

횡류식 도로터널의 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램 개발 연구

조형제^{1*} · 전규명² · 민대기³ · 김종원³ · 백종훈⁴

¹정회원, (주)범창종합기술 상무

²정회원, (주)범창종합기술 이사

³비회원, (주)범창종합기술 이사

⁴비회원, (주)범창종합기술 차장

A study on the program development for area optimizing of damper ports in road tunnels with transverse ventilation system

Hyeong-Je Jo^{1*} · Kyu-Myung Chun² · Dea-Ke Min³ · Jong-Won Kim³ ·
Jong-Hoon Beak⁴

¹Managing Director, Bumchang Co., Ltd.

²Director, Bumchang Co., Ltd.

³Director, Bumchang Co., Ltd.

⁴Deputy General Manager, Bumchang Co., Ltd.

*Corresponding Author : Hyeong-Je Jo, hjjo@bumchang.co.kr

Abstract

The purpose of the optimization of the installation of supply/exhaust ports for tunnels with transverse ventilation system is to supply fresh air from outside to inside of tunnels uniformly and exhaust pollutant from tunnels properly for creating safe and clean environment for tunnel users. For this purpose, a ventilation port area optimization program was developed to obtain a uniform supply or exhaust air volume inside a great depth double deck tunnel with transverse ventilation system. In order to area optimize the developed port sizing program, the wind velocity was measured in the duct of the currently operated tunnel with semi-transverse ventilation. Also 3D cfd was performed on the same tunnel and cfd results were compared to the measured value. As a result, the error rate between the predicted value from the program and measured value was 6.72%, while the error rate between the predicted value from the program and 3D cfd analysis value was 4.86%. Both of comparison results show less than 10% of error rate. Thus It is expected that supply/exhaust port optimization design of transverse ventilation tunnel can be possible with using this large exhaust port area optimization program.

Keywords: Transverse ventilation system, Uniform supply, Double deck tunnel, The error rate, Port optimization design

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(1)177-188(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.1.177>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 4, 2018

Revised December 19, 2018

Accepted December 24, 2018



This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground
Space Association

초 록

횡류식 환기 시스템이 설치된 터널에서 급, 배기구 포트 개구면적의 최적화는 외부로부터 터널 내에 급기되는 신선공기의 분배를 균일하게 하고 터널 내 오염물질을 효율적으로 배출하여 터널 이용자에게 안전하고 쾌적한 터널 환경을 제공하기 위한 것이다. 이를 위하여 횡류 환기방식이 적용된 대심도 복층터널 내부에 균일한 급기 또는 배기풍량을 얻기 위해서 급, 배기구 포트 면적계산 및 최적화하기 위한 프로그램이 개발되었다. 개발된 포트 면적 계산 및 최적화 프로그램의 신뢰성 확보를 위해 현재 운영 중인 반횡류 환기방식을 적용하고 있는 터널의 덕트 내 풍속을 측정하였다. 또한 동일한 터널에 대한 3차원 수치해석을 수행하였고 CFD 결과를 측정된 값과 비교하였다. 분석결과, 프로그램이 예측한 값과 현장측정결과의 오차율은 약 6.72%를 보이고 있으며, 3차원 수치해석 결과와의 오차율은 약 4.86%로 나타났다. 두 결과 모두 10% 이내의 오차율을 보이고 있으므로, 이 포트 개구면적 최적화 프로그램을 사용해서 횡류식 터널의 급기 및 배기 포트의 최적화 설계가 가능할 것으로 기대된다.

주요어: 횡류식 환기, 균일 급기, 복층 터널, 오차율, 포트 최적화 설계

1. 서 론

국내 도로터널은 각종 SOC 사업을 통해 고속도로망 및 도시교통망 확충이 가속화되어 장대 터널의 수가 급격히 늘어나고 있으며, 차량의 급속한 증가에 따른 터널 이용 차량의 필연적인 증가로 인해 차량 배기가스에 의한 터널 내부환경의 악화문제가 주요 관심사항이 되고 있다.

