

# 표면 거칠기를 고려한 콘크리트 균열의 유량 예측

이윤택\*, 음동휘, 한동석

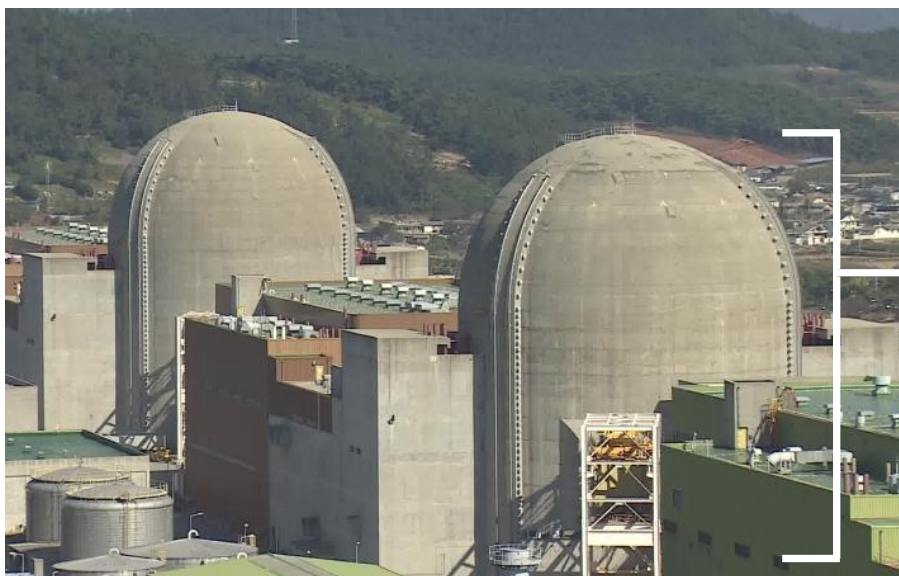
2026. 05. 08.

연세대학교 건설환경공학과

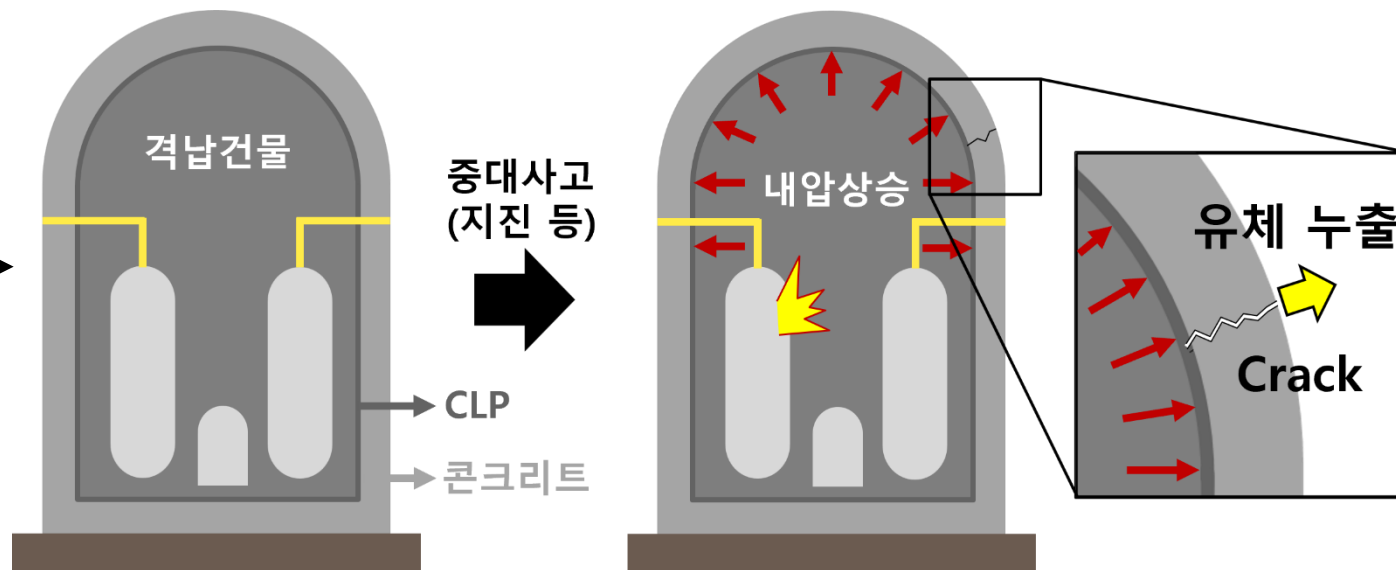
한국원자력학회 2026춘계학술발표회, 제주 국제컨벤션센터

# 연구 배경

- 원전의 **콘크리트 격납건물**은 방사성 물질 누출방지의 최종 차폐벽임
- 중대사고시 격납건물 관통 균열을 통해 **방사성 물질이 누출**될 수 있음



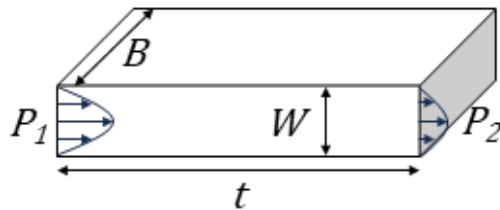
한빛 원자력 발전소, 전라남도 영광



방사성 물질 누출 예시

# 연구 배경

- 균열을 통해 유출되는 유량은 **폭**에 비례
- **복잡한 형상의 균열**에서는 폭만을 고려한 유량 예측에 한계 존재
- 더욱 정확한 유량 예측을 위해 **균열면의 거칠기** 등의 특성을 반영한 **유량 예측식** 필요



$$Q_a = 3.56R_e \frac{1}{8}WB \sqrt{\frac{\Delta PW}{t\rho}} \text{ (if } W \ll B\text{)}$$

