

KNS Spring Meeting Workshop

A Study on the Application of Computational Fluid Dynamics for Safety Regulation in the Thermal Hydraulic Field of Nuclear Power Plant

Presenter : Gong-hee Lee

2023. 05. 17.

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

Transparency



Responsibility



Excellence



Independence



Contents

I

연구개발 필요성

II

주제1 : 열수력 안전해석 규제검증기술 개발

III

**주제2 : 열유동 해석코드를 활용한 가동중시험
분야 현안 평가 기술 개발**

IV

요약



연구개발 필요성

원전 안전성 제고

산업기술기준(ASME, KEPIC 등) 및 계통/기기 설계/성능 적합성 평가

- ASME PTC, KEPIC MPT-19.5(유량), KEPIC MOR(열교환기) 등
- 원자로 내부구조물, 다단오리피스, 캐비테이팅 벤투리 등
- **규제지침 제개정을 통한 원전 안전성 제고**

규제요원 전문성 제고

안전 현안에 대한 신속하고 정확한 규제의사 결정을 위한 규제 기술력(**열유동 해석코드를 활용한 해석 기술**) 확보

- 안전 현안에 대한 원전 운영자의 원인 분석(계산) 및 재발 방지 대책의 적절성 평가
- 예상 현안에 대한 선제적인 안전성 확인
- 규제 행위에 대한 원전 운영자의 수용성 제고

고객만족도 제고

고객 만족도 조사 결과에서 나타난 불만족 사례 해소

- 규제요원별로 적용하는 규제요건 상이 ▷ 명확한 규제 기준 및 방향 제시
- 과도한 규제 수행
- 문제 해결을 위해 같이 고민하고 문제해결 방법 등을 제시 요망

주제 1

열수력 안전해석 규제검증기술 개발



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

부력 모델링이 단상 열성층 현상 해석 결과에 미치는 영향에 관한 비교 연구

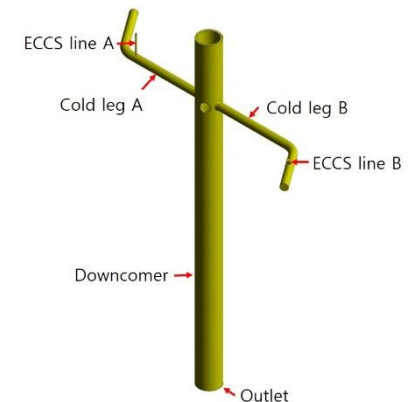
개요

- 부력이 난류 열성층에 미치는 영향이 이론적으로 명확하게 정립되어 있지 않아 인허가 신청자가 사용하고 있는 CFD 소프트웨어들에서 이용 가능한 **부력 모델링 옵션들은 물리적 배경의 타당성이 불충분하고 일부 제한사항이 존재**할 수 있음

연구내용

- 비상노심냉각계통 주입에 따른 저온관에서 단상 열성층 현상에 대해 ANSYS CFX R17.2에서 이용 가능한 부력 모델링 옵션들의 예측 성능에 대한 비교 평가 수행
 - 부력 영향 고려: 운동량 및 난류 수송 방정식(Baseline 레이놀즈 응력 모델)

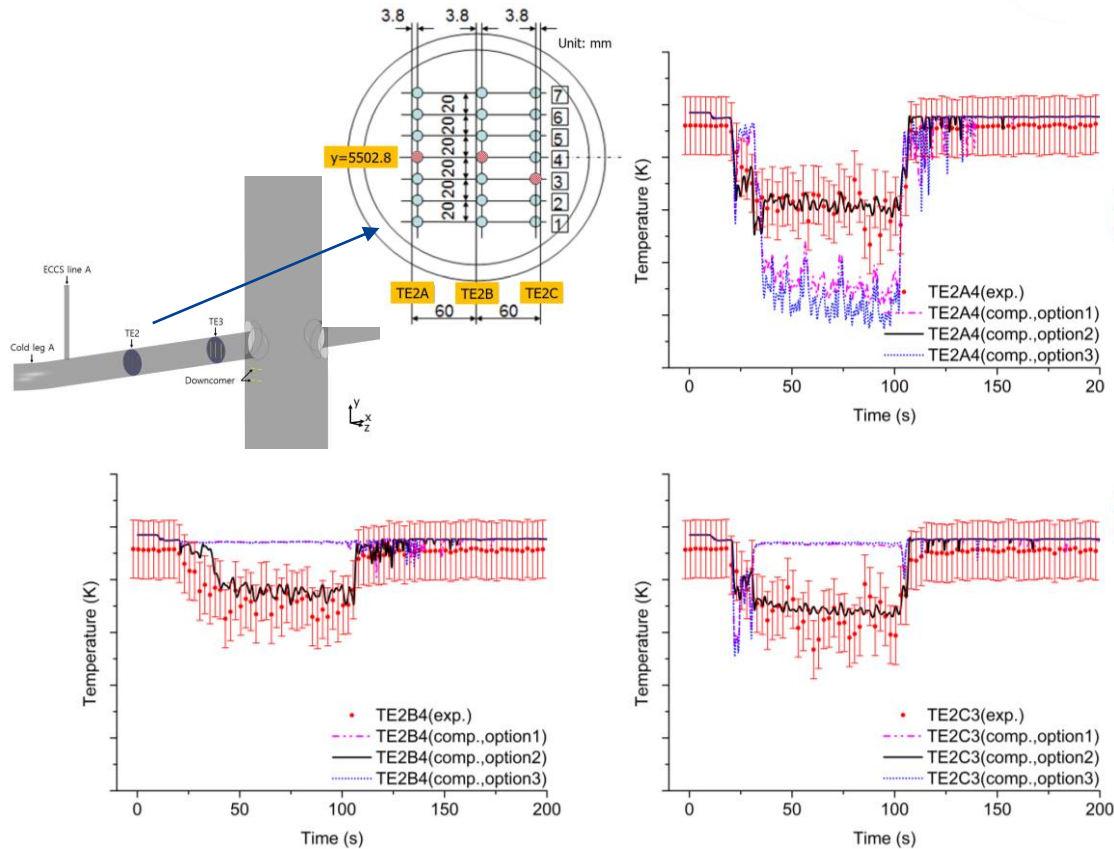
구분	option 1	option 2	option 3
Production	off	on	on
Dissipation	off	off	on
부력 모델링 고려 형태	$P_{ij,b}$, $P_{\omega b}$ 미고려	$\overline{\rho u_i u_j}$ 방정식에 $P_{ij,b}$ 고려; $P_{ij,b} = B_{ij} - C_{buo} \left(B_{ij} - \frac{1}{3} B_{kk} \delta_{ij} \right)$ $B_{ij} = g_i b_j + g_j b_i$ $b_i = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$	$\overline{\rho u_i u_j}$ 방정식에 $P_{ij,b}$ 고려; $P_{ij,b} = B_{ij} - C_{buo} \left(B_{ij} - \frac{1}{3} B_{kk} \delta_{ij} \right)$ $B_{ij} = g_i b_j + g_j b_i$ $b_i = -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$ ω 방정식에 $P_{\omega b}$ 고려; $P_{\omega b} = \frac{\omega}{k} [(\alpha_3 + 1) C_3 \max(P_{bb}, 0) - P_{bb}]$



