

해외 사례를 통한 해저터널의 환기 및 방재시설에 대한 고찰



이승철
강원대학교
소방방재학부
교수

1. 서론

해저터널은 기존의 육상, 해상 및 항공 교통수단의 한계성을 극복하기 위한 수단으로 해저에 터널을 건설하여

자동차 또는 열차로 터널을 통과하여 국가 간 또는 연육간을 연결하는 새로운 교통수단이다.

최근 세계 각국에서는 고속화 철도 및 도로 등의 고속 운송 체계의 개발수요가 증대됨에 따라 해협을 횡단하는

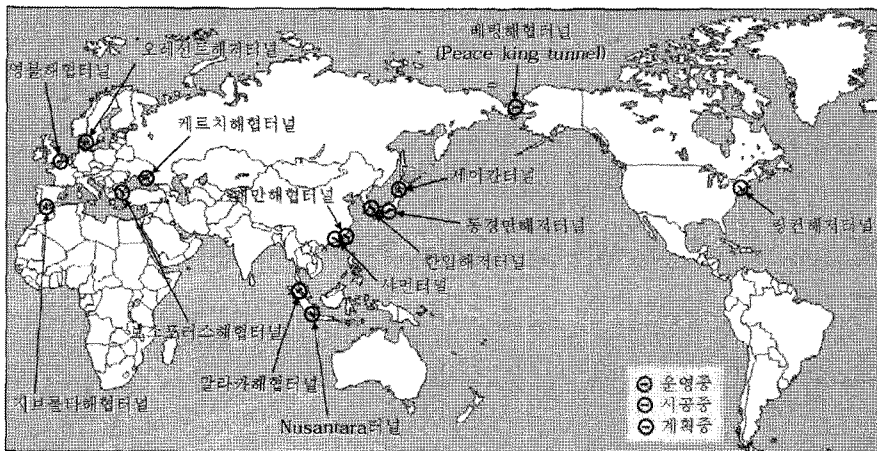


그림 1. 전세계 해저터널의 건설 현황

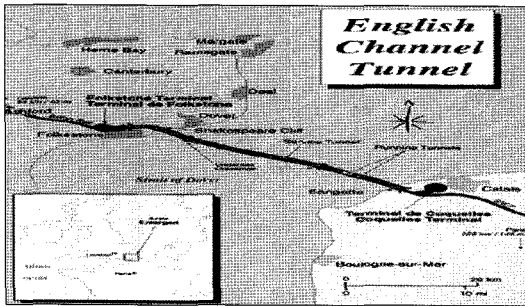


그림 2. 유로 해저터널의 노선 개요도

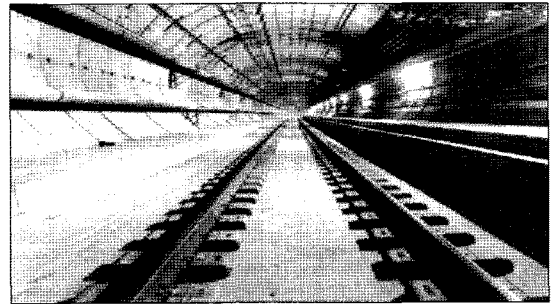


그림 4. 주행 터널 내부

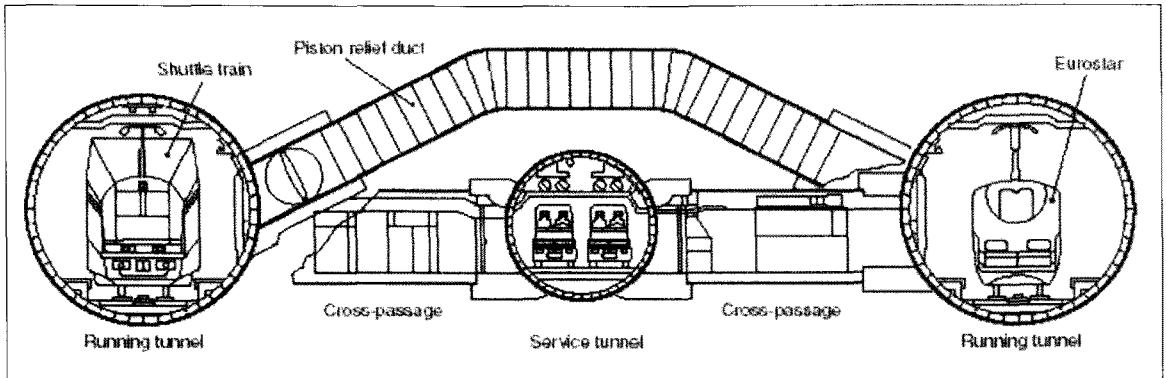


그림 3. 유로 해저터널의 시설물 구성도

교통용 해저터널의 건설수요가 빠르게 증가하고 있다. 국내에서도 기존의 교통수단의 한계성을 극복하기 위한 수단으로 국가간 또는 연육간을 연결하는 해저터널에 대한 관심이 높아지고 있다. 영국과 프랑스 그리고 일본과 같은 나라는 이미 해저터널이 연육교통 수단으로 개발되어 효과적으로 운영되고 있으며 그 기술적인 수준 역시 매우 높다. 국내의 경우는 최근 가덕해저터널의 개통으로 기존에 호남-제주 해저터널, 한일 및 한중 해저터널에 대한 다양한 노선 계획 등이 제안되고 검토되는 상황이다.

