

□ 論 文 □

연동신호제어계 교통류 지연
連動信號制御系에서의 交通流의 遲延
 — Random 遲延을 中心으로 —
 (Stochastic Delay at Linked Signals)
 이 광 호
 李 光 勳
 (日本大學交通土木工學科博士過程)

目	次
I. 序 論	IV. 連動信號交差路의 遲延모델
II. 連動制御信號交差路에서의 車輛의 到着分布	V. 모델의 檢證
III. 連動信號交差路의 랜담(random)遲延	VI. 信號週期(cycle)와 遲延과의 關係
	VII. 結 論

————— ABSTRACT —————

With respect to stochastic delays at linked signals the solid quantitative information has not been available as yet. On the basis of field data the values of "I" (variance-mean ratio of flow) were related with the rate of flow. The stochastic delays with specific "I" values were obtained from the distribution of overflow queue, which were calculated by the use of Markov chains. The examination of the results led to the derivation of a simple method for calculating stochastic delays through the introduction of "I" into Miller's model. The good agreement was shown between the model and the field. The relationships between the cycle lengths and delays were examined in a large number of conditions with regard to degree of saturation, signal split and link length. Within the practical range of cycle length uniform delays were dominant and no critical point was found in terms of minimum delay. In highly saturated conditions, however, the weight of stochastic delay is noticeable.

I. 序 論

連動信號信號로 制御되는 交通流는 車群(platoon)을 形成, 擴散하면서 下流의 交差路에 到着하게 된다.

따라서, 到着交通流는 一般的인 信號遲延모델에서 假定하고 있는 포아송(Poisson) 到着과는 차이가 있다.

到着交通流의 변동을 到着台數의 평균치에 대한 分散比(以下, I로 함)로 나타내는 방법

으로써 기존의 遲延모델을 修正한 모델이 몇몇 제안되었다.²⁾³⁾⁴⁾

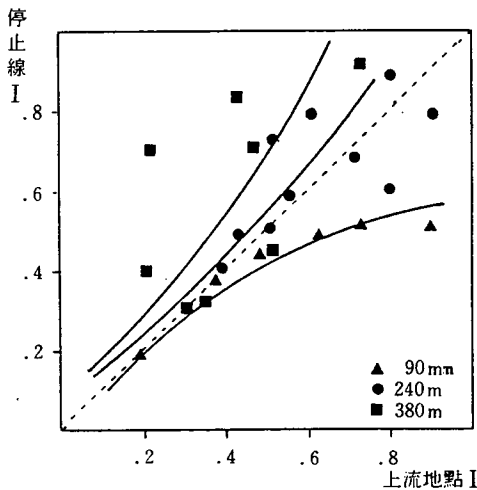
이들 모델의 대부분은 獨立交差路를 對象으로 開發된 理論的 모델로, 一般街路網에 대해서는 현실적 適用性이 충분하지 못하다.

본 연구에서는 連動制御하에서의 遲延을 랜담遲延(Random delay)에 중점을 두고 검토하였다.

II. 連動制御信號交差路에서의 車輛의 到着分布

連動信號로 制御되는 交通流에서 車輛의 到着分布는, 連動링-크(link)의 上流側地點과 下流側停止線에서 6초간격의 스텝별로 到着分布를 조사하여 各I의 값을 구하였다. 이 경우, 停止線에서는 待機行列(Queue)과 赤信號의 영향을 받지 않는 交通流만을 대상으로 하였다.

〈그림 2-1〉은, 380m, 240m 및 90m의 길이를 가진 세링-크에 대해서 上流側地點과 下流側停止線에서의 I의 關係를 나타낸 것이다. 그림의 데이터는 飽和度(Saturation degree)가 0.7의 경우를 예로 든 것으로, I의



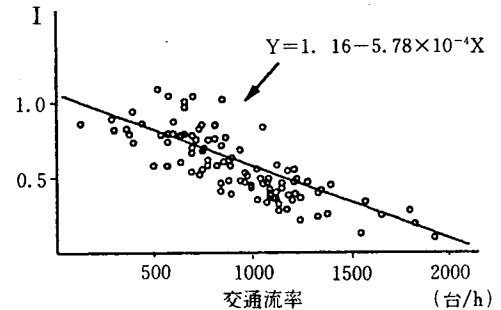
〈그림 2-1〉 上流地點 I와 停止線 I의 關係

값은 전 데이터가 1.0보다 작은 값을 보이고 있다. 이 결과 連動制御에서의 車輛到着分布가 二項分布(binomial distribution)를 보이고 있음을 알 수 있다.

