

KALIMER 증기 발생기 설계 특성

KALIMER Steam Generator Design Characteristics

민병태, 심윤섭, 김연식, 김의광

한국원자력 연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

칼리머(KALIMER) 증기 발생기의 설계요구 사항에 적합한 설계를 수행하였다. 설계 과정은 전열관에서의 압력 손실 및 재료 요구량에 대한 최적의 전열관 크기 및 수를 계산하였고, 이를 이용하여 최적의 전열관을 배열할 수 있는 번들 설계를 하였다. 그 결과 전열관은 내경 20 mm, 두께 4.5 mm, 길이 86 m, 수는 144개 이고, 전열관은 횡방향으로 13줄, 5.5° 각도로 헬리컬 코일 형태로 배열되었다. 증기발생기의 직경은 2.66 m이고, 전체 높이는 20 m이었다.

Abstract

KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) steam generator was designed to meet the design requirements. The tube size and number of tubes have been chosen by considering the pressure loss in the tubes and mass of the tube material, and then the bundle has been designed for a suitable tube arrangement. The tube inner diameter was calculated to be 20 mm, 4.5 mm in thickness, 86 m in length, and the total tube number of 144. The tubes were arranged in helical coil type with a slope of 5.5 degree and 13 rows. The steam generator diameter has been chosen to be 2.66 m, and overall height was 20 m.

I. 서론

액체금속로에서 열전달은 노심에서 발생된 열이 1차 소듐(sodium)으로 전달되며, 이 열은 중간 열교환기에서 2차 소듐으로 전달하고 1차 소듐은 노심으로 순환된다. 중간 열교환기에

서 가열된 2차 소듐은 증기 발생기의 쉘측을 흐르며, 전열관의 물을 가열시켜 증기를 발생시키고 중간열교환기로 순환된다. 중간 열교환기는 방사성 소듐과 비방사성 소듐이 경계를 이루며, 증기 발생기는 비상사성 소듐과 물이 경계를 이루므로, 증기 발생기 사고에 의한 방사성 물질의 누출이 없도록 설계되었다.

소듐과 물/증기는 격렬한 반응을 하여 부식성 가성소다와 과도한 압력을 주는 수소를 발생하고, 매우 높은 열이 발생된다. 특히 증기 발생기의 전열관의 균열에 의해 고압의 물/증기가 소듐으로 누출되면 소듐과 물이 반응하여 인접된 전열관을 연속으로 파손시키게 된다. 그러므로 증기 발생기의 전열관을 흐르는 물/증기와 쉘측을 흐르는 소듐과의 경계를 이루는 전열관의 건전성은 원자로의 안정성과 경제성에 중요한 역할을 한다.

헬리컬 코일형 증기 발생기는 전열관 길이를 길게 배열할 수 있어 물/증기의 누출에 가장 취약한 전열관과 관판과의 용접수를 줄일 수 있고, 코일형의 유연성으로 전열관과 쉘측의 열팽창 차이를 수용하기 용이하며, 조밀한 설계 특성으로 액체 금속로에 많이 채택되고 있다. 이같은 특성으로 칼리머 원자로에서도 헬리컬 코일형 증기 발생기를 선정하였고[1], 이에 대한 설계특성을 검토하고자 하였다.

2. 증기 발생기

2.1 설계 성능 및 요건

칼리머 원자로의 설계 요구사항 및 증기발생기 성능으로 주어진 자료는 표 1과 같다[2]. 설계 수명은 30년이고, 원자로 한 개에 대하여 증기 발생기의 수는 2개이다. 한 개의 증기발생기 용량은 198.3 MWt 이고, 증기발생기 출구 증기 온도 및 압력은 483.2℃와 15.5 MPa 이다. 소듐은 증기발생기의 상부에서 511℃로 들어와서 쉘측을 하향으로 흐르며, 물/증기와 열 교환하여 339℃로 냉각되어 하부로 나간다. 급수는 230℃로 증기발생기 하부의 관판을 통해 각 전열관으로 분배되어 상향으로 흐르면서 온도 483.2℃와 압력 15.5 MPa의 과열증기로 되어 상부 관판을 통해 터빈계통으로 나간다. 소듐과 급수의 유량속도는 각각 901.8과 87.725 kg/s 이다.

