

'01 추계학술발표회 논문

한국원자력학회

SMART 열병합 해수담수화 플랜트의 최적화 연구

Optimization study of the SMART Integrated Seawater Desalination Plant

황영동, 강한옥, 김영인, 이두정, 장문희

한국원자력연구소

홍종명

두산중공업

요 약

SMART 열병합 발전-담수플랜트의 전기 및 담수생산 요건을 만족하는 담수플랜트의 성능 및 연계계통 최적화와 SMART를 이용한 원자력 해수담수화의 경제적 타당성 평가를 목적으로 연구를 수행하였다. SMART와 담수공정으로 선정된 MED-TVC에 대한 열역학적인 분석을 통하여 SMART 열병합 발전-담수 플랜트의 전기 및 담수생산 요건을 만족하는 최적의 연계조건 및 담수플랜트의 성능인자를 설정하였으며, 담수생산단가에 중요한 영향을 미치는 이용율, 할인율 및 SMART 건설비에 대한 민감도 분석을 수행하였다. SMART 담수 설비는 단위 용량 10000m³/day, 성능비 PR=15로 현재 설계가 진행 중이며, 방사성 물질에 의한 담수플랜트의 오염 방지를 목적으로 SMART 이차계통과 담수플랜트사이에 증기변환기를 설치하였다. 한편 담수생산 단가는 할인율 8%의 경우 이용율 80%이상에서 0.74~0.88(\$/m³)의 범위에 있는 것으로 산정되었다. 이 결과는 국제적인 연구결과에서 제시하는 담수생산단가와 비슷한 값으로 SMART가 담수생산을 위한 에너지원으로 경제성이 있는 것으로 나타났다.

Summary

This study was performed to investigate optimal coupling between SMART and desalination plant which meets the electricity and water production requirements of the SMART nuclear desalination plant. Optimal performance parameter and the interfacing conditions between SMART and desalination plant were established through the thermodynamic analysis for the selected desalination process, MED-TVC. Also, a series of sensitivity studies on water production cost were performed for the capacity factor, discount rate and the overnight construction cost of SMART. Currently, SMART desalination plant MED-TVC unit is designed with the performance ratio of 15 and unit capacity of 10,000m³/day. Steam transformer was installed between SMART secondary system and the desalination plant to protect the desalination plant from the radioactive contamination. In addition, an economic analysis of desalination plant was conducted to investigate the economic viability of the nuclear desalination using SMART. The calculated water production unit costs are in the range of 0.73~0.83(\$/m³) for the plant availability of 80% or higher with the discount rate of 8%. This indicates that SMART can be considered as a competitive choice for desalination.

1. 개요

SMART를 이용한 열병합 발전-담수 플랜트는 원자로(SMART), 발전계통 및 담수계통으로 구성된다. SMART는 열출력은 330MW의 일체형원자로로 3.0 MPa의 압력에서 286°C의 과열증기를 생산하며 40,000m³/day의 담수와 약 90MWe의 전기를 생산을 목표로 개발되고 있다. 발전계통은 기존 원전의 발전계통과 동일하며 담수계통은 2차 계통으로부터 담수생산에 필요한 증기를 공급받는다. SMART와 담수플랜트는 증기변환기를 통하여 열적/기계적으로 연결되어 있으며, 증기변환기는 터빈으로부터 추출된 증기를 이용하여 담수공정에 사용되는 증기를 생산한다.^[1,2,3]

원자력 에너지를 이용한 해수담수화의 가장 큰 기술적인 문제는 기존의 전력생산을 위한 이차계통과 담수계통의 연계문제이다. 현재까지 SMART를 이용한 원자력 해수담수화 플랜트의 전기 및 담수생산 요건을 만족하는 최적의 연계방법을 설정하기 위한 많은 연구가 수행되었다. 이러한 목적으로 SMART와 다양한 형식의 담수 공정의 연계방법에 대한 열역학적인 분석, 담수계통의 사고 또는 운전 과도현상이 SMART의 안전성에 미치는 영향에 대한 평가, 담수생산의 경제적 타당성을 평가하기 위한 경제성 분석, 연계계통 및 담수플랜트 성능인자들을 최적화하기 위한 연구가 수행되었다.^[1,4,5,6,7]

본 연구는 SMART 열병합 발전-담수플랜트의 전기 및 담수생산 요건을 만족하는 담수플랜트의 성능 및 연계계통 최적화와 담수플랜트의 경제성 평가를 목적으로 SMART의 담수공정으로 선정된 MED-TVC를 연계한 담수플랜트의 성능비와 effect 수, 증기변환기의 성능 및 증기의 추출조건 등을 최적화 하기 위한 연구를 수행하였으며, SMART를 이용한 담수생산의 경제적 타당성을 평가하기 위한 경제성 분석이 수행되었다.