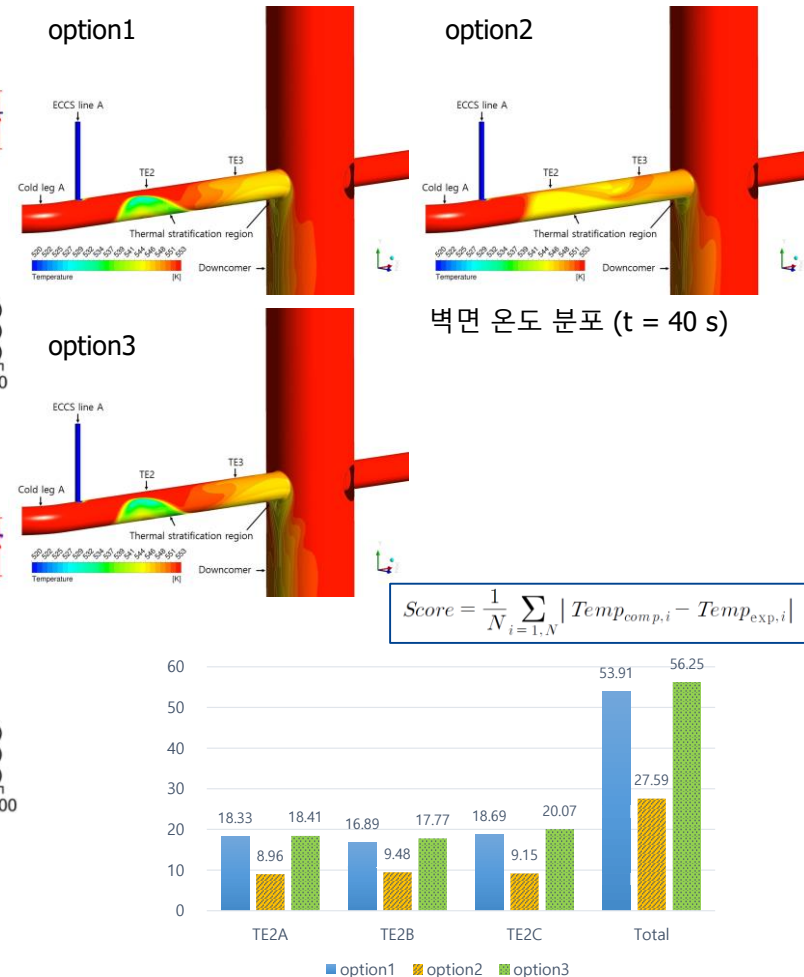
해석 모델 (ROSA LSTF)

