

공정열 및 수소생산을 위한 초고온가스로 열평형 분석

박소영* · 허균영* · 유연재** · 이상일**†

*경희대학교 원자력공학과, **현대엔지니어링 전력플랜트사업본부 원자력팀
(2016년 11월 14일 접수, 2016년 12월 15일 수정, 2016년 12월 16일 채택)

Heat balance analysis for process heat and hydrogen generation in VHTR

Soyoung Park* · Gyunyoung Heo* · YeonJae Yoo** · SangIL Lee**†

*Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

**Department of Nuclear Team Power & Energy Plant Division, Hyundai Engineering Company,
Seoul, Korea

(Received 24 November 2016, Revised 15 December 2016, Accepted 16 December 2016)

요 약

초고온가스로는 열출력 밀도가 낮아 노심용융의 가능성이 낮으며, 냉각재 상실사고 시 수소 발생 등으로 인한 폭발의 위험도 없다. 안전성 측면의 장점과 더불어 냉각재를 초고온으로 만들어 전력생산이외에 산업시설용 공정 열로의 응용도 가능하다. 본 논문에서는 초고온가스를 일차계통으로 하고, 전력 및 공정열 공급이 가능한 이차계통의 개념 설계를 담고 있다. 기존에 NGNP(Next Generation Nuclear Part)에서 제안한 350 MW 열출력 원자로 모델을 기반으로 수소생산 루프와는 별도로 전력생산을 위한 300 MW의 열에너지를 중간열교환기를 통해 이차계통으로 전달하는 참조모델을 개발하고, 이를 열역학적 측면에서 분석하였으며 이차계통 각 지점에서 주요 설계변수에 따른 효율분석과 최적화개념 연구를 수행하였다.

주요어 : 초고온가스로, 공정열, 수소생산, 전력생산, 중간열교환기

Abstract - Since the power density of the VHTR(Very High Temperature Reactor) is lower, there is less possibility of core melt. VHTR has no risk of explosion caused by hydrogen generation when the loss of coolant accident occurs, which is another advantage. Along with safety benefit, it can be used as a process heat supplier near demand facilities because coolant temperature is very high enough to be used for industrial purpose. In this paper, we designed the primary system using VHTR and the secondary system providing electricity and process heat. Based on that 350 MW thermal reactor proposed by NGNP(Next Generation Nuclear Part), we developed conceptual model that the IHX(Intermediate Heat Exchanger) loop transports 300 MW thermal energy to the secondary system. In addition, we analyzed thermodynamic behavior and performed the efficiency analysis and optimization study depending on major parameters.

Key words : VHTR(Very High Temperature Reactor), Process heat, Hydrogen production, Electricity production, IHX(Intermediate Heat Exchanger) loop

1. 서론

국내에서는 가압경수로 및 가압중수로와 같이 냉각

재로서 물을 사용하는 노형만을 운영한 경험이 있다. 하지만 외국에서는 고온가스냉각로에 대한 연구 및 운영실적을 다수 가지고 있다. 고온가스냉각로는 열출력 밀도가 낮아 노심용융의 가능성이 낮으며, 물을 사용하지 않으므로 냉각재 상실사고 시 수소 발생 등으로 인한 폭발의 위험도 없다.

†To whom corresponding should be addressed.
Tel : +82-2-2134-5904 E-mail : sang@hec.co.kr

고온가스냉각로는 수냉각로에 비하여 높은 온도의 냉각재를 만들 수 있다는 장점이 있다. 예컨대 중동지역에서 고온가스냉각로를 사용하면, 화석연료의 사용은 줄어들면서, 전력 및 해수 담수화에 필요한 80~200 °C의 증기를 높은 효율로 공급할 수가 있다. 더 나아가 초고온가스로는 고온가스냉각로의 기술에 기반을 두면서 안정성을 획기적으로 향상한 제 4세대 피동안전 원자로로서, 고온의 헬륨을 냉각재로 사용하기 때문에 고효율 전기 생산뿐만 아니라 대량 수소생산과 공정열 공급에 적합한 900 °C 이상의 열을 생산할 수 있다. 또한 상대적으로 발전 시설의 규모가 작고 가스터빈과 결합할 경우 고효율 전력 생산이 가능하기 때문에 내륙부지 혹은 도서 지역의 전력 공급에도 적합하다.[1]

