

굴착중인 장대터널내 최적의 환기시스템에 대한 연구

오병화^{1)*}, 임한욱²⁾

The Study on Optimum Ventilation System during Long Tunnel Construction

Byung-Hwa Oh and Han-Uk Lim

Abstract : In general, tunnel construction except for special cases such as very short tunnels must require an artificial ventilation system. Especially, it is efficient for long tunnels to use the combination of a proper ventilation system according to the progress of the excavation. Neung-Dong Tunnel of which length is 4,580m has been originally designed as using ventilation system of blower and exhaust mixture types. Since it has been expected to result in some problems, its design is analyzed to find the way to improve ventilation system by estimating the amount of required fresh air, considering various ventilation mixture types, ventilation's fluidity analysis and contaminant's distribution by numerical analysis. Economical efficiency for each type is also reviewed to determine the best ventilation system.

Key words : ventilation system, long tunnel

초 록 : 길이가 대단히 짧은 터널을 제외하고는 터널을 시공하는 경우 일반적으로 인위적인 환기시스템이 필요하다. 특히 장대터널의 경우 굴착 진행에 따라 적절한 환기시스템을 조합해서 사용하는 것이 효과적이다. 터널 연장이 4,580m인 능동터널은 본래 송기식을 사용하는 것으로 설계를 했지만, 굴착이 진행됨에 따라 송기식만으로 환기하는 데에는 한계가 예상되어 별도의 방식 검토를 수행하였다. 굴착중 터널의 소요환기량을 산정하고 이 소요환기량과 선택가능한 여러 가지 경우의 환기조합방식을 사례별로 구성한 뒤 환기량과 유동성을 해석하고 비교함으로써 경제적으로도 우수한 최적의 환기조합안을 도출하였다. 환기시스템을 결정하기 위하여 각 환기시스템에 대한 경제적 효율성 평가를 수행하였다.

핵심어 : 환기시스템, 장대터널

1. 서 론

최근들어 교통수송의 폭발적인 증가로 인하여 새로운 도로 및 철도건설의 수요가 증가하고 있으며, 국토의 70% 정도가 산지인 우리나라의 특성상 도로 및 철도 건설시 2km이상의 장대터널의 시공이 빈번한 추세이다. 공사 중의 재해방지와 갱내작업자의 작업조건 개선을 통한 시공성 향상을 이루기 위해서는 터널공사 시 발생하는 유해가

스, 부유분진 등에 의한 오염된 공기를 효과적으로 처리할 수 있는 최적의 환기시스템 구축이 필수적이다.

그동안 산업안전보건법 및 관련 기준에 근거하여 공사 중 터널 내 환기를 임시시설에 반영하고 있으나 적절한 환기시스템에 대한 본격적인 검토 내지는 검증이 미흡한 실정이었다. 특히 장대터널인 경우 굴착의 진행정도에 따라 환기효율이 차이가 남에도 불구하고 송풍기식의 획일적인 방식의 환기시스템만 계속 적용할 경우 비효율, 비경제성을 초래하게 된다.

본 연구가 실시된 곳은 부산지방국토관리청에서 발주한 산외-상북간 제3공구 국도확장공사(능동터널)로 이 구간의 능동터널은 직경 13m, 길이 4,580m의 쌍굴 장대터널로 일부구간을 제외하고 전단면을 NATM에 의해 굴착하는 것으로 계획되

1) 삼성건설

2) 강원대학교 명예교수

* Corresponding author : oobh67@hanamil.net

접수일 : 2006년 5월 27일

게재승인일 : 2006년 9월 15일

있다. 굴착이 진행됨에 따라 송기식만으로 환기하는 데에는 한계가 예상되어 별도의 방식검토가 필요하게 되었다. 따라서 굴착중 터널의 소요환기량을 산정하고 이 소요환기량과 선택가능한 여러 가지 경우의 환기조합방식을 사례별로 구성한 뒤 환기량과 유동성을 해석하고 비교함으로써 경제적으로도 우수한 최적의 환기조합안을 도출하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다. 환기량에 대한 모사(simulation) 및 운영비(operating cost) 평가는 V-net PC를 사용하였고, 막장부근의 환기유동 해석은 Phonics를 사용하였다.

2. 이론적 배경

일반적인 환기 네트워크 분석은 터널에서 소요 환기량을 산정한 후 설계상의 터널 단면적, 길이, 표면 거칠기 등 관련되는 인자들을 고려하여 필요한 개소에 신선한 공기를 공급하기 위한 선풍기를 선정함으로써 최적 환기 네트워크가 완성되어진다. 이러한 해석은 터널의 저항과 선풍기의 특성 곡선을 이용한 수치적인 해석으로 문제에 접근하여 해결하게 된다.

2.1 소요 환기량

환기의 목적은 터널에 상주하는 작업자의 호흡에 필요한 신선한 공기를 공급하고 동시에 더운 갱내에 신선한 공기를 공급하여 작업장 환경을 개선함으로써 작업원의 보건과 위생을 유지하는데 있다. 따라서 터널환기 설계를 위한 가장 첫 번째 단계는 소요 환기량의 산정이다. 소요 환기량은 통상 발파 후 CO 가스와 디젤기관차의 배기가스 NO_x에 대한 소요 환기량 중 큰 것을 선택하고 여기에 작업원의 호흡에 필요한 환기량을 가산하여 최종 소요 환기량으로 한다.

2.2 통풍로를 흐르는 공기량과 저항공기량과 저항

지하 각 작업장에서 필요로 하는 공기량이 결정되면 선풍기와 기타 다른 환기 장치의 위치 설정을 위하여 이 공기량을 각각의 위치로 보내기 위한 압력을 결정하여야 한다. 이 때 보통 공기를 비압축성 유체로 간주하고 수리학에서 쓰이는 공식을 사용한다.

관이나 유체자체의 내적 마찰 또는 개방된 벽의 저항 또는 굴림에 기인하는 흐름에서 발생하는 정

적압력의 손실로서 갱내 통풍로의 마찰손실은 흐름의 속력, 풍관의 내적 표면의 특징, 그리고 풍관의 면적에 관계된다.

환기시스템 설계에 가장 보편적으로 사용되는 Atkinson식은 다음과 같다(대한광업진흥공사, 1986).

$$H = \frac{KPLQ^2}{A^3} \quad (1)$$

여기서, H : 수두손실, K : 경험적 마찰계수, P : 통풍로 주변장, L : 통풍로 길이, Q : 공기량, A : 통풍로 단면적

상기 (1)식을 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$H = R \cdot Q^2 \quad (2)$$

여기서, R : 저항으로서 $R = \frac{KPL}{A^3}$ 의 관계가 있다.

