

대한교통학회 제29회 학술발표회

고속도로 교통류의 정성적 분석

명지대학교
이 의 은

高速道路 交通流의 定性的 分析

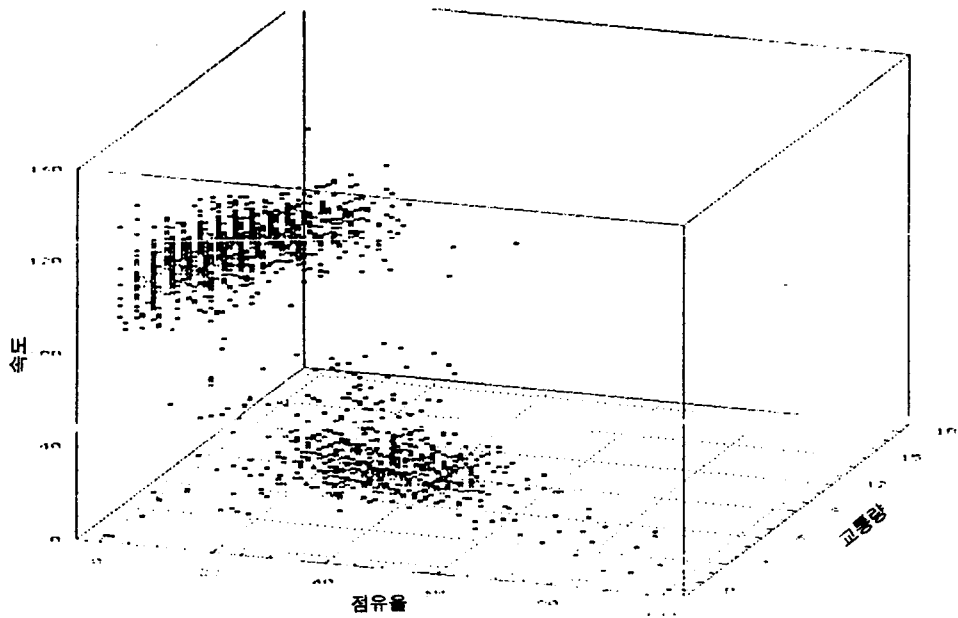
定性的 分析을 위한 資料로 20秒 또는 1分의 通信 週期(polling cycle)單位로 整理된 것을 사용하였다.

이 定性的 分析 段階에서는 相關關係의 形態 分析, 相互 遷移 過程, 各 事件 別 交通變數의 變動 形態등을 살펴보도록 하였다.

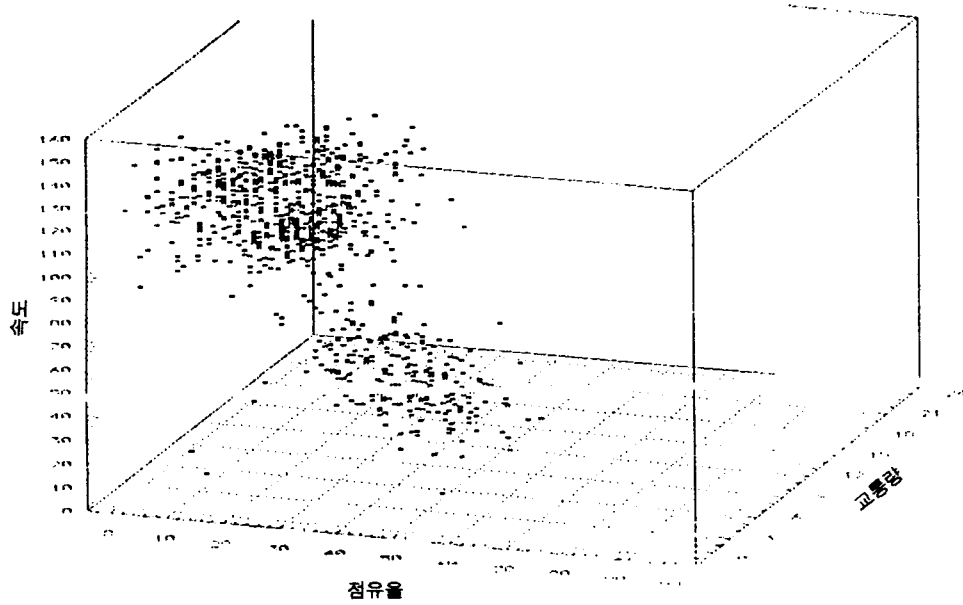
1 占有率-交通量-速度的 相關關係 分析

交通流의 總體的 形態 把握을 위해 交通流의 세 가지 變數들인 占有率-交通量-速度的 3次元 圖表를 作成하여(<그림 1> 參照) 停滯가 發生한 地點 資料들을 基準으로 各 位置別로 分析해 보았는데, Hall이 주장하는 破局面을 대부분의 停滯 發生 地點에서 確認할 수 있었다.

대체로 May가 주장하는 것과 같이 병목에서의 位置에 따라 병목에서 멀리 위치하면 두 영역간의 隔差(Gap)가 크고, 병목 가까이 병목 내로 갈수록 그 隔差가 작아진다.

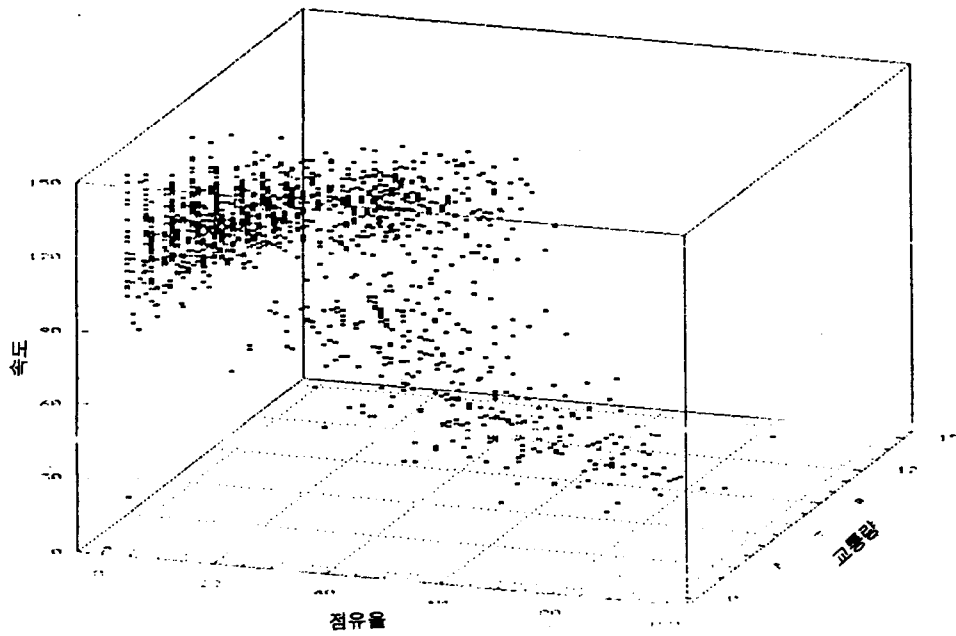


P24번 Station의 3차원 도표 (병목 1.5km 전방)

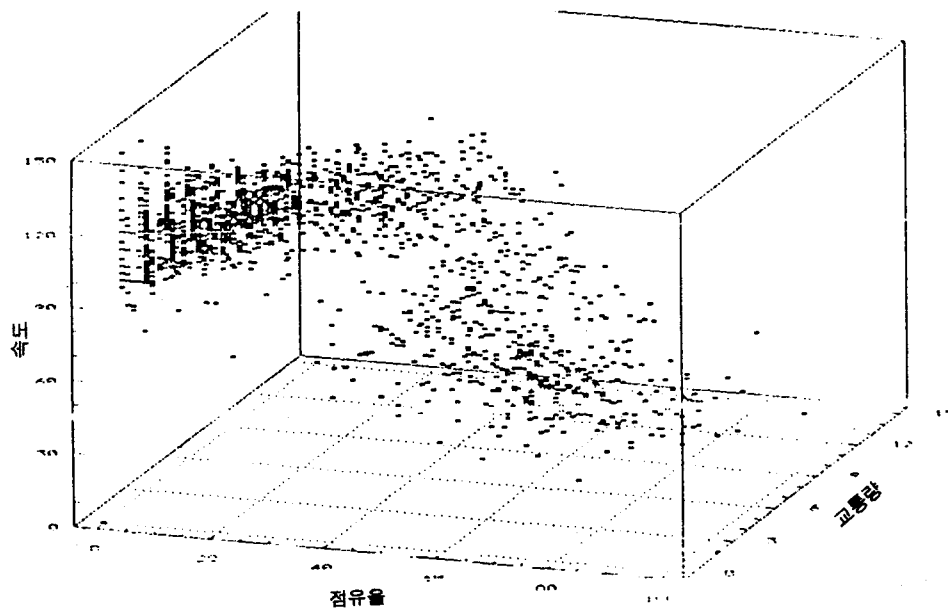


J16번 Station의 3차원 도표 (병목 0.3km 후방)

<그림 1> 各 地點別 占有率-交通量-速度 關係



J14번 Station의 3차원 도표 (긴 병목 内)

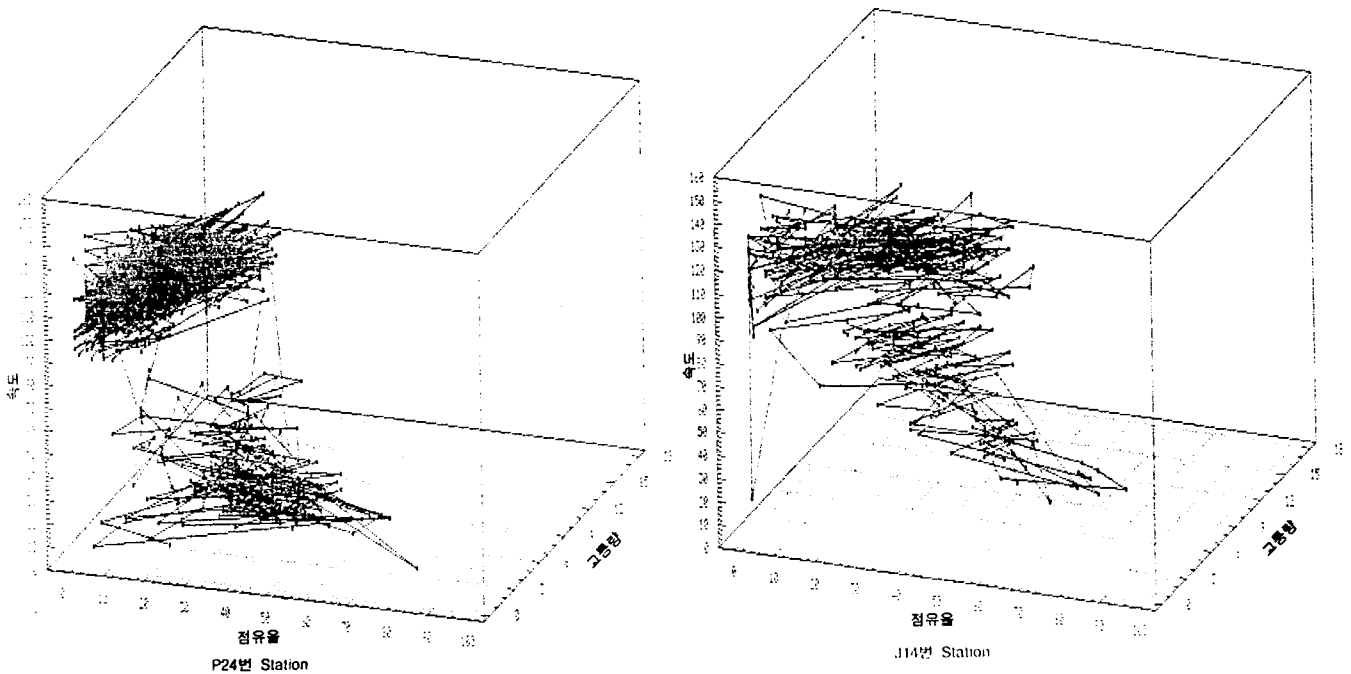


J10번 Station의 3차원 도표 (병목 0.5km 전방)

<그림 1> 各 地點別 占有率-交通量-速度 關係(繼續)

아래 <그림 2>는 두 地點에서의 重疊 時間-追跡圖를 나타내는데, P24번 지점의 경우 두 領域의 差異가 確實하며 두 領域間的 遷移가 別로 發生하지 않고 있다. 또한, 停滯領域에서의 變化(Variation)가 非停滯領域에서보다 크다는 것을 확인할 수 있다.

J14번 지점의 경우는 두 領域間的 隔差가 작으며 부드럽게 遷移되고 있음을 확인할 수 있다. 觀교-구리의 P24번 지점은 병목(상일 I/C)으로부터 1.5km 上流이고, 中部高速道路 14번 Station은 병목(중부 2터널)의 0.5km 상류라는 位置別 特性 때문에 두 領域과의 隔差에 差異가 發生하였다.



