

## KALIMER 증기발생기 보조냉각계통 설계 특성 연구

어재혁, 심윤섭, 김의광  
한국원자력연구소

### A study on Design Characteristics of KALIMER Steam Generator Auxiliary Cooling System

Eoh Jae-Hyuk, Sim Yoon-Sub, Kim Eui-Kwang  
Korea Atomic Energy Research Institute

#### 1. 서론

현재 개념설계 단계인 한국형 액체금속로, KA LIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor)는 출력운전 중 노심에서 발생된 열이 원자로 내부의 소듐풀, 중간열교환기(IHX), 중간열전달계통(IHTS)을 거쳐 증기발생계통(Steam Generating System ; SGS) 으로 이어지는 정상 열제거 경로를 통해 운전된다[1]. 계통의 냉각은 크게 증기발생계통(SGS), 피동 안전등급 잔열제거계통(PSDRS), 그리고 증기발생기 보조냉각계통(SGACS)의 세가지를 사용하여 이루어지며, 이중 증기발생기 보조냉각 계통(Steam Generator Auxiliary Cooling System; SGACS)은 공기의 강제순환을 활용하는 비안전등급 잔열제거 설비로, 고온의 소듐이 직접 접촉하는 증기발생기 외벽을 직접 냉각시켜 증기발생기 shell 측 소듐 온도를 감소시키는 역할을 수행하여, 핵연료 교체 등을 목적으로 노심 정지 후 계통을 재장전온도까지 냉각 시키는 경우에 계통에 발생하는 열하중을 효과적으로 제거하기 위한 하나의 수단으로 활용된다. 또한, SGACS는 중간계통(Intermediated Heat Transport System; IHTS)의 기능이 정상으로 유지되는 조건에서 증기발생계통(SGS)의 운전과는 관계없이 중간계통 소듐의 강제 또는 자연순환에 의해 열을 제거하여 발전소 사고시 원자로의 안전정지까지 도달하는데 시간을 단축시키고 1 차계통 소듐의 최고온도를 감소시키는데 기여하여 발전소의 운전성 및 안전 여유도 증진에 기여할 수 있다. 본 연구에서는 SGACS의 설계 특성 분석을 위해 설계 인자의 민감도 분석 및 Air blower의 사양 설정을 통해 SGACS의 용량을 평가하고, 이를 이용하여 잔열제거 운전시 SGACS의 적절한 활용 시점 및 SGACS의 효율적인 운용 등에 대한 분석을 수행하였다.

#### 2. KALIMER SGACS

증기발생기 보조냉각계통(SGACS)은 기저 열부하를 제거하는 증기발생계통(SGS)의 사용시간을 단축시키기 위해 계통의 열하중(heat load)이 일정용량 이하로 감소하면 SGS를 대신하여 계통 온도를 목표치로 유지하는 정도의 상대적으로 적은 열부하를 제거하는데 사용되며, 증기발생기 상단 공기 굴뚝에 설치된 Air Blower를 사용하여 강제순환에 의해 증기발생기를 직접 냉각한다. 그림 1은 SGACS의 형상으로, 증기발생기를 둘러싸고 있는 shroud와 증기발생기(SG) 외벽 사이에 형성된 공기유로를 통한 강제순환에 의해 열제거를 수행한다. 증기발생기 보조냉각계통(SGACS)은 증기발생기 하단으로부터 찬 공기가 유입되어 증기발생기 상단의 공기 굴뚝에 설치된 Fan에 의해 일정 목표 용량을 사용하여 필요한 열제거 용량을 확보하는 방식으로, 발전소의 정격출력 운전 동안에는 SGACS 공기굴뚝 상단에 설치된 air damper를 폐쇄하여 증기발생기(SG) 외벽을 통한 열손실을 방지하고, SGACS가 가동되는 경우에는 air damper를 개방하여 강제순환을 시작하여 증기발생기를 직접 냉각하게 된다.

