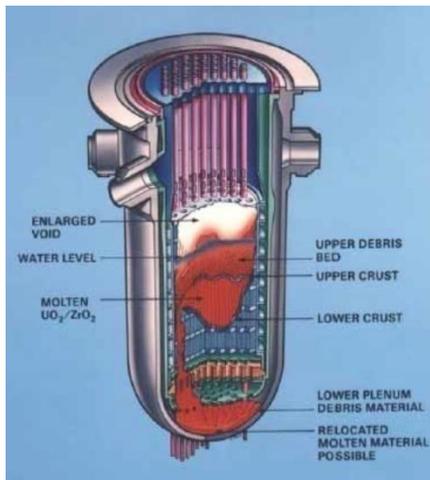


# A Basic Study on the Ejection of ICI Nozzle under Severe Accidents



Korea Maritime and Ocean University  
Department of Mechanical Engineering  
Jihoon Bae

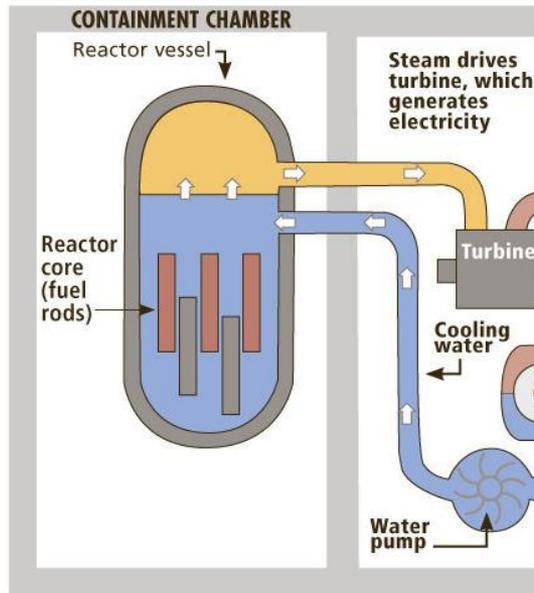
# 목차

- 소개 및 목적
- 해석의 경계 조건
- 유한 요소 및 모델링
- 물성 조건
- 용접부 파손 조건
- 열해석 결과
- 구조 해석 결과
- 결론

# 소개 \_ 중대사고

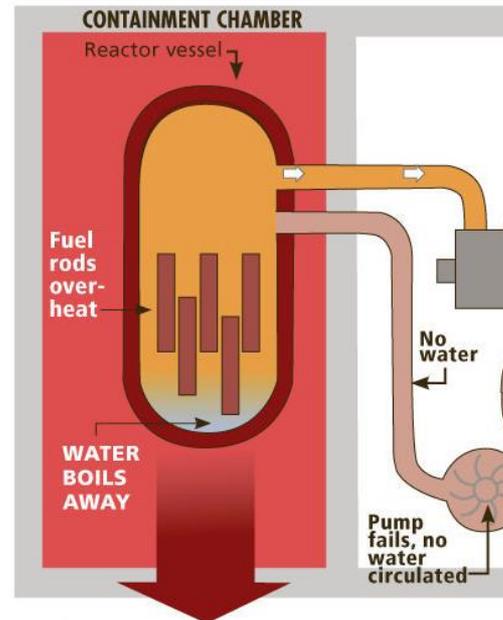
## NORMAL OPERATION

Water is circulated in the reactor vessel to cool the fuel rods, which generate steam to create electricity.



## WORST CASE SCENARIO

Without water, fuel rods overheat and the reactor core melts through chamber floor. Radioactivity released.

