

RHRS에서의 공기흡입 방지에 관한 모의실험

김 상녕, 장 완호
경희대학교

요 약

원자력 발전소의 일차계통 부분충수운전시 잔열제거 계통 입구에서 자유수면 와동으로 인해 계통에 공기가 흡입될 수 있으며 이로 인해 계통이 상실되거나 계기에 오차가 유발되어 많은 안전상의 문제를 야기할 수 있다. 이러한 문제들을 해결할 수 있도록 흡입구의 구조를 개선하기 위해 다양한 구조에 대해 실험을 수행한 결과 깔때기 모양과 우회유로를 설치한 경우, 그리고 기존 T자형에 와동 방지판을 부착하는 것이 매우 효과적임이 밝혀졌다. 하지만 깔때기 모양이나 우회유로의 경우는 배관구조의 변경이 필요하여 따라서 기존 발전소나 신설 발전소에 적용시 문제점이 많으므로 필요시 붙이고 불필요하면 제거가능한 탈착식인 다공 와동 방지판을 최종적으로 선정하였다. 이 경우에 대하여 1/4 축소 실험장치로 실험한 결과 운전유량 영역에서 와동의 발생으로 인한 공기흡입과 펌프의 정지를 획기적으로 줄여주는 것으로 밝혀졌다.

1. 서론

원자력 발전소의 연료재장전시에 증기발생기의 튜브검사나 보수, 냉각재펌프의 seal 교체, 또는 핵연료 재장전 수위지시계 검사 등을 위해 원자로 냉각재의 수위를 고온관 중심지점까지 낮춘후 증기발생기의 양단에 노즐댐등을 설치하여 운전할 필요가 생긴다. 이때 원자로의 수위를 높이면 증기발생기의 manway를 통하여 원자로 냉각재가 원자로 냉각재 계통 외부로 넘쳐 나오게 되고, 수위를 너무 낮추면 고온관에 직각 하방으로 연결된 정지 냉각펌프의 배관으로 공기가 과도하게 흡입되어 물과 공기의 이상류 유동이 발생하고 정지 냉각펌프의 양정이 급격히 떨어져서 정지 냉각계통이 상실되게 된다. 그러므로 고온관의 중심선 부근에 원자로의 냉각재 수위를 유지하고 원자로에서 발생하는 잔열을 정지냉각계통으로 제거하는 운전이 필요하게 되는데 이것을 mid-loop operation이라 한다. mid-loop operation에는 냉각재 계통의 냉각재량이 줄어서 배관단면적 일부가 증기나 공기로 채워지고 나머지는 물로 채워지게 된다. 이때 수위가 원자로 hot leg 부분에서 배관단면적의 중심선부를 어느 정도까지 내려오면 잔열제거계통 흡입구 부근에서 와동이 발생하게 된다. 즉 흡입구에서 소용돌이가 발생하게 되고 이로 인해서 증기 및 공기가 계통에 흡입되게 된다. 이렇게 되면 계통의 계측값에 신뢰성이 상실되어 운전자로 하여금 오작동과 오판을 불러 일으키고 5% 이상의 공기가 유입되면 계통의 펌프성능이 급격히 저하되어 결국 계통상실을 유발한다.

Diablo Canyon 사건 (1987. 4. 10)이후 확률론적 안전성평가 (PSA : Probabilistic Safety

Assessment) 결과와 전력회사의 운전경험 결과 원자로 계통내의 냉각재계통 냉각재량이 감소된 상태에서는 잔열제거 운전시 DHR(Decay Heat Removal) 계통의 기능상실 가능성이 매우 높은 것으로 밝혀졌다. 만일 상실되는 경우 이것이 감지되지 않고 심각한 상황에 이룰수 있다. 이 경우 기존의 해석에서 4시간의 시간적 여유가 있다고 믿었으나 최악의 경우 1시간 이내에 노심파손을 야기할 수 있다는 것이 판명되었다.