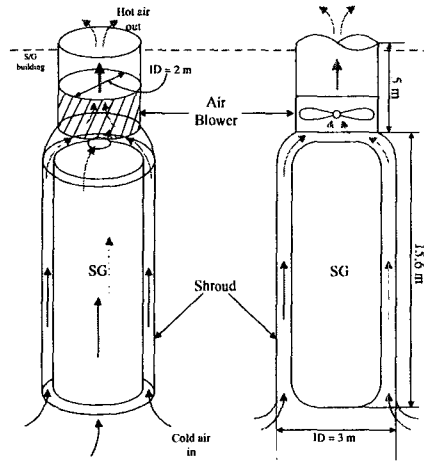


그림 1. SGACS 형상 개략도

100% 정격출력에서 재장전 모드까지의 발전소 상태 천이 기간 동안의 계통의 잔열을 효과적으로 제거하기 위해서는 앞서 언급한 세가지 잔열제거 계통의 열제거 용량을 파악해야 하며, 기존 연구[2]를 통해 고온대기 운전모드부터 재장전 온도까지의 상태천이 기간 동안에는 증기발생계통(SGS)을 통해 증기발생기로부터 생산된 증기를 응축기(condenser) 또는 공기로 dump 시켜 계통의 기저 열부하를 급격히 감소시키고, 증기발생계통(SGS)을 이용한 초기 급격한 계통 에너지 감소 이후, 재장전온도 진입시점부터는 원자로 격납용기(CV) 외벽으로부터 직접 열을 제거하는 PSDRS와 증기발생기(SG) 외벽으로부터 직접 열을 제거하는 증기발생기 보조냉각계통(SGACS) 2 대를 사용하여 계통의 온도를 재장전 온도로 일정하게 유지시키는 KALIMER 잔열제거 기본 운전논리를 개발한 바 있다[2]. 본 연구에서는 기본 잔열제거 운전논리의 구현을 위해 SGACS의 열제거 용량 증진 및 현실성 파악을 위한 분석을 수행하였다.

### 3. SGACS 설계인자 특성 분석

SGACS의 주요 설계인자로는 공기유로를 형성하는 증기발생기(SG)외벽과 shroud 사이의 간격, 강제순환 유량, 증기발생기(SG) shell 측 소듐 온도, 그리고, 공기굴뚝 직경 등이 포함되며, 강제순환을 활용하는 SGACS의 특성상 공기유로의 간격과 Air blower의 용량이 SGACS의 열제거 용량을 결정짓는 가장 중요한 설계인자라고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 적절한 잔열제거 기본 운전논리의 구현을 위해 이들 두가지 인자들에 대한 설계 특성 분석을 수행하였다.

#### 3.1 SGACS 공기유로 간격 설정

증기발생기 보조냉각계통(SGACS)의 주된 열제거 기구(mechanism)는 공기유로를 통한 대류 전열과 증기발생기 외벽과 shroud 간의 복사 전열이며, PSDRS와는 달리 강제순환을 사용하는 능동계통(active system)인 점을 감안할 때 복사보다는 대류가 차지하는 비율이 매우 높다. 따라서, 잔열제거 용량을 증가시키기 위해서는 SGACS 공기측의 대류 전열과정에 의한 열제거량을 증가시킬 필요가 있으므로, 증기발생기(SG)와 shroud 사이의 공기유로 간격을 조정하여 대류 전열에 의한 열제거량 변화를 분석하였다. 참고문헌 [1]을 참조하면 SG-shroud 간의 간격은 0.15 m이며, 이는 SGACS의 전력공급이 중단되는 사고에 대비하여 자연대류에 의한 열제거율을 최대한 확보하기 위하여 설정한 간격이다. 하지만, KALIMER 계통의 열제거 용량 확보 측면에서, 복사전열 보다는 강제대류에 의한 전열이 지배적인 능

동계통(active system) 으로 설정된 증기발생기 보조냉각계통(SGACS)의 특성상, 자연대류 성능 보다는 강제대류에 의한 성능을 고려할 필요가 있으므로 본 분석에서는 강제대류 성능에 가장 적합하도록 SG-shroud 사이의 간격을 조정하였다. SGACS 를 이용한 열제거량의 계산은 KALIMER 잔열제거계통의 해석을 위해 PARS 코드와 함께 개발된  $Q_{SGACS}$  코드를 통해 수행되었으며, 코드에 대한 상세한 설명은 참고문헌 [3] 에 제시되어 있다.

