASTM A615 shall be further subject to the following conditions:

(a) The actual yield strength based on mill tests shall not exceed  $f_y$  by more than 18,000 psi (125 MPa).

(b) The ratio of the actual tensile strength to the actual yield strength shall not be less than 1.25.

(c) For Grade 60 bars, the minimum elongation in 8 in. (200 mm) shall be at least 14% for bar sizes No. 3 (10) through No. 6 (19), at least 12% for bar sizes No. 7 (22) through No. 11 (36), and at least 10% for bar sizes No. 14 (43) and No. 18 (57).

(d) For Grade 75 bars and Grade 80 bars, the minimum elongation in 8 in. (200 mm) shall be at least 12% for bar sizes No. 3 (10) through No. 11 (36) and at least 10% for bar sizes No. 14 (43) and No. 18 (57).

### 철근의 설계항복강도 상향 (60 → 80ksi)

- 예외 {
- 전단마찰 (*Shear Friction*)
  - 방사전단 (*Radial Shear*)
  - 윤변전단 (*Peripheral Shear*)
  - 비틀림전단 (*Torsional Shear*)
  - 보전단 (*Beam Shear*)

### CC-3422 Reinforcing Steel

#### CC-3422.1 Design Strength.

(a) The design yield strength of reinforcement shall not exceed 80,000 psi (550 MPa). For shear friction, radial shear, peripheral shear, torsional and beam shear reinforcement, the design yield strength of reinforcement shall not exceed 60,000 psi (420 MPa).

### Tangential Shear 설계강도 요건 추가

$$(f'_c \geq 4ksi) \rightarrow (f_{yt} \geq 80ksi)$$

**CC-3521.1.3 Strength of Reinforcement.** Design yield strength of tangential shear reinforcement shall not exceed 80,000 psi (550 MPa). In cases where the minimum specified concrete strength is less than 4,000 psi (28 MPa), the design yield strength of tangential shear reinforcement shall not exceed 60,000 psi (420 MPa).

### 고강도철근 정착계수(1.2) 요건 추가

**CC-3532.1.7 Grade 75 and Grade 80 Reinforcement.** Development length,  $l_d$ , of Grade 75 and Grade 80 reinforcement calculated using CC-3532.1.2(i) shall be multiplied by a factor of 1.2.

### 고강도철근의 기계적 이음/정착자재 강도요건 증가

**Table CC-4333-1**  
**Tensile Requirements for Mechanical Reinforcing Bar Splices, Mechanically Headed Deformed Bars**  
**[Note (1)], and Welded Joints**

Specification	Bar Grade	Reinforcing Bar Properties		Splice, Mechanically Headed Deformed Bar, or Joint Strength Requirements	
		Minimum Yield Strength, psi (MPa)	Minimum Tensile Strength, psi (MPa)	Minimum Average Mechanical Splice, Mechanically Headed Deformed Bar, or Welded Joint Tensile Strength, psi (MPa) [Note (2)]	Minimum Single Mechanical Splice, Mechanically Headed Deformed Bar, or Welded Joint Tensile Strength, psi (MPa) [Note (3)]
ASTM A615	Grade 40	40,000 (280)	70,000 (480)	70,000 (480)	50,000 (350)
ASTM A615	Grade 60	60,000 (420)	90,000 (620)	90,000 (620)	75,000 (520)
ASTM A706	...	60,000 (420)	80,000 (550)	80,000 (550)	75,000 (520)
ASTM A615	Grade 75	75,000 (520)	100,000 (690)	100,000 (690)	93,750 (646)
ASTM A615	Grade 80	80,000 (550)	105,000 (725)	105,000 (725)	100,000 (690)
ASTM A706	Grade 80	80,000 (550)	100,000 (690)	100,000 (690)	100,000 (690)

NOTES:

- (1) For mechanically headed deformed bars, Grade 75 and Grade 80 shall not be used.
- (2) See CC-4333 and Mandatory Appendix D2-VIII.
- (3) These values are equivalent to 125% of the yield strength of each bar grade.

철근 설계기준항복강도 상향 (60→80 ksi)

## 9.4 Design Strength for Reinforcement

Modify as follows:

**9.4** —Design strength for reinforcement.

The specified  $f_y$  and  $f_{yt}$  used in design calculations shall not exceed 80,000 psi, except for prestressing steel and for transverse reinforcement in 10.9.3 and 21.1.5.4. For development of headed deformed bars, yield strength shall be limited to 60,000 psi in accordance with 12.6.1.

**R9.4**—Design strength for reinforcement.

~~Same as ACI 318-08 with the following addition:~~ In addition to the upper limit of 80,000 psi for **specified** yield strength of nonprestressed reinforcement, there are limitations on yield strength in other sections of the Code. In ~~11.4.2, 11.5.3.4, 11.6.6, 12.6.1, and 18.9.3.2,~~ the maximum value of  $f_y$  or  $f_{yt}$  that may be used in design is 60,000 psi. ~~The deflection provisions of 9.5 and the limitations on distribution of flexural reinforcement of 10.6 become increasingly critical as  $f_y$  increases.~~



벽체 전단철근 설계기준항복강도 상향 (60→80 ksi)

## 11.4 Shear Strength Provided by Shear Reinforcement

Modify as follows:

11.4.2 – (Same as in ACI 318-08)

The values of  $f_y$  and  $f_{yt}$  used in design of shear reinforcement shall not exceed 80,000 psi, with exemption for stirrup and tie rebar in beams and columns which shall not exceed 60,000 psi

R11.4.2 – (Same as in ACI 318-08)

The values of  $f_v$  and  $f_{vt}$  used in design of shear reinforcement was revised to 80,000 psi based on recent research (Ref. 11.18-11.20 & 11.74-11.XX) which has indicated that the performance of higher-strength steels as shear reinforcement is satisfactory and comparable to that of Gr 60 for diagonal crack control. The values of  $f_v$  and  $f_{yt}$  used in design of stirrup and tie rebar in beams and columns remain as 60,000 psi.

Table 20.2.2.4(a)—Nonprestressed deformed reinforcement

Usage	Application		Maximum value of $f_y$ or $f_{yt}$ permitted for design calculations, psi	Applicable ASTM specification				
				Deformed bars	Deformed wires	Welded wire reinforcement	Welded deformed bar mats	
Flexure; axial force; and shrinkage and temperature	Special seismic systems	Special moment frames	80,000	A706 <sup>[2]</sup>	Not permitted	Not permitted	Not permitted	
		Special structural walls <sup>[1]</sup>	100,000					
	Other	100,000 <sup>[3]</sup> <sup>[4]</sup>	A615, A706, A955, A996, A1035	A1064, A1022	A1064, A1022	A184 <sup>[5]</sup>		
Lateral support of longitudinal bars; or concrete confinement	Special seismic systems		100,000	A615, A706, A955, A996, A1035	A1064, A1022	A1064 <sup>[6]</sup> , A1022 <sup>[6]</sup>	Not permitted	
	Spirals		100,000	A615, A706, A955, A996, A1035	A1064, A1022	Not permitted	Not permitted	
	Other		80,000	A615, A706, A955, A996	A1064, A1022	A1064, A1022	Not permitted	
Shear	Special seismic systems <sup>[7]</sup>	Special moment frames <sup>[8]</sup>	80,000	A615, A706, A955, A996	A1064, A1022	A1064 <sup>[6]</sup> , A1022 <sup>[6]</sup>	Not permitted	
		Special structural walls <sup>[9]</sup>	100,000					
	Spirals		60,000	A615, A706, A955, A996	A1064, A1022	Not permitted	Not permitted	
	Shear friction		60,000	A615, A706, A955, A996	A1064, A1022	A1064, A1022	Not permitted	
	Stirrups, ties, hoops			60,000	A615, A706, A955, A996, A1035	A1064, A1022	A1064 and A1022 welded plain wire	Not permitted
				80,000	Not permitted	Not permitted	A1064 and A1022 welded deformed wire	Not permitted
Torsion	Longitudinal and transverse		60,000	A615, A706, A955, A996	A1064, A1022	A1064, A1022	Not permitted	
Anchor reinforcement	Special seismic systems		80,000	A706 <sup>[2]</sup>	Not permitted	Not permitted	Not permitted	
	Other		80,000	A615, A706, A955, A996	A1064, A1022	A1064, A1022	A184 <sup>[5]</sup>	
Regions designed using strut-and-tie method	Longitudinal ties		80,000	A615, A706, A955, A996	A1064, A1022	A1064, A1022	Not permitted	
	Other		60,000					

25.4.2.4 For deformed bars or deformed wires,  $\ell_d$  shall be calculated by:

$$\ell_d = \left( \frac{3}{40} \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s \psi_g}{\left( \frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) d_b \quad (25.4.2.4a)$$

in which the confinement term  $(c_b + K_{tr})/d_b$  shall not exceed 2.5, and

$$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{sn} \quad (25.4.2.4b)$$

where  $n$  is the number of bars or wires being developed or lap spliced along the plane of splitting. It shall be permitted to use  $K_{tr} = 0$  as a design simplification even if transverse reinforcement is present or required.

