

直進과 左回轉 信號順序에 따른 交叉路 容量分析과 信號時間 研究

Comparison of Capacities at an Intersection with
Lagging or Leading Left Turn Green Phase

都 哲 雄*
Do, Cheol Ung

Abstract

Through traffic utilization of left turn lane constitutes an unique traffic operation at an intersection. Consequently, due to the provision as of current practice, conventional methods which estimate traffic volume and intersection capacity by lane would not be valid for design of signal timings.

Through traffic utilization factor of left turn lane is affected by left turn volume and signal timings. The primary purpose of this study is to compare the results from leading left turn green phasing scheme with those from previously studied lagging left turn green phasing scheme in terms of utilization factor and intersection capacity by various left turn volume and signal timings, and thereby optimum signal timing to maximize the capacity at given left turn volume.

Leading left turn green phasing increases capacity by 10~15% as compared with that for current lagging left turn green phasing scheme. The range of optimum cycle length for left turn volume about 150 vph is 180~200 second. This cycle length range and left turn interval are longer than those for the lagging left turn green phasing scheme.

要 旨

交叉路에서 直進交通의 상당한 部分이 左回轉車線을 利用하는 特異한 交通運營은 交通量이나 容量을 車線別로 판단할 수 없게 하고 따라서 交叉路統制에서 가장 중요한 信號燈時間을 從來의 方法으로는 適切하게 設計할 수가 없다.

直進交通의 左回轉車線 利用率은 左回轉交通量, 信號燈時間에 따라 달라진다. 本 研究은 이 미 遂行된 直進-左回轉 페이스 때의 左回轉交通量과 信號燈時間에 따른 利用率 및 交叉路容量의 變化와 任意의 左回轉 交通需要에서 交叉路容量을 最大로하는 信號燈時間을 찾아낸 結果를, 左回轉-直進 페이스로 바꾸었을 때의 結果와 比較 分析했다.

左回轉-直進 페이스를 채택할 경우 現在의 直進-左回轉 페이스 때보다 약 10~15%의 交叉路容量 增加를 나타내며 最大交通容量을 나타내는 週期는 左回轉 交通量이 150 vph 부근일 때 180~200 초 정도로서 直進-左回轉 때 보다 조금 더 길며 左回轉信號時間도 따라서 좀 더 길어진다.

* 正會員 · 陸軍士官學校 教授

1. 序 論

大都市 또는 中小都市의 交叉路는 信號燈에 의해서 효율적인 交通統制가 이루어지고 있다. 특히 이들 중 大部分은 獨立交叉路信號燈으로 運營되고 있다. 또 幹線道路信號燈 시스템으로써 連動式으로 運營된다고 하더라도 信號등교차로의 거리가 멀리 떨어져 있을 경우에는 한 信號燈을 통과한 密集車輛群(platoon)이 다음 信號등으로 가는 도중에 이 platoon이 완전히 分散되어 버리므로 信號등간의 連動效果는 기대할 수 없으며 따라서 이런 경우는 독립信號등과 같은 역할을 수행한다고 볼 수 있다.

獨立信號燈에서의 左回轉 交通의 처리는 교차로 運營에서 대단히 중요하다. 外國의 경우에는 全面綠色信號에서도 左回轉이 허용되는 소위 Unprotected Left Turn 제도나 또는 左回轉 專用車線을 마련하여 別途의 左回轉信號를 제공하는 Protected Left Turn 제도가 널리 사용되고 있다. 그러나 현재 우리나라의 경우에는 左回轉 專用信號는 있으나 專用車線이 마련되어 있지않는 특이한 방식으로 運用되고 있어 Semi-protected Left Turn 제도라고 할 수 있다. 따라서 直進交通의 상당한 부분이 左回轉車線을 이용하고 있으므로 말미암아 交叉路統制計劃樹立에 어려움을 겪고 있다. 다시 말하면 交叉路의 運營方式은 外國과 판이하면서도 이를 運營하기 위한 容量計算이나 信號燈時間設計는 外國의 방식을 그대로 사용하고 있으므로 상당한 모순점을 내포하고 있다.

本 研究는 直進交通의 左回轉車線 利用率 推定과 이에 따른 交叉路容量을 算定하고 이 용량을 최대화하는 信號燈時間을 設計한 결과를 이용하여, (1) 현재와 같이 直進다음에 左回轉이 허용되는 phase 순서를(Lagging Left Turn Green) 左회전다음에 直進이 허용되게 하는(Leading Left Turn Green) 페이스로 바꾸므로써 交叉路容量이 얼마만큼 변하는가를 분석하고 이 두 制度에서 容量을 最大화하는 信號燈時間은 어떻게 변하는가를 살펴 보았다.

