

수공구조물에 영향을 미치는 공동현상에 관한 연구  
(Cavitation Concerns for Hydraulic Structures)

책임연구원 : 배 덕 흐

(창원대학교 토목공학과 교수)

연 구 원 : 이 상 태

(건설교통부 하천계획과 시설서기관)

김 창 길

(유신코퍼레이션 전무이사)

김 국 일

(동부엔지니어링 상무이사)



## 제 1 장 서 론

유체 흐름에 있어서 유체의 압력이 증기압보다 낮아지게 되면 기포(water vapor)가 형성되게 된다. 이 때 형성된 기포가 유체 흐름의 압력이 높은 위치로 이동하게 되면 기포가 파괴되어 국부적으로 높은 압력을 발생하게 되는데 이와 같은 현상을 공동현상이라 한다. 공동현상에 관한 연구 초기에는 펌프, 터빈, 선박의 프로펠러 등 기계조선 공학적인 문제에서 많이 진행되었다. 그러나 1930년대 중반 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers), 미개척국(U.S. Bureau of Reclamation, USBR), TVA(Tennessee Valley Authority) 및 기타 기관의 댐 건설 사업이 시작되면서 공동현상은 고속 흐름이 존재하는 수공구조물에도 주요 관심사가 되었다(Brown, 1963). 즉 이와 같은 공동현상이 수공구조물의 고체 경계면 부근에서 발생되게 되면 경계면에 위치하는 재료의 미소부분들이 제거되어 구조물에 심각한 영향을 미칠 수도 있다. 특히 콘크리트는 공동현상에 대한 저항력이 약하기 때문에 콘크리트 구조물의 경우 공동현상이 구조물의 특정 부위에 장시간 지속되면 심한 손상을 초래할 수도 있다.

공동현상은 저낙차의 수공구조물에도 발생할 수 있지만, 높이 75m 이상의 고낙차 수공 구조물에서는 공동현상이 구조물에 발생할 수 있는 여러 가지 주된 문제 가운데 하나이다. 일반적으로 공동현상이 발생하는 전형적인 유속의 범위는 35m/sec 정도로 알려져 있으나, 유속이 15m/sec 이상이면 공동현상이 발생 할 수 있는 것으로 알려져 있다.

지난 반세기 동안 수공 구조물의 설계시 공동현상에 대한 영향을 고려하지 않았기 때문에 구조물이 파괴된 사례가 많이 있다. 그림 1은 공동현상이 수공구조물에 미치는 영향을 단적으로 보여 주는 예시이다. 이와 같이 공동현상은 수공구조물의 설계 및 운영에서 중요한 문제중의 하나로 알려져 있으나 국내의 수공학 분야에서는 공동현상에 대한 이론 정립 및 문헌정리가 미비한 실정이다.

따라서 본 과업에서는 공동현상의 원인과 주요 지배인자 등을 포함하는 이론적 고찰, 공동현상이 발생할 수 있는 수공구조물의 종류 및 이에 대한 공학적인 해결 방안, 발생 사례 등을 조사하고자 한다. 특히 우리 나라의 경우 수자원총량은 연간 1,267억톤이 공급되고 있으나 이중 570억톤은 증발되고, 가용한 677억톤 가운데도 강수량의 계절적 편기 및 댐 등 저류시설의 부족으로 1994년 말 현재 연중 가용량은 수자원 총량의 16.6%에 해당하는 210억톤에 불과한 실정이어서 추정되는 1년 수요량 301억톤에 훨씬 못 미치고 있는 실정이다. 또한 향후 산업과 경제성장으로 물 수요가 서기 2001년에는 337억톤, 2006년에는 350억톤 그리고 2011년에는 367억톤으로 수자원 이용량은 매년 증가될 것으로 예상되어 많은 수공구조물의 건설이 예상되고 있다. 이와 같은 관점에서 본 과업은 향후 수공구조물의 설계 및 운영시 참고가 될 수 있으리라 생각된다.



그림 1. 공동현상에 의한 콘크리트 구조물의 피해 사례

## 제 2 장 공동현상 이론

어떤 특정 수공구조물에서 발생될 수 있는 공동현상의 원인 및 대책을 논의하기 전에 공동현상에 대한 정의, 종류, 주된 특징 등 공동현상의 제반 사항에 관해서 이해하는 것도 의미 있을 것이다. 본 절에서는 이들 사항에 대해서 기술하고자 한다. 보다 구체적인 내용은 Knapp et al.(1970)을 참고하기 바란다.

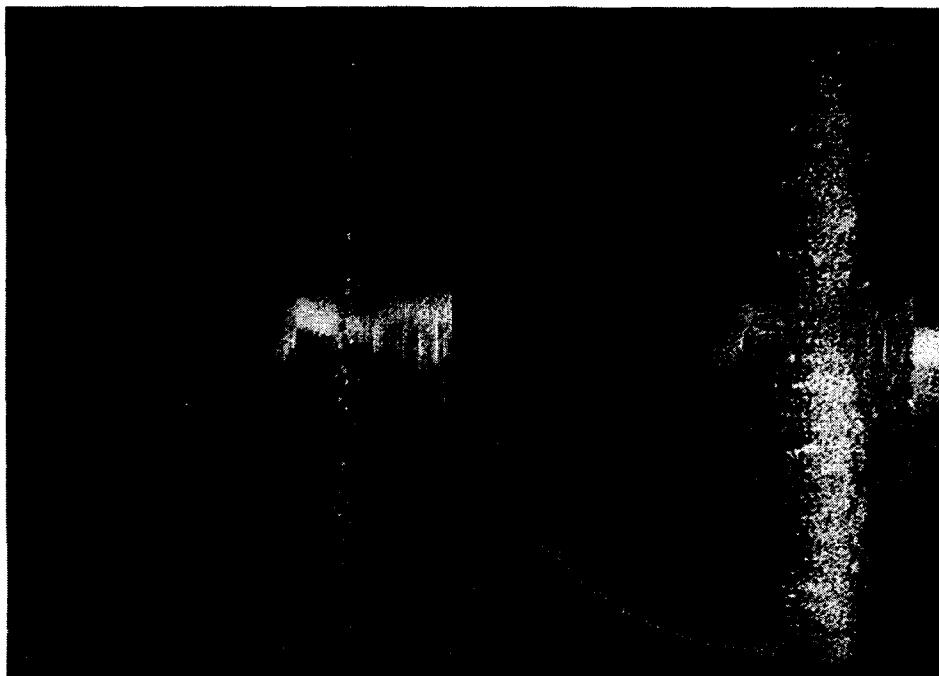
### 2.1 공동현상의 정의

유체의 흐름조건에서 유체의 압력이 증기압(vapor pressure)보다 낮아지게 되면 기포, 즉 공동(cavities)이 생기게 된다. 이때 발생된 공동이 유체압력이 높은 지역으로 이동하게 되면 공동은 압축되고 결국은 파괴되어 그 결과 국부적인 높은 압력이 발생된다. 이와 같은 현상을 공동현상이라 한다.

기포 혹은 공동이 형성되는 원리는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 어떤 특정 유체를 일정한 온도 하에서 압력을 증기압 이하로 줄였을 때 발생되며, 또 다른 하나는 일정한 압력 하에서 열을 가할 때 생기게 된다. 여기서 압력강하에 의해서 기포가 발생하는 공동현상은 온도 증가 즉 열을 가했을 때 기포가 발생하는 끓음(boiling) 현상과는 구분된다. 이와 같이 본 과업은 압력 강하에 의한 기포형성, 즉 흐름조건에 따라 압력이 강하하는 동압력 강하(dynamical pressure drop)로 그 범위를 제한하고자 한다.

공동현상은 흐름조건에 따라 압력이 증기압보다 더 낮은 지역에서 발생하여 다시 압력이 높은 지역으로 이동하게 되면 기포는 압축되고 결국은 파괴되어 많은 에너지를 방출하게 된다. 그 에너지는 주위 유체나 경계면에 매우 높은 국부적인 압력으로 전달된다. 이와 같은 엄청난 압력은 공동 침식(cavitation erosion)으로 알려진 손상의 원인이 된다. 이와 같이 공동현상 문제를 생각할 때 항상 염두 해야 할 문제중의 하나는 공동현상은 속도변화율(velocity

gradient)에 의한 압력변화율(pressure gradient)과 관련되어 있다는 것이다. 이와 같은 속도변화 혹은 압력변화는 궁극적으로 하상의 지형적 변화에 의한 것이다. 구거(conduit), 수문, 터빈, 펌프 등과 같은 구조물에서의 공동현상은 접근의 난이성 때문에 쉽게 관찰할 수가 없지만, 그림 2에서와 같이 반구회전체(hemispherical body of revolution)에서의 공동현상은 쉽게 관찰이 가능하다. 그림 2(b)에서와 같이 발달된 공동현상(developed cavitation)이란 "foaming"이 잘 발달된 상태를 말하며, 이에 비해 그림 2(a)에서와 같이 초기 공동현상(incipient cavitation)이란 공동이 막 생기기 시작하여 파괴되는 것을 말한다.



(a) 초기 공동

(b) 발달된 공동

그림 2. 공동의 발달과정

## 2.2 공동의 분류

공동은 다양한 장소에서 여러 가지 형태로 관찰되므로 그 분류 방법도 여러 가지가 있다. 이들 중 공동을 공동의 발생위치 및 공동의 주된 물리적 특성에 따라 분류하면 다음과 같다(Knapp et al., 1970).

(1) Traveling Cavitation: 이는 그림 3에서와 같이 물의 흐름을 통해서 아주 미세한 개개의 일시적인 공동이 형성되어 유체의 이동과 함께 확장, 수축, 붕괴의 과정을 거치는 것을 말한다. 그림에서 각 프레임의 시간간격은 1/20,000초이며, 흐름은 우측에서 좌측 방향으로 흐르고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 공동이 형성되어 성장되는 구간은 부압변화율 구간(region of negative pressure gradients)이며, 그 후 공동이 수축되는 구간은 정압변화율 구간(region of positive pressure gradients)이다. 공동이 붕괴되는 지점이 국부적인 유체 압력이 증기압보다 크지는 지점을 나타낸다. 이와 같이 개개 공동의 연속적인 생성 및 파괴는 수격작용(waterhammer)과 같은 압력진동(pressure pulsation)을 초래 할 수도 있다. 이와 같은 traveling cavitation의 형성 및 성장은 고체 경계면, 이동 와류(moving vortices)의 중앙부, 난류 전단장(turbulent shear field)의 고난류 영역(high turbulent region) 등에서 발생될 수 있다.

(2) 고정 공동(Fixed Cavitation): 그림 4에서와 같이 고정 공동은 유체의 흐름이 고체의 경계면으로부터 분리될 때 경계면과 유체 사이에서 형성된다. 기포화된 공동 부근의 유체는 이와 같은 기포단(氣泡團)을 이동시키게 되고 하류 압력이 증가하는 지역에 도달하면 공동은 파괴된다. 고정 공동은 항상 안정되어 있는 것은 아니다. 때때로 이들은 진동의 형태(pulsating manner)로 형성 및 붕괴되기도 하고 심지어 진동(vibration)이 연속적으로 일어나기도 한다. 수공 구조물에서 고정공동은 흐름경계면의 반경내부, 요철표면(surface irregularities), 다

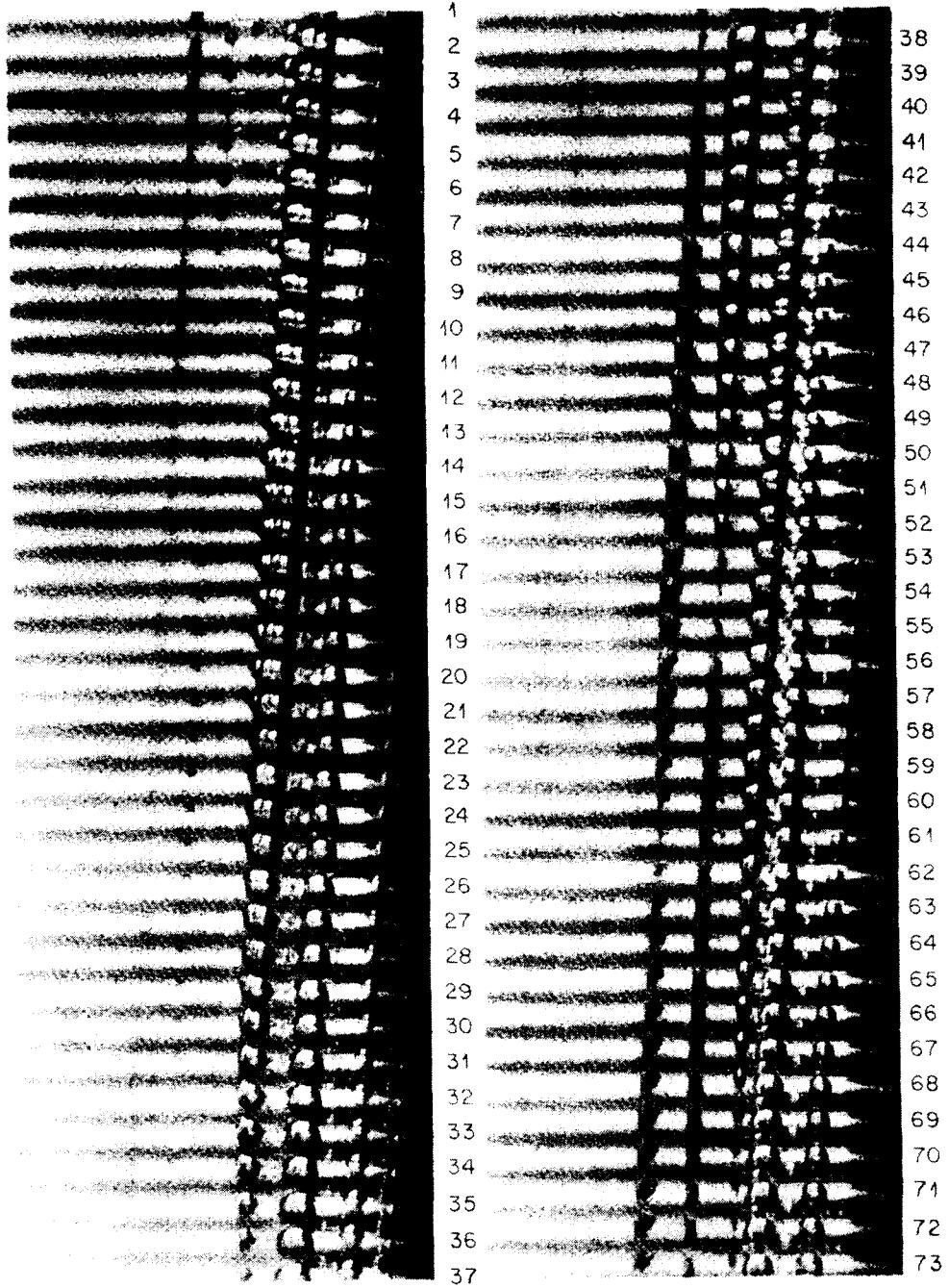


그림 3. 1/20,000초 간격으로 촬영한 Traveling cavitation의 모습

수의 수문에서 하나의 도관으로 흐르는 천이구간, 수문, 벨브 등에서 발생한다. 고정 공동은 포켓 공동(pocket cavitation), 분리 공동(separate cavitation)이라고도 한다.