Table 25.4.2.5—Modification factors for development of deformed bars and deformed wires in tension

Modification factor	Condition	Value of factor
Lightweight $\lambda$	Lightweight concrete	0.75
	Normalweight concrete	1.0
Reinforcement grade $\psi_g$	Grade 40 or Grade 60	1.0
	Grade 80	1.15
	Grade 100	1.3
Epoxy <sup>[1]</sup> $\psi_e$	Epoxy-coated or zinc and epoxy dual-coated reinforcement with clear cover less than $3d_b$ or clear spacing less than $6d_b$	1.5
	Epoxy-coated or zinc and epoxy dual-coated reinforcement for all other conditions	1.2
	Uncoated or zinc-coated (galvanized) reinforcement	1.0
Size $\psi_s$	No. 7 and larger bars	1.0
	No. 6 and smaller bars and deformed wires	0.8
Casting position <sup>[1]</sup> $\psi_t$	More than 12 in. of fresh concrete placed below horizontal reinforcement	1.3
	Other	1.0

<sup>[1]</sup>The product  $\psi_t \psi_e$  need not exceed 1.7.

25.4.3.1 Development length  $\ell_{dh}$  for deformed bars in tension terminating in a standard hook shall be the greater of (a) through (c):

(a)  $\left( \frac{f_y \psi_e \psi_r \psi_o \psi_c}{55 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b^{1.5}$  with  $\psi_e, \psi_r, \psi_o, \psi_c,$  and  $\lambda$  given

in 25.4.3.2

(b)  $8d_b$

(c) 6 in.

**Table 25.4.3.2—Modification factors for development of hooked bars in tension**

Modification factor	Condition	Value of factor
Lightweight $\lambda$	Lightweight concrete	0.75
	Normalweight concrete	1.0
Epoxy $\psi_e$	Epoxy-coated or zinc and epoxy dual-coated reinforcement	1.2
	Uncoated or zinc-coated (galvanized) reinforcement	1.0
Confining reinforcement $\psi_r$	For No. 11 and smaller bars with $A_{th} \geq 0.4A_{hs}$ or $s^{[1]} \geq 6d_b^{[2]}$	1.0
	Other	1.6
Location $\psi_o$	For No. 11 and smaller diameter hooked bars: (1) Terminating inside column core with side cover normal to plane of hook $\geq 2.5$ in., or (2) With side cover normal to plane of hook $\geq 6d_b$	1.0
	Other	1.25
Concrete strength $\psi_c$	For $f'_c < 6000$ psi	$f'_c / 15,000 + 0.6$
	For $f'_c \geq 6000$ psi	1.0

<sup>[1]</sup> $s$  is minimum center-to-center spacing of hooked bars.

<sup>[2]</sup> $d_b$  is nominal diameter of hooked bar.



25.4.4.2 Development length  $\ell_{dt}$  for headed deformed bars in tension shall be the longest of (a) through (c):

(a)  $\left( \frac{f_y \psi_e \psi_p \psi_o \psi_c}{75 \sqrt{f'_c}} \right) d_b^{1.5}$  with  $\psi_e$ ,  $\psi_p$ ,  $\psi_o$ , and  $\psi_c$ , given in

- 25.4.4.3  
 (b)  $8d_b$   
 (c) 6 in.

**Table 25.4.4.3—Modification factors for development of headed bars in tension**

Modification factor	Condition	Value of factor
Epoxy $\psi_e$	Epoxy-coated or zinc and epoxy dual-coated reinforcement	1.2
	Uncoated or zinc-coated (galvanized) reinforcement	1.0
Parallel tie reinforcement $\psi_p$	For No. 11 and smaller bars with $A_{tt} \geq 0.3A_{hs}$ or $s^{[1]} \geq 6d_b^{[2,3]}$	1.0
	Other	1.6
Location $\psi_o$	For headed bars: (1) Terminating inside column core with side cover to bar $\geq 2.5$ in.; or (2) With side cover to bar $\geq 6d_b$	1.0
	Other	1.25
Concrete strength $\psi_c$	For $f'_c < 6000$ psi	$f'_c/15,000 + 0.6$
	For $f'_c \geq 6000$ psi	1.0

[1]  $s$  is minimum center-to-center spacing of headed bars.

[2]  $d_b$  is nominal diameter of headed bar.

[3] Refer to 25.4.4.5.

# II

## 철근설계 기술기준

- 2.1 철근의 항복강도
- 2.2 균열의 제어
- 2.3 철근의 정착
- 2.4 철근의 이음

# 21 철근의 항복강도

구분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
주철근	<input type="checkbox"/> CC-3422.1 (Design Strength) : 80 ksi	<input type="checkbox"/> 9.4 (철근 설계강도): 80 ksi	<input type="checkbox"/> 20.2.2.4 (철근 설계강도) 1. 휨/축력/수축/온도 철근: 80~100 ksi ○ 특수모멘트골조 : 80 ksi ○ 특수구조벽체 / 기타 : 100 ksi
전단철근 (벽체포함)	<input type="checkbox"/> CC-3422.1 (Design Strength) : 80 ksi ※ 60ksi ⇒ $\left\{ \begin{array}{l} \text{방사 (Radial) 전단} \\ \text{윤변 (Peripheral) 전단} \\ \text{보 (Beam) 전단} \end{array} \right.$ <input type="checkbox"/> CC-3521.1.3 (Strength of Reinforcement) ○ Tangential Shear : 80 ksi ( $f_c' \geq 4$ ksi)	<input type="checkbox"/> 9.4 (철근 설계강도): 80 ksi <input type="checkbox"/> 11.4.2 (전단 철근) ○ 일반철근: 60 ksi ○ 용접철망 : 80 ksi <input type="checkbox"/> 21.1.5.5 (내진 전단철근) : 60 ksi	<input type="checkbox"/> 20.2.2.4 (철근 설계강도) 2. 전단 철근: 60~100 ksi ○ 내진시스템 : 80~100 ksi ○ 용접철망 : 80 ksi ○ 나선 / 일반(스터립/타이/후프): 60 ksi
비틀림 철근	<input type="checkbox"/> CC-3422.1 (Design Strength) : 80 ksi ※ 60ksi ⇒ 비틀림 (Torsional)	<input type="checkbox"/> 9.4 (철근 설계강도): 80 ksi <input type="checkbox"/> 11.5.3.4 (비틀림 철근) : 60 ksi (콘크리트 비틀림 저항 배제)	<input type="checkbox"/> 20.2.2.4 (철근 설계강도) 3. 비틀림 철근: 60 ksi ○ 종방향 / 횡방향 철근 : 60 ksi
전단마찰	<input type="checkbox"/> CC-3422.1 (Design Strength) : 80 ksi ※ 60ksi ⇒ 전단마찰 (Shear Friction) <input type="checkbox"/> CC-3424.5 (Strength of Reinforcement) ○ 전단마찰철근 설계항복강도: 60 ksi	<input type="checkbox"/> 11.6.6 (전단마찰 철근) : 60 ksi	<input type="checkbox"/> 20.2.2.4 (철근 설계강도) 2. 전단 철근: 60~100 ksi ○ 전단마찰 철근 : 60 ksi

