

도로터널 환기/방재 T.A.B 효율성 제고에 관한 연구

강병호*, 류승원
(주)범창종합기술

A Study to raise the efficiency of T.A.B for ventilation and safety of road tunnel

Byung-Ho Kang*, Seung-Won Yoo
Bumchang Engineering Co., Ltd.

제1장 머리말

도로터널 환기/방재의 T.A.B란 원활교통시 터널내의 쾌적환경 조성과 터널내 화재사고 발생시 안전한 대피 환경제공을 위해 터널내에 설치된 환기설비 및 제연, 방재시설의 시험, 조정 및 평가를 말한다. 과거 도로터널환기는 T.A.B에 대한 필요성을 인지하지 못하여 적용을 등한시 한 결과 터널내 오염분포가 균일치 못하였으며 설계치와 실제와의 차이가 발생하였다. 그러나 생활수준의 향상과 산업의 발달로 터널내의 쾌적환경에 대한 요구가 높아지고, 최근의 터널 화재에서와 같이 비상시의 방재 설비 역할에 문제점이 도출되어 더욱더 T.A.B의 중요성이 증가되고 있는 실정이다.

이에 따른 T.A.B 기술도 향상되어 최근에는 환기설비가 갖추어진 거의 모든 터널현장에서 환기/방재 시설의 반영과 T.A.B를 실시하고 있다.

T.A.B 수행은 설계치와 실측치를 비교하여 설계의 적합성에 대한 실정 파악에 커다란 의미가 부여 된다고 생각된다. T.A.B를 통해 얻어진 각종 자료들이 설계 또는 터널의 유지관리 특히, 화재시에 적절한 대처 방법을 제시하는데 유익한 자료가 되었으면 하며 제시분야의 발전과 더불어 좀 더 낮은 방향 즉, 효율성, 안정성 측면의 지속적인 향상된 노력이 필요하다.

옥내소화전등의 수계통은 생략하기로 한다.

제2장 도로터널 환기/방재 T.A.B의 개요

2.1 목적

도로터널 환기/방재시설은 도로터널내 쾌적한 환경조건 제시, 비상사태 발생시 사고 예방, 초기대응, 피난대피, 소화 및 구조활동, 사고확대방지 등으로서 인명피해와 재산상의 손실을 최소화, 아니 극소화 하는데 기본목적으로 한다.

2.2 방재계획

①건교부와 도로공사의 2004년 12월 발표된 도로터널방재시설 설치지침을 참고하면

도로터널 방재시설은 사고에 대한 예방적인 조치 및 사후조치 전반에 걸쳐서 방재시설의 역할을 정확하게 인식하고 시설간의 연계성과 설치목적을 고려하여 관리운영계획을 명확하게 계획하여야 한다.

②터널 방재시설은 관리체계에 영향을 주게 되므로 관리체계와의 관계를 고려하여 계획 되어야 한다.

③터널화재시 도로이용자가 상황을 판단하여 피난 및 대응조치를 취하거나 소방서등 관계기관이 현장에 도착하여 본격적인 소화활동을 하게 되므로 이 점을 고려하여 화재의 시간적경과에 따른 대응책을 마련하여야 한다.

④터널방재시설중 환기방식별 제연설비규모 배치, 운영 등의 계획은 실험적인 방법(T.A.B)이나 수치해석(시뮬레이션)적인 방법을 통해서 신뢰성을 검증하여 설치목적에 부합되도록 계획한다.

2.3 도로터널 T.A.B 수행업무요약

(1)수행내용

- ①시뮬레이션(환기, 제연)
- ②환기 및 제연계통의 풍량, 풍속, 풍압 측정
- ③터널외부 풍향, 풍속측정 및 터널내 자연통풍력측정(보정계수용)
- ④소음 및 진동측정
- ⑤종합보고서작성

(2) 세부업무

①시스템검토 및 시뮬레이션(2D,3D)

설계도면, 설계계산서 및 설계에 참고된 자료를 활용하여 터널내 기류분포, 농도분포, 제연시 기류분포 등 시뮬레이션을 하여 환기량 측정이 원활히 수행될 수 있도록 검토하고 미비점을 관련자가 보완하도록 제시한다.

