

道路交通流 特性에 관한 統計解析

A Statistical Analysis of the Characteristics of Traffic Flow on the Road

南 永 國*
Nam, Young Kug

Abstract

An understanding of interrelationships among basic characteristics of vehicular traffic flow, such as volum, speed, headtime, and density, is of prime importance.

Similarly in providing proper level of serviceability in the field of base of design and traffic control, it is deeply connected. After all, with a view to improve traffic flow characteristics, future efforts about the mutual function development between road and traffic should be made on the basis of present traffic characteristics.

This paper figures out some traffic characteristics from field data and provides proper model of equation to estimate traffic volume on the road.

要 旨

交通流의 特性을 理解하는데도 速度, 密度, 車頭時間 및 交通量의 相關性이 매우 重要하다.

設計의 基本이나 交通運用面에서도 적정수준의 供用性을 提供하는 데도 관련이 깊다. 結局 交通流의 特性을 改良할 目的으로 道路와 交通과의 相互機能 개발에 대한 앞으로의 勞力은 역시 現在의 交通現象을 重要視해야 한다.

이 論文은 이러한 實測資料를 토대로 하여 交通流의 特性을 統計의 으로 解析하고 交通量 算定을 위한 적정 Model式을 提案하였다.

해 들 必要가 있다.

1. 序 論

오늘날 自動車 交通量이 增大하여 道路交通機能이 高度化됨에 따라서 道路의 設計, 管理 및 交通規制等에 있어서 道路交通流의 實態를 充分히 把握한다는 것은 交通運用의 圓滑化를 圖模하기 위하여 매우 重要하다. 뿐만아니라 交通流 特性이 道路計劃 또는 運用에 어떠한 影響을 미치는 가를 交通工學的 側面에서도 充分히 檢討

交通流 現象에 관한 理論으로서는 1934年 B.D. Greenshields⁽⁴⁾, 1936年 W.F. Adams⁽²⁾가 密度와 空間速度사이 線型關係式을 發表하였고, 그 以後 R.T. Underwood⁽³⁾, H. Greenberg⁽¹¹⁾, Adolf D. May⁽⁵⁾, D.R. Drew⁽⁶⁾ 등이 一次元 壓縮性 非定常流로 취급하여 非線型關係式을 提案하였다.

또한 交通流의 動力學的 理論에 대하여 L.A. Pipes⁽⁷⁾, E. Kometani와 T. Sasaki⁽⁸⁾, R. Herman과 Montroll⁽⁹⁾, D.C. Gazis⁽¹⁰⁾ 등이 追從理論

*正會員·仁川大學 助教授 土木工學科

을 定立하였다.

多車線의 容量解析^(4,12,13), 車群과 速度와의 關係^(14,15,16), 交通流의 Simulation^(16,17,18)等에 대하여 많은 研究가 이루어지고 있으며, 우리 나라에서도 都市街路에 대한 交通流現象과 容量에 대하여 研究되고 있다^(20,21,22).

그러나 우리 나라 국도 및 고속도로에 대한 교통류 특성에 관하여 전혀 연구된 바 없으므로 本 研究는 우리나라의 2車線國道와 高速道路를 對象으로하여, 直接 그 道路의 交通 흐름狀態를 實測하였다. 이 實測한 資料를 통하여 車頭間隙, 速度分布를 統計的으로 解析하고, 定量的인 密度와 交通量에 대하여서도 統計的理論을 바탕으로 하여 妥當한 Model式構築에 관한 研究를 目的으로 하였다.

2. 交通流 現況調査

2.1 調査範圍

交通流에 影響을 미치는 基本要素는 速度, 車頭間隙 및 追越 이 가장 重要하다.

이 가운데에서 追越은 追從現象과 車線變更等 運動의 相互力學的인 關係와 走行上의 拘速度와의 相關解析이 뒤 따라야 하므로 作業量으로 보아 매우 龐大하여 本 研究範圍에서는 除外하였다. 다만 2車線幹線道路의 速度分布와 車頭時間만을 限定하였으며, 速度와 密度와의 相關關係로부터 交通量算定 Model提案에 重點을 두었다.

路線選定은 2車線高速道路인 大邱-馬山間(邱

-馬線)을 代表로 하고, 作業上의 能率을 勘案하여 邱-馬線 부근 國道 4號線(大邱-永川)과 國道 5號線(大邱-安東)을 擇하였고, 交通量이 많은 國道 6號線(서울-仁川)을 選擇하였다.

2.2 調査方法

道路위를 走行하고 있는 全車輛에 대하여 交通流의 性格을 알 수 있도록 連續通過하는 走行狀態를 계속적으로 測定해야 한다.

測定方法은 調査目的이나 주어진 條件에 따라 다르나 一般的으로 使用되고 있는 方法을 分類하면 아래와 같다.

- 1) 測定位置에 의한 分類
- 2) 測定器具에 의한 分類
- 3) 測定區間長에 의한 分類

本 調査에서는 測定器具에 의한 分類의 일종인 寫眞撮影에 의한 方法으로서 1/100초 Timer를 부착한 칼라비디오카메라(KY-1900 CH)를 사용하였다.

視距가 양호한 路側에 Video Camera設置하여 測定區間 60~100 m의 標準으로하고, 이 區間內 20 m씩 細分한 小區間別 車頭時間, 走行時間, 平均速度를 計算하였다.

카메라에는 타이머(VTG-22)를 부착시켜 測定感도 1/100 sec까지 測定하였으며, 撮影필름을 다시 비디오녹화기(BR-6400)에 넣어 녹화편집조정기(RM-88 U)로 모니터(AV-2000 USA)에 재현시켜 인위적으로 測定資料를 蒐集한후 必要한 計算은 컴퓨터(NEC PC-8801, PC-9801, VX-701)를 사용하였다. 調査內容은 表 2-1과 같다.

表 2-1 調査區間 明細

路線名 및 測定場所		測定年月日	測定項目	道路第件	備考	
國道 4號 (정천~반야월)	청 CC-1 (上)	1차: '85.2.15(15:15~16:00)	速度, 車頭時間	直線平坦 鋪裝=6.8 m	視距良好	
	천 CC-2 (下)	2차: 3.19(15:00~16:00)	交通量, 密度	路肩=4 m (양측)		
	하 양 (자유소안)	HG-1 (上)	1차: '85.2.15(16:30~17:00)	"	直線平坦 鋪裝=6.8 m	視距普通
		HG-2 (下)	2차: 3.9(16:00~16:40)		路肩=2.2 m (양측)	
	반 야 월	BA-1 (上)	1차: '85.8.13(09:00~11:00)	速度, 交通量 密度	鋪裝=6.8 m	"
		BA-2 (下)			勾配 5%	

國道5號 (大邱市界)	CD-1 (上)	1 차 : '85. 3. 9(17:55~18:30)	速度, 車頭時間	直線平坦 鋪裝=7.0 m	"
	CD-2 (下)	2 차 : '85. 3. 10(17:00~17:30)	交通量, 密度	路肩=3.6 m (양측)	
國道6號 (서울~인천)	서울측 SI-1-1(上)	1 차 : '85. 7. 29(13:10~15:10)	車頭間隙, 速度	直線平坦 鋪裝=7 m	"
	SI-1-2(下)		交通量, 密度	路肩=2 m (양측)	
	인천측 SI-2-1(上)	1 차 : '85. 7. 29(16:00~18:10)	"	勾配 3% 直線 鋪裝=7 m	"
	SI-2-2(下)		"	路肩=2 m (양측)	
대구~경산	DA-1 (上)	1 차 : '85. 4. 8(14:00~16:10)	速度, 車頭時間	4 車線鋪裝	"
	DA-2 (下)		交通量		
대구~마산 고속도로	No. 8.5 km AY-1 (上)	1 차 : '85. 2. 11(13:00~13:40) 2 차 : '85. 3. 10(13:00~14:00)	車頭間隙, 速度	直線平坦 鋪裝=7.2 m	도로확장 공사중
	AY-2 (下)		交通量	路肩=6 m (양측)	
	No. 17.5 km HY-1 (上)	1 차 : '85. 2. 14(16:10~16:45) 2 차 : '85. 3. 10(14:30~15:30)	"	산악도로 勾配	視距良好
	HY-2 (下)		"	"	
	No. 29.1 km HI-1 (上)	1 차 : '85. 3. 10(17:30~18:30)	"	현풍교를 頂點으로	"
	HI-2 (下)		"	上下 시거 불량	

3. 交通流理論

3.1 確率的 理論

普遍的인 交通流 解析 方法은 交通流을 일종의 確率過程으로 취급하여 確率理論을 적용하는 것이다.

