

수로터널의 유지관리 현황 및 거동특성

The Present State and Behavior Characteristics of Water Supply Tunnel

전제성¹⁾, Je-Sung Jeon

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, Korea Water Resources Corporation, KIWE, Principal Researcher

SYNOPSIS : The water supply tunnel has different characteristics which play a important role in stable water supply to the public from mechanical behavior and maintenance in comparison with road and railway tunnel. In this study, the present state and characteristics of water supply tunnels controlled by K-water have been investigated. The distribution of effective stresses that takes into account the effect of seepage forces induced by internal water pressure are estimated from closed-form and numerical method. The analysis of stress-strain behavior, seepage problem and hydrojacking for ensuring safety of existing water supply tunnel against neighboring new construction has been conducted.

Keywords : water supply tunnel, pressure tunnel, effective stress distribution, seepage, hydrojacking

1. 서 론

수로터널은 도로 및 철도터널과 다른 역학 및 운용관리 측면의 특성을 가지고 있으며, 이러한 특성은 수로터널의 유지, 관리를 통한 안정적 물공급이라는 국민적 편익증대에 있어 가장 기본적으로 인식되어야 할 기술적 요소라 할 수 있다.

본 연구에서는 한국수자원공사의 수도시설에 일환인 수로터널 현황 및 특성등을 살펴보고, 압력 수로터널에 대한 기존 손상사례를 통해 수로터널의 거동 및 내수압 작용으로 인한 인근지반의 응력변화 등을 분석하였다. 과거 국외 압력 수로터널에서 보고된 hydrojacking 등에 관한 고찰 및 검토이론의 분석을 통해, 현 국내 수로터널의 운영, 관리 측면의 안정성 확보방안을 살펴보았다. 한편, 최근 신규 구조물 시공으로 인한 기존 수로터널의 간섭사례를 대상으로, 조사 및 안정성 평가를 실시하였다.

2. 한국수자원공사의 수도시설 현황

2.1 시설현황

현재 한국수자원공사에서 관리중인 수도시설은 27개의 광역상수도 및 공업용수도 시설로서, 1일 16,482천m³의 용수를 공급할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 그중 광역상수도시설은 13,047천m³으로 79.2%, 공업용수도시설은 3,435천m³으로 20.8%를 차지하고 있다 (표 1).

주요시설로는 용수전용댐 12개소, 취수장 27개소, 정수장 35개소, 가압장 60개소 및 도·송수관로 3,770km의 시설이 있으며, 전국수도시설에 대한 광역상수도 비율은 총량기준 47.2%, 상수도 기준(공업용수제외) 41.4%에 이르고 있다.

표 1. 수도시설 현황

구 분	시설용량 (천m ³ /일)	주요시설물(개소)				관 로 (km)
		용수댐	취수장	정수장	가압장	
총 계	16,482	12	27	34	60	3,770
한 강 권 역	8,365	2	7	10	19	1,246
낙 동 강 권 역	3,523	9	10	11	15	892
금강, 섬진강권역	4,594	1	10	13	26	1,632

2.2 용수공급 현황

한국수자원공사는 광역상수도사업을 시작한 1980년에는 373개 수용가에 연간 285백만m³의 용수를 공급하였으나 2005년에는 1,577개 수용가에 2,881백만m³의 용수를 공급하였다. 1980년과 비교해보면 물량 면에서 10배, 수용가 수에서는 4.2배의 성장을 가져왔다.

2005년까지의 수종별 용수공급량은 원수가 1,529백만 m³로 53%, 정수가 1,149백만m³로 40%, 침전수가 203백만m³로 7%를 차지하고 있다.

2.3 수원 및 정수처리 현황

광역상수도의 수원은 다목적댐 등 대단위 취수원과 연계되어 있어 기상이변에 의한 장기 가뭄시에도 용수 공급이 보다 안정적이며, 양호한 수질을 유지하고 있어 일반적인 정수처리 방법으로 먹는물 수질기준에 적합한 물의 생산이 가능하다. 수원별 취수현황은 다목적댐내 취수 11,128천m³/일, 하천표류수 3,733천m³/일, 용수전용댐 1,621천m³/일로 구성되어 있다 (그림 1).

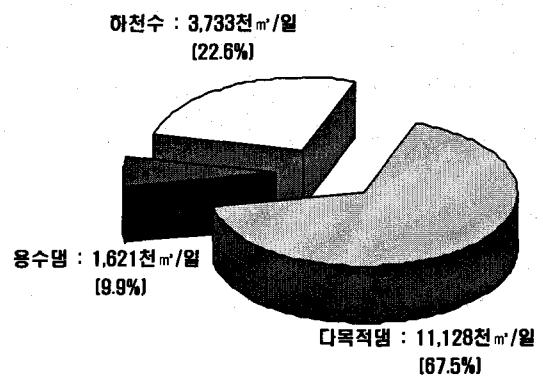


그림 1. 수원별 취수현황

2.4 수로터널 현황

수도시설로서의 관로 총연장 3,770km 중 관종별 구성비율은 강관 64.8%, 주철관 29.1%, PC관·흙관 1.9%, 터널 3.9%(145.6km), 기타 0.3%로 구성되어 있고 (표 2), 매설 경과년도별로 보면 20년 이상 경과한 1985년 이전 매설관로가 634km로 16.8%를 차지하고 있으며, 15~19년(1986~1990년)이 499km로 13.2%, 10~14년(1991~1995년)이 614km로 16.3%, 5~9년(1996~2000)이 1,316km로 34.9%, 5년 이내(2001~2005)가 707km로 18.8% 수준으로서 10년 이내의 관로가 53.7%를 차지하고 있다 (그림 2, 표 3). 또한, 관경별 매설현황을 보면 2000mm 이상이 648km로 17.2%, 1500~1900mm가 589km로 15.6%, 1000~1350mm가 833km로 22.1%, 500~900mm가 1,070km로 28.4%, 500mm 이하가 628km로 16.7% 비율로 구성되어 있다 (그림 3).