2. SMART 열병합 발전-담수플랜트 개념

SMART 열병합 발전-담수플랜트는 단위 용량 10,000 m³/day인 4기의 MED unit으로 구성되며 40,000m³/day의 담수와 약 90MWe의 전기를 생산할 수 있도록 설계되고 있다. 담수플랜트는 원자로에서 생성된 방사성물질의 이송에 의한 담수플랜트의 오염을 방지하기 위하여 담수플랜트의 각 unit은 증기변환기(steam transformer)를 통하여 SMART의 이차계통과 연결되며, 최대브라인 온도(MBT) 65°C, 해수온도 33°C의 조건에서 운전하도록 설계하고 있다. SMART 열병합 발전-담수플랜트의 구성도는 그림 1과 같다.

SMART의 이차계통과 담수계통의 연계방법은 터빈의 다중제어밸브에 의한 자동 추기방식으로 9bara의 포화증기를 터빈 중간에서 추출하여 증기변환기에 공급하고 증기변환기는 이 증기를 이용하여 담수플랜트에 사용되는 증기를 생성한다. 생성된 증기는 8bara, 170,6°C의 조건에서 열 압축기인 증기 이젝터(steam ejector)를 통하여 담수플랜트에 공급된다.

2.1 담수화 플랜트, MED-TVC

담수플랜트는 증기공급계통, 증발 및 응축계통, 해수공급계통, 브라인계통 및 화학적처리계통으로 구성된다. SMART의 담수플랜트는 에너지 효율을 높이기 위하여 MED 공정에 증기 이젝터를 결합한 열 압축방법을 적용하고 있다. 열 압축법은 증발기에서 요구되는 조건보다 높은 온도와 압력을 가진 증기를 담수공정에 이용할 수 있는 경우에 매우 유용한 방법이다. 열 압축법은 증기변환기로부터 공급되는 고압의 증기를 이용하여 최종 응축기로부터 방출되는 저압증기를 회수하여 담수플랜트의 첫 번째 effect 압력까지 높여 담수공정에 사용하는 방식으로 저압의 증기의 잠열을 회수하여 다시 사용하는 에너지 활용 측면에서 매우

효과적인 방법이다. 또한 회수되는 저압증기의 압축에 moving parts가 없는 이젝터를 사용하므로 보수 유지 및 에너지 활용 측면에서 많은 장점이 있다.

그림 2는 SMART에 사용되는 MED-TVC 공정의 흐름도를 보여주고 있다. 즉 담수공정의 열원인 증기는 열 압축기를 통해 담수설비의 가장 높은 온도 영역인 첫 번째 effect에 공급된다. 첫 번째 effect에 유입된 증기는 튜브 다발 안에서 응축되고 이 때 발생하는 잠열은 튜브를 통해 튜브 외벽의 농염수로 전달되어 응축되는 증기와 거의 동일한 양의 수증기를 발생시킨다. 첫 번째 effect에서 발생된 증기는 두 번째 effect에서 응축되어 담수로 되고 다시 농염수의 일부를 증발시키며 이후 이러한 과정이 마지막 effect 까지 반복된다.^[8]

MED 플랜트는 해수의 공급 및 예열 방식에 따라 1) Forward feed with preheaters, 2) Parallel feed with preheaters, 3) Parallel feed without preheaters 로 구분된다. 이들 방식 가운데 예열기가 없는 parallel feed 방식이 가장 단순하면서 증기 이젝터를 이용한 열 압축 방식에 가장 적합한 것으로 알려져 있다.

담수플랜트의 성능비(Performance Ratio : PR)는 담수생산단가를 결정하는 가장 중요한 인자로서 2,326kJ(1,000BTU)의 열에너지를 사용하여 생산할 수 있는 담수량(kg)으로 정의된다. 높은 성능비를 가지는 플랜트는 담수생산에 사용되는 에너지의 양이 작아 에너지 비용은 줄어드나 플랜트의 설비에 소요되는 비용, 즉 열전달 면적을 증가시키기 위한 비용 및 기타 추가 설비의 비용이 증가하게 된다. 반대로 플랜트의 성능비를 작게하여 시설투자비를 줄이면 에너지 소비량이 증가하여 상대적으로 담수생산단가가 상승하게 된다. 그림 3은 이들 다양한 형식의 MED 담수플랜트에 대한 성능비와 effect 수의 관계를 보여준다.

SMART의 담수플랜트는 예열기가 없는 Parallel feed 방식의 MED에 열 압축기를 결합한 방식으로 성능비 PR=15, Motive steam to load ratio(공급증기와 최종 응축기로부터 회수되는 증기의 비) ML=1 로 설계되고 있다. PR과 ML은 MED-TVC가 연계된 SMART 플랜트에 대한 열역학적인 분석과 전기출력 90MW, 담수생산량 40,000m³/day에 대한 경제성 분석 결과를 기준으로 설정하였다. 담수 플랜트에 대한 주요 설계인자는 표 1과 같다. 그림 4는 SMART 담수플랜트의 일반배치도, 그림 5는 P&I Diagram을 각각 보여 주고 있다.