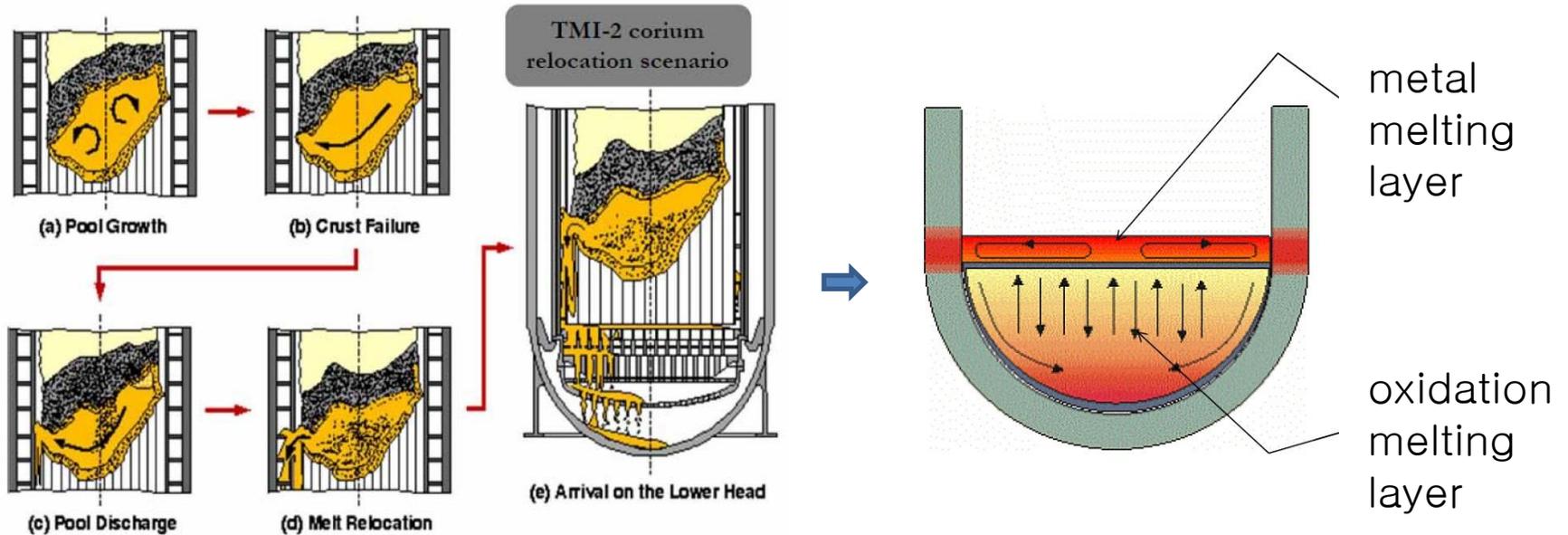


**CORE MELTS THROUGH FLOOR OF CONTAINMENT CHAMBER**

Ref : media.syracuse.com

- ✓ 중대 사고란 기존의 설계 기준 사고를 넘어서 노심의 손상을 야기하는 사고를 말함.
- ✓ 위 시나리오는 정상적인 상태와 중대사고 상태를 비교 (냉각수의 공급이 없다면 중대 사고가 발생 할수 있음.)
- ✓ 중대사고시 원자로 외벽 냉각 (External Reactor Vessel Cooling) -> ICI노즐 파손 및분출에 대한 연구

# 소개 \_ 중대사고

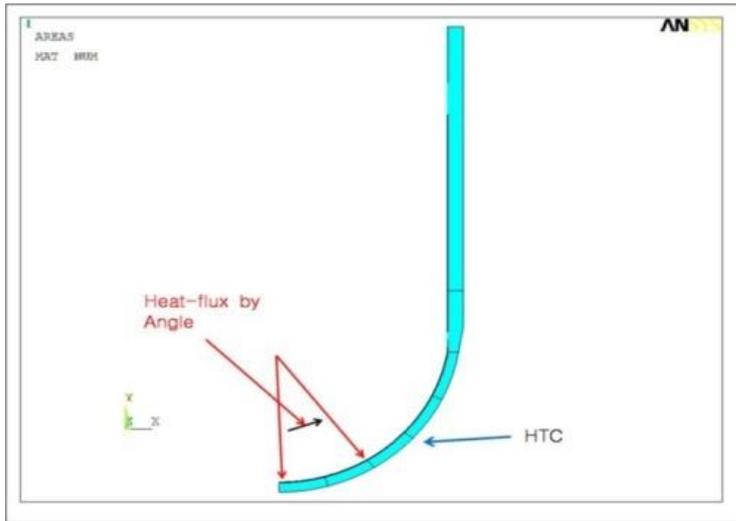


✓ 위 그림은 TMI사고시 연료봉의 용융 후 거동을 나타냄.

- 연료봉의 용융에 의해 pool 이 생성 및 확대 그리고 crust 생성
- 계속된 연료봉 용융에 의해 pool 의 crust 파손
- Pool의 crust 외부로 유출
- 용융물의 재배열
- 연료봉의 용융물 하부헤드 재배열

# 해석 의 경계 조건

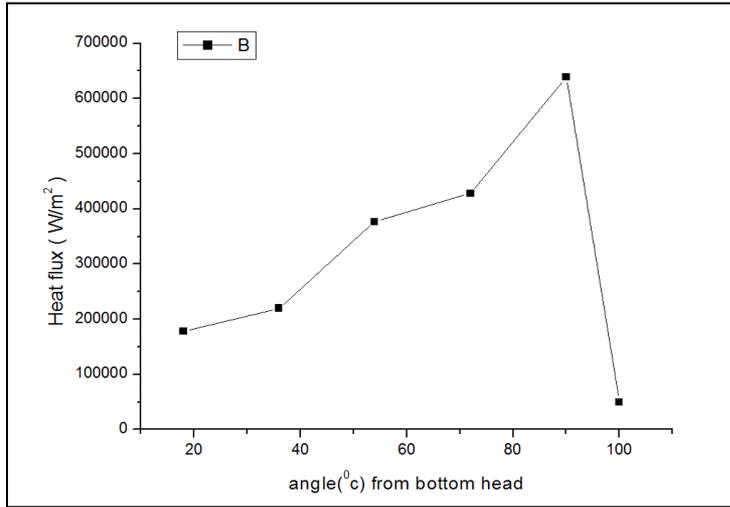
- 열해석 경계 조건



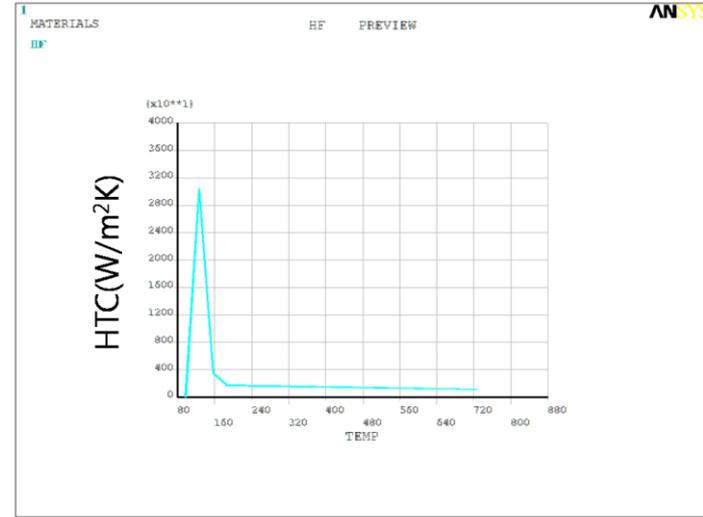
- ✓ 열전달 해석 및 구조 해석을 진행 함.
- ✓ 열전달 해석의 내부 경계 조건은 하부헤드 중심을 기준으로 각도별 열유속을 적용
- ✓ 열전달 해석의 외부 경계 조건은 대류 열전달계수 값을 적용
- ✓ 해석 진행 시간은 30000초 이며, 진행 이유는 중대사고 초기 거동을 확인 하기 위함.