<그림 2> 各 地點別 占有率-交通量-速度의 重疊 時間-追跡圖

2 速度-占有率의 相關關係 分析

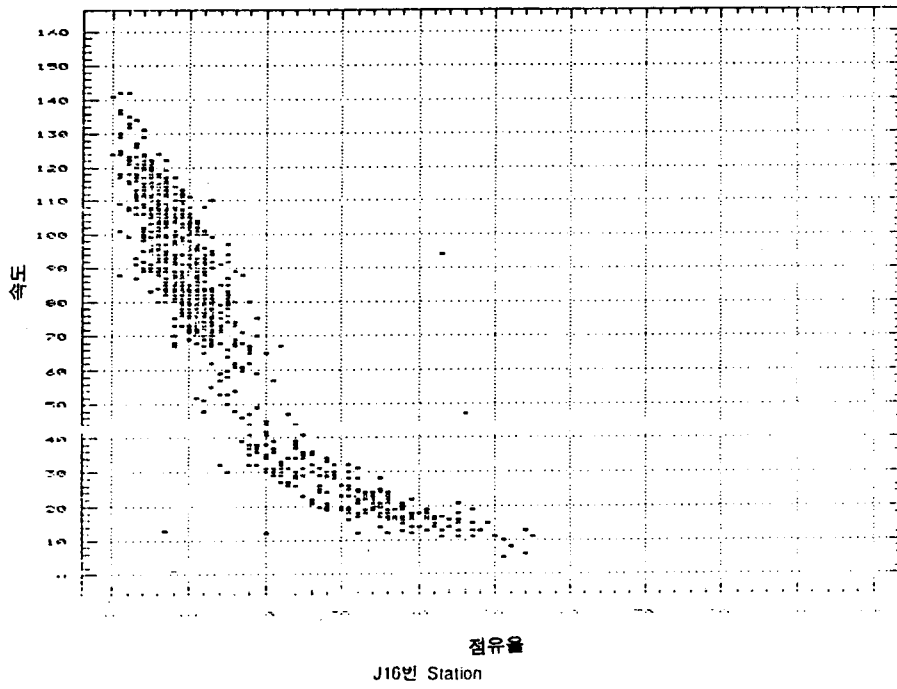
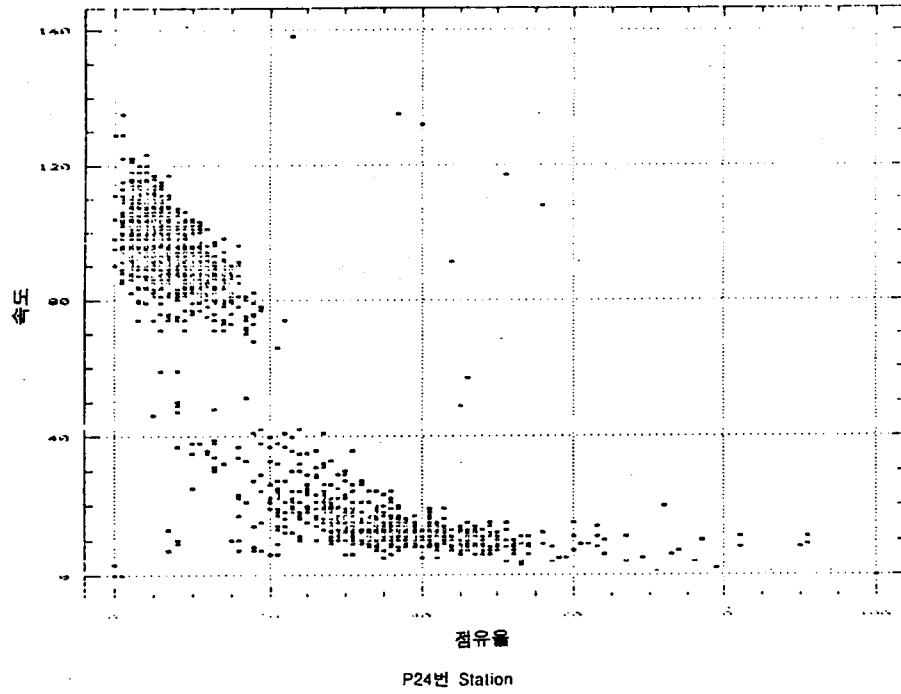
速度-占有率 相關關係는 <그림 3> 에서 보이는 바와 같이 각 지점별로 相異한데 이는 두 가지 이유 즉, 位置別로 占有率값이 感知器의 影響으로 다르게 생성되는 것과 병목으로부터의 위치에 따른 차이에 기인한다. 各 位置別로 J16번 지점(중부선 19.7km 地點)의 上行은 병목 구간의 시작인 중부 3터널로부터 약 4.5km 상류에 위치하여 이와 비슷한 위치(병목으로부터의)인 P24번 지점 下行과 비슷한 形態를 보이고 있는데 非停滯領域과 停滯領域의 区分이 명확하다. 약 40km/h~70km/h 사이의 不連續領域이 존재한다. 이는 May가 適宜한 地點의 位置 特性과 一致한다.

J14, 10번 지점(중부선 12.0km 地點)은 중부 1터널~3터널에 걸친 거대한 병목 구간의 내, 또는 바로 直前に 위치하여 停滯 내, 停滯풀림, 자유류 상태(비 停滯 상태)를 比較的 高루 경험한 形態를 보인다.

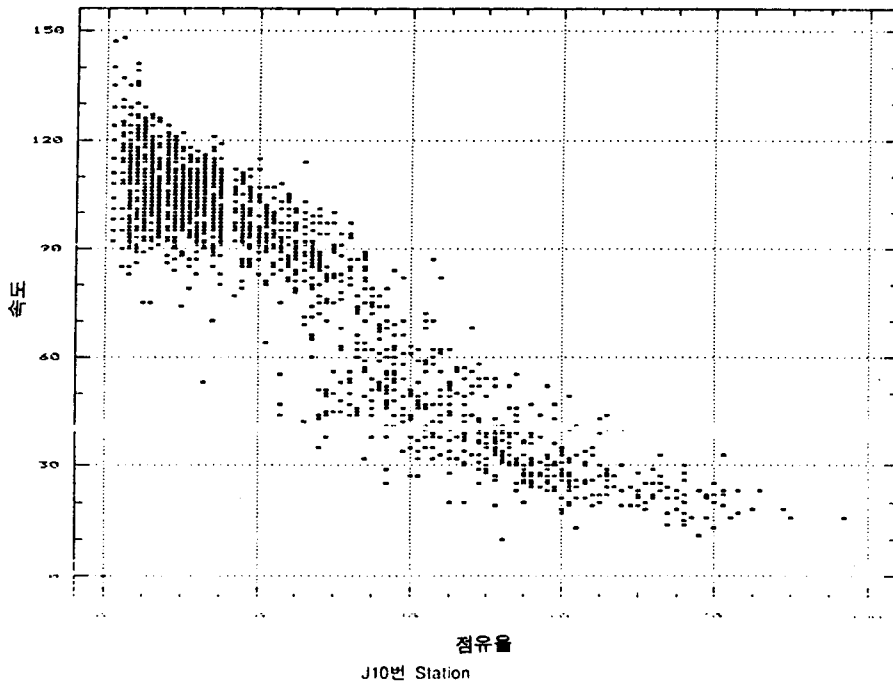
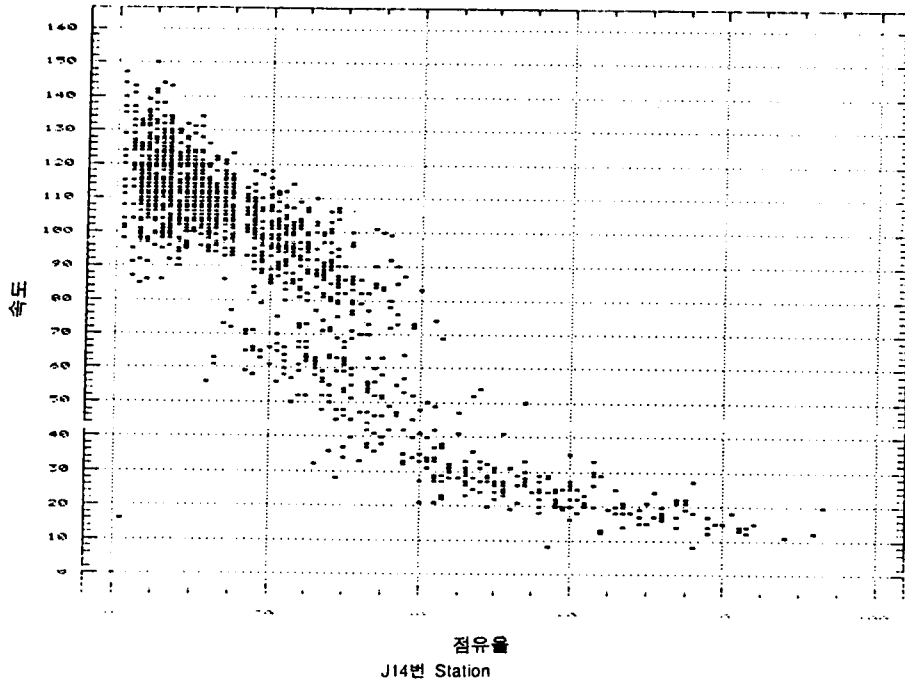
非停滯領域은 80km/h 이상의 경우로 보이며 약 40km/h 이하의 停滯領域과 그 中間의 領域으로 区分된다.

P30번 지점의 경우 非停滯領域과 停滯 풀림(QDF) 領域을 명확히 보이고 있는데 약 70km/h에서 斷絶되고 停滯 풀림 領域의 範圍는 30~70km/h로 파악된다. 이 P30 지점의 위치가 상일 I/C 상류 0.5km 전방으로 상일 I/C와 하일 I/C로 이루어지는 병목의 거의 끝 地點에 있어 이런 形態를 보인다.

車線別로 比較해 볼 때 一般的으로 追越車線에서는 領域의 斷絶이나 變換이 뚜렷이 觀察되는데 走行車線에서는 부드럽게 連結되어 있다. 이로써 追越車線을 이용하는 차량의 運轉者는 交通 運營 狀態에 더 민감하다는 결론을 導出해 낼 수 있다. 민감하다는 것은 운전자 조건뿐만 아니라 車輛 條件(加減速 能力 등)에도 起因한다. 이는 非停滯 領域의 경우 車線別로 차이가 나는데(추월차선 쪽이 速度가 높고 퍼져 있음), 停滯領域인 경우 비슷한 원인 즉, 停滯가 發生하면 車線別 特性值 變化가 줄어드는 것으로 설명될 수 있다. 즉, 車線 變更의 確率이 追越車線의 차량이 크므로 追越車線의 領域 斷絶이 커진다. 이로써 走行車線 利用 車輛이 追越車線 利用 車輛에 비해 非選擇的(Captive)임을 알 수 있다.



<그림 3> 各 地 點 의 速 度 - 占 有 率 相 關 關 係 (例)



<그림 3> 各 地點의 速度-占有率 相關關係(例)(繼續)

3 交通量-速度的 相關關係 分析

일반적으로 非停滯領域에서 交通量の 增加에도 불구하고 거의 水平인 速度를 유지하다가 最大 交通量の 60~80% 地點에서부터 꺾이기 시작하며, 容量 近處에서 停滯領域과의 斷絶을 보인다. 斷絶의 程度는 병목 上流部에서 가장 극심하고 병목 내를 지나 병목 하류로 갈수록 작아진다.

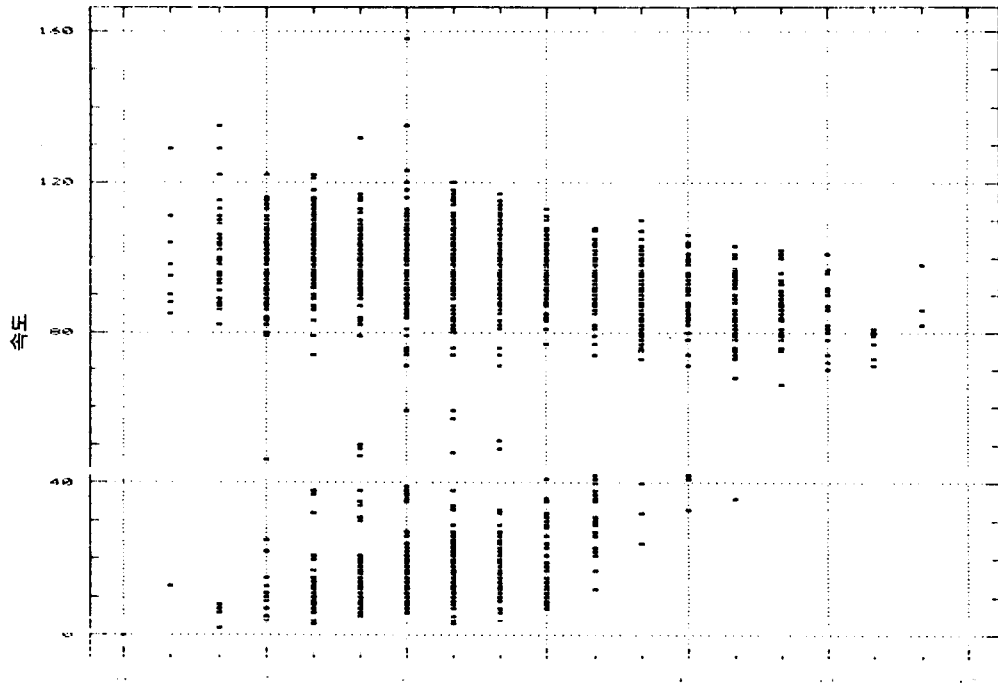
그러나 오랜 停滯를 경험하는(交通量の 時間的 推移를 살펴보면 오전, 오후 첨두시의 모습을 확실히 나타내어 거의 都市內 高速道路로서 분류가 가능하다) 하남 J/C와 상일 J/C 사이(P30 지점)에서는 傳統的 解析처럼 交通量 增加에 따라 速度가 완만하게 하강한다. 두 領域의 最大 交通量の 差異는 20~25% 정도로 두 용량 가설(Two Capacity Hypotheses)이 觀察된다.