표 1 칼리머 증기 발생기의 성능 및 설계 요구사항

설계 수명	30년	증기발생기 수	2
용량	198.3 MWt		
증기온도	483.2℃	증기 압력	15.5 MPa
소듐입구온도	511 ℃	소듐 출구 온도	339℃
급수온도	230 ℃	전열관 압력손실	<2.0 MPa
급수 유량속도/1SG	87.725 kg/s	소듐 유량속도/1SG	901.8 kg/s

2.2 증기 발생기 설계

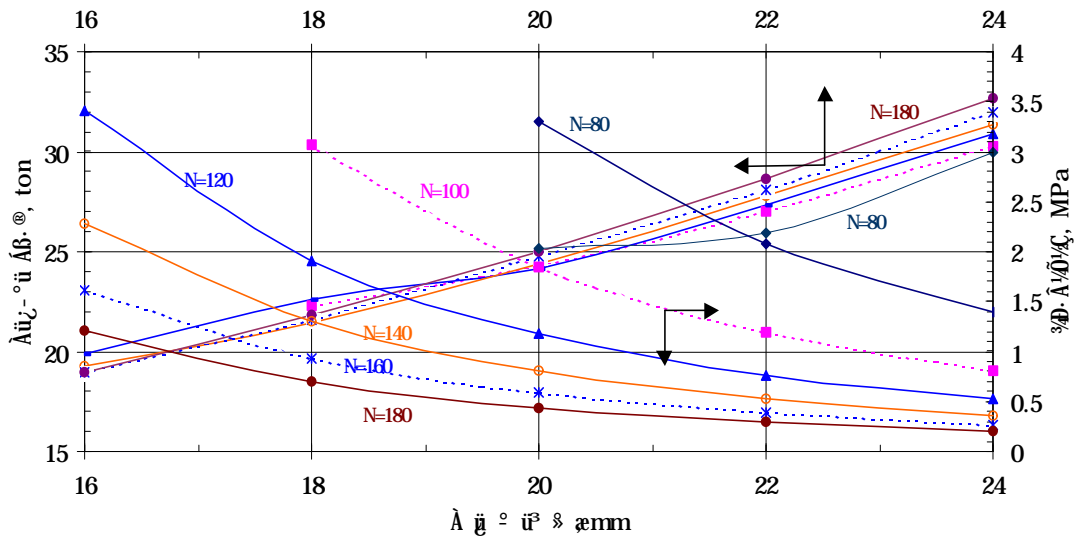
2.2.1 전열관 설계

증기 발생기 재료는 전열관과 셸측 모두 2¼Cr-1Mo 페라이트 강을 사용하기로 예비 선정하였다. 2¼Cr-1Mo 재료를 선정한 이유는 고온에서 강도가 급격히 감소되는 단점이 있으나, 물 및 증기에 대한 부식 특성이 스테인리스강보다 훨씬 강하므로 화력발전소 및 액체금속로에서 많이 사용하여 운전한 경험이 있으며, ASME Code B&PV에 품질 보증된 재료이기 때문이다[3,4].