2.2 증기변환기(Steam Transformer)

SMART를 이용한 원자력 해수담수화에서 고려하여야 하는 중요한 요소는 방사성 물질에 의한 생산 담수의 오염을 방지 할 수 있도록 설계하는 것이다. 증기변환기는 원자로에서 생성된 방사성 물질로부터 담수플랜트를 보호하기 위한 설비로 수평의 튜브 다발로 구성되며 터빈으로부터 추출된 증기를 이용하여 담수플랜트에 사용되는 증기를 생산한다. 그림 6에서와 같이 터빈에서 추출된 주증기는 튜브의 안쪽에서 응축되고 공급 브라인은 재 순환 펌프에 의하여 튜브의 바깥쪽에 분사된다. 살수된 물의 일부는 증발하여 증발기 열 압축기의 motive steam으로 사용된다. 담수플랜트의 첫 번째 effect에서 생성된 응축수의 일부는 증기변환기의 보충수로 사용된다. 보충수는 증기변환기에 살수되기 전에 주증기의 응축수를 이용하는 예열기를 통과하면서 가열된다. 예열기는 titanium을 용접하여 제작된 plate 형식의 열교환기를 사용한다.

증기변환기는 총 28.8kg/sec (4x7.2kg/sec)의 증기를 담수플랜트에 공급된다. 각 증기변환기는 9.0bar에서 추출된 7.5 kg 의 증기를 이용하여 담수공정에 사용되는 7.2kg/sec의 8.0bar 증기를 생산한다.

2.3 열평형도

SMART는 열출력 330MW의 일체형원자로로 3.0 MPa의 압력에서 286℃의 과열증기를 생산하도록 설계되고 있다. SMART와 담수플랜트는 증기변환기를 통하여 열적/기계적으로 연결되어 있으며, 증기변환기는 터빈으로부터 추출된 증기를 이용하여 담수공정에 사용되는 증기를 생산한다. 그림7은 SMART 열병합 발전-담수 플랜트의 열평형도로 증기변환기는 총 30kg/sec의 증기를 9.0 bara, 178.4℃ 조건에서 터빈으로부터 추출하여 담수공정에 사용되는 총 28.8kg/sec의 8.0bara, 170.4℃ 증기를 생산한다. 증기 추출 조건은 터빈으로부터의 추출 압력을 2.5~9.0bara 변화시켜 계산한 결과에 SMART 열병합 발전-담수 플랜트의 전기 및 담수생산요건을 반영하여 결정하였다.

3. 경제성 평가

SMART와 같이 전기와 담수의 동시 생산을 목적으로하고 있는 열병합플랜트의 경제성 평가는 근본적으로 결합생산의 경제성 평가 문제에 해당한다. 이 경우 전기 생산과 담수 생산에 공통으로 기여하는 공동이용설비의 비용배분방법은 경제성 평가의 결과에 크게 영향을 미친다. 본 연구에서는 IAEA에서 개발된 DEEP 코드를 이용하여 SMART 열병합 발전-담수 플랜트의 경제성을 평가하였다. DEEP 코드에서 채택하고 있는 Power credit 방법은 전력생산이 주를 이루고 담수생산이 생산물의 일부를 구성하고 있는 열병합플랜트의 경제성 평가에 적합한 것으로 평가되고 있다.^[9] 담수생산단가에 가장 큰 영향을 미치는 SMART의 건설비는 현재까지 국내에서는 소용량 일체형원자로에 대한 건설경험이 없기 때문에 개략적으로 산정 하였다. 기타 담수생산 단가의 산출에 필요한 입력자료들은 대부분 DEEP 코드에 내장된 값을 활용하였다.

3.1 SMART 건설단가 산정

현재까지 국내에서는 SMART와 같은 소용량의 일체형원자로에 대한 건설경험이 없기 때문에 용량에 따른 경제성(Economies of Scale)을 경험적으로 나타내는 Scaling Law를 적용하여 근사적인 방법으로 건설단가를 산정하였다. 그러나 근사적 방법에 의한 비용산정은 제반가정 및 근사 방법을 적용하므로 불확실성이 매우 크다. 용량증감에 따른 비용의 증감은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\frac{\text{Cost of large unit}}{\text{Cost of small unit}} = \frac{(\text{Capacity of large unit})^p}{(\text{Capacity of small unit})^p}$$

(1)

기본적으로 식(1)은 유사한 노형으로 용량이 다른 경우에 적용된다. 여기서 지수 p는 용량보정계수(Scaling Factor)이며, 플랜트를 구성하는 개개의 부품 및 계통(핵증기 공급계통, 터빈계통, 전기계통 등)에 따라 각기 다른 규모지수를 적용한다. 지금까지의 경험에 의하면 규모지수는 0.5~0.9의 값을 가지는 것으로 알려져 있다.^[10]

SMART의 건설단가는 식(1)에 최근의 전원계획에서 이용된 1000MWe 급 원자력발전소의 건설단가인 1541\$/kWe를 기준단가로, SMART의 설비용량을 100MWe, 그리고 보정계수 0.8을 적용하여 산정 하였다. SMART의 건설단가는 2,442(\$/kWe)로 계산되었으며 이 값은

기준 1000MWe급 원전의 건설단가보다 58%가 더 높은 값이다.

