

## 터널에서의 방수 Water Proofing in Tunnel

정형식<sup>1)</sup>, Hyung-Sik Chung

<sup>1)</sup> 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

### 1. 방수의 필요성

지하에 건설되는 터널은 특수한 경우를 제외하고는 지하수위 아래에 있기 때문에 굴착된 공간으로 침투수가 유입된다. 라이닝이 설치되지 않은 유류비축 지하공동(Unlined underground oil storage cavern)과 같이 침투수가 적당히 유입되어야 하는 경우도 있지만 대부분의 터널이나 인공적인 지하공간에서는 이들 내부로의 누수는 적지 않은 문제를 발생한다. 따라서 대부분의 터널에서는 내부로의 누수를 방지하기 위하여 그 용도와 중요성에 따라 적절한 정도의 방수조치를 취하게 된다.

사람이 장기적으로 사용하게되는 주거시설과 지하역사, 도서관, 체육시설 등과 같은 대중이용시설에서 누수에 의한 습기는 자칫 만성질환을 유발할 수도 있으므로 완벽한 방수가 이루어져야 하지만 사람들이 단시간만 이용하는 도로나 철도터널에서는 누수가 사람에 미치는 영향보다는 구조물과 시설물의 내구성과 안전운용에 미치는 영향이 주가 되므로 방수에 대한 요구가 주거시설 보다는 완화 될 수 있을 것이다. 또한 전력구나 통신구 같은 편의시설을 위한 터널에서는 누수가 주로 구조물의 내구성에 영향을 미치므로 교통터널 보다는 방수에 대한 요구정도가 낮을 수 있다. 한편 상수터널이나 하수터널에는 개통 후에 사람이 터널 내에서 작업하지는 않지만 상수터널이 누수 되면 수돗물이 오염될 수 있으며 하수터널이 누수 되면 지반을 오염시킬 수 있다. 따라서 이들도 정도는 낮더라도 방수조치는 되어 있어야 할 것이다.

표 1. 방수정도에 대한 고려사항

방수에 대한 요구정도	지하공간 용도	예상피해
최고	장기간 이용시설	만성질환
	습기에 영향받는 물품창고	물품의 손상 또는 부패
	터널중 결빙구간	노면결빙 및 고드름에 의한 교통안전저하
	터널중 비결빙구간	구조물의 손상 및 안전성 저하
	전력구, 통신구 등 편의시설 터널	구조물의 손상 및 안전성 저하; 시설물의 부식
최하	급수터널, 하수터널	구조물의 손상 및 안전성 저하; 주변환경 오염

## 2. 방수형식

### 2.1 방수형식의 종류

우리가 이용하는 대부분의 터널은 정도의 차이는 있으나 방수된 상태의 Dry tunnel를 요구하게 된다. 이와 비교되는 용어로 Wet tunnel이 있으나 옛날에 터널에 콘크리트 라이닝을 설치하지 않고 물방울이 가끔 떨어지는 상태에서 도로터널로 이용하던 것이 이에 해당하겠으나 최근에는 광산터널, 공사용 터널 등과 같은 임시터널을 제외하고는 토목시설물로서 이러한 터널은 건설하지 않는다.

방수란 굴착으로 형성된 지하공간으로 침투하는 유입수를 차단하는 것인데 터널상부와 측벽에서 유입되는 누수가 주로 문제되므로 NATM 터널에서 측벽과 상부에 방수막을 설치하여 침투수를 차단하는 상부방수(Umbrella type)를 우선 생각할 수 있다. 이 형식에서는 터널바닥 부분에는 방수를 하지 않으므로 침투수는 터널의 바닥부분을 통하여 내부로 유입되는 배수터널(Drained tunnel)이 되고 콘크리트 라이닝에 수압도 작용하지 않도록 한다. 최근에 국내에서는 NATM 터널의 콘크리트 라이닝 외부 전 주위에 방수막을 설치하여 침투수를 터널내부로 배수하지 않고 외부의 배수관을 통하여 배수시켜 상부방수와 마찬가지로 수압이 작용하지 않도록 하는 전주방수가 간혹 적용되고 있다. 따라서 전주방수 터널에서는 침투수가 터널 내부로는 유입되지 않지만 콘크리트 라이닝에 수압도 작용하지 않도록 하는 것이다. 이상의 두 방수형식에서는 배수를 반드시 하여야 하는데 여러 가지 이유로 배수할 수 없을 경우는 전주방수의 구조를 채택하면서 이것이 수압을 견딜 수 있도록 하는 비배수터널(Undrained tunnel)을 선택하게 된다. 이 때는 터널단면형상을 외부수압에 효과적으로 견딜 수 있는 원형에 가까운 형상으로 한다.

Shield 터널에서는 Shield를 전진시키면서 기성의 콘크리트 세그먼트를 조립하여 원통형의 콘크리트 라이닝을 설치하기 때문에 배수터널과 비배수터널은 형상이 같지만 비배수시는 세그먼트 사이에 지수재를 설치하고 라이닝이 수압에 견디도록 하지만 배수터널인 경우는 라이닝 외부로 배수가 불가능하기 때문에 세그먼트 사이로 누수될 수 있도록 한다. 그러므로 Shield에서 배수터널로 할 경우는 NATM 터널에서와 같이 상부방수나 전주방수는 할 수 없고 터널의 전주면에서 세그먼트 사이로 유입수가 들어오게 되므로 누수 되는 물은 내부에서 보이지 않도록 유도처리 하여야 한다.

터널을 계획하는 우선 배수터널로 할 것인가? 또는 비배수터널로 할 것인가?를 결정하고 NATM 터널에서 배수터널로 할 경우는 침투수를 터널내부로 배수하는 상부방수와 터널외부로 배수하는 전주방수 중에서 방수형식을 선택한다. 그림 1은 이들 세 가지 형식의 NATM 터널단면의 예를 보여 주고 있다.

