Journal of the Korean Geo-Environmental Society
24(5): 5～12. (May 2023) https://journal.kges.or.kr

ISSN 1598-0820 (Print)
ISSN 2714-1233 (Online)
DOI https://doi.org/10.14481/jkges.2023.24.5.5

수로터널 안정성에 미치는 요소를 고려한 근접시공범위에 대한 연구

A Study on the Near Construction Range Considering the Factors Affecting the Stability of Water Tunnel

이 민 규[1] · 이 동 혁†
Mingyu Lee · Donghyuk Lee

Received: March 22nd, 2023; Revised: March 27th, 2023; Accepted: April 10th, 2023

ABSTRACT : Recently, due to urban development and expansion, construction plans have been increasing adjacent to existing tunnel structures such as subways, roads, and large pipelines. Structural plans adjacent to existing tunnels have different effects on tunnel stability depending on the construction method, degree of proximity, and location of new structures. In particular, the pressure water tunnel shows a very large difference from other road tunnels and railway tunnels in geotechnical characteristics and operation characteristics. Therefore, it is necessary to review the safety zone due to adjacent construction in consideration of the geotechnical characteristics of the water tunnel and the new sturure construction method. In this study, the existing tunnel safety zone standards were investigated. A stability evaluation performed numerical analysis considering the deterioration of concrete lining in operation and the characteristics of water tunnel. In addition, the impact of vibration caused by pile construction and blasting excavation of new structures was reviewed. Based on this, a pressure water tunnel safety zone was proposed in consideration of adjacent construction.

Keywords : Water tunnel, Adjacet construction, Safety zone

요 지 : 최근에는 도시개발 및 확장으로 지하철, 도로, 대형관로 등 기존 터널 구조물에 인접하여 건설 계획이 증가하고 있다. 기존 터널에 인접한 구조물 계획은 신규 구조물의 시공방법 및 인접 정도, 위치에 따라 터널 안정성 미치는 영향이 다르다. 특히 압력수로터널은 지반 거동 특성 및 운영 특성에 있어 도로터널 및 철도터널과는 매우 큰 차이를 보인다. 따라서 수로터널의 거동 특성 및 신규공사 공법을 고려하여 근접시공으로 인한 안전영역에 대한 재검토가 필요하다. 본 연구에서는 기존 터널 인접 시공 기준을 조사하고 수로터널 특성을 고려하여 안정성 평가를 수행하였다. 안정성 평가는 운용 중인 터널의 콘크리트라이닝의 열화를 고려하여 수치해석적 방법으로 평가하였다. 또한, 신규 구조물의 말뚝 시공 및 발파굴착에 의한 진동 영향을 검토하여 인접 시공방법에 따른 기존 터널 안정성이 확보되는 영역을 검토하였다. 국내 다양한 근접시공 영역에 대한 기준을 바탕으로 운용 중인 수로터널 특성을 반영하여 안전영역을 재검토하였으며, 이를 바탕으로 근접 안전 시공범위를 제시하였다.

주요어 : 수로터널, 근접시공, 안전영역

1. 서 론

최근 도시 개발 및 확장, 사회기반시설 신설 등으로 인해 철도, 도로, 수로, 전력 등의 기존 터널 주변으로 각종 구조물 및 건축물이 계획되는 사례가 증가하고 있다. 특히 대도시의 인구 집중 및 기존 건물의 노후로 인해 기존 수로터널에 인접하여 도로, 철도, 건축물 등의 계획이 증가하고 있으며, 수로터널에 근접하여 시공되거나 간섭되는 사례가 증가하고 있다.

수로터널은 지반 거동 특성 및 운영 특성에 있어 도로터널 및 철도터널과는 매우 큰 차이를 보인다. 그러나 근접시공 시 수로터널에 대한 안전영역 기준이 없어 기존 철도터널의 안전영역 기준으로 검토하고 있다. 그러나 철도터널은 압력수로터널과 지반거동 및 운영 특성이 매우 달라 수로터널의 안정성을 확보할 수 있는 영역으로 신뢰하기 어렵다.

본 연구 대상은 도심지 내 운영을 시작한지 30년 이상된 수로터널로 상부에 공동주택이 계획되어 수로터널이 안전한 근접 시공 가능범위에 대한 문제가 대두되었다. 대상 수로터널은 운영 중인 터널로 내부에서 정확한 노후도를 평가하기 어려웠으며, 근접 시공으로 인하여 터널 안정성이 저하될 경우 누수 등 사고 발생으로 도시 수도공급에 차질이 발생되는 중요한 시설물이었다.

수로터널 안전영역 평가를 위하여 지반조사를 시행하였으며 신규 구조물 시공으로 터널에 미치는 영향을 평가하기

1) Ph.D. Candidate. Deprtment of Civil Engineering, Sangji University
† Lecturer, Department of Fire Safety, Sangji University (Corresponding Author : idonghyuk@hanmail.net)

위하여 수로터널의 특성을 반영한 안정성 검토를 수행하였다. 또한 시공 시 발생 가능한 진동을 추정하여 진동으로 인한 수로터널에 대한 안정성을 검토하였다. 따라서, 본 연구에서는 수로터널의 지반거동 특성을 고려하여 수로터널의 지반 안정성, 진동 영향을 고려한 종합적인 근접 안전 시공범위를 평가하였다.