최근 한기(주)는 SMART의 설계특성을 반영한 견적가격 및 경험 자료를 활용하여 SMART 건설사업비의 적정 범위를 산정 하였다. 최초 호기에 대한 건설단가는 2,674\$/kWe, 건설호기수의 증가에 따른 학습효과를 반영하면 4기를 건설하는 경우 2,213\$/kWe로 감소하는 것으로 추정하고 있다. 또한 추가호기 수의 증가에 따라 최대 1900\$/kWe까지 감소하는 것으로 추정하고 있다.

3.2 담수생산단가 분석

SMART를 이용한 담수생산의 경제적 타당성을 평가하기 위하여 담수생산단가에 중요한 영향을 미치는 주요 변수인 발전소 건설비, 이용율 및 할인율에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

SMART 건설비는 2,442\$/kWe로 산정되었으나 SMART는 계통이 단순화되고 모듈라 타입으로 설계되고 있기 때문에 이러한 설계특성을 반영하면 SMART의 건설비는 2,442\$/kWe에 비하여 최대 25%까지 낮아질 것으로 예상된다. 따라서 SMART 건설단가 기준치를 2,442\$/kWe로 설정하고, 한기(주)의 건설단가 산정결과를 반영하여 상한치를 2,600\$/kWe로 하한치를 1,800\$/kWe로 설정하였다. 발전소 이용율은 30~90%, 할인율은 3%~12%로 변화시켜 계산하였으며, 기타 변수는 DEEP 코드에 내장된 값을 이용하였다.

표 2는 SMART의 건설단가와 이용율을 변화시켜 계산한 담수생산 단가이다. SMART 건설단가는 1800\$/kWe, 2000\$/kWe, 2442\$/kWe, 2600\$/kWe, 발전소 이용율은 30~90%로 변화시켜 계산하였다. SMART의 건설단가와 이용율의 변화에 따라 산출된 담수생산단가의 변화로 산출결과를 살펴보면, 이용률의 변화를 30%에서부터 90%까지 고려했을 경우, 산출된 담수생산단가는 0.74\$/m³에서부터 1.22\$/m³까지의 변화를 보이고 있다.

표 3은 할인율이 3%에서부터 12%까지 변화할 경우 설정된 각각의 건설단가에 대하여 담수생산단가를 산출한 결과이다. 산출결과, 담수생산단가는 0.52\$/m³에서부터 1.05\$/m³까지의 변화를 보이고 있으며 담수생산 단가가 할인율의 변화에 매우 민감함을 알 수 있다

경제성분석 결과를 종합하면, 담수생산 단가는 할인율 8%의 경우 이용율 80%이상에서 0.74 - 0.88(\$/m³)로 담수생산의 경제성평가에 관한 국제적인 연구결과에서 제시하는 연구결과와 비슷한 범위 내에 들어가는 것으로 나타났다.

4. 결론

원자력 해수담수화는 해수를 담수화하기 위해 사용되는 에너지를 기존의 화석연료에서 원자력으로 대체하는 것이다. 본 연구는 SMART 열병합 발전-담수플랜트의 전기 및 담수 생산 요건을 만족하는 담수플랜트의 성능 및 연계계통 최적화와 담수플랜트의 경제성 평가를 목적으로 수행되었다.

SMART 열병합 발전-담수 플랜트는 SMART에서 생성된 열 에너지를 가장 효율적으로 사용할 수 있도록 담수공정과 연계계통을 선정하였다. 방사성 물질에 의한 담수플랜트의 오염 방지를 목적으로 SMART 이차계통과 담수플랜트사이 증기변환기를 설치하였으며 SMART 열병합 발전-담수플랜트의 전기 및 담수생산 요건을 만족하는 담수플랜트의 성능 인자 및 최적의 연계조건을 설정하였다. 현재 SMART 담수 설비는 단위 용량 10000m³/day, 성능비 PR=15로 설계가 진행 중이다. 이들 인자는 설계가 진행됨에 따라 설계자료를 반영한 보다 현실적인 값으로 일부 수정이 될 것이다.