해저터널과 같은 초장대 터널의 건설은 토목기술과 더불어 환기 및 방재기술 또한 중요하다. 이미 해외 해저터널의 환기 및 방재에 대한 기술적 검토는 여러 매체를 통해 소개된 바 있으며, 본 고에서는 영불간 유로 해저터널과 일본의 세이칸 해저터널 및 아쿠아 해저터널을 중심으

로 환기 및 방재에 대한 고찰을 재구성하였다.

2. 유로 해저터널

2.1 개요

유로 해저터널은 영국 Folkestone과 프랑스의 Calais를 연결하며 도버해협을 통과하는 초장대 해저터널이다. 총 연장은 50.45km이고 이중 해저구간은 38km이며 해저깊이는 약 45m이다. 1987년 12월 공사를 개시하여 1994년 5월에 개통되어 건설기간은 7년이고 약 150억 달러의 총 사업비가 소요되었다.



그림 5. 중앙통제실

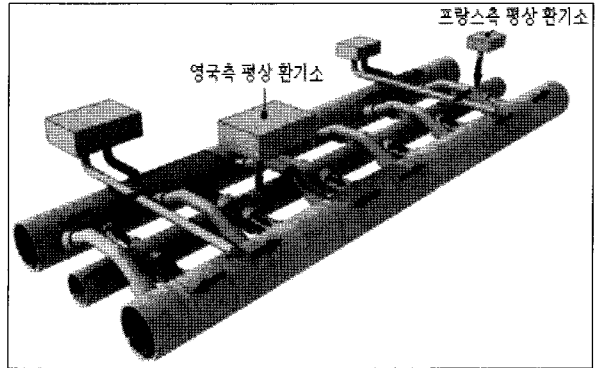


그림 7. 평상 시 환기 경로

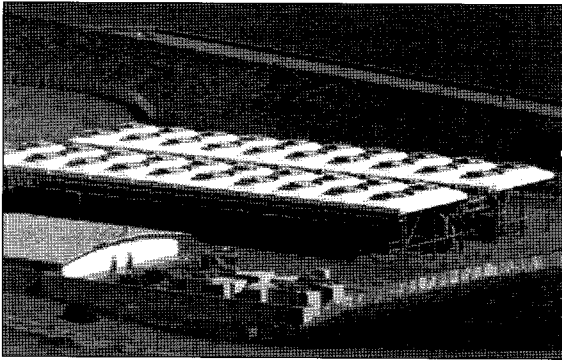


그림 6. 환기소

2.2 시설물 구성

유로 해저터널의 시설물 구성도를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 7.6m 직경의 두 개의 본선 터널 사이에 4.8m 직경의 서비스 터널이 있으며, 본선 터널과 서비스 터널을 375m 간격으로 피난연락갱이 연결해 주고 있다. 또한 피스톤 릴리프 덕트는 양측 본선 터널과 250m 간격으로 연결되어 있다.

터널의 유지 및 관리를 담당하는 중앙통제실은 영국의 Folkestone과 프랑스의 Calais에 각각 위치하고 있으며, 영국의 Shakespear cliff와 프랑스 Sangatte에 각각 1개 소씩 총 2개소의 환기소가 설치되어 있다.

2.3 환기시설

유로 해저터널 환기의 특징은 서비스 터널을 도입한 것과 열차풍에 의한 피스톤 효과를 줄이기 위해 피스톤 릴리프 덕트를 도입한 것이다. 그림 7에는 환기소에서 서비스 터널로 급기되는 경우의 공기 이동 경로를 나타내었다. 이 경우 영국과 프랑스에 설치된 2개의 환기소에서 서비스 터널로 급기된 공기는 서비스 터널에서 피난연락갱을 통해 2개의 본선 터널로 이동하며 최종적으로 각 터널의 입출구로 배기된다.

피난연락갱에는 서비스 터널로부터 2개의 본선 터널로의 공기 역류를 차단시키기 위해 역류 방지용 댐퍼(Non-return damper)가 설치되어 있다. 만약 열차가 본선 터널로 진입하여 운행중일 경우 열차풍에 의해 본선 터널의 공기는 피난연락갱을 통해 서비스 터널로 이동하려고 하지만 역류 방지용 댐퍼에 의해 차단된다. 이는 열차의 운행으로 인해 발생하는 열 및 오염물질이 신선공기를 공급하는 서비스 터널로 유입되는 것을 방지하겠다는 의도이며, 터널 내 화재 발생 시에도 유용하게 사용될 수 있다.

열차가 본선터널에 고속으로 진행하게 되면 열차의 전면부에는 압력이 급격히 상승하고 후면부에는 압력이 급격히 감소하는 피스톤 효과가 발생되고, 이로 인해 공력

저항이 증가되며 압력파가 형성될 수 있고, 또한 열차 내부의 승객 및 승무원에게 불쾌감을 유발시킬 수 있다. 이러한 부분을 감소시키기 위해 양쪽 본선터널을 직접 연결해 주는 피스톤 릴리프 덕트(Piston relief duct)를 설치하였다.

이것의 설치로 인해 열차의 전후 압력차이가 약 20kPa에서 약 6kPa로 감소되어 공력저항이 감소되며 압력파 형성도 줄일 수 있게 된다. 환기소의 급기량은 20,000명(1인당 26m³/hr)을 동시에 수용할 수 있으며 약 520,000m³/hr이다.

