



충격파를 고려한 입체교차로의 감속차로 길이 산정방안

Determination of Deceleration Lane Length in Interchange with Shock-Wave Theory

김 정 현*

Kim, Jeong Hyun

Abstract

Current highway design standards is based on the safety under the free flow condition. The length of deceleration lane is also determined in terms of the deceleration distance which is necessary for the drivers to adjust the vehicle speed from the speed limit on the main road to that on the exit ramp of the interchange. However, the queues are frequently developed on the deceleration, and the following vehicles to exit must decelerate on the main road. It may cause delay on the main road and traffic accidents. This study is to suggest a methodology to minimize such problems with the shock-wave theory. The queue length of exiting vehicles can be estimated by the design speeds, traffic volumes of main road and the exiting ramp, and the countermeasures to the operational problems. According to the results, the queue length can be shortened to 80% by upgrading the design speed of exit ramp as the amount of 10km/h. Fifty percent of queue length can be shortened by adding an additional lane on the ramp to two lanes.

Keywords : freeway ramp, shock-wave, deceleration lane, queue

요 지

현행 고속도로 연결로 중 감속차로의 길이는 자유교통류 상태에서 유출차량이 본선과 유출부 사이의 속도의 차이에 적응할 수 있는 제동거리로써 결정된다. 그러나 실제 도로의 운영상태에서는 항상 자유교통류 상태를 유지할 수 없으며 때로는 유출부에서 대기행렬이 형성되게 된다. 대기행렬은 그 이후 접근하는 유출차량이 감속차로 이전에서부터 감속을 해야 하는 상황을 발생시켜 본선 교통류에 영향을 주게 될 뿐만 아니라, 일부 입체교차로에서는 감속차로의 길이보다 더 길게 대기행렬이 형성됨으로 인하여 본선 최하위 차로까지 점유하게 되어 소통 및 안전에 큰 지장을 초래하고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 대안을 개발할 수 있는 방법론을 개발하기 위하여 충격파 이론을 적용하여 본선 및 유출부의 교통량, 설계속도 등에 따른 유출부 감속차로에서의 대기행렬 길이를 산정하여 현행 감속차로의 길이와 비교하였다. 그리고 대기행렬이 본선 교통류에 대한 영향을 최소화할 수 있도록 감속차로의 수에 따른 대기행렬길이의 변화도 분석하였다. 결과에 의하면 유출램프의 설계속도를 10km/h 상향시킴으로써 대기행렬의 길이는 10% 감소되며, 램프의 차로수를 1개에서 2개로 증가시키게 되면 50%의 대기행렬 감소를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 고속도로 연결로, 충격파, 감속차로, 대기행렬

* 정회원 · 한국철도기술연구원 책임연구원



1. 서론

우리나라 고속도로(연속류 도로)에서 입체교차로 부근은 주요 정체지점이 되고 있으며, 이 원인 중 하나는 유출연결 램프로 나가고자 하는 차량들이 대기 행렬을 형성하면서 감속차로 뿐만 아니라 감속차로 이전의 최하위 차로까지도 점유함으로써 발생하는 경우가 빈번하다. 이는 현행 우리나라의 도로설계기준(도로의 구조·시설기준에 관한 규칙)에서 입체교차로의 감속차로 길이는 자유속도로 주행하는 본선과 램프부 사이의 속도차이에 따른 감속거리를 기준으로 하여 결정되기 때문이다. 그러나 실제적으로 유출부의 교통량 과다나 하부도로 상의 정체 등으로 인하여 대기행렬이 형성될 경우 이와 같은 문제가 발생하는 것이다.

이러한 문제는 본선교통류에는 병목현상을 발생시켜 지정체의 원인이 될 뿐만 아니라, 유출하려는 차량이 본선 상에서 감속을 하게 됨으로 인하여 동일차로의 직진차량과 상충을 발생시키는 안전상의 문제도 야기할 수 있을 것이다.

이에 본 연구에서는 자유교통류 상태에서 감속거리를 기준으로 하고 있는 현행 감속차로의 길이 산정방법의 한계를 극복하고자 실제로 운영요소까지 고려한 안전한 감속차로의 길이를 산정할 수 있는 방법론을 제안하고자 한다. 즉 유출부에서 발생하는 대기행렬을 길이까지 고려하여 이후에 접근하는 유출차량들이 충분히 대기할 수 있는 감속차로 공간을 제공할 수 있도록 하는 것을 목표로 하였다.

