

운영을 고려한 도로설계기준 재정립의 필요성 - 고속도로 연결로 설계기준을 중심으로



김정현

1. 서론

도로의 설계기준을 정립함에 있어 가장 중요한 요소는 도로의 안전성을 확보하는 문제이다. 도로설계는 크게 평면, 종단, 및 횡단면 설계로 구성된다. 평면설계는 평면곡선에서 주행하는 차량이 원심력으로 인하여 횡방향으로 미끄러지거나 전복하지 않도록 하는 것이 분석의 핵심이 되며, 종단설계에서는 선형으로 인한 시거의 제약이 없도록 하는 것이 가장 중요하다. 횡단면설계에서는 현행 우리나라에서 적용되는 “도로의 구조시설에 관한 규칙”에서 볼 때 횡단면 경사를 통하여 도로면 배수를 원활히 하는 것이 첫 번째 목표이고, 둘째로는 횡단면 설계와 관련하여 적정 편경사를 제공함으로써 차량주행상태의 안전성을 확보하는 것을 들 수 있다. 이렇게 기본적인 선형의 안전성이 확보된 이후, 교통량등 운영부문의 요소가 도로시설의 설치기준에 추가되게 된다.

그러나 문제는 이러한 설계기준은 교통류가 안정상태를 보이고 교차로나 연결로 등에서 대기행렬이 발생하지 않는 상태를 가정하고 있다는 것이다. 도로시설이 절대적으로 부족한 우리나라의 상황에서, 도로시설의 일부에서 과포화 상태가 흔히 나타나고 있으므로 설계기준을 적용함에 있어서도 이러한 문제를 고려하는 것이 바람직하다. 소통상의 문제는 다시

안전상의 문제로 확대될 수 있기에 운영 및 소통을 고려한 도로의 설계기준을 재정립하는 문제는 중요할 것이다.

본 고에서는 안전성 위주로 작성된 현행 도로설계기준을 적용함으로 인하여 발생할 수 있는 여러 가지 문제점 중 하나인 연결로 진입구간의 감속차로 설계기준 상의 문제를 분석하여 봄으로써, 앞에서 제기한 문제점에 대한 보완의 필요성을 설명하고자 한다.

II. 현행 고속도로 연결로의 설계기준

1. 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 검토

도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 제33조에서 연결로의 설계속도는 접속하는 도로의 설계속도에 따라 <표 1>의 연결로의 설계속도를 기준으로 하고 있다.

도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙에 제시된 연결로의 설계속도를 고려하여, 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 제34조에서는 입체교차 감변속차로의 길이와 변이구간의 길이를 <표 2> 및 <표 3>과 같이 제시하고 있으며, 그 외에 감속차로의 차로수 및 유형에 따라 적용방법이 달라지거나 보정계수등을 적용할 수 있다.

<표 1> 연결로의 설계속도

상급도로 설계속도 (km/h) \ 하급도로 설계속도 (km/h)	120	110	100	90	80	70	60	50이하
120	80-50							
110	80-50	80-50						
100	70-50	70-50	70-50					
90	70-50	70-40	70-40	70-40				
80	70-40	70-40	60-40	60-40	60-40			
70	70-40	60-40	60-40	60-40	60-40	60-40		
60	60-40	60-40	60-40	60-40	60-30	50-30	50-30	
50 이하	60-40	60-40	60-40	60-40	60-30	50-30	50-30	40-30

〈표 2〉 변이구간을 제외한 감속차로의 최소길이

본선설계속도(km/h)		120	110	100	90	80	70	60
연결로 설계속도	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 3〉 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

2. 감속차로의 길이 산정방법

감속차로의 길이는 다음 세 가지 요소를 기준으로 하여 정하여 진다.

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

일반적으로, 감속차로에 접근하는 차량의 속도가 그 도로의 평균 주행 속도 이상이 되는 경우는 드물기 때문에, 감속차로에 접근하는 자동차의 속도로는 본선의 평균 주행속도를 채택하는 것이 적당하다. 감속방법은 브레이크 페달을 밟아 감속하여 연결로의 주행속도까지 떨어뜨리는 것이 보통이다. 감속차로의 길이를 정하는 방법론은 미국 AASHTO의 방법론을 그대로 적용하고 있으며, 다음에 설명된 바와 같다.

브레이크를 밟으면서부터 주행한 거리(S)는 감속도(d)의 값을 1.96m/sec^2 으로 할 때 다음 식과 같다.

