

# 고슬럼프 콘크리트 원전 격납건물 적용성 검토

## ACI 347 vs CRIRA Report 108 vs DIN 18218

한국수력원자력(주) 중앙연구원  
플랜트설계연구소 구조설계그룹  
노재명



# 목 차

- 01 개요
- 02 CLP 거꾸집
- 03 거꾸집 측압
- 04 결론

# 1 개요

- RCB 외벽 공극?
- 고슬럼프 콘크리트 사용 사례

# RCB 외벽 공극?



2019. 7. 8

한빛원전 3·4호기 격납건물 공극 190곳 발견



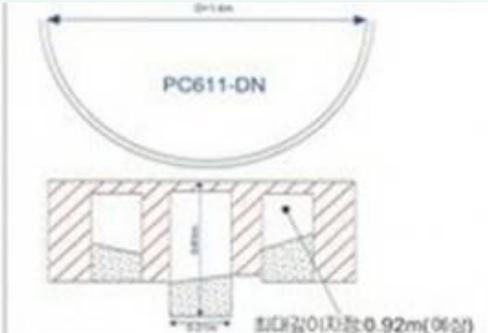
2019. 7. 7

한빛 3·4호기 격납건물서 구멍 190곳...최대 크기 90cm



2019. 7. 8

영광 한빛원전 최대 규모 공극 발견에 주민 '불안'



**콘크리트 내부 공극의 원인은 전적으로 시공불량이고,  
시공사와 감독자에게만 책임을 전가할 것인가?**

친환경 에너지 기업



한국수력원자력주

# 고슬럼프 콘크리트 사용 사례

- 프랑스 Civaux 2 격납건물 Con'c 슬럼프 : 19 cm (7.5±1.5 in.)
- 인도 Karga 1&2 격납건물 Con'c 슬럼프 : 19 cm (7.5±1.5 in.)
- 공통점 : Steel Liner 없는 노형

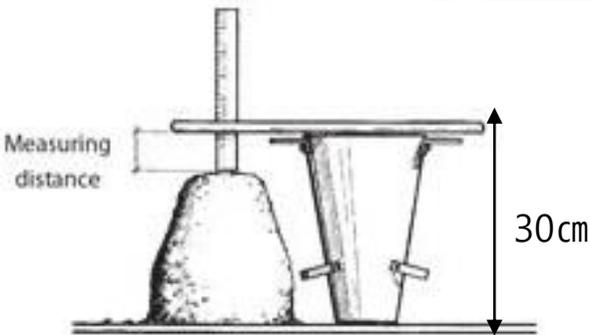


Figure 1: Slump Test

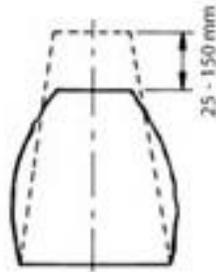


Figure 2: Low Slump (Stiff)

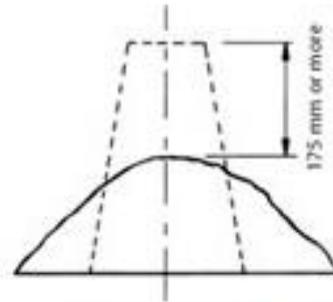


Figure 3: High Slump (Flowable)



- 국내 원전 격납건물 Con'c 슬럼프 : 7.5~12.5 cm (3~5 in.)
- UAE 원전 격납건물 Con'c 슬럼프 : 11.25~15 cm (4.5~6 in.)
- Containment Liner Plate를 콘크리트 거푸집으로 사용

# 2

## CLP 거푸집 (Containment Liner Plate)

- KEPIC SNB 거푸집 설계
- CLP 제원과 허용응력
- CLP 허용 최대 측압

# KEPIC SNB 4251 거푸집 설계

## SNB 4251.2 거푸집 설계

거푸집 설계에 관한 시공시방서는 **ACI 347**을 근거로 하여야 하며, 다음사항들을 고려해야 한다.

- (1) 콘크리트 타설속도와 방법
- (2) 콘크리트의 밀도
- (3) 수직하중, 수평하중, 충격하중을 포함하는 시공하중

## SNB 4251.3 거푸집으로서의 라이너의 사용

거푸집으로서 강재 격납구조 라이너를 사용할 때에는 **SNB 4522**의 라이너 공차요건을 초과하지 않도록 라이너 지지대와 타설 수평면의 높이에 대해 특별한 주의가 필요하다.

## SNB 4522 성형 허용오차 요약

Liner Shell (Wall)

