

# Tunnelling Technology

## 압력 수로터널의 특성 및 근접시공 영향



**전제성**  
인덕대학교  
건설정보공학과 조교수  
(공학박사, 토질및기초기술사)



**신동훈**  
한국수자원공사  
Kwater연구원 소장  
(공학박사)

### 1. 개요

국내에는 수도 및 발전 사업의 일환으로 많은 수로터널이 건설되어 운용되고 있다. 이중 한국수자원공사가 운영, 관리하고 있는 수로터널만 해도 대략 총연장 145km에 달하고 있는데, 대부분의 수로터널은 압력터널 형식으로서 시설물의 안전관리에 관한 특별법상 1중시설물로 구분, 안정적 용수공급이 매우 중요시되는 국가 중요시설이다.

최근들어, 도시확장 및 사회기반시설 확충을 이유로 도로, 철도, 터널 등의 각종 구조물들이 기존 수로터널과 근접 시공되거나 혹은 간섭되는 사례가 증가하고 있으며, 이러한 경향은 앞으로 도시기반시설 확충이라는 사회적 필요성으로 인해 더욱더 증가할 것으로 분석되고 있다.

수로터널은 역학적 특성 및 운용관리 특성에 있어 타 도로터널 및 철도터널과는 매우 큰 차이를 보이고 있다.

그러나, 근접시공에 대한 수로터널 안정성 검토 및 대책 수립시, 수로터널 특성에 기인한 수로터널에서의 발생가능한 불안정 요소와 운용특성을 배제한 채, 기존 도로터널 개념의 검토와 평가가 이루어지고 있는 것도 사실이다.

본 고에서는 한국수자원공사가 운영, 관리하고 있는 수로터널의 현황 및 도로터널, 철도터널 등과 비교할 때 수로터널이 갖는 특징을 살펴보고, 수로터널 인근의 근접시공 유형 및 유형별 기존 수로터널 안정성에 미치는 영향요소 등을 제시하고자 한다. 또한 수압조건 등과 관련된 수로터널 안정성 검토시의 고려사항 등을 소개하고자 한다.

### 2. 주요 수도시설 및 수로터널 현황

현재 한국수자원공사에서 관리중인 수도시설은 27개의

## 압력 수로터널의 특성 및 근접시공 영향

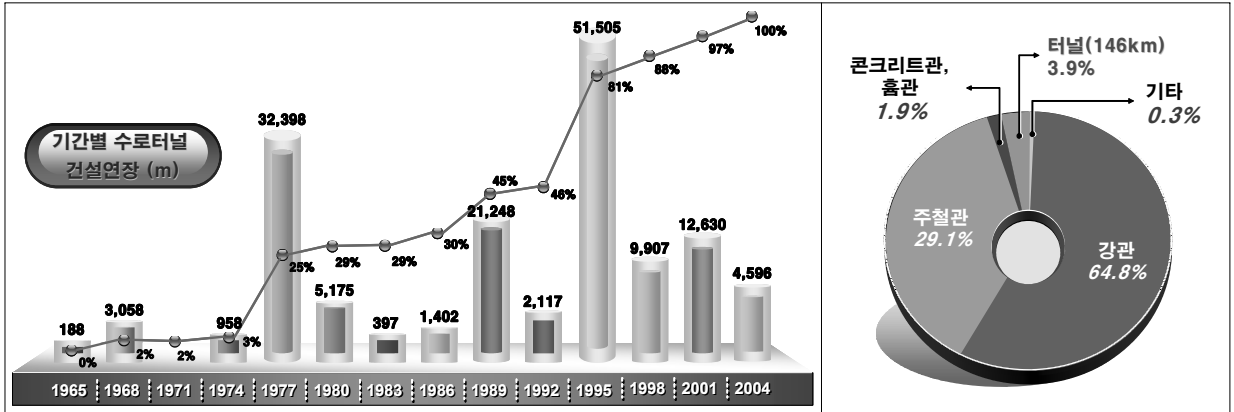


그림 1. 수로터널 기간별 건설이력(한국수자원공사, 2008)

그림 2. 관종별 관로현황

광역상수도 및 공업용수도 시설로서, 1일 16,482천 $m^3$ 의 용수를 공급할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 그중 광역상수도시설은 13,047천 $m^3$ 으로 79.2%, 공업용수도시설은 3,435천 $m^3$ 으로 20.8%를 차지하고 있다.

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.

용수공급 현황을 살펴보면, 한국수자원공사는 광역상수도사업을 시작한 1980년에는 373개 수용가에 연간 285백만 $m^3$ 의 용수를 공급하였으나 2005년에는 1,577개 수용가에 2,881백만 $m^3$ 의 용수를 공급하였다. 1980년과 비교해보면 물량면에서 10배, 수용가 수에서는 4.2배의 성장을 가져왔다.