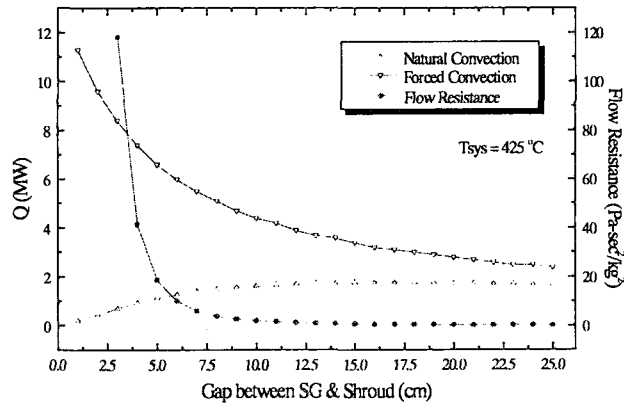


그림 2. SGACS 공기유로 간격과 열제거량 비교

그림 2 는 자연대류 경우를 기준으로 증기발생기(SG)와 shroud 사이의 간격과 열제거량 간의 상관관계를 나타낸 그림으로, 자연대류를 기준으로 간격을 설정할 경우, 공기유로 간격이 감소할수록 유로저항이 급격하게 증가하므로, 약 15cm 정도의 간격에서 최대 열제거량이 나타나지만, 앞서 언급한 바와 같이 SGACS 는 강제대류에 의한 능동계통(active system)으로, 공기유로의 저항과 상관없이 공기유로 간격을 감소시킬수록 대류에 의한 전열능력이 향상되므로 이론적으로는 증기발생기(SG)-shroud 간격을 더 감소시킬 수 있다. 하지만, 발전소 가동 중 검사 또는 진동에 의한 지지구조물 요동 등의 종합적인 측면을 고려하여 SG-shroud 간격은 10cm 가 적절한 것으로 판단되며, 이와 같이 SG-shroud 간격을 조정할 결과, SGACS 의 열제거량은 증기발생기의 shell 측 온도가 일정할 경우, 그림 3 과 같이 강제순환 유량별로 평균 30% 가량 증가하는 것으로 나타났다.

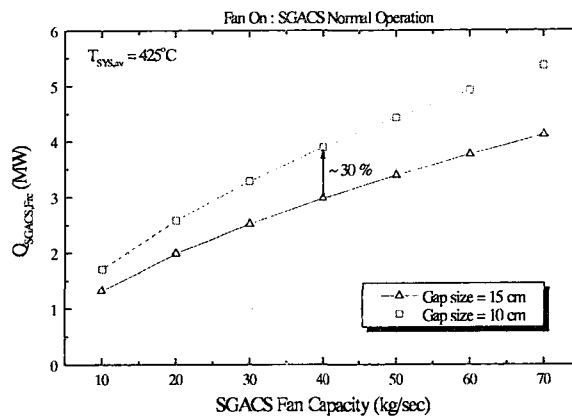


그림 3. SG-shroud 간격변화에 의한 SGACS 열제거량 비교

### 3.2 SGACS Fan 용량 설정

SGACS 의 강제대류 특성 반응을 통해 결정된 증기발생기(SG)-shroud 사이의 간격 10cm 를 이용하여 잔열제거 운전에 필요한 SGACS 의 Fan 용량을 설정하였다. SGACS 열제거 용량은 재장전 온도에서 발생하는 계통의 총 열부하(total heat load) 를 제거할 수 있어야 하므로[2], 재장전온도 도달시점 이후의 노심 붕괴열에 10% 의 여유도를 부여한 열량을 기준으로 다음 식 (1) 을 만족시키도록 SGACS 의 강제순환유량을 설정하였다.

$$Q_{SGACS}(T = T_{Re\ fueling}) \geq (1 + \alpha) \cdot Q_{SRC}(t) \quad (1)$$

식에서,  $Q_{SGACS}$  과  $Q_{SRC}(t)$  는 각각 SGACS 의 열제거 용량과 노심 붕괴열을 의미하며,  $\alpha$  는 보수적인 가정을 위한 여유도이다. 그림 4 는 고온대기 운전모드에서 재장전 온도까지의 계통에서 발생하는 열부하와 재장전온도 도달 시간에서의 노심 붕괴열을 포함하는 시간에 따른 계통 총 열부하(total heat load) 곡선을 나타낸 그림으로, 재장전온도 도달 시점 이후의 노심 붕괴열을 제거할 수 있도록 SGACS Fan 의 강제순환유량별 열제거량을 함께 도시하여 적절한 재장전온도 도달 시간과 SGACS Fan 용량을 설정하였다. 그림에서 KALIMER 계통은 2-Loop 으로 구성되어 있어 SGACS 역시 2 대가 작동하므로 SGACS 의 열제거 용량은 SGACS 1 대당 강제순환 유량에 의해 계산된 열제거량의 2 배로 표현하였다.