2. 현행 감속차로 설계기준

2.1 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙

도로의 구조·시설기준에 관한 규칙에 제시된 연결로의 설계속도를 고려하여, 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 제34조에서는 입체교차 감속차로의 길이

표 1과 변이구간의 길이 표 2로 제시하고 있고, 연결로가 2차로인 경우 감속차로의 길이는 표에 제시된 값에 1.2배 이상으로 한다고 규정되어있다.

감속차로와 변이구간의 길이는 표 1과 표 2의 수치의 합과 같다.

그리고 이 길이는 종단경사에 따라 표 3과 같이 보정을 하게 된다.

표 1. 변이구간을 제외한 감속차로의 최소길이

본선설계속도(km/h)		120	110	100	90	80	70	60
연결로 설계 속도	80	120	105	85	60	-	-	-
	70	140	120	100	75	55	-	-
	60	155	140	120	100	80	55	-
	50	170	150	135	110	90	70	55
	40	175	160	145	120	100	85	65
30	185	170	155	135	115	95	80	

표 2. 변이구간의 최소길이

본선설계속도(km/h)	120	110	100	90	80	70	60	50	40
변이구간 최소길이(m)	90	80	70	70	60	60	60	60	60

표 3. 감속차로의 길이 보정률

본선 종단경사 (%)	내리막 경사					오르막경사				
	0~2	2~3	3~4	4~5	5이상	0~2	2~3	3~4	4~5	5이상
감속차로의 길이 보정률	1.00	1.10	1.20	1.30	1.35	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80

2.2 현행 감속차로의 길이 산정방법

감속차로의 길이는 다음 세 가지 요소를 기준으로 하여 정해진다.

- 자동차가 감속차로에 진입할 때의 도달속도
- 자동차가 감속차로를 주행완료하였을 때의 속도
- 감속의 방법 또는 감속도

일반적으로, 감속차로에 접근하는 차량의 속도가 그 도로의 평균주행속도 이상이 되는 경우는 드물기 때문에, 감속차로에 접근하는 자동차의 속도로는 본선의 평균주행속도를 채택하는 것이 적당하다. 감속



방법은 브레이크 페달을 밟아 감속하여 연결로의 주행속도까지 떨어뜨리는 것이 보통이다. 감속차로의 길이를 정하는 기초로서, 미국 AASHTO의 취지를 따르고, 승용차를 대상으로 하여 다음과 같은 가설을 전체로 계산하였다.

- 유출차량은 감속차로의 선단을 평균주행속도(도달속도)로 통과한다.
- 그 후 운전자에 불쾌감을 주지 않을 정도로 브레이크를 이용하여 감속하며, 감속차로 끝에서 연결로의 평균주행속도에 이른다.

감속을 시작하면서 부터 주행한 거리(S)는 감속도(d)의 값을 1.96m/sec^2 로 할 때 다음 식과 같다.

$$S = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2d} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{50.8} \quad (1)$$

여기서, S : 감속거리(m)

v_1 : 유출부 평균주행속도(m/sec)

v_2 : 감속차로 시점부 도달속도(m/sec)

d : 감속도(1.96m/sec^2)

V_1 : 유출부 평균주행속도(km/h)

V_2 : 감속차로 시점부 도달속도(km/h)

위의 식과 미국의 AASHTO의 주행속도 권장기준을 이용하여 감속차로의 길이를 계산하면 표 1과 같다.

3. 고속도로 연결로 운영 상의 문제점

서론에서 언급된 바와 같이, 감속차로의 길이는 본선과 연결로 상의 주행속도 차이를 운전자가 안전하게 적응할 수 있는 최소의 길이이다. 그러나 이러한 속도의 차이는 충격파를 발생시키게 되고, 교통량이 일정 이상일 경우에는 충격파로 인한 대기행렬의 형성을 피할 수 없게 된다. 특히 연결로에서의 대기행렬의 길이가 감속차로 보다도 길어질 경우에는 본선 최하위 차로에 까지 이르게 되어, 본선 교통류에 장

애요소가 될 뿐만 아니라 안전상으로도 심각한 문제를 발생시키게 된다. 이러한 현상은 특히 교통량이 많은 고속도로에서 흔히 발생하는 경우이다.

