

터널식 여수로에서 발생하는 공동현상(Cavitation)

윤동덕¹⁾, 김태혁^{2)*}, 이종우²⁾, 천윤철²⁾, 오명렬¹⁾

Cavitation in Tunnel Spillways

Dong-Duk Yoon, Tae-Heok Kim, Joong-Woo Lee, Youn-Chul Chun and Myung-Ryoul Oh

1. 서 론

수로터널은 일반적으로 상수 및 용수를 도수할 목적으로 설치하는 터널로서 기능상 여러가지로 분류할 수 있으나, 도로, 철도, 지하철 같은 교통터널(transportation tunnel)과는 달리 터널내에 수압의 작용이 반복되는 특징이 있으며, 이를 기본으로 하여 내수압의 작용 유무에 따라 자유수면(무압터널)터널과 압력터널로 분류된다(Fig. 1. 참조).

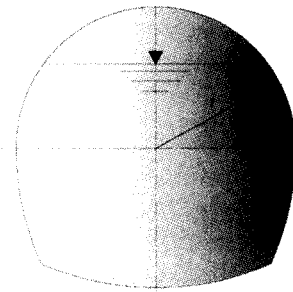
또한, 용도에 따라 상하수도 터널, 발전용 터널, 여수로(spillway) 터널, 가배수(diversion) 터널 및 방류(outlet) 터널로 분류되고 있다.

본 고에서는 이러한 수로터널 중 터널식 여수로에서 발생할 수 있는 공동현상(cavitation)에 대하여 발생원인과 대처방안 및 피해사례에 대하여 정리하고자 한다.

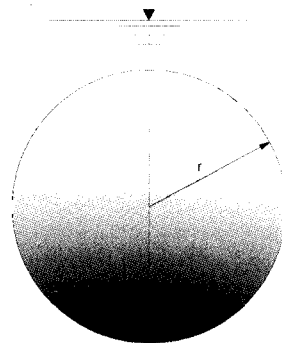
2. 국내외 수로터널 시공사례

최근 기상이변 등 수문환경의 변화에 따라 댐 설계기준이 가능 최대홍수량(PMF)으로 강화되고, 계획 홍수위에 접근하는 대홍수가 발생함에 따라 댐의 안전성 확보를 위한 합리적인 치수대책이 필요하게 되었다. 이러한 치수능력 증대방안의 하나로 터널식 여수로가 설계되고 있으며, 이러한 국내외의 수로터널에 대한 시공사례를 조사한 결과를 Table 1, Table 2에 정리하였다.

국내의 경우 상수도 터널, 발전용 터널 및 가배수 터널이 주를 이루고 있으며, 직경이 10 m 미만인 압력터널이고 경사터널이다. 국외의 경우는 터널식 여수로 및 가배수 터널이 대부분이며, 직경이 대단면이고 경사터널이라는 특징이 있다.



(a) Free Surface Tunnel (No Pressure)



(b) Pressure Tunnel

Fig. 1. Hydraulic classification of waterways

3. 공동현상(Cavitation)