또, 링-크길이 가 길면 길수록 下流部의 I는 上流部의 I보다 커지는 경향을 보여, 車群擴散現象을 잘 나타내고 있다. 단지 90m에서 반대 현상이 일부 보이는 것은 上流에서 관측된 低密度의 車群 바로 뒤에 過密度의 車群이 계속된 경우, 下流에서 관측된 결과에 의한 것이다.

〈그림 2-2〉는 사이클베이스(cycle base)로 飽和度에 關係 없이 전부의 I에 대해서 各平均流率과의 關係를 나타낸 것으로(3링-크 전부포함), 流率(flow rate)이 높을 수록 I가 작아지는 것을 알 수 있다. 兩者의 關係를 1次式으로 回歸하면, 式(1)과 같다.

$$Y = 1.16 - 5.78 \times 10^{-4} X \quad \dots(1)$$



〈그림 2-2〉 交通流率과 I의 關係

앞으로, 本研究에서 使用할 記號는 다음과 같다.

C : 信號週期(秒)

G : 有效青時間(秒)

$\lambda = G/C$: 스플릿(split)(%)

$\times = qC/GS$: 飽和度(Saturation degree)

S : 飽和交通流率(Saturation flow rate)
(台/秒)

q : 到着流率(Arrival flow rate)(台/秒)

- I : 平均到着台數에 대한 分散比(S^2/m)
- N_{GE} : 靑時間끝에서의 過剩待機台數(台)
- D : 遲延(秒/台)
- D_u : 均一遲延(Uniform delay)(秒/台)
- D_r : 랜담遲延(Random delay)(秒/台)

III. 連動信號交差路의 랜담(Random)遲延

1. 從來의 研究

Poisson到着($I=1$)을 假定하고 있는 信號遲延모델 중 가장 代表的인 것은 Webster² 모델이라 하겠다.(式(2))

$$D = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} + \frac{X^2}{2q(1-X)} - 0.65 \frac{C}{q^2} X^{1/3} \dots(2)$$

여기서 第1項은 到着率 q를 確定的인(deterministic) 定常入力(steady-state) 상태로 假定한 경우의 遲延을 나타낸 것으로 소위 均一遲延(Uniform delay)이다.

第2項은 定常포아손入力下에서 確定的인 서비스시간 $1/\lambda S$ 에 의한 待機行列에서의 遲延, 즉 Random遲延이다.

또, 3項은 實驗데이터에 의한 修正項이다.

式(2)는 均一遲延과 random遲延만으로 다음과 같은 基本式으로 표현할 수 있다.

$$W = W_1 + W_2 \dots(3)$$

式(3)의 第2項에 대해서 到着流의 變動指標 I를 使用하여, 每사이클의 過剩台數(overflow vehicles)를 구함으로써, 信號遲延을 산출하는 방법이 Miller²와 Newell³에 의해 제안 되었다.

Miller는 N_{GE} 를 式(4)로 구하여, 그 때의 信號遲延을 式(5)로 나타내고 있다.

$$N_{GE} = \frac{\text{EXP}[-1.33\sqrt{SG} \cdot (1-X)/X]}{2 \cdot (1-X)} \dots(4)$$

$$D_{\text{Miller}} = \frac{(1-\lambda)^2 C}{2(1-\lambda X)} + \frac{1-\lambda}{1-\lambda X} \cdot \frac{N_{GE}}{q} \dots(5)$$

한편, Newell은 停止線에서의 到着, 出發交通流의 變動 $\text{Var}(A)$, $\text{Var}(D)$ 를 使用하여, 똑같이 靑時間끝에서의 平均待機台數를 利用하여 그때의 信號遲延을 式(6)로 구하고 있다.

$$D_{\text{Newell}} = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda X)} + \frac{I H(\mu) X}{2q(1-X)} + \frac{I(1-\lambda)}{2S(1-\lambda X)^2} \dots(6)$$

2. Markov chain에 의한 random遲延의 계산

본 연구에서는 靑時間끝에서의 平均待機台數, N_{GE} 를 구하는 방법으로서 Markov chain을 使用했다.

Markov chain을 使用하여 正常狀態下에서의 待機台數分佈를 계산함으로써 N_{GE} 를 정확히 구하는 것이 가능하다.

1) Markov chain에서 到着패턴을 나타내는 Input matrix로서는, 實測된 I값이 1.0보다 작았던 것으로 부터 二項分佈를 利用했다.

$$A = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & \dots \\ 0 & a_0 & a_1 & a_2 & \dots \\ 0 & 0 & a_0 & a_1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & a_0 & \dots \end{pmatrix}$$

a_i = 二項分佈에서 i台的 車가 일정시간(cycle)동안 到着하는 확률

또, 出發패턴을 나타내는 Output Matrix는 靑時間과 飽和交通流率(saturation flow rate)에 의해 정해지는 일정값을 갖는 matrix로 했다.