도로터널의 환기는 차량에서 배출되는 오염물질을 배출 또는 희석하여 터널 내 환경을 허용농도 이하로 유지함으로써 쾌적성과 안전을 확보하기 위한 것이다. 도로터널에 대한 환기가 본격적으로 인식되기 시작한 것은 1920년대에 자동차가 널리 보급되면서 차량의 일상화 시대가 열리면서부터라고 볼 수 있다. 그 당시에도 장대터널이 있었으나 교통량이 그다지 많지 않았기 때문에 환기의 필요성 문제는 제기되지 않았다. 터널의 환기가 본격적으로 대두되기 시작한 시기는 미국 피츠버그시의 Liberty 터널에서 1924년 5월에 터널출구부근의 교통혼잡으로 인해 차량들이 터널 내에서 정체하여 운전자에 일산화탄소에 의해 중독되는 사고가 발생하면서 새로운 환기 시스템에 대한 요구가 증대되는 계기가 되었다(Bickel et al., 1996) (Fig. 1 참조).

이로 인해 횡류 환기방식이라는 도로터널 환기시스템이 제안되었다. 이 방식은 신선공기를 덕트를 통해서 터널의 깊숙한 지점까지 공급하여 공기가 차도를 가로질러 흐르며 오염공기를 배출하기 때문에 기존의 종류 환기 방식의 최대 단점인 터널연장 제한문제를 해결할 수 있게 되었다.

횡류 환기방식의 터널은 이처럼 터널 상부에 덕트를 설치하여 신선한 공기를 급기하고 터널 내의 오염공기를 덕트와 연결된 환기소를 통해 배출하는 방식이기 때문에 덕트에 설치된 급, 배기구를 통해 균일한 풍량이 공급되어야 한다. 포트를 통한 균일한 풍량의 공급은 Ryu et al. (2016)의 연구에서도 반횡류환기방식은 포트 개도면적의 조정이 필수요소이나, 국내에서 운영 중인 터널의 경우는 이에 대한 고려가 적절히 이루어지지 못하고 있는 실정이라고 언급하고 있다.

급, 배기구 포트를 통해 균일한 풍량을 공급하기 위해 Jo et al. (2016)은 횡류식 도로터널 급, 배기구 개도율 최적화 기초연구를 진행하였으며, 이를 바탕으로 Jo et al. (2017)에 의해 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램이 개발되었다. 본 논문에서는 개발된 프로그램의 최적화를 위해 현재 운영 중인 터널에서의 현장 측정 결과와의 3차원 수치 시뮬레이션 분석 결과를 바탕으로 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램에서 예측한 결과와의 비교분석을 통해 예측값의 오차율을 분석하여 프로그램 신뢰성 검증을 수행하였다.

