산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제26권 A호, 2006.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Nat'l Univ.,Korea, No. 26 A, 2006.

굴착중인 장대터널 내 최적의 환기시스템에 관한 연구

The Study on Optimum Ventilation System during Long Tunnel Construction

임 한 욱* 오 병 화**
Lim, Han-Uk Oh, Byung-Hwa

Abstract

To determine the optimum ventilation systems during long tunnel excavation, the velocity vector profile and the contaminant's distribution at working place are studied using 2-D, 3-D numerical analysis. The main results can be summarized as follow;

In case of long tunnels, blower-exhaust-mixture types which enable to use soft blast ducts is most appropriate in terms of ventilation and economical efficiency. Of the same ventilation types, ventilation efficiency has a difference according to blast ducts and the distance between fan and working place. The 3-D numerical result shows that arranging blower and exhaust ducts in the right and left corners of the tunnel respectively is effective to discharge contaminant.

The result of the real measurement shows that CO concentration can be reduced to below 50 ppm, which is regulation value, as 16-minutes fan operation goes on.

키워드 : *송·배기 혼합식 환기, 오염물질 분포, 최적 환기시스템, 장대터널 건설, 속도벡터*
Keywords : *blower-exhaust mixture type, contaminant's distribution, optimum ventilation system, long tunnel excavation, velocity vector*

1. 서론

최근 들어 교통수송의 폭발적인 증가로 인하여 새로운 도로 및 철도건설의 수요가 증가되고 있으며 국토의 70% 정도가 산지인 우리나라의 특성상 도로 및 철도 건설시 터널 특히 2km이상의 장대터널의 시공이 빈번한 추세이다. 이러한 터널공사시 발생하는 유해가스, 부유분진 등에 의한 오염된 공기를 효과적으로 처리할 수 있는 최적의 환기시스템 구축이 필수적이다. 이는 공사중의 재해방지와 갱내작업자의 작업조건 개선을 통한 시공성 향상을 이루는 중요한 요소이기도 하다.

* 강원대학교 지구시스템공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 산업대학원 지구시스템공학과 석사과정 졸업. (주)삼성물산 근무

그동안 산업안전보건법 및 관련 기준에 근거하여 공사 중 터널 내 환기를 임시가설에 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 부산 지방 국토 관리청에서 발주한 산외-상북간 제3공구 국도확장공사(능동터널)로 이 구간의 능동터널은 직경 13m, 길이 4,580m의 쌍굴 장대터널로 일부구간을 제외하고 전단면을 NATM에 의해 굴착하는 것으로 계획되었다. 굴착이 진행됨에 따라 송기식만으로 환기하는 데에는 한계가 예상되어 별도의 방식검토가 필요하게 되었다. 따라서 굴착 중 터널의 소요 환기량을 산정하고 이 소요 환기량과 선택 가능한

여러 가지 경우의 환기조합방식을 사례별로 구성한 뒤 환기량과 유동성을 해석하고 비교함으로서 경제적으로도 우수한 최적의 환기 조합안을 도출하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

본 연구에서 환기량에 대한 모사(Simulation) 및 운영비(Operating cost)는 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 CO가스와 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 저항

2.2.1 공기량과 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.

관(pipe)이나 유체자체의 내적 마찰 또는 개방된(Opening) 벽의 저항 또는 끌림에 기인하는 흐름에서 발생하는 정적압력의 손실로서 갱내 통풍로의 마찰손실은 흐름의 속력, 풍관의 내적 표면의 특징, 그리고 풍관의 면적에 관계된다. 원형 풍관에서 마찰손실을 계산하기 위한 유체역학 식은 다음과 같다.

$$H_l = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \qquad (1)$$

H_l : Head Loss in ft(m)
L : Length in ft(m)
D : Diameter in ft(m)
V : Velocity in fps(m/s)
f : Coefficient of Friction

일반적으로 유체역학을 위한 Darcy-Weisbach의 버전으로부터 환기에 마찰손실을 위한 Atkinson식은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$H_f = \frac{KPLV^2}{A} \qquad (2)$$

H_f : Friction Loss in Inches of Water(Pa)
V : Velocity in fpm(m/s)
K : Empirical Friction Factor in $lb\times min^2/ft^4$ (kg/m^4)

공기의 속도는 알려지지 않았지만 공기량 Q는 주어져 있다. V=Q/A이므로 V를 따로 계산하는 것보다, 사용에 편리하도록 정리하면 다음과 같다.

$$H_l = \frac{KPLQ^2}{A^3} \qquad (3)$$

2.2.2 충격 손실(Shock loss)

식 (3)에서 마찰 손실과 더불어 고려되어야 할 것이 바로 충격손실(Shock Loss)이다. 충격손실은 마찰손실과 함께 관의 면적이나 공기 흐름의 방향이 바뀜에 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 지하공간의 환기 설계에서 많이 사용되는 충격손실 측정 방법은 단면적 변화가 없는 직선 통풍로에 충격 손실이 가해지는 만큼의 등가한 길이(Equivalent Length)를 더해줌으로써 구하게 된다.

$$R = \frac{KP(L+L_e)}{A^3} \qquad (4)$$

Le : Equivalent Length (m)

2.2.3 Hardy Cross Method

환기 네트워크에서 가동점(Operating Point)은 Atkinson 공식으로 표현되는 터널의 저항곡선과 선풍기의 특성 곡선과의 교차점으로 결정 된다. 그러나 여러개의 망(Mesh)을 가지는 환기 네트워크의 경우 이를 직접적으로 알아낼 수 없기 때문에

연속적인 계산에 의해서 오차를 줄여 나가는 "Iteration Method"가 적용 되는데 이를 "Hardy Cross Method"라 한다.