전열관 직경은 ASME Code Section VIII Div. 2, Article D-2에 따라서 설계하였으며[5], 온도와 압력의 함수로 주어진 설계 허용 응력을 값을 사용하였다. 여기서 전열관 두께는 30년 수명을 고려하여 소듐과 물측의 부식 및 제작에 따른 허용도로 1.3 mm 추가했다[6]. 설계 수명과 압력에 따른 허용 응력값과 임의로 주어진 전열관 내경에 대하여 각각 적합한 전열관 두께가 계산된다. 계산된 전열관 직경에 대한 자료들과 표 1에 주어진 설계 요건에 적합한 전열관 수에 따른 전열관 길이 및 압력 손실을 계산하였다. 전산코드는 본 연구소에서 자체 개발한 HSGSA를 이용하였다[7]. 전열관 직경에 따른 전열관 중량, 전열관에서의 압력 손실, 전열관 수 및 길이에 대한 계산결과는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이 내경 18 mm 이하에서는 압력손실이 크게 증가하며, 22 mm 이상에서는 압력손실 영향이 적다. 또한 압력손실은 전열관수 증가에 따라서 감소하나 전열관 수가 160개 이상인 경우 영향은 적다. 이들의 검토에 따라서 압력손실이 과대하거나 영향이 적은 전열관 수 80개 이하와 160개 이상은 제외하였고, 내경 16 mm와 24 mm도 제외하였다. 전열관 수 120개를 기준으로 전열관 내경에 대한 압력손실은 18mm는 1.91 MPa, 20 mm는 1.173 MPa, 22 mm는 0.763 MPa로서 많은 차이가 있다. 설계조건으로 주어진 압력손실은 오리피스 설치에 따른 추가적인 압력손실을 고려하면 약 1.5 MPa 이하가 적합할 것이다. 내경 18 mm의 경우 설계 요건에 비해 압력손실이 너무 높지만 전열관 수를 증가시키면 사용할 수 있다(전열관 수 140개의 경우 압력 손실 1.3 MPa). 그러므로 전열관 내경 18 mm에서 22 mm는 설계조건에 따라 증기발생기에 적절하게 사용할 수 있는 범위로 판단된다. 전열관 중량은 직경 증가에 따라서 거의 선형적으로 증가하며, 전열관 수의 영향은 적다.

그림 1에서 보는 바와 같이 전열관 중량과 압력손실이 적은 직경은 20 mm정도가 적합한 것으로 판단되었다. 전열관 수는 설계 고려사항을 고려하여 압력 손실이 1.0 MPa 부근인 120개를 선정하였다. 이 경우 전열관 중량은 약 24.2 톤이고, 총 전열면적은 914.57 m²이다.



± × ²1 Ä ® ® ÖÁ ñ à¹ ß ŷ à ð ° ñ Ç ð æ ×/4 ð µ ù ¥ Á ß ® ×/4 D Æ Ö Ç

최종 전열관 수는 사고에 따른 플러깅을 대비하여 20% 여유를 주므로 144개로 하였고, 전열관 길이는 83.65 m로 계산되었으나 1.35 m 여유를 두어 86 m로 하였다. 표 2에는 전열관에 대한 요약과 전열관에서의 열수력 특성을 간단히 나타냈다.

표 2 칼리머 증기 발생기의 전열관 및 열수력 특성 자료

전열관 내경/두께	20/4.5 mm	전열관 수	144개(20% 여유)
전열관 길이	86 m(1.3 m 여유)	전열 면적	914.57 m ²
출구 열속	311.2 kW/m ²	포화수 발생위치	전열관 길이 25%
DNB 발생위치	전열관길이 50%	DNB 발생위치에서 증기질	0.441
포화증기 발생위치	전열관 길이 70.8%	압력손실	1.11 MPa

표 2에서 보는 바와 같이 전열관에서 100% 포화수가 발생하는 위치는 전열관 길이 25% 지역이고, DNB 발생위치는 전열관 길이 50% 이며 이 위치에서의 증기질은 0.441이다. 포화증기로 되는 위치는 전열관 길이 70.8% 지역으로서 이후 과열증기가 되어 전열관을 나간다. 전열관에서의 압력손실은 1.11 MPa로서 설계압력에 여유가 있으며, 이것은 전열관 사이를 흐르는 유량 속도 및 압력 차이에 의한 흐름 불안정성을 방지하기 위한 오리피스를 설치에 따른 압력손실을 수용할 수 있는 여유가 있다.