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

여기서, S : 브레이크를 밟으면서 주행한 거리(m)

- v_1 : 유출부 평균 주행속도(m/sec)
- v_2 : 감속차로 시점부 도달속도(m/sec)
- d : 감속도(1.96m/sec^2)
- V_1 : 유출부 평균 주행속도(km/h)
- V_2 : 감속차로 시점부 도달속도(km/h)

위의 식과 미국의 AASHTO의 방법론을 적용하여 감속차로의 길이를 계산하면 <표 2>와 같은 결과가 나오게 된다.

III. 고속도로 연결로의 운영상의 문제점

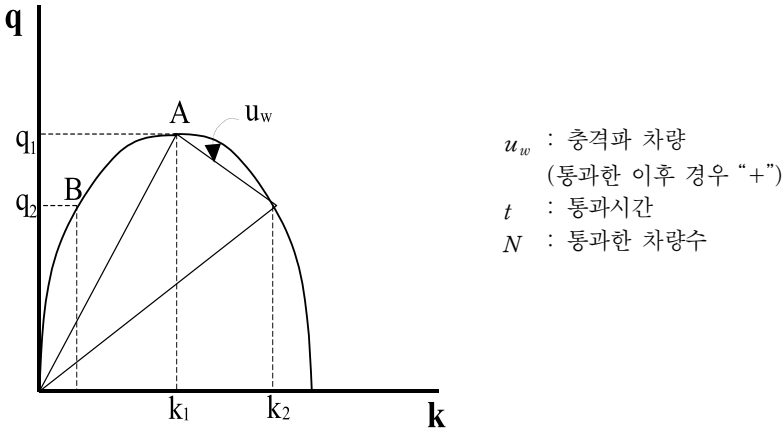
제2장에서 설명된 바와 같이, 감속차로의 길이는 본선과 연결로 상의 주행속도의 차이를 운전자가 안전하게 적응할 수 있는 최소의 길이이다. 그러나 이러한 속도의 차이는 충격파를 발생시키고 되고, 교통량이 일정 이상일 경우 충격파로 인한 대기행렬의 형성을 피할 수 없게된다. 특히 연결로에서의 대기행렬의 길이가 감속차로 보다도 길어질 경우에는 본선 최하위차로에 까지 이르게 되어, 본선 교통류에 장애요소가 될 뿐만 아니라 안전상으로도 심각한 문제를 발생하게 된다. 이러한 현상은 특히 교통량이 많은 서울시 내부순환도로등에서 흔히 발생하는 경우이다.

따라서 감속차로의 길이는 단순한 감속을 위한 공간으로서 뿐만 아니라, 연결로에서 대기행렬군이 본선 교통류에 영향을 미치지 않을 정도의 길이를 확보하는 것이 필요하다. 제4장에서는 연결로 감속차로에서 형성되는 대기행렬 길이를 충격파 이론을 적용하여 분석하여 봄으로써, 안전 뿐만 아니라 운영까지 고려한 감속차로 설계기준의 기본적 방법론의 한 대안을 제시하였다.

IV. 고속도로 연결로의 대기행렬 분석

1. 분석방법론

본 고에서 적용한 방법론은 서로 다른 설계속도를 가지는 도로와 연결



〈그림 1〉 충격파의 속도를 설명하기 위한 q-k 곡선

로의 충격파를 이용하였다.

우선 Maximum back of queue를 구하기 위해서 접근도로와 연결로를 설계속도와 차로수별로 분류하고, 다른 두가지 상황의 교통류에 대해 충격파의 속도를 구하여 Maximum back of queue를 산정한 다음 기존의 감속차로 길이와 비교하였다. 교통량의 변화량과 밀도의 변화량으로 충격파의 속도를 구하는 식은 〈그림 1〉의 그래프에 나타난 바와 같다.

〈그림 1〉의 관계식은 (식 2)로써 표현될 수 있다. 여기서 U_w 를 중심으로 계산하면 (식 3)이 도출되며, 이 식을 이용하여 충격파의 속도를 구하였다.

$$N = (u_1 - u_w)k_1 \cdot t = (u_2 - u_w)k_2 \cdot t \quad (\text{식 2})$$

$$(u_2 k_2 - u_1 k_1) = u_w (k_2 - k_1)$$

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

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

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

$$u_{Ramp} = \frac{q_{본선} - q_{Ramp}}{k_{본선} - k_{Ramp}}$$

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

$$t_{Ramp} = \text{본선 차량이 연결로의 용량보다 초과한 시간}$$

산정된 충격파의 길이 $L_{shockwave}$ 는 충격파의 속도와 진행되는 시간의 곱으로 나타내어진다. 여기에서 산정된 길이는 적정 감속차로라기 보다는 램프에 의해서 영향을 받는 영향권이라고 언급하는 것이 타당할 것이다.

$$L_{shockwave} = u_{Ramp} \times t_{Ramp} \tag{식 4}$$

(식 4)의 결과와 현재 설계에 사용되고 있는 감속차로 길이를 비교함으로써, 만약 (식4)의 결과가 현행 기준보다 크다면, 현행 기준 적용시 대기행렬의 길이가 감속차로를 넘어 본선에 까지 이르게 되어 문제가 발생할 수 있으므로 대안을 설정하여 적용하는 것이 필요한 것이다.