2. 研究의 背景

交叉路의 信號燈時間은 통상 다음의 목적중 그 어느 하나를 만족시키도록 설계한다. 즉

- 가. 遲滯를 최소화하기 위하여
- 나. 交叉路容量을 최대화하기 위하여
- 다. 交叉路의 交通需要를 충족시킬 수 있도록 하기 위하여
- 라. Cycle Failure를 최소화하기 위하여
- 마. 停止數, 燃料消耗, 排氣가스를 최소화하기 위하여 이다.

이 중에서 外國에서 많이 사용하는 방법은 Critical Lane 방법과 같이 最大車線의 交通需要를 만족시킬 수 있는 信號등시간을 산정하거나 또는 Webster 방법과 같이 遲滯를 최소화하기 위한 信號燈時間을 設計하는 방법이다. 그러나 이러한 방법들은 飽和度(degree of saturation)가 아주 낮은(예를 들어 Webster 방법은 飽和도가 0.4 이하일 때 잘 맞음)⁽²⁾ 경우에만 적용될 수 있는 방법들이다. 우리나라의 교차로와 같이 飽和도가 아주 높거나 過飽和狀態일 때는 이와 같은 방법들을 사용해서는 아니되며 또 直進이 左회전차선을 이용하기 때문에 飽和度の 算定 방법도 달라야 한다. 그러므로 우리의 경우에는 오히려 交叉路의 容量을 증대시키는 信號燈時間을 채택함이 바람직 하다. 물론 위에 열거한 목적중에서 한 信號등시간이 동시에 몇 개를 만족시킬 수 있거나 또는 連貫성이 있을 수 있다. 예를 들어 遲滯를 최소화하는 信號燈時間에서는 燃料消耗나 어떤 종류의 排氣가스(예를 들어 CO나 HC)도 최소가 될 수 있으며 停止數를 증가시키는 信號등시간에서는 NOx 가스도 증가한다⁽³⁾. 반대로 遲滯와 交叉路容量은 어떤 信號등시간에서는 정반대의 효과를 나타낸다. 즉 信號등 週期가 길어지면 容量은 증가하나⁽⁴⁾ 遲滯도 따라서 증가한다^(5,6,7).

過飽和狀態를 일반적으로 경험하고 있는 우리나라의 交叉路는 무엇보다도 容量을 증대시킬 수 있도록 해야하며 그러기 위해서는 우리나라 交叉路 특유의 Semi-protected Left Turn 제도가 容量에 미치는 영향을 이해하고 나아가서 信號

燈時間의 변화 중에서 phase의 순서가 交叉路口容量에 어떠한 영향을 미치는가를 알아볼 필요가 있다.

3. 研究計劃

研究過程은 두 단계로 나누어진다. 그 첫째는 Leading Left Turn Green 일때 左回轉 車線을 直進이 利用하는 利用率을 계산하여 交叉路口容量과 이 용량을 최대화하는 信號燈時間을 구하는 것이며, 두번째 과정은 이렇게해서 나온 결과를 Lagging Left Turn Green 때의 결과와 비교 분석하는 것이다.

研究地域은 두개의 6차선도로가 交叉하는 獨立信號燈交叉路 중에서 교차로 부근에 버스정류장이 있거나 左回轉交通이 많아 右側車線의 直進利用率이 아주 낮은 전형적인 都市部 교차로를 모델로 했다.

실험의 設計에 포함되는 變數와 그 水準(범위)는 다음과 같다.