2005년까지의 수종별 용수공급량은 원수가 1,529백만 $m^3$ 로 53%, 정수가 1,149백만 $m^3$ 로 40%, 침전수가 203백만 $m^3$ 로 7%를 차지하고 있다.

광역상수도의 수원은 다목적댐 등 대단위 취수원과 연계되어 있어 기상이변에 의한 장기 가뭄시에도 용수공급이 보다 안정적이며, 양호한 수질을 유지하고 있어 일반적인 정수처리 방법으로 먹는물 수질기준에 적합한 물의

생산이 가능하다. 수원별 취수현황은 다목적댐내 취수 11,128천 $m^3$ /일, 하천표류수 3,733천 $m^3$ /일, 용수전용댐 1,621천 $m^3$ /일로 구성되어 있다.

국내의 수로터널은 한국수자원공사, 한국전력, 지자체 등이 용수공급 및 발전 등의 목적으로 건설하여 운용중에 있다. 이 중 가장 많은 수로터널의 건설과 운용관리를 담당하고 있는 한국수자원공사의 수로터널 현황을 살펴보면 다음과 같다.

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

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.

수로터널 총 연장에 대한 직경별 비율을 살펴보면, 2,900mm~3,500mm 범위의 직경을 가진 수로터널들 총 연장이 전체의 30% 이상을 차지하고 있다. 수로터널의 단면은 대부분 원형 또는 마제형으로 시공되어 있으며,

라이닝 형식을 살펴보면, 한국수자원공사 관리의 수로터널 중 48.7%는 무근콘크리트 라이닝으로, 51.3%는 철근콘크리트 라이닝 형식으로 시공되었다.

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.

### 3. 수로터널의 특성

#### 3.1 압력 수로터널의 역학적 특성

압력 수로터널은 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 발생하며, 상호작용을 통해 각 손상은 타 손상의 진전을 급격히 촉진시키게 된다.

수로터널의 손상 및 파괴형태는 과도한 누수, 라이닝 손상, 인접지반으로의 내수압 영향증가와 이를 통한 인접지반 응력변화 등 다양한 형태로 나타나고 있다. Brekke and Ripley(1987)는 최근 60년간의 기존 수로터널 관련 자료를 수집하여 연구에 활용하였으며, 이중 54건의 중요 손상이 확인되었다.

수로터널의 가장 대표적 손상형태는 과도한 누수라 할 수 있는데, 이러한 누수는 라이닝이 없는 경우에만 해당되는 내용이 아니며, 숏크리트, 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 는 주장하고 있다.

#### 〈 과도한 누수시의 예상 문제점 〉

- 지속적인 누수경로 생성과 확장에 따른 누수량 급증 및 불안정성 증가  
(인접 지반의 침식, 유실 등에 따른 유로 및 공동의

표 1. 수로터널 손상사례별 손상형태 및 주요원인(Brekke and Ripley, 1987)

손상건수	손상형태	주요 원인
32/54	과도한 누수 (excessive leakage)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hydrojacking</li> <li>• 인근 암반의 변형</li> <li>• 투수성이 높은 지질조건</li> </ul>
12/54	인근 암반의 이완 (과도한 과잉간극수압)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지반특성</li> </ul>
7/54	라이닝 변형	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 과도한 외수압 작용 (4)</li> <li>• 과도한 그라우팅압 작용 (3)</li> </ul>
3/54	라이닝 파괴	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 내수압 작용</li> </ul>

Brekke et al. (1987)

## 압력 수로터널의 특성 및 근접시공 영향

생성, 추가적인 누수경로 확장)

- 라이닝 배면공동 생성에 따른 추가 라이닝 손상 및 누수량 증대
- 인근 지하로 전달되는 터널 내수압의 크기 증가 및 이로인한 인근 지반의 불안정성 증가 (전단강도 감소, 사면파괴, 공동생성 등)
- 수로터널 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

충분한 토피고 확보를 통해 수로터널의 구속효과를 확실히 기대할 수 있다해도 인근 지층조건 및 라이닝 상태 등에 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 절리등의 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.