2.2.2 번들 설계

헬리컬 코일형 전열관에서 전열관은 경사를 주어 감아야 한다. 경사 각도는 보통 5.0~8.0° 사이이며[8, 9], 전열관 길이(L)가 주어지면 경사각도에 따라서 번들 높이(h =전열관이 코일형으로 감긴 수직 높이)는 경사각 α 에 따라서, $h = \sin\alpha \times (L - \ell)$ 식으로 정해진다. 여기서 ℓ 은 전열관이 코일형으로 감기지 않고 상하부 공간을 통해 관관과 연결되는 길이와 열팽창 차이를 수용하기 위한 굴곡되는 부분의 길이로서, 여기서는 8 m로 하였다. 계산 결과 경사각을 5~7°로 변경시킴에 따라서 번들 높이는 6.8~9.5 m로 변화였다. 번들 높이는 증기 발생기 높이에 직접적인 영향을 주므로 너무 높지 않은 번들 높이 7.5 m, 경사각 5.5도를 선정했다. 번들 높이는 다음의 계산과정에서 전열관 배열에 따라서 수정될 것이다.

증기발생기 내에 전열관을 배열하기 위하여 그림 2와 같이 내부 구조를 간단히 그렸다. 그림 2에서 내부관은 증기 발생기 중심에 있는 파이프로서 증기 발생기 상부의 커버기체 공간과 하부를 연결한 부분이다. 내부관의 역할은 소듐-물 반응이 상부에서 발생하였을 때, 복잡한 전열관을 통한 유체의 흐름 방해로 하부에 설치된 파열관이 급속히 파열되는 데 방해되므로 이 내부관을 통해 상하부 압력이 신속하게 평등화 되도록 하는 것이다. 전열관을 코일형을 감는데는 어느 정도의 회전반경이 필요하므로 내부관의 외경을 400 mm로 하였다. 이 내부관을 기점으로 반경방향으로 전열관이 배열된다. 배열 간격은 유체의 유속 등을 고려하여 결정되어야 하지만, 문헌을 참고로 전열관 피치 간격은 반경방향 60 mm, 길이 방향 45 mm로 하였다.

번들 설계는 횡방향의 반경에 따라서 주어진 번들 높이에 감길 수 있는 전열관 수를 정하고, 주어진 경사각을 이루도록 해야 한다. 그러나 일정 길이의 전열관을 번들 높이에 정확히 맞도록 배열할 수 없으므로 번들 반경에 따라서 번들 높이가 약간씩 변한다.

번들의 횡방향 배열수와 직경을 구하기 위해 번들의 횡방향 길이(그림 2의 B)를 가정하여 전열관의 평균 반경을 구해 전열관이 1 회전하는데 필요한 길이를 구했다. 그러므로 한 개의 전열관을 감는데 필요한 회전수가 계산되고, 이것에 전체 전열관 수를 곱하면 필요한 총 회전수가 계산되며, 피치 면적을 곱하면 전체 필요한 면적이 계산된다. 이것을 가정된 번들의 횡방향 길이(B)로 나누면 필요한 번들 높이가 계산된다. 계산 결과 번들의 횡방향 길이를 800 mm로 가정하였을 때, 번들 높이가 7.54 m로서 원하는 번들 높이 7.5 m에 근접하였다. 번들 행의 길이 800 mm에 배열되는 전열관 수는 횡방향 피치 60 mm로 나누면 횡방향으로 배열되는 전열관 수는 13.3개로 13개를 배열할 수 있다. 그러므로 실제적인 반경방향 길이는 780 mm이고, 번들 직경은 1180 mm가 된다.

