2001 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

실제크기 재관수 기간 강수관 실험장치를 위한 공기 혹은 증기원의 확보방안

Sketch on the air/steam supply for the Full-size Downcomer Test Facility during Reflood

이 상 용

한국전력기술주식회사

대전시 유성구 덕진동 150

요약

신형경수로-1400(APR-1400)계통 중 압력용기 직접주입 계통(DVI)의 실증 실험에 사용될 수도 있는 실제 크기의 재관수 기간 강수관 거동 실험을 구동하는데 충분한 공기 혹은 증기 공급원을 확보하기위한 방안을 제시하고 그 실현성을 논하였다. 그 중 가압기를 통한 공기/증기 공급 장치는 실현성 면에서 가장 현실적인 것으로 판단된다. 이러한 장치가 성공적으로 구동되면 한국표준형원전 및 신형경수로 등의 후속호기 계통 개선에 적극 활용 할 수 있다.

Abstract

A study on the air/steam supply system is performed, which can supply the necessary flow for the full-size downcomer test facility that might be constructed for the confirmation of the direct vessel injection system of APR-1400. This review can show that the pressurized vessel supply method is most plausible among many options. If this system is successfully constructed and operated , it can be utilized for the improvements of the future systems of Korea Standard Nuclear Plant and APR-1400.

1. 서론

최근 진행되고 있는 신형경수로-1400(Advanced Power Reactor; APR-1400) 설계에서 종래 대부분의 다른 경수로에서 저온관에 주입하든 안전계통의 냉각수를 압력용기에 직접 주입(Direct Vessel Injection; DVI)하도록 설계를 바꾸었다. 이 설계와 관련하여 강수관 상부에 주입된 냉각수 중 얼마만한 분량이 저온관 밑에까지 도달 할 것인가는 매우 중요한 문제다. 이 문제를 해결하기 위하여 실험을 수행하고 있다. 현재 진행되고 있는 실험은 축도된 실험으로 그 결과를 실제 크기의 원자로 강수관에 적용하기 위하여 적절한 scaling law 를 찾아야 한다. 그러나, 이 때 강수관에서 일어나는 현상은 여러 개의 독립적인 변수들에 의해 지배받는다. 예를 들면, 하강하는 물 막의 퍼짐과 두께는 노즐 직경의 함수이며, 저온관 노즐로부터 분사되는 증기에 의해 흩어지는 물 막의 넓이는 저온관의 증기 속도의 함수이다. 강수관에서 원주방향으로 흐르는 증기에 의한 물 막의 영향은 강수관 직경과 간격의 함수로 보인다. 이상과 같이 강수관에서 일어나는 DVI 현상은 기하학적 인자만 보아도 여러 개가 됨을 알 수 있으며, 이러한 사실로부터 의미 있는 축도법칙을 도출하는 것은 매우 힘들 것으로 판단된다. 그러므로 현재 진행되고 있는 실험들의 결과를 가지고 발전소에 적용할만한 상관식의 도출 등의 의미 있는 작업을 하는 것은 한계가 있을 것으로 보인다. 이와 같은 논의는 곧바로 실제크기의 실험장치를 건설해야 한다는 결론에 도달하지만 경제적인 제약성 때문에 실제 크기의 실험장치를 건설할 수 없다. 즉, 충분한 양의 공기나 중기를 공급 시키기 위하여 요구되는 펌프는 그 규모나 개수가 경제적 가능성 범위를 벗어난다고 판단되고 있다.

이러한 상황에서 확실하게 강수관 문제를 해결하는 방법은 두 가지가 있다. 첫째는 현재 설계를 바꾸는 방법이고, 둘 째는 실제 크기 실험장치에 공기나 증기 공급할 수 있는 가능성을 찾아 보는 것이다. 이 논문에서는 두 번째 가능성을 추구하는데 목적을 두고있다. 즉 현재 필요한 공기/증기량을 추정하고 그 만한 양을 경제적으로 공급시키는 방법을 찾거나 고안하는 것이다. 2 절에서는 필요한 공기/증기량을 평가하고, 3 절에서는 기존 시설에서 공급 받는 가능성을 검토하고, 4 절에서는 새로운 시설을 건설하는 방법을 검토 하겠다.