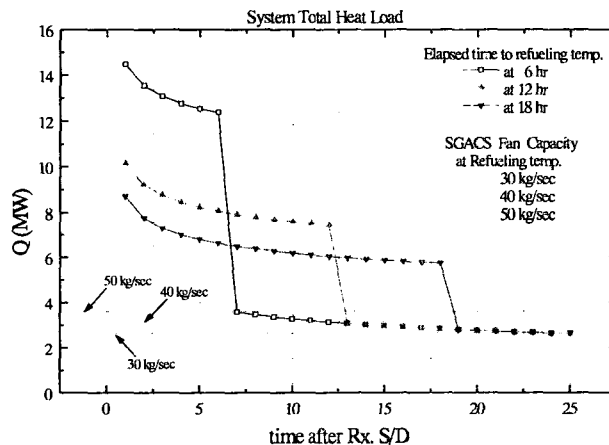


그림 4. 계통의 총 열부하(total heat load) 및 SGACS 열제거량

그림에서와 같이 고온대기 운전모드에서 재장전 모드까지의 시간이 짧을수록, 즉 계통의 냉각률이 증가할수록 계통의 총 열하중이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 이 상태 천이 기간 동안은 SGACS 를 사용한 계통의 열부하 제거가 불가능하므로 SGACS 는 재장전온도 진입 이후의 계통 온도 유지에만 사용할 수 있다는 기존 연구 결과를 잘 보여주고 있다. 또한, 재장전 온도에 도달하는 시점에서의 계통의 총 열하중이 노심 붕괴열에 의해 결정되므로 고온대기온도에서 재장전온도까지의 냉각률이 감소할수록 재장전 온도 진입 이후의 계통 열하중이 감소하여 SGACS 를 통한 필요 열제거 용량을 감소시킬 수 있다. 그림 4 를 통해 SGACS 의 필요 열제거량을 계산하면, 원자로 정지 후 재장전 온도 진입 시점이 6 시간인 경우에는 약 50 kg/sec 의 강제순환유량이 필요하지만, 12시간이 지난 경우에는 약 40 kg/sec, 그리고, 18 시간이 지난 경우에는 약 30~35 kg/sec 의 강제순환유량이 필요함을 알 수 있다. 따라서, 증기발생계통(SGS)의 사용시간을 감소시키고 SGACS 의 강제순환 유량을 현실화시키는 관점에서 재장전온도 진입시간을 원자로 정지 후 12 시간으로 설정하는 경우, 이 때의

SGACS의 강제순환 유량은 45kg/sec, 열제거량은 1.66MW 이다. 이를 통해 재장전온도 진입 시점인 원자로 정지 후 12 시간 이후부터는 SGACS 2 대를 이용해 계통의 잔열을 제거하여 계통 온도를 재장전 온도로 일정하게 유지시킬 수 있으며, 원자로 정지 후 4 일 경과 시점부터는 SGACS 1 대만으로 재장전 온도를 유지할 수 있다.

#### 4. SGACS 설계의 현실성 분석

앞서 언급한 SGACS의 설계특성 들은 유체적 관점에서의 최적 설계일 뿐이며, 이러한 설계가 현실성을 갖기 위해서는 Air blower의 사양이나 공기 유동에 의해 발생하는 유동 하중 등이 현실적인 값의 범위 내에 존재하는지 여부를 확인할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 SG-shroud 간격, 10cm와 Fan 용량, 45kg/sec를 기준으로 SGACS 설계의 현실성 분석을 수행하였다. SGACS의 Air blower 용량은 여유도를 부여할 경우, 약 50 CMS로 일반적인 blower의 사양과 비교하여 매우 큰 송풍 능력을 요구하며, 해당 유량에서의 공기축 속도가 매우 빠르다. 따라서, 공기축의 빠른 유동에 의한 구조물의 건전성을 파악할 필요가 있으며, 이를 위해 Air blower에 의해 발생하는 공기축의 유동 하중을 계산하였다. 먼저 유동 하중을 계산하기 위해서 그림 5와 같은 단일 계를 고려하고, 이 계에 대하여 식(2)와 같이 momentum balance를 적용하였다.