최대지름과 최소지름의 차이(매 12ft 높이마다 30°간격 측정) < 지름의 0.5 %

Bottom과 Spring line의 수직오차 < 높이의 1/200

Liner Head (Dome) 오차 < 내부지름의 1.25%

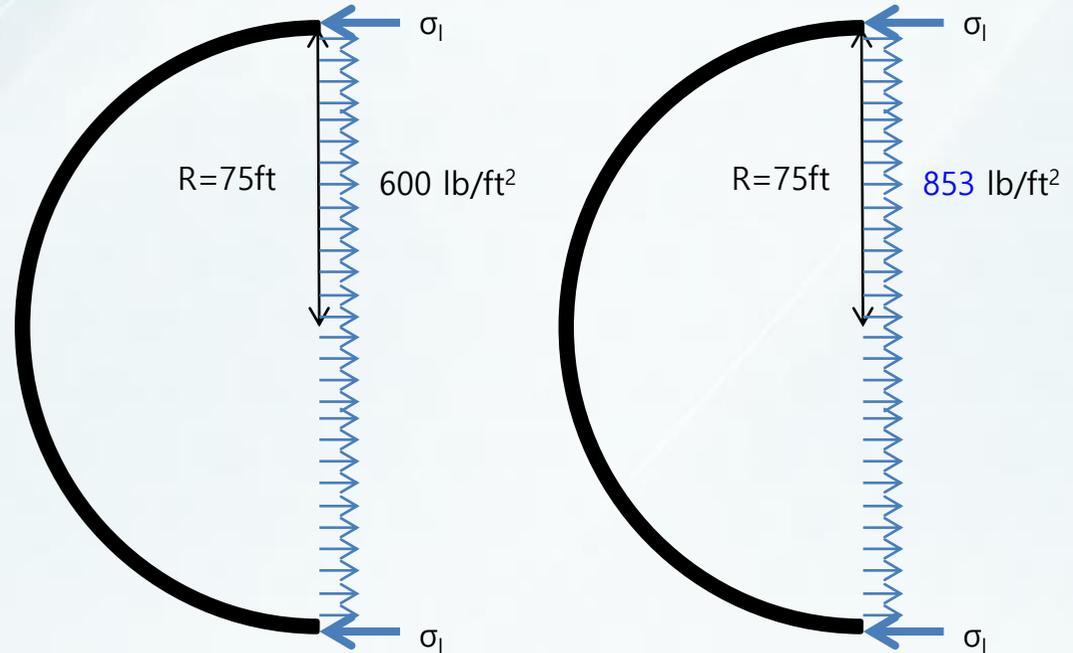
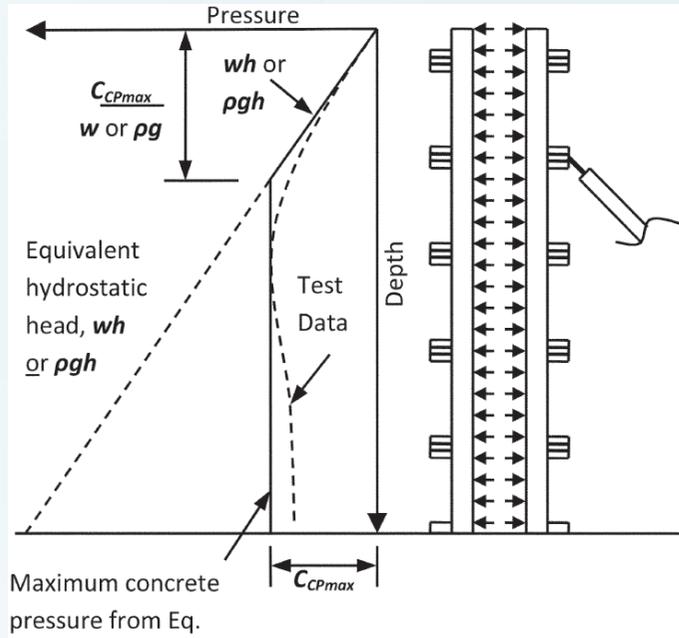
# CLP 제원과 허용응력

- 강종 : SA516 Gr 60 (항복강도 32 ksi)
- 두께/반지름 : 0.25 in. (6mm) / 75 ft.
- 시공중 라이너 플레이트의 허용응력 : **21.3 ksi = 2/3\*32**
  - Liner Plate Allowables (ASME III Table CC-3720-1, 2017)

Category	Stress-Strain Allowable	
	Membrane	Combined Membrane and Bending
Construction	$f_{st} = f_{sc} = 2/3 f_{py}$	$f_{st} = f_{sc} = 2/3 f_{py}$
Service	$\epsilon_{st} = \epsilon_{sc} = 0.002$	$\epsilon_{st} = \epsilon_{sc} = 0.004$
Factored	$\epsilon_{sc} = 0.005$ $\epsilon_{st} = 0.003$	$\epsilon_{sc} = 0.014$ $\epsilon_{st} = 0.010$