이러한 심각성에 입각하여 미국 NRC는 이에 대한 긴급조치를 취하도록 전력회사에 지시한 바 있으며 이러한 붕괴열제거 상실사고 방지를 위해서 지속적인 냉각재량 및 온도감시체계 강화를 지시한 바 있다.

따라서 영광 3,4호기 및 표준화 후속 발전소에서는 mid-loop operation시 와동으로 인한 계통의 공기흡입 및 이로인한 계통상실을 방지하기 위하여 원자로 냉각재 계통의 설계개선 및 감시체계의 설계자료 제공이 필요하다. 또한 기존의 원자력발전소에서는 잔열제거 계통의 공기흡입으로 인한 능력상실에 대한 위험성을 평가하기 위하여 잔열제거 계통의 흡입구에서 와동으로 인한 공기흡입 여부를 판정하기 위한 기준을 확립할 필요성이 나타나게 된다.

2. 실험

본 연구는 원자력 발전소의 Mid-loop 운전시 잔열제거 계통내의 공기흡입으로 인한 계기의 오작동과 계통상실 방지를 위한 유량 및 수위 등과 공기흡입이 발생하는 배관내의 수위와의 관계를 무차원 변수로 결정짓는데 목적이 있다.

이를 위해 영광 3,4호기 원자로 냉각재 계통내의 Hot leg와 잔열제거 계통 흡입구 부분을 1/4로 축소한 모형실험을 통해 유량이 와동에 미치는 영향을 평가하고 이를 토대로 하여 와동으로 인한 공기흡입을 방지할수 있는 Reducer Type의 흡입구와 우회유로 그리고 기존 T자형 배관에 Vortex Breaker를 부착한 새로운 흡입구 설계 개선방안을 제시하였다.

2.1 원자로 계통의 모형설계

아래와 같은 계산을 근거로 그림 1과 같은 실험장치 설계를 완료하였다.

표 1. 영광 3, 4호기의 주요제원

Hot leg pipe I.D.	42" (106.68 cm)
RHR I.D.	16" schedule 160 (12.812" = 32.54 cm)
RHR 펌프 설계유량	5000 GPM

표 2. 실험장치의 설계치

Hot leg pipe I.D.	10.5" (26.67 cm)
RHR I.D.	3.203" (8.14 cm)
RHR 펌프 설계유량	160 GPM(0.01 m ³ /sec)

위와 같은 설계와 아울러 와동으로 인한 공기흡입을 방지할 수 있도록 Reducer형의 흡입구를 설계하여 새로운 흡입구의 설계개선안을 실증하고자 하였다.

또한 기존의 원자로에서는 크게 고려하지 못하였던 흡입관내의 여러 특성 (hot leg 상류와 하류의 수위차이, hydraulic jump, 와동핵의 치우치는 정도 등)을 고려하기 위하여 3개의 자를 사용하여 mid-loop 운전상황에 따른 수위와 공기흡입상태의 변화를 면밀히 관찰할 수 있도록 설계하였으며 RCS 모사관에 tygon tube를 설치함으로 기존의 원자로에서 RCS level 측정설비에 공기가 흡입됨에 따르는 수위의 변동상황을 알아보도록 하였다.

2.2 실험방법

본 실험은 크게 세 부분으로 구분하여 실험을 수행하였다.

먼저 영광 3,4호기의 실물과 동형의 흡입구에서 유량의 변화에 따르는 공기의 흡입수위의 관계를 결정짓기 위한 실험을 수행하였다. 여기에 Reducer형 배관으로 교체한 경우와 우회유로를 사용한 경우를 각각 실험하였다. 마지막으로 실물과 동형의 흡입구에 Vortex Breaker를 설치하여 그 결과를 알아보았다. Vortex Breaker는 다시 두 형태로 나누어서 하나는 평판을 3개의 평판을 RCS 배관에 수직으로 설치한 것이고 다른 하나는 바깥의 평판에 구멍을 뚫어 평판으로 인해 생기는 물의 출렁임을 줄인 형태이다(그림 2).