그림 4. hemispherical nose를 가진 물체에 발생하는 고정 공동

(3) Super Cavitation: 그림 5에서와 같이 이는 공동 포켓(cavity pocket)이 대상 물 후면에서 발생하는 것을 말하는데, 엄격한 의미에서 super cavitation은 고정 공동의 한 경우를 말한다.

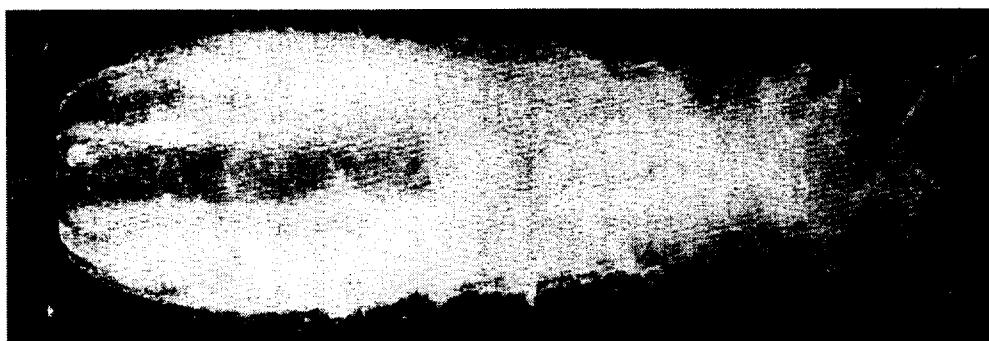


그림 5. suare-ended cylinder nose를 가진 물체에 발생하는 super cavitation

(4) 와류 공동(Vortex Cavitation): 와류의 중앙부(cores of vortices)에서 발생하는 와류 공동은 수공 구조물에서 발생할 수 있는 여러 공동 현상 가운데 매우

중요한 형태이다. 와류는 프로펠러, 펌프, 터빈, 배플 피어(baffle pier), 자유수면 제트류(free jet)의 경계면 등과 같이 흐름을 소용돌이치게 하여 높은 전단력 및 이차류를 발생시키는 영역에서 발생하는데, 와류의 중앙부는 속도가 증가하므로 상대적으로 압력은 감소하게 되고 유체의 압력이 증기압보다 작아지게 되면 공동이 형성된다. 와류 공동의 특징은 증기압보다 큰 압력에서도 공동이 파괴되지 않고 견딘다는 것이다. 그림 6은 와류 공동의 일례를 나타낸다.

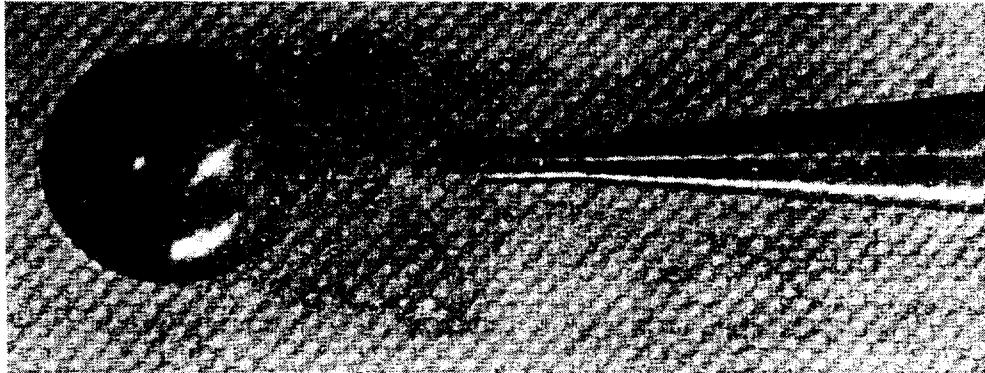


그림 6. 직경 1 인치의 구 후면에 나타나는 와류 공동

수공 구조물에서 와류 공동은 고속 흐름을 갖는 도관(conduit)의 접합부, 흐름 표면의 연결부위 단락부(offset joints proceeding into or away from flow), 수문홀통(gate slots) 등에서 발생한다.

### 2.3 공동형성에 영향을 미치는 요소(Factors of Cavitation)

공동현상을 일으키는데 영향을 미치는 주요 변수는 흐름장(flow fields), 즉 유속, 압력 및 지형조건(geometry) 등이다. 지형조건은 속도변화율과 기포 형성의 한계압력 결정에 직접적인 영향을 미친다. 기타 여러 가지 변수들도 공동의 형성 및 발달에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이들 가운데 중요한 요소들은 유체의 점성, 표면장력 등과 같은 유체의 열역학적(thermodynamic) 요소와

유체 내부에 고체나 기체의 함유 여부 등이 영향을 미친다. 그러나 이와 같은 영향들은 수학적 모델에 고려하기가 매우 힘이 들므로 공동현상의 예측은 일반적으로 압력, 속도, 지형조건 등 흐름의 특성을 고려하여 해석하게 된다.

#### 2.4 공동지수(Cavitation Index)

공동지수는 공동현상 자체를 이해하거나 공동현상을 예측하는데 매우 편리한 지수이다. 이 지수는 기계공학 분야에서 제안된 지수로서 특히 터어빈 기계(turbomachinery), 프로펠러 설계 분야에 많이 이용되어 왔으며 그 기본 개념은 다음과 같다.

그림 7과 같이 하나의 교각이 있는 하천에서 2차원 비점성 흐름의 경우를 생각해 보자. 교각의 존재가 흐름에 영향을 주지 않는 상류부의 한 단면 0에서 등류상태(uniform flow)의 흐름에서의 압력 및 속도를 각각  $p_0$ ,  $V_0$ 라 하고, 교각상의 한 단면 1에서의 속도 및 압력을 각각  $p_1$ ,  $V_1$ 이라 하자. 이들 두 단면 사이의 압력 및 유속의 관계는 다음 식 (1)과 같은 베르누이 방정식으로 표현될 수 있다.

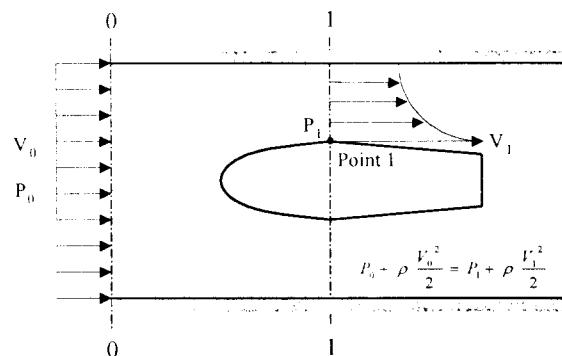


그림 7. 하나의 교각이 존재하는 하천의 평면도

$$p_0 + \rho \frac{V_0^2}{2} = p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} \quad (1.a)$$

$$p_0 - p_1 = \rho \frac{V_0^2}{2} \left( \frac{V_1^2}{V_0^2} - 1 \right) \quad (1.b)$$

식 (1.b)의 양변을  $\rho V_0^2/2$ 로 나누면 다음 식 (2)와 같은 무차원수  $\sigma_1$ 를 얻을 수 있다.

$$\sigma_1 = \frac{p_0 - p_1}{\rho \frac{V_0^2}{2}} = \left( \frac{V_1}{V_0} \right)^2 - 1 \quad (2)$$

여기서 피어에서의 압력  $p_1$ 이 증기압  $p_v$ 보다 큰 일반적인 흐름 상태에서는  $\sigma_1$ 은 상수 값을 갖는다. 이는 흐름장의 기하학적 조건과 단면 1의 위치에만 영향을 받지,  $V_0$ ,  $p_0$ 의 영향을 받지 않기 때문이다.

초기 조건으로서 단면 1에서의 압력  $p_1$ 이 증기압  $p_v$ 보다 크다고 가정하자. 그 다음 압력  $p_1$ 을 줄이기 위해서는 다음과 같은 두 가지 방법이 있다. (1) 단면 0의 압력  $p_0$ 을 일정하게 유지한 상태에서 유속  $V_0$ 의 증가, (2) 단면 0에서 유속  $V_0$ 을 일정하게 유지한 상태에서 압력  $p_0$ 의 감소가 있다. 압력  $p_1$ 이 증기압보다 큰 상태에서는  $\sigma_1 = \sigma_c$ 의 상수 값을 갖는다. 식 (1)에서 계산되는  $p_1$ 의 값이 증기압  $p_v$ 보다 작아지게 되면 이 식은 성립하지 않게 되며,  $p_1$ 을  $p_v$ 와 같다고 놓을 때  $\sigma_1 \neq \sigma_c$ , 즉  $\sigma_1$ 은  $\sigma_c$  보다 작아지게 된다. 이것은 바로 다음 식 (3)과 같은 공동지수의 개념으로 표현된다.

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho \frac{V_0^2}{2}} \quad (3.a)$$

식 (3.a)의  $\sigma$ 가 식 (2)의  $\sigma_1$ 보다 커지게 되면  $p_1$ 은  $p_v$ 보다 큰 상태이므로 단면 1에서는 공동현상이 생기지 않는다. 그러나 단면 1에서의 압력  $p_1$ 이 점차 작아져 증기압과 같은 상태가 되었을 때의 공동지수를 한계 공동지수(critical cavitation index)라 부른다. 이 상태가 초기 공동현상(incipient cavitation)단계

를 나타낸다. 공동지수  $\sigma$  가  $\sigma_1$ 보다 작아지게 되면, 즉  $p_l$ 이  $p_v$ 보다 작아지게 되면 발달된 공동현상(developed cavitation)이 예상되는 단계이고,  $\sigma$  값이 점차 작아지게 됨에 따라 수공구조물에 미치는 손상의 정도도 증가하게 된다.

또한 식 (3.a)의 공동지수  $\sigma$ 는 다음 식 (3.b)와 같은 압력수두  $H$ 의 항으로도 표현이 가능하다.

$$\sigma = \frac{H_0 - H_v}{\frac{V_0^2}{2g}} \quad (3.b)$$

### 제 3 장 수공학에서의 공동현상

#### 3.1 수공구조물의 공동원인

수공구조물에서 흔히 발생할 수 있는 공동현상의 원인은 단일 요철(isolated irregularities), 등분포 요철(uniformly distributed roughness), 정렬의 변화(change in alignment), 와류(vortex) 등이며, 이들을 간략히 살펴보면 다음과 같다(Jansen, 1988; Falvey, 1986). 여기서 단일 요철 또는 단일 조도(isolated roughness)는 유체 흐름면의 방해석 침전물(calcite deposit), 국부적인 공극(localized voids), 응기 등을 말하며, 전형적인 등분포 요철 또는 조도는 마감 처리된 콘크리트면(finished concrete surface)을 나타낸다.

##### 3.1.1 단일 요철(Isolated Irregularities)

표면의 불규칙성을 논의할 때 고려되어야 하는 매우 중요한 문제 가운데 하나는 바로 경계층의 두께이다. 특히 흐름에 직각 방향의 속도 변화율이 난류 경계층(turbulent layer)보다 훨씬 적은 층류저층(viscos sublayer)의 경우 경계층의 두께는 매우 중요한 문제이다. 그림 8에서와 같이 같은 형태의 불규칙 단면이라도 경계면이 얇을 경우에는 더 큰 속도가 발생한다. 만약 이와 같은 경우 국부적인 높은 속도가 발생하게 되면, 이에 따라 압력은 감소하는 결과를 초래

한다. 따라서 표면의 거친ness(surface roughness)을 논의할 때에는 유체의 점성 효과(viscous effect)는 반드시 고려되어야 한다. 그림 9와 그림 10은 독립 요철(isolated irregularity)의 몇몇 형태에 대한 공동지수를 구할 수 있는 실험 결과를 제시하고 있다.