3.1 공동현상의 정의

유체의 흐름조건에서 유체의 압력이 증기압(vapor pressure)보다 낮아지게 되면 기포, 즉 공동(cavity)이

¹⁾ (주)다산이엔지

²⁾ 삼성물산(주) 건설부문

*교신저자(Corresponding Author): kimtaehyok@samsung.com

접수일: 2004년 2월 26일

심사 완료일: 2004년 4월 19일

Table 1. Cases of domestic waterways

구분	형식 및 제원	굴착공법	지질	특이사항	
도수터널	입하-영천 도수로 터널	개수형, D=3.5 m, L=32.5 km	TBM., D&B	퇴적암류 화강암류	국내최장 전구간 라이닝
	주암댐 도수터널	개수형, D=4.5, 5.3 m, L=11.3 km	TBM., D&B	편마암류	부분라이닝 운영중 보수
	구덕 수로터널	압력형, D=7.0 m, L=3.0 km	TBM	화산암류	전구간 라이닝
	주암 상수도 터널	압력형, D=5.0 m, L=5.0 m	TBM	편마암류	전구간 라이닝 입출구 누수
	울산공업용수 터널	개수형, D=3.5, 4.3 m, L=22.18 km	TBM., D&B	화강암류	부분라이닝
	용담댐 도수터널	압력형, D=3.8 m, L=23.0 km	TBM., D&B	화산암류	전구간 라이닝
	밀양댐 도수터널	압력형, D=2.6, 3.8 m, L=7.655 km	TBM., D&B	화강암류	국내최소 직경 부분 라이닝
	녹산하수방류관거	L=3.0km 내외	TBM, Shield		시공중
	수정산 배수지 터널	무압형, D=5 m, L=1.835 km 내외	TBM, ITC		시공중
	복악 배수지 터널	L=4.6 km×2련	TBM		준공
	불광배수지 터널	무압형, D=6.2 m, L=4.0 km×2련	TBM+D&B확공		준공
양수발전터널	한강차집관로터널	L=3.0 km 내외	TBM		준공
	청평 양수발전소	압력형, D=4.1~6.6 m, L=0.726 km	D&B	변성암류	-
	무주 양수발전소	압력형, D=4.0~6.7 m, L=2.524 km	D&B	변성암류	2단 경사터널
	산청 양수발전소	압력형	D&B	변성암류	준공
	양양 양수발전소	압력형, L=6km	D&B	변성암류	국내 최장 경사터널 준공
청송 양수발전소	압력형	D&B	변성암류	준공	

Table 2. Cases of foreign tunnel spillways

구분	국가	설계유량(C_{ms})	터널연수	직경(m)	길이(m)	경사(Degrees)	수두(m)	준공년도
Hoover Dam	USA	5,664	2	15.24	195/225.5	50	170.4	1936
Yellowtail Dam	USA	2,605	1	9.75	351	55	147.8	1966
Blue Mesa Dam	USA	963	1	6.4	330	55	10.3	1966
Flaming Gorge Dam	USA	815	1	5.5	300	55	131.7	1964
Glen Canyon Dam	USA	3,908	2	12.5	570/517	55	174.8	1964
Kortes Dam	USA	1,416	1	9.14	197	50	197.0	1951
Seminole Dam	USA	1,500	1	9.14	170.7	50	62.78	1939
Hungry Horse Dam	USA	1,416	1	7.47	259.7	50	156.97	1953
Cirata Dam	Indonesia	2,600	2	10	570.5/585.53	50	116.0	1987
Batutegei Dam	Indonesia	2,000	1	11.5	557	50	116.0	2002
Tachien Dam	Taiwan	3,200	1	12.0	800	50	134.5	1974
Shihmen Dam	Taiwan	3,200	2	7.0W×10H	720	0.57	135	1964
Misakubo Dam	Japan	1,700	1	8.5	162.5	10	60	1969
Nagawado Dam	Japan	1,500	1	8.0	280	50	141	1971
Arima Dam	Japan	670	1	7.0	105.7	47	81.5	1986

생기게 된다. 이때 발생한 공동은 유체압력이 높은 지역으로 이동하게 되어 압축되고 결국은 파괴되어 그 결과 국부적으로 높은 압력이 발생하게 된다. 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(Fig. 2 참조). 여기서, 압력강하에 의해서 기포가 발생하는 공동현상은 온도 증가 즉 열을 가했을 때 기포가 발생하는 끓음(boiling)현상과는 구분된다.

3.2 공동현상의 원인

수로터널에서 흔히 발생할 수 있는 공동현상의 원인으로서는 단일 요철(isolated irregularities), 등분포 요철(uniformly distributed roughness), 정렬의 변화(change in alignment), 와류(vortex) 등이 있다. 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.

3.3 공동지수(Cavitation Index)

공동지수는 공동현상에 의한 구조물의 손상 가능성 정도를 나타내는 무차원 수로서 공동현상을 예측하는데 매우 편리한 지수이며, 베르누이 방정식에서 식 (1) 및 (2)로 나타낼 수 있다.

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

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

식 (2)의 양변을 $\rho V_0^2/2$ 로 나누면 다음 식 (3)과 같은 무차원수 σ_1 를 얻을 수 있다.

$$\sigma_1 = \frac{p_0 - p_1}{\rho \frac{V_0^2}{2}} = \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^2 - 1 \quad (3)$$

압력 p_1 이 증기압 p_v 보다 큰 상태에서는 $\sigma_1 = \sigma_c$ 의 상수 값을 갖는다. 압력 p_1 이 증기압 p_v 보다 작아지게 되면 식(3)은 성립하지 않게 되며, p_1 을 p_v 와 같다고 놓을 때 $\sigma_1 = \sigma_c$, 즉 σ_1 은 σ_c 보다 작아지게 된다. 이것은 바로 다음 식 (4)과 같은 공동지수의 개념으로 표현된다.

