

전압강하를 고려한 터널내 환기 및 방재팬의 경제적 위치선정에 대한 연구

A Study on an Optimal Design of Jet Fan Location
Considering the Voltage Drops in Tunnels

김은수*1), 김효규2), 송중호3)

Eun-Soo Kim, Hyo-Gyu Kim, Jung-Ho Song

*1) 삼보기술단 이사(ks905105@yahoo.co.kr)

2) 삼보기술단 대리

3) 서울산업대학교 전기공학과 교수

요 약

우리나라 지형의 특성은 약 70%가 산으로 이루어져 있다. 이러한 지형적 여건은 교통과 관련된 사회간접 자본의 증가로 이어지며, 최근에는 산업의 발전에 힘입어 교통량의 증가와 물류비용의 절감을 목적으로 철도 및 도로의 건설시 터널의 계획 및 시공이 증가되고 있는 추세이다. 이에 따라 터널의 환경개선과 화재시 제연을 목적으로 설치되는 제트팬(Jet Fan)의 용량이 차지하는 전기적 비중이 높아지고, 전압강하에 대한 손실율이 증가되고 있다. 따라서 제트팬의 설치시 배치방법과 터널의 길이에 따른 전기설 배치를 Case 별로 분류하여 전압강하를 계산하고 분석하여 가장 효율적이며 경제적인 방안을 연구하고 정리하여 향후 설계시 기초자료를 제공하고자 하였다.

1. 서 론

국내 터널내 제트팬 종류식(Longitudinal Ventilation System with Jet Fans)을 채택한 터널의 연장이 점점 증가되고 있는 추세이다. 이는 최근 교통환기력의 이론적 정립과 이의 유용한 이용, 팬의 기술적 향상, 차량엔진 성능의 향상에 따른 오염배출량의 감소 등으로 환기 계획시 필요한 소요환기량이 크게 줄고 있는 상황이며, 이는 또한 제트팬의 소요동력 및 전력케이블의 소요량에도 같은 변화를 보이고 있다.

최근 연구에 의하면[1],[2] 터널내 제트팬의 설치위치에 따른 환기성능은 1~3% 미만으로 거의 차이가 없는 것으로 보고하고 있는데, 이러한 이유는 PIARC 방식에서 제시하는 터널에서의 환기유량은 제트팬에 의한 터널내부에서의 승압효과에 의해서 결정되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 터널 연장별(1~5km)로 구분하고, 터널내 환기효율이 같다는 조건하에 제트팬의 배치방식을 a) 양단배치, b) 집중배치 그리고 c) 균등배치로 Case화 하여, 이에 따른 전압강하를 계산하였다. 또한 관련 공사비를 산출하여 봄으로써 각 연장별 제트팬 배치방법에 따른 경제성에 대한 비교분석을 수행하였다.

2. 터널내 제트팬 설치개요

2.1 대상터널의 제원

환기설비에 의한 전압강하를 알아보기 위해 일반적인 2차로 고속도로 터널을 대상으로 분석하였으며, 환기 및 제연팬의 용량결정은 PIARC 방식에 따라 계산하였다.[3] 대상터널의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 터널제원 및 입력자료
Table 1. Characteristics & Input data

(a) 터널제원

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
터널연장 [m]	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000
내공단면적 [m ²]	76				
둘레길이 [m]	34.609				
대표직경 [m]	8.784				
종단경사 [%]	±0.5				
평균표고 [m]	200				
차선수 [Lane(s)]	2				
제트팬 형식 [mm]	d1250 (37kW)				

(b) 교통량 자료

HGV=18.4%	승용차	소형버스	대형버스	소형트럭
구성비 [%]	69.1	8.6	6.1	3.9
HGV=18.4%	중형트럭	대형트럭	특수트럭	합계
구성비 [%]	9.2	2.6	0.4	100.0