2.4 방재시설

유로 해저터널에 화재 등으로 인한 비상사태 발생 시, 본선 터널로 신선외기를 급·배기시키는 비상 시 환기소가 추가적으로 운용되는 것이 특징이다. 본선 터널에 열차 화재 등으로 인해 정차되는 경우, 2곳의 비상시 환기소에서 제연팬을 가동시켜 승객들의 안전한 대피를 가능하도록 하였다. 그림 8에는 화재 등으로 인해 비상 시 제연팬이 가동될 때 신선외기의 급·배기와 공기 이동경로를 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 영국측 비상 시 환기소에서 급기된 공기가 양쪽 본선터널로 이동하며 프랑스측 비상시 환기소를 통해 최종적으로 배기된다. 이때 양

쪽 본선터널을 연결시키는 피스톤 릴리프 덕트는 상대편 터널로의 연기전파를 차단시키기 위해 댐퍼를 이용하여 차단할 수 있게 된다.

또한, 서비스 터널로 대피한 승객들에게 2곳의 평상시 환기소의 환기장치를 계속 가동되며, 이때 적절한 제연속도는 약 2.5m이고 12m/s 이상이면 안전한 피난대피에 지장을 초래할 수 있다.

3. 세이칸 해저터널

3.1 개요

세이칸 해저터널은 그림 9에서 보이는 바와 같이 일본의 혼슈섬과 북쪽의 홋카이도를 연결하는 철도 터널로서 츠카루 해협을 해저 부분을 관통하는 초장대 해저터널이다. 터널의 총 연장은 53.85km이고 이중 해저구간은 23.30km, 나머지 구간 30.55 km는 육저구간이다. 또한 최대 해저면 두께는 100m 이며 최대 수심은 140m이다. 일본 세이칸 해저터널은 1964년 3월에 터널건설에 착수하여 1988년 3월에 개통되었다. 24년의 건설기간 동안 약 6,900억엔(6조 9,000억원, 1988년 기준)의 공사비가 소요되었다.

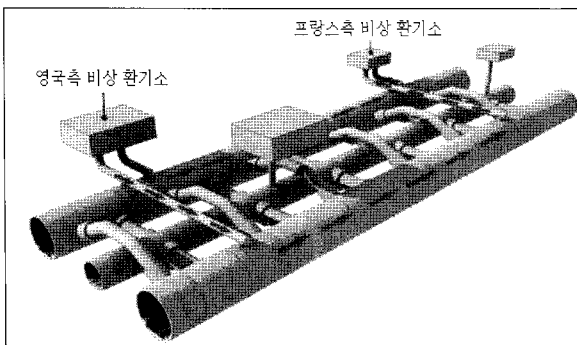


그림 8. 제연 및 신선외기 공급을 위한 환기 경로

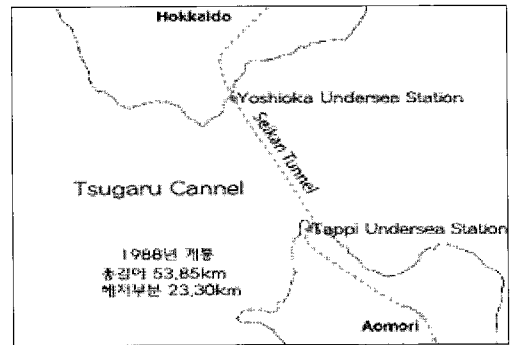


그림 9. 세이칸 해저터널 개요도

3.2 시설물 구성

그림 10은 세이칸 해저터널의 시설물을 평면적으로 나타낸 구성도이다. 그림에서 보이는 바와 같이 본선 터널

중앙부가 최대깊이인 V형태이며 수직갱도, 경사갱도, 본선 터널, 작업 터널, 선진 터널 및 피난연락갱 등으로 각각 구성되어 있다. 각 터널 및 갱도의 특징과 역할을 표 1에 정리하였다.