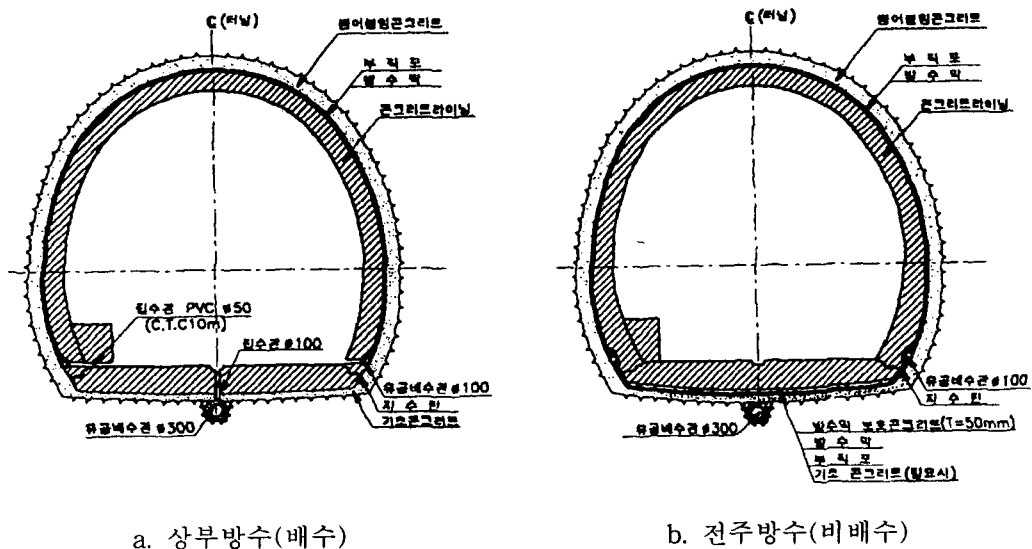
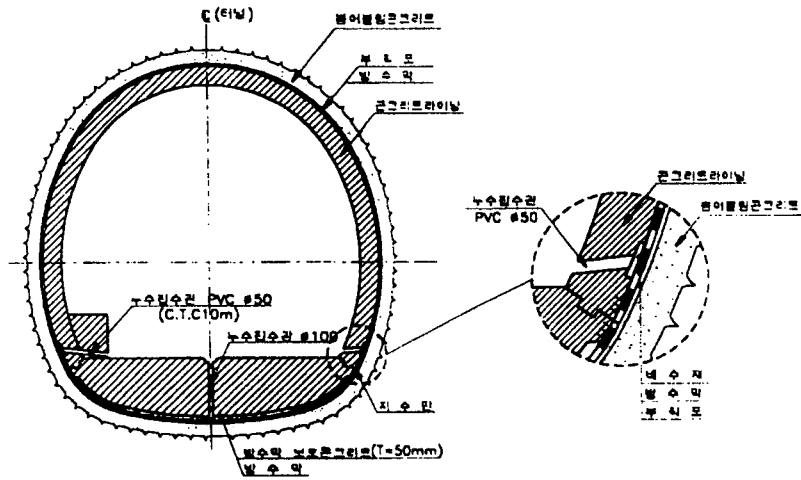


그림 1. NATM 터널의 방수형식



c. 비배수형 단면개념도

그림 1. NATM 터널의 방수형식 (계속)

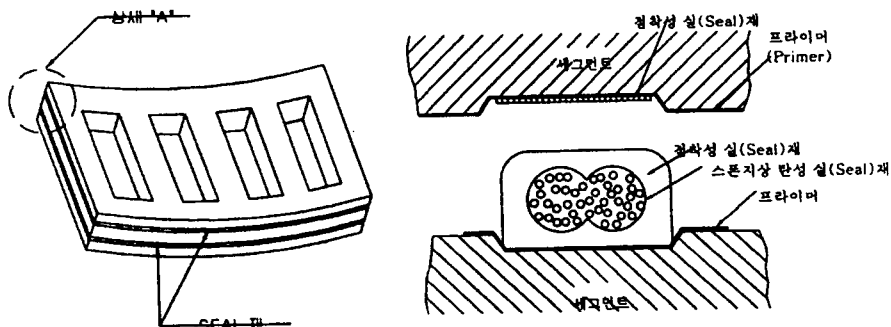
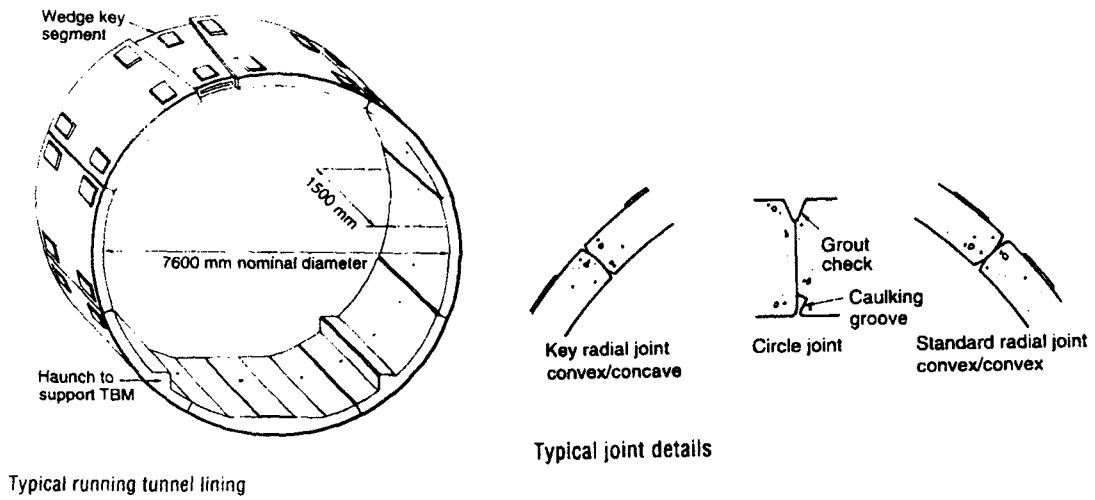


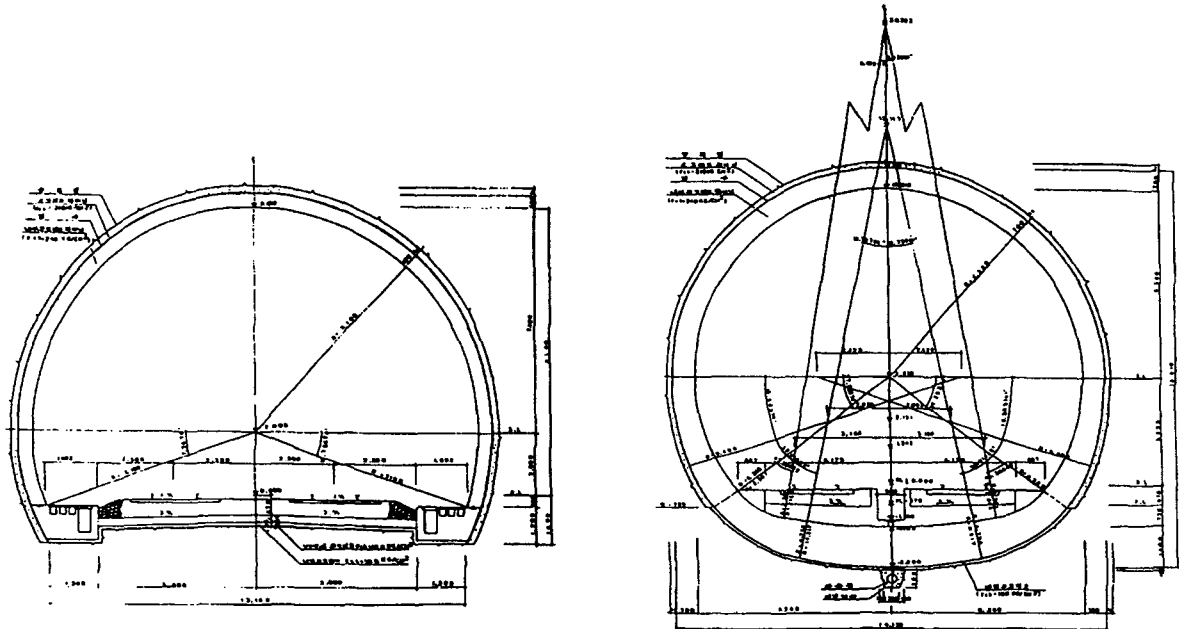
그림 2. 세그먼트 라이닝 방수

## 2.2 방수형식 선정시 검토사항

터널의 방수형식을 선정시는 다음의 여러 가지 사항들을 면밀히 분석한 후 종합적인 판단이 요구된다.