이 경우 車의 通過過程을 Random 으로 보아 Poisson 分布로 說明하고 있으며^(2,23), 경우에 따라서는 이를 변형하여 指數分布 또는 合成指數式⁽²⁴⁾을 援用하고 있다.

지금 車의 通過를 Poisson 過程으로 計算할때 그 分布形은 式(3-1)과 같이 Poisson's 分布로 볼 수 있다.

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (3-1)$$

여기서

$P_n(t)$: t 時間에 n 臺가 通過할 確率

λ : 單位時間當 平均通過臺數

λt : t 時間에 平均通過臺數

그리고 車頭時間分布에 있어서 t 時間에 1 臺

도 通過하지 않을 確率 $P_0(t)$ 는 式(3-2)와 같이 負指數分布와 類似하다.

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} \quad (3-2)$$

즉 式(3-2)는 t 보다 큰 車頭時間 出現確率로서 實用的인 式으로 바꾸면 式(3-3)과 같다.

$$P(t) = e^{-\frac{Q_t}{3600}} \quad (3-3)$$

여기서

$P(t)$: 車頭時間이 t sec 보다 큰 確率

Q : 時間交通量(VPH)

이 式이 實際 交通流에 어느 정도 適合한가는 道路 및 交通條件에 따라 다르기 때문에 一率의 으로 規定하기는 어렵다.

式(3-3)은 아주 간단한 형으로서 이를 사용하여 여러가지 計算을 比較的 쉽게 할 수 있다.

t sec 보다 큰 車頭時間을 合한 時間率 $R_{(>t)}$ 는

$$R_{(>t)} = e^{-\frac{Q_t}{3600}} \left(\frac{Q_t}{3600} + 1 \right) \quad (3-4)$$

또 t sec 보다 큰 모든 車의 車頭時間 平均 $T(>t)$ 는 다음과 같이 計算할 수 있다.

$$T(>t) = \frac{Q_t}{3600} + t \quad (3-5)$$

t sec 보다 적은 車頭時間의 平均 $T(<t)$ 는

$$T(<t) = \frac{3600 - Qe^{-\frac{Qt}{3600}} \left(\frac{Qt}{3600} + t \right)}{Q(1 - e^{-\frac{Qt}{3600}})}$$

$$= \frac{3600}{Q} - \frac{te^{-\frac{Qt}{3600}}}{1 - e^{-\frac{Qt}{3600}}} \quad (3-6)$$

3.2 流體力學的 理論

交通流 解析中 流體力學的 理論解析은 交通流을 一次元 壓縮性流體로 假定하여 交通量과 交通密度와의 關係로부터 經驗式⁽²⁵⁾과 流體의 連續方程式^(4,26)을 解析하는 方法이다.

이 理論은 流體의 運動 및 超音波와 洪水波 현상을 交通流에 應用한 것이다.

即 交通流의 그 速度와 交通密度사이에 一定한 函數關係를 고려하여 $V=V(K)$ 로 假定한다.

이 경우 連續方程式은

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3-7)$$

運動量方程式은 다음과 같다.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{1}{K} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3-8)$$

여기서

V : 速度 K : 密度

Q : 流量 t : 時間

x : 距離 P : 壓力

交通流에서는 速度는 密度의 函수이고, 交通量은 密度와 速度의 函수이므로 다음과 같다.

$$V = V(K) \quad (3-9)$$

$$Q = KV \quad (3-10)$$

따라서 式(3-7)은 式(3-11)로 된다.

$$\frac{\partial K}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + K \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3-11)$$

式(3-8)과 式(3-11)에 chain rule을 적용하여 풀면 式(3-12)와 같다.

$$C^2 = (KV')^2 \quad (3-12)$$

여기서 $C^2 = \frac{\partial P}{\partial K}$ 이고, $V' = \frac{\partial V}{\partial K}$ 이다.

지금 $V=0$, 즉 모든 車가 停止상태일 때 密度(Jam density)를 K_j 로 하면

式(3-12)은

$$V = C \ln \frac{K_j}{K} \quad (3-13)$$

$$\text{또 } Q = CK \ln \frac{K_j}{K} \quad (3-14)$$

即 C 는 Q_{max} 가 될 때 速度 V_m 을 나타낸다.

$K \rightarrow 0$ 에서는 理論的으로 $V \rightarrow \infty$ 이나 流體特性과는 別度로 $K=0$ 에서 $V=V_j$ 인 조건을 고려하면 式(3-10)은 式(3-15)가 된다.

$$\frac{dQ}{dV} = V \frac{dK}{dV} + K \quad (3-15)$$

交通量을 最大($\frac{dQ}{dV}=0$)로 하는 密度를 K_m 로 하면 式(3-15)는

$$K_m = -V \frac{dK}{dV} \quad (3-16)$$

로 된다. 그러므로

$$K = -K_m \ln V + C'$$

$K=0$ 에서 $V=V_j$ 이므로

$$K = K_m \ln \frac{V_j}{V} \quad (3-17)$$

따라서 交通量은 式(3-18)과 같다.

$$Q = VK_m \ln \frac{V_j}{V} \quad (3-18)$$

여기서 V_j : 自由速度

Lincoln Tunnel의 資料에 의하면 $K-V$ 관계는 그림 3-1과 같다.

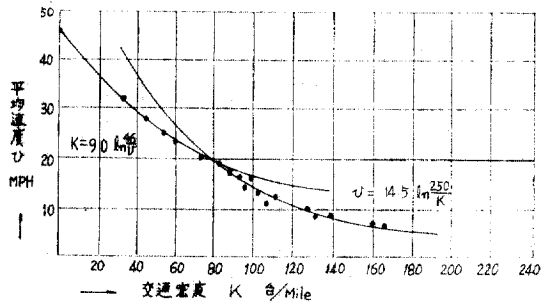


그림 3-1 交通密度와 平均速度

3.3 動力學的 理論

交通量이 車線마다 많으면 交通流은 自由走行이 어렵게 되어 自然的으로 追越도 不可能하게 되며 다만 앞車의 速度에 支配되어 後續車에 影響을 미치게 된다. 車가 一列로 走行하는 連續交通流을 假定하여 各車의 車速變化에 대한 相互關係에 대하여 어떤 假定條件을 設定하면 임의의 車列의 運動을 支配하는 運動方程式을 얻을

수 있으며, 이 方程式을 解析하면 各車의 運動 狀態를 알 수가 있다.

動力學的 理論은 앞차에 追從하는 車가 앞車의 變速動作에 따라 어떻게 움직일까를 假定한 것이다⁽⁸⁾.

