

# 사패산터널 환기 및 방재시스템 설계사례

국내외 편도 4차선 터널로서는 최장터널인 사패산터널 환기 및 방재시스템을 설계기준과 시뮬레이션을 통하여 설계에 반영된 내용과 현장에서 수행되었던 TAB 실측결과 현황 등을 소개하고자 한다.

장 지 돈

서울고속도로(주)(jdchang@seoulbeltway.co.kr)

조 주 환

(주) 범창종합기술(hjjo@bumchang.co.kr)

서울외곽순환 일산~퇴계원간 고속도로 민자사업 구간 36.3 km 중 사패산구간을 제외하고 그동안 부분운영이 되었으나 '07.12월 사패산터널구간이 완공되어 전구간을 운영하고 있으며, 설계시 검토된 내용과 현장에서 실측된 내용분석을 통하여 향후 국내 터널의 환기 및 방재시설 설계에 참고가 되고자 한다.

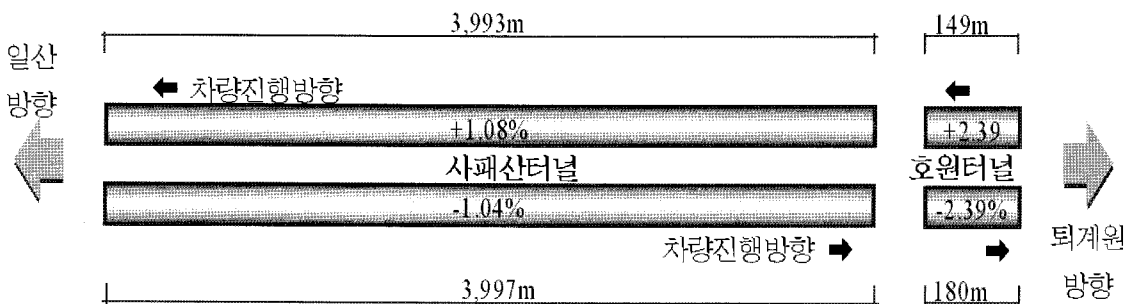
준 의해 제트팬과 전기집진설비를 조합한 종류식방식으로 설계되었으며 설계제원과 환기·방재설비 현황은 다음과 같다.

### • 설계제원

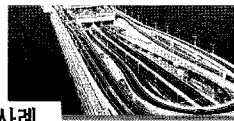
사패산터널 설계제원은 그림 1과 표 1과 같이 퇴계원방향 터널연장은 3.997 km 종단경사는 내리막 1.04%, 일산방향은 3.993 km 종단경사는 오르막 1.08%로이며 내공단면적은 134.91 m<sup>2</sup>, 대표직경은 11.42 m, 평균표고는 115 m이며 설계교통량은 180,166대/일·일방향이며, 자연저항풍속은 2.5 m/s를 설계시 반영하였다.

### 터널 환기 및 방재시스템 현황

사패산터널은 일반도로터널과 동일하게 터널제원과 교통량을 기준으로 도로터널 환기 및 방재설계기



[그림 1] 터널 개요도



**• 환기 및 방재설비 설계**

터널내 주행차량에서 발생되는 오염물질을 허용농도이하로 유지하기 위한 환기설비와 화재발생시(화재크기 20 MW) 화재연기의 제연에 필요한 방재용 제트팬 등 사패산터널 환기 및 방재설비현황은 표 2 와 그림 2와 같으며, 오르막터널인 일산방향에는 전기집진기는 2개소가, 퇴계원방향은 1개소가 설치되어있다. 제트팬은 터널 라이닝과의 0.5D를 이격시켜 설치하여 제트팬 토출측에서 분사되는 30 m/s의 고속운동에너지가 모두 압력에너지로 변화되는 조건인 제트팬 승압효율 100%를 설계에 적용하였다. 한편 방재용 제트팬은 시뮬레이션을 통해 선정된 제연풍속이 만족하도록 구경 1,500 × 13대(예비용 2 대 포함)를 각각 설치하였고, 전기집진기는 매연을 포집하는 전기집진셀 위치에서 기류가 안정적으로

유지되어 외부에서 유입되는 오염공기가 설계된 집진판에서 포집되어 시공 후 현장에서도 집진효율이 확보될 수 있도록 장비를 배치하였다.

