

침매 터널 방재설비 기술

부산 ~ 거제간 연결도로의 침매 터널에 적용될 방재시설에 대해서 소개하고 방재시스템 적용기술 및 성능에 대하여 소개한다.

김 두 호

(주)범창종합기술(dhkim@bumchang.co.kr)

조 형 제

(주)범창종합기술(hjjo@bumchang.co.kr)

구 임 식

(주)대우건설(koois7101@dwconst.co.kr)

김 창 환

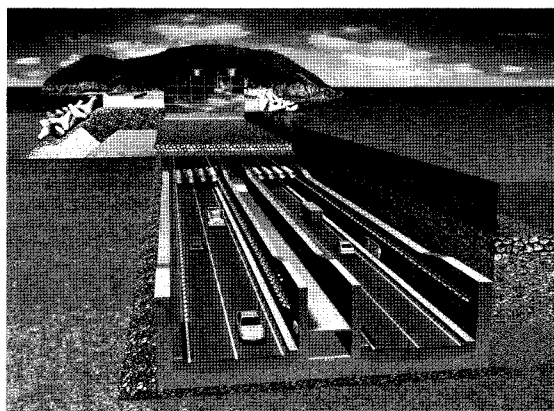
(주)대우건설(chang@dwconst.co.kr)

서 언

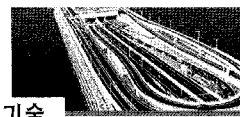
우리나라에서는 섬과 섬 또는 섬과 육지를 연결하는 방법으로서 거의 대부분을 교량으로 연결하여 왔었다. 그러나 얼마 전 국내에선 처음으로 부산 거제간 연결도로(거가대교, 총연장 8.2 km, 왕복 4차선) 중 일부구간(3.6 km)을 침매터널로 연결하는 침매함체 침설공사를 가덕도 앞 해상에서 시작하였다. 침매터널은 바다 밑을 뚫는 일반 해저터널과 달리 터널 모양 콘크리트 구조물인 함체를 지상에서 미리 만든 뒤 바다에 빠뜨려 고정, 연결하는 최첨단 공법이다.

부산 거제간 연결도로는 경상남도 거제시 장목면 유희리와 부산광역시 강서구 천성동을 교량과 침매터널로 연결하여 거제시 관광교통량의 원활한 처리, 부산 신항만 및 주변공업단지에서 발생하는 산업물동량을 지역 교통망에 연결하여 주변개발을 촉진하고, 또한 부산 서남부 및 거제시 주변 교통 취약 지역의 도로망을 확충함으로써 부산·경남 광역권의

원활한 교통에 기여하는 주요 도로로서의 역할을 수행할 수 있도록 계획되었다. 그러나 연결도로 일부 구간에 건설될 침매터널은 반 밀폐공간으로서 일반 도로가 갖는 위험요소보다 더 많은 위험요소를 내포하고 있으며 깊은 수심에 건설된다는 특수한 상황



[그림 1] 부산~거제간 침매터널



때문에 안전성 확보가 매우 중요하다. 특히 화재 발생 시 화재연기에 의한 가시거리의 감소, 유독가스 발생 등에 의해 승객의 생명을 위협받을 뿐만 아니라 발생하는 열에 의하여 구조물이나 각종설비 및 차량의 손상을 유발하여 결과적으로 오랜 시간 동안 통행 불능상태를 초래할 수 있다.

