

# Numerical Prediction of DNB in a Rolling 2 x 2 Rod Bundle with Tilted Rotation Axis



Department of Mechanical Engineering  
Chungnam National University

# 연구 배경: 해양원전에서의 핵비등이탈

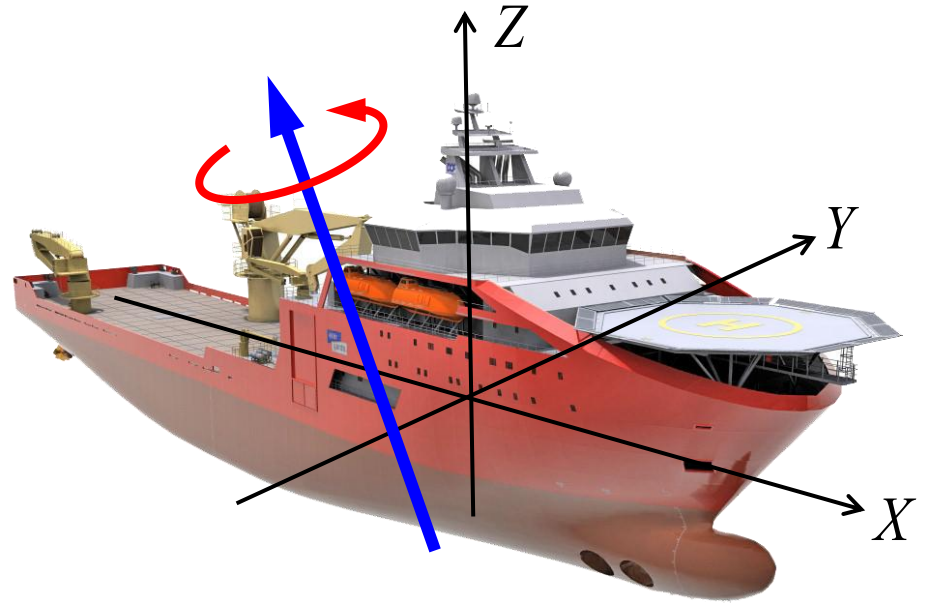
## □ 해양 원전의 특수성



[부유식 해양 원전 (Akademik Lomonosov, Russia)]



[코어파워 부유식 해양 원전 디자인(영국)]



- DNB는 가열면이 기포에 둘러싸일 때 발생하므로 유동에 의한 기포의 거동이 중요함
- 해상에서는 **원자로의 동적 운동**으로 기존 육상원전과 다른 유동이 발생
- 해양 원전의 열적 여유 설계를 위해 **요동하는 봉다발에서 DNB를 예측하는 것이 필수적임**

# 연구 배경: 기존 연구

## □ 요동하는 유로 내 DNB 연구(실험/해석)

- 해양 원전에 대한 관심이 증가하면서, 민간에서 요동 조건의 DNB에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음  
(Hwang et al., Albdour et al., Yoo et al.)
- 기존의 요동하는 조건의 DNB 전산해석 연구는 원형관이나 환형관과 같은 단순한 형상에 대해서 이루어짐  
(Gui et al., Liu et al., Tian et al.)

| References  | Flow channel               | Heater shape | Dynamic motion   | Note        |
|-------------|----------------------------|--------------|------------------|-------------|
| Gui et al.  | Narrow rectangular channel | water        | Heaving, Rolling | 1D analysis |
| Liu et al.  | Rectangular channel        | water        | Rolling          | 2D analysis |
| Tian et al. | Microchannel               | water        | Rolling          |             |
| Ryu et al.  | Circular pipe              | water        | Rolling          |             |

- 요동하는 조건의 봉다발에 대한 CFD 연구는 DNB에 대한 연구는 찾아볼 수 없으며, 대부분 단상유동에서 요동에 의한 열수력적 성질 변화를 관측하는 연구를 수행함  
(Yan et al., Wang et al., Liang et al.)

→ 요동하는 봉다발 내 DNB에 대한 수치해석적 연구는 매우 제한적인 것으로 예상되며 보고된바 없음

# Two-fluid model: 지배 방정식

## □ 비관성 상대좌표계 운동량 방정식

$$\frac{\partial(\alpha_v \rho_v \mathbf{u}_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{u}_v \mathbf{u}_v) = -\alpha_v \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_v \boldsymbol{\tau}_{eff,v}) + \mathbf{f}_i + \Gamma_b \mathbf{u}_v + \Gamma_w \mathbf{u}_l + \alpha_v \rho_v (\mathbf{g} + \mathbf{a}_v)$$

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l \mathbf{u}_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l) = -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_l \boldsymbol{\tau}_{eff,l}) - \mathbf{f}_i - \Gamma_b \mathbf{u}_v - \Gamma_w \mathbf{u}_l + \alpha_l \rho_l (\mathbf{g} + \mathbf{a}_l)$$

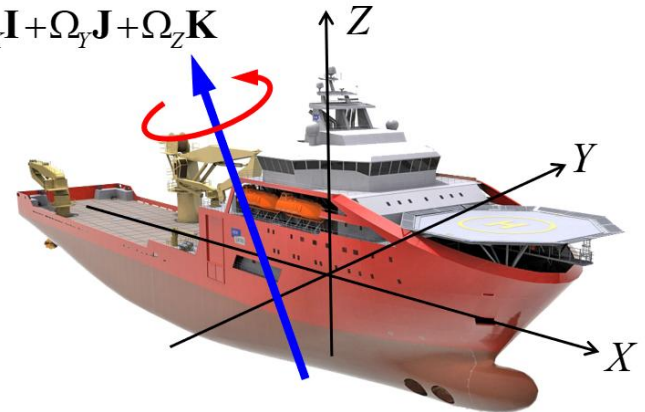
- $\mathbf{f}_i$ : 계면이 기체상에 작용하는 힘 (부록)
- $\mathbf{a}_v, \mathbf{a}_l$ : 상대좌표계 직선가속 및 회전가속에 의해 발생하는 힘(Fictitious acceleration)

$$\mathbf{a}_v = -\ddot{\mathbf{R}} - \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{r} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}_v - \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r})$$

$$\mathbf{a}_l = -\ddot{\mathbf{R}} - \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{r} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u}_l - \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r})$$

$\uparrow$   
 직선가속 효과      회전가속 효과

$$\boldsymbol{\Omega} = \Omega_x \mathbf{I} + \Omega_y \mathbf{J} + \Omega_z \mathbf{K}$$