2. 실제크기 강수관 실험장치에 필요한 공기/증기량

APR-1400 의 강수관에 흐르는 증기의 양은 대형 냉각재 상실사고(LB-LOCA)의 진행에 따라 달라진다. 그러나 현재 문제가 되고 있는 재관수 기간에는 그 양을 결정할 수 있는 여러 가지 실험 자료가 있다. 가장 믿을만한 데이터로는 역시 2D/3D[1] 데이터 일 것이다. 2D/3D 데이터도 여러 가지를 찾을 수 있지만 그 중 강수관 수위 저하실험의 입력은 우리 목적에 가장 적합하다고 본다. 그 데이터는 다음 표-1 과 같다. 여기에서 발전소 운전 중 안전주입수의 최저 온도를 30°C 로 잡고 적절한 열역학 변수들을 아래와 같이 찾으면, 최대 증기 응축률을 구할 수 있다. 이렇게 구한 증기량을 더해주면 표-1 의 마지막 열과 같은 증기량이 흐른다는 것을 추정할 수 있다. 이 값들의 평균값은 68kg/s 이고 최대인 것은 84kg/s 이다.

ECC Flow = 246kg/s

ECC water temperature = 30°C

Specific heat = 4.2 kJ/kg°C

Total condensation potential = 246*(100-30)*4.2

= 426*(100-30)*4.2

Latent Heat =2258 kJ/kg

Total Condensation Rate = 246*(100-30)*4.2/2258 = 32.03 kg/s

= 426*(100-30)*4.2/2258 = 55.47 kg/s

표-1 재관수 기간 파단 루프 유량

Broken Cold Leg Steam Flow (kg/s)	ECC injection Flow (kg/s)	Condensation Rate (kg/s)	Condensation Corrected Steam Flow (kg/s)
47-52	246	32	79-84
36	246	32	68
25	246	32	57
19	246, 426	32-56	51-75
평균			(51+84)/2=68

이상과 같은 추정계산을 통하여 실제크기 강수관에서 일어나는 현상을 관찰하기 위하여 강수관 반쪽을 모사하는 실험 장치를 건설한다면 68kg/s **의 절반정도 즉** 34kg/s **정도의 공기/증기가 필요하다. 이것을 부피로 환산하면** $34m^3/s$ **이다. 현재** APR-1400 **의 강수관 원주방향 유동면적을** $1.0m^2$ **로 하면,** 34m/s **의 유속을 요구한다.**

그러나 필요한 공기/증기 유량을 산정하는 과정에서 중요한 점을 간과하지 말아야 한다고 생각한다. 그것은 공급 해야 하는 총 시간이다. 이 시간은 길면 길수록 좋겠지만, 기술적으로 의미 있는 데이터를 생산할 수 있는 최소요구시간을 결정하는 것은 매우 중요하다. 그 이유는 이 시간에 유량을 곱한 것이 총 공기/증기 양이고 그 양에 따라 저장 탱크에서 공급시키는 것이 가능한가를 평가 할 수 있기 때문이다. 공기 실험을 전제로 한다면 실험장치 구조물의 온도와 공기 및 주입수의 온도는 모두 대기온도로 같을 것으로 본다. 즉 열적 평형을 이루기 위한 시간은 불 필요하다. 35m/s **의 공기가 원자로 강수관 원주를 돌아 나가는 시간은 강수관 직경을** 5m **로 잡으면 대략** 0.3 **초(=5*3.14/35/2) 걸린다. 저온관 입구 및 원자로 내부원통(**core barrel**)의 표면에서 일어나는 천이기간은** 10 **초 미만일 것으로 보인다. 이상과 같은 추정으로 보면** 30 **초 정도의 기간동안 규정된 공급이 이루어 진다면 의미 있는 데이터를 생산할 수 있다고 본다. 다음의 두절에서 그 양을 공급하는 가능성을 조사 해보겠다.**

3. 기존시설에서의 공기/증기 공급가능성

기존시설이란 현재에 앞에서 추정한 공기/증기를 사용하고 있는 시설을 말하며, UPTF 가 근처의 증기원에서 증기를 공급 받은 것을 생각하면 될 것이다. 우선 한국전력의 화력 발전소에서 그 가능성을 찾아 볼 수 있다. 어떤 발전소의 운전 정지 예정시간을 안다면 정지 후 증기발생기의 잔여 증기로도 실험이 가능 할 수 있다. 사전에 실험장치와 발전소 계통간에 적절한 연결 작업이 이루어 저야 함은 물론이다. 이 방법은 충분한 증기원을 확보할 수 있으나 해당 발전소의 운영에 관련한 사항을 협의해야 하는 부담이 있다.