터널곡선과 선풍기 특성 곡선이 만나는 가동점(Operating Point)에서는 식(5)가 성립한다.

$$P = P_t = P_f$$
$$Q = Q_t = Q_f \quad (5)$$

만약 시스템을 통과하는 공기량을 Q_a 라 하면,

$$P_f = f_2(Q_a) : \text{터널 곡선에서}$$
$$P_t = f_2(Q_a) : \text{선풍기 특성 곡선에서} \quad (6)$$

가 된다. 이 때,

$$\Delta P = P_f - P_t \neq 0 \quad (7)$$

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 $Q_a = 0$ 이므로,

$$P_t = PQ^2 = P_f \quad (8)$$
$$Q = Q_a + \Delta Q_a \quad (9)$$
$$P_f = P_t = R(Q_a + \Delta Q_a)^2 = R Q_a + 2 R Q_a \Delta Q_a + R \Delta Q_a^2 \quad (10)$$

그런데, ΔQ_a 가 매우 작은 값이라면, ΔQ_a^2 는 무시할 수 있으므로 다음식이 성립한다.

$$P_t = R Q_a^2 + 2R Q_a \Delta Q_a = P_f \quad (11)$$

$$\Delta Q_a = -\frac{\Sigma R Q_a |Q_a| P_f}{\Sigma 2R|Q_a|} \quad (12)$$

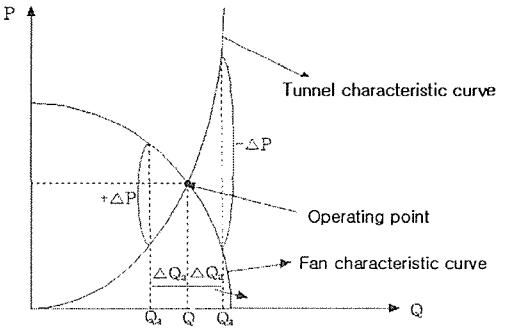
식 (12)에서 P_f를 무시하면 다음식이 된다.

$$\Delta Q_a = -\frac{\Sigma R Q_a |Q_a|}{\Sigma 2R|Q_a|} \quad (13)$$

윗 식의 ΔQ_a 가 일정 오차 범위안에 수렴 될 때까지 반복하여 실시한다.

2.3 환기방식

환기는 사용하는 동력원에 따라 자연 환기(Natural Ventilation)와 기계 환기(Mechanical Ventilation)로 나눌 수 있다.



$$\therefore \Delta Q_a = -\frac{\Sigma R Q_a |Q_a|}{\Sigma 2R|Q_a|}$$

Fig. 1 Hardy Cross Method & Operating Point

2.3.1 자연 환기방식

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.

2.3.2 기계 환기방식

기계환기는 기계를 이용하여 강제적으로 환기시키는 방법으로 자연환기에 포함되지 않는 모든 환기방식을 말한다.

① 송기식

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

② 배기식

막장에서 발생한 오염공기를 풍관으로 직접 배기한다. 풍관은 마찰저항이 적고 누풍이 없는 경질풍관을 사용하며, 작업장에서 발생되는 오염원을 풍관을 이용하여 배기하므로 배기 효율적인 면에서는 우수하나, 높은 배기압력을 요하고, 경질풍관 사용에 따른 시공비가 증가하는 단점이 있다.

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 막장으

로 송기한 후 희석된 오염공기를 배기 풍관을 통해 배출하는 방식이나 경질의 배기풍관이 필요하여 시공비가 증가된다.

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 환기방식과 동일한 효과를 나타내도록 하는 방식이다. 아울러, 작업장 내부의 원활한 유동 형성을 위하여 보조 송기용 선풍기를 설치하여 환기 효율을 증대시킨다. 송·배기 조합식과 유사한 환기 효과를 가지며 상대적으로 값이 싼 연질의 풍관을 사용하므로 경제적인 방식이라 판단된다.

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.

2.4 선풍기 형식의 선정

선풍기의 풍량 결정은 환기방식이 막장주위에 선풍기가 설치되는 송기식 또는 배기식인 경우는 누풍을 고려하지 않아도 되나 터널외부 또는 내부에 송풍기를 설치하는 송기·배기식의 경우는 풍관을 통하여 막장주위에 공급 또는 배기되므로 공사 진행중 풍관의 파손 또는 연결부의 불량 등에 의한 누풍 현상이 발생되므로 누풍을 고려한 선풍기의 풍량을 산정하여야 한다.

풍관내의 풍속은 소음, 진동 등을 고려하여 10~20m/s 바람직하다. 풍관내의 풍속을 16m/s이상으로 산정할 경우 풍관의 직경을 축소할 수 있으나 이는 소음, 진동대책이 필요하므로 공사용 터널 환기방식에서는 비경제적이라고 할 수 있다.

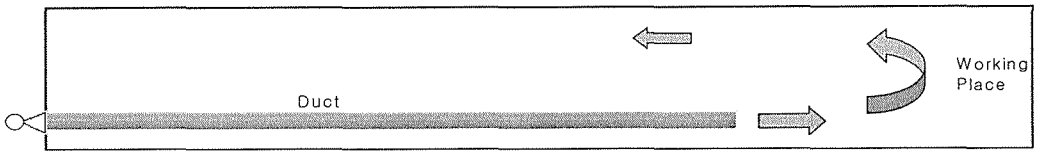


Fig. 2 The general method of a blower ventilation system

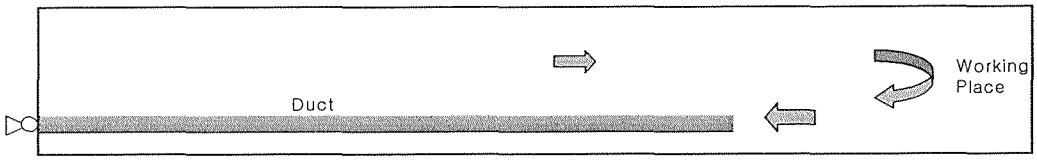


Fig. 3 The general method of an exhaust ventilation system

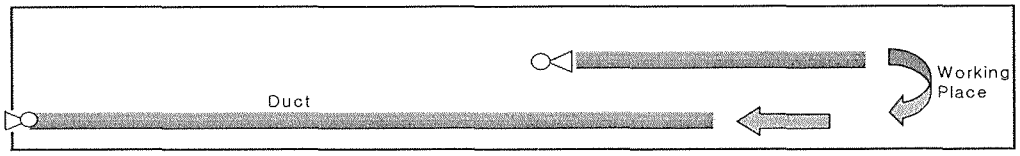


Fig. 4 The general method of blower and exhaust combination ventilation systems

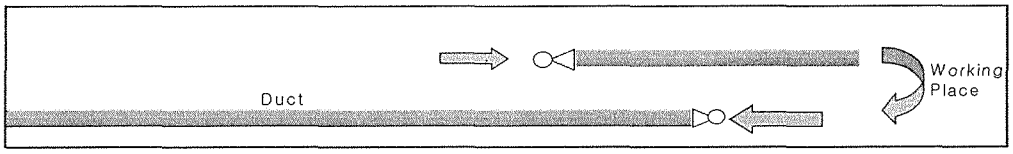


Fig. 5 The general method of blower and exhaust mixture ventilation systems

3. 수치해석에 의한 환기 해석

3.1 환기량 산정

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

3.1.1 환기량 산출기준

공사중의 터널 환기설비를 위한 환기량 산정은 시공방법에 따라 발파작업 및 공사용 사용 장비, 작업 싸이클(cycle) 등으로 소요 환기량이 다르므로 발파에 의한 유해가스 배출을 위한 필요환기량, 작업자의 호흡에 필요한 환기량, 디젤기관의 유해가스 배출을 위한 환기량 등을 고려하여 필요한 환기량을 산출한다.