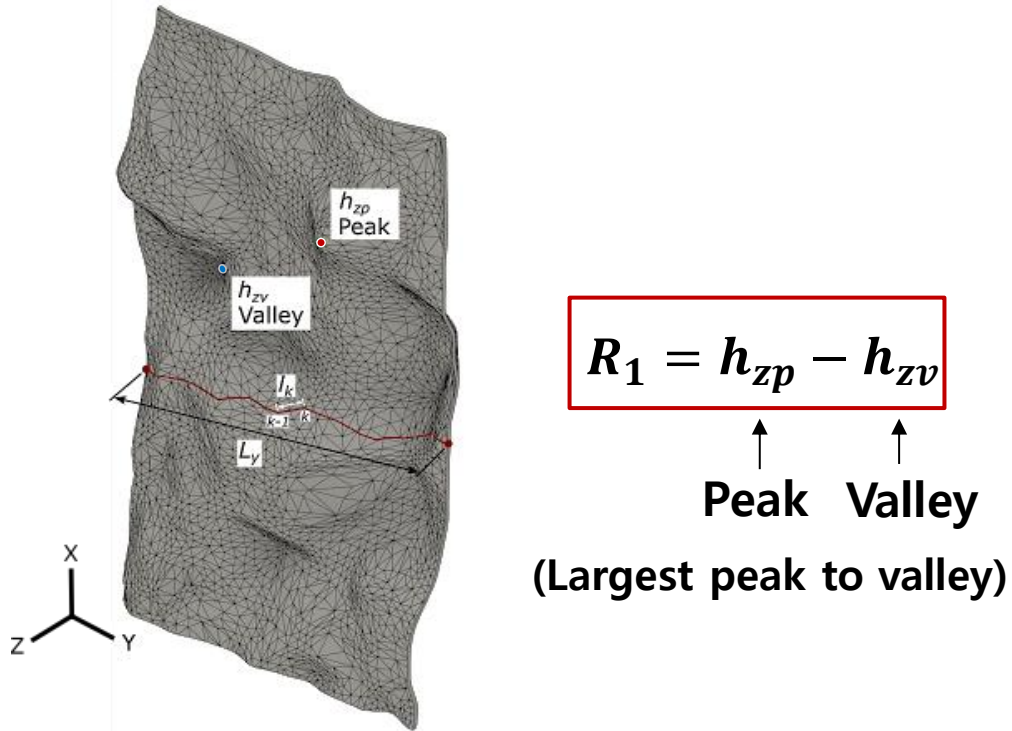
평판에서의 누출량 평가식

# 목차

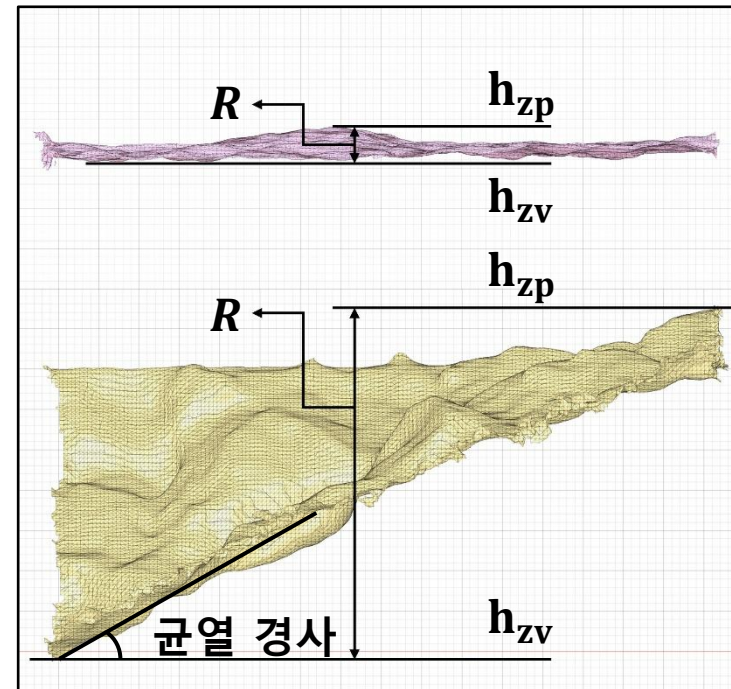
- 연구 배경
- 균열 조도
- 콘크리트 투수 실험
- 누출량 평가식 도출
- 균열 형상을 이용한 누출량 해석
- 매개변수 결정 및 결과 분석
- 결론

# 균열조도

- 선행연구의 균열조도 정의 사용
- Gadelmawla의 균열조도 정의는 **균열면의 거칠기보다 전체적인 굴곡에** 더 큰 영향을 받음



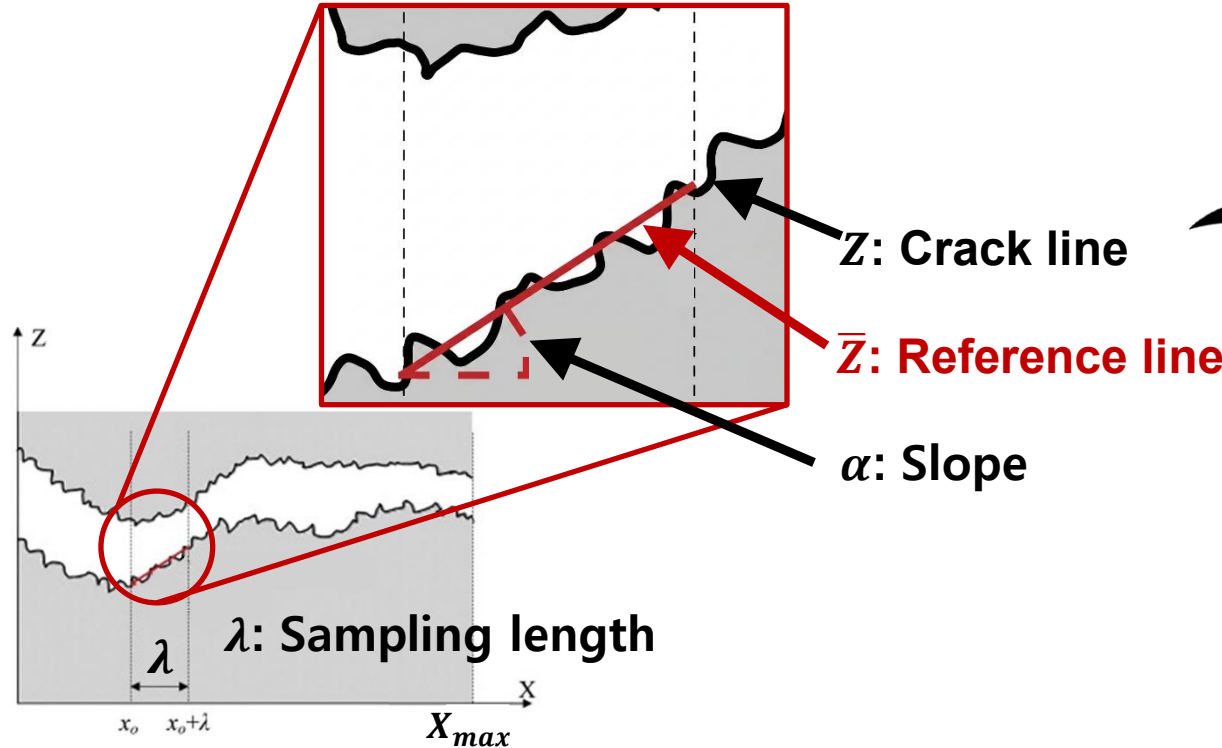
균열면의 높이차를 이용한 균열 조도  
(Gadelmawla et al. 2002)



평면 균열과 비평면 균열에서의 균열조도

# 균열조도

- 국부 거칠기를 고려할 수 있는 균열조도 정의를 이용



$$R_{local} = \frac{1}{\lambda} \sum (|\bar{Z}(x) - Z(x)| \cos \alpha)$$

→ Reference line과 Crack line의 차이

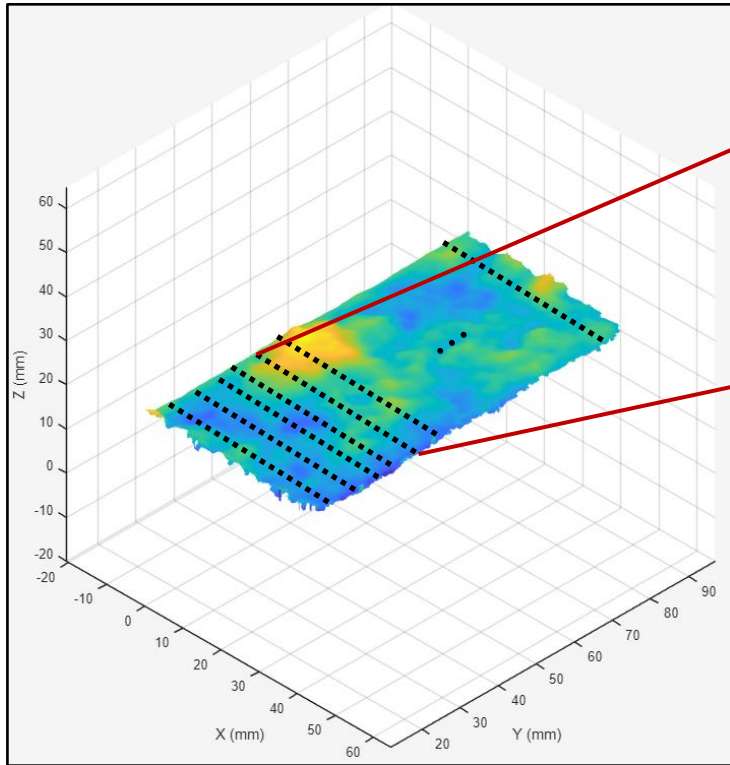
$$R_{global} = \frac{1}{X_{max} - \lambda} \sum_{i=1}^{X_{max} - \lambda} (R_{local})_i$$