부력 모델링이 단상 열성층 현상 해석 결과에 미치는 영향에 관한 비교 연구

◆ 부력 모델링 옵션별 시간에 따른 유체 온도 변화



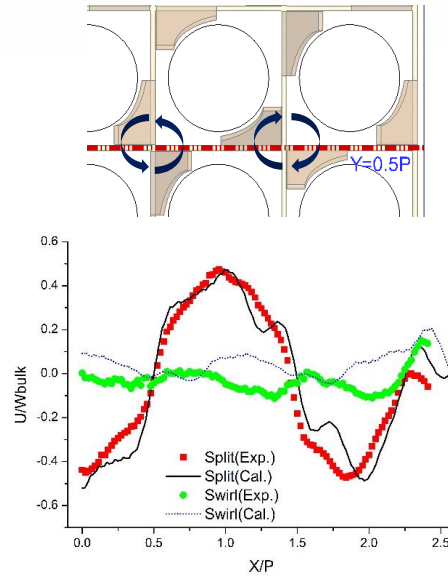
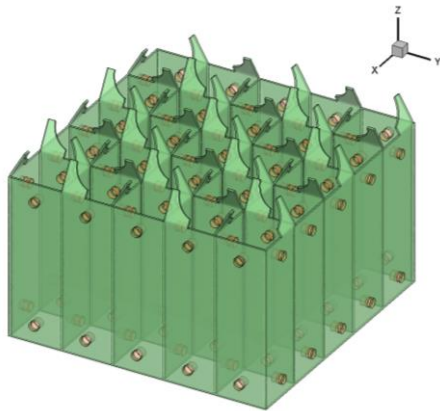
저온관 A의 측정 위치들에서 시간에 따른 유체 온도 변화



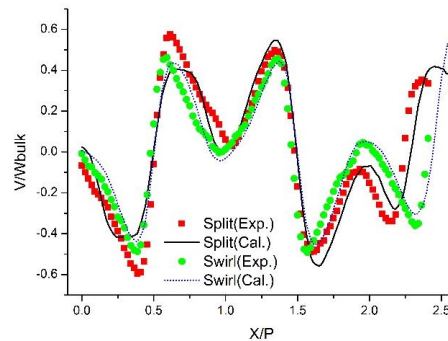
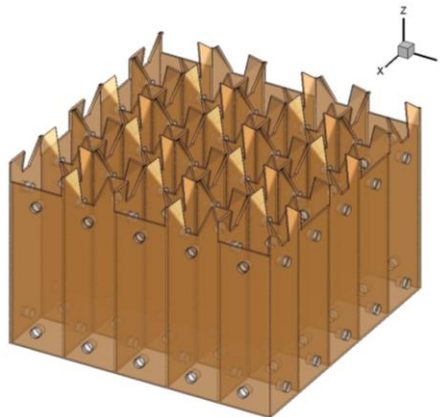
저온관 A에서 측정 위치들에서 계산된 유체 온도의 신뢰도 점수

핵연료집합체 내부유동 검증

• MATiS-H



분할 형태 혼합날개 및 시간평균 수평방향 속도 형상



선회 형태 혼합날개 및 시간평균 수직방향 속도 형상

표. 분할형태 점수표

Location Velocity	Location				Total
	Z=0.5D _h	Z=1.0D _h	Z=4.0D _h	Z=10.0D _h	
U/W _{bulk}	8.11	8.97	8.10	8.98	34.16
V/W _{bulk}	9.33	7.62	5.67	10.42	33.04
W/W _{bulk}	7.38	8.29	4.74	3.94	24.35
Total	24.82	24.88	18.51	23.34	91.55
Benchmark result	15.41~ 43.08	13.41~ 54.64	11.58~ 34.50	10.33~ 36.41	53.04~ 151.31

표. 선회형태 점수표

Location Velocity	Location				Total
	Z=0.5D _h	Z=1.0D _h	Z=4.0D _h	Z=10.0D _h	
U/W _{bulk}	8.49	7.27	6.31	4.14	26.20
V/W _{bulk}	7.27	4.52	7.12	6.06	24.96
W/W _{bulk}	6.75	6.51	5.62	4.04	22.92
Total	22.50	18.29	19.05	14.24	74.08
Benchmark result	-	-	-	-	46.3~ 165.12

주제 2

열유동 해석코드를 활용한 가동중시험 분야 현안 평가 기술 개발

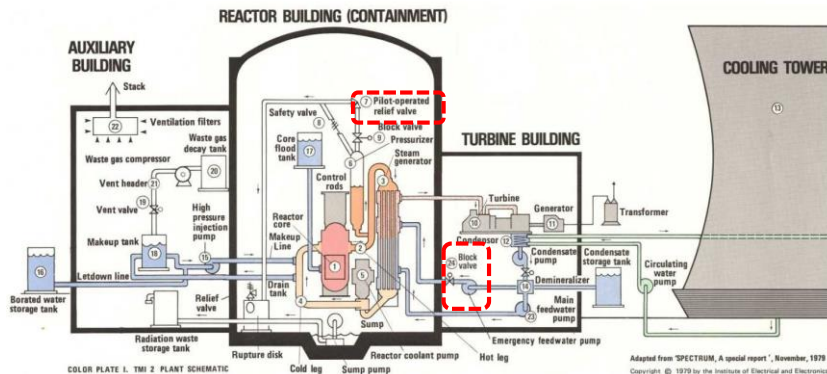


국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

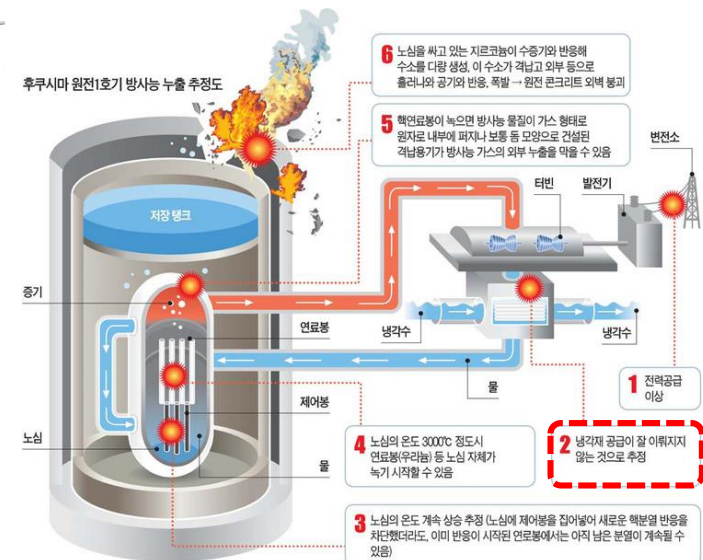
개요

가동중시험(In-Service Test)