(c) 오염물질 규제기준

주행속도 [km/h]	10	20	30	40
매연 [m^{-1}]	-	-	-	0.007
CO [ppm]	100	100	100	100
NOx [ppm]	25	25	25	25
주행속도 [km/h]	50	60	70	80
매연 [m^{-1}]	0.007	0.006	0.006	0.006
CO [ppm]	100	100	100	100
NOx [ppm]	25	25	25	25

교통량자료는 2001년도 도로교통량통계연보(건교부, 2002) 상의 서울~수원간 교통량을 적용하였으며, 오염물질별 규제 기준은 현 설계기준인 한국도로공사의 기준(2002.10)을 적용하였다. 참고적으로 매연은 시거장애물질로 분류되며, 저속주행시(10~30km/h) 안전주행에 문제가 되지 않으므로 본 분석에서는 제외하였다. 이상의 조건에 대하여 터널 연장별 (Case 별)로 환기설비용량 및 전기설비용량은 표 2와 같다.

표2. 환기설비 규모

Table 2. Calculation of Jet Fans

제트팬 형식: (d1250mm)	환기용		제연용	
	상향경사	하향경사	상향경사	하향경사
Case 1 (1km)	1	1	5(+2)	5(+2)
Case 2 (2km)	4	4	7(+2)	7(+2)
Case 3 (3km)	10	9	9(+2)	9(+2)
Case 4 (4km)	24	21	10(+2)	10(+2)
Case 5 (5km)	59	46	12(+2)	12(+2)
제트팬 형식: (d1250mm)	제트팬 설치대수		합계 [EA]	소요동력 [kW]
	상향경사	하향경사		
Case 1 (1km)	8	8	16	592
Case 2 (2km)	10	10	20	740
Case 3 (3km)	12	12	24	888
Case 4 (4km)	24	22	46	1,702
Case 5 (5km)	60	46	106	3,922

표 2에서 제연팬 항목중 (+2)는 국내 NFSC 501 기준에 따라 화재시 여분의 제연팬 2대를 설치한 경우이며, 설치대수는 2열 병렬설치를 고려한 대수이다. 터널연장이 증가할수록 환기설비의 규모는 급격히 증가하는 경향을 보이며, 전기설비의 설계용량도 동일한 비율로 증가하고 있다.

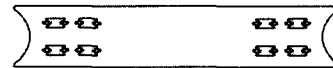
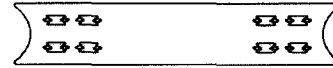
2.2 제트팬 배치법 및 전기실 배치 계획

국내외적으로 제트팬에 의한 터널환기방식을 적용할 수 있는 터널연장은 대략 5km 정도로 보고되고 있으며, 타 환기방식에 비해 경제성이 우수하기 때문에 제트팬 종류식이 많이 적용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 제트팬 방식이 적용 가능한 5km 이하의 도로

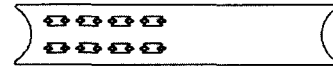
터널을 대상으로 제트팬의 배치방법 및 전기실의 배치 계획에 따른 전압강하를 계산해 보고 전기적으로 안정적이며 경제적인 방법을 찾아보고자 한다.

2.2.1 제트팬의 배치방법

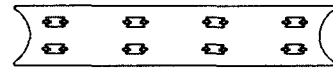
일반적으로 터널내 환기설비는 터널의 입구부나 출구부에 편중되게 배치하는 집중배치법과 환기설비 규모를 동등하게 분산하여 양단에 배치하는 양단배치법 그리고 터널내 전구간에 균등하게 배치하는 균등배치법 등으로 크게 나눌 수 있다. (그림 1 참조)



(a) 양단배치



(b) 집중배치



(c) 균등배치

그림 1. 제트팬 배치방법 개요도

Fig. 1. Layout of installation method for Jet-Fans

제트팬의 설치거리기준은 ① 터널의 갱구부에서 160m 이격후 제트팬 간의 종간간격도 160m를 기준으로 하며, ② 각 Case 중 균등배치의 경우는 터널의 길이에 적절하게 균등적으로 설치하였다.