→ 전 구간의  $R_{local}$  평균

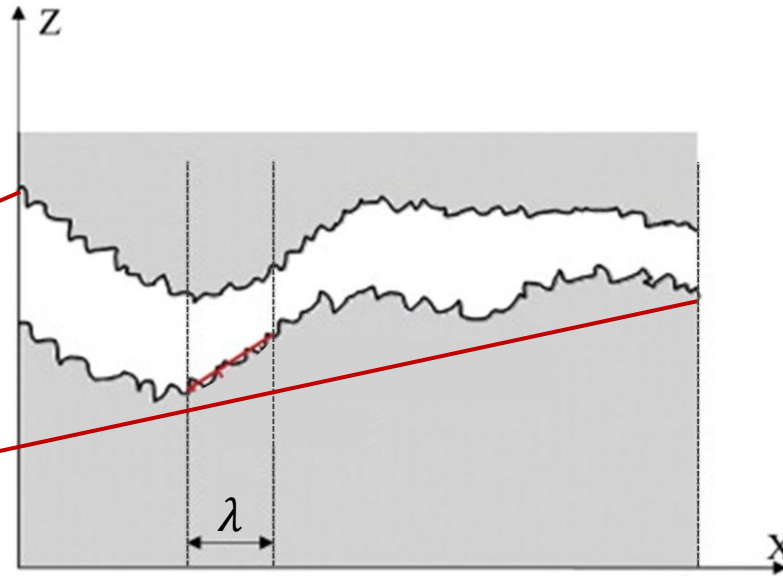
국부 거칠기를 고려한 균열 조도  
(Akhavan et al. 2012)

# 균열조도

- 균열 단면의 **등간격의 균열선**에서 균열조도를 계산한 후 평균값 계산



균열면 형상



$j$ 번째 균열선의 균열 프로파일

$$R_{local} = \frac{1}{\lambda} \sum (|\bar{Z}(x) - Z(x)| \cos \alpha)$$

$$R_{global} = \frac{1}{X_{max} - \lambda} \sum_{i=1}^{X_{max} - \lambda} (R_{local})_i$$

국부 거칠기를 고려한 균열 조도  
(Akhavan et al. 2012)

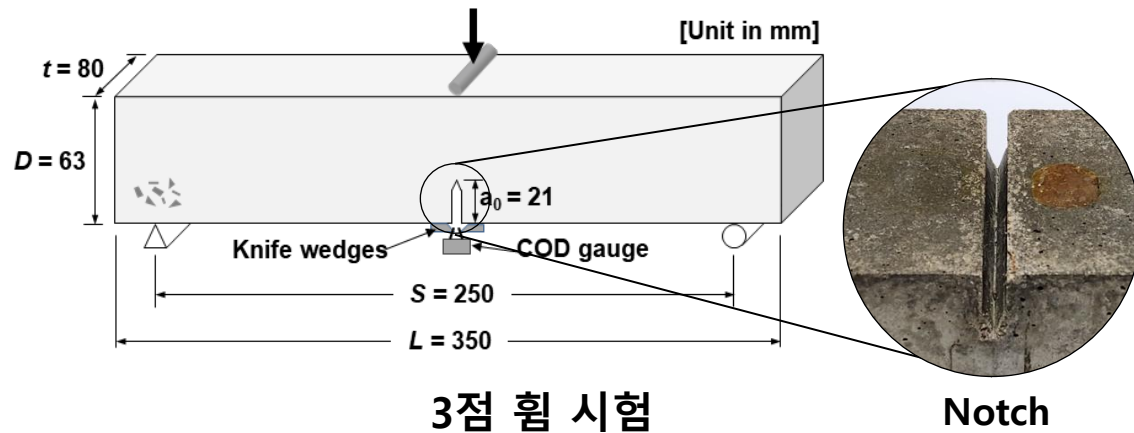
$$R_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{global})_j$$

최종 조도

$N$ : 구간의 개수  
 $(R_{global})_j$ :  $j$  번째 구간의 Roughness

# 콘크리트 투수 실험

- 콘크리트 시편의 관통 균열을 따라 누설되는 물의 양 측정
- **3점 하중 재하** 실험으로 파괴된 콘크리트 시편 이용하여 실험



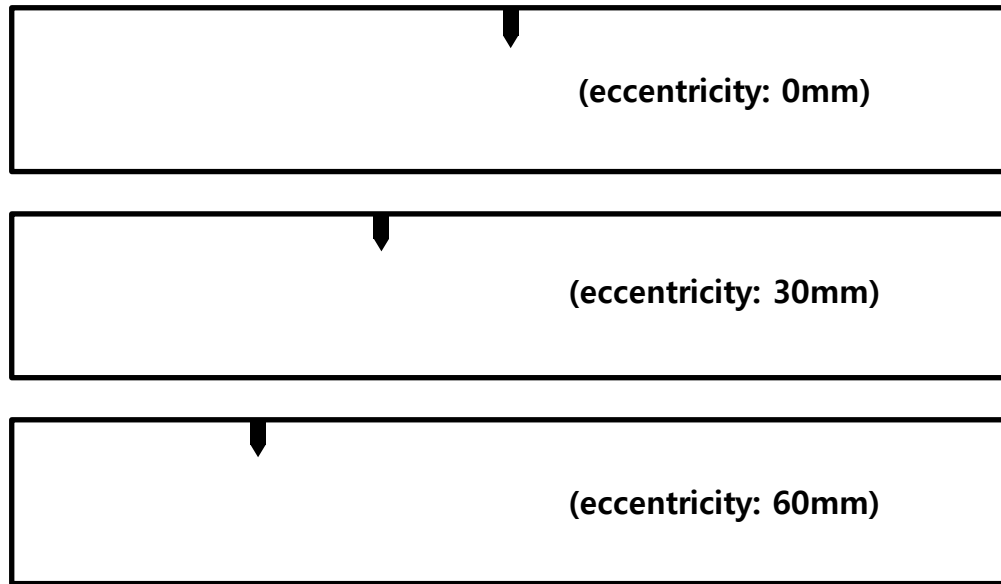
힘 파괴



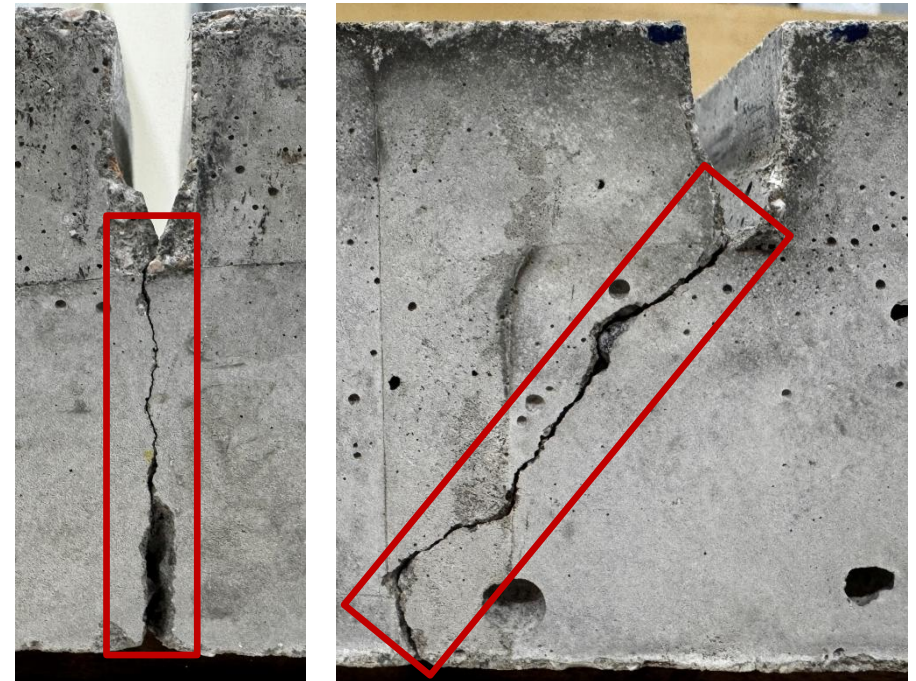
투수실험 세팅

# 콘크리트 투수 실험

- 초기 Notch 위치를 3가지(0mm, 30mm, 60mm)로 설정하여 **비평면균열** 획득
- **골재 사이즈**를 5mm와 20mm 각각 이용하여 균열 시편 획득



