

터널의 제연설비 설계절차 및 성능평가

터널의 화재에서 발생하는 연기를 제어하기 위한 제연설비의 설계 및 성능평가 절차에 대한 내용을 소개하고자 한다.

김진국

화재가 발생하면 일산화탄소와 같은 독성가스가 포함된 연기가 생성되고, 위로 상승한다. 일반건물의 경우에는 화재발생지역에서 연기가 천장에 축적되다가 창문, 문과 같은 개구부를 통하여 다른 장소로 전파된다. 그러나 터널의 경우에는 화재발생시 인위적으로 연기를 배출하지 않으면 연기가 터널에 가득 차게 되는 밀폐구조이고 특히 궤도차량용 터널인 경우 소방법상의 시설물에 대한 규정을 두고 있지 않고 있으며, 다른 용도 터널의 경우에도 제연에 대한 특별한 기술적인 규정이 없어 적절한 제연설비를 갖추지 않는 경우에 화재발생시 대형 인명사고가 발생할 가능성이 높다. 본 고에서는 국내 터널에서 가장 많이 적용되고 있는 종류식 환기설비를 기준으로 연기거동의 특성, 제연설계절차, 성능평가에 대하여 소개하고자 한다.

역기류와 임계유속

터널에서 화재가 발생하면 그림 1과 같이 화재에 의하여 생성된 연기가 부력에 의하여 상승하고 터널의 천장을 만나면 터널의 길이 방향으로 전파된다. 종류식 환기설비의 경우 피난 방향으로 연기가 전파되지 못하도록 피난방향에서 화재 방향으로 기류를 불어주게 되는 데 이 기류를 이기고 피난방향으로 연기가 전파되는 현상을 역기류(backlayering)라고 하며 이는 연기가 흐르고자 하는 힘이 연기를 제어하고자 하는 힘보다 크기 때문에 발생한다. 일단 역기류가 형성되면 피난하던 사람들이 연기의 독성가스에 의하여 질식하게 되므로 인명피해가 발생하게 된다. 이러한 역기류가 발생하지 않도록 불어주는 최소한의 유속을 임계

속도(critical velocity)라고 하며 제연설계시 제연유속을 임계유속보다 크게 되도록 설계하여야 한다.

임계속도는 아래 식에 의하여 계산할 수 있는데 경향을 살펴보면 동일한 화재에 대하여 터널의 높이(H)가 클수록, 터널면적(A)이 작을수록, 구배(K)가 클수록, 설계화재(Q)가 클수록 더 큰 임계속도가 요구되므로 팬의 용량을 설계할 경우 이러한 점을 잘 이해할 필요가 있다. 연기의 평균온도는 팬의 온도등급을 결정할 때 사용할 수 있다.

· 임계속도

$$V_c = K_g \left[\frac{gHQ}{Fr_c \rho C_p A T_f} \right]^{1/3}$$

· 구배효과

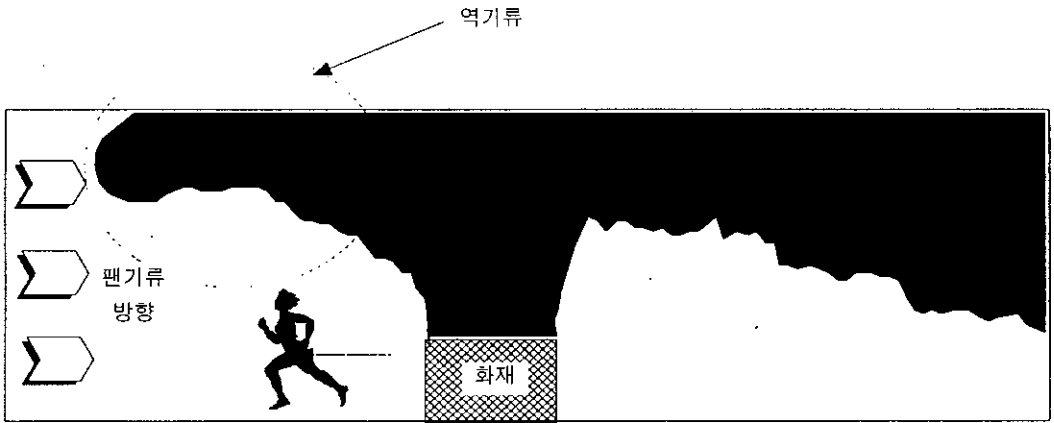
$$K_g = 1 + 0.0374(\text{grade})^{0.8}$$

