

공냉-수냉 혼합냉각계통 개발

권태순*[†] · 배성원*

Development of an Air-Water Combined Cooling System

Tae-Soon Kwon*[†], Sung-Won Bae*

Key Words : Air Cooler(공냉식냉각기), Water Cooler(수냉식 냉각기), Air-Water Combined Cooling System(공냉-수냉 혼합냉각계통), SBO(전원완전상실, Natural Circulation(자연순환))

ABSTRACT

A long term passive cooling system is considered as the most important safety feature for the nuclear design after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident in 2011. The conventional active pump driven safety systems are not available during a station Black Out (SBO) accident. The current design requirement on cooling time of the Passive Auxiliary Feedwater System (PAFS) is about 8 hours only. To meet the 72 hours cooling time, the pool capacity of cooling water tank should be increased as much as 3~4 times larger than that of current water cooling tank. In order to extend the cooling time for 72 hours, a new passive air-water combined cooling system is proposed. This paper provides the feasibility of the combined passive air-water cooling system. The current pool capacity of water cooling system is preserved, and the cooling capability is extended by an additional air cooler.

1. 서 론

후쿠시마 원전사고 이후 피동형 장기 잔열제거계통의 원자로 냉각성능의 중요성이 부각되고 있다. 현재의 피동잔열제거계통은 수냉 방식이 주류를 이루고 있으며, 러시아의 VVER1200 형은 증기발생기 2차 측의 냉각을 위해 격납건물 외부에 설치한 열교환기를 공기로 냉각시키는 공냉방식을 채택하고 있다. 국내 가압경수로형 원전의 설계기준사고(Design Basis Accident: DBA)에 적용되는 안전계통은 약 8시간 냉각능력의 보유를 기준으로 설계하고 있다.

OPR1000이나 APR1400형 국내 가압경수로는 안전주입탱크(SIT)가 유일한 피동안전계통이며 LBLOCA시 질소가스압력으로 원자로계통에 비상노심냉각수를 주입하도록 설계되었으며, 주입작동시간은 약 200초 전후이다. APR+에 적용된 피동보조급수계통(PAFS)의 작동시간은 당초 8시간을 기준으로 설계되었으며^(1,2), 후쿠시마 사고 이후에는 냉각시간의 연장을 검토하고 있다.

기존 수냉방식의 피동냉각계통의 8시간 냉각능력을 72시

간으로 연장시키려면, 냉각탱크의 냉각수 체적을 현재 용량 대비 약 3~4배 이상으로 크게 증가시켜야 하므로, 냉각탱크의 냉각수 체적 증가가 과도해진다. 따라서, 장기냉각을 위해 냉각수 체적의 단순증가를 대체할 수 있는 신개념 냉각방식의 개발이 필요하다.

본 연구의 목적은 이러한 기존 수냉방식의 피동잔열제거계통의작동시간을 연장시킬 수 있고 발전소 내부/외부 전원 및 비상디젤발전기가 모두 상실된 조건(SBO)에서도 작동 가능한 피동형 공냉-수냉 혼합냉각계통을 개발하는 데 있다. 이를 위해 계통의 구성방안을 제시하고 열교환기 설치 위치를 검토하였으며, 열교환기 설계안을 평가하였다. 또한, 피동(Passive)-능동(Active or Pump Driven System)계통 설계방안을 제시하였다.

2. 공냉-수냉 혼합냉각장치

2.1 설계기준

공냉-수냉 혼합냉각계통의 개발방향은 다음과 같다.

* 한국원자력연구원, 열수력안전연구부(Korea Atomic Energy Research Institute, Thermal Hydraulic Safety Division)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : tskwon@kaeri.re.kr

