

〈論 文〉

배관내 자유수면에서 와류현상에 대한 연구

오을권* · 장완호** · 이종원*** · 김상녕****

(1992년 3월 9일 접수)

A Study on the Free Surface Vortex in the Pipe System

Yool-Kwon Oh, Wan-Ho Jang, Jong-Won Lee and Sang-Nyung Kim

Key Words : Decay Heat Removal System(잔열제거계통), Air Entrainment(공기흡입), Free Surface Vortex(자유수면와동), Dimensionless Number(무차원수), Reactor Safety(원자로안전), Reducer Type(갈때기형), Perturbation(섭동), Critical Depth of Submergence(임계수위)

Abstract

In order to prevent the decay heat removal system from failure due to air entrainment of free surface vortex in the piping system, a set of simulating experiments for the midloop operation of nuclear power plant was performed. Through these experiments, a relation between the dimensionless numbers, such as submergence H/d , froude number, reynolds number, was found. However, the effect of reynolds number was negligible for the operation conditions of Nuclear power plant. It was also found that the perturbation of the system by the disturbance such as pump start, valve operation, etc., has a strong effect on the free surface vortex. Furthermore, from a view point of reactor safety, a modified inlet device of reducer type is strongly recommendable for the prevention of air entrainment.

기 호 설 명

d : 흡입관 직경 (diameter of intake pipe)

g : 중력가속도 (acccltration of gravity)

Fr : 프라우드 수 (froude number; $\frac{\bar{U}}{\sqrt{Lg}}$)

H : 임계수위 (critical depth of submergence)

P : 압력 (pressure)

Re : 레이놀즈수 (Reynolds number; $\frac{\rho L \bar{U}}{\mu}$)

\bar{U} : 평균속도 (average velocity)

σ : 표면장력 (surface tension)

P_0 : 대기압 (atmospheric pressure)

r_c : 공기핵 반경 (radius of air core)

We : 웨버수 (weber number; $\frac{\rho L \bar{U}^2}{\sigma}$)

ρ : 밀도 (density)

1. 서 론

*조선대학교 정밀기계공학과

**경희대학교 원자력공학과 대학원

***정회원, 경희대학교 기계공학과

****정회원, 경희대학교 원자력공학과

원자력 발전소는 정상운전중이라도 여러 다양한 운전조건이 존재하게 되는데 그 중의 한 경우가 mid-loop operation이다. 이는 연료교체 등과 같은

냉각운전 형태로 냉각재 계통의 냉각재량이 줄어서 배관단면적 일부가 증기나 공기로 채워지고 나머지는 물로 채워지는 상태를 말한다. 이때 증기나 분열로 인한 열출력은 거의 없고 단지 붕괴열로부터 잔열만이 나오게 된다. 이러한 무출력 운전시 (nonpower operation), 붕괴열제거 (DHR : decay heat removal) 상실은 실제의 중요성에 비추어 경시되어 왔다. 이는 통상 붕괴열이 얼마되지 않아서 노심손상 전에 노심냉각을 재개할때까지의 충분한 시간적 여유가 있고 또한 노심냉각에 다양한 냉각방법이 이용될 수 있다는 잘못된 인식에서 비롯된다.

하지만 Diablo Canyon사건(1987. 4. 10) 이후 확률론적 안전성평가(PRA:probabilistic risk assessment)결과나 전력회사의 운전경험 결과 원자로 냉각재 계통내의 냉각재량이 감소된 상태에서 DHR의 운전시 DHR 계통의 기능상실 가능성이 매우 높으며, 만약 상실되는 경우 감지되지 않고 심각한 상황에 이를수 있으며 기존의 해석에서 4시간의 시간적 여유가 있다고 믿었으나 최악의 경우 1시간내에 노심파손을 야기할 수 있다는 것이 판명되었다. (1) 이러한 mid-loop 운전중 염두에 두어야 할 현상들은,

첫째, 냉각재 계통의 압력증가

둘째, 배관내 수면의 와동으로 인한 공기흡입

셋째, 로심냉각 계통(RCS:reactor coolant system)내의 수위측정계의 수위와 실제 DHR계통의 흡입구 부근에서의 수위차이 등이 있을 수 있다.

이중 우리의 관심을 끄는것은 계통내의 흡입구에서 자유수면 와동이다.

유체입자가 한 유동영역에서 어떤 축 주위를 회전하면서 유동할때 이 유동을 회전유동 혹은 와동류(vortex flow)라고 말하는데, 이 현상은 우리가 일상생활에서 흔히 접하는 현상으로서 물이 싱크대에서 빠져나갈때 수위가 배출구에서 어느 정도 낮은 수준에 이르면 소용돌이를 일으키며 공기가 빨려나가는 것이다. 이러한 유동이 댐이나 취수구, 화학 및 식품처리공정 등에서 발생할때 증기 또는 공기가 와동중심을 통하여 흡입되어 이상유동이 발생하게 되며 이것은 수력기계 계통의 성능저하를 가져온다.

이와 같은 현상은 원자로 hot leg에서 수위가 배관단면적의 어느 수준까지 내려오면 잔열제거계통

흡입구에서도 발생하게 된다. 즉 흡입구에서 소용돌이가 발생하고 이로 인해서 증기 및 공기가 계통에 흡입되게 된다. : 이렇게 되면 계통의 계기들의 값에 신뢰성이 상실되어 운전자로 하여금 오작동과 오판을 불러 일으키고 기포율이 5% 이상의 공기가 유입되면 계통의 펌프성능이 급격히 저하되고 10% 이상이면 펌프가 정지하여 결국 계통상실을 유발한다.