# CLP 허용 최대 측압

## ○ Hoop Stress에 의한 CLP 단순도식화



## ○ CLP의 압축응력 ( $\sigma_l = \frac{pR}{t} = \frac{p*75}{0.25*12}$ )

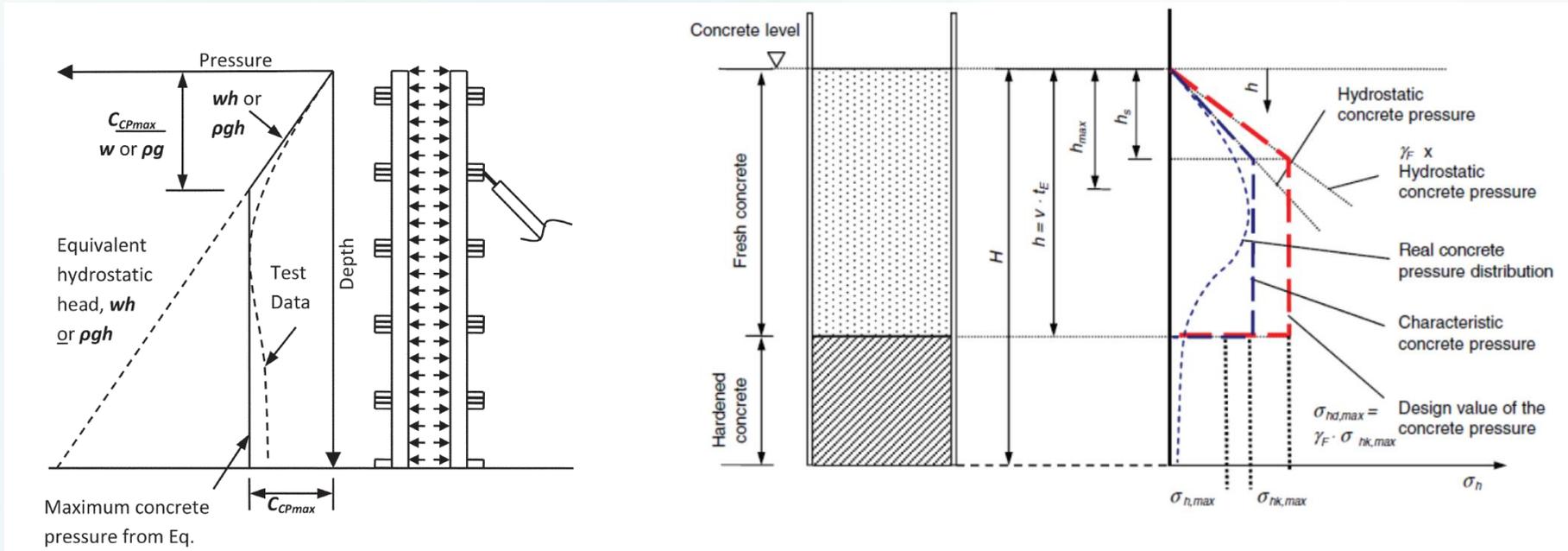
- 측압 600 lb/ft<sup>2</sup> (28.7 kPa)일 경우 : 15 ksi
- 측압 800 lb/ft<sup>2</sup> (38.3 kPa)일 경우 : 20 ksi
- 측압 853 lb/ft<sup>2</sup> (**40.8 kPa**)일 경우 : **21.3 ksi**

# 3

## 거푸집 측압

- 측압산정 방법 (ACI vs CIRIA vs DIN)
- ACI 347에 따른 측압 산정
- CIRIA Report 108에 따른 산정
- DIN 18218에 따른 측압 산정

# 측압산정 방법 (ACI,미 vs CIRIA,영 vs DIN,독)



반영변수	공통	유동성	기타
ACI	타설속도 타설높이 단위중량	슬럼프 (7in. 이하 or 초과)	온도, 시멘트, 혼화제
CIRIA		-	온도, 시멘트, 혼화제
DIN		슬럼프 테이블(F1~6, SCC)	<b>응결시간</b>

## ACI 349R-14

4.2.2.3 Alternatively, a method for either conventional or self-consolidating concrete based on appropriate experimental data can be used to determine the lateral pressure used for form design or a project-specific procedure can be implemented to control field-measured pressures in instrumented forms to the maximum pressure for which the form was designed.

# ACI 347(2004)에 따른 측압 산정

- 격납건물 외벽 콘크리트 타설 일반 조건 및 산정시 변수
  - 플라이 애쉬, 고로슬래그 미분말 등 혼화재료 사용 ( $C_c=1.2$ )
  - 일반 중량 콘크리트 ( $2,400 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_w=1$ )
  - 타설시 콘크리트 온도  $T=20^\circ\text{C}$  가정
  - 1단 타설 높이 10 ft. ( $h=3\text{m}$ )
  - 타설 속도  $R=1.5 \text{ ft/hr}$  ( $0.45\text{m/h}$ )

슬럼프	콘크리트 타설시 최대 측압 ( $C_{CPmax}$ )	
7 in. 이하	$C_c C_w \left[ 7.2 + \frac{785R}{T+17.8} \right]$ 단, 최소 $30C_w \text{ kPa}$ 이상	<b>30 kPa</b> (19.9 kPa)
7 in. 초과	$\rho g h$	<b>70.6kPa</b>

# CIRIA Report 108(1985)에 따른 측압 산정

- 격납건물 외벽 콘크리트 타설 일반 조건 및 산정시 변수
  - 일반 중량 콘크리트 ( $D=9.81 \times 2.4=23.54 \text{ kN/m}^3$ )
  - 타설 속도  $R=1.5 \text{ ft/hr}$  ( $0.45 \text{ m/hr}$ )
  - 1단 타설 높이  $10 \text{ ft.}$  ( $H=3\text{m}$ )
  - 형상계수  $C_1 = 1$  벽체, 재료 계수  $C_2 = 0.45$
  - 타설시 콘크리트 온도  $T=20^\circ\text{C}$  가정
  - 유동성 변수가 없음
  - 측압은 아래 값중 최소값, 결과 = **31.96 kPa**

$$P_{max} = D \left( C_1 \sqrt{R} + C_2 K \sqrt{H - C_1 \sqrt{R}} \right)$$

$$\text{여기서, } K = (36 / (T + 16))^2$$

$$P_{max} = DH$$

# DIN 18218(2010)에 따른 측압 산정

- 격납건물 외벽 콘크리트 타설 일반 조건 및 산정시 변수
  - 일반 중량 콘크리트 (2,400 kg/m<sup>3</sup>)
  - 타설 속도  $v=1.5$  ft/hr (0.45 m/hr)
  - **콘크리트 응결시간  $t_E$**  (일반적으로 5~10 hr, UAE : 5 hr, 신고리 5,6 : 9 hr)