충격손실

마찰 손실과 더불어 고려되어야 할 것이 바로 충격손실(shock loss)이다. 충격손실은 마찰손실과 함께 관의 면적이나 공기 흐름의 방향이 바뀌에 따라 발생되며 장애물 등에 의한 단면적을 줄이는 효과에 의하여 발생한다. 일반적으로 충격손실은 총 마찰 손실의 10~30%에 해당되는 것으로 알려져 있으나, 이에 대한 이해의 부족과 변화의 폭이 넓기 때문에 정확한 측정이 어렵다. 따라서 일반적으로 복잡한 네트워크를 가지는 지하 공간의 환기 설계에서 많이 사용되는 충격손실 측정 방법은 단면적 변화가 없는 직선 통풍로에 충격 손실이 가해지는 만큼의 등가 길이(equivalent length)를 더해줌으로써 구하게 된다.

$$R = \frac{KP(L+L_e)}{A^3} \quad (3)$$

여기서, L_e : 등가 길이

통풍로의 단면적, 굴곡의 변화에 따라 해석시 고려해야 하는 등가길이는 Table 1과 같다. 이성과 같이 저항(R)과 공기량(Q)가 정해지면 식(2)

로 부터 압력이 구해지고, 이를 토대로 적정한 선 풍기의 선정이 가능해 진다.

Table 1. Equivalent length

Source	ft (m)	Source	ft (m)
Bend, acute, round	3 (1)	Contraction, gradual	1 (1)
Bend, acute, sharp	150 (45)	Contraction, abrupt	10 (3)
Bend, right, round	1 (1)	Expansion, gradual	1 (1)
Bend, right, sharp	70 (20)	Expansion, abrupt	20 (6)
Bend, obtuse, round	1 (1)	Splitting, straight branch	30 (10)
Bend, obtuse, sharp	15 (5)	Splitting, deflected branch(90°)	200 (60)
Doorway	70 (20)	Junction, straight branch	60 (20)
Overcast	65 (20)	Junction, deflected branch(90°)	30 (10)
Inlet	20 (6)	Mine car or skip (20% of airway area)	100 (30)
Discharge	65 (20)	Mine car or skip (40% of airway area)	500 (150)

Hardy Cross Method

환기 네트워크에서 가동점(operating point)은 Atkinson 공식으로 표현되는 터널의 저항곡선과 선풍기의 특성 곡선과의 교차점으로 결정된다. 그러나 여러 개의 망(mesh)을 가지는 환기 네트워크의 경우 이를 직접적으로 알아낼 수 없기 때문에 연속적인 계산에 의해서 오차를 줄여 나가는 반복법이 적용되는데 이를 "Hardy cross method"라 한다(한국동력자원연구소, 1982, 1986). Fig. 1은 가동점을 결정하는 방법을 나타낸다.

터널곡선과 선풍기 특성 곡선이 만나는 가동점(operating point)에서는 식 (4)가 성립한다.

$$P = P_t = P_f$$

$$Q = Q_t = Q_f$$
(4)

만약 시스템을 통과하는 공기량을 Q_a 라 하면, 터

널 곡선에서는 $P_t = f_2(Q_a)$, 선풍기 특성 곡선에서는 $P_f = f_1(Q_a)$ 가 된다. 이 때,

$$\Delta P = P_f - P_t \neq 0$$
(5)

만약 $\Delta P > 0$ 라면 Q_a 는 Q 보다 ΔQ_a 만큼 큰 값으로 표현될 것이고, $\Delta P < 0$ 라면 Q_a 는 ΔQ_a 만큼 작은 Q 값으로 표현될 것이다. 한편, $\Delta P = 0$ 라면 $Q_a = Q$ 이므로,

$$P_t = P_f = P$$
(6)

$$Q = Q_a + \Delta Q_a$$
(7)

(7)식을 (6)식에 대입하면 다음과 같다.

$$P_t = P_f = R(Q_a + \Delta Q_a)^2$$

$$= R Q_a^2 + 2 R Q_a \Delta Q_a + R \Delta Q_a^2$$
(8)

(8)식에서 ΔQ_a 가 매우 작은 값이라면, ΔQ_a^2 는 무시할 수 있으므로 (8)식을 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$P_t = R Q_a^2 + 2 R Q_a \Delta Q_a = P_f$$
(9)

$$\Delta Q_a = - \frac{\sum R Q_a |Q_a| P_f}{\sum 2R |Q_a|}$$
(10)

식 (10)에서 P_f 를 무시하면 다음 식이 된다.

$$\Delta Q_a = - \frac{\sum R Q_a |Q_a|}{\sum 2R |Q_a|}$$
(11)

(11)식의 ΔQ_a 가 일정 오차 범위 안에 수렴 될

때까지 반복하여 실시한다.

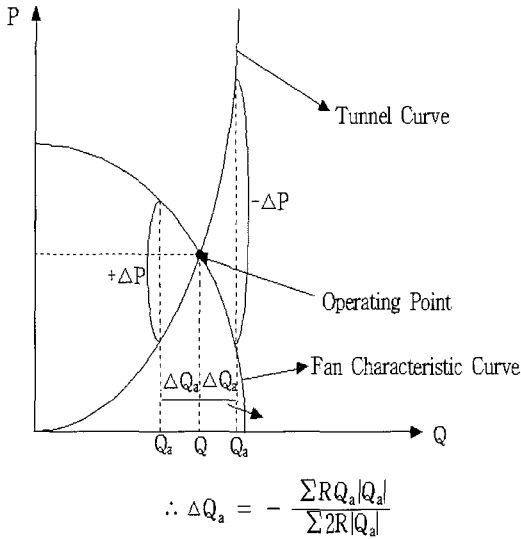


Fig. 1. Hardy cross method & operating point.

2.3 환기방식

자연환기방식

자연환기는 기계적 환기 설비를 이용하지 않고 자연적인 힘에 의해 환기하는 방식이다. 바람, 온도차, 압력차 등에 의해 자연적으로 환기시키는 방법으로 자연상태에 영향을 많이 받기 때문에 기계환기에 비해 환기량이 일정하지 않고 여름과 겨울에 외부 기온의 영향을 많이 받는다는 단점이 있다.

기계환기방식

기계환기는 기계를 이용하여 강제적으로 환기시키는 방법으로 자연환기에 포함되지 않는 모든 환기방식을 말한다(이와 임, 1995).

① 송기식

막장까지 신선한 공기를 공급하여 신속한 치환이 가능하며, 터널내부가 오염되거나 환기 구간의 길이가 짧아 막장 송기에 의한 배기가 가능하며, 풍관은 연결사용이 가능하므로 공사비가 절감된다. 집중송기식과 연속송기식이 있으며, 외기의 공기를 작업장 쪽에서 불어 넣어주는 방법으로 일반적으로 터널길이가 200~500m인 때에 많이 적용된다(Fig. 2 참조).