2. 압력 수로터널의 근접시공에 따른 거동

2.1 압력 수로터널의 특성

도로나 철도와 같은 일반적인 터널은 지반하중을 라이닝 외부에서 내부로 작용하는 것과 달리 압력 수로터널은 외부 지반하중 외에 터널 내부에서 외부로 내수압이 작용하고 있어 노후, 손상 정도에 따라 거동 양상 및 주변 지반에 대한 영향이 다음과 같이 상이하다. 노후로 손상된 압력 수로터널은 내수압으로 인한 누수가 발생하여 유로가 확장된다. 이로 인한 주변지반 포화 및 강도저하, 공동 발생, Hydro-jacking, 라이닝 균열 확장 등 다양한 형태의 손상이 발생한다. 이러한 손상은 누수량을 증가시켜 손상을 확장하며 반복적인 손상 촉진의 악순환이 계속된다. 수로터널의 특성상 이와 같은 손상이 발생하면 터널의 보수 및 보강을 위하여 공급중단을 할 수밖에 없다. 압력 수로터널은 일반적인 터널과 달리 손상이 발생할 경우 즉각적인 현장조사 및 손상 위치 파악, 대책 마련이 불가능하다. 압력수로터널의 손상으로 과도한 누수가 발생했을 경우 예상되는 문제점은 다음과 같다.

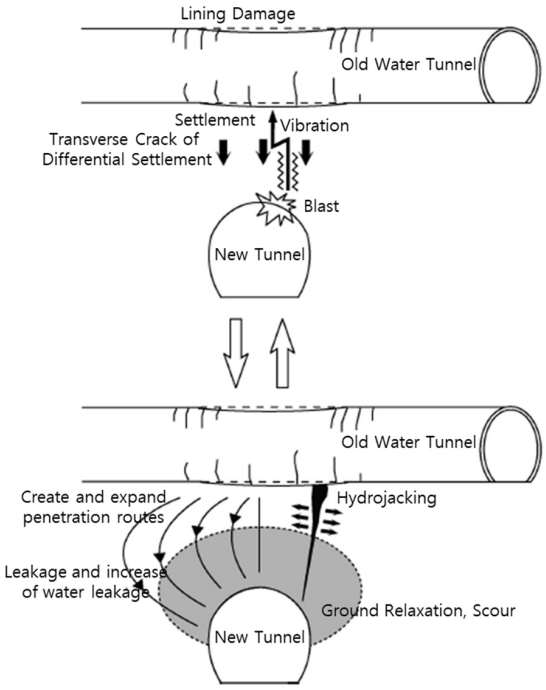
- 지속적인 누수 및 확장으로 누수량 급증(인접 지반의 침식, 유실 등에 따른 유로 및 공동의 생성, 추가적인 누수경로 확장)
- 라이닝 배면 지반 공동으로 추가 손상 및 누수량 증대
- 배면 지반으로 터널 내수압의 크기 증가 및 인근 지반의 안정성 저하(전단강도 감소, 사면파괴, 공동생성 등)
- 터널 보수·보강 시의 단수로 물공급 차질 및 민원 발생
- 단수 시 내수압 저하로 지반 평형상태가 급격히 깨져 지반하중으로 인한 터널 안정성 저하 발생
- 재운영 시 용수 손실 발생으로 원활한 용수공급 차질 및 단수조치에 따른 수익감소

2.2 압력 수로터널의 근접시공 영향

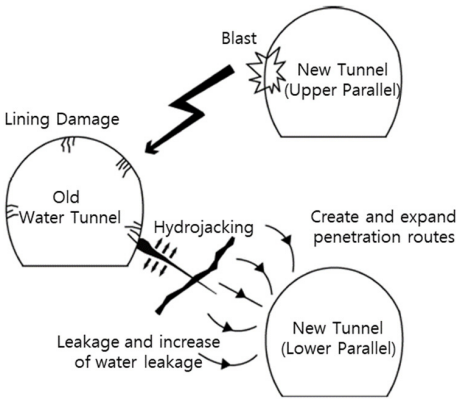
일반적으로 터널 근접시공은 기존 터널 주위로 신규 구조물 시공으로 인해 터널과 주변 지반의 응력 변화, 지반 진동, 지하수위 변화 등이 발생한다. 최종적으로는 기존 터널의 안정성, 내구성 및 기능 등에 영향을 미치게 된다.

특히, 압력 수로터널(Pressure Water Tunnel)의 경우 근접시공으로 발생하는 터널 손상은 인접지반으로 누수량을 증가시키게 된다. 이러한 누수량 증가는 손상 부위를 더욱 확장시키고 다시 누수량 증가를 가속시켜 연속적인 손상확대가 진행되는 특성을 보인다.

기존 수로터널의 근접시공의 형태는 신규터널의 근접교차, 신규터널의 병설시공, 기존 수로터널의 상부 굴착 및 측면 굴착의 형태로 구분하여 발생할 수 있다. 각 근접시공 형태에 따라 근접시공이 기존 수로터널에 미치는 영향 및 문제점은 Fig. 1, Fig. 2와 같다(Korea Water Resources Corporation, 2007).