3.1.2 작업장의 소요 환기량 산출

1) 갱내 작업원에 필요한 환기량 (Q_1)

작업자의 호흡에 필요한 소요 환기량은 발파 후 가스 및 디젤기관 배기가스 등에 의한 발생량 보다 극히 적은 양이지만 장시간 작업시 특히 작업자가 많은 경우 CO_2 농도는 증가되어 무시할 수 없으므로 작업자의 호흡에 필요로 하는 소요 환기량을 고려하여 반영하여야 한다.

$$Q_1 = q \times N \qquad (14)$$

q : 작업원 1명당 소요환기량 (보통 $3m^3/min.명$)
N : 갱내의 최대 작업 인원수 (최대 30명)
$\therefore Q_1 = 3.0m^3/min \times 30명 = 90m^3/min$

2) 발파가스에 대한 환기량 (Q_2)

발파 후 터널내의 유해가스인 CO와 NOx의 발생량은 폭약의 종류 및 장약량에 따라 다르나 소요 환기량은 다음과 같이 산출한다.

$$Q_2 = \frac{0.368 \times W \times \varepsilon}{R \times a \times t} \qquad (15)$$

W : 1회 발파에 필요한 화약량 : 269kg
ε : 화약 1kg당 유해가스 발생량(m^3/kg)
다이나마이트 (일반폭약) : $8.0 \times 10^{-3} m^3/kg$
R : 송기식의 경우 1.0
a : 유해가스의 허용농도(CO 50ppm)
t : 환기소요시간 (30min)

◦ 다이나마이트 사용시 발생되는 CO에 대한 필요 환기량(Q_a)

$$Q_a = \frac{0.368 \times 269 \times 8 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-6} \times 30} = 528 m^3/min$$

3) 내연기관의 배기가스에 의한 필요환기량(Q_3)

가솔린 또는 프로판 가스 기관의 중장비는 디젤기관에 비하여 배기가스중 CO의 발생량이 10~60배가 되며 산화질소(NO_x), 연화함물, 탄화수소 및 CO_2로 동시에 대량 배출되어 위험성이 크므로 작업중인 터널 등 지하공간에서는 가솔린 또는 프로판 가스 기관의 사용을 금하고 있다. 또한 디젤기관 중 배기가스 처리장치 (Air Cleaner)가 없는 디젤기관도 터널내 작업을 금하고 있다. 터널내 작업중인 디젤기관으로부터 배출 되는 배기가스에 대한 환기량 산정대상은 NOx로 하고 이의 허용농도는 NO를 고려하여 25ppm으로 하며, 디젤기관의 사용장비는 천공, 버럭처리 등을 고려하여 소요환기량을 산정한다. 능동터널의 경우

Q_3 = 적재장비 및 운반장비 출력(PS) × 가동율 × 유해가스 발생량

$Q_A = (308PS \times 0.2) \times 2.2 = 136m^3/min$

$Q_B = (1160PS \times 0.4) \times 0.8 = 371.2m^3/min$

$Q_C = (90PS \times 0.15) \times 0.8 = 10.8m^3/min$

$\therefore Q_3 = 136 + 371.2 + 10.8 = 518m^3/min$

4) 뿜어붙임 콘크리트 타설시 분진에 대한 환기량 (Q_4)

공사중인 터널내의 분진 발생은 작업 싸이클에 따라 차이가 있으나 굴착, 버럭처리, 발파작업 및 뿜어붙임 콘크리트 타설시 분진이 발생된다. 뿜어붙임 콘크리트 작업시의 분진발생은 골재와 시멘트 혼합시 및 벽면에 뿜어 붙일 때 콘크리트가 튀어 나온다. 뿜어붙임 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 2종 분진에 해당되어 환기 대상에서 제외된다.

$$Q_4 = W \times D/a \qquad (16)$$

W : 분진발생량 ($25mg/m^3$)
D : 기관의 배기 가스량 ($15m^3/min$)
a : 허용치 ($5mg/m^3$)
$\therefore Q_4 = 25 \times 15/5 = 75m^3/min$

5) 소요 환기량 (Q_{req})

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

$\therefore Q_{req}$ = 90m^3/min(작업자)+528m^3/min(발파)
= 619m^3/min = 10.32m^3/sec

3.2 송・배기 혼합식

3.2.1 해석조건 및 프로그램

본 연구 대상 터널과 같이 터널의 길이가 긴 장대(長大)터널의 경우는 풍관을 사용하는 경우이므로 작업장과 풍관과의 이격간격을 선정하여 작업장에서 보다 원활한 환경 유지를 위하여 환기모사가 필요하다.

여기서는 앞에서 기술한 바와 같이 MVS사의 V-net PC와 CHAM사의 PHOENICS 3.2 프로그램을 사용하여 여러 환기방식별로 작업장 공기 유동과 오염물질 거동 해석을 실시하였다.

수치해석 모델은 2차원 해석은 15가지 사례별로, 3차원 해석은 2차원 해석 결과 얻어진 최적조건을 다시 2가지 경우로 세분하여 실시하였다. 그러나 본고에서는 지면관계상 다음과 같이 송・배기 조합식의 경우만을 기술하기로 한다.

능동 터널의 설계환기 방식은 당초 설계에는 Fig. 3과 같이 송・배기 조합식이지만 이의 대안으로 Fig. 4와 같은 송・배기 혼합식이다.

전자는 경질(硬質)의 풍관 사용이 불가피하지만 후자의 방법은 연질의 풍관 사용이 가능하기 때문이다.