Fig. 2. The general method of a conveyance ventilation system.

② 배기식

막장에서 발생한 오염공기를 풍관으로 직접 배기한다. 풍관은 마찰저항이 적고 누풍이 없는 경질 풍관을 사용하며, 작업장에서 발생하는 오염원을 풍관을 이용하여 배기하므로 배기 효율적인 면에서는 우수하나, 높은 배기압력을 요하고, 경질풍관 사용에 따른 시공비가 증가하는 단점이 있다(Fig. 3 참조).

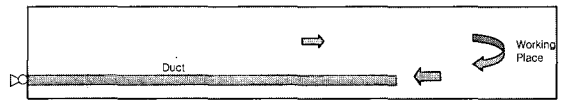


Fig. 3. The general method of an exhaust ventilation system.

③ 송·배기 조합식

배기식 또는 송기식의 환기 효과를 높이기 위해 막장부근의 작업공간에 보조적으로 송기용 팬과 풍관을 설치하는 것으로 송기팬은 터널내에 배기팬은 터널밖에 설치하여 터널내의 공기를 막장으로 송기한 후 희석된 오염공기를 배기 풍관을 통해 배출하는 방식이나 경질의 배기풍관이 필요하여 시공비가 증가된다(Fig. 4 참조).

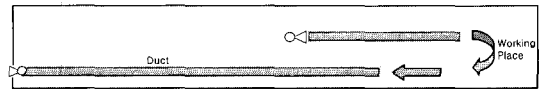


Fig. 4. The general method of conveyance and exhaust combination ventilation systems.

④ 송·배기 혼합식(배기 효과를 부여하기 위한 송기방식)

막장에서 발생한 오염공기를 풍관으로 배기하는 방식이나 배기용 선풍기를 터널 외부에 설치하는 것이 아니라 막장에 내부에 설치하여 배기식 환기 방식과 동일한 효과를 나타내도록 하는 방식이다. 아울러, 작업장 내부의 원활한 유동 형성을 위하여 보조 송기용 선풍기를 설치하여 환기 효율을 증대 시킨다. 송·배기 조합식과 유사한 환기 효

과를 가지며 상대적으로 값이 싼 연질의 풍관을 사용하므로 경제적인 방식이라 판단된다(Fig. 5 참조).

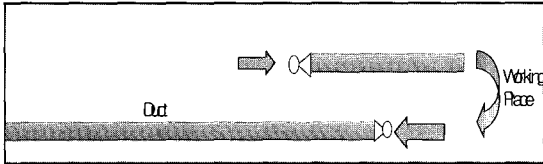


Fig. 5. The general method of conveyance and exhaust mixture ventilation systems.

⑤ 갱도식

관통된 터널이 2개 이상인 경우 풍관을 사용하지 않고 한쪽 터널의 갱구를 송기구 다른쪽을 배기구로 사용한다. 갱도 전체를 하나의 배기통로로 사용하는 것으로, 넓은 단면을 사용하므로 환기효율이 증대된다. 그러나 입기와 배기갱이 분리되어야 하며, 지하공동굴착과 같은 경우 갱도에 오염원이 항상 존재하므로 계속적인 작업을 수행하기 어렵다.

3. 수치해석에 의한 환기 해석

3.1 환기량 산정

발파가스에 대한 소요환기량과 디젤장비의 소요 환기량 중 큰 값을 사용하고, 여기에 작업장에서 작업하는 인원의 호흡에 필요한 소요환기량을 더해 작업장에 대한 소요 환기량을 산출한다.

환기량 산출기준

공사중의 터널 환기설비를 위한 환기량 산정은 시공방법에 따라 발파작업 및 공사용 사용 장비, 작업 사이클(cycle) 등으로 소요 환기량이 다르므로 1)발파에 의한 유해가스 배출을 위한 필요 환기량, 2) 작업자의 호흡에 필요한 환기량, 3) 디젤기관의 유해가스 배출을 위한 환기량 등을 고려하여 필요한 환기량을 산출한다(Table 2, 3 참조).

작업장의 소요환기량 산출

1) 갱내 작업원에 필요한 환기량
작업자의 호흡에 필요한 소요 환기량은 발파 후 가스 및 디젤기관 배기가스 등에 의한 발생량 보

Table 2. The standard of dust exposure in workplace environment

구 분		노동부고시 (제 97-65조)	일본산업위생학회 (1989)
		총 분 진	총 분 진
제 1종 분진	유리규산 (SiO ₂) 30% 이상의 광물성분진 등	2mg/m ³	5mg/m ³
제 2종 분진	유리규산 (SiO ₂) 30% 미만의 광물성분진 등	5mg/m ³	4mg/m ³
제 3종 분진	기타분진 (유리규산 1% 이하)	10mg/m ³	8mg/m ³
석 면 분 진		0.5개/cm ²	0.2개/cm ²

Table 3. The amount of requirement ventilation and operation rate

건설장비	정격출력에 대한 환기량 (m ³ /min · ps)	가동율
쇼벨(Shovel)계	2.2	0.2~0.3
덤프(Dump)계	0.8	0.4~0.5
기타기계	0.8	0.15~0.2

다 극히 적은 양이지만 장시간 작업시 특히 작업자가 많은 경우 CO₂ 농도는 증가되어 무시할 수 없으므로 작업자의 호흡에 필요로 하는 소요 환기량을 고려하여 반영하여야 한다(Table 4 참조).

Table 4. Necessary ventilation quantity per worker and ventilation velocity

구 분	미국	서독	오스 트리아	스위스	프랑스
작업자 1인당 필요환기량 (m ³ /min)	5.66	2.0	2.0	1.5	1.5
생내풍속(m/s)	0.3	0.2	0.3	0.3 (단면 20m ² 이상)	0.3

2) 발파가스에 대한 환기량

발파 후 터널내의 유해가스인 CO와 NO_x의 발생량은 폭약의 종류 및 장약량에 따라 다르나 소요 환기량은 Table 5와 같다.