2.2.2 전기실 배치계획

터널 연장별 전기실의 배치는 국내에서 일반적으로 설치하는 개수를 기준으로 하였으며, 경제성, 시공성을 고려하여 1km 는 1개소, 2~3km는 2개소, 4~5km는 3개소로 결정하였다. 환기설비의 배치법과 전기실의 개수를 고려한 각 Case 별 케이블 배치는 그림2와 같다.

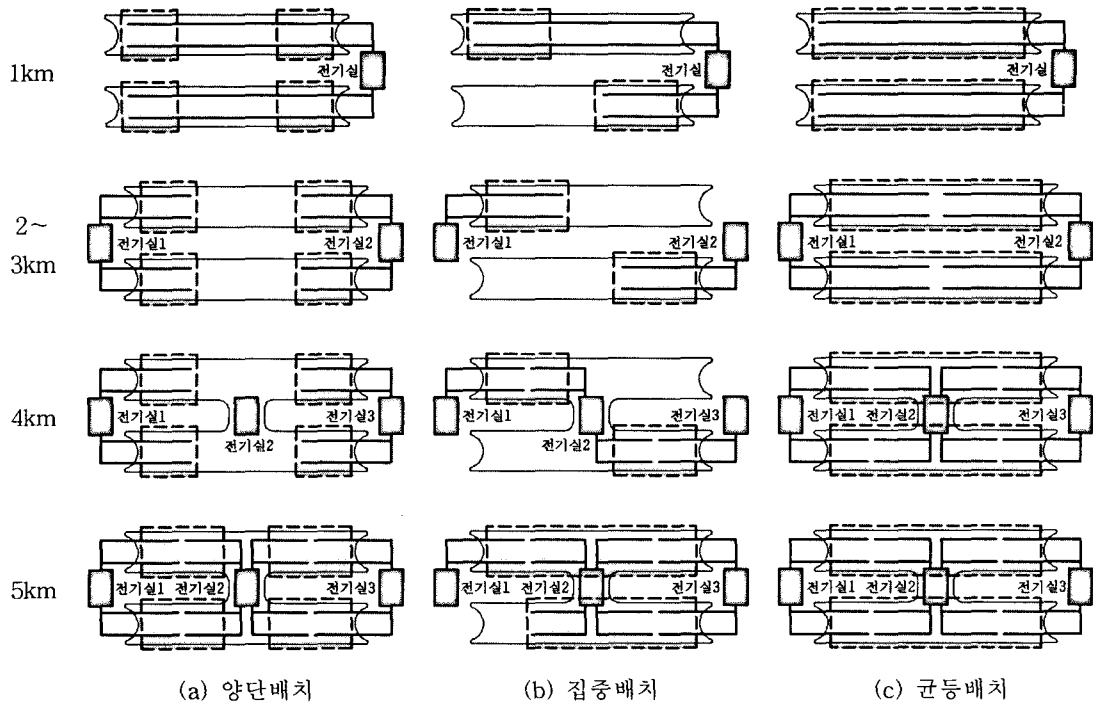
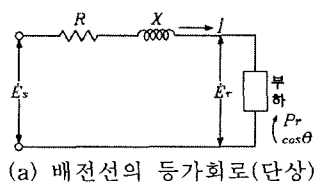


그림 2. 케이블 및 전기실 배치 개요도
 Fig. 2. Layout of cable & electric control room

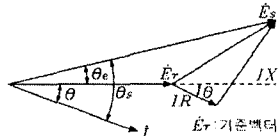
3. 전압강하를 고려한 경제성 검토

3.1 전압강하의 계산

각 Case 별 전압강하를 계산하기 위하여 전력케이블의 규격의 선정기준은 다음을 따랐다. 먼저 선로정수로서 선로의 저항 및 Inductance 만 가지고 있으며, 선로정수 및 부하는 평형을 이루고, 부하전류는 공급전압의 변동에 관계없이 정전류로 가정하였다.[6] 따라서 전압강하는 다음과 같이 표현 가능하다.