이러한 심각성에 입각하여 미국 NRC(2)는 이에 대한 긴급조치를 취하도록 전력회사에 지시한 바 있으며 이러한 붕괴열제거 상실사고방지를 위해서 계속적인 냉각재량 및 온도 감시체계 강화를 지시한 바 있다.

한편 이 문제와 관련된 연구로는 토목공학 분야인 댐 취수구에서의 공기흡입이나 화학공장 및 식품공장에서 원료저장탱크의 공기흡입 등의 펌프의 성능저하나 계통상의 문제들에 관한 연구가 이론이나 실험을 통해서 수행되었다. 이들 결과는 대체적으로 어떤 유동조건 하에서 공기흡입이 일어나는 수위가 플라우드수와 밀접하다는 것이다. 또한 본 문제와 직접 관련이 있는 원자로 배관에서와 같은 배관계통 내에서 자유수면 와동문제는 미국의 웨스팅하우스사가 자금을 지원하여 수행한 유일한 실험연구(3)가 있으며 이는 흡입관의 각도와 유체의 표면장력, 점성계수 등이 와동에 미치는 영향을 중점적으로 조사하였다. 그 결과 흡입관의 흡입각도가 와동에 큰 영향을 미치지 않으며 따라서 해결책이 되지 못한다는 사실과 표면장력과 점성계수 효과는 무시할 수 있음을 밝혔다. 단지 와동을 지배하는 변수는 다른 연구자들의 결과와 마찬가지로 프라우드수인 것을 확인하였다. 하지만 축소비가 너무 커서 (축소비가 10정도임) 신뢰성이 떨어지며 공기흡입으로 인한 계통상실 방지를 위한 대책을 제시하지 못하였다. 또한 국내의 연구(4)는 원자력 연구소에서 수행되었는데 이것은 A.J. Odgaard Model(5)을 일부 수정하여 전산기로 계산한 결과를 웨스팅하우스 실험과 단순비교한 것으로 원형탱크에 적용하는 모델이므로 배관에 적용 가능하다는 확고한 근거가 희박하며 경향도 일관성이 결여되어 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 원자력 발전소중 영광 3,4호기의 설계자료를 토대로 1/6크기로 축소된 모델실험을 통해서 공기흡입이 발생하는 임계수위를 결정하는 상관식을 개발하였으며 또한 공기흡입구를 reducer type으로 개선함으로써 공기흡입을

방지할 수 있음을 밝혔다.

2. 지배방정식 및 무차원 변수

2.1 지배방정식

자유수면 와동을 지배하는 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

우선, 유체유동은 비압축성, 정상상태라고 가정하면 운동방정식은,

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g}$$

으로 표시할 수 있고, 경계조건은 공기핵 근방의 액체와 기체의 경계면에서 압력조건인 $P - P_0 = -\frac{2\sigma}{r_c}(r \rightarrow 0)$ 와 공기핵으로부터 멀리 떨어진 곳에서의 압력조건인 $\Delta P = P - P_0 = \rho g H (r \rightarrow \infty)$ 이다. 여기서 P_0 는 대기면의 압력이고 r_c 는 공기핵의 반경, σ 는 표면장력을 r 은 와동의 핵으로부터 반경방향의 거리를 말하며 H 는 배관하단부터의 수위를 말한다.

위의 지배방정식을 $V^* = \frac{V}{U}$, $r^* = \frac{r}{L}$, $P^* = \frac{P}{\rho U^2}$, $r_c = \frac{\bar{U}^2}{g}$ 등으로 치환하여 무차원방정식으로 정리하면,

· 운동방정식

$$V^* \cdot \nabla V^* = \nabla P^* + \frac{1}{Re} \nabla^2 V^* + \frac{1}{Fr^2},$$

· 경계조건

$$\Delta P^* = -\frac{1}{We Fr^2} (r^* \rightarrow 0),$$

$$\Delta P^* = \frac{H/L}{Fr^2} (r^* \rightarrow \infty)$$

이 된다.

여기서, $Re = \frac{\rho L \bar{U}}{\mu}$, $Fr^2 = \frac{\bar{U}^2}{Lg}$, $We = \frac{\bar{U}^2 L \rho}{\sigma}$ 로 정의되며 \bar{U} , L 는 각각 평균속도, 대표길이(흡입관의 반경 d) 등을 나타낸다. 한편, Re , Fr , We 는 무차원수인 레이놀즈수, 프라우드수, 웨버수이다.

위의 결과로부터 자유수면 와동을 지배하는 무차원 수들의 관계는 $H/d = f(Fr, Re, We)$ 가 됨을 알 수 있다.

2.2 무차원 변수

자유와류에 영향을 미치는 무차원 변수는 위에서

유도된 바와 같이 프라우드수, 레이놀즈수, 웨버수 등이 있다.

이들 세 가지 무차원 변수를 모두 맞추어서 실험을 하기는 불가능하므로 이들중 와동을 주로 지배하는 하나의 변수를 찾아내는 것이 바람직하다(실제로 발전소 운전조건에서는 Fr 만이 주요 무차원 변수이다). 이의 근거는 다음과 같다.