(1) 수치해석 조건

2차원 해석을 위하여 송・배기 혼합식은 송기 풍관과 작업장과의 이격거리를 50m로 고정시키고, 배기풍관과 작업장과의 이격거리는 각각 50m, 100m, 150m로 구분하여 3가지 경우에 대하여 해석하였다.

반면에 3차원 해석은 가장 환기효율이 좋은 이격거리 50m, 150m 경우를 각각 작업장의 좌・우에 배치시킨 경우와 터널 한 쪽 측벽부 상・하에 배치시킨 경우로 구분하여 실시하였다.

(가) 모사 환경

Software : V-net PC

Hardware : NT workstation

(나) 유동해석 초기조건 및 기초자료

유동해석을 위한 초기조건 및 환기량 모사를 위한 기본자료는 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

3.2.2 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, 부

Table 1 Pre-conditions for fluidity analyses

Items		Content
Analysis length	2D	length 500m × width 12m
	3D	length 500m × height 8m × width 12m
Number of grid	2D	200×36
	3D	100×8×12
Number of repeat	2D	1000
	3D	500
Kind of model		k-ε model
Convergence condition		0.01%

Table 2 The basic data for calculation of ventilation amount

Items	Content
Size of duct [mm]	Φ1000, Φ1500, Φ1600, Φ1700
Friction coefficient (k)	0.0056(inside of tunnel)
	0.011(vinyl duct)
	0.0037(spiral duct)
Leakage rate [%/100m]	0.025
Leakage [%]	assume of 25%(total quantity)
Fan efficiency [%]	80
Main fan	AL16-1100 rpm
CO_2 content(at working place) [m^3/s]	0.046
Requirement of fresh air(at working place) [m^3/s]	10.32

분적으로 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.

(2) 유동 모사

유동해석은 송배기 혼합식의 경우 송기 풍관을 50m로 이격시킨 경우에 있어서 배기 풍관을 50, 100, 150m로 이격거리 변화를 주어서 해석하였다. 측벽으로부터 이격거리는 앞에서 서술한 바와 같이 사용된 풍관의 직경 대 비율, 즉 1500mm의 풍관이 사용된 경우 1500mm의 이격 거리를 설정하여 해석하였다. 0.5ϕ(750mm)의 이격 거리는 다른 환기 방식과 동일하게 벽면 저항에 의해 유동이 감소할 것으로 판단하여 0.5ϕ보다 효율적인 1ϕ의 경우에 대하여 해석을 수행 하였다. 환기량 해석에서 서술한 바와 같이 변형 배기식에 보조 선풍기를 설치하여 작업장의 유동을 추가하였다. 이러한 선풍기의 위치를 가지는 2차원 해석의 경우에 다른 환기 방식과 비교하여 매우 뛰어난 환기 효율이 구해진다. 이에 3차원 해석을 사용하여 송기 풍관과 배기 풍관의 배치에 따른 환기 효율 측면도 검토하였다. 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 발생되는 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 작업장에서 선풍기 두 대에서 발생되는 정압이 크기 때문에 터널 외부의 공기가 유입되는 것으로 유추된다.

(가) 작업장에서 송기풍관 50m, 배기풍관 50m 이격 경우

① 유동속도

송기풍관을 작업장에서 50m, 배기풍관을 작업장에서 50m 이격시킨 경우로 작업장에서의 최대 공기 속도는 약 1.12m/s를 나타내고 있다. 앞에서 서술한 바와 같이 작업장에서의 정압으로 인하여 터널 외부에서 재유입되는 구간이 부분적으로 발생하고 있다.

② 오염물질

작업장에서 발생된 오염물질은 송기 선풍기에 의해 밀려서 배기 풍관으로 유입되고 있다. 작업장의 오염물질농도는 약 23%의 농도를 보이고 있다. 배기 선풍기에 의해 배기되지 못한 오염물질들은 송기 선풍기에 의해 형성된 공기차단(Air Curtain) 효과에 의해 터널을 통해 배기되지 않고 작업장으로 다시 유입된다. 따라서 송배기 혼합식의 경우 터널내에 약간의 오염물질 분포가 이루어지지만 송기식처럼 높은 농도의 분포는 이루어지지 않는다.

(나) 작업장에서 송기풍관 50m, 배기풍관 100m 이격 경우

① 유동속도

송기 풍관을 작업장에서 50m 이격시키고 배기 풍관을 작업장에서 100m 이격시킨 경우 작업장의 최대 공기 속도는 약 1.12m/s 이다. 송기 풍관 50m, 배기 풍관 50m 이격 시킨 경우와 비교해 보면 작업장에서의 유속은 송기 선풍기에 의해서 발생된 유동에 의한 속도이다.

② 오염물질

송기 풍관 50m, 배기 풍관 50m 이격시킨 경우와 유사한 분포를 보이나 작업장에 잔존하는 오염물질의 농도는 21%로 약 2%정도의 차이를 보인다. 또한 송기 선풍기에 의한 공기차단 효과와 터널 입구 부분의 재유입은 이 사례에서도 발생한다.

(다) 작업장으로부터 송기풍관 50m, 배기풍관 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.

② 오염물질

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.

3.2.3 3차원 해석

송배기 혼합식의 2차원 해석 결과와 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 대하여 해석이 불가능하므로 이에 대한 추가적인 해석이다. 기본적인 구조는 송배기 혼합식의 방식이므로 선풍기는 송기방식이고, 두 대가 설치 되어있다. 한 대의 선풍기는