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\rho \frac{V_0^2}{2}} \quad (4)$$

식 (4)의 σ 가 식 (3)의 σ_1 보다 커지게 되면 p_1 은 p_v 보다 큰 상태이므로 공동현상이 발생하지 않지만, 압력 p_1 이 점차 작아져 증기압과 같은 상태가 되었을 때를 초기 공동현상(incipient cavitation)의 단계로 표현되며, 이때의 공동지수를 한계 공동지수(critical cavitation index)라 부른다. 공동지수 σ 가 σ_1 보다 작아지게 되면, 즉 p_1 이 p_v 보다 작아지게 되면 발달된 공동현상(developed cavitation)이 예상되는 단계이고, σ 값이 점차 작아지게 됨에 따라 구조물에 미치는 손상의 정도도 증가하게 된다.

3.4 공동현상에 의한 구조물 손상

공동현상은 흐름조건에 따라 압력이 증기압보다 더 낮은 지역에서 발생하여 압력이 높은 지역으로 이동하게 됨에 따라 Fig. 3과 같이 기포 수는 압축되고 결국은 파괴되어 많은 에너지를 방출하게 된다. 그 에너지는 주위 유체나 경계면에 매우 높은 국부적인 압력으로 전달되고 이러한 엄청난 압력은 공동 침식(cavitation erosion)으로 알려진 손상의 원인이 된다.

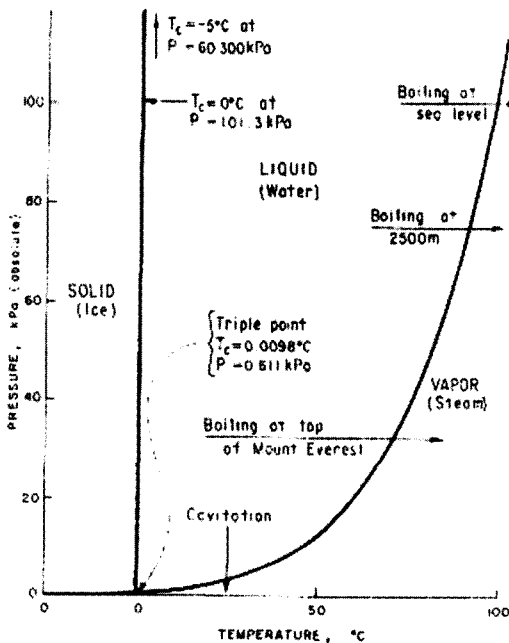


Fig. 2. Phase diagram for water

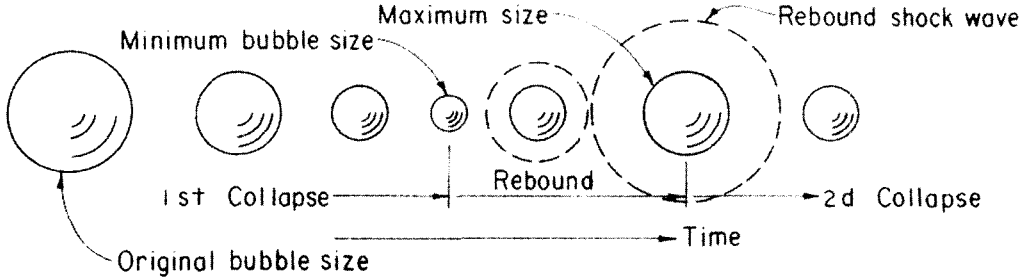


Fig. 3. Collapse mechanism of bubbles

이러한 공동현상에 의한 터널식 여수로의 손상은 Fig. 4 (a)와 같이 1941년 Hoover dam에서 처음으로 발생하였으며, Blue Mesa dam(1970), Flaming George dam(1975), Glen Canyon dam(1983)등에서도 터널 라이닝의 손상이 발생하였다. 또한 개수로식 여수로에서도 Fig. 4(b)처럼 공동현상에 의한 손상이 발생하였다.

