

수리특성을 고려한 수로터널 설계

Design Consideration for Tunnel Spillway related to Hydraulic Characteristics

윤동덕¹⁾, Dong-Duk Yoon, 김태혁²⁾, Tae-Hyok Kim, 이중우³⁾, Jung-Woo Lee, 오명렬⁴⁾, Myung-Ryul Oh

¹⁾ 다산이엔지 지반사업본부 상무, Director, Geotechnical Division, Dasan Engineering Co.

²⁾ 삼성물산 건설부문, 과장, Manager, Samsung Corporation

³⁾ 삼성물산 건설부문, 차장, Project Manager, Samsung Corporation

⁴⁾ 다산이엔지 사장, President, Dasan Engineering Co.

SYNOPSIS : The recent unpredictable weather condition, especially abnormal heavy precipitation which is on the verge of PMF, made implement more rigorous design standard. Following these trends, the idea of additional auxiliary spillway, most of them are tunnel around existing one, is adopted to many sites. Tunnel spillway, having free water table is generally consisted of several compartments such as inlet, transition, inclined, curved and stilling parts. It may has some technical problems to be considered. Among them, the surface deterioration due to cavitation is reported many times in the part of irregularities on lining. Including this kind of problem, several technical considerations for tunnel spillway will be handled in this paper during design procedure.

Keywords : Tunnel spillway, PMF, inclined tunnel, cavitation, water pressure in tunnel, lining, aerator

1. 서 론

수로터널은 일반적으로 상수 및 용수를 도수할 목적으로 설치하는 터널로서 기능상 여러 가지로 분류할 수 있으나, 도로, 철도, 지하철과 같은 교통터널(transportation tunnel)과는 달리 터널내에 수압의 작용이 반복되는 특징이 있으며, 이를 기본으로 하여 내수압의 작용 유무에 따라 자유수면 터널과 압력터널로 구분된다. 또한 용도에 따라 상하수도 터널, 발전용 터널, 여수로(spillway) 터널, 가배수(diversion tunnel)터널 및 방류(outlet)터널로 분류되고 있다.

국내의 경우 청평과 무주 양수발전소에서 발전용 터널이 시공되었으며, 구덕, 주암 및 용담 댐에서 도수로터널이 시공되었다. 국외의 경우 후버 댐, 글렌 캐년 댐, 코르데스 댐, 블루메사 댐 등에서 개수로형의 터널식 여수호가 시공되어 운영중에 있다. 국내의 여수로 형식 중 터널식 여수로는 운영 중인 것은 없으나, 치수능력증대사업으로 설계 및 시공 중에 있다.

최근 기상이변 등 집중호우에 의한 수문환경의 변화에 따라 댐 설계기준이 가능 최대홍수량(PMF)으로 강화되고, 계획홍수위에 접근하는 대홍수가 발생함에 따라 댐의 안정성 확보를 위한 합리적인 치수대책이 필요하게 되었다. 이러한 치수능력 증대방안의 하나로 비상 여수호가 설계 및 시공되고 있다.

2. 여수로 설계

2.1 노선 선정

노선 선정은 수리특성, 지반조건 및 환경영향을 고려하여 최적위치를 선정하게 된다. 첫째, 수리특성 측면에서 유입부 및 방류부는 기존 여수로의 흐름과 간섭영향이 없어야 한다. 이와 같은 물의 흐름에 대한 간섭영향은 수치해석과 수리모형실험을 통해 검증된다. 둘째, 유입부 및 방류부는 PMF시 물을 방류할 수 있는 단면이어야 하므로 기존의 교통터널보다는 대단면이 된다. 따라서 유입부 및 방류부는 시추조사 및 물리탐사 등 정밀조사를 실시하여 지반조건이 양호한 곳에 선정되어야 한다. 셋째, 유입부 및 방류부의 지반조건이 불리하면 갱구 형성시 대규모 비탈면이 발생할 수 있으므로 산림훼손이 심하게 된다. 따라서 친환경을 고려하여 산림훼손을 최소화 할 수 있는 곳을 선정하여야 한다.

2.2 여수로 형식

여수로 형식은 크게 개수로와 관수로 형으로 구분할 수 있다. 개수로 형에는 자유낙차형, 월류형 및 측수로형 여수로가 있으며, 관수로 형에는 터널형, 샤프트 및 사이폰 여수로 등이 있다. 이중 자유월류형 여수로가 국내 댐의 93%를 차지하고 있으며, 기타 모닝글로리, 측수로 및 사이폰 형식을 취하고 있다.