# 해석의 경계 조건

- 열해석 경계 조건



a) 열유속의 내부 적용



b) 대류 열전달계수의 외부적용

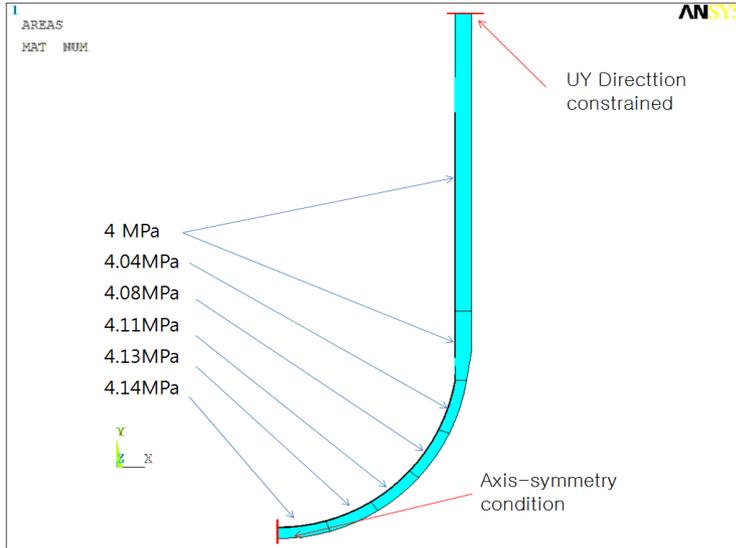
✓ 내부의 열유속 조건은 내부 용융물의 붕괴열 및 재료간 밀도에 따른 열유속 발생 및 적용(논문 참고 “In-vessel coolability and retention of a core melt”).

✓ 최소 50kW/m<sup>2</sup> ~ 최대 639kW/m<sup>2</sup> 까지 발생.

✓ 외부의 대류 열전달 조건은 외부 표면의 핵비등 영향에 따라 이상적 열전달을 적용하기 위하여 계산 및 적용.

# 해석의 경계 조건

## • 구조해석의 경계조건

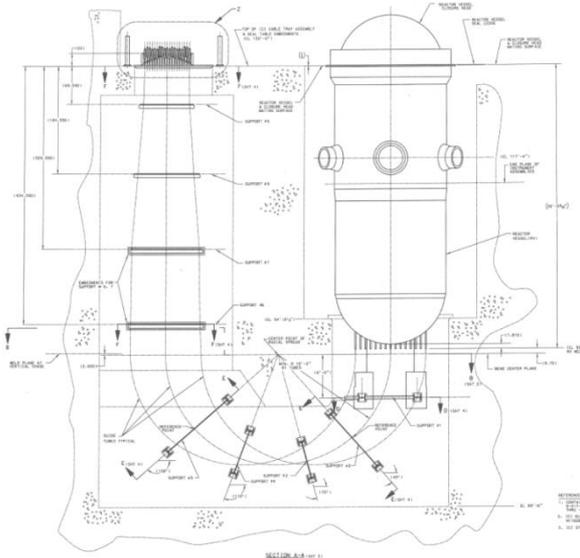


a) 구조해석의 경계 조건

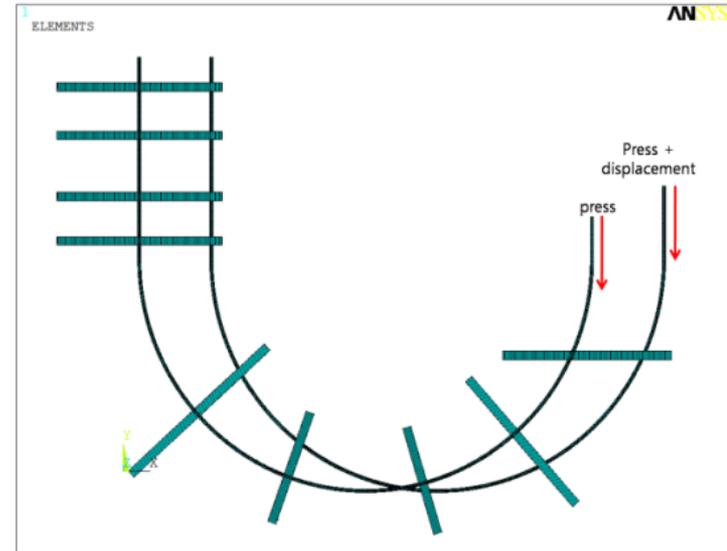
- ✓ 중대사고 후 내부는 압력 강하가 적용되어 약 4MPa의 압력이 적용됨.
- ✓ 연료봉 및 내부 구조물의 용융물이 발생하여 하중으로 작용하게 됨.
- ✓ 해석에는 내부 압력 및 용융물의 자중을 더하여 하부헤드의 내부에 압력으로 적용하였음.

# 해석의 경계 조건

- 구조해석의 경계조건



a) 구조물의 배치도



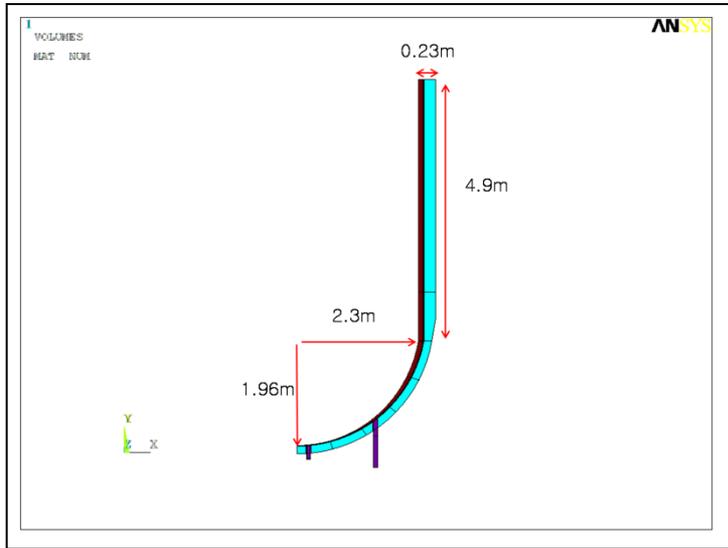
b) 하부 구조물의 경계조건

✓ 하부 구조물 해석은 하부 헤드의 해석 결과를 통하여 변위 및 압력을 계산하여 구한 결과 값을 하부 구조물( 각각의 노즐 )에 적용하여 해석을 하였음.