**터널 환기 및 방재설비 설계와 현장성능**

사패산터널 환기 및 방재설비 설계에 적용한 설계기준과 시뮬레이션결과와 현장실측을 통해 분석된 결과를 비교하여 향후 설계단계에서 보완이 필요한 항목과 설계단계에서 반듯이 수행이 필요한 사항을 검토하고자 하였고 주요항목은 다음과 같다.

**• 자연환기력**

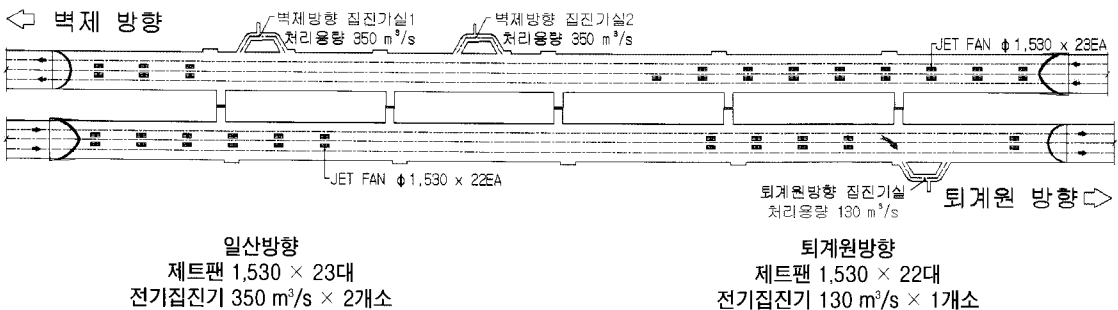
환기설계시 자연환기력(Vn)은 제트팬 토출방향과

<표 1> 설계교통량

구분	승용차	버 스		트럭				합계
		소형	대형	소형	중형	대형	특수	
일산방향	53,114	13,129	7,259	7,393	7,095	2,597	1,113	91,700
퇴계원방향	48,929	13,668	7,012	7,906	7,447	2,453	1,051	88,466

<표 2> 환기 및 방재설비현황

구분		매연	CO	NOx	방재용
일산방향	전기집진기	350 m³/s × 2개소	350 m³/s × 2개소	350 m³/s × 2개소	-
	제트팬	Ø1,500 × 23대	Ø1,500 × 18대	Ø1,500 × 1대	Ø1,500 × 13대
퇴계원방향	전기집진기	130 m³/s × 1개소	130 m³/s × 1개소	130 m³/s × 1개소	-
	제트팬	-	Ø1,500 × 22대	Ø1500 × 3대	Ø1,500 × 13대

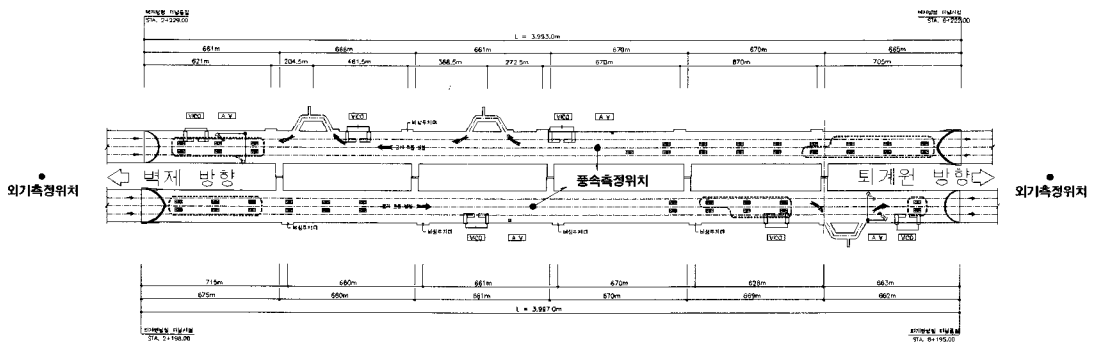


[그림 2] 터널 환기설비 현황도

반대로 2.5 m/s 작용하는 것이 설계기준이며 2007년 12월 9일부터 12월 17일까지 8일간 그림 3과 같이 자연환기력을 측정하였다. 측정결과는 표 3과 같으며 외부자연풍속과 풍향과의 상호연관성은 없으며 자연환기력(Vn)은 3일간 퇴계원방향으로 0.24 m/s ~ 1.86 m/s, 5일간 일산방향으로 0.23 m/s ~ 1.54 m/s 작용하는 것으로 조사되었다.