Table 5. The generated amounts of harmful gas for ventilation (m³/min)

폭약의 종류	환기대상 유해가스	표준가스 발생량	비 고
일반 다이나마이트	CO	8×10 ⁻³	
기타 다이나마이트	CO	11×10 ⁻³	Gelatin Dynamite
슬러리(Slurry)폭약	CO	2.5×10 ⁻³	
에멀전(emulsion)폭 약	CO	5.0×10 ⁻³	
초유폭약(ANFO)	NO ₂	17×10 ⁻³	Finex-1

3) 내연기관의 배기가스에 의한 필요환기량

가솔린 또는 프로판 가스 기관의 중장비는 디젤 기관에 비하여 배기가스 중 CO의 발생량이 10~60배가 되며 산화질소(NO_x), 연화합물, 탄화수소 및 CO₂로 동시에 대량 배출되어 위험성이 크므로 작업중인 터널 등 지하공간에서는 가솔린 또는 프로판 가스 기관의 사용을 금하고 있다. 또한 디젤 기관 중 배기가스 처리장치 (Air Cleaner)가 없는 디젤기관도 터널내 작업을 금하고 있다. 터널내 작업중인 디젤기관으로부터 배출 되는 배기가스에 대한 환기량 산정대상은 NO_x로 하고 이의 허용농도는 NO를 고려하여 25ppm으로 하며, 디젤기관의 사용장비는 천공, 버럭처리 등을 고려하여 소

요환기량을 산정한다. Table 6은 내연기관의 종류에 따른 환기량을 나타낸다.

Table 6. The required ventilation amount and operation rate of diesel engine

건설장비	정격출력에 대한 환기량 (m ³ /min · ps)	가동율	비 고
쇼벨 (Shovel)계	2.2	0.2~0.3	쇼벨, 백호, 드릴잡보, 브레카 등 작업장형 장비
덤프 (Dump)계	0.8	0.4~0.5	덤프트럭, 트럭막사, 콘크리트펌프, 벡셀운반차 등
기타기계	0.8	0.15~0 2	숏크리트, 계측대차, 작업대차, 소형트럭 등

4) 뿔어붙임 콘크리트 타설시 분진에 대한 환기량

공사중인 터널내의 분진 발생은 작업 사이클에 따라 차이가 있으나 굴착, 버럭처리, 발파작업 및 뿔어붙임 콘크리트 타설시 분진이 발생된다. 뿔어붙임 콘크리트 작업시의 분진발생은 골재와 시멘트 혼합시 및 벽면에 뿔어 붙일 때 콘크리트가 튀어 나온다. 뿔어붙임 콘크리트 작업은 건식 공법의 경우보다 분진발생이 적은 습식 공법을 채택하여 작업장내 오염공기를 최소화하여 작업장 오염에 영향을 주지 않도록 한다. 이 때 분진은 대부분 광물성 분진이며 유리규산량도 20% 이하로 제 2중 분진에 해당되어 환기 대상에서 제외된다. Table 7은 터널 굴착작업의 각 사이클에서 발생하는 분진의 양을 나타낸다.

Table 7. The amount of dust generated in tunnelling operation

작업명	분진의 종류	발생량
천공작업	분진	1~50 mg/m ³
발파작업	분진 CO	100~300 mg/m ³
굴착작업	분진	100~1,500 mg/m ³
적재작업	분진	10~1,000 mg/m ³
운반작업	분진	10~1,000 mg/m ³
건설기계용 디젤기관	매연 CO	100~2,000 mg/m ³ 100~2,000 mg/m ³
뿔어붙임 콘크리트 작업	분진	10~200 mg/m ³

5) 소요 환기량

발파작업과 버럭치리는 동시작업이 불가능하므로 따로 생각하여 안전율을 고려하여 둘 중 많은 값의 환기량을 선정한다.

3.2 해석 조건 및 프로그램

본 연구대상 터널과 같이 터널의 길이가 긴 장대 터널의 경우는 풍관을 사용하는 경우이므로 작업장까지의 적절한 풍관 이격 간격을 선정하여 작업장에서의 보다 원활한 작업 환경을 유지하기 위한 환기 묘사가 필요하다. 여기서는 전문화된 바와 같이 MVS사의 V-net PC와 CHAM사의 PHOENICS 3.2 프로그램을 사용하여 각각의 환기 방식별 모델에서 작업장 공기 유동과 오염물질 거동 해석을 수행하였다. 우선 각 환기 방식에서 사용되는 기본적인 송기식과 배기식 환기방식에 대하여 수치해석을 하고, 두 방식 상호간의 조합형인 송배기 조합식, 변형 배기식, 송배기 혼합식 환기 방식을 대상으로 수치해석을 실시하였다. 각각의 환기 방식에 대하여 굴진의 진행정도에 따른 환기량 해석을 수행하였고, 풍관과 작업장의 이격 거리 및 풍관과 터널 측벽과의 이격 거리를 변화시켜 작업장 주변에서 환기속도의 유동해석을 실시하였다. 즉 환기량 묘사의 경우 굴착진행 정도에 따라 1000m까지 굴착한 경우(Phase 1)와, 2000m까지 굴착한 경우(Phase 2)로 나누어 해석을 실시하였다. 환기속도의 유동성 해석과 오염물

질의 회석 정도를 확인하기 위하여 사례별로 2차원 해석을, 그리고 특수한 경우에 대하여 3차원 해석을 실시하였다.

능동 터널의 설계 환기 방식은 설계원안은 송·배기 조합식이지만 이에 대한 대안은 송·배기 혼합식이다. 본 연구의 경우 송·배기 조합식의 경우 경질(硬質) 풍관의 이용에 따른 경제적인 문제점을 해결하기 위하여 송·배기 혼합식의 적용성 검토에 그 초점을 두었다.

2차원 해석 시 배기식, 송기식 및 변형 배기식은 풍관이 작업장으로부터 30, 50, 70m 이격되고, 또 각각에 대하여 벽면으로부터 풍관 직경의 0.5배와 1배 이격시킨 경우로 구분하여 해석하였다. 또한 송·배기 조합식은 송기풍관이 작업장으로부터 150m 이격되고, 배기풍관은 각각 30, 50, 70m 이격된 3가지 경우로, 그리고 송·배기 혼합식은 송기풍관을 50m 이격시키고 배기풍관은 각각 50, 100, 150m 이격시킨 사례에 대하여 연구하였다(Table 8 참조). 한편 3차원 해석은 가장 환기 효율이 좋은 송·배기 혼합식의 경우로 송기풍관을 50m, 배기풍관을 150m 이격시킨 경우를 각각 작업장의 좌·우에 배치시킨 경우와 터널의 한쪽 측벽부 상·하에 배치시킨 경우에 대하여 실시하였으나 지면관계상 송·배기혼합식에 대해서만 수록하였다.

