한국ITS학회논문지 J. Korea Inst. Intell. Transp. Syst.

도로연결 시설 진출차량의 합류속도에 따른 본선 유발 총 지체 분석

A Study of Total Delay Occurrence Depending on Merging Speed from Acceleration Lane

이 준 형*

* 주저자 및 교신저자 : 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 연구원

Junhyung Lee*

* Dept. of Future Technology and Convergence Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Corresponding author : Junhyung Lee, takion0424@yonsei.ac.kr

Vol.19 No.2(2020)
April, 2020
pp.62~73

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
https://doi.org/10.12815/kits.2020.19.2.62

Received 24 February 2020
Revised 2 March 2020
Accepted 4 April 2020

ⓒ 2020. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

도로연결허가는 위계가 높은 도로의 접근성을 제한함으로서 높은 속도로의 지역 간 광역 이동성을 보존하기 위한 제도이다. 이미 도시화가 진행되어 도로의 이동성이 상실된 지역에서 과도하게 긴 변속차로 길이요구로 인해 토지의 접근성이 악화되므로 향상된 차량 가속성능을 반영하여 변속차로 최소길이를 재검토해야한다는 요구가 제시된다. 그러나 변속차로 최소길이 요건을 재검토하기 위해서는 저속에서 본선으로 합류하는 차량이 본선에 미치는 영향을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 이를 위하여 본선의 교통류율, 가속차로 내 도달속도에 따라서 도로연결 시설 진출차량 1대가 본선에 유발하는 총 지체를 분석하였다. 본선의 교통류율과 총 지체는 정확한 선형관계를 가지고 있는 것이 확인되었으며, 도로연결 시설에서 진출한 차량의 본선 합류속도가 40km/h부터 100km/h까지 20km/h간격으로 증가함에 따라 각각 약 5.0배, 1.6배, 5.1배 감소하였다. 가속차로 내 차량이 본선과 동일한 속도로 가속하여 합류할 경우 유발하는 총 지체가 0.5대 · 시 이하로 가장 이상적이지만, 운전자의 인지반응속도 1초를 감안할 때 본선과 약 20km/h이내의 속도편차를 가지고 합류할 경우 본선에 유발하는 총 지체는 미미한 것으로 판단되었다.

핵심어 : 도로연결허가, 가속차로, 총 지체, 합류부, 합류속도

ABSTRACT

Access management is aimed at preserving the road's high intercity mobility. In urbanized areas, immoderate acceleration lane-length requirements restrict the accessibility of land. Therefore, there are many opinions to revise the minimum acceleration lane-length requirement. For this purpose, it is important to diagnose the effects of slow vehicles on the mainline. This study analyzed a single merging vehicle's total delay occurrence depending on the mainline traffic flow rate and merging speed. A linear relationship was observed between the mainline traffic flow rate and total delay. As a merging speed increases gradually from 40km/h to 100km/h in 20km/h intervals, the total delay decreases by 5.0, 1.6, and 5.1 times, respectively. This shows that the ideal condition with the total delay is less than 0.5 vehicle · sec when there is no speed difference between the mainline and merging vehicle. On the other hand, given the one-second response time of drivers, the total delay occurrence was slightly low when the speed difference between the mainline and merging vehicle was less than 20km/h.

Key words : Road access management, Acceleration lane, Total delay, Merging area, Merging speed

Ⅰ. 서 론

1. 개요

도로는 도시를 구성하는 기본요소로서 물자와 사람의 지역 간 이동과 마을단위 지역사회에 접근하기 위한 접근성 두 가지 역할을 담당한다. 『도로법』 제52조에 따른 도로연결허가는 지역 간 광역 이동성이 중시되는 고속국도, 자동차 전용도로, 일반국도, 지방도, 4차로 이상의 도로에 다른 도로나 통로, 그 밖의 시설을 연결하여 차량이 진출입하고자 할 때 도로관리청의 허가를 받게 함으로써 (Lee et al., 2019) 무분별한 진출입로 개설에 따른 도로의 이동성 상실을 예방하고, 도로의 안전을 확보하는 것을 그 목표로 한다. 민원인은 도로연결허가를 득하기 위하여 시설을 도로와 연결하기 위한 변속차로와 안전시설 등의 설치계획을 제출하고, 도로연결허가를 받을 경우 즉시 공사를 시행하여야 한다.

현재 『도로와 다른 시설의 연결에 관한 규칙(이하 도로연결규칙)』 [별표 5]는 고속국도 또는 일반국도에 도로연결허가를 신청할 때 시설의 유형과 규모에 따른 변속차로의 최소길이를 제시하고 있으며, 도로관리청 업무담당자는 변속차로 중 일부라도 도로연결규칙 제6조에 따른 도로연결허가 금지구간과 중첩되는 경우 도로연결허가를 불허한다. 변속차로의 최소길이는 도로연결 시설을 진출입하는 차량이 충분히 감속 또는 가속을 하여 본선의 원활한 교통을 방해하는 것을 최소화하고, 교통안전을 도모하고자 하는 데에 그 목적이 있다.