구 분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)								
최소 철근	<p>□ CC-3535 (b): Containment Shell ⇒ 표면철근 단면적에 의한 균열 제어</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 표면철근 단면적 ≥ 중단면적의 0.2%</li> </ul> <p>□ CC-3535 (c): Base-mat ⇒ 표면철근 단면적+간격에 의한 균열 제어</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 표면철근 단면적 ≥ 중단면적의 0.18%</li> </ul> <p style="text-align: center;">(<math>A_{s\text{배근}} \leq \frac{4}{3} A_{s\text{소요}}</math>)</p> <p>※ 철근 강도비 수정계수 : <math>\frac{60,000}{f_y}</math> ..... (<math>f_y &gt; 60,000 \text{ psi}</math>)</p>	<p>□ 7.12.2.1: <math>t &lt; 48''</math> 부재 <math>A_{s,\min}</math> (수축온도철근)</p> <table border="1" data-bbox="782 402 1352 768"> <thead> <tr> <th><math>f_y</math></th> <th><math>A_{s,\min}</math> (최소 철근단면적)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>f_y \leq 50 \text{ ksi}</math></td> <td><math>\geq 0.002A_g</math></td> </tr> <tr> <td><math>f_y = 60 \text{ ksi}</math></td> <td><math>\geq 0.0018A_g</math></td> </tr> <tr> <td><math>f_y &gt; 60 \text{ ksi}</math></td> <td><math>\geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0.0018A_g \left( \frac{60,000}{f_y} \right) \\ 0.0014A_g \end{array} \right.</math></td> </tr> </tbody> </table> <p>□ 7.12.2.2: <math>t \geq 48''</math> 부재 <math>A_{s,\min}</math> (수축온도철근)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>\left( \frac{f'_t}{f'_s} \right) A \leq A_{s,\min} \leq 0.01A</math> (선택) <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>f'_t</math>: Con'c 설계인장강도(<math>\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \sqrt{f'_c}</math>)</li> <li>- <math>f'_s</math>: 철근 용력 (<math>0.6f_y</math>)</li> <li>- <math>A</math>: 철근내부의 Con'c 유효 인장면적</li> </ul> </li> </ul>	$f_y$	$A_{s,\min}$ (최소 철근단면적)	$f_y \leq 50 \text{ ksi}$	$\geq 0.002A_g$	$f_y = 60 \text{ ksi}$	$\geq 0.0018A_g$	$f_y > 60 \text{ ksi}$	$\geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0.0018A_g \left( \frac{60,000}{f_y} \right) \\ 0.0014A_g \end{array} \right.$	<p>□ 24.4.3.2: 수축온도 철근 최소단면적</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>A_{s,\min} \geq 0.0018A_g</math></li> </ul>
	$f_y$	$A_{s,\min}$ (최소 철근단면적)									
$f_y \leq 50 \text{ ksi}$	$\geq 0.002A_g$										
$f_y = 60 \text{ ksi}$	$\geq 0.0018A_g$										
$f_y > 60 \text{ ksi}$	$\geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0.0018A_g \left( \frac{60,000}{f_y} \right) \\ 0.0014A_g \end{array} \right.$										



구분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
철근 간격	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ CC-3535 (c): Base-mat                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>s \leq 18''</math> (450mm)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 7.6.5: <b>웜철근</b> 간격 (Wall/Slab/Joist)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>s \leq \min. \begin{cases} 18'' \\ 3h(\text{부재 두께 } 3\text{배}) \end{cases}</math></li> </ul> </li> <li>□ 7.12.1: 수축/온도 철근 간격                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>s \leq 18''</math></li> </ul> </li> <li>□</li> <li>□ 8.12.5.2: <b>웜철근</b> 간격 (T-beam Flange)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>s \leq \text{flange 두께 } 5\text{배}(5h), 18''</math></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 부재요건으로 이동                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1방향 slab(7장), 2방향 slab(8장), 벽체(11장)</li> </ul> </li> <li>□ 24.4.3.3: 수축/온도 철근 간격                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>s \leq \min. \begin{cases} 18'' \\ 5h(\text{부재 두께, 높이, 깊이}) \end{cases}</math></li> </ul> </li> <li>□ 24.3.2: 인장면 <b>최외곽 웜철근</b> 간격(보, 1방향 Slab)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ 기존의 Beam요건에서 사용성 요건으로 이동</li> <li>○ <math>s \leq \min. \begin{cases} 15 \left( \frac{40,000}{f_s} \right) - 2.5c_c \\ 12 \left( \frac{40,000}{f_s} \right) \end{cases}</math></li> <li>○ 철근응력 <math>f_s = 2/3f_y</math> (24.3.2.1)</li> </ul> </li> <li>□ 24.3.4 : <b>웜철근</b> 간격 (T-beam Flange)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 좌 동 (24.4.3.3)</li> </ul> </li> </ul>

구 분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
콘크리트 압축강도		□ 12.1.2 : 최대 $f'_c \leq 10 \text{ ksi}$	□ 25.4.1.4 : 최대 $f'_c \leq 10 \text{ ksi}$
최소 정착길이	□ CC-3532.1.2.(i): 최소 정착길이 (12")	□ 12.2.1 : 최소 정착길이 (12")	□ 25.4.2.1(b): 최소 정착길이 (12")
정착길이 기본 산정식	□ CC-3532.1.2.(i):(1): 정착길이 기본식 [철근직경(#6↓, #7↑)으로 구분] $l_d \geq \begin{cases} \left[ \frac{3}{40} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \cdot \frac{0.8}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b}\right)} \right] d_b \text{ (6번 ↓)} \\ \left[ \frac{3}{40} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \cdot \frac{1.0}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b}\right)} \right] d_b \text{ (7번 ↑)} \end{cases}$	□ 12.2.3 : 정착길이 기본식(정밀식) $l_d \geq \left[ \frac{3}{40} \cdot \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \cdot \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b}\right)} \right] d_b$	□ 25.4.2.1(a)/4: 정착길이 기본식(정밀식) $l_d \geq \left[ \frac{3}{40} \cdot \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \cdot \frac{\psi_t \psi_e \psi_s \psi_g}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b}\right)} \right] d_b$

구 분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
증감계수	<input type="checkbox"/> CC-3532.1.2.(i):(1): <b>다발철근</b> 계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1.2 (3bar)</li> <li>○ 1.33 (4bar)</li> </ul> <input type="checkbox"/> CC-3532.1.2.(i)(2)~(3): 증감계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 상부철근 계수 : 1.3</li> <li>○ 초과철근 계수 : <math>A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}</math></li> </ul> <input type="checkbox"/> CC-3532.1.7. : 고강도철근 증가계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Gr.75 &amp; 80 고강도철근 : 1.2</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 12.2.4 : 정착길이 증감계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 상부철근 계수 : 1.3</li> <li>○ 철근Size 계수 : 0.8 (#6 ↓)</li> <li>○ 에폭시 철근 계수 : 1.5 (<math>c_c &lt; 3d_b</math>) 1.2 (기타)</li> <li>○ 경량콘크리트 계수 : 0.75</li> <li>○ 고강도철근 증가계수 : 1.2 또는 ACI 408-03</li> </ul> <input type="checkbox"/> 12.2.5 : 초과철근 계수 ( $A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}$ )	<input type="checkbox"/> 25.4.2.5 : 정착길이 증감계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 좌 동</li> <li>○ 좌 동</li> <li>○ 좌 동</li> <li>○ 좌 동</li> <li>○ 철근 Grade 계수(<math>\psi_g</math>) : 1.15 (Gr80) 1.3 (GR100)</li> </ul> <input type="checkbox"/> 25.4.10.1: 초과철근 계수 ( $A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}$ )
특수 모멘트 골조		<input type="checkbox"/> 21.7.5.2 : 특수모멘트골조 인장철근 정착 (#11 이하 직선철근) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>l_d \geq \begin{cases} 2.5l_{dh} \text{ (기타근)} \\ 3.5l_{dh} \text{ (상부근)} \end{cases}</math></li> <li>○ 여기서, <math>l_{dh} = 21.7.5.1</math>에 따라 산정</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 18.8.5.2 : 특수모멘트골조 인장철근 정착 (#11 이하 직선철근) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 좌 동</li> <li>○ 여기서, <math>l_{dh} = 18.8.5.1</math>에 따라 산정</li> </ul>

구 분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
최소길이	<input type="checkbox"/> CC-3532.3(a): 최소길이( $8d_b$ or 6" 이상)	<input type="checkbox"/> 12.5.1: 최소 정착길이 ( $8d_b$ & 6" 이상)	<input type="checkbox"/> 25.4.3.1: 최소 정착길이 ( $8d_b$ & 6" 이상)
기본식	<input type="checkbox"/> CC-3532.3(b): 정착길이 기본식 <ul style="list-style-type: none"> <li><math>l_{dh} \geq 0.02 \left( \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b</math></li> </ul>	<input type="checkbox"/> 12.5.2 정착길이 기본식 <ul style="list-style-type: none"> <li><math>l_{dh} \geq 0.02 \left( \frac{f_y \psi_e}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b</math></li> </ul>	<input type="checkbox"/> 25.4.3.1(a): 정착길이 기본식 <ul style="list-style-type: none"> <li><math>l_{dh} \geq \frac{1}{55} \left( \frac{f_y \psi_e \psi_r \psi_o \psi_c}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b^{1.5}</math></li> </ul>
증감계수	<input type="checkbox"/> CC-3532.3(c): 정착길이 증감계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>측면피복 계수 : 0.7 (#11 이하)</li> <li>횡보강근 계수 : 0.8 (#11 이하)</li> <li>초과철근 계수 : <math>A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}</math></li> </ul>	<input type="checkbox"/> 12.5.2 : 정착길이 기본식 <ul style="list-style-type: none"> <li>경량콘크리트 계수 : 0.75</li> <li>에폭시 계수 : 1.2</li> </ul> <input type="checkbox"/> 12.5.3 정착길이 증감계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>측면피복 계수 : 0.7 (#11 이하)</li> <li>횡보강근 계수 : 0.8 (#11 이하)</li> <li>초과철근 계수 : <math>A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}</math></li> </ul>	<input type="checkbox"/> 25.4.3.2 : 정착길이 증감계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>경량콘크리트 계수 : 0.75</li> <li>에폭시 계수 : 1.2</li> <li>횡구속 철근 계수 : 1.6(조건 불만족)</li> <li>위치 계수 : 1.25 (직경/위치 불만족)</li> <li><math>f'_c</math> 계수 : <math>\frac{f'_c}{15,000} + 0.6 (&lt; 6 ksi)</math></li> <li>※ 초과철근 계수(<math>A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}</math>) 미적용</li> </ul>
특수 모멘트 골조		<input type="checkbox"/> 21.7.5.1 : 특수모멘트골조 인장철근 정착 (#11 이하 갈고리철근) <ul style="list-style-type: none"> <li><math>l_{dh} \geq \left( \frac{f_y}{65\lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b, 8d_b, 6"</math></li> <li>경량 Con'c: <math>1.25l_{dh}, 10d_b, 7.5"</math></li> </ul>	<input type="checkbox"/> 18.8.5.1 : 특수모멘트골조 인장철근 정착 (#11 이하 갈고리철근) <ul style="list-style-type: none"> <li>좌 동</li> <li>좌 동</li> </ul>



