

■ 論 文 ■

## 2중 루프검지기 속도측정 정확도 개선 알고리즘 개발

Development of Speed Measurement Accuracy Using Double Loop Detectors

강 정 규

(한국도로공사 도로연구소 연구위원)

### 목 차

I. 서론	1. 복수 신호처리에 의한 정확도 개선
1. 연구배경 및 목적	2. 비정상 주행차량 필터링 방법
2. 연구범위 및 방법	V. 알고리즘 평가 및 현장실험
II. 기존연구 검토	1. 현장실험 방법
1. 루프검지기의 개요	2. 속도측정회수 증가에 따른 정확도 향상
III. 속도 측정 오차요인 분석 및 개선방안	3. 이상주행차량 필터링 알고리즘 평가
1. 2중 루프검지기의 속도 측정 원리	4. 현장 종합실험
2. 오차 개선 방향	VI. 결론
IV. 물리적 오차 개선 알고리즘 개발	참고문헌

Key Words : 루프검지기, 속도, 단속, 필터링, 신호

### 요 약

최근 국내에 확대 설치되고 있는 자동과속단속시스템의 핵심은 주행차량의 지점속도를 측정하는 속도검지부의 정확도라 할 수 있다. 우리나라 속도검지부의 경우 대부분 2중 루프검지기를 이용하여 속도를 측정하고 있는데 속도측정정확도는 루프검지기의 하드웨어 성능뿐 아니라 루프검지기 발생신호를 처리하는 알고리즘에 상당부분 의존한다. 따라서 본 연구에서는 2중 루프검지기의 속도측정 정확도를 높이기 위한 신호처리 알고리즘을 개발하고 이를 현장에서 평가하였다.

먼저 이론 및 현장실험에서 밝혀진 문제점들을 분석하여 원인별로 개선방향을 분류한 뒤 알고리즘을 개발하였다. 이를 위해서 첫째, 검지기의 2개의 진입시점 신호 뿐 아니라 진출시점 신호까지 포함시켜 정확도를 높이는 2중 처리 알고리즘을 개발하였다. 둘째, 속도측정 오차의 허용범위인  $\pm 5\%$ 를 초과하는 원인이 되는 검지영역내 비정상적인 주행궤적차량 즉, 대각선주행과 동시진입차량을 걸러내는 필터링알고리즘을 개발하였다.

현장실험을 통하여 개발 알고리즘의 정확성을 평가한 결과 속도측정정확도가 대폭적으로 개선됨을 확인할 수 있었다. 또한 대각선 주행차량, 동시진입차량 등 검지영역 내에서 비정상적 주행궤적을 발생시켜 심각한 오차를 발생시키는 차량들을 성공적으로 제거할 수 있었다.

## 1. 서론

### 1. 연구 배경 및 목적

속도는 크게 지점속도와 구간속도로 구분된다. 최근 들어 지능형교통시스템(ITS)의 활성화에 따라 비콘방식이나 GPS에 의한 구간속도 측정이 늘어나고 있으나 아직도 지점속도는 교통관리의 의사결정을 지원하는 중요 매개변수이다. 통상 지점속도는 짧은 구간에 설치된 한 쌍의 차량검지영역에서 센서를 통하여 측정된 차량들의 존재시작시간( $t_1$ )과 존재종료시간( $t_2$ )을 바탕으로 계산된다. 따라서 지점속도의 정확도에 영향을 미치는 인자는 센서 고유의 정밀도 뿐 아니라 계산 알고리즘, 배치방식 등이다. 대부분의 교통관리 목적상 속도정확도는 평균 5% 내외의 오차를 허용하고 있으나 개별차량에 대해 매우 정확하게 속도를 측정해야 하는 분야가 있는데 바로 자동과속단속시스템 분야이다.

고정식 자동과속단속시스템은 2001년 12월 말 현재 전국 853개 지점에서 운영 중에 있으며 지속적으로 확대되어 2006년 말에는 전국 약 3,000개 지점에서 운영될 예정이다. 고정식 자동과속단속시스템은 과속과 관련된 사고가 많은 곳, 중상 및 사망사고가 현저히 높은 곳 등에 설치하여 운전자의 행태 및 교통특성을 변화시켜 궁극적으로 교통안전을 증진하는 것이 중요 목적이다. 이는 교통사고의 대폭감소 뿐 아니라 난폭운전 감소 등 자동차 교통에 획기적인 영향을 미치고 있다. 이러한 자동과속단속시스템의 핵심은 단속의 근거가 되는 차량의 속도를 측정하는 검지기 자료에 대한 신뢰도이다. 과속단속시스템이 측정한 차량의 속도를 신뢰할 수 없다면 이를 근거로 이루어지는 모든 단속행위는 정당성을 갖기 어렵고 지속적인 사용이 어려워진다. 이 때문에 경찰청 무인교통장비 규격서에서는 속도측정의 신뢰도를 95% 이상으로 설정하고 있다. 이는 여러대의 평균속도가 아니라 검지한 모든 개별차량에 대한 정확도이기 때문에 대단히 높은 수준이다.