국내에서 초고온가스조에 대한 개념 설계가 진행 중인 가운데 그러한 연구의 일환으로서 본 논문에서는 초고온가스냉각로로 구성된 일차 계통에서 열에너지를 공급 받아 전력 및 공정열 공급이 가능한 이차계통에 대해서 개념 설계를 수행하고 이에 대한 열역학적 시뮬레이션을 수행한 내용을 담고 있다. 우선 기존에 NGNP(Next Generation Nuclear Part)에서 제안한 바 있었던 SC-MHR(Steam Cycle-Modular Helium - cooled Reactor) 열병합 발전 프로세스에 중간열교환

기(Intermediate Heat Exchanger, IHX) 루프를 활용한 수소 생산 및 랭킨사이클 개념을 분석해 참조모델로 사용하였다. 다음으로는 이를 열역학적 측면에서 분석하였으며, 열변환계통 각 지점에서 주요 설계변수에 따른 효율분석과 최적화 개념 연구를 수행하였다.

2. 연구 방법론

2-1. 고온가스냉각로 열변환 사이클 분석

다른 원자로와 비교하여 고온가스냉각로의 장점은 열병합 발전에 효과적이라는 것이다. 열병합발전은 전기와 열을 동시에 생산하는 종합에너지시스템으로서 일반적으로 고온부는 전기, 저온부는 공장의 공정(Process)용 증기 또는 온수로 만들어 주거 및 사무용 시설에 난방용으로 공급하는 두 가지의 목적이 독립적으로 수행되는 병렬형 에너지 이용 시스템이다. 열병합발전은 전력만을 생산하는 경우보다 훨씬 복잡한 계통으로 구성되며, 다양한 운전모드에 따라 적절한 전력 또는 열부하를 제어함으로써 안정적으로 시스템을 유지하여야 한다.[2]

NGNP에서는 고온가스냉각로 기술에 기반한 다양한 열병합발전 개념설계를 수행한 바 있는데, 본 논문에서는 이에 대한 선행 분석을 수행하였다. Fig 1에서는