Consistence class	콘크리트 타설시 최대 측압 ( $\sigma_{hk,max}$ , kPa)		
	산정수식	$t_E = 5(\text{UAE})$	$t_E = 9(\text{신고리})$
<b>F1 (6 in.)</b>	$(5v + 21)(1 + 0.03(t_E - 5))$	<b>25.0</b>	<b>26.0</b>
F2 (7 in.)	$(10v + 19)(1 + 0.053(t_E - 5))$	25.0	28.5
<b>F3 (8 in.)</b>	$(14v + 18)(1 + 0.077(t_E - 5))$	25.0	31.8
<b>F4 (8.5 in.)</b>	$(17v + 17)(1 + 0.14(t_E - 5))$	25.0	<b>38.5</b>
F5 (9 in.)	$25 + 30v \frac{t_E}{5}$	<b>38.5</b>	49.3
F6 (9.5 in.)	$25 + 38v \frac{t_E}{5}$	42.1	55.8
SCC	$25 + 33v \frac{t_E}{5}$	39.9	51.7

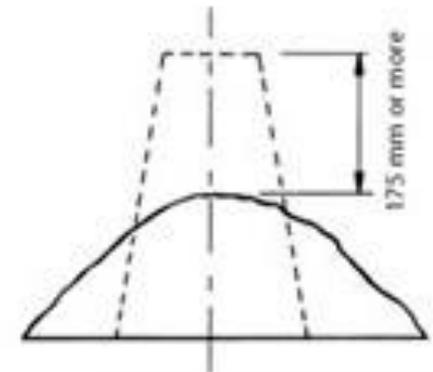
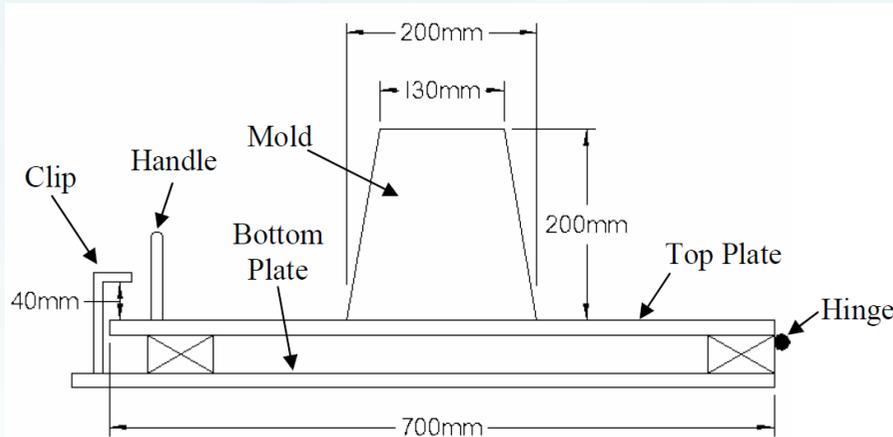
최소설계 측압은 F1~4 의 경우, 25 kPa 이상. F5, F6, SCC의 경우, 30 kPa 이상.

# DIN 18218에 따른 측압 산정

## ○ Flow table test (DIN EN 12350-5)

- 슬럼프 7 in. 이상의 콘크리트 유동성 구분을 위한 시험

Class	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Flow diameter (mm)	≤ 340	350 to 410	420 to 480	490 to 550	560 to 620	≥ 630
Slump, assumed (in.)	≤ 6 in.	7 in.	8 in.	8.5 in.	≥ 9 in.	≥ 9.5 in.



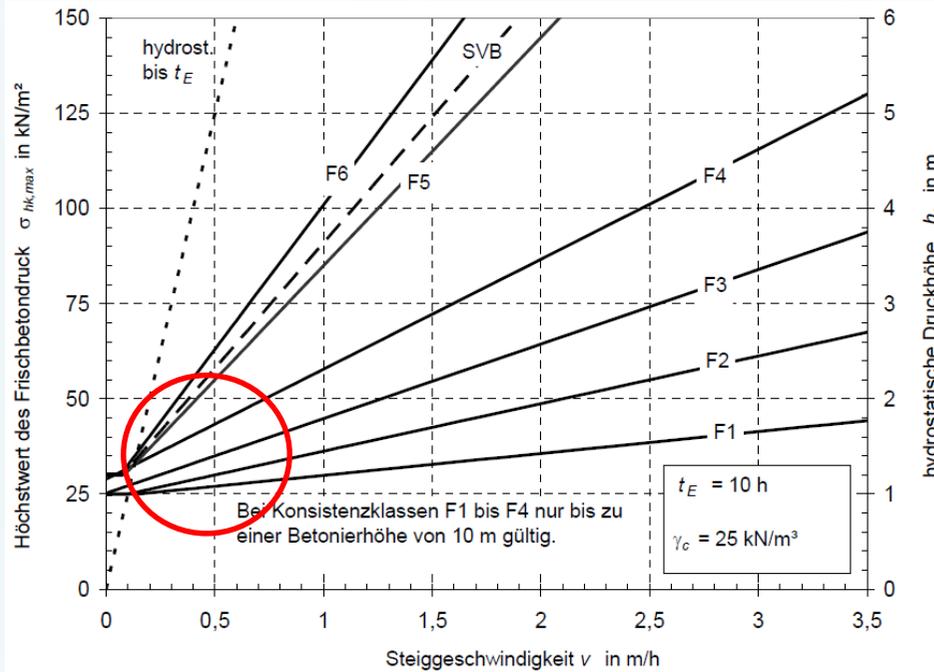
## ○ Flow table test (DIN EN 12350-5) vs Slump test (ASTM C143)