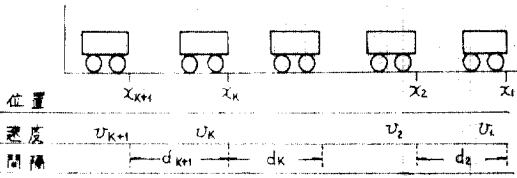


그림 3-2 車列의 座標系

그림 3-2에서 보는 바와같이 1디멘션系를 고려하여 이 系中에서 첫번째 차의 速度가 變化함에 따라 그 影響은 後續하는 各車에 傳達되므로 이를 하나의 傳達系로 생각할 수가 있다.

임의의 車 k 가 速度變化로 $k+1$ 인 車에 대한 影響을 고려하면 이것을 車列全體에 擴大適用할 수가 있다. 이 相互關係에 대해서 여러가지 影響을 고려할 수가 있으며, 速度의 變化에 따라 感度도 달라진다고 생각하여 復雜하지만 非線形微分方程式의 解를 實際의 가깝다고 생각한 것이다.

上記考慮事項을 綜合하여 追從理論의 一般式으로서 D.C. Gaizs, R. Herman은 다음 非線型微分方程式을 提案하였다^(10,16).

$$\dot{x}_{k+1}(t+\Delta) = \frac{c \dot{x}_{k+1}(t+\Delta) \cdot [\dot{x}_k(t) - \dot{x}_{k+1}(t)]}{[x_k(t) - x_{k+1}(t)]^l} \quad (3-19)$$

여기서

$\dot{x}_{k+1}(t+\Delta)$: 時刻 $(t+\Delta)$ 에 대한 $(k+1)$ 번째 車의 變速度(加減速度)

$\dot{x}_{k+1}(t)$: 時刻 (t) 에 대한 車의 速度

$x_{k+1}(t)$: 時刻 (t) 에 대한 $(k+1)$ 번째 車의 位置

Δ : 反應지체시간

l, m : parameter

c : 계수

追從運動方程式이 $Q=K\bar{V}$ 인 관계가 유지된 定常狀態의 交通流에 대해서 成立하는 것으로 한다. 이때 파라미터 l, m 를 適當히 주어짐으로서 交通密度 K 와 速度 \bar{V} 의 關係를 나타내는 여

러가지 交通流 Model을 誘導할 수가 있다.

1) $m=0, l>1$ 인 경우

式(3-19)는 上記條件에서는 式(3-20)이 된다.

$$\dot{x}_{k+1} = \frac{C \cdot [\dot{x}_k - \dot{x}_{k+1}]}{[x_k - x_{k+1}]^l} \quad (3-20)$$

式(3-20)을 積分하여 係數 c 와 積分常數 A 를 境界條件 $K=0$ 일 때 $\bar{V}_i = V_f$ 와 $K=K_j$ 일 때 $\bar{V}_i = 0$ 을 적용하면 각각의 값을 구할 수가 있다.

$$c = \frac{V_f(l-1)}{K_j} \quad (3-21)$$

$A = V_f$ (V_f : 自由速度)

따라서 空間平均速度와 車頭間隙 $S = \frac{1}{K}$ 관계로부터 式(3-22)를 구할 수가 있다.

$$\bar{V}_i = V_f \left[1 - \left(\frac{K}{K_j} \right)^{l-1} \right] \quad (3-22)$$

$l=N+1$ 이면 다음과 같다.

$$\bar{V}_i = V_f \left[1 - \left(\frac{K}{K_j} \right)^N \right]: -(N次 曲線Model)$$

2) $m=0, l=1$ 인 경우

式(3-19)는 上記條件으로부터 式(3-23)이 된다.

$$\dot{x}_{k+1} = \frac{C[\dot{x}_k - \dot{x}_{k+1}]}{[x_k - x_{k+1}]} \quad (3-23)$$

위식을 積分하여 계수와 적분상수는 境界조건 $K=K_j$ 일 때 $V_i=0$ 와 $K=K_0$ 일 때 $\frac{dQ}{dK}=0$ 를 적용하여 구한 값을 積分式에 代入하면 式(3-24)가 된다.

$$V_i = V_0 \ln(K_j/K) \quad (3-24)$$

여기서

V_0 : 最適速度

K_0 : 最適密度

위 式이 Greenberg Model이다.

3) $m=1, l>1$ 인 경우

式(3-19)는 上記條件으로부터 式(3-25)가 된다.

$$x_{k+1} = \frac{C \cdot \dot{x}_{k+1} [\dot{x}_k - \dot{x}_{k+1}]}{[x_k - x_{k+1}]^l} \quad (3-25)$$

위식을 積分하여 계수와 적분상수는 境界조건 $K=0$ 일 때 $\bar{V}_i = V_f$ 와 $K=K_0$ 일 때 $\frac{dQ}{dK}=0$ 를 적분式에 代入하여 변형하면 式(3-26)이 된다.

$$\bar{V}_l = V_j \cdot e^{-\frac{1}{l-1} (K/K_0)^{l-1}} \quad (3-26)$$

$l=N+1$ 일때

$$\bar{V}_N = V_j \cdot e^{-\frac{1}{N} (K/K_0)^N} : \text{指數型 非線形 Model}$$

4. 速度特性

4.1 速度分布

道路위에車輛이 通行하고 있을때 어느정도의 交通量을 供用시킬 수 있는가는 道路交通流의 速度特性에 支配를 받는다. 바꾸어 말하면 주어진 條件下의 道路에 交通量이 적으면 速度가 크고, 速度가 크게 되려면 交通量이 적으면 希望速度를 유지할 수가 있다.

速度特性을 定量的으로 表現하는 方法으로서 는 一般的으로 널리 使用되고 있는 平均速度와 速度分布이다.

그림 4-1, 2 와 같이 級別速度分布는 一般的으로 正規分布를 하고 있으며 各 路線別 速度特性 및 그 分布의 適合度 χ^2 檢定은 表 4-1 과 같다.

路線別 速度分布現況은 交通量의 多小에 따라 다르나 平均速度와 最多速度는 큰 차이가 없으며, 高速道路가 國道보다는 約 10 km/hr 정도 速度差異가 있다.

自由速度分布에 있어서도 混合交通을 比較하여 볼때 85% 速度는 國道가 35~76 km/hr 범위이며, 高速道路에서 68~84 km/hr 범위로서 速度變動範圍가 高速道路가 좁으며, 速度크기도 훨씬 높다.

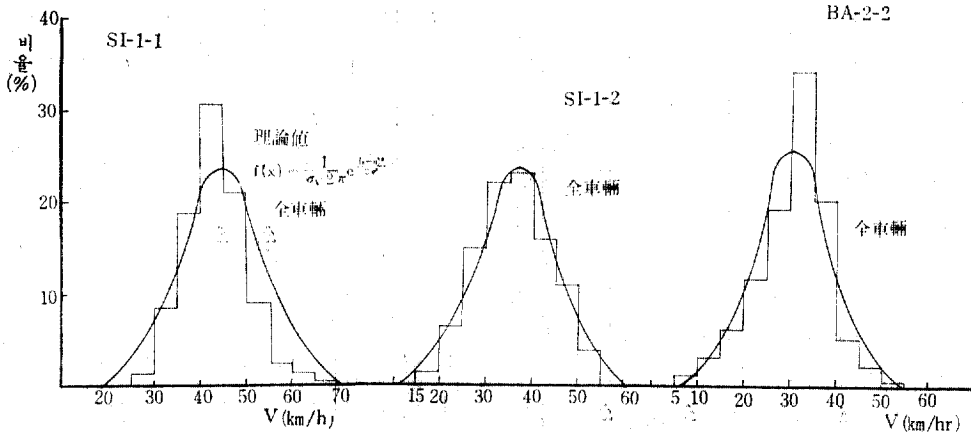


그림 4-1 速度分布(國道 6, 4號)

