

거시적 교통류모형을 이용한 고속도로 돌발상황에 따른 탄소배출량 산정연구

Estimating Carbon Emissions due to Freeway Incidents by Using Macroscopic Traffic Flow Models

손 영 태 Son, Young Tae
한 규 종 Han, Kyu Jong

정회원 · 명지대학교 교통공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : son@mju.ac.kr)
한국교통연구원 국정교통연구본부 연구원 (E-mail : lqjong86@koti.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to develop a methodology for estimating additional carbon emissions due to freeway incidents.

METHODS : As our country grows, our highway policy has mainly neglected the environmental and social sectors. However, with the formation of a national green growth keynote and an increase in the number of people interested in environmental and social issues, problems related to social issues, such as traffic accidents and congestion, and environmental issues, such as the impact of air pollution caused by exhaust gases that are emitted from highway vehicles, are beginning to be discussed. Accordingly, studies have been conducted on a variety of environmental aspects in the field of road transport, and for the quantitative calculation of greenhouse gas emissions, using various methods. However, in order to observe the effects of carbon emissions, microscopic simulations must use many difficult variables such as cost, analysis time, and ease of analysis process. In this study, additional greenhouse gas emissions that occur because of highway traffic accidents were classified by type (incident handling time, number of lanes blocked, freeway level of service), and the annual additional emissions based on incidents were calculated. According to the results, congestion length and emissions tend to increase with an increase in incident clearance time, number of occupied lanes, and worsening level of service. Using this data, we analyzed accident data on the Gyeong-bu Expressway (Yang-Jae IC - Osan IC) for a year.

RESULTS : Additional greenhouse gas emissions that occur because of highway traffic accidents were classified by type (incident handling time, number of lanes blocked, freeway level of service) and annual additional emissions caused by accidents were calculated.

CONCLUSIONS : In this study, a methodology for estimating carbon emissions due to freeway incidents was developed that incorporates macroscopic flow models. The results of the study are organized in the form of a look-Up table that calculates carbon emissions rather easily.

Keywords

carbon emission, macroscopic traffic flow model, incident, highway

Corresponding Author : Son, Young Tae, Professor
Department of Transportation Engineering, 116 Myongji-ro,
Yongin-si, Gyeonggi-do, 17058, Korea
Tel : +82.31.330.6504 Fax : +82.31.336.2885
E-mail : son@mju.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Oct. 13, 2015 Revised Oct. 15, 2015 Accepted Jan. 18, 2016

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

국가적으로 녹색성장기조와 관련된 다양한 정책들과 관

심이 집중되기 시작하면서, 도로부문의 차량 배기가스로 인한 대기오염 등의 환경적인 문제들과 교통사고 및 소통 혼잡 등의 사회적인 문제들이 대두되게 되었다. 이로 인해

도로교통 분야에도 환경적 측면을 중심으로 하는 다양한 연구들이 진행되고 있다. 이 연구들 중 환경정책의 효과를 평가하기 위해 환경오염을 정량적으로 표출하기 위한 지표로서의 탄소배출량을 산정하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있는데 대부분의 연구는 교통량 수준에 따라 차량의 주행속도나 혼잡 시 발생하게 되는 탄소배출량 산정에 중점을 두는 반면 돌발상황 시 추가적으로 발생하는 탄소배출량에 대한 연구는 드문 편이다. 이는 돌발상황이 안전측면과 도로의 원상태 복귀 시간 단축 등에 초점을 두어 연구가 진행된 반면 돌발상황의 감소가 탄소배출량을 감소시키는데에 기여할 수 있음을 간과한 결과이다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 통행특성의 분석을 통해 고속도로 교통사고 발생에 따른 온실가스 추가 배출량을 산정하는 방법론을 정립하고, 실제 발생가능한 상황을 시나리오로 구성하여 적용함으로써 제시된 방법론의 적용성 및 돌발상황과 탄소배출량의 관계를 정립하고, 이를 이용하여 사고에 따른 연간 추가 배출량을 산출하였다.

1.2. 연구의 내용 및 방법

본 연구의 대상구간은 고속도로로 한정하되, 실제 자료들을 활용하기 위해 대상구간을 경부고속도로 양재나들목(부산기점 415km)~오산나들목(부산기점 378km)까지 양방향 총 37.5km으로 하고, 해당 고속도로구간의 본선 내에서 발생했던 1년 동안의 이력자료를 참고하여 발생시간, 처리시간 등을 수집 분석하였다.

돌발상황에 의해 발생된 지정체에 따른 온실가스배출량의 증가를 구하기 위해서는 사고가 발생한 이후의 사고 처리시간 및 해당 지점의 소통상태가 사고 이전의 상태로 돌아올 때까지의 분석이 필요하다. 이를 위해 사고 발생 이후부터 사고로 발생한 정체의 해소시간 까지를 분석 대상시간으로 설정하였다.

본 연구에서는 각 서비스 수준별 교통량 및 속도자료 등의 통행특성자료를 이용하여 차량군의 통행특성을 분석할 수 있는 거시적 기법인 충격파이론(Shock Wave Analysis)을 이용한 분석방법을 제안하고, 이에 따른 각 차량군(일반군, 지체군, 회복군 등)의 특성을 교통사고 분석을 통해 도출된 대표적 사고 유형에 적용하고, 이들을 이용해 사고로 인한 추가적인 온실가스 배출량을 분석하였다.

2. 관련 이론 고찰

2.1. 고속도로 돌발상황에 교통류특성 관련연구

일반적으로 도로상에서 발생하는 교통 혼잡은 도로의 수요가 공급보다 과다하여 발생하는 교통현상으로 정의한다. 이러한 교통 혼잡은 크게 반복적 혼잡과 비반복적 혼잡으로 분류하는데 용량이 교통수요를 감당하지 못하여 지체와 정체가 주기적으로 발생하는 반복적 혼잡에 비해 비반복적 혼잡은 공사, 기상예보, 행사와 같이 발생 전에 예측할 수 있는 특별상황과 교통사고, 차량 고장, 도로 상의 낙하물, 급작스런 기후변화 등 예측할 수 없는 돌발 상황에 의해 발생하는 사고를 의미한다. 이러한 비반복적 혼잡에서 돌발상황에 의해 고속도로에서 발생되는 교통 혼잡 상태를 고속도로의 돌발상황으로 정의하되, 본 연구에서는 돌발로 인한 혼잡상황 이외에 비혼잡상황을 포함하여 분석하기로 한다.