가. 左回轉 交通需要—20vph에서 300vph까지
29 levels

나. 週期—60초에서 220초까지 17 levels

다. Split—左回轉時間: 2.6초 부터 42초까지
25 levels

—각 接近路에 割當되는 綠色時間:
全綠色시간의 10%에서 90%까지
9 levels

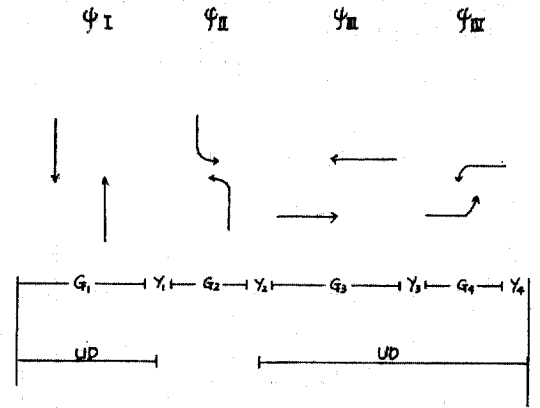
直進交通의 左回轉車線 利用率(UF)는 Lagging Left Turn Green 인 경우, 左回轉交通需要, 週期, 左回轉時間에 좌우되며, (1) Leading Left Turn 인 경우에는 左回轉交通需要, 週期, 左回轉時間, 두 도로의 Split에 좌우된다. 그러므로 前者의 경우에는 (29×17×25)개, 후자의 경우는 (29×17×25×9)개의 UF를 얻을 수 있으며 또 이와 같은 수의 接近路容量을 얻을 수 있다. 本 研究에서 사용된 飽和交通量은 直進의 경우 2400臺/時間, 左回轉의 경우 2200臺/時間이며 4초의 黃色時間과 3초의 出發遲延(Start-Lag), 2초의 進行延長(End-Lag)을 사용했다.

4. 理 論

Leading Left Turn Green 일 때의 直進交通의

左回轉車線 利用率은 Lagging Left Turn Green 일 때와 다르다. 이 두 制度의 기본적인 차이점은 아래와 같다.

가. Lagging Left Turn Green 의 경우



UD: 이 期間에 도착하는 左回轉車輛은 말미암아 直進交通은 ϕ_I 동안 左回轉車線을 利用하지 못함

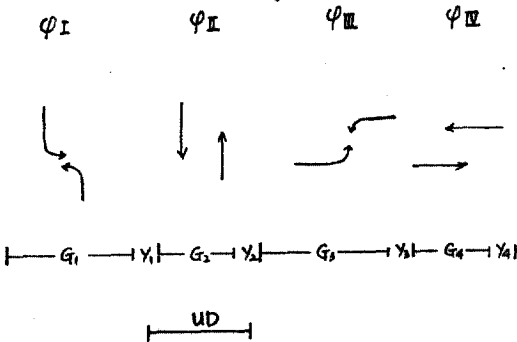
그림 1. Lagging Left Turn Green 의 경우

그림 1에서 보는 바와 같이 ϕ_I 동안의 直進車輛이 좌회전차선을 이용하지 못하는 경우는 $\phi_{III}-\phi_{IV}-\phi_I$ 동안에 도착하는 左回轉車輛 때문이다. 바꾸어 말하면 直進이 左回轉車線을 100% 이용할 경우는 첫째: 左回轉信號동안 모든 좌회전차량이 완전히 통과하여 ϕ_{III} 신호가 시작되는 순간에는 좌회전차량이 좌회전차선에 한대도 남아있지 않아야하며, 동시에 둘째: $\phi_{III}-\phi_{IV}-\phi_I$ 동안 좌회전차량이 한대도 도착하지 않는 경우이다. 만약 첫째 조건을 만족시키면서 동시에 이 기간($\phi_{III}-\phi_{IV}-\phi_I$) 동안 1대의 좌회전차량이 도착한다면 그 차량의 평균도착시간이 이기간의 中間時點이라고 할 때 그 시간 이전에 도착한 直進은 좌회전차선을 점유하여 이 차선을 이용할 것이기 때문에 이용율은 50%이다. 이와 같이하여 이 期間동안 좌회전 도착율이 2대이면 33%, 3대 이면 25%의 이용율을 나타낸다.

獨立交叉路의 車輛到着率은 Poisson 分布를 나타내므로 이들의 모든 경우 즉 첫째조건을 만족시킨 확률과 $\phi_{III}-\phi_{IV}-\phi_I$ 동안의 좌회전 도착이 0에서부터 무한대가 될 때 까지의 각각의 확률을 적용시켜서 앞절에서 언급한 (29×17×25)개의

이용율을 電算機로 구할 수 있다. 이렇게 해서 얻은 利用率을 이용하여 한 接近路의 각 신호등 시간과 각 左回轉交通量에 대한 용량을 구하고 이와 교차하는 接近路의 용량을 구하여 두 교차도로의 左回轉交通量 조합에 대한 最大容量과 그 때의 信號燈時間을 구할 수 있다.