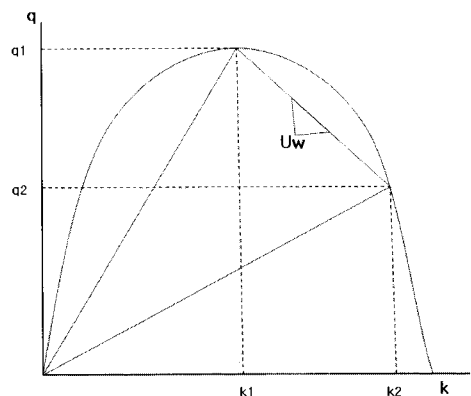
따라서 감속차로의 길이는 단순한 감속을 위한 공간으로서 뿐만 아니라, 연결로에서 대기행렬균이 본선 교통류에 영향을 미치지 않을 정도의 길이를 확보하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 연결로 감속차로에서 형성되는 대기행렬의 길이를 충격파 이론을 적용하여 분석함으로써 안전뿐만 아니라 운영까지 고려한 감속차로 설계기법 개발의 기본적 방법론의 한 대안을 제시한다.

4. 고속도로 감속차로의 대기행렬 분석

4.1 분석방법론

본 연구에서는 서로 다른 설계속도를 가지는 도로를 연결하는 부가차로(감속차로)에서 발생하는 대표적인 문제점으로 유출차량의 대기행렬의 형성을 꼽았으며, 대기행렬의 길이와 위치를 파악하기 위하여 충격파 이론을 적용하였다.



q : 교통량 k : 밀도

q_1, k_1 : 충격파 발생지점 이전 교통량, 밀도

q_2, k_2 : 충격파 발생지점 이후 교통량, 밀도

u_w : 충격파의 속도

그림 1. 충격파의 속도를 설명하기 위한 교통량-밀도($q-k$) 곡선



우선 대기행렬군의 끝 지점(Maximum back of queue)을 구하기 위하여 접근도로와 연결로의 설계 속도와 차로수별로 분류하고, 다른 두 가지 상황의 교통류에 대하여 충격파의 속도를 구하여 Maximum back of queue를 산정한 다음, 기존의 감속차로 길이와 비교하였다. 교통량의 변화량과 밀도의 변화량으로 충격파의 속도를 구하는 식은 그림 1의 그래프에 나타난 바와 같다.

그림 1의 관계식은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다. 여기서 u_w 를 중심으로 계산하면 식 (3)이 도출되며, 이 식을 이용하여 충격파의 속도를 구할 수 있다.

$$N = (u_1 - u_w)k_1 \cdot t = (u_2 - u_w)k_2 \cdot t$$

$$(u_2 k_2 - u_1 k_1) = u_w (k_2 - k_1) \quad (2)$$

$$q_2 - q_1 = u_w (k_2 - k_1)$$

$$u_w = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} \quad (3)$$

- 여기서, N : 충격파 영향 차량 수
- u_1 : 충격파 발생지점 이전
- u_2 : 충격파 발생지점 이후
- u_w : 충격파의 속도
- k_1 : 충격파 발생지점 이전
- k_2 : 충격파 발생지점 이후
- t : 지속시간

식 (3)을 이용하여 램프 상류에서 발생하는 충격파의 속도 u_{Ramp} 는 다음과 같다.

$$u_{Ramp} = \frac{q_{\text{인입도로}} - q_{Ramp}}{k_{\text{인입도로}} - k_{Ramp}} \quad (4)$$

충격파가 진행되는 시간(t_{Ramp})은 반복적으로 발생하는 본선 차량이 연결로의 용량을 초과하는 지속 시간을 의미한다.

산정된 충격파의 길이 $L_{shockwave}$ 는 충격파의 속도와 진행되는 시간의 곱으로 나타내어진다. 여기에서 산

정된 길이는 적적 감속차로라기 보다는 램프에 의하여 영향을 받게 되는 영향권으로 보는 것이 타당할 것이다.

$$L_{shockwave} = u_{Ramp} \times t_{Ramp} \quad (5)$$

식 (5)의 결과와 현재 설계에 사용되고 있는 감속차로의 길이를 비교함으로써, 만약 식 (4)의 결과가 현행기준보다 크다면, 현행기준 적용 시 대기행렬의 길이가 감속차로를 넘어 본선에 까지 이르게 되어 문제가 발생할 수 있으므로 대안을 설정하여 적용하는 것이 필요한 것이다.