수로터널의 건설은 1965년 창원지역에서 시작되었으며, 1975년 이후 국가산업단지 조성등을 이유로 본격적인 건설이 진행되었다. 1980년대 후반이후에는 수도권광역상수도시설의 일환으로 많은 수로터널들이 수도권지역에 건설되었다.

수로터널은 그 기능으로 분류할 때 크게 도수터널 및 송수터널, 취수터널 등으로 구분할 수 있는데, 도수터널이 전체 수로터널의 84.2%를 차지하고 있으며, 송수터널은 11.8%, 취수터널은 3.9%를 차지하고 있다.

또한 수로터널은 압력터널 및 개수로터널의 형태로 운용되며, 압력터널이 전체 수로터널의 76.3%, 개수로터널이 23.7%를 차지하고 있는데, 그 운용형태에 따라 수로터널의 거동특성 및 안정성 검토에 있어 매우 큰 차이를 발생시키게 된다. 이러한 관점에서 수로터널의 라이닝 형식또한 매우 중요한 요소로 작용하게 되는데, 한국수자원공사 관리의 수로터널중 48.7%는 무근콘크리트 라이닝으로, 51.3%는 철근콘크리트 라이닝 형식으로 시공되었다.

수로터널의 직경은 취수터널 일부를 제외하고는 대부분 1,900mm~3,900mm 범위로 분포하는데, 가장 많은 빈도수를 보이는 직경 범위는 2,100mm~2,300mm 이고, 수도권광역상수도의 경우 3,200mm~4,300mm 직경으로 시공되었다.

표 2. 관종별 현황(수로터널)

관리단(25)		계	관 종 별 연 장 (m)				
			강 관	주철관	콘크리트관, 흙관	터 널	기 타
총 계		3,770,785	2,445,207	1,098,074	72,274	145,578	9,652
한 강 계 통 (7)	소 계	1,245,985	918,836	280,757	-	44,459	1,933
	팔당	322,134	277,048	21,441	-	23,645	-
	남양	295,355	250,269	45,086	-	-	-
	과천	253,736	225,403	9,437	-	17,161	1735
	양주	35,393	35,393	-	-	-	-
	백운	67,967	52,124	11,992	-	3,653	198
	충주	202,878	76,383	126,495	-	-	-
통계	68,522	2,216	66,306	-	-	-	
낙 동 강 계 통 (8)	소 계	892,330	408,236	331,496	69,377	75,502	7,719
	울산	207,441	111,634	6,009	43,893	44,105	1,800
	창원	148,542	37,362	93,169	10,776	4,203	3,032
	사천	112,150	59,884	52,266	-	-	-
	거제	62,849	13,377	49,472	-	-	-
	밀양	90,990	32,234	51,152	-	7,604	-
	포항	98,837	68,340	28	14,708	12,874	2,887
통계	94,560	55,478	39,082	-	-	-	
금강· 섬진강 계통 (8)	소 계	1,632,470	1,118,135	485,821	2,897	25,617	-
금강남부	443,330	303,909	139,421	-	-	-	
충남중부	67,862	37,899	29,963	-	-	-	
청양	240,399	156,258	79,181	-	4,960	-	
여주	233,395	177,046	49,732	2,897	3,720	-	
광주	160,416	145,845	-	-	14,571	-	
보령	153,963	121,333	30,264	-	2,366	-	
아산	178,305	135,066	43,239	-	-	-	
동화	154,800	40,779	114,021	-	-	-	

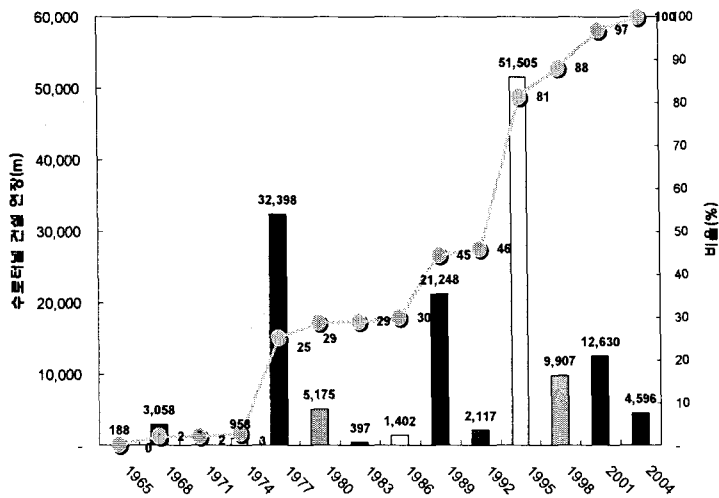


그림 2. 기간별 수로터널 건설이력

표 3. 수로터널 주요 건설이력

건설연도	관리단	연장(m)
1965~1967	창원	3,053
1975~1977	포항	7,729
	울산수	20,949
1987~1989	팔당	5,590
	과천	6,899
	백운	3,526
1993~1995	충주	2,514
	양주	2,719
	당천	10,041
	백운	1,525
1998	과천	1,525
	양주	2,212
	울산수	23,156
	광주	14,571