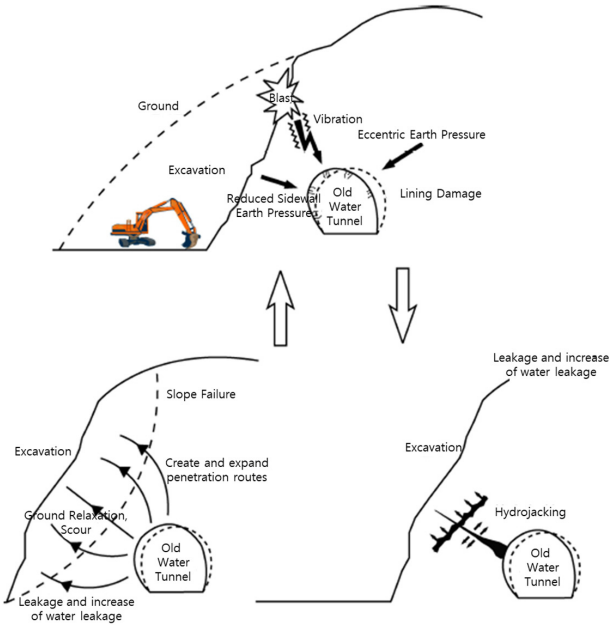


(a) Near construction type – Tunnel crossing

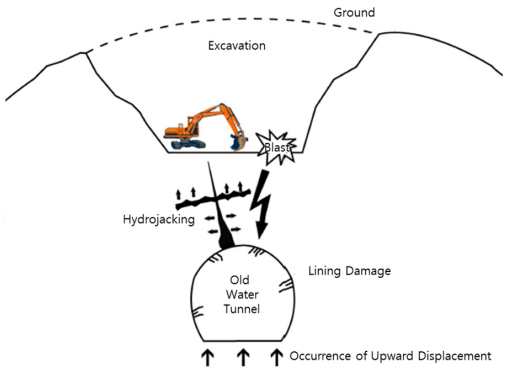


(b) Near construction type – Tunnel parallelism

Fig. 1. The effect of near construction type of water tunnel (1) (Korea Water Resources Corporation, 2007)



(a) Near construction type – Tunnel lateral excavation



(b) Near construction type – Tunnel upper excavation

Fig. 2. The effect of near construction type of water tunnel (2) (Korea Water Resources Corporation, 2007)

3. 국내 근접시공 관련 기준

터널 근접 시공시 안전영역 결정에 주요 인자 중 '구조물 터파기의 형상 및 깊이'와 '구조물 하중'은 터널 상부 신축 건물 계획 시 중요하며, 기존구조물의 안정성 평가에 반드시 반영되어야 한다.

터널 굴착으로 인한 영향범위는 전통적으로 Fig. 3과 같이 주동파괴면인 45°+∅/2를 기준으로 결정되어 왔다(Cording & Hansmire, 1975; Attewell, 1977; Attewell et al., 1986).

국내에서는 지하철 건설이 활발해지면서 안전영역 설정에 대한 관심이 커졌다. 그러나 현재까지 국가적 차원의 터널 안전영역 설정기준은 마련되어 있지 않으며, 지하철 건설에 따른 보상을 위해 서울 및 부산지하철 등에서 자체적으로 안전영역에 대한 규정을 운용하고 있다(서울특별시 도시철도공사, 2001).

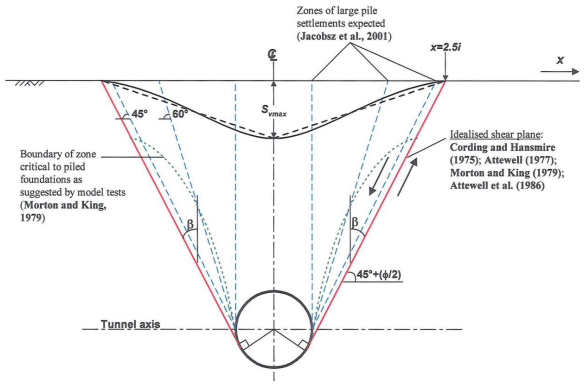
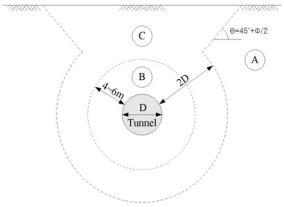
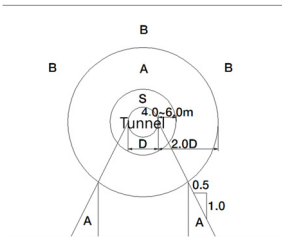
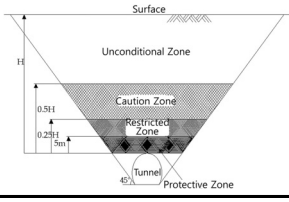


Fig. 3. Idealized shear plane (Cording & Hansmire, 1975; Attewell, 1977; Attewell et al., 1986)

Table 1은 국내·외 근접시공 관련 안전기준을 나타낸다.

Table 1. Safety standards for near construction of tunnels

Index	Diagram	Definition
Seoul Metro (1983)		- A : Possible - B : Not possible - C : Considering near Structures
Seoul Metro (2007)		- S : Not possible - A : Deformation in the tunnel - B : Possible
Seoul Metro (2011)		- ~ 0.25 : Not possible - 0.25~0.5 : Attention - 0.5 ~ : Possible

4. 근접시공에 의한 수로터널 안정성

4.1 검토 개요

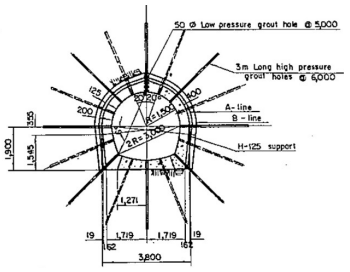
본 연구의 압력 수로터널은 1980년대에 준공된 마제형 터널로 내경 3.0m, 총연장은 3.97km로 재래식터널공법(ASSM)으로 시공되었다.