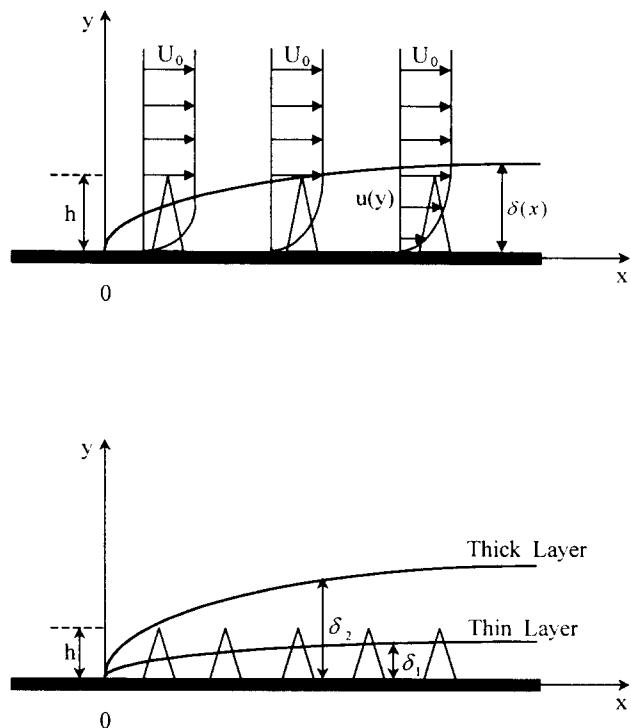


그림 8. 공동에 대한 경계층의 영향

Symbol	Irregularity	Dimensions	Flow		
			a	b	c
△	Triangles	2	0.161	0.196	0.152
○	Circular arcs	2	0.344	0.267	0.041
▲	Hemispheres	3	0.439	0.298	0.2108
●	Cones	3	0.632	0.451	0.0328
■	Cylinders	3	-0.737	0.550	0.00117
□	Slopes	2	0.041	0.510	0.000314

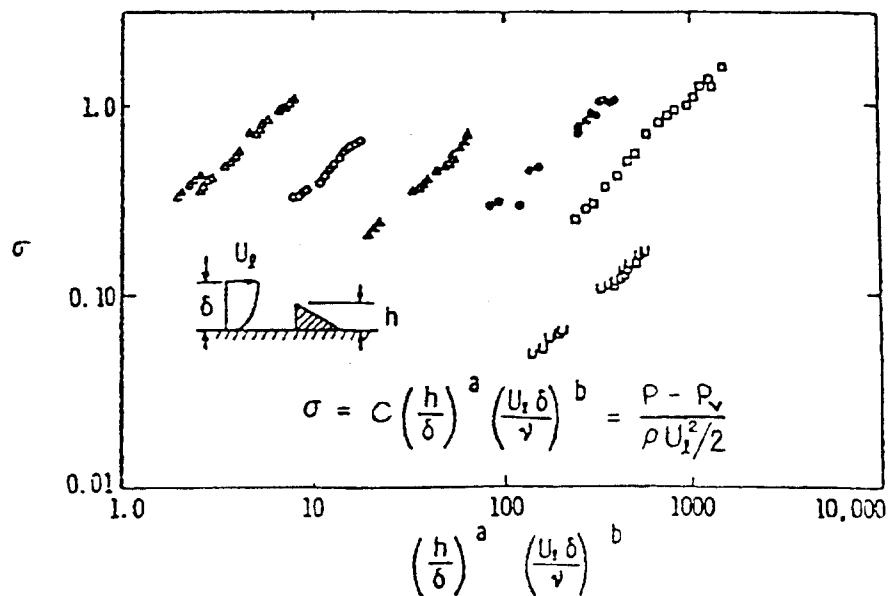


그림 9. 독립 요철에서의 공동 특성

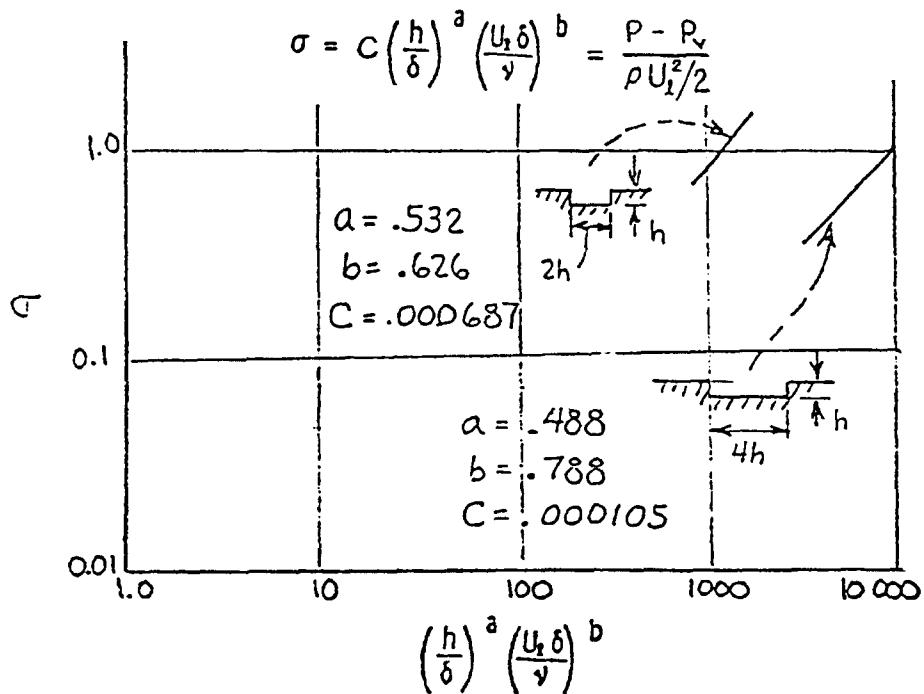


그림 10. 경계면내에 있는 holes에서의 공동 특성

그림에서 점성 효과(viscous effect)는 경계층의 두께  $\delta$ 에 의해 고려되고 있으며, 공동지수는 요철의 높이와 경계층 두께의 비( $h/\delta$ ) 및 레이놀드 수의 함수로 주어진다. 이 때 reference velocity와 pressure는 경계층 바로 직전의 유속 및 압력이다.

### 3.1.2 분포 요철(distributed roughness)

일반적으로 분포 조도(distributed roughness)의 불규칙성은 절대조도 (absolute roughness, Nicuradze roughness)로 표현된다. 앞 절의 단일 요철과 분포 요철이 공동현상에 미치는 영향의 차이는 조그마한 돌기가 전 표면에 분포되어 있는 분포 조도가 단일 요철보다 점성의 증가 혹은 압력의 감소로 공동

발생의 가능성성이 높다는 것이 실험적으로 규명되었다. 실제로 기계(조선) 공학 분야에서 이와 같은 문제에 관한 연구는 많이 진척된 상태이고, 다음과 같은 비교적 단순한 관계식으로 발표되었다(Arndt et al., 1979).

$$\sigma_i = 4f \quad (4)$$

여기서  $f$ 는 Darcy-Weisbach의 마찰계수를 나타내고,  $\sigma_i$ 는 한계공동지수(critical cavitation index)를 나타낸다.

침식된 콘크리트(eroded concrete) 표면에서의 실험 결과에 의하면 약 0.5mm 보다 큰 모든 요철은 단일 요철로 고려되어야 한다는 것이다.

### 3.1.3 어라인먼트의 변경(Change in Alignment)

여기서 어라인먼트의 변경이란 하나의 지형 형태에서 또 다른 형태로의 변화, 하나의 단면형에서 또 다른 단면형으로의 변화, 바닥경사의 변화에 의한 표고의 변화 등을 의미한다. 이들 가운데 대표적인 것은 경사의 변화이다.

경사의 변화에 대한 공동현상의 발생에 대한 연구는 점성의 영향을 무시할 수 있는 높은 레이놀드 수 조건 하에서 수행되었으며, 제안된 식은 다음 식 (5)와 같이 비교적 단순한 식으로 제시되었다(Jansen, 1988; Falvey, 1986).

$$\sigma_i = 1.8 \left( \frac{R}{h} \right)^{0.7} \quad (5)$$

여기서  $R$ 은 그림 11에서와 같이 경사 표면의 수평길이이고,  $h$ 는 높이를 나타낸다. Reference 속도는 경사면 바로 상류부의 속도를 나타낸다. 그림 12는 다른 형태의 바닥표고 변화에 대한 공동지수를 나타낸다.

이와 같은 어라인먼트 변경에 의해 가장 흔히 발생될 수 있는 공동의 형태는 고정 공동(fixed cavitation, pocket cavitation)이다. 그림 13에서와 같이 고정 공동 바로 다음 영역, 즉 공동이 파괴되는 영역에서 공동 피해가 발생한다.

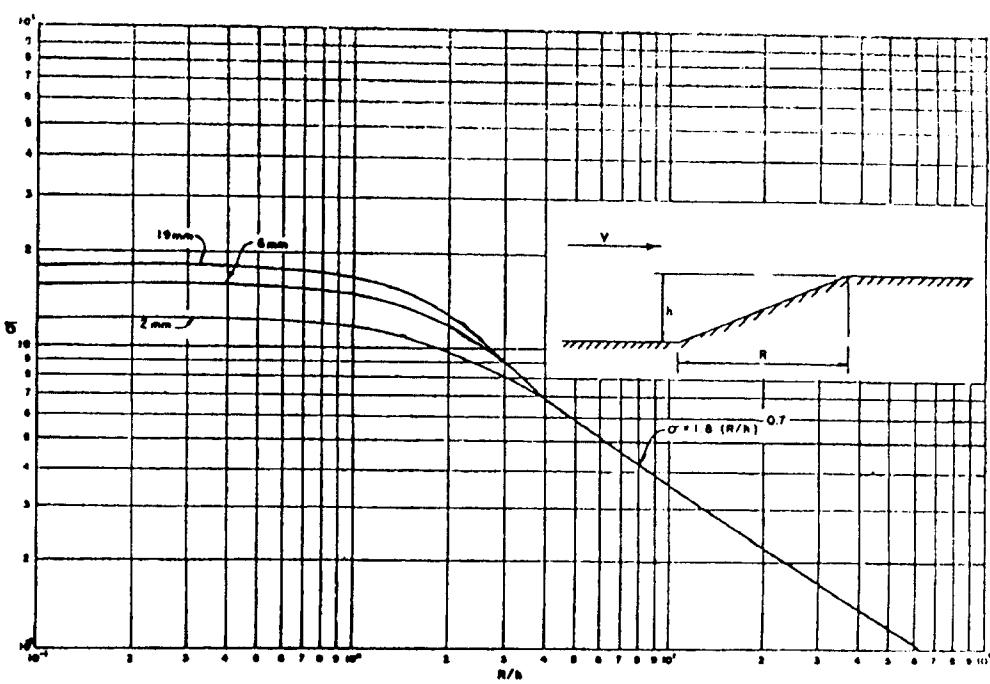


그림 11. 바닥경사 변화에 의한 공동 특성 곡선 (1)

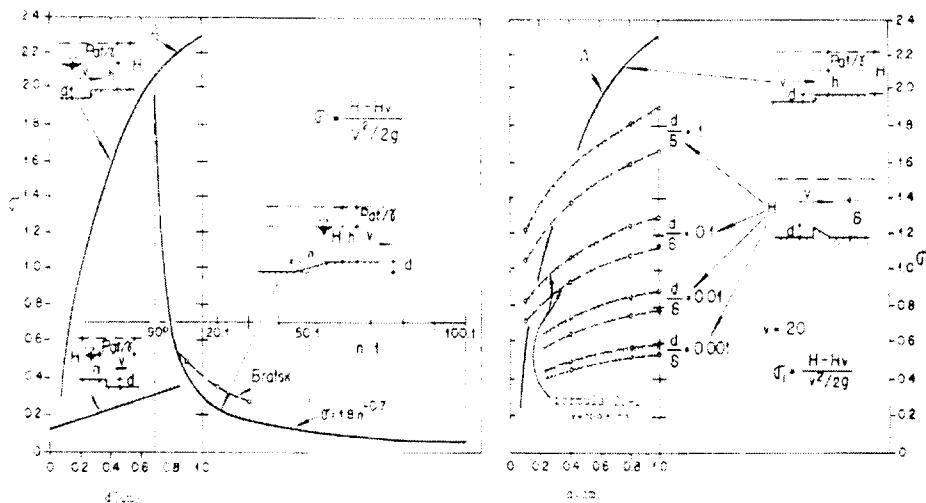


그림 12. 바닥경사 변화에 의한 공동 특성 곡선 (2)

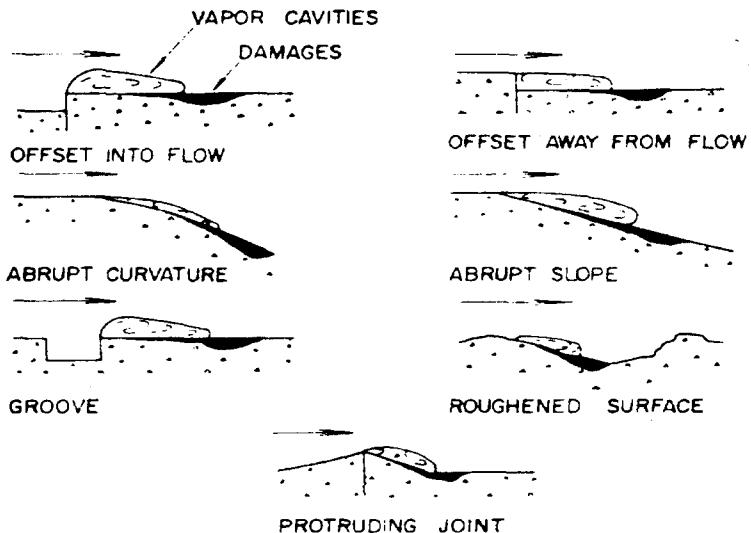


그림 13. 흐름 표면의 불규칙성에 의한 공동 피해 유형

### 3.1.4 와류 공동(Vortex Cavitation)

일반적으로 곡면으로 구성된 표면에서는 이차류(secondary flow)가 형성되고, 그 결과 와류(vortex)가 생긴다(Schlichting, 1979). 이와 같은 문제의 전형적인 예제는 바로 여수로의 정점부(spillway crest)에서 볼 수 있다. 이와 같이 생성된 와류는 개수로 형태(chute)나 터널 형태의 통수수로(discharge channel)를 통하여 하류로 전달되는데, 이때 흐름의 유속은 매우 증가하게 된다. 이와 같은 고속의 사류는 하류부 곡면에서의 유속을 증가시키고, 와류의 중심부에서 압력은 증기압 이하로 떨어져 공동현상을 발생시키는 원인이 된다. 이와 같은 와류가 압력이 높은 지역으로 이동하게 되면 공동은 파괴되고, 공동 파괴가 구조물 표면 근처에서 발생하게 되면 구조물에 손상을 입히게 된다. 이와 같은 현상은 터널 여수로(tunnel spillway)의 말단부(elbow) 근처에서, 또한 개수로 여수로(chute spillway)의 바 appré형 구조물(flip bucket)에서 전형적으로 볼 수 있다. 이 두 가지 경우에 매우 높은 압력이 발생하고, 궁극적으로는 공동이 파괴되어 많

은 에너지를 감쇄시킨다. 더구나 이와 같은 경우에는 유체 흐름의 원심력에 의해 와류를 벽면에 더욱 가깝게 만들므로 공동파괴가 구조물 근처에서 발생할 가능성을 증대시키는 역할을 한다.