나. Leading Left Turn Green의 경우



UD: 이 期間동안에 도착하는 左回轉車輛은 φII 동안 直進의 左回轉車輛 利用을 防할 能.

그림 2. Leading Left Turn Green의 경우

그림 2에서 보는 바와 같이 φII 동안의 直進車輛이 左回轉車線을 이용하지 못하는 경우는 φI 동안에 도착하는 左回轉차량 때문이다. 바꾸어 말하면 直進이 左回轉車線을 100% 이용할 경우는 첫째: 左回轉信號동안 모든 좌회전차량이 남김없이 통과해야 하며, 동시에 둘째: φII 동안 좌회전차량이 한대도 도착하지 않는 경우이다. 첫째조건을 만족시키면서 동시에 이 φII 기간동안 1대의 左回轉이 도착한다면 그 차량의 平均到着時點이 이 기간의 중간시점이라고 할 때 그 기간 이전에 도착한 直進만 左回轉車線을 이용하고 그 이후의 직진차량은 直進車線을 이용할 것이므로 이용율은 50%이다. 마찬가지로 이 기간 동안 左回轉차량의 도착율이 K臺이면 直進의 좌회전車線 이용율은 100/K+1%가 될 것이다.

Lagging Left Turn Green의 경우에는 이용율이 週期와 左回轉信號길이, 左回轉交通量의 함수이지만, Leading Left Turn Green에서의 이용율은 直進信號의 길이와 左回轉交通量의 함수이다. 이 두가지의 경우를 비교하기 위해서는 이

들 각 變數를 통일시켜야 하므로 Leading Left Turn Green에서의 直進信號길이를 한 接近路의 總綠色時間에서 左回轉信號時間을 뺀 값으로 나타냈으며 그 接近路의 總綠色時間을 다시 週期와 두 交叉道路의 總綠色時間 比率로 나타내었다. 그러므로 Leading Left Turn Green에서는 (29×17×25×9)개의 이용율을 구할 수 있고 이를 이용하여 같은 수의 接近路 容量을 구할 수 있다. 이와 같이 해서 구한 接近路 容量을 다시 조합을 구성해서 交叉路의 容量을 구하며 그 방법은 Lagging Left Turn Green 때와 동일하다.

利用率을 구하기 위한 前提가 되는 두조건(앞에서 언급한) 중에서 첫째 조건을 만족시키기 위한 확률(φI)은 다음과 같이 表示할 수 있다. 즉,

$$\phi_1 = \sum_{i=0}^{\infty} P(i; \mu_1) \sum_{j=0}^{2s-i} P(j; \mu_1) \sum_{k=0}^{3s-j} P(k; \mu_1) \dots \dots P(y; \mu_1) \sum_{z=0}^{\infty} P(z; \mu_1) \quad (1)$$

여기서

$P =$ Poisson 確率分布函數,

$i, j, k, \dots, y, z =$ 連續된 週期에서 한 週期內에서의 左回轉 到着臺數를 나타내는 確率變數

$\mu_1 =$ 한 週期內에서의 左回轉 平均到着臺數

$s =$ 주어진 左回轉 信號時間동안의 飽和流率(臺)

그러므로 μ_1 은 週期和 左回轉交通量에 따라 달라지며, s 는 左回轉信號時間에 左右된다.

둘째조건에서 直進時間동안 平均 μ 臺의 左回轉이 도착한다고 할 때 x 臺가 到着할 確率は

$$P(x; \mu) = \frac{\mu^x e^{-\mu}}{x!}$$

로 나타나며 이 때의 直進의 左回轉車線 利用率은 $P(x; \mu) \times \frac{1}{x+1} \approx \frac{\mu^x e^{-\mu}}{(x+1)!}$

이다. 따라서 x 가 0에서 無限大까지 변하므로 平均 利用率(φ2)은 다음과 같이 表示된다. 즉,

$$\phi_2 = \sum_{x=0}^{\infty} P(x; \mu) \frac{1}{x+1} = \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\mu^x e^{-\mu}}{(x+1)!} \quad (2)$$

5. 研究結果

앞에서 언급한 바와같이(그림 1, 2 참조) 直進時間동안 직진이 좌회전차선을 100% 이용하지 못하는 경우는;