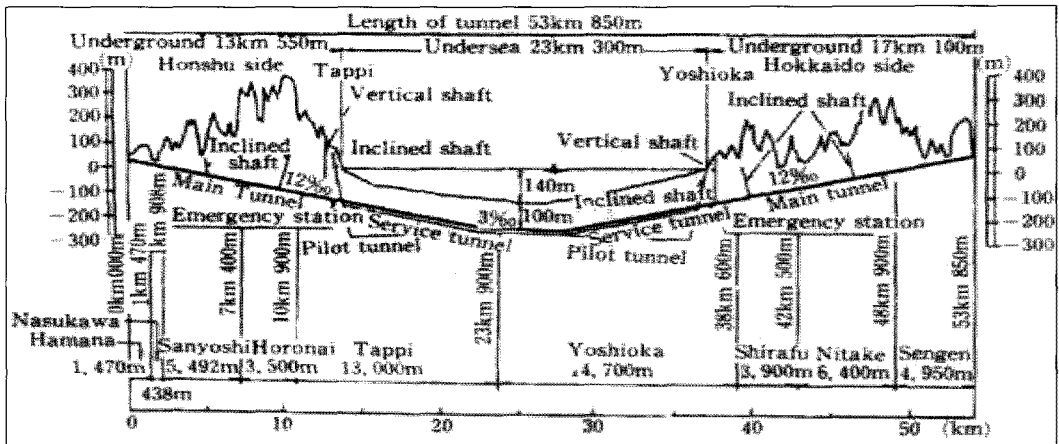


그림 10. 세이칸 해저터널의 시설물 구성도

표 1. 세이칸 해저터널을 구성하는 각 터널의 특징 및 역할

시설종류	특징	역할	
		공사 중	공사 후
수직갱도 (Vertical shaft)	양쪽 긴급구난역 바깥쪽에 위치하는 수직형 갱도	엘리베이터를 이용하여 공사인부 및 자재, 기계를 운반	배기 통로로 사용하며 본선 터널과 연결되어 있음
경사갱도 (Inclined shaft)	해저터널 입·출구부에 각각 1개씩 14°의 기울기로 굴착되어 있으며 양쪽 정점 안쪽의 2개와 육저부에 4개가 있음. 사경 1/4 정점에 연결된 케이블용 경사갱도가 각 1개씩 별도로 있음.	해저의 물리, 지질조사에 사용되었으며 공사 관계자의 통행, 자재, 기계, 굴착된 암석의 운반, 배수 등에 사용	환기와 보수작업을 위해 설치된 케이블카로 자재 운반을 하고 있으며 급기 및 대피 통로로 사용
본선 터널 (Main tunnel)	높이 7.85m, 폭 9.7m. 열차가 통과하는 터널로 3층의 건물 크기와 비슷함	-	-
작업 터널 (Service tunnel)	본선 터널과 약 30m 거리의 평행으로 굴착된 터널로 항상 본선 터널 보다 먼저 굴착. 해저부의 보수 통로, 본선 터널과 많은 연결통로로 연결되어 있음.	본선 터널을 올바른 방향으로 굴착할 수 있도록 하는 기능과 굴착장비의 효율을 증가시켜 완공을 앞당기는 역할을 하는 터널. 터널로 장비 및 자재를 옮기는 통로로 사용	보수를 위한 트럭과 차량이 다니는 통로로써 이용
선진 터널 (Pilot tunnel)	가장먼저 굴착된 터널	해저의 지질상태 등의 조사를 하여 이를 토대로 시공방법을 결정하므로 작업 터널과 본선 터널의 시공에 이바지함	배수와 환기를 위한 터널로 사용되고 있음
피난연락갱 (Connection gallery)	긴급구난역의 본선 터널 양쪽에 40m 간격으로 작업 터널과 연결시켜주는 연결통로 (한쪽에 13개씩)	터널로 장비 및 자재를 옮기는 통로로 사용	작업 터널 및 경사갱도로 연결되어 대피 및 급기통로로 이용

본선 터널의 단면을 그림 11에 나타내었으며 터널의 높이와 최대 폭 7.85m와 9.70m이다. 또한 1.067m의 궤간에서 재래식 열차가 운행되고 신칸센 열차의 운행을 위해 1.435m의 궤간을 설치하였다. 그림 12는 세이칸 터널 긴급구난역 위치에서의 단면도를 나타낸 것이며 그림에서 보이는 바와 같이 직경 11.1m의 본선 터널 1개와 직경 5.0m의 작업 터널이 있으며 본선 터널과 작업 터널을 피난연락갱이 긴급 구난역에서는 40m 간격, 이외지역에서는 600~1000m 간격으로 연결해 주고 있다. 또한 본선 터널과 작업 터널 중앙엔 직경 5.0m의 선진 터널이 있다.

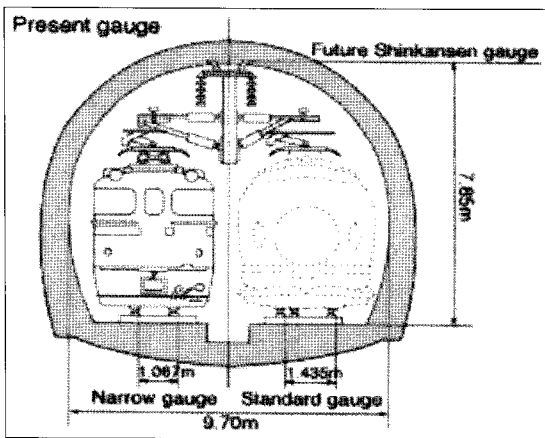


그림 11. 본선 터널의 단면

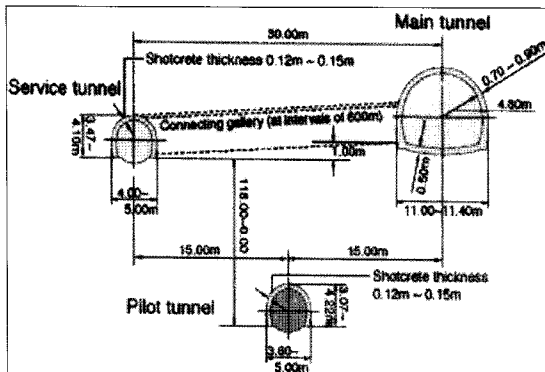


그림 12. 긴급구난역 위치에서의 터널 단면

3.3 환기시설

초장대 터널인 세이칸 해저터널에서 열차에 의해 발생한 축적된 열, 유지보수 차량에서 발생하는 매연, 기타 오염물질들의 정체 및 대류를 교통 환기력이나 자연 환기력만으로 불충분하므로 적절한 환기 시스템이 필요하다. 따라서 환기방식은 V형태 터널노선을 활용하여 외부공기를 최대깊이의 터널 중앙부 본선 터널로 급기하고 본선 터널 입·출구부의 수직갱도를 통해 배기시키는 특징을 가지고 있다.