다음 항공공학을 연구하는 연구소나 학교의 풍동실험 장치를 검토 하는 일이다. 이러한 실험실에서 만들 수 있는 최대 유량은 어려움 없이 재관수 기간 강수관 실험의 요구조건을 만족 시킬 것으로 생각된다. 이 방법은 앞의 방법보다는 실현 가능성이 높을 것으로 판단되나 역시 얼마간의 협상이 필요할 것이다. 이 외에도, 화공단지, 유화학단지, 철강단지 등을 조사해 보면 이러한 양의 공기나 증기를 얻을 가능성은 높다고 생각한다.

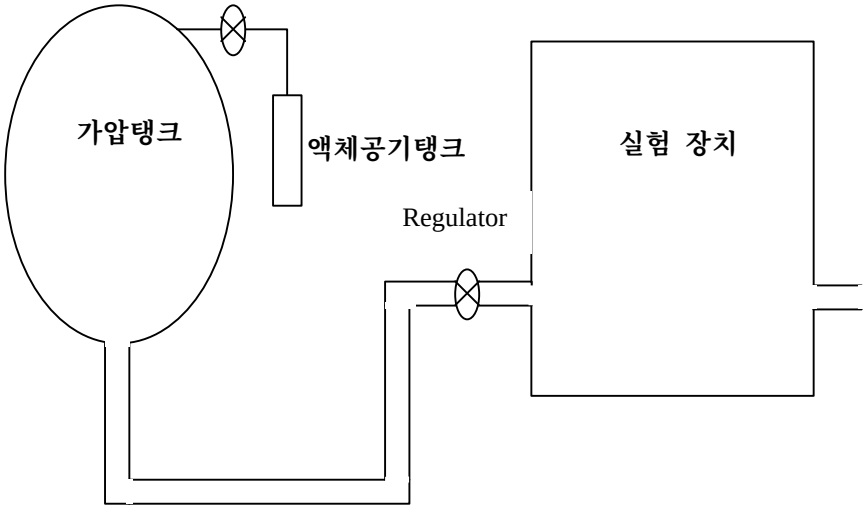
4. 새로운 시설의 건설

새로운 시설을 건설 하는 것은 앞에서 이미 경제적이 되지 못한다고 결론 내렸다. 그러나, 이러한 결론은 장시간 공급한다는 전제하에 내린 결론이고 단기간 즉 30 초 정도의 기간동안 공급을 하는 것을 목표로 한다면 여러 가지 대안이 상정 될 수 있다.

4.1 가압탱크를 사용하는 방법

가압탱크에 공기를 가압된 상태로 저장한 후 실험시작과 함께 개방하여 필요한 시간동안 공급하는 방법이다. 이 방법은 매우 간편하여 쉽게 건설할 수 있다. 대형 탱크와 연결 파이프 그리고 압력조절기 등이 기본적으로 요구 되는 장비이다(그림-1).