차량의 속도를 측정하는 검지기는 레이저, 레이다, 피에조, 루프검지기 등 그 종류가 많으나, 고정지점에 대한 속도측정에는 정확도와 유지관리 측면에서 루프검지기를 채택하고 있다. 특히 기존 자동과속단속시스템에서는 대부분 루프를 일정 간격으로 2개, 즉 한

쌍을 설치하여 속도를 측정하고 있다. 또한 2중 루프검지기는 안정적인 성능을 바탕으로 최근 ITS사업의 활성화와 더불어 더욱 확대가 되고 있다. 특히 우리나라 고속도로에서는 2중 루프검지기가 콘크리트 포장부의 교통정보수집원으로 채택되고 있고 터널부에서는 영상검지기를 제치고 거의 독점적으로 사용되고 있다. 그러나 루프검지기 하드웨어 성능에 따른 오차 요인 뿐 아니라 시공방법, 주행환경 등의 요인으로 주행차량의 속도를 정확하게 측정하기란 쉽지가 않다. 국내의 경우 루프검지기에 관한 연구는 주로 전자교통신호 운영이나 교통정보 수집용으로는 많이 연구되었지만, 2중 루프검지기의 속도측정 정확도를 높이기 위한 기반연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 2중 루프검지기를 이용하여 정확도가 높은 속도측정을 할 수 있는 방법을 개발하는데 있다.

### 2. 연구 범위 및 방법

현재 전국에서 운영중인 자동과속단속시스템의 속도검지부는 대부분 2개의 루프검지기를 이용하고 있다. 이 방식은 루프검지기 자체의 하드웨어 고유오차 외에도 루프검지기 설치형태, 검지영역에서의 차량 주행 궤적, 기타 설치 및 관리 부주의 요인 등으로 추가적인 오차발생 요인이 존재한다.

따라서 루프검지기의 속도측정정확도를 높이기 위해서는 루프검지기의 우수한 하드웨어를 채택할 뿐 아니라 제반 오차요인들을 줄일 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다. 이와 같은 관점에서 본 연구는 자동과속단속시스템에서 활용되고 있는 2중 루프검지기를 대상으로 소프트웨어적 측면에서 검지영역내 동시 진입과 대각선 주행 등으로 인한 오차 요인 분석에 초점을 맞춘다. 루프검지기의 하드웨어적 성능, 물리적 배치, 환경적 측면은 동일한 조건으로 가정하여 본 연구의 범위에서 제외한다.

우선 기존 속도측정방법을 검토하고, 루프검지기의 속도측정 정확도에 영향을 미치는 오차요인을 고유오차, 물리적 오차, 환경적 오차의 3가지로 구분하여 분석한다. 이를 위하여 기존 루프검지기의 시공방식, 모형, 일반 알고리즘 등을 조사한다. 이를 통하여 속도측정에 영향을 미치는 원인들을 분류하여 원인별 오차 저감방안을 제시한다. 최종적으로 오차 저감방

안을 구체적으로 실현할 수 있는 알고리즘을 개발하고 이를 현장실험을 통하여 평가한다. 현장실험은 실험실조건과 현장조건으로 구분하여 시행한다.

## II. 기존 연구 검토

### 1. 루프검지기의 개요

루프검지기(Inductive Loop Detector:ILD)는 교통정보 수집 목적으로 1969년 ASTL(Automatic Traffic System Laboratory)에서 개발된 검지기이다. 루프검지기는 도로 포장부에 매설된 루프에 의하여 형성된 검지영역을 차량이 통과하거나, 정지해 있는 경우 차량으로 인한 루프의 인덕턴스의 변화를 측정하여 차량의 통과 또는 존재의 결과를 검지한다. 대부분의 기초원리는 참고문헌(ITE, 1985)에 충실한 내용이 수록되어 있기 때문에 본 절에서는 속도측정 원리와 관련된 루프검지기의 전기적 특성, 작동원리를 제한적으로 검토한다.

#### 1) 차량 검지원리

루프검지기는 일반적으로 미국의 NEMA(National Electrical Manufactures Association) 표준에 의하여 설치되며 주요 구성 요소는 루프코일, 도입선, 검지부이다. 루프코일은 도로면에 매설되며, 직경 5mm 내외의 전선을 2~4회 회전시켜 설치한다. 도입선(lead-In-Cable)은 루프코일과 현장제어기 내에 있는 검지부 장치(Detection Device Unit)까지 연결하는 케이블로서, 루프코일과 검지부 장치간 거리가 짧은 경우 도입선과 검지부 장치를 직접 연결하기도 한다. 검지부 장치는 루프코일에 10KHz~200KHz의 주파수를 갖는 교번 전류를 전송한다. 루프코일에 전류가 흐르면 교번자장(Alternative Magnetic Field)이 형성된다. 이러한 전기적 특성(저항, 인덕턴스, 커패시턴스)이 상호 작용하여 통과 차량을 검지한다. 자장의 최대변화는 도체면과 루프면이 수평을 이루는 경우에 일어나며 이 경우 차량에 의한 인덕턴스의 변화도 최대로 일어난다. 자전거와 같이 도체면이 자장의 방향에 수직인 검지대상은 도체내에 유도되는 와전류(Eddy Current)가 적어서 정상적인 검지가 용이하지 않다. 차량의 경우 밑바닥 부분은 연속적인