또한, 공사지 및 준공도면을 조사하여 수로터널 통과구간은 화강암이 주류로 분포하고 있으며 풍화상태 및 정도에 따라 3가지 TYPE으로 분류하여 지보를 적용한 것으로 분석되었다.

연구대상 터널은 Type C 지보패턴이 적용된 구간으로

강지보공, 콘크리트라이닝 및 철근이 보강되어 있으며 Table 2와 같다.

Table 2. TYPE C pattern (Korea Water Resources Corporation, 1981)

Index	TYPE C
Section	
Steel Rib	H-125
Lining (Rebar)	T=40cm (D29@250mm)

수로터널 직상부에 공동주택이 계획되었으며, 이에 따라 수로터널 근접시공에 대한 안정성 평가가 요구되었다. 검토단면은 구조물 현황을 기준으로 하여 가장 위험한 3단면을 설정하였으며 추가적으로 수로터널에 영향을 줄 가능성이 있는 배치를 검토하기 위해 가상의 2개 단면을 설정하였다. 설정된 2개 단면은 지층조건 및 상부 구조물 조건이 가장 불안정한 경우와 구조물과 수로터널의 이격거리를 검토하기 위하여 지상구조물이 수로터널 직상부에서 16m 수평 이격된 단면

Table 3. Analysis sections (1)

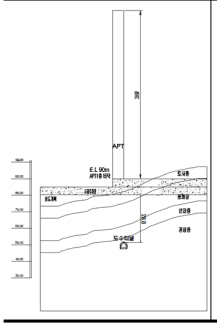
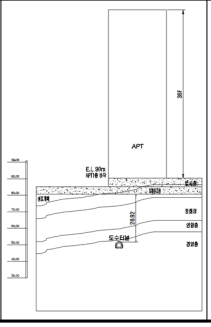
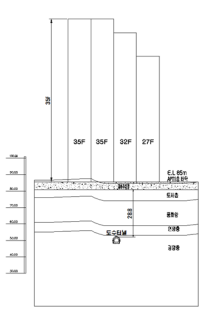
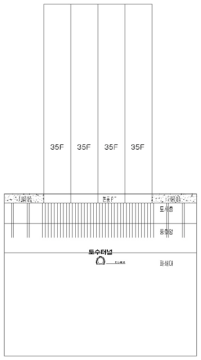
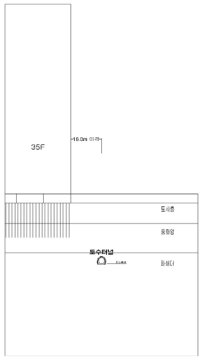
Section A-A'	Section B-B'	Section C-C'
		

Table 3. Analysis sections (2)

Critical section	Critical section 16m
	

이다. 해석위치 및 가정 단면설정 현황은 Table 3과 같다.

수로터널의 안정성 검토를 위해 다음과 같은 주요 항목들을 설정하였다.

① 수로터널 안정성 측면
- 콘크리트라이닝 부재력 : 열화된 부재의 공칭강도 확보 여부 및 부재의 응력 증가량
- 터널 주변 지반 안정성 : Hydro-jacking 발생 여부

② 수로터널 사용성 측면
- 수로터널 용수 누수방지 : 콘크리트라이닝 균열 제어

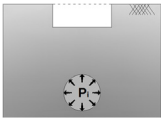
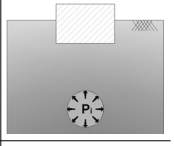
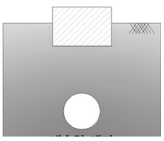
수로터널 구조물의 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수는 준공(1980년) 이후 37년간 단수없이 운영된 점을 고려할 때 기간이 경과함에 따라 콘크리트라이닝의 재질이 열화되었을 가능성을 고려하였다. “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침”(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017) 및 KS F 2730(Korean Standards Association, 2003)에서 제시하고 있는 방법에 따라 콘크리트 재령계수 0.63을 적용하여 Table 4와 같다.

Table 4. Water tunnel lining strength considering deterioration

Index	Design	Deterioration
Compressive strength	f_{ck}=18MPa	f_{ck}=11.34MPa
Elasticity coefficient	E_c=25,181MPa (≒25,000MPa)	E_c=22,816MPa (≒22,000MPa)

안정성 검토를 위한 해석 수행 시 해석단계는 수로터널의 굴착단계 해석 이후 운영상태를 모사하기 위한 초기단계, 지상 구조물을 시공하기 위한 터파기 단계, 지상구조물 시공완료 단계로 수행하였다. 추가적으로 수로터널의 유지보수

Table 5. Analysis stage

Stage	Items	Diagram
Initial	- Ground modeling - Tunnel excavation and lining - Lining sectional forces	
Open cut	- Lining stress increase - Lining sectional forces - Hydro jacking	
Construction of structures	- Lining stress increase - Lining sectional forces	
Maintenance	- Lining stress increase - Lining sectional forces - Differential settlement	

를 위해 터널 단수 시 내수압이 제거되는 단계를 검토하였다. 각 해석 단계별 해석 조건 및 검토항목은 Table 5와 같다.

4.2 수로터널 안정성 검토

4.2.1 응력 증가량 검토결과

수로터널 직상부에 근접하여 구조물 계획 시 수로터널의 응력증가량을 검토한 결과, 거의 모든 검토단면에서 인장 및 압축응력 증가량이 허용치 이내로 확인이 되었다. 이는 기존 수로터널의 직상부 1.0D 이상 이격된 곳에서의 근접시공은 수로터널에 미치는 영향이 미비한 것으로 볼 수 있다. 그러나, 지층조건 및 지상구조물 위치를 가장 불안정하게 설정한 가상의 Critical Section 중에서 구조물 시공완료 단계 및 터널 유지보수 단계에서 7.21MPa로 허용치(5.0MPa)를 초과하였다.