### 2.2.1 터널의 공사비

배수터널의 콘크리트 라이닝은 설계자에 따라 다소의 수압을 지지하도록 하고 있으나 일반적으로 배수기능이 완전하여 수압은 작용하지 않는 것으로 가정하기 때문에 철근을 배근하지 않는 무근콘크리트로 시공하며 두께도 얇아진다. 전주방수형식은 터널바닥부에도 방수막과 콘크리트 라이닝을 설치하므로 상부방수형식 보다 공사비가 큰 것은 그림 1에서도 쉽게 알 수 있다. 반면에 비배수터널은 지하수위 높이에 해당하는 전체수압을 받으므로 콘크리트 라이닝은 두꺼워 지고 철근을 배근하게 된다. 단면형상도 원형에 가깝거나 마제형일 경우도 바닥부를 역아취형태로 하기 때문에 자연히 굴착량도 커지게 되어 공사비도 배수터널에 비하여 훨씬 커지게 된다. 그림 3은 경부고속철도 복선터널의 대표적인 비배수터널과 배수터널(상부방수) 단면을 보여 주고 있다.



a. 배수형 산악터널 표준단면

b. 비배수형 산악터널 표준단면

그림 3. 배수터널과 비배수터널단면 비교

### 2.2.2 터널의 유지관리

#### 1) 유입수량과 펌프비용

배수터널에서는 유입수를 터널내부(상부방수) 또는 외부(전주방수)에서 지속적으로 배수시켜 콘크리트 라이닝에 수압이 작용하지 않도록 하기 때문에 유입수량이 클 경우는 펌프가동 비용이 만만치 않다. 표 2와 표3은 서울지하철 3호선과 4호선의 집수정에서 펌프로 배수한 유입수량을 보여주고 있는데 예를 들어 3호선의 경복구역에서의 배수량은 하루 약 3250톤이 되고 1년간의 펌프가동 전기료는 수억원에 이른다고 한다. 유입수량은 지형 및 지반상태와 밀접한 관계가 있는데 서울지하철 3호선과 4호선 중에서 유입수량이 많은 집수정을 보면 연신내역, 경복구역, 안국역, 동대문역, 길음역 등인데 이들 역사 부근에

서 지하철 터널은 하천 밑을 통과하거나 층적토층과 풍화토층을 지나게 된다.

비배수터널의 경우는 인위적인 배수를 하지 않으므로 라이닝을 통하여 누수 되는 매우 적은 수량만 펌프로 배수하게 되므로 펌프비용은 별로 문제되지 않는다. 물론 배수터널에서도 주변지반의 투수계수가 매우 적거나 콘크리트 라이닝 시공이전에 주변지반에 차수구라우팅을 실시하여 유입수를 감소시키면 펌프비용을 절감시킬 수 있으므로 터널이용시의 펌프비용을 검토시는 터널주변의 지형 및 지반상태와 차수비용도 함께 연계시켜 보아야 한다.

표 2. 서울자하철 3호선 집수정 별 유입량 실측치

역사	집수정 유입거리	유 입 량 (m <sup>3</sup> /min)						비 고
		92.3월	91.3월	91.6월	91.9월	91.12월	평균	
구과발		0.39	0.38	0.44	0.83	0.39	0.486	
구과발(본선)		0.24	0.19	0.19	0.52	0.24	0.276	
연신내	2014	1.4	1.73	1.66	1.70	1.40	1.578	
불광	1246	0.13	0.15	0.15	0.16	0.13	0.144	
녹번	765	0.15	0.19	0.19	0.16	0.15	0.168	
홍제		0.01	0.14	0.14	0.13	0.01	0.086	
홍제(터널)		1.6	1.60	1.90	2.90	2.10	2.02	
무악재		0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.016	
독립문	1292	1.0	0.37	0.69	1.05	1.09	0.84	
경복궁	1963	2.25	2.25	2.26	2.27	2.26	2.258	
안국	698	1.72	1.75	1.76	1.75	1.74	1.744	
종로 3	1441	2.39	2.43	2.44	2.45	2.44	2.43	
을지 3	650	0.82	0.82	0.83	0.84	0.84	0.83	
충무로	935	0.33	0.38	0.38	0.37	0.37	0.366	
동대	811	1.39	1.45	1.46	1.47	1.46	1.446	
약수	840	0.31	0.34	0.34	0.35	0.34	0.366	
금호	952	0.24	0.26	0.26	0.27	0.27	0.26	
압구정		0.1	0.08	0.09	0.1	0.1	0.094	
압구정(본선)		0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.034	
신사	583	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.056	
잠원	1438	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.056	
고속터미널	1568	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
교대	1466	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.72	
남부터미널	783	0.07	0.05	0.05	0.06	0.08	0.062	
양재	1180	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.24	
양재		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	

표 3. 서울자하철 4호선 집수정 별 유입량 실측치

역사	집수정 유입거리	유 입 량 (m <sup>3</sup> /min)						비 고
		92.3월	91.3월	91.6월	91.9월	91.12월	평균	
쌍문		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
쌍문(본선)		0.1	0.103	0.105	0.1	0.1	0.1016	
수유		0.08	0.085	0.08	0.08	0.08	0.081	

표 3. 서울자하철 4호선 집수정 별 유입량 실측치 (계속)

역사	집수정 유입거리	유 입 량 (m <sup>3</sup> /min)						비 고
		92.3월	91.3월	91.6월	91.9월	91.12월	평균	
수유(본선)		0.065	0.06	0.065	0.065	0.065	0.064	
미아	546	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	
미아3	2146	0.7	0.65	0.7	0.7	0.7	0.69	
길음	826	2.1	0.84	0.85	1.9	1.9	1.518	
성신여대	1316	0.34	0.31	0.31	0.34	0.34	0.328	
한성대	596	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13	0.132	
혜화	900	0.68	0.67	0.67	0.68	0.68	0.676	
동대문	1515	1.82	1.83	1.82	1.82	1.82	1.822	
동대문운동장	1187	0.21	0.95	0.94	0.95	0.21	0.652	
충무로		0.23	0.24	0.24	0.25	0.24	0.24	
충무로(본선)		0.27	0.28	0.28	0.29	0.28	0.28	
명동	791	0.49	0.21	0.21	0.21	0.21	0.266	
회현	249	0.21	0.48	0.46	0.49	0.49	0.426	
서울역	832	0.53	0.6	0.56	0.53	0.53	0.55	
숙대입구	983	0.15	0.05	0.05	0.15	0.15	0.11	
삼각지	1461	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.86	
신용산	888	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
이촌		0.07	0.05	0.05	0.07	0.07	0.062	
충신대		0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.52	
사당		1.4	1.8	1.4	1.4	1.3	1.46	