와류에 공기핵이 발생하기 전까지(와동핵의 반경이 매우 큼) 웨버수는 거의 영향이 없다. 왜냐하면 지배방정식에서 볼 수 있듯이 표면장력에 의한 힘

은 $\frac{2\sigma}{r}$ 이므로 r 이 크면 표면장력에 의한 힘은 매우 작기 때문이다. 다른 연구자들에 의하면 웨버수는 $7.2 \times 10^2 < We$ 의 범위에서 와동에 무관함을 밝혔다.^{(5),(6)} 본 연구의 원자력발전소 *DHR*계통의 운전조건 하에서 웨버수가 3.5×10^4 이상이고 실험장치의 웨버수가 $5.7 \times 10^2 \sim 3.5 \times 10^3$ 로 계산되었으므로 이를 무시하였다. 결국 Fr 수와 Re 수가 주로 지배하게 된다.⁽⁷⁾ 한편 레이놀즈수가 10^5 이상이면 이의 효과도 무시할 수 있다고 밝혀졌다. 실제 원자로 운전조건과 동일한 조건 및 실험조건에서 레이놀즈수는 $10^5 \sim 10^6$ 범위에 있으므로 이때 레이놀즈수의 영향을 일차적으로 무시한다.⁽⁸⁾

따라서 프라우드수만을 맞추는 상사법칙이 성립하도록 실험을 하고⁽⁹⁾ 위의 조건은 배관이 아닌 수조에서의 조건이므로 배관내에서는 레이놀즈수의 효과가 증폭될 수 있으므로 이의 영향을 보기 위해 유량과 온도를 실제조건보다 증가시키는 실험을 수행하였다. 또한 축척비는 최대한으로 적게 하여 레이놀즈수의 불일치로 인한 영향을 줄이도록 하였다.^{(10),(11),(12)}

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험은 원자력 발전소에서 연료교체시에 *RCS*를 통해서 잔열을 제거하는 과정에서 발생하는 와류현상에 대한 고찰을 위한 것으로 수조탱크, 전원 조절장치, hot leg 모사관, 흡입배관 및 펌프, 계측장치 등으로 구성된다(Fig. 1)

우선, 수조탱크는 실험시에 hot leg 모사관과 펌프에 물을 공급하고 실제 발전소 냉각재 계통내의 원자로 역할을 하는 것으로 지름 60 cm, 높이 90 cm의 철재원통형탱크이다. 실험이 대기압 상태에서 수행되므로 탱크의 상부는 대기중에 노출되어

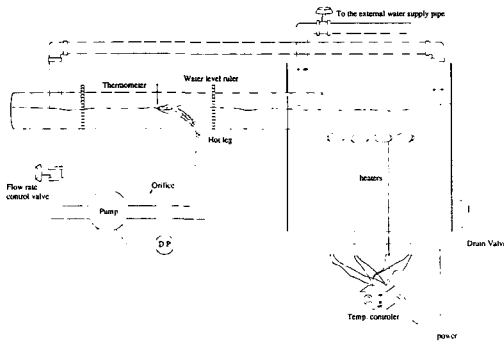
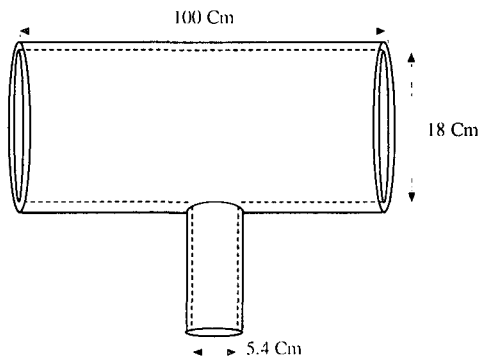
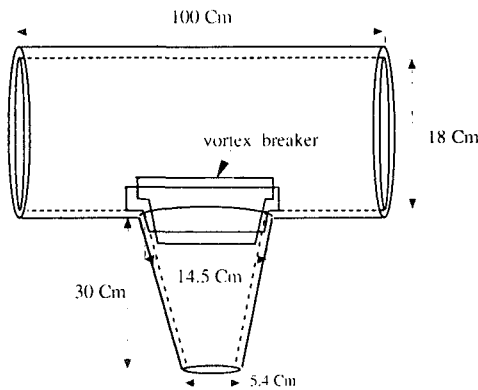


Fig. 1 Schematic diagram of test loop



(A) T-type suction pipe



(B) Reducer type suction pipe

Fig. 2 Types of suction pipe

있다. 내부에는 펌프를 통과한 물이 다시 수조탱크 안에 들어올때 수위의 안정과 출렁거림의 영향을 줄이기 위하여 지름 45 cm, 높이 60 cm 정도의 원통형 다공벽(원충벽)을 만들어 물이 이 벽을 통과하는 동안 요동이 줄어들어 다음 안쪽으로 들어와 다시 hot leg 으로 흘러 들어가도록 설계하였다.

Hot leg 모사관은 배관내에서 와동현상의 관찰이 용이하도록 투명한 아크릴관(내경 18 cm, 길이 100 cm) 4개를 직렬로 연결하여 냉각재 계통의 hot leg를 만들고 잔열제거 계통의 흡입관의 모형을 만들었다. 실제 원자로 mid-loop 운전시 hot leg 한쪽 끝은 댐처럼 막혀 있으므로 이와 유사하게 관의 한쪽을 막고 다른 한 쪽은 수조탱크와 연결하였다. 잔열제거 계통의 흡입모사관은 5.4 cm의 내경을 갖는 아크릴 관으로 원자로 모사탱크쪽으로 부터 260 cm 정도 떨어진 곳 (폐쇄 쪽으로부터 140 m 정도 떨어진 곳)에서 hot leg 모사관과 수직으로 연결되어 펌프로 통한다. 이와 같이 흡입구를 원자로 모사탱크로 부터 15D(관의 내경)이상 떨어지게 설치하여 유동이 입구영향을 덜 받도록 하였다.