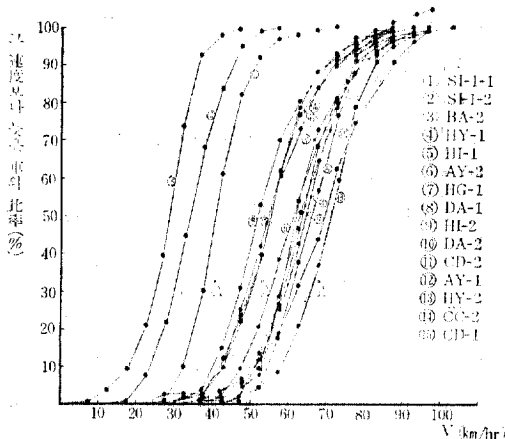


그림 4-2 速度累積 分布(全車輛)

4.2 時間平均速度와 空間平均速度

1) 速度測定

道路區間을 走行中인 모든車에 대하여 瞬間速度를 구할 수가 있다. 이 경우 撮影時間이 미소하면 測定한 速度를 瞬間速度로 보며 地點速度와 區別된다.

즉 走行中 車의 速度는 瞬間的으로 끊임없이 변동하나 어느 한대의 車의 走行軌跡은 時間과 거리의 關係로 나타낼 수가 있다. 따라서 그림 4-3의 한 地點 L 를 通過한 車의 地點速度測定은 "○"표에서 구하고, 瞬間速度는 區間 L 內 어떤 車의 瞬間에 대한 速度를 測定(△표)하면 구할

表 4-1 路線車種別 速度分布 現況

路線名	車種區別	平均速度 (km/hr)	最多速度 (km/hr)	標準偏差 σ	適合度檢定 χ^2	自由速度分布(km/hr)			備考	
						85%	50%	15%		
國道 4號 (大邱~永川)	BA-2	C	31.63	32.5	8.237	18.42	38	30	20	
		SB	28.85	32.5	8.462	15.10	41	29	16	
		ST	30.65	32.5	7.279	48.05	35	29	21	
		T	28.90	32.5	6.515	14.14	33	29	20	
		TT	30.47	32.5	7.547	105.33	35	29	20	
	CC-2	C	62.67	67.5	12.772	8.66	75	60	48	
		B	60.17	47.5	11.671	1.23	70	56	46	
		T	56.13	57.5	11.175	11.04	64	53	44	
		TT	58.54	57.5	12.023	17.90	68	55	45	
	HG-1	C	60.66	52.5	10.885	11.75	71	57	47	
		B	57.89	57.5	9.156	4.91	64	55	47	
		T	52.82	52.5	8.034	11.02	58	50	42	
TT		55.85	52.5	9.678	27.45	64	52	44		
國道 5號 (大邱~安東)	CD-2	C	66.75	57.5	13.650	5.39	81	62	48	
		B	64.94	57.5	12.002	6.61	76	61	50	
		T	63.02	62.5	10.368	1.78	71	60	50	
		TT	64.66	57.5	11.973	11.51	76	61	49	
國道 6號 (서울~仁川)	SI-1-1	C	44.65	42.5	9.368	11.92	51	40	33	
		SB	44.06	47.5	7.089	2.27	51	43	34	
		ST	43.55	42.5	7.446	13.09	48	41	33	
		B	49.32	42.5	11.63	3.51	63	43	36	
		T	42.70	42.5	9.029	1.17	46	41	34	
	SI-1-2	TT	44.02	42.5	7.949	8.27	49	41	34	
		C	39.41	42.5	8.947	11.63	46	38	27	
		SB	36.97	35.0	7.443	1.65	38	35	27	
		ST	35.73	37.5	7.403	5.79	41	33	25	
		B	35.25	32.5	5.556	0.65	38	33	27	
大邱~慶山	DA-1	T	33.18	27.5	7.804	8.89	38	30	23	
		TT	36.40	37.5	8.204	7.35	43	34	25	
		C	60.20	57.5	12.088	11.19	71	56	45	4車線
		B	53.55	47.5	10.789	12.26	62	50	39	
	T	51.48	52.5	8.093	13.66	56	48	41		
	TT	56.15	52.5	11.465	62.84	66	52	42		
	DA-2	C	62.76	62.5	9.555	7.26	71	60	50	
		B	58.00	57.5	10.536	3.38	66	55	44	
		T	52.37	52.5	8.936	5.27	58	50	41	
		TT	57.63	57.5	10.592	10.34	66	55	44	
AY-1	C	62.28	67.5	10.247	6.17	77	66	54		
	B	68.19	67.5	11.044	5.56	77	65	53		
	T	64.08	67.5	8.675	5.80	69	62	52		
	TT	66.80	67.5	10.163	11.20	75	64	54		

邱馬高速公路

AY-2	C	60.24	57.5	13.028	9.73	73	56	45
	B	61.70	57.5	11.676	8.14	72	58	47
	T	55.15	52.5	9.980	10.06	59	52	42
	TT	58.13	57.5	11.638	27.33	68	55	44
HY-1	C	67.50	65.0	10.287	10.59	76	64	55
	B	69.44	67.5	10.682	4.08	78	67	53
	T	63.15	62.5	9.794	5.38	70	61	51
	TT	65.45	67.5	10.466	6.07	74	63	53
HY-2	C	75.64	77.5	9.711	1.79	84	72	63
	B	73.81	72.5	11.122	6.55	80	72	62
	T	67.05	72.5	9.131	4.42	73	65	57
	TT	72.31	72.5	10.645	8.34	80	71	60
HI-2	C	72.43	72.5	12.896	7.41	82	71	57
	B	74.39	72.5	12.320	1.81	80	71	57
	T	63.84	62.5	14.651	1.30	77	62	45
	TT	71.07	62.5	13.781	4.67	84	69	55
HI-1	C	73.89	77.5	9.643	4.20	81	72	59
	B	72.86	77.5	10.891	5.83	82	71	57
	T	62.05	67.5	7.971	7.43	71	63	54
	TT	68.65	62.5	9.894	13.27	76	66	56

※ 1) C=승용차 SB=소형버스 ST=소형트럭 B=버스 T=트럭 TT=전차량(혼합교통)
 2) $\chi^2_0(19, 0.01)=36.2$ $\chi^2_0(19, 0.05)=30.1$ $\chi^2_0(19, 0.10)=27.2$

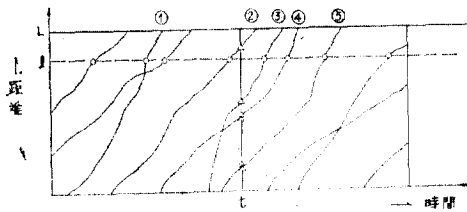


그림 4-3 時間-距離相關

수가 있다. 그리고 速度分布의 考慮對象은 다음과 같다.

- 1) 地點 l 에 대한 時間平均速度 및 地點速度의 時間分布
 - 2) 時間 t 에 대한 空間平均速度 및 瞬間速度의 空間分布
 - 3) 區間 L 에 대한 平均區間速度 및 區速度의 分布
- 地點 l 및 時間 t 에 測定한 速度, 交通量 및 密度를

$$v_1 \ v_2 \ \dots \ v_i \ \dots \ v_c$$

$$q_1 \ q_2 \ \dots \ q_i \ \dots \ q_c$$

$$k_1 \ k_2 \ \dots \ k_i \ \dots \ k_c$$

로 하면 q 및 k 는 時間的 臺數와 空間臺數를 나타낸다.

$$Q = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^c q_i \quad (4-1)$$

$$K = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^c k_i \quad (4-2)$$

$$\bar{v}_t = \frac{1}{\tau Q} \sum_{i=1}^c v_i q_i \quad (4-3)$$

$$\bar{v}_s = \frac{1}{KL} \sum_{i=1}^c v_i k_i \quad (4-4)$$

여기서

Q : 單位時間 交通量(臺/hr)

K : 單位距離 交通密度(臺/km)

\bar{v}_t : 時間平均速度(km/hr)

\bar{v}_s : 空間平均速度(km/hr)

특히 交通量이 많으면 一般的으로 瞬間速度의 變動要因은 크게되며 끊임없이 變速현상이 나타난다.