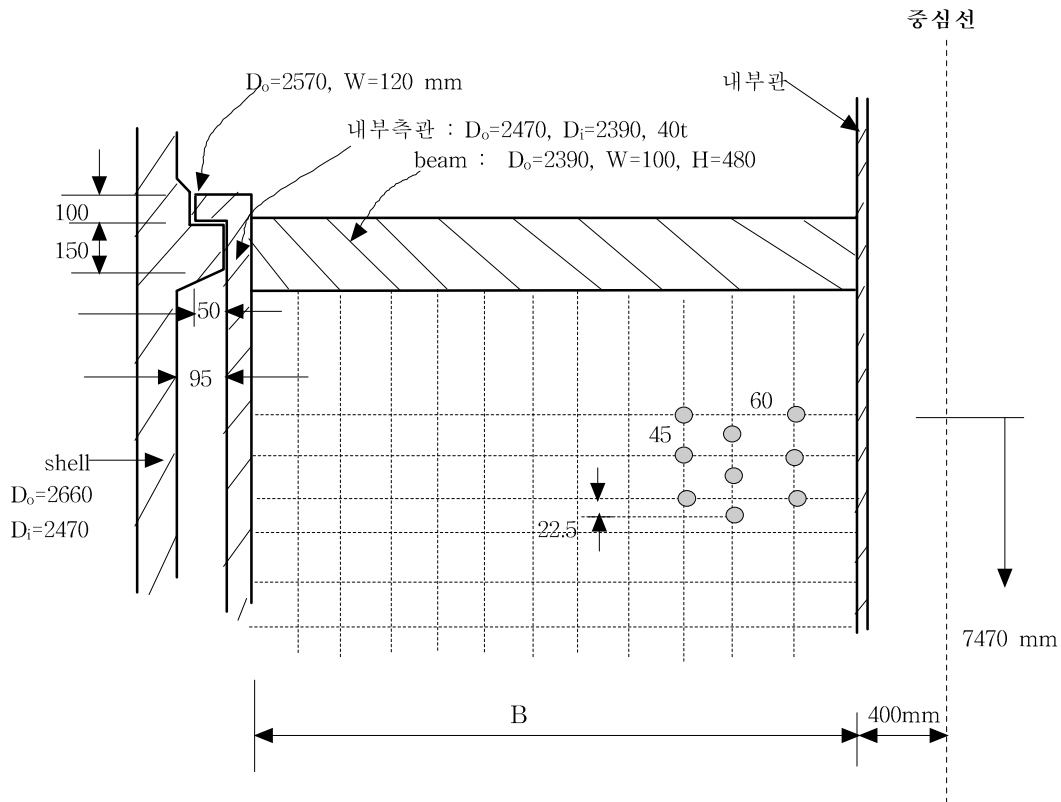


그림 2 칼리머 증기 발생기 내부 구조 형태

반경 방향으로 13개가 배열되는데 따른 각각의 회전 직경에 따른 길이 방향으로 배열되는 전열관 수를 계산해야 한다. 1행의 경우 전열관 중심경은 내부관에 행의 피치가 반을 차지하므로 430 mm가 된다. 이것에 의해 1회전 길이가 계산되고, 전열관 길이 1개가 감기기 위한 회전수는 28.9회이다. 그러므로 행의 피치수가 167개이므로 1행에는 총 5.7개의 전열관이 감길 수 있다.

헬리컬 코일형 증기 발생기는 내부에 흐름 균일화를 위한 배플을 설치할 수 없으므로 코일을 따라서 소뭍이 흐를 수 있다. 따라서 동일한 행에서 전열관의 반은 좌측으로 반은 우측으로 회전시키도록 해야한다. 그러므로 1행당 전열관은 짝수로 배열하여야 한다. 위의 계산에서 1행에 전열관은 5.7개가 들어갈 수 있으나 4개의 배열은 너무 작고, 6개를 배열하면 횡방향 피치수가 증가하고, 번들 높이가 증가하게 된다. 그러나 짝수 배열에 가장 근접한 수를 선택하였으며, 이같은 방법으로 13개의 각 행에 들어가는 전열관을 배열하고, 전체 전열관 수 144개에 맞도록 조절한 결과는 표 3에 보는 바와 같다. 표 3에서 각 전열관 횡방향에 대한 전열관 반경은 내부관에 설치되는 전열관 지지대와의 간극 등을 고려하여 재계산된 것이다.