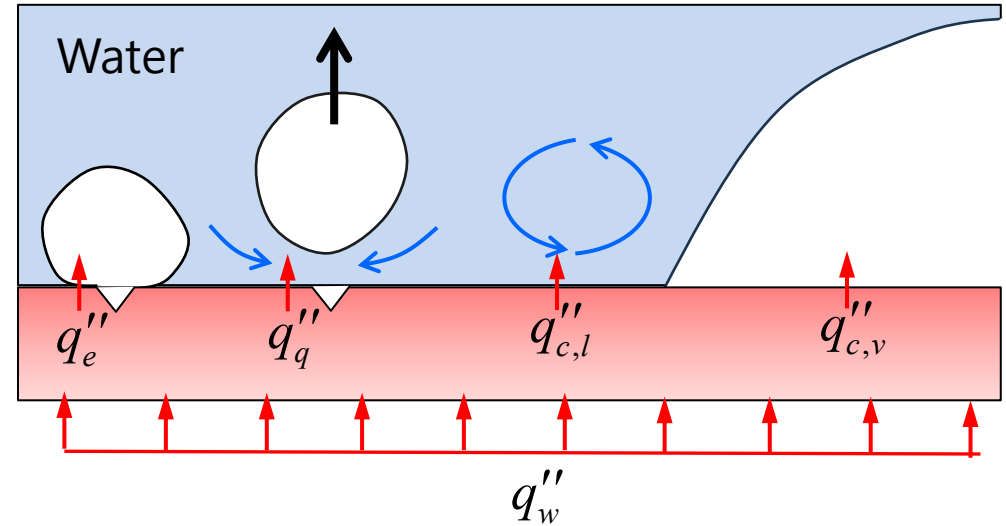


# DNB 전환 모델

## □ 수정된 RPI 벽면열전달 모델

- 액체와 증기에 대한 각각의 대류 열전달 고려

$$q_w'' = f(q_{c,l}'' + q_e'' + q_q'') + (1-f)q_{c,v}''$$



$$q_{c,l}'' = h_{c,l}(T_w - T_l)(1 - A_b)$$

Convective heat flux to liquid

$$q_{c,v}'' = h_{c,v}(T_w - T_v)$$

Convective heat flux to vapor

$$q_e'' = V_d N_w \rho_v i_{fg} f_d$$

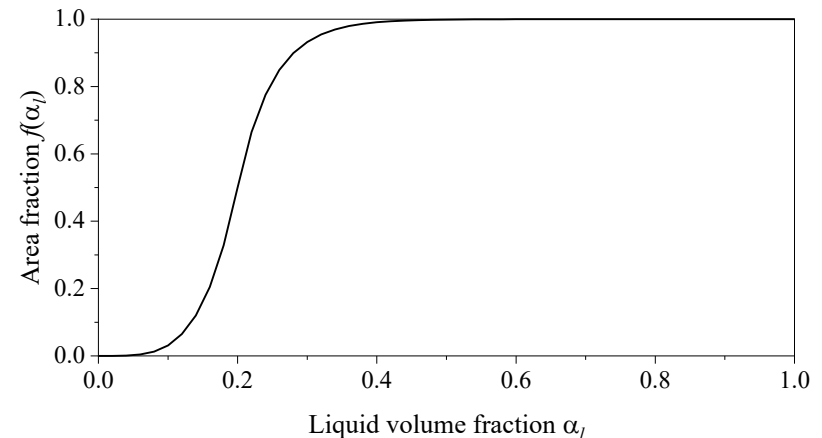
Evaporative heat flux

$$q_q'' = 2\sqrt{\lambda_l \rho_l c_{p,l} f_d / \pi} (T_w - T_l) A_b$$

Quenching heat flux

- 공간 분율  $f(\alpha_f)$  (Lavieville et al.)

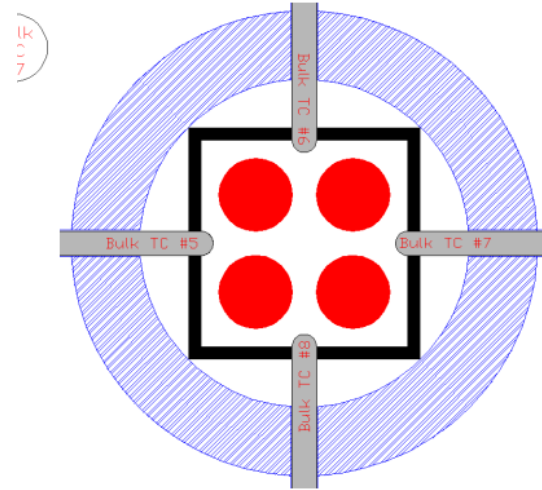
$$f(\alpha_l) = \begin{cases} 1 - 0.5e^{-20(\alpha_l - 0.2)} & \text{if } \alpha_l \geq 0.2 \\ 0.5(\alpha_l / 0.2)^4 & \text{otherwise} \end{cases}$$



# 봉다발 DNB 모의 조건 선정

## □ Greenwood (2017)

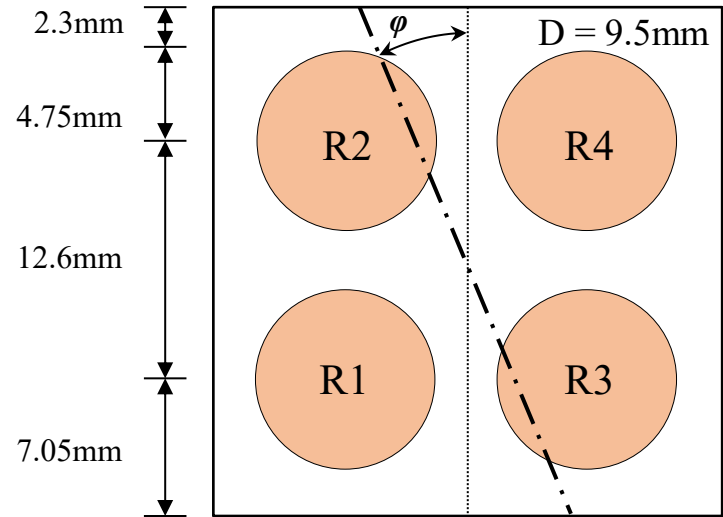
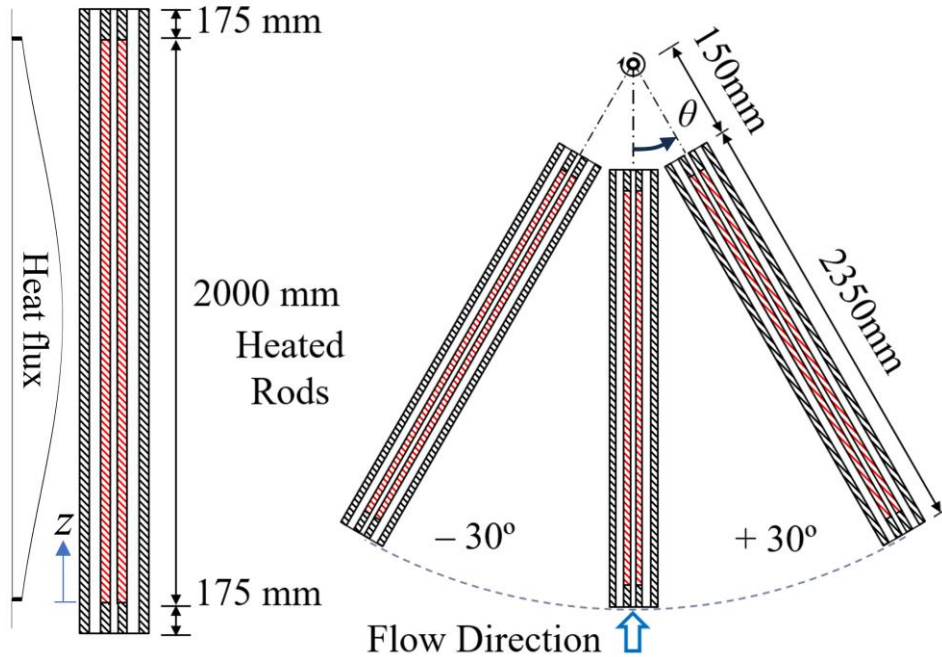
- Greenwood (2017): 수직인 데이터만 제공 → 이것으로 실험데이터 검증



