고속도로 합류부 설계 개선방안

Some Considerations of Expressway Merging Design

심대영* · 정준화** · 이승준***
Shim, Dae Young · Jeong, Jun Hwa · Lee, Seung Jun

1. 서 론

고속도로에서의 진출입 차량은 연결로를 통해서만 이용이 가능하도록 출입제한이 이루어지고 있으며, 차량이 고속도로로 진입하는 합류부는 차량의 원활하고 안전한 합류가 이루어지도록 설계되어져야 한다. 기존의 고속도로 합류부에 대한 도로 교통 용량분석은 수학적(확률적) 기반의 간격수락 모형과 현장조사 자료를 이용한 회귀분석 모형들이 제시되어 왔으며, 가속차로의 설계와 관련한 설계지침들도 다수 제시되고 있다[1)~17)].

이러한 가속차로의 설치에 대해 적용되는 현재의 「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙」[5)]의 합류부 설계기준은 교통 소통의 측면에서 합류 행태를 반영하지 못하는 미비점이 있어 개선이 필요한 바, 본 연구에서는 현재의 가속차로 설계기준에 대한 보완을 위하여 수행되었다. 즉, 현행 기준에서 가속차로의 길이 규정은 차량의 합류 행태에 의한 해석보다는 연결로와 고속도로 본선의 설계속도 차이를 해소하기 위한 방법으로서만 가속차로 설계기준이 제시되고 있어 이러한 차량의 합류과정에서 야기되는 용량의 차이를 반영하지 못하고 있다. 또한, 현재 국내의 가속차로 설계 기준에 사용한 변수들에 대한 검토가 부족하여 설계규정에 제시된 산정결과에도 일관성이 부족한 점이 발견되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 현행의 고속도로 합류부의 가속차로 설계 기준에 제시된 방법론에 대한 보완 사항을 제시하고자 한다. 이를 위하여 일부 사례지점에서의 고속도로 통행특성을 검토하고, 현행 설계기준에 대한 보완 사항을 제시하였으며, 차량의 합류 간격수락 행태를 반영한 가속차로 설계방안을 제안하였다.

2. 기존 문헌 검토

2.1 가속차로 설계기준

국내의 고속도로 합류부의 가속차로 설계는 「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙」에 의거하여 실시되고 있으며 이 규칙은 상대적으로 고속의 차량 주행이 일어나는 고속도로 본선과 저속인 연결로의 설계속도의 차이를 상호 연계하도록 가속차로를 설계하는 원칙에 근거하여 설명하고 있다. 즉, 연결로에서 빠져나와 가속차로에 진입한 속도를 V_1으로 하고 일정한(등가속도 운동) 가속도 a 로써 가속차로를 주행하고 본선에 진입하는 시점의 속도가 V_2가 될 때 가속차로의 길이(L)는 이 두 속도 V_1과 V_2의 차이에 따라 다음의 식과 같이 산정하고 있다.

$$\text{가속차로 길이 } L = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2a}$$

여기서, V_1= 연결로에서 가속차로로 접근하는 속도
V_2 = 가속차로에서 본선으로 진입하는 속도
a = 가속차로에서의 가속도

* 비회원 · 관동대학교 교통공학전공 교수 · 공학박사 · 033-670-3452 · (E-mail:sdyng@kwandong.ac.kr)
** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 수석연구원 · 공학박사 · 교통기술사 · 031-910-0171(E-mail:jhjeong@kict.re.kr)
*** 비회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 · 공학박사 · 031-371-3427 · (E-mail:samuellee@freeway.co.kr)

이러한 설계 방법은 일본의 도로구조령(일본 도로구조령의 해설과 운용, 사단법인 일본도로협회, 2004년 2월)에 상당한 근거를 두고 있으며, 미국의 AASHTO 설계기준[17]도 이러한 방법을 적용 하고 있다. 한편, JHK[15]에서는 차량의 간격분포를 이용한 원활한 합류과정을 보장하도록 하는 가속차로의 설계 방식을 제안하고 있는데 이는 AASHTO 가속차로 설계에서 간격수락 거리(gap acceptance length)가 반영되고 있다고 판단된다. 미국의 AASHTO 설계기준은 연결로와 본선의 속도차이를 보완하는 국내의 가속차로 설계 방법과 차량의 간격수락행태를 반영한 합류과정에 의한 설계를 상호 절충하고 있다.