표 1. 여수로 형식별 특징

구분		특징
개수로형	자유낙차 여수로	 <ul style="list-style-type: none"> • 아치댐에 적합 • 여수로의 기초가 견고한 경우 채택 • 하류에 부댐 설치하여 인공 저수지를 만들거나 콘크리트 물받이 설치
	월류 여수로	 <ul style="list-style-type: none"> • 월류 마루부의 흐름이 공기의 유입없이 월류부 표면에 밀착하며 경계면의 간섭없이 마루부를 흐르도록 함 • Concrete 댐에 설치
	측수로 여수로	 <ul style="list-style-type: none"> • 물의 흐름이 바뀌어 수리학적으로 비효율적 • 월류 수심이 제한되어 월류부 연장이 긴 여수로가 필요한 경우나 좁은 급경사 수로 및 터널에 접촉할 경우 적용 • Fill댐에 설치
관수로형	터널 여수로	 <ul style="list-style-type: none"> • 터널 또는 암거를 설치하여 홍수량 배제 • 터널내에서 유목등의 지장을 받지 않고 자유로운 부분 흐름을 유지하기 위하여 총 단면적에 대한 통수 단면적의 비는 75% 이내
	샤프트 여수로	 <ul style="list-style-type: none"> • 나팔형(morning glory) 또는 낙하 유입관 여수로라고 함 • 제수두에서 최대 가까운 유량을 월류 • 설계 유입홍수보다 큰 홍수에는 단점 • 보조 또는 비상여수로와 병행하여 사용
	사이폰 여수로	 <ul style="list-style-type: none"> • 역U자형의 개수로 여수로 • 저수지 수위와 여수로 마루부 수두차 8m 이하로 제한 • 심한 진동에 견딜 수 있는 견고한 지반 필요

2.3 굴착 단면

터널식 여수로의 설계기준은 댐 설계기준 및 USBR에서 터널내 안정된 흐름을 유지하기 위해 터널 단면적에 대한 흐름단면적의 비는 75% 이내로 규정하고 있다. 터널단면은 그림 1과 같은 흐름도에 의해 지반조건, 토피고, 지형 및 유수상태 등 안정성을 고려하여 식 (1)과 같은 경험식으로 적정 규모를 산정한 후 WS77 프로그램으로 유속에 대한 통수단면 확보여부를 검토한다.

$$\frac{Q_{\max}}{D^2 \sqrt{g(H+W)}} = 0.46 \sim 0.79 \quad (1)$$

여기서, Q_{\max} : 최대유량(m^3/s), D : 직경(m), g : 중력가속도($9.8m/s^2$), $H+W$: 총수두(m)이다.

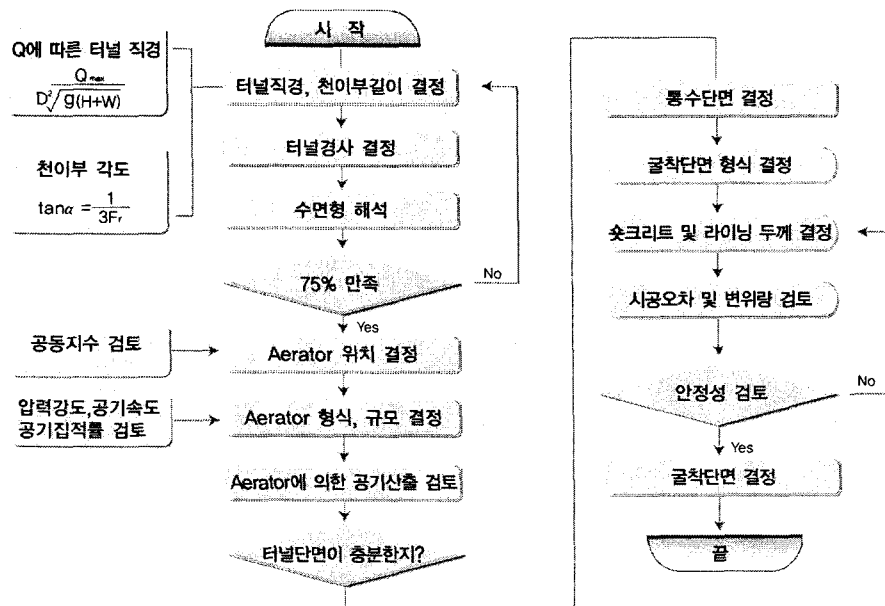


그림 1. 수로터널 단면 선정 흐름도

2.4 터널 경사

수로터널의 경사는 적용 가능한 경사별로 표 2와 같이 수리특성, 지반조건, 시공성 등을 고려하여 결정하는데 이 경우 경사터널, 만곡부 및 수평터널 등으로 구성된다.