區間 L 를 走行하는데 要하는 時間 T 인 車의 速度는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V = \frac{L}{T} \quad (4-5)$$

여기서 V : 區間速度

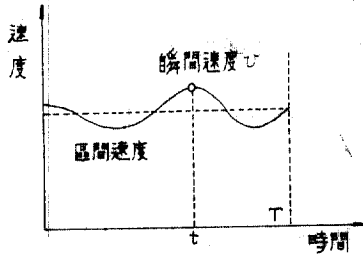


그림 4-4 速度的 時間變動

그림 4-4 와 같이 어느 時間에 따라 그 瞬間速度는 항상 변한다. 그러나 區間速度는 走行距離와 走行時間과의 相關關係에서 區間速度를 표시할 수 있다. 이 경우 임의의 순간에 측정된 車의 瞬間速度는 一種의 確率變數로 볼 수가 있다.

따라서 密度函數와 平均 및 分散은

$$\int_0^{\infty} v \phi_v(v) dv = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} v T \phi_v(v) dv = \frac{L}{T} = V \quad (4-6)$$

$$\phi^2(V) = \int_0^{\infty} (v - V)^2 \phi_v(v) dv \quad (4-7)$$

여기서

$\phi_v(v)$: 區間速度 V 인 車의 速度變動(時間變動)에 관한 密度函數

$\phi^2(V)$: 區間速度 V 인 車의 速度變動(時間變動)의 分散이다.

따라서 이 車의 區間速度 V 는 區間內를 走行하는 車에 대해서 임의의 瞬間速度를 測定할 경우 結局 瞬間速度의 期待値와 같다.

또한 車의 地點速度變化를 距離에 대응하여 생각하면 各 地點마다 地點速度(v)를 測定했을 경우 이는 一種의 確率變數로 볼 수 있으나 分明히 $\phi_v(v)$ 와는 다르다.

이를 $\phi'_v(v)$ 로 表示하면 이 平均 및 分散은

$$V' = \int_0^{\infty} v \phi'_v(v) dv \quad (4-8)$$

$$\phi^{2'}(V) = \int_0^{\infty} (v - V')^2 \phi'_v(v) dv \quad (4-9)$$

여기서

$\phi'_v(v)$: 區間速度 V 인 車의 速度變動(地點變動)에 관한 密度函數

$\phi^{2'}(V)$: 區間速度 V 인 車의 速度變動(地點變動)의 分散

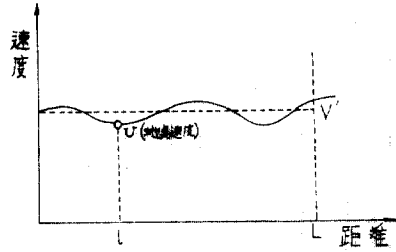


그림 4-5 速度的 距離變動

V' 및 $\phi^{2'}$ 는 區間內 地點速度 測定值의 期待値 및 分散을 나타내는 V' 는 V 와는 다르다.

이 兩者의 相關關係에서 이 車가 $v - v + dv$ 인 速度로 區間內를 走行한 거리는

$$V T \phi'_v(v) dv = v T \phi_v(v) dv \quad (4-10)$$

$$\therefore \phi'_v(v) dv = \frac{v}{V} \phi_v(v) dv \quad (4-11)$$

따라서 式(4-12)로 된다.

$$\begin{aligned} V' &= \int_0^{\infty} v \phi'_v(v) dv = \frac{1}{V} \int_0^{\infty} v^2 \phi_v(v) dv \\ &= \frac{1}{V} \{V^2 + \phi^2(V)\} = V \{1 + \lambda^2(V)\} \end{aligned} \quad (4-12)$$

여기서 $\lambda(V)$ 는 速度的 時間變動에 대한 變動

係數 = $\frac{\phi(V)}{V}$ 이다.

이 車의 時間에 관한 速度變動에 대한 變動係數가 크면 地點速度의 期待値는 瞬間速度의 期待値에 比해서 크다.

$$\text{또 } \int_0^{\infty} \phi'_v(v) dv = \int_0^{\infty} \frac{v}{V} \phi_v(v) dv = 1 \quad (4-13)$$

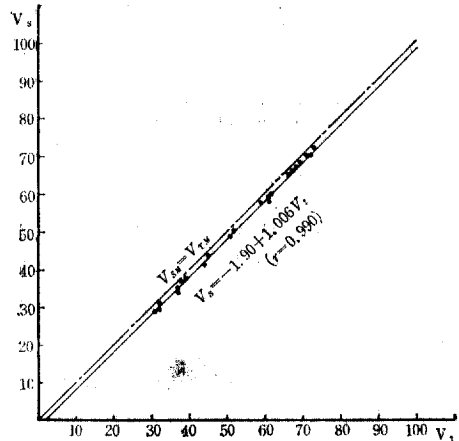


그림 4-6 $\bar{v}_s - \bar{v}_t$ 相關圖

$$V = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{V} \phi v'(v) dv} \quad (4-14)$$

즉 區間速度 V 는 區間內 各 地點의 地點速度 v 의 調和平均이다.

또한 \bar{v}_s 와 \bar{v}_t 에 있어서도 그림 4-6에서와 같이 一定한 直線關係式이 成立한다. 그림 4-6은 調査測定한 全 路線에 對한 空間平均速度와 時間平均速度의 相關圖이다.

4.3 車頭間隙

道路위를 끊임없이 連續走行하고 있는 各車의 車頭間隙이나 車頭時間은 速度變化에 따라 變動한다. 어떤 交通流의 平均車頭間隙을 \bar{s} , 平均車頭時間을 \bar{t} 로 하면 交通量(Q)과 密度(K)에 의 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \bar{t} &= \frac{1}{Q} = \frac{1}{\bar{v}_s K} \\ \bar{s} &= \frac{1}{K} = \frac{\bar{v}_s}{Q} \end{aligned} \right\} \quad (4-15)$$

t sec 보다 큰 車頭時間 出現確率은 式(3-1)에서

$$P_0(t) = e^{-t/\bar{t}} \quad (4-16)$$

이다.

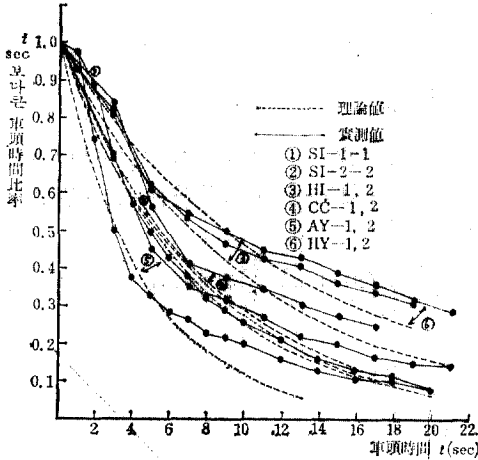


그림 4-7 車頭時間 到着分布

一般的으로 t sec 보다 큰 車頭時間이 出現할 確率은 Poisson 分布로 알려져 있으나 交通條件이나 交通量狀態에 따라 理論值와 꼭 一致하지는 않는다.