또한 담수생산단가에 중요한 영향을 미치는 이용율, 할인율 및 SMART 건설비에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 분석결과 담수생산 단가는 할인율 8%의 경우 이용율 80%이상에서 0.74~0.88(\$/m³)의 범위에 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 담수생산의 경제성평가에 관한 국제적인 연구결과에서 제시하는 연구결과와 비슷한 범위내에 들어가는 것으로 이는 SMART가 담수생산을 위한 에너지원으로 경제성이 있는 것으로 나타났다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. M.H Chang, et al., An Integrated Nuclear Desalination Plant Concept Using An Advanced Small PWR - SMART, Proc. of IDA World congress on Desalination and Water Reuse, San Diego, USA, Aug. 29 - Sept. 3, 1999.
2. M.H. Chang, et al., SMART AN Advanced Small Integral PWR for Nuclear Desalination and Power Generation, Proc. of Global 99, International Conference on Future Nuclear Systems, Jackson Hole, USA, Aug. 29 - Sept. 3, 1999.
3. M. H. Chang, et al., Development of Advanced Reactor Technology, *Research Report, KAERI/RR-1896/98*, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon (1999).
4. Y. D. Hwang, et al., Economic Evaluation Methodology of the Nuclear Desalination Plant , KAERI/TR-1547/2000, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon(2000).
5. Y. D. Hwang et al., Design concept and its Requirements of the Integrated SMART Desalination Plant , KAERI/TR-1761/2001, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon(2001).
6. Y. D. Hwang, et al., Economic Evaluation of the Integrated SMART Desalination Plant , KAERI/TR-1792/2001, Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon(2001).
7. Working Material, Optimization of the Coupling of Nuclear Reactors and Desalination Systems , IAEA-RC-719, IAEA, Vienna, 16-20 Nov. 1998.
8. W.T. Hanbury et al., Desalination Technology 95, Porthan Ltd., Glasgow, U.K, April 1995.
9. IAEA, Methodology for the Economic Evaluation of Cogeneration/Desalination Options: A Users Manual, *Computer Manual Series No.12*, International Atomic Energy Agency, Vienna (1997).
- 10 J. C. Lim, et al., A Study on the Economic Survey and Analysis for Seawater Desalination Plant using Advanced Integral Reactor , KAERI-CM-157/96 , 1996

표 1. Main Design Parameters of the SMARTdesalination plant

Parameters	Data
Type of the desalination process	MED combined with thermal vapor compression
Number of units per plant	4
Arrangement of plant	Horizontal
Number of effects	9
Total water production capacity	40,000m ³ /d (10,000m ³ /d x4 units)
Minimum controllable unit output	5,000 m ³ /day
Performance ratio	15.0 (kg of distillate/2326kJ)
Design temperature of seawater	33℃
Maximum seawater salinity	45,000 ppm
First effect Max. Brine Temperature	65℃
Last effect Mini. Brine Temperature	47.9
Vapor temperature in the first effect	69.3℃
Vapor pressure in the first effect	0.25 bar a
Vapor temperature in the last effect	47.9℃
Maximum distillate temperature	43℃
Total seawater flow per unit	3,234 m ³ /hr
Brine blow down flow rate	1,010 m ³ /hr
Brine blow down temperature	41℃
Steam pressure to thermo- compressor	8.0 bar a
Distillate PH at evaporator outlet	6~8
Maximum TDS of distillate at evaporator outlet	25mg/l

표 2. SMART 건설단가 및 이용률의 변화에 따른 담수생산단가 민감도분석 (단위: \$/m³)

건설단가 이용률	2600(\$/kWe)	2442(\$/kWe)	2000(\$/kWe)	1800(\$/kWe)
30(%)	1.22	1.21	1.19	1.17
50(%)	1.10	1.09	1.06	1.04
70(%)	0.96	0.95	0.92	0.90
80(%)	0.88	0.88	0.85	0.82
90(%)	0.81	0.80	0.77	0.74

표 3. SMART 건설단가 및 할인율의 변화에 따른 담수생산단가 민감도분석 (단위: \$/m³)

건설단가 할인율	2600(\$/kWe)	2442(\$/kWe)	2000(\$/kWe)	1800(\$/kWe)
3(%)	0.56	0.56	0.54	0.52
5(%)	0.65	0.64	0.63	0.60
8(%)	0.81	0.80	0.77	0.74
10(%)	0.99	0.91	0.88	0.85
12(%)	1.05	1.04	0.98	0.96