가상의 추가 검토 단면 중 수로터널 직상부에서 16m를 이격한 단면에서는 허용치 이내로 안정한 것으로 확인되었으므로 본 결과는 근접시공범위 검토 시 반영하였다. 각 단면에 대한 응력증가량 검토결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Result of lining stress (MPa) increase

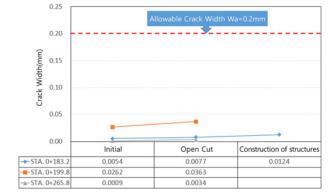
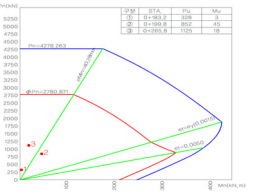
Index		Initial	Open cut	Construction	Maintenance
A-A'	Stress	0.36	0.28	-0.12	-0.61
	Variance		-	-0.12(Comp.)	-0.61(Comp.)
	Stability		-	0.12 < 5.0 O.K	0.61 < 5.0 O.K
B-B'	Stress	0.01	-0.02	-1.53	-2.73
	Variance		-	-1.53(Comp.)	-2.73(Comp.)
	Stability		-	1.53 < 5.0 O.K	2.73 < 5.0 O.K
C-C'	Stress	0.45	0.67	-1.81	-2.34
	Variance		0.22(Tens.)	-1.81(Comp.)	-2.34(Comp.)
	Stability		0.22 < 1.0 O.K	1.81 < 5.0 O.K	2.34 < 5.0 O.K
Critical Section	Stress	0.193	0.361	-7.199	-7.786
	Variance		0.17(Tens.)	-7.20(Comp.)	-7.79(Comp.)
	Stability		0.17 < 1.0 O.K	*7.20 > 5.0 N.G*	*7.21 > 5.0 N.G*
Critical Section 16m	Stress	0.34	0.18	-0.45	-1.87
	Variance		-	-0.45(Comp.)	-1.87(Comp.)
	Stability		-	0.45 < 5.0 O.K	1.87 < 5.0 O.K

4.2.2 콘크리트라이닝 안정성 검토결과

인장 균열폭 검토 결과 허용 균열폭인 0.2mm(콘크리트라이닝 전단면 인장균열) 이내로 균열폭 제어에 의한 수밀성 확보가 되는 것으로 검토되어 수로터널 상부 건축물 건설로 인한 영향은 미미한 것으로 검토되었다.

내수압 미적용 시 상부 공동주택 시공에 따른 수로터널 콘크리트라이닝의 단면력 및 휨균열 검토 결과 TYPE C(콘크리트라이닝 두께 : 400mm, 주철근 D29@250) 단면은 안정성에 문제가 없는 것으로 나타났다.

Table 7. Result of lining Stability

Crack review	Strength design method
	

4.2.3 Hydro-jacking 안정성 검토결과

Hydro-jacking 안정성에 대한 해석결과 지표면과 평행한 방향의 안전율은 측압계수에 따라서 5.5~12.9의 분포로 나타났으며 지표면과 직각방향의 안전율은 7.9~80.3의 분포로 나타났다. 이는 기준안전율인 F.S=1.3을 상회하고 있어 본 연구의 근접시공에서는 hydro-jacking에 대한 안정성은 충분히 확보되는 것으로 판단된다.

Table 8. Result of hydro-jacking

Index			K0=0.5	K0=1.0	K0=2.0
Parallel to the surface	A-A'	σ'_3(kN/m^2)	1,314.3	1,104.5	673.2
		σ'_θ(kN/m^2)	121.0	121.0	121.0
		F.S	10.9 > 1.3 O.K	9.1 > 1.3 O.K	5.6 > 1.3 O.K
	B-B'	σ'_3(kN/m^2)	1,321.9	1,123.4	724.4
		σ'_θ(kN/m^2)	130.7	130.7	130.7
		F.S	10.1 > 1.3 O.K	8.6 > 1.3 O.K	5.5 > 1.3 O.K
	C-C'	σ'_3(kN/m^2)	1,377.1	1,184.7	798.4
		σ'_θ(kN/m^2)	106.8	106.8	106.8
		FS	12.9 > 1.3 O.K	11.1 > 1.3 O.K	7.5 > 1.3 O.K
Perpen-dicular to the surface	A-A'	σ'_3(kN/m^2)	378.0	1,069.4	2,593.0
		σ'_θ(kN/m^2)	42.9	42.9	42.9
		F.S	8.8 > 1.3 O.K	24.9 > 1.3 O.K	60.4 > 1.3 O.K
	B-B'	σ'_3(kN/m^2)	1,321.9	1,123.4	724.4
		σ'_θ(kN/m^2)	130.7	130.7	130.7
		F.S	10.1 > 1.3 O.K	8.6 > 1.3 O.K	5.5 > 1.3 O.K
	C-C'	σ'_3(kN/m^2)	384.8	1,270.8	3,092.1
		σ'_θ(kN/m^2)	38.5	38.5	38.5
		F.S	10.0 > 1.3 O.K	33.0 > 1.3 O.K	80.3 > 1.3 O.K

5. 근접시공에 의한 수로터널 진동영향

5.1 진동 하중

5.1.1 항타하중

말뚝의 항타 하중 산정 시 말뚝의 항타력 및 진동주기를 고려하여 산정하였으며, 항타력은 기존 제품의 재원표를 참고하였다. 말뚝항타에 의한 진동영향 검토 시 항타 진동에서 일정 간격 떨어진 곳에서의 응답을 관찰하는 것이 목적이므로,

항타력에 대한 하중을 고려하여 시간이력 항타하중으로 적용하였다. 항타력을 고려한 최대 하중은 743kN를 적용하였다.