그러나 아직까지 이와 같은 공동현상에 의한 피해, 즉 발생유무 및 위치 등을 파악할 수 있는 실험결과는 제시되지 않고 있는 실정이다.

### 3.2 수공구조물의 공동피해 원리(Damage Mechanism)

수로나 터널의 내면이 매끈한 콘크리트 표면으로 되어 있고 그 위에 공동지수가 한계값보다 조금 적은 상태에서 물이 흘러간다고 가정하자. 이 경우 초기 공동, 즉 조그마한 기포가 형성되나 이를 대부분의 기포는 일반적으로 표면으로부터 멀리 떨어져 있기 때문에 구조물에 피해는 주지 않는다. 이 상태에서 흐름의 유입속도가 증가하게 되면 압력은 더욱 강하게 되고 공동현상은 더욱 심하게 되어 공동의 일부는 표면근처에서 파괴되며 구조물에 경미한 손상을 가하게 된다. 만약 속도가 더욱 증가하게 되면 기포군(swarm of bubble)이 형성되고 큰 기포로 흡착이 생겨 이것이 파괴될 때에는 구조물에 큰 손상을 끼치게 된다. 일단 콘크리트 표면이 공동에 의해서 파괴되기 시작하면 매우 큰 동압력은 더욱 커지게 되고 결국은 구조물 내면이 파괴되고 구조물의 기초마저 위험하게 된다.

여기서 우리가 한 가지 유의하여야 할 것은 구조물에 일단 피해가 발생하면 이것은 피해를 더욱 가속시키는 역할을 하게 된다는 것이다. 즉 공동에 의해 피해가 발생하면 단면을 불규칙하게 만들므로 공동발생에 대한 또 다른 원인이 제공되며 공동피해는 하류 쪽으로 급속히 전진된다는 것이다.

### 3.3 공동피해 잠재력(Damage Potential)

앞에서 살펴본 것처럼 공동현상에 의한 피해는 공동의 강도에 달려있는 문제이지 공동이 생겼다고 해서 모두 피해가 발생하는 것은 아니라는 것을 언급한 바 있다. 따라서 흐름의 조건에 따라 공동의 발생여부 및 공동피해의 정량적 해석을 위한 관련 식을 도출할 필요가 있다. 몇몇 현장실험에서는 공동현상에 의한 구조물의 피해가 발생할 지 여부에 대한 지침을 제시하는데 공동피해 잠재력을 사용한 바 있다. 피해 잠재력은 다음 식 (6)과 같이 정의된다.

$$D = \frac{1}{\sigma_i} \left( \frac{\sigma_i}{\sigma} - 1 \right) \left( \frac{V}{V_R} \right)^6 \quad (6)$$

여기서  $D$  : 피해 잠재력

$\sigma_i$  : 한계 공동지수

$\sigma$  : 흐름의 공동지수

$V$  : 평균유속

$V_R$  : 공동의 시작과 관련된 reference velocity ( $V_r = \sqrt{\frac{p_0 - p_v}{\rho \sigma_i / 2}}$ )

실험결과에 의하면  $D$ 가 1000보다 작은 경우 여수로 터널이나 슈트(chute)에서 공동에 의한 손상이 발생하지 않는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 피해 잠재력을 이해하고 이에 대한 검증을 위해 보다 많은 연구가 요구된다.

### 제 4 장 공동현상이 발생 가능한 전형적인 수공구조물

앞에서 살펴본 것처럼 공동현상은 압력이 증기압보다 낮아지게 되면 발생하게 된다. 동력학적 흐름 조건에서는 속도가 증가하면 압력은 감소하게 된다. 이와 같은 속도 변화는 대부분의 경우 지형의 변화에서 야기된 것이다. 제 3 장에서 살펴 본 것처럼 흐름의 형태를 변화시키는 지형의 변화는 잘못된 콘크리트

의 마감처리, 독립된 돌기 등이 원인이 된다.

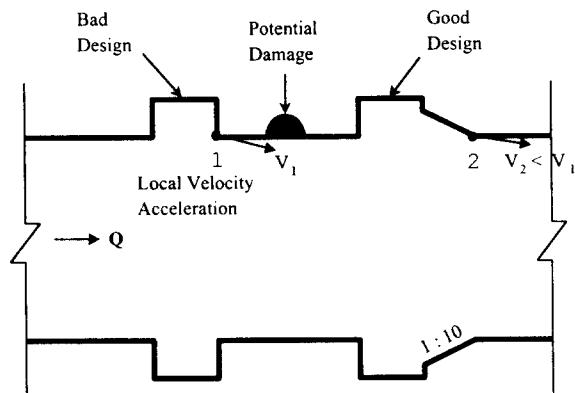
만약 지형의 변화가 심하면 15m/s 이하의 작은 reference velocity에서도 초기 공동이 발생할 수 있는 충분한 국부적인 압력 강하로 가속될 수 있다. 이와 같이 공동현상의 영향을 받을 수 있는 수공구조물의 형태는 매우 다양하기 때문에 본 절에서는 가장 전형적인 형태를 소개하고자 한다.

#### 4.1 구거의 부정렬(Misalignment of Conduits)

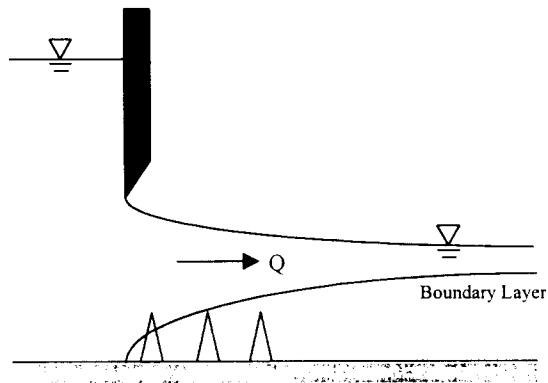
고낙차 슈트(high head chute), 여수로 터널에서 구거의 부정렬은 공동 현상에 의한 구조물의 피해 가능성이 매우 높다. 이에 대한 적절한 사례는 미국 콜로라도 주와 아리조나 주에 접해 있는 Boulder 댐의 홍수통제용 구거(conduits)에서 발생한 피해이다(Vennard et al., 1947). 구체적인 피해 사항은 Brown(1963)을 참고하기 바란다.

#### 4.2 수문과 수문홈 (Gates and Gate Slots)

수문에서 공동현상에 의한 피해 가능성이 높은 지역은 그림 14 (a)와 같은 수문홈 부근이나, 그림 14 (b)와 같은 수문의 직하류 바닥 부근이다. 그림 14 (a)의 경우 일정한 유량  $Q$ 가 흘러갈 때 홈통의 하부 가장자리인 지점 1에서 국부적인 유속 증가가 발생하게 되고 공동피해는 하류로 전파될 가능성이 높다. 설계자는 상류부 구거의 마찰 요인이 설계시 예상하고 있는 것보다 훨씬 작을 가능성이 있다는데 주의를 하여야 한다. 이와 같은 경우에는 자동적으로 속도는 증가하게 되고 수문 홈통에서 공동 피해 위험성이 커진다. 또한 그림 14 (b)의 경우에는 수문의 개방도가 작은 경우 점성류 경계층의 발달 영역은 매우 작아 표면 조도는 경계층 밖으로 노출된다. 이는 유속을 증대시키는 역할을 하게 되므로 공동피해 위험성도 커진다.



(a) 수문홈 주위의 흐름



(b) 수문 침하류부의 흐름

그림 14. 수문 흠통과 수문의 개략도

#### 4.3 흐름 천이 단면(Transitional Sections)

수문이 위치한 단면으로부터 하류 구간 단면까지의 흐름의 천이 구간에는 종종 설계가 잘못된 연유로 큰 전단력을 발생시켜 국부적인 유속 상승을 초래하게 되고, 그 결과 공동을 형성하게 하여 구조물의 손상을 가져올 수 있다. 이와

같은 천이 영역을 잘 못 설계한데서 야기되는 공동의 피해는 Brown (1963)에 잘 나타나 있다.

#### 4.4 여수로 정점부(Spillway Crest)

여수로 정점부에 대한 설계의 오류는 종종 공동현상에 의한 구조물의 피해를 초래한다(Jansen, 1988; U.S. Bureau of Reclamation, 1987). 월류형 여수로 정점부(ogee crest)상의 원심력은 흐름의 유속을 증가시키고 압력을 작게 하는 원인이 된다. 그럼 15와 같이 설계 수두(designed head)를  $H_0$ , 실제 수두(actual head)를  $H_e$ 라 할 때 전형적인 ogee 형태의 정점부에서의 압력은  $H_0 = H_c$  인 경우 대기압이 작용한다.

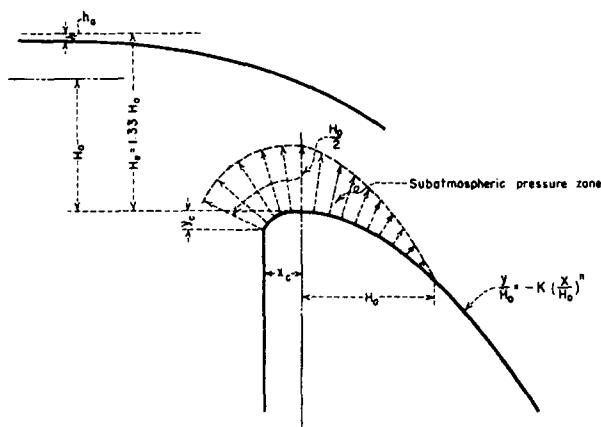


그림 15. 여수로 정점부에 작용하는 부압

설계 수두  $H_0$ 보다 실제 수두  $H_c$ 가 더 큰 경우에는 여수로 정점부에서 부압(subatmospheric pressure)이 작용하게 된다. 지금까지의 연구 결과에서 나타난 바로는 실제수두  $H_e$ 와 설계수두  $H_0$ 의 비  $H_e/H_0$ 가 1.33을 넘어서는 안된다는 것이다. 이것은 국부 대기압과 관계가 있는 정점부에서의 압력의 변화는 공동현상과 관련이 있기 때문에 상당히 제안된 접근방법이다. 과거의 연구 결과에 의하

면 이와 같은 공동현상에 대한 위험을 피하기 위해서 정점부에서 최대 부압(maximum subatmospheric pressure)은 -6 m 이하이어야 한다는 것이 제안되었다(Jansen, 1988).

또한 사이론 여수로의 정점부를 설계할 때에는 세심한 주의를 요한다. 정점부에서의 곡률반경은 정점부에서의 최대 부압(maximum subatmospheric pressure)이 증기압의 약 70% 이상이 되도록 설계하여야 한다(U.S. Bureau of Reclamation, 1987).

#### 4.5 여수로와 방류용 터널(Spillway and Outlet Tunnels)

앞 절의 와류 공동에서 언급한 것처럼 곡면의 여수로 정점부에서는 이차류가 발생되고 그 결과 전단력의 영향으로 흐름 방향의 와류가 발생한다. 또한 이와 같은 구조물에 피어나 수문홈이 존재하면 와류의 형성을 촉진시키는 역할을하게 된다.

이와 같이 발생된 와류는 슈트나 여수로 터널 하부로 이동하게 되고, 흐름이 가속되기 때문에 하류부 곡면에서의 유속은 증가되게 된다. 이것은 심한 압력 강하를 초래하게 되고 그 결과 공동현상이 발생되게 된다. 이와 같은 곡면에서의 기포화된 공동은 통상적인 선형 공동(linear cavities)에 비해 각운동량(angular momentum)의 potential 때문에 압력의 증가에 비교적 저항력이 크다. 그러나 압력의 증가가 매우 커지게 되면 공동은 결국 붕괴된다.

높은 압력이 발생하는 전형적인 위치는 터널 여수로나 바UCKET형 구조물(bucket)의 말단부(elbow)에 해당하는 오목 곡면(concave curvature)의 외곽부분이다. 이 경우 원심력의 영향으로 와류는 더욱 구조물 경계면 쪽으로 접근하게 되므로 공동 파괴가 발생할 경우 구조물 피해를 가중시키는 원인이 된다.

또한 고낙차 터널 여수로나 슈트의 부정렬(misalignment), 터널 내부의 방해석 침전물(calcite deposits), 또는 불균일면(irregularities) 등은 공동 피해를 가속시킬 수 있다.

#### 4.6 減勢用 構造物(Stilling Basins)

減勢工(stilling basin) 부근에서는 전단력이 매우 큰 흐름이 발생하므로 심한 공동현상이 발생할 수 있고, 그 결과 구조물에 심한 손상을 미칠 것 같지만 실제로는 그렇지 않다. 감세용 구조물에서 피해의 주요 원인은 동압력(hydrodynamic pressure)의 변동(fluctuation)과 침식(ablation)에 의한 것이다. 그 이유는 감세공의 거친 표면을 통과하는 이와 같은 고속 흐름에는 공기의 영향을 받기 때문이다. 여수로와 같은 급경사 수로를 거쳐 감세수로로 유입되는 고속의 난류 제트류(turbulent jet)가 경사가 완만한 감세공의 하단부(댐 하류부)의 상류로의 변환이 도수(hydraulic jump)를 통해 일어나게 된다. 이 때 상당량의 공기가 유입되므로 이는 공동 피해를 저감하는 역할을 한다.