그러나 이미 도시화가 진행된 지역에서 과도하게 긴 변속차로 길이를 요구함에 따라 도로연결허가가 불허될 경우 해당 토지는 맹지가 되거나, 접근성이 악화되어 민원인의 재산권에 피해가 발생하므로 업무담당자는 실제 해당 도로연결허가가 도로의 이동성이나 안전성에 미치는 영향을 면밀히 검토해야 한다. 또한 일반적으로 법에서 요구하는 변속차로 최소길이보다 긴 거리의 변속차로를 확보하는 것이 교통안전 측면에서 유리하다는 일반적인 인식이 있지만, 도로연결허가와 동반되는 도로점용허가는 공공의 도로를 사적인 용도로 특수 사용하는 것을 허가하는 제도로서, 도로관리청이 필요이상의 변속차로 확보를 요구하여 많은 도로면적에 대해 도로점용허가를 내주는 것은 문제의 소지가 있다. 따라서 도로연결 시설 진출입을 위한 적정한 변속차로 길이를 찾는 것이 매우 중요하다.

현재 적용되고 있는 변속차로 최소거리의 기준은 지난 1999년 도로연결규칙이 최초로 제정된 이후, 지역별, 변속차로 설치형태 등에 따라 일부 요건이 완화된 것을 제외하고는 큰 틀의 변화가 없었다. 또 지난 20년간 차량의 성능이 변화한 것을 반영하여 변속차로 최소길이 요건을 변경해야한다는 요구가 꾸준히 제시되어 왔다. 그러나 실제 변속차로 최소길이 요건을 완화하고자 한다면, 도로연결 시설에 진출입하는 차량이 본선에 미치는 영향에 대한 정확한 판단이 필요하다. 실제 도로환경에서는 동일한 변속차로 길이 조건에서 차량별 가속성능과 운전자 성향에 따라 도달속도는 서로 상이하다. 만약 변속차로 최소길이 요건이 완화된다면, 현재보다 낮은 속도에서 본선으로 합류하는 차량들이 증가할 것이다. 따라서 본 연구는 향후 변속차로 최소길이 요건을 수정할 경우 발생하는 영향을 분석하기 위한 기초연구로서 가속차로에서 본선으로 합류하는 차량의 합류속도와 본선의 교통류율에 따라 합류차량 1대가 본선에 유발하는 총 지체를 분석하였다.

Ⅱ. 기존연구 고찰 및 용어정리

1. 변속차로의 길이

본 연구는 도로연결 시설에서 진출하는 차량이 본선에 미치는 영향을 범위로 한다. 그러나 변속차로 길이와 관련한 설계 기준은 일반적인 합류부 가속차로의 기준을 모두 검토하였다.

1) 도로연결규칙

도로연결규칙 [별표 5] 변속차로 최소길이는 <Table 1>과 같이 도로연결허가 대상 시설의 규모를 대규모, 중규모, 소규모로 3분류하여 결정하는 것으로 분석된다. 또한 대규모에서 중규모, 소규모로 규모가 감소할 때마다 변속차로 최소길이가 일정한 비율(약 2/3)로 감소하는 것으로 설계되어 있다.

도로연결규칙 [별표 5]에 따르면 가장 대표적인 도로연결허가 대상인 주유소와 휴게소의 경우 감속차로와 가속차로를 합쳐 총 140m의 변속차로 최소길이를 요구한다. 즉, 진출입로의 통로 폭을 고려할 때 약 150m 거리에 곡선반경, 종단기울기, 교차로, 터널, 지하차도, 교량, 버스 정차대, 측도 등에 따른 도로연결허가 금지구간이 위치하지 않을 때에만 도로연결허가가 가능하다.

본 연구에서는 편의상 도로연결허가 대상인 도로에 변속차로를 설치하고 진출입하는 시설을 “도로연결시설”로 지칭하고, 도로연결 시설에서 빠져나온 뒤 가속차로를 통해 본선으로 진입하는 차량과 그 속도를 각각 “합류차량”과 “합류속도”라는 용어로 사용하겠다.

<Table 1> Facility size classification depending on minimum speed-changing lane length

Size of a Facility	Facilities
Large	Industrial complex, Service area, Gas station, Facilities with more than 51 parking spaces, Houses with more than 101 households
Medium	Auto mechanic, Facilities with 21~50 parking spaces, Houses with 21~100 households
Small	Passage with more than 6m wide, Facilities with under 20 parking spaces, Houses with 6~20 households

2) 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙

MOLIT(2013a)는 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙을 해설하고 있다. MOLIT(2013a)에 따르면, 가속차로의 길이는 일반적으로 승용차가 대기 주행거리를 포함하여 가속에 필요한 거리로 결정되어야 한다. 그러나 국내의 경우, 차종 구성 중 트럭이 차지하는 비율이 높아, 승용차량보다는 트럭의 주행특성을 고려하여 13 PS/ton의 마력을 가지는 트럭을 기준으로 가속차로의 길이 규정의 근거로 삼는다. Eq (1)은 가속차로의 길이를 계산하는 산식이며, MOLIT(2013a)는 평지에서의 평균 가속도를 <Table 2>와 같이 제시하고 있다. Eq (1)의 가속차로 길이 계산식과 <Table 2>의 가속도 값을 이용하여 가속차로의 소요길이를 계산한 뒤, 운용경험 및 설계기준치를 고려하여 도출한 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 적용 값은 <Table 3>과 같다.

$$L=\frac{v_1^2-v_2^2}{2a\times 3.6^2} \quad \cdots\cdots (1)$$

L : acceleration lane length (m)　　a : acceleration (m/s^2)

v_1^2 : accelerated speed on acceleration lane (km/h)　　v_2^2 : initial speed on acceleration lane (km/h)

<Table 2> Average acceleration depending on driving speed (MOLIT, 2013a)