흡입배관은 본 실험의 가장 중요한 부분으로 원자로의 hot leg내 잔열제거 계통의 흡입구를 모사하기 위한 것이며, 본 실험에서는 영광 3,4호기의 실체를 모사하기 위한 수직 단순 T형 흡입관과 mid-loop 운전시 공기흡입을 방지하기 위한 개선책의 하나로 reducer type의 흡입관을 만들어서 별도의 실험을 수행하였다. 단순 T형의 흡입관은 내경이 5.4 cm, 길이 100 cm의 아크릴 관으로 하였으며 reducer type은 입구(내경이 큰 쪽)의 내경이 14.5 cm이고 길이는 30 cm, 출구는 5.4 cm의 깔때기 형으로 입구에서 유입속도를 줄이므로 와동을 약화시키기 위함이다(Fig.2).

실험장치 내의 설치된 유일한 유동의 동력원인 펌프는 수직 1단 원심펌프로 입출구 내경이 모두 7.5 cm이고 출력은 0.75마력, RPM은 1750인 청우공업사 제품으로 영광 3,4호기의 원자로 냉각재 펌프를 1/10으로 모사한 펌프이다. 총 수두는 약 3 m 이고 최대 유량은 0.0055 m³/sec이다.

유량은 ASME 규격에 맞추어 황동으로 제작된 오리피스를 사용하여 측정하였다. 제작상의 오차를 보정하기 위하여 보정작업을 수행하였고, 그 결과 오리피스의 방출계수(discharge coefficient)는 0.604~0.657정도로 나타났다. U자관 차압계에는 수은이 사용되었다.

기타 물의 유량을 조절하기 위하여 7.5 cm규격의 게이트밸브 1개와 수온 측정용 온도계 1개, 가열기, 수위 측정용 자 등이 사용되었다.

3.2 실험방법

우선, 외부로부터 장치에 물을 공급하여 수위를

Table 1 Comparison of the prototype with the model

Item	Reactor System (Yonggang 3 & 4)	Experiment apparatus
Flow rate	0.2523 m ³ /sec	0.002~0.005 m ³ /sec
Hot leg pipe ID	1.0668 m	0.18m
RHR pipe	0 3258 m	0.054 m
Temp	50~60°C	Room temp(10~17°C)~70°C

실험하고자 하는 위치보다 약간 위나 아래로 맞춘 다음 밸브를 잠그고 펌프를 작동하여 충분한 시간이 경과한 후(거의 정상상태에 도달한 뒤), 배수밸브를 이용하여 매우 천천히(1 GPM 이하) 수위를 일정한 위치까지 맞추어 밸브를 잠그고 공기흡입 유무를 관찰하는 실험을 반복한다. 이 수위에서 공기흡입이 없으면 0.1 cm~0.2 cm 정도 다시 낮추어 공기흡입이 이루어질 때까지 계속적으로 수위를 낮춘다. 일단 공기흡입이 이루어지면 펌프를 끄고 계통을 정지시킨 후 같은 실험을 반복하여 확인한다. 상온실험은 15회 실험하여 평균하였고 고온(30°C 이상)에서는 5회 평균하였다. 이때 배관안으로 와동핵이 들어가기 시작하는 때의 수위를 임계수위로 정하였다. 한편, 와동의 형태, 공기흡입 유무는 실험관이 투명한 아크릴이므로 육안관찰로도 충분하였다.

실험은 크게 세 부분으로 나누어 수행하였다.

첫 부분은 영광 3, 4호기의 실물과 동형의 흡입구에서 유량(프라우드수)에 따른 공기 흡입수위(무차원 수위 : H/d)의 관계를 결정짓는 실험이고, 둘째 부분은 레이놀즈수의 효과를 알아보기 위해 물의 온도를 10°C~70°C 범위로 유지하여 행한 실험이며, 나머지 부분은 흡입구의 조건을 reducer type으로 변경하여 수행한 실험이다.

본 실험에 사용된 유량은 실제 원자로 계통내의 유량(PSAR 상의 수치)과 유사성(프라우드수)이 성립하도록 0.002~0.005 m³/sec으로 하였으며 온도는 10°C~70°C 범위로 조절하였다. 이때의 프라우드수는 1.20~3.00이다(Table 1).

4. 실험결과 및 고찰

4.1 결과

앞에서 언급한 바와 같이 T자형, reducer type

에 대해 유속과 임계수위의 관계를 알아낼 수 있도록 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 영광 3, 4호기 모델을 축소한 형태인 T자 형의 경우에 대하여 중점적으로 실험을 실시했다. 실험에서 임계수위와 유량과의 관계는 물론 와동의 물리적현상 및 특성을 관찰하였다. (Fig. 3)

그림에서 (a), (b)는 와동은 생기지 않으나 주입구에서 흡입력에 의해 물이 흡입되므로 와동이 점차 발달해 나가는 과정의 초기단계이고, 이 단계가 발전하면 (c)와 같이 와동핵이 흡입배관 입구에 도달하여 흡입되게 된다. 본 실험에서는 (e)의 상태를 기준한계치로 잡았다.

