

# 신형경수로(APR1400)의 터빈 사이클 열성능 분석

정대율\* · 임혁순\* · 정대욱\* · 허균영\*\*

## Turbine Cycle Thermal Performance Analysis of Advanced Power Reactor 1400

Dae-Yul JEONG, Hyuk-Soon LIM, Dae-Wok JEONG, Gyun-Young HEO

**Key Words:** APR1400 Heat balance, TBN cycle, Thermal Performance Evaluation. 신형경수로 열평형도, 열성능 분석

### Abstract

Advanced Pressurized Reactor 1400(APR-1400), which is a standard evolutionary advanced light water reactor(ALWR), has been developed from 1992 as one of long-term Government Project(G-7). The APR-1400 is designed to operate at the rated output of 4000MWt to produce an electric power output of around 1450MWe. The balance of plant (BOP) for the secondary system consists of main steam, feedwater, condensate, turbine generator and auxiliary system. In this paper, we describe the major design features of secondary component, balance of plant configuration, and then the turbine cycle thermal performance evaluation using PEPSE code.

#### 기호설명

T : 온도 (Temperature)  
 h : 엔탈피 (Btu/lb)  
 MW : 발전기 출력 (MegaWatt)  
 Psia : 압력

### 1. 서론

신형경수로는 '92. 6월 정부의 G-7과제로 선정되어 현재까지 표준설계를 개발해 오고 있다. 안전성과 경제성을 향상시켜 대내외적 경쟁력을 확보

하고 장기전력수급 계획에 따른 전력수요 충족을 위해 대형원전의 장점을 살리고 해외 개량원전과의 차별화를 위해 원자로 열출력 4000MWt로 설정하여 개량형 원전에 대한 표준설계를 한전 주도로 산·학·연이 합동으로 개발해왔다. 차세대 원전의 노심 열출력을 기준으로 원자로계통 참조 노형인 System 80+ 대비 증기발생기 열전달면적 증가, BOP계통의 용량증가, 저압터빈 최종익의 52"을 채택을 전제로 설계 수행하여 개발한 열평형도(Heat Balance)에서 전기출력이 1455MWe로 계산되었다.

따라서 본 보고서에서는 차세대원전의 터빈사이클의 주요기기 설계, PEPSE 코드를 사용하여 차세대원전의 터빈 사이클에 대하여 터빈발전기 열성능 분석, 전기출력 1455MWe 설계값의 적정성을 확인하고자 한다.

\* 한전 전력연구원 신형원전개발센터

\*\* 한국과학기술원 원자력공학과 (박사과정)

## 2. 2차측 주요계통 및 기기설계

### 2.1 2차측 계통도

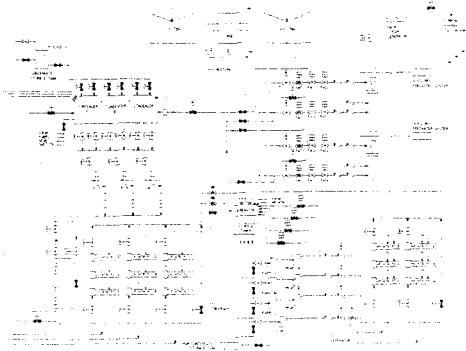


Figure 1. The Drawing of Secondary System in APR1400

### 2.2 주요계통 및 기기

#### 2.2.1 주증기계통

주증기계통은 원자로 열출력 4000MWt을 충분히 제거할수 있도록 System 80+보다 약 2% 증기유량이 증가되고 주증기 배관직경을 다소 증가시켜 증기유속을 System 80+와 동일하게 설계하였다.

Design Item	UCN 3.4	System 80+	KNGR	비고
Steam Flow(lb/hr) (Des./Nor.oper.)	$13.32 \times 10^6$ / $12.72 \times 10^6$	$17.64 \times 10^6$	$18.80 \times 10^6$ / $17.95 \times 10^6$	- KSNP Vs 40% increa. - Sys. 80+ Vs2% increa.
Pressure(Psia) (Des./Nor.oper.)	1,270/1,070	1,200/1,000	1,200/992	
Temperature(°F) (Des./Nor.oper.)	575/553	570/545	570/543.6	

#### 2.2.2 터빈 발전기

원자력설비 100% 열출력(4000MWth)하에서 52" LSB와 43" LSB에 대한 성능특성 및 경제성 분석결과 정격출력에서 52" LSB를 사용시 내부효율이 약 2~3% 향상, 열소비율 감소, 호기당 전력 발전량이 증가되어 설계최적화 심의회의에서 52" LSB적용을 확정하여 설계하였다.