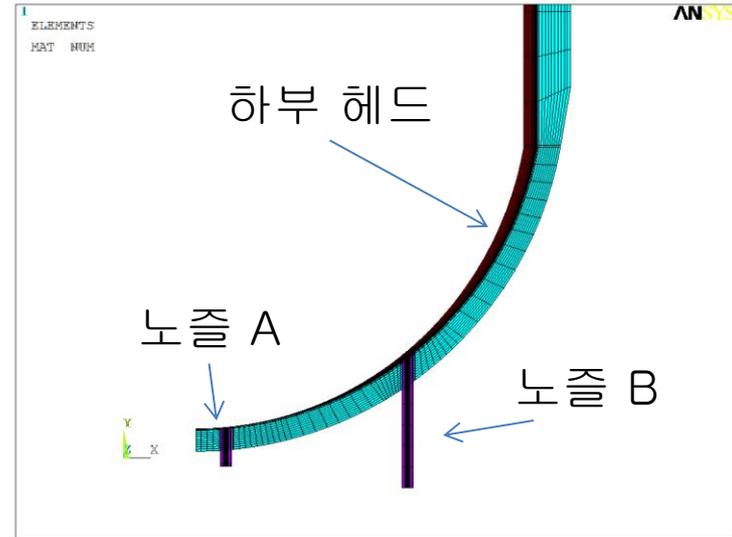
( 노즐A : 압력 , 노즐B : 압력 + 변위 )

✓ 노즐과 지지대 간에는 노즐의 길이 방향을 제외한 상호간에 구속하여 원활한 슬라이딩이 적용되는 조건을 적용하였음.

# 유한요소 및 모델( 하부 헤드 )



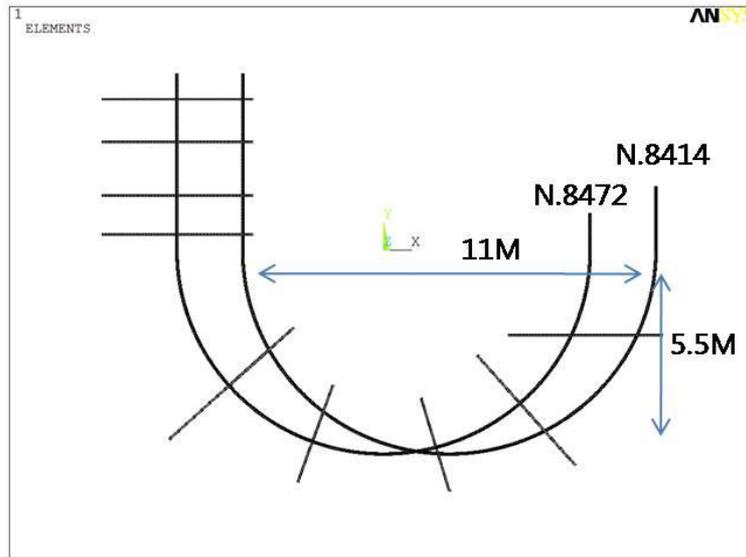
**a) 3D MODEL**



**b) 유한요소**

- ✓ 전체 모델의 1/12 을 사용하여 해석을 하였음.
- ✓ 해석에 사용된 부위는 하부헤드 및 노즐A 와 노즐B 임.( 노즐A 는 중심부, 노즐B는 최외각 부)
- ✓ 열 해석에는 Solid 70 번 3차원 요소, 구조 해석에는 Solid 185 번 3차원요소를 사용함.

# 유한요소 및 모델( 하부 구조물 )



a) 유한요소 모델

- ✓ 하부 구조물 해석에 사용된 부위는 지지부위 및 노즐A와 노즐B임.
- ✓ 지지 부위는 노즐의 처짐 방지를 위하여 헤드 하부에 설치되어 있음.
- ✓ 노즐은 beam 요소를 사용 하였으며, 지지 부위는 shell 요소를 사용 하여 해석을 하였음.

# 물성 조건

a) Mechanical property of SA-508 Grade3 class1 ( 하부 헤드)

T (°C)	k (W/mK)	C <sub>p</sub> (W/kg K)	E (GPa)	β (10 <sup>-5</sup> m/mK)	ν	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
100	40.6	481.5	208	1.21	0.29	7750
300	38.7	566.2	198	1.33		
500	34.8	663	176	1.44		
700	27.6	814	100	1.51		
1407		13150	12.25			
1600		1400				

✓ 하부 헤드에 사용 되는 SA-508 Grade 3 class 1 은 저합금 강으로 열처리 와 담금질로 인하여 강도 와 취성이 매우 우수함.