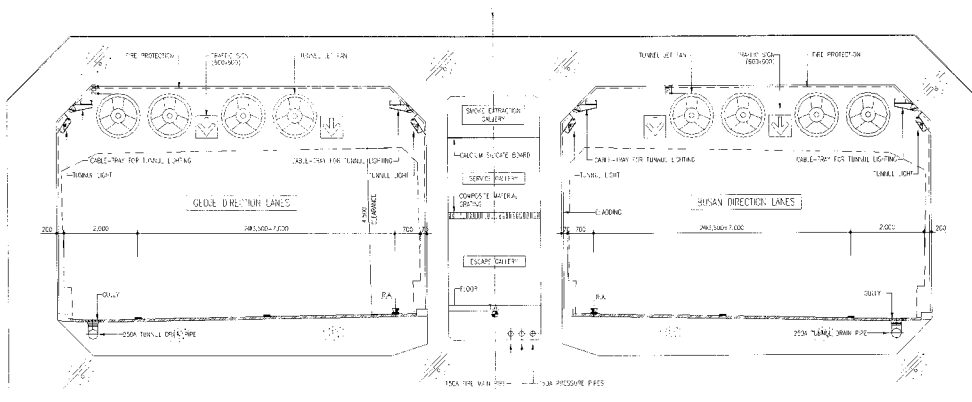
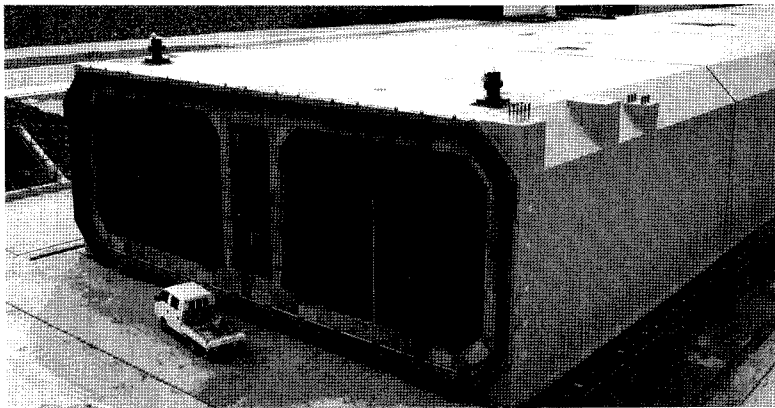
따라서 본고에서는 부산 거제간 연결도로 중 침매 터널 내에서 화재 발생 시 승객의 안전을 확보할 수 있는 방재설비에 대해서 소개하고 방재 시스템의 적용기술 및 성능에 대하여 알아보려고 한다.

침매터널의 방재시설

우리나라 최초의 해저터널인 부산 ~ 거제간 연결 도로에 시공될 침매터널은 그림 2에 나타내는 바와

같이 양방향 터널이 하나의 박스 형태로 이루어진 구조물로서 일반 도로터널과는 달리 터널 중앙에 점검통로 및 공동구로 사용하는 갤러리가 설치되어 각 방향의 터널을 분리하도록 되어있다. 이러한 특성을 이용하여 갤러리 상부공간에 환기 덕트를 설치함으로써 터널의 차도 상부에 설치된 제트팬과 함께 종류식 환기 및 반회류식 환기를 동시에 실시할 수 있는 형태로 설계되어 있다.

이 침매 터널에 적용될 방재시설은 우리나라 소방법규와 도로터널 방재시설 설치지침의 설치기준을 비교하여 더 강화된 규정을 기준으로 선정하였다. 또한 터널 연장이 약 3.7 km(3,665.7 m)로서 1등급 터널(3,000 m 이상)에 해당하기 때문에 위험도 평가의 결과와 관계없이 1등급 터널에 해당하는 방재시설을 적용하였으며 소화설비, 경보설비, 피난설비,



[그림 2] 침매터널의 단면도

소화활동설비, 비상전원설비 등의 방재설비를 설치하였다.

먼저 소화설비로서 한쪽 측벽에 소화기를 내장하여 소화전함을 45 m 간격으로 양방향(거제방향, 부산방향) 각 83개소를 설치하였으며, 반대쪽 측벽에는 소화기함을 90m 간격으로 각 42개소를 설치하였다. 또한 터널 집수정에 포소화탱크 및 포헤드를 설치하였으며, 갤러리 전기판넬 위치에 가스소화설비를 설치하여 소화활동을 수행할 수 있도록 하였다. 경보설비로서 화재감지기 및 CCTV 등을 설치하여 화재발생을 조기에 감지할 수 있게 하였으며 45 m 간격으로 비상경보설비를 설치하였다. 또한 비상방송설비, 비상전화, 라디오재방송설비 및 정보표지판 등을 설치하여 경보전파를 신속하게 할 수 있도록 하였다.

피난설비로서 터널과 갤러리 경계벽에 90 m 간격으로 양방향 각 41개소의 방화문을 설치하였으며 중앙 갤러리를 피난연락경으로 사용하여 승객들을 대피할 수 있도록 하였다.