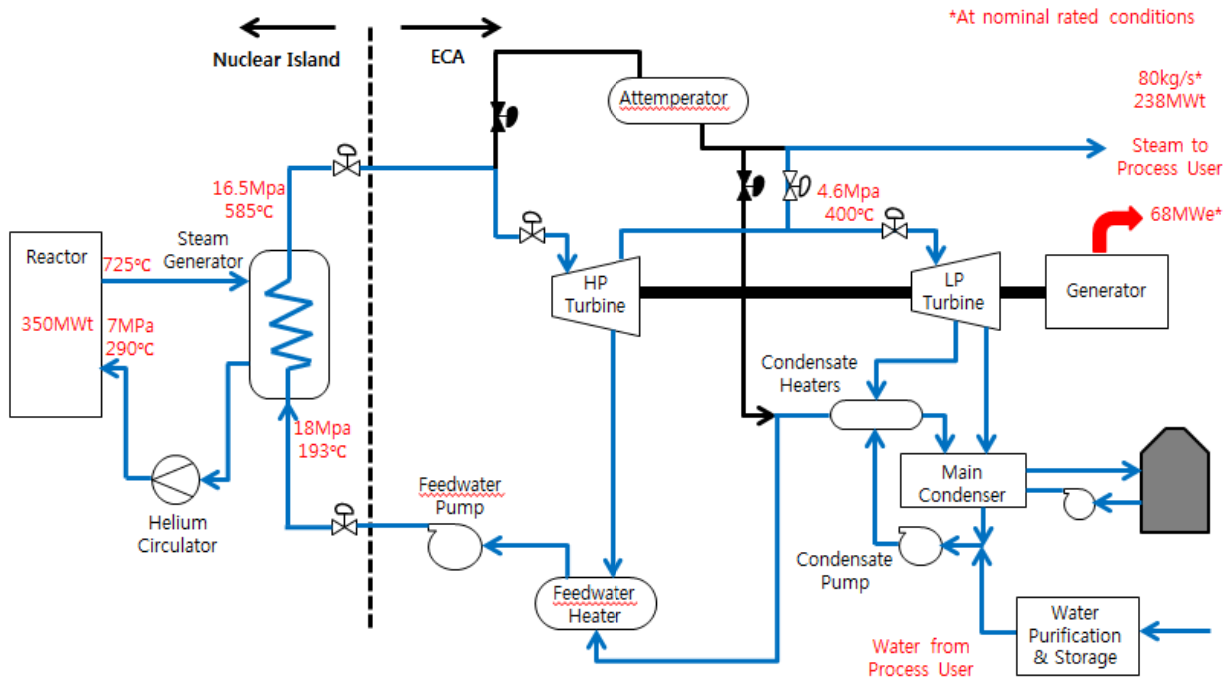


Fig. 1. SC-MHR cogeneration Process of NGNP [3]

Table 1. Steam Generator inlet and exhaust condition(case of no hydrogen production) [4]

	Inlet conditions			
	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Flow (kg/hr)
AEM	193.3	20,684.3	831.3	469,785.7
RCM	193.3	20,684.3	831.5	469,785.7
TBM	193.3	18,762.7	830.6	345,505.9
	Outlet conditions			
	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Flow (kg/hr)
AEM	585.0	16,499.2	3,530.2	469,785.7
RCM	585.0	16,499.2	3,530.2	469,785.7
TBM	585.0	16,499.2	3,530.2	345,505.9

NGNP에서 제안한 SC-MHR(Steam Cycle - Modular Helium-cooled Reactor) 증기/열병합 발전 프로세스를 보여주고 있다. SC-MHR의 주요계통은 NI(Nuclear Island)와 ECA(Energy Conversion Area)로 구분되는데, 통상 기존의 수냉각로의 용어를 활용한다면 NI를 일차계통, ECA를 이차계통으로 부를 수 있다. NI는 원자력으로 증기를 생성하고, 이를 ECA에 제공하는 역할을 한다. ECA에서는 증기 에너지의 일부가 고압 터빈에서 전력으로 변환된다. 고압 터빈을 전후하여 전기 생산 외에도 사용자가 필요한 수준의 증기 압력으로 감소를 시켜 공정열을 제공하기도 한다.[3]

이와 같이 ECA는 운전 목적에 따라 몇 가지 모드로 구분된다. All-Electrical Mode(AEM)에서는 전력생산만을 목적으로 가동된다. Rated Cogeneration Mode(RCM)의 경우 전체 유량의 60% 가량을 공정열로 사용한다. 고압 터빈 끝단에서 빠져 나가는 유량의 일부를 공정열로 사용하며, 이때 열교환기 및 탈기기로 이동하는 작동유체의 유로가 바뀌게 된다. Turbine Bypass Model(TBM)의 경우는 터빈으로 가는 유로를 차단함으로써 모든 유량을 공정열로 사용하게 된다. Table 1은 수소생성이 없는 경우 증기발생기의 입출구 조건을 나타낸 것이다.

만일 NI 쪽에서 50 MW의 열을 수소생산을 위해 사용한다면, ECA 쪽에서는 이를 감소한 만큼의 열원을 활용 할 수 있다. 단 증기발생기의 입출구 조건은 그대로 유지되어야 하므로, 유량을 조절해야 한다. 이를 감안하여 재작성한 증기발생기에서의 입출구 조건은

Table 2. Steam Generator inlet and exhaust condition(case of hydrogen production) [4]

	Inlet conditions			
	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Flow (kg/hr)
AEM	193.3	20684.3	357.4	402,673.5
RCM	193.3	20684.3	357.5	402,673.5
	Outlet conditions			
	Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Enthalpy (kJ/kg)	Flow (kg/hr)
AEM	585.0	16,499.2	3,530.2	402,673.5
RCM	585.0	16,499.2	3,530.2	402,673.5

Table 2와 같다. TBM의 경우는 조건에 따라 유동적일 수 있으므로 생략하였다.