이 당시만 하더라도 공동현상에 대한 원인이 규명되지 않아 공기혼입장치(aerator)를 설치하지 못하여 터널 라이닝에 손상이 발생하였다. 그러나 Yellowtail dam에 공기혼입장치를 설치한 이후 1984년 Glen Canyon dam에서 그 효과가 검증되어 Flaming George dam, Blue Mesa dam, Hoover dam 등에 공기혼입장치를 설치하여 더 이상 공동현상에 의한 구조물의 피해는 발생하지 않았다.

이러한 공동현상에 의한 구조물 손상은 Fig. 5와 같이 공동지수와 관련이 있다. Hoover dam, Yellowtail dam, Blue Mesa dam, Flaming Gorge dam 및 Glen Canyon dam의 터널식 여수로에서 공동지수 $\sigma = \frac{p - p_v}{V^2/2}$ (여기서, p : 압력수두 p_v : 수증기압 V : 유속)는 모두 0.2

보다 작고 유속이 30m/s 이상이 되어 터널 라이닝의 손상을 방지하기 위한 대책으로서 공기혼입장치(aerator)의 필요성이 대두되었다.

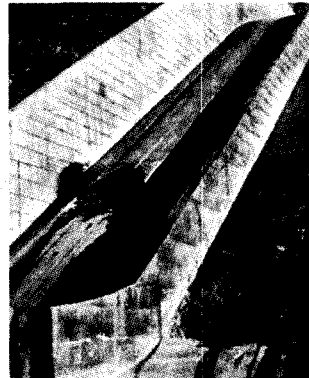
3.5 공동현상에 대한 대처방안

터널식 여수로에 대한 공동현상이 인식되기 시작한 것은 1940년대 이었지만 1970년대까지도 이에 대한 대처방안으로 단지 공동현상이 예상되는 지점에 철판과 같이 쉽게 손상을 입지 않는 재료를 사용하거나 또는 공동현상을 피할 수 있는 구조형상을 채택하고 시공에 있어서도 엄격한 시방을 적용하는 것이었다. 미국의 경우 1960년대에 공기혼입장치에 대한 개념은 인식되었으나 실제 공동현상에 대한 문제가 발생하였을 때 이에 대한 해답을 찾고자 많은 실험과 이론적 접근을 통해서 대처방안을 강구해 왔다.

그 결과 (1)구조물 표면의 유선화(streamlining), (2)표면처리(smoothing and coating of surfaces), (3)흐름의 조절판 부착(throttling (chocking) the flow), (4)공기혼입장치(aerator)의 방법이 있으나 공기혼입장치



(a) Hoover Dam Tunnel Spillway



(b) Karun Dam Chute

Fig. 4. Cavitation Damage in Spillways

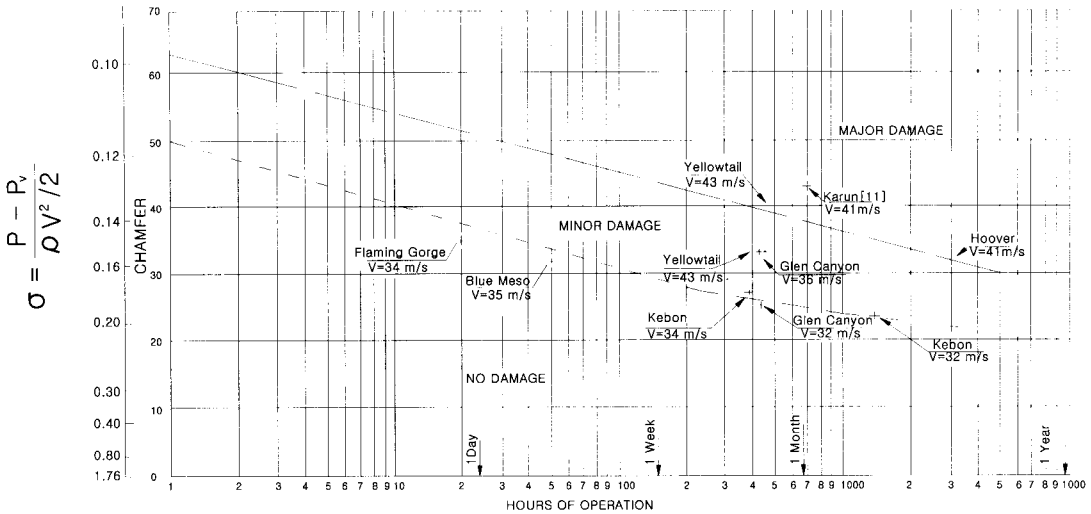


Fig. 5. Damage experience in spillways

(aerator)설치가 효과적이고 기타의 방법은 다소 제한적인 적용성을 가지고 있는 것으로 알려져 왔다.