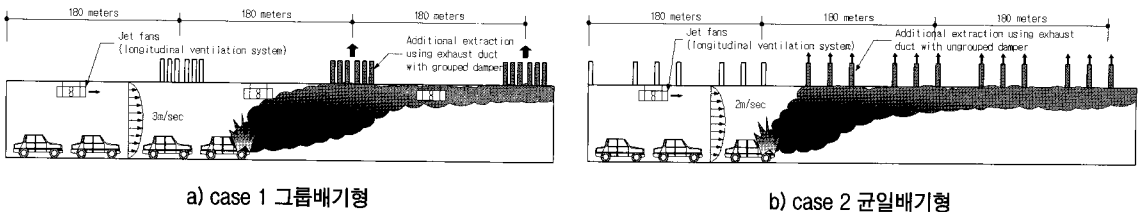
소화활동설비로서 터널의 차도 상부에 제트팬을 이용한 종류식 제연설비를 설치하였으며 이와 동시에 터널 갤러리의 상부에 반횡류식 제연설비를 설치하여 연기를 외부로 배출함으로써 기존의 도로터널에서의 제연 시스템과는 달리 화재 발생 시 승객이 보다 안전하게 대피할 수 있는 환경을 조성하였다.

본 침매터널의 방재시설 기준을 스웨덴과 덴마크를 연결하는 터널 연장 3,750 m의 오레스드(Oresund)침매터널과 비교하여 보면 소화설비의 설치간격은 오레스드 터널(설치간격 : 88 m, 방수용량: 3600 LPM : 1800 LPM 2개소)의 절반정도인 45 m이지만, 방수용량은 2000 LPM(1000 LPM 2개소)으로 유사한 수준이며 비상전원설비 및 방화문의 설치간격도 유사한

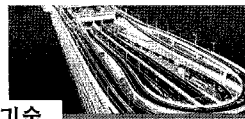
수준으로 설치하였다. 그러나 비상경보설비는 오레스드 터널 절반정도의 짧은 간격으로 설치하였으며 제연 설비는 오레스드 터널이 제트팬에 의한 제연에만 의존하는 반면 본 침매 터널에서는 제트팬과 갤러리 상부의 환기덕트를 통해 배연을 실시하여 보다 안전하므로 침매터널 설계 적용현황은 오레스드 터널의 시설현황보다 강화된 용량으로 선정되어있음을 알 수 있다.

방재 시스템 기술 및 성능

앞에서 언급한 바와 같이 부산 ~ 거제간 연결도로의 침매터널에서는 종류식 환기와 반횡류식 환기를 동시에 실시할 수 있도록 환기 시스템이 설계되어 있다. 이 환기 시스템은 평상시에는 차량으로부터 배출되는 배기가스로 인해 터널 내 공기환경이 기준치를 초과하지 않도록 외기를 공급하여 적정 공기질을 확보하는 역할을 하게 되지만 터널 내 화재가 발생할 경우 그림 3과 같이 반횡류식 환기장치는 배기방식으로 전환하여 터널 측벽 상부로의 부분 배연을 실시하는 방재설비 역할을 하게 되며 차도 상부에 설치된 제트팬은 차량진행의 반대방향으로 연기흐름을 방지하는 제연시스템으로의 역할을 하게 된다. 현재 우리나라에 건설된 대부분의 터널은 종류식 또는 횡류식 중 한가지 방식에 의한 제연 또는 배연을 실시함으로써 침매터널에 적용될 복합적인 제연방식을 사용하는 곳은 존재하지 않는 실정이다. 이에 따라 본고에서는 이 시스템이 실제 침매터널에 적용될 경우 화재 발생 시 제연에 필요한 제트팬을 선정하고 임계풍속을 결정하며 부분 제연 시스템인 갤러리 제연팬의 제연성능을 검증하기 위하여 수치 해석을 실시하였다.



[그림 3] 침매 터널 화재 시 배연 방식



임계풍속 및 제트팬 선정

먼저 터널 내 화재 시 제연에 필요한 용량 산정을 위하여 임계풍속 결정에 관한 수치해석을 실시하였다. 일반적인 도로 터널의 화재에 대해서는 버스 1대가 전소하는 규모에 해당하는 20 MW를 화재규모로 선정하지만 본고의 침매 터널에서는 해저구간에 설치되는 특성상 안전성을 강화하기 위하여 화재규모를 발생 가능한 최대 규모의 화재인 100 MW에 대하여 선정하였다. 임계풍속은 Tetzner식을 이용하여 계산하였으며 수치해석을 통하여 신뢰성검증을 실시하였다.

본 침매터널에서 100 MW에 대한 임계풍속 값은 3.35 m/s($\beta = 0.25$ 적용)로 계산되었으며 이에 따라

상용프로그램인 FLUENT를 이용하여 검증을 실시하였다.