- 원자로시설의 안전관련 **펌프** 및 **밸브**에 대한 안전기능* 수행능력을 확인하고 원자로 가동기간동안 시간 경과에 따른 해당 기기의 취약화 정도를 감시·평가하기 위한 시험
 - 안전기능*: 원자로의 안전정지, 정지상태의 유지 및 사고의 예방 또는 사고결과를 완화시키는 기능
 - 펌프 및 밸브 이외에 열교환기, 차압식 유량계 등도 포함



미국 Three Mile Island 원전 사고 (출처: IEEE Spectrum, 1979)



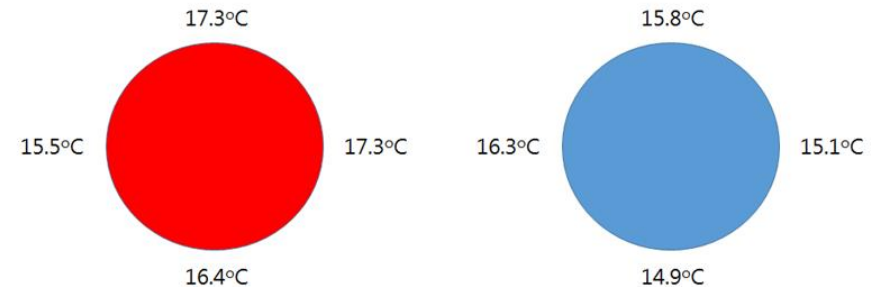
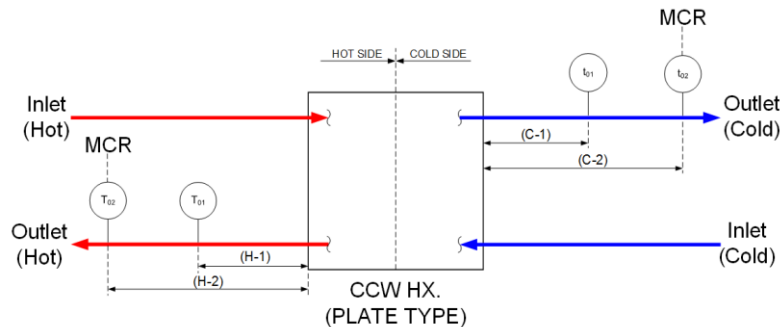
일본 후쿠시마 원전 사고 (출처: 한경경제, 2011)

가동중시험 이행 관련 현안에 대한 열유동 해석

① 판형열교환기에서 발생하는 온도 성층화 현상 수치해석

개요

- 고유한 설계 특성으로 인해 **열교환기 출구 배관에서 온도 성층화(불균일한 온도 분포)**가 발생할 수 있는데 성능시험시 이를 고려하지 않고 **온도 계측기를 부적절한 위치에 설치할 경우 시험 결과에 상당한 오차**가 발생할 수 있음



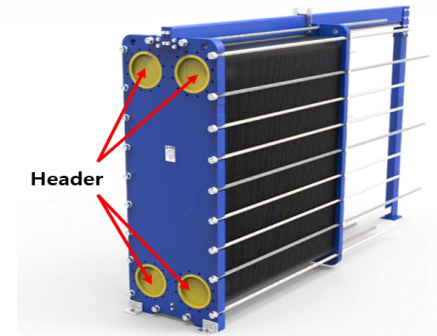
구분	선행원전	신형원전
고온 출구(H-1)	길이: 8'-6" Elbow: 2 EA	길이: 4'-4" Elbow: 없음
고온출구 공통관(H-2)	길이: 98'-10" Elbow: 6 EA	길이: 113'-6" Elbow: 8 EA
저온 출구(C-1)	길이: 4'-9" Elbow: 없음	길이: 2'-2" Elbow: 없음
저온출구 공통관(C-2)	길이: 87'-5" Elbow: 6 EA	길이: 69'-6" Elbow: 4 EA

