

네트워크 도로터널에서 근접행렬을 이용한 교통량 계산 방법

김학범^{1*} · 백중훈²

¹정회원, (주)제이에스시솔루션 대표이사

²비회원, (주)범창종합기술 설계지원팀 차장

The calculation method of the traffic using incidence matrix in vehicle network tunnels

Hag Beom Kim^{1*} · Jong Hoon Beak²

¹CEO, JSCSolution Inc

²Deputy General Manager, Design Support Team, Bumchang Engineering Inc

*Corresponding Author : Hag Beom Kim, kimhb31@naver.com

Abstract

In order to design the ventilation in the road tunnel, it is necessary to know the ratio of average annual daily traffic by vehicle type. In general, the road tunnels are one-directional tunnel, so the traffic of each vehicle type does not change along the tunnel. On the other hand, in the case of network road tunnels, since the connections in the tunnels are complex, the traffic of vehicle-type varies depending on the network composition of tunnels. In the studying the easy method for calculating the ratio of vehicle type for the network road tunnel are proposed with using incidence matrix.

Keywords: Incidence matrix, Average annual daily traffic, Ventilation design, Network road tunnel

초 록

도로 터널 내의 환기설계를 위해서는 먼저 각 차종별 교통량 구성 비율을 알아야 한다. 일반적인 도로터널의 경우 입구와 출구의 수가 동일하고 일방향이기에 때문에 유입된 차종별 구성 비율이 출구에서 나올 때까지 달라지지 않는다. 반면에 네트워크 도로터널의 경우 터널 내의 연결이 복잡한 네트워크로 되어 있기 때문에 차종별 구성 비율이 달라진다. 이에 본 연구에서는 근접행렬을 이용하여 네트워크 도로터널에서 차종별 일교통량 구성 비율을 쉽게 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

주요어: 근접행렬, 년 평균 일교통량, 환기설계, 네트워크 도로터널

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(3)561-573(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.3.561>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received January 9, 2018

Revised March 21, 2018

Accepted March 29, 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 © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

1. 서론

일반적으로 도로터널 환기시설 설계는 고속도로의 경우 “고속도로터널 환기시설 설계기준”(Korean Expressway Corporation, 2012)에서 제시된 정량적 산출방법에 따라 설계를 진행하게 되며 환기시설 설계의 시작이 차종별 연평균 일교통량을 조건으로 하여 진행이 된다. 그러나 네트워크 도로터널의 경우는 설계 용량을 계산할 각각의 입구에서 유입되는 차종의 구성 비율이 달라지면 터널 내의 복잡한 네트워크 구조로 인하여 터널에서 구간별로 비율이 달라진다. 또한 “고속도로터널 환기시설 설계기준”(Korean Expressway Corporation, 2012)에서는 네트워크 도로터널에 대한 구간별 차종별 교통량 및 구성 비율을 산출하는 정량적 방법이 제시되어 있지 않기 때문에 네트워크 도로터널에 적합한 새로운 기준으로 정비될 필요성이 제기되고 있으며(Kim et al., 2016) 네트워크 도로터널에서 해석할 수 있는 프로그램의 개발이 요구되고 있다. 이에 Kim et al. (2017)의 연구에서는 국내에 소개된 네트워크 도로터널 환기해석 프로그램의 동향과 네트워크 이론을 바탕으로 한 환기해석 프로그램을 소개하고 있다. Yoo et al. (2016) 연구에서는 일방향 도로터널에서 정체되었을 때의 교통량 계산 방법을 제시하고 있다. 본 연구에서는 네트워크 도로터널의 구간별 교통량을 쉽게 구할 수 있는 정량적 산출방법을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 “고속도로터널 환기시설 설계기준”에서 제시하는 일방향 도로터널 환기량 산출과정

“고속도로터널 환기시설 설계기준”(Korean Expressway Corporation, 2012)에서 제시하는 도로터널의 환기량 산출 계산 과정은 Fig. 1과 같으며 기본적인 계산 원리는 터널 내의 교통량(승용차 환산대수)에 차량 당 배출량을 곱하여 전체 오염물질 발생량을 계산한다. 따라서 환기설계에서 중요한 설계변수 중 첫 번째가 차종별 교통량 산정이 된다.