2) 배수계통의 유지

NATM의 배수터널에서 침투수는 콘크리트 라이닝 외부를 둘러싸고 있는 배수재(Fleece)를 통하여 양측 벽면하부에 있는 종방향 배수관에 모여지고 다시 중앙이나 양측면에 있는 주배수관으로 배수된다. 배수터널에서 콘크리트 라이닝에는 수압이 작용하지 않아야 하므로 이러한 일련의 배수경로는 확실하게 유지시켜야 한다. 여기서 주배수관은 직경이 300mm 이상의 대구경이므로 문제되지 않으나 양측면의 종방향 배수관은 직경이 100mm 정도의 PVC관을 사용하므로 석회암지대 같이 침전물이 많은 지역에서는 배수관을 막을 수 있으므로 정기적인 청소가 필요하다. 이 때 다차로 도로터널이라면 차로를 부분 통제하여 시행할 수 있으나 철도터널의 경우는 열차운행을 중단하여야 하므로 매우 곤란하다. 최근에 독일에서는 이러한 문제로 고속철도의 터널을 비배수터널로 변경하고 있다.

배수계통에서 또한 중요한 것이 배수재인데 주변지반에 점토함유량이 많으면 장기간에 걸쳐 점토입자가 배수재의 공극을 막게 되어 배수기능이 저하될 수 있다. 실제로 런던의 지하철인 경우 배수터널로 배수계통의 시설이 있으나 터널이 점토층 내에 있으므로 장기간에 걸쳐 배수재가 막힐 것을 감안하여 콘크리트 라이닝은 비배수조건으로 설계 및 시공하고 있다. 배수재가 막히면 이는 수리가 거의 불가능하므로 방수형식 결정시 이러한 가능성도 고려하여야 한다.

2.2.3 지하수위

터널굴착으로 인하여 자연상태의 지하수위가 변동될 수 있으므로 우선 장기적으로 터널을 운용시 터널상부에 존재할 수 있는 최대수두를 예측하여야 한다. 터널상부의 수두가 크면 콘크리트 라이닝에 작용하는 수압이 커지므로 과도한 수압을 지지하도록 하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 비효율적이다.

따라서 터널이 하천이나 해저를 지날 경우와 같이 터널상부의 수두가 클 경우 설계자는 비배수터널로 하여 콘크리트 라이닝이 큰 수압을 받도록 할 것이던지 아니면 주변지반에 차수구라우팅을 실시하여 침투수량을 감소시던지 또는 노선을 투수계수가 매우 적은 지층으로 선정하고 배수터널로 할 것인지를 선택하여야 한다.

일본의 세이칸터널과 영불해협터널의 영국측 부분은 다같이 배수터널로 하였지만 세이칸터널에서는 주변지반의 구라우팅으로 침투수량을 줄인 반면 영불해협터널에서는 노선을 투수계수가 매우 적은 Chalk marl층 내에 계획하여 침투수량을 적게 하였다.

## 2.2.4 환경보존

국내에서 본격적으로 NATM 공법으로 터널을 시공하기 시작한 것은 1980년 2월 착공한 서울지하철 3,4호선이다. 이때 터널에 대한 기술도입을 Austria와 일본에서 하였는데 하천을 통과하는 구간을 제외하고는 모든 터널을 상부방수(Umbrella type)의 배수터널로 시공하였다. 그리고 기존의 지하수위가 어떻게 변화할지는 전혀 관심을 두지 않았다. 물론 이 시기에는 서구 선진국에서도 지하수자원을 보호한다는 개념이 없었을 때이었다.

그러나 최근에는 서구 선진국들의 지하수자원보호에 대한 법규가 강화되어 도심지 내에서는 모든 굴착공사시 기존지하수위를 유지하여야 하며 지방에서는 터널굴착시 지방정부의 수자원 관련 부서의 허가를 받아야 한다. 그러므로 도심지의 터널은 대부분 이러한 문제가 비배수터널로 시공하는 주된 원인의 하나로 되고 있으며 지방에서도 터널굴착이 기존지하수위에 영향을 미치지 않거나 미치더라도 환경에 피해가 없는 것을 설득하여야 공사허가가 난다.

국내에서는 요즈음에 와서 일부 학자들과 환경론자들이 지하수보존에 대하여 여러 가지 토론을 하고 있으나 우리 건설계에서는 아직은 관심 밖에 있다. 건물신축이나 지하철 개착식 터널공사시 지하를 30m 이상을 굴토하면서도 흙막이 구조의 안전만을 염려하고 있다. 참고로 독일의 지하굴토 현장을 보면 지하수위를 유지하면서 굴토하기 때문에 수중굴착을 하게 된다. 그림 4는 독일 베를린의 한 지하철역사를 위한 굴토현장을 보이고 있으며 그림 5는 독일 고속철도의 터널시공순서이다.

지하수보존에 역행(?)하는 분야는 토목뿐만 아니라 건축분야에서도 마찬가지이다. 서울 시내의 대형 건물은 굴토깊이가 25m 이상인 것이 많은데 건축허가시 양압력에 대한 대처방안으로 기초바닥면에서 지하수를 영구적으로 펌핑하여 양압력을 제거하는 방안을 허가하고 있다. 서구 선진국에서도 최근에서야 이러한 지하수자원 법규가 강화 됐지만 우리 나라도 머지 않아 선진국과 같이 수자원보존이 요구되면 건축법규와 지하공사 관련법규도 변경될 것이므로 이 때는 도심지에서 비배수터널이 필수적일 것이다.