5.1.2 발파하중

일반적인 발파공에 대한 탄성해석에서 발파압력은 공벽에 수직한 방향으로 가해지도록 하고 이때 작용하중을 미국 National Highway Institute(Konya & Walter, 1991)에서 제시한 공식을 적용하여 산정하였다. Eq. (1)은 하중 1kg당 폭발하중을 기준으로 한 것이다.

$$P_{\det} = \frac{4.18\times10^{-7}\times SGe\times Ve^2}{1+0.8SGe}, \quad P_B = P_D\times(\frac{d_c}{d_h})^3 \quad (1)$$

여기서, P_{det} : 폭발압력(detonation pressure, kbar)
P_B : 공벽면에 가해지는 압력(decoupled detonation pressure, kbar)
V_e : 폭속(detonation velocity, ft/sec)
d_c : 화약의 직경(charge diameter, mm)
d_h : 장약공의 직경(borehole diameter, mm)

Eq. (1)은 발파시 발생하는 공기의 동압력 크기를 정의하는 식이며, 실제 공벽에 작용하는 동압력은 시간에 따라 변하는 형태를 취한다. 따라서 Starfield(1968)가 제시한 시간이력에 대한 동압력을 적용하였다.

$$P_D(t) = 4P_B(\exp(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}) - \exp(-\sqrt{2}\,Bt) \quad (2)$$

여기서, 하중상수 B=16338인 하중상수이며 1kg 장약량당 동압력이다. 본 검토에서는 노천발파에 의해 발파 진동에서 일정 간격 떨어진 곳에서의 응답을 관찰하는 것이 목적이므로, 발파공 1공에 대한 하중을 고려하여 발파하중으로 적용하였다. 지발당 장약량은 0.250kg으로 산정하여 최대 폭굉압은 72.64MPa로 산정되었다.

5.2 진동영향 검토 결과

진동에 의한 검토는 상부 터파기에 따른 발파진동과 말뚝항타진동에 대한 검토 두 가지에 대해 수행하였다. 발파해석 시 정밀진동제어발파 및 단공발파의 조건으로 검토하였으며, 천공경을 고려하여 발파하중을 적용하였다. 현재의 지반조사 결과 및 건축계획에서는 발파작업이 필요 없으나 지반조사의 불확실성을 감안하여 지표면까지 연암이 존재하는 것으로 가정하였다. 항타해석 시 적용한 말뚝은 508mm, 12t로 가정하였으며, 말뚝두부에 항타하중을 재하하여 해석하였다.

항타진동 해석결과 모든 단면에서 수직, 수평방향 진동속도 모두 수로터널 진동허용치 이내로 산정되었다. 발파진동 해석결과 단면 A-A'(STA.0+183.2)에서는 수직, 수평방향 진동속도 모두 수로터널 진동허용치 이내로 산정었다. 나머지 두 단면에서는 수직방향 진동속도에서 모두 허용 진동치를 초과하는 것으로 산정되어 본 결과를 근접시공범위 수립 시 반영하였다.

6. 수로터널의 근접시공범위 검토

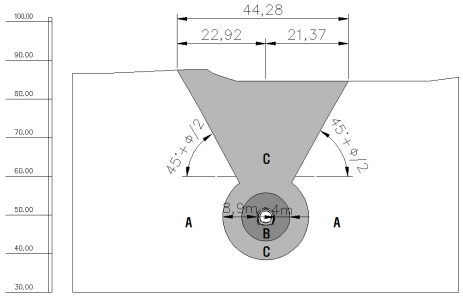
6.1 안전기준에 따른 이격거리 검토

수로터널 인근 근접시공 시 터널의 안정성을 확보하기 위한 이격거리를 제안하기 위하여 5개 단면의 안정성 검토 결과를 바탕으로 이격거리를 산정하였다.

6.1.1 제1기 서울지하철(1983) 건설 시 설정한 안전영역

제1기 서울지하철 건설 시 설정한 안전영역으로 산정하는 경우 Table 9와 같이 터널 상부의 지표면(터널 중심으로부터 약 45m 범위)과 터널의 최외곽선으로부터 8.9m 이격되는 지점까지는 지반조건, 근접구조물의 종류, 하중상태 등을 고려하여 공법이 선정될 필요가 있는 "C" 구간에 해당된다. 이 구간에서의 시공이 이루어지는 경우, 구조물의 하중상태, 지반조건을 고려한 안정성 검토 수행 후 공법 선정이 될 필요가 있다.

Table 9. Result of Seoul Metro (1983)

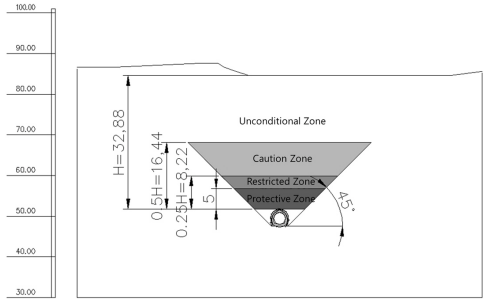
Index	Diagram
Section C-C'	

6.1.2 서울특별시도시철도공사(2001) 기존터널 근접시공 관리 매뉴얼

서울특별시도시철도공사 기존터널 근접시공 관리 매뉴얼에 따라 산정하는 경우 Table 10과 같이 터널 천단으로부터

약 16m 까지는 요주의 범위에 해당된다. 이 범위를 침범하여 굴착이 이루어지는 경우 수로터널의 변위와 변형 등에 영향이 미칠 것으로 판단된다. 그러나 현재의 건축계획 하에서는 시공이 가능할 것으로 판단된다.