그러나 이렇다고 해서 감세공에는 공동의 피해가 없다는 것은 아니다. 감세공에 발생할 수 있는 전형적인 공동 피해는 배플 피어(baffle piers)나 실(sills)과 같이 급격한 지형의 변화(sudden change in geometry)가 있는 곳에서 발생할 수 있는데 이는 제트류의 추가적인 가속을 초래할 수 있기 때문이다.

#### 4.7 수문-여수로 흐름(Sluice-Spillway Flow)

콘크리트 중력댐에서 여수로 부분의 몸체에 방류용 구조물(outlet works)을 설계한 경우가 많이 있다(그림 16). 이 경우 여수로나 방류구 구조물이 각각 운영될 때에는 통상 흐름이 완만(smooth)하기 때문에 공동 피해의 염려는 없다. 그러나 여수로와 방류구 구조물을 동시에 운영(수문-여수로 흐름)될 때에는 상황이 다르다. 즉 이와 같은 상황 하에서 운영될 때 방류용 구조물 직하류부에 공동에 의한 구조물 피해 사례가 제시된 바 있다(Brown, 1963). 이것은 와류 형태의 공동에 의한 피해로 추정된다. 그 이유는 수문과 여수로를 통해서 흘러나와 이들 두 흐름이 만나는 지점에서는 심한 전단력이 발생하므로 와류가 쉽게 형성되기 때문이다.

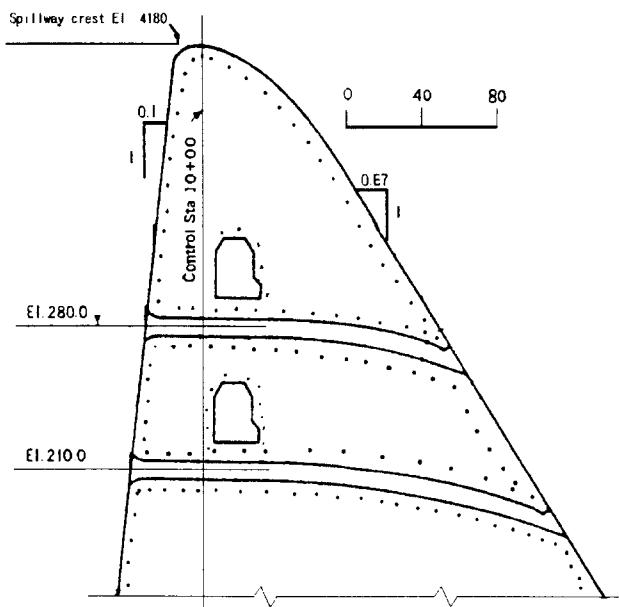


그림 16. 콘크리트 중력댐의 방류용 구조물(Folsom Dam, 미국)

#### 4.8 주운 갑문(Navigation Locks)

두 개 혹은 그 이상의 보통 높이의 갑문을 설치하는 대신 고낙차의 갑문을 설치할 경우에는 갑문의 운영시간(filling and emptying times)을 줄일 수 있는 장점이 있지만, 공동 피해가 발생 가능한 단점이 있다. 이 경우 보통 공동 피해가 발생하는 위치는 밸브의 하류부이다.

## 제 5 장 공동현상에 대한 공학적인 해결책

토목공학의 실무에서 공동현상에 대한 문제가 발생하였을 때 이에 대한 해답을 찾고자 많은 실험과 이론적 접근을 통해서 해결책을 찾고자 노력해 왔다. 그 결과 여러 가지 방법 가운데 공기주입법(aeration)이 가장 효과적이고, 기타의 방법은 다소 제한적인 적용성을 가지고 있는 것으로 알려져 왔다. 그들 중에서 대표적인 것을 살펴보면 다음과 같다.

### 5.1 구조물 표면의 유선화(Streamlining)

구조물의 외부 형상을 유선화(streamlining) 하는 것은 지금까지 시도되었던 가장 대표적인 공학적인 해결책 가운데 하나이다. 과거 많은 수공 구조물들이 수공학적 설계(hydraulic design)는 고려하지 않은 채 단지 구조 역학적으로 구조물을 설계하는 구조 기술자에 의해 설계되었다. 그 결과 수리학적으로는 아주 잘못된 설계, 즉 흐름의 분리현상(flow separation) 및 저압의 공동(low pressure pocket cavitation) 등이 발생하였다.

구조물 표면을 유선화하는 것은 암거(culvert)의 천이구간(transition part) 설계 및 그림 14 (a)와 같은 수문홈 설계에 유용하다. 이와 같이 설계할 경우 홈의 가장자리에서 발생할 수 있는 고속의 흐름에 의한 포켓 공동(pocket cavitation)의 형성을 피할 수 있거나 적어도 약화시킬 수 있는 것으로 알려졌다.

### 5.2 표면처리(Smoothing and Coating Surfaces)

공동발생의 원인이 국부적인 혹은 분포된 불규칙 표면에 흘러가는 흐름의 영향이라면 polishing, coating, armoring과 같은 표면처리가 공학적인 해결 방안으로서 도움이 되는 경우가 있다. 이와 같은 표면처리 방법에는 경계층(viscous sublayer)이 침투하지 않도록 매끈하게 처리(smoothing)하거나 철 장갑화(steel

armoring)와 같은 저항을 크게 하는 것 양자 모두 포함된다.

Coating이나 polishing은 어떤 경우에는 매우 효과적이나 어떤 경우에는 그 렇지가 못한 경우가 있다(Jansen, 1988; Russell and Sheehan, 1974). 구조물의 특정 부분을 장갑화한 경우, 특히 수문의 바로 아래 마루 부분의 경우에는 문제를 단지 하류 쪽으로 이동시키는 결과 밖에 안되는 경우가 있어 주의를 요한다.

### 5.3 흐름의 조절판 부착(Throttling (Chocking) the Flow)

수문홈이나 불규칙 단면에 흐름의 방향을 조절하기 위해서 조절판(throttling)을 달는 것은 공동현상을 방지하기 위한 효과적인 한 방법이 될 수 있다. 수문이 설치된 지배단면(control section)에서 흐름단면을 축소시키면 연속방정식에서 알 수 있는 것처럼 상류단의 유속은 감소되고 증기압이 발생하지 않는 범위 까지 압력을 증가시킬 수 있다. 물론 지배단면을 축소시키는 것은 유출구 유량의 감소를 초래한다. 만약 유량의 변화 없이 제한된 범위 이내의 상류단 유속을 유지하고자 한다면 보다 더 큰 구거(conduit)를 설계하여야 하나 이것은 비용의 증가를 초래한다. 따라서 어떤 경우에는 그림 17에서와 같이 지배단면에 강판(steel plates)을 부착하여 지배단면을 줄이게 되면 상류단의 압력을 증가시킬 수 있어 공동피해의 한 치유책으로 이용될 수 있다.

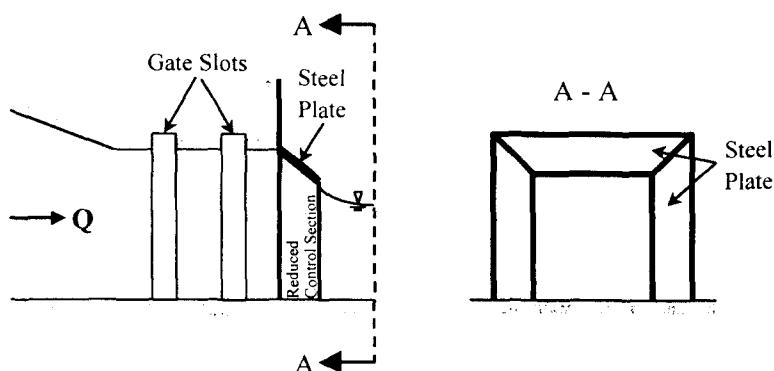


그림 17. 공동피해 저감을 위한 조절판 부착

#### 5.4 공기주입법(Aeration)

공동현상을 경감하고자 공기주입법을 사용한 최초의 사례는 Grand Coulee 댐이다(Falvey, 1986). 이 댐에서 공동에 의한 피해는 여수로 하단부분 방수구의 교차점(intersection) 부분에서 발생하였다. 이와 같은 문제를 해결하고자 표면을 매끈하게 하기 위한 polishing이나 epoxy coating 방법 등을 사용하였으나 효과를 거두지 못하였다. 그러나 공기발생기(aerator)를 설치하고 난 후에는 더 이상 공동에 의한 구조물의 피해는 발생하지 않았다.

Glen Canyon 댐의 임시 방류구 구조물을 공동에 대한 공기주입 효과를 잘 나타내 주는 좋은 예제라 할 수 있다. 이 방류구는 오랜 기간동안 침식에 의해 바닥이 손상되었으나 더 이상 피해는 진행되지 않고 있는 상태이며 유속 42m/sec의 유량이 흐르고 있다. 그 이유는 유출구에서의 제트류는 바루바닥에 도달하기 전에 충분히 공기 주입이 된 상태로 도달하기 때문이다.

'70년대와 '80년대에는 수공구조물을 공동현상의 피해로부터 방지하기 위한 최선의 방법은 공기주입법으로 알려져 있다. 공기주입법은 공동현상에 의한 구조물의 피해를 방지할 뿐 만이 아니라 기타의 효과도 많은 것으로 알려져 있다. 즉 공기주입법에 의해 제트류는 더욱 산란되고, 이와 같은 흐름이 감세용 구조물(stilling basin)에 흘러 들어갈 때 에너지 분산 효과를 증가시킨다.

그림 18에서 알 수 있는 것처럼 공기주입은 원래의 흐름보다 부피가 늘어나기 때문에 슈트의 벽을 더욱 높게 할 필요가 있으며 이는 구조물의 비용을 증가시킨다. 그러나 터널의 라이닝(lining) 공사에서 표면을 매끈하게 처리하는 문제와 표면의 부정렬(misalignment) 문제에 대한 기준은 상대적으로 훨씬 완화될 수 있다. 공기주입법은 공동피해 방지를 위해서 중요한 방법이므로 보다 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.



그림 18. 공기주입에 의한 부피 증가의 예,  
Foz do Areia 댐 여수로, 유량  $2,500\text{m}^3/\text{sec}$

#### 5.4.1 공기주입 원리 및 효과

지난 몇십년 동안 공동현상에 의한 구조물의 피해를 경감하기 위한 방안의 일환으로 공기주입에 관한 몇몇 방법이 제안되었으나 채택되지 않았다. 현 단계에서 공기주입 원리는 완전히 설명되고 있지 않는 단계이지만, 그나마 가장 신빙성 있는 설명은 다음과 같다.

물 속에서 공기의 효과를 시험하기 위해서 소리의 속도를 측정해 본 결과 공기가 아주 조금만 포함되어 있어도 소리의 속도는 현격하게 감소되었다. 음속의 감소는 공동이 파괴된 후 야기되는 수격작용 형태(waterhammer type)의 압력

을 감소시킨다. 이와 같은 현상을 보여주기 위해서 기본적인 수격작용에 관한 식을 도입하면 다음 식 (7)과 같다.

$$dp = \rho c dV \quad (7)$$

여기서,  $dp$  : 압력 증가분

$c$  : 음속

$dV$  : 속도 증가분

물리적으로 기포(air bubble)는 공동이 봉괴될 때 발생하는 에너지를 흡수하는 스프링 역할을 한다고 상상할 수 있다. 그러나 이와 같은 설명은 압력이 낮아 공동현상이 이미 발생하였을 때 공기의 영향을 설명하는 것이라 할 수 있다.

공기의 영향은 공동현상의 발생을 억제시키는 데에도 중요한 역할을 하지만 공동현상에 의한 수공 구조물의 피해를 줄이는 데에도 중요한 요소이다. 만약 충분한 공기가 존재하면 그것은 부압(negative pressure)을 줄이는 역할을 하게 되고 그 결과 기포의 형성을 억제한다. 비록 많은 연구자들 사이에 공기의 영향에 관한 원리의 설명에는 의견이 완전히 일치하지는 않으나, 모든 연구자는 1%의 air concentration은 공동에 의한 구조물의 손상을 현격히 줄일 수 있고 약 5-10%의 air concentration은 손상을 완전히 제거할 수 있다는데 의견을 일치하고 있다(Jansen, 1988; Brown, 1963; Russell과 Sheehan, 1974; Falvey, 1986).

이제 공기주입의 역학적 원리에 대해서 알아보기로 하자. 일반적으로 여수로 슈트를 따라 발달하는 난류경계층이 흐름 표면에 도달하는 지점, 즉 경계층의 두께가 흐름의 깊이에 해당되는 지점에서 self aeration이 시작된다는 것은 잘 알려진 사실이다. 경계층의 시작점에서 self aeration 위치까지의 거리는 다음 식 (8)과 같은 경계층 성장공식(boundary layer growth formula)으로 표현된다.

$$\frac{\delta}{x} = m \left( \frac{x}{k} \right)^{-n} \quad (8)$$

여기서,  $\delta$  : 경계층 두께

$x$  : 슈트의 시작점으로부터의 거리

k : Nicknames의 등가조도(절대조도)

m : 슈트의 경사에 따른 상수 ( $m = \frac{0.0212}{\sin \alpha}$ )

$\alpha$  : 바닥경사

n : 상수 (n=0.1)

여기서 여수로의 정점부, 피어 혹은 어떤 어떤 불규칙면에서 발생한 와류의 3차원 영향은 剝離點(separation point) 까지의 거리를 짧게 할 수도 있다.

공기주입 과정은 난류의 거동에 의해서 설명된다. 공기는 불규칙한 수표면에서의 난류 거동에 의한 물방울의 물보라 효과에 의해 포착된다. 일단 물 입자에 포착된 공기는 난류와 중력의 영향으로 물로부터 공기를 밀어내는 불규칙한 확산 운동(random dispersive movement)을 하게 된다. 만약 슈트가 충분히 길다면 평형 상태에 도달하게 되고, air concentration profile를 얻을 수 있다. 그러나 불행하게도 수표면을 통해서 포착되는 공기의 양은 바닥 저면까지 보내기는 충분하지가 않아 슈트의 바닥을 공동피해로부터 방지할 수가 없다.