Table 8. The 2-D simulation condition for fluidity analysis

배기식		송배기 조합식	송기식		변형배기식		송·배기 혼합식
작업장과 이격거리	측벽과 이격거리		작업장과 이격거리	측벽과 이격거리	작업장과 이격거리	측벽과 이격거리	
30m	0.5 ϕ	송기 풍관 150m 배기 풍관 30m	30m	0.5 ϕ	30m	0.5 ϕ	송기 풍관 50m 배기 풍관 50m
	1 ϕ			1 ϕ		1 ϕ	
50m	0.5 ϕ	송기 풍관 150m 배기 풍관 50m	50m	0.5 ϕ	50m	0.5 ϕ	송기 풍관 50m 배기 풍관 100m
	1 ϕ			1 ϕ		1 ϕ	
70m	0.5 ϕ	송기 풍관 150m 배기 풍관 70m	70m	0.5 ϕ	70m	0.5 ϕ	송기 풍관 50m 배기 풍관 150m
	1 ϕ			1 ϕ		1 ϕ	

3.3 송·배기 혼합식

2차원 해석

(1) 환기량 모사

송·배기 혼합 방식은 변형 배기식에 보조적으로 송풍기를 터널 내부에 설치하여 송기와 배기를 함께 이루어지게 만들어 환기를 극대화 시키는 방식이다. 이는 송배기 조합식과 비슷한 방식으로 송기 풍관은 터널 전체에 걸쳐 연결이 되어있는 것이 아니라 Fig. 6과 같이 작업장 바로 뒷부분에 짧게 설치된다. 송배기 조합식과는 달리 주 선풍기가 터널 외부에 설치되어있는 것이 아니라 작업장 부근에 설치되어 터널 외부로 송기하는 방식이다. 따라서 작업장 부근에 2개의 선풍기가 설치되고, 부분적으로 보조 풍관이 사용된다. 송기식과 배기식의 모델에서는 2개의 통풍로가 적용되었으나 송배기 조합식과 마찬가지로 송배기 혼합방식에서도 통풍로가 3개 적용된다. 또한 다른 환기 방식과 마찬가지로 누풍로를 설치하여 누풍율을 고려한 실제상황에 가까운 모사를 실시하였다.

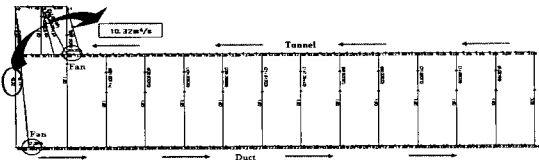


Fig. 6. The base model of conveyance and exhaust mixture ventilation systems.

(2) 유동 모사

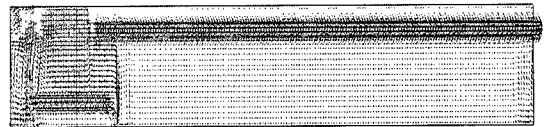
유동해석은 송배기 혼합식의 경우 송기 풍관을 50m로 이격시킨 경우에 있어서 배기 풍관을 50, 100, 150m의 이격거리 변화를 주어서 해석하였다. 측벽으로부터의 이격거리는 앞에서 서술한 바와 같이 사용된 풍관의 직경 대 비율, 즉 1500mm의 풍관이 사용된 경우 1500mm의 이격거리를 설정하여 해석하였다. 0.5φ(750mm)의 이격거리는 다른 환기 방식과 동일하게 벽면 저항에 의해 유동이 감소할 것으로 판단하여 0.5φ 보다 효율적인 1φ의 경우에 있어서 해석을 수행하였다. 환기량 해석에서 서술한 바와 같이 변형 배기식에 보조 선풍기를 설치하여 작업장의 유동을 추가하였다. 이러한 선풍기의 위치를 가지는 2차원 해석의 경우에서 보여지 듯이 다른 환기 방식과 비교하여 매우 뛰어난 환기 효율이 보여진다.

이에 3차원 해석을 사용하여 송기 풍관과 배기 풍관의 배치에 따른 환기 효율 측면도 살펴보았다. 3차원 해석의 경우 선풍기는 이동형임을 고려하여 높이 4m 위치에 설치한 경우와 좌우 배치에 의한 환기 효율을 해석하였다. 오염물질의 해석에 있어서 다른 환기 방식과 같이 작업장에서 발생하는 오염물질은 최대치를 1로 설정하고 그에 따른 비율적 분포를 살펴보았다. 다른 환기 방식과 달리 터널 입구부에서 보이는 오염물질의 농도는 터널 외부로 배기된 오염물질의 재유입에 의한 농도 분포로 예상된다. 이는 작업장에서의 선풍기 두 대에서 발생하는 정압이 크기 때문에 터널 외부의 공기가 유입되는 것으로 유추된다.

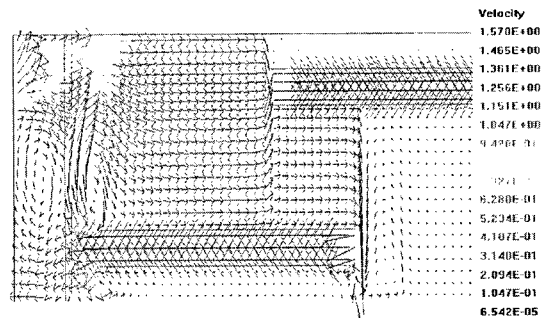
가) 작업장으로부터 송기 풍관 50m, 배기 풍관 150m 이격 경우

① 유동속도

송기 풍관을 작업장에서 50m, 배기 풍관을 작업장에서 150m 이격시킨 경우로 터널내 속도 분포는 Fig. 7(a)와 같다. 특히, 작업장으로부터 약 250m 부근까지의 그림은 Fig. 7(b)이다. 작업장의 최대 공기 속도는 약 1.15m/s 이다.



(a) 전체 해석 구간의 속도 벡터도



(b) 작업장으로부터 약 250m 지점까지 속도 벡터도

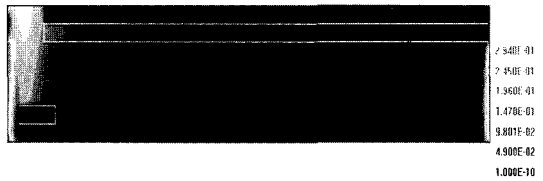
Fig. 7. The velocity vector profile.

② 오염물질

앞의 송배기 혼합식의 경우와 유사한 분포를 보이고 있지만 송기 선풍기에 의한 유동이 완전하게 형성된 이후 배기 풍관에 의한 배기가 이루어지므로 작업장의 오염물질 농도는 다른 송배기 혼합식의 사례와 비교할 때 낮은 편이다. 즉 송기 선풍기에 의해서 작업장의 오염물질을 터널 외부 방향으로 이끌어 내면 작업장 뒤에 있는 배기 풍관을 통해 터널 외부로 배기시킨다. 마지막 단계에서 보이는 작업장의 오염물질 농도는 약 21%로 배기 풍관을 100m 이격시킨 경우와 비교할 때 약 0.2%의 차이를 보인다(Fig. 8참조).