4.2 분석결과

4.2.1 기존자료 분석

우선 접근교통량의 경우 진입하는 도로의 설계속도별(100km/h, 80km/h, 60km/h)로 진입하기 전에 교통량의 상태를 가장 교통량이 많은 용량상태로 가정을 하여 사용하게 되는데, 이 때 기존 도로용량편람에 제시된 고속도로 기본구간의 용량을 본선의 진

표 4. 도로용량편람 상의 연결로 용량

연결로의 자유속도(kph)	연결로의 용량(pcph)	
	1차로 연결로	2차로 연결로
>70	≤2,000	≤4,000
≤70	≤1,900	≤3,800
≤60	≤1,800	≤3,600
≤50	≤1,700	≤3,400
<40	≤1,600	≤3,200

표 5. 도로용량편람상의 고속도로 기본구간의 서비스수준

서비스 수준	밀도 (pc/kmpl)	설계속도 120kph		설계속도 100kph		설계속도 80kph	
		교통량 (pcphpl)	v/c비	교통량 (pcphpl)	v/c비	교통량 (pcphpl)	v/c비
A	≤6	≤700	≤0.30	≤600	≤0.27	≤500	≤0.25
B	≤10	≤1,150	≤0.50	≤1,000	≤0.45	≤800	≤0.40
C	≤14	≤1,500	≤0.65	≤1,350	≤0.61	≤1,150	≤0.58
D	≤19	≤1,900	≤0.83	≤1,750	≤0.80	≤1,500	≤0.75
E	≤28	≤2,300	≤1.00	≤2,200	≤1.00	≤2,000	≤1.00
F	>28	-	-	-	-	-	-



입교통량이라 가정을 하였고, 연결로 내의 용량 상태의 교통량을 고속도로 연결로 접속부에 제시된 연결로 내의 속도별 교통량을 접근 교통량이라고 가정하였다.

4.2.2 자료수집

본 연구를 위하여 실제 입체교차로 유출부에서 발생하는 대기행렬의 길이와 본선 및 연결로의 설계속도, 그리고 교통량 등에 대한 조사가 필요하다. 본 연구는 완전한 설계지침의 개발이 아닌 현재의 문제점을 파악하고 그 대안을 제시하는 pilot study의 성격을 감안하여 자유로 행주대교 복단의 입체교차로와 자유로 이산포 IC 등 2개 지점을 선정하여 분석하였다. 이 지점들은 수도권에 입지한 도시고속도로 구간에 위치하여 침두시 본선 및 유출입 교통량이 용량상태에 가까운 지점들이다. 그러나 이 도로는 고속국도와 같은 설계기준이 아닌 국도의 설계기준에 따라 건설된 도로로서, 교통여건등이 유사한 고속국도 상의 인터체인지와는 다른 교통현상을 나타낼 수 있는 한계는 존재하지만, 방법론 개발에 초점이 맞추어진 본 연구의 대상으로서는 큰 문제가 없는 것으로 판단되었다.

4.2.3 분석과정

Maximum back of queue를 구하기 위해서는 충격파의 속도, 지속시간 두 가지 변수를 알아야 한다. 이 중에서 충격파의 속도를 구하기 위한 두 가지 변수는 교통량의 변화량과 밀도의 변화량을 알아야 한다.

교통량의 경우는 현재 도로용량편람에 제시된 고속도로 기본구간의 교통량을 본선에서 Ramp에 진입하려는 최대교통량이라고 가정하고, 연결로의 교통량 또한, 도로용량편람 상에서 제시된 연결로의 용량을 최대교통량이라고 가정한다. 그러나 밀도의 경우는 실제로 측정이 불가능하므로, 교통량과 밀도의 관계식을 이용하여 밀도를 구하여 충격파의 속도를 구하는 방법을 선택하기로 하였다.

주어진 교통량으로 밀도를 구하는 식은 아래의 교

통량(q)과 밀도(k)의 관계식으로 표현 할 수 있는데 일반적으로 임계밀도를 중심으로 용량상태보다 적은 밀도를 안정류, 용량상태보다 큰 밀도를 불안정류라 정의하고 각각 다른 곡선식으로 표현되어진다.