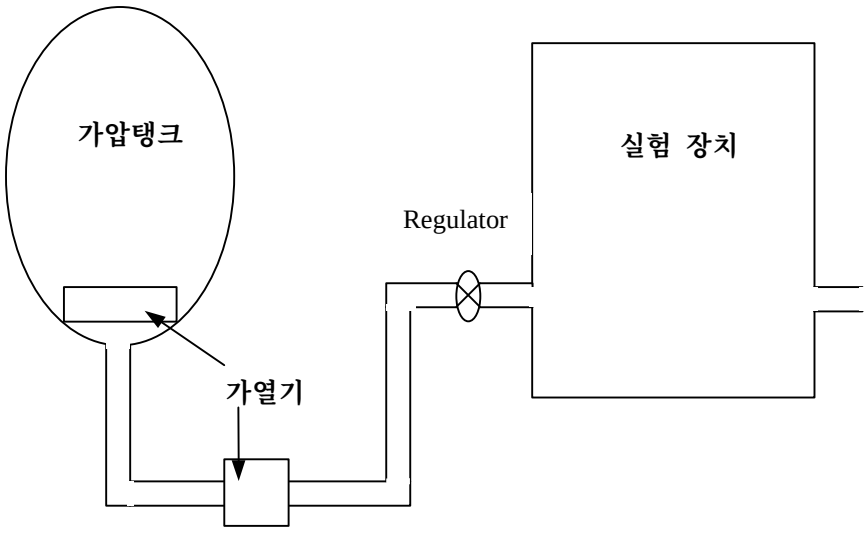
그림-1 가압탱크 공기 공급장치



이러한 장치는 현재 한국원자력 연구소에서 건설하고 있는 실제크기 Fluidic Device 실험장치를 사용해도 된다. 이 장치가 full-size test 인 것을 감안하면 Safety Injection Tank(SIT) 에서 물을 빼고 공기를 가압 시키면 원하는 공기 유량을 얻을 수 있다. 즉 SIT 의 체적이 $68m^3$, 압력이 40bar 인 것으로부터 1bar 에서 실험 장치를 작동시킨다고 가정하면 대략 68*40/34=80 초 동안 공기를 공급할 수 있다. 이것은 2 절에서 요구하는 30 초를 초과하는 능력이다.

만약 이 장치에서 증기를 사용한다면 그림-2 와 같이 가압탱크 내부에 가열기를 장착 시켜야 하며 배출관에 enthalpy 보정을 위해 가열기를 설치 할 필요가 있다. 가압탱크 내부에 가열기는 원자로의 Pressurizer Heater 와 유사할 것이다. 한편 enthalpy 보정을 위한 가열기는 보정량에 따라 전기 가열기에서부터 hydrogen igniter 까지 다양한 선택 중 적합한 것을 취할 수 있다. 또한, 전체적으로 더 오랫동안 실험을 계속하기 원한다면 탱크의 개 수를 증가 시키면 된다.