초기 Notch 위치 (0mm, 30mm, 60mm)



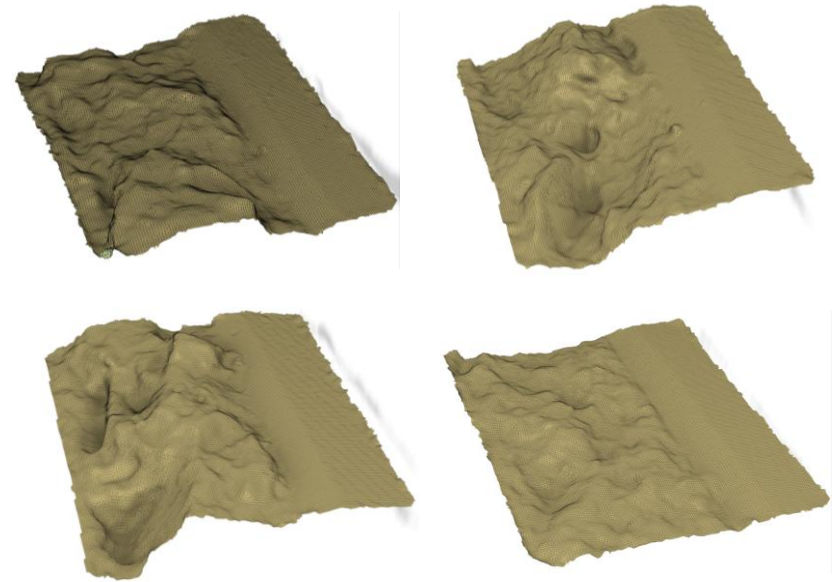
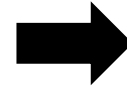
Notch 위치에 따른 균열면의 차이 (0mm, 60mm)

# 콘크리트 균열면 측정

- 3D 스캐너를 활용하여 콘크리트 시편의 균열면 측정
- 균열면 데이터를 활용하여 조도 산출



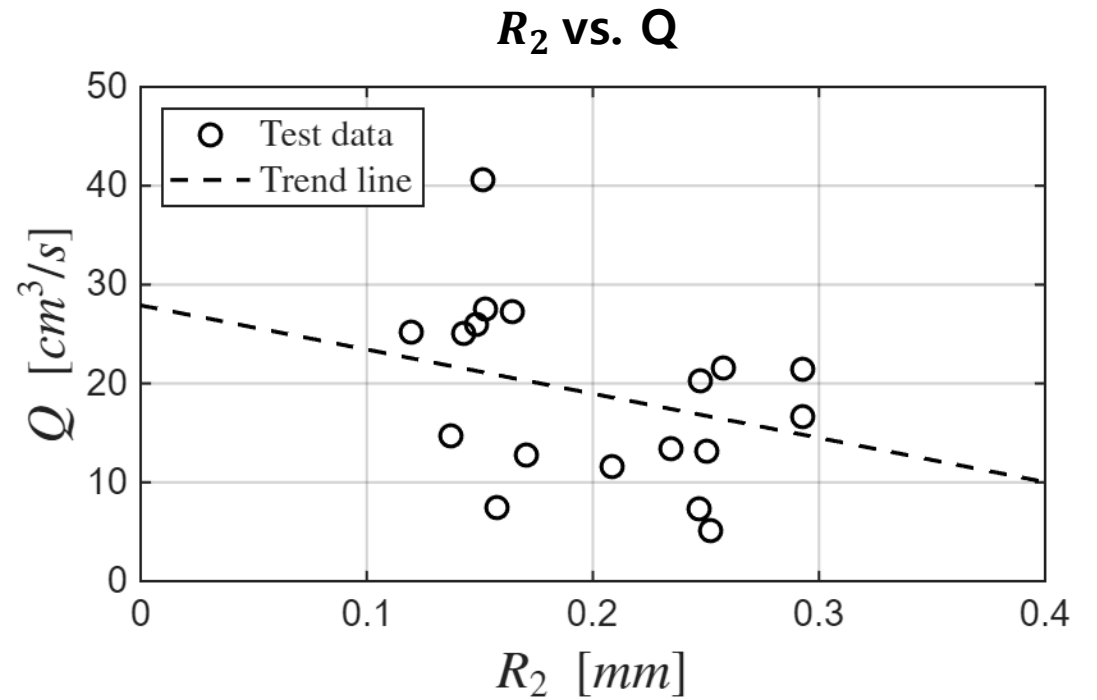
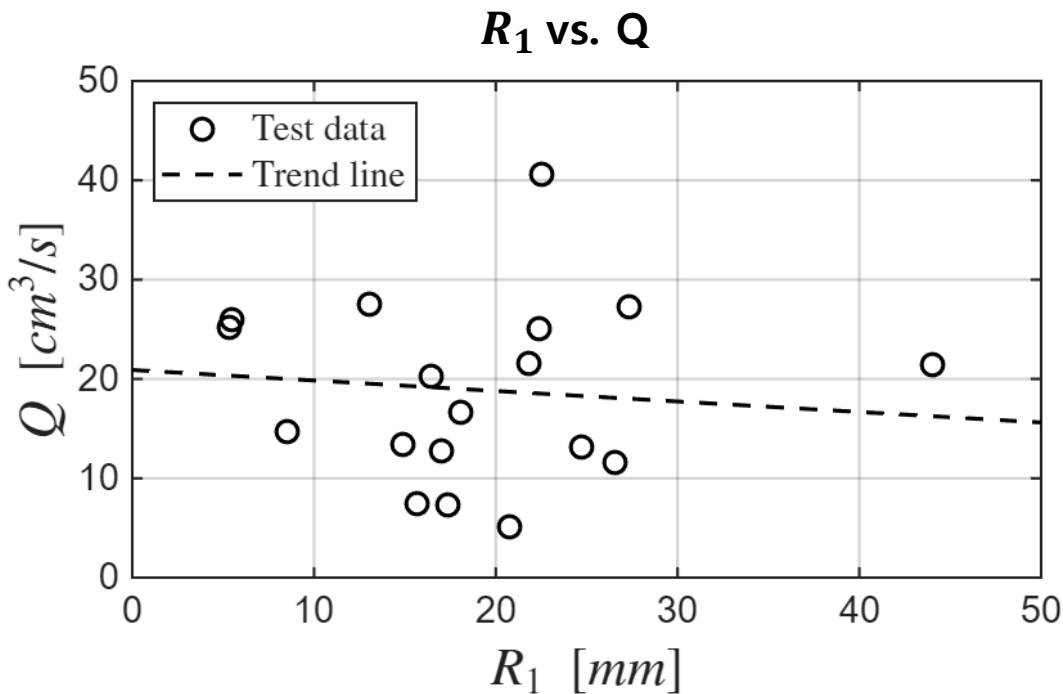
콘크리트 시편