### 3.2 수로터널의 운영관리 특성

수도권광역상수도 시설 등 현재 운용되고 있는 수로터널의 상당수는 상호 연계 및 복선화 운영체계가 미비하여 현실적으로 임의 단수가 불가능한 실정이다. 즉, 수로터널은 일반 도로터널 및 철도터널과 달리, 수로터널의 손상은

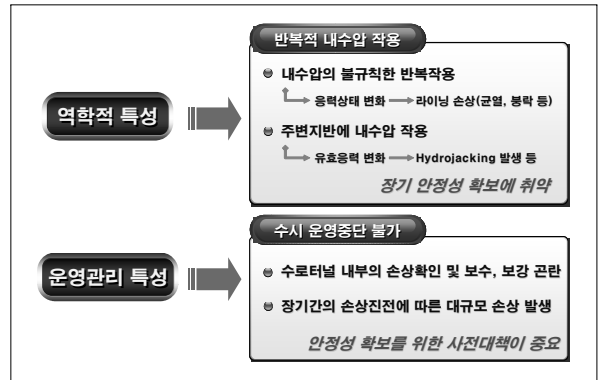


그림 3. 수로터널의 역학적 특성 및 운영관리 특성

발생시 즉각적인 손상정도에 관한 현장조사 및 보수보강을 위한 단수조치가 어려운 것이 현실이다. 또한 사전 단수협의를 통해 단수가 이루어진 경우도, 그 단수시간이 매우 짧은 관계로 일반 도로터널에서와 같은 조치작업은 현실적으로 불가능하다. 이는 수로터널의 매우 중요한 특성으로서, 수로터널 장·단기 안정성 확보를 위한 사전 대책이 매우 중요시 되는 것도 이러한 이유에 기인한 것이다.

## 4. 수로터널 근접시공의 형태 및 영향

일반적 개념의 터널 근접시공은 기존 터널 주위로 신규 구조물 시공이 진행되는 것으로서, 이러한 공사로 인해 터널과 주변지반의 응력변화, 지반진동, 수위변화 등이 발생하게 되며, 최종적으로는 기존 터널에 변형이 발생해 고유의 안전성 및 내구성, 기능 등에 영향을 미치는 것이다.

수로터널에 있어서, 이러한 근접시공 형태는 도로터널 및 철도터널등과 동일하지만, 수로터널 고유의 기능성 및 거동특성, 운용특성 등을 고려할 때 동일 근접시공 형태라 할지라도 그 영향에 있어 기타 도로터널 및 철도터널과는 다른 특징적인 현상들을 살펴볼 수 있다.

특히, 터널내부에 내수압(internal water pressure)이 작용하는 압력 수로터널(pressure tunnel)의 경우, 도로

압력 수로터널의 특성 및 근접시공 영향

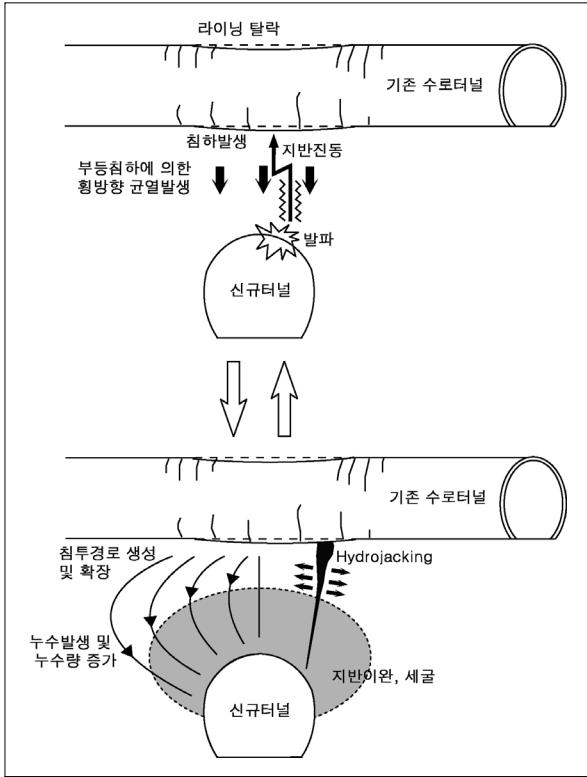


그림 4. 터널교차에 대한 근접시공 형태(하부통과)

터널 및 철도터널 등에서의 근접시공시 발생하는 영향 및 손상 등에 있어 그 형태에 유사하지만, 이러한 손상은 인접지반으로의 누수량 증가로 이어지게 되며, 누수량 증가는 기존의 손상을 더욱 증가시키고 이는 다시 누수량 증가를 가속시키는 연속적 손상확대의 특징을 보이고 있다.

수로터널에 대한 근접시공 형태를 터널교차, 터널병설, 측면굴착, 상부굴착 등으로 구분하고 각 근접시공 형태에 따라 근접시공이 기존 수로터널에 미치는 영향 및 문제점 등을 살펴보면 다음과 같다.