돌발상황은 그 유형에 따라 교통소통에 다양한 영향을 미치기 때문에 이들에 대한 여러 연구가 수행되어 왔다. 특히, 많은 연구들이 돌발에 의한 지체의 영향요소들과 영향정도를 파악하고자 하였는데 대표적 연구는 Cambridge Systematics(1990)와 Lindley(1987)의 연구로 돌발의 유형 및 지속시간, 차단된 차로의 수, 관련된 차량의 수, 트럭의 유무 등을 영향요소로 인지하였으며, Cambridge Systematics의 연구에 의하면 일반적으로 고속도로 상의 돌발상황은 약 70%만이 경찰이나 도로관리기관에 보고되며, 나머지 30%는 아주 경미한 것으로 교통상황에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

USHCM(2010)에서는 돌발상황을 1시간 미만의 짧은 기간의 교통사고로 정의하고, 고속도로 용량에 대한 영향을 차단되어 있는 차선에 따라 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1. The Proportion of Available Capacity used in Accident on a Highway Section States

Lane	2	3	4	5	6	7	8
Shoulder blocked	0.95	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Accident in shoulder	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93
1 lane blocked	0.35	0.49	0.58	0.65	0.71	0.75	0.78
2 lane blocked	0	0.17	0.25	0.4	0.5	0.57	0.63
3 lane blocked	N/A	0	0.13	0.2	0.26	0.36	0.41

결과에 따르면, 예를 들어 2차로 고속도로의 경우 1개 차로가 차단되게 되면 본래의 용량의 50%가 아닌 15%가 추가된 65%의 용량이 감소되는 것으로 나타났다. 이처럼 차로 차단에 따른 용량감소가 차로감소 개수에 추

가적으로 발생하는 이유는 사고영역을 통과하는 운전자들이 사고를 확인하거나 사고지점 주변을 의식하여 느리게 주행하는 점이 그 이유라고 설명하고 있다.

이후 많은 연구들은 위의 영향요소들을 상황별로 추가적으로 분석하는데 할애하고 있다.

김성환(2009)은 편도 2차로의 고속도로에서 단기공사 진행으로 인해 고속도로 상류부에 미치게 되는 교통영향을 미시적 관점뿐만 아니라 거시적인 관점에서 분석하고 이러한 교통영향을 사전에 예측·분석할수 있는 지체산정 모형을 개발하고자 하였다. 이기영(2012)은 고속도로에서 발생한 교통사고를 대상으로 하여 돌발상황 지속시간에 영향을 주는 요인들을 찾아내기 위한 모형을 개발하였다. 분석 결과, 교통사고가 발생한 장소(일반구간, 교량, 터널 등)에 따라 돌발상황의 지속시간에 영향을 미치며, 현장처리를 위한 작업차량의 도착시간이 지속시간에 가장 민감한 요인으로 분석되었다. 실제 자료를 이용한 분석을 기반으로 돌발상황에 대한 영향분석을 추정하기 위한 노력으로 백승걸(2003)은 돌발상황으로 인한 도로용량의 변화나 통행시간의 변화 그리고 정체 길이에 대한 예측과 혼잡상태 판정 등 돌발이후의 교통영향을 예측하기 위해 TCS와 VDS자료를 활용한 Cellular Automata모형 기반의 동적 고속도로 시뮬레이션 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 특정 구간 및 특정 시간에 사례 적용하였으며, 이를 통한 돌발후 교통류 상황에 대한 예측 결과를 도출하였다.

2.2. 탄소배출량 산정 연구

교통분야에서 탄소배출량을 산정하는 방법은 크게 두 가지로 나뉘는데, 개별차량의 주행궤적을 고려한 미시적 방법과 주행하는 차량의 궤적을 평균적으로 고려하는 거시적 분석방법이 있다. 미시적 분석방법은 주어진 도로, 교통상황에서 개별차량의 주행궤적을 미시적 시뮬레이션 등의 방법으로 단위시간별로 획득하고 분석대상이 되는 지역에 대한 단위시간당 속도, 가속도 정보를 수집하여 속도-가속도의 조합으로 배출량을 산출하게 된다. 많은 연구들이 미시적 방법을 사용하는데, 교차로가 포함되는 단속류의 경우, 미시적 시뮬레이터인 SIDRA 등이 이용되고 있으며(오흥운, 2013), 보다 광범위한 네트워크에 대해서는 미시적 시뮬레이터인 VISSIM 등을 통해 주행궤적을 확보하고 확보된 주행차량주행 궤적을 통해 배출량을 추정하고 있다(박진영, 2007).

개별 차량의 주행궤적을 활용하는 미시적인 방법과는 달리 거시적인 방법은 기본적으로 대상구간을 주행하는

차량이 모두 평균속도로 주행한다는 가정 하에 총차량대수와 평균주행속도를 활용하되, 속도에 따라 배출되는 탄소배출량을 일대일 매칭을 통해 산정하는 방식이다. 대부분 국가 연구소에서 제시하는 방법론은 거시적 분석방법이라 볼 수 있는데, 미국의 Environmental Protection Agency(EPA, 2009)나 영국의 TRRL에서 제시한 모형 모두 다 평균주행속도와 속도에 따른 배출계수를 기준으로 배출량을 산정하게 되어 있다. 우리나라의 국토교통부 교통시설 투자평가지침(한국개발연구원, 2009)에서 제시하는 방법도 유사한데 차량의 탄소배출량을 차종에 따라 분류하고, 5개의 오염원으로 나눠 평균속도에 따라 변화하는 탄소배출량을 산정하도록 되어 있다.

미시적 모형, 거시적 모형 모두 장단점이 있으나 모든 차량의 주행궤적을 시간별로 획득하는 것에 대한 현실적 제약이 따르는데다 일반적으로 탄소배출량은 교통량, 도로기하구조, 신호 변화 등에 따른 변화를 큰 틀에서 상대적으로 살펴보는게 보편적이므로 본 연구에서는 거시적 방법을 따르되 가능한 고속도로상에서 변화하는 속도의 추이를 반영하기 위해 단순화한 Continuum Equation을 이용하기로 한다.

2.3. 적용 거시교통류이론

유체역학 이론은 교통류를 유체로 가정하고 유체역학에서의 물리적 법칙을 유추하여 교통류 관계(교통량-밀도-속도)에 적용시킨 것으로, 크게 단일 교통군의 지체변화를 묘사하는 운동파이론과 두 개의 다른 특성을 가지는 교통군의 상호 영향관계를 묘사하는 충격파이론으로 발전하였다. 본 연구에서 적용한 모형은 고차 연속교통류 모형으로 기본적으로 고차연속교통류 모형은 속도와 교통량이 밀도의 함수라고 가정하며 다음의 3가지 상태방정식으로 구성된다.