· 연기평균온도

$$T_f = \frac{Q}{\rho C_p A V_c} + T$$

SES (subway environmental simulation)

복잡한 터널 구조의 경우에도 각 구간의 화재에 대한 임계유속이 평가되었으면, 주어진 환기설비에 의하여 생성될 수 있는 공기의 유속을 평가해야 한다. 이러한 것을 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램 중에 SES라는 것이 있어 이를 소개하고자 한다. SES 컴퓨터 프로그램은 복잡한 지하철도 시스템의 유동, 열전달 습도 및



[그림 1] 터널에서의 화재와 역기류

공조 시스템의 해석을 위해 미 교통부의 Volpe National Transportation Systems Center의 지원하에 Parson Brinckerhoff에 의해 개발되었다. 그 동안 서울을 비롯한 세계 유수의 도시들에서 충분한 검증을 거쳐 오고 있는 소프트웨어이다. 주요 성능으로는 복잡하게 얽혀 있는 지하철도망과 다양하게 운행되는 지하철의 운전상태를 고려한 철도망내의 공기유동해석, 열역학적인 해석 및 습도의 예측 등을 할 수 있도록 되었다. 최근에는 화재 발생시에 발생 될 수 있는 현상들을 시뮬레이션할 수 있는 화재모델이 추가 되어 역기류현상 등을 예측 할 수 있도록 설계 되어져 있다. 이는 특히 뜻하지 않은 사고의 발생시 승객의 안전한 대피 시간이나 경로등의 설계에 매우 중요한 영향을 미치고 있다. SES는 그림 2와 같이 크게 4가지의 모듈로서 구성되어 있으며, 서로 연결되어 전체적인 시스템을 해석한다.

터널의 제연설비 설계절차

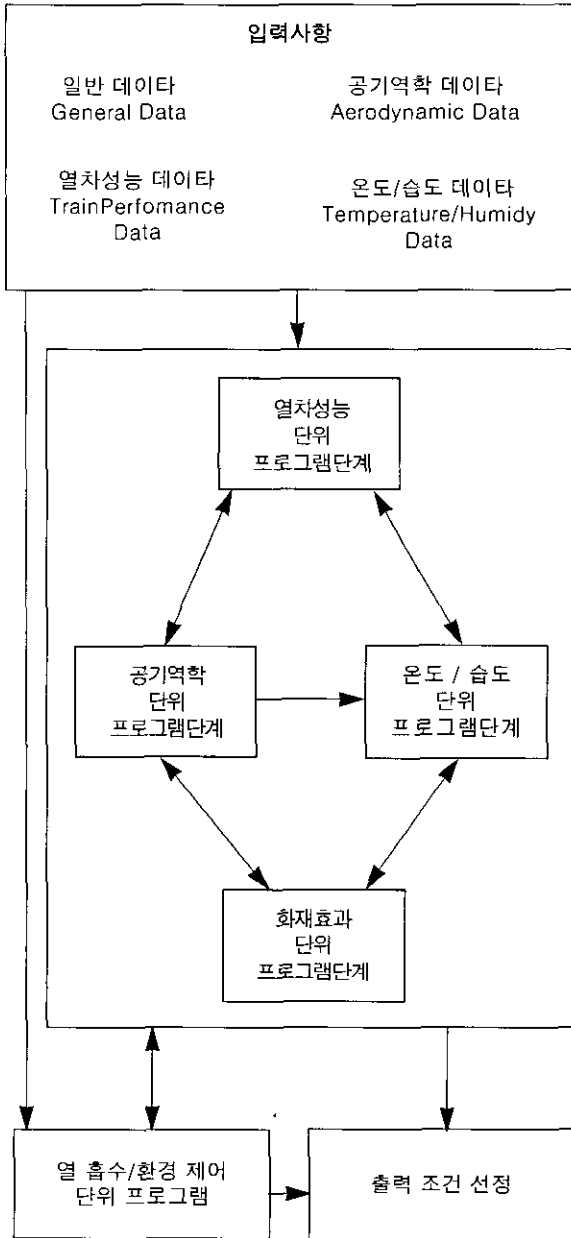
터널의 제연설비 설계절차에 대한 흐름도를 그림 3에 나타내었다. 터널과 환기방식이 주어지면 먼저 필요한 제연용량에 대한 기초 자료를 만들기 위하여 임계유속에 대한 평가를 하여야 한다. 임계유속이 주어지면 이를 만족시키기 위한 개략적인 압력손실과 풍량을 고려한 팬의 성능을 결정한다. 다음으로 예상되는 상황에 대하여 어떤 팬을 어떻게 구동시킬 것인가를 결정하는