- 작동 유체: 물
- 유동 특성 :  $G = 927 \text{ kg/m}^2\text{s}$  upward,  $p = 104.0 \text{ bar}$
- 입구 과냉각 온도:  $50.3^\circ\text{C}$
- 수치해석 모델 검증은 사전 연구에서 요동하는 원형관 내 DNB 예측을 통해 수행함

# 봉다발 DNB 모의 조건 선정

- 요동 조건에서 봉다발 DNB 실험 데이터는 보고 되거나 공개 된 바 없음
- Greenwood (2017) 실험 모의 조건에 요동을 추가함



- 요동 조건 :  $T = 6 \text{ s}$ ,  $\theta_{\max} = 30^\circ$
- 요동 회전축 비틀림 조건 :  $\phi = 0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$
- 열유속 : DNB 발생까지 주기적으로  $q_{\text{avg}}$  점진적 증가

➤ 불균일한 열유속 조건

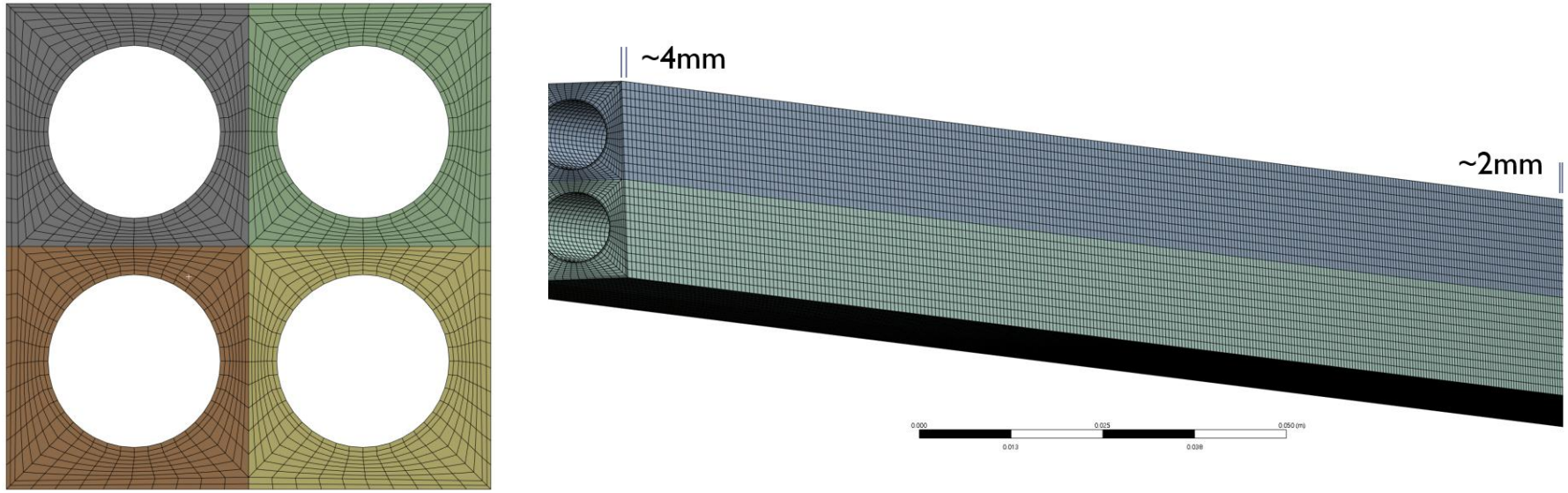
$$\frac{q(x)}{q_{\text{avg}}} = \theta_0 + \theta_1 \cos\left(2\theta_2 \left[\frac{x}{L_{HL}} - 0.5\right]\right)$$

Given:  $\theta_0 = 0.8187$ ;  $\theta_1 = 0.6813$ ;  $\theta_2 = 2.4364$

- 전지구 평균 파주기는 8 ~ 10초이며, 요동의 영향을 더 명확하게 보기 위해 더 짧은 주기 선정
- 국제해사기구의 안전기준에 따르면 일반적으로 갑판에 침수가 발생하는 기울기 한계가  $30^\circ$ 임

# 수직 봉다발 DNB 예측

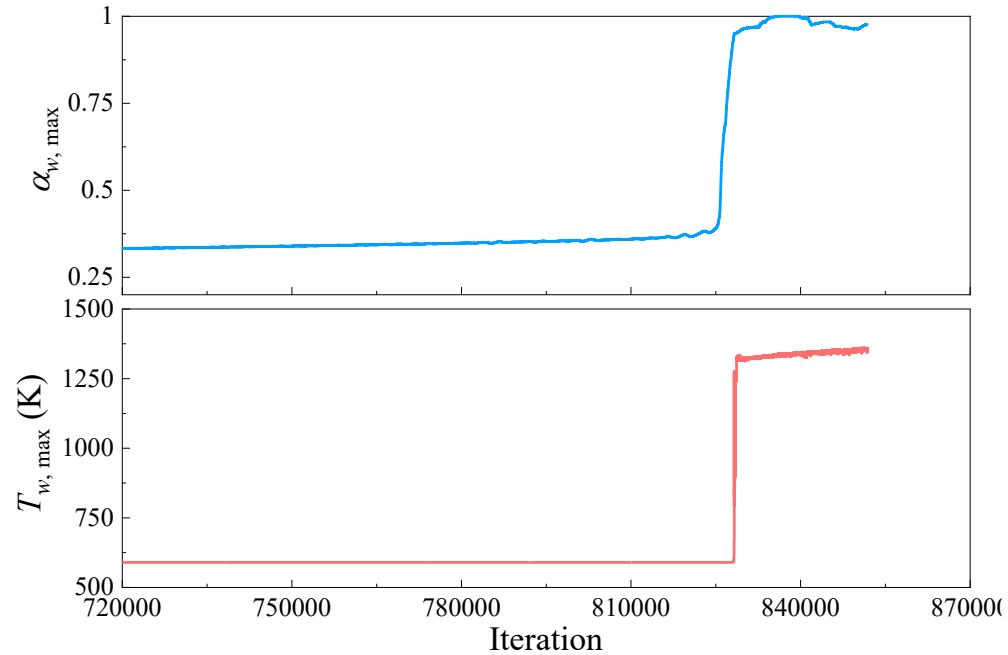
## □ 봉다발의 격자 형상



- 가열면이 위치하는 각 원형봉 주위에 조밀한 격자를 배치
- 원형봉의 벽면에 맞닿은 격자 크기(0.2 ~ 0.08mm)에 따라 4가지 격자를 제작
- 가열 구간의 축방향 격자 크기는 열유속이 가장 큰 중앙부의 격자를 양 끝단보다 조밀하게 구성
- 격자 평균 skewness는 0.2399, Orthogonal quality는 0.91016으로 격자 수준 매우 우수함