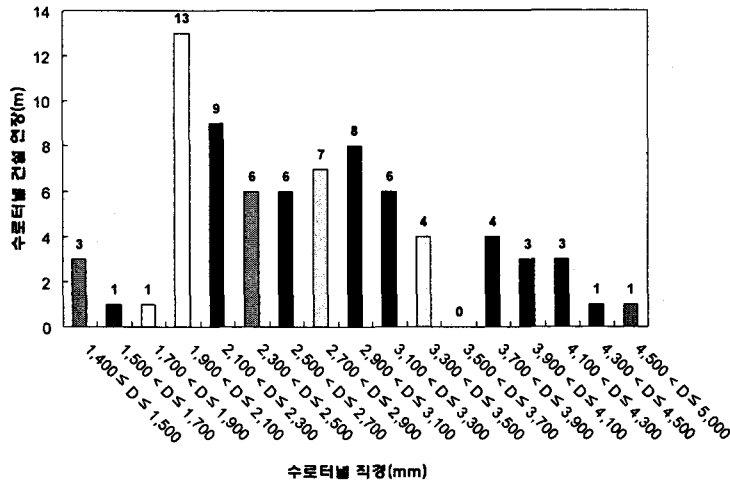


그림 3. 수도터널 직경(D) 분포

3. 수도터널의 거동

3.1 압력 수도터널의 손상 및 파괴

압력 수도터널은 일반 도로터널 및 철도터널 등과 달리, 터널 내부에 내수압이 작용된다는 커다란 역학적 차이점을 가지고 있다. 이로 인해 그 거동 및 손상형태 등에 있어 기타 터널과 상이함을 보이고 있는데, 일반 도로터널에서와 같이 지반변위에 따른 터널의 응력-변형 거동 이외에 내수압 작용에 따른 누수발생 및 유로확장, 이로 인한 주변지반의 포화 및 강도저하, hydrojacking 발생, 추가적인 라이닝 균열 등 다양한 형태의 손상이 발생하게 되며, 더욱이 중요한 것은 이러한 손상이 매우 오랜시간에 걸쳐 서서히 발생한다는 것이다.

Brekky & Ripley(1987)는 최근 60년간의 기존 수도터널에 대한 손상 사례를 조사하여, 그 손상형태 및 주요원인을 분류하였다 (표 4).

그 결과, 기존 수도터널의 가장 많은 손상형태는 과도한 누수로 나타났다으며, 과도한 누수는 아래와 같은 문제점을 반복적으로 야기한다.

표 4. 압력수도터널의 손상형태 및 원인(Brekky & Ripley, 1987)

손상형태	주요 원인	비율(%)
과도한 누수(leakage)	·hydrojacking ·인근 암반의 변형 ·투수성이 높은 지질조건	59.2
인근 암반의 이완 (붕락 등)	·지반특성	22.2
라이닝 변형	·과도한 외수압 작용 ·과도한 그라우팅압력 작용	13.0
라이닝 파괴	·내수압 작용	5.6

< 과도한 누수시의 예상 문제점 >

- 지속적인 누수경로 생성과 확장에 따른 누수량 급증 및 불안정성 증가
(인접 지반의 침식, 유실 등에 따른 유로 및 공동의 생성, 추가적인 누수경로 확장)
- 라이닝 배면공동 생성에 따른 추가 라이닝 손상 및 누수량 증대
- 인근 지반으로 전달되는 터널 내수압의 크기 증가 및 이로인한 인근 지반의 불안정성 증가
(전단강도 감소, 사면파괴, 공동생성 등)
- 수도터널 보수보강시의 단수조치에 따른 물공급 차질
- 내수압 감소 및 단수시, 외부 지하수 유입에 따른 용수오염

□ 운영시 용수 손실량 증가에 의한 원활한 용수공급 차질 및 단수조치에 따른 수익감소

이러한 누수는 라이닝이 없는 경우에만 해당되는 내용이 아니며, 슛크리트, 무근 콘크리트 라이닝, 철근 콘크리트 라이닝 등이 설치된 경우에도 라이닝의 균열 등을 통한 누수 및 내수압 전달이 발생하므로, 누수와 관련된 검토는 라이닝이 없는 조건과 동일한 개념하에 검토되어야 한다고 Brekke & Ripley(1987)는 주장하고 있다.

충분한 토피고 확보를 통해 수로터널의 구속효과를 확실히 기대할 수 있다해도 인근 지층조건 및 라이닝 상태등에 따라 과도한 누수가 발생할 수 있으며, 이는 수로터널의 손상에 큰 영향을 미칠 수 있다.

과도한 누수현상과 함께 수로터널 주변지반의 원지반 응력상태 및 불연속면 조건에 따라 주변지반에 과도한 과잉간극수압이 발생할 수 있으며, 이는 지반강도의 저하와 함께 사면부 활동과 지반변위 유발, 암반 절리 등의 불연속면에 대한 열림현상 촉진과 관련된 hydrojacking 등을 발생시킬 수 있다.

한편, 라이닝 배면의 배면 그라우팅(contact grouting)등이 부실한 경우, 반복적 내수압 작용으로 인한 라이닝 부재의 피로 및 균열, 붕락 등의 손상이 유발될 수 있으며, 이는 내수압 작용영향을 증가시키는 동시에 추가적인 누수량 증대 등의 전반적인 손상으로 진전될 수 있다.

수로터널의 운용특성에 의해서도 여러 가지 손상이 유발될 수 있는데, 수로터널 운용시, 내수압의 크기 및 작용영역은 가압조건 및 단수, 재통수 등의 운영형태에 따라 수시로 변화하게 되며, 이러한 불규칙한 수리영향은 수로터널의 장기 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 건설당시는 안정상태를 보이던 암반 및 불연속면들이 장기운용에 따른 반복적 수리영향으로 인해 부분포화 및 이완, 전단강도저하, 붕락, 등의 현상을 보이게 되며, 이러한 손상이 장기간 지속될 경우는 상당한 규모의 손상으로 진전될 수 있다.