세이칸 해저터널의 환기를 상세히 설명하기 위해 그림 13에 평상시 환기 경로를 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 터널 입·출구부에 각각 위치하는 급기팬이 가동되어 외부 신선공기는 경사갱도, 선진 터널, 작업 터널과 피난연락갱을 각각 경유하여 최대깊이의 터널 중앙부 본선 터널로 유입된다. 이때 모든 피난연락갱은 공기의 흐름이 차단되는데 최대깊이의 본선 터널과 연결된 피난연락갱과 긴급구난역에 위치한 피난연락갱은 제외된다. 경사갱도는 평상 시 유지보수 작업 및 자재 운반로로 이용되며 케이블카가 설치되어 일부 인원이 자주 이용하는 통로이다. 또한 화재발생 등과 같은 비상 시에는 평상 시 기능과 더불어 피난대피로로 활용될 수 있으므로 항상 신선외기가 유입되는 급기통로이어야 한다.

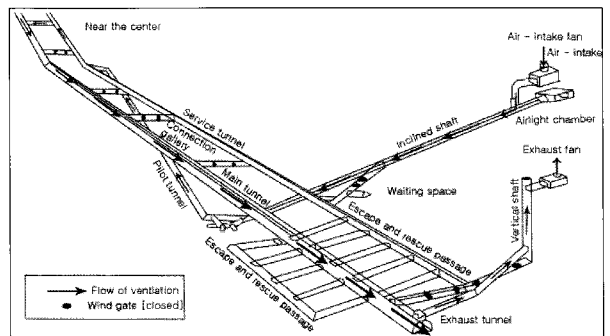


그림 13. 평상 시 환기 경로

각 환기소에는 2대의 급기팬(약 234,000 m³/hr과 약 288,000m³/hr)과 1대의 배기팬(약 612,000m³/hr)이 설치되어 있다.

3.4 방재시설

세이칸 해저터널의 방재시설의 특징은 터널 내 비상역 역할을 하는 긴급구난역(해저부 2곳, 육저부 2곳)을 도입한 것이다.

일본 철도터널에서의 화재 시 운전지침은 열차가 자력으로 터널 외부로 빠져나가는 것을 원칙으로 하기 때문에 이러한 방재시스템의 구축은 세이칸 터널에 국한되어 있다. 또한 긴급구난역에는 승객의 피난안전을 위해 조명설비, 방송설비, 피난대피통로 및 각종 소화설비가 설치되어 있다. 그림 14에는 화재 시 제연 및 신선외기 공급을 위한 환기 경로를 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 열차에 화재가 발생하게 되면 열차는 가능한 긴급구난역에 정차하게 되고 환기소에 의해 급기된 신선외기는 경사궤도를 지나 구난대피소에 공급된 후 피난연락갱을 통하여 본선 터널로 유입되며 연기 및 기타 오염물질은 수직궤도를 통해 외부로 배기되며 제연용량은 601,200m³/hr이다. 피난승객의 피난방향은 급기되는 환기방향과 역방향이 된다.

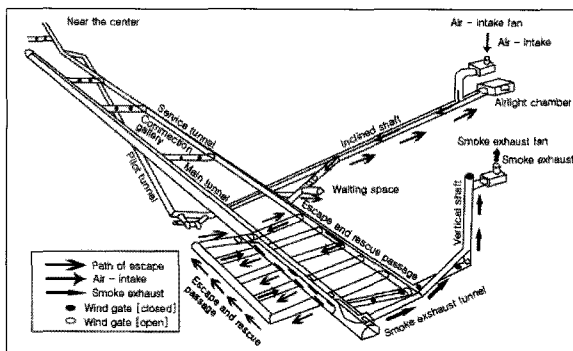


그림 14. 화재 시 제연 및 신선외기 공급을 위한 환기 경로

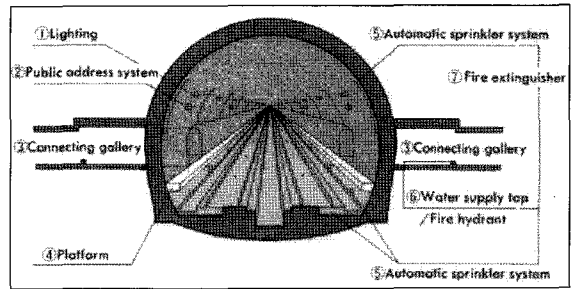


그림 15. 세이칸 해저터널의 방재설비 개념도

세이칸 터널 해저부의 긴급구난역은 닛피와 요시오카의 경사궤도 하부 말단 부근에 설치되어 대대적인 방재설비가 마련되어 있다. 방재설비를 상세히 설명하기 위해 그림 15에는 방재설비의 개념도를 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 피난 승객 안전 확보를 위한 조명설비, 방송설비, 피난통로, 각종소화설비가 설치되어 있다. 대표적인 소화설비인 스프링클러 설비는 화재가 발생한 열차를 향하여 위, 아래, 측면에서 물을 뿜어주는 방식으로 소화활동을 펼친다. 또한 피난연락갱에는 소화전이 배치되어 필요시 초기소화 할 수 있으며 1,000명을 수용할 수 있는 구난대피소는 피난 승객의 원활한 피난을 도와준다.