FLUENT에서는 k- ϵ 모델을 사용하여 난류 모델을 해석하였으며 solver는 Segregated Solver Simple Method를 이용하였다. 이 때 터널 내 격자수는 약 20만개이며 연장 400m에 대하여 해석을 실시하였다.

해석결과로서 표 1에 나타낸 바와 같이 임계풍속이 3.30 m/s 일 경우 화재연기가 터널의 상류방향으로 거슬러 올라가는 연기의 역류 현상이 발생하나 임계풍속을 3.35 m/s로 적용할 경우 화재연기는 역류현상이 발생하지 않고 적절하게 제어 되었다. 따라서 터널의 임계풍속은 초기 화재 시는 2.0 m/s로 적용하며, 화재규모가 100 MW에 도달 시 3.35 m/s가 되도록 풍속을 제어하여야 한다. 또한 표 2와 같

<표 1> 제트팬에 의한 임계풍속 해석 결과

구분	해석결과	
	Vr = 3.30 m/s 적용	Vr = 3.35 m/s 적용
연기확산경로		
CO 등농분포		
종단면 온도분포		

<표 2> 침매 터널 화재 시 제연용 제트팬 선정

차량속도 (km/h)	10	20	30	40	50	60	70	80
터널내 차량수	462	385	332	293	263	239	219	203
필요소압력	30.72	27.65	25.53	23.97	22.77	21.82	21.02	20.38
제트팬압력	1.28							
제트팬대수	24.00	21.60	19.95	18.73	17.79	17.05	16.42	15.92

이 터널 내부의 차량 수와 차량 속도에 대하여 제트팬의 대수는 최대 24대가 필요하다. 그러므로 제연용 제트팬은 화재위치의 제트팬 고장을 고려하여 예비용 제트팬 4대를 설치함으로써 총 28대로 선정하였다.

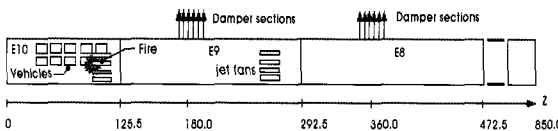
제연 시뮬레이션

갤러리 제연팬에 의한 부분제연시스템은 배기구의 설치위치에 따라 제연성능에 차이가 발생할 수 있기 때문에 그림 4에 나타나는 바와 같이 배기구를 그룹화하여 설치하는 경우(Case 1)와 배기구를 터널 전체적으로 균일하게 배치하는 경우(Case 2)의 2가지의 대표적인 시스템에 대하여 제연성능을 검증하였다. Case 1에서는 댐퍼구역사이의 거리를 180 m로 설정하여 6개의 댐퍼를 그룹화 하였으며 각 그룹 내 댐퍼의 간격은 2 m로 구성하였다. Case 2에서는 각 댐퍼 사이의 거리를 22.5 m로 균일하게 배치하였다. 또한 방화문은 터널 입구로부터 146 m, 236 m 및 326 m 지점에 설정하였다.

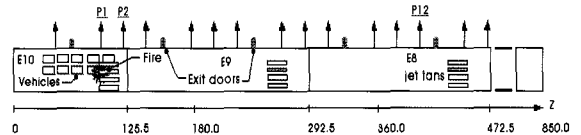
수치해석은 상용프로그램인 STAR-CD를 사용하였

으며 매연수송방정식(transport equation of soot)을 포함한 3차원 보존방정식을 계산하였다. 난류모델은 RNG k- ϵ 모델을 사용하였으며 복사열전달은 화재로부터 열방출을 조절하면서 모델화 하였다. 해석 대상은 터널구역 일부부인 터널 연장 850 m에 대하여 약 35만개의 제어체적으로 구성하여 해석하였으며 이 때 모델구역의 제트팬은 정지한 것으로 가정하였다. 또한 화재의 크기는 시간의 함수로서 왼쪽에서 오른쪽으로 확산되며 화재의 위치는 터널의 종축에 대하여 중앙에서 벗어난 비대칭 위치를 선택하여 최악조건인 상황 하에서 해석하였다.

