
Study of the Stress Effects on Workers

in Nuclear Power Plants on Thermodynamics Laws

한울2발전소 허남일



Contents

- ① 서론
- ② 유동모델
- ③ 열역학 1법칙
- ④ 열역학 2법칙
- ⑤ Availability 분석
- ⑥ 결론

서론

- 원자력발전은 최악의 상황에도 기계적으로 안전성 보장
ex) Valve Fail Close
- 그러나, 1979년 TMI 사고 발생
 - 기기결함, 작업자의 실수, 운전원 판단오류
 - PORV 고착, HPSI 임의 조작
 - 짧은 시간에 너무많은 일로 인한 판단오류 가능성
- 일로 생기는 스트레스로 인한 인간의 기기조작 오류 가능성?
- 발전소 내의 일과 그 영향에 따른 스트레스를 열역학 법칙으로 정리

유동모델

- $\frac{\delta p}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$

연속방정식

- $\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla \mathbf{V} + \rho \mathbf{g}$

운동량방정식

- $\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p(\nabla \cdot \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi$

에너지방정식

→ *flow of work*에 의한 에너지 생성 및 이동 가정

- *flow of work* 구분

- ✓ *Laminar flow of work* : Ordinary State in NPP

- ✓ *Turbulent flow of work* : O/H or Plant Trip, 자연재해(울진산불 등)

열역학 제1법칙

- 한명의 종사자에게 주어지는 에너지방정식은

$$dE = \delta Q - \delta W$$

(→ δ 는 상태량이 아닌 경로에 의한 값)

- 단위 시간당으로 변형하면

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta E \quad (\Delta E = \Delta U + \Delta PE + \Delta KE)$$

\dot{Q} : O/H시 본연의 업무 외에 주어지는 일의 양

\dot{W} : O/H시 본연의 업무 외에 주어지는, \dot{Q} 에 의해 해내는 일의 양

따라서 ΔE 는 한 개인에게 일로 인해 생긴 에너지 변화량(즉, 스트레스의 양)

ΔU : 각 개인이 가지고 있는 원래의 Stress energy(개인의 가정사, 재정 등)

ΔPE : 어떤 플랜트(조직)이 갖고 있는 Stress energy(조직문화 등)

ΔKE : 조직 내에서 환경 변화에 따른 Stress energy(O/H, Trip 등)

으로 가정해보자.

열역학 제1법칙

- 발전소를 하나의 Control Volume으로 가정한다면, Mass 는 총 인원이 된다.

$$\sum_1^n m = M \text{ (발전소 전체 인원)}$$

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right)$$

Control Volume 내 상태가 Steady state라면

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = 0, \quad \dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$$

C.V에 의한 일을 고려하여 엔탈피 $h(h=u+pv)$ 를 도입하면

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m} \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m} \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right)$$

KE, PE를 무시하면, 에너지 보존방정식은 $h(T,P)$ 에 관한 intensive 값으로 정의된다. (h 는 실험치 Table값 및 건도이용, 보간하여 값을 구함)

여기에서 같은 에너지 차원을 가진 스트레스 엔탈피를 제안, S_h

열역학 제1법칙

- 같은 에너지 차원을 가진 스트레스 엔탈피(S_h)를 제안하면,
→ S_h 역시, intensive 값을 지님
 $S_h(I, S)$: Stress enthalpy
 I : work importance (업무 중요도)
 S : work stiffness (업무 강도)

Table 1. 업무강도와 업무중요도에 따른 발전소 업무 구분-(예시:2-D)

업무강도→ 업무중요도↓	1	2	3	4	5
1	환경미화	서무	화재방호	교육훈련	
2	운전경험	출입자관리	각종 행정	현장 운전원	
3	보안	수질관리	인허가/수검	2차계통 정비	MCR 운전원
4	공정관리	엔지니어링	방사선관리	정주기 시험	노심관리
5			품질관리	1차계통 정비	Rx 정비

* 종사자 보직 근속년수 등 3D 확장 가능

열역학 제1법칙

- 현실적인 스트레스 엔탈피를 생각해본다면

$$\frac{S_{h1}}{S_{h0}} = (A_1 + A_2 + A_3 + \dots)$$

S_{h0} : 원래의 스트레스 엔탈피

S_{h1} : 실제 스트레스 엔탈피

여러 Factor(업무 성실성, 업무 평정, 동료평가 등) 을 고려하여 산정

- 한 발전소 전체가 O/H를 끝낸 후를 가정했을 때(단열 폐쇄계)

결국 Q는 없으며,

$$\Delta E = -W$$

∴ O/H 동안 발전소 전체의 스트레스 에너지는 일을 하는 만큼 만들어짐

열역학 제2법칙

- Clausius Statement

- 더 찬 곳에서 더 뜨거운 곳으로 열이 이동되는 유일한 결과를 가지는 과정은 불가능

일반적인 Clausius Theorem은 다음과 같다.