2.1.1 교통량 제원에 따른 구성비

입력되는 각 항목은 설계 교통량 [대/일], 설계년도, 차종별 일 교통량 [대/일], 최대교통량(or 도로용량) M_{max} [PCU/h-lane], 정체 시 교통밀도 D_0 [PCU/km-lane], 승용차 환산계수 이다. 입력된 데이터를 근거로 산출되는 항목은 년 평균 일 교통량(Average Annual Daily Traffic, AADT) [대/일], 차종별 일 교통량(Daily Traffic By Car, DTc) 차종별 혼입율 C_p [%], 대형차 혼입율 HGV [%]이다. 여기서, AADT, C_p , HGV의 식은 다음과 같다.

$$AADT = \sum_i DTc_i \quad (1)$$

$$C_p [\%] = \frac{DTc}{AADT} \times 100 \quad (2)$$

$$HG\% = C_{p_{Large\ bus}} + C_{p_{Midsize\ truck}} + C_{p_{Large\ truck}} + C_{p_{Special\ truck}} \quad (3)$$

여기서, 첨자 i 는 8개 차종을 의미한다. 여기서, 식(1)의 단위는 대/일 이다.

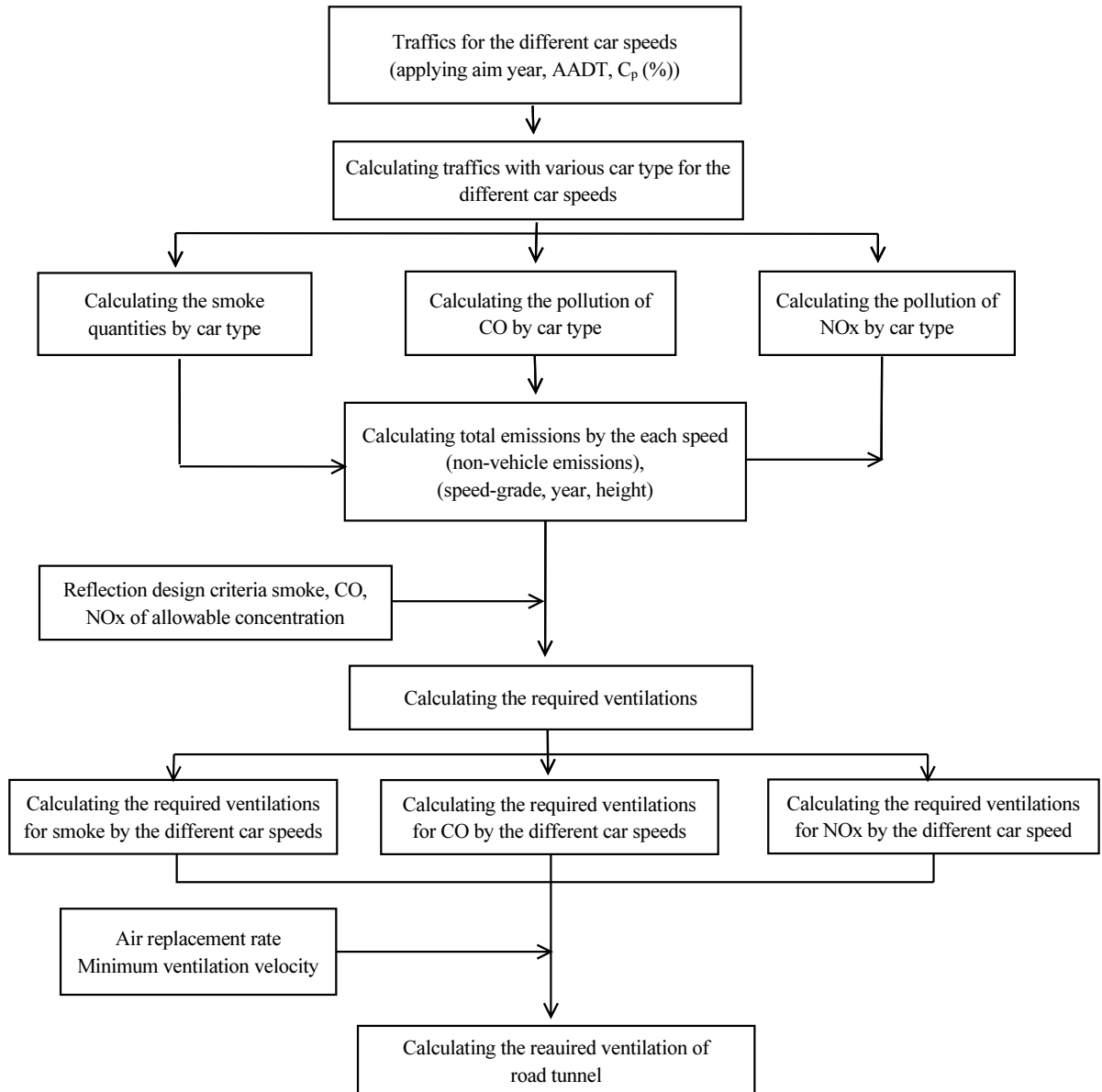


Fig. 1. The flow-chart of ventilation calculation in road tunnel (Korean Expressway Corporation, 2012, p. 23)

2.1.2 터널 내 차량대수(PCU :) 계산

최대교통량(or 도로용량) M_{max} [PCU/h-lane]은 아래표로 구하고 정체 시 교통밀도 D_0 [PCU/km-lane]는 150 [PCU/km-lane]가 초기값(Default)이다(단, 국도의 경우 165 [PCU/km-lane]). 차종별 승용차 환산계수를 이용하여 승용차 환산계수 PCE를 구하는데 식은 다음과 같다. 차종별 승용차 환산계수는 아래 Table 1과 같다.

$$PCE = \sum_i [Cp_i \times PCE_i] / 100 \tag{4}$$

여기서, 첨자 i는 차종이며 총 8개 차종이 있다.

교통밀도 산정 식은 식(5)와 같으며 이 식은 도로의 성격에 따라 승용차 대수로 표현되는 도로용량(M_{max})을 어떻게 적용하느냐에 따라서 도로의 설계교통량을 반영함으로써 교통밀도를 보완할 수 있는 장점이 있다.