2.3.1. 교통량, 속도, 밀도의 기본적 관계

$$q = u \cdot k$$

q = 교통량 (대/시)

u = 공간평균속도 (km/시)

k = 밀도 (대/km)

2.3.2. 교통량 보존 방정식

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = g(x, t)$$

$g = (x, t)$ 는 단위 시간, 단위 거리 당 차량의 발생·소멸율을 나타내는 것으로 분석구간에 진·출입 램프가 없으면 $g = (x, t)$ 은 0이 된다.

2.3.3. 가속도 방정식

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} u = \frac{1}{T} (u_e(k) - u - \frac{v}{k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x})$$

T = 반응시간 계수 (시/km)

v = 기대 계수 ($\text{km}^2/\text{시}$)

$u_e(k)$ = 균형속도 (km/시)

위 식의 왼쪽 항은 차량의 가속을 표현한 것이고, 오른쪽의 첫 번째 항은 실제교통류의 속도가 일정시간이 지난 후 균형속도에 도달하려고 하는 것을 표현하고 있다. 오른쪽의 두 번째 항은 운전자들이 하류부의 교통상황에 반응하는 효과를 표현하고 있다. 만약, 혼잡 때문에 하류부의 밀도가 높아지면 속도가 줄어든다는 것을 의미한다. 이 모형에 의해 도출된 밀도와 속도를 활용하여 충격파를 분석함으로써 특정 구간의 거시적 교통류 특성이 인접 구간으로 전이되는 현상을 설명할 수 있다. 충격파 분석은 시공도에서 시공간 영역의 설명을 통해 혼잡을 설명하는데 유용하며, 병목현상이 발생하는 지점의 상류부에서 발생하는 차량 간의 상호작용에 대한 설명이 가능한 방법이다. 연속류 구간에서 교통량(q) - 밀도(k) 곡선이 Fig. 1과 같이 선정되었다면, 그림에서 보이는 바와 같이 A지점에서의 교통류 상태가 본래의 교통흐름이라 할 때 이때의 교통량 밀도 속도를 q_a, k_a, μ_a 로 표시할 때 돌발상황으로 인해 B지점에서 병목 현상이 발생하여 새로운 교통류에서의 교통량, 밀도, 속도를 q_b, k_b, μ_b 로 나타내면 충격파의 속도는 w_{ab}

로 나타낼 수 있다. w_{ab} 는 돌발상황 발생으로 인해 상류부로 혼잡이 확산되는 속도를 의미하며 충격파의 종류 중 후방형성에 해당된다. 충격파 방정식의 산출과정은 개념적으로 A지점과 B지점 사이의 경계면을 중심으로 두 지점에서의 교통량은 같으며, A지점이 속도를 충격파를 기준으로 표시하면 $(\mu_a - w_{ab})$ 가 되고 B지점의 속도와 충격파를 기준으로 표시하면 $(\mu_b - w_{ab})$ 가 된다.

$$w_{ab} = \frac{\partial q}{\partial k} \simeq \frac{\mu_a k_a - \mu_b k_b}{k_a - k_b}$$

결국 두 교통류 간에서 발생하는 충격파의 속도는 두 교통류 간의 밀도 차이와 교통량 차이의 비율로 나타낼 수 있다. 충격파의 속도를 이용하여 대기행렬 및 TNF의 산정이 가능하며, 돌발상황 발생 시 Fig. 1의 그림 a에서 보는 바와 같이 대기 행렬은 충격파의 속도 $w_{ba} = \frac{q_1 - q_2}{k_a - k_b}$ 로 상류부로 확산을 하게 된다. 대기행렬은 돌발상황 지속시간 t_p 까지 확장되어, 이 시점에서 최대 대기 행렬을 나타내게 되며, 대기 행렬의 성장률인 다음 식을 통해서 구할 수 있다.

$$\frac{dn}{dt}(\text{pcphpl}) = (q_1 - q_2) - w_{ba} k_b$$

따라서, 최대 대기행렬의 길이는 다음 식을 통해 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{최대대기행렬 길이}(km) = \\ (\text{queuing rates} \times t_p \times \text{average vehicle length}) \end{aligned}$$

Fig. 1에서 보는 바와 같이 돌발상황의 종료시점에서의 대기 행렬의 선두차량들은 출발율(discharging rates)인

$$\frac{dn}{dt}(\text{pcphpl}) = (q_d - q_2) - w_{ba} k_b$$

로 소거되기 시작하여 대기행렬의 성장률과 만나는 시점에서 혼잡이 해소되게 되는데 돌발상황 발생 이후부터 이때까지의 시간인 TNF를 다음의 식을 통해 구할 수 있다.

$$TNF = \frac{(- \text{discharging rates} \times t_p)}{(\text{queuing rates} - \text{discharging rates})}$$

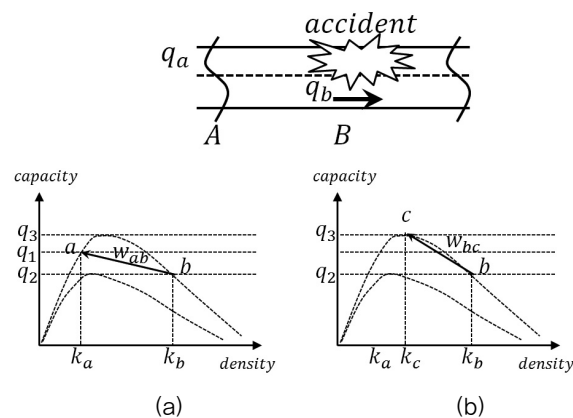


Fig. 1 Shock-wave at the Time of the Accident

3. 자료수집 및 분석

3.1. 돌발로 인한 차로 점유

본 연구의 목적에 적합한 결과를 산출하기 위해 기존의 고속도로망 중 연간 통행량과 돌발상황이 가장 많이 발생하는 경부고속도로 수도권구간(양재IC-오산IC)의 양방향구간을 대상구간으로 선정하였다.



Fig. 2 Sections for Collection and Analysis of Traffic Data

해당 구간에서 발생한 123건의 사고들에 대해서 교통 소통 및 배출가스 증가에 영향을 미치는 주요 요소인 차로점용(차단)여부와 사고처리시간에 대해 조사하였다.

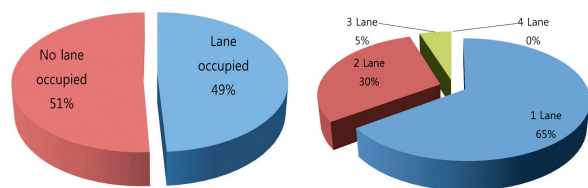


Fig. 3 Lane Occupancy Status in Incident

차로 점유는 본선의 서비스상태 저하 및 운전자들의 속도 등에 많은 영향을 미치게 된다. 분석 결과, 1개 차로 점유가 가장 큰 비율을 보였으며, 본선 4개 전 차로가 차단되었던 상황은 발생하지 않았던 것으로 나타났다. 점유상태를 보았을 때 절반에 가까운 사고에서 본선 차로가 점유되지 않았다는 것을 알 수 있는데, 이는 갓길차로에 가까운 차로(3, 4차로)에서 발생한 사고들은 사고 발생 후 갓길차로로의 유도가 안쪽 차선들보다는 비교적 수월하기 때문인 것으로 생각된다.