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1-e_0 & e_0 & 0 & 0 & \dots \\ 1-e_0-e_1 & e_1 & e_0 & 0 & \dots \end{pmatrix}$$

$$e_i = \begin{cases} 1 & \text{for } i=S \cdot G \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

이 경우 Markov chain의 遷移確率行列(transition probability matrix)은 다음과 같이 나타내 진다.

$$P = A \cdot E$$

遷移確率行列 P는 확률 P_{ij} 의 매트릭스로, P_{ij} 는 1사이클 동안에 待機行列台數가 初期狀態 i 로부터 最終狀態 j 로 변하는 확률을 나타내고 있다.

$$P = \begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,m} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m,1} & P_{m,2} & \dots & P_{m,m} \end{pmatrix}$$

시스템의 初期狀態確率は 다음과 같은 行벡터로 표현된다.

$$P(0) = [P_1(0), P_2(0), \dots, P_m(0)]$$

또, Markov chain에서 狀態確率は 初期狀態로부터 독립적인 定常確률 P*에 收束한다.

$$P(n+1) = P(n) \cdot P$$

$$P(n+1) = P(n) = P^*$$

여기서, n은 時点を 意味함.

m個의 상태를 가진 markov chain에서 行列方程式은 다음과 같은 連립 1차 방정식을 구성한다.

$$[P_1 \dots P_m] = [P_1 \dots P_m] \begin{pmatrix} P_{1,1} & \dots & P_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m,1} & \dots & P_{m,m} \end{pmatrix}$$

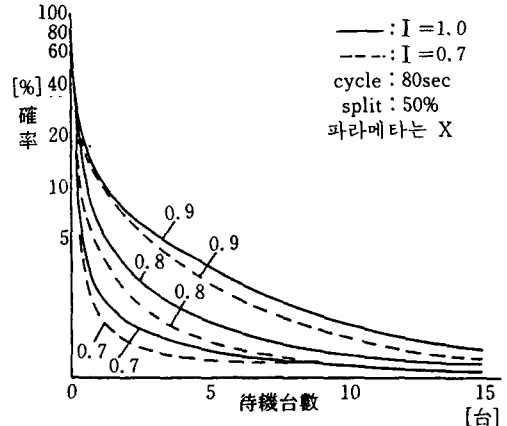
여기서 P_i 는 定常狀態下에서 狀態 i 가 발생할 확률이다.

또, P_i 값을 정하기 위한 制約條件은 다음과 같다.

$$P_1 + P_2 + \dots + P_m = 1.0$$

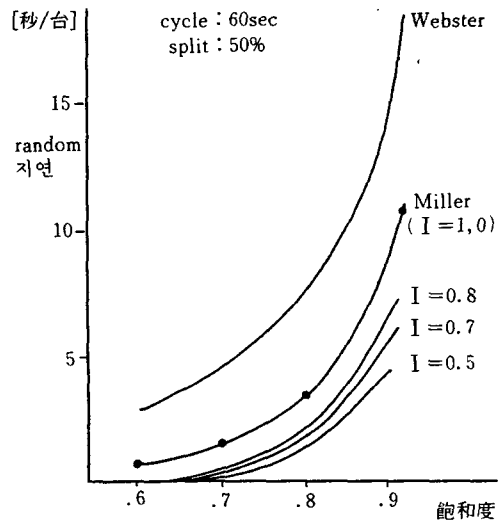
한편 본 연구의 Markov chain에서는 到着流率과 I값을 사이클베이스(cycle base) 평균값을 사용했다.

2) <그림 3-1>은 靑時間끝에서의 待機行列分布의 계산결과를 例示한 것으로 $I=1$ 의 경우는 도착분포를 포아손分布로, $I=0.7$ 의 경우는 도착분포를 二項分布로 하여 각 Markov chain에 의해 구해진 결과이다. 또 靑時間끝에서의 평균대기대수는 대기대수의 分布로부터 구해진다.