# 물성 조건

## b) Mechanical property of Inconel 690 (노즐 & 용접부)

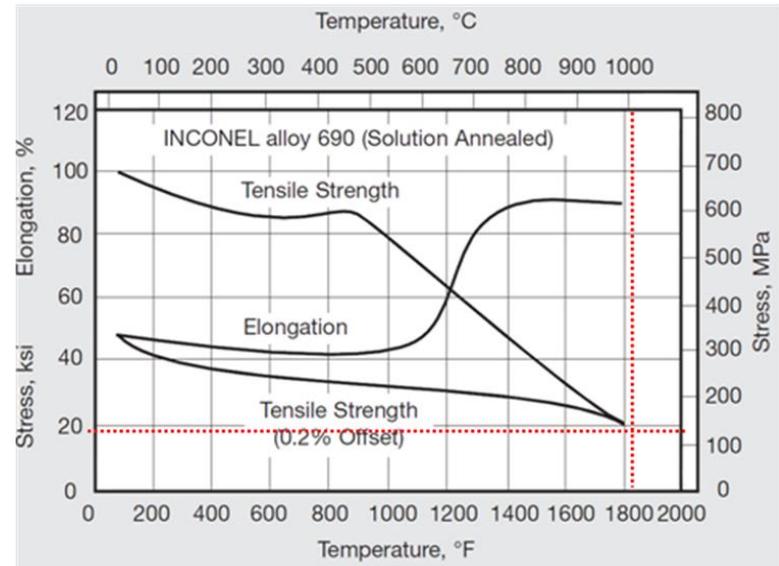
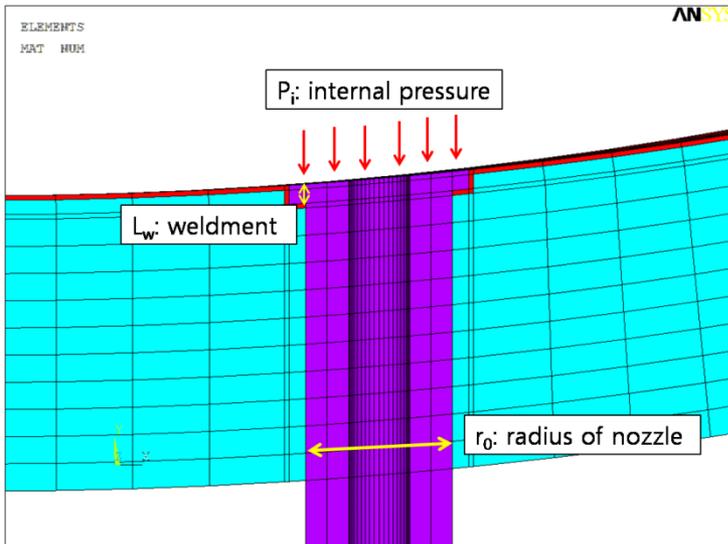
T (°C)	k (W/mK)	C <sub>p</sub> (W/kg K)	E (GPa)	β (10 <sup>-5</sup> m/mK)	ν	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
100	13.5	471	202	1.406	0.29	8193
300	17.3	525	190	1.453	0.31	
500	21	578	174	1.519	0.3	
700	24.8	631	160	1.618	0.28	
900	28.5	684	140	1.701	0.3	
1100	-	738	17.76	1.779	0.36	
1343	-	8036	14.08	-	-	
1377	-	8120	13	-	-	
1400	-	900	12.25	-	-	

✓ 노즐 과 용접부에 사용 되는 Inconel 690은 크롬 과 니켈 등으로 구성된 강으로 고온의 산화를 방지하여 강도가 우수함.

✓ 노즐에서 고온과 고압이 빈번하게 작동되기 때문에 Inconel 690을 사용함.

# 용접부 파손 평가

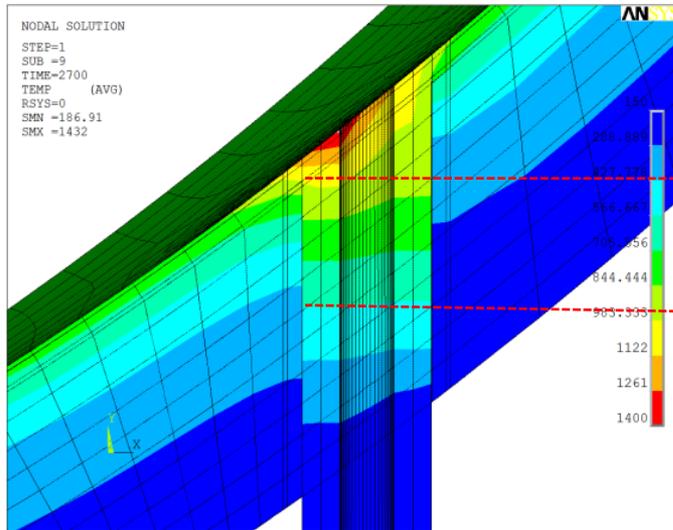
- ✓ 하부 헤드와 노즐 간에 용접으로 연결이 되어있어 매우 중요함.
- ✓ 중대 사고 시에 하부 헤드에 재 배치 된 용융물에서 나오는 붕괴열에 의해 접촉된 용접부는 고온으로 상승하고 인장응력 감소를 야기 하여 결국 파손을 일으킴.



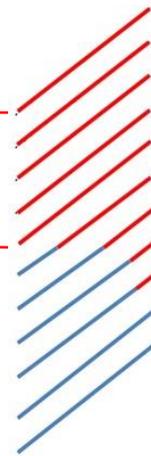
$$\tau_w = \frac{p_i \pi r_o^2}{2\pi r_o L_w} = \frac{p_i r_o}{2L_w} \quad \sigma_e = \sqrt{3}\tau_w \quad \Rightarrow \quad \sigma_e \geq \sigma_u$$

- ✓ 위 계산식을 통하여 유효응력을 구하고, 온도별 인장응력 그래프를 통하여 감소된 용접부의 인장응력을 비교하여 파손 온도를 구할수있음. **파손온도 (1008°C)**