3.2 내수압 작용에 따른 주변지반 응력변화

3.2.1 과잉간극수압 분포

Bouvard and Pinto(1969), Schleiss(1986) 등은 수로터널 내수압 작용 및 주변 지반으로의 침투현상 발생시, 침투압으로 인한 주변지반의 유효응력 변화량을 예측하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 기본적으로 수로터널 주변지반은 균질하며, 등방성이고 간극이 있는 탄성체이고, 수로터널에서 주변지반으로의 침투는 방사방향으로 발생되며 Darcy's law를 따른다는 가정하에 반경방향 및 접선방향 유효응력 변화식을 식(1)과 같이 제안하였다. 그러나, 이 연구결과는 실제 현상에 적용되는데 몇 가지 문제점을 내포하고 있다.

$$P_w = P_i \frac{\ln \frac{b}{r}}{\ln \frac{a}{b}} \quad (1)$$

여기서, P_w : 주변지반내 침투로 인한 과잉간극수압

P_i : 수로터널 내수압

P_o : 주변지반의 정수압 ($\Delta P_w = P_i - P_o$: 내수압과 외수압 차이)

a : 수로터널 반경

b : 침투에 의한 과잉간극수압이 무시될 수 있는 방사방향 거리

r : 수로터널 중심과 임의 지점까지의 반경방향 거리

가장 근본적 문제점으로서, 침투에 의한 응력 및 변위는 침투영향이 미칠수 있는 임의거리 b 값의 영향을 받는다. 즉, b 값에 따라 응력 및 변위 결과가 크게 달라지지만, Bouvard and Pinto(1969)는 b 값을 산정하기 위한 별도의 방법 및 기준을 제시하고 있지 않다.

또한, 이 연구에서는 침투에 의한 지반내 유효응력 변화를 예측 하는데 있어, 원지반의 지하수위의 영향을 고려하고 있지 않다. 지반내 침투현상을 예측하는데 있어 원지반의 지하수위는 큰 영향을 미치게 되며, Schleiss(1986)는 이러한 문제점을 고려하여, Bouvard and Pinto(1969)의 해석해에 적용되는 b 값을 수로터널과 원지반 지하수위의 수직거리 h_o 로 적용할 것을 제안하였다. 그러나, Schleiss도 방사방향 흐름 등 Bouvard and Pinto와 동일한 가정을 하고 있다.

Fernández and Alvarez(1992)는 Bouvard and Pinto(1969), Schleiss(1986)의 기존 가정사항의 모순을 인식, 임의 방향의 흐름 및 원지반 지하수위 위치를 고려하고 침투 영향범위에 대한 가정을 제거한 상태에서, 침투에 의해 발생하는 지반내 유효응력 예측에 관한 해석식을 식(2)와 같이 유도하였다.

임의 흐름조건 및 지하수위를 고려한 수로터널 인근지반의 과잉간극수압 분포는 Harr(1962)에 의해 제안된 image well method를 통해 산정되었는데, 수로터널은 image well method에서의 시험정(source)으로 고려되며, mirror-image상의 관측공은 지하수위로부터 수로터널과 원지반 지하수위의 수직거리만큼 이격된 곳에 위치하게 된다. 즉, 수로터널로부터 관측공까지의 거리(L)는 수로터널과 지하수위간 수직거리의 2배가 된다 (그림 4).

이는 수로터널로부터의 누수에 관계없이 원지반 지하수위는 일정하게 유지된다는 가정하에 성립될 수 있는데, 지하수위에 비해 터널심도가 매우 깊거나 수로터널로부터의 누수량이 매우 적은 경우, 이러한 가정은 실제 흐름현상에 부합될 수 있다. 그러나, 수로터널로부터의 누수가 인근 원지반 지하수위를 크게 변화시키는 조건에 대해서는 수로터널로부터 관측공까지의 거리(L)에 대한 보정이 필요하다.

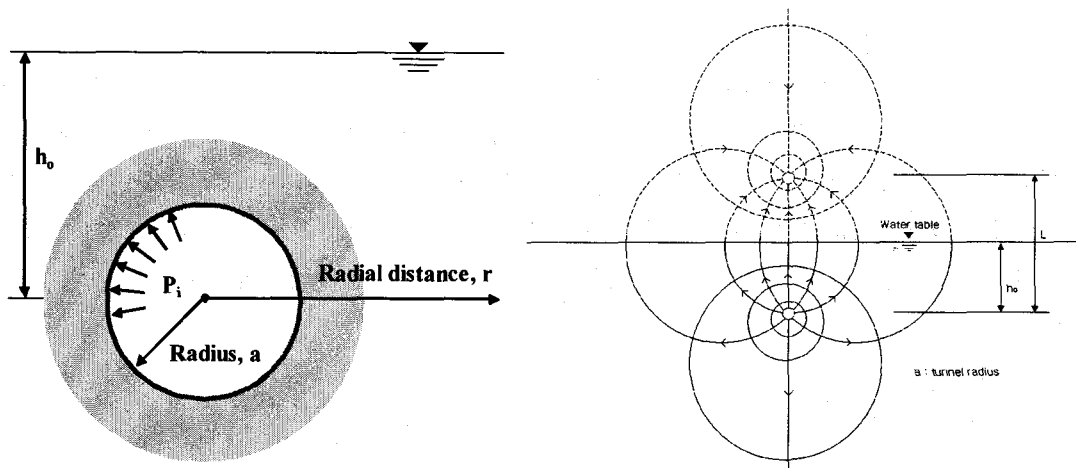


그림 4. 수로터널 압력조건 및 과잉간극수압 산정 개념

$$P_w = \gamma_w (h_i - h_o) \frac{\ln \left[1 + \frac{4h_o}{r} \left(\frac{h_o}{r} - \cos \theta \right) \right]}{\ln \left[1 + \frac{4h_o}{a} \left(\frac{h_o}{a} - \cos \theta \right) \right]} = \Delta P_w \frac{\ln \xi_{r\theta}}{\ln \xi_{a\theta}} \quad (2)$$

3.2.2 유효응력 분포

간극이 있는 탄성체 암반에 대하여, 임의의 흐름조건 및 원지반 지하수위를 고려한 지배방정식에서 침투에 의한 전단응력을 무시하고, 터널 중앙부($\theta = 90^\circ$)의 하중경사(pressure gradient)를 터널 전체단면에 대한 대표값으로 가정하는 과정을 통해 아래와 같은 응력방정식 유도가 가능하다. 수로터널 내수압과 외수압 조건에 대한 반경방향 및 접선방향 응력에 관한 Fernandez 이론해는 다음과 같으며, 이 응력값은 내수압작용시의 침투 현상에 의해 발생하는 지반내 유효응력값이다.