표 3 칼리머 증기 발생기 전열관 배열

행번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
전열관 수	6	6	8	8	10	10	12	12	12	14	14	16	16
번들 반경 mm	435	495	555	615	675	735	795	855	915	975	1035	1095	1155

그림 3에는 전열관 배열 모습으로 1행에 대한 것이다. 1행의 총 6개의 전열관에서 각 3개씩 반대 방향으로 회전하도록 배열되었으며, 3개의 길이방향 길이는 135 mm, 2행과의 간격은 60 mm 이다. 1행의 총 직경은 870 mm 이다.

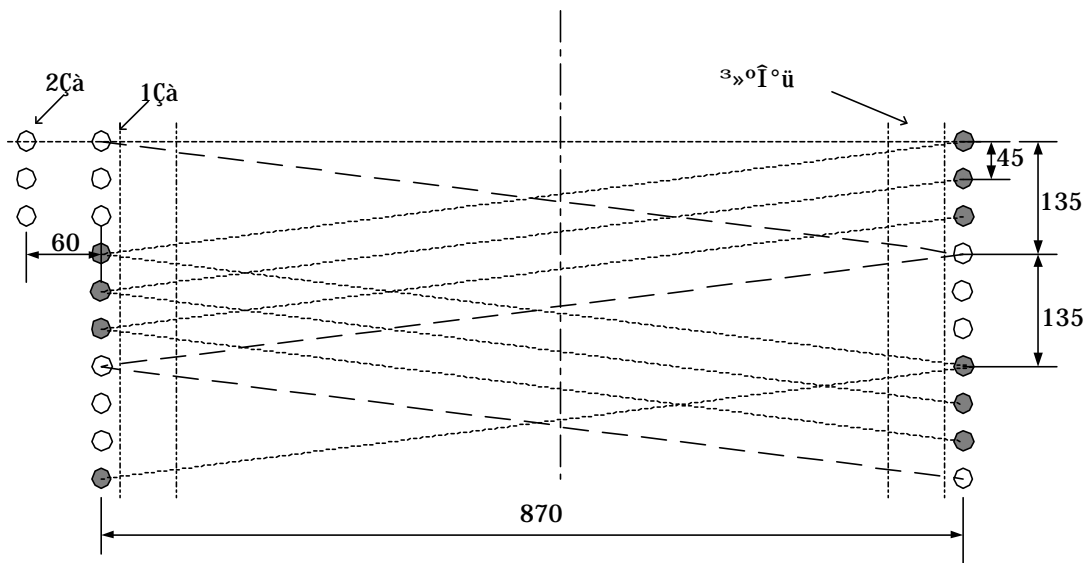


그림 3 증기 발생기 전열관 배열 모습

최외각 배열되는 13행의 전열관 직경과 지지대 설치로 번들의 외경은 2390 mm 이며, 설계된 칼리머 증기 발생기의 전체적인 모습은 그림 4와 같다. 증기 발생기 상부에는 커버기체 공간으로 알곤 기체로 채우며, 소듐-물 반응에 의한 압력을 완화시키도록 한다. 소듐은 소듐 분배기를 통해 증기 발생기의 셸측에 균일하게 분배된다. 셸측의 상부 공간은 충분한 여유를 두어 소듐이 균일한 흐름 분포를 하면서 안정된 흐름을 유지하도록 한다. 소듐이 셸로 들어오는 부분에는 증기가 나가는 전열관이 있으므로 온도차이에 의한 전열관의 손상을 방지하도록 전열관에는 열 차폐장치가 필요하다. 소듐은 번들을 통해 물/증기와 열교환 하면서 하부 노즐을 통해 중간 열교환기로 순환된다.