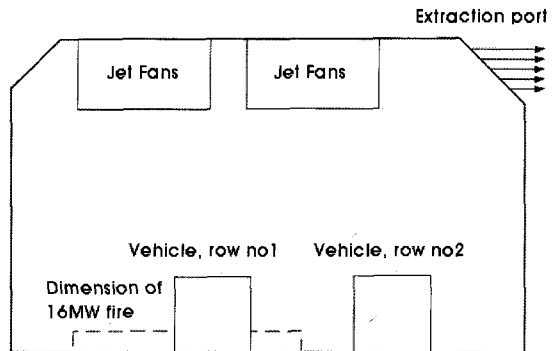
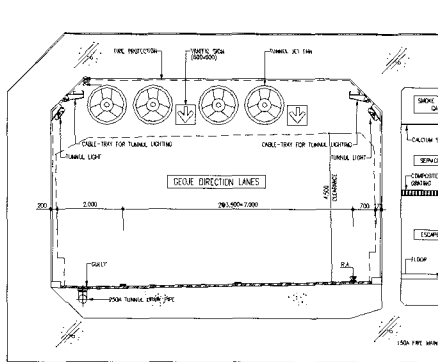
해석모델의 초기경계조건은 압력 1 bar, 내부 온도 293 K이며 벽경계는 non slip 조건으로 가정하였다. 각 댐퍼 크기는 1.84 × 2 m의 면적이며 작동 전에는 모두 닫혀 있는 것으로 가정하였다. 또한 터널의 초기 풍속은 9.7 m/s를 공급하여 비정상상태의 해석을 위한 초기 유동장으로 사용되었다. 화재모델은 터널 입구로부터 90 m 거리에 위치해 있으며 최대 16 MW 크기로 2대의 승용차에 화재가 발생하며 화재 24분 후에 최대 열부하에 도달하여 이후의 화재규모는 일정한 것으로 가정하였다.



a) case 1. 그룹배기형

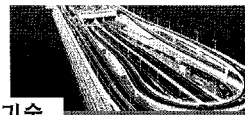


b) case 2. 균일배기형



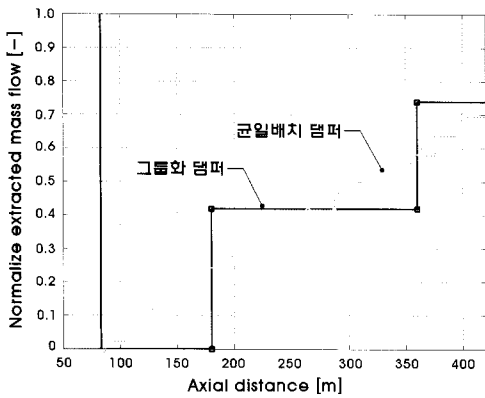
c) 침매 터널 해석 구간의 횡단면도

[그림 4] 침매터널 해석모델의 개략도

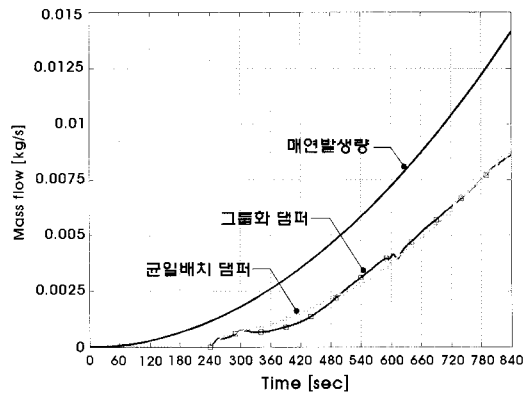


해석결과로서 각 Case에 대한 매연 배출량을 그림 5에 나타내었다. 2조건 모두 매연발생량의 약 70%를 제거하는 결과로 나타났으며 댐퍼가 그룹화된 경우가 균일하게 설치된 경우보다 약간 나은 성능을 보여주었다. 특히 화재위치에 근접한 댐퍼구역에서는 Case 2가 Case 1보다 나은 성능을 보여주었으나, 화재위치에서 멀리 떨어진 구역에서는 Case 1에서의 성능이 Case 2 보다 좋게 나타났다.

표 3은 도로 바닥으로부터 2 m 위의 평면에서 시간대별 가시도 현황을 나타낸 결과이다. 여기서 146 m, 236 m 및 326 m지점은 방화문 위치이며 180 m와 360 m는 그룹 배기형 덕트의 위치이다. 표에 나타나는 바와 같이 화재초기에는 Case 2에서 화재위치 인근에서의 가시도가 더 좋은 것으로 나타났으나, 화재이후 10분경부터는 Case 2의 가시도가 점차적으로 악화되어 Case 1에서 가시도가 더



a) 거리별 누적 매연배출량

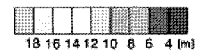


b) 시간대별 매연배출량

[그림 5] 터널 Case별 매연 배출량

<표 3> 시간대별 가시도 해석 결과

시간 [sec]	Case 1. 그룹배기형					Case 2. 균일배기형						
	0	146	180	236	326	360	0	146	180	236	326	360
270	[Visibility image]											
420	[Visibility image]											
480	[Visibility image]											
540	[Visibility image]											
600	[Visibility image]											
660	[Visibility image]											
840	[Visibility image]											



좋은 것으로 나타났다.