가동중시험 이행 관련 현안에 대한 열유동 해석

① 판형열교환기에서 발생하는 온도 성층화 현상 수치해석

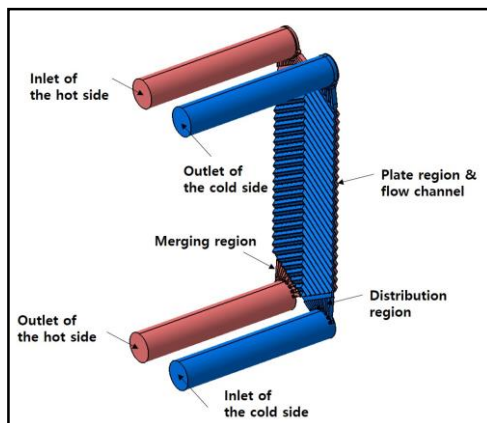
◆ 해석코드 검증

- Gulenoglu 등(2014)이 설계한 형상으로 서로 접촉된 2개의 전열판 사이로 작동 유체가 흐르는 채널이 형성됨. 국내 원전에 설치된 판형 열교환기에 비해 축소된 크기이지만 동일한 유형에 해당함
- Case 1과 2에서 전열판 길이와 관련된 변수들(쉐브론 면적 길이, 포트-포트 길이)을 제외한 나머지 형상 변수의 값은 동일함
- 예측된 Nusselt 수 및 마찰계수는 상관식 대비 각각 $\pm 15\%$, $-20\% \sim +5\%$ 범위내의 편차를 나타내었음
- 해당 편차는 해석모델과 실제 열교환기 형상의 국부적인 차이, 수치 모델링(난류모델 등)의 제한적인 성능 등에 기인하는 것으로 판단됨

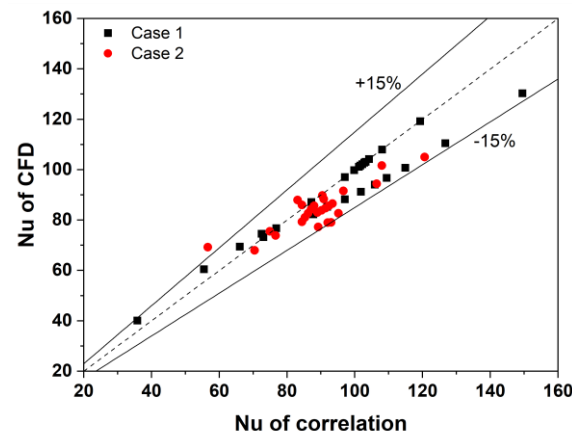


판형열교환기 형상 정보

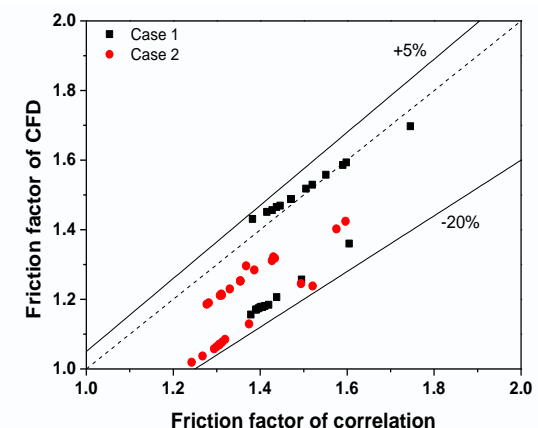
Parameters	Unit	Case1	Case2
Chevron angle	Deg.	30	30
Port diameter	mm	0.035	0.035
Chevron area length	m	0.37	0.665
Port-port length	m	0.335	0.63
Corrugation depth	mm	2.76	2.76



해석코드 검증용 모델 개략도(Case 1)



실험 상관식과 해석결과 비교(좌측; Nu수, 우측; 마찰계수)



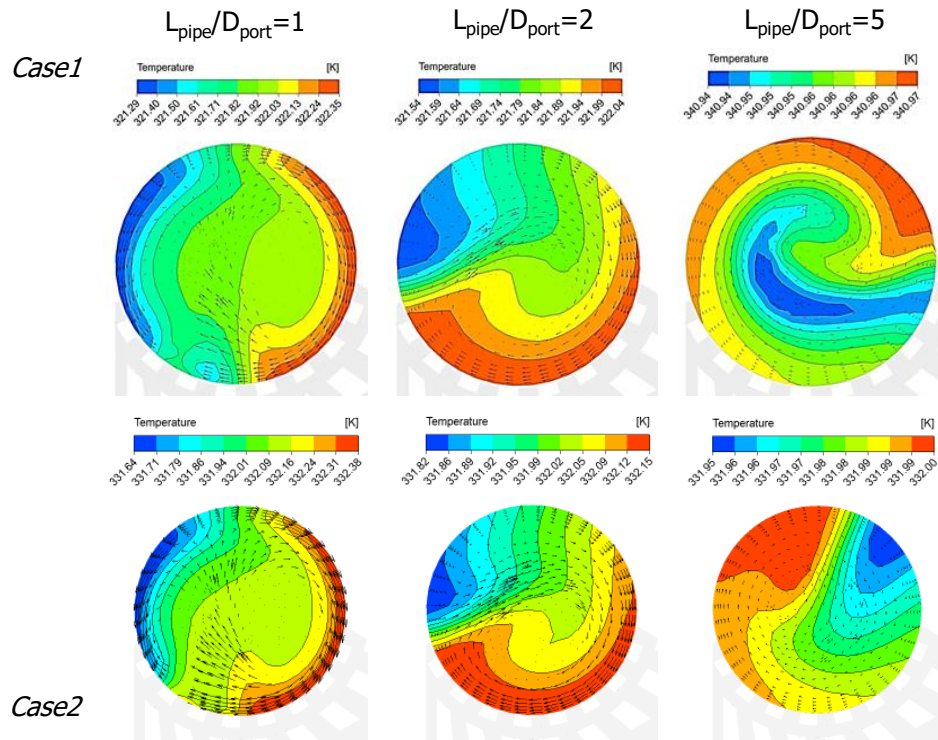
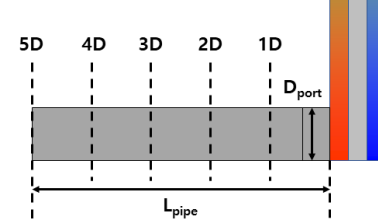
가동중시험 이행 관련 현안에 대한 열유동 해석