경부선 수도권 구간에 대한 사고 이력자료 분석 결과, 대부분의 돌발은 발생 후 약 1시간 이내에 대부분의 처리가 완료되는 것을 알 수 있었다. 특히 사고 처리시간

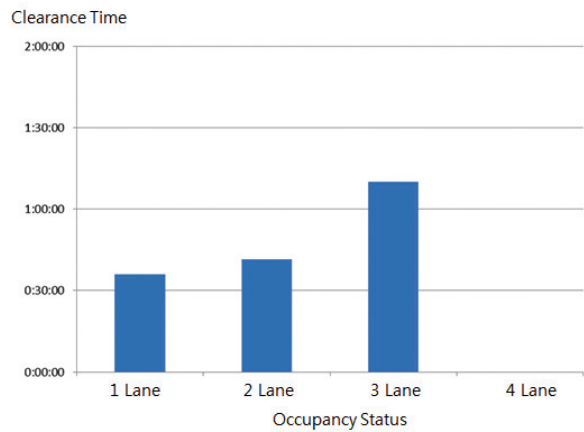


Fig. 4 Clearance Time

에 있어 20분 이내의 빠른 사고 조치와 평균 35분 내외의 일반적인 조치 그리고 1시간 이상의 장시간에 걸친 사고 조치로 사고처리 시간을 구분할 수 있었다. 또한 사고 후 본선차로의 점유 유형에 있어 1차로 > 2차로 > 3차로 > 4차로 순의 점유빈도를 보였으며 이와는 반대로 처리시간은 1차로 < 2차로 < 3차로 < 4차로 순으로 나타났다. 이를 통해 사고의 정도가 크고 범위가 클수록 그 발생빈도는 상대적으로 적지만 사고 발생에 따른 처리 시간 및 이에 따른 본선의 소통상태 회복시간은 점점 커지는 것을 알 수 있었다.

3.2. 사고 지점 도출

본 연구에서는 연구 목적에 가장 적합한 자료를 수집하기 위하여 한국도로공사에서 제공하는 분석대상구간의 교통사고 이력정보 데이터를 이용하였다. 이력정보 데이터에는 고속도로 내에서 발생한 사고의 일자, 시간, 이점, 사고 등급, 사고 원인 등의 내용이 작성되어 있으며, 본 연구의 목적에 있어 중요한 항목인 돌발상황의

Table 2. Sample Data for Incident Location

No.	Survey section		No.	Survey section	
	Start	End		Start	End
1	415.5	415.1	63	395.1	394.7
2	415.3	414.9	64	395	394.6
3	414	413.6	65	395	394.6
⋮					
59	396.1	395.7	121	378.7	378.3
60	396	395.6	122	378	377.6
61	395.6	395.2	123	378	377.6
62	395.3	394.9			

처리시간 및 사고 유형이 기입되어 있어 보다 체계적인 분석이 가능하다. 사고 자료는 각 이정별로 사고 건수를 누적도수로 표현하였으며, 각 이정별 거리는 도로교통공단에서 수행하고 있는 ‘교통사고 잦은 곳 개선사업’의 고속도로 부문의 사고 잦은 곳 선정기준을 참고하여 400m를 간격으로 정하여 진행하였고 해당 구간의 123개의 사고지점의 데이터를 수집하였다. Table 2는 선정된 123개 지점의 일부를 나타낸 것이다.

3.3. 교통 및 차로 점유 조건

본 연구에서는 돌발 상황으로 인해 차로점유가 발생된 고속도로 내에서 서로 다른 용량상태를 보이는 본선 구간에서 발생하는 용량감소에 따른 하류부 대기행렬로 인한 교통상황의 변화를 거시적 교통류 모형으로 추정하도록 하였다. 이러한 상황에 대한 해석을 위해 본 연구에서는 충격파 이론을 이용하고자 하였다. 충격파 이론을 이용하면 교통량과 밀도의 특성이 다른 두 교통류가 만나는 상태에 대한 해석이 가능하며 충격파 속도의 도출도 가능하다. 또한 다른 두 교통류의 발생으로 인한 대기행렬의 길이와 위치 그리고 대기행렬의 소멸시간 등을 파악할 수 있다.

충격파 이론을 이용하여 교통류의 시공간적인 전개과정을 분석하기 위해서는 수집한 자료에서 충격파 이론을 이용할 수 있는 변수를 도출해야 하며, 이를 활용해 각 상황별 충격파속도를 구해야 한다. 충격파 이론의 적용에 있어 중요한 변수는 교통량과 밀도이다. 교통량 q 와 밀도 k 는 충격파 속도 w 를 도출하는데 있어 필수요소이기 때문이다. 또한 교통량과 밀도는 고속도로 기본구간의 서비스 수준분석에 있어 효과척도가 되는 부분이기도 하다. 그리하여 본 연구에서는 고속도로 기본구간의 서비스수준분석에 이용되는 각 서비스 수준별 밀도와 교통량을 이용하여 소통 상태에 대한 기본적인 시나리오를 구축하고자 하였다. 본 연구에서 활용하는 사고 자료의 대상구간인 경부고속도로의 설계속도가 120km/h이기 때문에 분석과정에서도 설계속도 120km/h에 대한 각 서비스수준에 따른 밀도와 교통량을 적용하고자 하였다.

고속도로의 돌발상황 발생으로 변화되는 도로 조건은 앞서 고속도로 사고 이력조사에서 분석된 경부선의 조건을 적용하고자 하였다. 본 연구의 분석대상구간의 기본 기하구조는 우리나라의 고속도로에서 가장 일반적인 형태를 보이고 있는 4차로 고속도로에 대한 분석을 진행하였다.

사고구간의 차로점유상황은 4차로에 대해서 일반적

인 통행상태부터 시작하여 1차로, 2차로, 3차로 그리고 전 차로차단의 시나리오를 적용하였다.

사고발생 후 처리시간의 길이는 짧은 시간에 처리되는 단시간 처리 상황과 일반적인 처리시간 그리고 긴 시간이 소요되는 장시간 처리로 시나리오를 구분하여 진행하였다. 일반적인 처리시간은 앞서 분석된 평균 처리시간을 분석과정 상의 편의를 고려하여 40분과 전, 후 20분으로 결정하였다.