4.1 터널 교차

터널교차란 기존 수로터널과 근접하여 상부 또는 하부

표 2. 터널교차가 기존 수로터널에 미치는 영향 및 문제점

터널교차 형태	근접시공 영향 및 주요 문제점
하부교차	<p>&lt; 근접시공 영향 &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>하부터널 굴착으로 인한 지반변위 및 수로터널 부등침하 발생</li> <li>인접지반 응력상태 변화에 따른 지반이완 및 추가 하중 작용</li> <li>인접지반의 추가 유로생성 및 기존 유로확장</li> <li>수로터널 하부지반의 토피고 감소</li> <li>인접지반으로의 내수압 영향증가(전단강도 감소)</li> <li>굴착시 발파진동으로 인한 수로터널 라이닝 손상</li> </ul>
※기존 수로터널 하부로 신규터널 통과	<p>&lt; 주요 문제점 &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>수로터널 라이닝의 과도한 균열 및 부분적 탈락발생</li> <li>수로터널 외부로의 급진적 누수량 증가 및 기존 손상의 확장</li> <li>인접지반의 세굴 및 유로확장</li> <li>Hydrojacking 발생 및 진전(국부적 발생 → 전반적 파괴)</li> </ul> <p>※ 신규터널로의 동수구배 형성에 따라 침투발생이 매우 용이하며, 이는 외부로의 누수발생과 진전을 동반, 수로터널의 안정성과 기능성 유지에 치명적 영향을 미침</p>
상부교차	<p>&lt; 근접시공 영향 &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>상부터널 굴착으로 인한 응력해방 및 지반변위 발생</li> <li>인접지반의 추가 유로생성 및 기존 유로확장</li> <li>수로터널 상부지반의 토피고 감소</li> <li>굴착시 발파진동으로 인한 수로터널 라이닝 손상</li> </ul>
※기존 수로터널 상부로 신규터널 통과	<p>&lt; 주요 문제점 &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>수로터널 라이닝의 균열 및 부분적 탈락발생</li> <li>수로터널 외부로의 누수량 증가 및 기존 손상의 확장</li> </ul>

에 신규 도로터널 및 철도터널 등을 교차 통과하도록 시공하는 것으로서, 상부 및 하부 통과형태에 따라 그 영향과 문제점에는 큰 차이가 발생한다.

4.2 터널 병설

터널병설이란 신규 도로터널 및 철도터널 등을 기존 수로터널과 근접하여 평행하게 시공하는 것으로서, 심도상의 위치에 따라 상부 및 하부 병설로 구분될 수 있다.

압력 수로터널의 특성 및 근접시공 영향

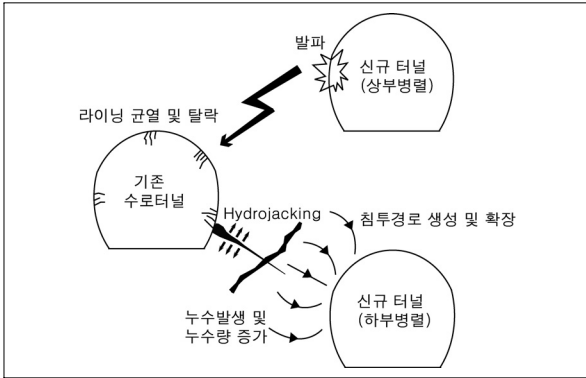


그림 5. 터널병설에 대한 근접시공 형태

표 3. 터널병설이 기존 수로터널에 미치는 영향 및 문제점

터널병설 형태	근접시공 영향 및 주요 문제점
하부병설	<p><b>&lt; 근접시공 영향 &gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 측면굴착으로 인한 지반변위 발생</li> <li>• 인접지반 응력해방에 따른 지반이완 및 추가하중 작용</li> <li>• 인접지반의 추가 유로생성 및 기존 유로확장</li> <li>• 수로터널 측면지반의 토피고 감소</li> <li>• 인접지반으로의 내수압 영향증가(전단강도 감소)</li> <li>• 굴착시 발파진동으로 인한 수로터널 라이닝 손상</li> </ul> <p><b>&lt; 주요 문제점 &gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수로터널 라이닝의 과도한 균열 및 부분적 탈락발생</li> <li>• 수로터널 외부로의 급진적 누수량 증가 및 기존 손상의 확장</li> <li>• 인접지반의 세굴 및 유로확장</li> <li>• Hydrojacking 발생 및 진전(국부적 발생 → 전반적 파괴)</li> </ul> <p>※ 병설구간이 길어질수록 공학적으로 불리한 불연속면 및 누수, 취약지반 등의 발생가능성이 높아지며, 부분적 지반조사와 분석에 대한 현실적 한계를 감안할 때, 대규모 병설의 근접시공은 기존 수로터널의 안정성에 매우 불리한 형태임</p>
상부병설	<p><b>&lt; 근접시공 영향 &gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 측면굴착으로 인한 응력해방 및 지반변위 발생</li> <li>• 인접지반의 추가 유로생성 및 기존 유로확장</li> <li>• 수로터널 측면지반의 토피고 감소</li> <li>• 굴착시 발파진동으로 인한 수로터널 라이닝 손상</li> </ul> <p><b>&lt; 주요 문제점 &gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수로터널 라이닝의 균열 및 부분적 탈락발생</li> <li>• 수로터널 외부로의 누수량 증가 및 기존 손상의 확장</li> </ul>