# 수직 봉다발 DNB 예측

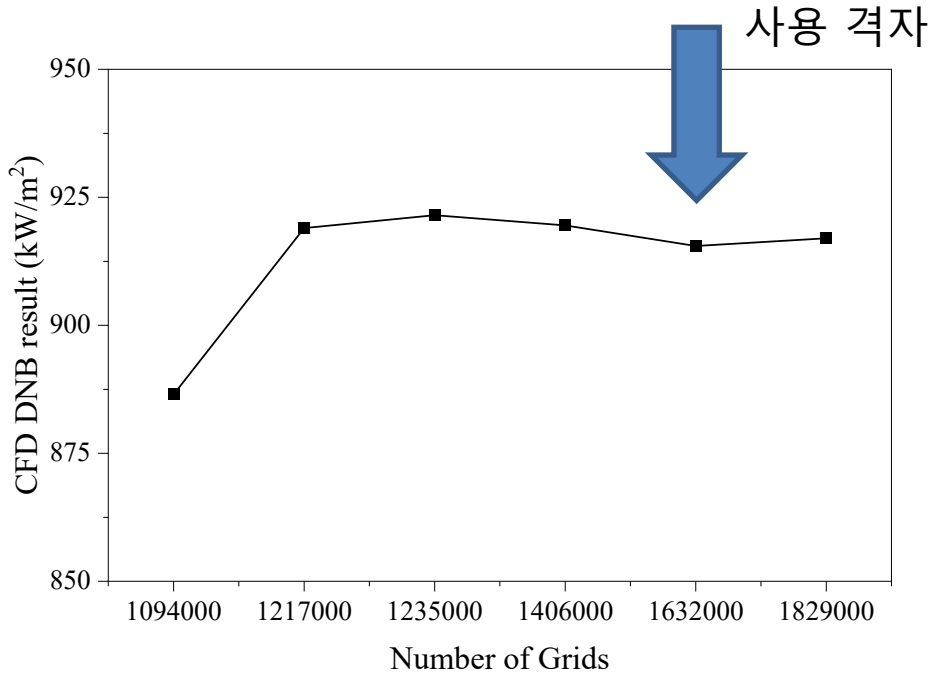
## □ 격자 수렴성 시험



- 수직 고정 조건에 대해서는 Steady state 해석 수행
- DNB 발생 이전부터 열유속 증가에 따른 최대 벽면 기포율 증가가 심해짐
- 기포율이 임계점을 넘으면서 온도의 급상승 발생
- DNB 발생 이후의 온도 수치는 실제와 맞지 않을 수 있으나 DNB가 발생하는 열유속의 값은 맞음

# 수직 봉다발 DNB 예측

## □ 격자 수렴성 시험

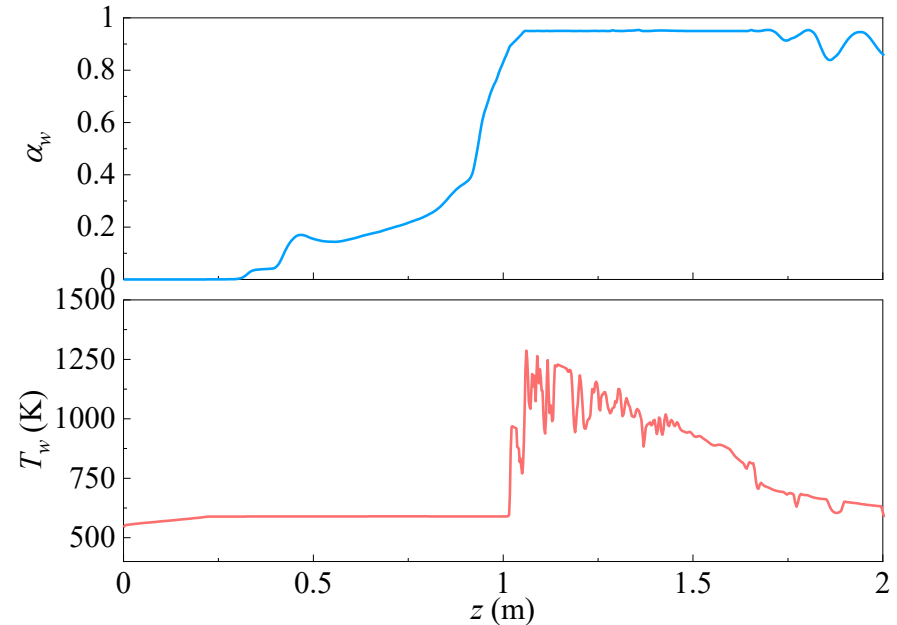
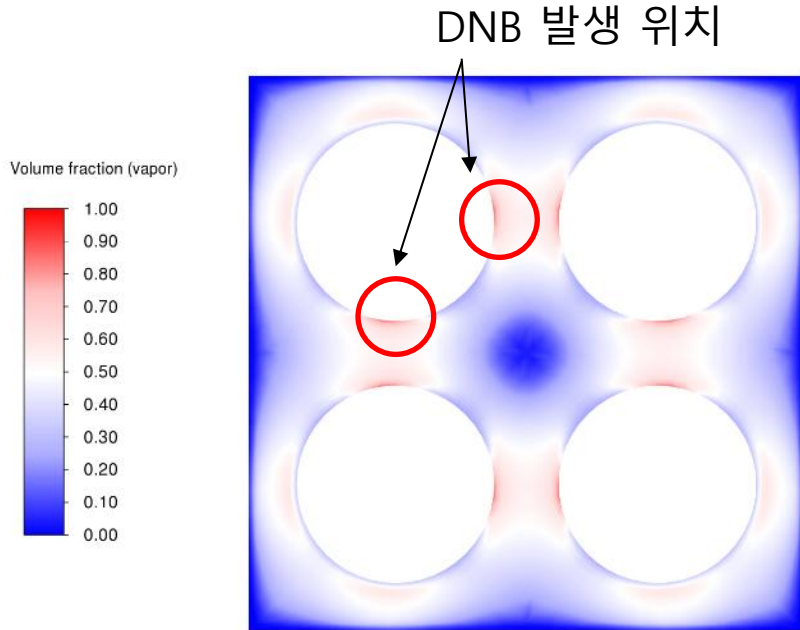


| Number of Grids | CFD DNB result          | Exp. DNB              |
|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| 1,094,000       | 886.5 kW/m <sup>2</sup> | 831 kW/m <sup>2</sup> |
| 1,217,000       | 919.0 kW/m <sup>2</sup> |                       |
| 1,235,000       | 921.5 kW/m <sup>2</sup> |                       |
| 1,406,000       | 919.5 kW/m <sup>2</sup> |                       |
| 1,632,000       | 915.5 kW/m <sup>2</sup> |                       |
| 1,829,000       | 917.0 kW/m <sup>2</sup> |                       |

