

도로터널 결로 대책 가이드라인

2024. 4. 18.

국 토 교 통 부
도 로 국

가이드라인 제정에 따른 경과조치

본 「도로터널 결로대책 가이드라인」의 발간 시점에서 이미 시행중인 건설공사 및 설계용역은 발주청의 장이 필요하다고 인정하는 경우, 종전에 적용하고 있는 기준을 그대로 적용할 수 있습니다.

도로터널 결로 대책 가이드라인

1. 목적

이 가이드라인은 하해저 장대 도로터널의 하계 결로로 인해 발생할 수 있는 도로 이용자의 불안감 해소 및 운전자의 안전 확보를 위한 방안 등을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 적용대상

이 가이드라인은 본 가이드라인 제정 이후 「도로법」 제10조에 따른 도로에 계획 및 시공되는 하해저 장대(연장 1km 이상) 도로터널을 대상으로 하며, 필요한 경우 대심도 지하도로, 수원(水源)지 인근에 터널 갱구부가 위치한 터널의 경우에도 적용할 수 있다.

3. 적용 범위

- 3.1 이 가이드라인은 터널내 결로 대책에 대해 방향과 원칙을 제시한 것으로 적용 범위에 대해 특별한 경우를 제외하고 이에 따를 것을 권장한다.
- 3.2 이 가이드라인에서 정하지 않은 사항은 관련 법령, 지침, 설계기준 및 시방서 등을 따라야 한다.
- 3.3 이 가이드라인의 규정은 결로 대응시설의 설치 여건이나 유형 등에 따라 변경하여 적용할 수 있으며, 결로 대응시설 설치를 위한 세부 사항은 본 가이드라인을 참고하여 해당 시설의 관리청이 별도로 정할 수 있다.

4. 가이드라인 적용 시 사전 검토사항

- 4.1 터널 내 결로 대응시설을 계획할 때에는 이 가이드라인의 내용과 해당 시설의 입지 및 주변 여건 등을 감안한 결로 영향 검토를 통해 결로 대응시설의 설치 필요성을 충분히 검토해야 한다.
- 4.2 터널 내 결로 대응시설의 설치 계획을 수립할 때에는 충분한 분석을

통해 시설 규모를 최소화하여야 하며, 신규 시설의 설치뿐만 아니라 환기설비와 같은 기존 설비의 운영 방안도 함께 강구하여야 한다.

4.3 터널 내 결로 대응을 위해 결로 발생량의 저감방안뿐만 아니라, 운전자에게 결로 발생 상황에 대한 정보 제공 방안 등을 함께 고려하여야 한다.

5. 도로터널 결로대책 가이드라인

5.1 터널 내 결로 대응시설

5.1.1 결로 대응시설은 결로 저감시설과 결로로 인한 2차 사고 방지시설로 나눌 수 있다. 결로 저감시설은 환기설비, 제습설비, 결로 유도설비, 단열시설 등이 있으며, 결로 사고 방지시설은 결로 발생정보 안내 시설과 미끄럼 방지시설로 나눌 수 있다.

5.1.2 “결로 발생정보 안내시설”은 터널 내 결로 발생 시 운전자에게 결로 발생 정보를 전달하여 불안감을 해소하고 운전자의 주의를 환기시켜 감속운행 등 안전운전을 유도하기 위한 설비로서 결로 발생량 모니터링 설비(CCTV, 터널 내외부 온습도 측정장비)와 VMS (Variable Message Sign), 표지판 등의 터널 정보 안내시설을 활용한다.

5.1.3 “미끄럼 방지시설”은 터널 내 결로로 노면이 젖어있는 경우 미끄럼 저항이 급격히 감소하므로 결로 다발구간의 노면 미끄럼 저항을 높이기 위해 포장층 표면에 재료를 추가하거나 그루빙과 같이 포장층 표면 재료를 제거하는 방식을 적용할 수 있다.

5.1.4 “환기설비”는 터널을 주행하는 차량에서 배출되는 오염물질을 빠르게 배출하기 위한 설비로서 터널 내 하계 결로 발생이 우려되는 실외 환경에서는 결로 발생의 근원인 외기에 함유된 수분을 강제로 유입시키는 역할을 할 수 있기 때문에 실외 환경과 터널 내 교통량 등에 따라 환기설비의 운용 방법을 결정하여야 한다.

5.1.5 “제습설비”는 공기 중에 함유된 수분을 기계적인 힘으로 응결시켜 제거하는 설비로서 터널 내 결로를 완전히 제거하기 위해서는 대용량의 설비가 요구되며, 운용 비용이 매우 높으므로 설치 구간 및 용량 등에 대해 엄밀하게 고려하여야 한다.