Table 3. Incident Clearance Time Classification

Incident clearance time		
Short	Normal	Long
20 min	40 min	60 min

4. 돌발상황 발생에 따른 통행특성 분석

4.1. 온실가스 배출량 산정방법

돌발상황 발생으로 인해 고속도로본선의 소통행태는 영향을 받게 되고 이것은 곧 평균속도의 변화를 의미하게 된다. 이러한 속도의 변화는 차량이 운행 중에 배출하는 온실가스의 양에도 영향을 미치게 된다. 이러한 속도변화에 따른 온실가스 배출계수는 국립환경과학원에서 제시하고 있는 배출계수를 적용하였다. 본 식에 따르면 국내 차종별 CO₂ 배출계수는 속도를 변수로 하는 함수로 정의되어 있으며, 일부 차종의 경우 속도의 범위에 따라서 다른 배출계수를 적용하도록 하였다.

Table 4. Vehicle Emission Factor Equations by Vehicle and Fuel Type (KMLTMA, 2011)

Vehicles	Fuel type	Emission factor equation
Car	Gas	65.4km/h < $Y=1555.5 \times V^{(-0.578)}$
		65.4km/h $\geq Y=0.0797 \times V+144.19$
Bus	Diesel	65.4km/h < $Y=2676.7 \times V^{(-0.3344)}$
		65.4km/h $\geq Y=1.3034 \times V+548.56$
Truck	Diesel	65.4km/h < $Y=1135.2 \times V^{(-0.4668)}$
		65.4km/h $\geq Y=2.2307 \times V+25.76$
		$Y=0.1029 \times V^2-14.937V+798.9$
	Large	$Y=6240.3 \times V^{(-0.3829)}$

4.2. 교통류 특성

고속도로 사고 발생으로 인해 발생하는 혼잡 및 대기행렬의 길이를 산정하기 위해 충격파이론을 이용한 대기행렬의 길이 산정 및 시간을 계산하였다. 이를 위해

다음과 같은 전제조건으로 고속도로 돌발상황 구간의 통행특성변화를 분석하였다.

각 시나리오 간의 첫 분석은 시공도 작성을 통한 최대 대기행렬 길이 및 대기행렬 소멸시간의 차이간의 비교이며, 두 번째는 작성된 시공도에 나타나는 교통군들의 특성을 분석하여 돌발상황 발생 전, 후의 온실가스 배출량의 차이를 비교하였다.

시공도 작성을 통한 분석구간은 대기행렬의 소멸지점을 기준으로 하며, 이를 통해서 각 시나리오에 따른 소멸위치 및 경과시간을 계산한다.

분석을 통해 도출된 각 시나리오별 결과 값을 실제 사고 자료에 적용하여 1년간 돌발상황 발생으로 인해 고속도로 본선구간에서 발생한 온실가스의 추가 배출량을 계산하고, 돌발상황 관련 요소(처리시간, 돌발상황 발생)의 개선에 따른 연간 추가 배출량 감소 및 개선효과를 분석하였는데, 온실가스 배출량의 분석의 경우 거시적 모형에 의해 산출된 고속도로상의 각 차량군의 특성을 이용하였다.

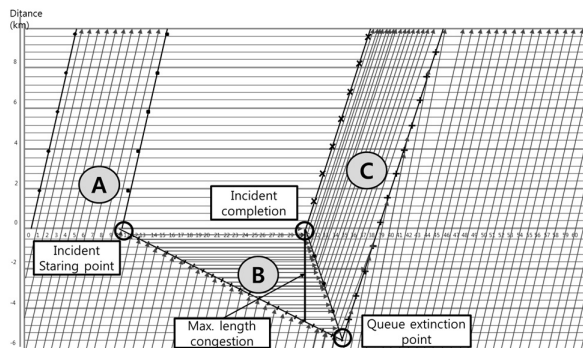


Fig. 5 Sections for Collection and Analysis of Traffic Data

Fig. 5는 돌발상황으로 일부 차량이 차단되어 대기행렬이 형성되는 경우 고속도로 본선상에 발생하는 서로 다른 특성을 갖는 차량군을 개략적으로 나타낸 것으로 차량군의 특성은 크게 정상류, 지체류, 회복류의 3가지로 분류할 수 있으며, 각 교통군의 특성은 다음과 같다.

정상류 A는 돌발상황이 발생하지 않았을 때 통행중인 차량군을 나타내고 있다. 고속도로 내에서 이러한 차량군은 고속의 상태를 보이고 있으며 고속도로 내 돌발상황으로 인한 용량감소현상이 발생하지 않으면 계속하여 고속도로 상에서 관측되게 된다.

지체류 B는 용량 감소로 인한 대기행렬과 관련된 통행특성을 나타낸다. Fig. 5에 예시로 제시된 시나리오에는 본선구간 내 모든 차량이 차단되었을 때의 통행특성

으로 통행류 A로 진행하던 차량들이 돌발상황으로 인해 통행류 B를 겪게 되고 차량의 완전 폐쇄로 인하여 정차된 상태로 돌발상황이 처리될 때까지 움직이지 않는 것을 볼 수 있다. 통행류 B에서는 통행류 A와 비교했을 때, 상대적으로 저속 성향을 보이며 완전히 정차하고 있는 상황을 보일 수도 있다. 이는 발생원인의 제거 및 처리 등에 따라 소멸하게 되며, 해당 교통류를 통과하게 되면 다른 교통류의 영향을 받게 된다.

회복류 C는 통행류 B로 인해 발생하며 차로 감소로 인한 용량이 변하는 도로본선은 용량의 감소가 다시 원상태로 복구되어도 바로 돌발상황 발생 이전의 소통 상태로 돌아갈 수 없다. 이는 정체로 인해서 통행속도 감소로 인한 순간적인 수요 증대가 정체구간 내에서 발생하게 되었고 이러한 효과가 돌발상황 처리 후에도 계속하여 영향을 미친다. 이때의 속도는 용량상태에서의 통행속도를 보이게 되는데, 이러한 특성도 시간이 지남에 따라 돌발상황 이전의 통행상태로 점차 회복하게 된다. 이러한 A → B → C의 한 주기를 지나게 되면 통행상태는 다시 A의 상태로 돌아가게 된다.

본 연구에서는 A, B, C 각각의 통행류에 적합한 계산 방법을 도출하여 사고발생 전, 후의 각 시나리오별(점유차로, 차단시간, 서비스수준)에 따른 배출특성의 변화를 관찰하고자 하였다. 이러한 차량군의 특성을 반영하여 각각의 특성에 적용할 수 있는 온실가스 배출량 산정방법을 적용하고자 하였다.