$$\frac{\sigma'_r}{\Delta P_w} = \frac{1}{2(1-\nu)} \cdot \quad (3)$$

$$\left\{ \frac{\left(\frac{a^2}{r^2} - 1\right) + \frac{2 \ln \frac{r}{a} + \left[(1-2\nu) \left(1 + \frac{4h_0^2}{r^2}\right) - 2(1-\nu) \right] \ln \frac{\left(\frac{r^2}{a^2} + \frac{4h_0^2}{a^2}\right)}{\left(1 + \frac{4h_0^2}{a^2}\right)}}{\ln \left(1 + \frac{4h_0^2}{a^2}\right)} \right\}$$

$$\frac{\sigma'_\theta}{\Delta P_w} = \frac{-1}{2(1-\nu)} \cdot \quad (4)$$

$$\left\{ \frac{\left(\frac{a^2}{r^2} + 1\right) - \frac{2 \ln \frac{r}{a} - \left[(1-2\nu) \left(1 + \frac{4h_0^2}{r^2}\right) + 2\nu \right] \ln \frac{\left(\frac{r^2}{a^2} + \frac{4h_0^2}{a^2}\right)}{\left(1 + \frac{4h_0^2}{a^2}\right)}}{\ln \left(1 + \frac{4h_0^2}{a^2}\right)} \right\}$$

여기서, σ'_r : 반경방향 유효응력

σ'_θ : 접선방향 유효응력

ν : 주변지반의 포아송비

3.2.3 이론해 비교

Fernandez 해석해에서는 주변지반을 투수성의 탄성체로 고려하고 내수압은 터널굴착면의 수두로서 고려하였다. 내수압 작용 및 이로 인한 침투압 발생조건에 대한 Fernandez 해석해와 Lamé의 이론해 및 Bouvard 등의 해석해를 비교해 보았다 (그림 5).

Lamé의 이론해는 중공 실린더 탄성체에 대한 원통좌표상의 응력해를 나타낸 것으로서, 주변지반은 불투수성의 탄성체로 고려하였고, 내수압은 일반 역학하중 재하조건으로 고려하였다(침투압 미발생).

각 이론해의 비교결과, 내수압을 단순 역학하중으로 고려한 경우에 비해, 내수압에 의한 주변지반의 침투압 발생을 고려할 때, 인장응력의 발생영역이 매우 크게 증가함을 알 수 있으며, 그 크기는 지하수위로 부터의 터널 심도(h_0/a)에 직접적인 영향을 받음을 알 수 있다.

또한, Lamé의 이론해를 통한 터널 주변의 반경방향 응력은 항상 압축력으로 나타나는 반면, 침투압 발생을 고려할 경우 반경방향 및 접선방향 응력은 항상 인장력으로 나타나며, 이는 주변 절리암반의 벌어짐 및 진전과 관련된 hydrojacking 현상에 큰 영향을 미치게 된다.

결과적으로 수로터널 주변의 인장응력 분포(In-situ stress)와 함께 수로터널 내수압 작용에 기인한 인근지반에서의 침투압 발생은 주변의 총 인장응력 크기를 크게 확대시키는 반면, 수로터널 내수압을 단순 역학하중으로 고려할 경우는 주변지반에 압축응력이 발생하는 결과를 초래하게 되어, 인장응력의 발생정도를 실제보다 과소평가하게 된다는 것을 알 수 있으며, 수로터널에 대한 안정성 검토를 하는데 있어, 터널주변의 상재하중과 수로터널 내수압을 단순 비교하는 기존 방식은 실제의 불안정 현상을 설명하지 못하는 한계점을 내포하고 있음을 알 수 있다.

한편, Fernandez의 이론해에 비해 Bouvard & Pinto(1969)의 이론해는 침투압으로 인한 응력변화량을 작게 평가하고 있으며, 거리증가에 따른 감소비율도 Fernandez의 이론해와 비교하여 큰 것으로 나타났다.

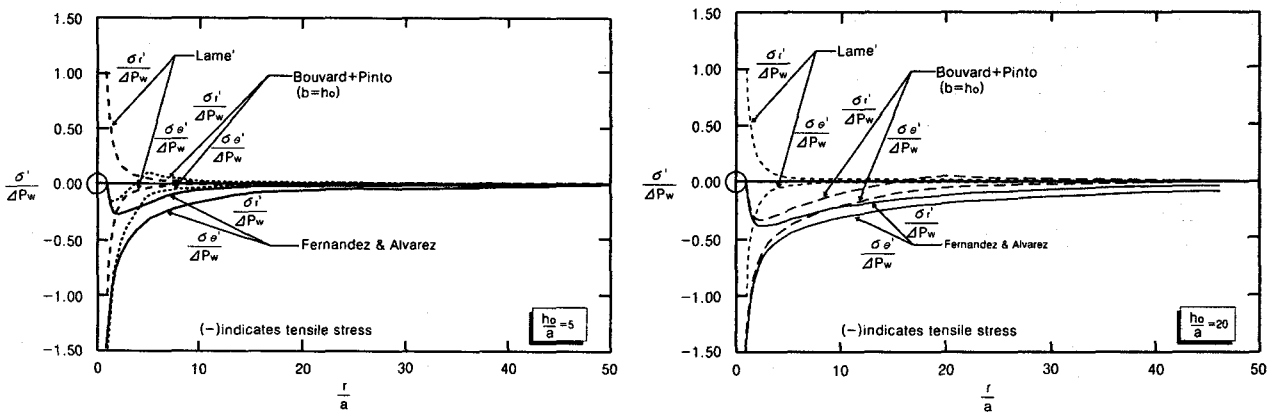


그림 5. 수로터널 주변지반의 응력변화 비교

3.3 Hydrojacking 발생 및 파괴

Hydrojacking은 수로터널에서 발생할 수 있는 가장 대표적인 손상사례라 할 수 있는데, 이러한 현상은 누수 및 세굴, 응력이완, 변형, 불연속면 거동 등 다양한 현상과 연관되어 발생하게 된다. 이러한 hydrojacking의 발생과 진전과정을 간략히 요약하면 다음과 같다.