5.1.6 “결로 유도설비”는 터널 내로 유입되는 저온의 지하수 등을 열원

으로 하여 형성된 저온의 표면을 통해 결로 발생을 유도하여 수분을 제거하는 냉각설비로 설치 비용 대비 결로 저감 효과를 검토하여 설치하여야 한다.

5.1.6 “단열시설”은 터널 라이닝의 단열성능을 높이거나 단열성능이 좋은 소재(단열재)를 터널 내외부에 부착하여 터널 내 공기의 지중 손실 열량을 감소시키고, 표면온도를 상승시켜 결로 발생을 저감하는 방식이다. 단열재 적용 시에는 경제성, 유지 관리, 내화성능 등에 대해 고려하여야 한다.

5.1.7 상기의 결로 대응시설은 터널 전체 구간 또는 결로 다발 예상구간에 설치하도록 한다.

5.2 결로 발생 영향 분석 조건

5.2.1 도로터널의 입지에 따른 결로 발생 영향 분석을 위한 실외 환경 조건을 선정하여야 하며, 지역에 따른 실외 환경 조건은 “참고 1”의 표에 제시된 지역 중 분석 대상 지역과 가장 인접한 지역의 조건을 선정한다.

5.2.2 “참고 1”에서 제시된 조건보다 상세한 조건을 확보할 필요가 있는 경우에는 실외 온습도 조건은 “기상청 기상자료개방포털”(data.kma.go.kr) 관측정보, 수온조건은 “실시간 해양환경 어장정보시스템”(nifs.go.kr)을 통하여 정보를 확인가능하며, 지역별 지중온도는 관측 정보가 부재하기 때문에 기존 연구에서 발표된 이론식에 따른 지중 온도 정보를 확인하여야 한다. 이때, 분석 조건의 설정에 대한 근거를 분석 결과와 함께 제시하여야 한다.

5.2.3 도로터널의 설계 조건에 따른 결로 발생 영향 분석을 위해서 구조체의 구성(구성 소재의 물성 및 두께), 교통량(일간 최대, 평균, 최소), 환기 풍량(최대, 최소)을 조사하여야 한다.

5.2.4 도로터널의 기하구조에 따른 결로 영향 분석을 위해서 터널의 3차원 형상에 대한 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics Analysis)을 실시하여 각 구간별 표면열전달율 (W/m^2K , 유동하는 공기와 터널 표면간 열전달 특성 계수)을 산출하여야 한다.

5.2.5 터널의 결로 저감 시설별 사양에 대한 조건을 선정하여야 하며, 적용을 고려하는 시설별로 환기설비(터널내 형성 유속, (m/s)), 제습

설비(제습용량(liter/day)), 결로유도설비(용수온도, 단위 연장별 결로 유도면적(m²/m)), 단열재의 열전도율(W/mK), 두께(m) 등을 설정한다.

5.3 결로 발생 영향 분석

5.3.1 도로터널의 구간별 결로 발생 영향을 분석하기 위해서는 다음의 그림과 같은 과정을 통해 결로 발생 영향을 분석하여야 한다.

5.3.2 도로터널의 입지에 따라 선정된 “실외 환경 분석 조건”과 “설계조건”, 그리고 전산유체해석을 통하여 도출한 기하구조에 따른 “열전달 특성 조건”을 반영하여 상기의 분석 과정에 따라 터널의 구간별 결로 발생 영향을 분석한다.

5.3.3 교통량 및 환기량에 따른 결로발생량의 변화를 분석하여야 한다.

5.3.4 결로 발생 영향 분석은 상기의 분석 과정을 따르거나 본 가이드 라인에서 제시하는 결로계산기를 이용하여 계산할 수 있으며, 상세 내용은 결로계산기 사용자 매뉴얼을 참고할 수 있다.