아래의 그래프에서 밀도 29pc/km는 도로용량편람에서 제시된 용량상태에서의 밀도이고, 160pc/km는 차량이 1km안에 최대 가능한 밀도를 나타낸다.

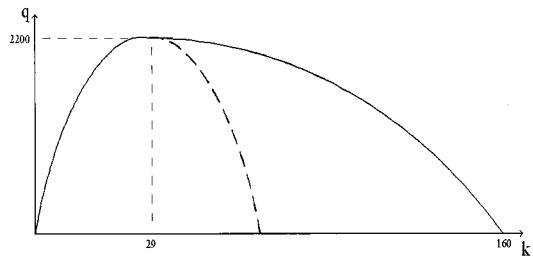


그림 2. 실제 적용 가능한 $q-k$ 곡선

그림 2의 $q-k$ 곡선에서 k 를 구하기 위해 곡선의 관계식을 구하는 방법은 식(6)과 같이 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned}
 ak(k-160) &= q \\
 ak^2 - 160ak - q &= 0 \\
 a &= \frac{q}{k^2 - 160k}
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 구해진 a 값을 식에 대입하여 구하여 교통량에 비례하는 밀도 k 값을 구한다.

4.2.4 분석결과

본 연구에서는 본선의 설계속도(100, 80, 60km/h)와 램프의 설계속도(60, 50, 40km/h)에 따른 교통량의 변화된 값과 밀도값을 통하여 충격파의 값을 산정하였으며, 그 결과는 표 6에 나타나 있다. 본선의 설계속도가 100km/h인 경우에는 본선에서 램프에 진입하는 교통량이 용량의 80%가 넘어가면서 뒤쪽으로 충격파가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 본선의 설계속도가 80km/h인 경우에는 본선에서 램프에 진입하는 교통량이 용량의 90%를 넘으면



서, 설계속도가 60km/h인 경우에는 거의 용량상태에 이르러 램프 뒤쪽으로 충격파가 발생하는 것을 볼 수 있었다.

표 6. 본선과 연결로에서 발생하는 충격파 속도

본선 설계 속도	램프 설계 속도	램프 진입교통량에 따른 충격파 속도(km/h)							
		진입 용량 상태	용량의 90%	용량의 80%	용량의 70%	용량의 60%	용량의 50%	용량의 40%	용량의 30%
100	60	-3.70	-1.54	-	-	-	-	-	-
	50	-4.58	-2.37	-0.49	-	-	-	-	-
	40	-5.60	-3.27	-1.33	-	-	-	-	-
80	60	-1.77	-	-	-	-	-	-	-
	50	-2.63	-0.85	-	-	-	-	-	-
	40	-3.57	-1.72	-	-	-	-	-	-
60	60	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	-0.88	-	-	-	-	-	-	-
	40	-1.79	-0.17	-	-	-	-	-	-

주: 음영부분은 후미로 충격파가 발생하는 부분임

표 6의 속도에 따른 충격파의 영향권을 산정하였는데, 이 값은 앞절에서 언급하였듯이 충격파의 지속 시간의 경우는 일반적으로 교통량이 가장 큰 첨두시간 교통량이 지속되는 시간을 의미한다. 그러나 만일 첨두시간 1-2시간 동안 계속적으로 최대교통량에 도달한다면 충격파의 길이는 기하급수적으로 커질 것이 자명한 사실이다. 그래서 본 연구에서는 지속시간을 5분 단위로 나눠서 연결로에 진입하기 전에 본선 진입교통량과 연결로 교통량의 차이를 조사하였다. 일반적으로 본선진입교통량이 연결로 교통량을 초과하는 시간이 10분정도 되는 것으로 조사되어, 본 연구의 지속시간으로 정의하여 충격파의 길이를 산정하였고, 연결로로 인해 영향받는 구간을 충격파의 속도와 지속시간의 곱으로 연결로의 영향구간으로 정의하여 나타내었다.

영향권을 산정할 때, 기존에 도로시설 및 기준에 제시된 부가차로의 길이와 실제 영향권 길이를 비교함으로써, 부가차로 길이의 적정성을 재고해 볼 수 있다. 그 값은 표 7에 나타나 있으며, 진한 빗금 부분

이 기준에 제시된 부가차로의 길이를 벗어나는 부분이고, 옅은 빗금 부분이 기준에 제시된 부가차로의 길이에 포함되는 지역을 의미한다. 표에서도 나타나듯이, 부가차로의 현행기준을 벗어나는 지점이 진입용량상태에 가까울수록 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.