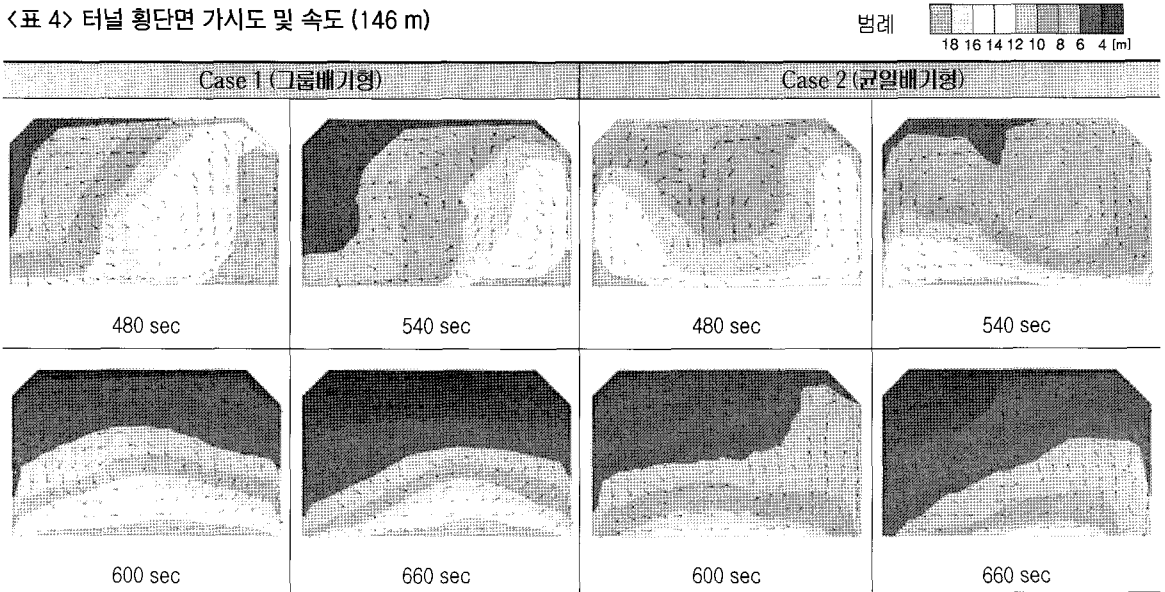
표 4 및 표 5에 방화문이 위치한 146 m 지점과 236 m 지점에서의 시간대별 가시도 및 속도벡터에 대한 단면을 나타내었다. 방화문은 단면상의 우측면에 위치해있다.

해석결과로서 146 m 지점과 236 m 지점 모두 화재

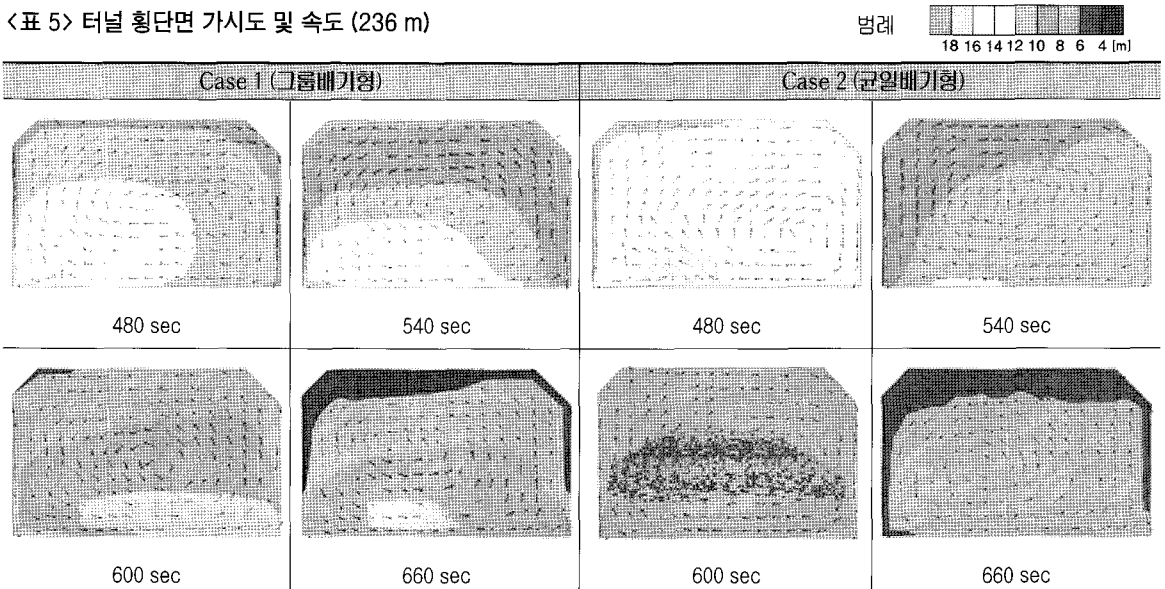
초기에는 Case 2에서의 가시도가 더 좋은 것으로 나타났다, 화재이후 9 ~ 10분경부터 Case 1에서의 가시도가 더 좋게 나타나고 있다.