배관계통내의 T자형 흡입관 입구에서 자유수면 와동에 관련된 현상들을 요약하면 와동은 매우 불

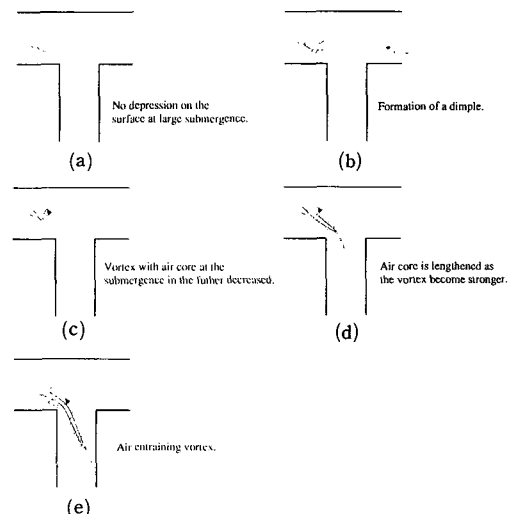


Fig. 3 Vortex developing stages in a T-types suction pipe

규칙하고 연속적이지 못하며 생성, 소멸을 거듭하며 이러한 주기도 일정치 못하다. 또한 관내의 와동은 흡입구 수직 상부에서 일어나지 않고 하류쪽으로 1.5D 정도(유량에 따라 약간 차이 있음) 치우쳐 형성된다. 와동핵이 흡입구쪽으로 빨리 들어오므로 약간 비스듬히 누운상태로 형성된다. 또한 와동은 외부간섭에 매우 민감하다. 실험에서 와동은 펌프의 작동개시, 밸브의 개폐 등에 매우 민감하게 영향을 받음이 밝혀졌다.

이러한 외부섭동에 의해 수면의 파나 그 밖의 조건이 변하게 되므로 이 경우 어느 순간에 평균수위보다 낮아질 수 있으며 이로 인해 이 순간의 와동이 이후 와동거동에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 심지어는 수위를 높이면서 하는 실험이 낮추면서 하는 실험보다 높은 수위에서 공기가 흡입됨을 볼 수 있었다. 이는 와동이 낮은 수위에서 발생하여 소멸되지 않고 잠재하여 나타나지 않다가 이후에 다시 영향을 주는 것으로 판단된다. 본 연구는 원자력 발전소의 안전과 관련된 문제이므로 보수성을 유지하기 위해서 수위를 올리면서 실험을 수행하여 임계수위가 높게 나타나는 임계수위 결정방식을 채택하였다.

다음으로 수위가 높고 낮음에 따라 와동형태와 와동으로 인한 공기흡입 모양이 상당히 다른 것이 발견되었다. 낮은 수위(적은유량)에서의 와동은 상당히 연속적이고 자주 일어나며 와동핵도 작고 와동으로 인한 공기흡입도 소규모인 반면 수위가 높은 곳에서 와동(많은유량)은 빈도가 매우 드문 반면 와동핵이 크기 때문에 일어나면 대량 공기흡입

이 이루어짐이 밝혀졌다.

유속을 일정하게 맞추고 물의 높이를 점차 낮추는 경우 처음에는 자유수면을 깨뜨리며 수면의 파동만이 나타나다가 점차 와동의 핵이 생성, 발달하면서 물이 회전하며 핵의 중심으로 공기가 흡입되는 현상이 일어난다(유속의 변화에 따르는 임계수위의 변화값은 Table 2에 나타나 있다).

Reducer 형은 흡입구 부근에서 유속을 떨어뜨리므로 와동형성을 예방하여 공기의 유입을 줄이기 위하여 고안된 것이다. 이때의 와동현상의 특징은 T자형과 상이함이 발견되었다. 즉, Reducer형의 흡입관에서는 와동이 현저히 줄어들어 물론 공기핵이 커지며, 공기핵에서 떨어진 기포도 흡입력보다는 공기의 부력이 크므로 다시 흡입구 밖으로 빠져나오는 것이 발견되었다.

실험을 통한 흡입관의 설계 개선효과를 살펴보면, 흡입관 입구를 T자형에서 reducer type과 vortex breaker를 설치한 reducer type으로 대체한 경우 모든 유량에서 와동으로 인한 공기흡입을 획기적으로 줄일 수가 있었다. Reducer type의 경우 0.0044, 0.005 m³/sec에서만 와동으로 인한 직접적인 공기흡입이 일어났을 뿐, 그 밖의 구간에서는 와동으로 인한 공기흡입은 나타나지 않았다.(Fig.4)

또한 vortex breaker를 설치한 경우 와동으로 인한 공기흡입이 일어나지 않았다. 특히 낮은 수위에서조차도 상류에서 유입된 물이 폭포처럼 떨어지므로 와류의 형태로는 발달하지 못하게 된다(Fig.5). 따라서 아주 낮은 수위(유량을 충족시킬 수 없는 수위)를 제외하고는 공기흡입이 일어나지