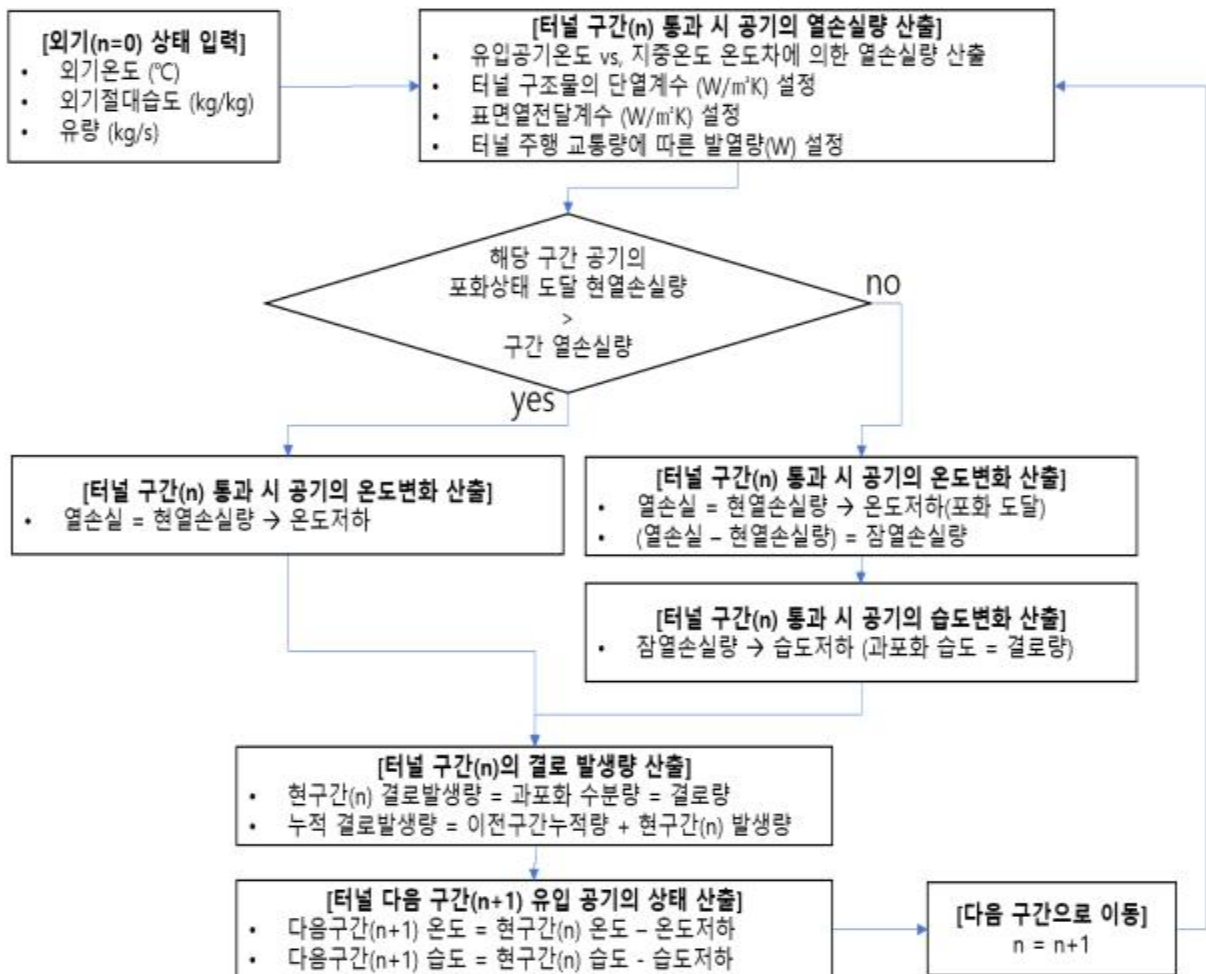


그림. 터널 구간별 결로 발생량 산출 과정

5.4 결로 대응설비 효과 분석 및 운영방법의 설정

- 5.4.1 결로 영향 분석 결과에 기초한 설비별 설치 효과를 분석하여 가장 효율적인 결로 대응설비를 선정하여야 하며 대응설비 운영 비용을 종합적으로 고려한 운영계획을 수립하여야 한다.
- 5.4.2 결로 저감 설비 적용 시에는 단열, 결로 유도설비와 같이 지속적인 효과가 발생하는 시설과 환기설비, 제습설비와 같이 용량, 위치 및 제어 방법에 따라 적용 효과가 변경되는 설비의 적용 효과를 비교 분석하여 효율적인 대책을 적용하여야 한다.
- 5.4.3 터널 내외부 환경 조건상 결로 저감 설비 설치를 통해 충분한 결로 저감 효과를 얻기 어려운 경우, 결로 다발구간 또는 위험구간에 대해 국부적으로 결로 저감 설비를 설치할 수 있으며, 이 경우 운전자에게 결로 발생 정보를 전달하는 정보 안내 설비 및 미끄럼 방지 시설 등의 안전시설을 반영하고 운전자 안전을 고려한 운영 시나리오를 계획하여야 한다.
- 5.4.5 결로 대응설비는 터널 내외부 환경 및 터널 내 표면온도 모니터링 시스템, 제어 시스템 등과 연동하여 효율적으로 운영되도록 계획하여야 한다.
- 5.4.4 결로 대응설비의 운영 방법은 대상 터널의 내부 표면온도 조건 및 실외 온·습도 조건에 근거하여 정하거나 “참고 2” 사례와 같이 결로 발생 상태에 따라 차등하여 설정하여야 한다.
- 5.4.6 결로 저감효과 및 운영 비용을 종합적으로 고려하여 결로 저감 설비 운영 시나리오를 설정하여야 한다.