- 각 격자에서 DNB가 발생하는 열유속의 값을 실험값과 비교
- 1,217,000개 이상의 격자 수에서 수렴된 결과를 보임
- 수렴된 격자 수 중에서 실험값과 차이가 가장 적은 격자 수 1,632,000개 격자 사용
- 실험값과의 차이  $|1 - (\text{DNB}_{\text{CFD}} / \text{DNB}_{\text{Exp.}})|$  는 0.109 미만으로 매우 유사한 결과를 보임
- 연구에 사용된 공간 분율 모델의 임계기포율  $\alpha_{v,cr} \cong 0.8$  은 본 연구의 조건과 유사한 조건 ( $P = 100 \text{ bar}$ ,  $G = 1492.0 \sim 1983.0 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $T_{\text{sub}} = 9.6 \sim 11.7 \text{ K}$ )에서 평균 19.59%의 오차를 보이므로 실험값과 매우 유사한 결과라고 할 수 있음 (Chauhan et al.)

# 수직 봉다발 DNB 예측

## □ 봉다발 내 DNB 위치 기포율 및 온도 분포



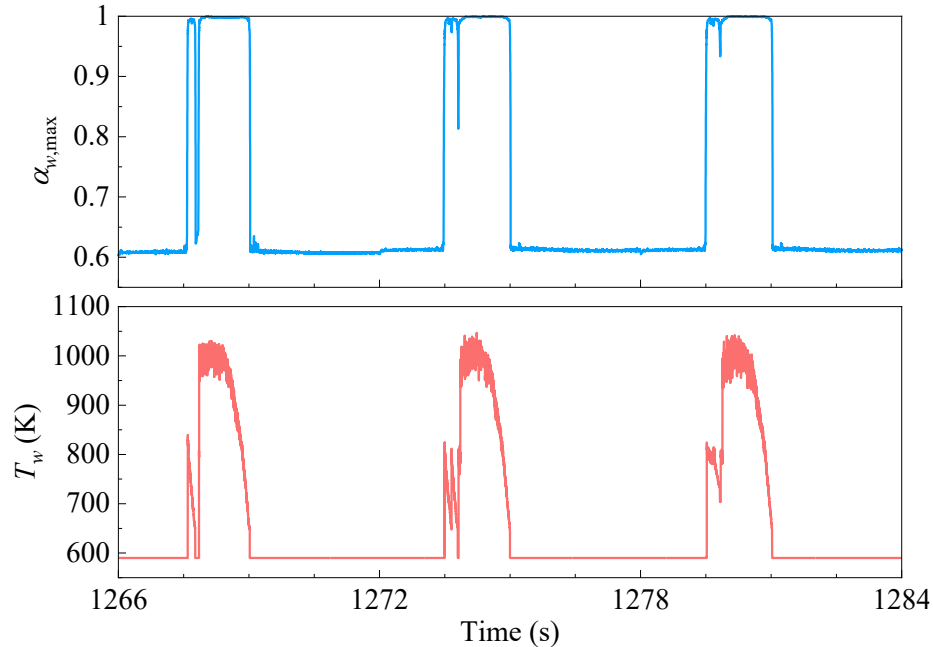
[봉다발의 DNB 발생 지점 단면에서 기포율 분포] [해당지점에서 높이에 따른 벽면 기포율 및 온도 변화]

- DNB는 봉다발을 구성하는 가열봉 사이의 서브채널에서 발생
- 불균일한 열유속 때문에, 기포율이 높아도 벽면의 온도는 중앙 부분이 가장 높은 것을 확인 가능
- 기포율이 0.8을 초과한 이후부터 증발 열전달도 급격히 감소하고 증기의 대류 열전달이 진행
- 기존 봉다발 DNB 연구에서는 이와 같은 서브채널에 대한 연구에 더 중점을 두었음