$$D_t = \frac{D_o \times M_{max}}{[D_o \times V + M_{max} \times (1 - V/60)^2]} \tag{5}$$

여기서, 식 (5)의 단위는 PCU/km-lane 이다.

Table 1. Passenger car equivalents of vehicle types (Korean Expressway Corporation, 2012)

Division	Passenger car	Small bus	Large bus	Small truck	Midsized truck	Large truck	Special truck
Express way	1	1	1.5	1	1.5	1.5	2
Multi lane	1	1	1.5	1	1.5	1.5	2
2 lane	1	1	1.5	1	1.5	1.5	1.9

주행속도별 교통밀도를 이용하여 차량대수, 교통량, 주행속도별 차종별 교통량, 터널 내 차량대수를 아래 식 (6)~(9) 순차적으로 구한다.

$$Nc = \frac{D_t}{PCE} \tag{6}$$

$$Tc = Nc \times N_{Lane} \times Vc \tag{7}$$

$$Tc_i = Tc \times Cp_i / 100 \tag{8}$$

$$PCU = \frac{Tc_i}{Vc} \times \text{TunnelLength} \times PCE \tag{9}$$

여기서, N_c 는 차량대수 단위는 대/km-lane, N_{Lane} 는 터널 내 차선수, V_c 는 차량속도이다. PCU는 터널 내 차량대수이고 T_c 는 교통량이고 Tc_i 는 차종별 주행속도별 교통량이며 식 (7), (8)의 단위는 대/h 이다.

2.2 근접행렬을 이용한 네트워크 도로터널의 구간별 교통량 계산법

근접행렬은 그래프에서 적용하는 행렬로서 노드간의 연결을 표현하는데 사용되는 행렬이다. 본 연구에서는 터널의 연결여부와 교통흐름의 방향을 표현하기 위하여 근접행렬 A를 도입하였다. 근접행렬 A의 노드와 브랜치는 터널의 진/출입과 합류/분기부를 노드로, 노드와 노드의 연결된 터널구간을 브랜치로 한다. 이때 근접행렬의 행은 노드 i로 열은 브랜치 j로 나타낸다. 그리고 노드와 노드가 연결이 되면 숫자 1로 나타내며, 노드와 노드가 연결되지 않으면 숫자 0이다. +와 -의 부호는 교통의 흐름방향을 나타내기 위하여 사용된다. 노드를 기준으로 차량들이 유입되면 +로, 노드를 기준으로 차량이 유출되면 -으로 표현한다.