<그림 3-1> Markov chain에 의한 待機行列 分布

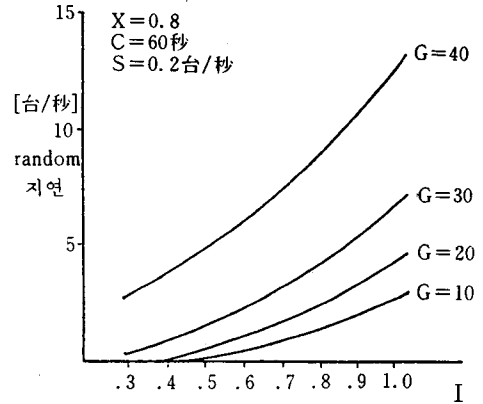
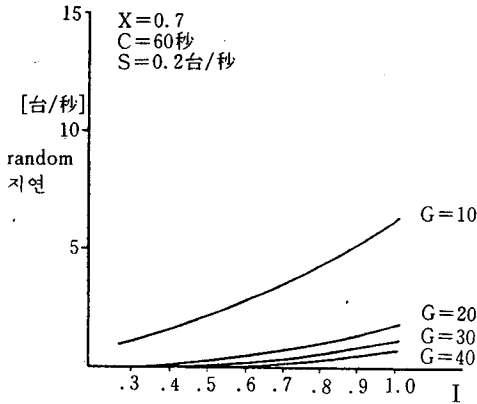
<그림 3-2>는 포아손到着을 가정하고 있는 기존 모델에 의한 random遲延과 二項分布로 각 I값에 의한 Markov chain의 결과를, 각 飽和度別로 나타낸 것이다. Markov chain의 결과가 기존의 遲延모델의 결과보다 훨씬 작은 값을 나타내면서, 또 I값이 커질수록 random遲延이 높아지는 것을 알 수 있다. 참고로 $I=1$ 의 경우는 Miller의 결과와 거의 일치하고 있다.



<그림 3-2> 既存지연모델과 Markov에 의한 random지연의 비교

이 결과로부터 到着流의 I 값이 0.6~0.8 사이에 있는 連動信號交差路에 있어서는 기존 모델의 random遲延이 과대평가되고 있음을 알 수 있다.

〈그림 3-3〉, 〈그림 3-4〉는 각 I 값에 대해서 split에 의한 random遲延의 差를, 포화도 0.7, 0.8의 2케이스에 대해서 나타낸 것이다. split가 작아 질 수록 또 포화도가 높아



〈그림 3-3〉 Split에 의한 random지연(X=0.7)

〈그림 3-4〉 Split에 의한 random지연(X=0.8)

〈表 3-1〉 車群패턴과 random遲延

飽和度 SPLIT		0.7				0.8				0.9									
		0.5		0.6		0.7		0.5		0.6		0.7							
車群PATTERN	m	11.5 6.0		12.6 8.4		14.7 9.8		12.0 8.0		14.4 9.6		16.8 11.2		13.5 9.0		16.2 10.8		18.9 12.6	
		Case 1 6:4 	I	0.7	0.9	0.6	0.8	0.5	0.7	0.6	0.8	0.5	0.7	0.4	0.7	0.8	0.7	0.4	0.7
Dr	0.1			0.0		0.0		0.8		0.4		0.1		5.4		2.6		1.7	
m	12.3		5.3	14.7	6.3	17.2	7.3	14.0	6.0	16.8	7.2	19.6	8.4	15.8	6.7	18.9	8.1	22.1	9.6
Case 2 7:3 	I	0.6	0.9	0.5	0.9	0.4	0.8	0.5	0.9	0.4	0.8	0.3	0.8	0.4	0.9	0.4	0.8	0.2	0.7
	Dr	0.1		0.0		0.0		0.7		0.2		0.1		3.7		3.5		1.1	
	m	14.0	3.5	16.8	4.2	19.6	4.9	16.0	4.0	19.2	3.8	22.4	5.6	18.0	4.5	21.6	5.4	25.2	6.3
Case 3 8:2 	I	0.5	1.0	0.4	1.0	0.3	0.9	0.4	1.0	0.3	1.0	0.2	0.9	0.4	1.0	0.3	0.9	0.2	0.9
	Dr	0.1		0.0		0.0		0.5		0.0		0.0		3.7		2.0		0.6	
	m	17.5		21.0		24.5		20.0		24.0		28.0		22.5		27.0		31.5	
Case 4 	I	0.4		0.3		0.2		0.3		0.2		0.0		0.2		0.0		0.0	
	Dr	0.0		0.0		0.0		0.1		0.0		0.0		0.4		0.0		0.0	
	m	17.5		21.0		24.5		20.0		24.0		28.0		22.5		27.0		31.5	
Case 5 	I	0.8		0.7		0.6		0.7		0.6		0.6		0.7		0.6		0.5	
	Dr	0.3		0.1		0.0		1.0		0.4		0.2		5.8		3.8		1.7	
	m	17.5		21.0		24.5		20.0		24.0		28.0		22.5		27.0		31.5	

질 수록 split에 의한 random遲延의 差가 커지는 것을 알 수 있다.

3. 車群패턴과 random遲延

앞에서 논한 Markov chain의 계산결과는 到着流率과 I를 사이클베이스의 평균값을 사용하였다. 그러나 連動信號制御系의 交通流은 上流側의 信號制御에 의해 車群을 형성하며 도착하게 된다.