全體的으로 분석해 볼 때, 臨界速度가 병목으로부터 먼 地點일수록 높아지는데 이는 地點別 交通變數의 相關關係 差異와 운전자가 점점 高速道路 運轉에 익숙해지는 것과 관련된 것으로 思料된다.

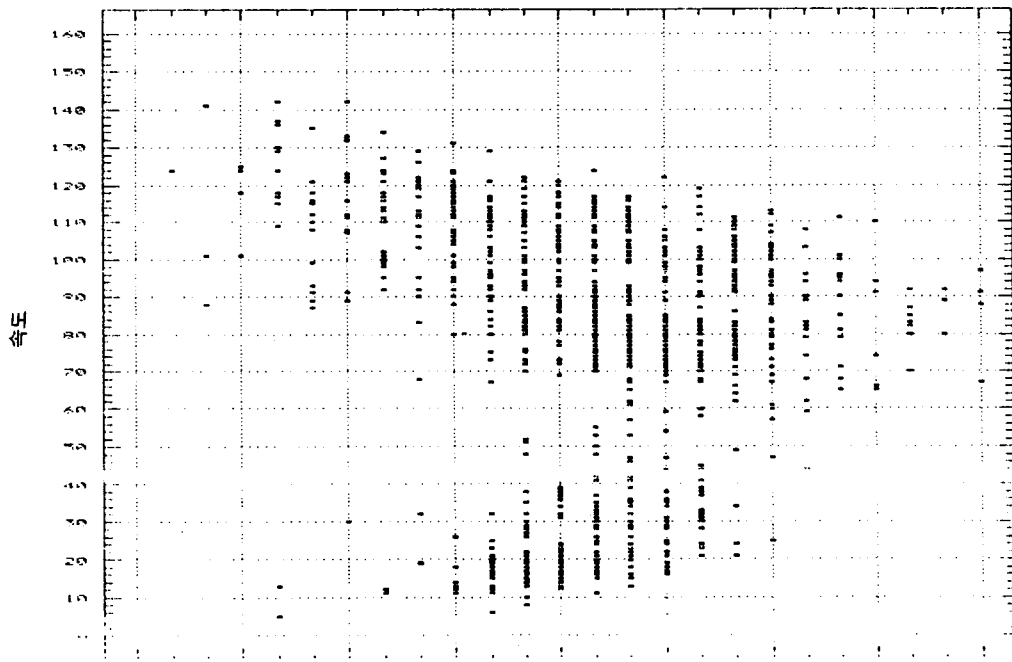
重疊 時間-追跡圖를 살펴보면, Hall이 주장하는 바와 같이 두 領域間의 轉移가 거의 비슷한 交通量 水準에서 일어남을 발견할 수 있었다. 또한 轉移가 最大 交通量보다 훨씬 작은 수준에서 일어남을 발견하였다. 이런 결과를 놓고 볼 때 交通 管理는 容量보다 훨씬 交通量이 작은 시점부터 이루어져야 함을 알 수 있다.

走行車線의 경우에는 前 節에서 분석한 바와 같이 斷絶이 뚜렷하지도 않고 非停滯領域과 停滯領域의 最大 交通量도 비슷하다. 非停滯領域에서의 交通量 變化에 따라 速度의 變化가 거의 없음은 追越車線과 비슷하다.

走行車線에서의 交通變數들의 부드러운(Smooth) 변화는 停滯에 관계없이 이 차선을 이용할 수밖에 없는(Captive) 차량이 많음에 기인한다.

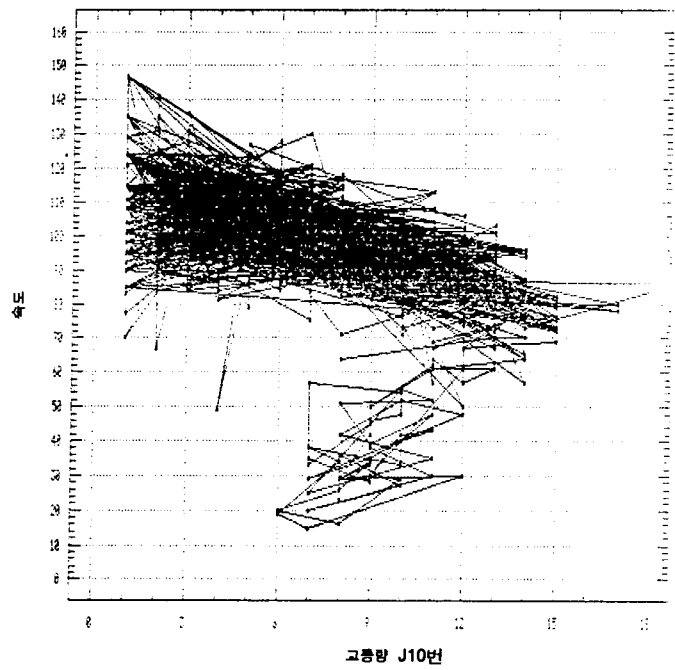
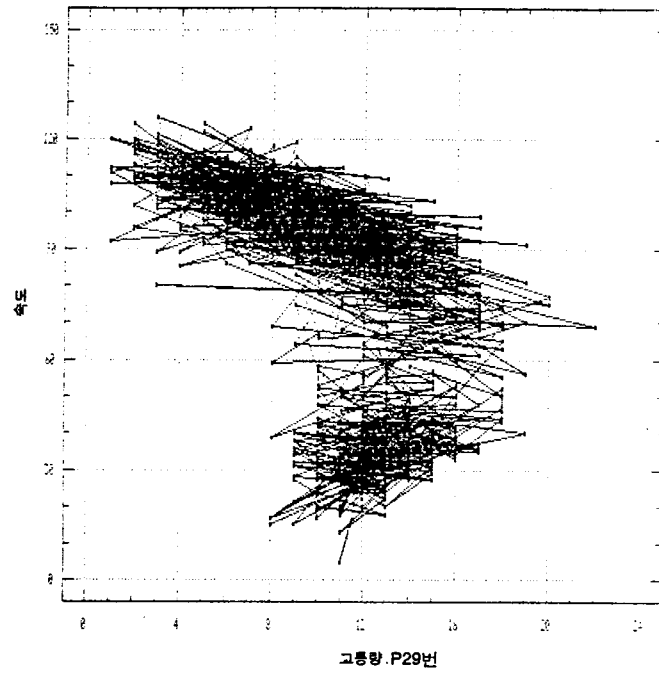


교통량 P24번



교통량 J16번

<그림 4> 各 地點別 交通量-速度 相關關係(例)



<그림 5>地點別 交通量-速度的 重疊 時間-追跡圖(例)

4 占有率-交通量の相關關係 分析

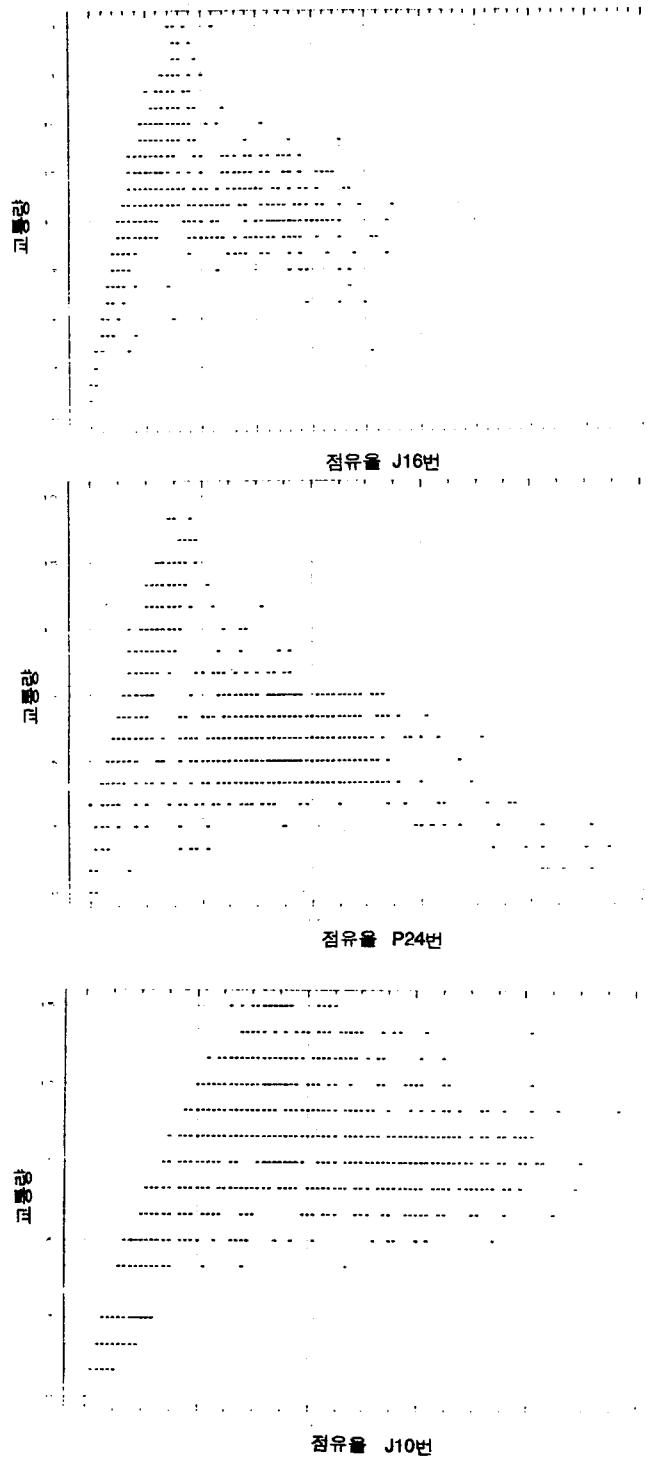
<그림 6>에서 占有率-交通量 相關關係 散布圖를 살펴보면 非停滯領域에서는 거의 直線 關係를 유지하면서 몰려 있고 停滯領域에서는 直線을 이루는 것이 아니라 三角形에 가까운 形態를 유지하고 있다. 전체적인 形態는 대체로 Hall이 주장하는 逆 V 形態이나 병목 상류부(P24, J16번 지점)에서는 Koshi가 주장하는 逆入 形態를 보인다. 이 역시 병목으로부터의 位置別로 相異한 形態를 취하고 있다. 非停滯領域의 線形 形態는 거의 모든 地點에서 발견된다.

P30번 지점에서는 非停滯領域과 상당히 높은 交通量에서 10~30% 占有率을 경험하고 있는 대기행렬 풀림흐름(QDF)을 발견할 수 있다.

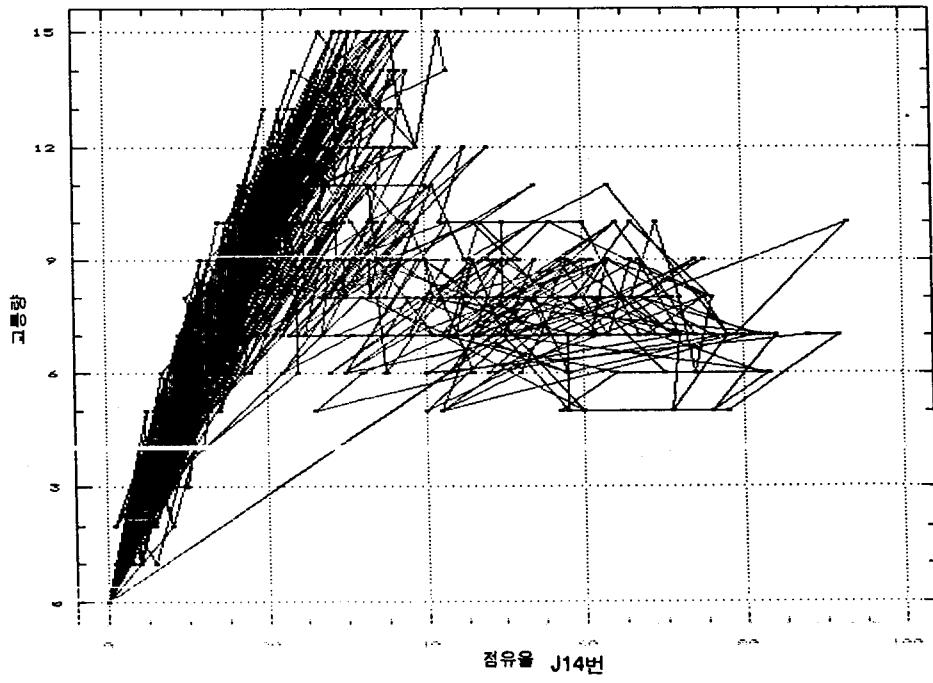
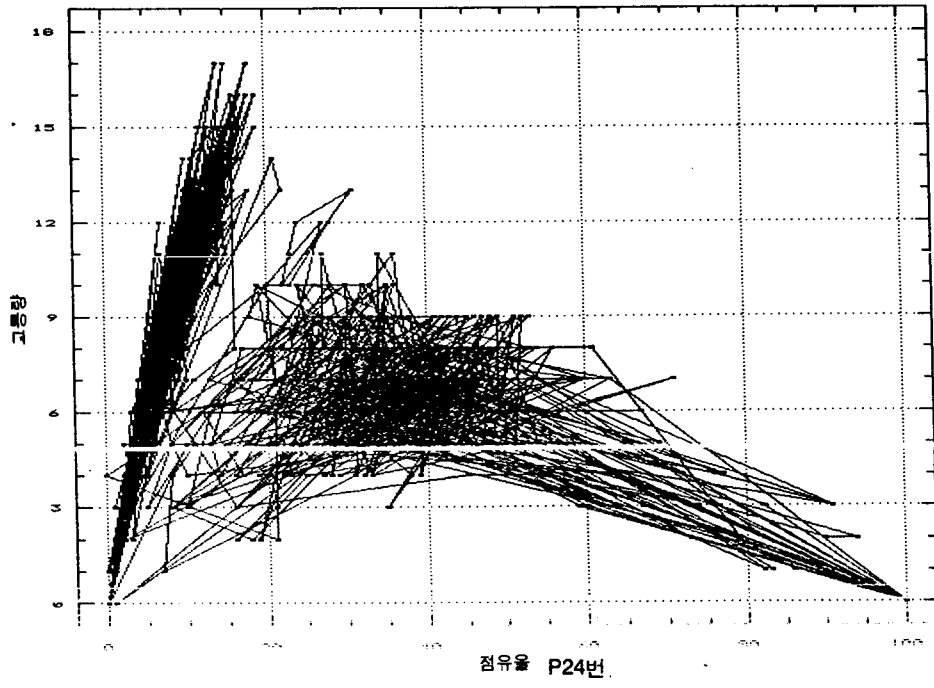
또한 각 高速道路別로, 位置別로 相異한 形態를 보이고 있는데 대표적으로 臨界占有率이 4車線 高速道路의 경우 10-12%, 3車線 高速道路의 경우 13-14%, 2車線 高速道路의 경우 16-18% 정도로 차이가 발생하는데 이는 옆차선 내부 마찰(Internal Side-Friction)에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 정확한 옆차선 내부 마찰에 대한 검토는 微視的인 資料의 解析에 의해 完成될 수 있을 것으로 사료되는 바 이는 本 研究의 範圍를 벗어나므로 此後 研究 課題로 남긴다.