NGNP는 랭킨사이클을 이용한 열변환 개념 설계 이외에도 브레이튼사이클도 제안한 바 있다. Fig 2는 NGNP에서 GT-MHR(Gas Turbine Modular Helium Reactor)을 토대로 설계한 600 MW급의 수소생산 사이클을 제시하고 있다. 이는 GT-MHR과 설계 구성이 동일하지만, IHX로 열을 전달하는 냉각 루프를 추가적으로 포함하고 있으며, 냉각재의 출구 온도가 950 °C로 작동하여 850 °C인 GT-MHR과 다소 차이가 있다. 공정에 대해 개략적으로 설명을 하면 원자로에 의해 가열된 950 °C의 헬륨이 IHX로 열에너지를 전달하며, IHX에서는 65 MWt의 열에너지가 각각 SI(Sulfur-Iodine)계 수소생산 시설에 60 MW, HTE(High Temperature Electrolysis)계 수소생산 시설에 대략 5 MW 정도로 나눠 전달된다.[5] Fig 2에서 주목할 점은 브레이튼사이클로 운전된다는 점도 있지만, IHX를 이용하여 원자로 사고에 대비한 안전성을 높이고, 필요한 온도의 공정열을 공급할 수 있는 방법을 제시했다는 점이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 IHX 개념의 장점을 활용하기 위하여, Fig 2의 개념설계도를 참조하여 고온 고압의 헬륨기체가 흐르는 IHX 루프를 350 MW 열출력 원자로(Reactor)로부터 2개를 달아 1개는 수소생산시설로 50 MW를 이용하고, 나머지 1개는 전력생산시설로 300 MW를 이용하는 개념을 제시하였다. 국내에서는 헬륨을 이용한 브레이튼 사이클의 경험이 없기 때문에, 이보다는 기술력이 앞서고 검증된 랭킨 사이클을 설치하는 것으로 결론을 지었다. 이에 대한 상세 분석 내용은 다음과 같다.