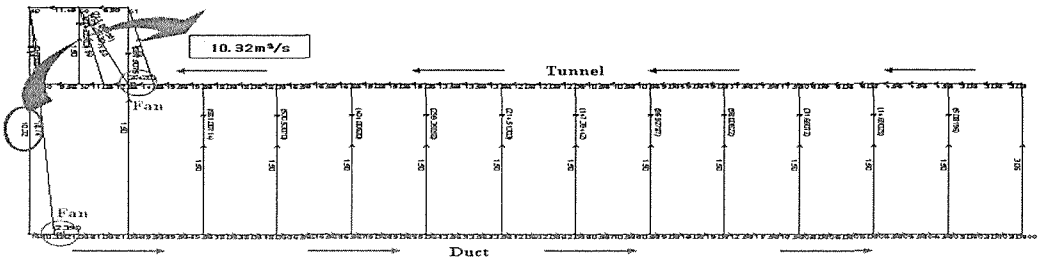
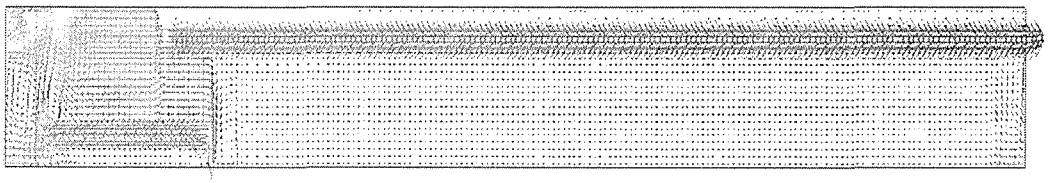
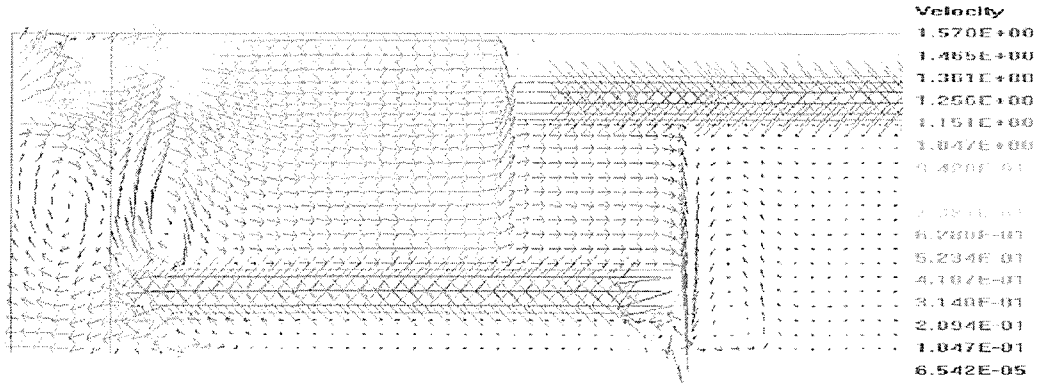


Fig. 6 The basic model of blower-exhaust mixture ventilation system

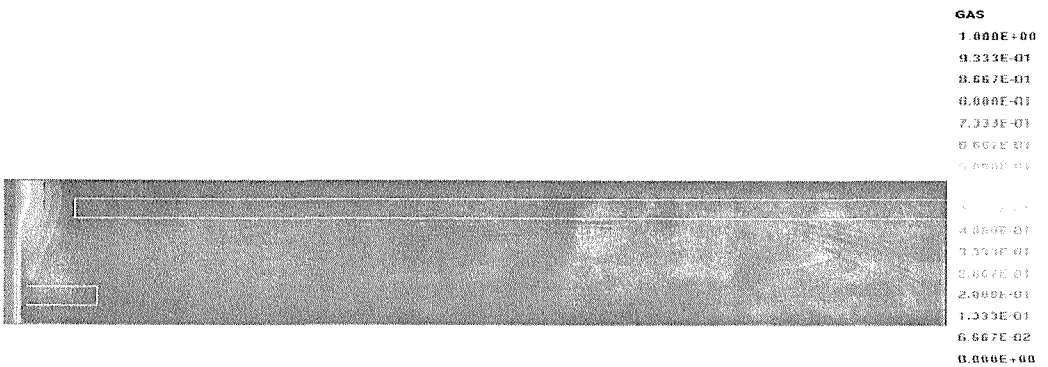


(a) The velocity vector profile at analyses area

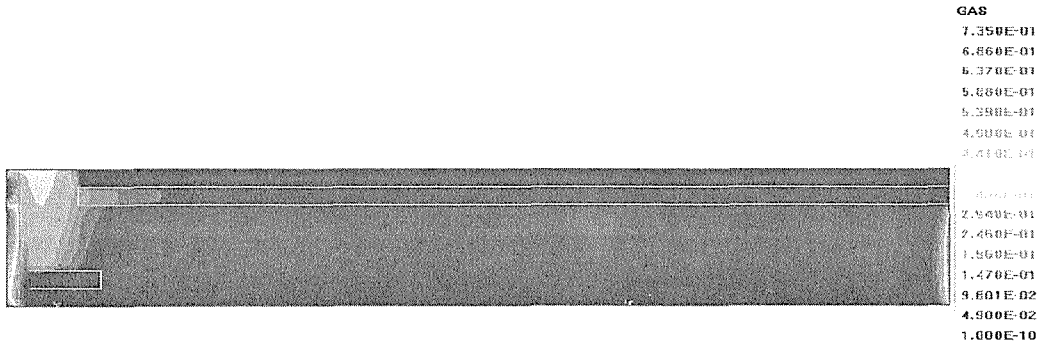


(b) The velocity vector profile at 250m length

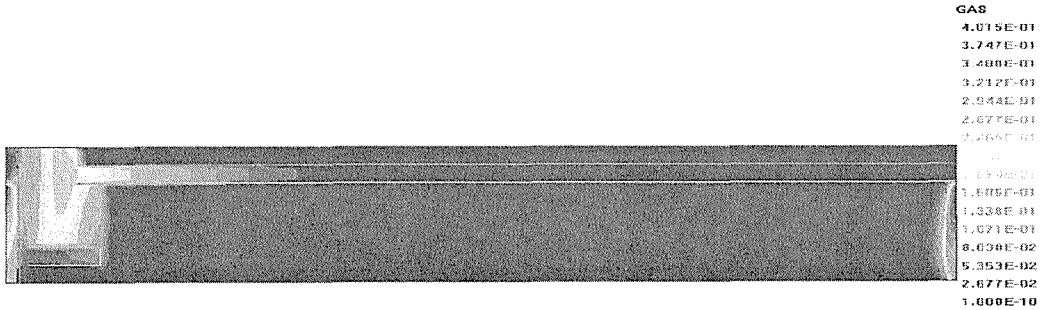
Fig. 7 The velocity vector profile of blower-exhaust mixture system