콘크리트 균열면 데이터

# 실험 유량과 조도의 상관관계 분석

- 투수 실험을 통해 얻은 유량과  $R_1, R_2$ 의 관계 분석
- Pearson 상관계수의 **절댓값**이 클수록 높은 상관관계



Pearson  
Correlation ( $\rho$ ) :  $\rho = -0.02$   
Coefficient

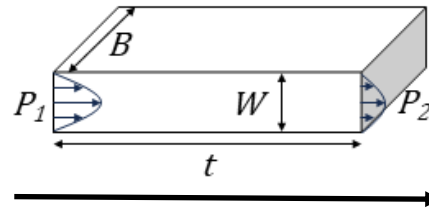
$\rho = -0.41$

# 누출량 평가식 도출

- 선행 연구를 참고하여 난류 거동에서의 누출량 평가식 도출
- 조도를 고려할 수 있도록 식 업데이트

$$\frac{\Delta P}{t} = f_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{v^2}{D_H}$$

Darcy-Weisbach equation  
(Brown, 2002)



두 평판 사이를 흐르는 유체 모델

$$Q_a = 3.56 R_e^{\frac{1}{8}} W B \sqrt{\frac{\Delta P W}{t \rho}} \quad (\text{if } W \ll B)$$

평판에서의 누출량 평가식

- \* Hydraulic diameter:  $D_H = 4A/P$   
(A: cross-sectional area, P: perimeter)  
 $f_D$ : Darcy friction factor  
(=  $0.3164 R_e^{-1/4}$ )  
 $\rho$ : density  
 $v$ : fluid velocity  
 $W$ : crack width

$$Q_{aR} = 3.56 R_e^{\frac{1}{8}} W B \sqrt{\frac{\Delta P W}{t \rho}} \left[ \beta_1 \left( \frac{W}{R} \right)^{\beta_2} \right]$$

$\beta_1, \beta_2$ : 보정계수  
 $R$ : 조도(mm)

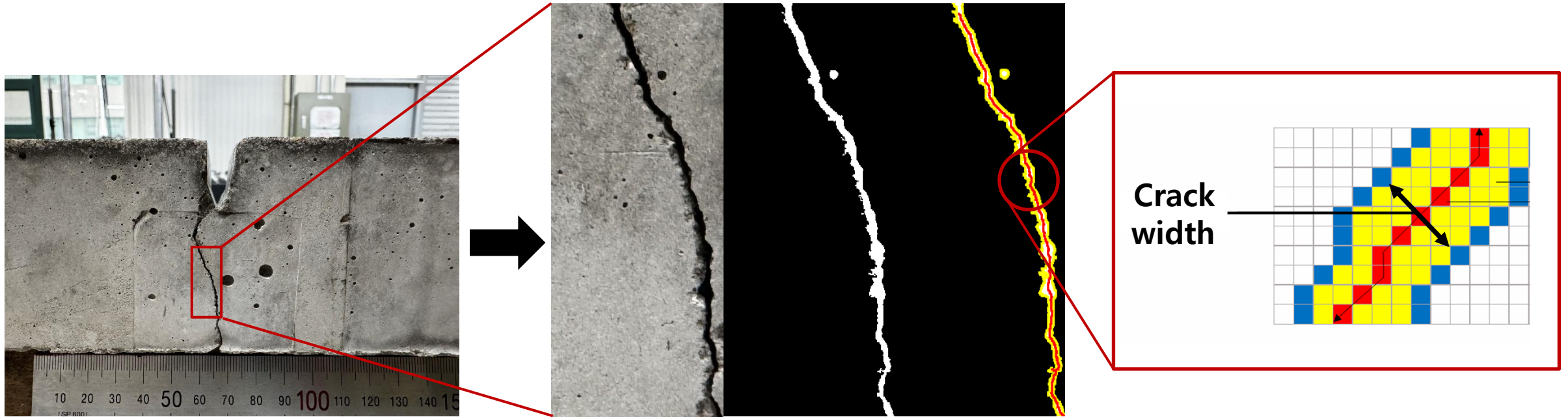
무차원 수

조도를 고려한 누출량 평가식

균열면의 거칠기(조도) 고려

# 균열폭 측정

- 이미지 프로세싱을 통하여 균열폭 측정

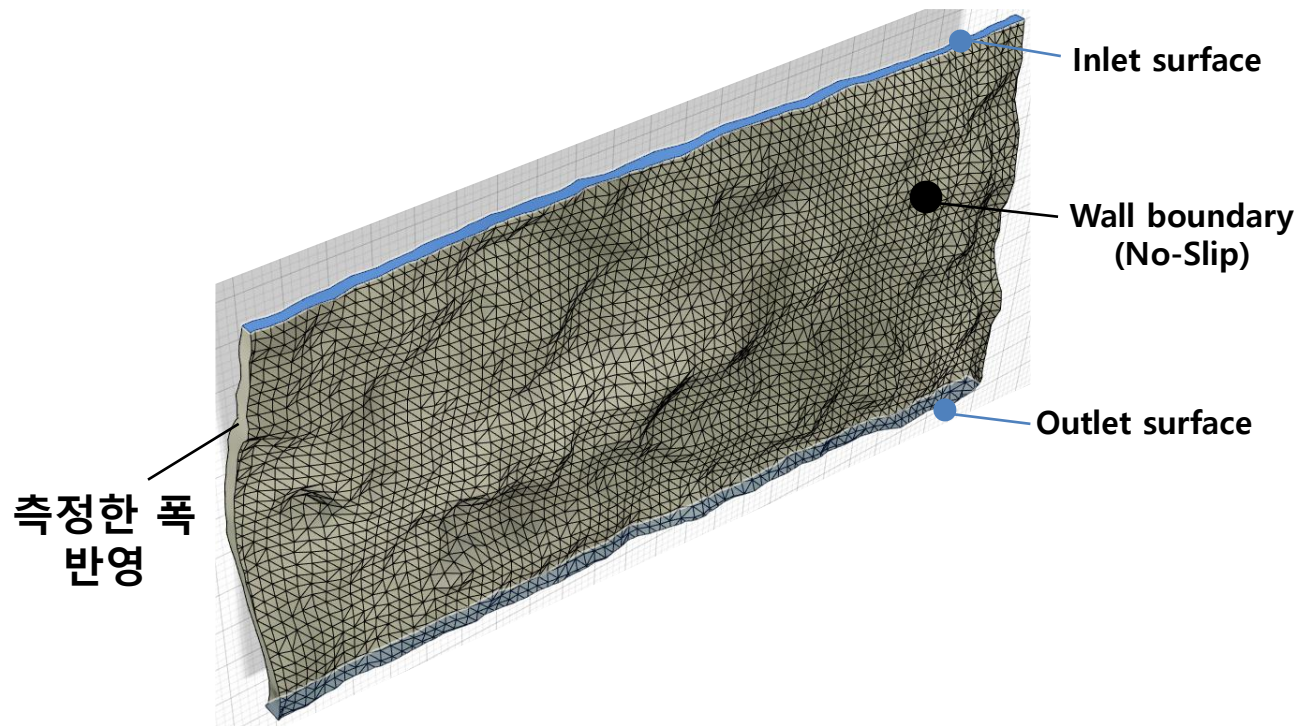


시편 측면부 촬영 이미지

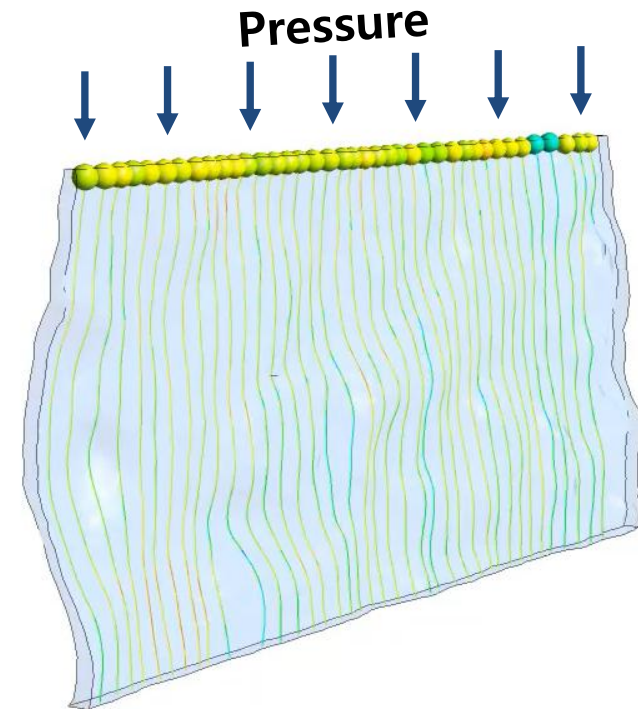
이미지 프로세싱을 통한 균열 탐지 및 균열폭 측정  
(Juan et al., 2024)