②예비보고서 작성

시스템검토 및 시뮬레이션 결과치를 작성하고 T.A.B 작업 절차에 대한 내용 등을 정리하여 보고서로 제출한다.

③터널 풍속, 풍향, 풍압측정

모든 사항이 완료된 후 수행 절차서에 따라 T.A.B 작업을 실시한다.

④자동제어 계통 점검

설계의도에 적합한 운영방법 및 운전모드를 제시한다.

⑤소음 및 진동측정

제트팬 가동시의 소음 및 진동을 측정한다.

⑥종합보고서 작성

상기 측정 결과치를 종합 분석하여 터널에서의 승압력과 저항, 자연환기력) 등을 상세히 기술하여 향후 터널 운전 관리시 필요한 자료가 되도록 한다.

제3장 도로터널 환기/방재 T.A.B의 실시사례

3.1 터널명 : OO터널

3.2 터널연장 : 상행 : 1,909 [m]

하행 : 1,939 [m]

3.3 도로현황 : 일반국도(일방향교통)

표-1 터널 개요

구 분	상행	하행
도로교통방법	2차로 1방향	2차로 1방향
연장(m)	1,909	1,939
터널내공단면적(m ²)	67.31	67.31
터널대표직경(m)	8.486	8.486
중단구배(%)	+ 1.17	- 1.15
표고(m)	136.6	136.6
주행속도(km/h)	80	

표-2 추정교통량(대/일)-2025년

구 분	승용차	교 통 량 (대/일)					합계
		버 스		트 릭			
		소형	대형	소형	중형	대형	
교통량(대)	21,790	217	3,824	4,637	641	227	31,336
혼입율(%)	69.54	0.69	12.20	14.80	2.05	0.72	100

3.4 T.A.B관련 용역수행/사례내용

(1) 용역수행기간

- ① 2005. 9.26~2006.02.28: 용역기간
- ② 2005. 9.26~10.31: 설계도서 검토
- ③ 2005.10.10: 터널내,외부자연풍측정
- ④ 2005.11.10: 터널내,외부자연풍측정
- ⑤ 2005.12.10: 터널내,외부자연풍측정
- ⑥ 2006.01.21~01.27 : 터널T.A.B수행
- ⑦ 2006.02.01~02.28: 측정데이터정리, 종합보고서작성 및 제출

(2) 수행업무

- ① 시스템검토 및 시뮬레이션(2D,3D)
- ② 예비보고서 작성
- ③ 현장점검
- ④ 터널풍속 측정
- ⑤ 자동제어계통 점검
- ⑥ 소음 및 진동측정
- ⑦ 종합보고서 작성

(3) 측정방법

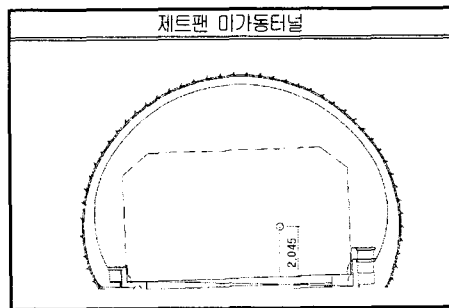
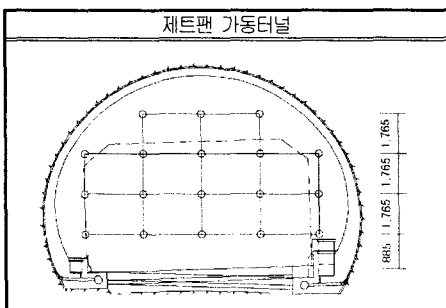
- ① 자연환기력 측정
 - 풍속계는 측정에 적합한 것을 사용
 - 측정된 풍속이 적절한 값인가를 측정 중 바로 확인함.
 - 측정치가 이상이 있을 시는 철저히 조사하여 수정 후 재 측정하여야함.
 - 풍향계는 터널의 입, 출구 방향을 지시할 수 있어야 함.
 - 모든 계측장비는 계측 값이 일정한 시각별 자동 기록이 유지되도록 함.
 - 측정된 값은 종합분석시 보정계수로 활용함.
- ② 풍속측정
 - 풍속계는 측정에 적합한 것을 사용함.(열선형 등)