(a) 배전선의 등가회로(단상)



(b) 배전선의 벡터도

그림 3. 배전선 개동도
 Fig. 3. Layout of equivalent circuit(1 phase) & vector map

그림3 에서

Z : 임피던스(= $R + X$)

R : 전선1가닥의 저항(Ω)

X : 전선1가닥의 리액턴스(Ω)

I : 부하전류(A)

E_s, E_r : 송전단 및 수전단에서의 1선과 중성선 간의 전압(V)(선간전압의 $1/\sqrt{3}$)

$\cos \theta$: 부하역율,

이라 하면,

$$\begin{aligned} \text{전압강하율} &= \frac{|E_s| - |E_r|}{|E_r|} \times 100 \\ &= \frac{1}{E_r} \times (R \cos \theta + X \sin \theta) \times 100 [\%] \end{aligned} \quad \text{식(1)}$$

$$\text{전압강하} e = I \times (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad \text{식(2)}$$

따라서 3상 3선식에서의 선간 전압강하는 식 (3)과 같다.

$$\text{전압강하} = K \times L \times I \times (R \cos \theta + X \sin \theta) \text{ [V]}$$

식(3)

식(3)에서 K는 배전방식에 의한 정수로 본 연구에서는 $\sqrt{3}$ (삼상 3선식)을 적용하였다. L은 거리[m], I는 전류[A], R은 교류도체 실효저항[Ω], X는 리액턴스[Ω], θ 는 전압과 전류의 위상차[°]를 의미한다.

전압강하계산은 내선규정(제120절)에 따라 전선의 길이가 60m를 초과할 경우, 전압강하는 6~7% 이내로 규정하고 있으므로 본 연구에서는 터널내 전압강하가 6%를 초과하지 않는 범위로 제한하였다. 그리고 전압강하 계산을 위한 케이블 규격별 선로정수 및 최대 배선길이는 표3과 같다.[4],[5]

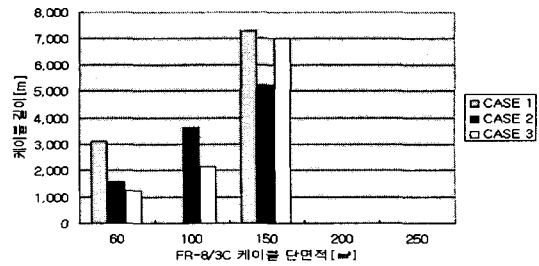
표. 3 케이블 규격에 따른 배선의 선로정수 및 최대 길이

Table 3. Coefficients & maximum length of cable with cable size (voltage drop: below 6%)

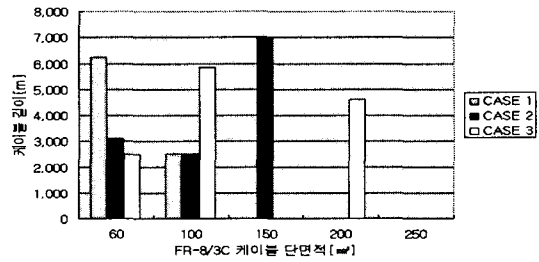
케이블규격	선로정수			전압강하계수치	
	R [Ω/Km]	L [mH/Km]	X [Ω/Km]	Va=K*(Rcosθ+Xsinθ)	
FR-8 60mm ² /3C	0.397	0.245	0.0922	(K=√3)	0.688
FR-8 100mm ² /3C	0.24	0.247	0.0933		0.445
FR-8 150mm ² /3C	0.16	0.238	0.0897		0.317
FR-8 200mm ² /3C	0.122	0.241	0.0909		0.259
FR-8 250mm ² /3C	0.0996	0.236	0.089		0.222
FR-8 325mm ² /3C	0.0784	0.231	0.087		0.188
케이블규격	부하전류 [A]	계산값 [mm ²]	실전압강하 [%/V]	최대길이 [m]	
FR-8 60mm ² /3C	70.1	59.66	5.97/22.67	470	
FR-8 100mm ² /3C	70.1	99.84	5.99/22.76	730	
FR-8 150mm ² /3C	70.1	149.22	5.97/22.68	1020	
FR-8 200mm ² /3C	70.1	199.01	5.97/22.69	1250	
FR-8 250mm ² /3C	70.1	249.49	5.99/22.75	1460	
FR-8 325mm ² /3C	70.1	324.35	5.99/22.75	1730	