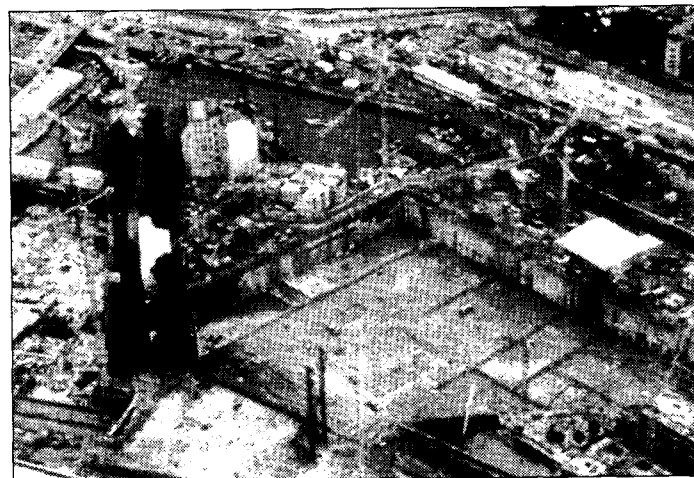


그림 4. 베를린 지하철역사 공사현장

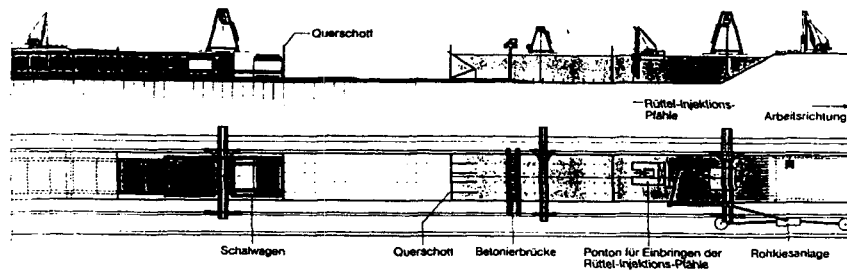


그림 5. 독일고속철도 개착식 터널 시공순서도

### 2.2.5 주변의 유해환경 유무

터널이 통과하는 주변에 쓰레기 매립장, 광산폐기물 적치장 등 지하수가 오염될 가능성이 많은 지대에서는 침투수가 터널 내부로 배수되면 구조물과 사람들에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 설계시 지하수의 오염 여부, 콘크리트에 유해한 금속함유 여부, 유독가스 함유 여부 등을 조사하여 침투수가 구조물과 사람에 유해하면 비배수터널 또는 전주방수의 배수터널로 하여야 할 것이다.

### 2.2.6 방수방법의 개발 및 시공의 정밀성

우선 NATM 터널의 방수방법을 살펴보겠다. 국내에서도 하천하부를 통과하는 터널이나 인접한 개착터널과의 일관성을 유지하기 위하여 비배수터널이 시공된 것이 있다. 그러나 이러한 터널의 콘크리트 라이닝이 상당한 수압을 받는데도 적용된 방수방법은 20년전 NATM이 처음 도입될 때 상부방수의 배수터널에 적용하던 방법을 그대로 사용하였기 때문에 부끄럽게도 대부분 실패하고 말았다. 비배수터널로 시공하여 놓고 터널시공시 바닥부에 임시로 사용하였던 배수구를 통하여 침투수를 외부로 배수하지 않으면 콘크리트 라이닝 사이로 누수 되어 터널을 사용하기가 곤란한 경우도 있었다. 이것이 바로 전주방수의 배수터널인 것이다. 이러한 배수형식이 외국에도 간혹 있으나 그것은 처음부터 전주방수로 계획한 것이고 국내현장의 경우는 비배수터널이 실패하여 전주방수터널이 된 것이다.

국내의 비배수터널도 이론적으로는 “완전방수”가 될 수 있을 것이다. 이러한 “완전방수” 터널에서 큰 수압 하에서도 누수를 방지하고 있는 것은 1겹의 방수막이며 이 방수막은 수천 m<sup>2</sup>의 면적에서 바늘구멍 하나도 없어야 된다. 내부의 콘크리트 라이닝의 시공이음에는 지수판이 없기 때문이다. 더구나 국내현장에서는 이것이 남아 있는 1겹의 방수막을 시공시 손상이 가지 않도록 하는 노력이 부족하다. 국내에서는 이러한 방수방법을 적용한 터널을 “완전방수 터널”이라고 불려왔다. 이것이 “완전방수”가 될 수 없음을 터널에 종사하는 기술자들은 알고 있으나 일반인 들은 “완전방수”가 불가능한 것을 이해하지 못하여 우리는 부실공사의 오명을 뒤집어쓰게 된다. 그 동안 국내에서는 터널의 방수를 위한 연구개발을 너무 소홀히 한 것이 사실이며 배수터널이냐? 비배수터널이냐?를 정하는데 우리의 방수능력이 중요한 고려사항이 됨은 매우 부끄러운 일이다.

Shield터널에서는 기성의 콘크리트 세그먼트를 조립하여 터널 라이닝을 형성하므로 NATM 터널에서 콘크리트 라이닝을 현장 타설 할 때 보다 방수에 대한 문제가 훨씬 적다. 세그먼트 사이에 지수재를 설치하여 조립하므로 조립과정에서 철저한 시공이 이루어진다면 만족한 방수상태를 이룰 수 있을 것이다.

### 2.3 방수 및 배수형식의 선정

앞에서 검토하여 본 여러 가지 사항들을 표 5에 요약하여 보았다. 각 나라의 사회여건과 건설조건이



다르지만 서구에서는 지하수자원보존이 주목적이 되어 비배수터널로 시공하는 것을 전제로 하고, 방수 방법과 방수의 요구수준에 대한 연구가 진행되어 왔는데, 반면에 국내에서는 방수터널은 “완전방수”를 전제하였지만 방수방법에 대한 연구개발이 되지 않고 재래의 방법을 사용하기 때문에 “완전방수”는 불가능한 것으로 단정하여 배수터널로 시공하고 있다. 표 4에서 보면 우리가 터널 계획시 꼭 고려할 사항을 등한시하는지 알 수 있다.

장래에는 국내에서도 지하수자원보존의 중요성이 대두되어 지하수위를 변동시킬 수 없을 것이고 배수 계통의 유지관리에 많은 비용이 소요되어 결국에는 국내에서도 도심지에서는 비배수터널이 되어야 할 것이다.

표 4. 방수 및 배수형식의 선정시 고려요소

요소		검토사항	중요도		
			국내	서구	
공사비		굴착면의 증대, 라이닝구조의 보강	보통	보통	
유 지 관 리	배수비용		중요	보통	
	배수 계통 유지	배수재(Fleece)	점토입자의 유입가능지반 배수재의 막힘	불고려	중요
		중방향 배수관	석회암지대 및 점토지반에서 배수관내 침전	불고려	중요
지하수위		수압이 클 경우는 침투수 감소 후 배수	중요	중요	
환경보존		기존지하수위 유지	불고려	중요	
주변의 유해환경		지하수분석, 오염도 측정 터널내 배수시 구조물 손상 여부 유해가스 유무 검사	보통	보통	
방수방법개발		방수재료 및 시공법 개발 방수요구정도 연구	불고려	중요	

### 3. 방수방법

#### 3.1 국내의 문제점

앞에서 언급하다시피 국내에서는 배수터널이나 비배수터널에 관계없이 방수방법에 대하여 연구가 거의 없었던 것이 사실이다. 만족한 방수를 하려면 배수터널에서는 무엇보다도 라이닝에 수압이 작용하지 않도록 침투수를 철저히 배수하여야 하는데 배수계통을 효율적으로 유지관리하기 위한 배려가 없었다. 최근에는 국내에서도 배수재를 보조하기 위하여 배수판(Drain panel)을 설치하는 현상이 늘어나고 있어 이러한 관점에서는 매우 고무적이다(그림 6). 그림 7에서는 독일 고속철도 터널에서 중방향 배수관의 청소를 쉽게 하기 위한 배치를 볼 수 있다.