- 슬럼프 7 in. 이상 콘크리트의 두 시험간 유동성의 비교 분석 필요

# 고슬럼프 콘크리트 적용시 CLP 측압 비교

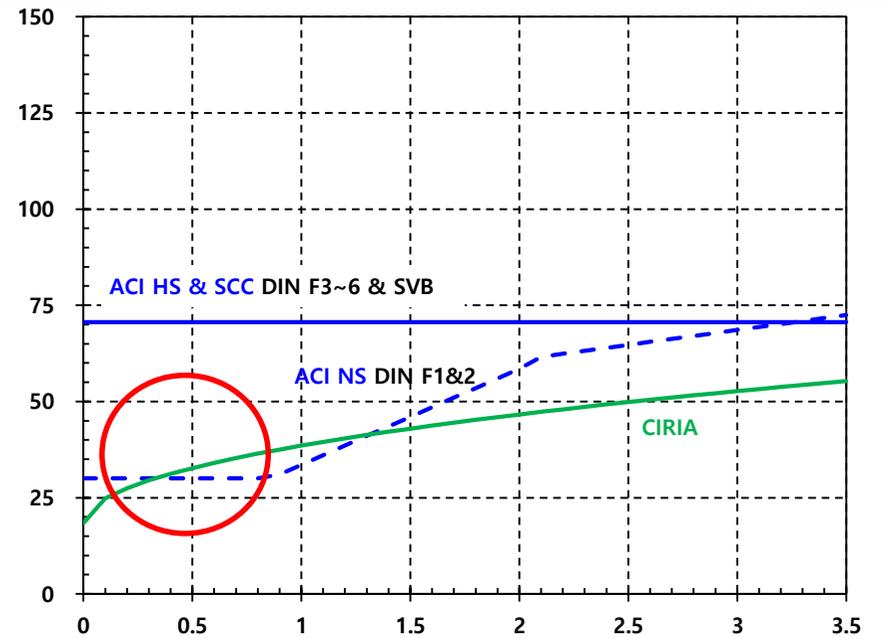


설계 측압



타설속도

설계 측압



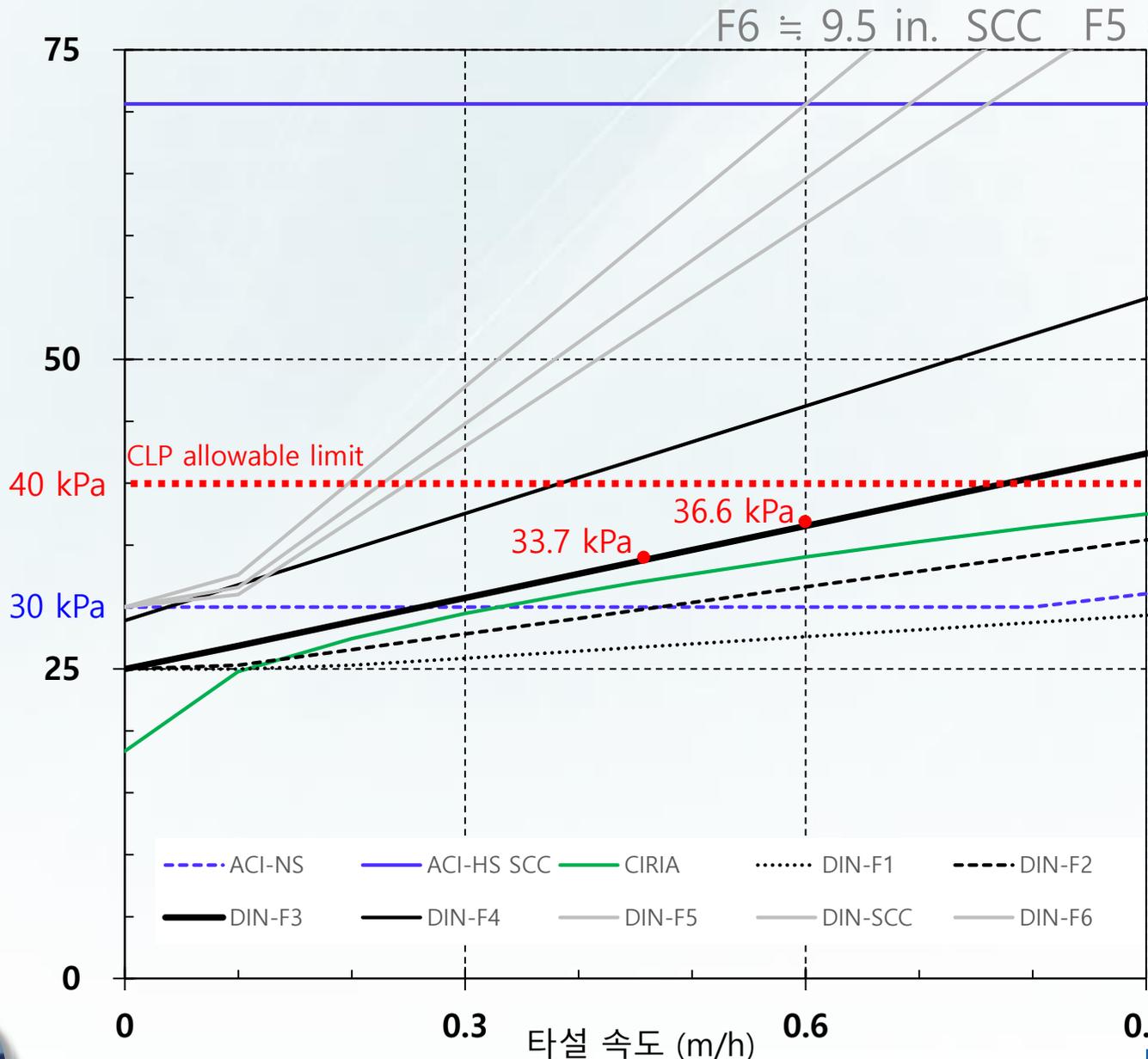
타설속도

RCB 격납건물 외벽 콘크리트 타설조건 고려시  
검토되어야 하는 부분