# 열 해석의 결과(ICI 노즐)



용접부 파손시간의 온도 분포도

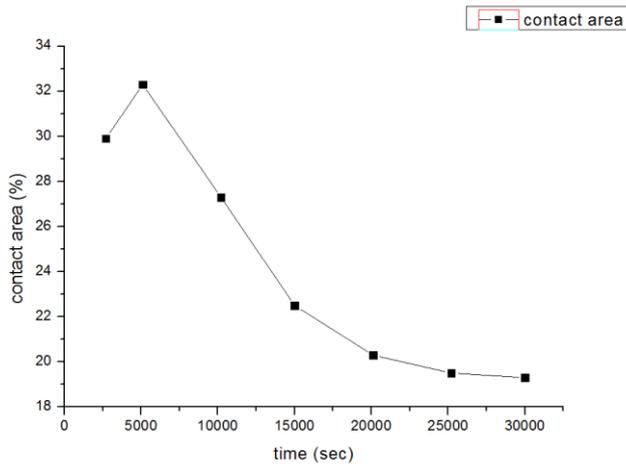
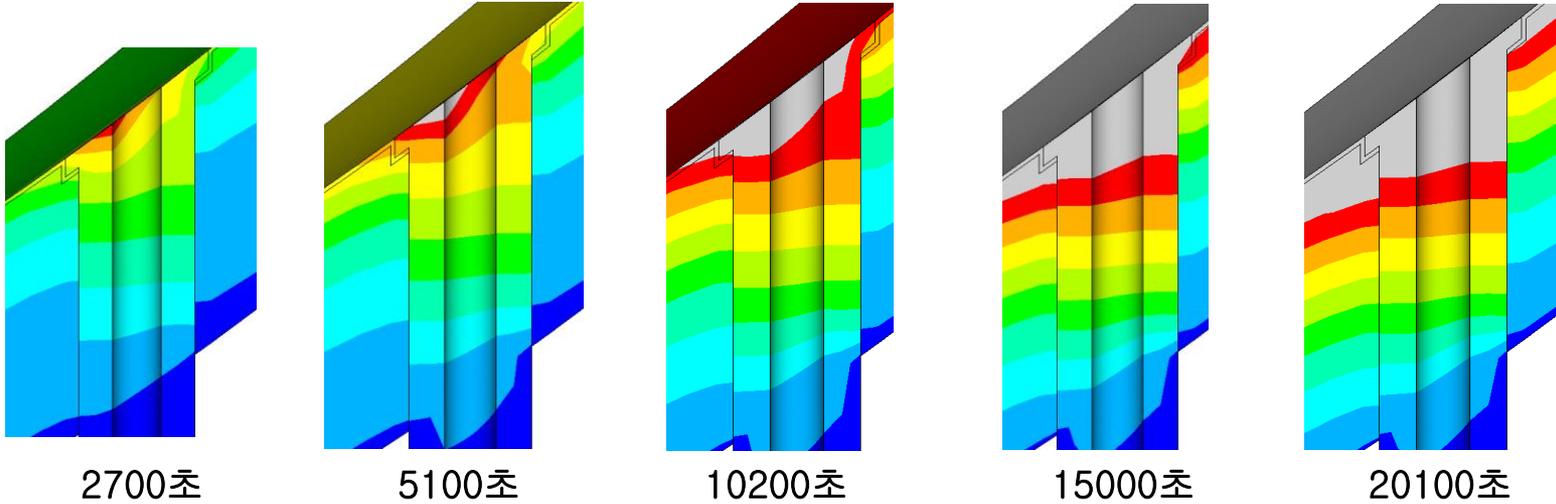


용접부 파손 시간  
( 29.9% 접촉부위 )

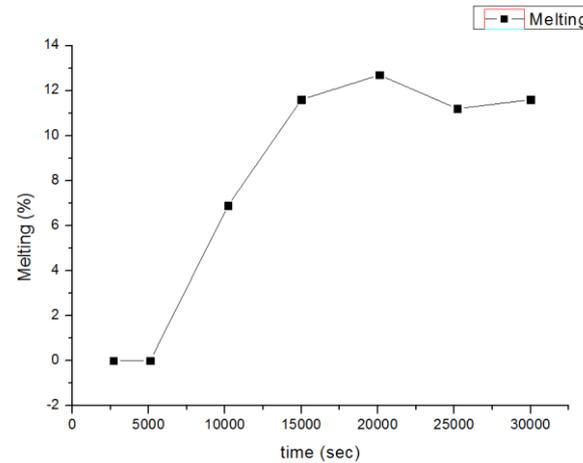
(※ 접촉부 , 비접촉부 )

- ✓ 용접부의 파손이 발생하는 시간은 2700초임.
  - ✓ 이시간 때에 노즐과 하부헤드의 접촉 범위는 29.9%임.
  - ✓ 그러나, 노즐과 하부헤드의 안정적인 접촉으로 분출은 발생되지 않음.
- ※ 홀의 접촉 과 비접촉은 색으로 표시