구 분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
자재요건	<input type="checkbox"/> CC-2310 & 2311: 자재요건 제시 <input type="checkbox"/> CC-4331.3: 허용되는 자재 Type	<input type="checkbox"/> 3.5.9 : ASTM A970 자재 명기	<input type="checkbox"/> 20.2.1.6 : ASTM A970 자재 명기
강도요건	<input type="checkbox"/> CC-3532.1.2(a): $\geq 1.25f_y$ 정착성능	<input type="checkbox"/> 12.6.4 : $\geq 1.0f_y$ 정착성능	<input type="checkbox"/> 25.4.5.1 : $\geq 1.0f_y$ 정착성능
제한요건	<input type="checkbox"/> CC-3532.4(b): 제한 요건 <input type="checkbox"/> CC-3532.4(C): 정착 설계 <ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 압축강도 제한 : 6,000 psi</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 12.6.1 : 제한요건 <ul style="list-style-type: none"> <li><math>f_y \leq 60ksi</math></li> <li><math>d_b \leq No.11</math></li> <li><math>A_{brg} \geq 4A_b</math></li> <li><math>c_c \geq 2d_b</math></li> <li><math>s \geq 4d_b</math></li> </ul> <input type="checkbox"/> 12.6.2 : 정착 설계 <ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 압축강도 제한 : 6,000 psi</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 25.4.4.1 : 제한요건 <ul style="list-style-type: none"> <li><math>f_y \leq 80ksi</math></li> <li><math>d_b \leq No.11</math></li> <li><math>A_{brg} \geq 4A_b</math></li> <li><math>c_c \geq 2d_b</math></li> <li><math>s \geq 3d_b</math></li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트 압축강도 제한 삭제 ⇒ 계수변영</li> </ul>
기본식/ 최소길이	<input type="checkbox"/> CC-3532.4(C): 정착 설계 $l_{dt} \geq \begin{cases} 0.016 \left( \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b & \text{(기본식)} \\ 8d_b \text{ and } 6'' & \text{(최소길이)} \end{cases}$	<input type="checkbox"/> 12.6.2 : 정착 설계 $l_{dt} \geq \begin{cases} 0.016 \left( \frac{f_y \psi_e}{\sqrt{f'_c}} \right) d_b & \text{(기본식)} \\ 8d_b \text{ and } 6'' & \text{(최소길이)} \end{cases}$	<input type="checkbox"/> 25.4.4.2 : 정착 설계 $l_{dt} \geq \begin{cases} \frac{1}{75} \left( \frac{f_y \psi_e \psi_p \psi_o \psi_c}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b^{1.5} & \text{(기본식)} \\ 8d_b \text{ and } 6'' & \text{(최소길이)} \end{cases}$
증감계수		<input type="checkbox"/> 12.6.2 : 정착 설계 <ul style="list-style-type: none"> <li>에폭시 철근 계수 : 1.2</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 25.4.4.3: 정착길이 증감계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>에폭시 철근 계수 : 1.2</li> <li>평행 tie철근 계수 : 1.6(조건 불만족)</li> <li>위치 계수 : 1.25 (직경/위치 불만족)</li> <li><math>f'_c</math> 계수 : <math>\frac{f'_c}{15,000} + 0.6 (&lt; 6ksi)</math></li> </ul> <input type="checkbox"/> ※ 초과철근 계수( $A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}$ ) 미적용
특이사항	※ 실증실험후 대구경철근 사용 가능 (Test Data)	※ 항복강도/직경 제한 (원전 적용불가)	

구 분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
최소 정착길이	<input type="checkbox"/> CC-3532.2.3.(b): 정착 설계 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 8" 이상</li> <li>○ 또는, <math>0.0032f_y d_b</math> 이상</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 12.3.1 : 최소 정착길이 (8" 이상)	<input type="checkbox"/> 25.4.9.1 : 최소 정착길이 (8" 이상)
정착길이	<input type="checkbox"/> CC-3532.2.3.(b): 정착 설계 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>l_{dc} \geq 0.02 \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b</math> (설계식)</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 12.3.2 : 정착길이 설계 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>l_{dc} \geq \begin{cases} 0.02 \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b &amp; \text{(설계식1)} \\ 0.0003f_y d_b &amp; \text{(설계식2)} \end{cases}</math></li> </ul>	<input type="checkbox"/> 25.4.9.2 : 정착길이 설계 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>l_{dc} \geq \begin{cases} \frac{1}{50} \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b &amp; \text{(설계식1)} \\ 0.0003f_y d_b &amp; \text{(설계식2)} \end{cases}</math></li> </ul>
증감계수	<input type="checkbox"/> CC-3532.2.3.(b): 정착 설계 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 초과철근 계수 : <math>A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}</math></li> </ul>	<input type="checkbox"/> 12.3.3 : 정착길이 증감계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 경량콘크리트 계수 : 0.75</li> <li>○ 초과철근 계수 : <math>A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}</math></li> </ul>	<input type="checkbox"/> 25.4.9.3 : 정착길이 증감계수 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 좌 동</li> <li>○ 횡구속 계수 : 0.75 (신규)</li> </ul> <input type="checkbox"/> 25.4.10.1: 초과철근 계수 ( $A_{\text{소요}}/A_{\text{배근}}$ )
특이사항	※ 확대머리철근/기계적 정착 효과 고려(X)		

구 분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
콘크리트 압축강도	<input type="checkbox"/> CC-3532(d) : 최대 $f'_c \leq 10 \text{ ksi}$	<input type="checkbox"/> 12.1.2 : 최대 $f'_c \leq 10 \text{ ksi}$	<input type="checkbox"/> 25.4.1.4 : 최대 $f'_c \leq 10 \text{ ksi}$
허용직경	<input type="checkbox"/> CC-3532(b): #11(36mm)까지 허용	<input type="checkbox"/> 12.14.2.1 : #11(36mm)까지 허용 ○ 예외 : 12.16.2 (압축철근 이형이음) 15.8.2.3 (기초 압축철근)	<input type="checkbox"/> 25.5.1.1 : #11(36mm)까지 허용 ○ 예외 : 25.5.5.2/3 (압축철근 이형이음) 16.3.5.4 (기초 압축철근)
비접촉 이음조건	<input type="checkbox"/> CC-3532(b) : 비접촉 이음 조건 ○ $s \leq \begin{cases} 0.2l_{st} \\ 6'' \end{cases}$	<input type="checkbox"/> 12.14.2.3 : 비접촉 이음 조건 ○ $s \leq \begin{cases} 0.2l_{st} \\ 6'' \end{cases}$	<input type="checkbox"/> 25.5.1.3 : 비접촉 이음 조건 ○ $s \leq \begin{cases} 0.2l_{st} \\ 6'' \end{cases}$
겹침이음 길이	<input type="checkbox"/> CC-3532.1.1: 인장철근 겹침이음 길이 ○ A급 겹침이음 $\geq 1.0l_d$ ○ B급 겹침이음 $\geq 1.3l_d$	<input type="checkbox"/> 12.15.1 : 인장철근 겹침이음 길이 ○ A급: $l_{st} \geq \begin{cases} 1.0l_d \\ 12'' \end{cases}$ ○ B급: $l_{st} \geq \begin{cases} 1.3l_d \\ 12'' \end{cases}$ ※ $l_d$ : 12.2.5의 초과철근 계수를 미적용한 12.2.1에 따라 계산된 정착길이	<input type="checkbox"/> 25.5.1.4 : 인장철근 겹침이음 길이 ○ A급: $l_{st} \geq \begin{cases} 1.0l_d \\ 12'' \end{cases}$ ○ B급: $l_{st} \geq \begin{cases} 1.3l_d \\ 12'' \end{cases}$
A등급 정의	-	<input type="checkbox"/> 12.15.2 : A급 겹침이음 정의 ○ $(A_{배근}/A_{소요}) \geq 2.0$ ○ $(A_{이음}/A_{전체}) \leq 0.5$	<input type="checkbox"/> 25.5.2.1 : A급 겹침이음 정의 ○ $(A_{배근}/A_{소요}) \geq 2.0$ ○ $(A_{이음}/A_{전체}) \leq 0.5$
이형철근 이음	<input type="checkbox"/> CC-3532.1.6: 이형철근 겹침이음길이 ○ $l_{st-이형} \geq l_{st-대구경}$ (대구경철근 기준으로 산정)	<input type="checkbox"/> 12.15.3 : 이형 인장철근 겹침이음길이 ○ $l_{st-이형} \geq \max. \begin{cases} l_{d-대구경} \\ l_{st-소구경} \end{cases}$	<input type="checkbox"/> 25.5.2.2 : 이형 인장철근 겹침이음길이 ○ $l_{st-이형} \geq \max. \begin{cases} l_{d-대구경} \\ l_{st-소구경} \end{cases}$