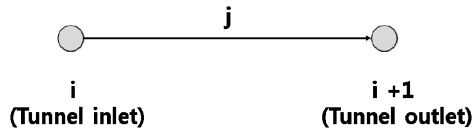


Fig. 2. One directional road tunnel

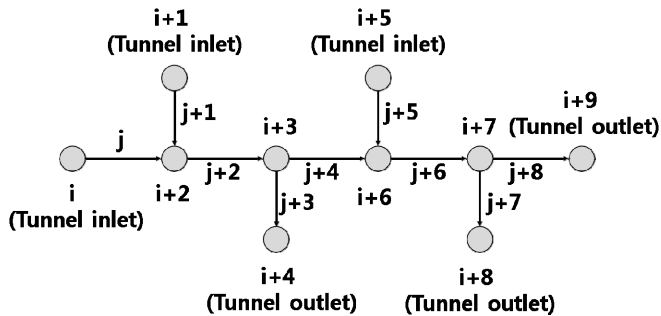


Fig. 3. Network road tunnel

기존의 일방통행의 도로터널과 신규 형태의 네트워크 도로터널의 경우를 근접행렬의 노드와 브랜치 개념을 적용하여 그림으로 나타내면 Fig. 2와 Fig. 3과 같다. Fig. 2와 Fig. 3에서 보는바와 같이 터널의 입/출구 및 합류/분기부를 노드로 나타내고, $i, i+1, \dots, i+n$ 로 표시하였고 각 브랜치를 $j, j+1, \dots, j+n$ 번호를 표시하였다. Fig. 3의 터널은 다음 Table 2와 같은 근접행렬 A로 작성된다.

Table 2. Incidence matrix A

	j	j+1	j+2	j+3	j+4	j+5	j+6	j+7	j+8
i	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
i+1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
i+2	+1	+1	-1	0	0	0	0	0	0
i+3	0	0	+1	-1	-1	0	0	0	0
i+4	0	0	0	+1	0	0	0	0	0
i+5	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
i+6	0	0	0	0	+1	+1	-1	0	0
i+7	0	0	0	0	0	0	+1	-1	-1
i+8	0	0	0	0	0	0	0	+1	0
i+9	0	0	0	0	0	0	0	0	+1

이러한 근접행렬을 이용하여 네트워크 도로터널의 각 구간(여기서는 브랜치)의 교통량은 다음 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$A T = C \tag{10}$$

여기서, A는 근접행렬이고 T는 네트워크 도로터널의 각 구간인 브랜치의 일 교통량(대/일)을 나타내는 행렬이고, C는 경계값으로 터널 입출구의 일 교통량(대/일)을 나타낸다.

상기의 식 (10)에서 네트워크 도로터널의 각 브랜치 별 일 교통량인 T를 구하기 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

1. 각 노드의 교통량 총합은 0이어야 한다.
2. 각 브랜치는 반드시 두 개의 노드만을 연결하여야 한다.
3. 유입된 교통량의 총합과 유출된 교통량의 총합은 같아야 한다.

따라서 구하고자 하는 각 브랜치의 일 교통량 T(대/일)은 근접행렬 A의 전치행렬과 역행렬을 이용하면 구할 수 있게 된다.

$$T = [A^T A]^{-1} A^T C \tag{11}$$

따라서 식 (11)을 다시 식 (1)에 적용하면 각 브랜치별 일 교통량은 식 (12)로 표현된다.

$$A A^T T_j(\text{대/일}) = \sum_i (T_j)_i \tag{12}$$

식 (12)를 이용하여 식 (2)에 적용하면 터널 내 브랜치별 차종구성비는 다음과 같다.

$$Cp_j(\%) = \frac{(T_j)_i}{\sum_i (T_j)_i} \times 100 \tag{13}$$

식 (13)을 식 (9)에 적용하면 네트워크 도로터널의 브랜치별 터널 내 차량대수(PCU)는 다음과 같이 나타낸다.

$$PCU_j = D_t \times Cp_j/100 \times Tunnel\ Length \times N_{Lane} \tag{14}$$

따라서 근접행렬 A를 이용하면 네트워크 도로터널의 각 브랜치별 터널 내 차량대수 PCU를 구할 수 있게 된다. 여기서, 식 (12)~(14)의 아래첨자 j는 각 구간인 브랜치를 나타내고, i는 차종을 나타낸다.

