

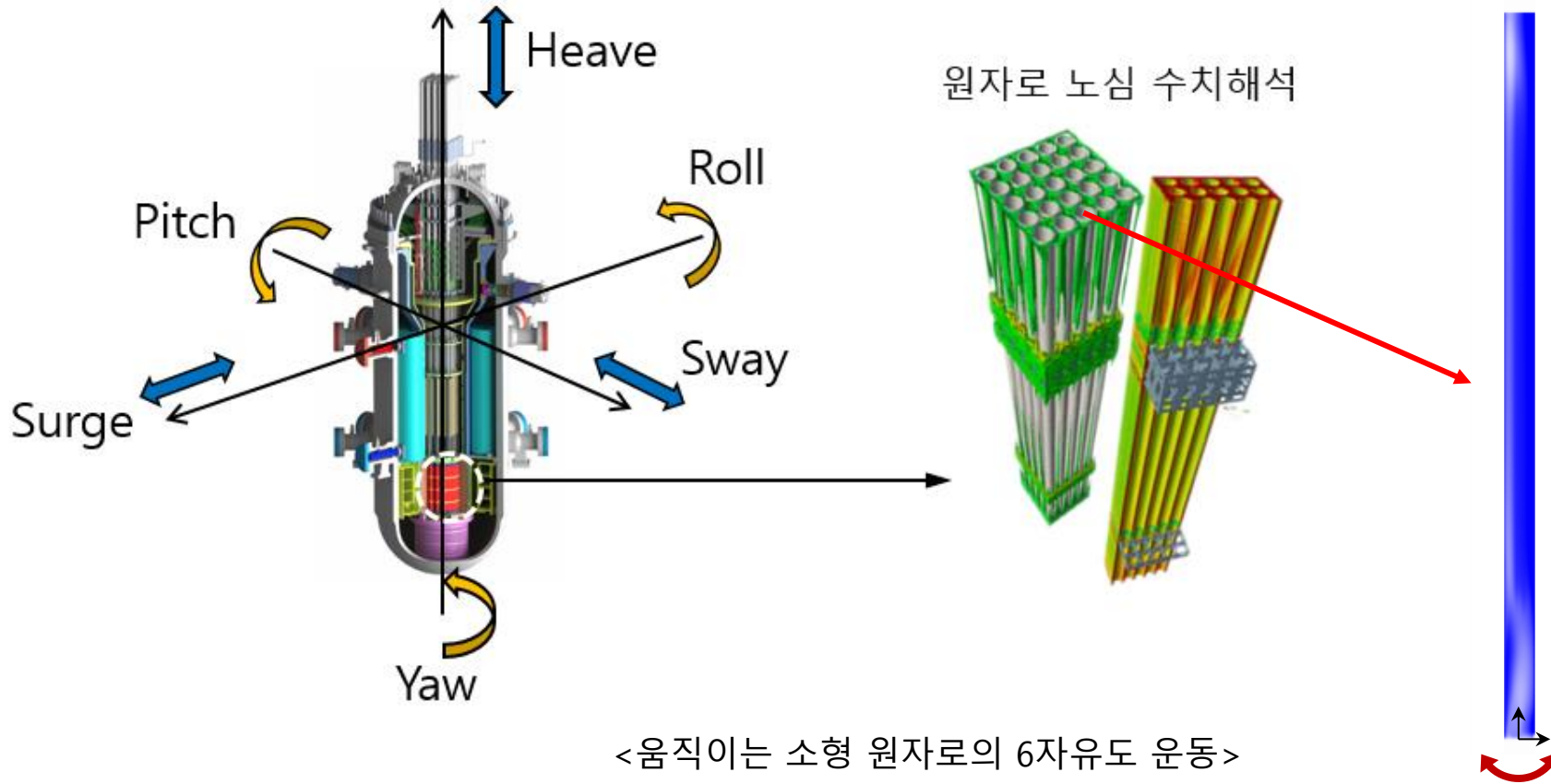
Experimental Investigation of the Bubble Behavior Under Rolling Oscillations

2023. 5. 19.

Presenter: Myungho Kim

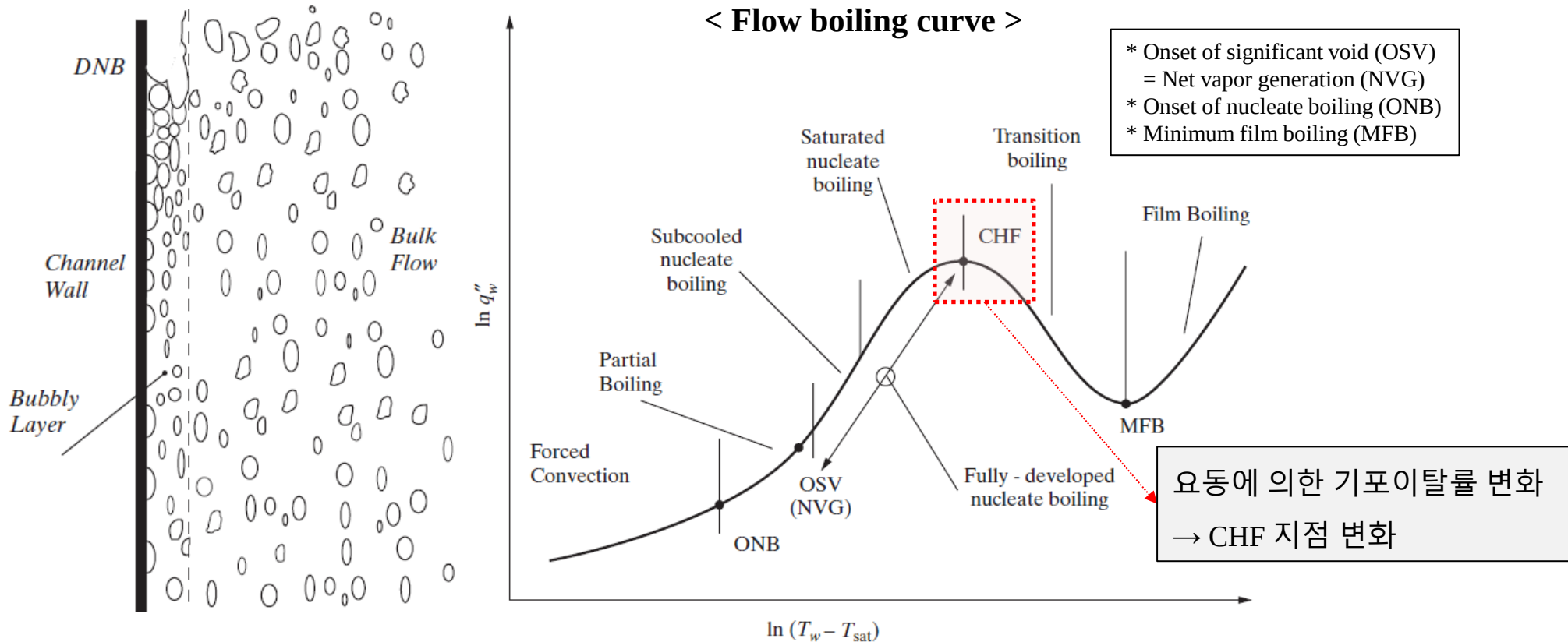
Department of Mechanical Engineering
Chungnam National University

- 연구 배경
- 연구 동향
- 관련 이론
- 실험장치 구성
- 수직 원형관 내 기포 변수 측정
- 수직 원형관 내 기포류 수치해석
- 결론



- 에너지 자원이 부족한 우리나라에서는 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해 원자력발전이 가장 효과적인 저탄소 전력원임. (21년 기준, 전체 에너지 사용의 약 27%를 원자력 발전이 차지)
- 최근 소규모 분산 전력망에 적합한 **해양원전** 및 **소형모듈원자로(SMR)** 개발에 대한 관심이 증가함.
- 해양원전에서는 원자로 냉각성능 예측을 위해 선박의 **6자유도 운동을 고려한 열수력 해석이 중요.**