Table 2 Results of the experiment () : avg. temperature

Type (m ³ /sec) Flow Rate	T-type				Reducer type	Reducer type with vortex breaker
	at 15°C	at 30°C	at 50°C	at 70°C		
0.0020	7.31(14.1)	7.55(30.7)	7.67(49.9)	7.29(69.8)	*	*
0.0025	7.86(13.9)	8.02(30.2)	8.29(50.1)	8.41(70.3)	*	*
0.0032	8.59(13.8)	8.83(30.5)	8.96(50.0)	8.89(70.4)	*	*
0.0038	9.29(13.9)	9.69(31.1)	9.83(50.6)	9.74(69.3)	*	*
0.0044	9.91(13.8)	10.31(29.9)	10.41(50.2)	10.31(70.5)	8.23(10.5)	*
0.0050	10.79(13.7)	10.71(30.3)	10.82(50.6)	10.71(70.0)	10.10(10.7)	*

* : Air entrainment does not occur

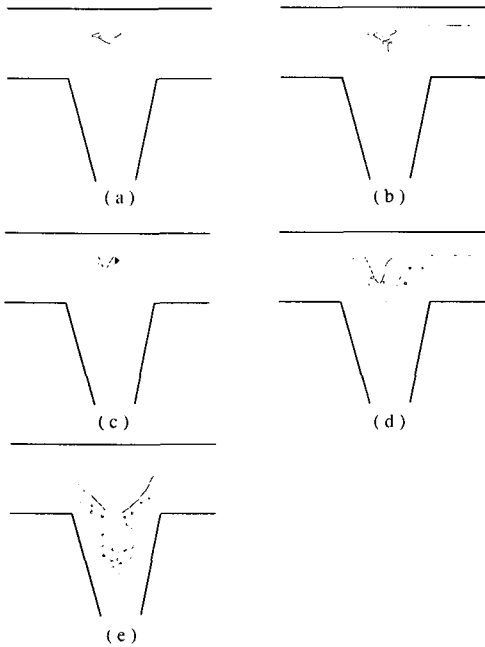


Fig. 4 Vortex developing stages in a reducer type suction pipe

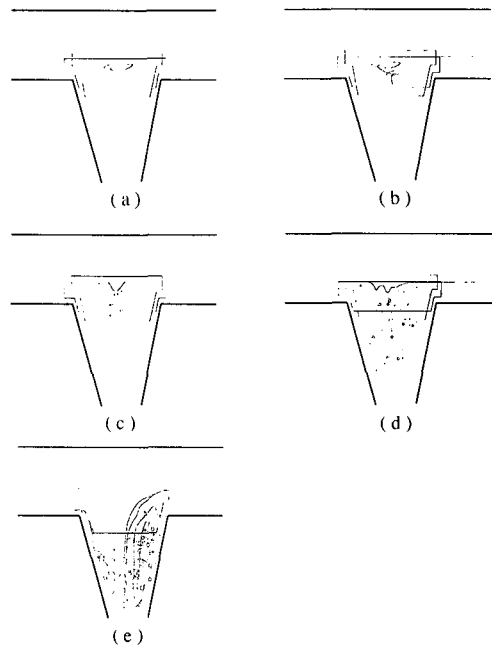


Fig. 5 Vortex developing stages in a reducer type suction pipe with vortex breaker

않았다.

레이놀즈수가 임계값에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상온(약 15°C)과 30°C, 50°C, 70°C로 물을 가열하면서 실험하였다. Table 3과 Fig.6에서 보는 것과 같이 저유량에서는 레이놀즈수가 3배 증가함에 따라 약 10%의 임계수위 증가를 보이거나 높은 유량에서는 별 영향이 없이 H/d 와 레이놀즈수와의 관계는 직선으로 일정하게 나타나 다른 연구

자들의 결과와 마찬가지로 크게 영향을 미치지 않는다는 결과를 얻었다.

다른 연구자의 결과와 본 연구결과를 토대로 F_r 수만이 자유와동에 영향을 미치는 주요변수이므로 Table 2,3에 나타난 결과를 이용하여 무차원수 H/d 와 F_r 수와의 관계를 그래프를 통하여 나타내었다.(Fig. 7, 8, 9) 각각의 점들은 실험치를 나타내고, 원으로 표시된 부분은 와동이 없이 작은 기포가 소

Table 3 Critical water level data in terms of H/d for T-type, Reducer types (with and without vortex breaker)

Type (m ³ /sec) Flow rate	Froude No	T-type				Reducer type	Reducer type with vortex breaker
		at 15°C	at 30°C	at 50°C	at 70°C		
0.0020	1.2001	1.359	1.452	1.475	1.402	*	*
0.0025	1.5069	1.465	1.542	1.594	1.617	*	*
0.0032	1.9200	1.590	1.698	1.723	1.710	*	*
0.0038	2.2800	1.719	1.863	1.890	1.783	*	*
0.0044	2.6726	1.835	1.967	2.002	1.983	1.5230	*
0.0050	3.0001	1.999	2.059	2.081	2.060	1.8710	*