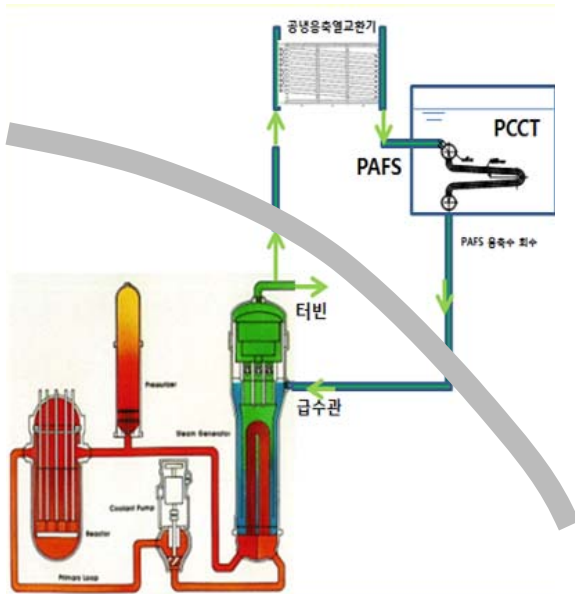


Fig. 1 Serial Allocation of Air-Water Heat Exchanger

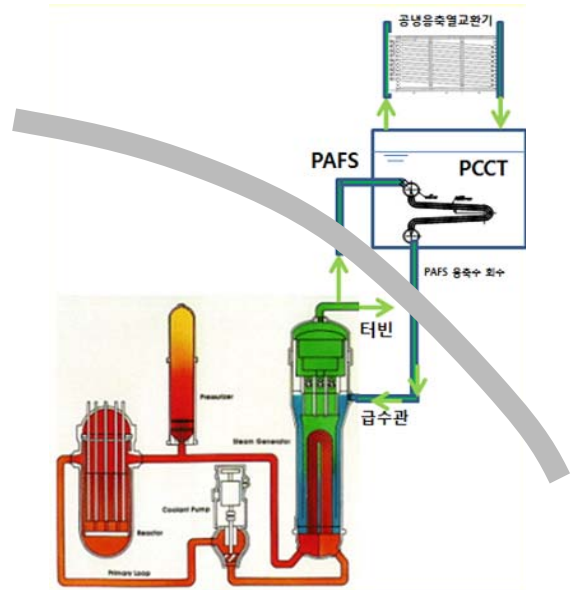


Fig. 2 Parallel Allocation of Air-Water Heat Exchanger

- 발전소 전원완전상실사고(SBO) 등 대규모 재해/사고 대비 장기냉각 가능한 피동잔열제거계통
- 냉각시간의 연장을 위한 냉각수 탱크 재충수 불필요
- 냉각시간이 무제한인 피동형 공냉냉각계통

신개념 공냉-수냉 혼합냉각계통의 주요 설계기준은 아래와 같다.

- (1) 모든 설계기준사고시 8시간 이후 72시간까지 냉각수의 재보충 없이 냉각 작동. 단, 사고 후 30분 이후에 작동한다는 보수적 가정을 적용.
- (2) 혼합냉각계통의 경우 8시간 이전은 수냉계통에 의한 열제거, 8시간 이후는 공냉계통에 의한 열제거.
- (3) SBO 환경하에서 기기 작동을 위한 전용 배터리를 구비하여 피동계통이 기동됨.
 - 안전등급의 직류(Class 1E DC) 전원을 제외한 외부 전원은 끊긴 상태로 가정함.
 - 전용 축전지를 제외한 Class 1E DC도 불능
 - 계통의 초기구동용 single-action 밸브는 고려.
 - 기타 계통 상시적 작동 능동기기는 배제함.
- (4) 계통은 밀도차(중력 구동)에 의한 자연대류 등에 의한 계통의 자연순환력에 의해 작동.
- (5) 일반설계기준(미연방법, 10CFR50 App.A), 규제 지침(US NRC RG 1.26 등) 등의 관련 설계 기준 및 설계요건을 고려함.
- (6) 노심손상빈도의 증가 억제 설계 고려함.
- (7) 단일 고장 가정 복수계통으로 설계함.
- (8) Safety Valve 등은 정상 작동.

2.2 열교환기 위치

2.2.1 공냉-수냉 열교환기 직렬 배치

공냉-수냉 혼합냉각계통에서 열교환기를 배치하는 방안으로 크게 원자로냉각재계통의 1차측 약 15 MPa 급 압력경계가 격납건물 밖으로 확장되는 방안과 증기발생기 2차측 약 8 MPa 급 압력경계가 격납건물 밖으로 확장되는 방안을 고려할 수 있다. 그러나, 1차측 압력경계를 격납건물 밖으로 확장시키면 격납건물의 기능이 무의미해지므로 가압경수로의 설계 개념상 고려될 수 없다. 증기발생기 2차측의 약 8 MPa 급 압력경계를 격납건물 밖으로 확장시키는 방안이라고 해도 격납건물 밖으로 확장된 압력 경계면의 면적이 최소화되어야 한다.