본 실험에서 사용된 유량은 실제 원자로 계통내의 유량이 운전상태의 변화에 따라 약간씩 변화가 있을수 있으므로 이를 고려하여 운전출력의 30~110%에 해당하는 값(영광 3,4호기의 정지냉각 펌프의 설계유량은 5000 GPM이다)으로 표시하였다. 이 값을 실제의 원자로의 유량과 대조하면 1500 ~ 5500 GPM이 된다. 이 범위에서 원자로에서 운전조건으로 500 GPM씩 증가시켜 9개의 구간을 설정하였다. 이때의 프라우드수는 각각 0.66~2.44로 나타났다.

표3. 본 장치의 실험영역

영역 \ 종류	동형의 흡입관	Reducer형 흡입관	우회유로의 설치	Vortex Breaker 설치
축적	1/4	1/4	1/4	1/4
온도	상온	상온	상온	상온
프라우드수	0.66 ~ 2.24	0.66 ~ 2.24	0.66 ~ 2.24	0.66 ~ 2.24
유량	운전출력의 30~110%	운전출력의 30~110%	운전출력의 30~110%	운전출력의 30~110%
기 타 특기사항	영광 3,4호기 축소형	상부 23.5 cm 하부 8 cm 길이 60 cm	운전유량의 10 ~ 50% 우회	기존의 흡입관에 Breaker 설치

3. 결과

(1) T자형 흡입관에서 수위에 따른 입계수위와 유동정지 수위를 무차원 상관식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{펌프의 입계수위} : H/d = 1.4 Fr^{0.18}$$

$$\text{유동 정지수위} : H/d = 1.1 Fr^{0.68}$$

(2) Reducer형 흡입관은정격유량에서 공기흡입은 있었으나 계통상실은 유발되지 않았다. 이는 고수위(고유량)에서는 높은 수위로 인하여 와동핵이 흡입관 입구까지 발달하지 못하고 저수위(저유량)에서는 흡입관 양단간에 수위차가 현저하여 와동이 발달할수 없기 때문이다. Reducer형 흡입관의 이러한 개선효과는 입구유로 단면적 증가와 함께 Reducer형으로 임계깊이의 증가효과 때문으로 생각된다. 이 경우에는 지속적으로 공기가 흡입되기 때문에 비록 유동정지는 일어나지 않는다 할지라도 펌프에 무리를 주게되어 큰 사고를 야기할 가능성이 있다.

(3) 우회유량을 준 경우 임계수위와 유동정지 수위는 다음과 같다.

우회유량 10%	임계수위	$H/d = 1.2 Fr^{0.70}$
	유동정지수위	$H/d = 1.0 Fr^{0.42}$
우회유량 20%	임계수위	$H/d = 1.2 Fr^{0.68}$
	유동정지수위	$H/d = 1.0 Fr^{0.42}$
우회유량 30%	임계수위	$H/d = 1.2 Fr^{0.59}$
	유동정지수위	$H/d = 1.0 Fr^{0.70}$
우회유량 40%	임계수위	$H/d = 1.2 Fr^{0.60}$
	유동정지수위	$H/d = 0.9 Fr^{0.36}$
우회유량 50%	임계수위	$H/d = 1.2 Fr^{0.52}$
	유동정지수위	$H/d = 1.0 Fr^{0.6}$

(4) 와동 방지판을 설치한 경우

일반 와동 방지판의 경우	임계수위	$H/d = 0.9 Fr^{0.45}$
	유동정지수위	$H/d = 1.2 Fr^{0.48}$
다공 와동 방지판의 경우	임계수위	$H/d = 0.7 Fr^{0.31}$
	유동정지수위	$H/d = 0.8 Fr^{0.34}$

4. 결론

유속, 관형태, 우회유량의 변화를 주면서 와동의 임계치에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을수 있었다.