• 제연풍속

제연풍속은 화재시 발생하는 유독가스를 기류방향과 반대로 역류하는 것을 방지하는 풍속을 말하며 현재 터널특성을 고려하여 계산하는 수식은 있으나 특히 제연풍속에 영향을 주는 매개변수( $\beta$ )에 대해서는 기준정립이 어려워 근접한  $\beta$ 를 적용한 제연풍속에 대하여 각각 시뮬레이션을 통하여 제연풍속을 선정한다. 제연풍속은 표 4와 같이 설계시보다 재검토시 제연풍속이 증가하였으나 제연설비 대수의 변동은 없었다. 표 5는 제연풍속별 시뮬레이션의 결과를 나타낸다.



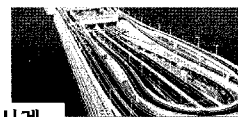
[그림 3] 터널 자연환기력 측정위치

<표 3> 자연환기력 측정결과

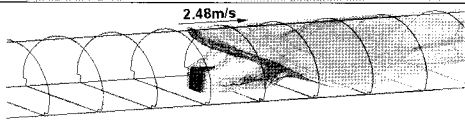
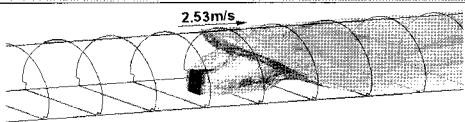
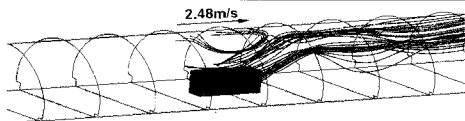
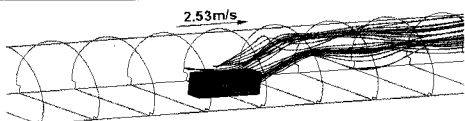
구분	측정일시	측정시간	평균 자연환기력(Vn)		작용방향
			일산방향터널	퇴계원방향터널	
1	12월 09일	21:24 ~ 21:06	0.24 m/s	0.37 m/s	퇴계원방향
2	12월 10일	20:00 ~ 01:10	1.04 m/s	1.54 m/s	일산방향
3	12월 11일	19:50 ~ 00:30	1.06 m/s	1.45 m/s	퇴계원방향
4	12월 12일	22:00 ~ 03:10	0.23 m/s	0.38 m/s	일산방향
5	12월 13일	22:00 ~ 01:40	0.48 m/s	0.54 m/s	일산방향
6	12월 14일	21:50 ~ 02:10	1.18 m/s	1.22 m/s	일산방향
7	12월 16일	23:30 ~ 03:50	0.48 m/s	0.8 m/s	일산방향
8	12월 17일	22:40 ~ 03:00	1.86 m/s	1.5 m/s	퇴계원방향

<표 4> 제연풍속 설계 및 검토

구분	설계	검토
제연풍속	2.48 m/s	2.53 m/s
매개변수( $\beta$ )	0.375	0.35
제트팬수	구경 1,530 × 13대(예비용 2대 포함)	구경 1,530 × 13대(예비용 2대 포함)



<표 5> 제연풍속별 시뮬레이션

구분	설계	검토
터널내 CO 등 분포면		
연기확산 경로		

<표 6> 제트팬 승압력 측정결과

구분	제트팬 가동대수	제트팬 승압력(mmAq)		제트팬1대 승압력(mmAq)		효율(%)
		실재	이론	실재	이론	
일산방향 12월12일	7대	7.07626	9.49716	1.01089	1.35674	74.5%
	11대	8.51560	14.84940	0.77415	1.34995	57.4%
	15대	12.34005	19.67805	0.82267	1.31187	62.7%
	19대	14.87771	24.54724	0.78304	1.29196	60.6%
	23대	17.97966	29.15024	0.78172	1.26740	61.7%
	평균	-	-	1.3156	63.3800	63.38%
퇴계원방향 12월13일	8대	8.03933	10.91741	1.00492	1.36468	73.6%
	13대	12.68720	17.04240	0.97594	1.31095	74.4%
	16대	15.70373	20.62728	0.98148	1.28921	76.1%
	20대	19.12942	25.26375	0.95647	1.26319	75.7%
	22대	20.53524	27.52344	0.93342	1.25107	74.6%
	평균	-	-	1.3156	63.3800	74.88%