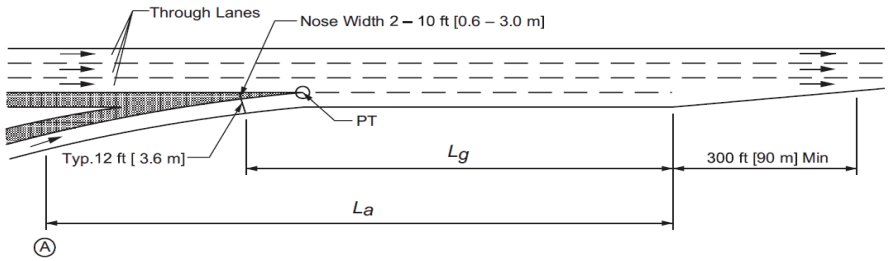
Driving speed (km/h)	70	63	60	55	51	50	45	42	40	35	30	28	20
Average acceleration (m/s^2)	0.28	0.34	0.36	0.41	0.46	0.47	0.54	0.59	0.63	0.74	0.88	0.95	1.38

<Table 3> Acceleration lane length in “Korean rules about the road structure and facilities standard”

Mainline design speed (km/h)			120km/h	110km/h	100km/h	90km/h	80km/h	70km/h	60km/h
Ramp design speed (km/h)	80km/h	Acceleration lane length (m)	245m	120m	55m	-	-	-	-
	70km/h		335m	210m	145m	50m	-	-	-
	60km/h		400m	285m	220m	130m	55m	-	-
	50km/h		445m	330m	265m	175m	100m	50m	-
	40km/h		470m	360m	300m	210m	135m	85m	-
	30km/h		500m	390m	330m	240m	165m	110m	70m

3) AASHTO(2018)

AASHTO(2018)에서는 <Fig. 1>과 같은 가속차로 설계 형태를 제시하고 있다. <Fig. 1>의 L_a는 <Table 4>의 최소 변속차로 길이를 나타내며, L_g는 차로 변경을 위한 간격탐색을 할 수 있는 90~150m정도 길이의 구간을 의미한다. AASHTO(2018)에서 <Fig. 1>과 <Table 4>를 통해 제시하는 가속차로 최소 길이는 램프에서 본선으로 합류하는 운전자가 본선의 속도에 비하여 약 10km/h 내외의 속도차이를 가지고 본선으로 합류할 수 있도록 설계하고 있다.



<Fig. 1> Typical acceleration lane design (AASHTO, 2018)

<Table 4> Minimum acceleration lane length in AASHTO(2018)

Mainline design speed			Design speed on ramp							
			Stop Condition	20km/h	30km/h	40km/h	50km/h	60km/h	70km/h	80km/h
			Initial vehicle speed on ramp							
Acceleration lane length (m)	Design Speed	Merge Speed	0km/h	20km/h	28km/h	35km/h	42km/h	51km/h	63km/h	70km/h
	50km/h	37km/h	60m	50m	30m	-	-	-	-	-
	60km/h	45km/h	95m	80m	65m	45m	-	-	-	-
	70km/h	53km/h	150m	130m	110m	90m	65m	-	-	-
	80km/h	60km/h	200m	180m	165m	145m	115m	65m	-	-
	90km/h	67km/h	260m	245m	225m	205m	175m	125m	35m	-
	100km/h	74km/h	345m	325m	305m	285m	255m	205m	110m	40m
	110km/h	81km/h	430m	410m	390m	370m	340m	290m	200m	125m
	120km/h	88km/h	545m	530m	515m	490m	460m	410m	325m	245m
	130km/h	92km/h	610m	580m	550m	530m	520m	500m	375m	300m

2. 차량추종이론 및 차로변경행태

1) 차량추종이론

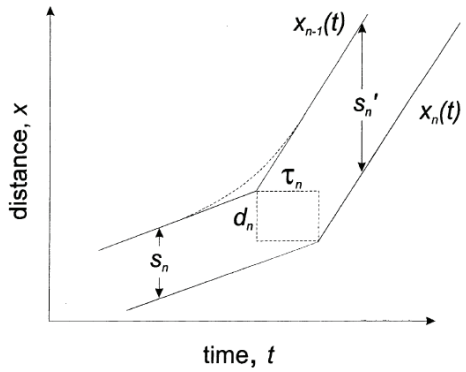
차량추종이론은 Pipes(1953)에 의하여 처음 정립된 이래로 GHR모델(Chandler et al., 1958), CA모델(Kemetani and Sasaki, 1959), 선형모델(Helly, 1959), AP모델(Michaels, 1963) 등 다양하게 연구되어 왔다.(Mark, 1999) 2000년대에 이르러서는 충격파이론을 접목한 모델들이 주로 사용되었는데,(Newell, 2002; Daganzo, 2006) <Fig. 2>, Eq (2)와 같이 차량의 속도와 간격간의 선형관계를 통해 차량추종이론을 설명하고 있다. Yeo et al.(2008)과 Yeo et al.(2009) 등은 Eq (2)가 stop-and-go 상태의 교통류 특성을 반영하지 못한다는 점을 지적하고 개선된 모델을 제시하기도 하였다. 그러나 본 연구의 범위는 정체상황에서 램프와 본선간의 역전 상황이 아니라, 도로연결 시설 진출에 관한 것으로 한정되어 있으므로, Eq (2)의 기본적인 차량추종이론 모델로 설명이 가능하다.