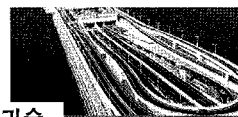
이것은 최초 화재 시 화재연기의 발생량이 적기 때문에 균일 댐퍼에서도 충분히 화재연기를 배출할 수 있기 때문이며 점차 화재연기의 발생량이 증가됨에

<표 4> 터널 횡단면 가시도 및 속도 (146 m)



<표 5> 터널 횡단면 가시도 및 속도 (236 m)





따라서 균일배기형 댐퍼는 적은 크기의 댐퍼 때문에 원활한 배기를 하지 못하게 되는 것으로 판단된다. 따라서 댐퍼의 배치가 그룹화된 Case 2에서 처럼 화재연기를 집중적으로 배출하는 것이 배출효율이 높아 상대적으로 가시도가 좋게 나타나는 것으로 사료된다.

피난대피 안전성 검토

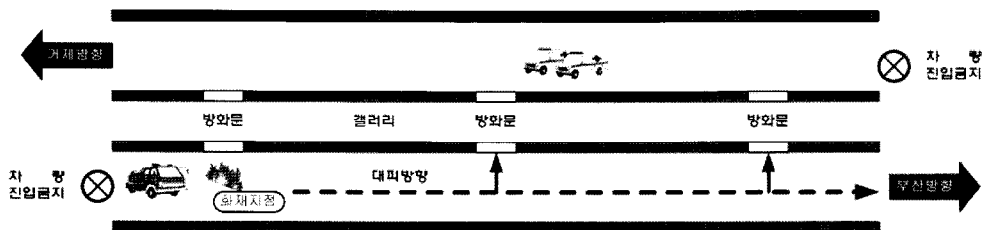
침매 터널에서의 안전성 검토를 위하여 차량화재가 발생한 경우 운전자가 차량으로부터 안전지대까지 탈출하는 과정에서 화재연기로부터 영향을 받지 않고 안전하게 대피할 수 있는지의 여부를 판단하기 위하여 피난대피 프로그램인 SIMULEX를 이용하여 해석하였다.

화재 시 제연운전은 제연시뮬레이션의 운전조건과

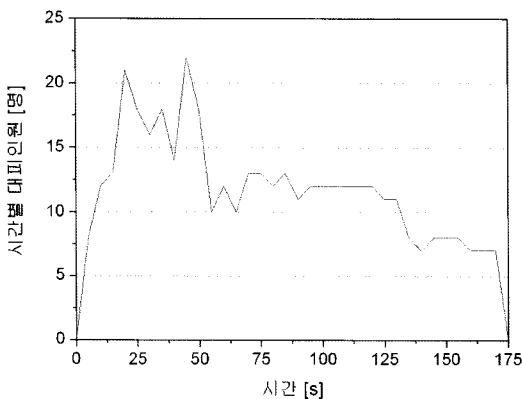
동일한 것으로 가정하며, 화재연기의 확산분포는 제연시뮬레이션의 수행결과를 기준으로 하였다. 또한 화재발생 시 터널 내 차량운행이 지체되어 화재차량 전방의 차량이 계속 운행하여 터널 밖으로 신속히 탈출하지 못하고 화재초기동안 정체되어 있는 조건으로 가정하였다.