구 분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
압축철근 이음길이 설계식	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ CC-3532.2.2: 압축철근 겹침이음 길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>l_{sc} \geq 0.0005f_y d_b</math> (<math>f_y \leq 60 \text{ ksi}</math>)</li> <li>○ <math>l_{sc} \geq 0.0009f_y d_b - 24</math> (<math>f_y &gt; 60 \text{ ksi}</math>)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 12.16.1 : 압축철근 겹침이음길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>l_{sc} \geq 0.0005f_y d_b</math> (<math>f_y \leq 60 \text{ ksi}</math>)</li> <li>○ <math>l_{sc} \geq 0.0009f_y d_b - 24</math> (<math>f_y &gt; 60 \text{ ksi}</math>)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 25.5.5.1 : 압축철근 겹침이음길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>f_y \leq 60 \text{ ksi} \Rightarrow l_{sc} \geq 0.0005f_y d_b</math></li> <li>○ <math>f_y \leq 80 \text{ ksi} \Rightarrow l_{sc} \geq 0.0009f_y d_b - 24</math></li> <li>○ <math>f_y &gt; 80 \text{ ksi} \Rightarrow l_{sc} \geq \begin{cases} 0.0009f_y d_b - 24 \\ l_{st} (= 1.0l_d \text{ or } 1.3l_d) \end{cases}</math></li> </ul> </li> </ul>
최소 이음길이	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ CC-3532.2.2: 압축철근 겹침이음 길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 최소 이음길이 : 12"</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 12.16.1 : 압축철근 겹침이음길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 작 동</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 25.5.5.1 : 압축철근 겹침이음길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 작 동</li> </ul> </li> </ul>
증감 계수	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 12.16.1 : 압축철근 겹침이음길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <u>저강도 콘크리트</u> (<math>f'_c &lt; 3 \text{ ksi}</math>) 계수 : 1/3</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 25.5.5.1 : 압축철근 겹침이음길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 작 동</li> </ul> </li> </ul>
이경 압축철근 이음길이	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ CC-3532.2.2: 이경 압축철근 겹침이음길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ #11이하 철근의 겹침이음 허용</li> <li>○ 단, 소구경 + #14,18은 겹침이음 허용</li> <li>○ <math>l_{st-이경} \geq \max. \begin{cases} l_d-대구경 \\ l_{st}-소구경 \end{cases}</math></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 12.16.2 이경 압축철근 겹침이음길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ #11이하 철근의 겹침이음 허용</li> <li>○ 단, 소구경 + #14,18은 겹침이음 허용</li> <li>○ <math>l_{st-이경} \geq \max. \begin{cases} l_d-대구경 \\ l_{st}-소구경 \end{cases}</math></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 25.5.5.2~4 : 이경 압축철근 겹침이음길이                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ #11이하 철근의 겹침이음 허용</li> <li>○ 단, 소구경 + #14,18은 겹침이음 허용</li> <li>○ <math>l_{st-이경} \geq \max. \begin{cases} l_d-대구경 \\ l_{st}-소구경 \end{cases}</math></li> </ul> </li> </ul>



구 분	ASME B&PV CC-19년 (KEPIC SNB)	ACI 349-13년 (KEPIC SNC)	ACI 318-19년 (KEPIC SGB)
강도요건	-	<input type="checkbox"/> 12.14.3.2 : $\geq 1.25f_y$ 이음성능	<input type="checkbox"/> 25.5.7.1 : $\geq 1.25f_y$ 이음성능
엇갈림 요건	<input type="checkbox"/> CC-3532 (e): 기계적이음 Stagger 요건 <ul style="list-style-type: none"> <li>적용기준(<math>0.9f_y</math>) : 기계적이음 변형률 <math>\geq</math> 철근 변형률의 1.5배</li> <li>최대 이음량 : 동일단면 철근의 <math>\frac{1}{2}</math> 이하</li> <li>최소 엇갈림 길이 : 30인치 (760mm)</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 12.15.5 : $\geq 1.25f_y$ 요건을 만족하지 못하는 #5이하 철근의 기계적/용접 이음 <ul style="list-style-type: none"> <li>최소 엇갈림 길이 : 24"</li> </ul> <input type="checkbox"/> 12.15.6 : Tie 부재의 인장철근 이음 <ul style="list-style-type: none"> <li>이음방법 : 기계적 이음 또는 용접이음 (<math>\geq 1.25f_y</math>)</li> <li>최소 엇갈림 길이 : 30"</li> </ul>	<input type="checkbox"/> 14년 개정판 삭제  <input type="checkbox"/> 25.5.7.4 : Tie 부재의 인장철근 이음 <ul style="list-style-type: none"> <li>이음방법 : 기계적 이음 또는 용접이음 (<math>\geq 1.25f_y</math>)</li> <li>최소 엇갈림 길이 : 30"</li> </ul>

# III

## 철근 단면설계 최적화

3.1 철근 설계기준

3.2 철근설계 최적화

### 1. 고강도철근 적용에 따른 부재단면 철근물량 감소 (긍정적 효과)

- 부재단면의 공칭강도( $S_n$ ) 발현에 필요한 철근단면적( $A_s$ ) 절감 가능
- 철근항복강도 33%증가시(Gr60→Gr80) 철근단면적 최대 25% 절감가능

$$S_n \propto A_s \cdot f_y \rightarrow A_s \propto \frac{S_n}{f_y}$$

✓ 압축(휨압축 포함) 철근 :  $P_n = 0.85f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$

✓ 인장(휨인장 포함) 철근 :  $P_n = f_y A_{st}$

✓ 전단 철근 :  $V_n = V_c + V_s = V_c + \frac{A_v f_y t d}{s}$  --- (1방향)

$$v_n = v_c + v_s = v_c + \frac{A_v f_y t}{b_o s}$$
 ----- (2방향)

✓ 비틀림 철근 :  $T_n = \min. \begin{cases} \frac{2A_o A_t f_y t}{s} \cos\theta \\ \frac{2A_c A_l f_y}{P_h} \tan\theta \end{cases}$

✓ 전단마찰 철근 :  $V_n = \mu A_v f_y$

### 2. 부재단면 철근 설계물량 절감 제약 (제한 효과)

- 구조적 측면에서 철근항복강도의 역수( $1/f_y$ )에 비례하여 철근단면적( $A_s$ ) 절감 가능
- 사용성 측면에서 최소철근( $\rho, A_{s,min}$ ) 및 최대 철근간격( $s$ )이 제한요소로 작용

#### ✓ 최소철근량( $\rho, A_{s,min}$ )

- RCB 기초 (ASME CC) : 0.18% 이상 ( $60ksi/f_y$  고강도철근 감소계수 적용)
- RCB 쉘/돔 (ASME CC) : 0.2% 이상
- 안전성관련 구조물 기초 (ACI 349) :  $(f'_t/f'_s)A$  이상 (4ft 이상인 경우)
- 안전성관련 구조물 벽체 (ACI 349) :  $\rho_{t,l} \geq 0.25\%$

$$\rho_l \geq 0.25\% + \left(2.5 - \frac{h_w}{l_w}\right) (\rho_t - 0.25\%) \text{ 이상}$$

#### ✓ 철근의 간격 ( $s$ )

- RCB 기초 (ASME CC) : 18" 이상
- 안전성관련 구조물 기초 (ACI 349) : 18" / 3h
- 안전성관련 구조물 벽체 (ACI 349) : 18" / 3h /  $l_w/5$ (수평) or  $l_w/3$ (수직)