$$x_n(t+\tau_n) = x_{n-1}(t) - d_n \quad \cdots\cdots (2)$$

$x_n(t)$: position of n^{th} vehicle at time t

d_n : n^{th} vehicle's space displacement relative to the $(n-1)^{th}$ vehicle

τ_n : n^{th} vehicle's time displacement relative to the $(n-1)^{th}$ vehicle

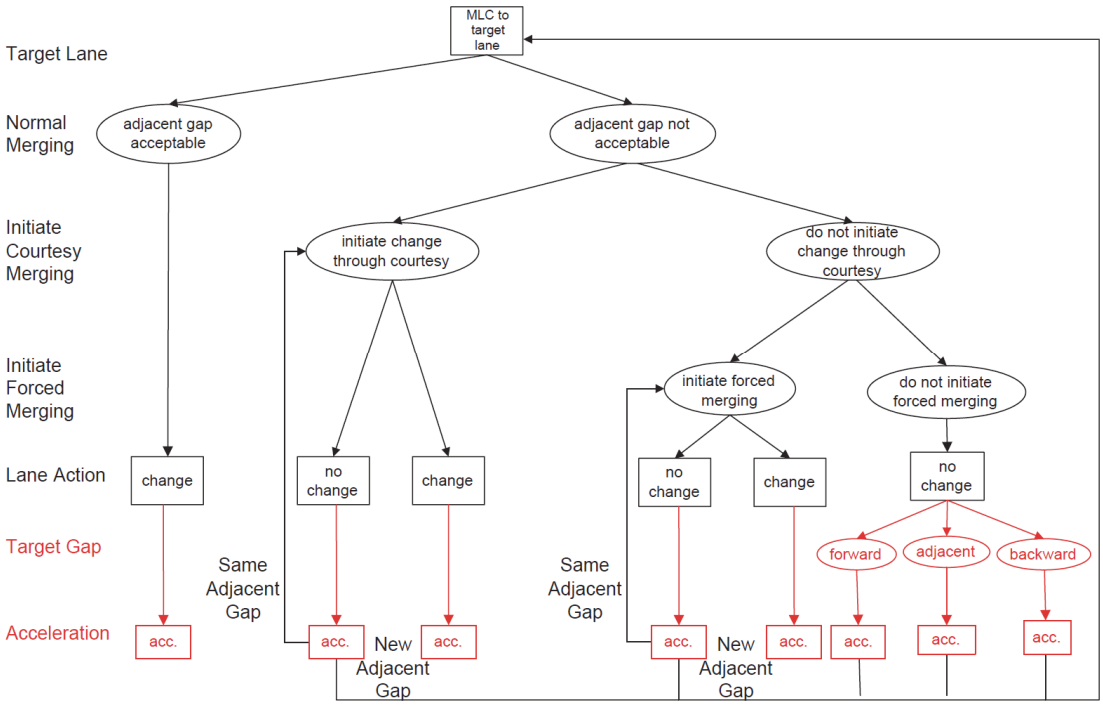


<Fig. 2> Linear approximation of vehicle trajectories (Newell, 2002)

2) 차로변경 행태

차로변경 행태는 크게 "Normal merging"과 "Courtesy merging", "Forced merging"으로 분류될 수 있다.(Choudhury et al., 2009; Mathew, 2014) 차로변경 의사결정 모델은 <Fig. 3>과 같이 분류될 수 있다. Normal merging은 인접차로의 차간간격이 충분할 때 인접차로 차량에 영향을 미치지 않고, 차로를 변경하는 형태이다. Courtesy merging과 Forced merging은 인접차로의 차간간격이 충분하지 않을 때 발생하는데, 합류차량이 차로변경 의사를 밝혔을 때 후방 차량이 속도를 줄이며 차간 간격을 확보해 줄 경우 courtesy merging이 가능하다. 후방차량이 합류차량에게 양보하지 않을 경우 합류차량은 forced merging을 통해 차로 변경을 시도하게 된다.

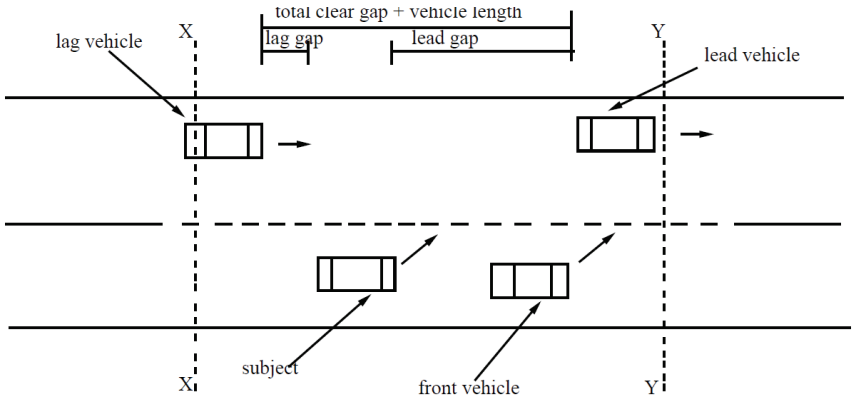
본선에 진입한 저속차량은 본선에 빈 공간(void)을 형성하여 일시적으로 합류부의 용량을 감소시킨다. (Laval and Daganzo, 2006; Leclercq et al., 2016) 반대로 본선차량은 변속차로에서 합류하는 저속차량과의 상충을 회피하기 위하여 합류부에 도달하기 이전에 상위차로로 차로를 변경한다.(MOLIT, 2013b; TRB, 2010) 차로를 변경하지 않을 경우 저속차량으로 인한 감속이 불가피하기 때문이다. 이러한 합류부 차로변경 특성으로 인하여 MOLIT(2013b)과 TRB(2010)에서는 합류부 영향권의 범위를 본선 하위 2개 차로로 정의하고 있다.