□ 핵연료 벽면의 기포 거동의 중요성



Ref.: Two-Phase Flow, Boiling and Condensation, S. Mostafa, 2008

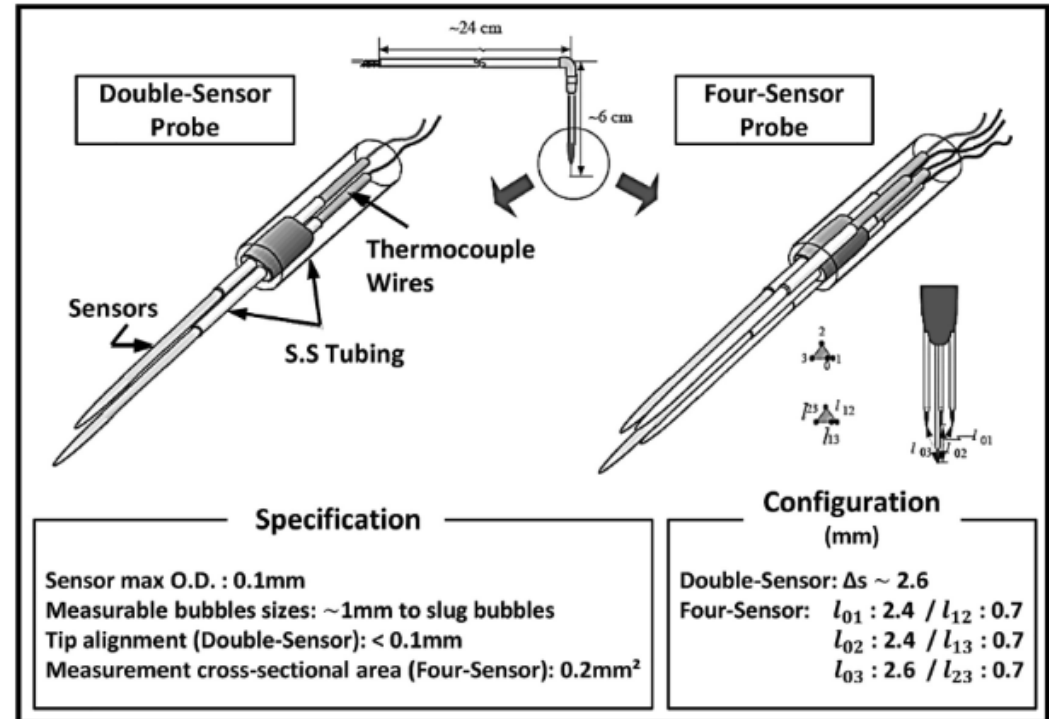
- 높은 열을 방출하는 원자로의 효과적인 냉각을 위해 2상 열관리가 필수적임
- 열전달 성능이 급격하게 감소하기 시작하는 CHF 예측은 안전 설계에서 매우 중요함
- 열전달 모델링에서 중요한 역할을 하는 **기포율 분포**를 예측하는 것이 핵심

□ 기포 변수 측정

Class	Typical regimes	Geometry	Configuration	Examples
Separated flows	Film flow		Liquid film in gas Gas film in liquid	Film condensation Film boiling
	Annular flow		Liquid core and gas film Gas core and liquid film	Film boiling Boilers
	Jet flow		Liquid jet in gas Gas jet in liquid	Atomization Jet condenser
Mixed or Transitional flows	Cap, Slug or Churn-turbulent flow		Gas pocket in liquid	Sodium boiling in forced convection
	Bubbly annular flow		Gas bubbles in liquid film with gas core	Evaporators with wall nucleation
	Droplet annular flow		Gas core with droplets and liquid film	Steam generator
	Bubbly droplet annular flow		Gas core with droplets and liquid film with gas bubbles	Boiling nuclear reactor channel
Dispersed flows	Bubbly flow		Gas bubbles in liquid	Chemical reactors
	Droplet flow		Liquid droplets in gas	Spray cooling
	Particulate flow		Solid particles in gas or liquid	Transportation of powder

Two-phase flow parameter

Flow regime, Pressure, **Void fraction**, Gas/Liquid Velocity, IAC, Bubble size ...



Ref.: Interfacial area transport equation and measurement of local interfacial characteristics, Kim, 1999

➤ 국소 위치에서 2상 유동 변수 측정이 중요해지고 있음

Ref.: Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow, ishii, 2011

□ 기포 변수 측정에 관한 연구 동향

• 침투식 측정 기법 연구 사례

➤ 국소 위치에서 **기포율(void fraction)** 과 **기포의 속도(velocity)** 및 **크기(size)**를 측정하기 위한 연구가 주로 수행됨.

• 전기저항 프로브를 이용한 연구 (1963~)

- 기포율: 단일 센서로 측정 / 기포 속도 및 크기: 2-센서 혹은 4-센서 프로브 이용
- 문제점: 높은 측정 민감도

• 광학 프로브를 이용한 연구 (1970~)

- 기포율: 단일 센서로 측정 / 기포 속도 및 크기: 2-센서 혹은 4-센서 프로브 이용
- 문제점: 계면을 통과하는 위치에 따라 신호 품질에 차이 발생

• 도플러 신호를 이용한 연구 (1976~)

- 기포율: X / 기포 속도 및 크기: 단일 센서
- 문제점: 기포 진입각에 따른 측정 불확도 존재, 탐침 오염도에 따라 측정 정확도에 영향을 받음

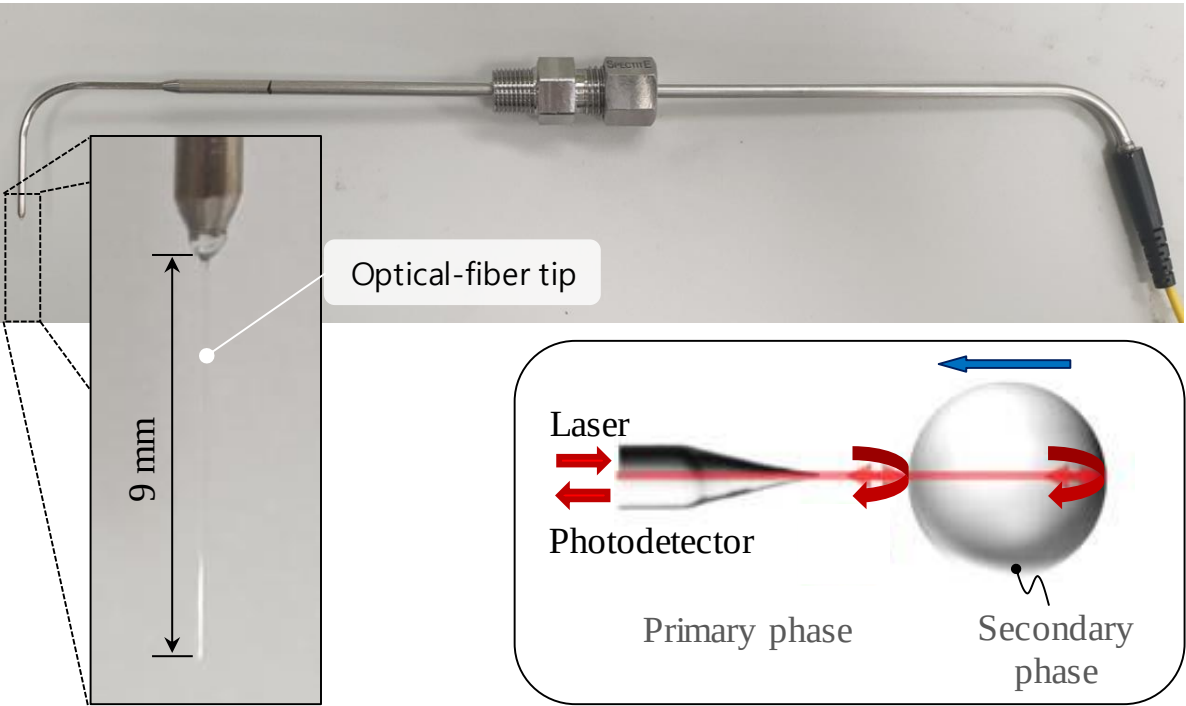
• 광학 프로브와 도플러 신호 결합 (2022~)