#### 2.2.3 복수계통

##### 2.2.3.1 복수기 및 복수펌프

복수기 배압은 표준원전과 마찬가지로 3대의 복수기가 동일압력을 갖는다. 순환수 유로는 개별

부지 설계범위로 분류되어 사업단계에서 설계업무가 수행될 예정이나 분석을 위해 6대의 순환수 펌프가 각각 6개 수실에 냉각수를 공급하는 병렬 순환수 유로로 가정하였다. 복수펌프는 출력증가에 따른 펌프 유량증가는 선행호기(울진 3,4호기)에 비해 약 36% 가량 증가하여 설계하였다.

##### 2.2.3.2 저압급수 가열기

저압급수 가열기는 정격유량이 8,693gpm으로 계열당 50% 용량으로 3열 3단으로 구성되며(총 9대), 1,2번 가열기는 복수기내에 설치된다.

##### 2.2.3.3 탈기기

탈기기 저장탱크는 보충되는 유량이 없이도 급수계통의 요구유량을 5분간 공급할 수 있는 용량(200,000gal)을 갖도록 설계되어 있으며 50%×2대로 구성되어 있다.

#### 2.2.4 급수계통

4000MWth 열출력을 제거하고 증기발생기 추출수계통을 통해 취출되는 유량을 고려하여 증기발생기 수위를 일정하게 유지하도록 주급수계통의 정격유량을  $8.16 \times 10^6$  kg/hr로 설계하였다. 동계통은 50%용량의 터빈구동 주급수 펌프 3대로 구성하여 정상운전중 3대의 급수펌프가 각각 33 1/3%의 급수를 공급하며 1개의 급수펌프 정지시 나머지 2개열이 50% 급수를 공급할 수 있도록 하여 발전소 출력 감발없이 100% 출력운전이 가능하도록 설계하였다. 또한, 기동용 급수펌프는 발전소 출력 5%까지 감당하고 출력 5% 이상시 주급수펌프가 급수를 공급하고 고압급수가열기는 75%용량으로 2열 3단으로 구성되어(총 6개) 있다.

Design Item	Starting Feed p/p	Booster Feed p/p	Main Feed p/p	HP feed HTR
Nor.Flow (gpm)	2,000	14,400	14,400	22,143
Number	1대(MD)	50% × 3Ea(MD)	50% × 3Ea(TD)	75%/1Train, 3Stage2 Train

## 3. 신형경수로 터빈사이클 열성능분석

### 3.1 분석코드(PEPSE Code)

PEPSE 코드는 분석하고자 하는 발전소계통의

기기와 유로를 모델링하여 분석한다. 기기는 터빈, 복수기, 급수가열기, 열교환기 등의 하드웨어를 모델링한 것으로 응용할 수 있는 분야는 4가지로 최적상태 도출, 민감도 분석, 발전소 설계, 발전소 성능예측이다. 발전소 설계시(Power Plant Design) 발전소 터빈사이클의 열역학적으로 높은 상태(Highest Thermodynamic Availability)의 고에너지 영역에서 낮은 상태(Lowest Availability)의 저에너지 영역으로 진행하면서(고압터빈→저압터빈·고압급수가열기 배수→저압급수가열기 배수→복수기) 각 급수가열기를 출입하는 질량 및 에너지의 열평형을 이루도록 하여 발전소 열평형 성능을 분석하는데 사용된다.

### 3.2 터빈사이클 설계 열평형도(그림2. 참조)

터빈사이클의 성능을 분석하기 위해서는 우선적으로 터빈사이클내 기기(Component) 및 배관(Stream)의 배열 형태 즉 터빈의 대수와 형식, 급수가열기의 대수와 배수(Drain) 배출 방식, 주급수펌프 터빈구동, 고압밸브 및 터빈 밀봉패킹(TBN Gland Packing) 누설 증기배관의 배열 등이 결정되어야 한다. 원자로설비 100% 열출력(4000MWe)하에서 신형경수로의 최적 터빈사이클 구성하기 위하여 저압터빈 성능결정에 있어 설계상 가장 중요한 요소는 저압터빈 설치대수 및 최종익 길이를 저압터빈 3대(6 Flows), 저압터빈 최종익 길이를 “LSB 52 inch 터빈”으로 중합 사이클을 구성하여 열평형도를 개발하였다.