따라서 이와 같은 문제로부터의 해결책은 수로바닥에서 물에 공기를 제공하는 것이다. 그림 19와 그림 20에서와 같이 수로바닥에 조그마한 계단, 경사 혹은 소단(단락부) 등의 설치는 물을 바닥으로부터 이탈시킬 수 있다. 이와 같은 소단락부로부터 물이 튀어 오르면 저면 수맥(lower nappe)을 가진 일종의 제트류가 형성되고 이 면을 따라 공기가 유입된다. 이 때 저면 수맥에서의 압력 분포(pressure distribution)와 속도장(velocity field)의 갑작스런 변화로 인해 전단력이 커지고 심한 난류를 발생한다(Jansen, 1988). 난류의 돌발 효과는 수맥의 표면장력이나 점성력 효과를 완화시켜 거친 표면을 형성한다. 이 때 포착된 공기는 불규칙한 수면을 따라 흐름 속으로 들어가게 된다.

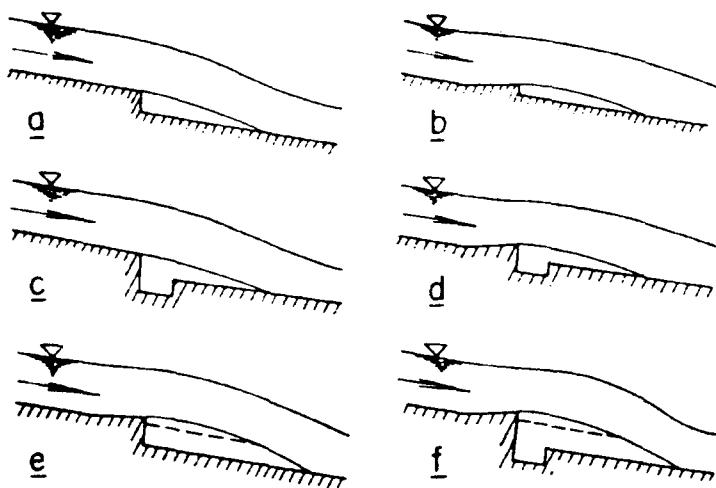


그림 19. 단락부의 형태

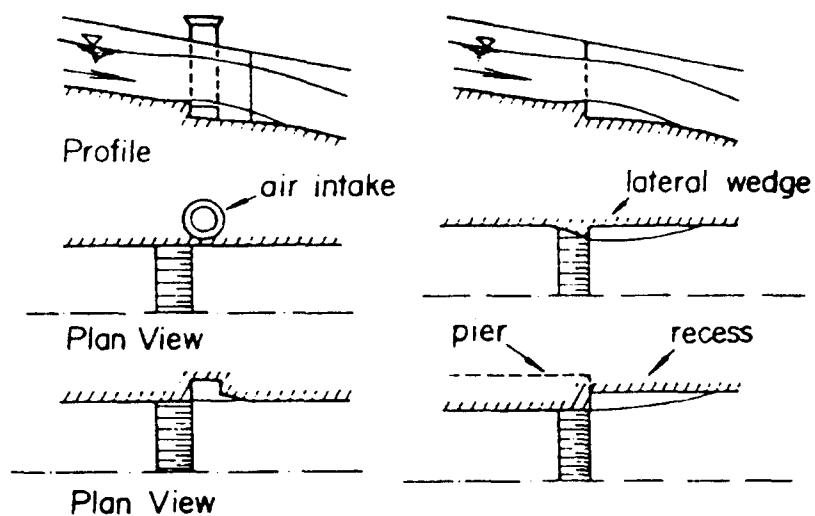


그림 20. 공기주입의 원리

#### 5.4.2 공기주입 장치의 설계

앞 절에서 소개되었던 공기주입 장치는 적절하게 설계되어 제 위치에 설치되어야만 효과를 발휘할 수 있다. 설계시 제기되는 문제는 다음과 같다.

(1) 공기주입 장치를 어디에 설치할 것인가?

(2) 만약 공기주입 장치가 한 개 이상 필요하다면 공기주입 장치와 공기주입 장치 사이의 거리는 얼마나 할 것인가 ?

앞에서 설명한 것처럼 공기는 중력의 영향 때문에 슈트의 바닥으로부터 이탈된다. 따라서 그림 18과 같이 길이가 긴 슈트나 터널에서는 공기가 적절히 제공될 수 있도록 구거의 전 길이를 따라 공기주입 장치를 설치할 필요가 있다.

(3) 공기주입 장치의 형태와 차원(dimension)은 어떻게 할 것인가?

이와 같은 질문에 정확한 대답을 한다는 것은 매우 어려운 문제이다. 대부분의 경우 이와 같은 문제에 대한 해답을 얻기 위해서는 수리모형실험이 필요하지만, 수리모형실험을 하더라도 매우 복잡한 모형 조건 예를 들면 중력, 점성력 및 표면장력의 영향 때문에 프루우드, 레이놀드 및 웨버의 상사법칙을 동시에 만족시켜야 하기 때문에 어느 정도의 불확실성은 피할 수가 없다.

한편 기존의 모델실험 결과나 현장측정 결과를 예비 설계시 기초 자료로 활용하는 것도 좋은 방법 가운데 하나이다(Jansen, 1988; Brown, 1963; Falvey, 1986).

흐름의 공동지수가 한계값 이하로 떨어질 것이 예상되는 지점에 공기주입 장

치를 설치할 필요가 있다. 이 때 공동지수의 한계값은 3장에서 제공된 도표들을 이용하여 산정할 수 있다. 또한 수리모형실험을 통해서 염밀한 해를 구하지 않아도 되는 경우에는 공동피해 매개변수(damage parameter)를 사용할 수 있다. 이와 같은 경우 공동피해 매개변수가 1,000 보다 크게 되는 지점에 공기주입 장치를 설치하면 된다.

여기서 한 가지 지적할 점은 공기주입을 위해서는 흐름을 저면 바닥으로부터 분리시켜야 하며 공기에 노출될 수 있도록 자유수맥을 가진 제트류가 형성되어야 한다는 것이다. 그 다음은 제트류 밑으로 공기가 유입될 수 있도록 하기 위해서는 도관(duct)이 설치되어야 한다는 것이다. 그럼 21은 이와 같은 문제를 해결할 수 있는 공기 공급을 위한 장치의 예시를 나타낸다. 기타 여러 가지 공기주입 장치의 형상 및 제원은 Jansen (1988), Russell 과 Sheehan(1986)을 참고하기 바란다.

공기의 속도가 100 m/sec 이내의 범위에서 공기와 물의 비율이 약 10~20% 조건에서 공기를 공급하는 도관의 제원을 얻을 수 있지만 보다 정확한 해석을 위해서는 수리모형실험이 필요하다. 특히 대규모 구조물인 경우에는 반드시 수리모형실험을 할 필요가 있다.

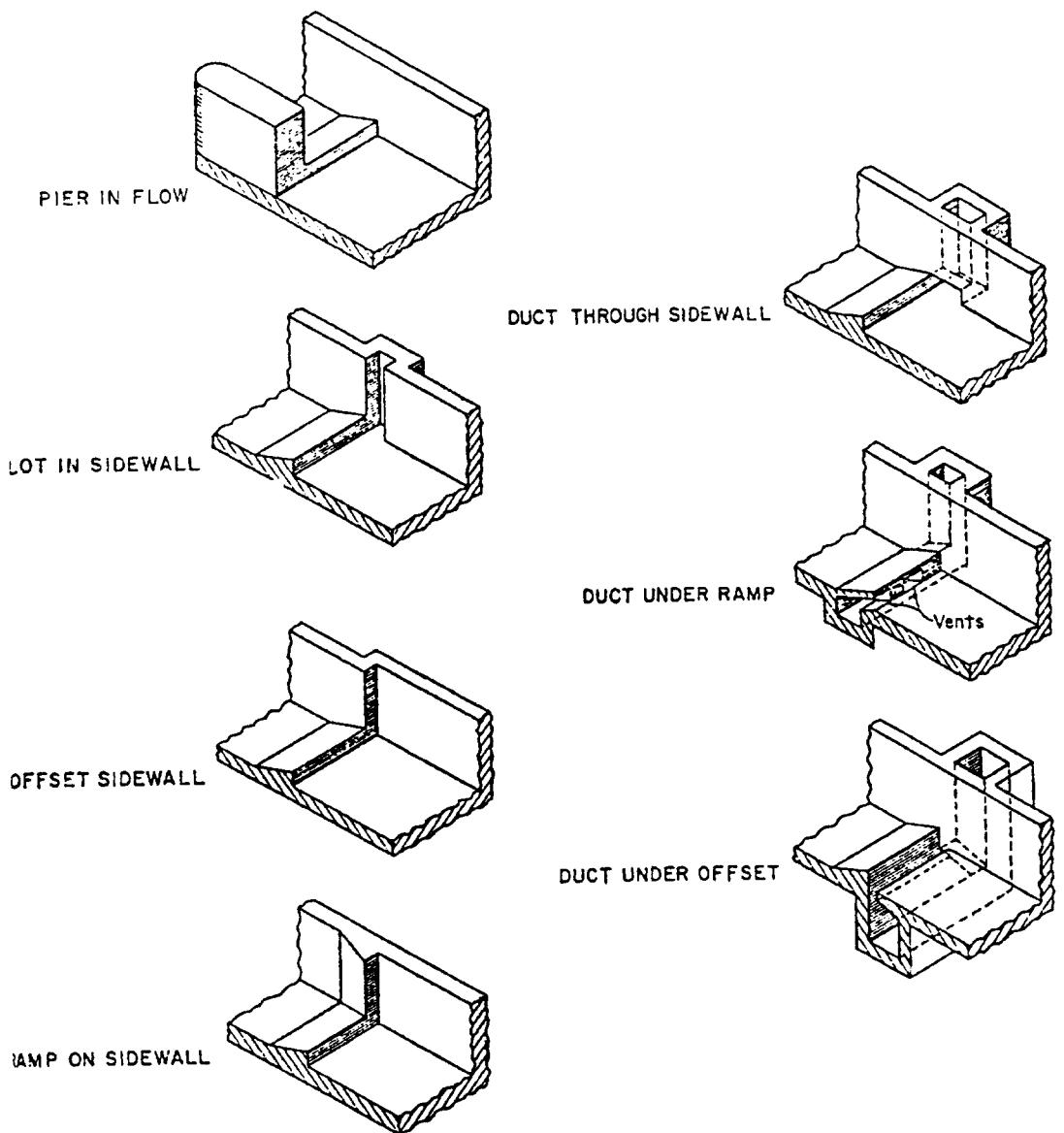


그림 21. 공기공급을 위한 장치의 구성

한편 원형 도관에 만판이 아닌 상태로 물이 흘러 갈 경우, 그림 22와 같이 터널 주위에 통상 홈(groove)이나 덧붙임(rump)을 사용한다. 덧붙임의 높이는 인버트(invert) 부분에서 최대가 되며 터널에서 최대 흐름이 예상되는 깊이에서 최소가 되도록 하여 최대 높이에서 최소 높이까지 점차 작아지게 한다. 이와 같은 덧붙임(rump)의 설계는 고속의 흐름상태에서 수탉의 꼬리(rooster tail)와 같은 모양의 흐름이 발생하는 것을 방지한다(Falvey, 1986).

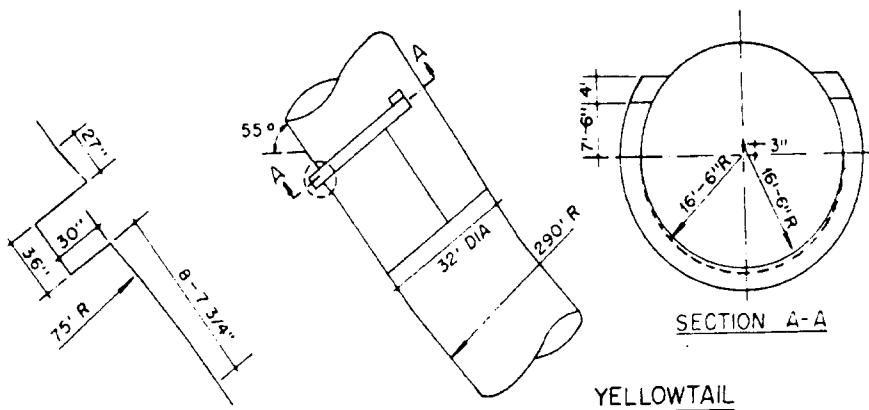


그림 22. 원형 도관의 공기주입 장치

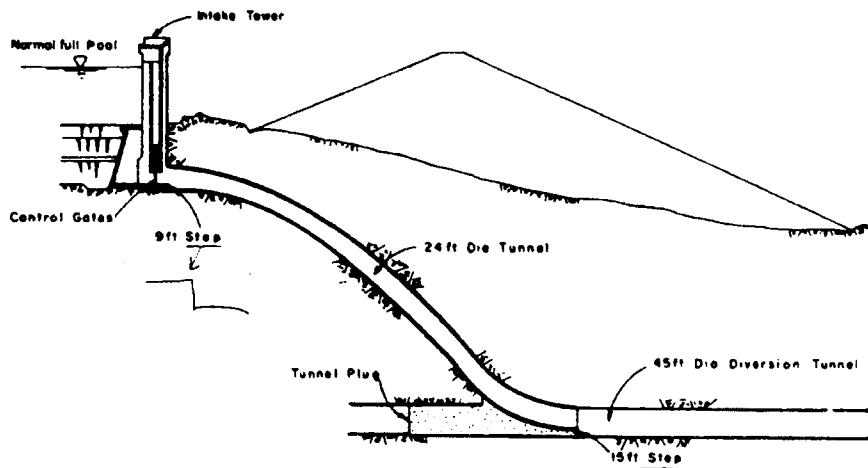
여수로에서 공기주입 장치의 적절한 간격에 관한 문제는 학자들마다 서로 다른 견해를 가지고 있다. 최근의 현장실험 결과에 의하면 약 150~300 ft (50 ~100 m) 간격으로 공기주입 장치를 설치하면 충분한 것으로 나타났다.