# 열 해석의 결과(ICI 노즐)

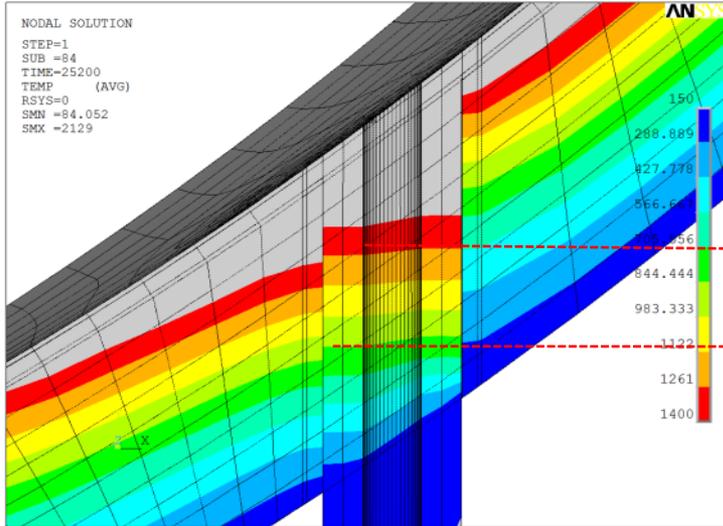


시간에 따른 노즐의 접촉 면적

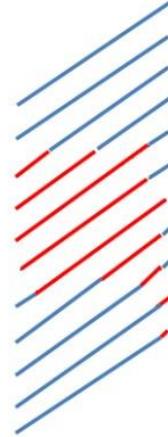


시간에 따른 노즐의 용융 면적

# 열 해석의 결과(ICI 노즐)



노즐분출시간의 온도 분포도

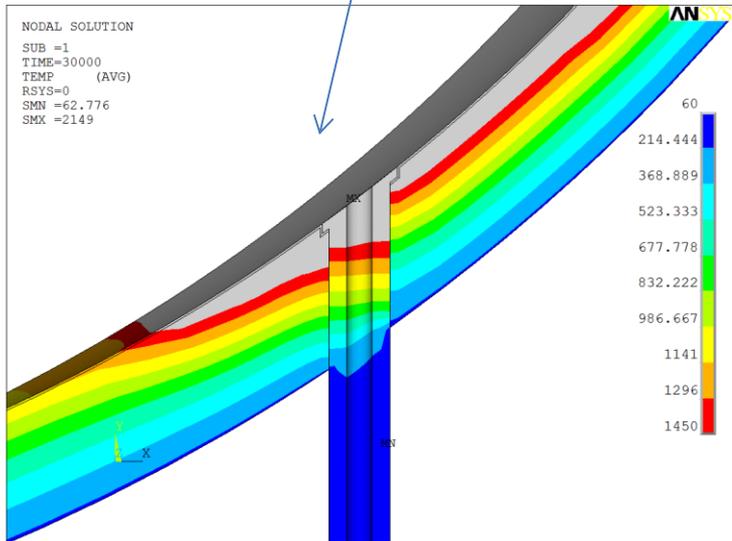
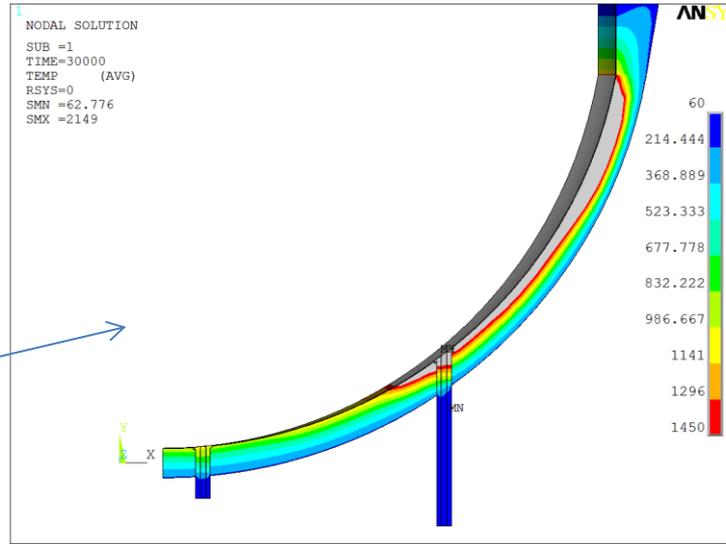


노즐 분출 시간  
(19.5% 접촉 부위)

(※ 접촉부 , 비접촉부 )

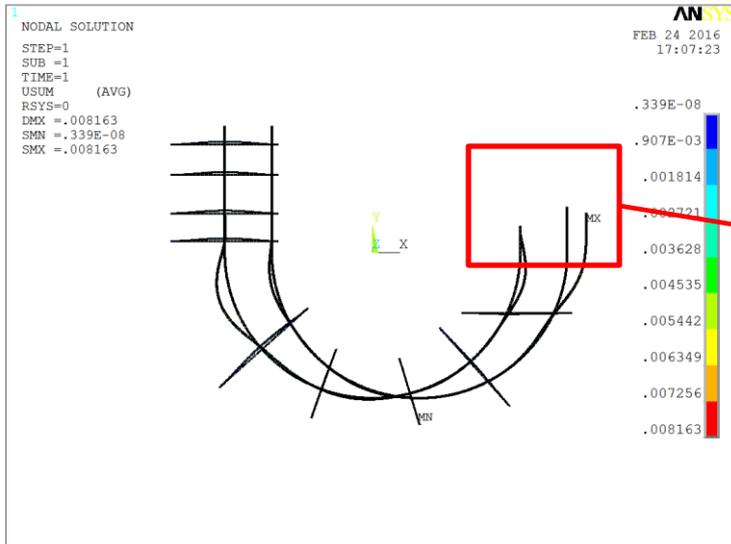
- ✓ 노즐의 분출 되는 시간은 25200초 임.
  - ✓ 노즐과 하부헤드의 용융에 의해 접촉부가 19.5% 감소됨.
  - ✓ 접촉부 감소 인하여 노즐과 하부 헤드 간에 불균형 접촉이 되어 노즐의 분출이 됨.
  - ✓용융 후 남은 노즐의 내부 길이는 120mm 임.
- (※ 용융 부위는 회색으로 표시함.)