4. 동경만 아쿠아 해저터널

4.1 개요

동경만 아쿠아 라인은 서쪽의 가와사키와 동쪽의 기사라즈를 연결하는 세계 최대 설드 터널이다. 총 길이는 15.1km이고 가와사키로부터 약 10km의 해저구간과 약 5km의 교량으로 구성되어 있으며, 해저깊이는 약 60m이다.

1987년 7월에 공사를 개시하여 1997년 12월에 10년간의 공사를 끝마치고 1997년 12월 18일에 개통되었으며, 총 사업비는 1조 4,409억엔이 소요되었다.

4.2 시설물 구성

동경만 아쿠아 라인의 시설물 구성도를 그림 17에 나타내었으며 각 구성물 각각에 대한 설명은 다음과 같다.

1) 우키시마 입구부

가와사키 우키시마 분기점에서 터널로 들어가는 입구이다. 터널이 해저부에 이르는 약 700m의 경사 성토부으로 구성되어 있다.

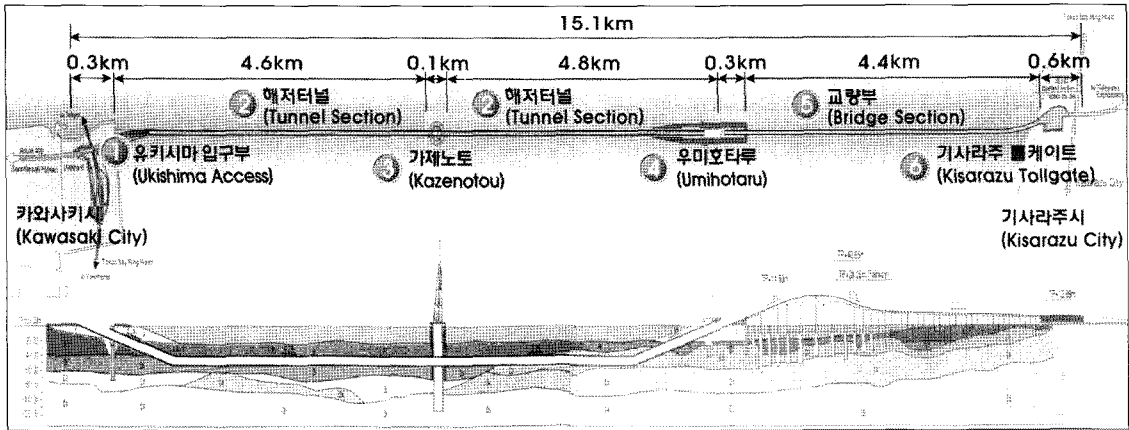


그림 16. 동경만 아쿠아 라인의 노선도

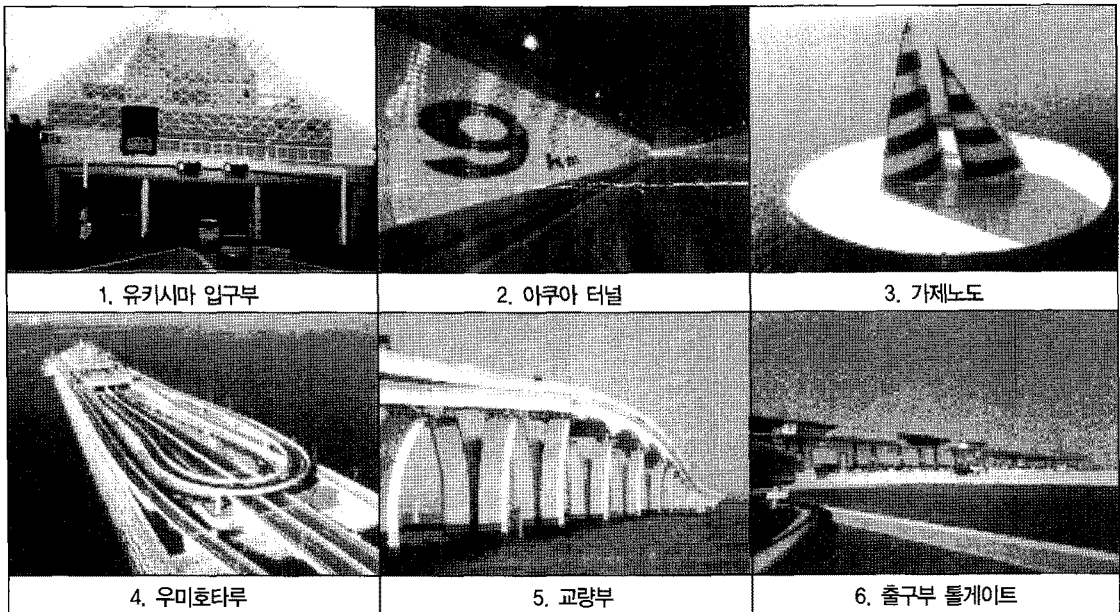


그림 17. 동경만 아쿠아 라인의 시설물 구성도

2) 해저부(아쿠아 해저터널)

우키시마 입구부와 우미호타루까지 이어져있으며, 직경 13.9m, 길이 약 10km에 이르는 해저터널로 구성되어 있다.