Fig. 1은 기존 APR+ PAFS의 열교환기 전단과 주증기관 사이에 공냉열교환기를 직렬로 추가할 때의 배치도⁽³⁾를 보여준다. 이 열교환기는 격납건물 내부 또는 외부에 설치될 수 있다. 공냉열교환기가 격납건물 밖에 위치하며, 공냉열교환기 튜브는 증기발생기 2차측 압력 경계를 격납건물 밖으로 확장시킨다. 두 경우 공히 공냉열교환기 튜브의 설계기준은 10MPa 급 압력 기준이 적용되어야 하므로 튜브의 두께가 상당히 두꺼워진다. 한편, 공냉열교환기 튜브 내부의 증기 온도는 포화온도가 되므로 열교환기 입출구의 온도차(DT)가 커질 수 있다.

Fig. 2는 기존 APR+에서 격납건물 밖에 위치하고 있는 PAFS의 열교환기 냉각탱크(PCCT)의 상부에 공냉열교환기를 병렬로 추가할 때의 배치도⁽³⁾를 보여준다. 공냉열교환기가 격납건물 밖에 위치하지만 증기발생기 2차측 압력경계와

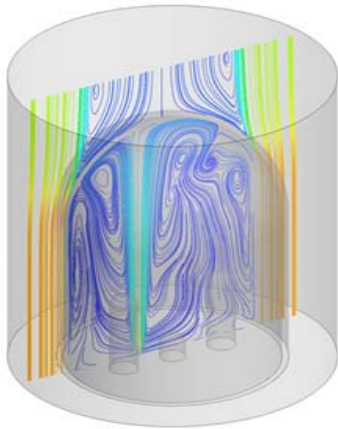


Fig. 3 Internal and external flow pattern of containment

무관하게 분리되어 있으며, 공냉열교환기 튜브의 내부는 냉각수 탱크 압력에, 그리고 외부는 대기압에 노출된 상태이다. 이 경우, 기존 PAFS의 PCCT를 저압압력용기화(1~2 Barg)하면 PCCT에서 발생하는 증기를 냉각시키는 공냉열교환기에 순환시킬 수 있다.

따라서 공냉열교환기의 설계압력으로 1~2 Barg 급 기준이 적용되므로 주증기관에 공냉열교환기를 설치하는 경우보다 튜브의 두께가 상대적으로 얇아진다. 이 경우 공냉열교환기 튜브 외측은 준 대기압 상태에 있으며, 원자로 1차측 및 2차측 압력 경계로부터 완전 분리되어 있고, 원자로냉각재계의 압력경계를 격납용기 밖으로 추가 확장시키지 않는 특징이 있다. 이러한 설계에 따르면, 주증기관(증기발생기 2차측)에 공냉열교환기를 부착하는 경우에 비해, 열교환기 튜브 내부의 증기 온도는 낮아지고, 튜브의 두께는 보다 얇아진다.

2.2.2 공냉-수냉 열교환기 병렬 배치

PAFS 전단에 열교환기를 설치하는 경우, 공냉열교환기는 용도에 따라서 격납건물 내/외부에 선택적으로 배치될 수 있다. 격납건물 외부에 배치하면 증기발생기 2차측용 냉각기나 격납건물 냉각시스템의 냉각기로 적용될 수 있으며, 열교환기 튜브 외부를 공기로 냉각시키고 튜브 내부로는 격납건물 내부의 증기나 증기발생기 2차측 증기가 흐른다. 반대로, 격납건물 내부에 열교환기를 설치하게 되면 격납건물 냉각기로 적용하되 튜브 외부는 격납건물의 증기 및 비응축성 가스가, 그리고 튜브 내부로는 격납건물 밖의 물탱크로부터 공급되는 냉각수가 각각 흐르는 상태가 된다. 두 경우 모두 열교환기의 위치에 따른 격납건물 내부 및 외부의 유동 상태에 따라 열교환기의 성능이 좌우된다.