(1) Mid-loop 운전에서 와동은 외부의 섭동에 민감한 영향을 받는다. 특히 펌프의 작동개시, 밸브의 개폐 등 운전상태의 여러 경계조건에 크게 좌우된다. 또한 와동은 매우 불규칙적이고 연속적이지 못하며 생성, 소멸을 거듭하며, 생성, 소멸의 주기는 유량의 증가에 따라 점차 불규칙하게 나타난다.

(2) 공기흡입으로 펌프에 소요되는 전력의 영향을 알아보기 위해 전류계를 설치하여 전류를 측정할 결과 공기흡입량에 따라 전류량이 영향을 받는 것으로 나타났다. 하지만 유동정지에 예측하기에는 무리가 따르며 따라서 보츠수단으로의 활용은 가능하나 임계수위의 예측기준으로서는 부적합하다.

(3) Reducer형의 경우나 우회유로를 설치한 경우에도 임계수위와 유동정지수위의 줄여주는 효과가 있으나 실제 발전소에 적용시에는 설계변경과 아울러 배관 구조변경에 따른 부차적인

계산이 필요하게 되므로 기존 발전소나 신설발전소에 사용하기는 문제가 있다.

(4) 흡입관에 와동 방지판을 설치한 경우 기존의 흡입관에 비해 약 50%까지 임계치를 줄일 수 있었다. 이 경우에도 다공성 와동방지판이 보다 효과적이었으며 이를 실제 발전소에 적용할 경우 큰 효과를 얻을수 있다. 발전소에 적용시는 필요시에는 불이고 불필요하면 제거가 가능하도록 탈착식으로 설치하면 문제가 없으리라 생각된다.

5. 참고문헌

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1988, "To all Holders of Operating Licenses or Construction Permits for Pressurized Water Reactors ", Loss of Decay Heat Removal (Generic Letter No 88 - 17).
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1987, " Loss of Residual Heat Removal System, Diablo Canyon, unit 2, April 10, 1987, : NUREG - 1269 .
3. Andreychek, T. S., 1988, "Loss of RHRS Cooling while the RCS is Partially Filled", Rev. 0, WCAP-11916, Westinghouse Electric Corporation Power Systems.
4. 김 환열, 1990, " Mid - Loop운전시 정지냉각기능 상실에 대한 고찰", 한국 원자력 연구소.
5. Odgaard, A. Jacob, 1986, " Free - Surface Air Core Vortex. ", Journal of Hydraulics Engineering. Vol. 112, No. 7, pp 610 ~ 620.
6. Jain Akalank K., et al. 1978, " Vortex Formation At Vertical Pipe Intakes", Journal of the hydraulics division of ASCE. pp 1429 ~ 1445.
7. Anwar, H. O., 1965, " Flow in a Free Vortex. ", Journal of Water Power. pp 153 ~ 161.
8. Marris, A. W., 1967, " Theory of the Bathtub Vortex. ", Journal of Applied Mechanics. pp 11 ~ 15.
9. Sharp, J. J., 1972, " Hydraulic Modeling. " pp 77 ~ 95.
10. Dagget, Larry L., Keulegan, Gabris H., 1974, " Similitude in Free Surface Vortex Formations", Journal of the Hydraulics Division of ASCE. pp 1565 ~ 1581.
11. Hecker, George E., 1981, " Model - Prototype Comparison of Free Surface Vortices ", ASCE. pp 1243 ~ 1259.
12. Padonabhan, Mahadevan, Hecker, George E., 1984, " Scale Effects in Sump Pumps ", The Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No 11 .
13. Zielinski, Paul B., et al. 1968, " Effects of Viscosity On Vortex - Orifice Flow. ", Journal of the Hydraulics Division of ASCE, pp 745 ~ 752.
14. Linford, A., 1965, " The Application of Models to Hydraulic Engineering Air Entraining Vortices ", Water and Water Engineering , pp 105 ~ 110