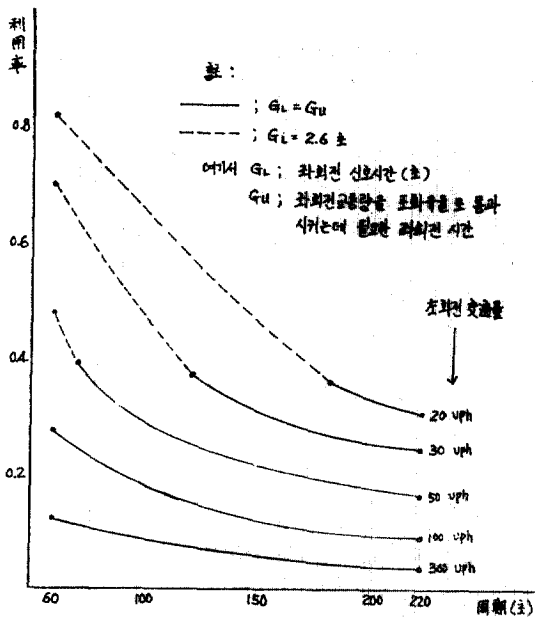


그림 3. 週期, 左回轉交通量과 利用率 (Lagging Green)

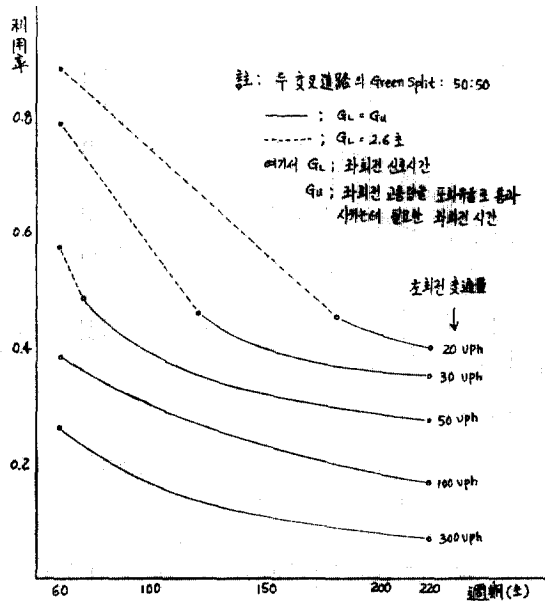


그림 4. 週期, 左回轉交通量과 利用率 (Leading Green)

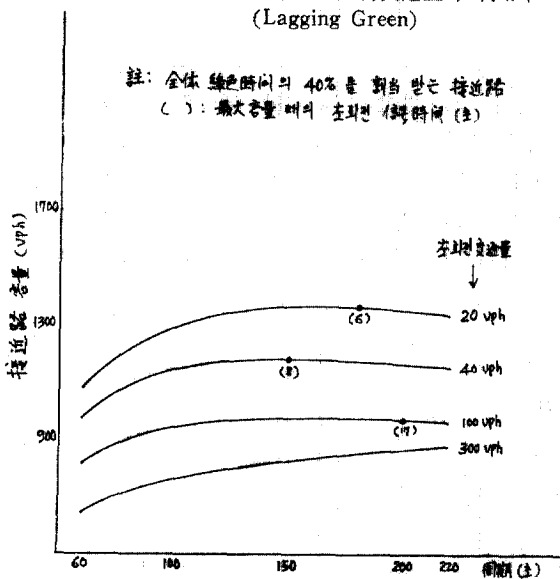


그림 5. 週期, 左回轉交通量과 接近路容量 (Lagging Green)

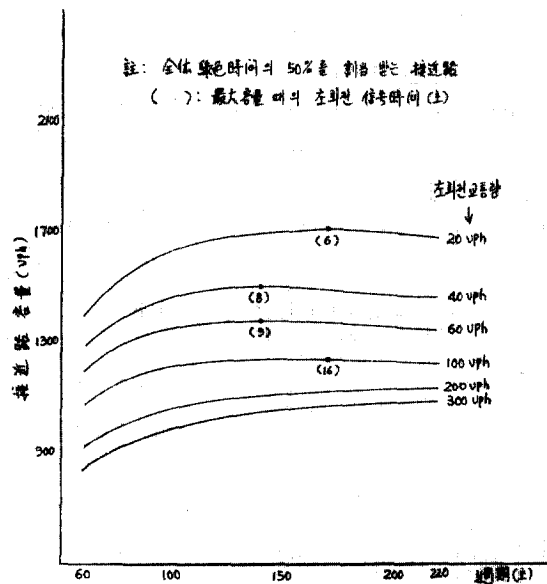


그림 6. 週期, 左回轉交通量과 接近路容量 (Lagging Green)

가. Lagging Left Turn Green 때는 全週期에서 左回轉信號時間을 켜 시간동안에 左回轉차량이 도착할 경우와

나. Leading Left Turn Green 때는 直進時間 동안에 左回轉이 도착할 경우이다.