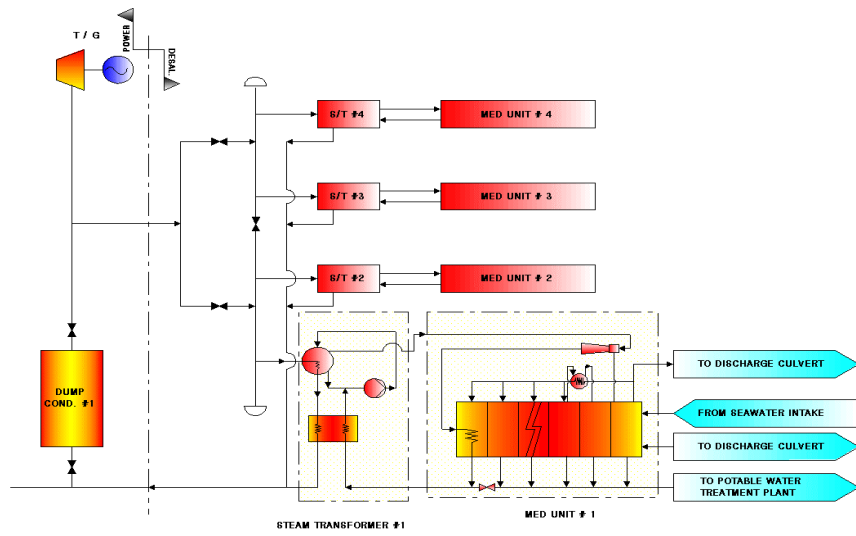


그림 1. SMART 열병합 담수플랜트의 연계 구성도

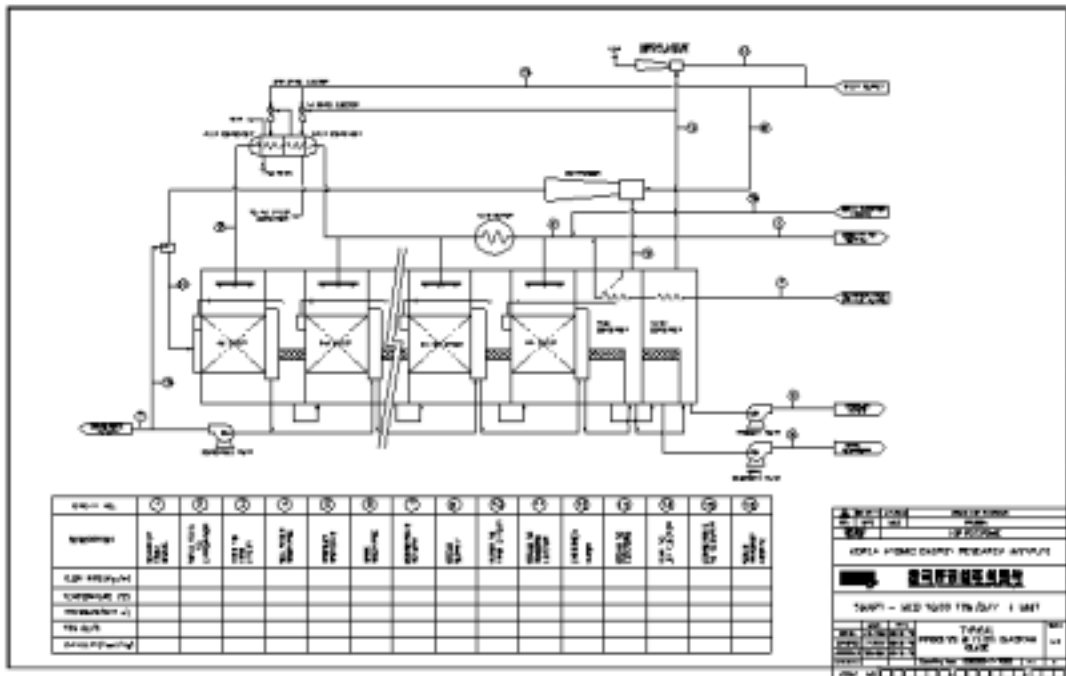


그림 2. MED-TVC 공정 흐름도

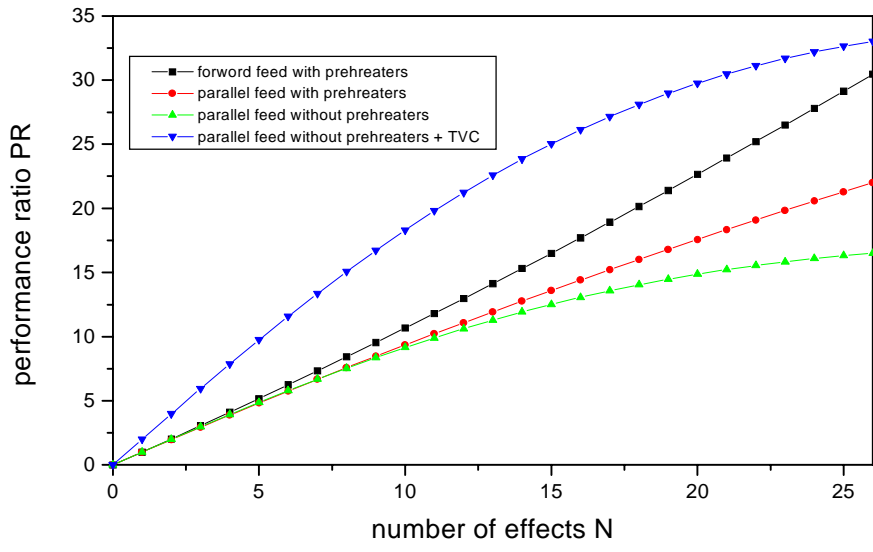