일단 내수압이 주변지반 정수압보다 클 경우, 터널로부터 주변지반으로의 흐름이 발생하게 되고, 내수압 증가에 따른 침투압 및 침투량이 증가하게 된다. 이어 주변지반의 지하수위가 상승하게 되며, 수로터널 인접지반에서의 국부적 초기 hydrojacking이 발생하게 된다. 점차 국부적 hydrojacking 발생영역들의 연결 및 확장을 통한 누수경로 생성 및 확장현상이 발생하게 되며, 결국에는 급격한 누수량 증가 및 전체적인 hydrojacking이 발생하게 된다.

이러한 hydrojacking의 발생여부에 관한 검토는 기존의 기준 및 이론적 유추를 통해 가능하다. Dann *et al.* (1964)은 Australia의 Snowy Mountain의 양수발전 프로젝트를 위해 수직방향 및 수평방향에 대한 수로터널 최소 토피두께 산정식을 제안하였으며, 수평방향 최소두께는 수직방향 최소두께의 2배가 된다는 가정을 하고 있다 (그림 6). 즉 수평방향 최소두께는 수직방향 최소두께를 산정한 후 2배를 하는 방식으로 산정한다. 본 프로젝트의 대상지반은 대부분 신선한 화강암으로 이루어져 있으며, 라이닝 없이 시공된 수로터널의 경우 준공후에도 별다른 누수가 발생하지 않았다. 1970년 노르웨이 Åskora 수로터널의

hydrojacking 파괴사례를 경험하면서, 1971년 Bergh-Christensen and Dannevig에 의해 Norwegian rock cover criterion이 발표되었다 (그림 7). 이 기준에서는 인근 지반의 사면경사가 고려되었는데, 아래식은 사면 수직방향의 절편에 대한 한계평형해석으로 유도되었다.

Brekke and Ripley(1986)의 압력 수로터널 손상사례를 살펴보면, 대부분 Norwegian criterion을 만족하고 있으며, 예외사례로서 Bjerka에 있는 수로터널의 경우, 불리한 방향성을 갖는 조인트군에 의해 파괴가 발생했고, 캘리포니아 Balsam Meadow 프로젝트(Brekke & Korbin, 1990)의 경우, 최소 주응력이 매우 작은 수직 조인트의 발달로 인해 hydrojacking이 발생하였다.

Deer(1983), Cording(1988), Fernandez(1984) 등의 현장사례를 살펴보면, 기존의 기준을 매우 보수적인 범위에서 만족하고 있지만 실제로는 hydrojacking 등의 파괴가 발생함을 알 수 있다. 이 사례들은 현장조건을 살펴보면, 대부분 수직 절리등의 불연속면이 발달되어 있으며, 이들 불연속면에 매우 작은 주응력이 작용하고 있다는 공통점을 가지고 있었다.

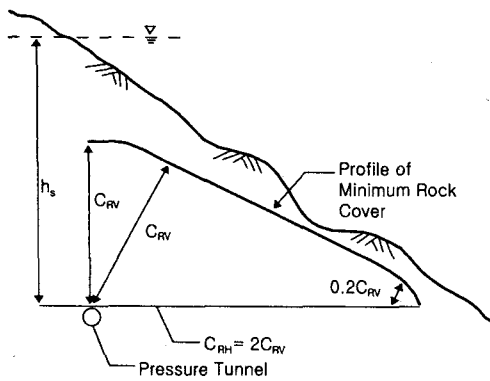


그림 6. Snowy Mountain criterion

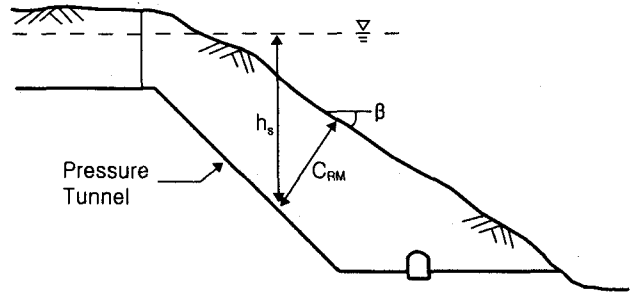


그림 7. Norwegian Criterion

3.4 라이닝 및 인접지반의 상호작용

라이닝이 있는 수로터널의 경우, 수로터널 외부로의 유출량 및 인접지반에서의 간극수압 분포는 인접지반의 투수계수(k_m)와 라이닝의 투수계수(k_L)에 좌우된다 (그림 8).

라이닝 상태가 매우 양호하다면 라이닝에 가해지는 외수압은 인접지반의 지하수위에 좌우되며 라이닝을 통한 미량의 유출량은 공학적으로 무시할 수 있다.

그러나, 만일 라이닝에 균열등의 손상정도가 심각해지면 라이닝의 투수계수는 기하급수적으로 증가하게 된다. 이런 경우, 인접지반의 투수계수가 매우 작다면 라이닝과 지반의 경계면에 작용하는 수압은 수로터널의 내수압과 비슷해지며, 라이닝을 통한 유출량은 인접지반의 투수계수에 의해 좌우된다.

라이닝 통과시의 손실수두에 대한 정규화식 및 라이닝-지반 경계면에서의 수두(h_{w1})는 라이닝 통과시의 유출량(q_L) 및 인접지반으로의 유출량(q_m) 산정을 통해 식 (5)와 같이 표현된다.