2.2 합류부 간격수락 분석에 의한 설계기준

연결로에서의 차량의 합류 행태에 대해 설명하고자 하는 시도가 자주 일어왔는데 국내에서도 최근에 한국도로공사[12]에서 간격수락모형을 검토하고 이를 가속차로 설계 기준에 도입하고자 하였다. 표 1은 한국도로공사의 보고서에 제시된 가속차로 길이 설계기준의 예이다. 이 표에 제시된 가속차로의 길이는 연결로와 본선의 속도 차이를 고려한 가속거리, 그리고 간격수락 과정에 따라 원활한 합류의 진행을 위해 필요한 합류대기 주행거리, 그리고 차로변경에 필요한 변이거리에 의하여 산정하고 있음을 볼 수 있다. 이 안에는 가속차로길이의 1/10~1/5L을 합류금지구간으로 하여 차선규제봉 등의 시설물 설치를 권고하고 있다.(교통안 08210-123호('04.11.10))

표 1. 한국도로공사의 서비스수준별 가속차로 길이 설계기준 제안예 (본선 설계속도 100km/h)

본선 설계속도 = 100km/h	LOS C (지방부)			LOS D (도시부)		
	연결로 설계속도			연결로 설계속도		
	40km/h	50km/h	60km/h	40km/h	50km/h	60km/h
가속거리 (m)	229	252	254	229	252	254
합류 대기주행거리 (m)	132	132	132	164	164	164
변이구간 (m)	70	70	70	70	70	70
가속차로길이 (m)	431	454	456	463	486	488
가속차로길이 설계기준 값 (m)	**430**	**450**	**460**	**460**	**480**	**490**

이외에도 다양한 논문과 문헌에서 제시된 내용들은 간격수락 모형들이 연결로 합류부에 대한 기본적인 분석과정으로 채택되고 있어 고속도로 합류부의 설계 과정에도 이를 반영하는 것이 필요함을 시사해 주고 있다.

2.3 기존 연구의 시사점

한국도로공사 등 도로 운영 주체는 합류부의 가속차로 길이가 고속도로의 운영 측면의 효율성에 영향을 주는 것으로 파악하고 있다. 앞에서 언급한 한국도로공사의 보고서에 의하면 구체적으로 수원IC와 신갈JC의 운영사례를 통하여 가속차로의 길이가 상대적으로 짧은 경우에서도 지나치게 긴 가속차로를 제공하는 것보다 오히려 더 많은 차량을 소통하게 하는 것이 가능하다는 관측 결과를 제시하고 있으며, 신치현 등[10]은 고속도로의 효율적인 운영을 위하여 가속차로의 길이를 오히려 짧게 제한하는 방안을 제안하고 있다.

가속차로의 길이가 운영 측면에서 고속도로 합류부의 소통에 영향을 미치고 있음이 다수의 논문에서 언급되고 있음에도, 기존의 도로설계기준과 도로용량편람[6]과 같은 도로용량 분석 과정에서는 아직 이러한 간격수락 모형을 분석과 설계에 충분히 반영하지 못하고 있다. 즉, 고속도로 합류부의 용량은 시설의 설계요소만을 반영하여 분석하여 설계하는 수준에 머무르고 있고, 연결로에서의 합류 차량의 행태와 같은 합류부의 교통 측성 및 운영 요소에 의한 소통 능력의 분석에 이르기까지 입증하기에는 아직 기존의 연구 성과에 한계가 있다는 입장을 가지고 있다고 판단된다. 그러나, 실제 고속도로의 운영사례나 기존의 각종 논문, 문헌에서 보듯이 간격수락 모형에 기초한 합류 과정은 고속도로 합류부의 기본 거동으로 설명되고 있다는 점에서 본

연구에서는 합류부의 설계 과정에서도 이러한 면을 반영하여 운영측면의 효율성을 감안한 합류부 설계방안을 도출하는 것이 필요하다는 입장에서 연구를 진행하였다.

3. 합류부 설계 개선 방안

3.1 연결로와 본선의 속도 차이를 고려한 가속거리 산정

현재 사용하고 있는「도로의 구조·시설기준에 관한 규칙」에 의한 가속차로 길이는 앞에서 언급한 본선과 연결로의 속도 차이를 해소하는 방식으로 결정되고 있으며 그 결과는 표 2에 표시되어 있다. 이 표에서 괄호 속의 값은 규정 값이며, 그 외 일반 숫자는 계산에 의한 값이다. 이 표에서 가속차로 규정 값은 일관성이 있으나, 계산 값은 일관성이 없이 제시되고 있다. 예를 들면, 본선 설계속도 120kph의 경우에 연결로 속도가 감소하면 속도 차이가 커져 소요 가속차로 길이는 증가하여야 함에도 불구하고 계산 값은 증가하다가 감소하게 되는 결과를 보이고 있다.