방수터널에서는 어떠한 수압을 받더라도 방수기능을 발휘하여야 하는데 현재 적용하고 있는 것과 같이 라이닝 외부에 1겹의 PVC 방수막 만으로 만족한 방수상태를 기대하기는 어렵다. 한 지점에서 방수막이 손상이 되어 누수가 발생하면 중방향으로 얼마든지 방수막과 라이닝 사이를 침투할 수 있으며 결국 가장 약한 라이닝 벽면이나 이음부로부터 누출될 것이다. 국내의 방수방법에는 중요한 3가지 문제가 있다. 배수터널의 라이닝도 중국에는 얼마의 수압을 받는 것으로 가정하고 설계하는 것이 일반 관례이므로 이 문제는 배수터널이나 비배수터널에 관계없이 공통적인 사항이다.

(1) 터널시공시 방수막이 완전하게 유지되기를 기대하는 것은 환상에 가깝다. 따라서 우선 콘크리트 라이닝 시공시 방수막에 손상이 발생한다는 가정에서 이 부분으로 침투한 물을 어느 범위 내에 국한

시켜야 한다. 그러면 누수지점을 쉽게 발견할 수 있고 보수가 용이하게 된다. 그러기 위하여 방수막과 라이닝 사이의 공간을 적당한 간격으로 나누어 독립된 격실을 만들어 주어야 한다.

(2) 콘크리트 라이닝을 타설시 일반적으로 바닥부를 먼저 타설하고 벽체와 천장부는 약 10m 내외의 길이로 분할하여 타설한다. 따라서 완성된 라이닝에는 바닥부와 벽체 사이에 시공 이음부가 있고 상부에는 거푸집의 길이에 따라 시공 줄눈이 형성된다. 개착식 터널의 경우는 모든 시공 이음부에 고무지수판이 설치되는데 터널의 콘크리트 라이닝에는 이것이 없다. 그러므로 현재 시공되어 있는 터널에서는 배수터널 또는 비배수터널 가릴 것 없이 이 이음부에서 누수가 발생하고 있다.

(3) 콘크리트 내에는 기포가 있어 방수막을 침투한 물이 콘크리트 벽면에 스며 들 수 있다. 국내에서 현재 사용하고 있는 콘크리트는 압축강도가 240 kg/cm<sup>2</sup> 일반콘크리트인데 이를 수밀콘크리트로 바꾸어야 한다.

Teilprojekt 6, Anlage 3

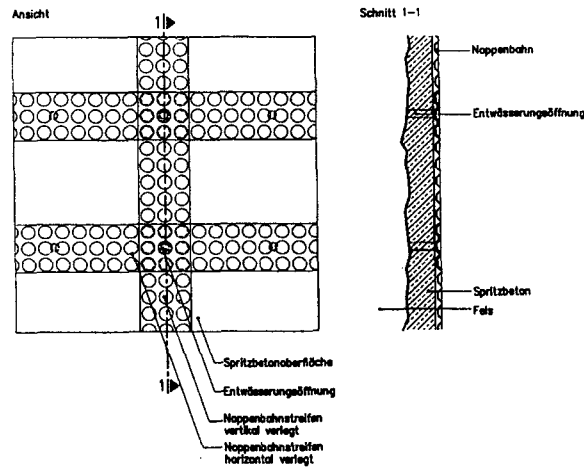


그림 6. 배수재를 보조하는 Drain panel 설치

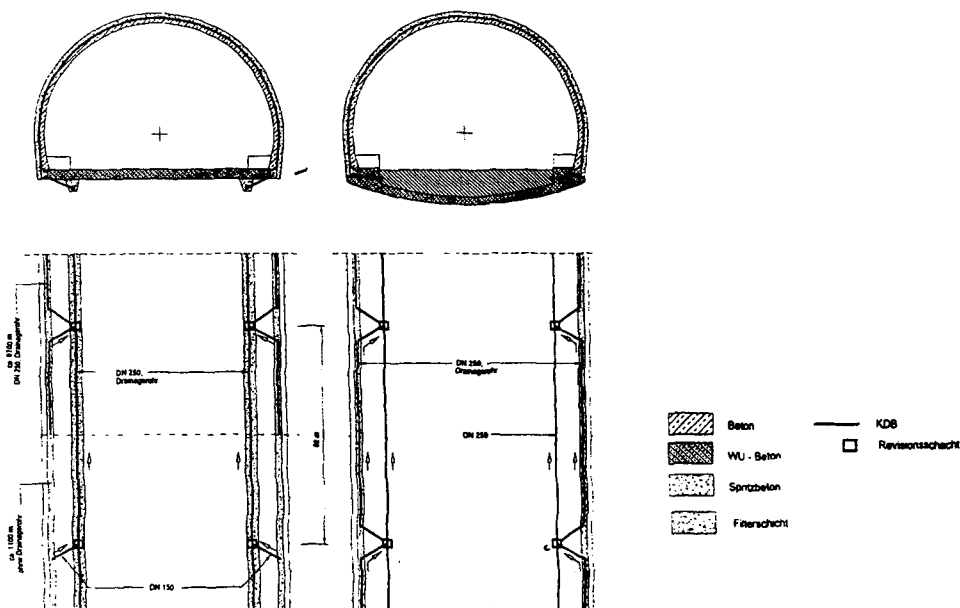


그림 7. 독일의 산악지 배수터널의 종방향 배수관

### 3.2 서구의 방수방법

앞에서 지적한 국내의 문제점들을 서구 각국에서는 어떻게 처리하고 있는지 알아보자.

#### 3.2.1 방수막의 격실 설치

방수막은 작용 수두의 크기에 따라 1겹 또는 2겹으로 할 수 있는데 1겹인 경우는 시공이음부에 설치하는 지수판사이에서 격실을 형성한다(그림 8). 2겹의 방수막으로 할 경우는 2장의 방수막 사이를 나누어 격실을 만들고 내부 방수막과 지수판 사이에는 1겹의 경우와 마찬가지로 격실이 만들어진다. 그림 9는 독일에서 사용하고 있는 2겹 방수막을 보여 주고 있다.