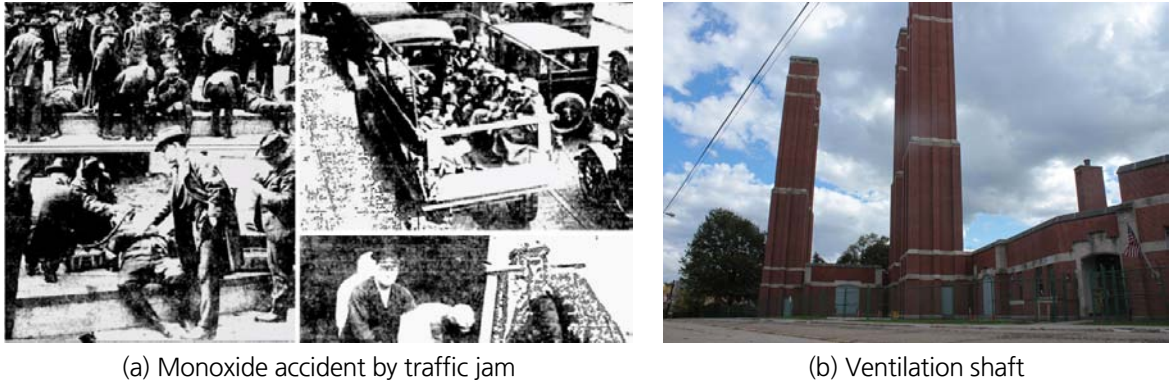


Fig. 1. Monoxide accident and ventilation shaft installation of Liberty tunnel

2. 운영 중 터널 현장측정 결과

일반적으로 횡류(반횡류) 환기방식은 터널의 시점과 종점부 환기소에서 덕트를 통해 터널 공간으로 공기를 급기 또는 배기하고 있다(Fig. 2 참조). 현장측정을 수행한 ○○터널은 반횡류 환기방식을 적용하고 있는 터널로서, 터널 시점부와 종점부에 환기소가 설치되어 있으며, 현장측정은 시점부측의 급기 덕트에서 수행하였다. 중앙부근이 Bulk Head로 구획되어 시점측 환기소와 연결된 덕트 내 풍속을 측정하여 분석하였으며, 급기댐퍼의 개도율은 운영 중인 터널인 점을 고려하여 설치된 상태 그대로 100% 오픈된 상태로 측정을 진행하였다.

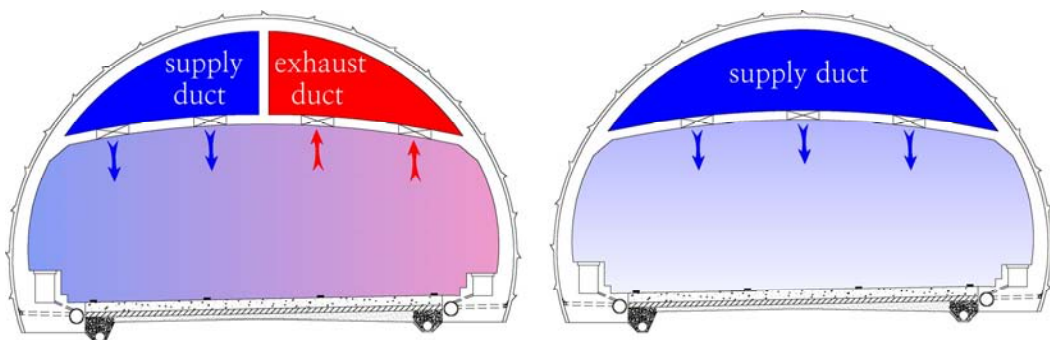


Fig. 2. Overview of tunnel section with transverse and semi-transverse ventilation system

2.1 현장측정 터널 제원

○○터널은 반횡류(급기) 환기방식의 터널이며, 양방향 2차로 터널로 차량이 터널 내에서 교행하는 형태의 터널이다. 터널 제원과 급기 댐퍼의 제원을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Tunnel specifications

Length	750 m
Tunnel cross-sectional area	46.947 m ²
Ventilation system	Semi-transverse ventilation system (supply)

Table 2. Supply air flow and damper quantity

	Start point duct			End point duct		
	Air volume [m ³ /s]	Damper quantity [EA]	Each damper flow [m ³ /s]	Air volume [m ³ /s]	Damper quantity [EA]	Each damper flow [m ³ /s]
Air volume & Quantity	166	268	0.6194	188	308	0.61038

터널의 급기는 시점측 환기소에 설치된 축류송풍기 가동으로 신선공기를 덕트 내로 공급하며 급기댐퍼를 통해 터널 내로 신선공기가 공급된다(Fig. 3 참조). 급기댐퍼는 국내의 도로설계편람(MOLIT, 1999)기준을 참고하여 5 m 간격으로 1열에 2개씩(0.2^w × 0.9^h) 설치되어 총 134열 설치되어 있다. 또한 급기댐퍼는 덕트 시점에서부터 약 85 m 까지는 설치되어 있지 않고, 덕트의 중간지점은 Bulk Head로 막혀 있으며, 반대쪽은 종점측 환기소를 통해 신선공기를 터널 내로 공급하고 있다.