Fig. 3은 대형냉각재상실사고시의 격납용기 내부의 유동에 대한 CFD 해석 결과를 나타낸 것이다.⁽⁴⁾ 격납용기 내부는

파단 증기 유동에 따라서 큰 내부순환유동을 보이고 있다. CFD 해석에서는 파단증기의 방향을 상향 방향으로 설정하였기 때문에 파단류 제트가 수직방향으로 분사되고 있다. 파단류의 방향에 따라 다양한 격납건물 내부유동의 변화가 예상되며, 파단류로 기인되는 격납건물 내부의 유동은 정체되거나 성층화되지는 않지만, 전원완전상실사고(SBO)와 원자로 계통의 비파단사고시 격납건물의 성층화 등은 고려할 수 있는 사고 상황이다. 따라서, 격납건물 내부에 열교환기를 설치하는 경우는 사고 조건에 따라서 다양한 내부 유동을 고려하여야 하며, 정체유동 영역에 열교환기를 설치하면 튜브 열전달이 매우 제한적으로 이루어질 수도 있다.

격납건물 외부의 유동은 횡류가 없는 상태에서 자연대류만을 가정할 경우에 대한 CFD 결과이다. 이 경우가, 자연상태에서, 공냉열교환기 튜브에서의 최소한의 열전달이 발생하는 경우라 판단된다. 격납건물 상부 돔 근처는 재순환류가 발생하므로 공냉열교환기 설치위치로는 부적합하다. 공냉열교환기를 상부 돔 부근에 설치하려면 공기 유도관을 별도로 부착하거나, 격납건물의 수직 부분의 최상단 고도를 초과하지 않는 위치에 열교환기를 배치하여야 한다.

2.3 열교환기 평가

2.3.1 열교환기 튜브 평가조건

열교환기를 구성하는 튜브에 대하여 다음 기준을 적용하여 냉각에 필요한 튜브 개수를 산출하였다. 튜브는 길이가 4 m이고, 외경이 60.33 mm이며, 내경이 52.5 mm인 스테인리스 튜브로 설계되었다고 가정하였다. 바닷가 근처에 많이 위치하는 원자력 발전소의 위치 특성상 비부식재료의 선택이 필요하기 때문이다.

(1) 격납건물 내부에 열교환기 위치시(Fig. 4(a))

(격납건물 밖에서 튜브 내부로 냉각수 공급)

튜브내부 가정 조건:

- 압력 : 1 Bar
- 온도 : 80 °C(입구) / 90 °C
- 속도 : 0.19 m/s

튜브외부 가정 조건:

- 압력 : 3 Bar
- 온도 : 133 °C
- 유체 : 증기

(2) 격납건물 외부에 열교환기 위치시(Fig. 4(b))

튜브내부 가정 조건:

- 압력 : 3 Bar
- 온도 : 133 °C

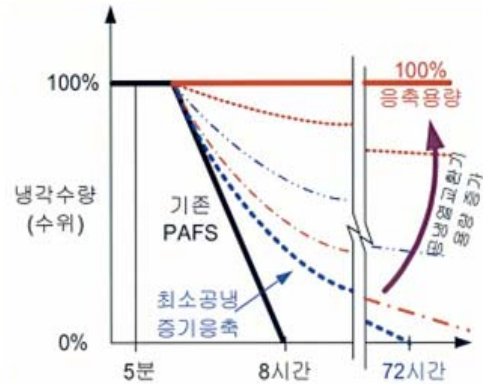
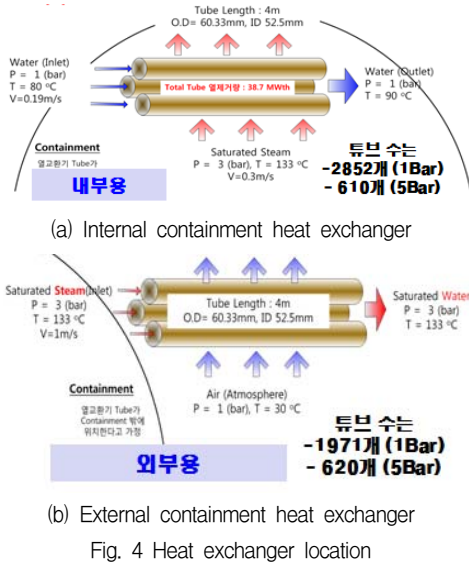