급수는 하부의 물 입구 관관을 통해 들어와서 각 전열관을 분배된다. 관관은 상하부 2개씩으로 전열관은 72개씩 배열되므로 관관의 직경을 크게 감소시킬 수 있다. 전열관으로 들어온 급수는 소듐과 맞흐름 하면서 포화수가 되고, 증발되며, 과열증기로 상부 관관을 통해

터빈으로 보내진다. 증기 발생기 하부에는 소듐-물 반응시 과압이 발생될 때, 과열관이 파괴되어 소듐과 반응 생성물이 덤프탱크로 덤프되도록 하였다. 여기서 수소 같은 기체는 상부로 배출되도록 하여 증기 발생기 및 중간 열교환 계통을 보호하도록 하였다.

3. 결론

칼리머 증기 발생기에 적합한 전열관 크기와 수를 계산하여, 헬리컬 코일형으로 최적 배열할 수 있음을 보였다. 이를 이용하여 증기 발생기 전체 크기에 대한 개념설계를 하였다.

* Acknowledgement : 본 연구는 과학기술부의 원자력 사업의 일환으로 수행되었음.

4. 참고문헌

[1] 민병태, 심운섭, 김연식, 위명환, "KALIMER 증기 발생기 타당성 평가에 관한 연구", KAERI/TR-918/97, (1997)

[2] Park, C. K., et. al., "KALIMER Design Concept Report", KAERI/TR-888/97, (1997)

[3] Roy, P. and C.N. Spalaris, "Some Aspects of Materials Development for Sodium Heated Steam," USAEC Report GEFR-SP 205, General Electric (1980)

[4] Challenger, K. D., et. al, "LMFBR Steam Generator Materials," USAEC Report DOE/SF/00893-T5, General Electric, (1976)

[5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, Article D-2 Shells of Revolution under Internal Pressure

[6] Personal Communication, GE

[7] 김연식, "HSGSA 전산코드 사용자 지침서," 내부보고서 KALIMER/FS-4CM-98-001, (1998)

[8] Kakarala, C. R. and C. E. Boardman, "Advanced Liquid Metal Reactor Helical Coil Steam Generator," ASME, NE-Vol 5, Thermal Hydraulics of Advanced Heat Exchangers, editors: Y.A. Hassan and S. M. Cho, (1990) 39-47

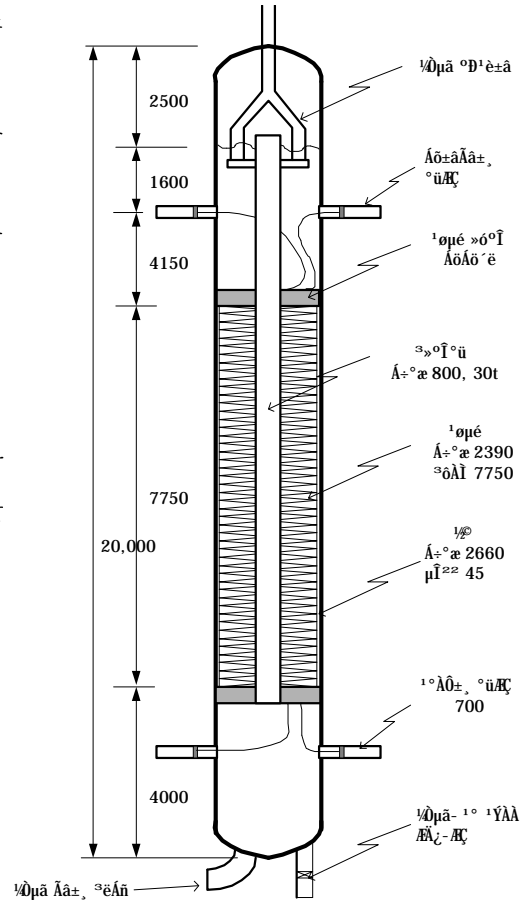


그림 4 칼리머 증기 발생기 개념도