3) 가제노토(바람의 탑)

가제노토는 아쿠아 해저터널의 한 중심부에 만들어진 직경 193m에 달하는 원형의 인공섬이다. 공사 중에는 실드머신의 발진기로서 이용되었고, 완성 후에는 터널의 환기시설로 사용되고 있다.

4) 우미호타루(바다 반딧불)

우미호타루는 도로가 터널에서 교량으로 변하도록 만들어진 인공섬이며, 육상시설이 자리잡고 있다. 현재 휴게시설로 이용되고 있으며 많은 사람들이 다녀가는 관광 명소이다.

5) 교량부(아쿠아 교)

이 교량부는 길이가 약 4.4km에 이르며, 우미호타루에서부터 기사라즈 해안까지 교량부로 연결되어 있다.

동경만 아쿠아 해저터널은 복층구조로 건설되었다.(그림 18 참조) 하부의 좌측통로는 공동구 및 탈출로로 이용

하도록 하였다. 중앙통로는 평상 시에는 유지 관리용 차량이 운행되며, 비상 시에는 응급차량이 다닐 수 있다.

4.3 환기시설

동경만 아쿠아 해저터널의 환기는 수직갱, 전기집진기 그리고 환기팬(제트팬)을 이용한 종류식 환기방식이 적용되었다.

그림 19에 아쿠아 해저터널의 환기시설 및 환기경로를 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 터널 입구부로부터 교통환기력과 환기팬(제트팬)을 이용하여 신선외기를

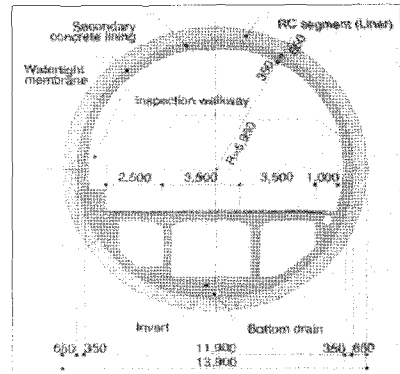


그림 18. 아쿠아 해저터널의 단면도

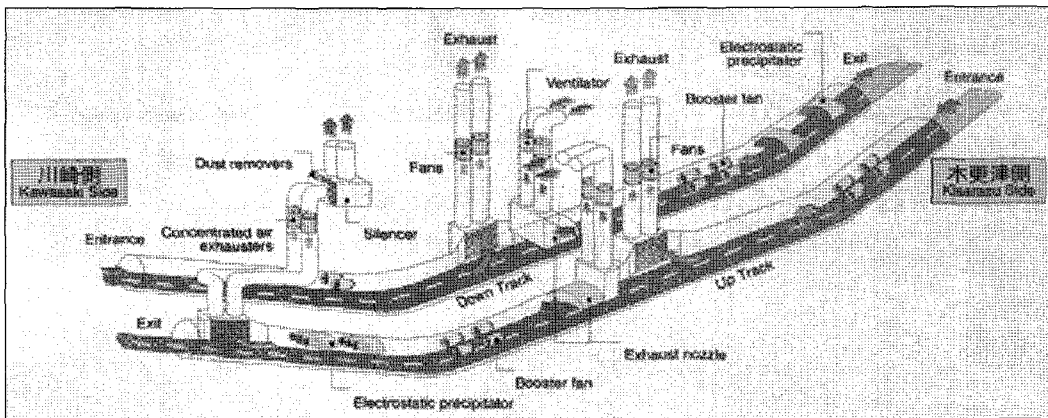


그림 19. 아쿠아 해저터널의 환기시설 및 환기경로

유인시키고 공기의 불순물들을 터널 중앙부 배기팬이 설치된 수직갱을 통해 배출시킨다. 또한 급기팬이 설치된 또 다른 터널 중앙부 수직갱과 환기노즐을 통하여 외부 신선공기를 터널 내로 급기시키고 환기팬(제트팬)과 전기 집진기를 이용하여 공기를 이동시키고 불순물들을 정화시켜 최종적으로 터널 출구로 배출시킨다. 이때 가와사키 측 터널 출구부에는 전기집진기와 배기팬이 설치된 수직갱이 있어 또 한번의 배기가 이루어진다. 이는 가와사키 측 터널출구 밖으로 나오게 되면 육지와 만나게 되는데 육상에서의 오염된 공기를 최소화하기 위함이다.

4.4 방재시설

동경만 아쿠아 해저터널의 방재시설은 크게 화재 발생

시, 화재진압을 위한 소화설비와 안전한 대피를 위한 피난대피설비로 구성된다. 특히 차도상에서 피난입구문과 비상슬로프를 이용하여 하부 비상탈출구로 대피할 수 있는 피난대피시설이 특징적이라 할 수 있다.

터널 내부에는 그림 20에서 보는 바와 같이 소화기, 소화전, 수동 통보기 등으로 구성되어 있다. 화재 감지를 위해 화재 감지기가 25m 간격으로 설치되어 있으며, 전 구간에 스프링클러가 설치되어 있고, 5m 간격으로 스프링클러 헤드가 설치되어 있어서 화재 시 어느 구간에서든 화재진압을 할 수 있도록 소화설비가 구축되어 있다.