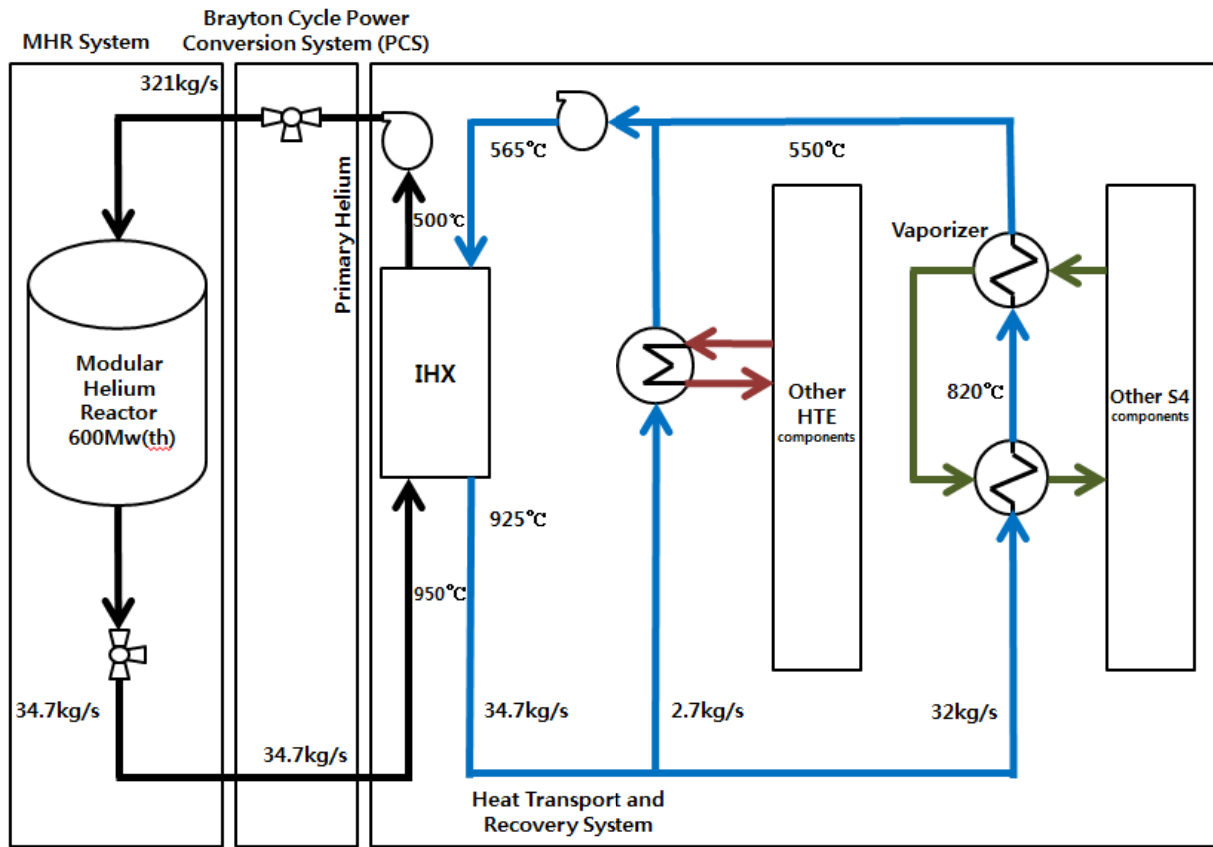


Fig. 2. Hydrogen production and Brayton cycle concept of NGNP [5]

2-2. 열변환 사이클 개념설계

본 연구에서는 SC-MHR의 원자로와 GT-MHR에서 제시한 IHX의 개념을 도입하여 IHX를 활용한 랭킨 사이클을 열변환 사이클로 제시하였다. Fig 3과 Fig 4에서는 본 연구에서 고안한 두 가지 IHX 루프 기반의 랭킨사이클을 보여주고 있다. Fig 3은 기본적인 기기만을 모델링한 것으로서 헬륨이 흐르는 1, 2차 루프의 압력강하를 계산하고 기본적인 사이클 효율을 계산하는 목적으로 시도되었다. 하지만 증기터빈사이클 부분은 단순한 랭킨사이클을 이용하였기 때문에 여전히 최적화의 여지가 있다. 따라서 Fig 4와 같이 급수가열기 1단이 설치된 재생사이클을 구성하고 이에 대한 효과를 살펴보았다.[6]

이에 대한 시뮬레이션을 위하여 열역학 시스템 분석 소프트웨어인 PEPSE와 EES(Engineering Equation Solver)를 이용하였다. 헬륨 기체 및 증기가 흐르는 계통에 대해서 각각 EES 및 PEPSE를 이용하여 분석하였다.

Fig 3에서는 IHX-1 루프를 이용한 수소생산계통에서 50 MW를 사용한다고 가정하고, 나머지 300 MW로 IHX-2 루프를 지나 전력을 생산하는 계통을 구성하였다. IHX-1과 2 루프의 유체는 헬륨이고, 증기발생기에 흐르는 유체는 물이다. 원자로에 의해 가열된 950 °C, 7000 kPa의 헬륨기체가 IHX-2 루프와 열교환을 하고, IHX-2 루프의 750 °C, 7000 kPa의 헬륨기체가 증기발생기(Steam Generator)에 열을 공급함으로써 물을 증기로 상변화 시킨다.

Fig 3에서 1, 4, 5, 6, 8 지점의 온도와 압력 그리고 1차, 2차 루프 압력강하에 대한 가정은 참고문헌에서 SC-MHR에 대해 제시한 값을 이용하였다.[3] 나머지 2, 7, 9, 10, 11, 12 지점의 물성치를 구하기 위해서는 터빈, 펌프, 순환기의 효율을 모두 0.9로 가정하였으며, 여기에 활용된 주요 방정식은 아래 (1), (2) 식과 같다.[7]