비교조건  
응결시간 10시간  
콘크리트 온도 20°C



# 고슬럼프 콘크리트 적용시 CLP 측압(1)



F6 ≅ 9.5 in. SCC F5 ≅ 9 in.

7 in. 초과 or SCC

F4 ≅ 8.5 in.

**F3 ≅ 8 in.**

Slump 무관

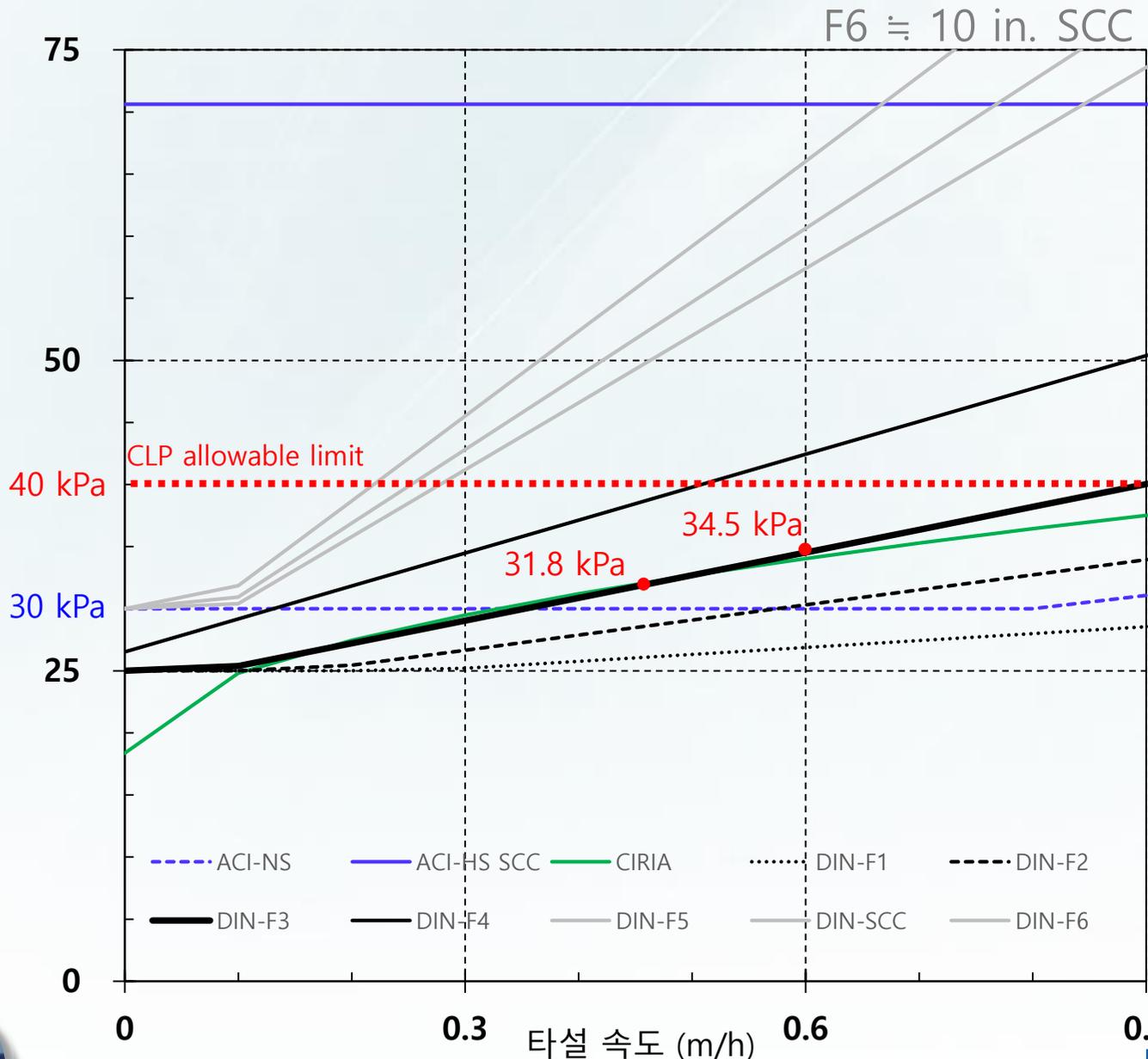
F2 ≅ 7 in.

7 in. 이하

F1 ≅ 6 in.