# 열 해석의 결과(ICI 노즐)

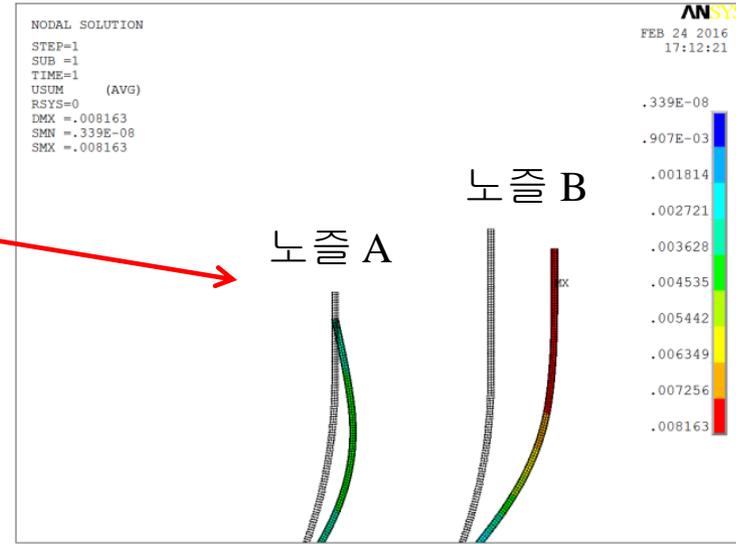


- ✓ 30000초 일때 용융 면적은 8% 임.
- ✓ 노즐 및 하부헤드의 외부는 외부 대류열 전달에 의해 영향으로 용융이 없음.

# 구조 해석의 결과( 하부 노즐과 지지대)



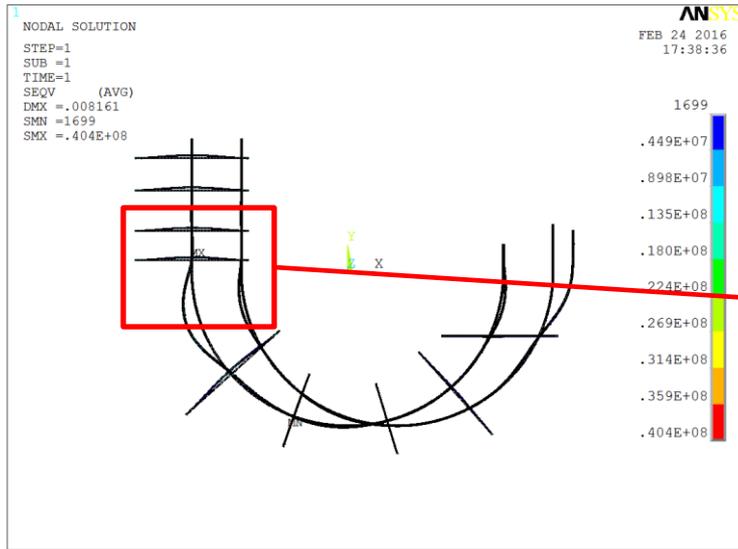
변위



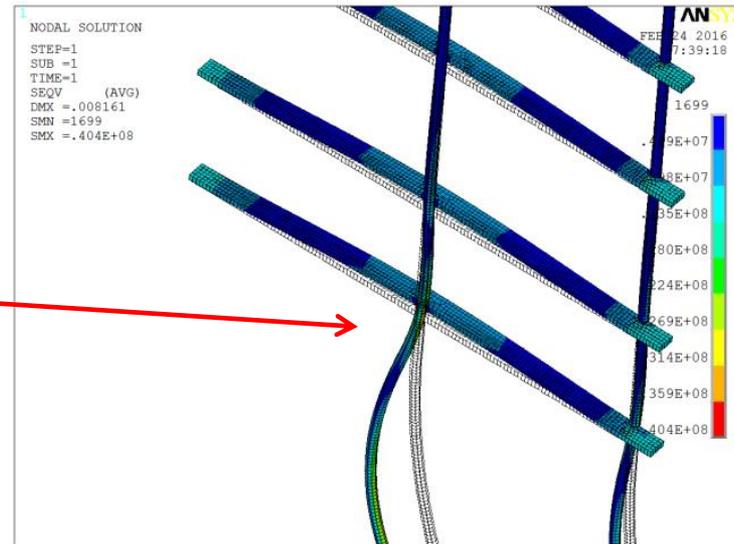
노즐의 확대

- ✓ 하부 구조물의 최대 변위는 8.16mm 임.
- ✓ 노즐A의 수직 변위는 3.3mm 임.
- ✓ 노즐B의 수직 변위는 2.3mm 임.
- ✓ 노즐 A, B 간에 수직 변위 차이는 노즐A는 순수한 수직 압력 만이 작용한 수직 변위 만을 가지고 있기 때문임.

# 구조 해석의 결과( 하부 노즐과 지지대)



유효등가응력



- ✓ 최대유효등가 응력은 40.4MPa 임.
- ✓ 노즐의 최대 응력이 발생한 이유는 원활한 슬라이딩이 이루어지지 않기 때문임.
- ✓ 그러나, 허용응력을 넘지는 않음. ( $\sigma_y = 282\text{MPa}$  ,  $\sigma_a = 282/3 = 94\text{MPa}$ )

# 결론

- ✓ 중대사고시에는 ICI노즐이 취약부가 될수있음.
- ✓ 용융물 유동에 의한 열유속 이 노즐B 부위가 가장 크게 적용되기 때문에 노즐과 하부헤드의 용융에 의한 노즐 분출이 예상됨.
- ✓ 재배치 된 용융물의 영향으로 용접부위가 파손이 됨( 2700초 ), 그러나 노즐과 pipe hole 의 접촉으로 노즐 분출이 저지 됨.
- ✓노즐 과 하부헤드 의 용융이 발생하여 노즐과 pipe hole 간에 접촉압력 감소로 발생하였음(25200초).
- ✓ 용접부 파손 과 노즐의 접촉압력 감소로 분출이 예상 되었지만 하부 구조물의 지지에 의해 노즐 분출을 막을수 있음.  
( 처짐량 : 3.3mm, 2.3mm , 용융후 내부 노즐 길이 : 120mm )
- ✓노즐A 는 용융및 용접부 파손이 발생하지 않음.
- ✓ 추가 적으로 하부 구조물 상세 해석이 필요함.