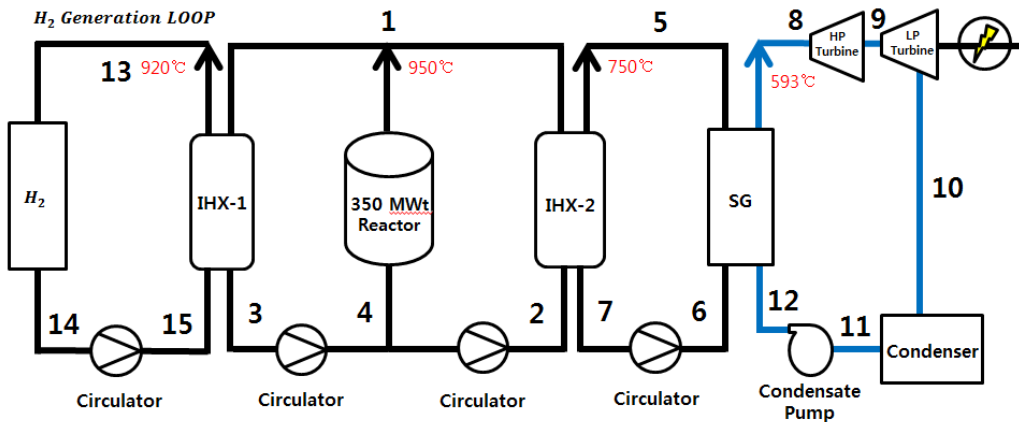


Fig. 3. Simple IHX loop modeling

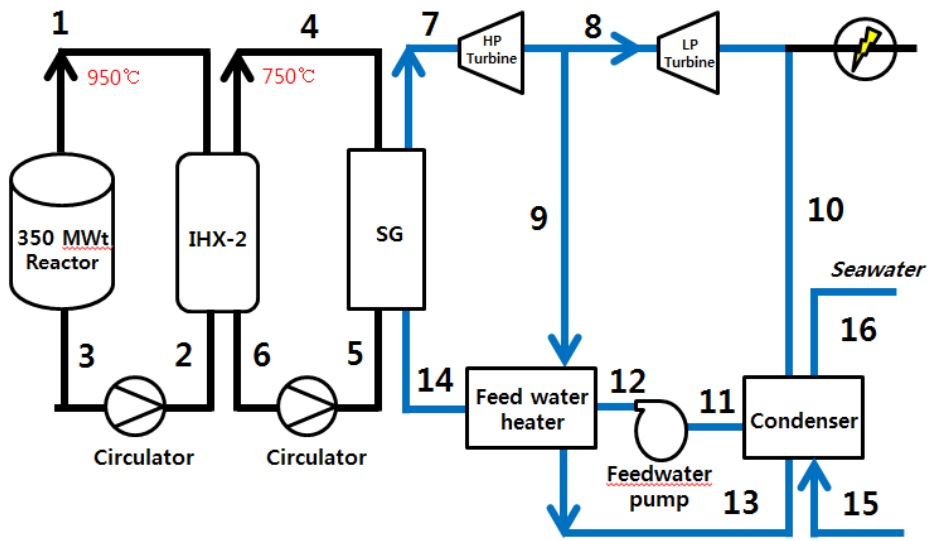


Fig. 4. IHX loop modeling include regeneration cycle

- 2, 12 지점의 엔탈피 계산에 이용한 식

$$: h_{in} = h_{out} - \left(\frac{v \times (P_{out} - P_{in})}{\eta_{fan}} \right) \dots (1)$$

여기서 h 는 엔탈피(kJ/kg),
 v 는 유량의 비체적(m^3/kg),
 P 는 압력(kPa),
 in 은 기기로 들어오는 부분,
 out 은 기기에서 나가는 부분.

- 7, 9, 10 지점의 엔탈피 계산에 이용한 식

$$: h_{out} = h_{in} - \eta(h_{in} - h_{out\ isen}) \dots (2)$$

여기서 η 는 기기의 효율,

$h_{out\ isen}$ 은 기기에서 나가는 부분의 등엔트로피(isentropic) 엔탈피.

- 11 지점의 물성치

$$: P_{11} = P_{10},$$

복수기를 지나는 지점에서의 건도, $q_{11} = 0$.

Fig 4는 효율을 최적화시키기 위해 Fig 3의 전력생산 부분에 급수가열기 1단을 추가적으로 설치한 것이다. 1, 3, 4, 5, 7, 15에 대한 온도와 압력, 그리고 1차, 2차 루프 압력강하에 대한 가정은 앞서서와 마찬가지로 참고문헌의 값을 활용하였다.[3]

3. 결 과

NGNP에서 제안한 SC-MHR과 GT-MHR의 IHX 루프 모델을 참고 모델로 하여 전력생산 부분을 브레이크 사이클 대신 랭킨사이클로 변환한 모델이 Fig 3이며 이에 추가로 급수가열기 1단을 달아 효율 개선을 분석한 것이 Fig 4이다. 이들은 모두 350 MW 열출력을 원자로에서 제공하되, 50 MW는 수소생산루프로 이동한다고 가정하고, 나머지 300 MW를 이용하여 전력을 생산하는 루프라 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

우선 원자로와 IHX-2 루프에 흐르는 헬륨 기체 유량을 m_1 , IHX-2와 증기발생기 사이에 흐르는 헬륨 기체 유량을 m_2 , 증기발생기에 흐르는 물의 유량을 m_3 라 가정한다. 1차 루프에서 발생할 것으로 예상되는 압