### 3. 고강도철근 적용에 따른 정착/이음 길이 증가 (부정적 효과)

➤ 철근의 항복강도( $f_y$ ) 증가에 따른 정착/이음 길이 증가

$$(l_d, l_s) \propto \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \cdot d_b \quad \text{또는} \quad \propto f_y \cdot d_b$$

- ✓ 직선 인장철근 정착( $l_d$ ), 갈고리 인장철근 정착( $l_{dh}$ ), 확대머리 인장철근 정착( $l_{dt}$ )
- ✓ 직선 압축철근 정착( $l_{dc}$ )
- ✓ 인장철근 이음( $l_{st}$ ), 압축철근 이음( $l_{sc}$ )

➤ 고강도철근 적용계수(1.15~1.3) 적용에 따른 정착/이음 길이 증가

- ✓ 직선 인장철근 정착( $l_d$ )
- ✓ 인장철근 이음( $l_{st}$ ) 및 압축철근 이음( $l_{sc}$ ) – ACI 318-19

➤ Gr.60에서 Gr.80으로 고강도철근 적용시

- ✓ ASME-CC / ACI 349 : 정착/이음 길이 1.60배 증가 (← 1.33\*1.20)
- ✓ ACI 318-19 : 정착/이음 길이 1.53배 증가 (← 1.33\*1.15)



### 4. 설계기준(ACI 318) 변경에 따른 대구경철근 정착길이 증가 (부정적 효과)

- ACI 318 지위 : ACI 349의 참조코드 / 발간중인 19년판은 ACI 318-14를 기초하여 작업.
- ✓ ACI 318-19 일부 요건이 추가 반영될 수 있으며, 향후 이에 대한 대비가 필요
- ✓ 철근직경의 영향 증가로 대구경(#9 이상)의 갈고리/확대머리 철근의 정착길이 증가

$$(l_{dh}, l_{dt}) \propto \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} d_b$$
$$\rightarrow \propto \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} d_b^{1.5} \text{ (ACI 318-19)}$$

- ✓ 대 상 : 갈고리 인장철근 정착길이 ( $l_{dh}$ )  
확대머리 인장철근 정착길이 ( $l_{dt}$ )

➤ 기존 설계식(ASME-CC/ACI 349) 대비 개정된 ACI 318의 **갈고리/확대머리 철근 정착길이**

구 분		ASME-CC / ACI 349	ACI 318-19
정 착 길 이	갈고리 인장철근( $l_{dh}$ )	$\frac{1}{63} \psi_e \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b$	$\frac{1}{75} \psi_e \psi_r \psi_o \psi_c \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b^{1.5}$
	확대머리 인장철근( $l_{dt}$ )	$\frac{1}{50} \psi_e \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b$	$\frac{1}{55} \psi_e \psi_p \psi_o \psi_c \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b^{1.5}$
	직선 인장철근( $l_d$ )	$\frac{3}{40} \psi_e \psi_t \psi_s \left( \frac{d_b}{c_b + K_{tr}} \right) \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b$	$\frac{3}{40} \psi_e \psi_t \psi_s \psi_g \left( \frac{d_b}{c_b + K_{tr}} \right) \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b$

➤ ACI 318-19 개정 전후 비교 (모든 **증감계수 1.0**, 단위 :  $f_y/\sqrt{f'_c}$ )

직경	$d_b$	$d_b^{1.5}$	$\left( \frac{d_b^{1.5}}{d_b} \right)$	갈고리 ( $l_{dh}$ )		확대머리 ( $l_{dt}$ )		직선철근 ( $l_d$ )
				변경전	변경후	변경전	변경후	
#9	1.125	1.193	+ 6.0%	0.018	0.019	0.015	0.016	0.084
#10	1.250	1.398	+11.9%	0.020	0.022	0.017	0.019	0.094
#11	1.375	1.612	+17.2%	0.022	0.026	0.018	0.021	0.103
#14	1.750	2.315	+32.3%	0.028	0.037	0.023	0.031	0.131
#18	2.250	3.375	+50.0%	0.036	0.054	0.030	0.045	0.169

### 1. 부재단면 최소철근 및 철근간격의 설계영향 최소화

#### ➤ 최소 철근 ( $\rho, A_{s,min}$ )

✓ 부재단면내 철근량 : (부재단면내 철근의 총단면적) / (부재 단면적)

✓ 부재단면내 철근의 총단면적 : **철근단면적** \* 단면내 철근수량

→ **철근단면적**과 **철근수량** 조정을 통한 **최적의 철근면적** 결정

#### ➤ 철근 간격 ( $s$ )

✓ 철근 간격 조정을 통한 철근량 조정이 최상의 설계방안

✓ 최대 철근간격요건, 항공기중들 등 초과하중 안전해석 영향으로 간격 조정에 한계

→ **철근단면적** 조정을 통한 **소요 철근면적** 결정

#### ➤ 호칭별 **철근단면적 편차** 최소화를 통해 **철근 단면설계** 효율성 향상

→ #10(32mm) ~ #18(57mm)의 호칭치수가 다양한 KS자재 적용 가능성 검토

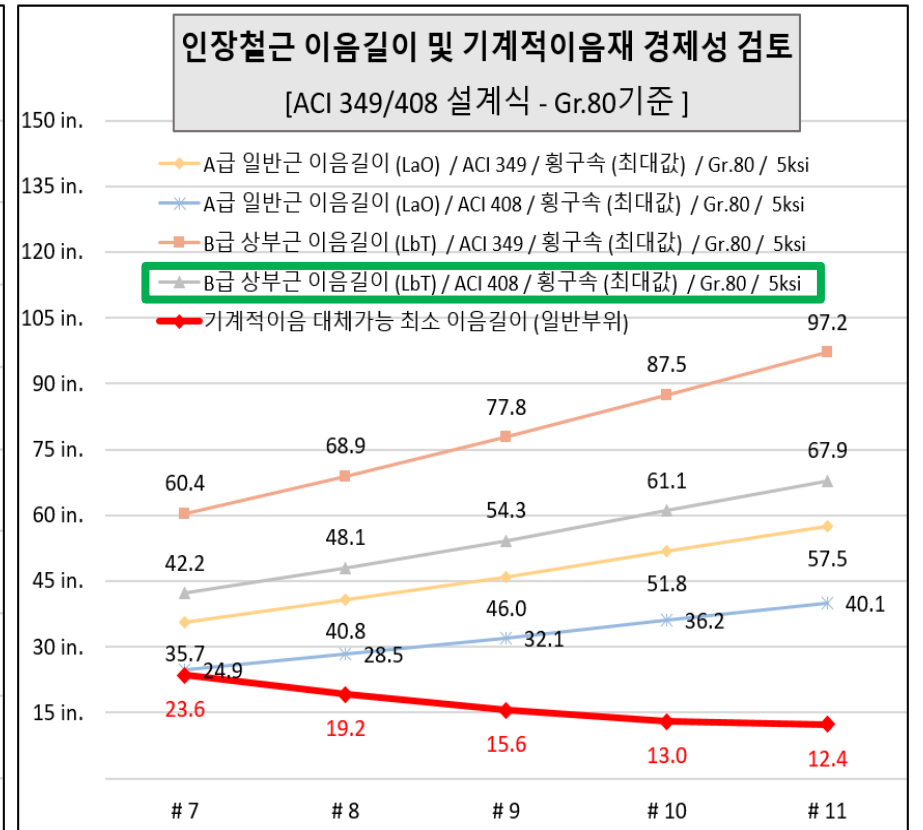
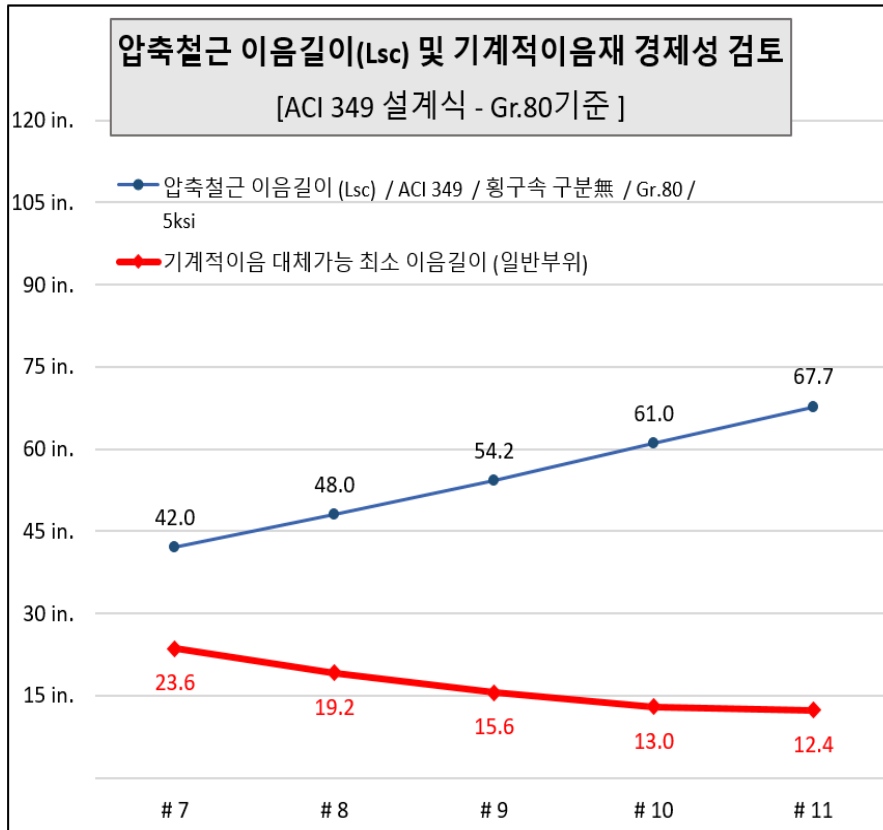
➤ ASTM철근과 KS철근의 단면적 비교