2.5 천이 구간

수리구조물의 원활한 흐름을 위해 유입부 및 방류부에는 수로터널의 단면이 변화하는 천이구간이 필요하다. 이러한 천이구간의 변화각도는 댐 설계기준에 의해 식 (2)로 산정하나 흐름 단면적은 통수단면적의 75%이하를 유지하여야 한다.

$$\tan \alpha = \frac{1}{3F_r} \quad (2)$$

여기서 α : 각도, F_r : 평균 프루드수 이다.

표 2. 수로터널 경사 비교분석 예

구분	46	30	14
개념도			
수리적 안정성	불량(곡률부 반경이 적음)	불량(사출 흐름이 만곡부에 떨어짐)	양호
경제성	1	3	2
시공성	2	3	1
유속(%)	40.3	39.5	38.8
공동지수	0.21	0.22	0.23
천이부길이(m)	40	80	155
곡률반경(m)	100	180	270

2.6 만곡부

경사터널에서 수평터널로 변화하는 구간에서 종단경사의 급변화는 가급적 지양하여야 한다. 일반적으로 터널식 여수로에서 만곡부는 그림 2와 같이 다른 구간에 비해 공동지수가 적은 취약구간이므로 공동 현상을 방지하기 위해 반경을 크게 하는 것이 바람직하다. 댐 설계 기준에 의하면 최소 곡률반경은 다음 식 (3)과 같다.

$$R = 0.0312 dV^2 / P \quad (3)$$

여기서, V : 유속, d : 수심(m), P : 동수압(t/m^2) 이며, 최소한 수심의 10배 이상의 곡률반경 확보 필요하다.

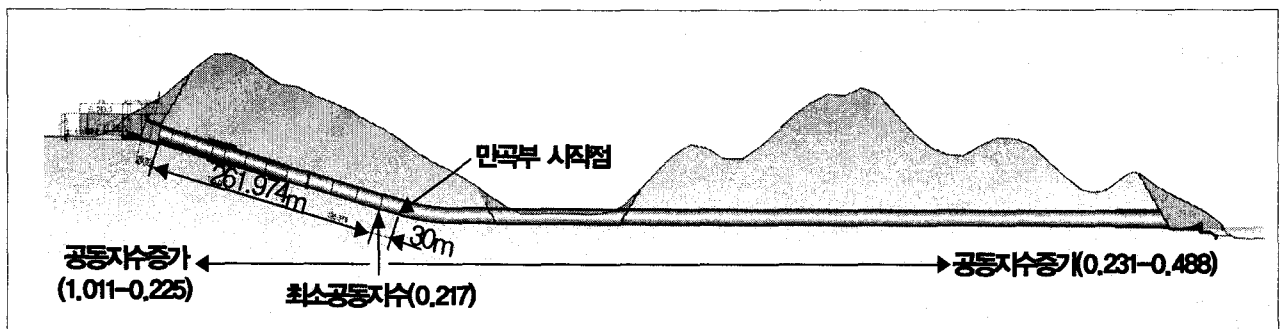


그림 2. 만곡부에서의 공동지수

2.7 라이닝

2.7.1 콘크리트 라이닝에서 내, 외수압과 Weep Hole의 역할

수로터널은 일반적인 도로터널이나 철도터널과 달리 운영(시공중, 통수와 유지보수) 과정에서 지하수 조건, 토피고 현황, 운영방법, 수위변동에 따라 동시 또는 한가지 수압만 받게 되는 특성이 있다. 그러므로 내, 외수압의 균형을 조절하여 현장 여건에 맞게 적절한 라이닝 형식을 취하는 것이 매우 중요하며, 다음과 같은 조건으로 구분하여 해석한다.

(1) 내수압이 외수압보다 큰 경우 (누수 가능성 검토)

토피가 터널내 정수압의 수두보다 낮은 경우로서 내수압은 피압지하수 상태가 되어 누수문제가 발생할 수 있다. 이런 구간은 수밀성을 확보할 수 있는 압밀그라우팅+철근라이닝 또는 철관라이닝을 적용하여 누수를 억제한다. 주의할 사항은 압밀 그라우팅시 주입압은 토피의 2배에 해당하는 정수압을 초과해서는 안되므로 주입압 관리에 주의하여야 한다.