표 2. 도로의 구조시설기준에 관한 규칙에 따른 가속차로 소요길이 계산 값 (단위 m)

본선 설계속도			120	110	100	90	80	70	60
			본선 가속차로 종점부 도달 속도(kph)						
			88	81	75	67	60	53	45
연결로 설계 속도	80	초기 속도 70	392 (245)	229 (120)	100 (55)	-	-	-	-
	70	63	428 (335)	294 (210)	188 (145)	59 (50)	-	-	-
	60	51	431 (400)	332 (285)	254 (220)	158 (130)	84 (55)	-	-
	50	42	**391** (445)	**313** (330)	**252** (265)	178 (175)	120 (100)	68 (50)	-
	40	35	**340** (470)	**278** (360)	**229** (300	**170** (210)	124 (135)	82 (85)	42 -
	30	28	**283** (500)	**235** (390)	**197** (330)	**150** (240)	**114** (165)	**82** (110)	50 (70)

이러한 차이는 가속차로 길이 산정식에 적용하는 가속도(a) 때문인 것으로 판단된다. 즉, 일반적으로 고속의 경우 속도를 더 높이기 위해서는 더 큰 에너지가 필요하므로 고속에서 적용하는 가속도는 저속도에 비해 낮은 것이 일반적이다. 그러나, 기존의 규정은 연결로 진입부의 초기속도에 대한 가속도만을 적용한 등가속도 운동을 가정하여 계산 값을 구하였기 때문에 더 큰 속도차이에도 이를 극복하기 위한 가속차로 길이가 더 짧아도 된다고 하는 계산 결과가 나타난 것이다.

한편, 표 2에 제시된 시점부 초기 속도 및 종점부 도달 속도는 가속차로 설계기준차량인 트럭에 대해 합리적으로 결정한 것으로 판단되지만 기준 속도의 의미가 명확한 것은 아니다. 본 연구에서는 제한된 지점이지만 현장에서의 연결로 진입부와 본선 접속부에서의 트럭 속도조사를 통하여 평균 속도를 반영하고자 하였다. 속도 조사 결과로부터 미루어 볼 때 일반적으로 연결로를 주행하고 가속차로에 접근하는 차량의 초기속도는 연결로 자체의 속도(제한속도로 표기)에 비하여 대체로 높다. 본선 진입 도달 시의 평균 속도는 본선의 속도에 비해서 낮다.

일반적인 차량의 가속능력은 저속에서는 가속도가 높지만 높은 속도에서는 가속도가 저속에 비해 낮게 나타나는 변가속도 운동이 이루어진다. 이러한 거동을 등가속도 운동으로 해석하게 됨으로서 표 2와 같은 불일치가 나타나게 된 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 변가속도 운동을 반영하여 가속차로 길이를 산정하도록 제안하고자 한다. 본 연구에서 계산한 변가속도 운동에 따른 (최소) 필요 가속차로 길이는 표 3과 같다. 다만, 본선 가속차로 종점부의 속도는 추가조사를 통해 보완한다면 다소 변동적일 것이다

표 3. 변가속도 운동으로 계산한 가속차로 최소 길이 (단위 m, 괄호는 기존 국내 기준)

본선설계속도			120	110	100	90	80	70	60
			본선 가속차로 종점부 도달 속도(kph) (트럭 기준)						
			80	75	70	65	60	50	40
연결로 설계 속도	80	초기속도 70	234 (245)	129 (120)	- (55)	-	-	-	-
	70	65	303 (335)	200 (210)	71 (145)	- (50)	-	-	-
	60	60	389 (400)	285 (285)	156 (220)	85 (130)	- (55)	-	-
	50	50	482 (445)	377 (330)	250 (265)	179 (175)	95 (100)	- (50)	-
	40	40	549 (470)	440 (360)	316 (300)	245 (210)	160 (135)	66 (85)	- (-)
	30	30	588 (500)	483 (390)	355 (330)	284 (240)	199 (165)	105 (110)	40 (70)