重疊 時間-追跡圖를 살펴보면, 最大 交通量보다 상당히 낮은 交通量에서 두 領域間의 遷移가 발생함을 알 수 있으며 이 遷移가 거의 平行하게 이루어짐도 발견된다. 특히 逆入 形態를 보이는 地點 즉, 병목에서 멀리 떨어져 있을수록 낮은 交通量에서 遷移가 발생한다.

두 領域間의 最大 交通量은 追越車線에서는 거의 25% 정도 차이가 나고 있으나 走行車線에서는 그 差異가 없다. 즉, 停滯가 발생하면 두 차선간의 交通量 차이가 없어짐을 알 수 있다.



<그림 6> 各 地點別 占有率-交通量 相關關係(例)



<그림 7> 各 地點別 占有率-交通量의 重疊 時間-追跡圖(例)

5 密度-占有率 關係 分析

集中度(Concentration)는 두 가지 測度 즉, 密度, 占有率로 표현할 수 있다. 密度는 그 單位에서 알 수 있듯이 區間(Area) 測定值이고 占有率은 地點(Spot) 測定值이다.

密度는 航空 撮影이나 寫眞 測量, 流入/流出 調査(Input/Output Survey) 등의 方法을 통해 구할 수 있고, 占有率은 車輛 檢知器 등으로 구해진다. 高速道路 交通 管理 시스템에서 직접 구할 수 있는 測度는 % 占有率로, 이는 (車輛이 感知器를 占有한 時間)/測定 時間 $\times 100$ 으로 구할 수 있다.

5.1 密度-占有率 變換式

여기서는 密度와 占有率의 數學的 關係를 誘導해 보도록 한다. 먼저, 個別 車輛의 速度는 進行 距離를 進行 時間으로 나누면 되는데, 다음 式 (5. 1)과 같다.

$$X_i = \frac{L_v + L_y}{t_0} \quad \text{式 (5. 1)}$$

여기서

$$\begin{aligned} x_i &= \text{개별차량속도 (m/sec)} \\ L_v &= \text{개별차량길이 (m)} \\ L_y &= \text{유효검지영역 (m)} \\ t_0 &= \text{개별차량점유시간 (sec)} \end{aligned}$$

이 (5. 1)을 巨視的 水準으로 變換하면

$$\bar{\mu}_{SMS} = \frac{3600}{1000} \left(\frac{\bar{L}_V + \bar{L}_D}{\bar{t}_0} \right) \quad \text{式 (5. 2)}$$

感知器가 T 시간 동안 占有된 時間(T_0)은 N 臺가 지나갈 때

$$T_0 = N \left(\frac{\bar{t}_0}{3600} \right) \quad \text{式 (5. 3)}$$

여기서 $T_0 = T$ 시간 동안 總占有時間 (時間)
 $N = T$ 시간 동안 感知器를 지나간 車輛 臺數
 $T =$ 總 觀察時間 (時間)

식 (5. 2)에서 \bar{t}_0 를 구해 식 (5. 3)에 代入하면

$$T_0 = \frac{N}{\mu_{SMS}} \left[\frac{\bar{L}_v + L_D}{1000} \right] \quad \text{式 (5.4)}$$

시간 T 동안의 % 占有率은

$$\%OCC = 100 \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad \text{式 (5. 5)}$$

式 (5. 4)의 T_0 를 式 (5. 5)에 代入하면

$$\%OCC = \frac{N}{T} \left(\frac{100}{\mu_{SMS}} \right) \frac{\bar{L}_v + L_D}{1000} \quad \text{式 (5. 6)}$$

여기서 $\frac{N}{T}$ 은 q (교통류율)이므로

$$\%OCC = \frac{q}{\mu_{SMS}} \left(\frac{1}{10} \right) (\bar{L}_v + L_D) \quad \text{式 (5. 7)}$$

等流 條件에서 $q = k \bar{\mu}_{SMS}$ 이므로

$$\%OCC = k \left(\frac{1}{10} \right) (\bar{L} + L_D) \text{ 이 된다.} \quad \text{式 (5. 8)}$$

5.2 密度-占有率의 相關關係

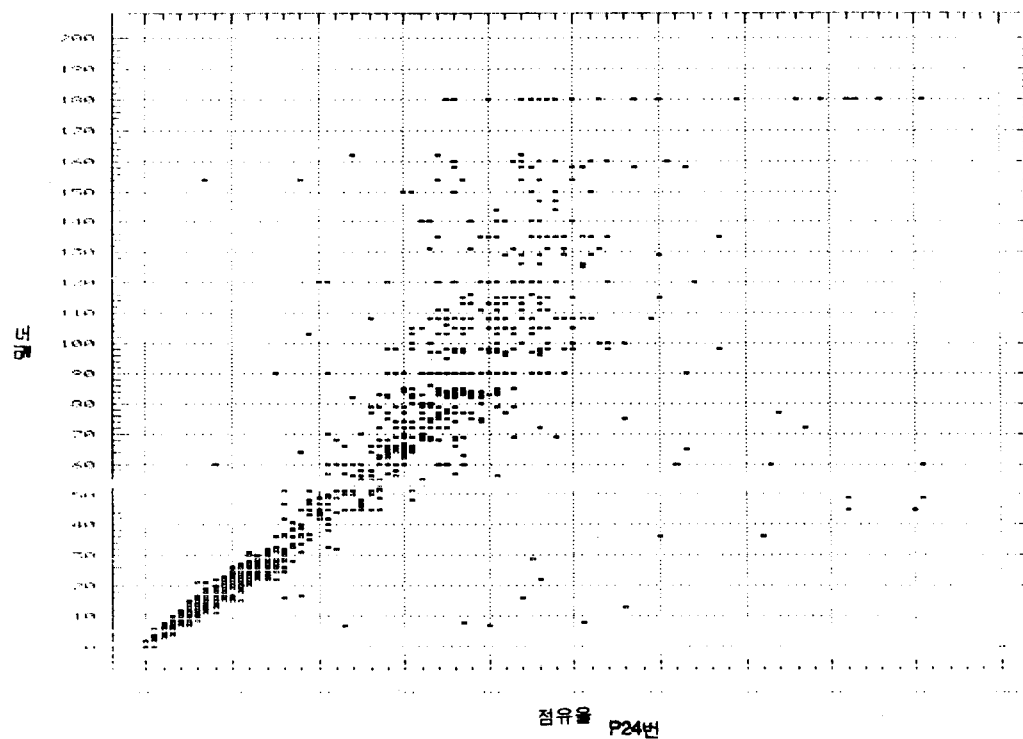
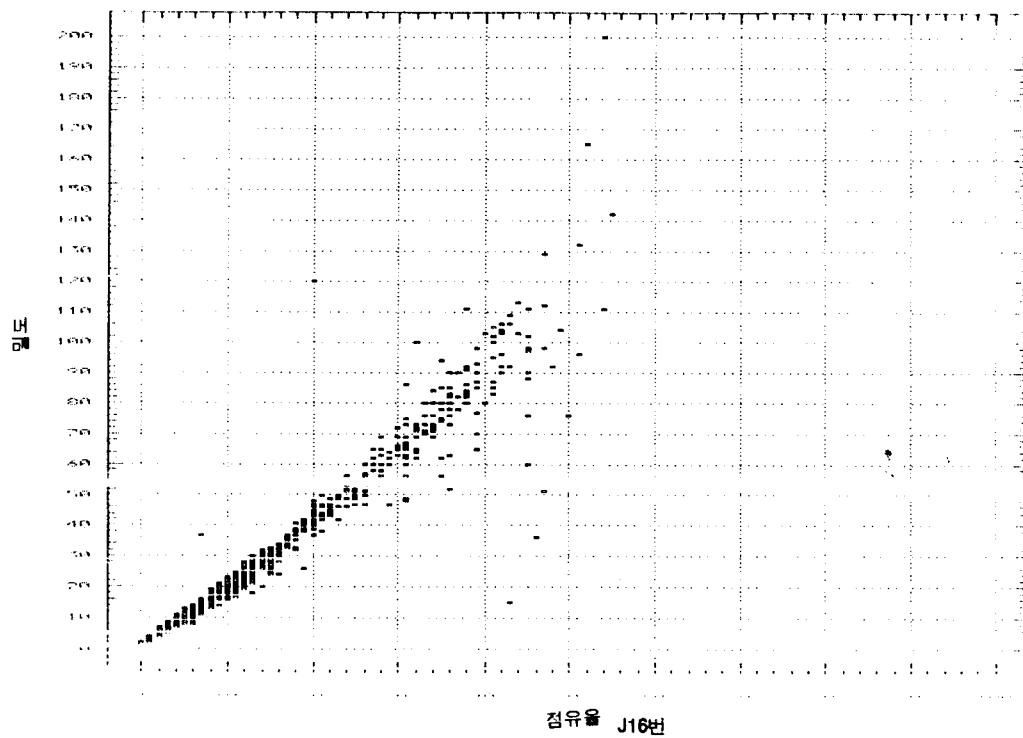
占有率은 位置에 따라 다르게 (site-specific) 측정될 경우가 많다. 이는 센서, 포장 상태, Loop Coil의 꼬임 상태, Lead-in 선의 상태에 따라 磁場 形成이 다

르기 때문이다. 하지만, 密度-占有率 相關關係에서 대략 위 4.5.1에서 誘導된 變換式에 따라 線形 關係를 유지하는 領域과, 그렇지 못하고 分散되는 領域의 斷絶點을 확인할 수 있는데 이 점이 密度가 40대/km 정도일 때이다. 이는 다른 相關關係에서 非停滯領域의 限界密度임을 확인해 볼 수 있다.

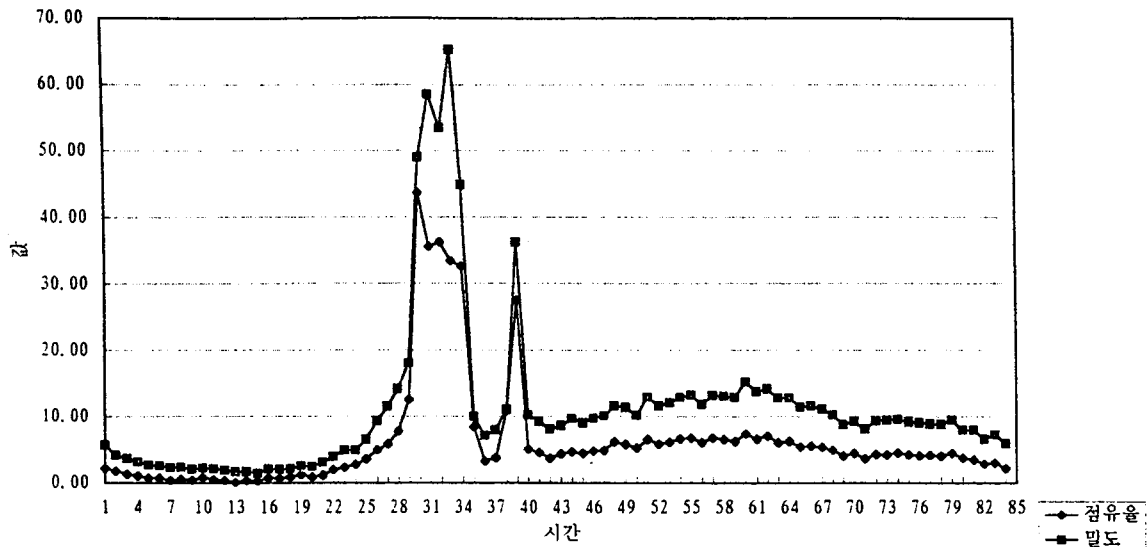
위의 狀態 變動은 두 가지 原因에 緣由하는 것으로 思料되는 바, 그 하나는 占有率は 地點 測定值이고 密度는 區間測定值임에 의하여 생기는 차이로 판단 되고, 또 하나는 停滯領域에서는 等流라는 假定이 성립하지 않는다는 假說이다. 이는 停滯가 시작되면 섰다갔다(Stop-and-Go)를 반복하게 되어 地點과 區間的 集中度가 달라지고 “連續된 物質(Continuous Medium)”이라는 等流의 前提가 흐트러진다는 것을 의미한다.