① 판형열교환기에서 발생하는 온도 성층화 현상 수치해석

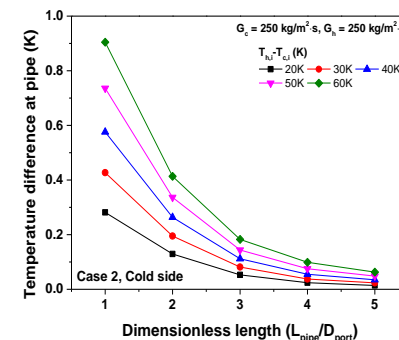
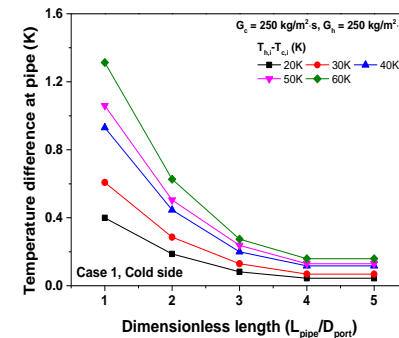
● 출구 포트 단면에서 온도 성층화

- 출구 포트에 가장 근접한 $L_{\text{pipe}}/D_{\text{port}} = 1$ 인 단면에서 최대 온도차가 발생하였음. 이는 출구 포트에 유입된 유동이 충분히 혼합되지 않아 온도 성층화가 발생했기 때문인 것으로 판단됨
- 따라서 출구 배관에서 온도 성층화가 없는 균일한 온도 분포를 형성하기 위해서는 유동 혼합이 지속적으로 진행할 수 있도록 일정 거리가 필요함

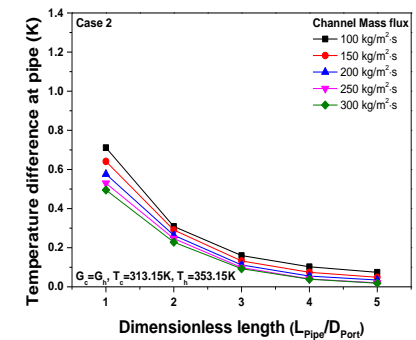
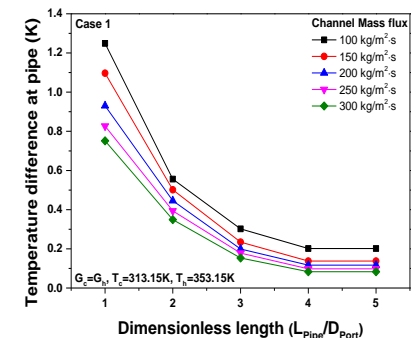
출구 포트 단면위치



저온측 출구 위치별 단면에서 온도분포 및 속도 벡터



저온측-고온측 입구 온도차에 따른 저온측 출구 위치별 온도차 변화



저온측-고온측 입구 유량에 따른 저온측 출구 위치별 온도차 변화

가동중시험 이행 관련 현안에 대한 열유동 해석

① 판형열교환기에서 발생하는 온도 성층화 현상 수치해석

◆ 연구결과의 규제활용

- 열유동 해석을 통해 열교환기 출구 배관에서 온도 성층화 현상이 존재하지 않는 위치에 온도 계측기를 설치하는 것이 필요함을 확인하였고 이를 규제지침 3.20 (원자력 발전소 안전관련 열교환기 성능관리) 개정시 반영함으로써 열교환기 성능시험 불만족/부정확으로 인한 원자력발전소 정지 또는 고장을 사전에 방지할 수 있을 것으로 판단됨

경수모형 원전 안전기준 및 규제지침 1 규제지침 3.20 열교환기 성능관리

3.20 원자력발전소 안전관련 열교환기 성능관리

KINS-SG-000.20, Rev. 1

1. 서문(총칙)

1. 목적

본 규제지침의 목적은 안전관련 열교환기의 성능을 적절하게 평가하고 주기적으로 관리하기 위해 적용되어야 할 기본적인 사항들에 대한 규제입장을 제시하기 위함이다.

2. 적용범위(적용대상)

본 규제지침은 모든 운전상태에서 안전관련 열교환기가 설계된 고유의 안전기능을 수행할 수 있는 성능을 확보하고 있는지를 확인하기 위한 산·검사업무 수행 시에 적용한다.

3. 관련 법령

본 규제지침은 「원자력시설 등의 기술기준에 관한 규칙」 제29조 및 제31조(참고문헌 1)에 따른 열교환기 및 열교환을 제공업체에 의한 성능 시험 등의 열교환기에 대하여 「원자력시설 등의 기술기준에 관한 규칙」 제41조제1항과 제63조제1항(참고문헌 1) 본문의 시험·검사·검사·보수 관련 절차 및 계획 수립 요건을 만족시키기 위한 세부 기술적인 방법을 규정한다.