그러므로 前者의 경우가 後者の 경우보다 左回轉차선 利用率이 낮음을 알수가 있다. 이때

左回轉차량이 도착하여 直進의 左回轉車線 이용에 영향을 주는 시간은 前者에 대해서는 (週期-左回轉信號時間)이며 後者に 대해서는 直進信號時間이므로 두 利用率의 차이는 (週期-直進時間-左回轉時間) 즉, 접근로의 綠色時間이 짧으면 짧을 수록 커진다. 뿐만 아니라 그림 3, 4에서

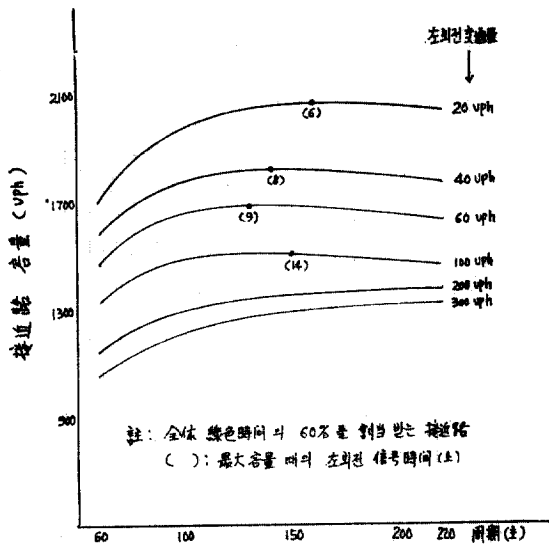


그림 7. 週期, 左回轉交通量과 接近路容量 (Lagging Green)

보는 바와 같이 左回轉交通量이 커질수록 이 이용율의 차이는 커진다.

Lagging Left Turn Green 때의 直進의 左回轉車線 이용율에 따른 全綠色時間의 40%, 50%, 60%를 할당받는 接近路의 容量은 그림 5, 6, 7에 보이는 바와 같다. 이에 대응하는 Leading Left

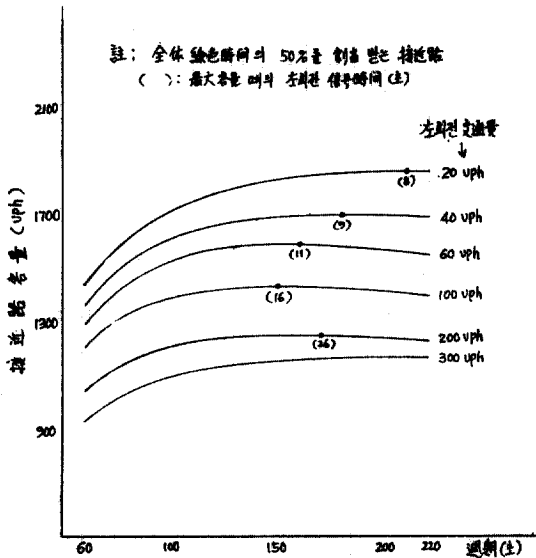


그림 9. 週期, 左回轉交通量과 接近路容量 (Leading Green)

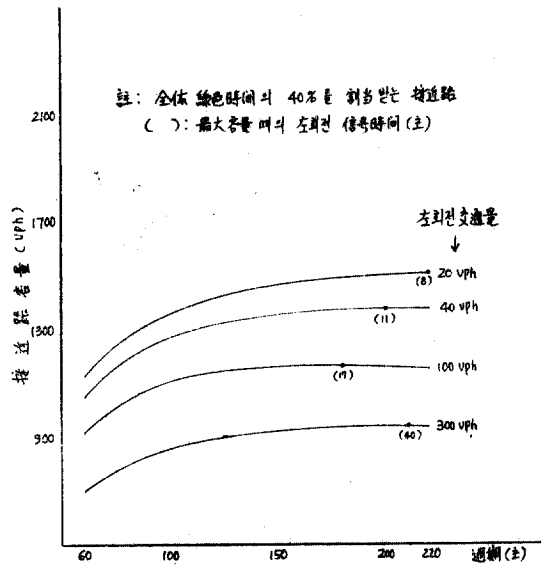


그림 8. 週期, 左回轉交通量과 接近路容量 (Leading Green)

Turn Green 의 경우는 그림 8, 9, 10에 나타나 있다.