- 측정된 풍속이 적절한 값인가를 측정 중 바로 확인하여야함.
 - 측정치가 이상이 있을 시는 철저히 조사하여 수정 후 재 측정하여야함.
 - 모든 계측장비는 계측 값이 일정한 시각별 자동 기록이 유지되도록 함.
 - 풍속계는 다접점(18POINTS 이상)계측기를 사용하여 동시 측정이 가능하도록 함.
- ③ 운전모드별 풍속측정
- 횡단면 풍속분포측정 (단면의 크기에 따라 측정점을 가, 감하여 선정 할 것)
 - 종방향 풍속분포측정 (길이의 크기에 따라 측정점을 가, 감하여 선정 할 것)
 - 정회전,역회전, 운전대수별 측정.
- ④ 온, 습도 측정
- 온도계 및 습도계는 측정대상에 적합한 범위의 것을 선정함.
 - 온도측정에 영향을 미치는 것은 배제한 후 측정함.
 - 모든 측정값은 일정한 시각별 자동기록이 유지되어야 하며 측정된 계측 값이 적절한 값인가를 측정 중 바로 확인 하여야함.
- ⑤ 압력측정
- 압력계는 터널측정에 적합한 범위의 것을 사용함.
 - 게이지 범위는 눈금의 중반부 이상에서 측정값이 읽여지도록 함.
 - 측정값은 일정한 시각별 자동기록이 유지되도록 하며 측정된 계측 값이 적절한 값인가를 측정중 바로 확인되어야 하며 종합적으로 판단함.
- ⑥ 자연풍향·풍속
- 외기 측정에 대한 측정사항을 다루며 그 측정치는 터널 내부 풍속 및 풍압 측정 시와 동일 시각으로 측정함.
- 풍향, 풍속 측정
 - 측정값은 일정한 시각별 자동기록이 유지되어야 하며 측정된 계측 값이 적절한 값인가를 측정중 현장에서 바로 확인되어야 함.
- ⑦ 소음 및 진동측정
- 소음은 옥타브밴드별로 측정함.
 - 소음측정은 장비 운전중에 수행함.
 - 진동은 케이싱 4방향에서 측정함.
 - 설치된 제트팬 모두 측정함.

3.5. 터널 T.A.B 수행

(1) 자연환기력

① 측정위치



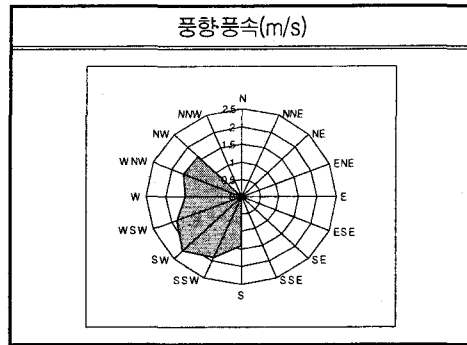
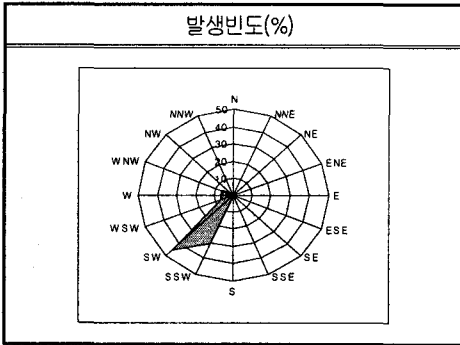
② 측정결과