2.3 근접행렬을 이용한 교통량 및 오염물 배출량 계산사례

본 절에서는 상기 식들이 네트워크 도로터널 교통량 조건 사례별(Table 3)로 교통량 계산 적용을 보이고 계산된 교통량을 이용하여 브랜치별 오염물질 배출량을 계산하였다. 터널의 적용대상은 Fig. 3으로 하였다. 터널의 브랜치별 연장을 제외한 형상제원과 교통량은 “고속도로 터널 환기시설 설계기준”(Korean Expressway Corporation, 2012)에서 제시된 값을 사용하였다(Table 4, 5).

Table 3. CASE study

	Traffic condition	Incidence matrix
CASE 1	Same traffic at every branch (section)	Not use
CASE 2	Same component ratio at every branch (section)	Use
CASE 3	Not same component ratio at every (section)	Use

Table 4. Tunnel specification

Item	Value	Dimension
Tunnel length (m)	1,000	
Tunnel inner area (m ²)	73	
Diameter (m)	8.6	
Grade (%)	1	
Lane	2	
Average elevation (m)	100	

Table 5. Daily traffic (Korean Expressway Corporation, 2012)

	Passenger car		Bus		Truck				AADT (car/day)	HGV (%)
	Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsized	Large	Special		
Traffic	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866	44,574	25.2
Component-ratio (%)	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9	100.0	

2.3.1 CASE 1. 전 브랜치에서 교통량이 동일할 경우

Table 7에 제시된 교통량이 전 브랜치에 동일하게 적용하므로 근접행렬을 적용할 필요가 없다. 식 (5)~(9)까지 동일 제원을 대입하여 계산을 하면 된다. 따라서 주행속도별 교통밀도와 10 km/h 주행속도에서의 터널 내 차량대수(PCU), 매연의 오염물질 배출량 계산결과는 아래와 같다.

Table 6. Traffic density for the variable traveling speed

Traffic velocity (km/h)	10	20	30	40	50	60	70	80
Traffic density (PCU/km-lane)	109	83	66	53	44	37	32	27

Table 7. PCU in the tunnel for the 10 km/h, CASE 1

Branch (j)	Passenger car		Bus		Truck				PCU (car)
	Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsized	Large	Special	
1~9	88	67	53	43	35	30	25	22	363

Table 8. Pollutant in the tunnel at the 10 km/h velocity for variance car type (m²/h), CASE 1

Traffic velocity (km/h)	Branch (j)	Passenger car		Bus		Truck			
		Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsized	Large	Special
10	1~9	80.074	105.066	26.813	464.225	1.843	464.786	292.325	177.462

Table 7과 Table 8의 결과에서 보는 바와 같이 모든 브랜치(구간)에서 동일한 조건일 때에는 브랜치(구간)별로 동일한 터널 내 차량대수(PCU)와 동일한 오염물질 배출량이 계산된다.

2.3.2 CASE 2. 전 브랜치에서 구성비가 동일하나 브랜치별로 교통량이 다른 경우

이 경우는 그림과 같이 입구/출구에서는 Table 3에서 제시된 동일한 교통량이 유입되거나 유출되지만 병목구간에 따라 교통량이 증가나 감소되는 경우이다.

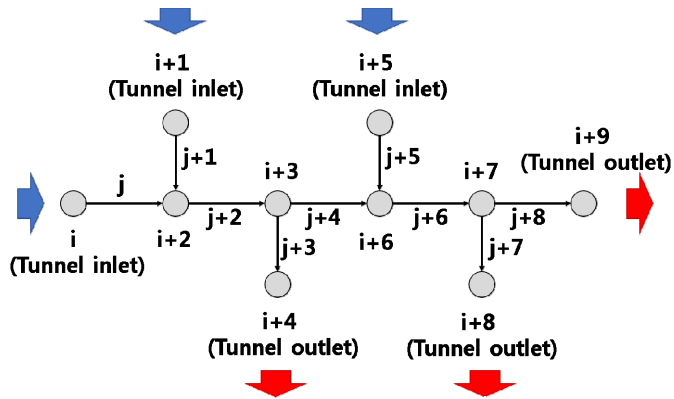


Fig. 4. Same traffic component ratio in the network road tunnel

브랜치별로 교통량(대/일)과 터널 내 교통대수(PCU)를 구하기 위하여 식 (11)을 계산하면 다음과 같다.