구동모드를 선정한다. 팬 구동모드의 선정에 있어서는 단순한 제연유속의 생성뿐만 아니라 피난과 구조활동 또한 고려해야 한다. 압력과 유량의 성능곡선을 SES와 같은 소프트웨어에 입력하여 각 구간의 제연유속을 계산하고 각 구간에서 임계유속과 비교한 후 화재관련 구간이 임계유속보다 크면 설계조건을 만족한다. 이러한 설계방식은 단순한 구조를 가지는 터널에 대해서는 충분하다고 사료되지만 터널내부 구조 및 차량의 운행방식이 복잡한 경우에는 3차원 CFD와 같은 정밀한 해석방법이 요구되기도 한다.

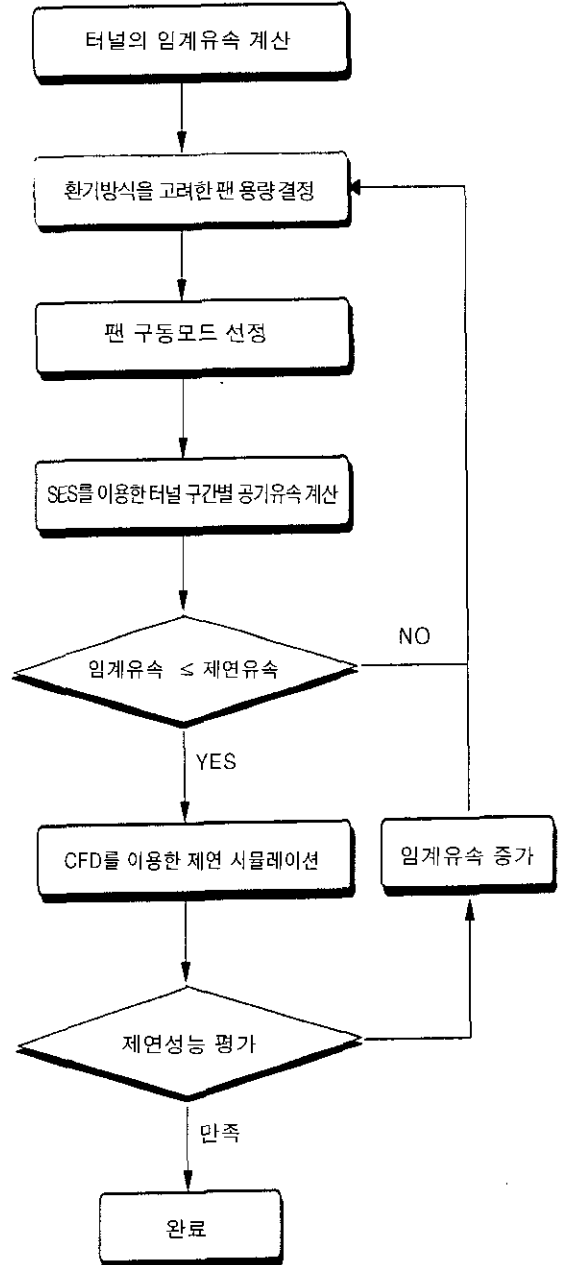
터널의 제연설비 성능평가

제연시스템을 평가하기 위하여 도입되는 방법 중 하나가 고온연기시험기법으로써 인공열원과 인공연기를 이용하여 화재를 모사하는 것이다. 브루셀공항 건물에서 실제 적용되고 있는 장면을 그림 4에 나타내었다.