4. 관련 검사 및 검사지침

열교환기를 포함하는 안전관련 계통(정지냉각계통, 기기냉각수계통, 사용후핵연료저장조 냉각 및 정화 계통 등)의 열교환기에 대한 사용점검사, 안전검사 및 정기검사는 경수로용 원자력발전소 사용권 시설 검사지침서와 경수로용 원자력발전소 사용권 성능 검사지침서, 경수로용 원전 안전성시험 및 발전을 원자로 정기검사지침(참고문헌 3-6)에 따라 수행되고 있다. 본 규제지침은 열교환기 성능 평가 및 관리 방법으로 적용 가능한 기술적인 사항을 규정한다.

2 ...

■ 열

정책제안서 양식

제안 년월 : 2022년 6월

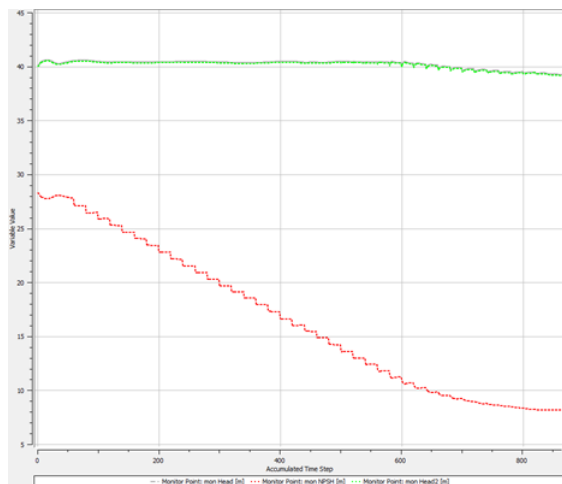
제안명	원자력발전소 안전관련 열교환기 성능관리 규제지침 개정(안)		
정책분류	규제지침		
필요성	열교환기 출구 배관에서 온도 성층화(불균일한 온도 분포)로 인해 발생할 수 있는 성능시험 결과의 불확실도를 최소화할 수 있는 위치에 온도감지기를 설치할 필요가 있음.		
주요 제안 내용	온도 성층화 등이 존재할 가능성이 있는 위치에는 온도 감지기의 설치를 피하거나 KEPIC MPT 19.3에 따라 적절한 측정위치에 충분한 수의 온도 감지기를 설치하여야 함. 운전 경험을 반영하여 열교환기 성능변수가 허용기준 불만족시 시정 조치의 사례로서 온도 감지기를 포함한 계측기 설치 위치 적절성 점검(예: 온도 성층화 영향을 최소화할 수 있는 위치)을 추가할 필요가 있음.		
정책반영 시기대효과	정확한 열교환기 성능시험을 통한 원전 안전성 제고		
관련 연구과제명	가동원전 안전관련 펌프 및 밸브에 대한 성능평가 개선 방법론 및 정밀해석 평가 기술 개발(총괄)		
정책제안자 (연구책임자)	성 명 소 속 기 관 전 화 번 호 메 일 주 소	한 국 원 자 력 안 전 기 술 원	
(실무자)	이 공 회 안 전 기 술 원	042-666-0663	ghlee@kins.re.kr
담당기관 및 부서	한국원자력안전기술원 규제검증평가실, 계통평가실, 안전기준실		
관련 근거자료	CFD를 활용한 관형열교환기 출구배관에서 온도 성층화 예비평가, NSTAR-22NS12-003		

- 1 -

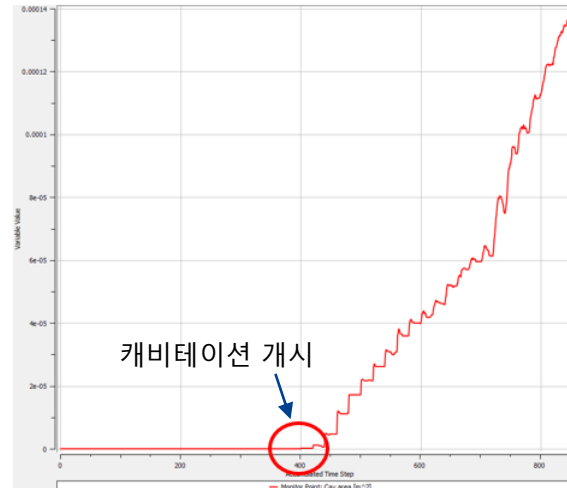
원심펌프 캐비테이션 유동 해석

개요

- 기존 펌프 캐비테이션 유동 해석시 수작업으로 유효흡입수두(Net Positive Suction Head, NPSH)를 낮추어 가는 방식으로 반복 계산을 수행하므로 인해 상당한 해석시간이 소요되었음
- CFX Expression Language를 이용하여 출구 압력을 자동으로 서서히 감소시키면서 목표로 하는 3%, 10% head drop이 발생하는 NPSH를 찾는 방식을 개발하였음



Head & NPSH



Vapor volume fraction

```

Ht = change IniHt
HtOld = areaAve(Water.IniHt)@outlet
Pmin = minVal(pabs)@cavitating device - Psat
Pnew out = areaAve(p)@outlet
Pold out = areaAve(Water.Pold)@outlet
Pold1 = areaAve(p)@outlet
Pold2 = pswitch2
Pramp1 = (Pmin - target1) * 0.1