4.3. 대기행렬분석

본 연구에서는 돌발상황 발생으로 인해 발생하는 정체행렬의 최대길이와 정체해소시간에 대한 결과를 서비스수준에 따라서 산출하였다. 본 연구에서 분석한 최대 정체 길이는 분석시간동안 정체 길이가 가장 길게 발생된 구간을 의미하며, 대기행렬의 소멸시간은 돌발상황의 처리가 완료된 시간을 지점으로 하여 대기행렬이 완전히 소멸될 때까지의 시간이다. 각 시나리오에 대한 교통류특성변화는 시공도 작성 후 제시한 분석방법을 통해 계산하게 되며 각 시나리오별로 시공도를 활용해 교통류 특성을 도출하고 그 결과를 취합하여 정리하였다.

분석 결과 서비스 수준이 낮은 상태에서 처리시간과 차로차단 수가 증가함에 따라 대기행렬의 길이와 발생 후 소멸시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 서비스 수준이 A와 B일 때 1차로, 2차로 차단 상황에서 하루부에서의 지·정체가 발생되지 않는 것으로 나타나는데, 이는 사고 발생 전의 통행량이 돌발상황 발생으로 인해

차단된 후에 감소된 사고 지점의 용량보다 더 작기 때문인 것으로 분석된다.

Table 5. Estimated Queue Length and Queue Extinction Time

Lanes occupied	lane occupied time	L O S	Max. queue length (km)	Queue extinction time	Queue extinction time after clearance
1	20min	A	-	-	-
		B	-	-	-
		C	2.05	22min 00sec	2min 00sec
		D	12.15	31min 53sec	11min 53sec
	40min	A	-	-	-
		B	-	-	-
		C	4.09	44min 00sec	4min 00sec
		D	24.31	1hr 03min 47sec	23min 47sec
	60min	A			
		B			
		C	6.14	1hr 06min 00sec	6 min
		D	36.46	1hr 35min 0sec	35min 40sec
2	20min	A	1.14	20min 37sec	37sec
		B	6.73	23min 41sec	3min 41sec
		C	14.47	27min 56sec	7min 56sec
		D	34.91	39min 07sec	19min 07sec
	40min	A	2.28	41min 15sec	01min 15sec
		B	13.45	47min 22sec	7min 22sec
		C	28.95	55min 51sec	15min 51sec
		D	69.82	1hr 18min 15sec	38min 15sec
	60min	A	3.41	1hr 01min 52sec	1min 52sec
		B	20.18	1hr 11min 03sec	11min 03sec
		C	43.42	1hr 23min 47sec	23min 47sec
		D	104.73	1hr 57min 22sec	57min 22sec
3	20min	A	3.86	21min 49sec	01min 49sec
		B	10.49	24min 20sec	04min 20sec
		C	19.72	29min 19sec	09min 54sec
		D	43.93	40min 45sec	20min 45sec
	40min	A	7.73	43min 39sec	03min 39sec
		B	20.97	49min 54sec	09min 54sec
		C	39.45	1hr 05min 38sec	25min 38sec
		D	87.86	1hr 21min 30sec	41min 30sec
	60min	A	11.59	1hr 05min 28sec	05min 28sec
		B	31.46	1hr 14min 51sec	14min 51sec
		C	59.17	1hr 27min 57sec	27min 57sec
		D	131.79	2hr 02min 14sec	1hr 02min 14sec
4	20min	A	5.63	24min 07sec	4min 07sec
		B	11.98	28min 45sec	8min 45sec
		C	21.06	35min 23sec	15min 23sec
		D	45.66	53min 21sec	33min 21sec
	40min	A	11.25	48min 13sec	8min 13sec
		B	23.96	57min 30sec	17min 30sec
		C	42.12	1hr 10min 46sec	30min 46sec
		D	91.33	1hr 46min 43sec	1hr 06min 43sec
	60min	A	16.88	1hr 12min 20sec	12min 20sec
		B	35.94	1hr 26min 15sec	26min 15sec
		C	63.19	1hr 46min 09sec	46min 09sec
		D	136.99	2hr 40min 04sec	1hr 40min 04sec

4.4. 온실가스 배출량 분석

앞서 분석된 이러한 시나리오별 분석결과와 시공도 분석을 이용하여 각 시나리오별 온실가스 배출량을 분석하였다. 앞서 분석방법에 대한 내용에서 설명했듯이 거시적인 교통류 모형 상에서는 3종류의 교통류 특성이 존재한다. 이들 각각의 특성에 맞는 교통류 특성을 적용해야 구간 내에 존재하는 모든 특성들에 대한 설명 및 분석이 가능하다.

앞의 Table 4에서의 온실가스 배출량산정 방법을 이용하여 사고 발생 이전의 상태에 대한 온실가스 배출량을 계산하고 이를 서로 비교하여 그 차이를 사고에 따른 온실가스의 추가 배출량으로 정의하고, 이를 각 시나리오별로 계산하였다.

$$Q = E' - E$$

Q = 사고발생에 따른 온실가스 추가 배출량(kg)

E = 평상 시의 구간 내 온실가스 배출량(kg)

E' = 사고발생에 따른 온실가스 배출량(kg)

충격파이론, 시공도를 활용한 차량군의 통행특성변화에 대한 분석을 이용하여 계산되는 시나리오별 온실가스 배출량을 각 유형별(사고처리시간, 차로폐쇄, 서비스 수준)에 근거하여 Table 6과 같이 정리하였다. 분석 결과, 구분 유형인 사고처리시간, 차로폐쇄, 서비스수준에 따라서 추가 온실가스 배출량이 차이를 보이는 것을 알 수 있으며, 그 차이는 각 유형별 변화에 영향을 받음을 알 수 있다. 우선 1차로 차단 시의 온실가스 배출량은 그 외의 차로 차단 시의 상황보다 상대적으로 온실가스의 추가적인 배출이 적은 것을 볼 수 있다. 특히 서비스 수준 A와 B의 상황에서는 추가적인 배출량이 없는 것으로 나오는데 이는 차량의 수가 적고 소통상태가 양호한 구간 내에서는 사고가 발생하더라도 차로변경이나 속도변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석된다. 하지만 2차로 차단의 상태에서는 배출량의 크기가 1차로 차단 상황보다 훨씬 커졌음을 알 수 있으며, 이는 3차로, 4차로로 갈수록 계속하여 늘어나는 것을 알 수 있다. 이는 차로차단이 늘어날수록 사고 지점에서 통행이 가능한 차로의 수가 점차 줄어들기 때문에 사고 지점의 용량수준이 점차 감소하기 때문이다. 용량수준의 감소는 해당구간의 V/C 비율의 증가를 가져오게 되고 이는 통행상태의 악화를 초래하게 되는 것이다. 통행상태의 악화에 따른 속도 감소는 온실가스 배출량의 증가를 가

저오게 된다.