- 기포율: 단일 센서로 측정 / 기포 속도 및 크기: 단일 센서로 측정
- 문제점: 기포 진입각에 따른 측정 불확도 존재, 탐침 오염도에 따라 측정 정확도에 영향을 받음

✓ 바늘형 프로브 센서의 발전 과정: 전기저항 → 광학 → 광학 + 도플러 신호 커풀링

관련 이론 - 단일 광섬유 도플러 프로브(Optical-fiber Doppler probe, OFDP)

□ 기포율(Void fraction) 측정 이론



광 검출기로 되돌아오는 레이저 양 (R)

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

n_1 : 광섬유에 노출되는 유체의 굴절률

n_2 : 레이저가 지나가는 유체의 굴절률

기포율 측정

$$\alpha = \frac{\sum_i T_{g,i}}{T_{tot}}$$

$T_{g,i}$: i번째 기포의 지속시간

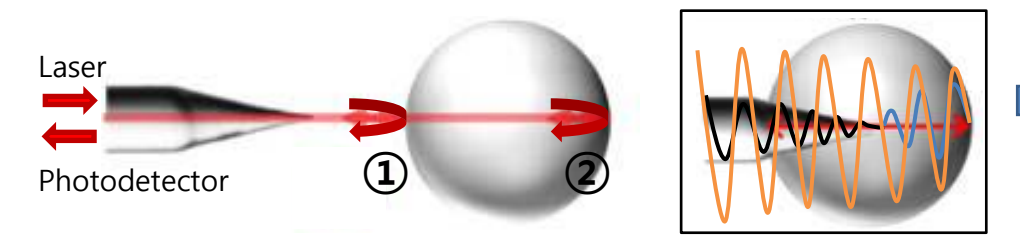
T_{tot} : 임계 전압값을 넘는 기포의 총 통과 시간

* 임계 전압값: (Min.: 0.05V, Max.: 0.266V)

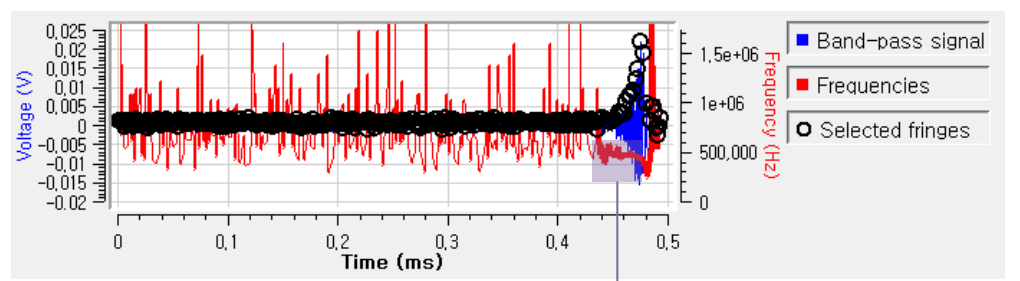
Variable	Value
Bubble diameter	100 μm ~ (better than 10 %)
Bubble velocity	0.5 ~ 80 m/s (better than 10 %)
Void fraction	0 ~ 100 % (better than 5 %)
Tolerance between the probe and the flow direction	30 °
Operating temperature	~ 60 °C
Operating pressure	~ 8 bar

관련 이론 - 단일 광섬유 도플러 프로브(Optical-fiber Doppler probe, OFDP)