력강하는 참고문헌 자료를 통해 100 kPa로 설정하였는데, 이 값이 올라가면 헬륨 팬의 동력 소요에 의해 사이클 효율이 낮아지게 된다. 2차 루프에 대한 압력 강하는 제시되지 않았지만, 1차 루프보다는 적을 것으로 예상되어 보수적으로 100 kPa로 동일하게 가정하였다. 단순 IHX 루프 모델에 대한 시뮬레이션 결과로 도출된 각 지점에서의 열역학적 물성치는 Table 3과 같다.

이로부터 전기출력을 원자로 열출력으로 나눈 Gross 효율1, η_{gross1} , 전기출력을 증기발생기 열출력으로 나눈 Gross 효율2, η_{gross2} 와 전기출력에서 1, 2차 루프 헬륨팬, 3차 루프 펌프 소요동력을 제외한 값을 원자로 열출력으로 나눈 값인 Net 효율, η_{net} 을 구할 수 있었다. 이와 관련된 주요 방정식은 아래와 같고, 계산 결과는 Table 4와 같다.[8]

Table 3. Results of simple IHX loop modeling

	T	P	h	m
1	950	7000	4822	416217
2	445.4	6900	2203	416217
4	450	7000	2227	416217
5	750	7000	3784	469959
6	300	6900	1449	469959
7	303	7000	1465	469959
8	585	16500	3528	328124
9	384.8	4600	3166	328124
10	39.01	7	2154	328124
11	39.01	7	163.4	328124
12	39.99	18000	183.3	328124

T : Temperature(°C), P : Pressure(kPa)
 h : Enthalpy(kJ/kg), m : Flow(kg/hr)

Table 4. Efficiency analysis of simple IHX loop model

Gross 효율1 (전기출력/원자로열출력)	42 %
Gross 효율2 (전기출력/SG 열출력)	41 %
Net 효율	39 %

$$\eta_{gross1} = \frac{W_{turbine}}{300MW}$$

$$(W_{turbine} = m_3 \times (h_8 - h_{10}))$$

$$\eta_{gross2} = \frac{W_{turbine}}{(h_8 - h_{12}) \times m_3}$$

$$\eta_{net} = \frac{W_{turbine} - W_{total}}{300MW}$$

$$(W_1 = m_1 \times (h_4 - h_2), W_2 = m_2 \times (h_7 - h_6))$$

$$(W_{total} = W_1 + W_2 + W_{pump})$$

압력강하가 높아지면 헬륨 팬에 투입되는 소요 동력이 기체의 온도를 높여 전기출력이 오히려 높게 나오

면서 Gross 효율이 높게 나오겠지만, 본 연구에서는 실질적으로 중요한 지표인 Net 효율을 향상시키는 것이 중요하다고 판단하였다.[9]

따라서 Fig 3과 같은 단순 랭킨사이클에서 Fig 4과 같이 급수가열기 1단이 설치된 재생사이클을 구성하고 이에 대한 효과를 살펴보았다. 급수가열기가 설치 전과 설치 후에 대하여 3차 루프를 PEPSE로 시뮬레이션 하였으며 급수가열기 설치 후 IHX 루프 모델링 시뮬레이션 결과로 도출된 각 지점에서의 열역학적 물성치는 Table 5와 같다. 또한, Table 6에서는 IHX 루프 모델링의 급수가열기 설치 전과 후에 대해 출력, Gross 효율 및 Net 효율을 비교하여 결과 값을 제시하였다.[10]

Table 5. Results of IHX loop modeling include regeneration

	T	P	h	m
1	950	7000	4822	416217
2	445.4	6900	2203	416217
4	450	7000	2227	416217
5	750	7000	3784	469959
6	300	6900	1449	469959
7	585	16500	3526.9	400274
8	383.4	4600	3165.2	313318
9	383.4	4600	3165.2	86956
10	39	7	2171.1	313318
11	39	7	163.4	400274
12	40	18000	183.4	400274
13	45.6	4600	194.8	86956
14	193	18000	828.7	400274
15	15	101	63	15104260
16	25	303	105.1	15104260