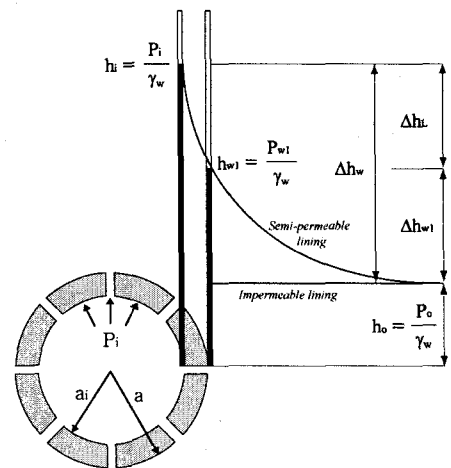


그림 8. 라이닝 통과시의 수두분포

$$h_{w1} = h_i - \frac{\Delta h_w}{1 + C \frac{k_L}{k_m}}, \quad C = \frac{\ln \frac{L}{a}}{\ln \frac{a}{a_i}} \quad (5)$$

라이닝이 없는 경우에 대한 인접지반으로의 단위길이당 유출량(q_o) 관계식을 통해 라이닝의 투수성에 따른 수두손실 및 유출량 관계를 분석하면 다음과 같다.

① 라이닝이 불투수성에 가까운 경우($\frac{k_L}{k_m} = \frac{1}{80} \sim \frac{1}{100}$):

- 라이닝을 통과하면서 발생하는 수두손실은 수로터널 외부로의 순 유출수두의 80~90%에 달하며, h_o 가 감소할수록 증가하는 경향을 나타낸다.
- 라이닝 설치시 유출량은 라이닝이 없는 경우의 10~20% 수준으로 감소한다.

② 라이닝이 반투수성에 가까운 경우($\frac{k_L}{k_m} = \frac{1}{10} \sim \frac{1}{20}$):

- 라이닝을 통과하면서 발생하는 수두손실은 수로터널 외부로의 순 유출수두의 40~60%에 달한다.
- 라이닝 설치시 유출량은 라이닝이 없는 경우의 40~70% 수준으로 감소한다.

③ 라이닝이 투수성에 가까운 경우 :

- 라이닝을 통과하면서 발생하는 수두손실은 수로터널 외부로의 순 유출수두의 5%를 넘지 않는다.
- 라이닝 설치시 유출량은 라이닝이 없는 경우의 95% 수준이며, 그 감소정도가 미비하다.

4. 근접시공 사례 및 평가

4.1 수로터널 하부로의 도로터널 통과 사례

서울 OO지역 일대에 위치하는 수도권광역상수도 수로터널은 인근 5개 도시에 용수를 공급하는 국가 중요시설물로서, 시설물 안전관리에 관한 특별법상 1종 시설물로 분류되어 있다. 본 수로터널은 1989년에 준공된 터널로서, 터널통과유량 1,543(천톤/일)의 압력터널이며 평상시 내압은 2.5~3.5kg/cm², 수격압 작용시 최대 6.0kg/cm² 규모이다. 수로터널은 NATM 형식이며, 단면은 D=3.2m의 마제형 터널이다.

한편, 신규도로 건설 계획 중, 신규 도로터널이 기존 수로터널의 하단부 교차 통과 및 출구부에 근접 굴착토록 계획되어 있었다. 본 연구대상 지역은 지반의 불균질성이 매우 심하고, 간섭대상 터널의 심도가 100m에 달하는 점을 고려할 때, 심도별 공간적인 구역화 및 각 구역에 대한 적정 물성치 산정이 매우 중요하다. 이를 위하여, 본 연구에서는 대심도 시추조사 및 물리탐사, 다양한 현장시험 및 실내시험 등을 수행하였으며, 이들의 종합적인 분석을 통해 최종적인 대심도 공간 구역화 및 물성치 산정을 수행하였다. 한편, 이러한 지반조사 결과를 바탕으로 하여, 기존 수로터널과 신규 도로터널의 간섭부를 사면 간섭부 및 터널 간섭부로 분류하고, 수로터널에서 발생할 수 있는 hydrojacking 및 응력-변형거동, 발파영향 등에 관한 세부 안정성 검토를 수행하였다.

4.2 지반조사

지반조사와 관련해서, 본 연구에서는 육안분류 및 기존 수로터널 인근 지층상태(파쇄대, 단층대 등) 파악을 위한 시추조사 4개소, 공내영상촬영, 공간적 지층분포 형태 및 특성 파악을 목적으로 전기비저항 탐사 및 탄성파토포그래피탐사(공대공, 공대지) 등을 수행하였다.

시추조사 등에 의한 RQD, RMR 분류 및 탄성파 토포그래피탐사 결과 등을 종합적으로 분석하여 터널 간섭부에 대한 구역구분을 실시하였는데, 구역구분시 RQD, RMR 값은 1차적으로 회수된 시추코아에 대하여 2.0~3.0m 구간별로 값을 구한 후 각 구간에서의 극한치를 제외한 채, 심도별 가중치를 감안하여 적용하였다. 지반을 단순히 풍화토, 풍화암, 연암, 경암으로 분류한다면, 수로터널 주변지반은 경암지반으로 표현되며, 이러한 지층구분 방식은 각종 지반조사에 의해 확인된 심도별 불균질성 및 안정성에 영향을 미치는 단층대와 파쇄대를 적절히 표현하지 못하고 있음을 알 수 있었다.

4.3 수로터널 안정성 평가

수로터널의 안정성 검토와 관련해서, 수로터널 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 hydrojacking (그림 9), 수로터널에서의 누수와 파쇄대층을 통한 연속적 침투현상 및 이에 의한 불안정성 등을 중심으로 전체적인 안정성 검토를 실시하였다 (그림 10). 구체적인 안정성 검토방법을 살펴보면, 유한요소해석 프로그램인 Pentagon 2D 및 SEEP/W 2D를 이용하여 수치해석을 실시하였는데, hydrojacking 등을 기존 연속체 해석의 개념으로 평가하는데 있어서의 한계점을 인식, 해외에서 압력터널 설계시 널리 적용되는 이론식을 적용한 안정검토를 동시에 실시하였다.