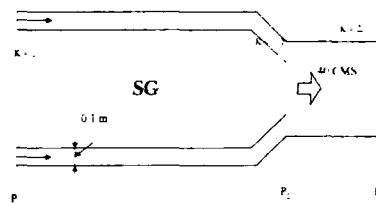


그림 5. SGACS momentum balance

$$\sum F = \rho V_3^2 A_3 - \rho V_1^2 A_1 = P_1 A_1 - P_3 A_3 - F_D \quad \therefore \Delta P = P_1 - P_3 \quad (2)$$

이 때, P<sub>1</sub>은 대기압으로 설정하였으며, 계산 결과 공기축 유동에 의해 발생하는 유동 하중은 약 320 kg<sub>f</sub>에 해당하였다. 이 하중을 비교하기 위해 SGACS shroud와 증기발생기 자체의 중량, 그리고 Air blower의 중량을 계산하였다. shroud의 중량 계산을 위해 재질을 304 스테인레스 강으로, 두께는 1cm로 가정하여 계산을 수행하였으며, Air blower의 중량은 모터와 주변 기기 들을 모두 포함하는 중량을 설정하여 실질적인 구조물의 총 중량을 대략적으로 산출하였다. 계산 결과, 증기발생기 자체의 무게는 약 200ton, shroud의 무게는 약 55 ton이며, Air blower의 무게는 약 2~2.5 ton[2] 이므로 SGACS 구조물의 총 중량은 약 260ton이다. 이에 비하여, 공기축의 유동 하중은 약 320 kg<sub>f</sub>으로 SGACS 총 중량의 1% 미만에 해당하여 기기의 중량만으로도 충분히 지탱할 수 있는 수준이다. 또한, 이러한 유동하중 중에서 벽면에 형성되어 증기발생기 외벽과 shroud 사이의 벽면에 작용하는 shear force는 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_w = \frac{\Delta P \cdot A_L}{P_{per} \cdot L} \quad \therefore F_{wall} = \tau_w \cdot A_{wall} \quad (3)$$

여기서, A<sub>L</sub>와 P<sub>per</sub>는 각각 SG-shroud 사이의 공기유로 면적과 perimeter를 의미하며, 증기발생기 외경에 비해 공기유로의 간격이 매우 좁으므로 양쪽 벽면의 shear stress를 동일하다고 가정하면, 증기발생기 외면과 shroud 내면에 걸리는 shear force는 각각 62.5 kg<sub>f</sub>와 69.2 kg<sub>f</sub>로 매우 작은 값을 나타낸다. 이는 공기의 점성이 매우 낮기 때문에 공기 유동이

아무리 활발하여도 벽면에 가해지는 힘은 매우 작은 것으로 판단된다. 따라서, 공기측 유동에 의한 구조적 건전성 문제는 발생하지 않으므로 SGACS Air blower 의 사양은 현실성을 갖는다고 판단할 수 있다. 또한, Air blower 의 적절한 선정을 위해서는 계통 내부의 각 active component 와 비교하여 Air blower 의 소요 전력이 현실적이어야 하므로, 공기측 압력손실 계산을 통한 Air blower 의 소요 전력을 계산하였으며, 그림 6 은 이 작업을 위한 기본 data 를 나타낸다.

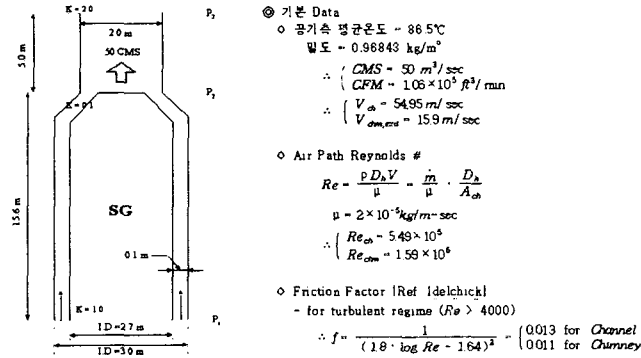


그림 6. Air blower 선정을 위한 기본 data

이를 토대로 SGACS 공기유로의 총 압력 손실은 다음 식 (4) 와 같이 계산될 수 있으며, 일반적으로 Air blower 선정시 고려하는 정압(Static Pressure) 은 계통의 총 압력손실 보다 커야 하므로 정압(SP)과 동압(VP)의 관계를 다음 식 (5) 과 같이 고려할 수 있다. 이를 이용하여 식 (6) 의 관계에 의해 송풍기의 소요 전력을 계산함으로써 계통에 사용되는 다른 active component 들과의 비교를 통해 대략적인 현실성을 파악하였다[2].