T : Temperature(°C), P : Pressure(kPa)
h : Enthalpy(kJ/kg), m : Flow(kg/hr)

Table 6. Power and Efficiency before installation of the feedwater heater

	급수가열기	
	설치 전	설치 후
출력 (MW)	121.648	126.731
Gross 효율	0.40549	0.42244
Net 효율	0.39390	0.40882

시물레이션에서는 원자로의 열출력을 300 MW로 고정시켰기 때문에, 급수가열기가 설치되지 않아 효율이 떨어지게 되면 전기출력이 낮아지게 됨을 알 수 있다. 급수가열기가 설치되기 전에는 Net 효율이 39%로 위의 상세설계과정을 이용한 IHX 루프 모델링 결과에서 제시한 Table 3의 값과 동일하다. 그러나 급수가열기가 설치된 후에는 Net 효율이 40.8%까지 올라가는 것을 알 수 있다.

위의 모델은 간단한 1단 재생사이클을 설치한 것으로서 다단의 재생사이클 설치 또는 재열사이클의 추가가 되는 등 보다 상세설계가 되어 갈수록 최적화 모델이 도출될 수 있음을 예상할 수 있다. 추가적인 상세설계는 원자로 설계와 병행하여 이루어질 예정이다.[11]

4. 결론

본 논문에서는 NGNP에서 제안한 SC-MHR 증기/열병합 발전 프로세스와 GT-MHR의 IHX 루프를 바탕으로 350 MW급 원자로로부터 2개의 IHX 루프를 달아 수소생산과 전력생산을 모두 갖춘 원자로 모델 및 동력변화 사이클에 대한 개념설계를 수행하였다. 기존에 제시되었던 고온가스냉각로의 열변환 사이클을 분석하기 위해 SC-MHR에 대한 ECA의 운전 목적에 따른 입출구 조건 및 출력의 변화를 살펴보았으며 이를 바탕으로 전력 생산 부분에 랭킨사이클에 기반한 IHX 루프를 상세 설계하여 각 지점의 열역학적 물성치와 효율계산을 수행하였다. 또한 추가적으로 터빈 및 급수가열기의 증감에 따른 전기출력 및 효율 변화를 다루어 재생, 재열사이클 추가 시 효율 최적화에 대한 가능성을 제시하였다.

References

1. Lee. S. I., 2015, Heat Balance Study on Integrated Cycles for Hydrogen and Electricity Generation in VHTR, Transaction of the KNS Spring Meeting
2. J. Saurwein, 2007, NGNP Point Design and Commercial Plant Configurations, Proceedings of the NGNP Project Status Meeting
3. J. Saurwein, 2010, Conceptual Design Report-Steam Cycle Modular Helium Reactor(SC-MHR) Demonstration Plant, General Atomics, pp. 113-118
4. Lee. S. I., 2015, Heat Balance Study on Integrated Cycles for Hydrogen and Electricity Generation in VHTR - Part 2, Transaction of the KNS Autumn Meeting
5. J. Saurwein, 2007, Preconceptual Engineering Services for the Next Generation Nuclear Plant(NGNP) with hydrogen Production: Executive Summary Report-NGNP and Hydrogen Production Preconceptual Design Studies Report, General Atomics, pp. 15-18
6. Kim. S. J., Lee. J. S., Kim. M. S., 2015, Comparison and Characteristic Analysis of Supercritical CO2 Brayton Cycle and Steam Rankine Cycle for Waste Heat Recovery, The Society of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers of Korea, pp.83-86
7. Park. C. Y., Hong. W. K., Kim. J. M., 2011, Thermodynamic Efficiencies of Organic Rankine Cycle with a Feed Liquid Heater or Regenerator, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 10, pp. 662-669
8. F-Chart Software, 2016, Engineering Equation Solver, <http://www.fchart.com/ees/>
9. Shin. Y. J., 2014, Preliminary Overview of a Helium Cooling System for the Secondary Helium Loop in VHTR-based SI SI Hydrogen Production Facilities, Transaction of the KNS Spring Meeting
10. Curtiss-Wright Nuclear Division, 2016, PEPSE, <http://famos.scientech.us/PEPSE.html>
11. Shin. Y. J., 2013, A Cooling System for The Secondary Helium Loop in VHTR-based SI Hydrogen Production Facilities, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No.14, pp. 6182-6189