3.2 케이블 길이별 공사비

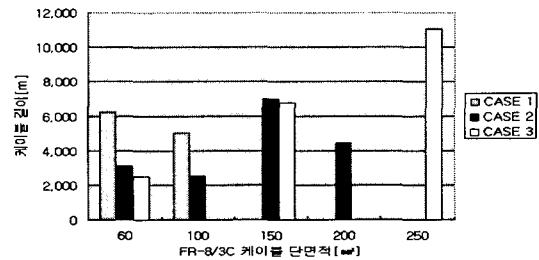
이상의 조건으로부터 터널연장별로 체트팬의 배치 방식에 따른 각 Case의 전압강하 계산을 수행하였으며, 케이블 규격별 총 배선길이와 배관배선 공사비를 계산하였다. 그림 4는 케이블의 길이를, 그림 5는 각 Case별 케이블 공사비를 나타내고 있다.



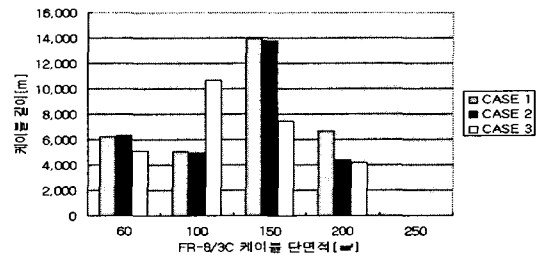
(a) 1km 일 경우



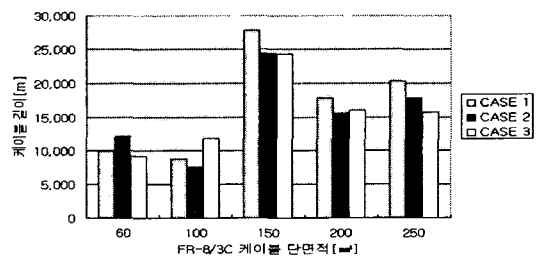
(b) 2km 일 경우



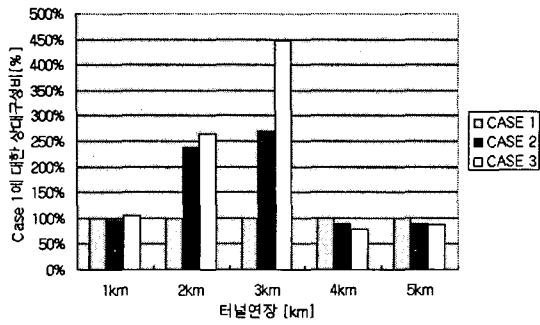
(c) 3km 일 경우



(d) 4km 일 경우



(e) 5km 일 경우



(f) 가중평균 길이(Case1)에 상대비율

그림 4. 연장별 케이블 소요길이
Fig. 4. Total cable length by tunnel length

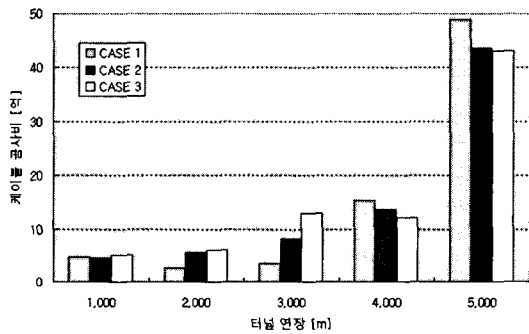


그림 5. 연장별 제트팬 배치방법별 케이블 공사비
Fig. 5. Cable costs by tunnel length

3.3 결과고찰

최근 도로터널의 방재계획과 관련하여, 방재팬을 터널의 입출구에 양단으로 분리한 양단배치법을 주로 적용되고 있는데, 이는 화재시 양단가압에 따른 제연 효과를 고려한 것이다. 그림 4. (f)에서 보는 바와 같이, 이는 연장 2~3km 터널에서는 양단배치법이 매우 적합한 것으로 분석되나, 연장이 긴 경우(4~5km)에는 균등배치법이, 짧은 경우(1km)에는 집중배치법이 유리한 것으로 나타났다. 특히, 연장이 증가하여 4~5km 이상이 되면, 환기기 설치대수의 급격한 증가에 따라 소요 전력도 증대되므로, 터널내 중앙부에 전기실을 1개소 증설하여 Case별 비교분석해 보면, 터널 전구간에 균등하게 제트팬을 배치한 것이 Case 1(양단배치)에 비하여 13~23% 정도 소요 케이블을 감소하는 것으로 분석되었다. 따라서 전압강하 및 배관배선비용을 종합적으로 고려한 결과, 터널연장 1km의 경우는 b)집중배치가, 2~3km의 경우는 a)양단배치가, 4~