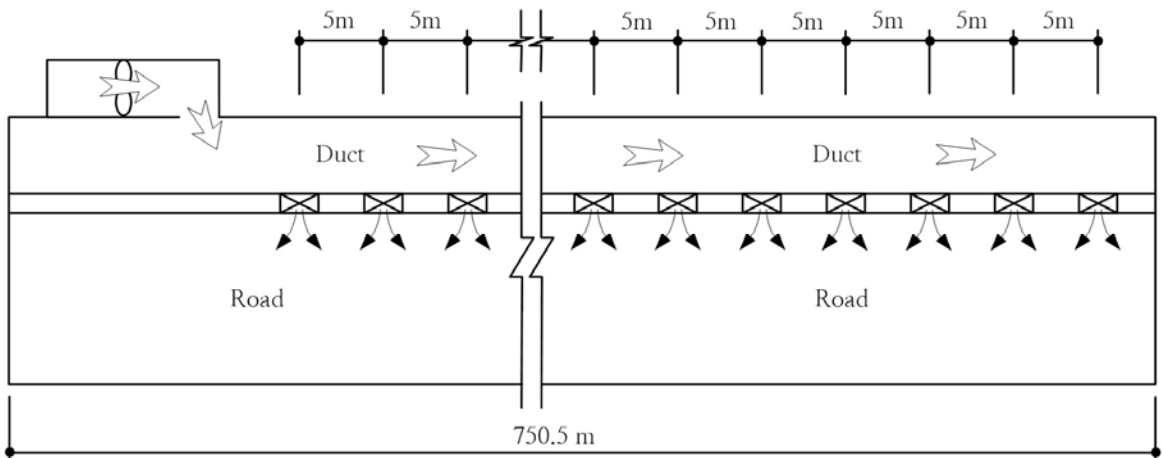


Fig. 3. Overview of tunnel ventilation system

2.2 현장측정 계획

시점측 환기소와 연결된 덕트를 통해 터널 내로 공급되는 풍량은 개별 댐퍼에서의 풍량을 직접 측정해야 하나, 댐퍼에서 풍량 측정시 실험장치의 터널 내 낙하로 인해 발생할 수 있는 차량 사고를 방지하기 위해 안전상의 이유로 개별 댐퍼의 풍량을 측정하지 못하였다. 따라서 댐퍼 전·후의 풍속을 측정하여 양단의 풍량차를 개별 댐퍼를 통해 터널 내 공급되는 풍량으로 평가하였다.

덕트 내의 유동 풍량을 측정하기 위해 풍속센서를 덕트 단면에 13개 지점에 설치하고, 실험 구간마다 측정시간 1분 간격으로 2회 측정을 수행하였으며, 급기댐퍼가 설치된 134열 중 20 m 간격의 34개 지점에서 측정을 수행하였다. 덕트 내 풍속 측정을 위한 센서 설치 개요 및 실험 진행 개요를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

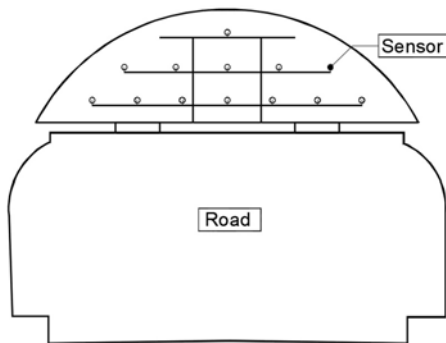


Fig. 4. Sensor installation overview

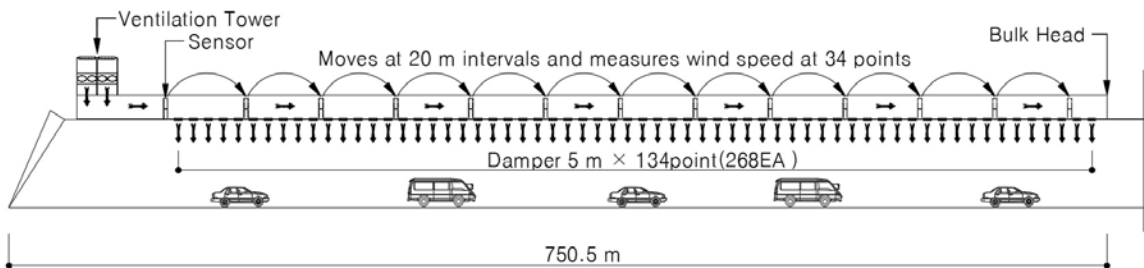


Fig. 5. Wind speed measurement overview

2.3 현장측정 결과

덕트 내 풍속을 측정한 결과, 급기댐퍼가 설치되지 않은 85 m 지점까지는 풍속 변화가 없었으며 1번째 급기구를 지나면서 풍속이 비교적 선형적으로 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 그래프의 특정 지점에서 풍속 측정값이 다소 높거나 낮게 나타나는 것은 현장 측정 시 외부 자연풍의 변화 및 터널 내 통과 차량 증가로 인한 터널 내 풍속 및 압력 변화가 덕트 내 기류 흐름에 영향을 미친 것으로 판단된다. 덕트 내 풍속 분포를 Fig. 6에 나타내었다.