## 제 6 장 국내외 공동침식(Cavitation Erosion) 사례 및 해결책

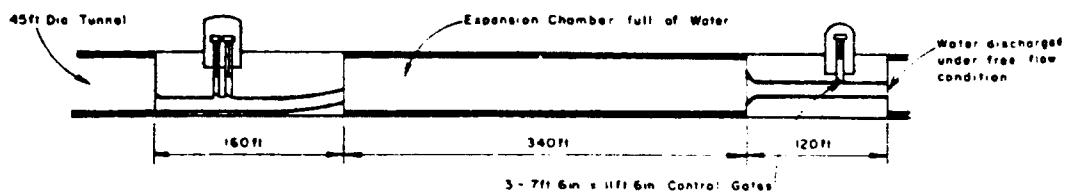
지난 50여년 동안 공동현상에 의한 구조물 파괴 사례와 이에 대한 일부 성공적인 보수 사례 및 기타 실패한 보수사례 등이 많았다(Jansen, 1988; Brown, 1963). 본 절에서는 다음과 같은 국외에서 발생한 두 가지 사례에 대해서 공동현상의 영향, 보수방법 및 설계시 고려 사항 등에 대해서 살펴보고, 국내 남강댐 방수로 사례에 관하여 기술하고자 한다.

첫 번째 사례는 그림 23과 같은 미카 댐(Mica Dam, British Columbia, 캐나다)의 방류용 구조물(outlet works) 설계에 관한 것이다(Russel과 Ball, 1967). 이 댐에는 두 개의 방류용 구조물이 건설되어 있었다. 그림 23의 상단에 있는 것은 저낙차 방류용 구조물을 나타낸다. 이 구조물은 部分流(part full flow)가 흐를 수 있도록 설계되었으며, 지배단면은 방류용 구조물의 상류단에 위치하고 있다. 이 구조물은 공동현상에 의해서 생길 수도 있는 구조물의 피해를 방지하기 위해서 두 부분에 커다란 단락부(steps)를 설치하였다. 그림에서와 같이 흐름에 공기를 주입하기 위해서 하나는 지배단면인 수문이 위치한 상류단에 9 ft의 단락부를, 또 다른 하나는 하류단에 15 ft의 단락부를 설치하였다. 건설 후 20년 동안 구조물을 운영하였으나 아무런 문제점이 발견되지 않았다.

또 다른 방류용 구조물은 고낙차(500 ft, 152.4m)에서 운영되고 있는 것이다. 공학부(Board of Engineers)에서는 제트류의 공기혼입(aeration)이 이 구조물의 공동피해를 방지할 수 있을 것인지에 대한 확신이 없었기 때문에 이 구조물에는 그림 23의 하단부에 있는 것처럼 매우 비싼 확장형(enlargement type) 에너지 감세구조물(energy dissipator)을 설치하였다. 그 결과 방류용 구조물의 운영에는 아무런 문제점이 발견되지 않았지만, 만약 이 구조물에도 저낙차 방류용 구조물과 같은 공동피해 방지 시설을 설치하였다면 구조물의 건설 및 유지를 훨씬 쉽게 할 수 있었을 뿐 만이 아니라 건설 비용도 줄일 수 있었을 것이다.



MICA DAM OUTLET WORKS.



MICA DAM LOW LEVEL OUTLETS.

그림 23. 미카 댐 방류용 구조물

두 번째 사례는 그림 24와 같이 여러 공동피해 사례 가운데 대표적인 사례로 거론되는 1983년 봄에 발생한 Glen Canyon 댐의 터널 여수로 사례이다(Jansen, 1988). 그림 25에서 볼 수 있는 것 처럼 홍수가 지나간 후 좌측 터널을 검사해 본 결과 수직 만곡부(vertival bend)와 수직 만곡부의 접촉 지점(tangency) 직하류부에 35 ft (11 m) 깊이, 50 ft (15 m) 폭으로 길이 134 ft (40 m)에 공동현상에 의해서 심각한 피해가 발생하였다. 한편 우측 터널 여수로도 검사해 본 결과, 피해 형태 및 장소 즉 만곡부 및 만곡부 직하류부의 침식 피해는 좌측 터널과 동일하였으나 그 피해 규모는 매우 작았다. 이와 같은 피해는 3.1.4 절, 4.5

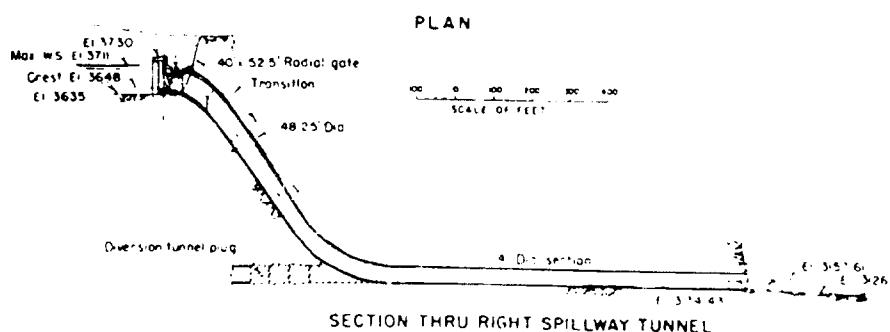
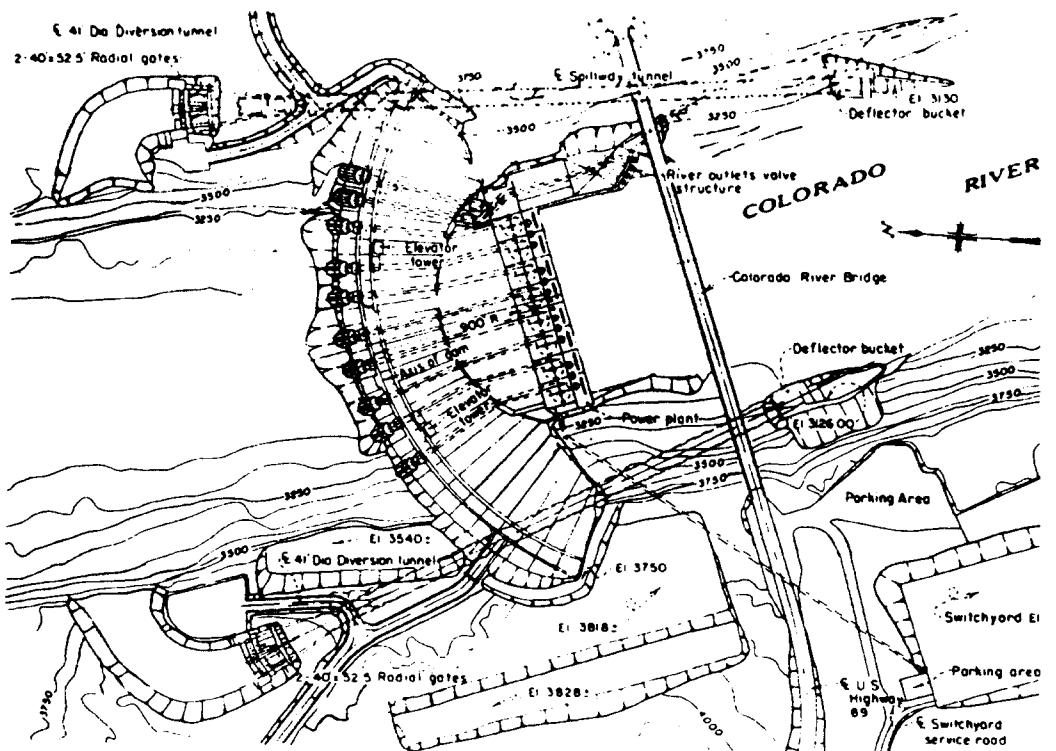


그림 24. Glen Canyon 댐의 터널 여수로

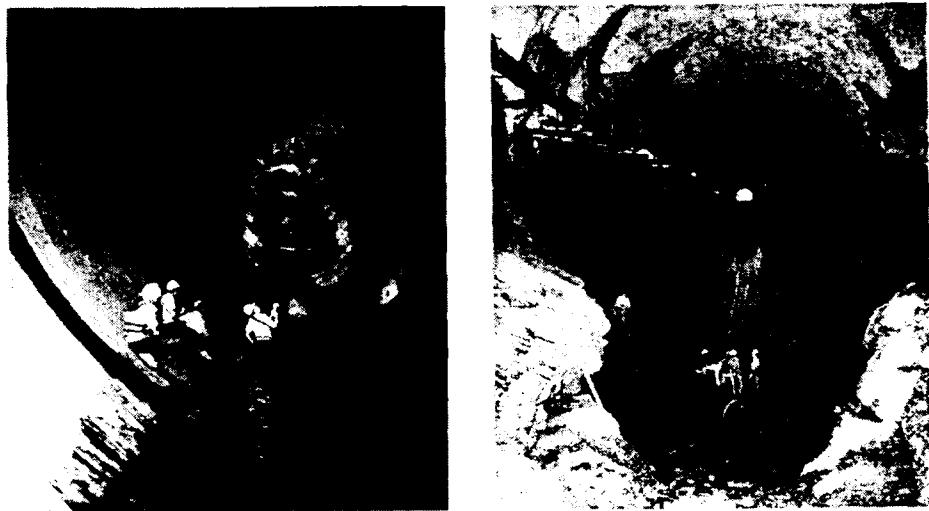


그림 25. Glen Canyon 댐의 좌측 터널 여수로

절에서 언급한 바와 같은 와류에 의한 공동 피해로 추측하고 있다.

국내의 피해 사례 조사는 문헌의 부족으로 많은 사례를 조사하기는 어려웠다. 따라서 본 과업에서는 본 분과 위원들의 과거 실무 경험을 중심으로 탐문조사하였다. 그 일례가 남강댐 鞍部 급류수로(사천만 방수로) 피해 사례이다(건설부, 1979).

남강 댐은 진주시 상류 6km 지점 부근에 壩堤를 축조하고 본 댐에서 약 11km에 이르는 사천만까지 인공 방수로를 굴착하여 본 댐 상류부에서 유하하는 대부분의 홍수량을 직접 사천만으로 방류시킴으로써 본 댐 지점 하류부 및 낙동강의 홍수피해를 경감시킬 뿐 만이 아니라 댐 하류부 연안 농경지의 관개 용수 공급, 진주시를 비롯한 댐 하류부 인접 도시의 상수도 및 공업용수 공급 및 수력발전을 위한 중앙 차수벽식 사력제 다목적 댐이다. 계획 홍수 방류량은  $7,460 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 이들 가운데  $2,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 는 남강으로 방류하고 나머지  $5,460 \text{ m}^3/\text{sec}$ 은 사천만으로 방류하도록 계획되어 있다. 한편 사천 방수로 구간에는 방수로의 유지보수를 위해서 방수로 상류 지점에 제수문이 설치되어 있으며, 급류

부 하단에는 방대한 流勢로 인한 세굴을 방지하기 위해서 減勢工 減勢池를 설치하였다.

그림 26은 사천만 방수로의 종단도 및 횡단도를 나타낸다. 사천 방수로 하단부 및 감세지에는 심한 파괴가 발생한 바 있다. 이를 위해서 1979년 피해복구를 위한 실시설계를 수행하였는데 그 당시의 상황을 살펴보면 다음과 같다. 사천 방수로는 그 중류부의 안부 개착부에서 구배가 1/50되는 급류구간의 우안측에서 지반활동이 진행되고 있었으며 공사 당시의 강우로 인하여 지반활동을 유발시켜 대규모 붕괴성 활동으로 방수로 일부를 매몰시킨바 있다. 1969년 대체적인 방수로 굴착 및 제수문, chute way 등 공사가 완료되어 홍수기에  $1,850 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 홍수를 시험 방류하였든 바 제수문 하류측 Apron 말단의 Chute way End Sill 기초지반의 세굴로 인한 붕락이 발생하여 chute way 하류에 콘크리트 Apron을 1:1의 구배로 연장 보강하고 안부에는 鋼官抗의 보강, 매몰 지구의 표면처리 및 맹암거 배수설비의 증설 등으로 보완한 바 있다. 그러나 사천 방수로는 이상 홍수시에 방류량  $7,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 최대 유량을 유하시켜야 하며 급류수로의 구배는 최상류 85m 구간은 수평이고 다음 135m 구간은 1:50 잔여 245m 구간은 1:20 구배의 콘크리트 사류수로이므로 수로 말단에 발생하는  $26\text{m/sec}$ 의 유속을 갖는 막대한 수세를 감세시키기 위하여 Deflector식 감세공이 설치되었고 그 하류에는 양안에 적당한 연장까지 도류벽이 설치되었으며 수로 말단에는 감세지를 설치하였다.