외부자연풍향·풍속에 의해 발생하는 터널내부 풍속은 터널 시점부(상행방향)에서만

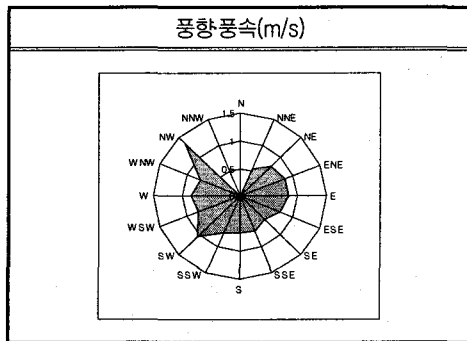
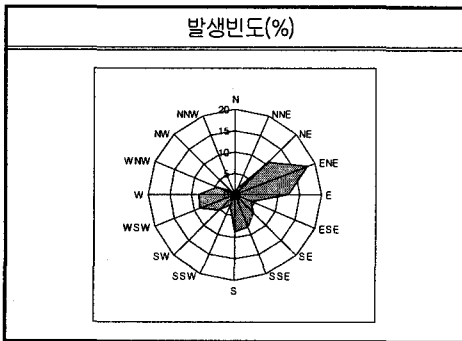
자연풍을 측정하여 시·종점 갭부 지형특성을 완전히 반영한 상관관계 분석이 불가능하나 터널내부풍속과 외부 자연풍향·풍속을 측정하여 터널에 설치된 제트팬 승압력 분석시 고려되는 터널내부 자연환기력을 상행과 하행의 상관관계로 분석하였다.

③ 측정데이터

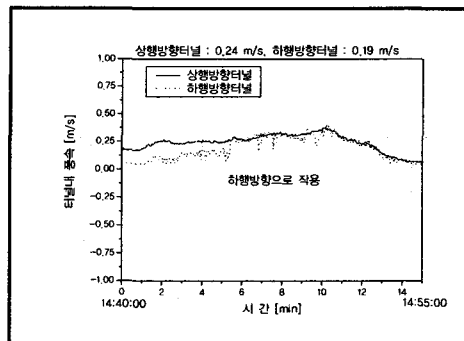
- 상행(외부 자연 풍향풍속)



- 하행(외부 자연 풍향풍속)



④ 터널내부 자연환기력



⑤ 결과

- 터널 외부 풍속과 터널 내부 풍속과의 직접적인 상관관계는 나타나지 않음.
- 측정기간 동안 자연환기력에 의한 터널 내부 자연풍속은 상행방향이 0.24m/s, 0.17m/s이고, 하행방향이 0.19m/s, 0.14m/s로써 터널내부 최대로 발생되는 평균 자연환기력은 자연풍 설계기준 2.5m/s보다 낮게 나타남.

- 외부자연풍에 의한 터널내 발생하는 자연환기력은 양터널의 측정점 갯수 및 측정 위치의 차이 때문에 일정한 비율의 풍속비를 나타낸다. 상행터널의 풍속 측정시 그때의 자연풍과 하행터널의 자연풍 측정위치에서 측정한 자연 풍속을 측정한 경우 상행:하행 자연환기력비는 1: 0.79, 하행터널의 풍속 측정시 그 때의 자연풍과 상행 터널의 자연풍 측정위치에서 측정한 자연 풍속을 측정한 경우 상행:하행 자연환기력비는 1: 0.82로 분석되었다. 이 비율은 실제 제트팬 승압력 분석에 적용하였음.

(2) 제트팬 승압력 이론 및 실제비교

- ① 설계서의 제트팬 승압력과 실제 터널에 설치되었는 제트팬 승압력을 비교하여 터널내 오염농도 설계 기준 준수여부를 검토하고자 함.
터널내 단면 풍속이 균일하게 형성되는 측정거리인 터널 중심부 1,000m 지점에서의 18Point 풍속data를 기준으로 승압력을 검토하였음.
- ② 실제 측정된 데이터를 계수 및 산출식을 적용하여 산출한 결과는 다음과 같다.