4. 공기혼입장치(Aerator)

공기의 영향은 공동현상의 발생을 억제시키는 데에도 중요한 역할을 하지만 공동현상에 의한 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.

4.1 공기혼입장치 형식

공기혼입장치는 Fig. 6과 같이 deflector, groove 및 offset의 3종류로 구성되며 개수로 형식의 여수로에서는 일반적으로 offset 형식을 채택하고 있으나 터널식 여수로에서는 위치 및 구조물의 제약에 받기 때문에 거의 groove 타입을 채용하고 있다. Fig. 7은 터널식 여수로에서 공기혼입장치를 설계 및 시공한 예이며, Table 3에 공기혼입장치의 설치사례를 정리하였다.

4.2 공기혼입장치 효과 검증시험

Yellowtail dam(1968), Flaming George dam(1982)에 공기혼입장치를 설치하였지만 그에 대한 효과가 의문시 되었다. 따라서 1983년 Glen Canyon dam의 터널식 여수로에서 공동현상에 의한 터널 라이닝 손상이 발생하여 이 부위를 보수하고 공기혼입장치를 설치한

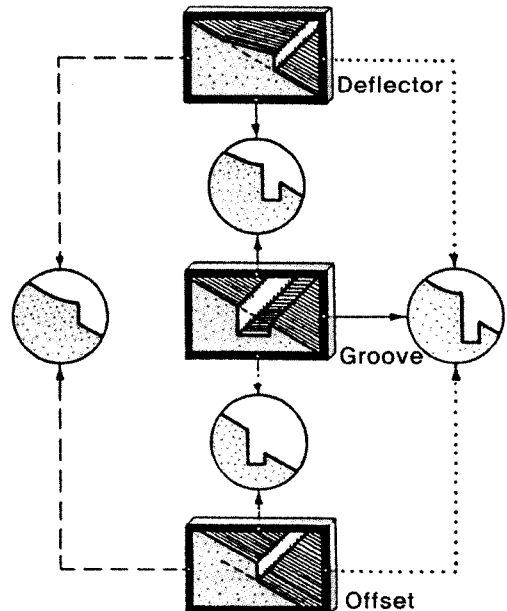


Fig. 6. Types of aerator

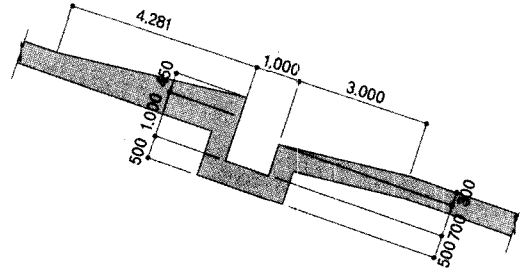
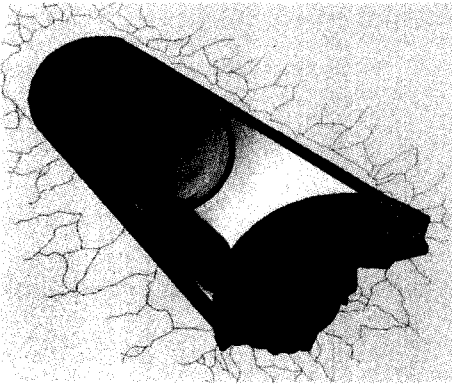


Fig. 7. An example of aerator design in tunnel spillway

Table 3. Cases of aerator construction

No.	댐 명	공기혼입장치 형식	Offset 높이 (구간거리)	Groove (깊이×폭)	Ramp 높이 (구간거리)
i)	Blue Mesa dam	Groove	203 mm(3,050 mm)	914 mm×914 mm	300 mm(2,400 mm)
ii)	Flaming George dam	Groove	100 mm(2,413 mm)	610 mm×610 mm	100 mm(914 mm)
iii)	Glen Canyon dam	Groove	305 mm(6,096 mm)	1,200 mm×1,200 mm	180 mm(1,295 mm)
iv)	Hoover dam	Offset	1,500 mm(7,620)	-	900 mm(5,270 mm)
v)	Yellowtail dam	Groove	152 mm(2,635 mm)	914 mm×914 mm	76.2 mm(685.8 mm)
vi)	Cirata dam	Groove	150 mm(2,000 mm)	800 mm×800 mm	80 mm(400 mm)
vii)	Batutegi dam	Groove	150 mm(2,650)	900 mm×900 mm	80 mm(700 mm)

후, 공기혼입장치의 효과를 검증하고자 1984. 8. 11~1984. 8. 17까지 prototype test를 실시하였다.