한편으로 自由走行이 아니고 交通量이 많아 실제로 Random이 되지 못하고 車群(Platoon)이 形成되어 일부 Regularity를 拘束할 때는 Pois-

son 分布가 되지 않는다.

即 自由走行車와 車群과의 각각다른 性格을 가진 2個의 獨立된 흐름으로 區分할 수 있다.

t sec 사이에 車가 1臺도 通過하지 않을 確率 $F(t)$ 는

$$F(t) = PG_1(t) + (1-P)G_2(t) \quad (4-17)$$

여기서, $G_1(t)$: 車群分布에 對한 函數

$G_2(t)$: 自由走行車의 分布에 對한 函數

P : 車群出現確率

따라서 交通量 Q 일때 車群의 臺數比率을 r 로 하면

$$F(t) = Qr\bar{t}_c G_1(t) + Q(1-r)\bar{t}_f G_2(t) \quad (4-18)$$

여기서, \bar{t}_c : 車群의 平均車頭時間

\bar{t}_f : 自由走行車의 平均車頭時間

1955年 André Schull⁽²⁹⁾은 自由走行車와 車群에 對해서 다음 分布形을 提案했다.

$$\left. \begin{aligned} G_1(t) &= e^{-\frac{t-t_0}{\bar{t}_c}} \\ G_2(t) &= e^{-t/\bar{t}_f} \end{aligned} \right\} \quad (4-19)$$

여기서 t_0 : 限界車頭時間

또 이러한 分布의 t 에 對한 齊時性이 뚜렷한 경우는

$$P(\geq t) = F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = re^{-\frac{t-t_0}{\bar{t}_c}} + (1-r)e^{-t/\bar{t}_f} \quad (4-20)$$

(단 $f(t)$: 車頭時間 分布의 密度函數)

즉 自由走行車數 $Q(1-r)$ 의 車頭時間分布에 對해서 e^{-t/\bar{t}_f} 가 나타내는 適合度를 조사할 需要가 있다.

$$P'(\geq t) = e^{-\frac{1}{\bar{t}_f}(t-t_0)} \quad (t \geq t_0) \quad (4-21)$$

t_0 : 車群形成 境界時間

$t_0 = 7$ sec 일때 t_0 보다 큰 車頭時間의 平均 \bar{t}' 는

$$\bar{t}' = \frac{1}{e^{-\frac{t_0}{\bar{t}_f}}} \int_{t_0}^{\infty} \frac{t}{\bar{t}_f} e^{-\frac{t}{\bar{t}_f} dt} = \bar{t}_f + t_0 \quad (4-22)$$

式(4-22)로써 \bar{t}' 를 구하여 式(4-21)으로 自由走行車의 車頭時間分布形을 얻어서 實測值와 理論值에 對한 適合度까지 檢定할 수 있다.

그림 4-7은 調査地點別 t 초이상 的 車頭間隙 分布를 理論值와 實測值를 比較한 것이며, 그림 4-8은 國道 6號線에서 t_0 가 7초이상⁽¹⁵⁾의 車頭

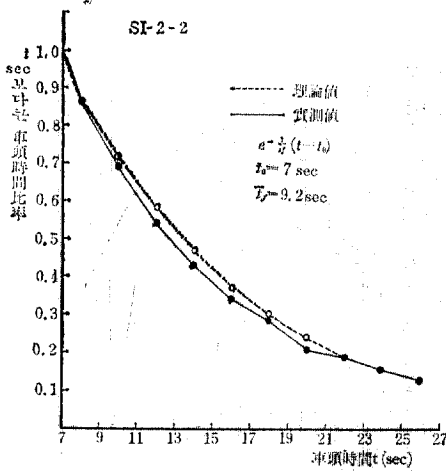


그림 4-8 t_b 以上の 車頭時間分布(國道 6 號)

車頭時間 t sec	觀測值 n_i	理論值 m_i	$\frac{n_i^2}{m_i}$
7~8	52	61.7	43.8
8~10	64	65.4	62.6
10~12	55	48.0	63.0
12~14	43	40.7	45.4
14~16	32	33.4	30.6
16~18	19	20.7	17.4
18~20	30	25.1	35.8
$\Sigma 295$		$\Sigma 295$	$\Sigma 298.6$
$\chi^2 = \Sigma \frac{n_i^2}{m_i} - \Sigma n_i = 298.6 - 295 = 3.6$			
自由度: $7 - 2 = 5$			

間隙出現確率에 대한 實測值과 理論值를 나타내고 있다.

5. 交通流의 Model

5.1 交通量, 速度 및 密度의 關係

空間平均速度(v)는 瞬間的으로 道路위의 一定 區間을 走行하고 있는 全車輛의 地點速度에 대한 平均이며 다음式으로 表示된다.

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n v_i k_i}{K} \quad (5-1)$$

여기서

v_i : 地點速度

k_i : 地點速度 v_i 를 갖인 車輛의 密度

$K = k_1 + k_2 + \dots + k_n$

$$q_i = v_i k_i \quad (\Sigma q_i = Q) \quad (5-2)$$

(q_i : 地點速度 v_i 를 갖인 車輛數 $\Sigma q_i = Q$)

$$Q = v_i K = VK \quad (5-3)$$

로 되며 3變數 Q , K 및 V 의 關係는 交通流의 제일 基本的인 式이다.

5.2 交通流의 密度와 速度의 關係

空間平均速度와 密度사이의 交通流現象이 分布하고 있는 計量值에 따라 各 Model 式이 成立한다.

1934 年은 Greenshields 는⁽¹⁾ 高速道路에 대한 實測結果로 密度와 空間平均速度사이의 線形關係가 있다는 것을 確認하였다.

交通量이 增加하고, 交通條件의 變化함에 따라 그림 5-1 과 같이 各 形態의 相關式을 發表하였다.

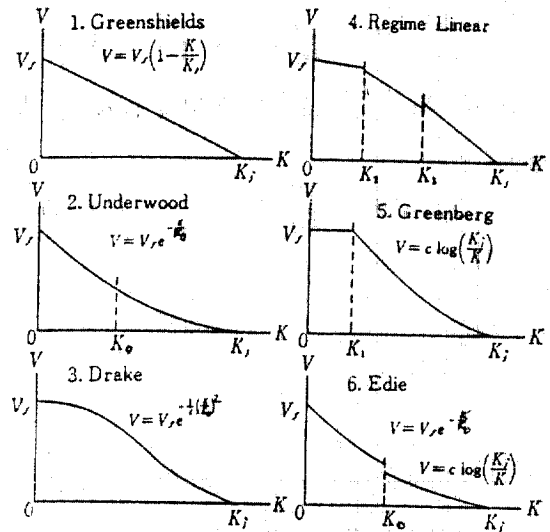


그림 5-1 代表的인 交通密度와 空間平均速度의 相關圖

이 相關式의 理論的 解析은 3章의 流體力學의 及 動力學의 理論을 뒷바침하고 있으며, 一般式에 대한 파라미터의 決定에 따라 提案한 相關式이 그림 5-1 이다.

2車線高速道路와 國道에 대한 實測資料를 統計分析한 結果 各 路線別 空間平均速度와 密度와 의 相關關係는 Greenshields 의 單回歸式이 적합하였다. 또 各 測點別 回歸係數를 決定하였으며, 이 式에 대한 F 와 t 의 適合度도 檢定하였다.

比較의 時間交通量이 많은 路線인 國道6號線과 測點交通量이 많은 國道4號의 BA(반야월) 구간이 相關係數가 높고, 그 外地點은 매우 낮다. 이러한 이유는 交通量이 적은 구간은 交通量에 의한 相對的인 走行간섭을 받지 않기 때문에 운전자들의 希望速度의 分布幅이 넓기 때문이다.