터널 교차시와 마찬가지로, 터널 병설에 있어서도 기존 수로터널보다 아래부분에 신규 터널이 시공되는 하부병설 형태가 누수 및 hydrojacking 등과 관련된 수로터널 안정성 측면에 있어 더욱 불리한 근접시공 형태가 된다.

※하부병설 : 기존 수로터널과 비슷하거나 낮은 심도에 신규터널이 병설시공되는 형태

4.3 측면 굴착

측면굴착이란 신규 구조물 및 도로 시공등을 위하여 기존 수로터널의 측면부 원지반을 굴착하는 것이다. 기존 수로터널과의 이격정도, 굴착방법 및 범위, 지반조건 등에 따라 그 영향정도가 달라지며, 최종적인 불안정 현상 및 영향등은 타 근접시공의 경우와 유사하다.

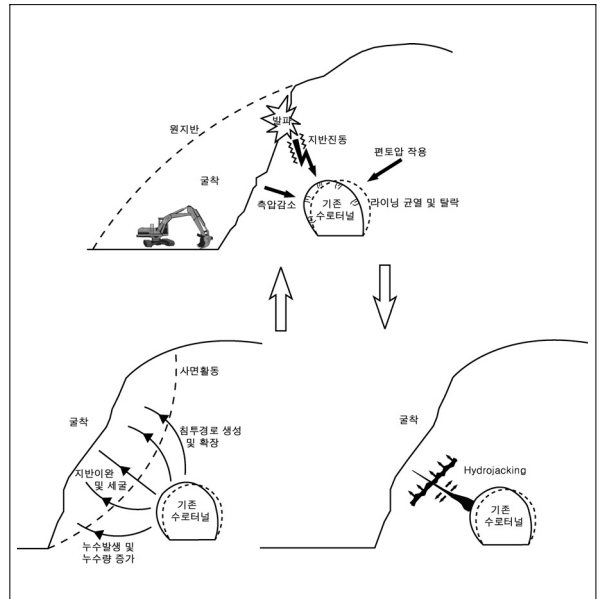


그림 6. 측면굴착에 대한 근접시공 형태

표 4. 측면굴착이 기존 수로터널에 미치는 영향 및 문제점

근접시공 형태	근접시공 영향 및 주요 문제점
측면굴착	<p>〈 근접시공 영향 〉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 측면굴착으로 축압감소 및 편토압 작용(측면 토피고 감소)</li> <li>• 인접지반의 추가 유로생성 및 기존 유로확장</li> <li>• 굴착시 발파진동으로 인한 수로터널 라이닝 손상</li> <li>• 인근 지반 및 불연속면의 전단강도 감소</li> </ul> <p>〈 주요 문제점 〉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수로터널 라이닝의 과도한 균열 및 부분적 탈락발생</li> <li>• 수로터널 외부로의 급진적 누수량 증가 및 기존 손상의 확장</li> <li>• 인접지반의 세굴 및 유로확장</li> <li>• 인접지반의 사면활동 및 변위발생</li> <li>• Hydrojacking 발생 및 진전(국부적 발생 → 전반적 파괴)</li> </ul>

표 5. 상부굴착이 기존 수로터널에 미치는 영향 및 문제점

근접시공 형태	근접시공 영향 및 주요 문제점
상부굴착	<p>〈 근접시공 영향 〉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 상부굴착으로 토피고 및 토피압 감소</li> <li>• 인접지반의 추가 유로생성 및 기존 유로확장</li> <li>• 굴착시 발파진동으로 인한 수로터널 라이닝 손상</li> </ul> <p>〈 주요 문제점 〉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 상부 구축압 감소에 의한 기존 수로터널의 상향변위 발생</li> <li>• 수로터널 라이닝의 과도한 균열 및 부분적 탈락발생</li> <li>• 수로터널 외부로의 급진적 누수량 증가 및 기존 손상의 확장</li> <li>• Hydrojacking 발생 및 진전(국부적 발생 → 전반적 파괴)</li> </ul>

#### 4.4 상부 굴착

상부굴착이란 신규 구조물 및 도로 시공등을 위하여 기존 수로터널의 상부 원지반을 굴착하는 것이다. 기존 수로터널과의 이격정도, 굴착방법 및 범위, 지반조건 등에 따라 그 영향정도가 달라지며, 최종적인 불안정 현상 및 영향등은 타 근접시공의 경우와 유사하다.