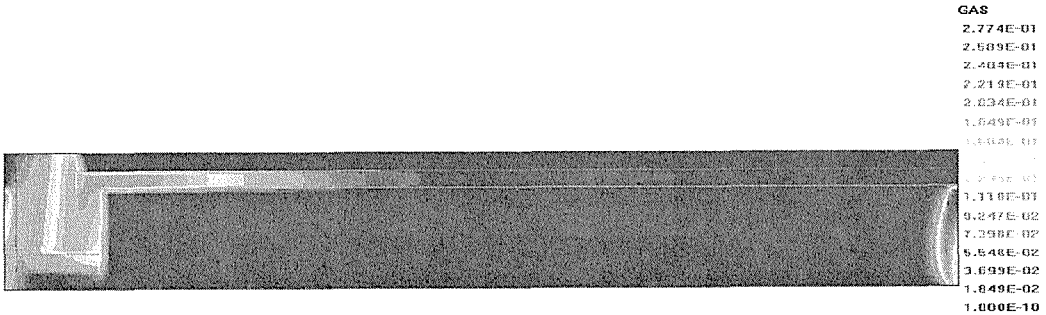
(a) Step 1



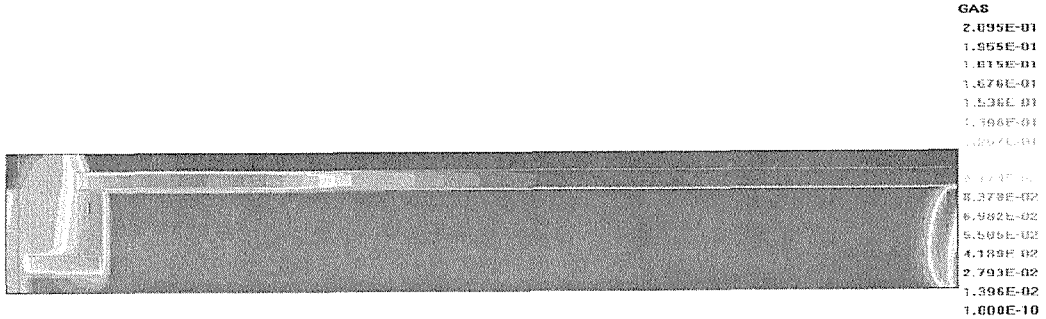
(b) Step 2



(b) Step 3



(b) Step 4



(b) Step 5

Fig. 8 The contaminant distribution profile of blower-exhaust mixture system

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 대하여 터널을 통한 오염물질의 농도 분포이다.

(1) 작업장으로부터 송기풍관 50m, 배기풍관 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 설치된 경우의 유동 해석이다.

(가) 유동속도

선풍기가 설치된 부근의 유속이 빠르고 2차원에서 살펴본 재유입이 발생하고 있음을 알수 있다. 작업장의 최고 유속은 약 0.23m/s이다.

(나) 오염물질

상하로 배치되어있는 관계로 송기 선풍기에 의한 공기차단 효과가 감소하여 터널을 통한 오염물질이 약 50% 분포된다.

(2) 작업장으로부터 송기풍관 50m, 배기풍관 150m 이격되고 좌우 조합된 경우

송기 풍관은 작업장에서 50m 이격되고, 터널 바닥 우측에 설치되어 있다. 배기 풍관은 작업장에서 150m 이격되고, 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.

(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.

이상 검토한바와 같이 송·배기 혼합식은 다른 환기 방식보다 뛰어난 효과를 보이며 터널 내 오염물질의 농도 분포도 양호하다. 특히 송기풍관 50m, 배기풍관 150m 이격인 경우 가장 효과가 뛰어나며 3차원 해석 결과 터널 좌우에 배치한 경우가 오염물질 배기에 가장 효율적이다.

4. 경제성 비교 및 효과

4.1 각 방식별 경제성 비교

4.1.1 운영비

각 환기 방식별 운영비를 비교하여 보면 Fig.

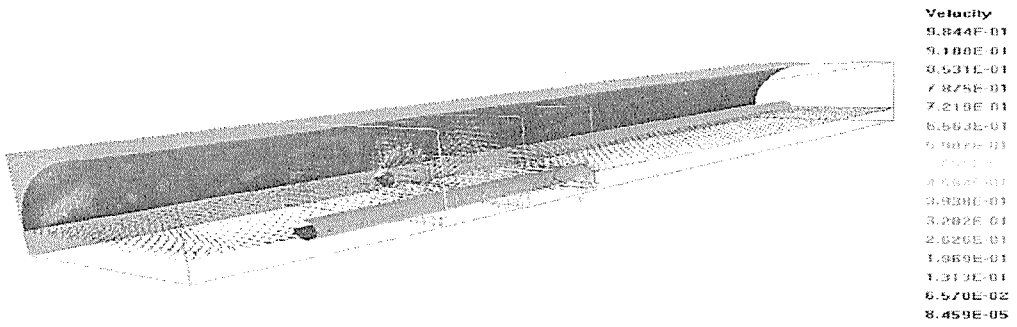


Fig. 9 The velocity vector profile of X-Z section

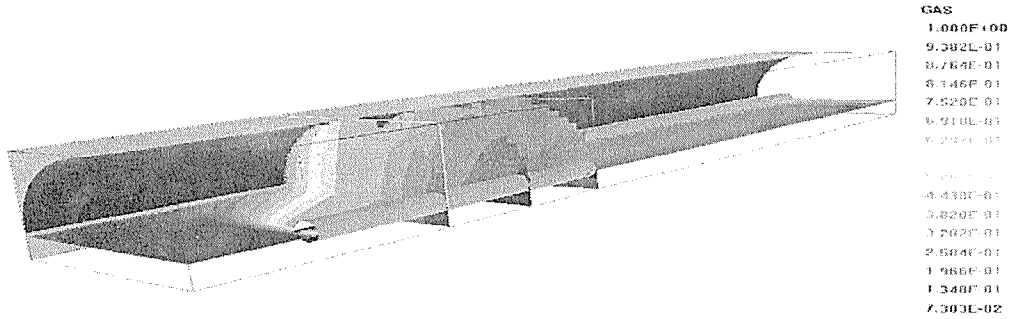


Fig. 10 The contaminant distribution profile of X-Z section

11, Fig. 12와 같다. 전체적으로 보면 송배기 조합식과 송배기 혼합식의 경우가 가장 높은 비용이 소요된다. 이는 다른 방식과 비교할 때 이 두 환기 방식의 경우에는 같은 용량의 선풍기 두 대가 사용되기 때문이다. Phase 1(굴착 진행정도가 1000m까지) 과 Phase 2(굴착이 2000m까지 진행)의 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 비교하여 높게 나타난다.