단위:mmAq

구분	가동 대수	승압력		1대 승압력		효율
		실제	이론	실제	이론	
상행	2대	3.84	3.64	1.92	1.82	105.5%
	4대	6.33	7.06	1.58	1.765	89.7%
	평균	-	-	1.75	1.792	97.7%
하행	2대	4.01	3.63	2.005	1.815	110.5%
	4대	7.58	7.1	1.895	1.775	106.8%
	평균	-	-	1.95	1.795	108.6%

③ 결과

- 제트팬 가동시에는 터널내 자연환기력을 알 수 없으므로 제트팬 가동 전 및 제트팬 정지 후의 정상상태에서의 수렴한 풍속을 터널내 풍속으로 선정하여, 제트팬 가동시의 자연환기력으로 적용하였음. (측정기간 동안 자연환기력은 심한 변동을 보이지 않고 대체적으로 균일하게 유지됨)
- 상행터널의 평균 효율은 97.7%임.
- 하행터널의 평균 효율은 108.6%임.
- 설치된 제트팬의 승압력이 이론값(설계값)보다 상행방향은 2.3% 낮게 나타나고, 하행방향은 8.6% 높게 나타났으므로 설계요구조건을 만족함.
- 제연시의 가동 대수인 4대의 제트팬 승압력이 설계치를 상회하여 화재시 대처하는데 문제가 없을 것으로 판단됨.

(3) 터널내부 목표풍속 도달시간

터널내 환기설비(제트팬) 가동대수에 따라 터널내 평균풍속도달시간과 환기설비 가동시 터널내 평균풍속에서 자연풍속 도달시간을 분석하여, 환기설비 대수제어시 터널풍속 대기시간을 설정하여 효율적으로 제어하는 방안을 검토하고자 함.

① 측정치

구분	제트팬 운전조건	평균도달시간	자연풍방향
상행	2대 가동 후	7분	순풍
	2대 정지 후	9분	"
	4대 가동 후	7분	"
	4대 정지 후	9분	"
하행	2대 가동 후	10분	"
	2대 정지 후	10분	"
	4대 가동 후	5분	역풍
	4대 정지 후	11분	"

② 결과

- 제트팬 가동대수에 따른 평균풍속 도달시간은 풍속이 일정해졌을 때의 평균풍속을 기준으로 하여 평균 풍속의 90%가 되는 시간으로 정하였다.
- 터널연장이 1.9km 정도로 외부 자연풍향·풍속과 외부기상조건에 민감하게 반응하여 터널내부 자연풍속의 변화량이 수렴되는 조건이 측정시간동안 발생되지 않아 정량적으로 환기설비 가동에 따른 효과대기시간을 규정하는 것은 어려우나 기본값으로 환기제어 또는 제연제어시 상기 조건의 경우 효과대기시간을 10분 이상으로 설정하는 것이 바람직할 것으로 사료됨.

(5) 종합의견

① 자연환기력

- 터널내부 풍속은 외부자연풍향·풍속과 상관관계는 성립되지 않았고, 최대로 발생하는 터널내부의 풍속은 0.24m/s로 설계시 적용된 자연풍속 2.5m/s보다 낮게 나타남.
- 터널에 작용되는 자연환기력(V_n)은 자연풍속·풍향, 온도, 기압 등에 의해 변화되므로 수행기간에 측정된 data를 대표값으로의 정의하는데 무리가 있으므로 터널 개통 후 터널내 설치되는 풍향·풍속계, 교통량측정계, 가시거리·일산화탄소측정계, 제트팬 가동시간 data의 분석을 통해 자연환기력을 효과적으로 이용할 수 있도록 환기제어 프로그램 수정이 요구되며, 추후 효율성 제고 노력이 지속적으로 이루어져야 된다고 봄.

② 제트팬 이론·실제 승압력

- 상행방향터널의 평균 제트팬 효율은 97.7%이고, 하행방향터널의 평균 제트팬 효율은 108.6%임.
- 설치된 제트팬의 승압력이 이론값(설계값)보다 상행방향은 2.3%낮게 나타났고, 하행방향은 8.6% 높게 나타났으므로 설계요구조건을 만족함.