# 요동 봉다발 DNB 예측 결과

## □ 요동 조건에서의 간헐적인 DNB

- 요동 진폭  $\theta_{\max} = 30^\circ$ , 회전축 비틀림  $\varphi = 0^\circ$

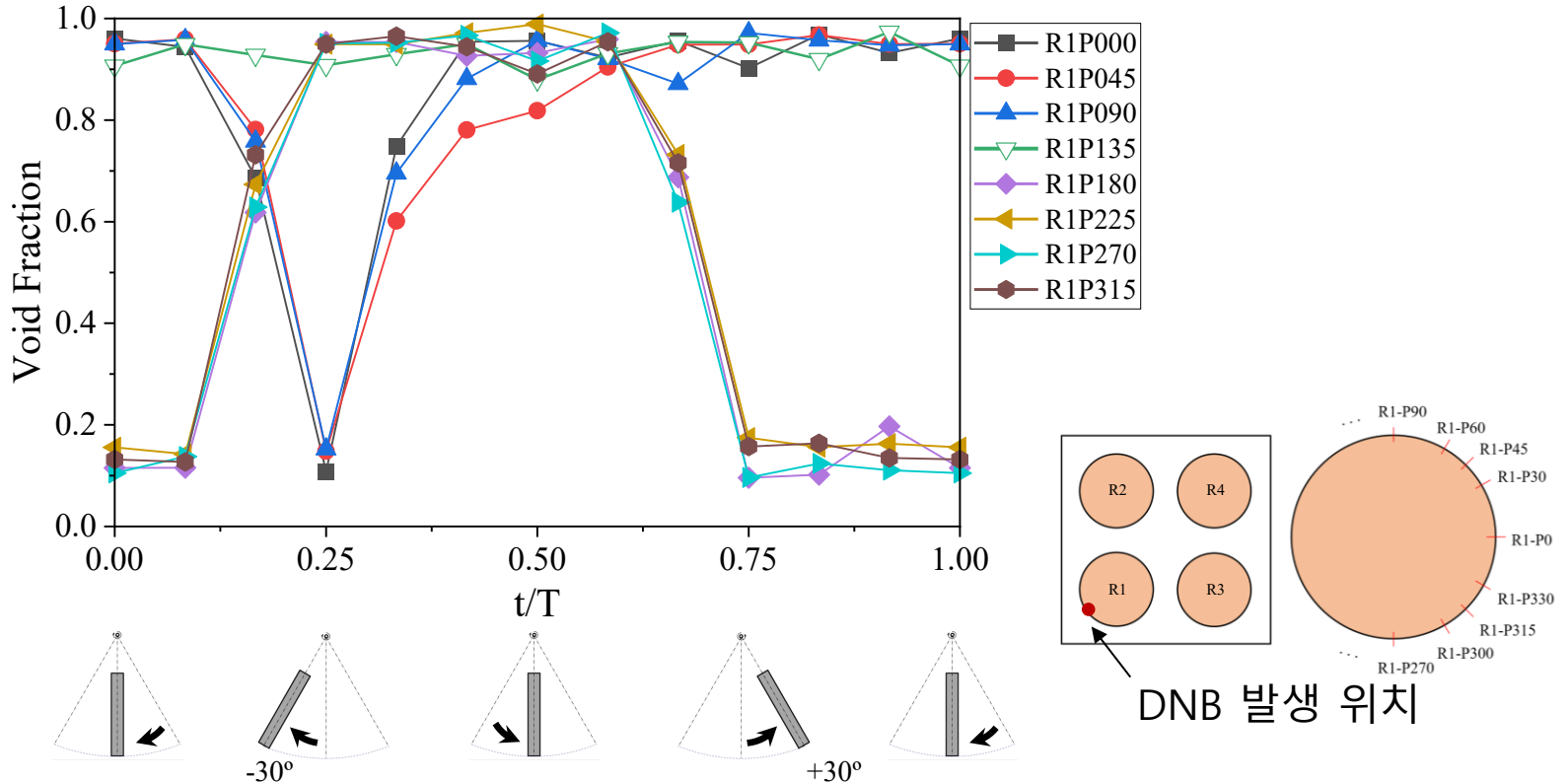


[요동하는 봉다발에서의 벽면 최대 기포율 및 벽면 최대 온도]

- 요동 조건에서는 단기적이고 반복적인 벽면 최대 기포율 및 최고 온도의 급상승이 확인됨
- 최대 기포율이 임계값 이하로 하강하지 않고 최고 온도가 포화온도로 복귀하지 못하는 지점을 DNB로 판단할 예정
- 이후 각각의 요동 진폭과 회전축 비틀림에 따른 DNB의 변화를 비교하고, 시간에 따른 국지적인 기포율의 변화와 열유속을 구성하는 각 열유속 항들의 변화를 확인하여 DNB 변화의 원인을 확인

# 요동하는 봉다발 DNB 예측 결과

□ 요동 조건에서의 DNB CFD 결과 (회전축 비틀림  $\varphi = 0^\circ$ )

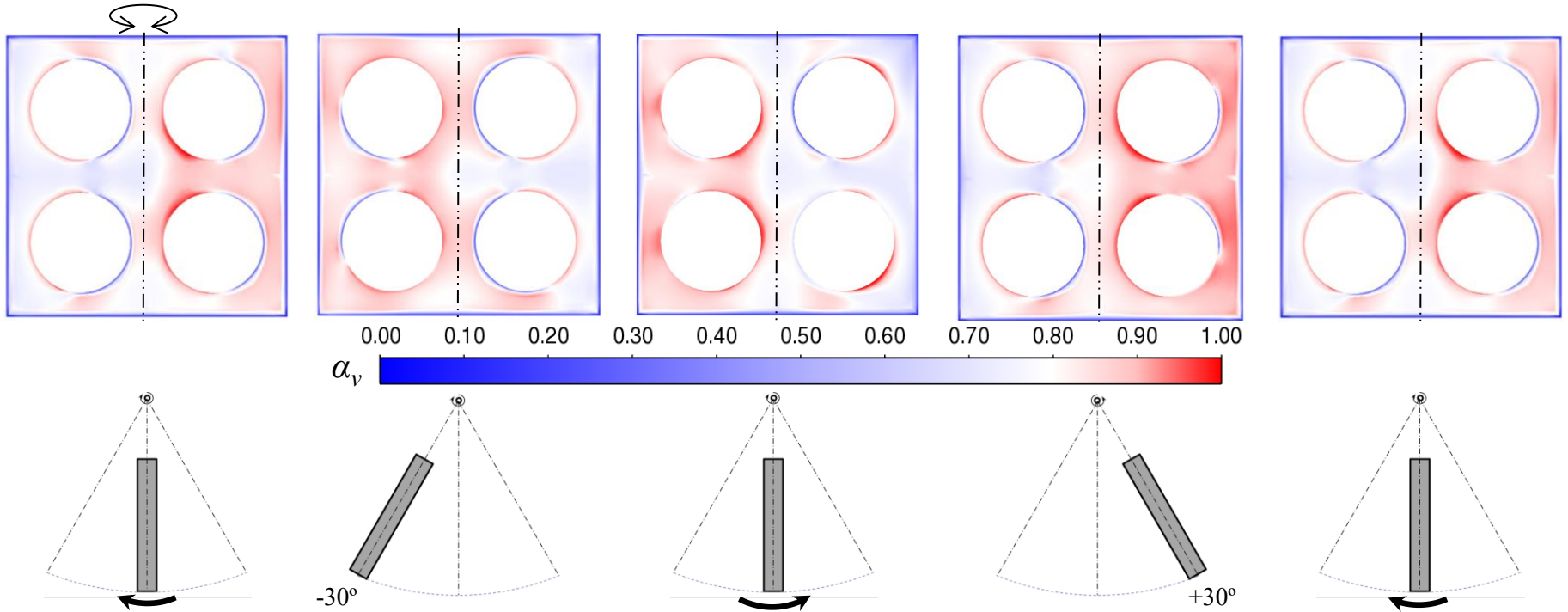


[R1 가열봉의 1주기동안 1.935m 높이에서 원주방향 8개 지점의 기포율 변화]

- 열유속  $1193.0 \text{ kW/m}^3$ 에서 가열봉 R1의 R1-P135, 높이 1.935m에서 1주기동안 연속적인 DNB 발생
- $t/T$  는 시간/주기로,  $t/T=0$ 이 1주기동안 연속적인 DNB가 발생한 열유속의 1주기 시작 시점임
- P135와 비슷한 모습을 보이는 P090, P045는 하방가열면이 아니게 되었을 때 한번 DNB가 해소됨

# 요동하는 봉다발 DNB 예측 결과

□ 요동 조건에서의 DNB CFD 결과 (회전축 비틀림  $\varphi = 0^\circ$ )