空間平均速度의 密度와의 關係式은 式(5-4)이다.

$$\bar{V}_s = V_f - \left(\frac{V_f}{K_f}\right)K = V_f \left(1 - \frac{K}{K_f}\right) \quad (5-4)$$

$Q = K\bar{V}_s$ 에서

$$Q = V_f K - \frac{V_f}{K_f} K^2 \quad (5-5)$$

交通量이 最大로 될려면 式(5-5)의 一次導函數 $\frac{dQ}{dK} = 0$ 로 하면 式(5-6)과 같다.

$$\frac{dQ}{dK} = V_f - \frac{V_f}{K_f} 2K = 0 \quad (5-6)$$

即 $K = K_0 = \frac{K_f}{2}$ 값을 式(5-5)에 代入하면 式(5-7)이 된다.

$$Q_m = V_f K_0 - \frac{V_f}{K_f} K_0^2 \quad (5-7)$$

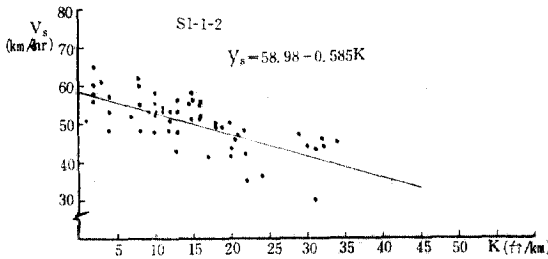


그림 5-2 $V_s - K$ 實測相關圖(國道6號)

最大 交通量을 구할 수 있다. 그림 5-2는 表 5-1에서 서울-仁川間(國道6號)의 $K - V$ 관계로부터 直線關係이며, 그림 5-3은 實測資料에 의한 交通量과 理論式에 의한 交通量 曲線을 比較한 것이다. 그림 5-3에서와 같이 잘 一致하고 있으며 最大密度와 停滯密度에 實測點이 없는 것은 測定路線에 混雜狀態의 交通流現象이 없었기 때문이다.

또한 國道路線만을 고려하여 表 5-1의 各路線別 空間平均速度(\bar{V}_s)와 平均密度(K) 사이에는 그림 5-1의 Underwood 相關式이 成立한다.

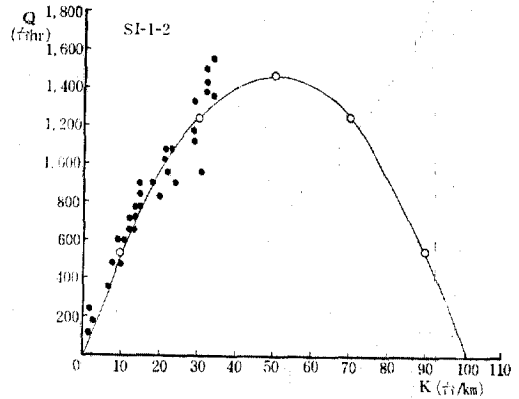


그림 5-3 $Q - K$ 相關圖(國道6號)

따라서 指數 Model 式은 式(5-8)이다.

$$V = V_f e^{-\left(\frac{K}{K_0}\right)} \quad (5-8)$$

式(5-8)의 自由速度(V_f)와 $\frac{1}{K_0}$ 의 값을 回歸 結果로 구할 수 있다.

$$V_s = 69.014 e^{-0.023K} \quad (5-9)$$

$(r = 0.935)$

그러므로

$$Q = 69.014 K e^{-0.023K} \quad (5-10)$$

또 單回歸式으로서는

$$V_s = 66.311 - 1.059 K \quad (5-11)$$

$(r = 0.905)$

$$Q = 66.311 K - 1.059 K^2 \quad (5-12)$$

式(5-9), (5-11)은 相關係數가 매우 높으며 實測資料를 통하여 고려할때 國道를 綜合한 代表的인 Model 式으로 適合하다.

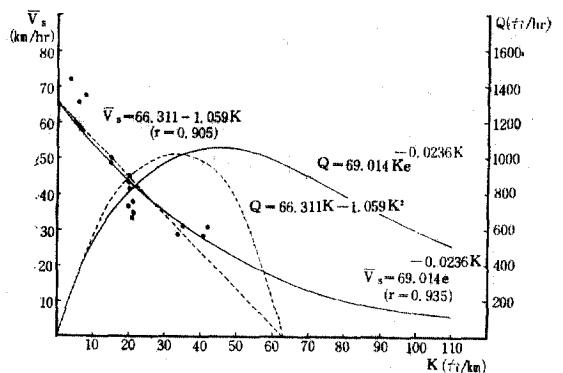


그림 5-4 $Q - K - V_s$ 相關圖

表 5-1 路線別 V-K 回歸 Model 一覽表

測 點 名	回 歸 式	K	V ₁	V ₂	σ ₁	σ ₂	γ	回 歸 式 檢 定			回 歸 係 數 檢 定			備 考
								F 檢	F(5%) 기 준	설명역 (%)	t 檢	t(5%) 查	표준오차	
청	V ₁ =62.53-0.54K	5.07	61.99	59.77	2.88	2.79	0.271	56.12	4.02	7.3	-2.031	2.007	0.268	
"	V ₁ =62.54-0.63K	6.80	60.96	58.18	4.05	5.75	0.419	65.53	4.01	17.6	-3.396	2.005	0.196	
하	V ₁ =71.82-1.008K	5.91	67.17	65.86	2.185	6.337	0.502	81.60	3.995	25.25	-4.539	2.00	0.222	
"	V ₁ =75.12-0.74K	3.5	73.39	72.48	2.80	2.930	0.265	62.40	4.004	7.0	-2.100	2.002	0.354	
반	V ₁ =37.12-0.17K	35.3	32.02	30.94	5.36	5.27	0.717	248.76	3.920	51.3	-11.3	1.990	0.015	
"	V ₁ =36.11-0.19K	34.4	31.36	29.44	2.05	2.65	0.718	47.49	4.260	51.6	-4.95	2.07	0.039	
"	V ₁ =38.25-0.18K	42.2	31.78	30.59	5.42	6.23	0.703	235.16	3.92	49.4	-10.77	1.980	0.016	
"	V ₁ =32.70-0.10K	40.5	31.14	28.60	2.34	3.243	0.335	25.92	4.26	11.3	-1.71	2.07	0.059	
칠곡-동명(CD-1)	V ₁ =71.94-0.47K	8.3	68.97	68.02	4.339	4.684	0.406	74.26	3.99	16.5	-3.502	1.990	0.222	
"	V ₁ =62.28-0.60K	5.7	60.56	58.78	4.59	4.30	0.528	72.09	4.023	27.9	-4.483	2.007	0.135	
서울-인천(SI-1-1)	V ₁ =50.45-0.31K	20.4	45.10	44.11	5.99	5.75	0.60	95.25	3.99	35.90	-5.851	2.00	0.063	
"	V ₁ =50.54-0.39K	19.6	44.24	42.00	3.19	3.35	0.456	13.900	4.75	20.8	-1.703	2.228	0.229	
"	V ₁ =58.98-0.58K	15.1	51.75	50.16	6.37	8.62	0.608	98.41	3.99	36.9	-6.034	1.996	0.097	
"	V ₁ =61.50-0.87K	14.7	51.14	48.58	2.69	4.97	0.810	32.59	4.74	66.25	-4.647	2.228	0.188	
"	V ₁ =40.18-0.228K	21.3	36.83	35.30	4.50	5.19	0.525	190.73	3.709	27.6	-7.262	1.977	0.031	
"	V ₁ =39.14-0.23K	20.5	36.87	34.43	2.82	3.01	0.491	35.59	4.196	24.1	-2.932	2.055	0.078	
"	V ₁ =41.95-0.177K	21.4	38.93	38.15	4.35	4.34	0.629	226.66	3.909	39.6	-9.469	1.977	0.018	
"	V ₁ =42.60-0.27K	20.4	38.04	36.98	2.57	2.87	0.667	48.67	4.196	44.5	-4.655	2.055	0.059	
구마곡속(HI-1)	V ₁ =61.56-0.48K	7.5	59.38	57.96	5.09	5.458	-0.454	71.84	4.00	20.65	-3.852	2.004	0.124	
"	V ₁ =58.65-0.33K	8.0	55.95	54.89	4.156	4.360	0.267	64.63	3.990	7.10	-2.152	2.001	0.155	
"(치천교 HY-1)	V ₁ =68.25-0.33K	4.6	67.77	66.71	2.05	2.124	0.141	57.134	4.01	1.90	-1.065	2.004	0.313	
"	V ₁ =72.98-0.58K	4.6	72.36	70.26	2.56	3.09	0.294	66.79	3.985	8.7	-2.408	2.000	0.243	
"(화원 AY-1)	V ₁ =75.30-0.56K	9.7	71.19	69.78	4.20	4.45	0.419	38.85	4.14	17.6	-2.617	2.039	0.216	
"	V ₁ =72.38-0.72K	9.5	66.14	65.47	6.18	6.16	0.717	49.43	4.24	51.4	-5.04	2.018	0.143	