$$\Delta P_{SYSTEM} = \Delta P_{ch} + \Delta P_{chm} = \frac{1}{2} \left( K + f \frac{L}{D_h} \right) \cdot \rho V^2 \quad (4)$$

$$SP_{Blower} > \Delta P_{SYSTEM} \quad , \quad VP = \left( \frac{CFM}{A_{Blower} \times 4005} \right)^2 \quad , \quad TP = SP + VP \quad (5)$$

$$Power = \frac{CFM \times TP}{6362 \times eff} \quad (6)$$

식 (6) 에서 *eff* 는 송풍기의 효율이며, 일반적인 경우를 적용하여 약 80% 를 적용하였다. 이와 같이, 식 (4) 에서 식 (6) 을 통해 SGACS Air blower 와 관련한 계통의 특성을 계산한 결과, 계통의 총 압력손실은 약 2.2kPa 에 해당하였으며, 이를 이용하여 계산한 송풍기의 소요 전력은 약 0.15 MW 이다. 이 값은 다음 표 1 과 같이 PHTS pump 의 약 15% 에 해당하는 작은 값이며, SGACS Air blower 의 사양이 현실성을 지님을 잘 보여주고 있다.

표 1. SGACS Air Blower 소요 전력 비교

Active Component	Power (total)	Power / EA
EMP (PHTS)	4 MWe	1 MWe
EMP (IHTS)	1.7 MWe	0.85 MWe
Pump (Feed water)	4 MWe	2 MWe
SGACS Air Blower	0.3 MWe	0.15 MWe

이러한 결과를 토대로, SGACS 공기유로 유속, 유동하중 및 SGACS air blower의 크기, 하중, 그리고 소요 전력 등을 다음 표 2에 정리하였으며, 구체적인 계산 자료는 참고문헌 [2]에 제시하였다.

표 2. SGACS Air Blower 설계 특성

설계인자	단 위	설계값	비 고	
SG-shroud 간격	[m]	0.1	-	
강제순환 유량	[kg/sec]	45	~50 CMS	
SGACS 열제거량 (최대)	[MW/EA]	1.66	재장전온도	
공기유동 압력손실	[kPa]	1.7	-	
공기 유속	열제거유로	[m/sec]	~ 50	태풍중심부 → ~ 20~30 m/sec
	굴뚝 출구	[m/sec]	12.7	
Fan 특성	최대 풍량	[CMS]	40 ~ 45	최대 110 CMS
	양정	[kPa]	2.0	-
	소요 전력	[MW/EA]	0.1	PHTS EMP의 15%
공기유동 하중	SG 외벽 (수직면)	[N]	612.5	M <sub>SG</sub> = 200 ton M <sub>shroud</sub> = 55 ton
		[kgf]	62.5	
	Shroud 내벽 (수직면)	[N]	678.5	
		[kgf]	69.2	
SG + Shroud (전체)	[N]	3.15		
	[kgf]	~ 320		

## 6. 결론

KALIMER 잔열제거 운전에서 활용되는 SGACS의 열제거 용량 증진을 위해 주요 설계인자에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과, 증기발생기-shroud 사이의 간격과 Air blower의 송풍 능력이 열제거량 변화에 가장 지배적인 영향을 미쳤으며, SG-shroud 간격을 감소시킨 결과 각각의 송풍 용량 영역에서 약 30%의 열제거량 증진 효과가 나타났다. 또한, SGACS Air blower의 용량은 잔열제거 운전 기본 논리를 바탕으로 재장전 온도 진입 시점에서의 계통 열하중을 기준으로 선정하였으며, 약 45kg/sec이고 이 때의 열제거 용량은 1.66MW이다. 이러한 SGACS 설계의 현실성 분석을 수행한 결과, SGACS의 강제순환 공기 유동에 의해 발생하는 유동 하중과 벽면의 전단응력은 기기 중량에 비해 무시할 수 있는 수준이며, Air blower의 소요 전력은 PHTS pump의 15% 수준의 작은 값이므로 Air blower 사양 및 SGACS 설계가 현실적으로 타당함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구 결과를 KALIMER 잔열제거 계통 설계에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. KALIMER Preliminary Conceptual Report, KAERI/TR-1636/2000
2. 어재혁, 심윤섭, 김연식, 김의광, "KALIMER 잔열제거 운전 기본 논리 개발", 한국원자력학회 2001 추계학술발표회, 2001
3. 위명환, 김연식, 김의광, 심윤섭, "SGACS 성능특성에 관한 수치해석적 연구", 한국원자력학회 '98 추계학술발표회, 1998