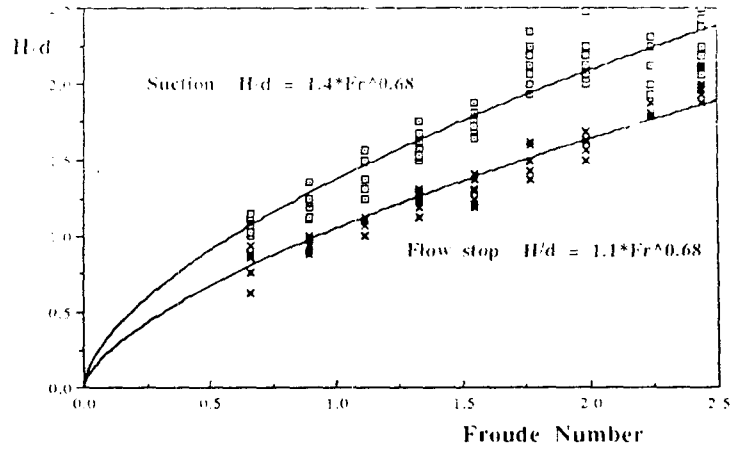


그림 3. T자형 흡입관에서 임계수위, 유동정지수위

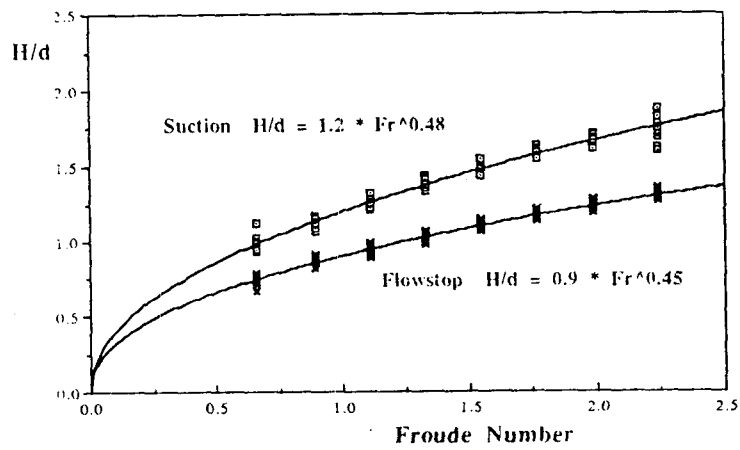


그림 4. 외동방지판 설치시 임계수위, 유동정지수위

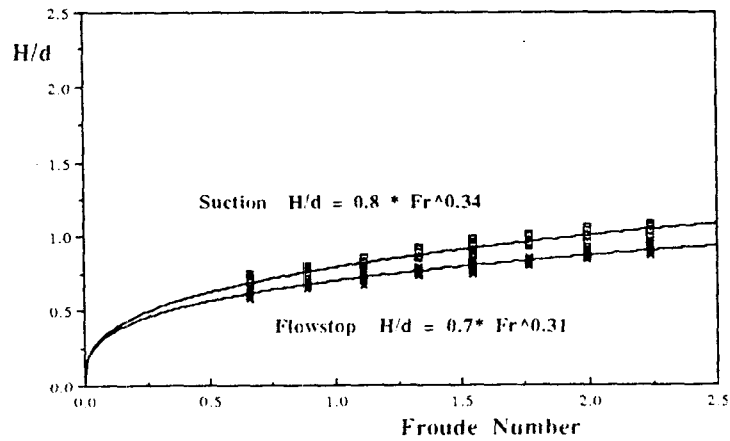