V. 분석결과

1. 기존 자료분석

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

〈표 6〉 도로용량편람 상의 연결로 용량

연결로의 자유속도(kph)	연결로의 용량(pcpkpl) ^(c)	
	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 7〉 도로용량편람상의 고속도로 기본 구간의 서비스수준

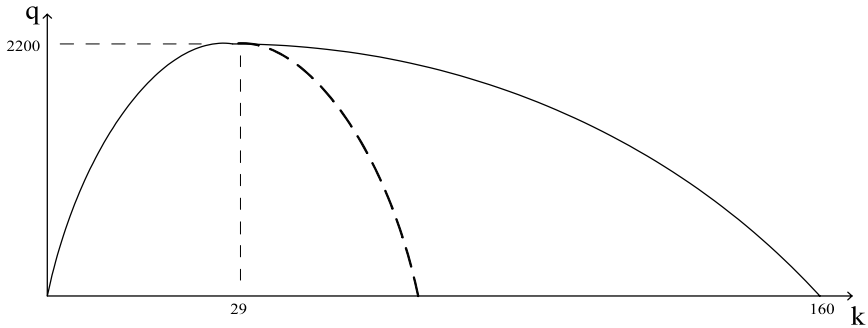
서비스 수준	밀도 (pcpkmpl)	설계 속도 120 kph		설계 속도 100 kph		설계 속도 80 kph	
		교통량 (pcphpl)	v/c 비	교통량 (pcphpl)	v/c 비	교통량 (pcphpl)	v/c 비
A	≤6	≤700	≤0.30	≤600	≤0.27	≤500	≤0.25
B	≤10	≤1,150	≤0.50	≤1,000	≤0.45	≤800	≤0.40
C	≤14	≤1,500	≤0.65	≤1,350	≤0.61	≤1,150	≤0.58
D	≤19	≤1,900	≤0.83	≤1,750	≤0.80	≤1,500	≤0.75
E	≤28	≤2,300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

2. 분석 과정

Maximun 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 최대 교통량이라고 가정하고, 연결로의 교통량 또한, 도로용량편람 상에서 제시된 연결로의 용량을 최대 교통량이라고 가정한다. 그러나, 밀도의 경우는 실제로 측정이 불가능하므로, 교통량과 밀도의 관계식을 이용하여 밀도를 구하여 충격파의 속도를 구하는 방법을 선택하였다.

주어진 교통량으로 밀도를 구하는 식은 아래의 교통량(q)과 밀도(k)의 관계식으로 표현 할 수 있는데 일반적으로 임계밀도를 중심으로 용량상태보다 적은 밀도를 안정류, 용량상태보다 큰 밀도를 불안정류라 정의하고 각각



〈그림 2〉 실제 적용가능한 q-μ 곡선

다른 곡선식으로 표현되어진다. 아래의 그래프에서 밀도값 29pc/km는 도로용량편람에서 제시된 용량상태에서의 밀도 값이고, 160pc/km는 차량이 1km안에 최대로 가능한 밀도 값을 나타낸다.

〈그림 2〉의 q-k곡선에서 k를 구하기 위해 곡선의 관계식을 구하는 방법은 (식 5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 ak(k-160) &= q \\
 ak^2 - 160ak - q &= 0 \\
 a &= \frac{q}{k^2 - 160k} \quad (\text{식 5})
 \end{aligned}$$

여기서 산출된 a값을 식에 대입하여 구하여 교통량에 상응하는 밀도, k를 구하였다.

이와 같은 자료를 이용하여 1절에서 설명된 방법론을 적용하였다.

3. 분석 결과

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 8〉에 나타나 있다. 본선의 설계속도가 100km/h인 경우에는 본선에서 램프에 진입하는 교통량이 용

〈표 8〉 본선과 연결로에서 발생하는 충격파 속도

본선 설계속도	램프 설계속도	램프진입교통량에 따른 충격파 속도(km/h)							
		진입 용량상태	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.

량의 80%가 넘어가면서 뒤쪽으로 충격파가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 본선의 설계속도가 80km/h인 경우에는 본선에서 램프에 진입하는 교통량이 용량의 90%를 넘으면서, 설계속도가 60km/h인 경우에는 거의 용량상태에 다달아서 램프 뒤쪽으로 충격파가 발생하는 것을 볼 수 있었다.