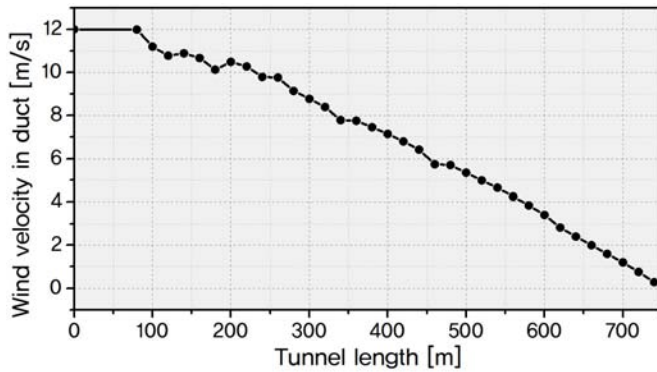


Fig. 6. Distribution of air velocity in field measurement duct

3. 3차원 수치해석 결과

3.1 3차원 수치해석 모델

급, 배기구 포트 최적화 프로그램의 오차율 분석을 위해 ○○터널의 3차원 모델링을 진행하여 3차원 수치해석을 진행하였다. ○○터널 설계도서의 제원을 바탕으로 모델링을 수행하였으며, 수치해석은 상용 프로그램인 ANSYS사의 FLUENT V18을 사용하였다.

덕트 내로 유입되는 기류는 환기소의 축류송풍기에서 운전되는 팬풍량을 기준으로 하였으며, 덕트 입구측을 Inlet Velocity 경계조건으로 적용하여 기류가 덕트 내로 일방향성을 갖는 조건이 되도록 하였다. 해석공간은 현장측정과 동일하게 ○○터널 시점측 약 750 m 구간을 3차원 모델링 하였으며, 터널 및 덕트 공간을 Tex/Hybrid 격자(0.2 m × 0.2 m × 1.0 m)로 그리드를 생성하였다. 전체해석 모델의 총 격자수는 약 304만개이다(Fig. 7 참조).

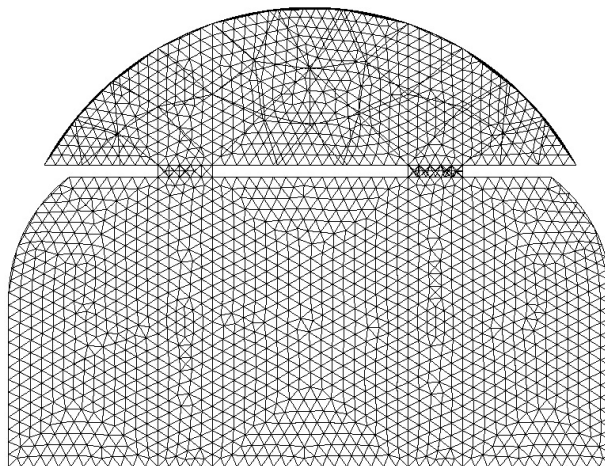


Fig. 7. 3D modeling overview

3.2 3차원 수치해석 결과

3차원 수치해석결과를 보면 급기댐퍼를 통해 급기가 이루어지는 경우의 차도공간과 덕트 내 정압과 풍속분포는 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 나타난다. 덕트 내 정압은 급기댐퍼가 설치되지 않은 덕트 내에서는 벽면마찰손실에 의해서 압력이 선형적으로 감소하며, 급기댐퍼가 설치되어 있는 부분에서는 점차적으로 감소하다가 중간지점 이후에는 점차 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 10 참조).