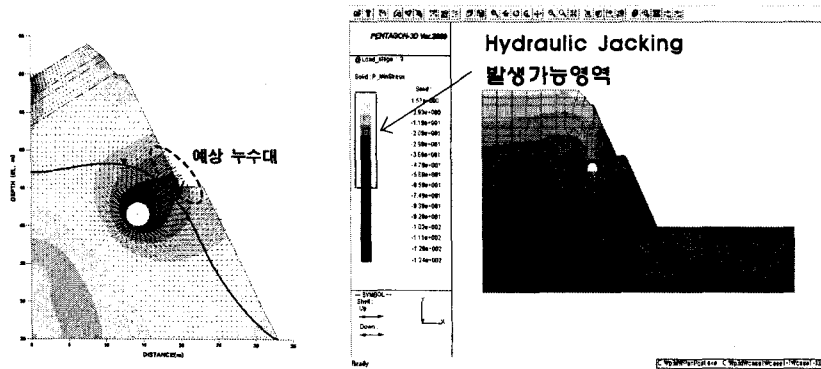


그림 9. 수치해석을 이용한 hydrojacking 검토

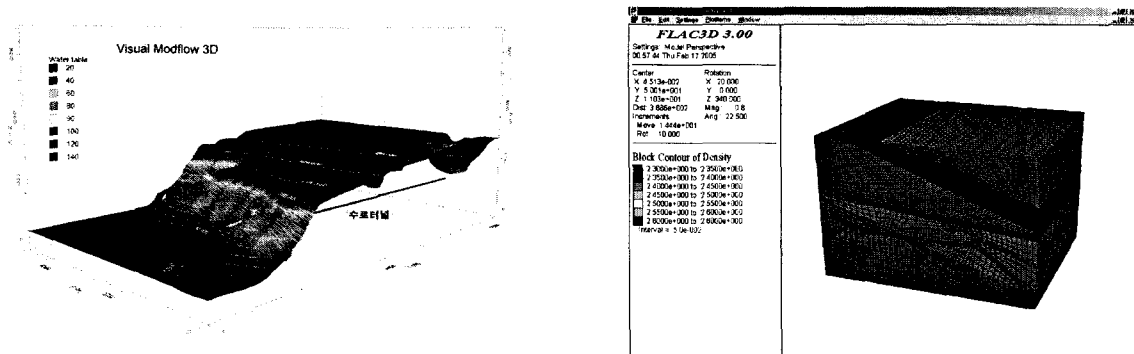


그림 10. 3차원 침투해석 및 응력변형 해석

또한 본 연구에서는 신규 도로터널 굴착 시 발생하는 주변 지하수위 하강이 수로터널의 운영에 어떤 영향을 미치는지에 관하여 검토하고, 수로터널과 교차되는 터널 간섭부의 안정성을 고려하기 위해 광역 지하수 모델링 프로그램(Visual MODFLOW Pro v.3.1)을 이용하여 굴착 시 지하수위 변화 및 신규 도로터널 내 유입수량을 분석하여 수로터널의 안정성을 평가하였으며, FLAC3D를 이용한 3차원 응력-변형해석을 실시하여 터널통과에 따른 응력거동 및 변위, 라이닝 구조검토 등을 수행하였다.

5. 결 론

현재 한국수자원공사에서 관리중인 수도시설은 27개의 광역상수도 및 공업용수도 시설로서, 수도공급 시설과 관련하여 145km 이상의 수로터널이 운영, 관리되고 있다.

최근들어 수로터널 자체의 손상사례 및 근접시공 등으로 인해 기존 수로터널의 안정성 문제가 대두되고 있는데, 이러한 문제들은 결국 안정적 물공급이라는 국민 생활안정 및 편익증대 측면에서 매우 중요한 항목이라 할 수 있다.

도로터널, 철도터널등과 달리 수로터널은 내부의 내수압 작용이라는 역학적 특성이외에 즉각적인 단수조치가 어렵다는 운영특성을 동시에 보이고 있다. 또한 국내 수로터널 중 상당수가 노후화되어가고 있으며, 인근 지반특성에 따라 이미 상당한 손상이 이미 발생한 것으로 보고되고 있다.

즉 수로터널만의 특성을 고려하여, 압력 수로터널에 대한 누수 및 균열, hydrojacking 등의 발생개념을 이해하고, 이로인한 불안정성 파악 및 대책을 마련하는 것은 안정적인 물공급이라는 국민적 요구를 위한 가장 기본적 사항이라 할 수 있으므로, 이와 관련된 다양하고 지속적인 관련연구가 필요하다고 할 수 있다.

참고문헌

1. 한국수자원공사(1997), "수로터널 설계 및 시공지침", pp.3~265.
2. Bieniawski, Z. T.(1997), "Engineering Rock Mass Classifications", John Wiley & Sons, New York, pp.1~135.
3. E. Hoek and E. T. Brown(1997), "Practical estimates of rock mass strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences", Vol. 34(8), pp.1165~1186.
4. G. Fenandez and T. A. Alvarez Jr(1994), "Seepage-Induced Effective and Water Pressures Around Pressure Tunnels", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120(1), pp.108-128.
5. T. A. Alvarez, Edward J. Cording and Gabriel G. Fernández(1999), "Pressure Tunnels in Fractured Rock: Minimum Cover Criteria from the Stability of Rock Wedges", Geotechnical special publication, No. 90, pp. 459-470.
6. T. L. Brekke and B. D. Ripley(1987), "Design Guidelines for Pressure Tunnels and Shafts", Report of Research Project 1745-17, EPRI AP-5273.