표 7. 충격파에 따른 영향권 길이

본선 설계 속도 (km/h)	램프 설계 속도 (km/h)	부가차로 준 (m)	램프 진입교통량(pcph)									
			2,200	1,980	1,760	1,540	1,320	1,100	880	660		
100	60	190	1차로	-630m	-260m	-	-	-	-	-	-	-
			2차로	-315m	-130m	-	-	-	-	-	-	-
	50	205	1차로	-780m	-400m	-80m	-	-	-	-	-	
			2차로	-390m	-200m	-40m	-	-	-	-	-	
	40	215	1차로	-950m	-560m	-230m	-	-	-	-	-	
			2차로	-475m	-280m	-115m	-	-	-	-	-	
80	60	140	1차로	-300m	-	-	-	-	-	-	-	
			2차로	-150m	-	-	-	-	-	-	-	
	50	150	1차로	-450m	-150m	-	-	-	-	-	-	
			2차로	-225m	-75m	-	-	-	-	-	-	
	40	160	1차로	-600m	-300m	-	-	-	-	-	-	
			2차로	-300m	-150m	-	-	-	-	-	-	
60	60	60	1차로	-	-	-	-	-	-	-	-	
			2차로	-	-	-	-	-	-	-	-	
	50	105	1차로	-150m	-	-	-	-	-	-	-	
			2차로	-75m	-	-	-	-	-	-	-	
	40	140	1차로	-300m	-30m	-	-	-	-	-	-	
			2차로	-150m	-15m	-	-	-	-	-	-	

주: 진한 음영부분은 부가차로의 용량을 초과하여 지체가 발생하는 지점, 옅한 빗금은 부가차로의 용량안에서 처리가 가능한 지점



5. 결론

본선의 교통량-속도의 변화와 램프의 교통량-속도의 변화에 따라 다양한 종류의 충격파가 발생한다. 분석결과에 따르면 유출부 교통량이 용량상태에 가까울 경우, 1개 차로로 운영되는 감속차로 상에서 침두시 대기행렬의 길이는 감속차로 길이의 2배 이상인 것으로 나타났으며 이는 실제 관찰결과와도 거의 일치하는 것이다. 즉 자유교통류 상태를 기준으로 단순히 물리적 감속거리만을 고려한 현행 감속차로 길이 산정방법은 실제로는 감속을 위한 충분한 거리를 제공하지 못하고 있으며, 더불어 본선 교통류의 운영과 안정상에 문제를 발생할 수 있음이 수치적으로도 나타난 것이다. 이러한 문제가 발생할 수 있는 램프는 설계속도를 10km/h 상향시킴으로써 20% 정도의 대기행렬 길이를 감소시킬 수가 있으며, 램프의 차로수를 1개에서 2개로 증가시킴으로써 50%의 대기행렬 길이를 감소시킬 수 있다.

감속차로의 길이를 증가시키는 경우는 단지 본선 교통량에 대한 램프 진입교통량의 영향을 최소화 하지만, 연결로의 차로수 증가의 경우는 본선교통량 뿐 아니라 연결로의 용량증대에 개선이 되므로 더 적절한 방법이라고 할 수 있다.

따라서 연결로의 지체발생을 최소화하려면, 연결로 진입로의 길이를 연장하는 방안보다는 연결로의 차로수 증가 또는 연결로 진입교통량의 감소방법을 고려하는 것이 훨씬 효율적인 방법으로 판단된다.

그러나 램프의 설계규격을 상향조정하는 것은 더 많은 건설비를 소요하게 된다. 따라서 운영을 고려하여 입체교차로의 설계기준을 상향조정하는 것과 이로 인하여 연계 되는 사회적 경제적 편익에 대한 경제성 분석이 추가로 필요할 것이다.

참고문헌

- 건설교통부, 도로용량편람, 2001. 10.
- 건설교통부, 도로의 구조 및 시설기준에 관한 규정 해설 및 지침, 1990. 12.
- 도철웅, 교통공학원론(상), 청문각, 1996. 1.
- 원제무, 도시교통론, 1995. 9.
- Highway Capacity Manual, FHWA, 2000.

접 수 일: 2008. 11. 25
 심 사 일: 2008. 11. 25
 심사완료일: 2009. 1. 8