그림 27은 1978년 당시의 사천 방수로 피해현황을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것 처럼 chute block으로부터 상류측으로 길이 60m, 우안 측벽으로부터 폭 25m, 최대 세굴심도 19m 규모로 파괴가 발생하였으며, chute way 바닥 콘크리트 슬라브  $1,450\text{m}^2$ 와 12기의 chute block 가운데 우안측 8기가 방류로 인하여 완전 유실되었다. 이와 같은 chute way 하류단 파괴 부분 이외에도 웨어 직

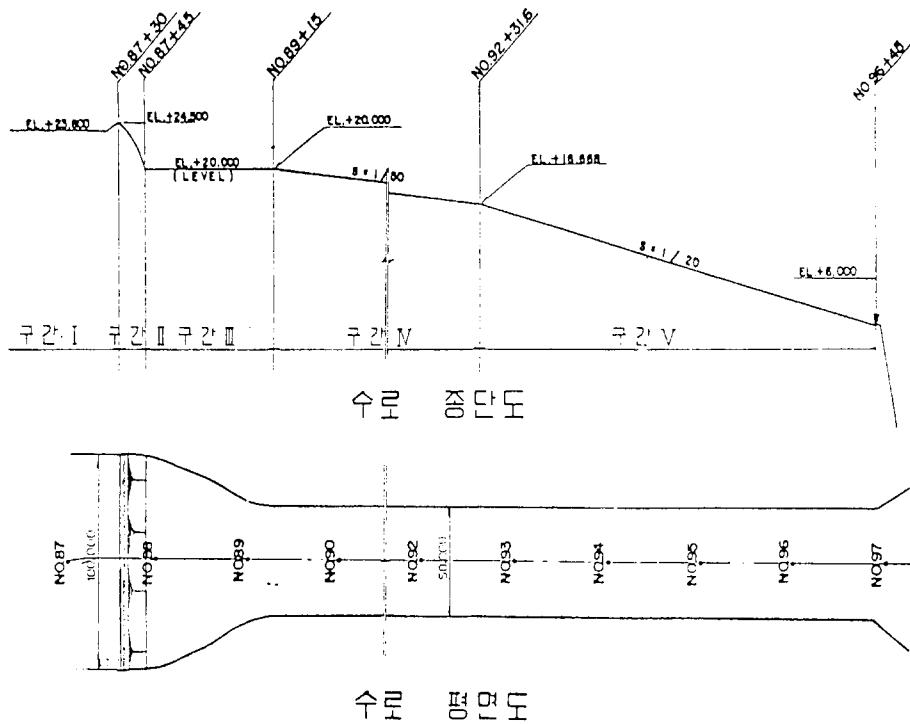


그림 26. 남강댐 사천만 방수로의 종·횡단도

하류부에서 chute block까지의 여수로 전연장에 걸쳐 수로바닥의 마모상태가 매우 심하며, 특히 우안측의 마모 상황은 바닥 슬라브의 철근까지도 노출될 정도로 심각한 실정이었다.

이러한 피해의 주원인은 주로 웨어 상류부의 하상사력, 운석 덩어리가 홍수시 水勢(웨어 상류부 유속  $V=4.5\text{m/sec}$ , 계획방류량  $Q=5,460\text{m}^3/\text{sec}$  유하시)로 인하여 웨어를 윌류하면서 수세가 다소 약한 우안측(웨어 직상류부에서의 하도가 우안측으로 만곡되고 있음)으로 보다 큰 입자의 사력역은 운석들이 몰려서 chute way를 유하하면서 수로바닥의 마모가 계속되어 온데서 기인한 것으로 추측되었다. 특히 본 방수로는 1969년 방수로 건설 당시의 시험 방류로 인하여

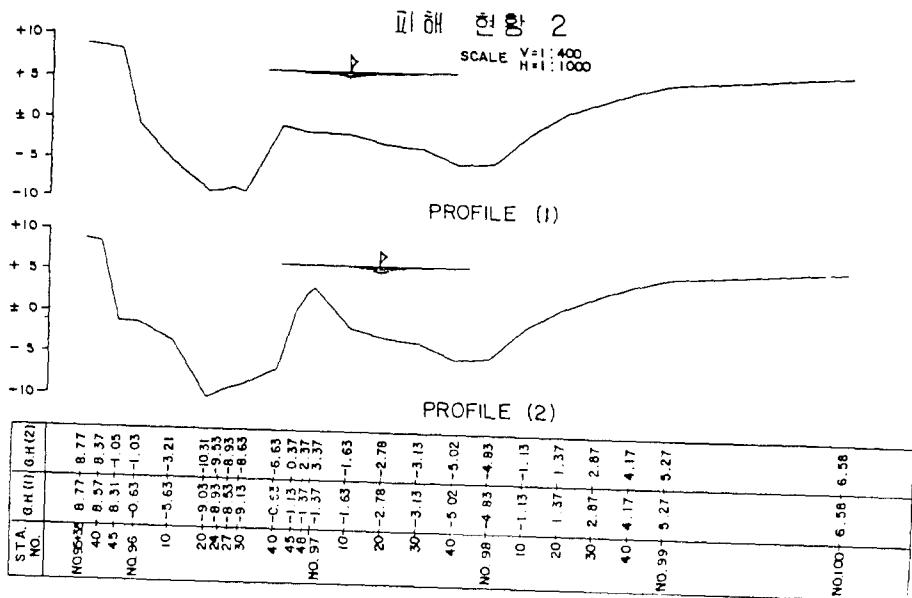
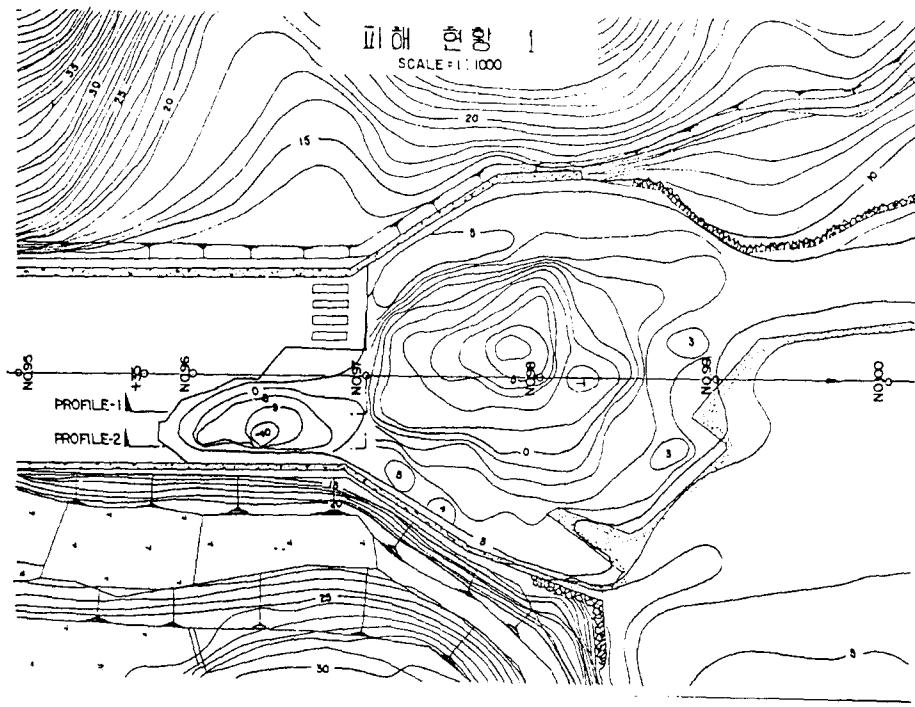


그림 27. 남강댐 사천만 방수로의 피해현황

방수로 chute way 우안측 하류단 일부가 파괴되어 이를 보강하기 위하여 잡석을 채운 후 상부 바닥 슬라브를 시공을 한 바 있다. 1979년 긴급복구를 요하는 파괴 구간이 바로 전술한 공사중 파괴된 구역으로서 이를 미루어 판단하면 콘크리트 슬라브 하부 채움 잡석이 시일이 경과함에 따라 침하함으로서 슬라브와 유리된 상태가 되면서 chute way의 콘크리트 슬라브는 수심 6m(계획 방류량  $Q=5,460\text{m}^3/\text{sec}$  방류시)의 수중량을 견디지 못하여 부분적으로 침하가 되었을 것이다. 세굴된 부분의 지질은 역질사암, 사질혈암 및 이질혈암의 교호층으로 되어 있으며 특히 층리가 발달되어 있고 본 방수로 급류수로는 이러한 지층의 단층파쇄대가 지나가는 협곡이다. 이러한 지층에 부설된 슬라브가 방류시  $20\text{m/sec}$ 의 고유속과 유송토석에 일부 파괴되어 나가면서 부분적으로 수류와 하상사이에 공동현상으로 인한 부압에 의해 바닥면에 **揚壓力**이 발생하며 파괴가 점점 확대됨과 동시에 연질암에 공동이 생기고 이 공동으로 인한 파괴가 계속 반복되어 일어났을 가능성이 크다.

이와 같이 본 피해 사례는 공동현상이 발생하는 전형적인 유속의 범위인  $35\text{m/sec}$  보다는 적으나, 방수로 건설 당시의 기초지반 처리 미숙으로 인한 단락부의 발생, 웨어 상류부의 하상사력에 의한 수로바닥의 마모 가중에 의한 요철 발생으로 인한 공동현상이 발달되어 발생한 것으로 판단된다. 기타 3 절에서 언급한 수공구조물에서의 공동발생 원인들이 본 방수로의 피해를 가중시키는데 일익을 담당했는가 하는 문제는 본 과업에서 확인할 수 없었지만, 본 피해가 발생한 지점을 생각하면 쉽게 짐작할 수 있을 것으로 판단된다.

## 제 7 장 요약 및 결론

공동 현상에 관한 문제는 수공구조물에서 야기될 수 있는 문제 가운데 주된 문제중의 하나이다. 만약 이와 같은 공동현상이 하상 혹은 수공구조물 근처에서 발생하면 국부적인 하상의 변동 또는 수공구조물에 손상을 입히게 된다. 특히 댐의 여수로와 같은 콘크리트 구조물은 공동 현상에 대한 저항력이 약하기 때문에 장시간에 걸쳐 심한 손상을 일으킬 수 있다.

따라서 본 과업에서는 특히 다음의 사항에 주안점을 두어 수공학에서의 공동 현상에 관한 제반 사항을 고찰하여 이론적으로 정리하였다.

- (1) 공동 현상에 대한 기초 이론을 제공
- (2) 공동 현상의 전형적인 “triggers” 지적
- (3) 다양한 수공구조물에서 공동현상의 발생 가능지점(potential point)를 지적
- (4) 일반적으로 통용되는 공동현상을 해결할 수 있는 방법 제시

이와 같은 공동 현상 문제를 해결하기 위해서 여러 가지 방면으로 그 해결책을 찾으려고 노력해 왔다. 많은 경우에 저낙차 수공구조물의 경우 설계시 흐름면을 유선화(streamlining) 하는 것 등 설계시 주의를 기울이면 공동현상에 의한 피해를 방지할 수 있다. 그러나 흐름의 유속이 100 ft/sec (35 m/sec)가 넘는 고낙차 수공구조물의 경우에는 공동현상을 피한다는 것은 거의 불가능하다. 어떤 경우에 방류용 구조물이 압력 구거(pressure conduits)인 경우 흐름단면의 축소(throttling of the flow)는 지배단면의 상류부 압력을 증가시킬 수가 있어 공동 피해를 방지하는데 좋은 해법이 될 수 도 있다.

지금까지 알려진 바로는 공동피해를 방지할 수 있는 방법에는 흐름면의 유선화(streamlining), 흐름면 처리(smoothing boundary surfaces), 흐름 단면축소 (chocking the flow) 등 여러 가지 방법이 제시되었으나 최선의 방책은 흐름에

공기를 주입하는 방법이다. 이 방법은 구조물을 보호하는데 통상 간단하고 값이 싸기 때문이다. 또한 이와 같은 공기주입 방법은 공동 현상 자체를 치유하는데에도 많은 도움이 될 뿐 만이 아니라 oxygen concentration의 증가, energy dissipation의 역할 등 여러 가지 이점을 제공한다.

이와 같이 여러 가지 기준에 제시된 공동피해 해결책들이 새로운 구조물을 설계할 때 이용될 수 있다. 그러나 대규모 구조물인 경우에는 반드시 수리모형 실험을 통하여 보다 정확한 해석을 할 필요가 있다.

### 참 고 문 헌

- 건설부 (1979) “남강댐 안부 급류수로 피해공구공사 실시설계 기본계획보고서”, 산업기지개발공사, p. 66.
- Arndt, R.E.A. et. al. (1979) "Influence of Surface Irregularities on Cavitation Performance", Journal of Ship Research, Vol. 23, No. 3, pp. 157-170.
- Brown, F.R. (1963) "Cavitation in Hydraulic Structures", ASCE, Journal of Hydraulic Division, Vol. 89, No. HY1, Jan. 1963, pp. 99-115.
- Falvey, H.T. (1986) "Review of Aerators to Prevent Cavitation in Spillways", U.S.-Romanian Workshop on Water Resources Engineering, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Proj. Report No. 258, July 1986.
- Henderson, F.M. (1966) "Open Channel Flow", Macmillan Publishing Co., Inc.
- Jansen (1988) "Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation".
- Johnson, V.E. (1963) "Mechanics of Cavitation", ASCE, Journal of Hydraulic Division, Vol. 89, No. HY3, May 1963, pp. 251-275.
- Knapp, R.T., Daily, J.W., and Hammitt, F.G. (1970) "Cavitation", IIHR, Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa.
- Russel, S.O., and Ball, J.W. (1967) "Sudden-Enlargement Energy Dissipator for Mica Dam", ASCE, Journal of Hydraulic Division, Vol. 93, No. HY4, July 1967, pp. 41-56.
- Russell, S.O., and Sheehan, G.T. (1974) "Effect of Entrained Air on Cavitation Damage", Canadian Journal of Civil Engineering, No. 1, pp. 97-107.
- Schlichting, H. (1955) "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill Book Company.

United States Bureau of Reclamation (1987) "Design of Small Dam", U.S.  
Department of Interior.

Vennard, J.K., Harrold, J.C., Warnock, J.E., and Hickox, G.H. (1947)  
"Cavitation in Hydraulic Structures: A Symposium", Transactions, ASCE,  
Vol. 112, pp. 1-124.

Wagner, W.E. (1967) "Glen Canyon Dam Diversion Tunnel Outlets", ASCE,  
Journal of Hydraulic Division, Vol. 93, No. HY6, Nov. 1967.

White, F.M. (1979) "Fluid Mechanics", McGraw-Hill Book Company.