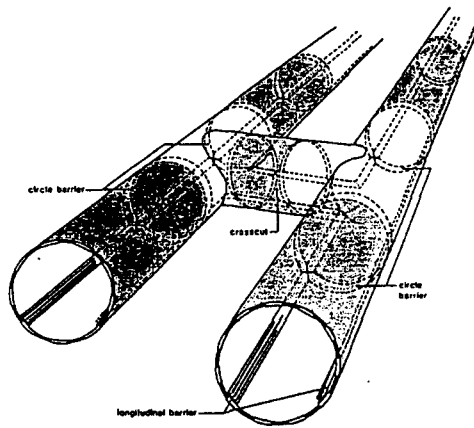


그림 8. 1겹 방수막 설치시의 격실

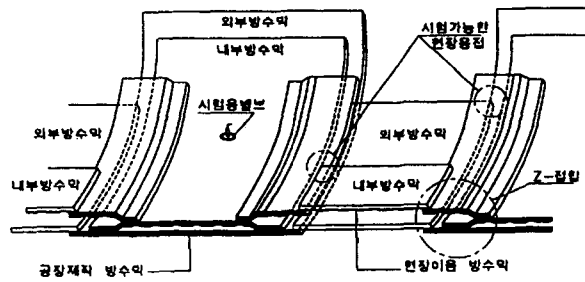


그림 9. 2겹 방수막 상세

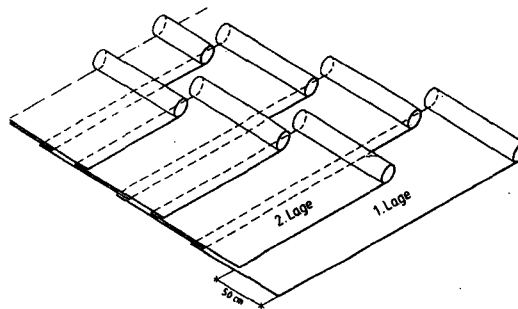


그림 10. 2겹 방수막 설치도

### 3.2.2 지수판

지수판은 모든 시공이음부에 설치하고 있다. 국내에서도 개착구조물에는 지수판을 벽체 중앙에 설치하는데 터널의 콘크리트 라이닝에는 지수판을 전혀 설치하지 않는다. 사실 이와 같이 라이닝의 중앙에 설치하는 것이 시공이 매우 어렵기 때문인지도 모른다. 그러나 이공이음부 지점에 지수판을 방수막에 부착시킨 후에 콘크리트 라이닝을 타설하면 전혀 문제되지 않고 시공도 간단하다. 서구 특히 독일에서는 지수판에 대한 연구가 매우 활발하여 여러 가지 형태의 지수판을 사용하고 있다(그림 11). 그림 12는 독일 고속철도 터널현장의 지수판 설치 장면이다.

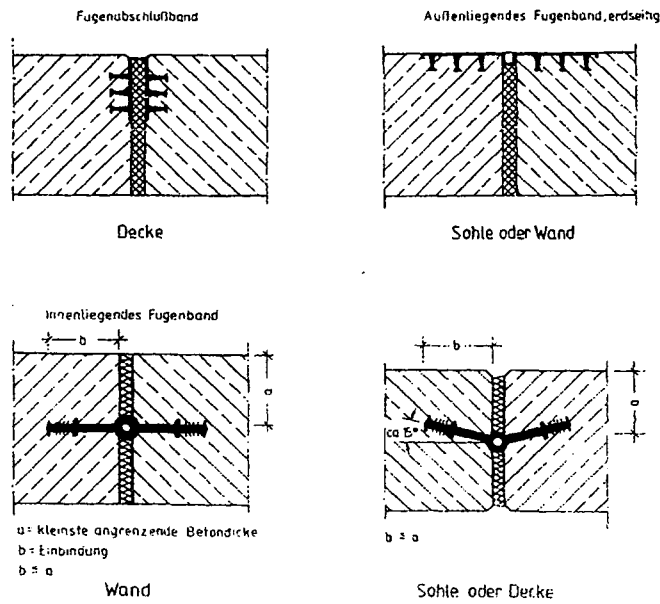


그림 11. 여러 가지 형상의 지수판



그림 12 독일 고속철도터널현장의 지수판 설치

### 3.2.3 콘크리트 라이닝

방수막을 침투한 물이 라이닝 외부면, 방수막 및 양측의 지수판으로 형성된 격실에 있게 된다. 라이닝 콘크리트 수밀성이 없으면 물은 벽면에서 스며 나오게 되는데 그러면 벽면이 얼룩지고 심하면 물방울을 형성하여 떨어질 수도 있다. 따라서 서구에서는 라이닝에 수압이 작용하는 경우는 필히 수밀 콘크리트를 사용하도록 하고 있다. 참고로 독일과 불란서에서는  $300 \text{ kg/cm}^2$  내지  $400 \text{ kg/cm}^2$  의 수밀콘크리트를 사용하고 있다.

### 3.2.4 독일고속철도의 방수방법

독일고속철도에서는 방수막, 지수판, 수밀콘크리트를 사용하여 라이닝에 작용하는 수압에 따라 표 5와 같이 추천하고 있다. 여기서 수압이 6 bar 이상 되는 경우도 규정하고 있으나 독일고속철도의 Manheim-Stuttgart 노선에서는 그림 12와 같이 압력이 6 bar 이상 되면 배수시킬 수 있는 밸브를 설치하여 놓았다.

표 5. 독일고속철도 추천방수방법

	수압=0	작용수압		
		수압<3bar	3bar<수압<6bar	수압>6bar
콘크리트 부식성이 약한 경우	수밀 콘크리트 또는 1겹방수막(상부방수)	수밀 콘크리트 (전주방수)	수밀 콘크리트 + 1겹방수막 (전주방수)	수밀콘크리트 + 2겹 방수막 (전주방식)
콘크리트 부식성이 강한 경우	1겹 방수막 (전주방수)	수밀 콘크리트 + 1겹 방수막 (전주방수)	수밀콘크리트 + 2겹방수막	

### 3.4 방수의 방법의 선택

국내에서는 아직 터널의 콘크리트 라이닝에 지수판을 설치하지 않고 있으며  $300 \text{ kg/cm}^2$  이상의 수밀콘크리트를 현장타설한다는 것은 엄두도 내지 못할 일이다. 따라서 현시점에서 국내에서는 특정 목적의 터널에서 어떠한 방수방법을 요구할지 정립이 되지 않고 있다. 다행히 한국지반공학회에서 한국통신공사의 연구의뢰를 받아 통신구 터널의 방수방법에 대하여 연구한 결과를 제안하였는데 이것이 터널의 용도에 따라 방수방법을 국내에서 최초로 제안한 것이다. 이에 대하여는 본 연구에 참여하였던 연구원 중에 한 사람이 상세하게 발표할 기회가 있을 것이다. 앞으로 도로터널, 철도터널, 전력구 터널에서도 조속한 시일 내에 이러한 연구가 이루어지기 바란다.

## 4. 방수의 등급과 허용 누수량

### 4.1 국내 현황

서구 각국에서도 최고의 방수방법을 적용하더라도 “완전방수”는 기대하지 않고 있다. 따라서 일찍이 시설물에 따라 어느 정도의 방수를 요구할 것인가? 즉 허용누수량을 얼마로 할 것인가?에 대하여 많은 연구가 있어 왔다. 물론 국내에서는 앞에서 수차에 걸쳐 언급하였듯이 “방수” 하면 “완전방수”를 요구하여 왔기 때문에 “허용 누수량”이란 있을 수 없었기 때문에 조그만 누수도 부실공사로 낙인 찍혀 왔다.