<Fig. 3> Framework of lane changing model with acceleration (Choudhury et al., 2009)

3) 차량추종이론 및 차로변경 형태 분석결과

선행 연구들의 차량추종이론과 차로변경 행태 모델을 분석해본 결과 합류차량이 고려하게 되는 요소는 <Fig. 4>와 같이 크게, 선행차량과의 간격, 변경차로의 선행차량, 후행차량의 위치이다. 가속차로 내의 선행차량은 합류차량이 충분히 가속하는 데에 방해요인이 될 수 있다. 그러나 이로 인해 본선에 유발되는 총 지체의 직접원인은 합류차량의 낮은 합류속도이다. 낮은 합류속도의 발생원인 중 하나로 가속차로 내 선행차량의 존재를 지목할 수 있으나, 선행차량의 유무는 낮은 합류속도를 유발하는 여러 간접적인 요인 중 하나에 불과하므로, 본 연구에서는 본선에 지체를 유발하는 직접적인 영향요소인 합류속도를 설명변수로 채택하였다.



<Fig. 4> Lane changing subject vehicle and the others relation (Mathew, 2014)

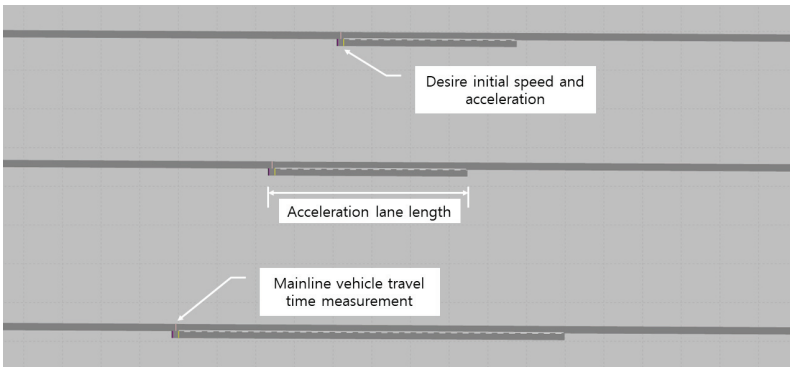
도로연결 시설 진출차량은 본선으로 합류하기 위해 가속하여 본선 선행차량을 앞질러 합류하는 방법, 본선 선행차량과 후행차량 사이를 courtesy merging 혹은 forced merging하는 방법, 본선 후행차량에게 양보하고 후방으로 합류하는 방법을 고려할 수 있다. 그러나 본선의 차량은 자유속도로 운행 중이고, 합류차량은 저속으로 도로연결 시설을 진출하여 가속하는 중으로서 아직 본선의 자유속도에 도달하지 못한 상황을 대상으로 하기 때문에 정상적인 조건에서는 본선 선행차량을 앞질러 합류하는 것이 불가능하다. 합류차량이 courtesy merging이 불가능하여 본선 후행차량에게 양보한 경우 후행차량은 합류차량에게 선행차량이 되고, 의사결정 과정이 반복되므로 본 연구에서는 합류차량이 본선 선행차량과 후행차량 사이로 진입하였을 때 후행차량에게 유발하는 총 지체를 산정하는 것을 목표로 하였다. 합류차량이 본선으로 진입할 때 본선 후행차량 수대에 지체를 유발하는데, 저속의 합류차량 1대가 유발하는 총 지체를 분석하여 합류차량들이 본선에 유발하는 총 지체 산정을 위한 단위기준 값으로 사용할 수 있다.

Ⅲ. 분석방법론

1. 시뮬레이션 설계

도로연결 시설은 대규모 진출입이 발생하여 병목구간을 형성하는 입체교차로 합·분류부와 달리 해당 시설을 이용하는 소수의 차량이 진출입하는 특성이 있다. 따라서 본 연구에서는 도로연결 시설에서 진출한 합류차량 1대의 합류속도와 본선 교통류율 조건에 따라 본선에 유발되는 총 지체를 분석하여 도로연결 시설 진출차량 수에 따른 유발 지체의 단위기준 값을 도출하고자 한다. 도로연결 시설 진출차량은 진입하는 본선 차로에서 뒤따르는 차량 수대에 연속적으로 영향을 미친다. 그러나 현장 데이터에서는 본선 후행 차량의 감속 등의 동작데이터를 전수로 구득하기 어려워 부득이 대표적인 미시 교통시뮬레이션 프로그램인 PTV VISSIM을 이용하여 시뮬레이션 분석을 수행하였다.

MOLIT(2013b)과 TRB(2010)에 따르면 합류부 영향권역은 하위 2개 차로이다. 그러나 본선의 차로수가 2개 이상일 경우 본선의 차량은 합류 차량의 발생을 예측하고, 상위차로로 미리 차로를 변경하여, 합류부 인근의 본선 최우측차로는 빈 공간이 형성된다. 본 연구의 목적은 도로연결 시설에서 본선으로 합류하는 차량이 본선 후행차량들에게 유발하는 총 지체를 고스란히 분석하는 것이므로, <Fig. 5>와 같이 본선 1개 차로로 시뮬레이션 네트워크를 설계하였다.