### 5. 수로터널의 안정성 검토시 고려사항

수로터널의 역학적 특성을 고려한 적정 안정성 검토를 위해서는 수로터널에 대한 손상 및 파괴 형태와 메커니즘, 내수압 작용이 주변지반의 응력변화에 미치는 영향 및 정도, 라이닝과 지반의 수리학적 상호작용, hydrojacking 발생 및 최소 토피고 이론 등에 대한 분석이 선행되어야 한다.

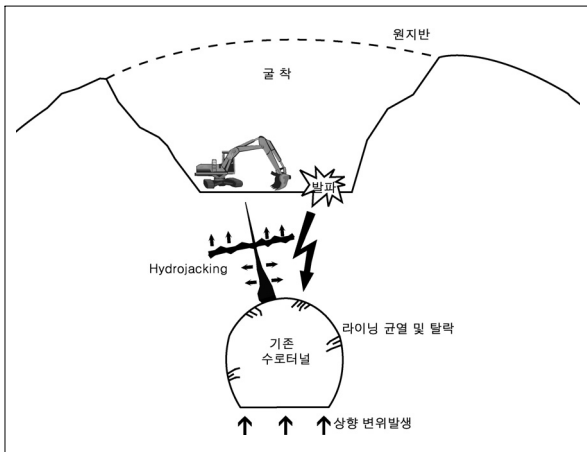


그림 7. 상부굴착에 대한 근접시공 형태

#### 5.1 내수압 작용에 따른 주변지반 응력분포

Fernández and Alvarez(1992)는 Bouvard and Pinto(1969), Schleiss(1986)의 기존 가정사항의 모순을 인식, 임의방향의 흐름 및 원지반 지하수위 위치를 고려하고 침투 영향 범위에 대한 가정을 제거한 상태에서, 침투에 의해 발생하는 지반내 유효응력 예측에 관한 해석식을 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 수로터

압력 수로터널의 특성 및 근접시공 영향

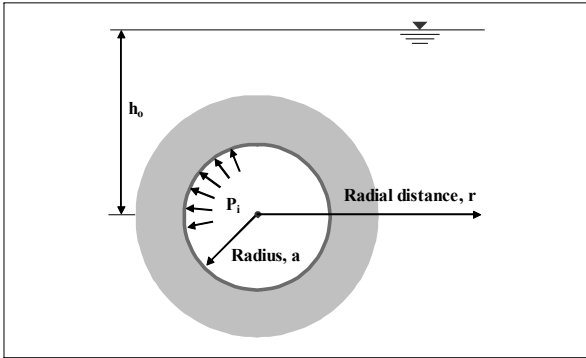


그림 8. 수로터널내 하중조건

널과 원지반 지하수위의 수직거리만큼 이격된 곳에 위치하게 된다.

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 대푯값으로 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 침투현상에 의해 발생하는 지반내 유효응력값이다.

$$\frac{\sigma'_r}{\Delta P_w} = \frac{1}{2(1-\nu)} \cdot \left\{ \left( \frac{a^2}{r^2} - 1 \right) + \frac{2 \ln \frac{r}{a} + \left[ (1-2\nu) \left( 1 + \frac{4h_0^2}{r^2} \right) - 2(1-\nu) \right] \ln \left( \frac{r^2 + \frac{4h_0^2}{a^2}}{a^2} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{4h_0^2}{a^2} \right)} \right\}$$

$$\frac{\sigma'_\theta}{\Delta P_w} = \frac{-1}{2(1-\nu)} \cdot \left\{ \left( \frac{a^2}{r^2} + 1 \right) - \frac{2 \ln \frac{r}{a} - \left[ (1-2\nu) \left( 1 + \frac{4h_0^2}{r^2} \right) + 2\nu \right] \ln \left( \frac{r^2 + \frac{4h_0^2}{a^2}}{a^2} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{4h_0^2}{a^2} \right)} \right\}$$

- 여기서,  $\sigma'_r$  : 반경방향 유효응력
- $\sigma'_\theta$  : 접선방향 유효응력
- $\Delta P_w$  : 내수압과 외수압 차이( $\Delta P_w = P_i - P_o$ )
- $h_i$  : 수로터널 내수압 수두
- $h_o$  : 주변지반의 정수압 수두
- $a$  : 수로터널 반경
- $r$  : 수로터널 중심과 임의 지점까지의 방사방향 거리
- $\nu$  : 주변지반의 포아송비

Fernandez 해석해에서는 주변지반을 투수성의 탄성체로 고려하고 내수압은 터널굴착면의 수두로서 고려한 반면, Lamé의 이론해는 중공 실리더 탄성체에 대한 원통좌표상의 응력해를 나타낸 것으로서, 주변지반은 불투수성의 탄성체로 고려하였고, 내수압은 일반 역학하중 재하조건으로 고려하였다.