비교조건  
(일반적인 경우)  
응결시간 10시간  
콘크리트 온도 20°C

# 고슬럼프 콘크리트 적용시 CLP 측압(2)



F5 ≙ 9 in.  
7 in. 초과 or SCC

F4 ≙ 8.5 in.

F3 ≙ 8 in.  
Slump 무관

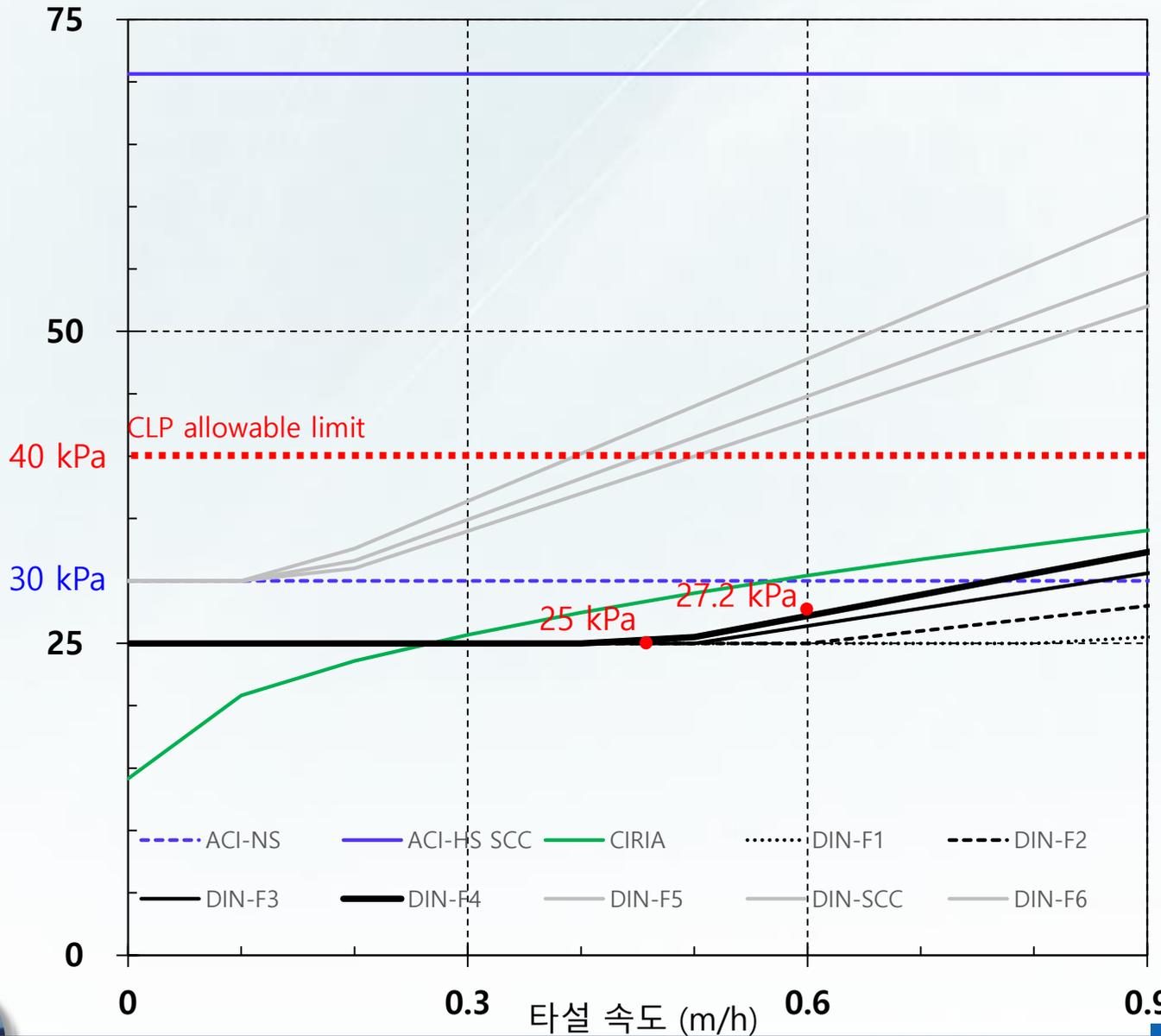
F2 ≙ 7 in.  
7 in. 이하

F1 ≙ 6 in.

비교조건  
(신고리)  
응결시간 9시간  
콘크리트 온도 20°C

- - - - - ACI-NS
- ACI-HS SCC
- CIRIA
- ..... DIN-F1
- - - - - DIN-F2
- DIN-F3
- DIN-F4
- DIN-F5
- DIN-SCC
- DIN-F6

# 고슬럼프 콘크리트 적용시 CLP 측압(3)



7 in. 초과 or SCC

F6 ≙ 10 in.

SCC

F5 ≙ 9 in.

Slump 무관

F4 ≙ 8.5 in.

7 in. 이하

F3 ≙ 8 in.