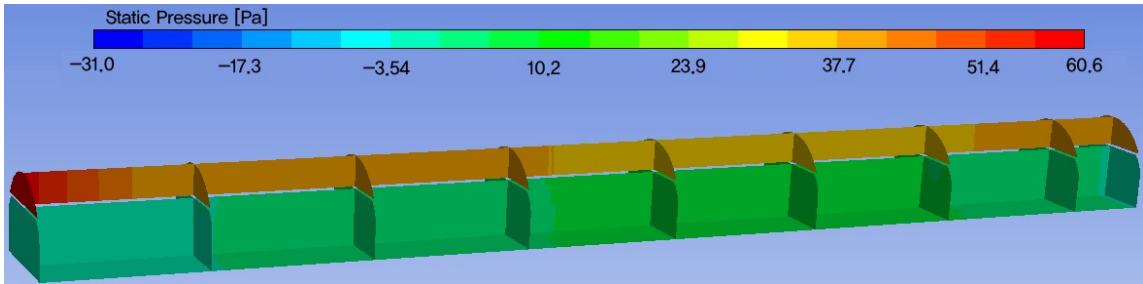


Fig. 8. Pressure contour

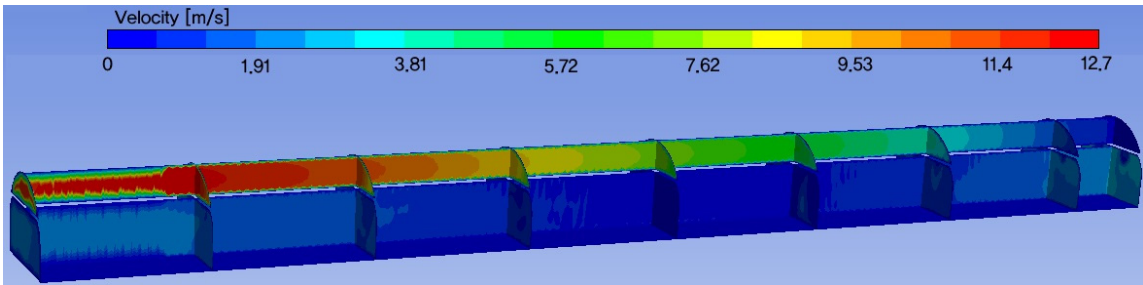


Fig. 9. Velocity contour

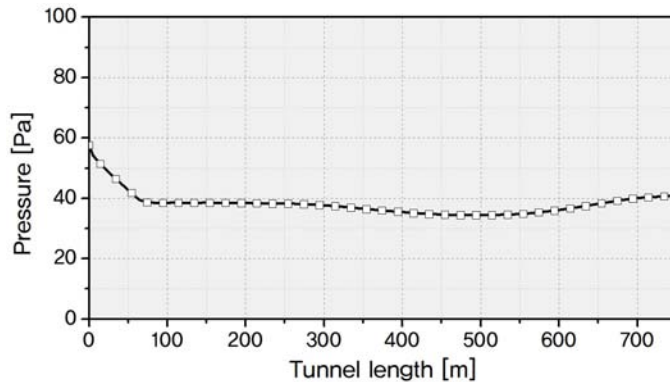


Fig. 10. Pressure distribution

덕트 내 풍속은 급기구가 설치되지 않은 덕트 공간에서는 균일하게 흐르고 첫 번째 급기 댐퍼에서부터 터널 내로 급기가 이루어지면서 덕트 내 풍속이 점차적으로 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. 3차원 수치해석 결과의 덕트 내 풍속을 보면(Fig. 11 참조) 덕트 내 풍속이 선형적으로 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 현장 측정 결과의 덕트 내 풍속분포와 유사한 형태인 것을 확인 할 수 있다.