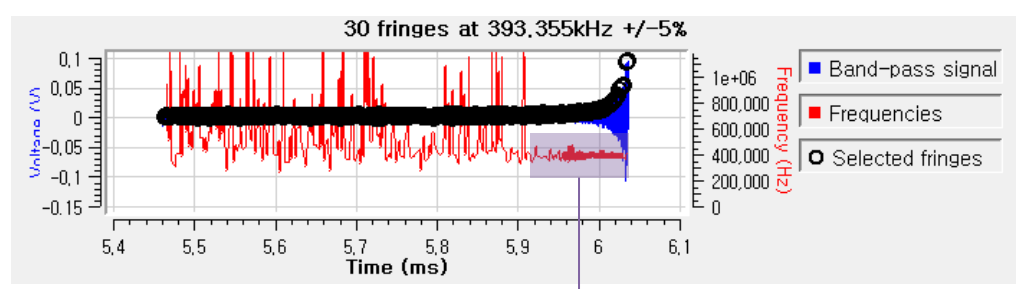
□ 기포 변수 측정 이론



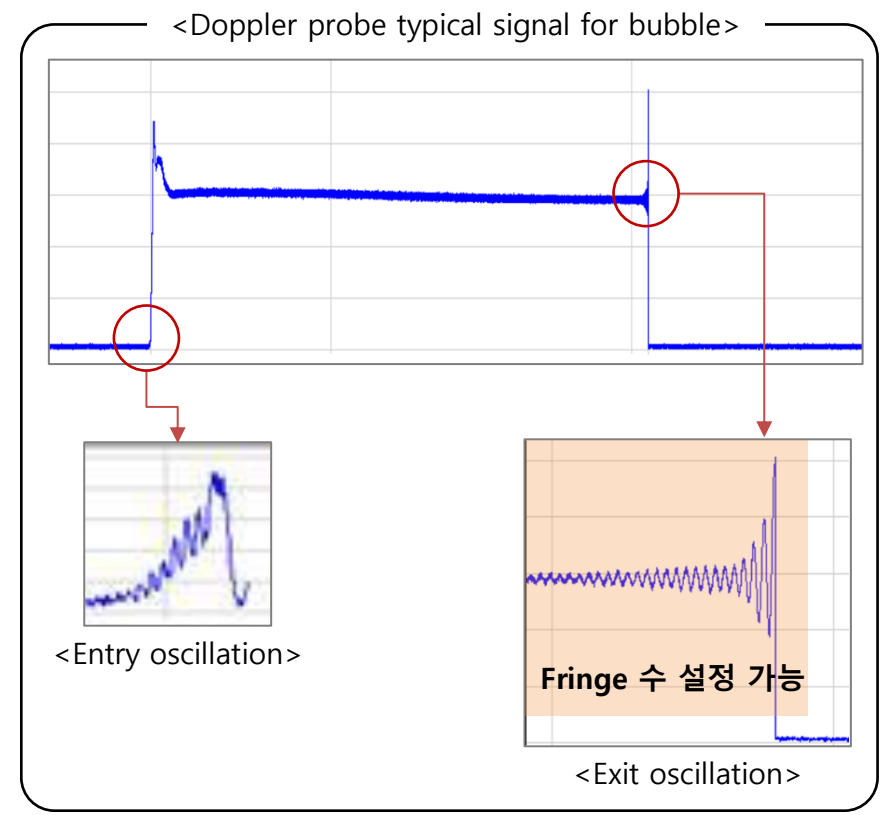
도플러 주파수 정확도는 입사각에 의존하며 90도에 가까울수록 오차 ↑



<Entry oscillation>



<Exit oscillation>



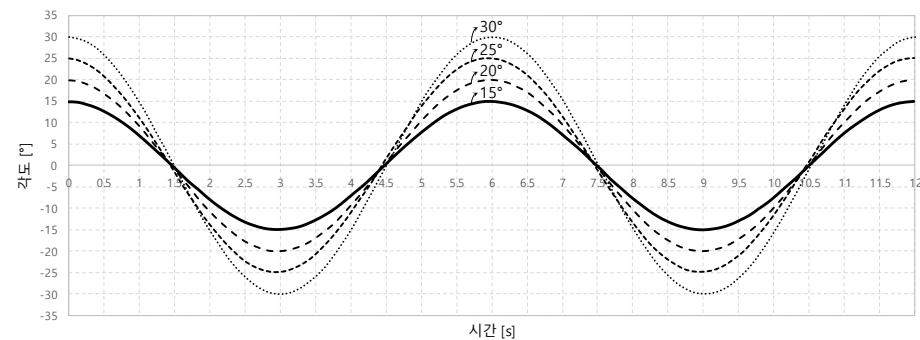
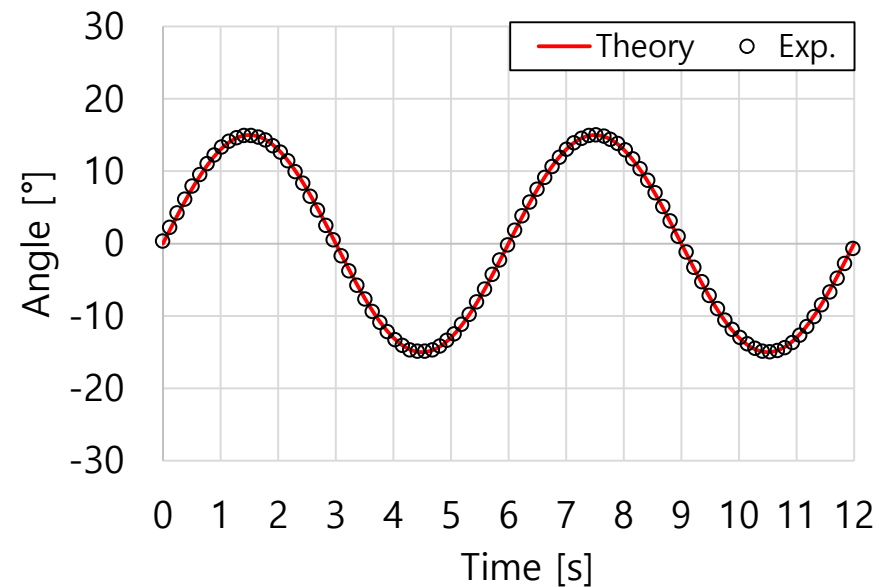
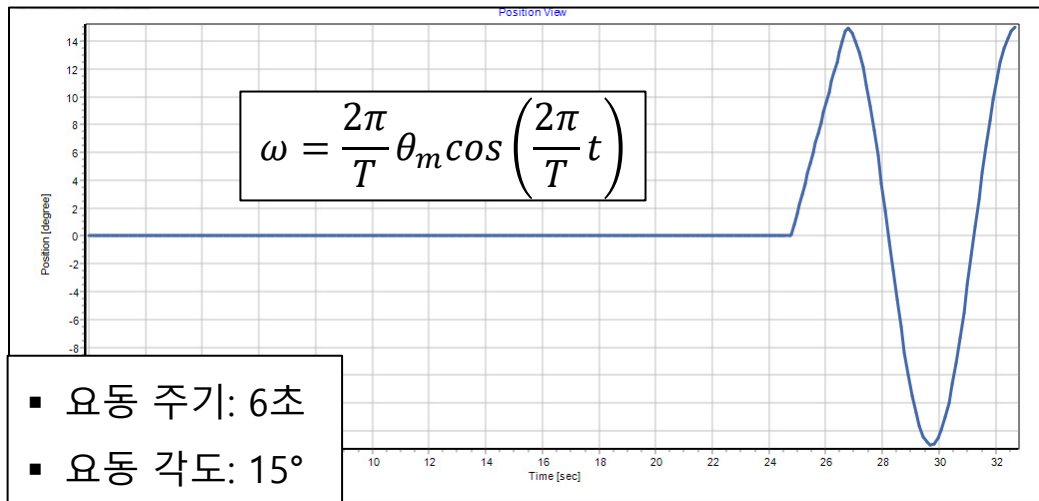
- 프로브는 접촉으로 작동, 팁으로 뚫린 모든 기포나 액적을 측정.
- 레이저는 광섬유 내부로 방사, 빛의 일부가 다시 광 검출기로 반사.
- 기포 또는 액적이 프로브에 의해 뚫릴 때 반사 된 빛을 측정하여 분석.

- 기포의 속도는 출구 측에서 계산하는 것이 더 정확함
- 주파수 비교 그래프(Red)를 보면 입구보다 출구 측이 더 **안정구간**이 긴 것을 확인 가능

기포의 탈수(dewetting)현상으로 인한 오차

실험장치 구성

□ 요동 테스트

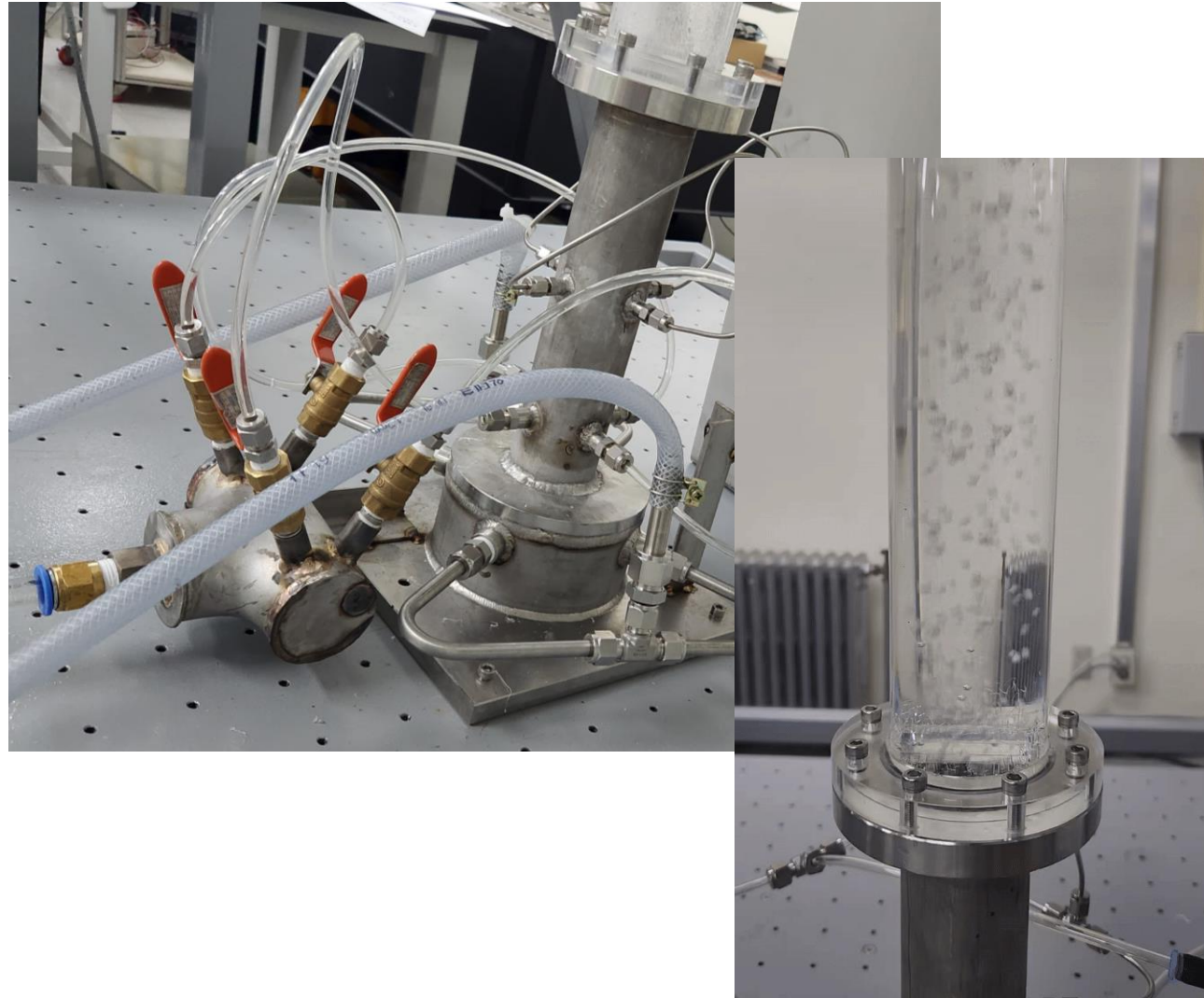
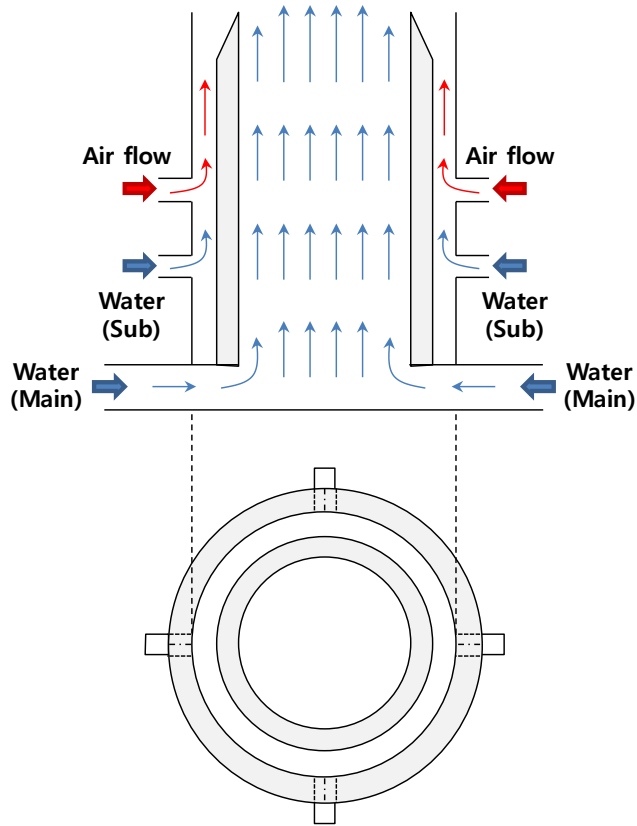