5km의 경우는 c)균등배치 방식이 전기실과의 최단 거리 배치방식인 것으로 나타나고 있다.

이상에서 제트팬의 배치법은 곧 전기실과 부하(제트팬) 사이의 전압강하 및 케이블의 배선길이를 의미하며, 이는 공사비와 직결되어있다. 따라서 기계적 측면에서 환기 효율이 동일하다고 가정할 경우, 단순히 제트팬 배치법만이 고려대상이 아니라 전기적인 측면의 부하안정성 및 케이블 비용 등에 대한 종합적인 분석을 통해 전체적인 경제성 향상으로 이루어질 수 있도록 하여야 할 것으로 보인다.

4. 결론

이상으로 국내 일반적인 2차선 도로터널을 대상으로 전압강하에 따른 제트팬의 경제적 위치선정을 검토한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) Case별 분석결과, 전기실로부터의 부하(제트팬)의 위치가 전체 부하수량에 대하여 균등하게 분배되어 배치될 때, 소요케이블 및 공사비가 가장 낮은 것으로 분석되었다.

(2) 터널연장별 Case 별 분석결과, 1km에서는 집중 배치법, 2~3km에서는 양단배치법, 4~5km에서는 균등 배치법이 가장 경제적인 것으로 분석되었다.

(3) 현재 방재측면을 고려한 제트팬의 (양단)배치법은 터널연장별 전기실과의 배선문제를 고려하지 못하고 있으므로, 향후 터널내 제트팬의 배치법은 전기적 측면의 부하안정성, 소요 케이블 및 배선비용 등에 대한 경제성 분석이 함께 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1]강신형, "터널 내의 제트팬 설치 위치에 따른 환기 성능에 관한 연구", 건양대 산학기술협력연구논문집, 제4권, 2001
- [2]안중환 등, "장대 터널내 제트팬 위치에 따른 환기해석", 대한설비공학회, 2001-W-094, 2001.11
- [3]한국도로공사, 고속도로 터널 환기시설 설치 기준, 2002.10
- [4]한국도로공사, 전기설비 주요방침 및 기준, 2002.10
- [5]대한전기협회, 내선규정, 2001.2.15
- [6]송길영, 송배전공학, 동일출판사, 1989