서구의 사람들은 우리보다 훨씬 현실적인가 보다. 벌써부터 방수등급과 이에 해당하는 허용 누수량을 정하여 놓고서 실제에 적용하고 있으므로 터널의 용도에 따라 어느 정도 누수는 허용하게 된다. 국내에서는 아직 터널 내부로의 누수에 대한 방수등급이나 방수에 대한 요구정도 즉 허용 누수량이 정하

여지지 않았었는데 1997년 본인과 몇몇 관심 있는 기술자들이 서울 2기 지하철의 일부 구간에서 이 문제를 다루어 보았으며 1998년에는 앞에서 언급한 통신구 터널에서의 문제를 연구하였다. 국내에서는 이러한 관점에서 연구되어야 할 부분이 아직도 너무나 많다. 우선 도심지 터널이 가장 많은 지하철에서도 일반적인 기준이 정해져야 하며 이 이외에도 도로터널, 철도터널, 전력구터널, 급수터널, 배수터널 등 일일이 열거하기 어려울 정도로 많다. 이것들은 앞으로 우리가 하여야 할 일들이므로 앞으로의 연구를 위하여 외국의 방수등급과 터널 내의 허용누수량을 참고로 소개하고자 한다.

## 4.2 영국의 규정

영국의 건설관련 연구기관인 CIRIA(Construction industry research and information association)에서 1979년에 제안한 바에 의하면 표 6에서와 같이 방수등급을 O, A, B, C, D, E 및 U등 7등급으로 나누고 각 등급에서의 누수량을 정하여 놓았다. 이러한 방수등급을 적용하는 것은 터널의 용도에 따라 다르므로 그 터널의 운용기관에서 정하여 주어야 한다.

적용하는 요령을 예를 들면 하나의 터널에서 다음과 같이 전체평균등급과 누수가 많은 부분의 등급을 같이 정해 놓아 부분적으로 누수가 많은 것도 인정하여 준다.

(예) 도로터널 : 전체/ A등급, 100m<sup>2</sup>/ B등급

표 6. 영국의 터널방수등급

CIRIA Class	Maximum permissible leakage(litre/d/m <sup>2</sup> )
O	Nothing visible
A	1
B	3
C	10
D	30
E	100
U	Unlimited

**Notes:**

1. A stated class is applied to define the upper limit for overall leakage flow arising in a given tunnel.
2. A stated class is applied to define the upper limit of local leaks measured over one of two standard 'square' areas on the internal surface of tunnel, having either 1m or 100mm sides.
3. Examples of notation:  
A/all : B/1 = Class A overall, Class B 1m square  
A/all : B/1 = Class A overall, Class B 100mm square

## 4.3 독일의 규정

독일에서는 이에 대한 연구가 가장 활발히 진행되어 온 것 같다. Otto-Graf-Institute 에서도 지하공간의 용도에 따른 방수등급과 허용누수량을 연구하였고 독일연방철도(German Federal Railway)에서도 용도에 따른 방수등급을 정하여 적용하여 왔다. 후에 STUVA(Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen- 지하교통시설연구협회)에서 이들을 종합하여 체계적으로 지하공간의 용도에 따라 방수등급과 허용누수량을 추천하였다. 방수등급이 매우 합리적으로 나누어 졌으며 허용누수량도 수급될 수 있는 값들로 앞으로 국내의 기준을 정하는데 많은 참고가 될 것이다(표 7).

표 7. 독일의 터널에 대한 방수등급 규정

방수 등급	습기상태	대상구조물의 용도	정 의	허용 가능한 누수량 (ℓ/m <sup>2</sup> /day)			
				STUVA		DS858	
				10m	100m	일반	<50m
1	완전건조	저장실, 작업실 주거공간	벽면에 수분의 얼룩조차 검출되지 않을 정도의 누수량.	0.02	0.01	-	-
2	거의건조 (상당히 건조)	동결위험이 있는 교통터널 및 비상통로	벽면에 약간의 수분 얼룩이 검출될 수 있는 정도, 수분의 얼룩에 건조한 손으로 접촉을 해도 손에 물이 묻지 않을 정도, 흡수지 또는 신문지를 붙여 보아도 붙여진 부분이 변색하지 않을 정도의 누수.	0.1	0.05	0.05	0.2
3	모관현상에 의한 습윤	방수의 등급 1 또는 2가 필요하지 않은 터널의 구역	벽면에 수분의 얼룩이 검출될 수 있을 정도의 누수, 한정되어진 수분의 얼룩이 습해져 있고, 그것에 흡수지 또는 신문지를 붙여 보아도 흡수하여 변색하지 않음. 그러나 수분이 방울져 떨어질 정도는 아님.	0.2	0.1	0.1	0.4
4	약간의 물방울이 떨어짐	실용터널	독립된 장소에 부분적으로 물이 방울져 떨어질 정도는 아님.	0.5	0.2		
5	물방울이 떨어짐	하수터널	부분적으로 물이 방울져 흐르는 정도.	0.1	0.5		

#### 4.4 기타 외국의 규정

기타 외국에서도 허용누수량에 대하여 규정하여 놓은 것이 있는데 아직은 독일에서 만큼 활발하지는 않은 것 같다. 참고로 미국의 여러 도시와 Melbourne(호주) 및 Antwerp(벨기에)에서 지하철도에 대하여 적용하고 있는 허용누수량을 보면(표 8) 차이가 많이 나지만 독일 규정보다는 다소 완화된 느낌을 준다.

표 8. 기타 외국의 규정

Underground Railway Systems	Short Section		Long Section	
	Daily Leakage Rate(ℓ/sq.m)	Reference Length(m)	Daily Leakage Rate(ℓ/sq.m)	Reference Length(m)
1	2	3	4	5
Washington, D.C(U.S.A)	10.7	3.5	0.9	80
San Francisco(U.S.A)			0.9	80
Atlanta(U.S.A)			0.9	80
Boston(U.S.A)			1.8	35
Baltimore(U.S.A)	5.3	3.5	0.7	35
Buffalo(U.S.A)	0.4	10	0.2	1,000
Melbourne(Australia)	0.25	10	0.1	1,100
Antwerp(Belgium)	0.25	10	0.1	100

## 5. 결론

이상과 같이 터널에서의 방수에 대한 여러 가지 문제점들을 살펴보았는데 앞으로 국내에서 시공되는 터널의 방수를 위하여 다음과 같은 제언을 하고자 한다.

(1) 앞으로는 우리 나라에서도 환경보존에 대한 중요성이 높아져서 지하수자원보호 관점에서 특히 도심지터널에서는 비배수터널이 주를 이루게 될 것이므로 이에 대비하여 연구가 이루어져야 한다.

(2) 방수재료의 개발과 시공법이 개선되어야 하겠다. 즉 다양한 지수판에 대한 형상과 재질에 대한 연구가 있어야 하며 방수막의 설치와 수밀콘크리트의 현장타설 방법도 개선될 여지가 있다.

(3) 터널 라이닝에 누수가 발생하면 누수지점을 효과적으로 찾아 낼 수 있는 방법과 이에 대한 보수 방법이 강구되어야 하겠다.

(4) 조속한 시일 내에 국내에서도 터널의 용도에 따른 방수등급과 허용누수량에 대한 규정이 만들어져야 하겠다.