시험 전에는 터널식 여수로에 압력 gage와 정적 및 동적 풍속 gage등 여러가지 계측기기를 설치하여 댐 방류 시 공기혼입장치에 작용되는 공기속도와 터널라이닝에 작용하는 dynamic pressure를 측정하였다(Fig. 8

참조). Prototype test 결과 공동현상에 의한 손상은 발견되지 않았으며 공기혼입장치에 의한 효과가 검증되어 이후 공기혼입장치가 보편적으로 사용되었다.

5. 결론 및 제언

도로, 철도, 지하철과 같은 교통터널과는 달리 수로터널에서는 물의 흐름에 의한 수리적 현상을 반드시 고려해야 한다. 최근 기상이변 등 수문환경의 변화에 따라 댐 설계 기준이 가능 최대홍수량(PMF)으로 강화되고, 댐의 안정성 확보를 위한 합리적인 치수대책이 필요하게 됨에 따라 치수능력 증대방안의 하나로 터널식 여수로의 설계가 진행되고 있다. 본 고에서는 터널 기술자들에게는 다소 생소한 터널식 여수로 설계 시, 검토해야 하는 공동현상의 발생원인, 구조물 손상 및 대처방안에 대하여 기술하였으며, 향후 유사프로젝트 수행 시 터널 기술자들에게 참조가 되었으면 한다.

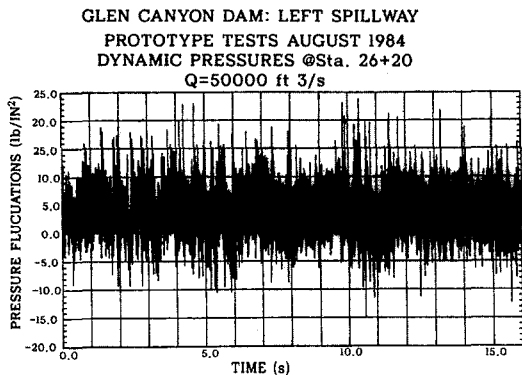


Fig. 8. Dynamic pressure fluctuation

참고문헌

1. USER, 1985, Spillway test at Glen Canyon Dam.
2. Henry T. Falvey, 1990, Cavitation in chutes and spillways, USBR Engineering monograph No. 42.
3. 이웅천, 1987, 고유속 수리구조물의 급기(Aeration)장치 설계, 대한수문학회, 229-234.
4. Brown, F.R., 1963, Cavitation in hydraulic Structures, ASCE, Journal of Hydraulic Division, Vol. 89, No. HY1, 99-115.
5. Russell, S.O. and Sheehan, G.T, 1974, Effect of Entrained Air on Cavitation Damage, Canadian Journal of Civil Engineering, No.1, 97-107.

윤동덕



1988년 연세대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 1990년 연세대학교 대학원 토목공학과 공학석사
 2001년 동아대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료
 Tel: 02-873-1701
 E-mail: dwgeo@zaigen.co.kr
 현재 다산이엔지 지반사업2부 이사

김태혁



1992년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 02-2145-6021
 E-mail: kimtachyok@samsung.com
 현재 삼성물산 건설부문 국내토목영업팀 과장

이중우



1984년 한양대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 Tel: 02-2145-5971
 E-mail: woolee@samsung.com
 현재 삼성물산 건설부문 국내토목영업팀 차장

천윤철



1981년 서울대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 Tel: 02-2145-5144
 E-mail: omma@samsung.com
 현재 삼성물산 건설부문 국내토목영업팀 상무

오명렬



1980년 연세대학교 토목공학과 공학사
 1982년 연세대 대학원 토목공학과 공학석사
 1990년 Univ of Michigan, Ann Arbor 공학석사
 1992년 State Univ. of New York 박사과정 수료
 Tel: 02-873-1701
 E-mail: ohmroh@hotmail.com
 현재 다산이엔지 대표이사