따라서 各車群의 到着流率과 I는 사이클베이스의 평균값과는 틀린 값을 갖게 된다. 여기에서는 <표 3-1>에 나타낸 것과 같이 到着流가 두개의 方形波流(rectangular wave)로 형성되는 4種類의 패턴과 한개의 方形波流(사이클베이스)에 의한 것에 대해서 각기 틀린 飽和度, split를 이용하여 각 케이스별로 random遲延을 구했다.

그 결과 車群패턴을 고려한 Markov chain의 계산결과가 사이클베이스의 결과보다 그 差는 적지만 random遲延이 낮은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 飽和度 0.9의 경우를 제외하고는 그 差는 무시할 수 있는 것으로부터, 사이클베이스의 到着流率과 I를 사용해도 거의 만족할 만한 결과가 얻어질 수 있음을 알 수 있다.

IV. 連動信號交差路의 遲延 모델

III장에서는 Markov chain에 의해서 구해진 random遲延과 I값, 信號파라메타, 飽和度와의 관계를 알아 보았다,

그 결과 連動信號制御系에서 信號遲延을 구하는 데에 있어서 I가 중요한 파라메타라는 것을 알았다.

여기에서는 random遲延을 I값을 이용함으로써 구할 수 있는 하나의 모델을 제시 하고자 한다.

모델의 型은 일반적으로 잘 알려진 Webster 모델로 기본으로 하여 式(7)과 같은 均一遲延

項과 random遲延項으로 표현했다.

$$D = D_1 + D_2 \dots\dots\dots (7)$$

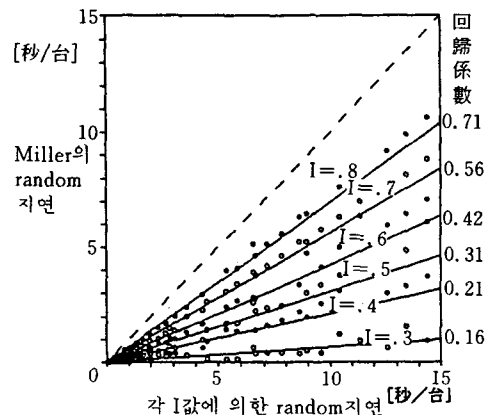
D₁에 대해서는 Robertson⁶⁾의 擴散모델을 이용하여, 링-크 上流끝에서 每 scan(4秒)마다의 flow-profile로부터 下流의 停止線에서의 到着 flow-profile을 구해서 均一遲延을 계산하는, 이른바 Transyt의 개념을 사용했다.

D₂에 대해서는 Markov Chain의 結果와 一致하는 Miller의 第2項을 기본으로 하여 개발했다. D₂를 정식화하기 위하여 Miller의 N_{GE}와 Markov Chain의 N_{GE}의 관계를 알아 보았다. <그림 4-1>은 각 I에 대해서 Markov chain에 의해서 얻어진 N_{GE}의 값을 Miller의 第2項에 代入해서 구한 random遲延과 Miller의 近似式으로부터 계산된 random遲延을 비교한 것이다.

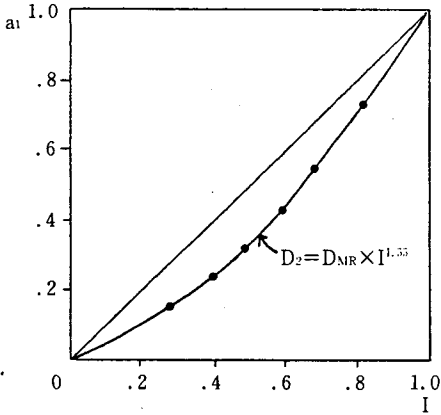
각 I에 대해서 Markov chain의 random遲延과 Miller의 random遲延 사이에는 명확한 線型關係가 있는 것을 알 수 있다.

그림에서 直線은 각 I에 대해서 原点回歸의 결과로 回歸係數을 동시에 나타내고 있다.

<그림 4-2>는 <그림 4-1>에서의 回歸係數 a_i의 값과 각 I의 값과의 관계를 나타낸 것이다.



<그림 4-1> Miller와 Markov chain에 의한 random지연의 관계



〈그림 4-2〉 直線回歸係數와 I의 관계

그림의 曲線이 보여 주듯이 兩者의 관계는 $a_1 = I^n$, ($n=1.55$)의 指數關係로 표현 될 수 있다.

따라서 random遲延 D_2 는 式(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_2 = D_{MR} \cdot I^{1.55} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 D_{MR} 은, Miller의 random遲延

結局, 連動信號制御交差路의 信號遲延은 다음과 같이 표현할 수 있다.