Table 9. Daily traffic in the network tunnel for CASE 2

Branch (j)	Passenger car		Bus		Truck			
	Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsize	Large	Special
1	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9
2	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9
3	36,080	24,052	6,138	6,196	422	10,950	3,578	1,732
	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9
4	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9
5	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9
6	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9
7	36,080	24,052	6,138	6,196	422	10,950	3,578	1,732
	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9
8	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9
9	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9

Table 10. PCU in the tunnel for the 10 km/h, CASE 2

Branch (j)	Passenger car		Bus		Truck				PCU (cars)
	Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsize	Large	Special	
1~9	88	59	15	15	1	27	9	4	218

Table 11. Pollutant in the tunnel at the 10 km/h velocity for variance car type (m²/h), CASE 2

Traffic velocity (km/h)	Branch (j)	Passenger car		Bus		Truck			
		Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsize	Large	Special
10	1~9	80.074	105.066	26.813	464.225	1.843	464.786	292.325	177.462

Table 9 계산결과에서 보는 바와 같이 구간별 교통량(대/일)은 달라도 구성비가 동일하기 때문에 터널 내 차량 대수(PCU) (Table 10)과 오염물질 배출량(Table 11)은 동일하게 계산된다.

2.3.3 CASE 3. 터널 내 브랜치별로 차량 구성비가 동일하지 않은 경우

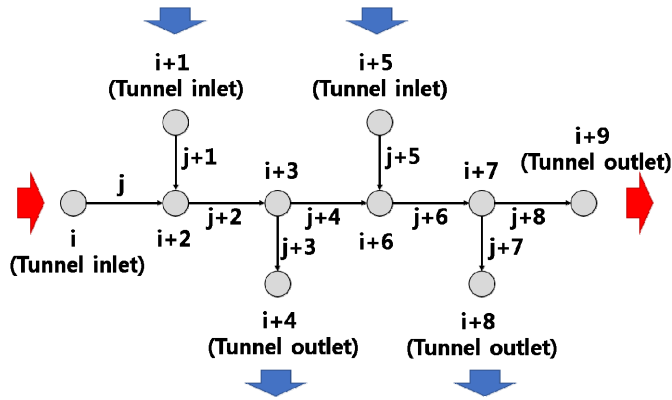


Fig. 5. Different traffic component ratio in the tunnel

적색 화살표가 Table 12와 같이 구성비가 다르게 입력된 경우이다.

Table 12. Daily traffic for RED colored inlet

	Passenger car		Bus		Truck			
	Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsize	Large	Special
Traffic	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	1,000
Component-ratio (%)	40.35	26.90	6.86	6.93	0.47	12.25	4.00	2.24

역시 식 (11)을 계산하면 다음 같이 된다.

Table 13. Daily traffic in the network tunnel for CASE 3

Branch (j)	Passenger car		Bus		Truck			
	Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsize	Large	Special
1	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	1000
	40.35	26.90	6.86	6.93	0.47	12.25	4.00	2.24
2	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.47	26.98	6.89	6.95	0.47	12.28	4.01	1.94
3	36,080	24,052	6,138	6,196	422	10,950	3,578	1866
	40.41	26.94	6.87	6.94	0.47	12.26	4.01	2.09
4	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.47	26.98	6.89	6.95	0.47	12.28	4.01	1.94
5	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	1000
	40.35	26.90	6.86	6.93	0.47	12.25	4.00	2.24
6	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.47	26.98	6.89	6.95	0.47	12.28	4.01	1.94
7	36,080	24,052	6,138	6,196	422	10,950	3,578	1,866
	40.41	26.94	6.87	6.94	0.47	12.26	4.01	2.09
8	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866
	40.47	26.98	6.89	6.95	0.47	12.28	4.01	1.94
9	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	1000
	40.35	26.90	6.86	6.93	0.47	12.25	4.00	2.24