```

```

/* 3% Pramp2 = max((Head - target)*997 [kg/m^3]*g,Pmin) * 0.5
/* 3% target = Ht*0.97

```

```

/* 10% Pramp2 = max((Head - target)*997 [kg/m^3]*g,Pmin) * 0.2
/* 10% target = Ht*0.9

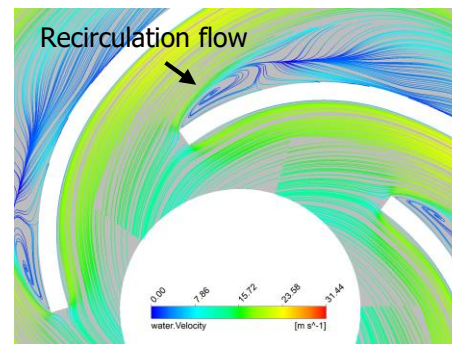
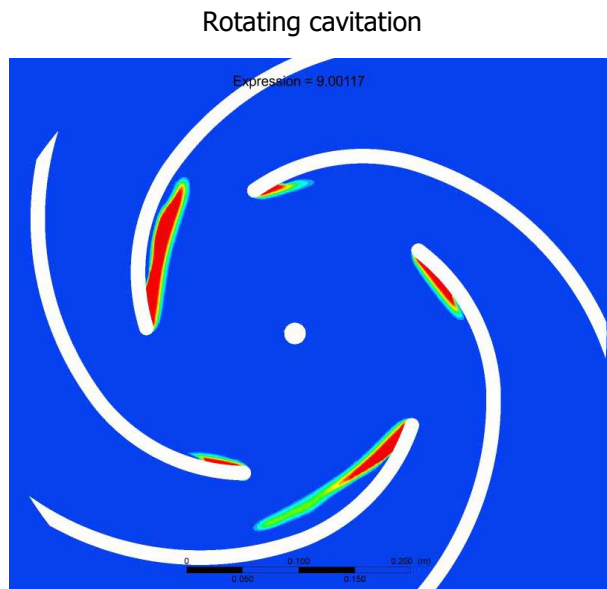
```

3% 및 10% head drop 조건에서 Cavitation 해석 모델 CEL 설정

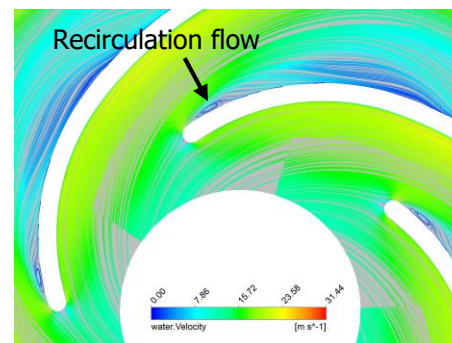
원심펌프 캐비테이션 유동 해석

연구결과의 규제활용

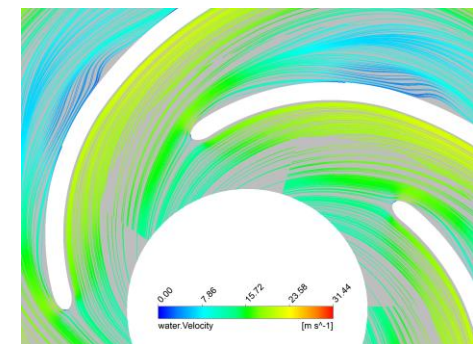
- 개발된 원심펌프 캐비테이션 유동 해석방법론은 원심펌프 캐비테이션 유동 특성에 영향을 미치는 인자(블레이드 전연 형상, 표면거칠기, 블레이드 각도/개수, 작동유체 온도, 누설 유동 등) 평가시 유용하게 활용 가능할 것으로 판단됨.



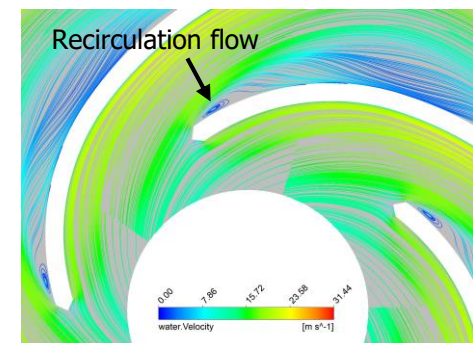
Blunt



Round



Elliptic



Sharp

Streamline at the midspan; depending on the blade leading edge profile (100% design flowrate & 5% head drop)

요약

- 본 발표에서 소개된 CFD 해석코드를 활용한 안전해석 및 가동중시험 분야 현안 평가 기술은 원자력 발전소 운영자가 제출하는 해당 분야 현안 발생 원인분석과 재발방지 대책의 적절성에 대한 규제자의 합리적이고 타당한 규제 의사 결정시 유용하게 활용 가능할 것으로 판단됨
- 또한, 독자적인 규제검증용 열수력 해석을 위한 기반기술로서 안전해석 및 가동중시험 분야 기기/계통의 안전성 평가 또는 안전현안 해결 등에 활용 가능할 것으로 판단됨

DISCLAIMER

- The opinions expressed in this presentation are those of the author and not necessarily those of the Korea Institute of Nuclear Safety (KINS). Any information presented here should not be interpreted as official KINS policy or guidance.

감사합니다