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_b \leq 0 \quad \text{or} \quad \oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_b = -\sigma_{cycle}$$

여기서, \oint 는 어떤 Cycle 동안 열량이 통과되는 전체 면적을 적분하는 적분 기호이다.

σ_{cycle} : "Strength" of the inequality

$\sigma_{cycle} = 0$: no irreversibilities present within the system

$\sigma_{cycle} > 0$: irreversibilities present within the system

$\sigma_{cycle} < 0$: impossible

- Irreversibility : 일의 진행을 저해하는 모든 요소(일의 생성, 전달, 소멸)

열역학 제2법칙

- 가역프로세스에서 엔트로피 상태량인 S 를 도입하면

$$S_2 - S_1 = \left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \right)_{int rev}$$

폐쇄계에서 엔트로피 식은 다음과 같이 정의된다.

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_b + \sigma$$

좌변항 : 엔트로피 변화량

우변 적분항 : 엔트로피 이동량

σ : 엔트로피 생성량

열역학 제2법칙

- 어떤 시스템이 계(System)와 주변(Surrounding)의 일부로 이루어진 Enlarged System 가정(Surrounding은 Process 중 System에 의해 영향을 받는다)
Enlarged System의 경계를 포함해서 C.V.을 규정한다면
Enlarged System은 고립계로 생각할 수 있다. (물질, 열량 이동 X)

그러면 에너지 방정식은,

$$\Delta E]_{isol} = 0$$

$$\Delta E]_{system} + \Delta E]_{surr} = 0$$

폐쇄계의 엔트로피 방정식은,

$$\Delta S]_{isol} = \sigma_{isol}$$

$$\Delta S]_{system} + \Delta S]_{surr} = \sigma_{isol} \geq 0$$

∴ 엔트로피 증가의 법칙

엔트로피는 증가함에 따라 스트레스 엔탈피가 소진되지 않고 원래의 준위보다 높아진다
(∵ $\Delta h < \Delta h_{isentropic}$)

∴ 일의 효율은 낮아짐

Availability 분석

- 일반적인 Availability(Exergy) 식은 다음과 같다.

$$A=(E -U_0)+P_0(V-V_0)-T_0(S-S_0)$$

여기서 첨자 0의 뜻은 Dead State 내의 평형상태를 나타내며, 이는 어떤 값도 Dead state(Environment의 값) 값보다 크거나 같다.

폐쇄계에 Availability를 적용하면

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 \delta Q - W$$

$$S_2 - S_1 = \int \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b + \sigma$$

에너지방정식

엔트로피방정식

이 식을 Availability 변화량으로 정리하면

$$A_2 - A_1 = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \delta Q - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0 \sigma$$

$A_2 - A_1$ 값은 양수도 음수도 나올 수 있지만 여기에서 중요한 것은, $I = T_0 \sigma$ (비가역성)이다.

Availability 분석

- $I: \begin{cases} > 0 & \text{irreversibilities present within the system} \\ = 0 & \text{no irreversibilities present within the system} \end{cases}$

폐쇄계에서 일과 열의 이동이 없어지고, Availability 이동 X

$$\Delta A]_{isol} = -I_{isol}$$

실제 I_{isol} 값은 무조건 양수이므로 유일한 Process는 Availability가 줄어드는 방향이어야만 한다.

- ✓ 엔트로피는 증가하고, Availability는 감소한다.
 - 사람이 가진 능력은 감소하는 방향으로 진행된다.
- ✓ 시간의 흐름(노동의 과정)에 따라 결국 Availability는 소진되어 무질서, 즉 무기력한 상태로 돌아갈 수 밖에 없다.
- ✓ 일이란 간단히 말해 유용한 에너지는 없애는 과정이며, 스트레스를 생산할 수 밖에 없는 당연한 과정이다.

- 물리학자 어윈 슈뢰딩거

“모든 생물은 주변환경으로부터 마이너스 엔트로피를 지속적으로 흡수하여 살아간다.”

결론 및 제언

- 발전소 내의 인원은 각각 다른 일의 양을 감당하고 있다.
- 선호 / 비선호 부서로 (정비/운영, 교대/일근) 나누어져 있음
 - ✓ 기피보직의 인원들의 관리가 필요(금전보상 또는 보직이동)
 - ✓ 소진되는 Availability를 다시 활성화하는 방안 모색 필요
- 향후 연구과제
 - ✓ O/H 공정도 및 작업오더 분석을 통한 업무분석(일의 단위, 시간, 인원)

**THANK
YOU**