ASTM A706/615			
호칭 mm(#)	단면적 mm <sup>2</sup>	편차 mm <sup>2</sup>	편차율 %
25 (#8)	510		
29 (#9)	645	135	20.9
32(#10)	819	174	21.2
36(#11)	1,006	187	18.6
43(#14)	1,452	446	30.7
57(#18)	2,581	1129	43.7

KS D3504			
호칭 mm(#)	단면적 mm <sup>2</sup>	편차 mm <sup>2</sup>	편차율 %
25	506.7		
29	642.4	136.7	21.1
32	794.2	151.8	19.1
35	956.6	162.4	17.0
38	1,140	183.4	16.1
41	1,340	200	14.9
43	1,452	112	7.7
51	2,027	575	28.4
57	2,579	552	21.4

### 2. 고강도철근 적용시 정착/이음 길이 설계최적화 방안

- 과도한 정착길 이로 인한 설계/시공 개선 부위 도출 및 확대머리철근 등을 활용한 최적상세 개발 (대형 개구부 주변 등)
- 철근의 겹침이음의 경제성/시공성 저하 → 기계적이음의 활용 범위 확대





### ➤ 공사비 산정 (철근/기계적이음)

- ✓ 기계적이음 시공 단가 : 신고리 5,6 계약용 설계서 참조 (직경별 개소당 시공단가)
- ✓ 철근 시공단가 : 신고리 5,6 계약용 설계서 및 철근 구매계약서 참조 (부위별 톤당 시공단가)

구분	규격1	규격2	단위	자재비	설치비 (노무+경비)	공사비
RB_1	#3-11	일반부위	톤	1,030,000	624,862	<b>1,654,862</b>
RB_2	#3-11	TGB외벽/ Pedestal	톤	1,030,000	666,421	<b>1,696,421</b>
RB_3	#3-11	RCB내부	톤	1,030,000	749,538	<b>1,779,538</b>
MS_7	#7	T-수직/수평	EA	38,194	34,136	<b>72,330</b>
MS_8	#8	T-수직/수평	EA	40,890	36,270	<b>77,160</b>
MS_9	#9	T-수직/수평	EA	41,235	38,404	<b>79,639</b>
MS_10	#10	T-수직/수평	EA	42,694	41,605	<b>84,299</b>
MS_11	#11	T-수직/수평	EA	56,521	42,671	<b>99,192</b>
MS_14	#14	T-수직/수평	EA	80,312	49,072	<b>129,384</b>
MS_18	#18	T-수직/수평	EA	98,969	57,608	<b>156,577</b>

주1) 철근 자재비 : KS D3504 SD500 715,000원  
 ASTM A615 GR.80 1,000,000원

주2) 공사비 기준 : 신고리 5,6호기 계약용 설계서 (철근 및 기계적이음재 시공비)

### ➤ 기계적이음 대체가능 이음길이 산정

- ✓ 기계적이음 시공단가 : 직경별 개소당 시공단가(원/EA) 적용
- ✓ 철근 시공단가 : 길이당 시공단가(원/in.) 적용 (톤당 시공단가\*단위중량)
- ✓ 대체가능 이음길이 산정 :
  - 목적 : 철근 겹침이음(양방향 철근)의 기계적 이음 대체시 경제성 효과 검토
  - 기계적이음시 양방향 철근의 겹침이음 불요 → (기계적이음 시공단가) / (2\*철근 길이당 시공단가)
  - 기계적이음과 겹침이음의 경제적 임계점을 의미하는 대체가능 최소 이음길이를 산정함

직경	철근 단위중량		철근 시공단가		기계적이음 시공단가	대체가능 이음길이 (양방향 철근 고려)	비고
	① lb/in.	② kg/in.	③ 원/kg	④ 원/in	⑤ 원/EA	⑥ in/EA	
#7	2.044	0.9271	1,654.862	1,534.2	72,330	23.6	① : ASTM A615 참조
#8	2.670	1.2111	1,654.862	2,004.2	77,160	19.2	② : ①×0.453592 kg/lb
#9	3.400	1.5422	1,654.862	2,552.1	79,639	15.6	③ : 신고리 56 설계서 참조 ④ : ③ × ②
#10	4.303	1.9518	1,654.862	3,230.0	84,299	13.0	⑤ : 신고리 56 설계서 참조
#11	5.313	2.4099	1,654.862	3,988.1	99,192	12.4	⑥ : ⑤ ÷ (2×④)

### ➤ **겹침이음길이 설계식**

#### ✓ **겹침이음길이 산정식**

분류	등급	겹침이음길이 산정식	최소길이 요건
압축철근	-	$l_{sc} = (0.0009f_y - 24)d_b$	-
인장철근	A급	A급 이음 ( $l_a$ ) = $1.0l_d$	12인치
	B급	B급 이음 ( $l_b$ ) = $1.3l_d$	12인치

#### ✓ **정착길이 산정식**

구분	ACI 318 기준	ACI 408 기준
겹침이음 길이 산정식	$l_{d-ACI318} = 1.2 \times \left[ \frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_s}{\left( \frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right] d_b$ (인치)	$l_{d-ACI408} = \left[ \frac{\left( \frac{f_y}{\sqrt[4]{f'_c}} - 1970\omega \right) \psi_t \psi_s}{62 \left( \frac{c\omega + K_{tr}}{d_b} \right)} \right] d_b$ (인치)
최소길이 요건	12인치	12인치, $16d_b$

### 3. 설계기준(ACI 318) 개정에 따른 대구경철근 정착설계 최적화 방안

- 대구경 갈고리철근의 과도한 정착길 이로 인한 설계/시공 개선필요 부위 도출
  - 갈고리철근의 최적상세 개발  
  
(적절한 횡보강 및 확대머리철근 적용 등 최적설계(안) 개발)
- 대구경 철근 대신 다양한 호칭의 철근을 적용한 철근 단면설계 최적화 구현
  - 확대머리철근 도입과 최적단면의 철근 적극 활용

# IV

## KS 철근자재 적용성 검토

4.1 철근자재 설계 현황

4.2 철근자재 국내외 표준 비교



- 설계기준 : ASME-CC (Sec. III Div.2) – 2019년 개정판 발행 ('19.7.1)
  - ✓ 적용 항목 : CC-2310, CC-2320, D2-VIII-1430
  - ✓ 철근 자재 : ASTM A615 또는 A706 (Gr.80 허용)

1. 기계적 특성 : ASTM A615 철근자재의 기계적 요건 추가 (ASTM A706 준용)

- ✓ 최대 항복강도 :  $f_{y\_max} \leq f_y + 18,000 \text{ psi (125MPa)}$
- ✓ 최소 실제 인장강도 :  $f_{tk} \geq 1.25 f_{yk}$
- ✓ 최소 파단 연신률(8", %) :

직경( $d_b$ )	Gr.60 (420MPa)	Gr.80 (550MPa)
#3(10) ~ #6(19)	14%	12%
#7(22) ~ #11(36)	12%	
#14(43), #18(57)	10%	

## 2. 화학적 성분 (최소 질량비, %)

✓ ASTM A615 자재의 Product Verification Analysis (ASTM A706 준용)

구분	ASME-CC(19)	ASTM A706(16)	ASTM A615(18)
탄소	0.33%	좌 동	-
망간	1.55%	1.56%	-
황(S)	0.053%	좌 동	-
인(P)	0.043%	좌 동	0.075%
규소(Si)	0.55%	좌 동	-

### 3. 용접철근 추가 요건 :

- ✓ 철근의 용접은 D2-VIII-1430 요건에 따름 (ASTM A615 / A706)
- ✓ 탄소당량( $C_e$ )에 따라 최소 Preheat 및 Interpass 온도 결정 [표 D2-VIII-1430-1]
  - 산정식 :  $C_e = C + \frac{Mn}{6} + \left( \frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{10} \right) - \left( \frac{Mo}{50} + \frac{V}{10} \right)$
- ✓ 용접용 ASTM A615 자재의 최소 화학성분

ladle[Heat] 분석 / 최소 질량비 (%)