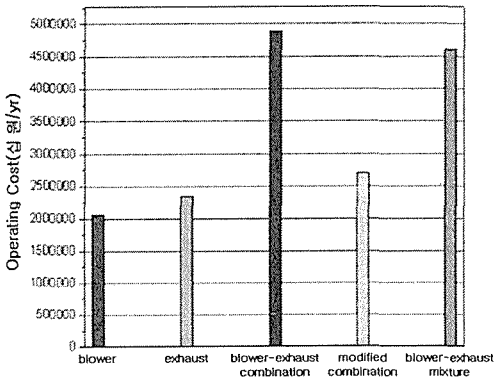


Fig. 11 Comparison of operating cost at various ventilation type(Phase 1)

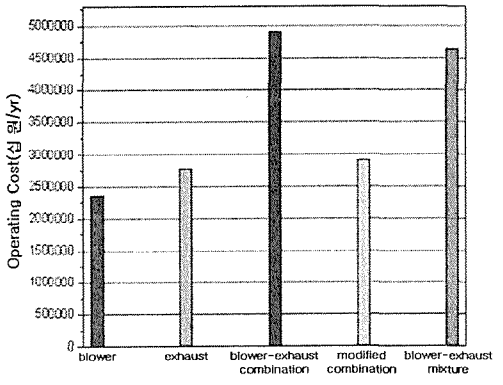


Fig. 12 Comparison of operating cost at various ventilation type(Phase 2)

본 연구에서는 선풍기 제작 시 선풍기의 특성에 의해 만들어지는 선풍기 특성 곡선의 부재로 한 종류의 선풍기만 모사하였다. 따라서 송배기 조합식과 송배기 혼합식의 경우 사용되는 보조 선풍기의 자료 또한 주 선풍기의 자료를 사용하였다. 환기량 모사 결과를 살펴볼 때 작업장에서의 소요환기량인 $10.3m^3/s$ 보다 약 2배정도 큰 $20.83m^3/s$의 용량을 갖는 선풍기가 송배기 조합식과 송배기 혼합식에서 두 대씩 사용되었으므로 보다 작은 용량의 선풍기가 사용 가능할 것으로 예상된다. 그러므로 송배기 조합식의 경우와 송배기 혼합식의 경우는 보다 소용량의 보조 선풍기를 사용할 경우 작업장의 환기 효율에 영향이 없이 운영비가 낮아질 것으로 예상된다.

4.1.2 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. 더욱이 송배기 조합식의 경우 송기식과 배기식의 두 가지 방식이 혼용되므로 각각의 방식에 따른 알맞은 재질의 풍관을 사용하여야 할 것이다.

풍관의 재질에 따라 차이를 보이지만 굴착이 2000m까지 진행되는 경우 풍관 설치비는 대략 이중흡음원형이 약 18억원으로 가장 비싸고, PVC 풍관이 약 4,650만원으로 가장 낮은 가격을 나타낸다. 따라서 장대 터널의 공사 중에는 경제적인 측면을 고려하여 가능한 연관 재질의 풍관 사용이 요구된다.

송·배기 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.

4.2 작업장의 CO농도 분포

작업장에는 CO_x, NO_x 등 여러 가지 유해가스가 발생된다. 여기서는 수치해석에 의한 CO_2 오염물질 분포상태와 실측에 의한 작업장의 CO 농도 분포를 검토해 보기로 한다.

4.2.1 수치해석에 의한 CO2 오염물질 분포

터널 굴착 시 발생이 예산되는 오염물질 중 CO_2 분포를 보면 다음과 같다. 송기식, 송배기 조합식, 변형 배기식, 송배기 혼합식, 배기식의 순서로 터널내 오염물질 농도가 낮아짐을 알 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 배기식과 송배기 조합식의 경우 경관 재질의 풍관 사용으로 초기 설치비가 높다. 따라서 터널 내 오염물질의 농도와 운영비를 비교할 때 송배기 혼합식이 가장 효율적일 것으로

판단된다.

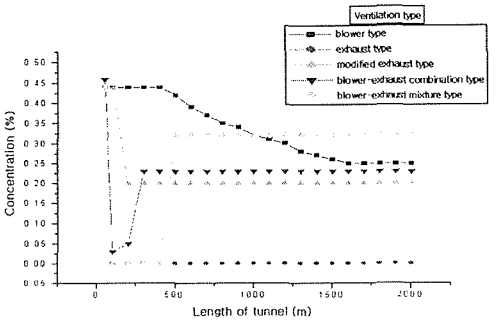


Fig. 13 CO_2 concentration rate at various ventilation type

4.2.2 실측에 의한 CO 농도 분포

CO측정의 경우 발파지점 90m 떨어진 지점에서 발파후 5분후부터 2시간동안 측정을 하였다. 발파 후 20분동안은 1분간격으로 측정을 하였고 그 이후는 2~3분 간격으로 측정을 하였다. 측정기기는 정전위 전해방식인 가노막스사의 디지털 CO측정기를 사용하였다.

상북방향과 차량 대피소의 동시발파 후 5분 후부터 CO농도와 90분 후 상북방면 커튼이 내려진 후의 CO농도를 측정하였다. 발파 후 역시 CO의 규제치인 50 PPM을 초과하였으며, 발파 후 10분 뒤 팬이 가동 되면서부터 작업장의 CO 가스의 농도가 점차 감소하여 16분 후부터 CO 규제치인 50PPM 이하로 떨어졌으며 시간이 경과함에 따라 최소 2.5 PPM까지 감소하는 것을 볼 수 있었다. 90분 경과후 커튼이 내려진 갱구로 이동하여 CO 농도를 측정한 결과 초기치 2.6PPM으로 매우 적은 양으로 측정되었다.

4.3 집진기에 의한 매연 정화기능

본 능동터널 현장에는 양쪽 갱구 부분에 대용량의 집진기를 설치함으로써 터널 내부에서 발생하는 매연을 효과적으로 제어하고 있다. 터널 입구부분에서는 많은 디젤장비들이 이동하므로 매연의 수치가 상당히 높다고 판단되며 그에 따라 집진기 설치의 필요성은 매우 크다고 볼 수 있다.