Paul Hsu와 Banks는 “차량 길이의 速度가 相互關係를 맺지 않은 경우에 密度-占有率이 直線 關係에 있다”고 하였는데 이는 곧 차량 길이(車種)와 速度가 相互關係에 맺고 있을 때(즉, 가·감속 능력의 차이가 있을 때)는 直線 關係가 아니라고 할 수 있다. 이를 다시 해석해보면, 가·감속이 필요 없는 경우, 즉, 非 停滯 狀態에서는 直線 關係를 가지지만, 가·감속이 필요한 停滯領域에서는 直線 關係를 유지할 수 없음을 의미한다. 즉, 停滯領域에서는 等流條件이라는 假定이 성립하지 않게 되어 $q = k \bar{\mu}_{SMS}$ 의 관계가 성립되지 않음을 의미한다. 또 다른 원인은 다음 <그림 9>에서 살펴본다.

다음 <그림 9>의 例에서 볼 수 있듯이, 占有率이 작을 때는 별 차이를 나타내지 않고 密度와 비슷하게 변하다가 占有率이 높아질수록 차이를 보이는데 그림에서 보듯이 일단 높아진 占有率이 떨어질 때 密度는 어느 정도 계속 높아진다. 이는 占有率은 地點 測定值이기 때문에 狀況 解除에 따라 바로 변하는데 密度는 區間測定值이기 때문에 조금 시간갭(Offset)을 가지고 변화하기 때문이다(즉, 交通量이 占有率보다 둔감하게 작용함을 內包하고 있다.)이도 密度와 占有率 關係가 停滯領域에서 直線關係를 유지할 수 없는 원인으로 판단된다.



<그림 8> 各 地 點 別 密 度 - 占 有 率 相 關 關 係 (例)



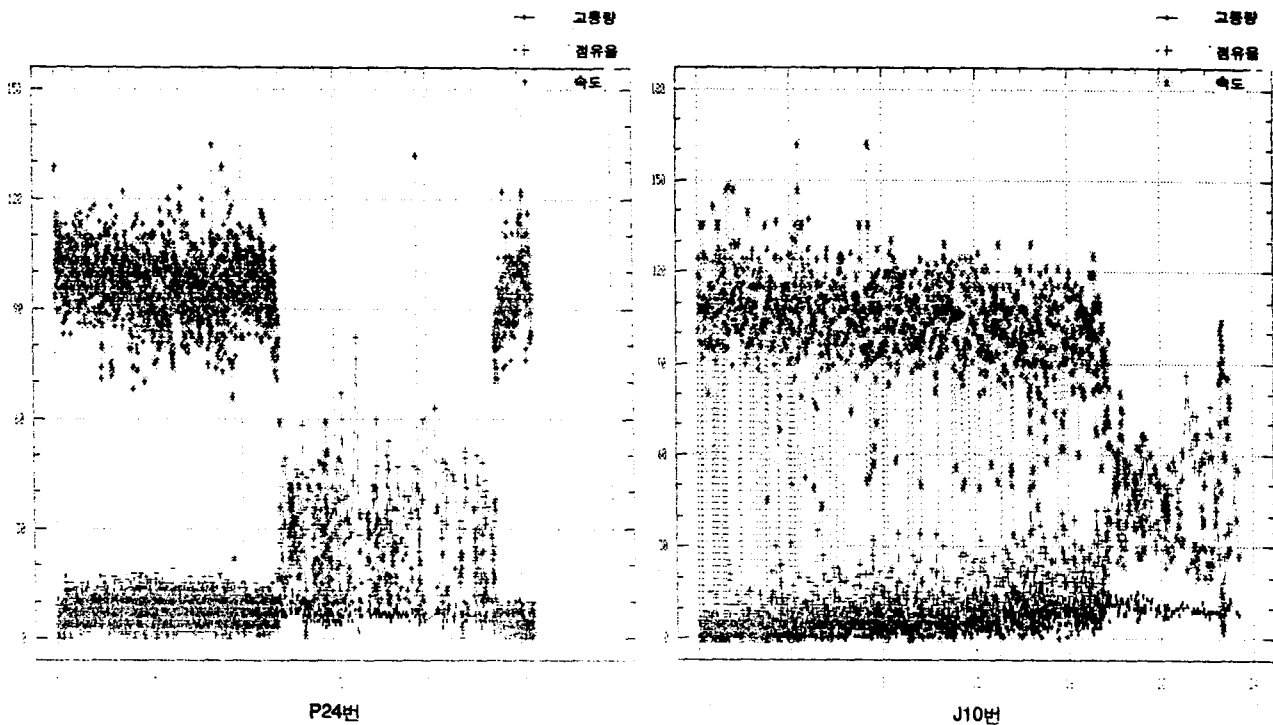
<그림 9> 密度-占有率의 時間的 推移

6 各 交通變數들의 時間的 推移 分析

6.1 各 交通變數들의 變動(Fluctuation)

時間帶別 特性值의 變化를 같은 尺度(Scale)로 살펴보면 停滯가 발생할 때 速度나 占有率은 급격히 變化하지만 交通量은 크게 變化하지 않는다. (時間 間隔이 늘어날수록 交通量의 變化量도 늘어나겠지만, 교통 管理 시스템에서 時間 間隔(Cycle)은 1分 이하로 한다.)

이로써 停滯나 有故를 感知하기 위한 變數로 速度나 占有率이 선택됨이 妥當한 것이다. 그런데, 感知器로 速度를 測定하기 위해서는 쌍센서를 설치해야 하는 불편을 초래하게 된다. 따라서, 一般的으로 有故나 停滯感知 알고리즘에서 占有率을 그 測定值로 선택하게 된 것이다. 최근에 설치된 高速道路 交通 管制시스템(COMPASS 등)에서는 쌍센서를 설치하기 시작했는데, 이를 바탕으로 McMaster 알고리즘등 速度를 變數로 선택하는 알고리즘들이 개발되기 시작하였다.

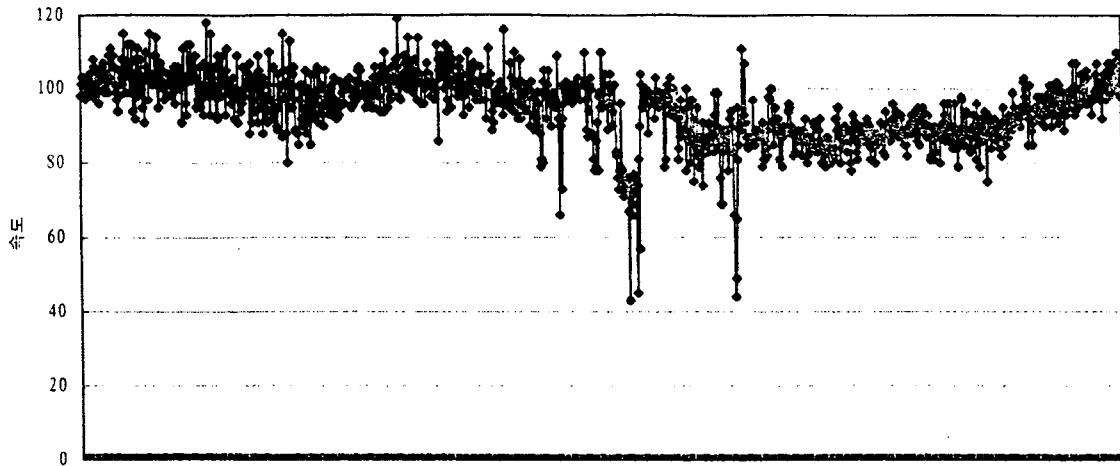
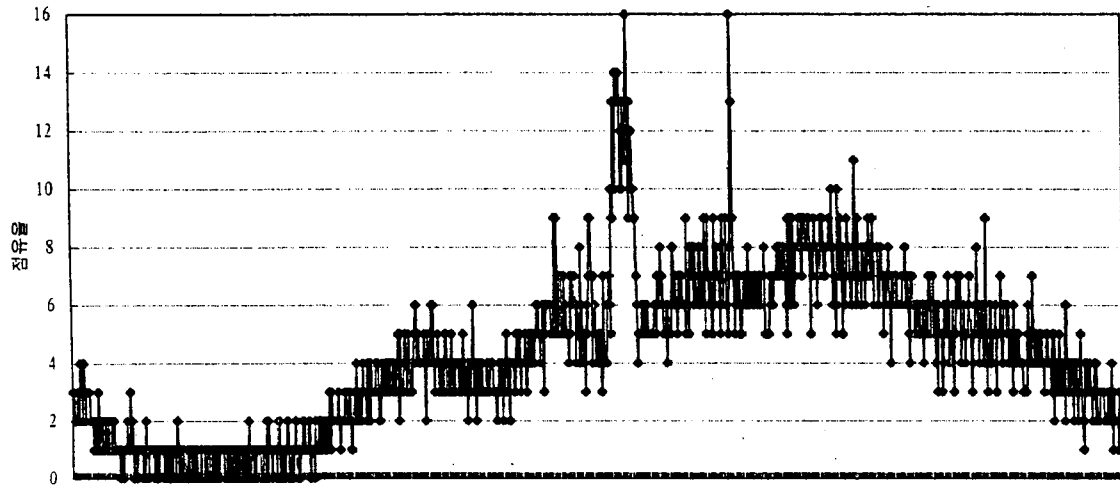
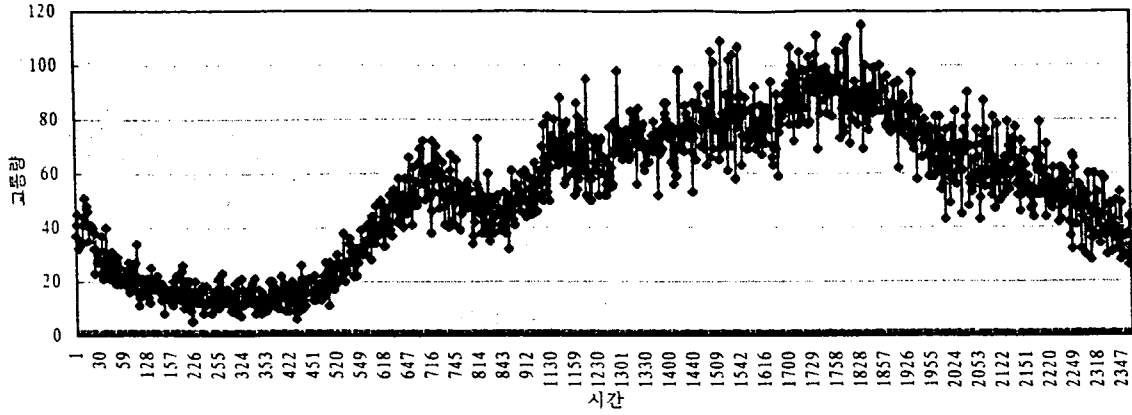


<그림 10> 各 交通變數들의 變動(例)