터널내 화재 시 차도상에서의 피난이 불가피한 경우, 그림 21과 같이 피난입구문을 통하고 비상슬로프를 이용하여 터널 바닥부의 탈출로로 대피할 수 있다. 또한 피난 유도설비는 비상 시에 그림 22와 같이 비상구를 안내하기

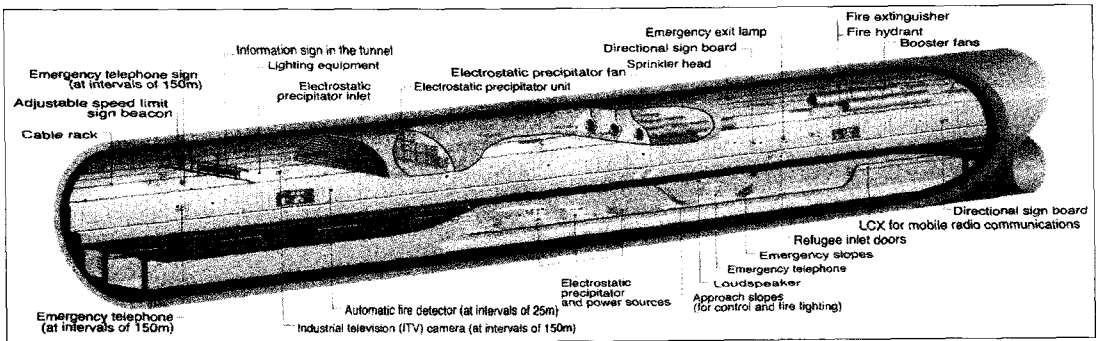


그림 20. 아쿠아 해저터널의 환기 및 방재설비

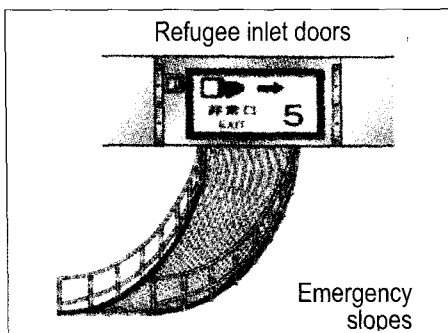


그림 21. 비상슬로프

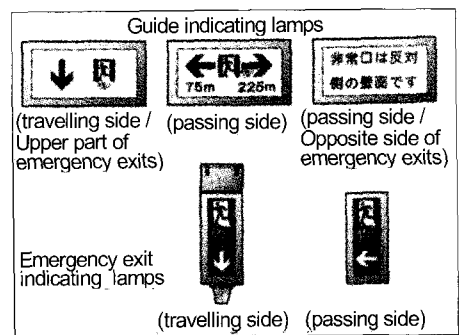


그림 22. 유도표시등과 비상구표시등

위한 비상구 표시등을 300m 간격으로 설치하였고 유도 표시등이 150m 간격으로 설치되어 있으며, 비상시에 연락체제를 위한 전화설비가 150m 간격으로 설치되어 있다.

5. 결론

본 고에서는 유로 해저터널과 세이칸 해저터널 그리고 동경만 아쿠아 해저터널의 환기 및 방재시설에 대해 각각 고찰하였다.

유로 해저터널 환기의 특징은 서비스 터널을 도입한 것과 열차풍에 의한 피스톤 효과를 줄이기 위해 피스톤 릴리프 덕트를 도입한 것이다. 또한 화재 발생 시, 본선 터널로 신선외기를 급배기시키는 비상 시 환기소가 추가적으로 운용되는 것이 특징이다.

세이칸 해저터널은 V형태 터널노선을 활용하여 외부공기를 최대깊이의 터널 중앙부 본선 터널로 급기하고 본선 터널 입·출구부의 수직경도를 통해 배기시키는 특징을 가지고 있다. 또한 방재시설의 특징은 터널 내 비상역 역할을 하는 2곳의 긴급구난역을 도입한 것이다.

동경만 아쿠아 해저터널은 수직갱, 전기집진기 그리고 환기팬(제트팬)을 이용한 종류식 환기방식이 적용되었다. 또한 방재시설은 화재진압을 위한 소화설비와 차도상에서 피난입구문과 비상슬로프를 이용하여 하부 비상탈출

구로 대피할 수 있는 피난대피시설이 특징적이라 할 수 있다.

상기에서 언급한 각 해저터널의 환기 및 방재시설은 고유한 특징을 가지고 있으며 기술적으로 검토할 사항이 많다. 향후 국내에서 초장대 해저터널의 건설이 결정된다면 터널 노선 및 터널굴착방식 등과 더불어 환기 및 방재방식에 관한 세심한 검토가 필요할 것이다. 또한 신개념의 독특한 환기 및 방재방식이 출현되기를 기대해 본다.

감사의 글

본 원고를 작성하는데 자료협조를 제공한 (주)삼보기술 단과 자료정리에 도움을 준 강원대학교 방재설비/CFD연구실 연구원(강성빈, 신건하, 홍지훈)에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 김남영, 이항(2009), "유로해저터널의 환기 및 방재측면에서의 고찰", *대한토목학회지*, 제57권 제8호, pp. 60-67.
2. 건설교통부(2004), "장대철도터널 화염방재기술 및 환기공조시스템개발".
3. 김남영, 이항(2010), "초장대 철도터널의 환기 및 방재시설에 관한 고찰", *설비저널*, 제39권 제5호, pp. 26-35.
4. 김영근, 김성환(2003), "세계 최대 쉘드터널-동경만 아쿠아 터널", *터널기술*, 제5권 제1호, pp. 47-64.