③ 운영모드별 풍속변화

- 본 터널은 각방향 터널에 제트팬 4대가 설치되어 있는 터널로 7단계 모드(1대→2대→3대→4대→3대→2대→1대)로 운영하는 것이 바람직함.
- 제연시의 임계풍속 2.5m/s의 적정 여부를 확인하기 위한 연막실험에서 연막연기개시 2분 후에 제트팬을 가동하여 임계풍속에 이르는 상태를 확인한 결과 임계풍속인 2.5m/s 이전인 2.3m/s에 연막기류가 정방향에서 역방향으로 전환되었다. 따라서 4대를 가동할 경우 제연에 문제가 없을 것으로 확인됨.
- 모드별 환기설비를 가동 또는 정지하였을 경우 측정된 평균풍속 도달시간에 따라 모드가 변환되는 기준인 시간변화량에 따른 오염농도 증가에 대한 효과대기시간을 측정된 도달시간이상으로 설정되어야 빈번한 제트팬 가동과 에너지 소비를 억제할 수 있음.
- 효과대기시간은 개통 후 6개월~1년 정도 계측 data 분석을 통해 재조정이 이루어져 터널 특성이 고려된 실제운영 data로의 변경이 자동제어프로그램에서 이루어져야함.

제4장 T.A.B 효율성 제고에 관한 사항

(1) 발주시기

- 일반적인 터널 T.A.B의 발주시기는 터널내 장비류가 모두 설치된 상태에서 발주되는 실정이다.
- 이것은 시스템검토시 문제점이 발견 되었을 경우 처리하기가 매우 곤란한 상황이 발생 될 우려가 있다.

- 따라서 T.A.B의 발주시점을 공사 초기에 시행하여 만약에 발생 할 수 있는 문제점의 대처에 용이하도록 하여야한다.
- (2) T.A.B 수행시 효율성 제고노력
 - 도로터널의 경우 개통시점에 거의 다다를 무렵 전기 및 도로 포장이 완료됨에 따라 T.A.B 수행시에 예로사항이 많이 발생되고 있다.
 - 개통일 전에 끝내기 위해 야간에 급히 해야 할 경우도 발생하고, T.A.B 수행시에는 터널을 차단하기 때문에 차량 통행이 불가능 하게 된다. 이 때문에 타 공종 수행자들과의 분쟁이 발생되어 T.A.B 수행에 어려움이 따르고 있다.
 - T.A.B를 수행하는 시점에서는 전기 및 도로포장, 터널내 비상전원 등이 모두 작업이 완료된 후 실시하여야하며 데이터 측정 및 기록을 위해서 충분한 시간적인 여유가 있어야한다.
 - 또한 다른 공정의 차량들이 터널을 통과하지 못하도록 통제하여야한다.
 - 터널내에 설치된 각종 자동제어 감시센서들의 설치가 완료 되어야 T.A.B 측정치와 모니터상의 감시센서 측정치와 비교가 가능하다.
 - 터널 관리실에서 제트팬 가동을 자동으로 할 수 있도록 하여야한다.(대부분 MCC 판넬에서 수동 기동함)
 - 매연, CO, NOx, 압력분포, 기류분포등 환기량을 근거로 선정된 장비용량이 적합한지 차량속도별 벽마찰손실, 자연환기력, 교통환기력, 필요승압력, 환기설비(제연설비)등을 검토한다.
 - 설계시 적용한 기준이 터널제원(추정교통량, 터널연장, 단면적, 종단경사등)에 충분히 반영했는지 확인 여부의 필요성.
 - 제연풍속과 관련한 환기기, 환기량등 연기 거동에 따른 시스템을 환기설비와 연계하여 검토해야하며 이 때 동력, 필요승압력, 환기기수량, 배치특성의 적정성등을 병행검토 하여야하며, 특히 화재시 연기거동해석 연기분포 및 임계속도 검증 화재주변지역의 온도분포해석 CO농도분포해석 화재시 터널 입출구의 연기거동해석, 제연설비 가압운전시 터널연기거동 및 압력분포해석을 시뮬레이션으로 확인 비교하여야한다.
 - 터널 특성상 전기집진기 설치 터널의 경우 집진성능, 정압손실의 적정성, Cell 수량의 적합성, 효율, 용량 등의 검토와 함께 수처리시설의 적합성과 자동제어 성능과 기능의 특성을 세분화 하여 그 적합성을 검토해야한다.
- (3) 수행업체의 자격기준
 - 현재 법적 뒷받침은 없으나 (사)대한설비공학회기술기준과 자격요건을 충족하도록 하고 있으며 주거공간 외 특히 도로터널 등의 T.A.B 부문은 향후 고도의 기술력과 장비를 갖춘 적합한 업체의 역할이 필요하다고 보며 꾸준한 노력으로 업역 확대방안이 필요하다고 사료됨.
- (4) T.A.B 수행 예산의 적정성 반영
- (5) T.A.B 기술자의 교육 및 질적 향상을 위한 프로그램개발
- (6) T.A.B 측정 수행장비의 검교정 정확성으로 효율성과 정확성을 확인.
- (7) 연기모드의 변화 확인으로 제연설비의 효율성 증대
- (8) 제연/환기모드의 정확성에 따른 에너지 절약적 운전프로그램 작성.
- (9) 해외자료의 지속적 분석, 참고.
 - 도로터널 화재에 대하여 예를 들면 스위스의 연방도로관리청(ASTRA)의 기본 규정(화재대응시간)의 비교로써 문제성 비교분석 및 선별적 반영유럽의 시험용 화재연기발생방법을 규정한 방재시험기준(European Norm)에 따른 것이다.