• 제트팬 승압효율

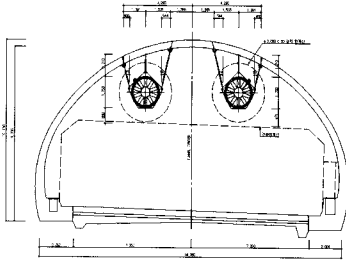
환기용 및 방재용에 필요한 제트팬 선정시 승압효율 100%를 기준으로 식 (1)에 의거 산정하였고 벽면 마찰계수(λ)는 0.025 자연환기력(Vn)은 실제측정값을 반영하여 '07.12.12 ~ 12.13일(2일간) 측정하였다. 측정결과는 효율은 일산방향 57.4% ~ 74.5% 퇴계원방향 73.6% ~ 76.1%로 측정되어(그림 4 참조), 제트팬 단독 가동시 승압력이 감소한 현상은 측정센서 오차(5%)와 제트팬과 인접 설치된 등기구와 TRAY, 정보표지판, 작업차량 및 전기집진기 풍절판 등에 의한 추가적인 효율감소(10 ~ 15% 적용)로 판단되며 설치된 전기집진기와 조합 운전시에는 승압력을 만족하는 것으로 측정되었다(표 6 참조).

$$\Delta P_j = \frac{\rho}{2} \times V_j^2 \times \frac{A_j}{A_r} \times 2 \times \left(1 - \frac{V_r}{V_j}\right) \times \eta \quad (1)$$

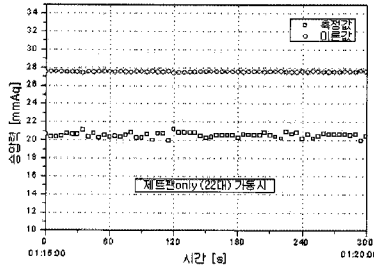
- ΔP<sub>j</sub> : 제트팬 승압력 (mmAq)
- V<sub>j</sub> : 제트팬의 분류속도 (m/s)
- V<sub>r</sub> : 터널내 단면평균풍속 (m/s)
- A<sub>j</sub> : 제트팬의 분류면적 (m<sup>2</sup>)
- A<sub>r</sub> : 터널내 내공단면적 (m<sup>2</sup>)
- η : 제트팬 승압효율(%)

• 전기집진기실 장비배치

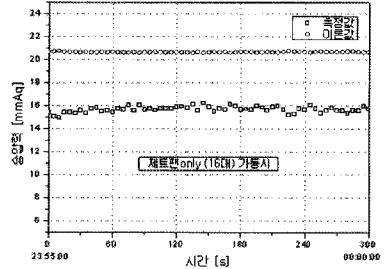
전기집진기실에 설치되는 장비는 기류특성이 성능과 직결되므로 설계단계에서 최대 집진처리용량



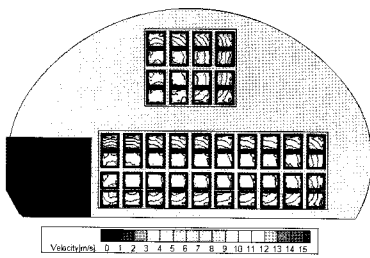
a) 제트팬 설치



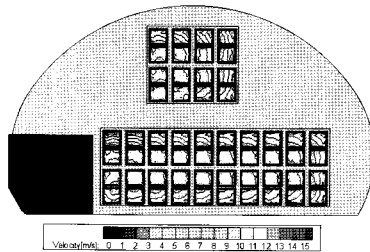
c) 측정 승압력(퇴계원방향)



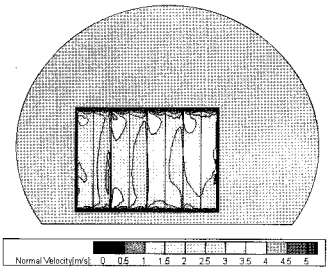
[그림 4] 제트팬 설치단면 및 측정승압력



a) 제1집진기(일산)

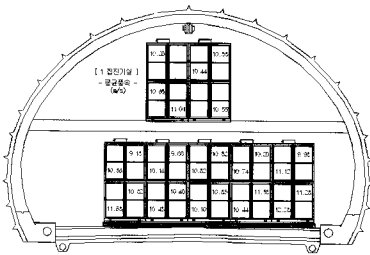


b) 제2집진기(일산)