서비스 수준의 변화에 따라서 추가 발생 배출량의 증가율이 점점 커지는 것을 알 수 있다. 서비스수준이 A에서 D수준으로 점차 악화되면서 온실가스 추가배출량의 증가 추세가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 이는 사고처리가 모두 완료되었다 하더라도, 상태가 악화될수록 사고가 발생하기 이전의 상태로 돌아가는데 시간이 더 걸리기 때문인 것으로 파악된다. 상태회복시간이 길어질수록 사고영향을 받는 차량의 수도 늘어나기 때문에 배출량의 크기도 교통량이 많을수록 점점 커지는 것으로 판단된다.

Table 6. Additional Emissions(Look-up Table) due to Incidents

no. lane occupied	LOS	20min gap(kg)	40min gap(kg)	60min gap(kg)
4 lanes	A	686.0	2744.1	6174.4
	B	1191.7	4766.8	10725.4
	C	1545.8	6183.1	13912.1
	D	2966.2	11865	26696.2
3 lanes	A	361.7	1446.6	3254.9
	B	810.5	3183.9	7163.8
	C	1523.5	6094.2	13711.9
	D	2836.8	11347	25530.6
2 lanes	A	134.2	536.9	1208.0
	B	664.9	2659.6	5984.0
	C	1281.3	4459.4	10033.6
	D	2566.9	10267.4	23101.6
1 lanes	A	-	-	-
	B	-	-	-
	C	211.81	794.5	1787.6
	D	1072.52	3089.7	6951.7

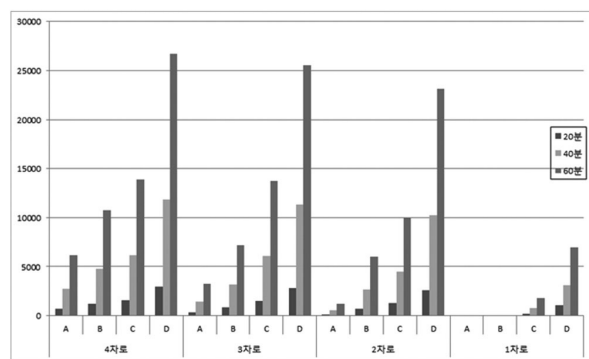


Fig. 6 Additional Emissions due to Incidents

4.5. 사고에 따른 고속도로 온실가스 추가 배출량 산출

4.5.1. 대상구간 기초자료 분석

앞의 연구에서 도출된 각 유형별 추가 배출량 look-

up 테이블을 활용하여 경부선 구간에서 발생한 사고 자료를 바탕으로 사고 발생에 따른 1년간 추가 온실가스 배출량을 산출하였다. 경부고속도로 양재나들목(부산기점 415km)~오산나들목(부산기점 378km)까지 양방향 총 37.5km로써 해당 고속도로구간의 본선 구간에서 발생했던 사고 이력자료를 이용하였다.

교통상태는 지점, 시간에 따라서 계속하여 변화하기 때문에 다른 위치, 다른 시간에 발생한 사고들을 일괄적으로 묶는 것은 현실성을 반영하지 못한다. 이러한 위치별, 시간별 소통특성을 반영하기 위해 본 연구에서는 양재IC~오산IC 구간의 시간대별 교통량 자료를 이용하였다. 구간 분류는 한국도로공사에서 제공하는 구간별 교통량 자료의 구간 분류를 이용하였으며, 이에 따라 양재IC~오산IC 구간을 다음 Table 7과 같이 7개 구간으로 구분하였다.

Table 7. Classification of the Target Range

Section	Distance (km)
Yangjae IC - Pangyo JC	7.62
Pangyo JC - Pangyo IC	0.72
Pangyo IC - Seoul TG	3.47
Seoul TG - Singal JC	9.00
Singal JC - Suwon IC	1.94
Suwon IC - Gihueng IC	6.08
Gihueng IC - Osan IC	8.01

각 구간의 교통량 자료는 도로공사에서 작성한 구간별 15분 교통량을 한 시간 단위로 합산하여 시간대별 교통량으로 정리하였다. 정리된 시간대별 교통량을 용량편람의 서비스 수준을 참조하여 시간대별 구간의 서비스 수준으로 변환하였다. 이와 같이 도출된 구간별 시간

Table 8. Example of Study Area Accident History Data

Accident time	station	Clearance time	No. of occupied lanes	LOS
02-02 12 : 15	399.8	0 : 35 : 00	2	C
02-26 00 : 25	380.8	1 : 00 : 00	2	A
03-08 11 : 00	388.8	1 : 25 : 00	2	B
04-04 08 : 50	390.2	1 : 10 : 00	2	C
04-11 07 : 10	379.1	0 : 50 : 00	2	B
05-03 13 : 03	406.5	0 : 27 : 00	2	B
05-11 23 : 50	381.4	0 : 20 : 00	2	A
05-23 06 : 20	398.5	2 : 05 : 00	2	C
06-16 08 : 15	400.7	0 : 55 : 00	2	C
□	□	□	□	□

대별 서비스수준을 사고 발생시간 당시의 해당 지점의 교통상황으로 적용하고자 하였다.

사고분석에 필요한 자료는 한국도로공사에서 제공한 교통사고이력에서 제공되는 사고유형, 사고처리시간 등의 데이터를 활용하였다. 사고자료 수집과정에서의 가공 과정을 이용하여 사고 자료들을 정리하였으며, 이를 차로 점유상태별과 사고 당시의 서비스 수준으로 정리하였다.

4.5.2. 분석결과

정리된 서비스수준, 사고처리시간, 차로점유를 이용하여 앞의 Table 6에서 도출한 유형별 추가 온실가스 배출량에 적용하여 사고발생에 따른 온실가스 배출량을 계산하였다. 처리시간의 경우 20분, 40분, 60분으로 범위 내의 시간 또는 60분 이상의 사고에 대해서는 보간법을 적용하여 시간별로 세부적인 온실가스 배출량을 계산하였다.