해석 조건으로서 최악의 조건에 대한 해석을 위하여 화재위치를 방화문 인근으로 설정하였으며 방화문의 간격은 90 m, 터널 내 차량은 10 km/h의 속도에서 화재 발생 후 3분 동안 터널 내 진입한 차량을 포함하여 58대를 혼입율에 따라 배치하였다. 이 때 총 대피 인원은 408명이며 해석구간은 180 m로 설정하였다. 그림 6은 피난 대피에 대한 화재시나리오를 나타낸다.

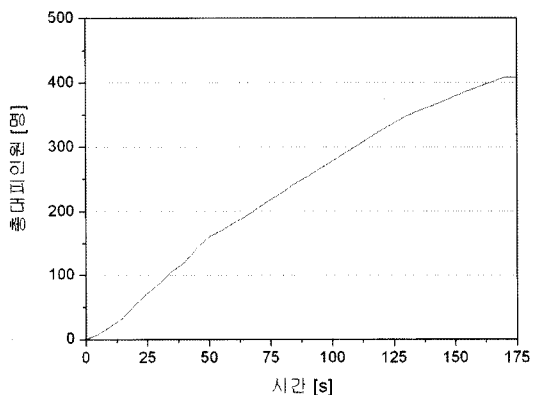
그림 7은 피난대피 안전성 분석의 결과를 그래프로 나타내었다.



[그림 6] 터널 화재 발생 시 피난 대피 시나리오



a) 시간대별 대피인원



b) 총대피인원

[그림 7] 피난대피 안전성 분석 결과

화재차량 전방 첫 번째 방화문(146 m 지점)까지 화재연기가 확산되어 피난대피 가시도 기준 10 m를 초과하는 시점은 화재이후 약 480초이며 두 번째 방화문(236 m 지점)까지 가시도 10 m 기준을 초과하는 시점은 540초 정도로 나타났다. 여기서 승객이 피난대피에 소요되는 시간은 175초로서 화재를 인지하고 피난대피를 시작할 때까지 약 2 ~ 3분이 소요된다고 가정할 경우 총 소요시간은 295 ~ 355초가 소요될 것으로 예상되었다. 따라서 모든 승객이 피난대피를 완료하는 시각까지 화재차량 전방의 가시도는 기준치 10 m 이상을 유지할 것으로 예상되었으며, 차량 지체시에도 터널내 운전자는 화재연기를 피해 안전하게 대피 가능할 것으로 판단되었다.

결 언

본고에서는 부산 거제간 연결도로의 침매터널 내에서 화재 발생 시 승객의 안전을 확보할 수 있는 방재시설에 대하여 살펴보았으며 방재 시스템의 적용 기술 및 성능에 대하여 알아보았다.

침매 터널에서는 기존의 일방향 터널에서 주로 사용되었던 제트팬에 의한 제연방식에서 한단계 진보하여 종류식 제연방식 뿐만 아니라 터널의 중앙 갤러리에서 부분 배연을 실시하는 횡류식 배기방식을 동시에 실시할 수 있는 복합 시스템을 적용하였다. 수치해석을 통하여 시스템의 배연 성능 및 안전성 검토를 실시한 결과 모든 승객이 피난대피를 완료하는 시각까지 화재차량 전방의 가시도는 기준값 이상을 유지할 것으로 예상되었으며, 차량 지체 시에도 터널내 운전자는 화재연기를 피해 안전하게 대피 가

능할 것으로 판단되었다. 그러나 터널 화재는 승객의 심리적 작용 및 의의성이 여전히 존재하므로 이와 관련된 여러 방향의 연구가 계속 되어야 할 것이며 보다 안전한 방재시스템의 설계를 위한 활발한 연구 및 기술 개발이 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. N. H. Danziger and W. D. Kennedy, "Longitudinal Ventilation Analysis for the Glenwood Canyon Tunnels", 4th Int. Sym. on the Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.169-181(1982).
2. D. Tetzner, R. Pollak, and M. sippel, "Critical Velocity - Comparative Assesment of Test Results and CFD Simulation", International Conference on tunnel fire and Escape from Tunnels, pp.181-190(1999).
3. Y. Wu and M. Z. A. Baker, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation System - A Study of the Critical Velocity", Fire safety Journal, Vol. 35, pp.363-390(2000).
4. O. Vauquelin and O. Megret, "Smoke Extraction Experiments in Case of Fire in a Tunnel", Fire Safety Journal, Vol. 37, pp.525-533(2002).
5. COWI., "Busan-Geoje Fixed Link, Immersed Tunnel:Partial Smoke Extraction System - CFD Calculation" (2004). 