式(5-9)와 (5-11)로부터 交通량을 理論적으로 구한 것이 그림 5-4이다.

그림 5-4에서 보는 바와 같이 $K-V$ 관계를 直線 또는 指數曲線으로 보아도 좋으며, 다만 指數曲線關係로 볼 경우 $K-Q$ 및 $K-V$ 관계에서 最大交通量과 自由速度가 다소 높다.

6. 結 論

이번 研究에서는 2車線高速道路와 國道에서 走行車의 速度特性和 車頭時間, 路線別 또는 測點別로 空間平均速度와 時間平均速度, 交通密度 및 交通量과의 相關關係를 分析하였다.

研究結果를 綜合하면 다음과 같다.

- (1) t sec 보다 큰 車頭時間比率은 交通條件에 따라 다르며 Poisson 分布로서 理論値와 꼭 一致하지는 않는다.
- (2) 區間速度는 區間內 小區間 地點速度의 調和平均과 같다.
- (3) 階級別 速度分布는 一般的으로 正規分布한다.
- (4) 交通密度(K)가 적은 路線은 自由速度(V_f)도 높고 速度에 따른 密度變化가 적다.
- (5) 交通密度가 적은 路線에서는 希望速度分布幅이 크므로 V_f-K 의 相關關係에서 相關係數(r)가 比較的 낮다.
- (6) 國道에서 V_f-K 관계는 Underwood Model 이 適合하며, 指數 Model 로서 $V_f=69.014e^{-0.0236K}$ 式이 適合하다.
- (7) 國道の 規制速度는 一律的인 規制를 지양하고, 自由速度의 累積分布를 고려하여 路線別로 規制하는 것이 妥當하다.

參 考 文 獻

1. B.D.Greenshields: A Study of Traffic Capacity, *Proc. H.R.B. No. 14*, 1934, pp. 448~477.
2. W.F. Adams: Road Traffic Considered as a Random Series, *J. Inst. of Civil Engrs.* 1936.
3. R.T. Underwood: *Speed Volume and Density Relationships, In Quality and Theory of Traffic Flow*, Bureau of Highway Traffic, Yale University, 1961, pp. 141~165.
4. Charles H. Knapp: Traffic Density Estimation for Single and Multilane Traffic, *Transportation Science*, Vol. 7, No. 1, 1973, pp. 75~85.
5. Said M. Esa & Adolf, D. Way: *Generalized Procedure for Estimating Single and Two Regime Traffic-Flow Models*, TRR, No. 772, 1980, pp. 24~36.
6. Donald R. Drew: *Classification and Application of Traffic Models*, Traffic Engineering, Nov. 1965.
7. L.A. Pipes: *Hydrodynamic Approaches*, HRB, SR79, 1964, pp. 3~5.
8. E. Kometani, Tsasaki: On the Stability of Traffic Flow, *Journal of Operations Research*, Japan, 1958, pp. 60~79.
9. R. Herman, Montroll: Traffic Dynamics, Studies in Car Following, *JORSA*, Vol. 7, No: 1, 1959, pp. 86~106.
10. D.C. Gazis, R. Herman, R.W. Rothery: Nonlinear Follow the Leader Models of Traffic Flow, *JORSA*, No. 4, 1961.
11. H. Greenberg: An Analysis of Traffic Flow, *JORSA*, No. 1, 1959, pp. 79~85.
12. Man-Feng Chang and D.C., Gazis: Traffic Density Estimation with Consideration of Lane-Changing, *TS*, Vol. 9, No. 4, Nov, 1975, pp. 308~320.
13. David Mahalel and A. Shalom Makkert: Further Aspects of Traffic Arrival Patterns on a Multilane Highway, *TS*, Vol. 17, No. 1, Feb. 1983, pp. 71~86.
14. Joelee and Jason, C. Yu: *Internal Energy of Traffic Flows*, TRB, No. 456, 1973, pp. 40~49.
15. 高田弘, 栗本讓: 道路交通流にすける車群の走行特性について防衛大學數工學研究報告 2卷2號 1964, pp. 177~178.
16. Edward B. Lieberman: *Simulation of corridor traffic*, HRB, No. 409, 1972, pp. 37~39.
17. Paul Ross and David Gibson: *Review of Road Traffic Network Simulation Model*, TRB, No. 644, 1977, pp. 36~41.
18. Josel, Rodriquez and Roy C. Loutzenheiser: *Vehicle Platoon Parameter: Methodology for Traffic Control*, TRB, No. 644, pp. 62~64.

19. William A. Stock and Adolf D. May: *Capacity Evaluation of Two-Lane, Two-Way Highway by Simulation Modeling*, TRR, No. 615, 1976, pp. 20~27.
20. 都哲雄: 直進交通의 左回車線利用率推定과 交叉容量 및 最適信號燈 時間算定, 大韓交通學會誌 No. 1, Vol. 1984. 4, pp. 56~63.
21. 國土開發研究院 “道路容量便覽作成을 위한 基礎研究”, 1981, pp. 51~104.
22. 吳益秀: 都市平面信號交叉點의 車輛進行特性에 關한 基礎研究, 嶺南大學校 大學院 博士學位論文 1984, pp. 29~55.
23. M.S. Raff: The distribution of block in an uncongested stream of traffic, *J. American Statistical Assn.* Vol. 46, 1951.
24. J.E. Tolle: *Vehicular Headway Distribution Testing and Results*, TRR, 567, 1976, pp. 57~63.
25. M.J. Lighthill, F.R.S., G.B. Witham: A theory of traffic flow on long crowded roads, *Proc. Royal Society, (A)*, 229, May, 1955.
26. P.I. Richard: Shock waves on the highway, *JORSA*, No. 1, 1956.
27. Juergen Pahl: *The Effect of Discrete Time Measurement on Speed Data*, TRB No. 349, 1971, pp. 1~12.
28. 高田弘: 速度分布の特性りみた道路交通流の解析, 土木學會論文集 125號. 1966, pp. 37~43.
29. A. Schuhl: *The Probability Theory to Distribution of Vehicles on Two-Lane Highway*. Travaux, January 1955, pp. 136~142.

(接受: 1985. 9. 3)