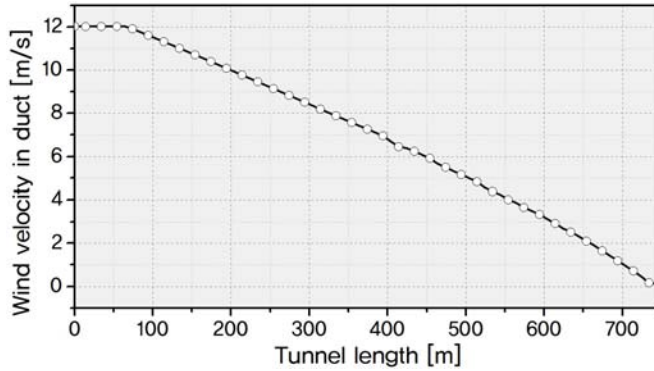


Fig. 11. Velocity distribution

4. 급, 배기구 포트 최적화 프로그램 계산 결과

4.1 해석 입력 조건

개발된 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램으로 ○○터널의 댐퍼 개도면적, 덕트 내 풍속 등에 대한 수치해석을 수행하기 위해 현장측정 및 3차원 수치해석 입력제원과 마찬가지로 연장 750 m, 급기댐퍼 수량 1열 2개 소씩 134개를 반영하였다. 또한 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램 계산을 위해 덕트 조닝 정보를 입력하였으며, 덕트 조닝 입력값을 Table 3에 정리하였다.

Table 3. duct zoning

Zone	Subzone	Type	Diameter	Cross-sectional area	Port area	Node	Start	End
data	1	1	3.39	16.67	0.18 × 2	1	0	757.28

개도를 및 덕트 내 풍속 위해서 프로그램 입력창에 기본적인 터널의 제원과 교통량 등을 입력해야 하며, 터널 내에 설치되는 덕트조닝 입력을 완료한 후 덕트 내 풍속 및 압력 계산을 위한 시뮬레이션을 진행하게 된다(Fig. 12 참조).



Fig. 12. Data input window

4.2 급, 배기구 포트 최적화 프로그램 해석결과

급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램을 통한 해석결과 급기댐퍼가 설치되지 않은 덕트 내에서는 벽면마찰손실에 의해서 압력이 선형적으로 감소하고 있다. 급기댐퍼가 설치되어 있는 부분에서는 점차적으로 감소하다가 중간지점 이후에는 점차 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 13, 14참조).

이는 덕트의 풍량이 급기댐퍼를 통해 유출되어 급기댐퍼를 지난 후에 덕트의 풍속이 감소하게 되고 이로 인해 정압 재취득현상이 발생하기 때문이다. 덕트 내 풍속은 앞 절에의 두 가지 결과와 마찬가지로 선형적으로 줄어 들고 있는 것을 볼 수 있다.

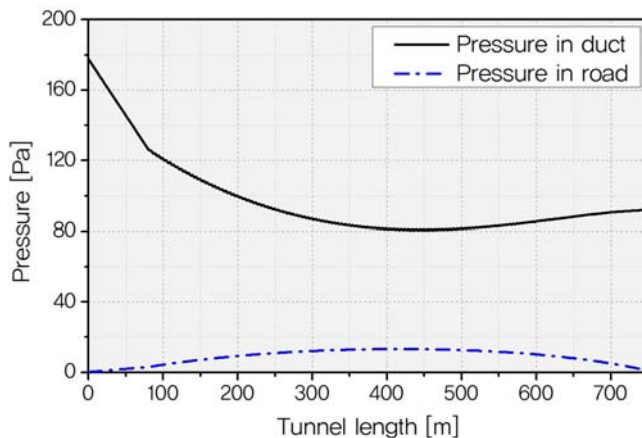


Fig. 13. Pressure distribution

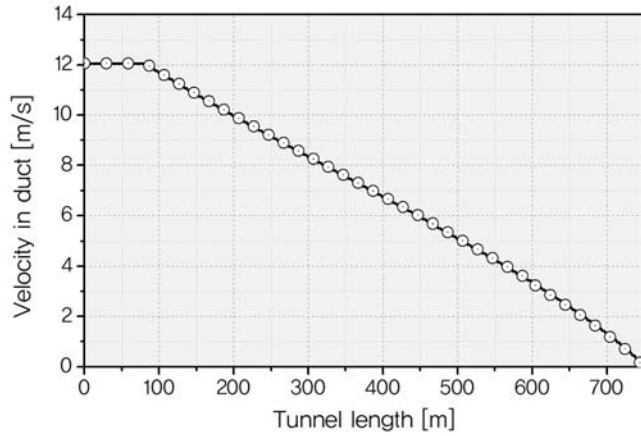


Fig. 14. Velocity distribution

5. 오차율 분석

급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램의 오차율 분석을 위해 현재 운영 중인 OO터널에 대한 현장측정을 진행하였으며, 3차원 수치해석도 병행 수행하여 덕트 내 풍속 분포를 비교, 분석하였다(Table 4 참조).