3.2 간격수락모형을 통한 가속차로 길이 산정

국내 현재의 고속도로 합류부 가속차로 길이는 고속도로 본선과 연결로의 속도차이 만을 고려하고 있는데, 다수의 논문과 저서에서 고속도로 합류부에서는 간격수락 행태에 의한 합류 과정을 설명하고 있고 일부 도로설계 기준에서도 이를 반영하고 있다. 그러나 미국의 AASHTO 설계기준은 간격수락 거리(Lg, gap acceptance length)로 이를 다루고 있지만 그 결정과정에 대한 상세한 자료는 제공되지 않고 있다. 다만 JHK의 Speed Change Lanes라는 NCHRP 3-35보고서를 통해서 간격수락 모형에 의한 가속차로 설계 방식을 설명하고 있으나 그 결과는 현재 AASHTO 설계 기준에서는 상당히 축소 반영되어 있다. 한국에서는 과거 다수의 연구자들이 간격수락모형을 통한 가속차로 길이 산정에 대한 연구를 수행하여 왔고 비교적 근래에도 한국도로공사에서 간격수락 모형을 통해 가속차로 길이를 산정하는 방법을 제안 하였는바, 본 연구는 이러한 사항을 종합하여 설명하여 추가적인 사항을 검토하였다.

현재의 간격수락 모형을 통해 가속차로 길이를 산정하는 과정은 우선 차량의 도착간격 분포 형태, 임계간격(critical gap), 임계간격의 수락을 통한 진입가능 교통량 산정, 최대 진입 가능교통량을 처리하기 위한 가속차로 길이의 결정 등으로 이루어지게 된다. 이러한 내용은 한국도로공사의 보고서에 비교적 체계적으로 제안되고 있으나 임계간격 등 관련 파라메타, 도착간격 분포, 가속차로 길이 결정 방법, 결정된 가속차로 길이의 효율성 등에서 검증과정이 진행되고 있는 상황이다.

본 연구에서는 한국도로공사의 가속차로 길이 산정과정에 JHK의 NCHRP 3-35 보고서에 의한 가속차로 길이 산정 과정을 추가하여 검토하였다. 이 보고서에 의한 합류부 가속길이는 그림 1과 같이 구성되며 이중 GSA(gap searching area)가 간격 수락 과정에 의한 가속차로 부분에 해당한다. 검토 결과 JHK의 방식은 도착간격 분포로 음지수분포를 적용하고 β(본선과 가속차로 상대속도차의 비$(1-v_f/v_r)$를 적용하여 간격수락 과정으로부터 유도한 것이다. 이 방식은 위의 한국도로공사의 가속차로 길이 산정과정과 동일한 의미를 지니고 있다.

$$GSA = L_{EN} = d_{hr} + L_{VC}$$

$$d_{hr} = f_{hr}\, d_h$$

$$d_h = \frac{v_r}{\lambda\beta^2}(e^{\lambda\beta T} - \lambda\beta T - 1)$$

여기서, v_r = 가속차로 진입시의 속도

β = 본선과 가속차로 상대속도차의 비 $(1-v_f/v_r)$

λ = 차량의 도착율

T = critical gap

L_{vc} = gap을 찾아 합류후 본선에 원활하게 진입하기 위한 거리

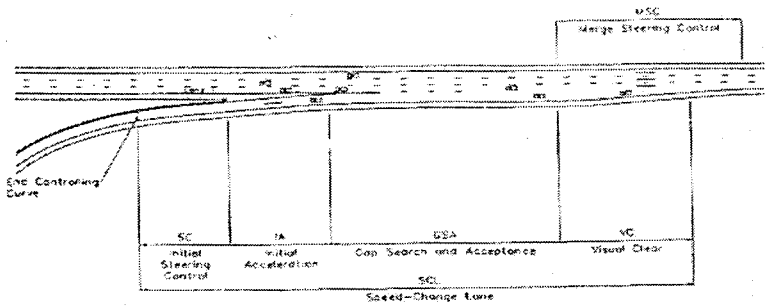
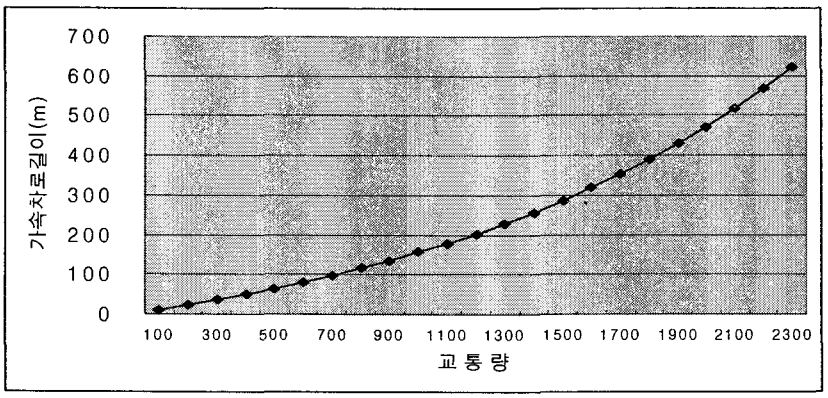


그림 1. NCHRP 3-35의 가속차로 설계 구간

본 연구에서는 국내에서 사용된 임계간격(T, critical gap)을 사용하고 파라메타 β는 일부 제외하여 적용하여 본선 설계속도 100kph일 때의 가속 차로 길이를 그림 2와 같이 도출하였다.