6.2 各 交通變數들의 時間帶別 變化

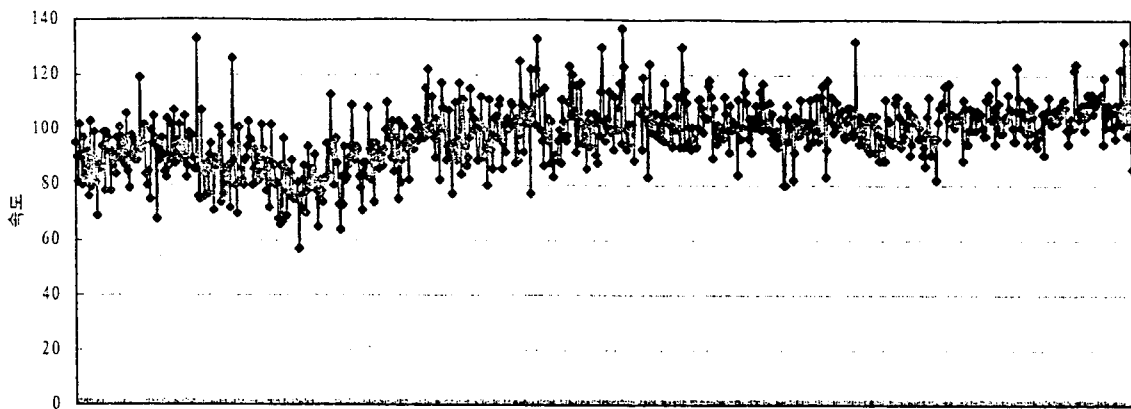
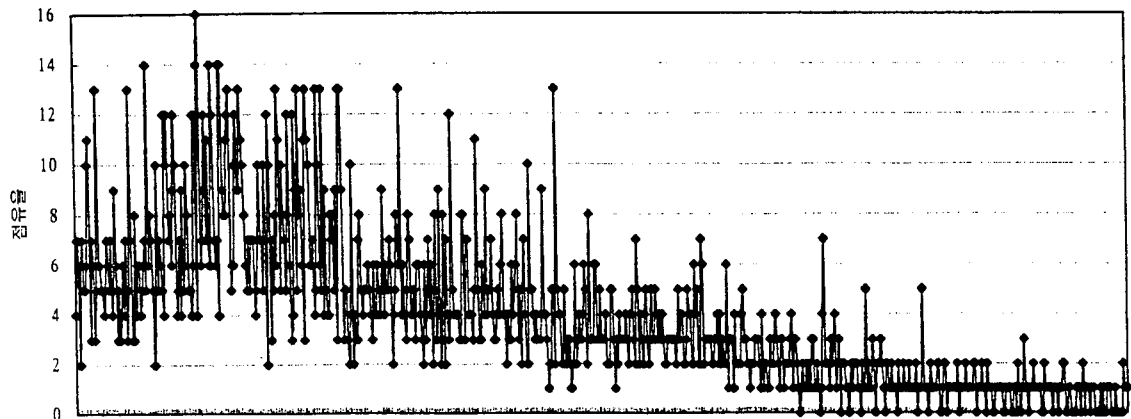
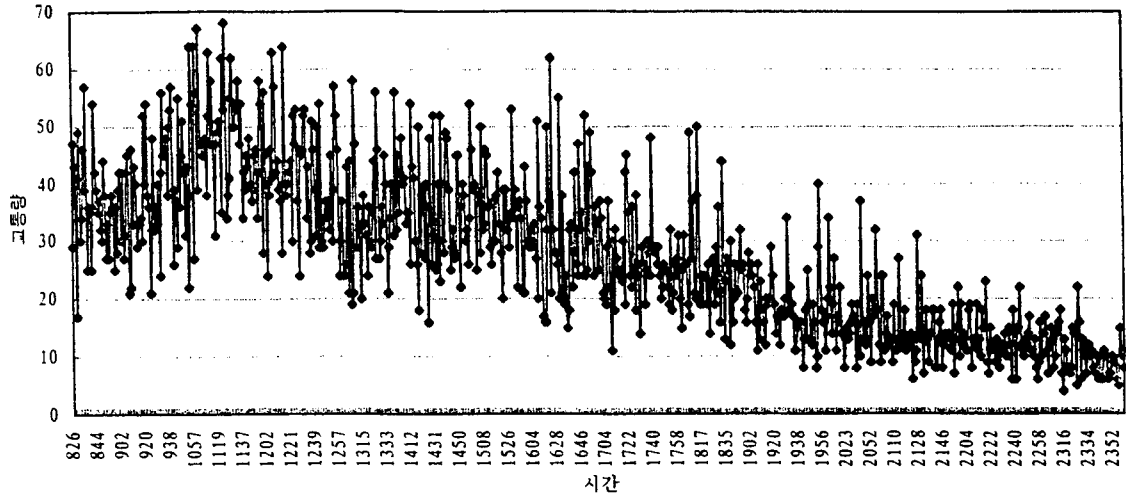
또한, 日日 交通變數의 變動 狀態를 살펴보면, 交通量의 경우 경부선 양재I/C 근처의 상행인 경우, 오전·오후 尖頭時의 交通量이 많은 樣態를 보이고 있으나 중부선의 경우에는 오전에는 下行 方向으로 오후에는 上行 方向으로 尖頭時現狀을 보인다. 首都圈 外廓 高速 道路의 경우에는 各 地域別로 相異한데 하일-하남I/C區間의 경우에는 위 경부선 양재 부근의 樣態와 비슷하며, 성남 I/C부근을 비롯한 나머지 구간에서는 하루종일 비슷한 交通量을 보인다. 占有率과 速度의 경우에는 침두시에서도 특별한 경우(대체로 交通量이 용량의 60% 이상)에만 증가·감소한다.

결론적으로, 交通量은 需要의 函數로 變動하지만 占有率및 速度는 運營 狀態에 따라 變化함을 알 수 있다. 또한 이런 運營 狀態가 병목으로부터의 位置, 車線 變更의 寡少등과 같은 運營 條件과 交通 條件에 따라 相異함을 알 수 있다.

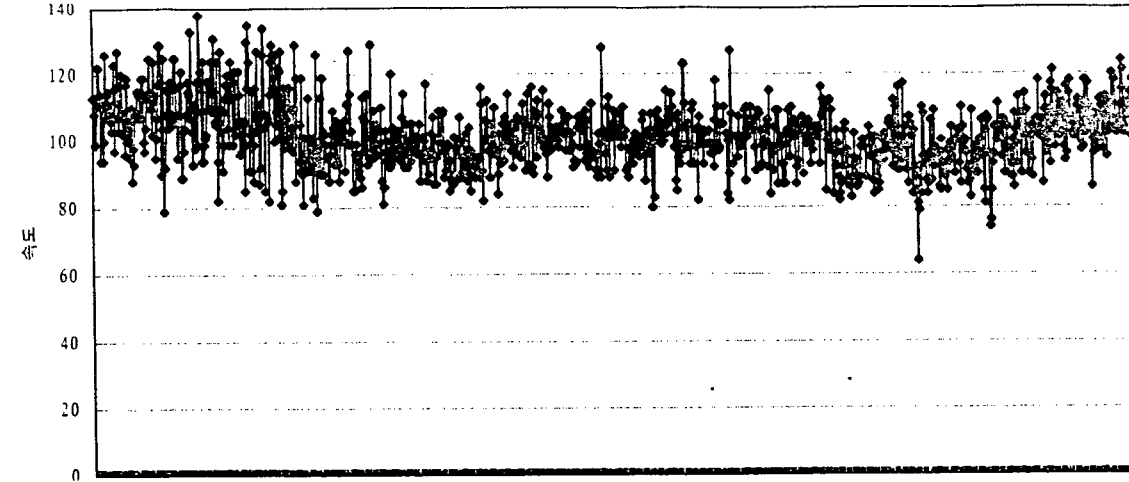
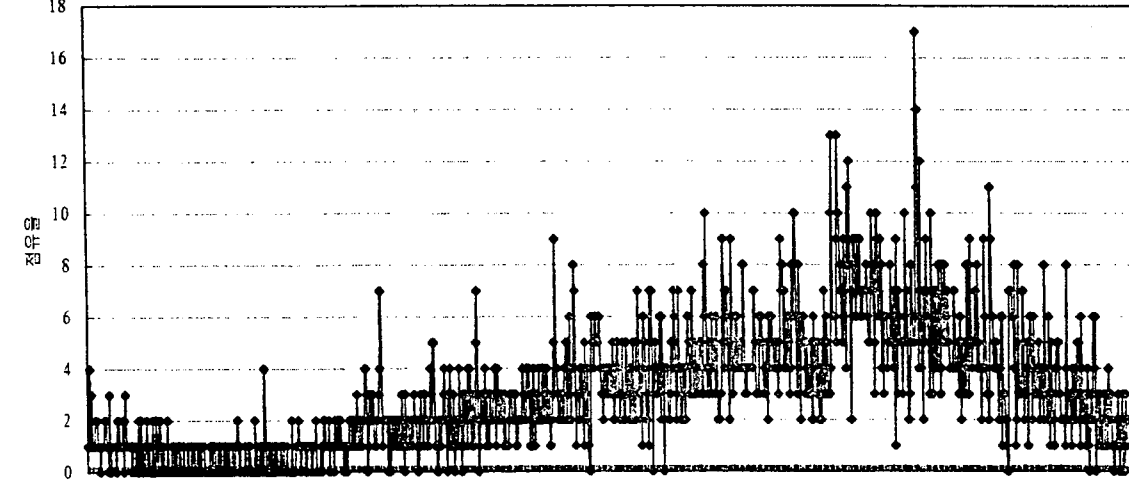
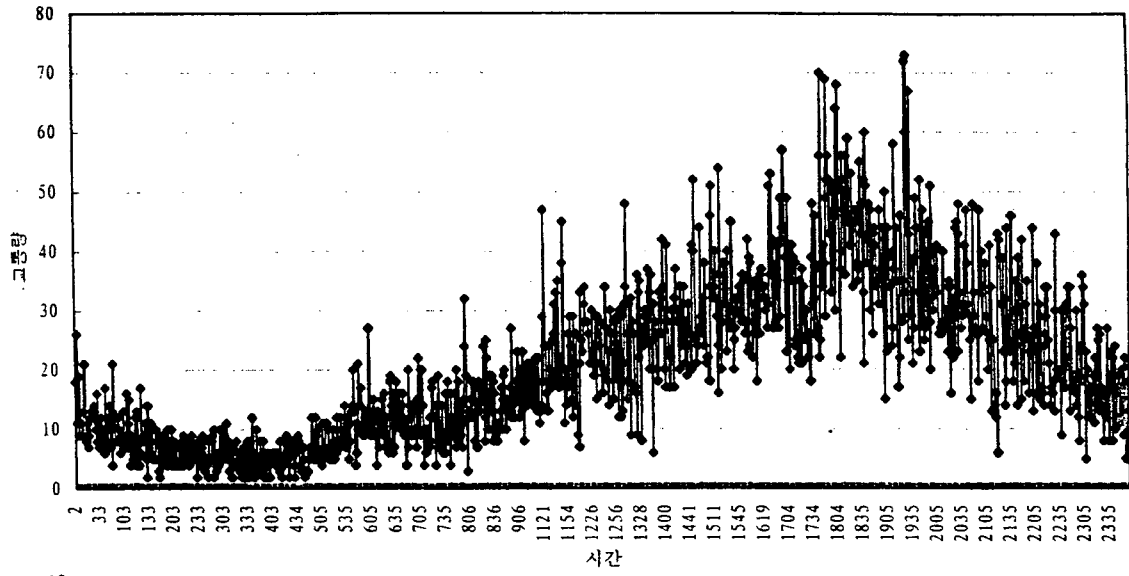


<그림 11> 各 交通變數들의 時間帶別 變化 例

충부선 하행 5.8km



<그림 11> 各 交通變數들의 時間帶別 變化 例(繼續)



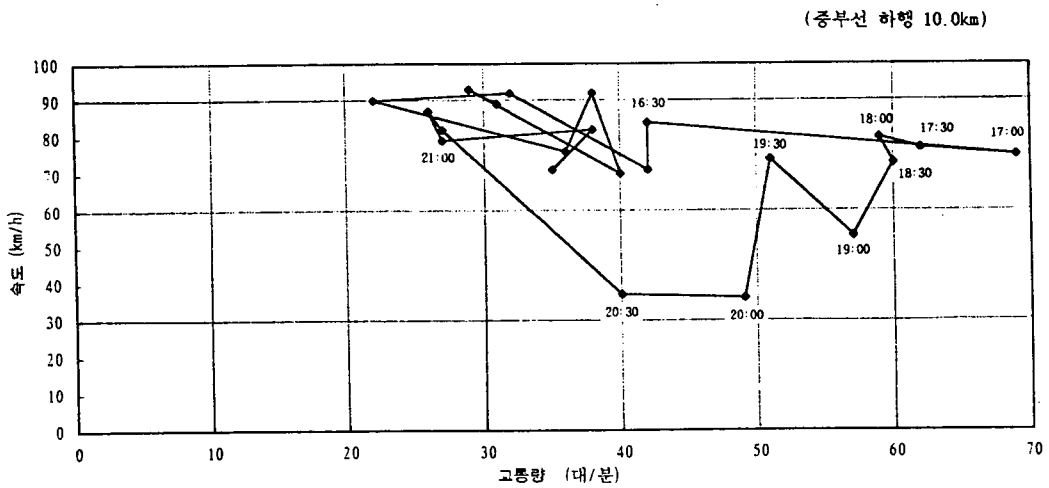
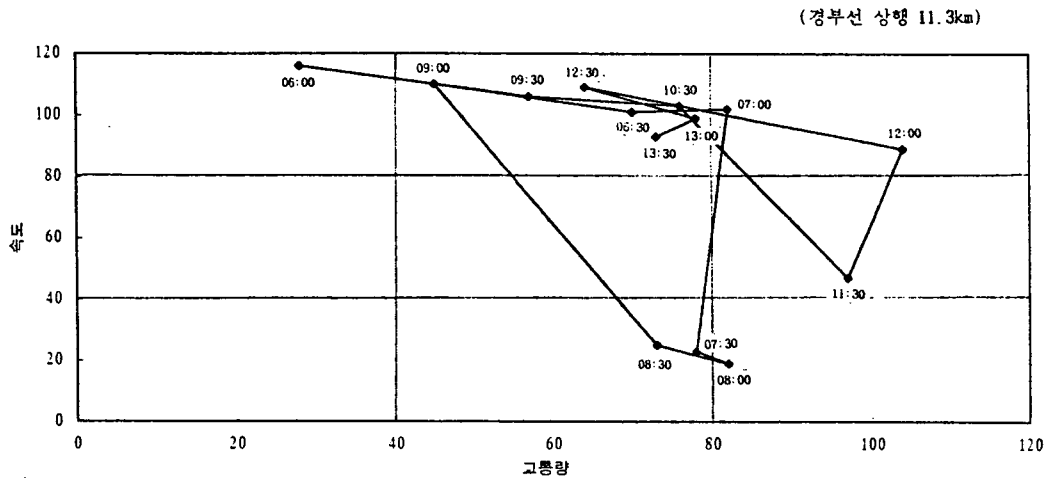
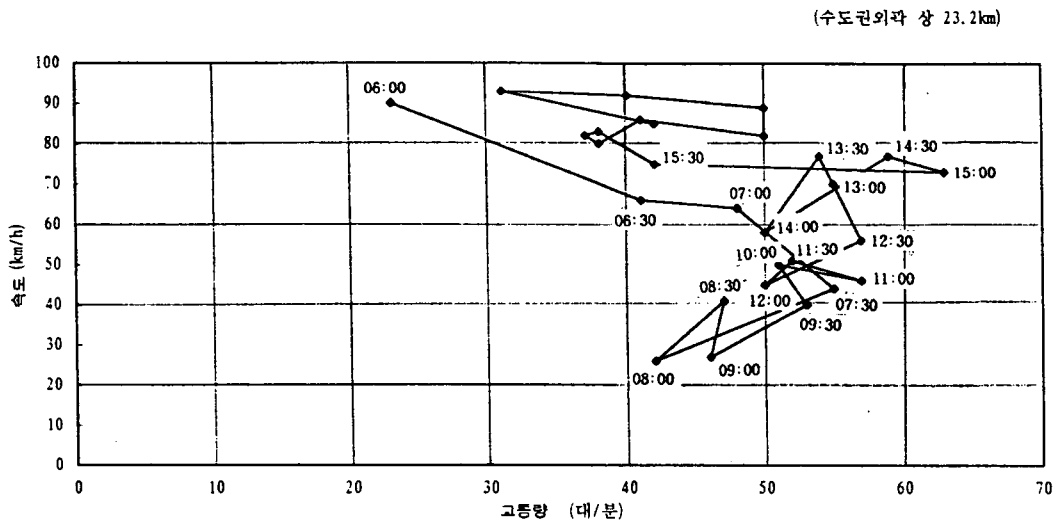
<그림 11> 各 交通變數들의 時間帶別 變化 例(繼續)