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 지하수위로부터 터널 심도( $h_o/a$ )에 직접적인 영향을 받음을 알 수 있다.

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.



압력 수로터널의 특성 및 근접시공 영향

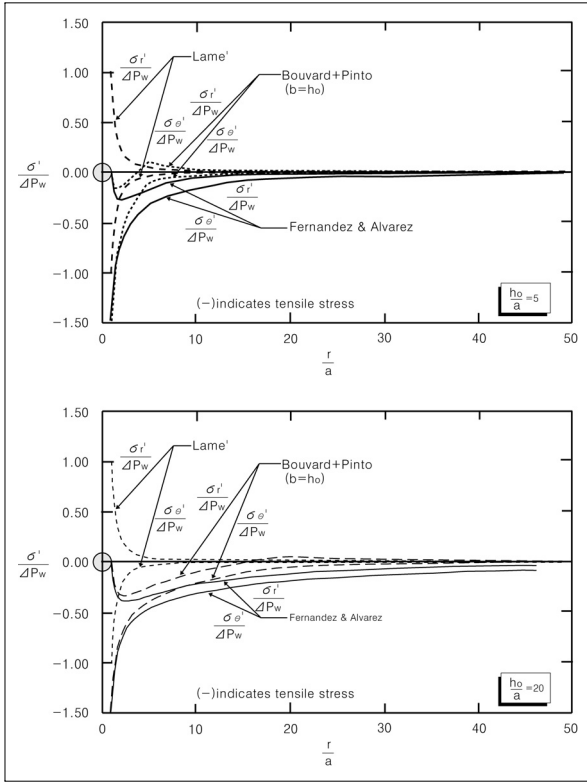


그림 9. 수로터널 주변지반의 응력변화 비교

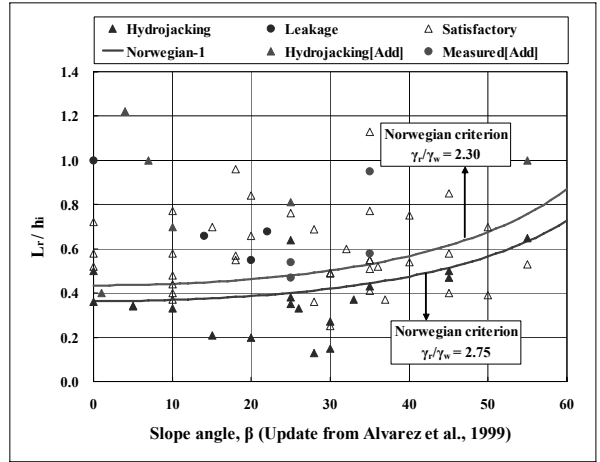


그림 10. 기존 수로터널 손상사례 및 토피고 기준

## 5.2 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. 일단 내수압이 주변지반 정수압보다 클 경우, 터널로부터 주변지반으로의 흐름 발생하게 되고, 내수압 증가에 따른 침투압 및 침투량이 증가하게 된다. 이어 주변지반의 지하수위가 상승하게 되며, 수로터널 인접지반에서의 국부적 초기 hydrojacking 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.

Dann et al. (1964)은 Australia의 Snowy Mountain의 양수발전 프로젝트를 위해 수직방향 및 수평방향에 대한 수로터널 최소 토피두께 산정식을 제안하였으며, 1970년 노르웨이 Åskora 수로터널의 hydrojacking 파괴사례를 경험하면서, 1971년 Bergh-Christensen and Dannevig에 의해 Norwegian rock cover criterion이 발표되었다. 이 기준에서는 인근 지반의 사면경사가 고려되었는데, 사면 수직방향의 절편에 대한 한계평형해석으로 유도되었다.

압력 수로터널에서의 누수 및 Hydrojacking 등의 안정성에 있어, 기존의 최소 토피고이론 및 사면 기울기에 의한 판단기준은 불연속면 발달 및 강도 측면의 현장 암반조건이 유리한 경우에 적용될 수 있으며, 불연속면이 발달한 일반적 현장조건에서는 그 판단기준으로 이용되는데 한계를 가질수 밖에 없다.