Figure 2. The TBN Cycle Heat Balance in APR1400

### 3.3 PEPSE MODELING(그림3. 참조)

신형경수로의 노심 열출력(4000MWth)과 전기출력 1455MWe급의 설계 터빈사이클 열평형도를 기준으로 PEPSE 모델링을 하였다. 터빈 발전기의 열성능 분석을 위해 PEPSE 프로그램의 모델링은 터빈입구에서 시작하여 증기발생기 유입급수까지로 모델링 하였다. 신형경수로의 터빈 사이클의 경우 총 50건의 기기모델 및 74개의 연결 Stream으로 구성되어 있으며 신형경수로의 설계 및 개발한 열평형도 중 전출력보증(Maximum Guaranteed Rate) 열평형도를 기준 모델로 작성하였다. 전출력 보증조건하에서 터빈출력은 1455MWe, 회전수는 1800rpm, 급수가열기는 3개의 저압급수가열기와 3개의 고압급수가열기로 구성되어있으며, 급수가열기의 중단온도차(TTD)는 5°F, 드레인 냉각온도차(DCA)는 10°F로 설정하였다. 고압터빈에서 3개소의 추기 및 습분분리단(Stage)이 있으며, 2개의 습분분리기, 저압터빈에서는 4개소의 추기가 있다.

## 4. 분석결과

### 4.1 PEPSE MODELLING 출력

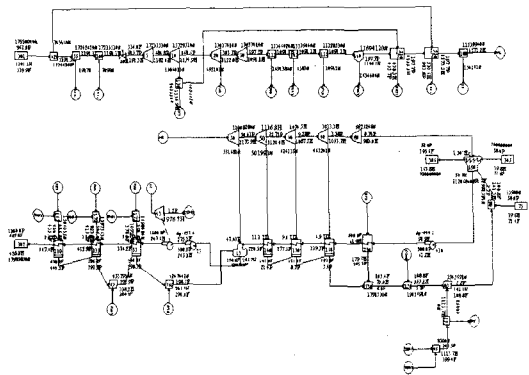


Figure 3. The TBN Cycle PEPSE Modeling & Output

### 4.2 터빈-발전기 팽창선도 분석

터빈 발전기의 성능분석을 위한 가장 기본적인 터빈의 열역학적 성능변수는 터빈의 내부효율이다. 내부효율은 증기가 터빈을 통과하면서 발생한 실제 열낙차와 증기의 팽창을 통하여 얻을 수

있는 이론적으로 유용한 에너지와의 비가 되며, %로 나타낸다. 그러나 팽창선이 직선으로 이루어지는 화력발전 터빈과는 달리 원자력 발전소 터빈은 습분제거의 영향으로 팽창선이 여러 개의 불연속점이 생기면서 그러짐을 알수 있었다. 이것은 건도가 낮은 습증기 구역에서 운전되고 있는 원자력 저압터빈은 팽창증인 증기에 함유하고 있는 수적(Water Droplet)을 포집하고 이를 추기관을 통하여 외부로 배출할때, 그 결과로서 증기의 재열효과를 얻고 있음을 알수 있었다. 팽창증기의 재열 정도는 증기건도의 향상에 따른 동일 압력하에서의 엔탈피 상승량으로써 나타나며 이는 습분분리단의 습분제거효율에 의하여 결정된다. 습분제거효율은 습분분리단 입구증기 습분에 대한 배출 응축수량의 비로써 나타나며 이는 습분분리단 증기의 습분과 Shell 압력의 함수가 된다.

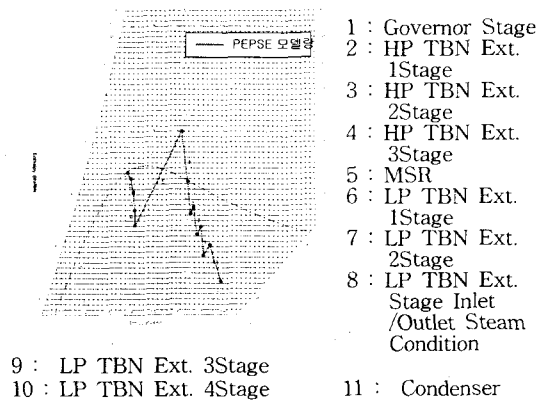


Figure 4. The TBN Expansion Drawing of Applying TBN Cycle Design Value in APR1400

### 4.3 터빈-발전기 성능분석

#### 4.3.1 터빈효율

신형경수로의 노심 열출력(4000MWth)을 기준으로 전기출력 1455MWe급의 최상의 조건을 기준으로 터빈 운전성능을 분석하였다. 일반적으로 터빈의 효율은 첫 번째 터빈단 입구조건과 마지막 터빈단 출구 조건사이의 유용 에너지와 사용 에너지의 비로 보통 고압터빈에서는 첫 번째 터빈단은 고압터빈 제어단이 되며, 저압터빈에서는 습분분리재열기 후단에 해당한다. 각 열의 터빈단은 동일한 효율로 간주된다.

$$\eta = \frac{h_i^{first} - h_o^{last}}{h_i^{first} - h_o^{last, isen}}$$

○ 각 추기단사이의 Stage Group에 대한 내부효율  
 = (Stage Group 입구 증기엔탈피 - Stage Group 출구 증기엔탈피) / (Stage Group 입구 증기엔탈피 - 등엔트로피 팽창시의 Stage Group 출구 증기엔탈피) × 100