초기대응시간						자체피난	소방서 등 유관기관 대응	
화재발생	화재발생 (최대60초)	화재신호 전송	화재 확인 및 조치	환기기(제연 기) 작동	제연기 최대 작동			
0분						2분	15분	상황 종료

- (10) T.A.B의 최대 목표는 안전 차원의 인명손실 예방 및 재산상의 손실을 최소화 하는 방향으로 모든 초점이 모아져야 할 것이다.
- (11) 개별관리, 통합운영관리방식등 특성분석을 통한 유사 터널의 합리적 관리방법을 모색하는 관리 시스템 개발의 지속적 추진이 필요할 것임.

제5장 맺음말

도로터널 환기/방재설비의 T.A.B수행은 설계치와 실제 데이터를 비교하여 그 차이를 발견하여 설계에 반영함으로써 설계 기술의 향상을 꾀하고 터널 관리자로 하여금 터널 내를 통과하는 차량과 사람의 안전을 위하여 화재시등의 대처 방법을 제시 하는데 큰 의미가 있다. 최근 몇몇 터널에서 발생한 화재 사고로 인하여 터널환기에 대한 중요성이 날로 증가하고 있는 실정이다. 근래에는 2km가 넘는 장대터널도 많이 건설되므로 터널 T.A.B의 중요성은 더 말할 나위도 없으리라 본다. 그러나 T.A.B의 수행시점이 터널 개통일에 가깝게 하다보니 문제점이 발생할 경우(예; 팬의 추가 설치가 요구될 경우)에는 이의 대처방법 해결이 곤란하므로 터널공사 초기에 발주하여야 하며 T.A.B의 측정치는 무엇보다도 정확성이 요구되며 터널 설계시 feedback 되어 보다 정확하고 up date된 기초 자료가 되어야 한다.

특히 환기 측면에서만 본다면 의미 축소 또는 소외될 수도 있지만 인명의 손실과 재산상의 엄청난 손실이 예상되는 제연설비차원의 안전성 문제는 아무리 강조되어도 지나치지 않을 정도로 중요한 것이다. 항목 하나하나 수치적 개념의 세심한 검토와 관심이 향후 T.A.B의 효율성제고와 필요성에 대한 인식이 확산 발전되어 안전문제에 큰 역할이 되리라 확신한다.

참고문헌

1. 공기조화설비의 T.A.B기술기준, (사, 대한설비공학회 2005)
2. 도로설계편람, (건설교통부 1999)
3. 도로터널 환기시설 설계기준, (한국도로공사 2002.10)
4. 도로터널 방재시설 설치지침, (건설교통부 2004.12)
5. 추계논문발표집, (사, 대한설비공학회 2005.11)
6. 지하공간 화재안전 선진화기술 세미나자료, (한국건설기술연구원2005. 6)
7. Water-mist 시험 및 세미나결과보고, (소방방재청 2006. 3)