서로 대응하는 두 그림을 비교하면 알 수 있는 바와 같이 週期와 左回轉 交通量에 따른 接近路容量의 변화는 같은 양상을 나타내지만 Leading Green 制度가 Lagging Green에 비해서 접근로용량이 훨씬 크다. 週期와 左回轉交通量 및 接近路의 Split에 따른 Leading Green 때의

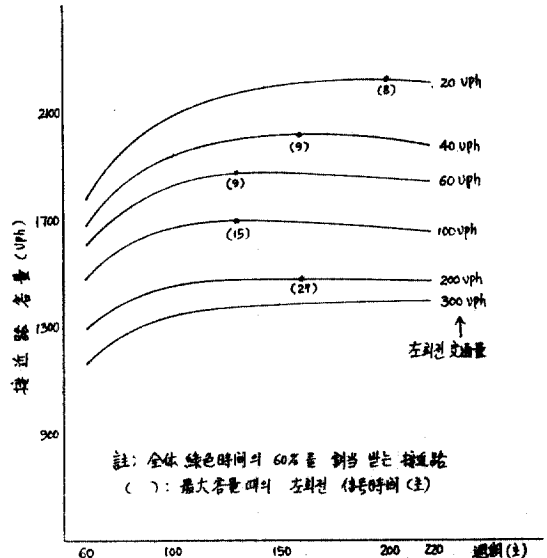


그림 10. 週期, 左回轉交通量과 接近路容量 (Leading Green)

접근로용량의 增加分을 表로 나타내면 아래와 같다.

한 接近路의 split이 40%이면 다른 交叉接近路의 split은 60%이며 또 이때 두 접근로의 증가분의 평균은 50% 때의 증가분과 거의 一致하므로 교차로 전체에 대한 증가분은 50% split의 接近路에 대한 증가분과 一致한다고 볼 수 있다. 그러므로 예를 들어 120초 週期를 갖는 信號燈交叉路에서 두 접근로의 좌회전교통량이 150 vph 이고 나머지 두 접근로의 左回轉交通量이 200 vph 일때 Lagging Green에 비해 Leading Green 信號制度로써 얻을 수 있는 交叉路容量 증가는 약 14.5%이다.

最大容量을 나타내는 左回轉시간은 주어진 左回轉交通量이 통과하는데 필요한 시간보다 길다. 그 이유는 左回轉信號時間을 길게해 주면 直進의 信號時間이 감소하는 대신 直進의 左回轉車線 利用率이 증가하므로, 左回轉信號時間보

다 긴 어느 信號時間에서 最大容量을 나타내게 된다. 통상 左回轉交通量이 100(vph) 以下에서는 1.5~2.5배 길며 그 이상의 左回轉交通量에 대해서는 1~1.5배 길다. 물론 이러한 경우는 주어진 시나리오의 도로조건에 限해서만 적용되며 이 보다 많은 車線의 도로에서는 最大容量을 나타내는 좌회전시간은 左回轉所要시간보다 그리 크지않을 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 Leading Green 때 주어진 左回轉交通量에 대하여 最大容量을 나타내는 週期는 Lagging Left Turn Green 경우의 最大容量을 나타내는 週期보다 조금 길며 左回轉信號時間도 이에 비례해서 길어진다.

지금까지의 해석은 한 接近路에 국한된 것이었으나 交叉路의 4 접근로는 각각 상이한 左回轉交通量을 가질 수 있으므로 한 接近路에 대한 最適信號燈時間(容量을 最大로 하는 信號時間)이 다른 접근로에 대해서도 最大의 容量을 나타