Fig. 6 Heat removal time extension by aux. heat exchanger capacity

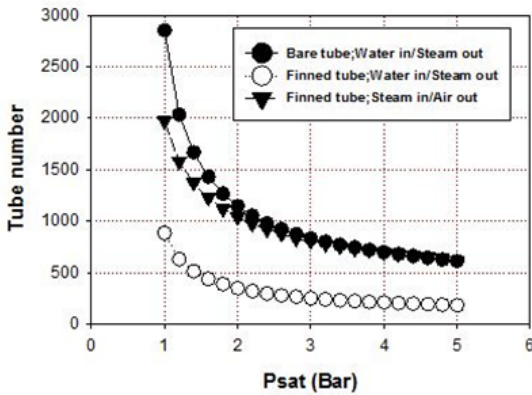


Fig. 5 Number of tubes for decay heat removal

- 유체 : 증기
- 튜브외부 가정 조건:
- 압력 : 1 Bar
- 온도 : 30 °C
- 유체 : 공기

2.3.2 평가결과

외경이 매끄러운 튜브(Bare Tube)와 핀튜브(Finned Tube)에 대해 각각 계산을 수행하였다. Fig. 4는 격납건물 내외부에 열교환기가 위치할 경우에 대한 튜브의 열적 평가 조건을 각각 나타내고 있고, Fig. 5는 위 평가조건에 대한 필요 튜브수를 계산한 결과를 보여준다. 튜브의 수는 경계조건에 따라 다소 변화하므로, 가압경수로의 사고시 열제거에 필요한 사고조건을 기준으로 기존 안전해석 결과를 참조하여, 보수적으로 결정하였다. 따라서 실제 설계시 튜브 수는 변할 수 있다.

Fig. 6과 같이 기존 8시간 작동 후 PCCT의 냉각수가 모두

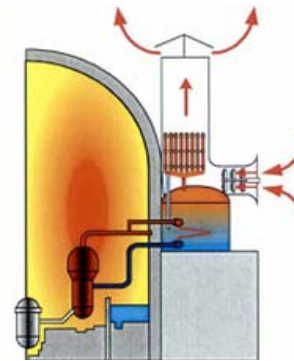


Fig. 7 Active and passive air cooler concept

증발하는 냉각계통에, 증발하는 냉각수 증기를 다시 포집하여 냉각 후 재순환시키는 공냉열교환기를 설치할 경우, 냉각 운전시간은 공냉열교환기 용량에 따라 달라진다. 증기의 냉각에 필요한 열교환기의 냉각 능력이 커질수록 냉각운전시간은 연장된다. 이 과정에서 발생하는 증기의 손실 또는 과압 보호를 위해 여전히 대기로 방출시키는 증기량 손실의 대소에 따라서, PCCT의 수위 회복이나 감소 지연시간이 영향을 받는다. 따라서, 72시간 수위유지를 목표로 하는 경우 그에 필요한 재순환 열교환기의 체적을 계산하여 공냉-수냉 혼합냉각계통을 설계하면 된다.

2.4 피동-능동 혼합냉각계통 연계

전원이 공급 가능할 경우를 대비하여 이러한 공냉-수냉 혼합냉각계통의 공냉계통에 송풍팬을 부착하면(Fig. 7 참조) 냉각성능이 개선되어 사고회복에 도움을 줄 수 있다. 이때 송풍 팬은 모터에 의해 구동되며, 전원 공급이 끊겨도 Fig. 8과 같이 팬의 날개와 날개사이의 유로를 통해 자연순환 공기의 흐름이 가능한 구조로 구성하면 능동(전기가용 상태) 운전모드에서 피동(전기가 끊겨 자연순환되는 상태) 운전모드로의, 별도의 전환장치 없이, 작동모드 전환이 가능하다.