사인파가 잘 구현됨을 확인

수직 원형관 내 기포 변수 측정 및 분석

□ 기포류 발생장치 제작

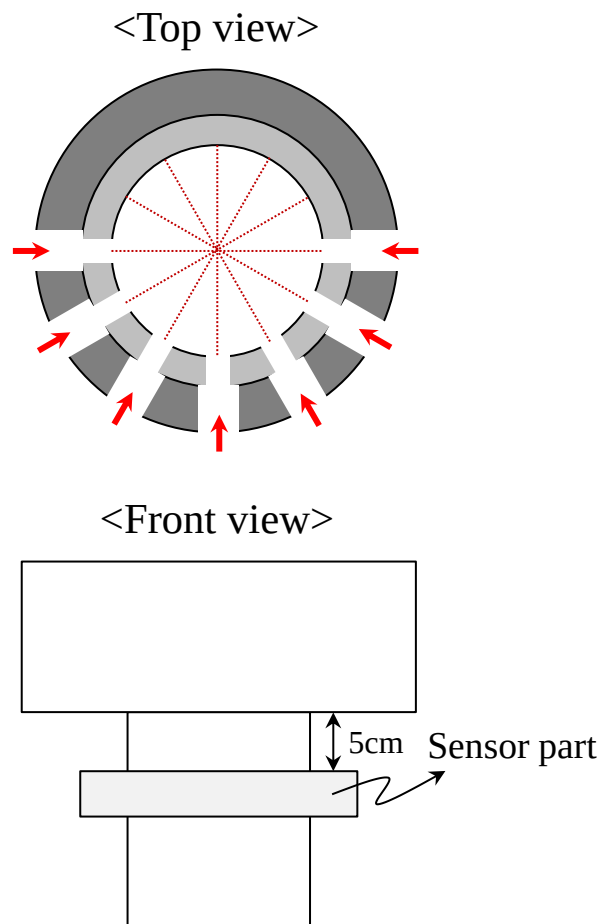
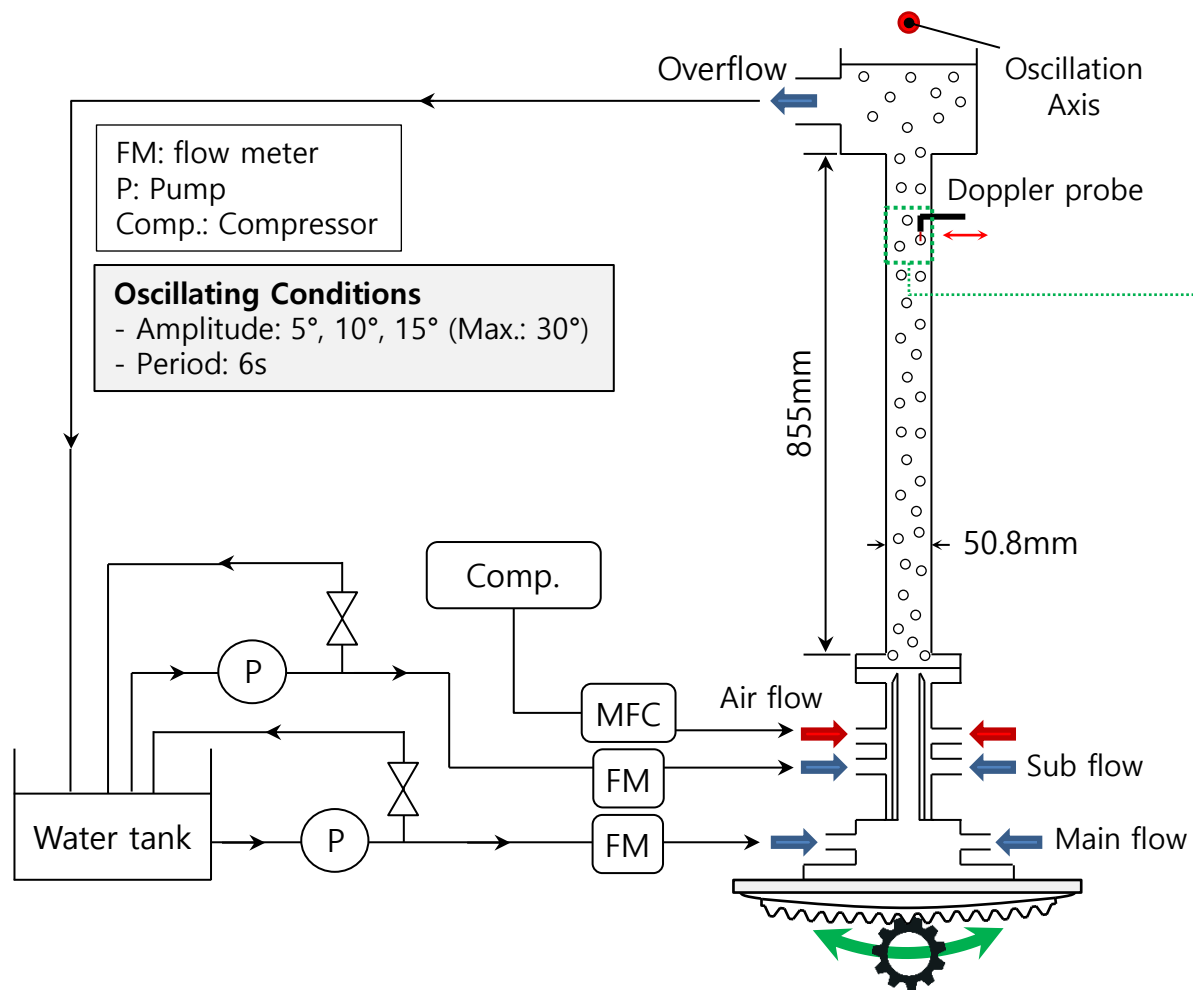
- 기체 유량과 물 유량으로 기포 크기 조절이 가능한 기포류 발생장치 설계 및 제작