* : Air entrainment does not occur

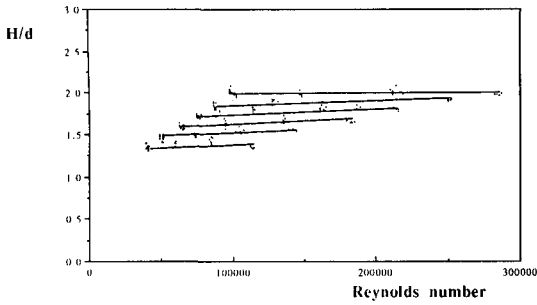


Fig. 6 A Relation between H/d and Reynolds No. in a T-type suction pipe

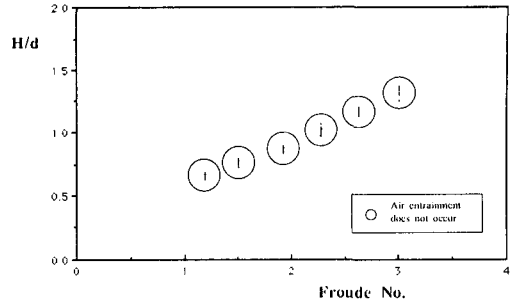


Fig. 8 A relation between H/d and Froude No. in a reducer type suction pipe with vortex breaker

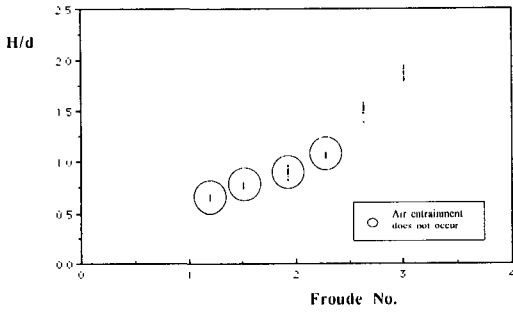


Fig. 7 A Relation between H/d and Froude No. in a reducer type suction pipe

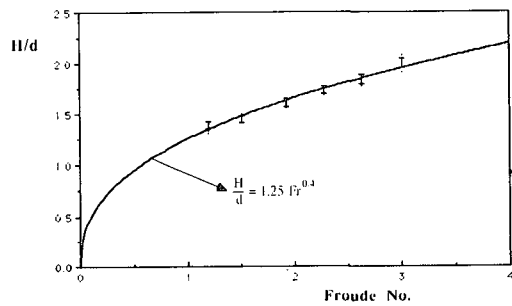


Fig. 9 Correlation equation in a T-type suction pipe with the uncertainty analysis

량흡입된 경우로 공기흡입이 없다고 할 수 있는 경우이다. T자형 흡입관에 관한 결과에서 기울기는 프라우드수의 상수승에 해당하는 값으로 나타나는 것을 알 수가 있으므로 이것으로 부터 T자형 흡입관의 상관식을 나타내 보았다.

여기서 와동으로 인한 잔열제거 계통내의 공기흡입 수위를 임계수위로 정의하며 이 임계수위는 $H/d = CF_r^n$ 으로 표시된다. 여기서 $C = 1.25$, $n = 0.4$ 이다.

또한 이 값들은 실험을 통한 결과이므로 값들에 대한 불확실성 분석을 위하여 95% 신뢰도를 갖는 1-distribution의 값을 대입하여 오차범위를 설정하였다 (Fig.8) 여기서 각각의 값들은 I자형으로 표시된 구간내에서 95%의 신뢰도를 갖게 된다. 본 실험에서 실험치에 대한 각 구간의 표준편차는 0.03 ~ 0.08로 나타났다.

4.2 고찰

T자형 흡입관은 와동이 흡입구의 수직상단에서 발생하지 않고 흡입구 중심부에서 유동의 하류쪽으

로 1.5D 정도 치우친 곳에서 발생한다. 이것은 유동의 관성에 의한 것으로 판단되며 reducer type을 사용하면 와동 중심부가 흡입관의 거의 수직상단에 발생하며 이는 입구면적이 넓어지므로 입구근방에서 유동의 속도가 줄어들어 그만큼 관성이 줄어들기 때문이다.

와동은 연속적이고 계속적으로 생기는 것이 아니고 불규칙하고 다양하게 발생 소멸을 거듭하며 와동 핵의 깊이도 다양, 불규칙하다. 이 중 와동핵의 깊이가 흡입구의 입구에 도달하게 되면 공기의 흡입이 발생한다. 또한 와동이 일어나는 임계수위가 명확하게 일정치 않고 매 번 10% 정도 내에서 변동이 있었으며 수위를 점점 높이면 공기흡입이 이루어지는 와동의 주기가 점점 길어지는 경향이 있다. 따라서 공기흡입이 이루어지지 않는 수위를 결정하는 기준이 되는 빈도(주기)를 측정하기가 곤란했다. 따라서 본 실험에서는 공기흡입이 다양으로 일어나서 펌프가 멈추는 수위보다는 공기가 소량이라도 흡입구로 빨려 들어가는 수위를 임계수위로 하였다. 이렇게 함으로써 원자로 안전성 측면에서

보수성을 유지할 수 있고 임계수위의 애매함도 해소할 수 있다.

또한, 와동의 강도는 수면의 높이와 유량에 대해 민감할 뿐만 아니라 실험장치 계통내의 미세한 섭동에도 영향을 받는 것이 밝혀졌다. 특히 펌프의 작동개시나 밸브의 열고 닫음(유량조절을 위해)에도 민감하게 반응한다. 또한 높은 수위에서 낮은 수위로, 낮은 수위에서 높은 수위로 수위를 변경하면서 실험을 하였을때 같은 유량에 대해 공기흡입이 일어나는 수면의 높이가 달라지는 것을 발견하였다. 실험장치에서 ΔH 는 0.8 cm 정도(hot leg 모형배관의 9% 정도) 차이가 있다.