(a) 단계 1



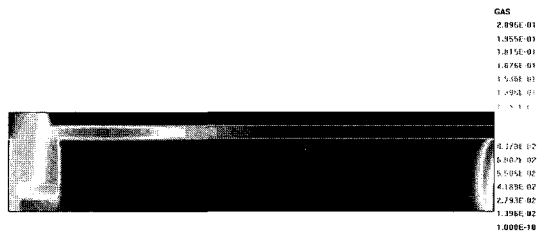
(b) 단계 2



(c) 단계 3



(d) 단계 4



(e) 단계 5

Fig. 8. The contaminant distribution profile.

3차원 해석

송배기 혼합식의 2차원의 경우에서 살펴본 바와 같이 송기 풍관 50m, 배기 풍관 150m 인 경우가 작업장의 오염물질 농도가 가장 낮으므로 이에 대하여 3차원 해석을 실시하였다. 이는 2차원 해석의 경우 터널 상하로 설치된 경우에 있어서 해석이 불가능하므로 추가적인 해석이 되겠다. 기본적인 구조는 송배기 혼합식의 방식이므로 선풍기는 송기방식이고, 두 대가 설치 되어있다. 한 대의 선풍기는 배기 효과를 발생하는 변형 배기식의 선풍기이고 한 대는 작업장의 유동을 보조하는 보조 선풍기이다.

3차원 해석의 경우 오염물질 분포는 2차원의 경우와 같이 단계별로 해석한 오염물질 농도 분포가 아니고, 작업장에서 지속적인 오염물질 배출이 발생할 경우에 있어서 터널을 통한 오염물질의 농도 분포이다.

(1) 작업장으로부터 송기 풍관 50m, 배기 풍관 150m 이격되고 상하 조합된 경우
 송기 풍관은 작업장면에서 50m 이격되어 있고 터널 바닥 부분에 설치되어 있다. 배기 풍관은 작업장면에서 150m 이격되어 있고 터널 바닥에서 선풍기를 이동시키는 차량 상부 부근 4m지점에 설

치된 경우의 유동 해석이다.

(가) 유동속도

Fig. 9 는 X Plan과 Y Plan의 속도 분포도이다. 선풍기가 설치된 부근의 유속이 높음을 알수 있고 2차원에서 살펴본 재유입이 발생하고 있음을 알수 있다. 작업장의 최고 유속은 약 0.23m/s이다.

(나) 오염물질

Fig. 10에는 3차원 경우의 오염물질 분포가 나타나 있다. 상하로 배치되어있는 관개로 송기 선풍기에 의한 공기차단 효과가 감소하여 터널을 통한 오염물질이 약 50% 분포된다.

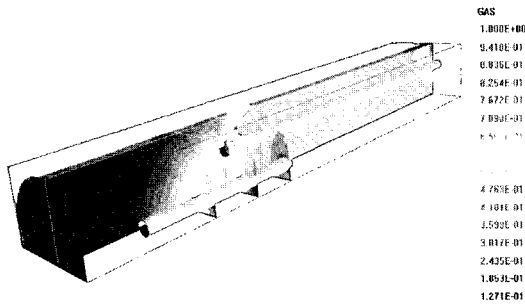


Fig. 9. The velocity vector profile of X-Y section.

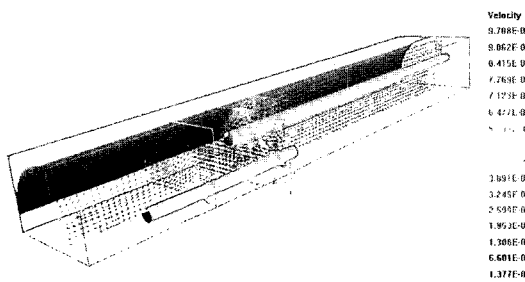


Fig. 10. The contaminant distribution profile of X-Y section.

(2) 작업장으로부터 송기 풍관 50m, 배기 풍관 150m 이격되고 좌우 조합 경우

송기 풍관은 작업장면에서 50m 이격되어 있고 터널 바닥 우측에 설치되어 있다. 배기 풍관은 작업장면에서 150m 이격되어 있고 터널 바닥 좌측에 설치된 경우의 유동 해석이다.

가) 유동속도

상하 배치와 같이 선풍기가 설치된 부분에서 유속이 가장 높게 분포하고 터널 입구 부분에서 재유입도 확인된다. 작업장에서의 최대 속도는 약 0.18m/s이다(Fig. 11 참조).

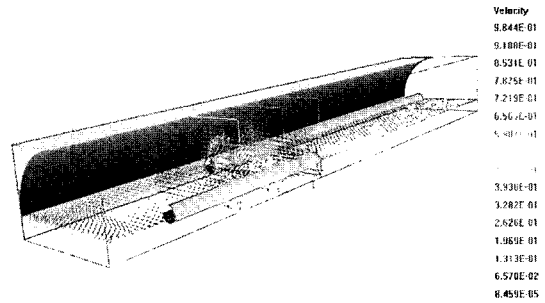


Fig. 11. The velocity vector profile of X-Z section.

나) 오염물질

상하 배치와 달리 송기 선풍기에 의한 공기차단 효과로 터널을 통한 오염 물질 분포는 약 24%로서 상하 배치의 경우보다 약 26%차이로 매우 양호한 분포를 보이고 있다(Fig. 12 참조).

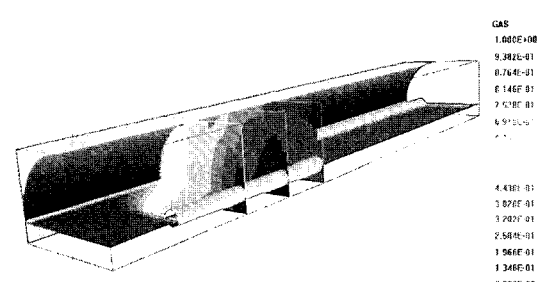


Fig. 12. The contaminant distribution profile of X-Z section.

이상 살펴본 바와 같이 송·배기 혼합식은 다른 환기 방식보다 뛰어난 효과를 보이며 터널내 오염물질의 농도 분포도 양호하다. 특히 송기 풍관 50m, 배기 풍관 150m 이격 경우에 있어서 그중 뛰어나며 3차원 해석 결과 터널 좌우에 배치한 경우가 오염물질 배기에 가장 효율적이다.