실제 누수 및 hydrojacking 등의 안정성은 수직방향과 수평방향의 현장응력비 및 불연속면에서의 강도와 주응력상태 등에 크게 좌우된다. Hydrojacking 발생 가능성은 수로터널 인근지반의 최소 주응력( $\sigma'_3$ )과 내수압 작용을 고려한 유효응력( $\sigma'_{r, \sigma'_\theta}$ )을 비교하여 검토하되, 수로터널의 위치 및 방향별 발생가능성을 검토해야 한다.

## 압력 수로터널의 특성 및 근접시공 영향

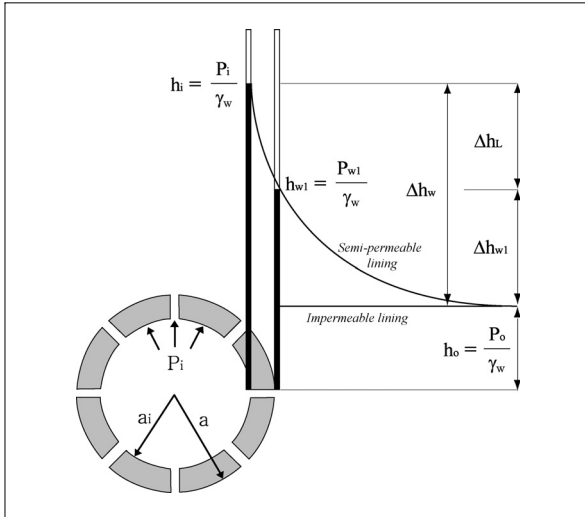


그림 11. 라이닝 통과시의 수두분포

수로터널 주변지반에 절리 및 파쇄대 등의 불연속면이 존재할 경우, 내수압 영향이 인근 불연속면에 직접적으로 작용하게 되며, 그 진전정도는 이론상의 Hydrojacking 발생영역보다 증가할 수 있다.

### 5.3 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. 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.

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

$$\left(\frac{k_L}{k_m} = \frac{1}{80} \sim \frac{1}{100}\right) :$$

- 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

$$\left(\frac{k_L}{k_m} = \frac{1}{10} \sim \frac{1}{20}\right) :$$

- 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.

## 6. 결론

최근 들어 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.

수로터널은 내수압 작용이라는 역학적 특성 및 수시단수를 통한 이상유무 판정이 어렵다는 운영관리상의 특성을 지니고 있다. 또한 국내 수로터널 중 상당수가 노후화

되어가고 있으며, 인근 지반특성에 따라 이미 상당한 손상이 이미 발생한 것으로 보고되고 있다. 그러나, 수로터널의 안정성을 평가하는데 있어 수로터널만의 이러한 특성을 무시한 채, 도로터널 및 철도터널 등에 관한 기존 검토방법을 답습하고 있는 것도 사실이다.

수로터널의 특성을 반영한 안전관리를 위해서는 내수압 작용에 대한 응력변화 및 누수현상, 라이닝과 인접지반의 수리학적 상호작용, hydrojacking 등에 관한 이론적 분석과 함께 운영관리 특성을 고려한 점검기법 개선 및 IT기술을 접목한 점검장비 개발 등이 요구된다고 할 수 있다.

### 참고문헌

1. 한국수자원공사(2007), “수로터널 설계 및 시공지침”
2. Bieniawski, Z. T.(1997), “Engineering Rock Mass Classifications”, John Wiley & Sons, New York, pp.1-135.
3. Hoek E. and Brown E. T. (1997), “Practical estimates of rock mass strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences”, Vol. 34(8), pp. 1165-1186.
4. Fenandez G. and Alvarez T. A. Jr (1994), “Seepage-Induced Effective and Water Pressures Around Pressure Tunnels”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120(1), pp. 108-128.
5. Lang, T. A., Kendorski, F. S., and Chawla, K. S (1976), “Effect of rapid water pressure fluctuations on unlined water tunnel stability”, Proc Rapid Excavation and Tunneling Conference, Las Vegas, 14-17 June, pp. 417-429.
6. Raven, K. G. & Gale, J. E (1985), “Water Flow in a Natural Rock Fracture as a Function of Stress and Sample Size”, Int. J. Rock Mech, Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 4, pp. 251-261.
7. Schleiss, A.(1986), “Design of previous pressure tunnels”, Int. Water Power and Dam Constr., 38(5), pp. 21~26.
8. Alvarez T. A., Cording E. J. and Fernández G. (1999), “Pressure Tunnels in Fractured Rock: Minimum Cover Criteria from the Stability of Rock Wedges”, Geotechnical special publication, No. 90, pp. 459-470.
9. Brekke T. L. and Ripley B. D.(1987), “Design Guidelines for Pressure Tunnels and Shafts”, Report of Research Project 1745-17, EPRI AP-5273.