(2) 외수압이 내수압보다 큰 경우(라이닝 작용 외수압 경감 검토)

일반적으로 누수문제 보다는 지하수위 저하에 대한 문제의 발생소지가 있으나, 그림 3과 같이 외수압을 경감시키는 Weep Hole 을 설치하는 것이 콘크리트 라이닝의 장기적인 수명을 연장할 수 있을 것으로 판단된다. 단 암반조건이 불량한 구간은 외수압에 의한 불연속면 충전물 등을 세굴시키고 블록 거동에 의한 터널의 붕괴를 야기할 수 있으므로 Weep Hole을 생략하고 철근 콘크리트 라이닝을 고려하는 것이 바람직하다.

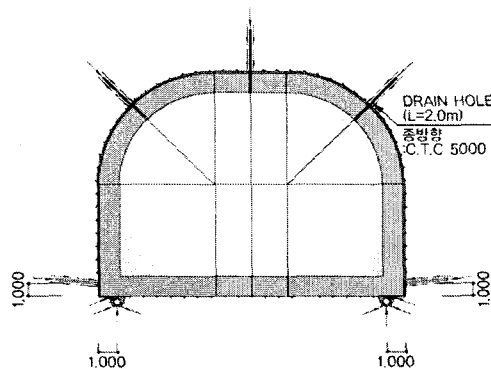


그림 3. Weep Hole 설치 단면도

2.7.2 터널내 수층압에 따른 영향 검토

댐 방류시 수로터널의 만곡부는 유수에 의한 수층작용으로 터널내 수압이 정수압보다 크므로 수층작용으로 인한 라이닝의 안정성 확보가 요구된다. 수층작용으로 인한 만곡부의 압력은 수치해석에 의해 산정하고, 이를 토대로 이완하중, 잔류수압, 자중+온도 및 내수압을 고려한 라이닝 해석을 수행하여 철근 보강 여부를 결정한다.

3. 공동현상

3.1 공동현상의 정의

유체의 흐름조건에서 유체압력이 증기압보다 낮아지게 되면 기포, 즉 공동이 생기게 된다. 이때 발생한 공동은 유체압력이 높은 지역으로 이동하게 되어 압축되고 결국은 파괴되어 국부적으로 높은 압력이 발생하게 된다. 이와 같은 현상을 공동현상이라 한다.

3.2 공동현상의 원인

수로터널에서 발생할 수 있는 공동현상의 주원인은 유속의 증가와 압력의 감속이나, 수리구조물에서 공동현상을 촉발하는 요인은 그림 4와 같은 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 유체흐름면의 방해석 침전물(calcite deposit), 국부적인 공극(localized voids), 용기 등을 말하며 전형적인 등분포 요철 또는 조도는 마감 처리된 콘크리트면(finished concrete surface)을 나타낸다.

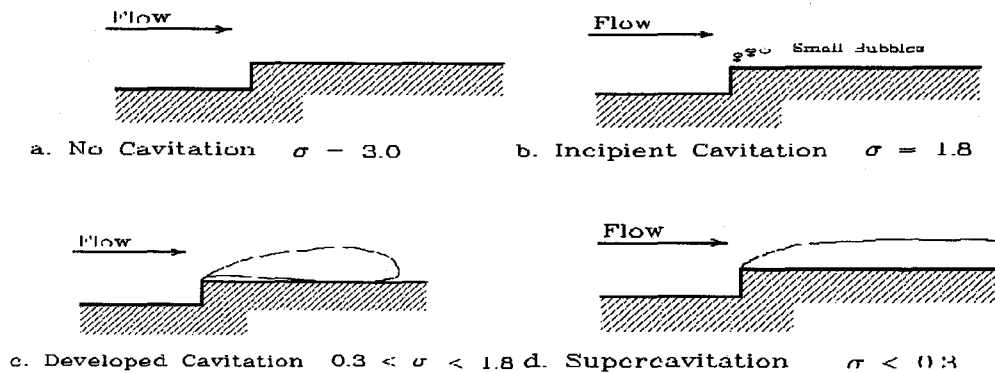


그림 4. Cavitation 발생 요인

3.3 공동현상에 의한 구조물 손상

공동현상은 흐름조건에 따라 압력이 증기압보다 더 낮은 지역에서 발생하여 압력이 높은 지역으로 이동하게 됨에 따라 기포수는 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.

이러한 공동현상에 의한 터널식 여수로의 손상은 그림 5와 같이 1941년 Hoover dam에서 처음으로 발생하였으며, 이후 Blue Mesa dam(1970), Flaming George dam(1975), Glen Canyon dam(1983) 등에서 터널 라이닝의 손상이 발생하였다. 이 당시만 하더라도 공동현상에 대한 원인이 규명되지 않아 터널 라이닝에 손상이 발생하였으나 Yellowtail dam에 공기혼입장치를 설치한 이후 1984년 Glen Canyon dam에서 그 효과가 검증되어 Flaming George dam, Blue Mesa dam, Hoover dam등에 공기혼입장치를 설치하여 더 이상 공동현상에 의한 구조물의 피해는 발생하지 않았다.