Table 4. Comparison of air velocity in a duct

Port optimization program & Field measurement		
Port optimization program & 3D analysis		

덕트 내 풍속은 환기소가 설치된 터널 입구부에서 최대값을 보이며, 터널 출구부로 갈수록 감소하고 있다. 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램과 현장측정 결과 덕트 내 풍속의 가장 큰 차이를 보이고 있는 지점의 오차율은 약 6.72%로 나타났으며, 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램과 3차원 수치해석 결과의 덕트 내 풍속이 가장 큰 차이를 보이고 있는 지점의 오차율은 약 4.86%로 분석되었다.

현장측정 결과 및 3차원 수치해석 결과와 10% 이내의 오차율을 보이고 있는 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램은 아주 짧은 시간에 필요한 입력 데이터 작성 및 계산결과가 출력된다. 이러한 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램은 3차원 수치해석에 비해 계산 소요시간 측면에서 상당한 이점이 있다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구를 통해 개발된 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램을 사용할 경우, 3차원 수치해석과 현장 측정과의 비교 분석을 통해 높은 정확도(최소 4.86% 오차율)를 검증함으로써, 포트 개구면적 계산 결과를 신속하게 도출할 수 있다는 점에서 실제 횡류식 및 반횡류식 환기방식의 포트 개구면적 최적화 설계에 상당한 도움이 될 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 개발된 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램과 ○○터널 현장측정결과 및 3차원 해석 프로그램 결과와 덕트 내 풍속을 비교, 검토하였다. 이를 통해 급, 배기구 포트 개구면적 최적화 프로그램의 성능을 검증하였다.

1. 본 연구를 통해 급, 배기구 포트개구 면적 최적화 프로그램에 의한 덕트 내 풍속 분포는 현장측정 결과 및 3차원 수치해석 결과 모두와 유사한 패턴의 덕트 내 풍속 분포를 보여주고 있다. 본 프로그램의 덕트 풍속 예측값은 현장측정 결과와 비교하여 6.72%의 오차율을 보이며, 3차원 수치해석 결과와는 4.86%의 오차율을 보이고 있어 개구면적 계산 프로그램의 정확도가 충분한 것으로 판단된다.
2. 급, 배기구 포트 최적화 프로그램을 통한 ○○터널(반횡류식)의 터널 내 풍속분포를 보면 급기댐퍼의 개도율을 조정하지 않은 상황에서도 터널 내로 풍량이 비교적 고르게 공급되어 덕트 내 풍속이 비교적 선형적으로 감소하고 있는 것으로 나타났다. 이는 현재 설치되어 있는 급기댐퍼의 개구면적이 작기 때문이며, 이러한 감소 패턴에 대해서 댐퍼 크기 변화 및 터널 내 풍속 변화가 미치는 영향에 관한 민감도 분석 또한 수행할 필요가 있을 것으로 보인다. 이 부분은 향후의 연구에서 보다 상세히 검토할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(16SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Bickel, J.O., Kuesel, T.R., King, E.H. (1996), Tunnel Engineering Handbook, 2nd, Chapman & Hall, New York, pp. 384-438
2. Jo, H.J., Chun, K.M., Min, D.K., Kim, J.W., Beak, J.H. (2016), “A fundamental study for optimizing the supply and exhaust port opening ratio in road tunnels with transverse ventilation system”, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 53, No. 2, pp. 140-148.
3. Jo, H.J., Chun, K.M., Min, D.K., Kim, J.W., Beak, J.H. (2017), “A study on the program development for optimizing the supply and exhaust port opening ratio in road tunnels with transverse ventilation system”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 3, pp. 517-532.
4. MOLIT (1999), Road design manual part 6 tunnel, 618 ventilation equipments, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 88.
5. Ryu, J.O., Kim, J.S., Rie, D.H. (2016), “Numerical study on the supply and exhaust port size and fire management method in the semi-transverse ventilation system for road tunnel”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 68-74.