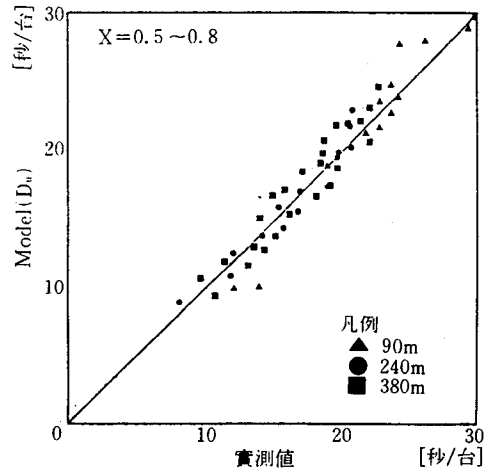
$$D_{cood} = D_1 + D_{MR} \cdot I^{1.55} \dots\dots\dots (9)$$

V. 모델의 檢證

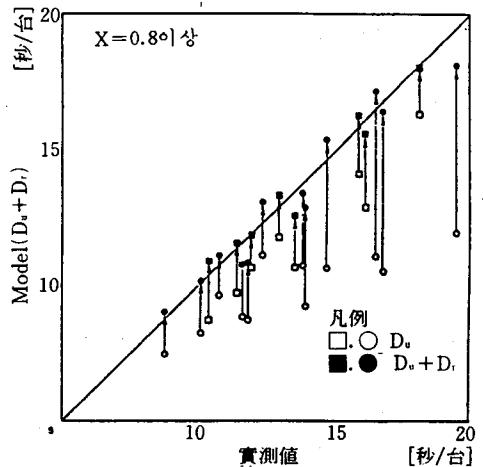
IV장에서 提案한 모델을 檢證하기 위하여, 3區間의 링-크로부터 얻어진 데이터에 의한 遲延과 모델에 의한 遲延을 사이클베이스로 비교했다.

實測遲延은 넘버프레이트(Number plate)法에 의해서 구했다. 한편 모델의 均一遲延은 링-크 上流流入部에서 관측된 flow-profile로부터 Rebertson의 車群擴散모델을 이용, 停止線에서의 flow-profile을 구해 계산했다. 또 모델에 대한 random遲延은 III장에서 설명한 방법에 의해 계산했다. 飽化度 0.5~0.8에서의 random遲延은 무시해도 좋을 정도로 작기 때문에 모델의 均一遲延만으로 實測値와

비교했다. 〈그림 5-1〉은 양자의 관계를 나타낸 것으로 거의 일치하는 좋은 결과를 보이고 있다. 飽化度가 0.8을 넘는 경우에 대해서는 random遲延을 무시할 수 없기 때문에 均一遲延에 random遲延을 더한 全遲延($D_u + D_r$)과 實測値를 비교하였다. 〈그림 5-2〉에 나타난 대로 飽化度가 높을 경우에는 random遲延의 비중이 크을 알 수 있다.



〈그림 5-1〉 實測値와 모델値(D_u)의 비교



〈그림 5-2〉 實測値와 모델値($D_u + D_r$)의 비교

VI. 信號週期와 遲延과의 관계

1) 運動制御의 最適化(optimization)에 있어서 信號週期(Cycle)는 綠燈(oddset) 다음으로 중요한 制御파라메타이다.

綠燈은 均一遲延을 지배하는 성질을 갖고 있는 반면, 信號週期는 均一遲延과 random遲延의 쌍방에 영향을 준다.

信號週期가 遲延에 끼치는 영향에 대해서 알아보기 위하여, 飽化度를 0.7~0.8, 0.9~0.95의 4水準, 스프리트(Split)를 0.4, 0.5, 0.6의 3水準으로 하는 各條件에 대하여 또 信號週期가 각각 60, 80, 100, 120秒의 경우 즉, $4 \times 3 \times 4 = 48$ 케이스에 대하여 random遲延을 IV章에서 제안한 모델에 의거 계산했다.

또 위의 48케이스의 各條件에 대해서 링-크길이 100, 200, 300, 400, 500m인 경우, 즉, 240케이스의 均一遲延을 TRANSYT-7F를 이용하여 계산했다. 이 경우 링-크에의 流入은 矩形波流로 했다. 또 綠燈(offset)에 대해서는 링-크 往復旅行時間과 信號週期(cycle)의 관계로 부터 平等綠燈의 最適綠燈을 취했다.