# 유량 해석

- 측정한 폭과 스캔한 균열면을 통하여 **균열면 사이의 영역** 모델링
- 유체해석 프로그램 Ansys를 활용하여 해석



3차원 균열면



균열 단면 사이의 유체 흐름 해석

# 매개변수 결정

- 누출량 예측식을 통해 얻은 유량  $Q_{aR}$ 과 해석을 통해 얻은 유량  $Q_s$ 의 오차가 최소가 되도록 매개변수 값을 결정

$$Q_{aR} = 3.56R e^{\frac{1}{8}WB} \sqrt{\frac{\Delta PW}{t\rho}} \left[ \beta_1 \left( \frac{W}{R} \right)^{\beta_2} \right]$$

$\beta_1, \beta_2$ : 보정계수

$Q_s$  (해석 유량)  $\rightarrow$   $\min_{\beta_1, \beta_2} \sum_i (Q_{s,i} - Q_{aR,i})^2 \rightarrow \beta_1, \beta_2$

최소제곱법을 이용한 매개변수 결정

# 균열 폭 영향 분석

- 폭이 다른 균열들의 유체해석 결과를 이용
- 유량이 폭의 차이에 지배적임을 확인

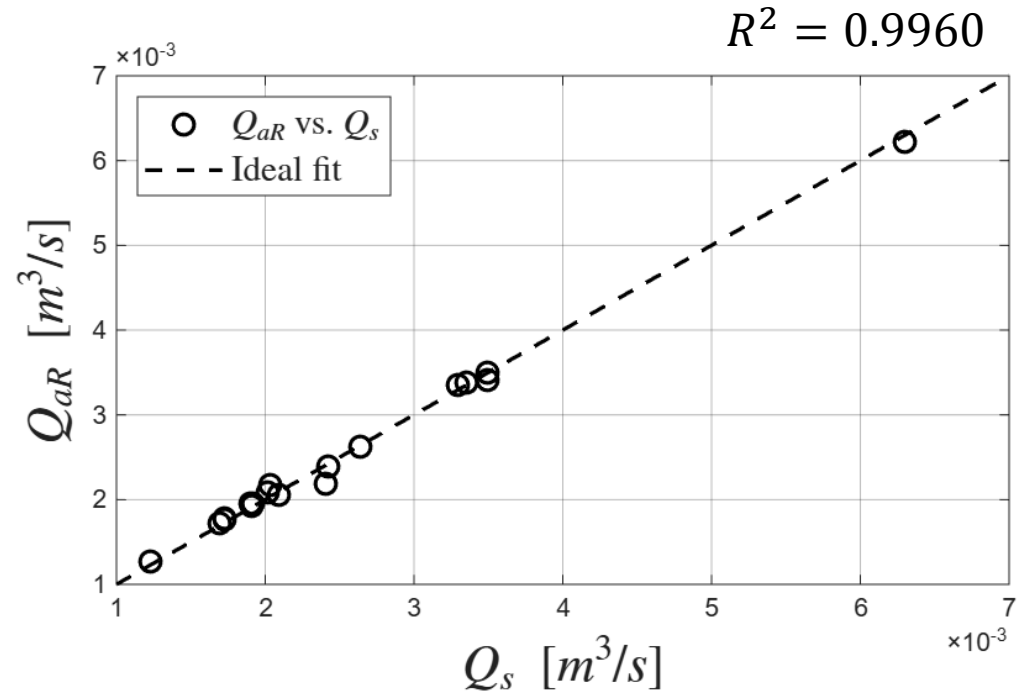
$$Q_{aR} = 3.56 R_e^{\frac{1}{8}} W B \sqrt{\frac{\Delta P W}{t \rho}} \left[ \beta_1 \left( \frac{W}{R} \right)^{\beta_2} \right]$$

$\beta_1, \beta_2$ : 보정계수

$$\rightarrow \beta_1 = 0.6384$$

$$\beta_2 = 0.0390$$

피팅 결과



$Q_s, Q_{aR}$  비교

# 평면균열 유량 분석

- 조도의 영향을 확인하기 위하여 폭을 일치시킨 후 해석 진행
- 평면균열을 이용하여 매개변수를 업데이트

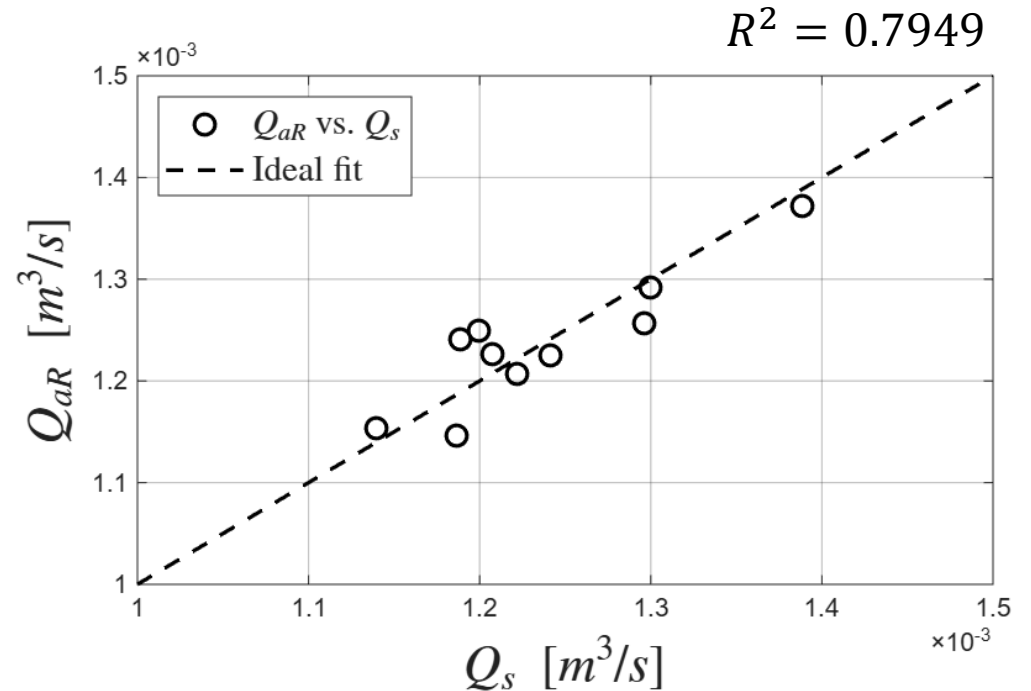
$$Q_{aR} = 3.56R_e^{\frac{1}{8}}WB \sqrt{\frac{\Delta PW}{t\rho}} \left[ \beta_1 \left( \frac{W}{R} \right)^{\beta_2} \right]$$