참고 1

도로터널 경로 영향 분석을 위한 실외 환경조건

구분		지역별 5년간 시간당 데이터 중 누적 발생 빈도에 따른 온습도 조건					
조건	누적빈도	인천	서산	군산	해남	여수	부산
온도	60%	16.0	15.3	16.0	16.0	17.5	17.6
	70%	18.7	18.2	18.7	18.8	19.8	20.0
	80%	22.0	21.5	22.0	22.0	22.6	22.6
	90%	26.0	26.0	26.0	26.4	26.4	26.4
	98%	33.7	34.2	33.7	34.2	33.1	32.9
상대 습도 (% RH)	60%	89.0	87.7	89.0	90.2	82.2	79.7
	70%	86.2	83.6	86.2	86.8	81.9	78.6
	80%	81.4	78.8	81.4	82.1	79.5	77.6
	90%	75.6	71.3	75.6	73.8	74.9	73.8
	98%	60.9	56.6	60.9	60.3	64.5	63.7
지중온도 (°C)		13.8	14.0	14.6	15.6	15.7	15.5
해저수온 (°C)		10.0 (서해 수심 50m)			16.0 (남해 수심 100m)		

- 기온, 습도 조건은 "기상청 기상자료개방포털"(data.kma.go.kr) 관측정보 참조
- 해수온 조건은 "실시간 해양환경 어장정보시스템"(nifs.go.kr) 관측정보 참조
- 지중온도 조건은 기존 연구 (정수일, 박윤성 (1984), "지중온도 예측을 위한 방법론 연구", 대한건축학회 논문집, Vol. 28, No. 19, pp. 32-38.) 결과에 따른 아래 이론식을 참조하거나, 별도의 예측을 통해 정할 수 있다.
- 누적빈도 60% 조건은 하계 기간(6~8월, 90일) 중 60%의 기간(54일)에서 결로가 발생되지 않음을 의미하며, 40%의 기간(36일)에는 결로가 발생됨을 의미함.

$$T = T_{av} + T_{am} \times \exp\left(-x \times \sqrt{\frac{w}{2\alpha}}\right) \times \cos\left(\omega t - x \times \sqrt{\frac{w}{2\alpha}} + C\right)$$

여기서, T_{av} : 지중평균온도(°C), T_{am} : 지하 임의의 지점에서 온도 진폭, α : 열확산계수 ($\frac{K}{\rho c}$, K :열전도율, ρ :밀도, c :비열), w : 각속도, x : 지하깊이(m), t : 시간(일수), C : 보정계수 이다.

상기의 식에 적용되는 26개의 지역별 조건을 기존 연구에서 표로 제공하고 있다.

참고 2

도로터널 경로 저감을 위한 설비 운영 방법 (사례)

• 보령 해저 터널 경로 상태에 따른 조치 방법 설정 사례

등 급	터널 내외기상태	상태	조치사항
Level 1	터널 내부 습도 80% 이상 터널 외부 습도 80% 이상	-	CCTV 모니터링 강화
Level 2	터널 내부 습도 85% 이상 터널 외부 습도 85% 이상	디치, 터널 벽면부 젖음 현상 발생 시작	CCTV 모니터링 강화 점검팀 순찰 강화, 제습기 가동
Level 3	터널 내부 습도 90% 이상 터널 외부 습도 90% 이상	도로바닥면 젖음 현상 발생 시작	CCTV 모니터링 강화 , 점검팀 순찰 강화, 제습기 가동, 제트팬 탄력 운용, VMS 젖음현상 관련 문안표출
Level 4	터널 내부 습도 95% 이상 터널 외부 습도 90% 이상	도로바닥면 젖음 현상 발생 구간 500m이상 발생	CCTV 모니터링 강화 , 점검팀 순찰 강화, 제습기 가동, 제트팬 전체 운용, VMS 젖음현상관련 문안표출, 터널내부속도표시 LCS 70km에서 60km 표출 [도로안전유의]

• 보령해저터널 외기 절대습도에 따른 구간별 경로 상태 판단 조건 설정 사례

등급	외기 절대습도	구간별 경로 상태		
		시점부	중간부	종점부
Level 1	6.8 g/kg 미만	건조	건조	건조
Level 2	7.6 g/kg 미만	건조	약습	건조
Level 3	12.7 g/kg 미만	건조	약습	약습
Level 4	12.7 g/kg 이상	습윤	습윤	습윤