6.3 30分 間隔의 變動(Time-Traced Plot)

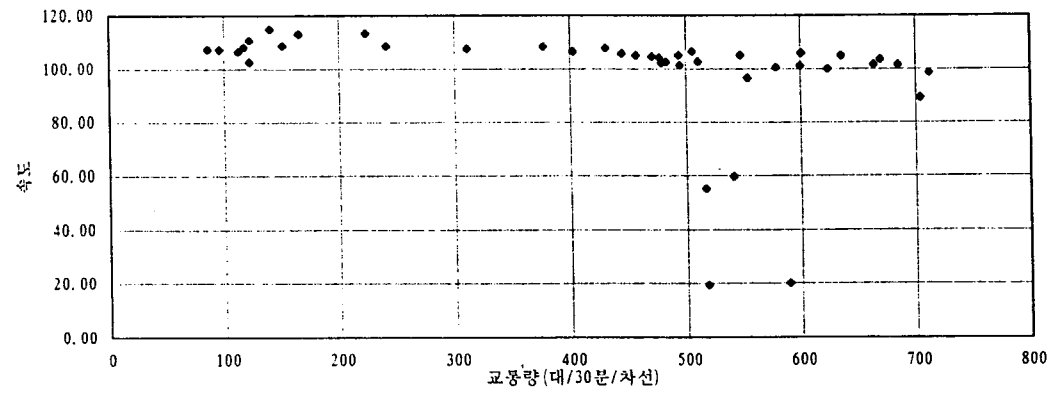
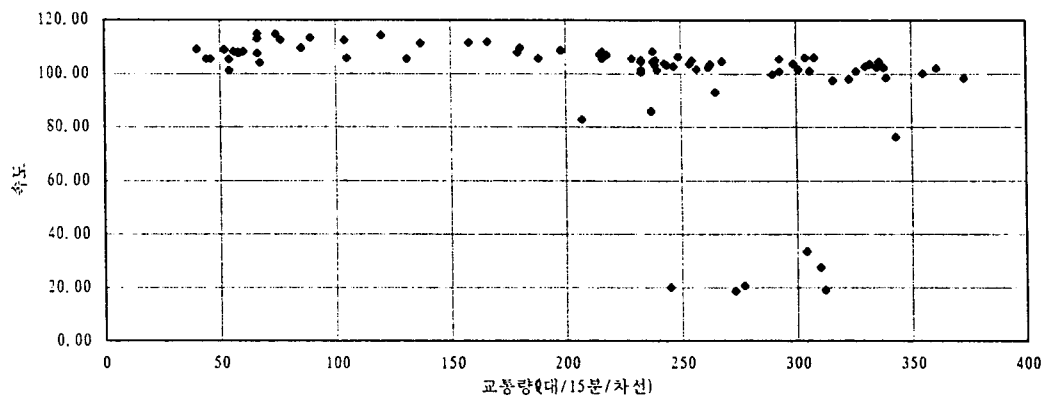
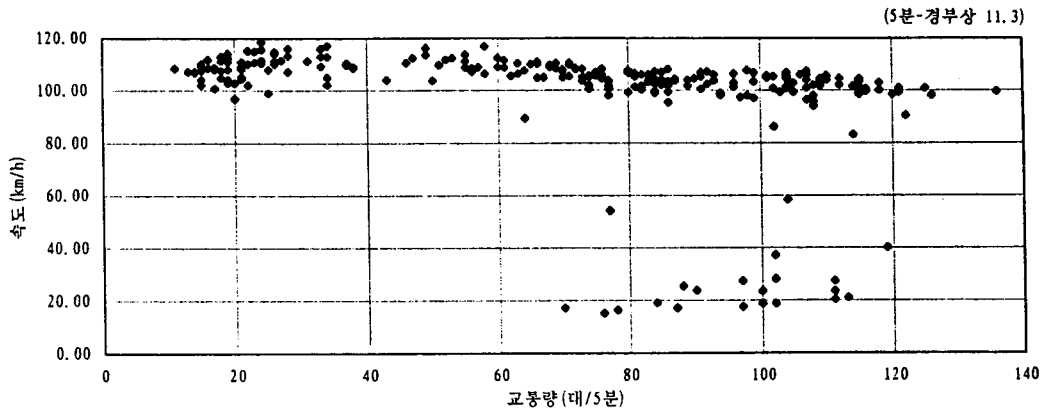
각 交通變數間의 關係를 30分 間隔으로 1分 資料를 利用하여 觀察해본 結果, 交通量-速度의 關係에서 最大 交通量을 보이는 地點을 지나면서 非停滯領域과 停滯領域이 연결되는 것이 아니고, 앞에서도 언급된 것과 같이, 容량의 약 60-70%의 交通量을 보이는 시점에서 급격히 下降하여 停滯領域으로 突入하고 대기 풀리면서 最大 交通量을 보이는 地點으로 옮겨간다. 이로써 Hall이 주장하는 급격한 下降(Jump)狀態를 확인할 수 있다.

6.4 各 時間間隔別 平均 比較

各 時間間隔別 즉 1分, 5分, 15分, 30分 間隔의 各 交通變數의 平均值들을 比較해보았다. 그 結果 대기행렬 풀림 領域의 자료들이 시간 간격이 커질수록 희박해짐을 確認할 수 있는데 이로써 Payne이 주장하는 不連續性(Discontinuity)은 자료의 稀薄性(Sparseness)에 의한 것이지 그 상태가 존재하지 않은 것에 연유하지 않음을 觀察할 수 있다. 즉, 人間工學的 側面에서 어떤 자료 稀薄 地點이 존재하는 것이 아니라 차라리 平衡 狀態가 깨짐에 따른 결과임을 確認할 수 있다.



<그림 12> 30分 間隔의 交通量-速度 關係圖에서의 遷移



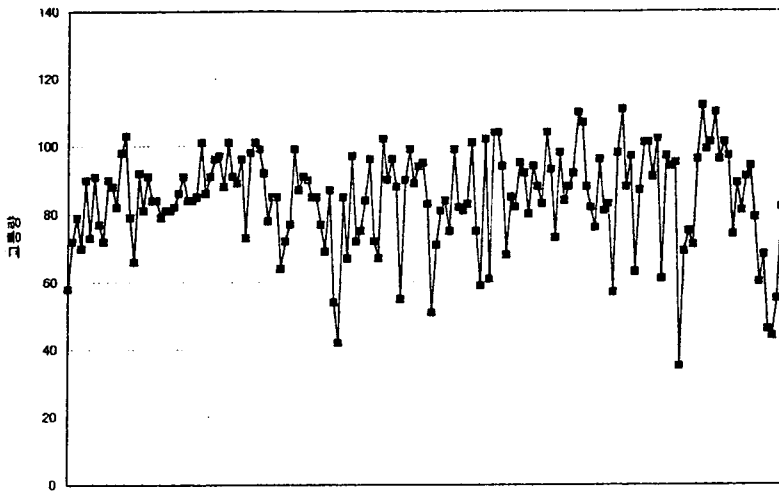
<그림 13> 各 時間間隔別 平均의 比較

7 停滯時 交通流 行態 分析

현재, 高速道路 交通 管理 시스템이 설치된 구간에서는 京釜線의 양재-판교 구간, 首都圈 外廓 高速 道路의 하남 J/C - 하일 I/C구간이 대표적인 反復的 停滯 區間이다. 이중 양재-판교구간에서 出勤 時間에 발생하는 停滯樣相을 살펴보면 다음 <그림 14>, <그림 15>와 같은데 그림에서 볼 수 있듯이, 停滯가 서서히 발생하여 하류 방향으로 전파되고 있으며 壓縮波(Compression Wave-占有率이나 速度등이 갑자기 변하는)現狀을 보인다. 이 현상의 判別 有無에 따라 交通量過多로 인한 反復的 停滯인지, 有故에 의한 非反復的인 停滯인지에 대한 판단이 가능할 것이다.

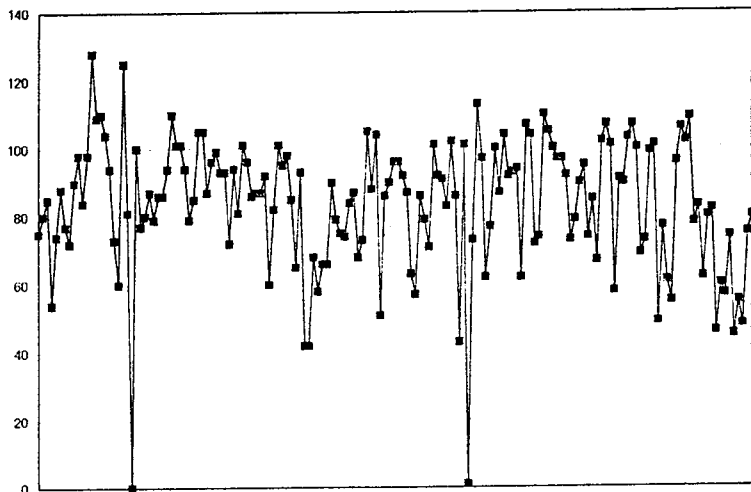
8 有故 發生時 交通流 行態 分析

有故 發生時의 上, 下流 地點의 交通流 行態를 분석해 보면 有故感知 알고리즘의 必要條件을 알 수 있게 된다. 대표적인 양상을 보이는 예를 살펴보고자 한다. 다음 <그림 16>~<그림 18>에서 살펴볼 수 있듯이 反復的 停滯와는 달리 급속히 진행되며, 輕微한 有故의 경우, 交通量 變化는 미미한 상태로 占有率과 速度는 상, 하류 지점간 차이를 보인다. 이로 볼 때 有故 感知 알고리즘에서 占有率 및 速度를 變數로 사용함이 타당한 것으로 사료된다.



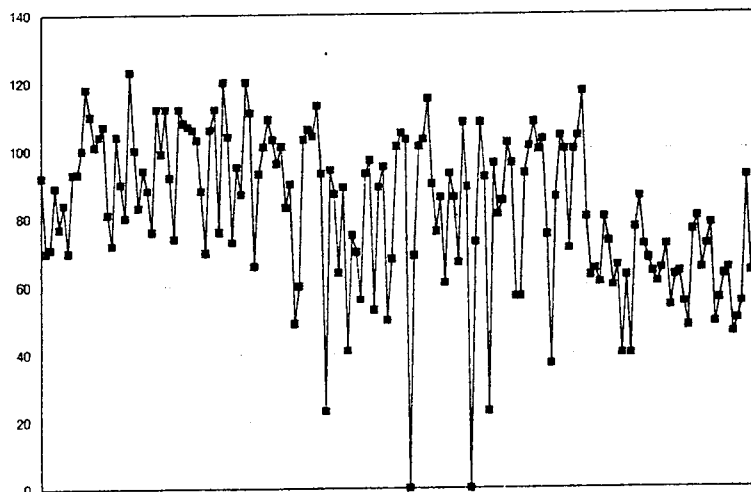
1995.03.25 07:01:05 1995.03.25 07:29:00 1995.03.25 07:57:01 1995.03.25 08:25:02 1995.03.25 08:53:00 1995.03.25 09:21:02

— 교통부선 차량 8.4km



1995.03.25 07:01:05 1995.03.25 07:29:00 1995.03.25 07:57:01 1995.03.25 08:25:02 1995.03.25 08:53:00 1995.03.25 09:21:02