수직 원형관 내 기포 변수 측정 및 분석

□ 실험장치 개략도

- 다각도로 측정이 가능한 요동실험장치 제작



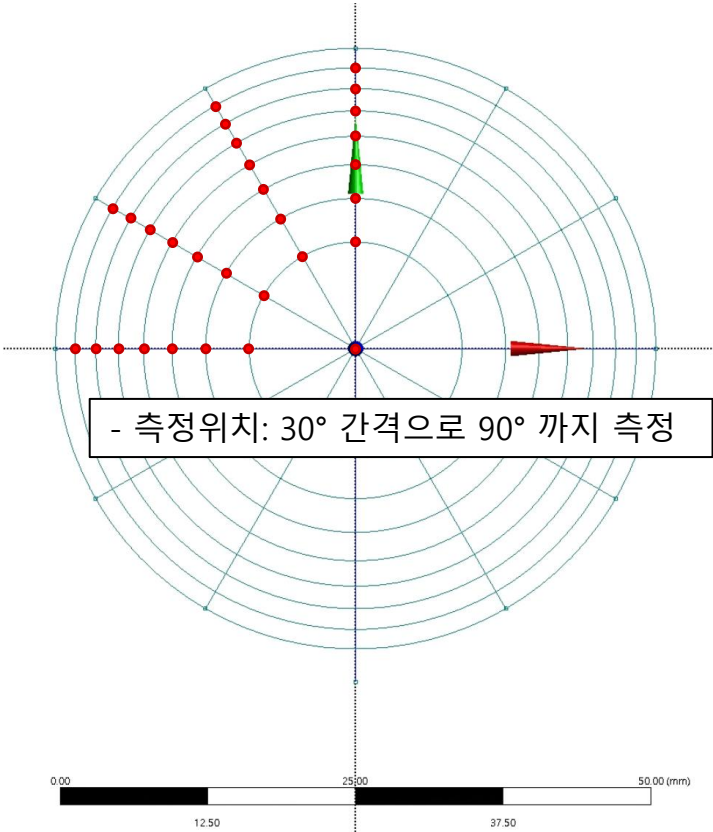
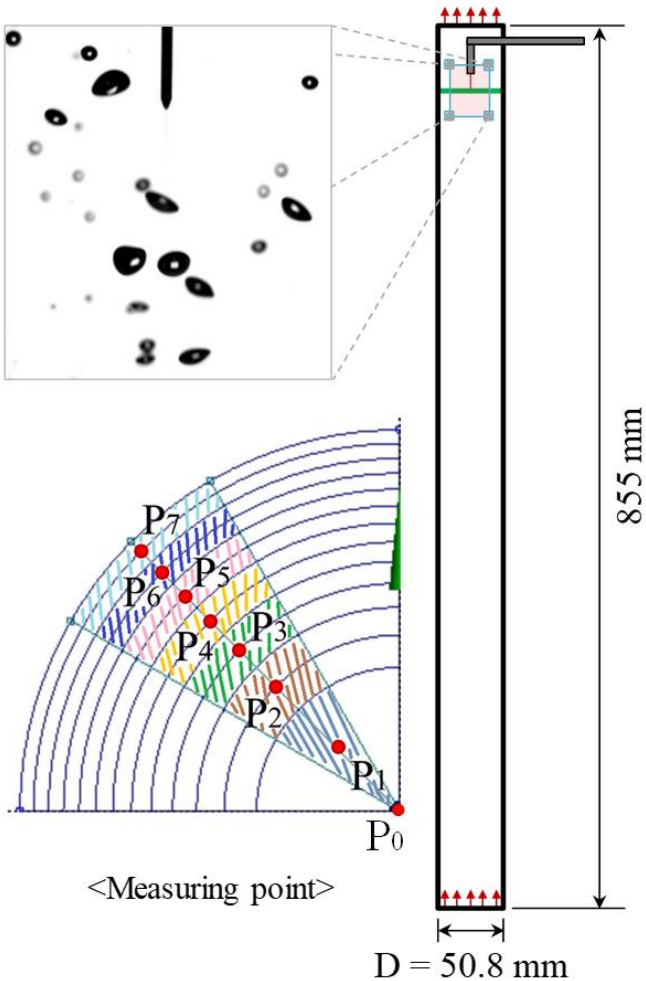
- 수조 직경이 작아 주변에 고리형 아크릴을 덧대어 원하는 위치에서 홀 생성

수직 원형관 내 기포 변수 측정 및 분석

측정위치 선정

- 면적-평균 유량 계산 간소화를 위한 측정위치 선정
 - 측정 위치를 대표하는 면적을 모두 같게 함

Variable	Measuring distance (mm)
P_0	0
P_1	6.8
P_2	11.8
P_3	15.2
P_4	18.0
P_5	20.4
P_6	22.5
P_7	24.5

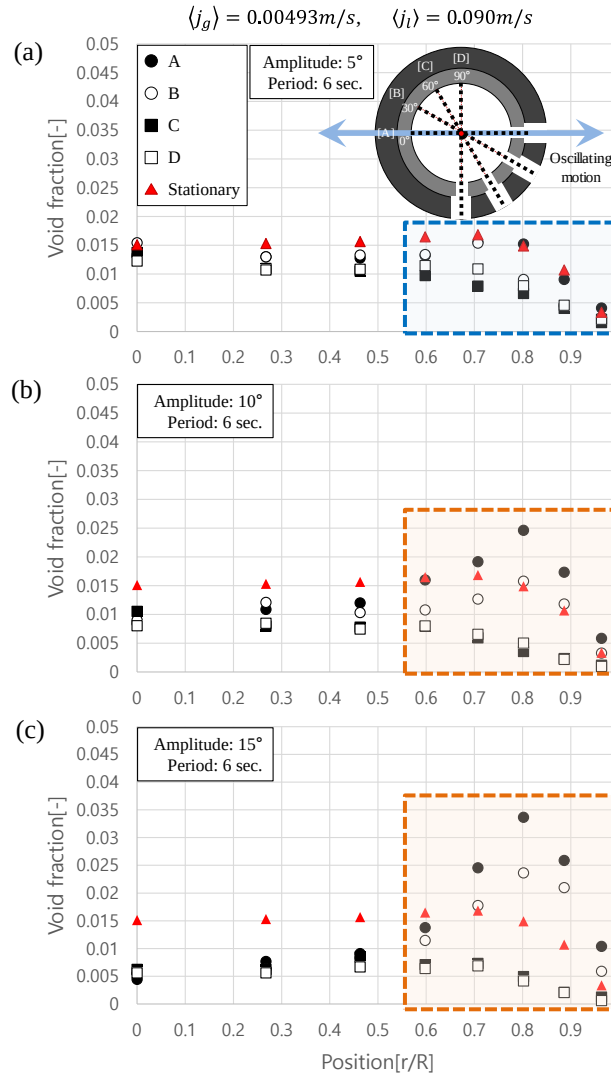
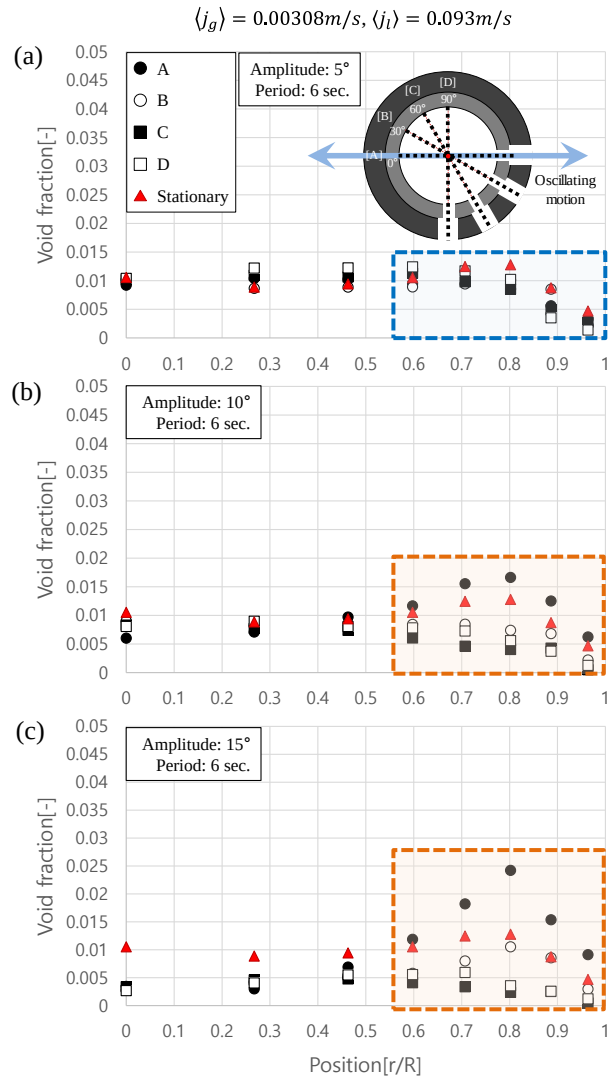