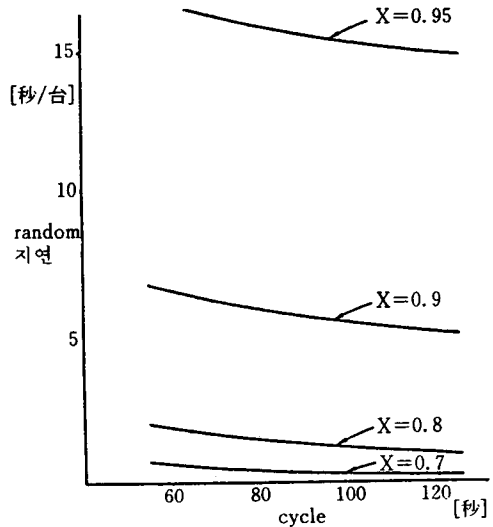
2) 스프리트(split) 0.5의 경우를 예로 random 遲延과 信號週期の 關係를 나타내면 <그림 6-1>과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 飽化度가 높아 질수록 짧은 信號週期에서 過剩流(overflow)의 작용이 강하게 나타난다. 하지만 전체적으로는 飽化度 그 자체의 영향이 현저히 큼을 알 수 있다.

3) 均一遲延과 random遲延의 합계, 즉 總遲延의 特性에 대해서 대표적인 예를 나타내면 <그림 6-2>, <그림 6-3>, <그림 6-4>와 같다. 그림에 따르면 信號週期和 遲延의 關係는 均一遲延의 特性이 지배적으로 random遲延과의 상호작용에 의한 중요한 特性은 거의 보이지 않았다.

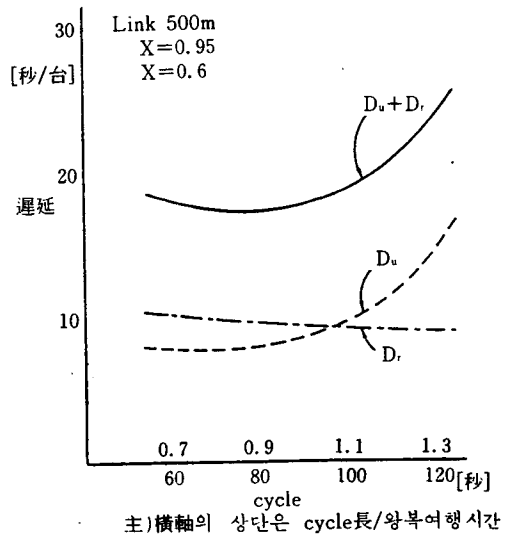
결국, 실제적인 信號週期の 범위안에서는

信號週期가 짧을수록 遲延은 작게 된다.

4) 한편, 各圖의 橫軸은 信號週期를 나타낸 것은 물론, 越²⁾모델에 의거 信號週期를 링-크 往復旅行時間으로 正規化시킨 값을 함께 나타



<그림 6-1> Cycle長, 飽化度와 random지연

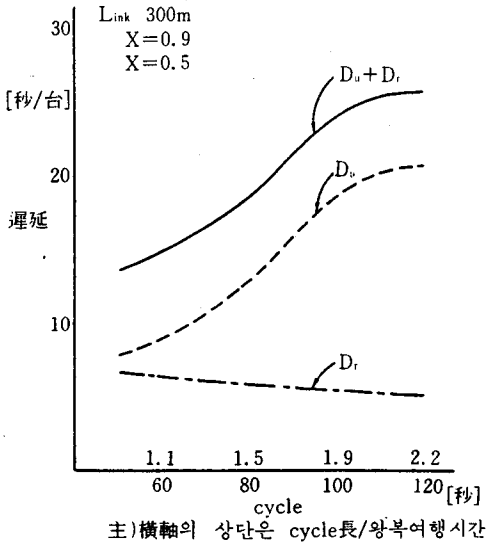


<그림 6-2> cycle長과 遲延(1)

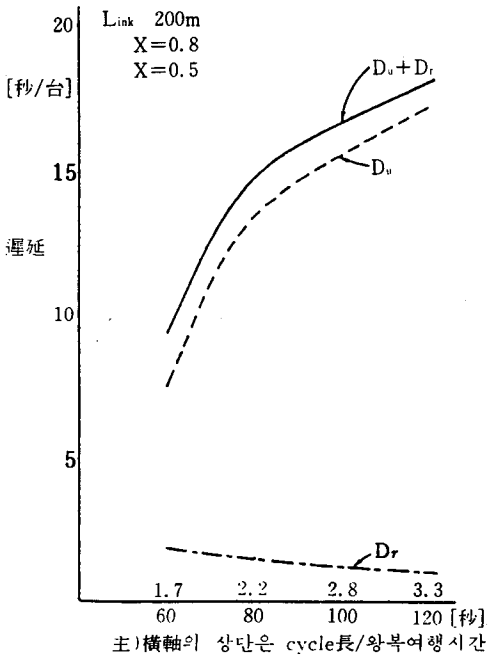
主)橫軸의 上단은 cycle長/왕복여행시간

내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 越모델에 의한 遲延과 信號週期の 특성이 보이나, 스프

릿트(split)와 飽化度에 따라 어느 정도의 변화가 있음을 알 수 있다.