그림 3. MED 플랜트의 성능비와 effect수의 관계

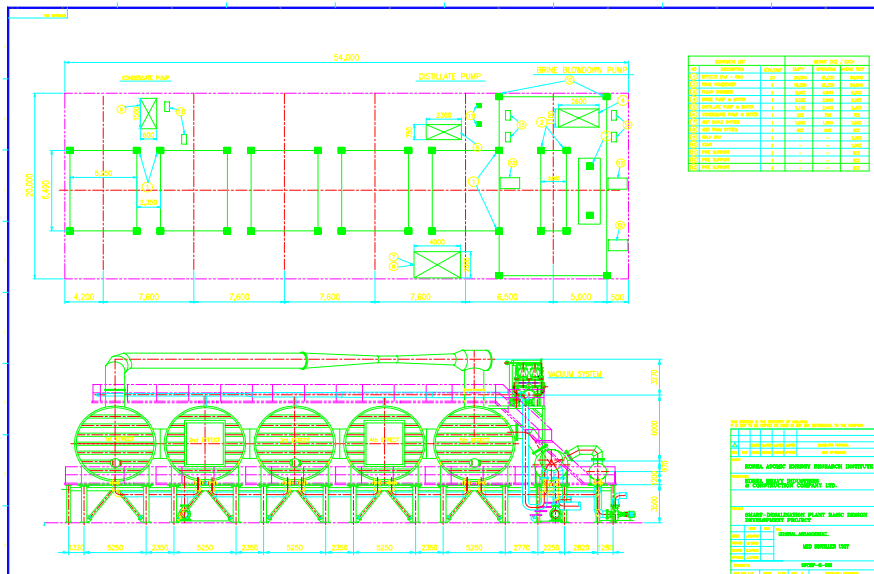


그림 4. 담수플랜트 MED-TVC 일반 배치도

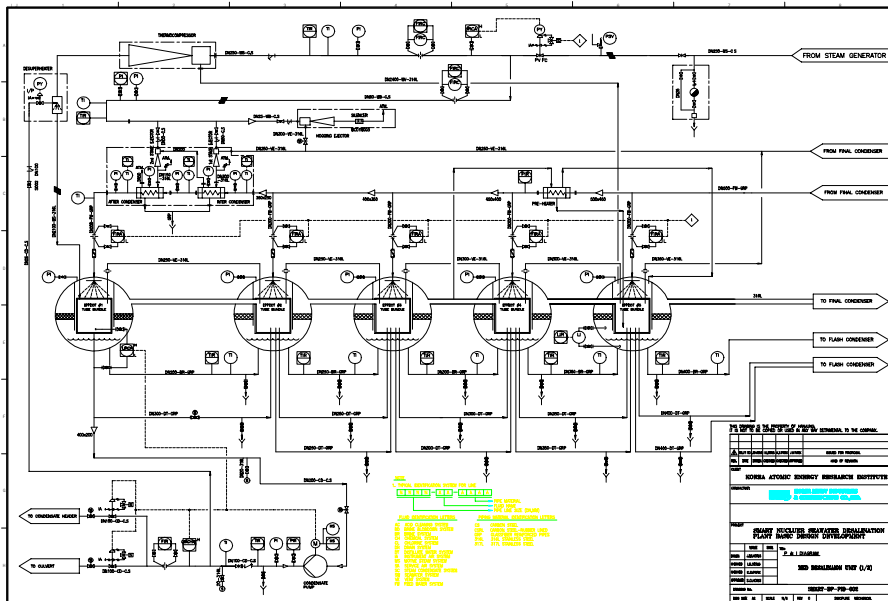


그림 5(a). 담수플랜트 P&I Diagram(1/2)