$\beta_1, \beta_2$ : 보정계수

$$\rightarrow \beta_1 = 0.5634$$

$$\beta_2 = 0.3428$$

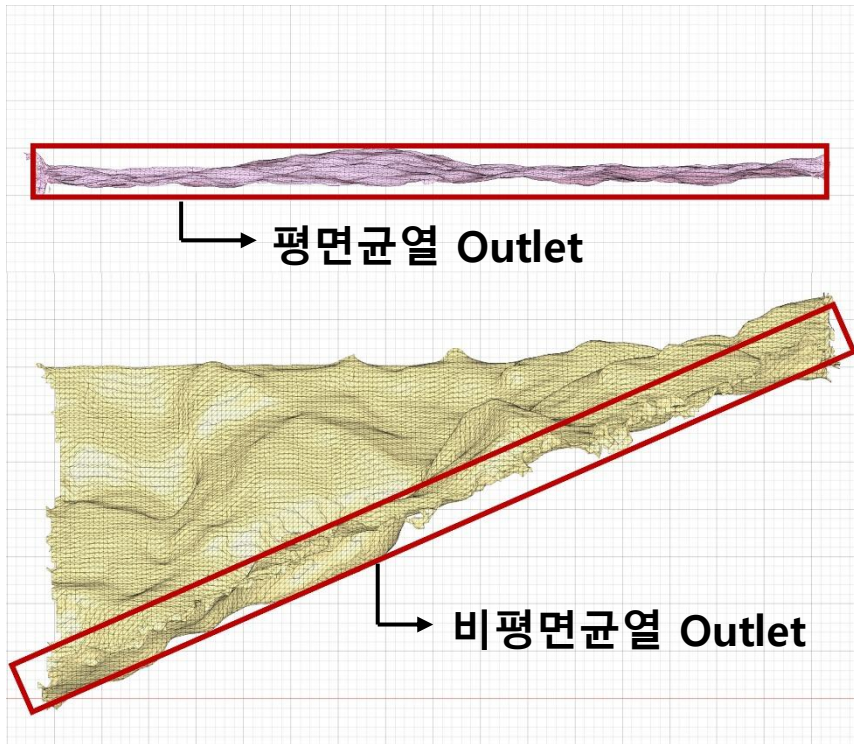
피팅 결과



$Q_s, Q_{aR}$  비교

# 비평면균열 유량 분석

- 평면균열과 비평면균열 데이터를 함께 분석
- 균열의 단면적 항을 보정하기 위하여 식에 유효 단면적 적용



평면 균열과 비평면 균열의 Outlet 면적 비교 예시

$$Q_{aR} = 3.56R_e^{\frac{1}{8}}WB \sqrt{\frac{\Delta PW}{t\rho}} \left[ \beta_1 \left( \frac{W}{R} \right)^{\beta_2} \right]$$

$$\rightarrow Q_{aR} = \alpha R_e^{\frac{1}{8}} \boxed{\bar{A}} \sqrt{\frac{\Delta PW}{t\rho}} \left[ \left( \frac{W}{R} \right)^{\beta} \right]$$

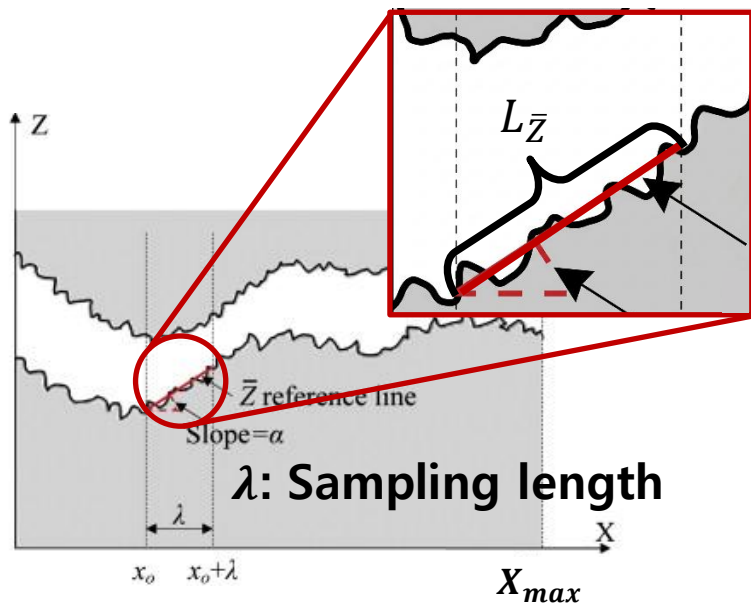
$\alpha, \beta$ : 보정계수  
 $\bar{A}$ : 유효 단면적( $m^2$ )

$$* \bar{A} = \frac{1}{2} (A_{inlet} + A_{outlet})$$

# Tortuosity 적용

- 선행연구의 균열면의 굴곡률을 나타내는 매개변수 **Tortuosity**를 적용 (Akhavan et al. 2012)

$$Q_{aR} = \alpha R_e^{\frac{1}{8}} \bar{A} \sqrt{\frac{\Delta PW}{t\rho}} \left[ \left( \frac{W}{R} \right)^\beta \right] \tau^\gamma \quad (\tau: \text{tortuosity}, \gamma: \text{보정계수})$$

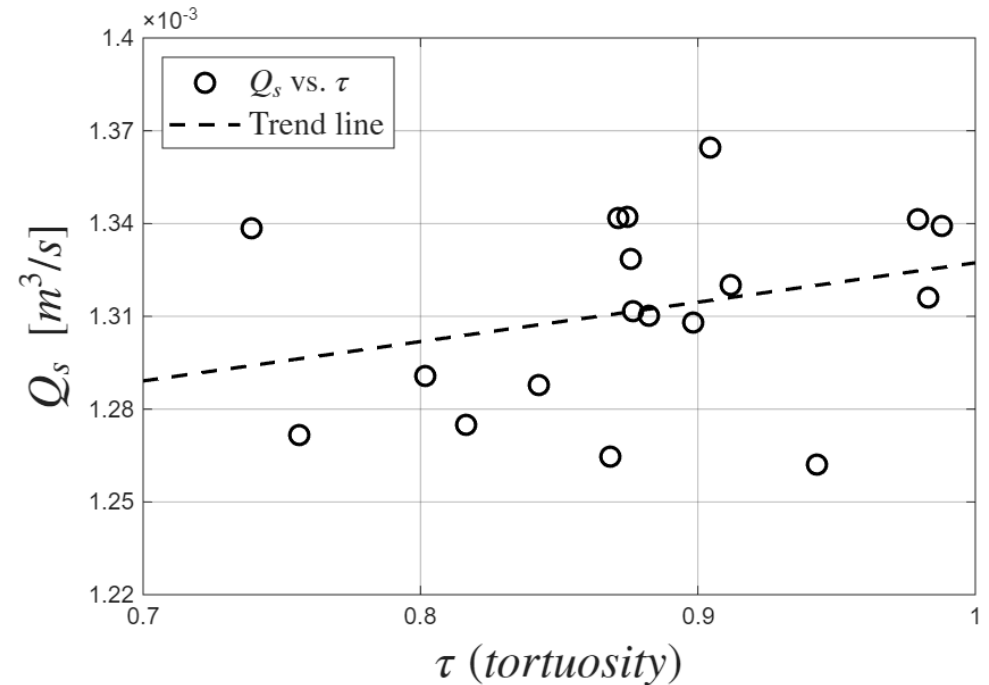


$$\tau = \left( \frac{X_{max}}{L_e} \right)^2$$

$\tau$ : Tortuosity

$$L_e = \sum L_{\bar{z}}$$

Tortuosity 계산 방식  
(Akhavan et al. 2012)