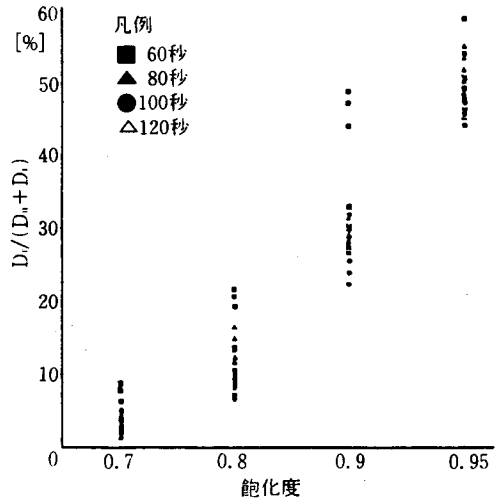
(그림 6-3) cycle長과 遲延(2)



(그림 6-4) cycle長과 遲延(3)

5) 遲延과 信號週期の 관계에 대한 특성은 均一遲延이 지배적이지만, random遲延이 總遲延에서 차지하는 비율을 보면 (그림 6-5)와 같다.

이것에 따르면 높은 飽化度에서는 random遲延이 무시할 수 없는 것으로부터 지금까지 언급한대로 가능한 交通流의 車群化를 도모하여 I의 값을 될수록 적게하는 것이 중요함을 알 수 있다.



(그림 6-5) random遲延이 차지하는 비율

VI. 結 論

본 研究에서 얻어진 成果를 종합해 보면 다음과 같다.

1. 連動信號로 制御되는 교통류의 싸이클 베이스의 到着分布는 三項分布가 적합하고, 分散/平均의 比(I)는 流率과 負의 相關이 있음을 알았다.

2. Markov chain을 사용해서 靑時間끝에

서의 過剩待機台數의 계산으로부터 구해진 random遲延을 Miller모델(포아손到着)과 비교한 결과, 連動信號制御下에서의 random遲延은 Miller 모델에 의한 결과에 I의 指數關數를 곱함으로써의 근사값을 얻을 수 있음을 알았다.

3) 모델을 檢證하기 위하여 連動制御되는 3區間の 링-크에 대해서 均一遲延과 random遲延을 각각 싸이클베이스로 계산하여 그 결과를 實測에 의한 遲延과 비교했다.

飽化도가 0.8이하에서는 random遲延을 무시한 均一遲延만을 고려한 결과가 實測値와 잘 일치했으며, 飽化도 0.8이상에서는 均一遲延에 random遲延을 더한 결과가 實測値와 일치함을 알았다.

4) 信號週期和 遲延의 관계를 알아보기 위하여 飽化度, split, 링-크長 및 信號週期の 240개-스組合에 대하여 均一遲延과 random遲延을 계산했다.

일반적으로 사용되는 信號週期の 범위에서는 均一遲延이 支配的으로 random遲延과 이 상호작용에 의한 특이한 특성은 거의 볼 수 없었다.

즉, 信號週期가 짧을수록 遲延은 작다. 그렇지만 飽化도가 높은 경우에는 random遲延의 비중은 무시할 수 없기 때문에 random遲延의 관점으로 부터 가능한한 交通流의 車群化를 도모함이 얼마나 중요한가를 잘 보여주

고 있다.

〈參 考 文 獻〉

1. Werner Brilon and Ning Wu(1990), "Delay at Fixed-Time Traffic Signals under Time-Dependent Traffic Conditions" *Traffic Engng. Control*, 31(12). pp. 623-631.
2. Miller, A. J. (1969), "Some Operating Characteristics of Fixed Time Signals with Random Arrivals" Institute of Highway and Traffic Reserch. University of New South Wales.
3. Newell, G. F. (1965), "Apporoximation Methods for Queues with Applications to the Fixed-cycle Traffic Light" *SIAM Rev.*, 7(2). pp. 223-240.
4. Hutchinson, T. P. (1972). "Delay at a Fixed Time Signal. II: Numerical Comparisons of Some Theoretical Expressions" *Transp. Sci.*, 6, pp. 286-305.
5. Webster, F. V. (1958). "Traffic Signal Settings" *Road Reserch Technical Paper. No.39*.
6. Wallance, C. E. et al(1983), "TRANSYT-7F Users Manual" FHWA. U. S. DOT. 1983.
7. 越 正毅(1975), "系統交通信號におけるサイクル制御の研究" 土木學會論文報告集, No.241, pp.125-133.