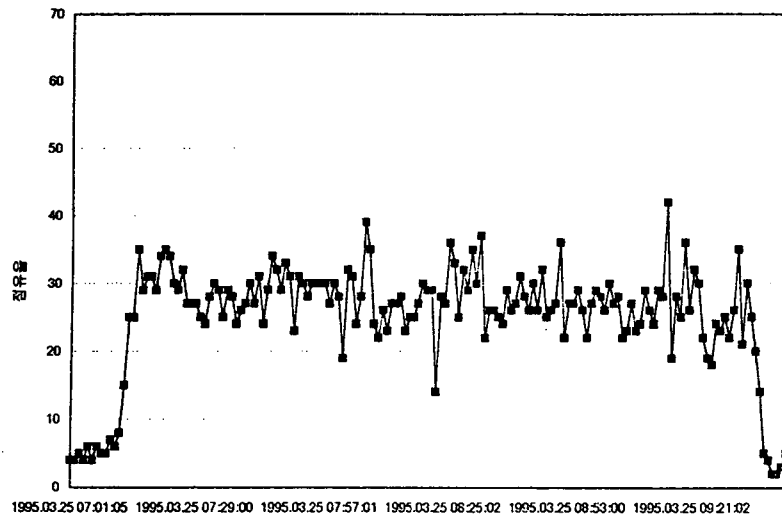
— 교통부선 차량 9.3km



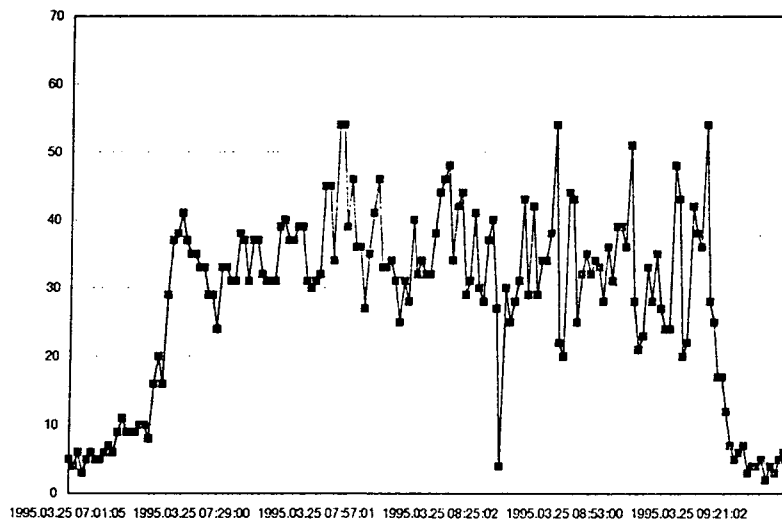
1995.03.25 07:01:05 1995.03.25 07:29:00 1995.03.25 07:57:01 1995.03.25 08:25:02 1995.03.25 08:53:00 1995.03.25 09:21:02

— 교통부선 차량 11.3km

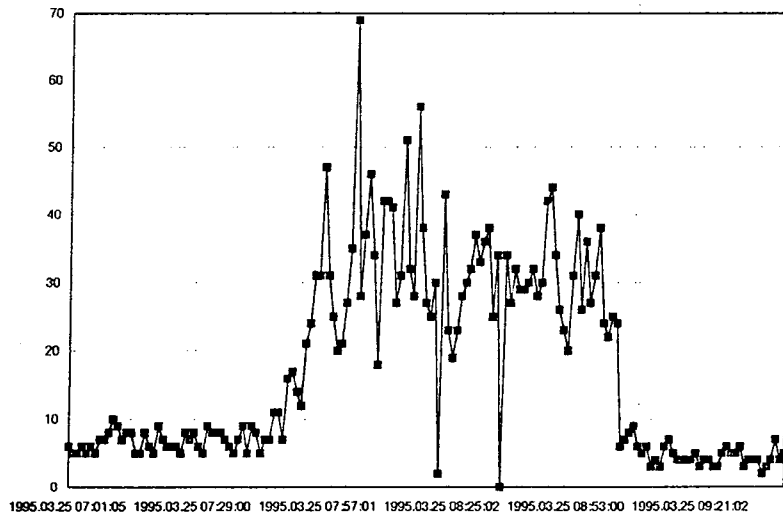
<그림 14> 各 地點別 交通量 變化例(停滯時)



점유율 8:40

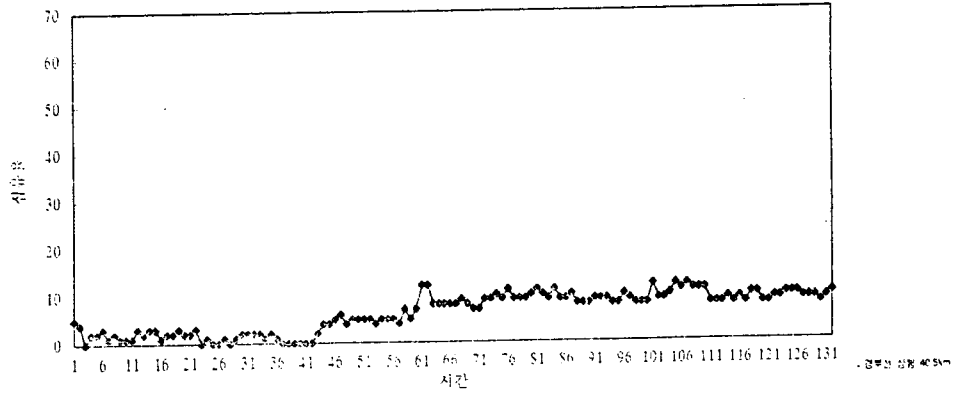
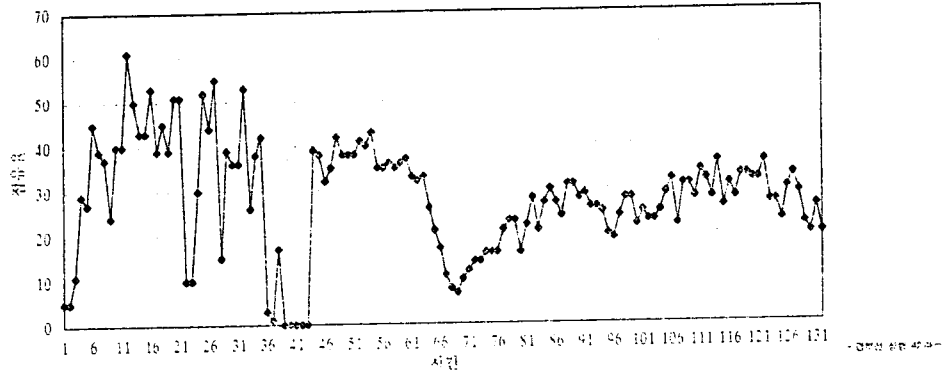
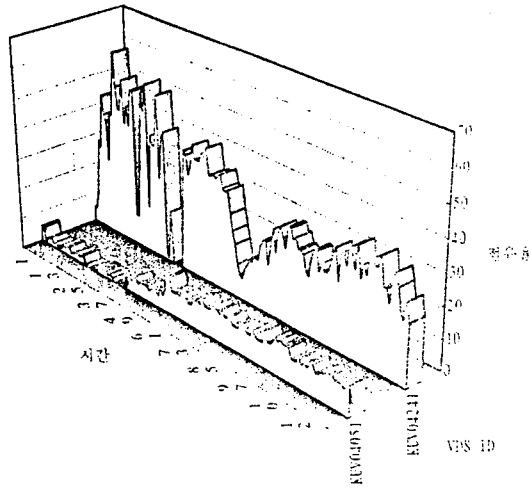


점유율 9:30

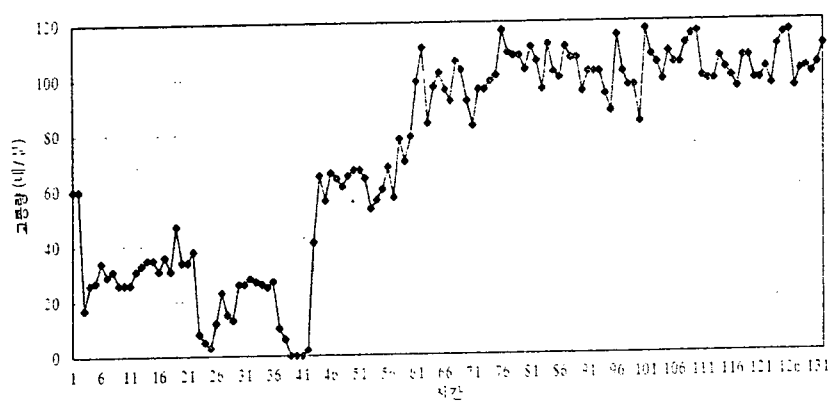
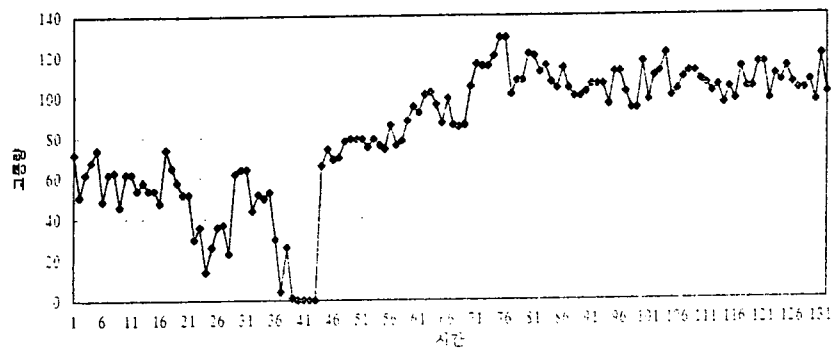
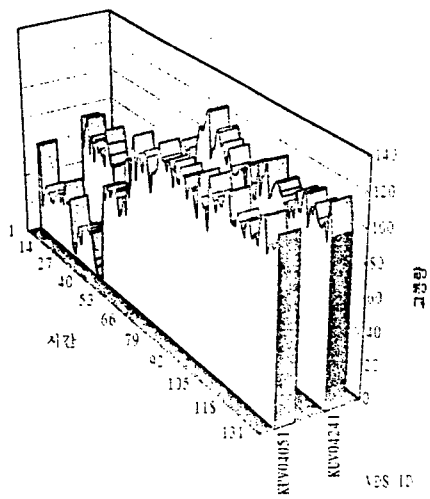


점유율 11:30

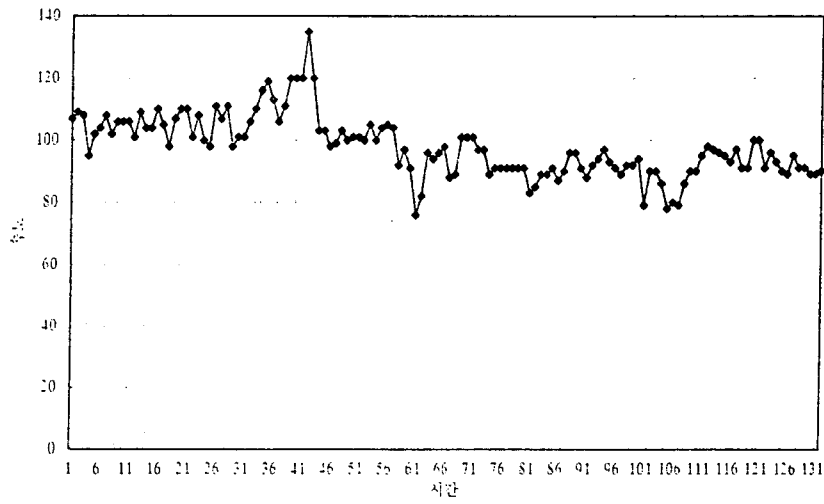
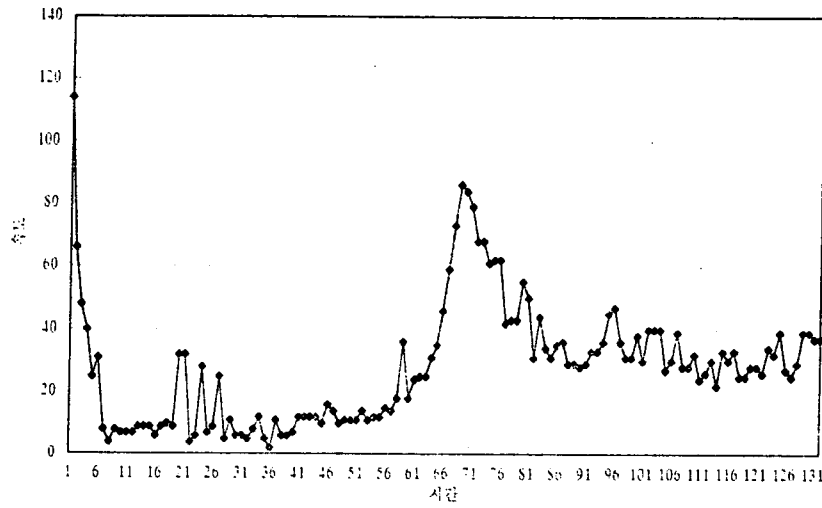
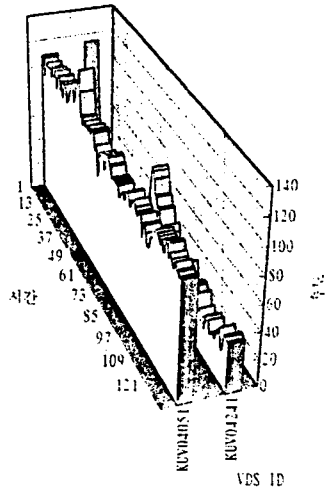
<그림 15> 各 地點別 占有率 變化例(停滯時)



<그림 16> 上,下流 地點間 占有率 差異(有故時)



<그림 17> 上,下流 地點間 交通量 差異(有故時)



<그림 18> 上,下流 地點間 速度 差異(有故時)