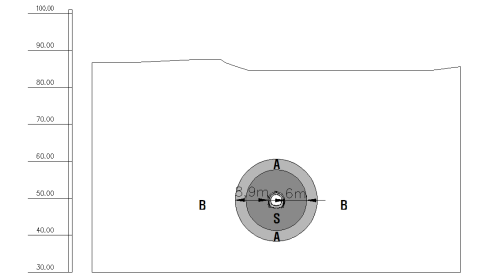
Table 10. Result of Seoul Metro (2011)

Index	Diagram
Section C-C'	

6.1.3 서울메트로(2007) 지하철 인접굴착공사 업무 매뉴얼

서울메트로 지하철 인접굴착공사 업무 매뉴얼에 따라 산정하는 경우 Table 11과 같이 터널 최외곽부로부터 약 8.9m까지의 이격거리까지는 A구간에 해당된다. 이 범위를 침범하여 굴착이 이루어지는 경우 수로터널의 변위와 변형 등에 영향이 미칠 것으로 판단된다. 매뉴얼에서는 본 구간을 침범하여 시공하는 경우 터널에 유해한 진동발생을 금지하고 토공굴착 시 단계별 분할 시공을 수행하는 등의 제한사항을 두어 시설물의 안전을 확보하도록 하고 있다. 그러나 현재의 건축계획은 A구간과 약 19m 정도 이격거리가 확보되어 있는 상태이므로 시공이 가능할 것으로 판단된다.

Table 11. Result of Seoul Metro (2007)

Index	Diagram
Section C-C'	

6.2 수로터널 근접시공를 위한 안전거리 제안

6.2.1 터널 안정성 확보가 가능한 안전영역

앞서 근접시공으로 인한 압력 수로터널의 안정성을 검토한 결과를 바탕으로 안전기준에 대한 이격거리를 검토하였다. 주택건설계획에 대한 안정성 평가 결과, 아래의 안전영역도의 주의시공구간에 구조물이 시공되는 경우에도 수로터널의 안정성이 확보될 것으로 판단된다. 본 연구에서 조사 및 가정한 사항(건물의 배치, 층고 및 굴착심도 등)에 대한 변경이 발생할 경우 변경된 조건에서 재검토가 필요하다. 근접시공에 따른 압력 수로터널의 안전영역도는 Fig. 4와 같다.

여기서, A구간은 시공불가 구간으로 터널굴착면에서 6m 이내의 영역으로 구간 내 일체의 시공행위가 불가능하다. B구간은 주의시공 구간으로 지표면 방향으로는 수로터널의 중심을 기준으로 좌우측 25m 구간이며, 지하부 방향으로 터널의 S.L에서 상부로 60°line의 내부 구간이며, 터널 근접부로는 굴착면에서 6~9m 구간이다. B구간은 안정성 검토 및 대책을 수립한 후 시공이 가능한 범위이다. C구간은 일반 시공구간으로 A, B영역 이외의 구간으로 발파진동 기준 만족 시 시공이 가능한 범위이다.

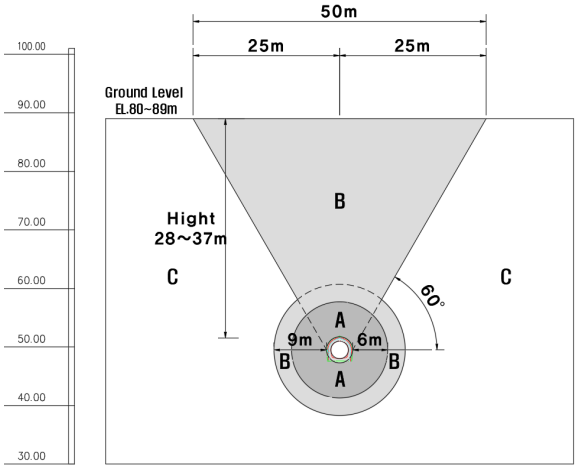


Fig. 4. Safety zone of near construction

6.2.2 근접시공 진동영향을 고려한 안전영역

발파진동 허용 이격거리에 대한 검토 결과, 국토교통부 발파진동 추정식 이용 시 29.1m, 발파진동해석 수행결과 26.2m로 산출되었다. 검토 결과 중 가장 큰 값을 반영하여 발파진동 허용 이격거리를 30m로 제안하였다. 이 범위 내에서 발파작업이 필요한 경우 발파작업 제한 및 무진동암파쇄 공법 등의 진동저감공법 적용을 검토해야하는 것으로 제안하였다. 말뚝항타 허용 이격거리에 대한 항타진동해석 수행결과, 최소 이격거리는 17.5m로 산정되었으며 최종적으로 18m를 항타진동 허용 이격거리로 제안한다. 본 검토는 Vibro hammer를 제외한 매입말뚝 시공 시 최종 타입에 대한 항타 진동검토 결과를 반영한 것으로 이외 공법 적용 시 추가적인 연구가 필요하다. 제안한 근접시공 진동에 따른 압력 수로터널의 안전영역도는 Fig. 5와 같다.