<Fig. 5> VISSIM simulation network

2. 분석 교통조건

도로연결 시설에서 진출하여 가속차로를 통해 본선으로 합류하는 차량이 본선에 미치는 영향은 크게 본선 주행속도, 합류속도, 본선 교통류율, 본선 합류시 후행차량(lag vehicle)과의 간격, 차종 구성 등에 따라 상이할 것이다. 또한 통상적으로 교통 시뮬레이션을 이용한 분석연구는 서로 다른 랜덤시드를 이용한 30회 이상의 반복실험을 통해 실험오차가 정규분포에 가까운 형태가 되도록 일반화 과정을 거친다. 그러나 본 시뮬레이션 분석은 랜덤시드를 사용하지 아니하고, 각각의 분석 교통조건에서 평균적인 결과값을 도출할 수 있도록 실험을 설계하였다.

실제 절대적인 본선의 주행속도와 합류차량의 속도보다는 본선 주행차량과 합류차량 간 상대속도가 중요하기 때문에 본 연구에서는 본선의 주행속도를 100km/h로 고정하고, 합류차량의 속도를 40km/h, 60km/h, 80km/h, 100km/h의 20km/h 간격으로 4분류하였다. 또한 평지, 구릉지, 산지 등의 일반지형과 특정 경사 구간, 복합 경사 구간에서 중차량 혼입율에 따른 영향은 TRB(2010) 또는 MOLIT(2013b)의 중차량 보정계수를 적용할 수 있음을 감안하여 모든 차종이 승용차 환산계수(PCU)로 환산된 경우에 해당하는 100% 승용차량 환경에서 분석하였다.

이상적인 조건에서 연속류 도로의 용량이 2,400veh/h/ln (TRB, 2010), 차량 간 시간간격(gap time)이 약 1.5초인 것을 감안하여, 본선 교통류의 차량 간 시간간격은 2초~10초까지 1초 간격으로 분석을 설계하였다. 또한 <Fig. 4>에서 제시한 바와 같이 합류차량의 진입시점의 본선 후행차량과의 간격도 총 지체 발생 규모에 중요한 고려요소이므로 동일한 합류속도와 본선 교통류율 조건에서 합류차량과 후행차량과의 시간 간격도 1초 단위로 세분화하여 그 평균값을 분석결과로 사용하였다. 예를 들어 본선 교통류의 차량 간 시간간격이 5초인 경우, 합류차량과 본선 후행차량의 시간간격은 1초~5초까지 세분화하여 그 평균값을 분석하였다. 자세한 분석조건은 <Table 5>와 같다.

<Table 5> Analysis traffic condition

Mainline / Merging speed	1,800veh/h (2sec)	1,200veh/h (3sec)	900veh/h (4sec)	720veh/h (5sec)	600veh/h (6sec)	514.3veh/h (7sec)	450veh/h (8sec)	400veh/h (9sec)	360veh/h (10sec)
40km/h	Average total delay of 0~1sec generation	Average total delay of 0~2sec generation	Average total delay of 0~3sec generation	Average total delay of 0~4sec generation	Average total delay of 0~5sec generation	Average total delay of 0~6sec generation	Average total delay of 0~7sec generation	Average total delay of 0~8sec generation	Average total delay of 0~9sec generation
60km/h									
80km/h									
100km/h									

Ⅳ. 시뮬레이션 결과 분석

1. 총 지체

시뮬레이션 분석결과 도로연결 시설에서 진출한 합류차량 1대가 본선으로 진입할 때 본선에서 주행하는 차량이 겪는 평균적인 총 지체는 <Fig. 6>, <Table 6>과 같다. 본선 합류차량의 합류속도가 높을수록, 본선 교통류율이 감소할수록 총 지체가 감소하였다. 특히 합류속도가 40km/h 이하인 경우 타 합류속도와 매우 큰 총 지체

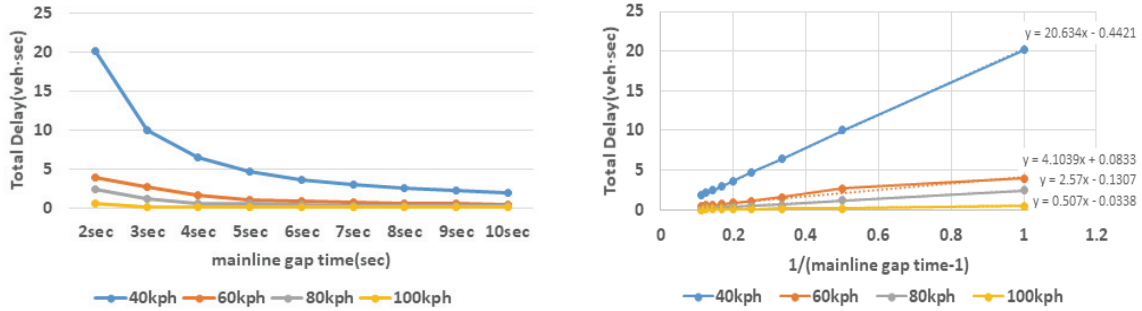
변화를 육안으로 확인할 수 있다. <Table 6>은 <Fig. 6>의 본선 차량 간 시간간격과 합류속도에 따른 총 지체 유발값을 제시하였으며, 특히 괄호 안에는 100km/h의 합류속도인 경우와의 총 지체 차이를 제시하였다.