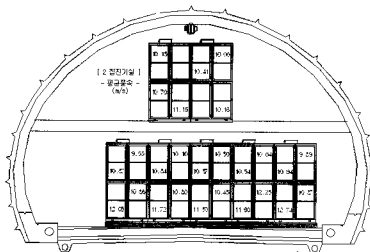


c) 제3집진기(퇴계원)

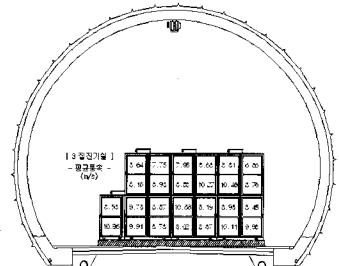
[그림 5] 전기집진셀 기류분포 시뮬레이션



a) 제1집진기(일산)



b) 제2집진기(일산)

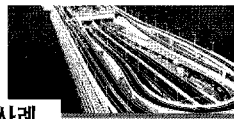


c) 제3집진기(퇴계원)

[그림 6] 전기집진셀 통과풍속 측정

의 집진셀 통과풍속 등이 유지하는지를 그림 5와 같이 시뮬레이션으로 확인하여 배치하였고, 시공 후 현장에서 동등한 성능이 유지될 수 있는지를 그림 6과 같이 집진셀풍속 26 point에서 측정하였으며 시뮬레이션과 현장실측 결과를 표 7에 비교하였다. 설계단계의 검토한 내용과 집진셀 최대값과

평균값 풍속편차가 실측값이 설계값보다 제1, 2집진기는 7.2 ~ 8.8% 감소하였고, 제3집진기는 실제 집진처리용량 5.4% 증가로 인해 풍속편차가 4% 증가하였으나, 집진셀 통과평균풍속은 설계값과 유사하게 나타났으며, 이 결과 시공된 모든 집진셀 현장 효율이 설계효율이상으로 측정되었다.



<표 7> 전기집진셀 통과풍속의 시뮬레이션 및 현장실측 결과 비교

구분		제1집진기	제2집진기	제3집진기	
시뮬레이션	집진처리용량	350 m <sup>3</sup> /s	350 m <sup>3</sup> /s	130 m <sup>3</sup> /s	
	집진셀 풍속	평균	9.29 m/s(77.6%)	9.29 m/s(77.6%)	7.70 m/s(85.8%)
		최대	11.97 m/s(100%)	11.97 m/s(100%)	9.00 m/s(100%)
	집진셀통과평균풍속	11.08 m/s	11.08 m/s	8.92 m/s	
현장실측 (26point)	집진처리용량	350 m <sup>3</sup> /s	350 m <sup>3</sup> /s	137 m <sup>3</sup> /s	
	집진셀 풍속	평균	10.57 m/s(86.4%)	10.8 m/s(84.8%)	8.97 m/s(81.8%)
		최대	12.23 m/s(100%)	12.74 m/s(100%)	10.96 m/s(100%)
	집진셀통과평균풍속	11.07 m/s	11.03 m/s	9.39 m/s	

## 결 언

사패산과 같이 장대터널 환기 및 방재설비는 조합 종류환기방식이 대부분이며, 특히 설계시에 제연용으로 사용되는 제트팬에 대해서는 터널내 설치되는 부속저항물(정보표지판, 풍절판 등)과 등기구 설치에 영향을 고려한 승압효율을 반영하여 터널 화재시 유독가스에 대한 제연풍속이 확보될 수 있는 설계기준의 변경이 필요한 것으로 판단된다. 그러나 제연풍속 선정은 매개변수 적용과 해석방법에 따라 다소 차이가 있으나 제연설비대수에는 영향을 주지 않는 것으로 예상된다.

전기집진기의 설계집진성능이 현장에서도 동일성능 이상으로 유지되기 위해서는 설계단계에서 기류 거동프로그램을 통해 장비배치의 적합성을 판단한 이후 장비배치를 결정하는 절차가 반드시 필요할 것으로 사료되나, 터널환기설계기준에는 이와 관련하여 아직 법적인 규제나 기준이 없어 아쉬움이 있다. 장대터널 환기 및 방재(제연)시스템은 많은 장비 설치로 인하여 공사비 및 유지관리비가 많이 소요되므로, 당초 설계목적에 부합될 수 있도록 환기 및 제연시스템을 개선하여 최상의 시스템으로 운영이 되도록 노력하여야 한다. 