Table 9. Sample Results of Additional Gas Emissions by Incident

Station	LOS	Clearance time	No. of lanes blocked	Additional gas emission (kg)
399.8	C	0 : 35 : 00	2	3664.9
380.8	A	1 : 00 : 00	2	1208.0
388.8	B	1 : 25 : 00	2	10139.5
390.2	C	1 : 10 : 00	2	12820.7
379.1	C	0 : 50 : 00	2	7246.5
406.5	B	0 : 27 : 00	2	1363.0
381.4	B	0 : 20 : 00	2	664.9
398.5	A	2 : 05 : 00	2	3389.1
400.7	C	0 : 55 : 00	2	6843.0
□	□	□	□	□

사고별로 계산된 온실가스 배출량을 합친 분석 대상 구간 내 연간 교통사고에 따른 온실가스 추가배출량은 약 114.5톤으로 분석되었다. 이는 37.5km라는 짧은 구간을 대상으로 하였고, 사고의 분류 대상도 '본선차로를 점유하여 도로소통에 영향을 주었던 사고' 라는 전제 하에 이루어진 분석이기 때문에 고속도로에서 발생한 수많은 교통사고들 중 일부의 사고에 대한 분석이라고 할 수 있다.

그렇기 때문에 향후 추가적인 연구를 통해 차후 전국 고속도로를 대상으로 그리고 본선 외에 다른 구간까지 추가적으로 분석된다면, 고속도로 전체를 대상으로 한

온실가스 배출량 분석이 가능해질 것으로 생각된다. 또한 사고 유형별로 정량적인 분석이 가능하기 때문에 향후 고속도로 교통사고 절감정책의 도입 또는 운영을 통한 온실가스 배출량의 감소 효과를 정량적으로 쉽게 예측할 수 있어 향후 정책도입에 따른 효과를 반영할 수 있는 척도를 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론 및 향후계획

5.1. 결론

고속도로에서 발생하는 사고는 지·정체를 발생하기 때문에 이를 관리하기 위한 효율적인 대책과 사후관리가 필요하다. 사고로 인해 발생하는 차로 점유나 사고 처리시간 등은 빠른 정보수집과 신속한 처리가 뒷받침될 수 있다면 다양한 면에서 이점이 있을 것이다. 그렇기 때문에 효과적이면서 오차없는 돌발상황 검지체계를 만들어 운영하고 신속한 사고처리를 위한 정책 개발 및 연구를 진행하는 것이 고속도로 교통사고로 인한 피해를 줄이는 가장 중요한 사항이다.

본 연구에서는 4차로의 고속도로 본선구간에서 돌발상황 발생으로 인해 발생하는 속도의 변화를 거시적 모형인 충격파를 이용하여 그 영향을 거리 및 시간을 이용하여 분석하였으며, 시공도를 이용하여 고속도로에서 발생하는 교통류 특성에 대한 온실가스 배출량을 분석하고, 이를 이용하여 사고 전, 후의 온실가스 배출량의 변화를 도출하였다.

이렇게 예측된 사고구간의 통행특성 정보는 실제 사고가 발생하지 않더라도 사고에 따른 고속도로에 미치는 영향을 거시적으로 예측할 수 있어, 향후 정책추진 및 대책수립 연구에 활용할 수 있는 중요한 자료로 이용될 수 있다.

본 연구에서 분석한 사고구간의 대기행렬, 배출량의 산출결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

첫 번째, 4차로인 고속도로 본선구간을 차로별, 서비스수준별, 차로점유시간별로 분류하여 분석한 결과, 차로차단이 많을수록, 서비스수준이 하락할수록, 차로점유시간이 길어질수록 대기행렬의 길이는 이에 비례하여 점점 증가하는 것을 알 수 있었다. 대기행렬 발생 후 완전히 해소된 시간도 위의 조건에 따라서 비례적으로 증가하는 것으로 분석되었다.

두 번째, 시공도자료를 이용하여 사고구간의 온실가스 배출량 변화를 분석한 결과, 구분 유형인 사고처리시간, 차로폐쇄, 서비스수준에 따라서 추가 온실가스 배출

량이 차이를 보이는 것을 알 수 있으며, 그 차이는 각 유형별 변화에 영향을 받음을 알 수 있었다. 앞의 연구에서 도출된 대기행렬의 길이와 대기행렬이 완전히 해소된 시간과 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

마지막으로, 본 연구를 통해 도출된 유형별 추가 온실가스 배출량 자료를 이용하면 사고들로 인해서 온실가스가 얼마나 더 배출되었는가를 알 수 있었다. 현재까지의 분석은 비교적 적은 사고를 대상으로 분석하였기 때문에 추가적인 연구를 통해 전국의 고속도로 사고를 대상으로 한 분석이 가능할 것이며, 이러한 연구를 통해 향후 정책 도입에 따른 효과를 반영할 수 있는 척도를 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

REFERENCES

- Adolf D. May, 1990. Traffic flow fundamentals.
- Baek S. K., Park J. B., Nam-gung S., Jang H. H., Kang N. J., et al , 2003. Development of Dynamic Highway Traffic Simulation Model for Incident Management, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.
- Cambridge Systemics. 1990. Incident Management.
- EPA. 2009. "Development of Emission Rates for Light-Duty Vehicles in the Motor Vehicle Emissions Simulator (Draft Report)".
- Han D. H., Lee Y. I., Jang H. H., 2011. A Study of Calculation Methodology of Vehicle Emissions based on Driver Speed and Acceleration Behavior, J. Korean Soc. Transp., 29(5), Korean Society of Transportation, 107-120.
- Kim J. H., Lee S. B, Park B. J, 2002. A study on how to improve frequent accident spot and interval selection, The Korea Transport Institute.
- Kim S. H., 2010. The Study of Model Development for Delay at Short-Term Work Zones on Two-Lane Freeways, Kye-myong University.
- Kim Y. K., Wu S. K., Park S. J., Kim M. J., HAN D. J, 2011. A Study on Evaluation Methodology of Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions on Road Network - Focusing on Evaluation Methodology of CO2 and NOx Emissions from Road -, The Korea Transport Institute Basic Research Reports.
- Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2000. KHCM 2001.
- Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011. Transport infrastructure investment rating 4th Amendment guidance.
- Korea National Institute of Environmental Research, 2009. Build the transport sector greenhouse gas Climate Change Response System (II) - Bottom-up automobile greenhouse gas emission factors.
- Lindley, J. 1987. Urban Freeway Congestion: Quantification of the Problem and Effectiveness of Potential Solutions. ITE Journal-Institute of Transportation Engineers 57.1, pp. 27-32.
- Muriel J. Grace, Renfrey B. Potts, 1963. A theory of the diffusion of traffic platoons.
- TRB special report, 1975. Traffic flow theory.
- Park, J.Y., Noland, R.B, and, Polak, J.W., 2007, Microscopic Model of Air Pollutant Concentration , Transportation Research Record 1750, No. 01-3099, 64-73
- University of Florida, 1991. TRANSYT-7F User's Guide.
- Yoo J. H., 2011. Development of Shock Wave Propagation Models through Temporal-Spatial Analysis, Junnam University.