구분	ASME-CC(19)	ASTM A706(16)	ASTM A615(18)
탄소당량( $C_e$ )	-	0.55%	-
탄소(C)	0.30%	-	-
망간(Mn)	1.50%	-	-
황(S)	0.045%	-	-
인(P)	0.035%	-	0.06%
규소(Si)	0.50%	-	-

- 설계기준 : ACI 349 – 2019년 개정판 발간 작업중
- ✓ 적용 항목 : ACI 349 3.5 Steel Reinforcement / ANSI/AWS D1.4 철근 용접
- ✓ 철근 자재 : ASTM A615(탄소강)/A706(저합금강)/A995(SS강): Gr.80 허용 예정

1. 기계적 특성 : 철근 구매시방서에 ASTM A615 철근의 기계적 요건 추가  
 격납구조물과 동일 (ASTM A706 준용)

2. 화학적 성분 : ASTM A615 또는 A706 철근요건에 따름 (별도 규정 없음)

Product 분석 / 최소 질량비 (%)

구분	ACI 349	ASTM A706(16)	ASTM A615(18)
탄소(C)	-	0.33%	-
망간(Mn)	-	1.56%	-
황(S)	-	0.053%	-
인(P)	-	0.043%	0.075%
규소(Si)	-	0.55%	-

3. 용접용 철근 : ASTM A706 허용 / 기타 철근은 ANSI/AWS D1.4 요건 추가

- 설계기준 : **ACI 318** – 2019년 개정판 발행 ('19.6.1)
- ✓ 적용 항목 : **ACI 318 3.5 Steel Reinforcement** / **ANSI/AWS D1.4** 철근 용접
- ✓ 철근 자재 : ASTM **A615**(탄소강)/**A706**(저합금강) 등 5개 표준: **Gr.100** 허용

## 1. 기계적 특성

- ✓ ASTM **A706 GR.100** 철근의 기계적 특성 요건 추가

구 분	GR.60	GR.80	GR.100	비 고
최소 항복강도 [ $f_y$ ]	60 ksi	80 ksi	100 ksi	
최대 항복강도 [ $f_{y\_max}$ ]	78 ksi	98 ksi	118 ksi	
최소 인장강도 [ $f_t$ ]	80 ksi	100 ksi	117 ksi	
실제 인장강도비 [ $k = (f_{tk}/f_{yk})$ ]	≥1.25		≥1.17	
파단 연성률 (8 in., %)	10~14%	10~12%	10%	
굽힘시험 직경(180°)	3d~8d	3.5d~9d	-	



## 1. 기계적 특성 (계속)

- ✓ ASTM **A706** 철근의 **최소 전체 연신률**(Total/Uniform Elongation,  $A_{gt}, \epsilon_u$ ) 요건 추가

직경 ( $d_b$ )	GR.60	GR.80	GR.100	비 고
#3(10) ~ #10(32)	9%	7%	6%	ASTM A706(16) X
#11(36), #14(43), #18(57)	6%			ASTM A706(16) X

- ✓ 비내진 시스템에 사용되는 ASTM **A615** 철근의 기계적 요건 추가

구 분	GR.40	GR.60	GR.80	GR.100	비 고
최소 인장강도 [ $f_t$ ]	60ksi	80ksi	100ksi	100ksi	ASTM A615(18) 기준
실제 인장강도비 [ $k = (f_{tk}/f_{yk})$ ]	$\geq 1.15$				ASTM A615(18) X

- ✓ 내진 시스템에 사용되는 ASTM **A615 GR60 이하** 철근의 기계적 요건 추가

- 최대 항복강도( $f_{y\_max}$ ), 최소 실제 인장강도비( $k$ ) 및 파단 연신률(8''): ASTM **A706**
- **최소 전체 연신률**(Total/Uniform Elongation,  $A_{gt}, \epsilon_u$ ) 요건 추가

☞ 9% (#3~10) / 6% (#11,14,18)

2. 화학적 성분 : ACI 318에는 별도의 화학성분을 규정하지 않음.

(철근자재 표준에 따름 - ASTM A615 or A706)

Product 분석 / 최소 질량비 (%)

구분	ASTM A706(16)	ASTM A615(18)	비 고
탄소당량(Ce)	0.55%	-	Heat(ladle) 분석
탄소(C)	0.33%	-	-
망간(Mn)	1.56%	-	-
황(S)	0.053%	-	-
인(P)	0.043%	0.075% (0.06%)	Product 분석 Heat(ladle) 분석
규소(Si)	0.55%	-	-

※ 탄소당량,  $C_e = C + \frac{M_n}{6} + \left( \frac{C_u}{40} + \frac{N_i}{20} + \frac{C_r}{10} \right) - \left( \frac{M_o}{50} + \frac{V}{10} \right)$

3. 용접용 철근 : ASTM A706 허용 / 철근 용접은 AWS D1.4에 따름 (26.6.4)

➤ 철근 강도

✓ 최대 항복강도 :  $f_{y\_max} \leq f_y + 18,000 \text{ psi (125MPa)}$

✓ 최소 실제 인장강도 :  $f_{tk} \geq 1.25 f_{yk}$

구 분	ASTM A706-16		KS D3504-16		
	GR.60 (420)	GR.80 (550)	400S	500S	600S
최소 항복강도 $[f_y]$ , MPa	420	550	400	500	600
최대 항복강도 $[f_{y\_max}]$ , MPa	$\leq f_y + 125 \text{MPa}$		$\leq f_y + 120 \text{MPa}$		
최소 인장강도 $[f_t]$ , MPa	550 $1.33f_y$	690 $1.25f_y$	-		
실제 인장강도비 $[k = (f_{tk}/f_{yk})]$	$\geq 1.25$		좌 동		

➤ 최소 파단 연신률(8" , %)

구 분	ASTM A706-16		KS D3504-16		
	GR.60 (420)	GR.80 (550)	400S	500S	600S
10 (#3) ~ 19 (#6)	14	12	16	12	10
22 (#7)	12	12	16	12	10
25 (#8) ~ 32 (#10)	12	12	18	14	10
36 (#11) / 35	12	12	16	12	8
43 (#11), 57 (#18) / 38 ,41, 51	10	10	14	10	6

➤ 전체 연신률(Total/Uniform Elongation,  $A_{gt}, \epsilon_u$ ) 요건 추가 (ACI 318-19 신규내용)

구 분	ACI 318-19			KS D3504-16 (부속서A)		
	GR.60 (420)	GR.80 (550)	GR.100 (700)	400S	500S	600S
#3(10) ~ #10(32)	9%	7%	6%	7% (C등급 기준)		
#11(36), #14(43), #18(57)	6%			8% (D등급 기준)		

➤ 굽힘 시험

붉은색 : 90도

구 분	ASTM A706-16		KS D3504-16		
	GR.60 (420)	GR.80 (550)	400S	500S	600S
10 (#3) ~ 16 (#5)	3d	3.5d	5d	5d	5d
19 (#6) ~ 25 (#8)	4d	5d	5d	5d	5d
29 (#9) ~ 36 (#11) / 35	6d	7d	5d	6d	6d
43 (#11), 57 (#18) / 38 ,41, 51	8d	9d	5d	6d	6d

- ASTM A706 : 탄소당량( $C_e$ ) =  $C + \frac{Mn}{6} + \left(\frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{10}\right) - \left(\frac{Mo}{50} + \frac{V}{10}\right)$
- KS D3504 : 탄소당량( $C_{eq}$ ) =  $C + \frac{Mn}{6} + \left(\frac{Cr+V+Mo}{5}\right) + \left(\frac{Cu+Ni}{15}\right)$

구 분	ASME-CC(19) Heat 분석	ASTM A706(16) Product 분석	KS D3504-16 (Cast 분석)			
			400S	500S	600S	
					D35 이하	D35 초과
탄소당량(Ce)	-	0.55%	0.55%	0.60%	0.67%	0.70%
탄소(C)	0.30%	0.33%	0.29%	0.32%	0.37%	0.40%
망간(Mn)	1.50%	1.56%	1.50%	1.80%		
황(S)	0.045%	0.053%	0.040%			
인(P)	0.035%	0.043%	0.040%			
규소(Si)	0.50%	0.55%	0.30%			



**Thank you !**

**Any Question?**

한수원중앙연구원 이병수 차장

✓ Email : [lbs.6985@khnp.co.kr](mailto:lbs.6985@khnp.co.kr)

[lbs6985@hanmail.net](mailto:lbs6985@hanmail.net)

✓ 핸드폰 : 010-3905-8836