4. 경제성 비교 및 효과

4.1 각 방식별 경제성 비교

운영비

각 환기 방식별 운영비를 비교하여 보면 Fig. 13, 14와 같다. 전체적으로 보면 송배기 조합식과 송배기 혼합식의 경우가 가장 높은 비용이 소요된다. 이는 다른 방식과 비교할 때 이 두 환기방식의 경우에는 같은 용량의 선풍기 대수가 두 대가 사용되기 때문이다. Phase 1과 Phase 2의 경우 비용이 크게 늘어나지 않는 이유는 풍관을 이용한 환기이므로 풍관의 저항에만 관련되어 운영비가 증가하기 때문이다. 또한 배기식, 송·배기 조합식의 경우는 배기 선풍기가 터널 외부에 설치되어있는 관계로 선풍기의 음압 발생으로 풍관의 재질이 경관이어야 한다. 풍관 재질에 따른 가격 비교는 뒷부분에 기술하였다. 그러므로 이 두 경우, 배기식과 송배기 조합식의 초기 설치비용이 다른 환기 방식에 비교해서 높아지게 된다.

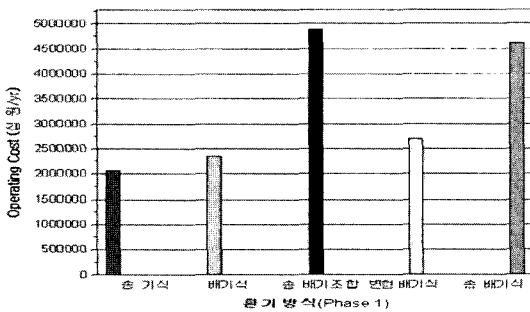


Fig. 13. Operation cost of phase 1.

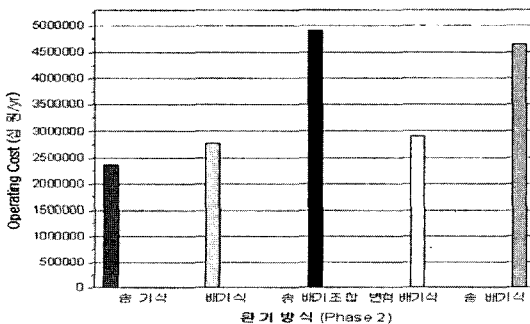


Fig. 14. Operation cost of phase 2.

본 연구에서는 선풍기 제작시 선풍기의 특성에 의해 만들어지는 선풍기 특성 곡선의 부재로 한 종류의 선풍기만 모사하였다. 따라서 송배기 조합식과 송배기 혼합식의 경우에서 사용되는 보조 선풍기의 자료 또한 주 선풍기의 자료를 사용하였다. 환기량 모사 결과를 살펴볼 때 작업장에서의 소요 환기량인 10.3m³/s 보다 약 2배정도 큰 20.83m³/s의 용량을 갖는 선풍기가 송배기 조합식과 송배기 혼합식에서 두 대씩 사용되었으므로 보다 작은 용량의 선풍기가 사용 가능할 것으로 예상된다. 그러므로 송배기 조합식의 경우와 송배기 혼합식의 경우에는 보다 소용량의 보조 선풍기를 사용할 경우 작업장의 환기 효율에 영향이 없이 운영비가 낮아질 것으로 예상된다.

풍관 재질에 따른 경제성 평가

경제적인 방식을 선정하기 위해선 종류별 풍관과 각각의 가격에 대해서 고려해야 한다. 풍관은 연관 재질과 경관 재질로 구분된다. 연관재질은 배기식과 송배기 조합식의 경우 터널 외부에 설치된 선풍기에 의한 음압이 발생되므로 풍관의 재질 특성상 사용하기 어렵다. 게다가 송배기 조합식의 경우 송기식과 배기식의 두 가지 방식이 혼용되므로 각각의 방식에 따른 알맞은 재질의 풍관을 사용하여야 할 것이다. 이러한 각각의 풍관 재질별 가격은 Table 9와 같으며, 원형 풍관과 이중흡음 원형풍관이 경관 재질이고, Fabric Duct, PVC 코팅 Duct, 줄타포린 풍관은 연관 재질의 풍관에 속한다. 이중흡음원형풍관이 m당 900,000원으로 가장 고가이며, PVC 재질의 풍관이 m당 23,260원으로 가장 저렴하여, m 당 약 39배의 가격 차이를 보인다. 경관 재질의 풍관으로 가장 저렴한 풍관은 180,000[원/m]으로 PVC 재질의 그것과는 m 당 약 7.7배의 차이가 있다.

Fig. 15는 풍관을 능동 터널에 사용할 경우 터널 연장, 즉 굴착 진행에 따른 풍관 길이 변화로 인해 예상되는 가격이다. 가격은 굴착이 2000m 까지 진행된 경우까지를 살펴보았다. Phase 2까지 설치되는 풍관의 가격은 이중흡음원형이 약 18억 원으로 가장 비싸고, PVC 풍관이 약 4,650만원으로 가장 낮은 가격을 나타낸다. 따라서 장대 터널의 공사 중에는 경제적인 측면을 고려하여 가능한 연관 재질의 풍관 사용이 요구되어진다.

Table 9. A prospective price tag of pipes per meter

덕트 종류		가격 (원/m)
스파이럴 덕트	원형 덕트	180,000
	OVAL 덕트	195,000
	이중흡음원형 덕트	900,000
Flexible 덕트	Fiber Glass Fabric	76,000
PVC 덕트	PVC 코팅지	23,260
	졸타포린	35,100

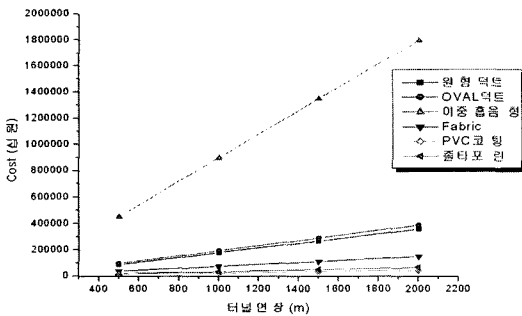


Fig. 15. Price of each pipe type according to tunnel extension.

이상에서 살펴 본 바와 같이 환기 방식 효율은 배기식의 효율이 가장 좋지만 시공비의 증가로 인해 사용이 어렵다. 또한 적절한 배기 효율을 가지기 위해서는 풍관의 작업장과의 이격거리가 30m 이내를 유지해야 하므로 작업 공간의 확보에도 적합하지 않다. 이에 시공비는 낮지만 배기식의 유동 분포를 보이는 변형 배기식을 검토해 보았다. 이러한 변형 배기식 또한 작업장의 오염물질 제거를 위해 작업장과의 이격 거리가 30m 이하로 근접해야만 하는 단점이 있어 작업 공간의 확보를 위해 송배기 조합식이나 송배기 혼합식의 사용이 권장된다. 그러나 송배기 조합식의 경우에도 배기식에서 사용되는 경관 재질의 풍관을 사용하므로 시공비가 높다. 따라서 위의 단점을 보완한 송배기 혼합식을 사용할 경우 연관 재질의 풍관을 사용하므로 시공비가 낮고 작업장에서의 오염물질 제거 효율 역시 배기식에 준하는 수준을 보이므로 송배기 혼합 환기 방식이 다른 환기 방식인 송기식, 배기식, 송배기 조합식, 변형 배기식의 환기 방식보다 경제적이고 환기적인 측면에서 효율적이라 하겠다. 참고로 통기 방법별 경제성을 비교하면 Table 10과 같다.