Table 14. PCU in the tunnel for the 10 km/h

Branch (j)	Passenger car		Bus		Truck				PCU (cars)
	Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsize	Large	Special	
1	88	59	15	15	1	27	9	5	219
2	88	59	15	15	1	27	9	4	218
3	88	59	15	15	1	27	9	5	219
4	88	59	15	15	1	27	9	4	218
5	88	59	15	15	1	27	9	5	219
6	88	59	15	15	1	27	9	4	218
7	88	59	15	15	1	27	9	5	219
8	88	59	15	15	1	27	9	4	218
9	88	59	15	15	1	27	9	5	219

Table 15. Pollutant in the tunnel at the 10 km/h velocity for variance car type (m²/h)

Traffic velocity (km/h)	Branch (j)	Passenger car		Bus		Truck			
		Gas	Diesel*	Small	Large	Small	Midsize	Large	Special
10	1	79.834	104.751	26.732	462.834	1.838	463.393	291.449	204.308
10	2	80.074	105.066	26.813	464.225	1.843	464.786	292.325	177.462
10	3	79.954	104.909	26.772	463.528	1.841	464.088	291.886	190.905
10	4	80.074	105.066	26.813	464.225	1.843	464.786	292.325	177.462
10	5	79.834	104.751	26.732	462.834	1.838	463.393	291.449	204.308
10	6	80.074	105.066	26.813	464.225	1.843	464.786	292.325	177.462
10	7	79.954	104.909	26.772	463.528	1.841	464.088	291.886	190.905
10	8	80.074	105.066	26.813	464.225	1.843	464.786	292.325	177.462
10	9	79.834	104.751	26.732	462.834	1.838	463.393	291.449	204.308

Table 13 계산결과에서 보는 바와 같이 브랜치별 교통량(대/일)과 차종별 구성비가 모두 다르게 된다. 따라서 Table 13을 이용하여 터널 내 차량대수(PCU) (Table 14)와 오염물질 배출량(Table 15)을 계산하였다. CASE 2와 CASE 3을 비교하면 구성비가 다른 경우 브랜치별, 차종별 PCU 숫자에서 차이를 보이고 있고 그 결과 CASE 3은 브랜치별 차종별로 오염배출량이 차이를 보였다.

3. 결론

본 연구에서는 네트워크 도로터널에서 환기설계를 위한 차종별, 차속별 오염물질 배출량을 설계자가 간단하게 계산할 수 있도록 하기 위하여 근접행렬을 이용한 계산 방법을 개발하였다.

1. 근접행렬을 적용하기 위해서는 터널 내에서 교통량이 선형적으로 변화한다고 가정하고, 유입된 교통량의 총합과 유출된 교통량의 총합은 같아야 한다.
2. 근접행렬을 이용하여 $[A^T A]^{-1} A^T$ 를 구하고 이를 이용하여 브랜치별 터널 내 교통량(PCU) 계산방법을 2.2절에서 수식으로 전개하였다.
3. CASE study를 통하여 구간별로 유출입 되는 교통량이 다르거나 차종별 구성비가 다른 경우에 근접행렬을 이용하여 터널 내 차량대수(PCU)와 오염물질 배출량을 구할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 의 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술 개발(17SCIP-B089409-04)’ 연구단의 지원을 통해 수행되었습니다.

References

1. Kim, H.G., Choi, P.G., Ryu, J.O., Lee, C.W. (2016), “A fundamental study on the ventilation analysis method for the network-type tunnel - focused on the none hardy-cross method”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 3, pp. 291-303.
2. Kim, H.G., Choi, P.G., Ryu, J.O., Lee, C.W. (2017), “Development of a program to predict the airflow rate and pollutant concentration in complex network-type tunnels”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 2, pp. 213-224.
3. Korean Expressway Corporation (2012), “Design criteria for highway tunnel ventilation facilities”, pp. 21-34.
4. Yoo, Y.H., Kim, H.G., Ryu, J.O. (2016), “A study on the calculation method for the number of vehicles in queue to determine the fire ventilation capacity in road tunnels - forced on the effect of queue length”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 1, pp. 41-52.