그림 5. 다공 외동방지판 설치시 임계수위, 유동정지수위

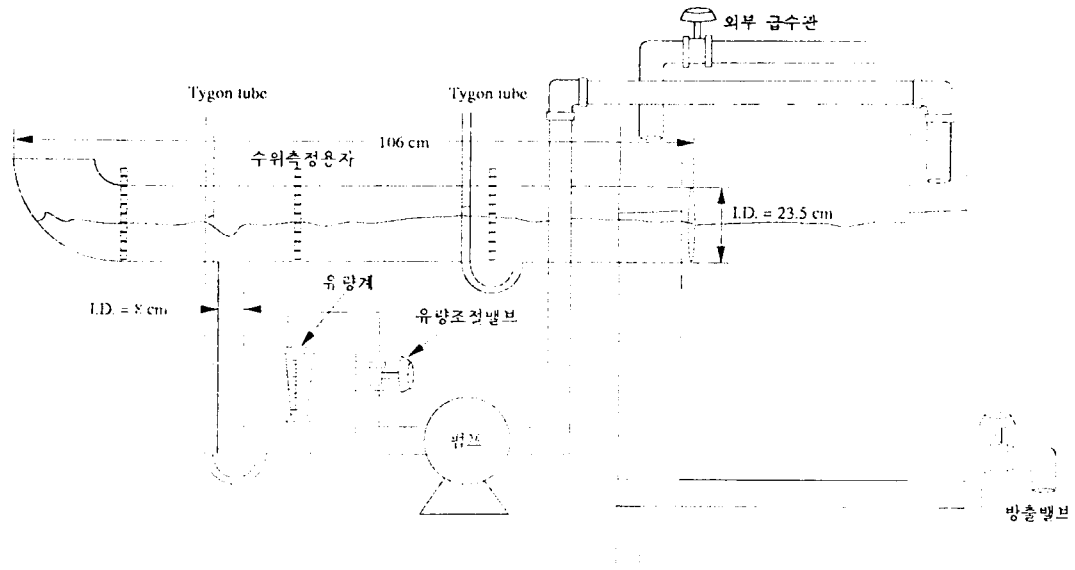


그림 1. RHRS 모형 실험장치 개략도

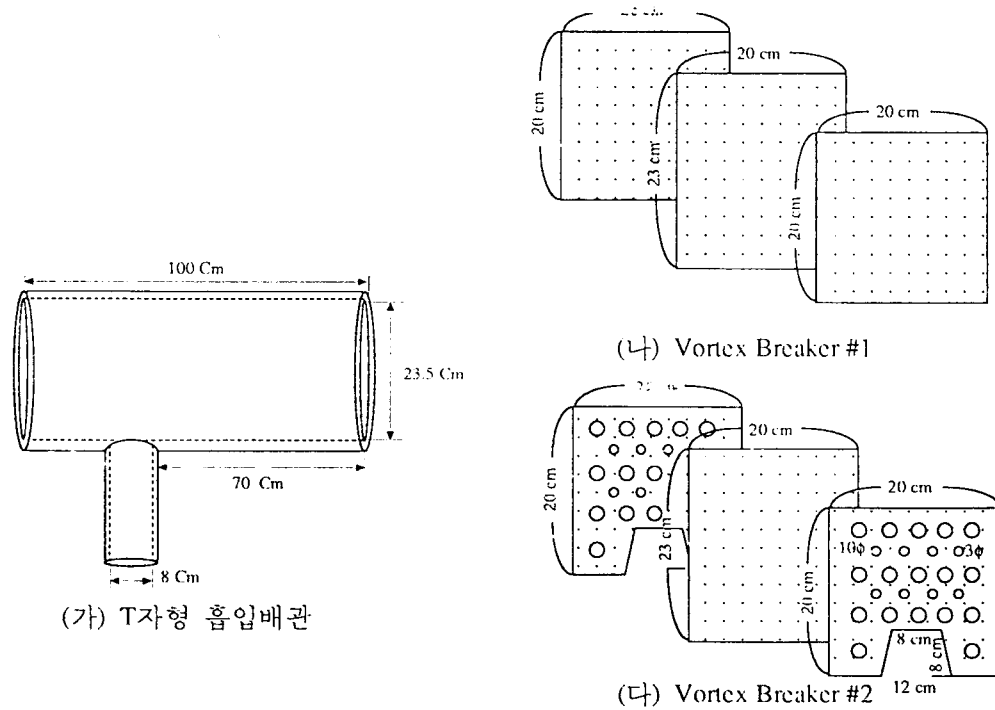


그림 2. 흡입배관의 종류