Table 10. The economical efficiency with ventilation types

항 목	송기식			배기식			송배기 혼합식		
	30m	50m	70m	30m	50m	70m	송기 50m 배기 50m	송기 50m 배기 100m	송기 50m 배기 150m
운영비 (원/ yr)	23,045,241	23,045,241	23,045,241	27,534,683	27,534,683	27,534,683	44,668,775	44,876,793	45,352,684
설치비 (천원/2km)	45,822	45,357	44,892	354,600	351,000	347,400	50,009	50,009	50,009
작업장 속도. (m/s)	0.50	0.42	0.33	0.23	0.17	0.06	1.15	1.16	1.15
오염 물질 배출	양호	불량	불량	양호	불량	불량	비교적 양호	비교적 양호	매우 양호
비고	터널 전반적 오염물질 분포			작업장 배기 상태 불량			오염물질 배출 및 풍관 재질을 고려한 경제적인 측면에서도 우수		

5. 결 론

공사중의 터널내에는 운반차량이나 증기 등에 의한 배기가스, 폭파로 인해 발생하는 각종 후(after) 가스, 작업원의 호흡, 땀어붙임 콘크리트 타설시 분진의 확산 등으로 갱내 공기는 오염되었고 이것을 그대로 방치하면 작업환경이 악화된다. 터널공사에서는 짧은 터널 등 특수한 경우를 제외하고는 일반적으로 인공적인 환기를 위하여 환기 설비를 준비해야 한다.

굴착중인 터널의 환기방식은 크게 송기식, 배기식, 변형 배기식 및 송·배기 조합식 그리고 송·배기 혼합식으로 구분할 수 있다. 시공중인 터널에 앞에 예시한 여러 방법 중 어떤 환기방식을 채택할 것인지는 환기의 효율성과 경제성을 고려하여 최적의 방식을 선정해야 한다. 일반적으로 앞의 3가지 방식은 비교적 길지 않은 터널공사에, 그리고 장대 터널의 경우는 뒤의 2가지 방식이 주로 채택된다.

본 연구에서 대상으로 한 산의-상복간 제3공구 국도확장공사의 일부인 능동터널은 직경 13m, 길이 4,580m의 쌍굴 터널로써 거의 전 구간을 NATM에 의해 굴착하도록 계획되어 있다. 당초 설계에는 송·배기 조합식으로 계획되어 있으나 이의 타당성을 검토하고 보다 개선된 환기 방식을 모색하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다. 이를 위하여 굴착중 터널의 소요 환기량을 산정하고, 이 소요 환기량과 선택 가능한 여러 경우의 환기 조합식을 구성한 다음 수치해석을 통하여 환기의 유동성 해석, 오염물질의 분포 상태를 분석하였다. 또한 각 방식별 풍관(duct) 재질에 따른 설치비와 운영비를 중심으로 경제성을 검토한 다음, 종합하여 최적의 환기 방식을 도출하였다. 이를 위하여 환기량에 대한 모사(simulation) 및 운영비는 V-net PC를, 막장 부근의 환기 유동 해석은 Phonics를 사용하여, 2차원 해석은 15가지 사례별로, 그리고 2차원 해석 결과 제일 우수한 것으로 확인된 2가지 경우에 대하여 3차원 해석을 실시하여 환기 방식을 결정하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 장대 터널의 경우 효과적인 환기 방식은 송·배기 조합식과 송·배기 혼합식이라 할 수 있다. 따라서 능동 터널의 경우 송·배기 조합식으로 계

획되었으나 본 연구 결과 송·배기 혼합식을 추천하였다. 두 방법 모두 송·배기용 선풍기 2대가 필요하나 전자는 배기용 선풍기를 터널 외부에 설치(터널 내부 1대, 터널 외부 1대)하기 때문에 배기 풍관의 재질이 단단해야 된다. 반면에 후자는 배기용 선풍기를 터널 내에 설치(2대 모두 터널내에 설치)하기 때문에 연질의 풍관 사용이 가능하다. 즉 환기 효율면에서 두가지방법 모두 우수하나 설치비가 경제적인 송·배기 혼합식이 가장 적합한 것으로 판단된다.

2. 송·배기 혼합식은 다른 환기 방식에 비하여 작업장내 공기의 유동속도가 우수하며 오염물질의 배출도 양호한 것으로 해석되었다.

3. 같은 환기방식을 채택하더라도 환기 효율은 송, 배기 풍관과 작업장간의 이격거리에 따라 차이를 보인다. 송·배기 혼합식의 경우 송기 풍관과 배기 풍관을 작업장으로부터 각각 50m, 150m 이격시킨 경우가 환기 속도도 빠르고 오염물질의 배출 효과가 매우 양호한 것으로 확인되었다. 이와 같은 이유는 송기 선풍기에 의한 유동이 완전하게 형성된 다음에 배기 선풍기에 의한 배기가 이루어지기 때문이다.

4. 3차원 수치해석 결과 3과 같은 이격거리 조건에서도 송기 풍관과 배기 풍관을 터널 한쪽 상, 하부에 설치하는 것 보다 작업장 터널의 좌, 우에 배치한 경우가 오염물질 배기에 효율적인 것으로 파악되었다.

참고문헌

1. 대한광업진흥공사, 1986, 갱내 골격구조 및 통기 개선을 위한 기초 연구, 대한광업진흥공사.
2. 이희근, 임한옥, 1995, 터널·지하공간 굴착공학, 구미서관, 서울, pp. 223-253.
3. 한국동력자원연구소, 1982, 갱내통기계통 개선 연구, 한국동력자원 연구소.
4. 한국동력자원연구소, 1986, 갱내 통기 종합시스템 연구, 한국동력자원 연구소.



오 병 화

삼성건설 대청댐비상여수로 현장 소장

전화 : 011)9746-5111

E-mail : oobh67@hanamil.net

임 한 옥

강원대학교 공과대학 명예교수

전화 : 031)478-1271

E-mail : wonnb@wonnb.co.kr