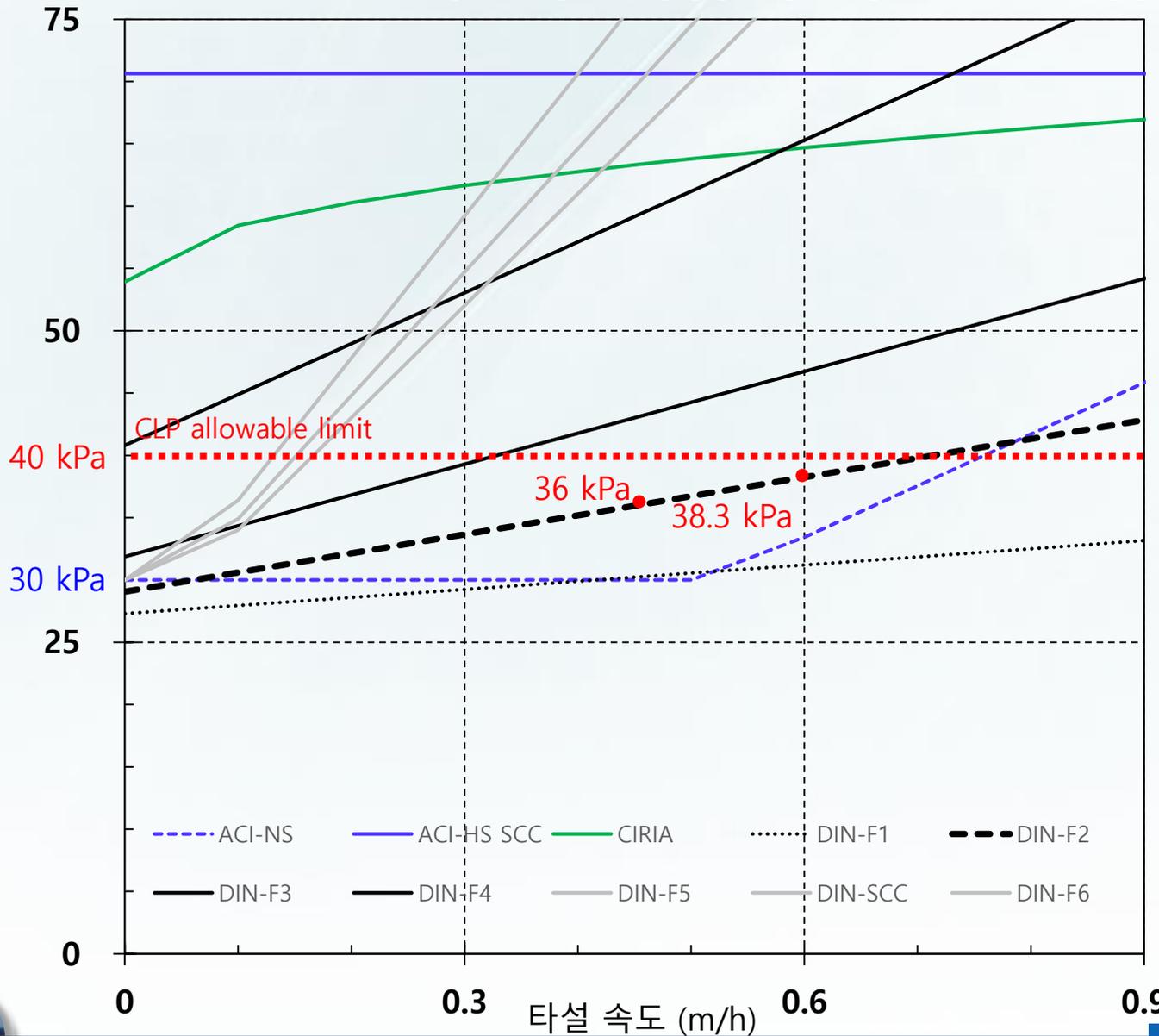
F2 ≙ 7 in.

F1 ≙ 6 in.

비교조건  
(UAE, 사우디)  
응결시간 5시간  
콘크리트 온도 25°C

# 고슬럼프 콘크리트 적용시 CLP 측압(4)

F6 ≅ 10 in. SCC F5 ≅ 9 in. F4 ≅ 8.5 in.



7 in. 초과 or SCC  
Slump 무관

F3 ≅ 8 in.

7 in. 이하  
F2 ≅ 7 in.

F1 ≅ 6 in.

비교조건  
(핀란드, 카자흐스탄)  
응결시간 15시간  
콘크리트 온도 5°C

# 4

## 결론

- 고슬럼프 콘크리트 적용 가능성

# 고슬럼프 콘크리트 적용 가능성

1. KEPIC SNB는 ACI 347에 따라 거푸집 설계를 하도록 규정
2. RCB 외벽의 경우 CLP의 허용 압축응력에 따라 콘크리트 측압이 제한됨
3. ACI 347은 슬럼프 7 in.이하 또는 초과에 따라 산정 측압의 차이가 과다함
4. 거푸집 측압 설계 기준인 독일의 DIN 18218(2010)은 고슬럼프(7~9 in.) 콘크리트 타설시 합리적 기준을 제시 (유동성의 세분화 및 응결시간 도입)
  - 독일산 거푸집(PERI, ICF 등)은 세계 주요 건설 프로젝트에 사용됨
5. ACI 347-04에서 ACI 347R-14(참조기준)로 완화되며, 아래사항을 언급  
**ACI 347R-14** 4.2.2.3 Alternatively, a method for either conventional or self-consolidating concrete based on **appropriate experimental data** can be used to determine the lateral pressure used for form design or **a project-specific procedure** can be implemented to control field-measured pressures in instrumented forms to the maximum pressure for which the form was designed.

✓ **적절한 시험에 따라 프로젝트에 특화된 측압 산정 기준 제시가 가능하다고 규정**



# THANK YOU

Life management of nuclear power plant concerns the safety, feasibility and economic benefit until the designed service life, which is an active, future-going tool unlike previous maintenance systems.