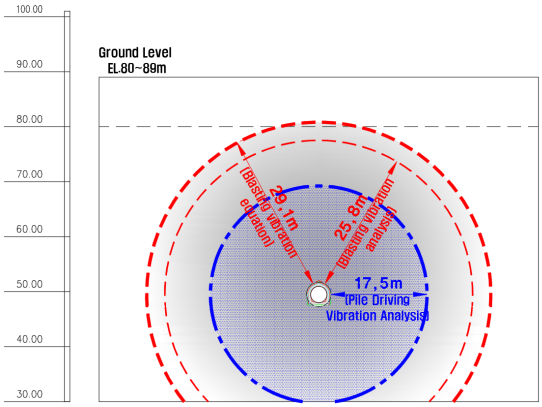


Fig. 5. Safety zone of near construction vibration

6.2.3 압력 수로터널을 고려한 근접시공범위 제안

이상의 검토결과를 종합하여 압력 수로터널에 근접하여 구조물 계획 시 다음과 같이 구조물의 위치와 터파기 시공 시 발파계획을 수립하기 위한 근접시공 안전범위를 제안하였다. 수로터널 상부 근접시공 가능 이격거리는 기존 근접시공 기준 및 관계기관의 검토기준 등을 근거로 Fig. 6과 같이 설정하였다. A영역은 수로터널 주변 6m 이내로 절대 시공불가 영역이고, B영역인 6~9m영역과 터널 상부 60° 이내 영역은 근접시공 계획에 따른 안정성 검토 및 대책을 수립하여 안정성 확보가 가능할 경우 시공할 수 있는 영역이며, C영역은 발파진동의 영향만 없으면 별도의 대책 없이 시공이 가능한 영역이다.

터파기 시공 시 파일 항타는 수로터널 굴착면에서 18m 이격거리 내에서는 작업이 이루어지지 않도록 하고 18m 내에서 파일시공이 이루어지는 경우 매입말뚝의 시공만 가능하도록 제한하는 범위로 안전시공범위를 제안하였다.

발파작업 시 수로터널 굴착면에서 30m 이격거리 내에서는 무진동 암파쇄 공법을 적용한다. 30~58m 영역에서는 정밀진동제어발파를 적용하며 58m 이상의 이격거리에서는 소규모 발파를 적용하여야 한다.

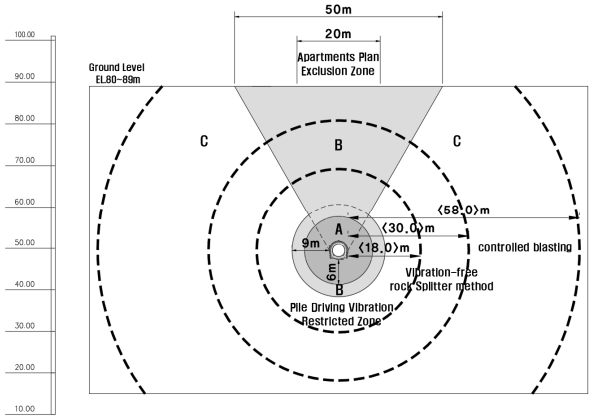


Fig. 6. Safety zone of water tunnel

7. 결 론

압력 수로터널은 지반 거동 특성 및 운영 특성에 있어 일반적인 도로 및 철도 터널과 매우 다른 차이를 보이고 있다. 수로터널의 거동 특성을 고려한 근접시공에 대한 안전영역에 검토가 요구되었다. 따라서 본 연구에서는 압력수로터널의 거동특성을 반영한 터널 안정성, 수로터널 콘크리트라이닝 구조적 안정성, Hydro-jacking을 검토하여 기존 안전영역과 비교한 결과 기존 안전영역 기준보다 다소 보수적으로 산정되었다. 또한, 근접시공 시 발생되는 진동에 대하여 영향검토를 수행하여 근접시공 안전영역에 투영하여 근접시공 가능 범위와 동시에 공법에 대한 적용성도 같이 확인할 수 있는 안전영역을 제시하였다.

References

1. Korea Water Resources Corporation (1981), OOdam construction site.
2. Korea Water Resources Corporation (K-Water) (2007), Technical method for Ensuring Safety of the Existing Water Supply Tunnel against Neighboring New Construction.
3. Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation (Seoul Metro) (1983), Tunnel Safety Zone.
4. Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation (Seoul Metro) (2001), Practical manual for adjacent to Urban Metro, pp. 1~222.
5. Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation (Seoul Metro) (2007), Manual for Near-Subway Excavation Construction.
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017), Detailed Guidelines for Safety Inspection and Precision Safety Diagnosis.
7. Korean Standards Association (2003), KS F 2730, Testing method for rebound number to conclude compressive strength of concrete.
8. Attewell, P. B. (1977), Ground movements caused by tunnelling in soil, Proc. of International Conference on Large Movements and Structures, London, pp. 812~948.
9. Attewell, P. B., Yeates, J. and Selby, A. R. (1986), Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures, Blackie, Glasgow.
10. Cording, E. J. and Hansmire, W. H. (1975), Displacements around soft ground tunnels, In Proceedings of the 5th PanAmerican Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Session IV, pp. 571~632.
11. Konya, C. J. and Walter, E. J. (1991), Rock blasting and overbreak control, National Highway Institute, p. 5.
12. Starfield, A. M. and Pugliese, J. M. (1968), Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A comparison between a computer model and field measurements, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 5, pp. 65~77.