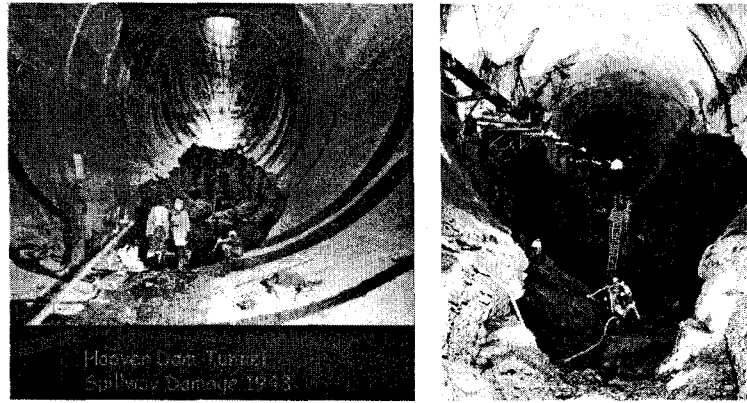


그림 5. Cavitation에 의한 라이닝 손상

4. 공기혼입장치(Aerator)

공기의 영향은 공동현상의 발생을 억제시키는 데에도 중요한 역할을 하지만 공동현상에 의한 구조물의 피해를 줄이는 데에도 중요한 요소이다. 만약에 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 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 종류

공기혼입장치는 그림 6과 같이 deflector, groove 및 offset의 3종류로 구분되며, 개수로 형식의 여수로에서는 일반적으로 offset 형식을 채택하고 있으나 터널식 여수로에서는 위치 및 구조물의 제약을 받기 때문에 거의 groove 타입을 채용하고 있다.

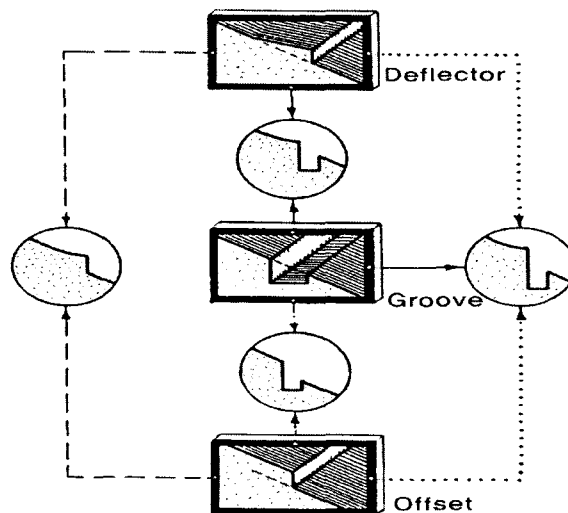


그림 6. 공기혼입장치 종류

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 후 공기혼입장치 효과를 검증하고자 1984. 8. 11 ~ 1984. 8. 17까지 prototype test를 실시하였다. 시험 전에는 터널식 여수로에 압력 gage와 정적 및 동적 풍속 gage등 여러 가지 계측기를 설치하여 댐 방류 시 공기혼입장치에 작용되는 공기속도와 터널 라이닝에 작용하는 dynamic pressure를 측정 하였다. Prototype test 결과 공동현상에 의한 손상은 발견되지 않아 그 후부터 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 설계기준이 가능 최대홍수량으로(PMF)으로 강화되고, 댐의 안정성 확보를 위한 합리적인 차수대책이 필요하게 됨에 따라 차수능력 증대방안의 하나로 터널식 여수로의 설계 및 시공이 진행되고 있다. 본고에서는 터널 기술자들에게는 다소 생소한 터널식 여수로 설계시 검토해야 하는 굴착단면, 천이구간, 만곡부 및 라이닝에 작용하는 내수압, 공동현상의 발생원인 및 대처방안에 대하여 기술하였다.

참고문헌

1. K. Warren Frizell(1985), "Spillway test at Glen Canyon Dam", USBR
2. Herry T. Falvey(1990), "Cavitation in chutes and spillways", USBR Engineering monograph No. 42
3. 이응천(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 Shechan, G. T(1974), "Effect of Entrained Air on Cavitation Damage, Canadian Journal of Civil Engineering No.1, 97-107.