수직 원형관 내 기포 변수 측정 및 분석

□ 요동 상태에서 기포 변수 측정

• Case 1 시간-평균 기포율

• Case 2 시간-평균 기포율



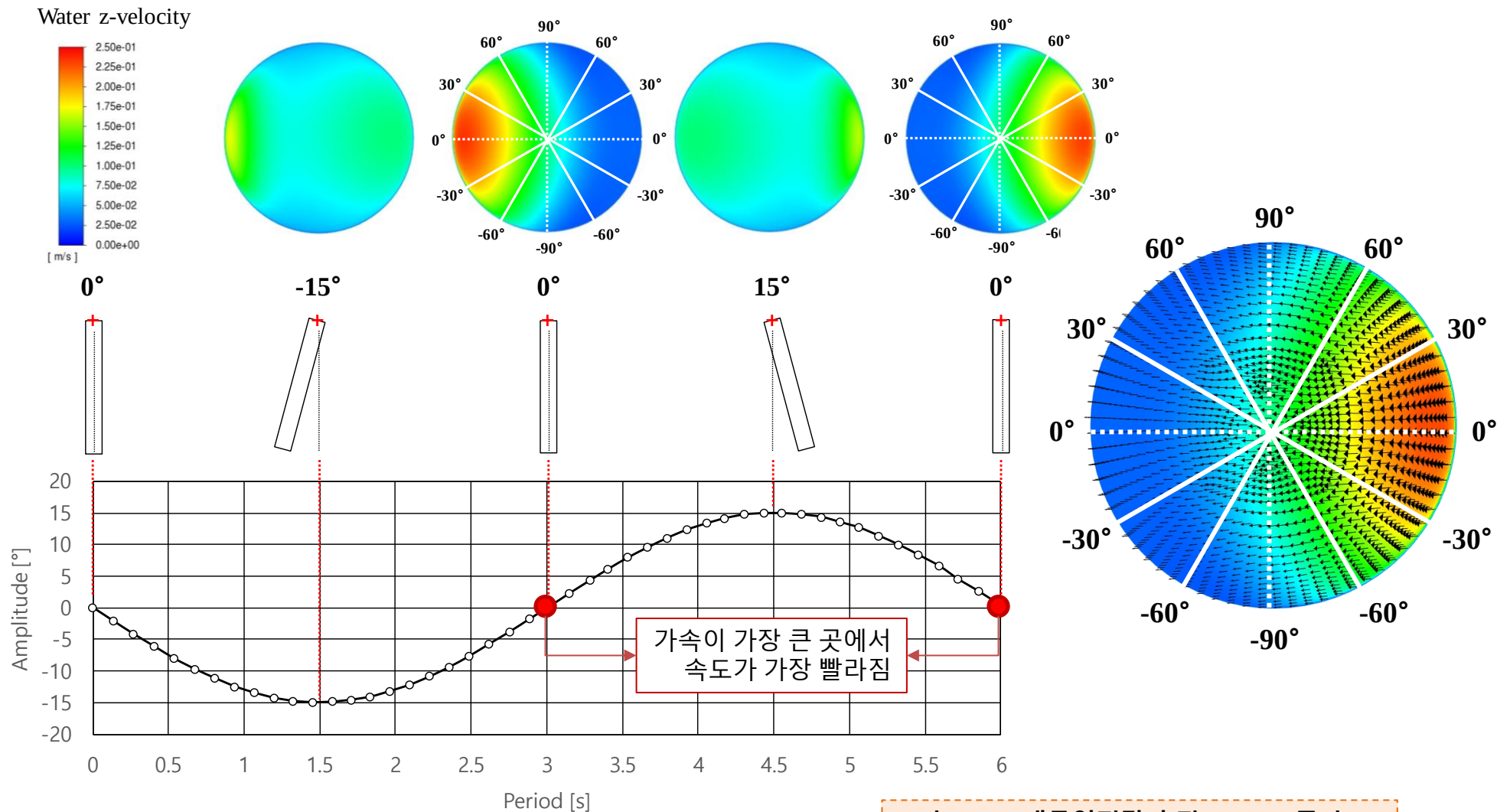
▪ 5°6s 조건에서는 요동에 의한 peak 현상이 거의 없음

- 10°6s 조건부터 peak 가속화
- A, B: 기포율 ↑
- C, D: 기포율 ↓

수직 원형관 내 기포류 수치해석

□ 요동하는 수직 유로 내 기포류 거동 분석 (Case 1)

- 수치해석을 통한 추가 분석 (물 속도)