<Fig. 6> (a)는 본선의 차량 간 시간간격과 총 지체간의 관계를 나타내는 산점도이다. 두 변수간에는 반비례 관계가 관측되었으며, <Fig. 6> (b)에서는 (차량 간 시간간격의 역수-1)값의 역수를 취하여 <Fig. 6> (a)에서 관측된 반비례 관계를 선형 정비례 관계식으로 나타내었다. <Fig. 6> (b)의 합류속도별 총 지체 그래프의 기울기를 통하여 합류속도에 따른 유발 총 지체의 규모를 상대비교할 수 있다. 합류속도가 40km/h인 경우 60km/h의 합류속도에 도달한 경우와 비교하여 약 5.0배 큰 총 지체를 나타냈으며, 합류속도가 60km/h인 경우는 80km/h의 합류속도에 도달한 경우와 비교하여, 약 1.6배, 합류속도가 80km/h인 경우는 100km/h의 합류속도에 도달한 경우와 비교하여 약 5.1배 큰 총 지체를 나타냈다.

2. 결과 분석

본선 통행속도와 동일하게 진입차량이 100km/h의 속도에 도달한 경우 진입차량과 본선차량의 통행특성이 동일하지만, 아직 용량수준에는 근접하지 않아 본선 교통류율과 무관하게 모두 1초·대 미만의 총 지체를 나타냈다. 운전자의 인지 반응시간을 약 1초로 가정하고, <Table 6>의 각 합류속도별 본선유발 총 지체를 분석한다면 합류차량이 80km/h이상의 속도로 가속하여 본선으로 합류할 때에는 본선 교통류율과 무관하게 본선에 유발하는 총 지체가 미미한 것으로 판단된다.

<Table 6>에서 합류속도 100km/h일 때 관측된 총 지체는 본선차량과 합류차량의 속도차이에서 발생하는 것보다 합류차량으로 인하여 본선 후행차량이 적절한 간격 조정을 수행하기 위하여 발생하는 기본적인 총 지체 값이다. 따라서 실제 합류속도 차이에 따라 발생하는 총 지체는 100km/h의 합류속도일 때 발생하는 총 지체와의 차이와 같으며, <Table 6>의 괄호 안에 제시되어 있다. 40km/h의 합류속도인 경우 발생하는 지체가 타 합류속도보다 극단적으로 큰 이유는, 본선의 임계속도와 관련이 있는 것으로 판단된다. 제한속도 100km/h의 연속류 도로는 약 80km/h 내외에서 임계속도가 형성된다.(Lee et al., 2020) 합류차량이 40km/h의 속도로 진입한 경우 극단적으로 낮은 속도로 인하여 본선 진입 후 100km/h까지 가속하더라도 상당 시간동안 본선 후행 차량군이 임계속도 이하의 속도로 운행이 불가피하다. 이에 반하여 60km/h 이상의 속도로 본선에 합류한 경우, 1대의 저속차량이 본선으로 합류하더라도 짧은 시간 가속을 통해 전체 교통류 군이 평균적으로 임계속도 이상의 속도 회복이 가능한 점에서 총 지체 그래프에 큰 간격이 발생하는 것으로 분석된다.



(a) Inverse relationship between total delay and mainline gap time

(b) Linear relationship between total delay and mainline gap time unit

<Fig. 6> Average total delay occurrence depending on merging speed and traffic demand

<Table 6> Average total delay occurrence depending on merging speed and traffic demand

Total delay unit : veh·sec

( ) : total delay difference compare to 100km/h merging speed

	40km/h	60km/h	80km/h	100km/h
1,800veh/h(2sec)	20.15 (19.65)	3.95 (3.45)	2.45 (1.95)	0.50
1,200veh/h(3sec)	10.00 (9.83)	2.67 (2.50)	1.20 (1.03)	0.17
900veh/h(4sec)	6.43 (6.30)	1.55 (1.43)	0.62 (0.50)	0.13
720veh/h(5sec)	4.72 (4.64)	1.08 (1.00)	0.48 (0.40)	0.08
600veh/h(6sec)	3.63 (3.57)	0.83 (0.77)	0.37 (0.30)	0.07
514.3veh/h(7sec)	2.91 (2.86)	0.70 (0.64)	0.30 (0.24)	0.06
450veh/h(8sec)	2.48 (2.43)	0.59 (0.54)	0.25 (0.20)	0.05
400veh/h(9sec)	2.16 (2.11)	0.52 (0.48)	0.22 (0.18)	0.04
360veh/h(10sec)	1.92 (1.88)	0.47 (0.43)	0.20 (0.16)	0.04

Ⅴ. 결 론

도로연결규칙은 이동성 보장이 중요한 상급 도로에 다른 시설이나 도로를 연결할 때 주의를 기울이도록 하는 것을 목적으로 하고 있다. 도로연결규칙에서 제한하는 변속차로의 최소길이 규정 등은 도로연결 시설에 진출입하는 차량과 본선 주행 차량 간 속도편차를 최소화하여 정체 유발과 안전상의 문제를 최소화하기 위한 규정이다. 최근 도로연결규칙이 제정된 이후 약 20년의 시간동안 자동차의 주행성능이 크게 진화한 것을 이유로 변속차로 최소길이의 요건 완화에 대한 요구가 있다.