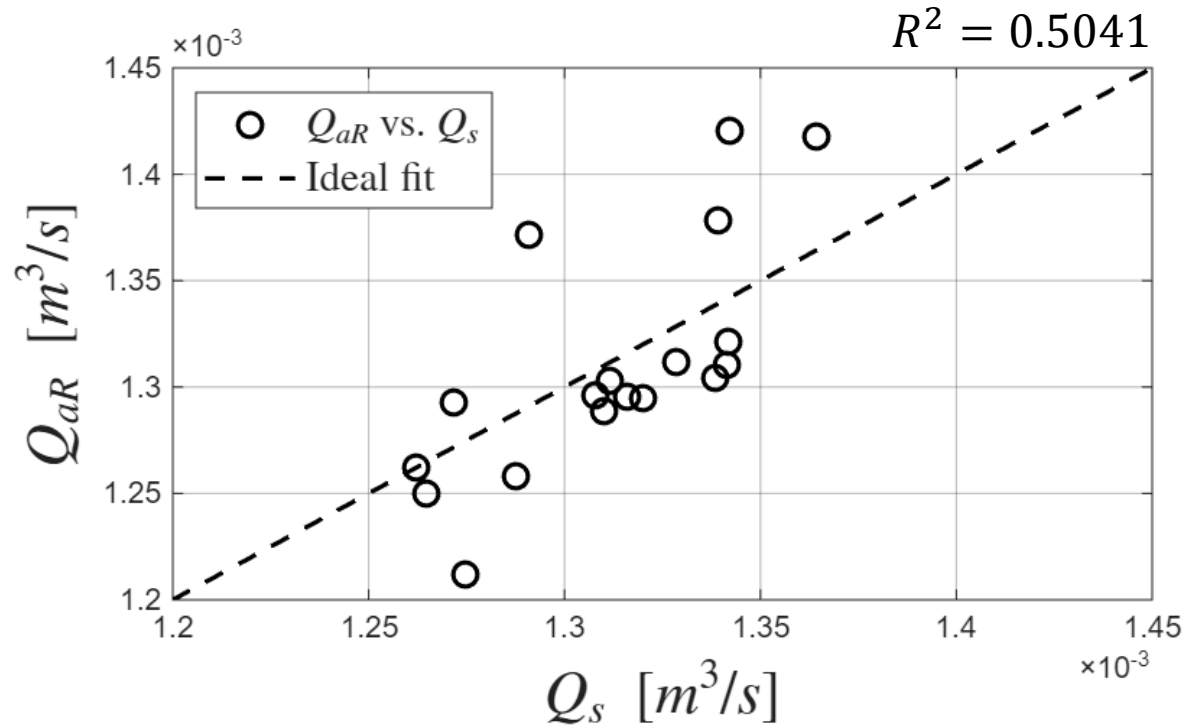


$Q_s$ 와 Tortuosity의 상관관계 확인  
→ Pearson correlation coefficient( $\rho$ ) = 0.3

# 비평면균열 유량 분석

- 균열면의 **굴곡률**을 나타내는 매개변수 **Tortuosity**를 적용하여 식을 업데이트

$$Q_{aR} = \alpha R_e^{\frac{1}{8}} \bar{A} \sqrt{\frac{\Delta PW}{t\rho}} \left[ \left( \frac{W}{R} \right)^\beta \right] \tau^\gamma \quad (\tau: \text{tortuosity}, \gamma: \text{보정계수})$$



$$\alpha = 2.1438$$

$$\beta = 0.0693$$

$$\gamma = 0.3926$$

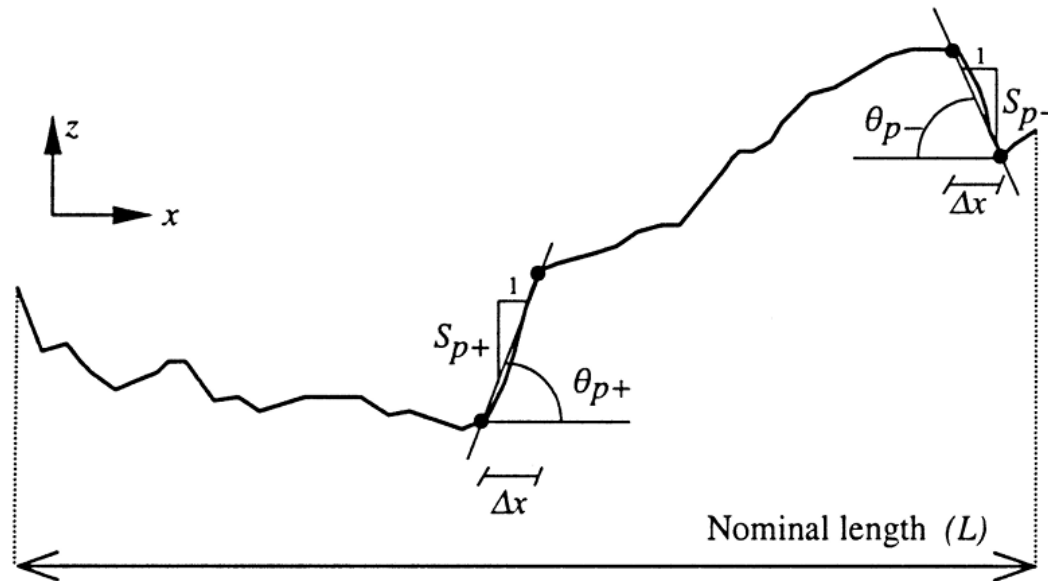
$Q_s, Q_{aR}$  비교

# 결론

- **Pearson Correlation Coefficient** 분석으로 실험을 통해 얻은 유량과 균열면의 조도 간의 상관관계 확인
- 평가식을 통해 계산한 유량과 유체해석을 통해 얻은 유량의 선형 관계를 확인
- 균열의 형상이 복잡해질수록, 폭 이외의 다른 특성(조도, 굴곡)들이 유량에 높은 영향을 미침을 확인
- 비평면균열의 경우, 균열면의 전체적인 굴곡이 반영된 매개변수인 **Tortuosity**를 도입하면 식이 선형 관계를 가짐을 확인

# 진행 연구

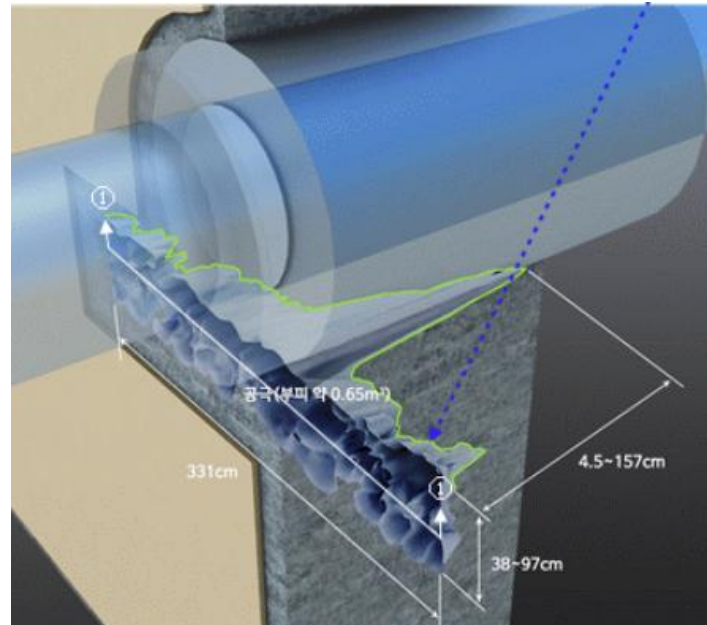
- **균열의 형상**에 의한 유량 변화를 더욱 잘 설명할 수 있는 매개변수 조사
- **추가적인 매개변수**를 통하여 식의 정확도를 높일 수 있을 것으로 예상



균열선의 기울기  
(Belem et al., 2000)

# 추후 연구

- 실제 원전의 격납건물에 존재하는 **배면공동**을 고려하기 위한 매개변수 정의 및 식 업데이트 진행 예정



한빛 원전 4호기 격납건물 공동 예시 (한국수력원자력 보도자료, 2019)

## 사사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NRF-00144250).