○ 터빈 Section 내부효율 (%)  
 = (터빈 입구 보울엔탈피 - 터빈 팽창선 끝점엔탈피) / (터빈 입구보울 엔탈피 - 터빈 입구 보울조건에서 배기압력까지 등엔트로피 팽창하였을 경우의 배기엔탈피) × 100

#### 4.3.2 터빈발전기 성능

터빈 성능은 터빈을 통과하는 증기가 터빈에 공급할 수 있는 에너지량(유용에너지)과 실제로 증기가 터빈에 공급하는 에너지량(사용에너지)과의 비 즉, 내부효율로서 나타내며 터빈 내부 부품(Nozzle, Bucket 등)의 성능저하에 따라 발생하는 터빈배기, 추기 및 누설증기의 유량과 상태의 변화량을 고려되어야 한다. 차세대원전의 설계열평도를 기준으로하여 PEPSE 코드를 사용하여 터빈 성능분석결과 고압터빈에서 86%, 저압터빈 76%, 전기출력은 1454.506MWe 얻을수 있다.

DESCRIPTION		HEAT BALANCE DATA	PEPSE OUTPUT
1. STEAM FLOW AT S/G OUTLET(LB/HR)		17.95×10 <sup>6</sup>	17.95×10 <sup>6</sup>
2. TBN THROTTLE STEAM	A. FLOW(LB/HR)	A. 17.1751×10 <sup>6</sup>	A. 17.1751×10 <sup>6</sup>
	B. PRESSURE(PSIA)	B. 962.0	B. 962.0
	C. ENTHALPY(BTU/LB)	C. 1191.3	C. 1191.3
3. FINAL FEEDWATER	A. FLOW(LB/HR)	A. 17.9859×10 <sup>6</sup>	A. 17.9859×10 <sup>6</sup>
	B. ENTHALPY(BTU/LB)	B. 430.7	B. 428.0
	C. TEMP(°F)	C. 450.0	C. 447.6
4. CONDENSER PRESSURE(INJIG)		1.50	1.50
5. MOIS. SEPARATOR EFFL(%)		-	-
6. REHEATER TTD(1 <sup>ST</sup> /2 <sup>ND</sup> ) (°F)		20/80	20/80
7. CONDENSATE PUMP DIS. PRES(PSIA)		500.0	500.0
8. MAIN FEED PUMP DIS. PRES(PSIA)		1300.0	1300.0
9. FEEDWATER PUMP TURBINE EXH. PRESS (INHGA)		2.50	2.50
10. GENERATOR	A. POWER FACTOR	A. 0.90	A. 0.90
	B. OUTPUT(MWe)	B. -	B. -
	- 총 출력(MWe)	- 1480.63	- 1480.02
	- 기계순출(MWe)	- 7.828	- 7.828
	- 전기순출(MWe)	- 17.686	- 17.686
- 발전기출력(MWe)	- 1455.117	- 1454.506	
11. HEATRAT NET (BTU/KWH)		9328	9436

## 5. 결 론

신형경수로의 터빈싸이클 열성능 분석을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

- (1) 신형경수로의 열출력 4000MWt을 기준으로 설계열평형도에서 전기출력을 산정한 계산한 1455MWe와 PEPSE 프로그램 분석값과 1454.5MWe로 거의 일치 되었다. 이것은 각 기기의 성능 변수 설계치가 적합하게 설계됨을 알 수 있었다.
- (2) 터빈효율은 고압측보다 저압측이 감소하였으며 이것은 복수기 성능영향으로 사료되며 하절기 해수온도의 상승, 복수기 관폐쇄(Plugging), 진공 누설시 복수기 성능저하로 저압터빈의 효율이 더 감소될 것으로 추측된다.
- (3) 정상운전중 발전소의 열성능 저하시(최종적으로 발전기 출력감소시) 설계기준 주요변수와 비교 분석하여 각 기기의 열성능 저하된 것을 기기별 성능변수 설계치로 개선시켜 발전기 출력의 증가 예측이 가능하다.
- (4) 신형경수로의 터빈발전기 열성능 분석절차를 확립함으로써 발전소 정상운전시 단위 기기별 성능저하 원인분석 및 예방정비 계획을 수립하여 가동율 향상과 발전소 성능에 미치는 각종 기기의 설계, 운전 및 열역학적 변수를 조절하여 최적 운전상태를 도출할수 있는 기반을 마련할 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) 전력연구원, '93.4, 원전 터빈싸이클 열성능분석 전산프로그램
- 2) 전력연구원, '89, 원자력 발전소 성능 및 효율 개선 사전연구
- 3) PEPSE User's Manual
- 4) 전력연구원, 신형경수로(APR-1400) 표준 안전분석 보고서