表 1. Leading Green 때의 接近路容量增加分(%)

split		週期(초)	V ₁₁ (vph)								
			60	80	100	120	140	160	180	200	220
40%	20	4	6	7	8	9	10	11	12	13	
	50	9	11	13	15	16	18	19	19	20	
	100	13	15	17	19	20	19	19	19	19	
	150	14	17	18	18	18	18	17	16	15	
	200	14	16	16	16	16	15	14	14	13	
	250	12	14	15	15	14	13	12	11	11	
	300	10	12	13	13	12	11	10	9	8	
50%	20	4	5	6	7	8	8	9	10	11	
	50	8	10	11	12	14	14	15	15	15	
	100	11	14	15	15	16	15	15	15	14	
	150	13	15	15	15	14	14	13	12	11	
	200	13	14	14	14	13	12	11	10	9	
	250	13	13	13	12	11	10	9	9	8	
	300	11	12	12	11	10	9	8	7	6	
60%	20	3	4	6	6	6	7	8	8	9	
	50	7	8	9	10	10	11	11	12	12	
	100	10	12	11	12	12	12	11	11	10	
	150	12	11	12	12	11	10	9	9	8	
	200	12	12	12	11	9	9	8	7	6	
	250	11	11	11	9	8	7	7	6	5	
	300	10	11	9	9	7	6	6	5	5	

낸다고는 볼 수 없다. 그러므로 個個의 接近路의 容量과 이때의 信號燈時間의 組合으로써 交叉路의 最大容量을 나타내는 信號燈時間을 얻을 수 있다. 예를 들어 40%의 split을 갖는 두 接近路의 左回轉交通量이 60 vph와 70 vph이며 60%의 split을 갖는 두 접근로의 좌회전 交通量이 100 vph와 120 vph인 交叉路에서 Lagging Left Turn Green 방식 때의 最大容量은 週期 160초, 40% split 道路의 左回轉時間 11초, 다른 도로의 左回轉時間이 17초 때이며 그 값은 5081 臺/時間이다. 그러나 Leading Left Turn Green 방식 때의 最大容量은 週期 160초, 40% split 道路의 左回轉時間 12초, 다른 道路의 좌회전시간이 19초 일때 나타나며 그 값은 5827 臺/時間으로써 14.7%의 증가를 보인다.

6. 結 論

左回轉車線을 左回轉交通과 直進交通이 같이 사용하는 특이한 信號燈交叉路 運營方式에서의 交叉路容量算定이나 遲滯量算定, 또는 信號燈時間設計는 지금까지 통상적으로 사용하고 있는 方法으로는 설명할 수가 없으며 또 適合하지도 않다. 특히 外國과는 달리 過飽和상태가 대부분인 우리나라 交叉路에서의 信號燈時間設計는 무엇보다도 交叉路의 容量을 增大시키는데 主眼點을 두도록해야 한다(물론 過度한 遲滯가 일어나지 않는 범위내에서).

本 研究는 Leading Left Turn Green 방식을 채택할 때 現在의 Lagging Left Turn Green의 경우와 비교하여 容量이 얼마만큼 增加하며, 또 最大容量을 나타내는 信號燈時間에는 어떤 차이가 있는지를 비교 분석했다.

Leading Left Turn Green 방식을 채택할 경우 Lagging Left Turn Green 방식에 비해서 交

叉路의 容量이 增加하며 특히 左回轉交通量이 100~150 vph 일때 약 15%의 증가를 보임으로써 가장 效果가 크다.

最大容量을 나타내는 週期는 Leading Green 때가 Lagging Green 때 보다 길며 左回轉信號時間도 마찬가지이다.

最大容量을 나타내는 左回轉時間은 주어진 左回轉交通量이 飽和流率로 통과하는데 필요한 時間보다 1~2.5배 길다. 그러나 本 研究에서 사용된 交叉路보다 적은 경우에는 이 배율이 1에 가까워 질 것이다.

參 考 文 獻

1. 都哲雄, "直進交通의 左回轉車線 利用率 推定과 交叉路容量, 最適信號燈時間의 算定", 大韓交通學會誌, 1983. 4.
2. Webster, F.V., Traffic Signal Settings, *Road Research Technical Paper No. 39, Scientific and Industrial Research, RRL, 1958.*
3. Do, Cheol Ung, "An Evaluation of Traffic Flow Performance Measures in a Linear Arterial Network", *Ph. D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison, 1978*, pp. 178~185.
4. US DOT., *Traffic Control Systems Handbook, 1976*, p. 62.
5. Bauer, C.S., "Some Energy Considerations in Traffic Signal Timing", *Traffic Engineering, ITE, 1975*, pp. 19~25.
6. Courage, K.G. and S.M. Paraper, "Delay and Fuel Consumption at Traffic Signals", *Traffic Engineering, ITE, Nov. 1975*, pp. 23~27.
7. Cohen, S.L. and G. Euler, "Signal Cycle Length and Fuel Consumption and Emissions", *TRB Record 677, TRB, 1979*, pp. 41~48.

(接受: 1983. 4. 16)