본선 우측차로 교통량 또는 기준 최대 통과 교통량 (pcphpl)	소요 가속차로 길이(m)
500	65
1000	157
1500	286
2000	472
2200 (LOS E수준)	568

주) 임계간격 Tc = 3.5초, v_r= 70kph

그림 2. 간격수락 모형 분석 과정을 통한 가속차로 길이 제안값

위의 가속차로 길이 산정 결과에 있어서 임계간격 등 사용된 파라메타 들은 기존의 문헌들을 위주로 인용하고 본 연구에서 현장조사를 통해 보완하였는데, NCHRP 3-35의 관련 파라메타 β를 일부 수정 적용하여 위의 모형식으로부터 계산된 결과 값이며 관련 현장조사 보완을 통해 관련 파라메타들의 보완이 이루어진다면 다른 경우에 대해서도 쉽게 적용할 수 있다고 본다. 다만 한국도로공사 등의 연구 결과와 같이 Pearson Type-Ⅲ와 같은 보다 일반적인 차두시간 분포를 적용한다면 위의 수식이 변화하므로 상당한 결과의 차이가 예상된다. 그러나 간격수락 과정을 이용한 가속차로 길이 결정을 위한 기본적인 유도 과정은 적용 가능하다고 판단된다.

4. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 기존 고속도로 합류부 설계방법의 문제점을 지적하고 합류부 교통특성을 기반으로 그 개선사항을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 변가속도를 적용한 가속차로 길이산정, 간격수락모형을 통한 가속차로 길이 산정 등은 향후 보다 충실한 현장조사를 통한 적용 매개변수의 조정 등을 통해 현장에서의 적용성을 평가 해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 제안된 간격수락 모형을 통한 합류부 가속차로 설계는 본선과 연결로의 설계속도 차이만을 반영하는 기존의 방식에 비해 합류 가능 교통량을 최대화 하는 방법으로 운영측면에서 더욱 효율적인 것으로 판단된다. 그러나 설계기준의 변경과 실제 현장에서의 적용을 통한 이에 대한 검증은 추후 다양한 검증과정의 실시가 진행되는 것이 필요할 것으로 판단되어 향후 과제로 남긴다.

감사의 글

이 연구는 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 신치현, 고속도로 연결로 접속부에서의 속도 추정모형, 대한교통학회지, 1995.
2. 한국도로공사 도로연구소, 고속도로 유출입교통행태 분석 및 가감속차로 설계운영 기준연구, 도로연 96-46-3, 1996.
3. 김상구, 김유진, 진경수, 합류부 합류교통량 평가, 대한교통학회지, 1997.
4. 김상구, 박창호, 고속도로 합류부의 교통와해 원인 분석, 대한교통학회지, 1998.
5. 건설교통부, 도로의 구조 시설 기준에 관한 규칙 해설및 지침, 2000.3.
6. 건설교통부, 도로용량편람, 2001.
7. 최재성, 이승준, 고속도로 합류부 임계차두간격 및 용량산정에 관한 연구, 대한교통학회지, 제19권 6호, 2001. 12.
8. 김진태 등, 모의실험 전산모형을 위한 도심고속도로 합류부 간격수락행태모형 개발, 대한교통학회지, 제20권6호, 2002. 12.
9. 김상구, 대기합류확률을 고려한 가속차로 길이 산정에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 2003.7.
10. 신치현, 김규옥, 혼잡저감을 위한 고속도로 접속부 가속차로의 동적연구, 대한교통학회 제48회 학술발표회, 2005. 6.
11. 이승준, 박재범, 강정규, 가속차로 길이에 따른 합류행태 및 합류부 교통특성 분석, 대한교통학회지, 제23권 8호, 2005. 12.
12. 한국도로공사, 고속도로 분·합류부 설계기준 수립에관한 연구, 도로교통 TR-05-04, 2005.
13. 관동대학교, 고속도로 본선접속부 감가속차로 설계 및 운용개선방안 위탁연구보고서, 2006. 5.
14. Drew D., Traffic Flow Theory and Control, 1968.
15. JHK & Ass., Speed Change Lanes, NCHRP 3-35, 1989.
16. TRB, Highway Capacity Manual, 2000.
17. AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (4th Ed.), 2001.