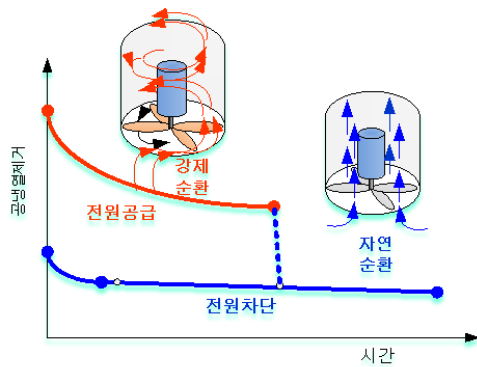


Fig. 8 Active passive switching concept

Fig. 8은 이러한 개념을 나타낸 그림이다. 따라서, 능동팬은 Fig. 8과 같이 날개와 날개 사이가 충분히 큰 단일 블레이드형 팬이나 복수 블레이드형 팬을 적용해야 한다.

2.5 공냉-수냉 혼합계통의 열교환기 위치

기존 가압경수로형 원자력발전소에서, 열교환기 냉각탱크(PCCT)의 위치는 대략 보조건물의 상부에 위치하게 된다. 이 경우 공냉-수냉 혼합냉각계통의 열교환기는 열교환기 냉각탱크의 상단이 가장 적합하다. Fig. 9는 이러한 배치의 예를 나타내는 개념도이다. 이를 적용할 경우, 보조건물의 지진하중 해석 등에서 열교환기 자중 등의 하중이 추가로 반영되어야 한다.

3. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소의 기존 수냉 기반의 잔열제거계통의 작동시간을 72시간급으로 확장하기 위한 방안의 하나로 수냉-공냉 혼합냉각계통의 설계개념 수립을 위한 제반사항을 살펴보았다. 이 설계안은 기존 수냉계통의 압력경계를 격납건물 외부로 추가 확장하지 않고, PAFS의 열교환기 냉각탱크에서 대기로 방출되는 증기를 포집하여 재순환시키는 방안이다. 이 안을 구체화할 세부방안에 대한 연구는 계속 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 기술혁신사업의 일환으로 연구가

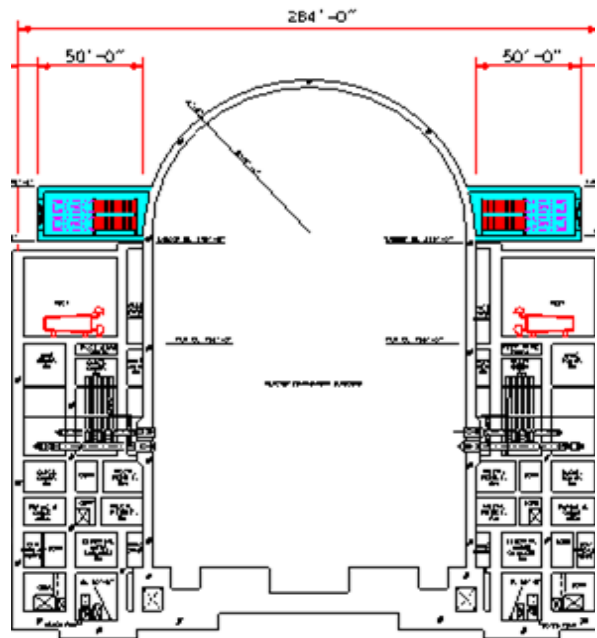


Fig. 9 Location of air cooler

수행되었습니다. KETEP과 연구지원관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- (1) Y.-J. Cho, S.-W. Bae, B.-U. Bae, S. Kim, K.-H. Kang, B.-J. Yun, "Analytical studies of the heat removal capability of a passive auxiliary feedwater system (PAFS)", Nuclear Engineering and Design, 248, pp. 306~316, 2012.
- (2) B.-U. Bae, B.-J. Yun, S. Kim, K.-H. Kang, "Design of condensation heat exchanger for the PAFS (Passive Auxiliary Feedwater System) of APR+ (Advanced Power Reactor Plus)", Annals of Nuclear Energy, 46, pp. 134~143, 2012.
- (3) Sung-Won Bae and, Tae-Soon Kwon, "Evaluation of a Design Concept for the Combined Air-water Passive Cooling PAFS+", Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea, May 29-30, 2014.
- (4) Tae-Soon Kwon, S. W. Bae, K. H. Kim, Y. S. Park, and H. S. Park, "Internal Flow Behaviors in Containment", Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea, May 29-30, 2014.