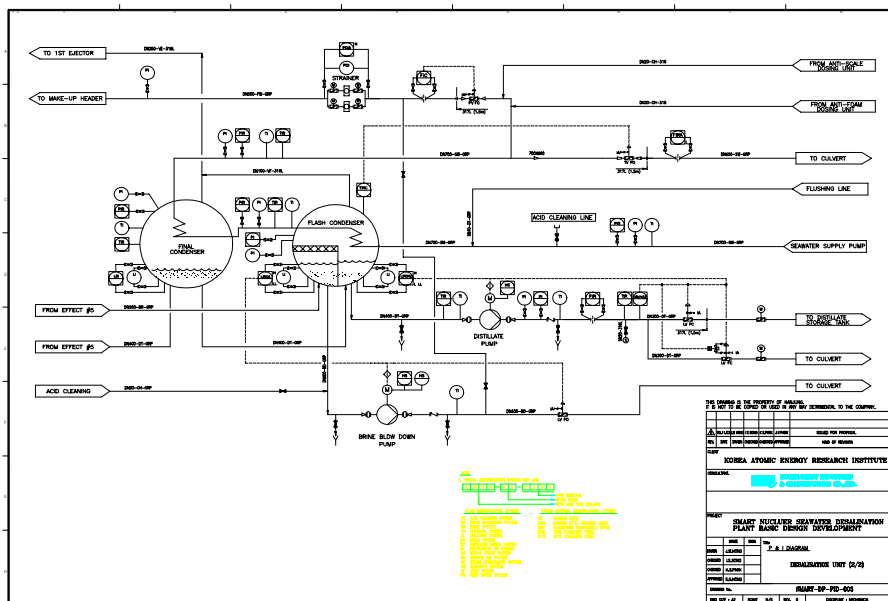


그림 5(b). 담수플랜트 P&I Diagram(2/2)

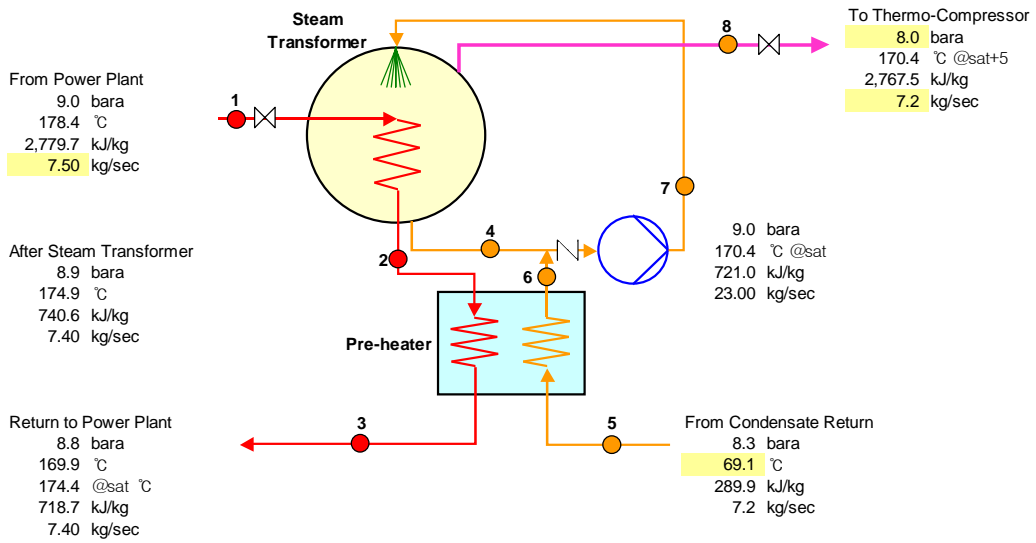


그림 6. Steam Transformer 열 평형도

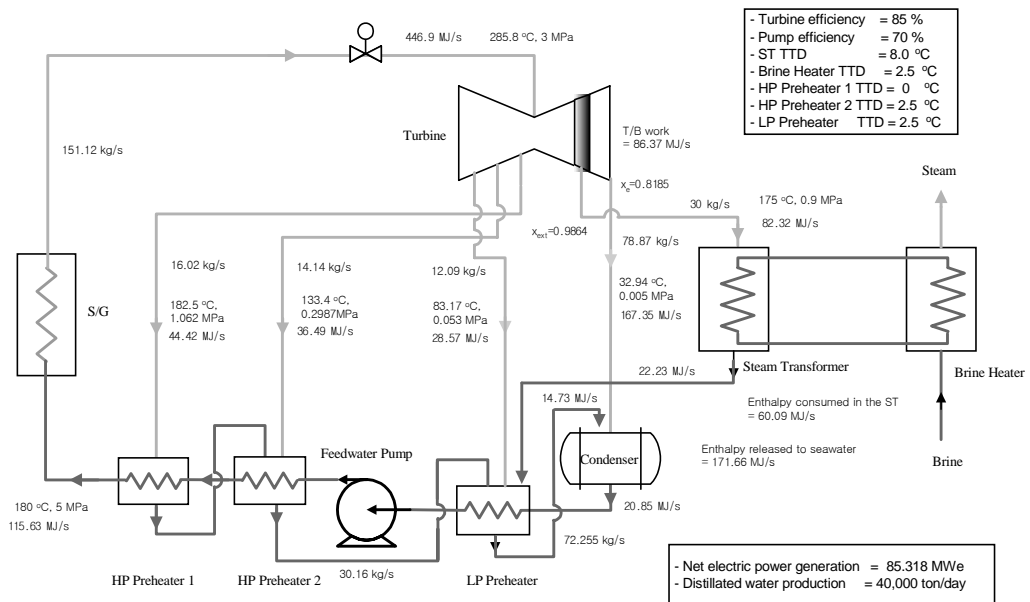


그림 7. SMART 열병합 발전-담수 플랜트의 열 평형도