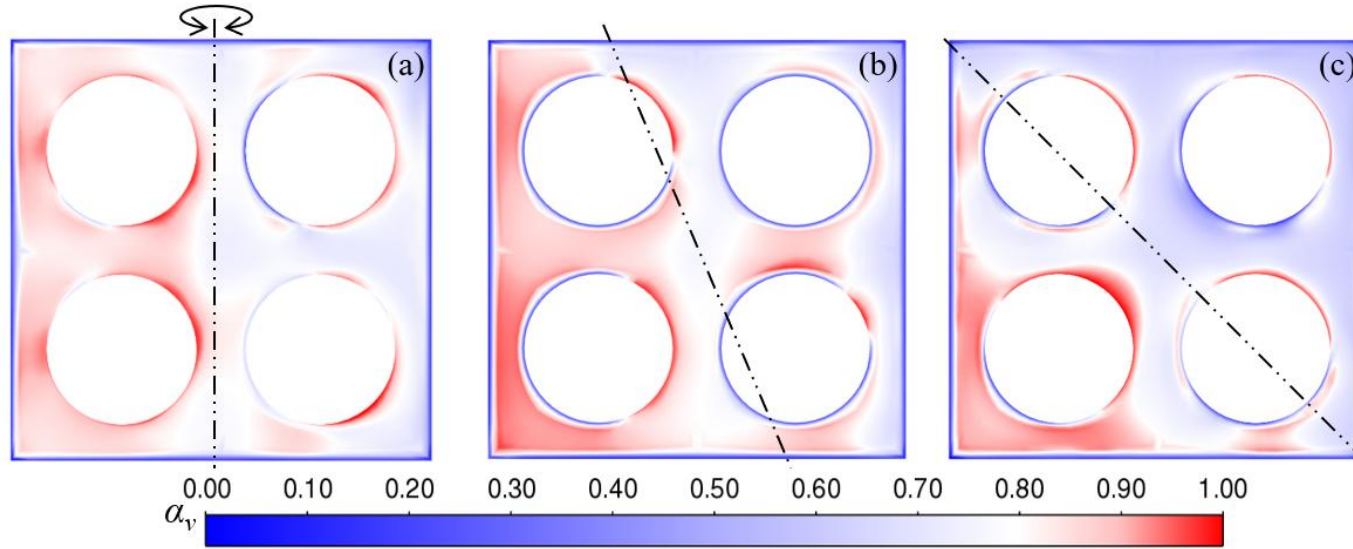


[높이 1.935 m 단면에서 1주기 동안의 기포율]

- 각도가 증가하면 부력으로 인해 한 쪽으로 기포가 집중되는 것을 확인 가능함
- 각도가 감소하면 누적된 부력의 영향으로 기포 집중이 유지되며 가열봉의 서브채널 바깥 영역도 잠식함  
→ 때문에 서브채널 바깥의 하방가열면에서 DNB가 발생하여 1주기동안 DNB 상태가 유지됨
- 요동에 따른 부력의 작용 방향 변화에 의한 기포의 국소적인 집중 현상이 DNB를 발생시킴

# 요동하는 봉다발 DNB 예측 결과

## □ 요동축이 비틀린 조건에서의 DNB CFD 결과 비교

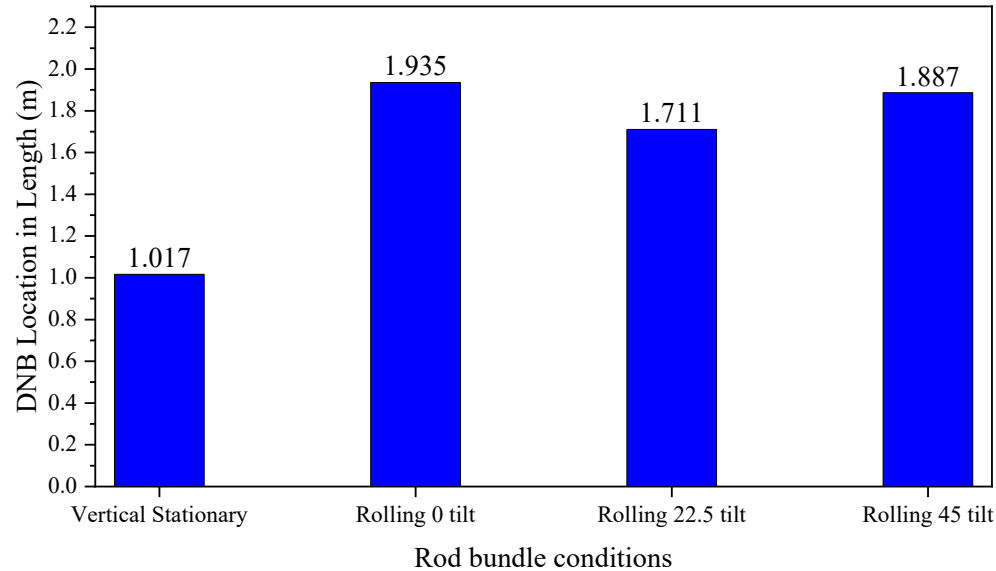


[요동하는 봉다발의  $t/T=0.5$  단면에서 기포율 분포 : 요동축 비틀림 (a)  $0^\circ$ , (b)  $22.5^\circ$ , (c)  $45^\circ$ ]

- 부력으로 인해 기포가 집중될 때 가열봉만이 아닌 채널의 벽면에도 기포가 집중되는데, 요동축 비틀림에 따라 기포의 편향 집중 양상이 변화함
- 요동축 비틀림  $45^\circ$ 의 경우 채널 모서리에 기포가 쌓이면서 가열관을 잠식하여 요동에 의한 DNB 개선 효과를 상쇄함
  - 요동하는 조건에서는 봉다발 뿐만 아니라 **봉다발을 둘러싼 채널의 형상이 DNB의 발생에 영향을 줌**
- 비틀림  $0^\circ$ 에서는 P1P135, 비틀림  $22.5^\circ$ 에서는 P1P060, 비틀림  $45^\circ$ 에서는 P4P000, P4P270에서 DNB가 발생
  - 모두 **서브채널 바깥 영역에서 채널의 영향으로 DNB 발생함**

# 요동하는 봉다발 DNB 예측 결과

□ 수직 고정 조건과 요동축이 비틀린 조건에서의 DNB CFD 결과 비교

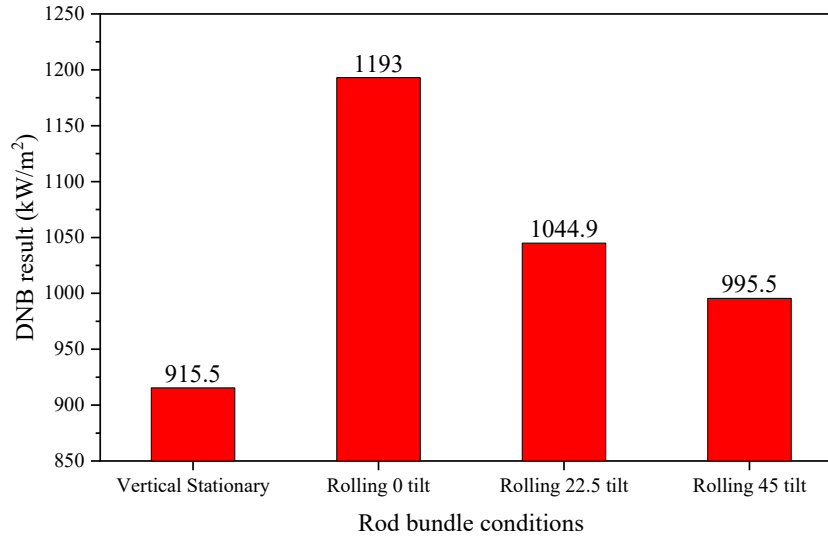


| Case       | Vertical Stationary | Rolling ( $\theta_{max} = 30^\circ$ ) |                          |                        |
|------------|---------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------------------|
|            |                     | Axis tilted $0^\circ$                 | Axis tilted $22.5^\circ$ | Axis tilted $45^\circ$ |
| DNB Height | 1.017 m             | 1.935 m                               | 1.711 m                  | 1.887 m                |