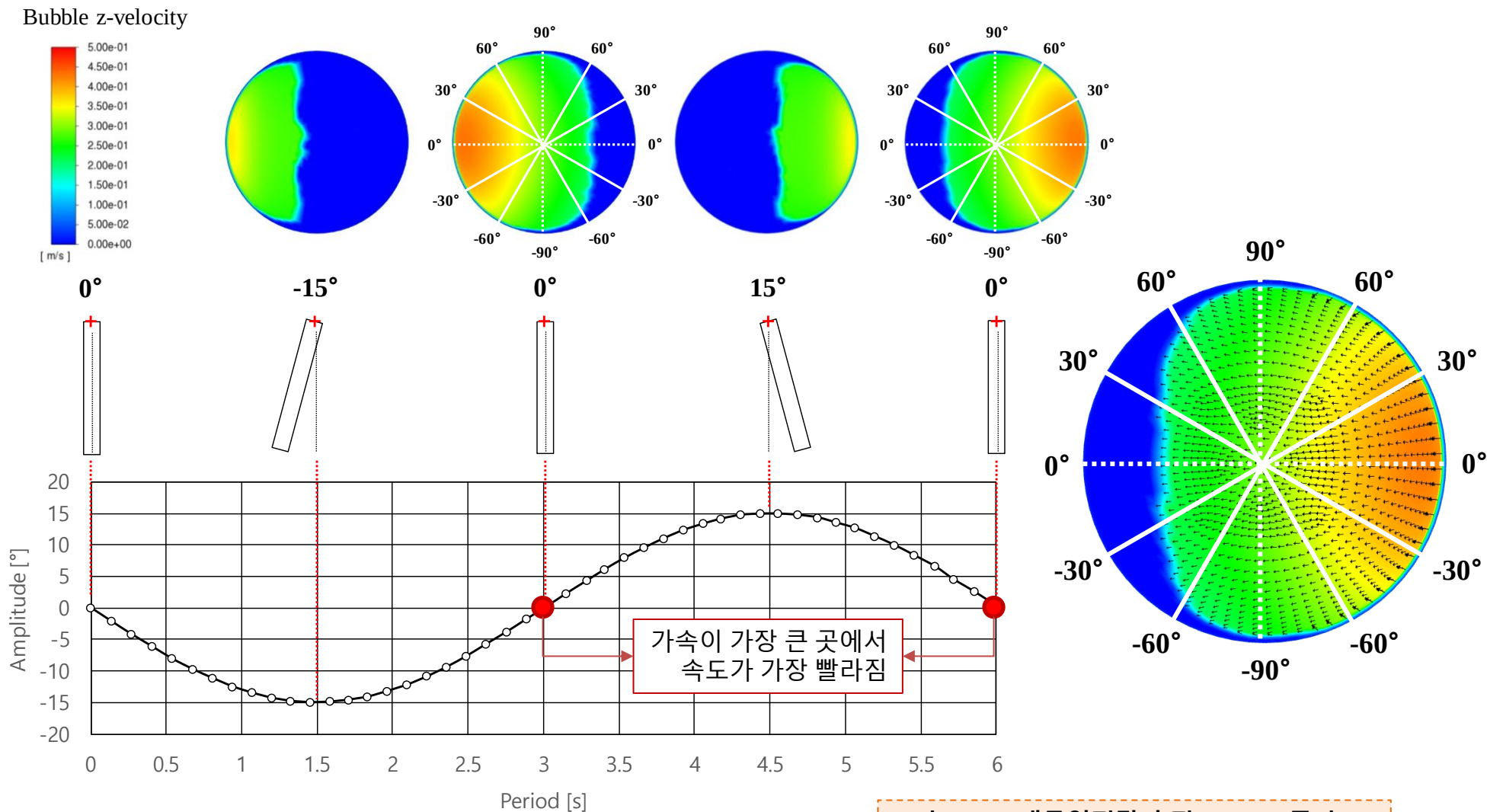


▪ 속도↑ → 대류열전달 촉진 → DNB 증가

수직 원형관 내 기포류 수치해석

□ 요동하는 수직 유로 내 기포류 거동 분석 (Case 1)

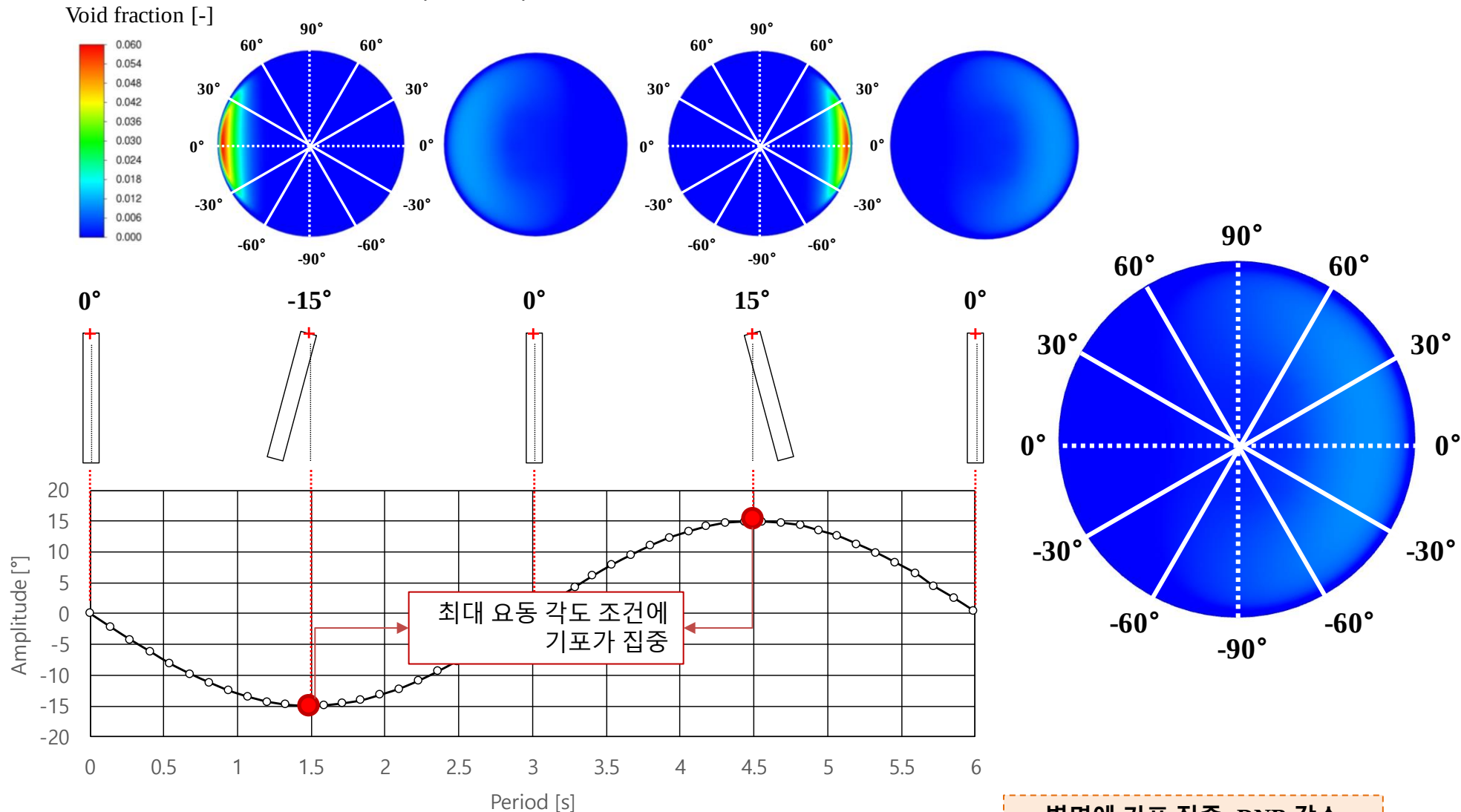
- 수치해석을 통한 추가 분석 (기포 속도)



▪ 속도↑ → 대류열전달 촉진 → DNB 증가

□ 요동하는 수직 유로 내 기포류 거동 분석 (Case 1)

- 수치해석을 통한 추가 분석 (기포울)



▪ 벽면에 기포 집중: DNB 감소

■ 요동 시스템 제작 및 국소 위치에서의 최신 측정기술 도입

- 해수면에서의 사인파 요동을 완벽히 구현하는 요동 시스템 제작
- 침투식 측정기법 이용 (단일 광섬유 도플러 프로브)

■ 요동하는 수직 유로 내 기포 변수 측정

- 기포 변수를 다양하게 조절할 수 있는 기포류 발생장치를 제작하여 다각도로 측정 및 분석
- 요동 각도 및 유량에 따른 기포 변수를 측정하고 분석
- 롤링 요동은 기포율 분포를 낮추는 영향이 있으며, 요동 각도가 클수록 그 효과가 커짐

■ 3차원 수치해석을 통해 실험 결과에 대한 논의 보강 (물/기포 속도, 기포율 변화)

- 요동축으로부터 30° 위치(A - B) 까지 요동에 의한 영향을 크게 받음
(1차원 코드에서 재현을 위해서는 이에 대한 효과를 반영해줘야 함.)
- 요동에 의한 상승속도 증가 및 기포율 분포 변화로 DNB가 달라질 수 있으므로 다양한 조건에서 실험적 연구가 요구됨