펌프의 작동개시나 밸브의 개폐시 일어나는 수면의 파(wave)는 일시적인 수면높이의 변화를 가져와 와동의 강도와 와동 핵의 깊이에 많은 영향을 미치게 된다. 이로 인해서 고요한 수면에서 보다 높은 수위에서도 공기흡입이 일어남을 볼 수 있었다. 이것은 평균수위는 높으나 수면에 파가 형성되면 순간적으로 힘의 균형이 깨지고 또한 수면이 낮아지며 이로 인해서 와동의 강도가 급격히 증가하여 공기흡입이 이루어진다.

낮은 높이의 수면에서 발생한 와동에 의한 공기흡입은 자주 연속적으로 일어나나 높은 수면에서의 공기흡입은 불규칙하고 불연속적으로 드문 드문(10분 정도 주기) 일어난다. 그렇지만 높은 수위에서의 공기흡입시는 와동 핵도 크고 물의 유량도 많기 때문에 한꺼번에 많은 양의 공기흡입이 일어난다.

Reducer type에서는 흡입구에서의 속도저하로 대부분의 운전유량에 공기흡입이 발생하지 않았으며 흡입되더라도 저유속으로 인한 약한 흡입력으로 빨아들이지 못하고 공기의 부력에 의해 기포가 다시 올라오게 되므로 실질적인 공기흡입은 거의 일어나지 않는다. 특히 저수위 고유속에서는 흡입구 쪽으로 물이 폭포처럼 떨어지므로 유량을 충족시킬 수 없는 수위를 제외하고는 와동이 일어나지 않으며 공기흡입도 발생하지 않는다.

5. 결론

유속, 흡입관의 형태에 변화를 주면서 와동의 임계치에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 자유수면 와동은 외부의 섭동에 민감한 영향을 받으며 특히 펌프의 작동개시, 밸브의 개폐 등

운전상태의 여러 경계조건에 크게 좌우된다. 또한 와동은 매우 불규칙적이고 연속적이지 못하고 생성, 소멸을 거듭하며, 이 생성, 소멸의 주기도 일정치 못하다.

(2) 레이놀즈수가 10^5 이상이고 웨버수가 10^2 이상인 배관내의 자유수면 와동의 유동조건에서 와동을 지배하는 주요 무차원수는 프라우드이다.

(3) 와동으로 인한 잔열제거 계통내의 공기흡입 수위를 임계수위로 정하여 이 임계수위를 무차원수 H/d 와 F_r 로 나타내면 $H/d = CF_r^n$ 으로 표시된다. 본 실험에서는 $C=1.25$, $n=0.4$ 으로 나타났다.

(4) 흡입관 입구를 T자형에서 reducer type과 vortex breaker를 설치한 reducer type으로 바꾼 경우 와동이 현저하게 줄었고 정격유량에 육박하는 유속에서만 와동으로 인한 공기흡입이 발생하였다. 특히 vortex breaker를 설치하면 와동으로 인한 공기흡입을 대부분 방지할 수 있다.

후기

본 연구는 조선대, 경희대에서 수탁과제로 수행된 것입니다.

참고문헌

- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1988, "To all Holders of Operating Licenses of Construction Permits for Pressurized Water Reactors," Loss of Decay Heat Removal (Generic Letter No 88-17), pp. 1~42.
- (2) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1987, "Loss of Residual Heat Removal System, Diablo Canyon, unit2, April 10, 1987, NUREG-1269, pp.89~104
- (3) Andreychek, T.S., 1988, Loss of RHRS Cooling while the RCS is Partially Filled, Rev. 0, WCAP-11916, Westinghouse Electric Corporation Power Systems, pp.1~49.
- (4) 김환열, 1990, "Mid-Loop운전시 정지냉각기능 상실에 대한 고찰," 한국원자력 연구소, 선임승격논문, pp.1~60.
- (5) Odgaard, A. Jacob, 1986, "Free-Surface Air Core Vortex," Journal of Hydraulics Engineer-

- ing, 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, Vol. 104, H.Y 10, Proc. paper 14104, pp.1429~1445.
- (7) Anwar, H.O., 1965, "Flow in a Free Vortex," Journal of Water Power, Vol.4, No.1, pp.153~161.
- (8) Marris, A.W., 1967, "Theory of the Bathtub Vortex," Journal of Applied Mechanics, Paper No. 66-Wa/APM-11, pp.11~15.
- (9) Sharp, J.J., 1972, "Hydraulic Modeling," Addison Wesley, Boston, pp.77~95.
- (10) Dagget, Larry L. Keulegan, and Gabris, H. 1974, "Similitude in Free Surface Vortex Formations," Journal of the Hydraulics Division of ASCE, Vol.100, No.HY 11, Proc. Paper 10941, pp.1565~1581.
- (11) Heckcr, George E., 1981, "Model-Prototype Commparision of Free Surface Vortices," Journal of the Hydraulics Division of ASCE, Vol. 107, No. HY 10, pp. 1243~1259
- (12) Padonabhan, Mahadevan, Hecker, George E., 1984, "Scale Effects in Sump Pump Models," The Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No 11, pp.1540~1556.
- (13) Zielinski, Paul B., et al. 1968, "Effects of Viscosity On Vortex-Orifice Flow," Journal of the Hydraulics Division of ASCE, Vol.94, No. HY 3, Proc. Paper 5956, pp.745~752.
- (14) Linford, A., 1965, "The Application of Models to Hydraulic Engineering Air Entraining Vortices," Water and Water Engineering, Vol. 2, pp.105~110