국내에선 먼지에 대해 분진, 입자상물질(Particulate Matters), 총먼지, 에어로졸 등 다양한 명칭을 사용하고 있다. 특히 먼지 또는 입자상물질에 대해 한국과 일본에서는 주로 분진(粉塵) 또는 총먼지(TSP: Total Suspended Particles)라 부르고 있다. 대기환경보전법에서는 대기오염물질 배출시설에 대해 입자상물질 중에서도 총먼지(TSP : Total Suspended Particles)에 대한 배출허용기준을 설정하고 있으며, 환경정책기본법에서는 대기중 먼지농도에 대해 PM10(Particulate Matters) 즉, 입자직경이 10㎛ 이하인 입자의 농도로써 대기환경기준을 설정하고 있다. 우리나라에서는 1983년 총먼지(TSP)에 대한 대기환경기준을 환경정책기본법에 반영하였으며, 93년에는 미세먼지(PM10)에 대한 환경기준(연간 80㎍/㎥ 이하, 일일 150㎍/㎥ 이하)을 설정하였다. 이후 2001년부터는 총먼지에 대한 환경기준을 삭제하고 미세먼지(PM10) 환경기준을 70㎍/㎥, 150㎍/㎥일로 강화하여 운영하고 있는 현실이나 터널 작업장에서의 미세먼지(PM10) 기준은 없는 현실이다. TSP중 PM10이 차지하는 비율은 부유분진의 농도, 지역특성에 따라 차이가 있으나 보통 약 40~80%정도의 범위를 가지고 있다. 호흡성 분진인 PM10은 작업원에게 있어서 진폐증과 같은 건강에 악영향을 줄 수 있는 인자이므로 능동터널 내에서 PM10 측정을 실시하였다. 측정시 베타선 흡습법장치인 BAM1020을 사용하여 발파 전부터 데이터를 수집하고 발파 후 5분 경과후의 데이터를 수집하였다. 측정위치는 CO측정기와 마찬가지로 발파 위치로부터 90M 떨어지는 지점에서 측정을 하여 데이터를 수집하고 터널 입구부에서 발파 1시간 후에 측정하여 데이터를 수집하였다.

능동터널 작업장내 미세먼지(PM10)의 측정 결과 상북방면 갱구에 커튼을 설치하지 않았던 경우 $1349\mu g/m^3$이 측정되었고, 커튼을 설치한 경우 $784\mu g/m^3$이 측정되었다. 결국 커튼 설치로 인하여 집진기의 효율은 증가하고 미세먼지의 농도는 약 41% 감소한 것으로 나타난다. 비록 커튼을 설치한 후 갱구에서의 미세먼지 농도가 대기환경기준치를 크게 상회하지만 갱구에서의 대기 확산 측면에서 보면 이 농도는 Source 농도가 되므로 그리 염려할 수준은 아닌 것으로 사료된다. 일반적으로 가우시안 분산모델에 적용시켜 볼때 대기중 오염물질은 거리의 제곱에 반비례하므로 오염원 발생지역에서 10m만 이동되더라도 오염물질은 크게 감소한다. 이러한 사실로부터 농도 $784\mu g/m^3$의 갱구 오염원에서 근거리의 대기는 대기오염 기준 이하라고 볼 수 있다. 즉, 결론적으로 능동터널 갱구에 설치된 대용량 집진기의 및 갱구에 설치된 커튼의 효과로 인해 미세먼지 뿐만 아니라 각종 오염물질은 갱구주변의 환경에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

5. 결론

공사중의 터널내에는 운반차량이나 중기 등에 의한 배기가스, 폭파로 인해 발생되는 각종 후(after) 가스, 작업원의 호흡, 뿜어붙임 콘크리트 타설시 분진의 확산 등으로 갱내 공기는 오염되었고 이것을 그대로 방치하면 작업환경이 악화된다.

따라서 터널공사에서는 짧은 터널 등 특수한 경우를 제외하고는 일반적으로 인공적인 환기를 위하여 환기설비를 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 3방식은 비교적 길지 않은 터널공사에, 그리고 장대터널의 경우는 뒤의 2 방식이 주로 채택된다.

본 연구에서 대상으로 한 산외-상북간 제3공구 국도확장공사의 일부인 능동터널은 직경 13m, 길이 4,580m의 쌍굴 터널로써 거의 전 구간을 NATM에 의해 굴착하도록 계획되어 있다. 이와 같은 장대터널의 효과적인 환기시스템을 결정하기 위하여 현장조건을 모사하고 수치해석을 실시하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

장대 터널의 경우 효과적인 환기 방식은 송·배기 조합식과 송·배기 혼합식이라 할 수 있다. 따라서 능동 터널의 경우 송·배기 조합식으로 계획되었으나 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 경질(硬質)이 요구된다. 반면에 후자는 배기용 선풍기를 터널 내에 설치(2대 모두 터널 내에 설치)하기 때문에 연질의 풍관 사용이 가능하다. 즉 환기 효율면에서 2방법 모두 우수하나 설치비가 경제적인 송·배기 혼합식이 가장 적합한 것으로 판단된다.

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

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.

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.

실제 시공 과정에서 발파 후 CO 농도 분석을 하였다. 즉 발파 지점에서 90m 떨어진 곳에서 CO 농도를 검측한 결과 발파 후에는 규제치인 50ppm을 초과하였으나 발파 후 10분 뒤 선풍기가 가동되면서 작업장 내 CO 농도는 감소하기 시작하여, 16분이 지나고부터는 규제치 이하로 감소됨을 알 수 있었다.

터널 입구에 집진기를 설치한 다음 집진기 효율을 극대화하기 위하여 입구에 커튼(curtain)을 설치한 상태로 측정한 결과 $784\mu g/m^3$으로 대기 환경기준치를 크게 상회하나 대기 확산 효과를 고려할 때 우려할 수준은 아니라 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 임한욱 외 1인, "터널·지하공간 굴착공학"

[2] T.J.R. Sales, "The Use of Models in the Study of Air Flow in Mines T.I.M.E", pp.772~791, 1959.

[3] 강창희 외 3인 , "갱내 통기계통 개선 연구", 한국동력자원 연구소 연구보고서, 7호, 1982.

[4] 강창희 외 6인, "갱내 통기 종합시스템 연구", 한국동력자원 연구소 연구보고서, KR-86-2-13, 1986.

[5] 대한광업진흥공사, "갱내 골격구조 및 통기 개선을 위한 기초 연구", 1986.

[6] 유영채, "공사 중 터널 환기 설비에 대한 고찰"