그림-2 가압탱크 증기 공급장치

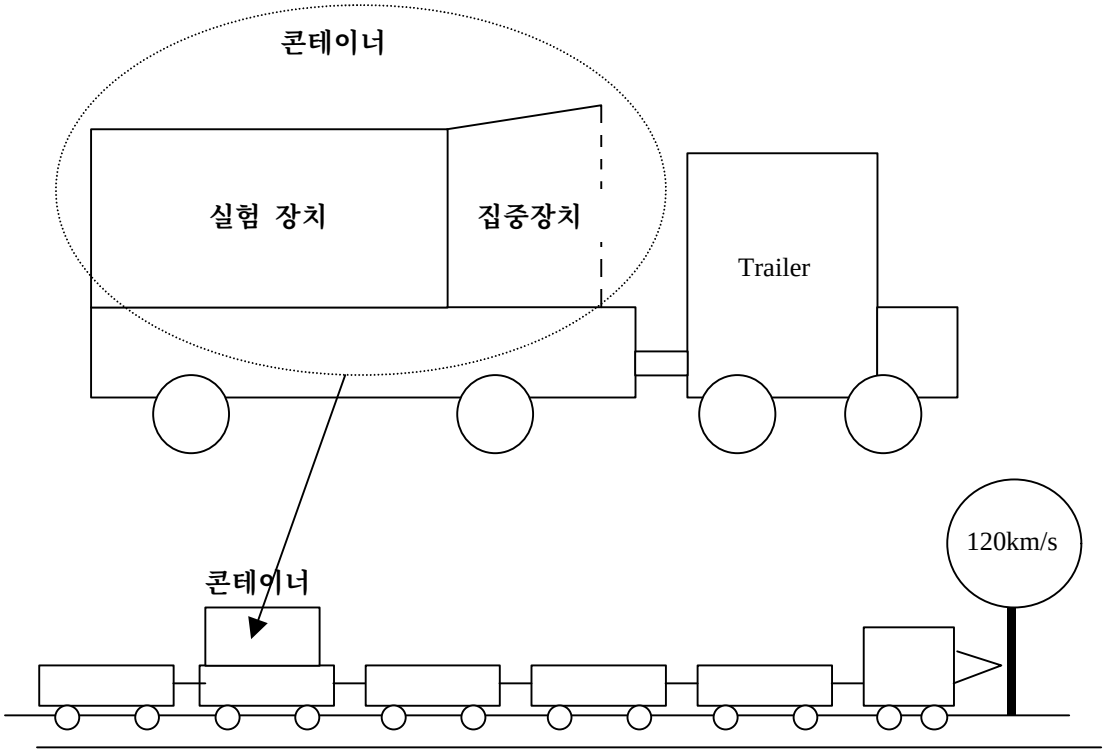


4.2 차량 속도를 이용하는 방법

다음 그림-2 와 같이, Container 에 관련 실험 장치를 설치하여 trailer 나 화물열차에 장착하는 방법을 생각 해 보자. 혹은 화물열차의 차량 한 개를 빌려서 사용할 수도 있다. 이 방법은 trailer 나 화물열차가 달리는 속도를 이용하여 원하는 풍속을 얻는 방법으로 100km

로 달리는 차량은 28m/s, 120km/s 로 달리는 차량은 33m/s, 150km 로 달리는 차량은 42m/s 의 공기를 연속적으로 공급 시킨다. 물론 공기 집중 장치의 압력 강하를 고려하면 실제 실험 장치의 내부 유속은 위 계산 치들 보다 작은 값이 될 것이다. 2 절의 요구 풍속이 $34m^2$ 인 것을 고려하면 차량 속도는 120km/s 정도로 가능할 것으로 보인다. 이러한 방법은 경제적으로 큰 장점이 있지만 실험 장치내의 압력강하를 이겨 내면서 원하는 유속을 얻을 수 있는가 하는 문제와 진동 등이 실험에 주는 효과 등을 배제할 수 없다는 단점이 있다.

그림-3 차량속도에 의한 공기 공급장치 개념도



5. 논의 및 결론

이상의 검토에서 실제크기의 재관수 기간 강수관 실험장치의 구동을 위한 공기나 증기의 공급원을 경제적으로 확보하는 것은 가능 함을 보였다. 특히 4.1 절에서 논의한 방법은 경제적으로 뿐만 아니고 기술적으로 실현 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 이와 같은 장치를 통하여 DVI 인허가에 필요한 실험 데이터를 생산하기 위한 실제크기의 재관수

강수관 실험을 수행하는 것이 가능해 진다. 그러나 이 논문의 검토는 매우 기초적인 분석에 근거하였으므로 추후 실제적인 기술시현성은 보다 상세한 자료에 근거해서 이루어 져야 할 것으로 판단된다.

지금까지 현재 당면한 APR-1400 의 강수관 문제를 주로 언급 하였지만, 강수관의 열수력 문제는 2D/3D[1] 연구가 끝난 지금에도 완전히 규명이 되지 않은 문제가 남아 있다. 그 중 가장 중요한 것은 SIT 내의 질소가스가 방출될 때 강수관의 거동과 노심의 거동이 완벽하게 이해 되지 못했다는 점이다. 이러한 질소가스 거동의 불확실성의 중대함은 참고문헌 [1]의 관련 구절을 인용하는 것으로 보여 주겠다.

" ..the surge (induced by nitrogen discharge) would quench the hottest portion of the hottest rod, with a sustained turnaround in the cladding temperatures.....[1] "

이 문제는 상기의 공기/증기 공급원이 확보되면 어느 정도 연구 해 볼 수 있는 주제이다. 이 문제 이외에도 장기적으로 보면, KSNP 나 후속 APR-1400 의 안전계통 설계개선을 위하여 공급원 확보는 의미 있는 일이라고 생각된다.

참고문헌

1. P. S. Damerell, et. al., "2D/3D Program Work Summary Report", NUREG/IA-0126, June 1993