이 기법은 구조물이 내장까지 완성되었을 때에도 적용할 수 있는 방법으로 청정 화재를 사용하므로 화재로부터 발생하는 연기에 의한 구조물 오염이 없다. 다만 좁은 공간에서 많은 발열량 즉 대형 화재를 사용할 경우에는 내장과 구조물을 열적으로 보호하기 위한 단열재를 사용해야 한다. 안전한 온도의 연기를 필요한 양만큼 생성할 수 있는 화재의 크기를 선택한다. 설치된 제연설비가 설계기준을 만족한다는 것을 보여주기 위해서 모사(simulated) 시험화재 조건을 사용하여 제



[그림 2] SES 프로그램 구조



[그림 3] 제연설비 설계절차



[그림 4] 브루셀 공항건물에서의 고온 연기시험

연설비의 작동, 제어순서, 역기류의 제어 등 제연설비의 정확한 성능을 알아보기 위한 방법이다. 그러나 실제 화재에서 연기의 농도 및 시스템의 완벽성을 확인하기 위한 수단은 아니다. 그리고 이 시험방법을 모든 제연시스템에 항상 적용해야 되는 것은 아니며 일부 제연시스템에서 발생할 수 있는 불확실성을 해결하기 위한 수단을 제공하는 것이다. 마감하기 직전에 시험과 관련된 제연시스템을 포함한 공조시스템이 설치되고 점검이 끝난 후에야 시험이 수행될 수 있다.

제연설비를 유효성을 확인하기 위해서는 성능에 관계된 어떤 항목을 확인해야 하는지 관련당국과 협의단계에서 결정하여야 한다. 시험을 수행할 때 최소한 다음과 같은 기준은 만족해야 한다.

- 설계조건에 부합하도록 제연설비가 작동하여야 한다.
- 터널에 결함이 있더라도 제연설비가 심하게 영향을 받아서는 안된다.
- 시험 중에 제연설비 요소 중 하나라도 작동하지 않는 경우가 있으면 안된다.

시스템 준비

시험이 수행되기 전에 일상적인 환기시스템을 충분한 시간동안 작동시켜 평상시의 내부적인 환경조건을 만

들어야 한다. 새로운 설비 및 장비는 설계조건에서 적어도 4시간 동안 작동시켜야 한다. 위의 조건이 요구하는 것은 충분한 시간동안 공조 시스템이 정상적으로 작동할 수 있음을 확인하기 위해서이다. 이 조항을 돕으로써 터널에서 설계온도조건을 만족하도록 하여 시스템들이 제대로 작동함을 보임과 함께 비정상적인 내부온도 등에 의하여 야기될 수 있는 불리한 내부 환경조건을 피하고자 함이다.

시험화재의 크기

시험화재의 크기는 설계변수를 근간으로 해야 하며 어떤 경우에도 구조물의 손상을 주는 온도가 되지 않도록 해야 한다. 시험화재의 크기는 안전한 최대천장온도(maximum safe ceiling temperature) 이하로 제한된다. 이 온도는 화재진압장치의 작동이나 천장 재질에 손상을 주는 온도보다 최소 10℃ 낮은 온도로 선택된다. 천장을 보호하기 위한 수단이 주어지고 어떤 화재진압장치도 작동을 하지 않을 것이라는 확신만 있으면 더 높은 온도를 선택할 수 있다.

성능 기록 및 판단사항

성능평가와 관련하여 전문가가 기록 및 판단해야 할 사항은 다음과 같다.

- 수행된 시험 횟수
- 제연설비의 작동과 역기류 제어 유무
- 제연유속
- 작동실패 및 시험중지의 원인(있는 경우)

제연설계 및 성능평가에서 문제점

제연설비의 설계나 성능평가에서 항상 논점이 것은 화재규모이다. 이 화재규모에 의하여 제연유속이 변하고, 성능평가에 사용되는 화원의 규모가 결정되는데, 아직 국내에서는 화재규모에 대한 규정, 지침 또는 학계와 기술계에서의 합의점이 없어 항상 논쟁의 근원이 될 수 있다. 따라서 이러한 점에 대한 여러 분야의 전문가들이 모여 합리적인 방법에 대한 논의와 결론이 있으면 하는 바람이다. ㉞