〈표 8〉의 속도에 따른 충격파의 영향권을 산정하였는데, 이 값은 앞절에서 언급하였듯이 충격파의 지속시간의 경우는 일반적으로 교통량이 가장 큰 침두시간 교통량이 지속되는 시간을 의미한다. 그러나, 만일 침두시간 1-2시간 동안 계속적으로 최대 교통량에 도달하지는 않고, 만약 도달한다면 충격파의 길이는 기하급수적으로 커질 것이 자명한 사실이다. 그래서 본 고에서는 지속시간을 5분 단위로 나눠서 연결로에 진입하기전에 본선 진입교통량과 연결로 교통량이 차이를 조사해서, 일반적으로 본선진입교통량이 연결로 교통량보다 초과하는 시간이 10분정도 되는 것으로 조사되어, 본 연구의 지속시간으로 정의하여 충격파의 길이를 산정하였고, 연결로로 인해 영향받는 구간을 충격파의 속도와 지속시간의 곱으로 연결로의 영향구간으로 정의하여 나타내고자 한다.

영향권을 산정할 때, 기존에 도로 시설 및 기준에 제시된 부가차로의 길이와 실제 영향권 길이를 비교함으로써, 부가차로 길이의 적정성을 재고해 볼 수 있다. 그 값은 〈표 9〉에 나타나 있으며, 진하게 빗금쳐진 부분이 기준에 제시된 부가차로의 길이를 벗어나는 부분이고, 열게 빗금쳐

〈표 9〉 충격파에 따른 영향권 길이

본선 설계속도 (km/h)	램프 설계속도 (km/h)	부가차로 현행기준 (m)	램프진입교통량(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	-	-	-	-	
본선 설계속도 (km/h)	램프 설계속도 (km/h)	부가차로 현행기준 (m)	램프진입교통량(pcph)								
			2,000	1,800	1,600	1,400	1,200	1,000	800	600	
80	60	140	1차로	-300m	-	-	-	-	-	-	
			2차로	-150m	-	-	-	-	-	-	
	50	150	1차로	-450m	-150m	-	-	-	-	-	
			2차로	-225m	-75m	-	-	-	-	-	
	40	160	1차로	-600m	-300m	-	-	-	-	-	
			2차로	-300m	-150m	-	-	-	-	-	
본선 설계속도 (km/h)	램프 설계속도 (km/h)	부가차로 현행기준 (m)	램프진입교통량(pcph)								
			1,800	1,620	1,440	1,260	1,080	900	720	540	
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, 연한 빗금은 부가차로의 용량 안에서 처리가 가능한 부분

진 부분이 기준에 제시된 부가차로의 길이에 포함되는 지역을 의미한다. 표에서도 나타나듯이, 부가차로의 현행기준을 벗어나는 지점이 진입용량 상태에 가까울수록 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.

VI. 결론

〈표 9〉에 나타난 바와 같이, 교통류의 운영상태를 고려하였을 경우 요구되는 시설기준은 단순히 도로시설의 안전성만을 고려하였을 때와 차이

를 나타낼 수 있다. 이러한 현상이 극히 드물게 나타난다면 경제성등을 고려할 때 현행 기준을 적용하여도 무방할 수 있다. 그러나 도시고속도로와 같이 항시적으로 이러한 현상이 발생할 소지가 있는 지점이라면 운영 상태까지 고려하여 시설규모를 결정하는 것이 경제성과 안전성 모두의 측면에서 바람직할 것이다.

본 고에서는 일단 고속도로 연결로의 감속구간에 대하여 그 문제를 분석하고 새로운 기준을 설정할 수 있는 대안을 제시하였다. 그러나 이러한 문제는 비단 고속도로 연결로 뿐만 아니라, 교통량이 용량에 근접한 여러 가지 유형의 도로시설에서 발생하고 있다는 것이다. 일반적으로 교통량이 용량에 근접하거나 과포화상태 까지 이르는 지점은 주로 도시부 도로일 것이다. 그러나 현행 “도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙”은 건설교통부 도로국을 중심으로 작성되어 일반국도나 고속국도를 주대상으로 하고 있다. 도로유형이 사실상 고속국도와 동일한 도시고속도로의 경우에도 반드시 고속국도의 설계기준을 적용하지 않아도 되는 현실에서 일반국도 보다 설계규격이 낮은 일반 도로는 이러한 문제가 더욱 심각하다.

안전성은 도로설계에 있어서 가장 우선되는 원칙이다. 하지만 우리의 현실을 고려할 때 운영까지 고려한 설계기준의 재정립이 절실한 상황이다. 이와 더불어 현행 기준이 명확하게 규정하여주지 못하는 도시부 도로 설계기준의 필요성도 함께 제기되어야 할 것이다.