분석방법론에서 설명한 바와 같이 도로연결 시설에서 진출하는 차량은 일반적인 입체교차로 합류부와 달리 진출입 차량 수의 교통수요 자체가 도로 용량 초과를 유발하기 보다는 합류차량이 본선 교통류와 이질적인 교통 흐름을 야기하여 사고를 유발하거나 부분적인 지체를 유발하는 것이 문제이다.

도로연결허가 단계에서 장래 본선의 교통수요를 고려하기 쉽지 않다. 따라서 업무담당자는 도로연결허가 시설의 규모에 따른 진출입 교통량과 도로연결허가 금지구간 해당여부, 적정 변속차로 확보가능 여부, 인근 다른 교통안전 위협요소 등을 기반으로 도로연결허가 여부를 결정할 수밖에 없다. 이를 위하여 본 연구의 결과는 가속차로를 설계할 때 목표 합류속도를 얼마로 설정하는 것이 합당한지에 대한 데이터를 제시하였다.

합류속도가 40km/h부터 100km/h까지 20km/h간격으로 증가함에 따라 각각 약 5.0배, 1.6배, 5.1배 증가하며, 본선 교통류율과 총 지체는 선형관계를 가지는 것을 확인하였다. 물론 가속차로 내 차량이 본선과 동일한 속도까지 가속한 뒤 합류하는 것이 가장 이상적이지만, 본 연구 결과에 따르면 점용지에서 진출하여 본선에 합류하는 차량이 본선과 약 20km/h 이내의 속도편차를 가지고 합류한다면 본선에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

현재에도 고속국도나 읍·면지역의 일반국도는 도로연결규칙에 따라 변속차로 최소길이를 정하고, 그 밖의 도로연결허가 대상 도로는 지방자치단체가 각 지역의 특성을 반영하여 조례로 그 기준을 정하도록 하고 있으나, 대부분의 지방자치단체가 관련된 조례를 제정하지 않았거나, 도로연결규칙을 그대로 인용하고 있다. 만약 이 연구를 토대로 향후 변속차로 최소길이에 대한 요건을 수정하거나, 지방자치단체들이 지역의 여건에 맞는 변속차로 최소길이 요건을 설정한다면, 각 지역도로의 평균적인 통행속도와 교통량을 감안하여 변속차로 최소길이를 설정해야할 것이다. 가령 시가지 지역의 경우, 본선의 통행속도가 낮으므로 현재 도로연결규칙보다 짧은 변속차로 최소길이를 기준으로 정할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20SCIP-C146569-03).

REFERENCES

AASHTO(2018), *A policy on geometric design of highways and streets 7th edition*, pp.10-132.

Brackstone M. and McDonald M.(1999), "Car-following: a historical review," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 2, pp.181-196.

Chandler R. E., Herman R. and Montroll E. W.(1958), "Traffic dynamics: studies in car following," *Operations Research*, vol. 6, pp.165-184.

Choudhury C. F., Varun R. and Moshe E. B.(2009), "Modeling acceleration decisions for freeway merges," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2124, pp.45-57.

Daganzo C. F.(2006), "In Traffic Flow, Cellular Automata = Kinematic Waves," *Transportation Research Part* B, vol. 40, pp.396-403.

Helly W.(1959), "Simulation of Bottlenecks in Single Lane Traffic Flow," In *Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow*, pp.207-238.

Kometani E. and Sasaki T.(1959), "Dynamic behaviour of traffic with a nonlinear spacing-speed relationship," In *Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow*, pp.105-119.

Laval J. A. and Daganzo C. F.(2006), "Lane-changing in traffic streams," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 40, pp.251-264.

Leclercq L., Knoop V. L., Marczak F. and Hoogendoorn S. P.(2016), "Capacity drops at merges: New analytical investigations," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 62, pp.171-181.

Lee J., Shin C., Kim Y. J. and Kang S.(2019), "Automatic Detection of the Access-restricted Sections based on Geographic Characteristics of At-grade Intersections in High Definition Maps," *The Korea Spatial Planning Review*, vol. 103, pp.27-39.

Lee J., Son B. and Kim T.(2020), "Empirical Observation of Maximum Throughput Change in Isolated Merging Bottleneck depending on On-ramp Traffic Flow Ratio," *Proceeding of 99th TRB Annual meeting*, Washington D.C., USA.

Mathew T. V.(2014), *Transportation Systems Engineering*, IIT(Bombay, India), pp.15.1-15.2.

Michaels R. M.(1963), "Perceptual factors in car following," In *Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow*, pp.44-59.

MOLIT(2013), *Explanation of Korean rules about the road structure and facilities standard*, pp.515-518.

MOLIT(2013b), *Korea Highway Capacity Manual*, pp.78-92.

Newll G. F.(2002), "A simplified car-following theory: a lower order model," *Transportation Research Part B*, vol. 36, pp.195-205.

Pipes L. A.(1953), "An operational analysis of traffic dynamics," *Journal of Applied Physics*, vol. 24,

pp.274-281.

TRB(2010), *Highway Capacity Manual*, pp.11-55.

Yeo H. S. and Skabardonis A.(2009), "Understanding Stop-and-go Traffic in View of Asymmetric Traffic Theory," *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*, Springer, pp.99-115.

Yeo H. S., Skabardonis A., Halkias J., Colyar J. and Alexiadis V.(2008), "Oversaturated Freeway Flow Algorithm for Use in Next Generation Simulation," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2088, pp.68-79.