- 각 조건에 따른 1주기동안 연속적으로 DNB가 발생한 위치의 가열구간 시작점으로부터의 높이 비교
- 요동 조건에서 DNB가 1주기동안 유지된 위치는 수직 고정 조건보다 더 높은 곳에서 확인됨
- 벌크 영역에 기포율이 높은 봉다발 상부가 요동에 의해 발생하는 기포 거동에 의해 영향을 더 많이 받기 때문

# 요동하는 봉다발 DNB 예측 결과

## □ 수직 고정 조건과 요동축이 비틀린 조건에서의 DNB CFD 결과 비교

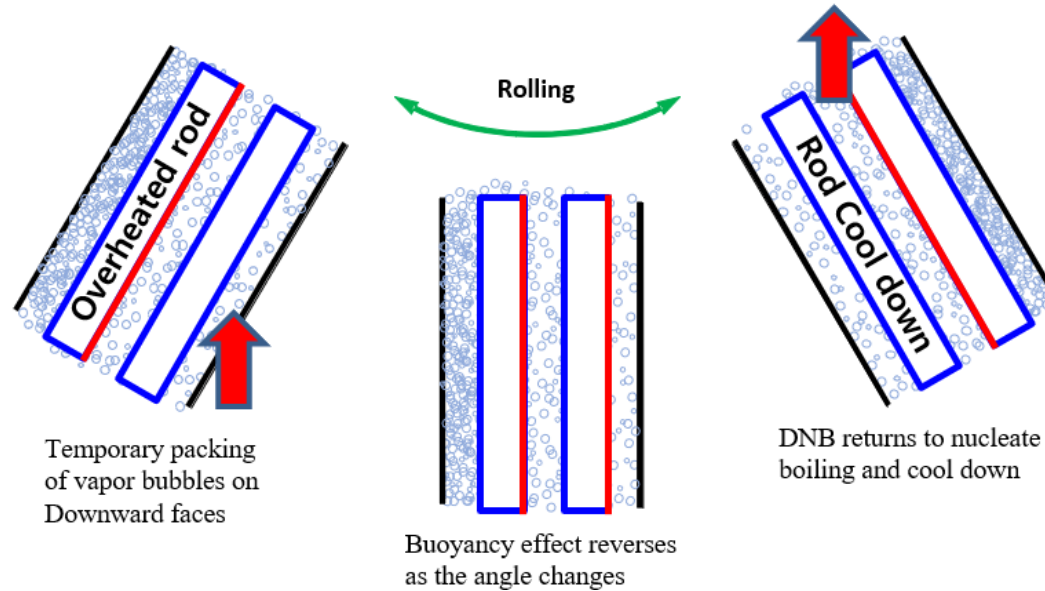


| Case       | Vertical Stationary     | Rolling ( $\theta_{max} = 30^\circ$ ) |                          |                         |
|------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
|            |                         | Axis tilted 0°                        | Axis tilted 22.5°        | Axis tilted 45°         |
| DNB result | 915.5 kW/m <sup>2</sup> | 1193.0 kW/m <sup>2</sup>              | 1044.9 kW/m <sup>2</sup> | 995.5 kW/m <sup>2</sup> |
| DNB ratio  | 1                       | 1.303                                 | 1.141                    | 1.087                   |

- 전체적으로 요동 조건이 DNB를 상승시킴 → 요동에 의한 지속적인 기포 집적 저해가 DNB 상승 효과
- 요동에 의해 국지적으로 기포가 집중되어 간헐적인 DNB가 발생하지만, 마찬가지로 요동에 의해 이 현상이 해소되면서 DNB를 상승시키게 됨

# 요동하는 봉다발 DNB 예측 결과

## □ 요동 조건에서의 DNB 발생 메커니즘



- 요동이 진행되는 동안 봉다발이 한 쪽으로 기울면 부력으로 인해 하방가열면에 기포가 쌓여 일시적인 DNB가 발생함
- 하방가열면이 요동에 따라 수직 상태가 되면 부력으로 인한 기포 집중 현상이 해소되며, 반대편으로 기울면서 상방가열면이 부력이 오히려 기포를 떼어내는 효과를 가짐
- 또한 봉다발의 2x2 배열상 한 쪽에서는 가열봉이 위쪽에 위치하여 기포가 집중되지만, 반대편으로 기울어지면 아래쪽에 위치하게 되어 가열봉 주변에서 기포가 제거되는 효과가 발생함.
- **벌크 영역의 기포율이 높아 기포의 편향 집중 효과가 큰 봉다발의 상단에서 충분한 열유속이 존재하여 가열봉이 아래쪽에 위치하였을 때에도 하방가열면에서 기포율이 임계기포율 이상으로 유지되면 DNB로 발전함**

## □ 본 연구의 목적

- 요동하는 봉다발 내 DNB 수치해석 체계 확립
- 요동하는 2x2 봉다발에서 DNB 예측

## □ 요동이 봉다발 내 DNB에 미치는 영향

- 수직 조건과 요동 조건의 가장 큰 차이점 :
  - 요동하는 봉다발에서는 DNB가 간헐적으로 발생함
  - 열유속이 가장 높은 가열봉의 중앙이 아닌 기포율이 높은 상단에서 DNB가 발생함
  - 요동하는 봉다발에서는 봉다발 주위의 채널 벽면의 영향으로 서브채널 바깥에서 DNB가 발생함
- 요동에 따른 부력의 작용 방향 변화가 기포의 거동을 크게 변화시키며 DNB 변화에 기여함
  - 요동축 비틀림에 따라 DNB가  $995.5 \text{ kW/m}^2 \sim 1193.0 \text{ kW/m}^2$  로 수직 고정조건  $915.5 \text{ kW/m}^2$  보다 증가
  - 그 중 요동축 비틀림  $0^\circ$ 에서  $1193.0 \text{ kW/m}^2$  로 가장 증가폭이 컸고, 요동축 비틀림  $45^\circ$ 에서  $995.5 \text{ kW/m}^2$  로 가장 증가폭이 작았음
- 요동축의 비틀림이 변화하면 일부 가열봉이 더 많은 기포에 노출되어 비교적 이르게 DNB가 발생함

## □ 현재 연구의 한계

- 가열봉의 수가 적음
- 요동 조건의 봉다발 내 DNB 데이터의 검증 필요