도체판으로 이는 루프면과 수평의 관계를 유지한다. 차량이 루프면 위에 존재하는 경우 연속적인 도체판은 루프 자장에 의해 반대방향으로 유도자장이 발생하고 유도자장으로 인한 내부의 유도전류는 상쇄되어 결과적으로 루프의 자장에 반대되는 유도자장이 발생한다. 루프검지기에서 출력하는 기초자료는 차량의 길이에 비례하고 속도에 반비례하는 점유시간이다. 점유시간의 길이는 검지부의 인덕턴스 변화에 비례하는 주파수 변화폭을 그 기초로 삼고 있으므로 기준이 되는 인덕턴스 변화폭을 어떻게 설정하는가에 따라서 출력되는 점유시간의 크기는 달라진다. 그러므로 루프 검지기의 민감도는 인덕턴스 변화 폭을 어떻게 설정하느냐에 따라서 달라진다. 루프감도는 루프코일의 패턴 형태와 회전수에 따른 인덕턴스의 변화에 따라서 다르다. 패턴형태와 회전수가 결정된 루프검지부에서는 루프케이블의 길이에 따른 케이블의 인덕턴스의 가감에 따라서 감도가 결정된다.

#### 2) 2중 루프검지기의 속도측정 원리

자동과속단속시스템은 도로교통법에서 규정한 자동차의 제한속도 위반 여부를 가리기 위해 속도를 측정한다. 이때의 자동차 속도는 지점속도(Spot Speed)로서 임의의 지점에서 순간속도이다. 차량의 속도는 단위시간(시, 분, 초) 동안 차량이 이동한 거리를 나타내는 것이다.

두 개의 고정된 루프검지기를 이용하여 개별차량의 속도를 측정할 경우 두 지점간 루프간격  $d$ 는 고정되어 있고 이 두 지점을 통과하는 시각  $t_1$ 과  $t_0$ 를 측정하여 속도를 계산한다. 즉 소요시간이 변수가 되므로 속도(V)는 식(1)과 같이 구한다.

$$V \text{ (km/h)} = \frac{3600d}{1000(t_2 - t_1)} \quad (1)$$

따라서 차량의 동일한 특정부분이 두 개의 루프를 통과하는 시각을 정확하게 측정하는 것이 속도측정에 가장 중요하다.

#### ① 단일 루프검지기일 경우

$d$  : 평균 차량길이(m) (검지기 길이+평균 차량 검지 길이)

$t_1$  : 검지 시작 시간(초)  
 $t_2$  : 검지 끝 시간(초)

② 두 개의 루프검지기일 경우

$d$  : 두 검지기간 간격(m)  
 $t_1$  : 첫 번째 검지기의 검지 시작 시간(초)  
 $t_2$  : 두 번째 검지기의 검지 시작 시간(초)

3) 국내 연구사례

루프검지기에 관한 연구는 국내에서도 활발하게 수행되었다. 도로교통안전관리공단에서는 1994년 루프검지기의 형태별 성능시험연구에서는 팔각과 원형검지의 성능비교를 수행하였는데 검지기의 헤드부분의 형태가 일부 성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 1995년 아주대학교에서 신호교차로의 정지선에서 포화도 제어를 위한 최적 루프검지 형태를 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 그 결과 실시간 교통신호제어 용도에 가장 적합한 루프형태는 1.8×4.5m로서 코일 적정 회전수는 3회전으로 제시하고 있다. 이외에 아주대학교를 중심으로 루프검지기의 정확도 개선, 검지대상의 확대를 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 루프검지기는 도로에 매설되는 장비이므로 시간의 경과에 따라 파손 및 고장이 발생한다. 이러한 고장의 주요 원인은 부적절한 시공 및 관리부실 등이다. 1998년도 서울시립대에서 서울시에 설치되어 있는 607개소의 루프검지기 상태를 분석한 결과 불량이 57대(9%)이고, 사용불가가 215대(36%)로 약 45%가 불량 혹은 사용이 부적절한 것으로 나타났다. 종합적으로 기존 연구는 신호제어용, 교통량 등의 종합 정보를 수집하기 위한 연구에 주력하였다는 것을 알 수 있다. 90년대 후반부터 고속도로, 도시고속도로 등 연속 교통류 시설에 활발하게 설치되고 있는 2중 루프검지기에 관한 연구는 매우 제한되어 있으며 특

히 속도측정 정확도 분야의 연구는 거의 없는 실정이다.

4) 속도측정용 루프검지기 국내 현황

〈표 1〉은 1999년도 전국에 설치된 100대의 자동과속단속시스템의 설치업체별 검지기 사양을 비교한 것이다. 국내 자동과속단속시스템 설치업체는 대체로 팔각 혹은 직각형 모양으로 루프코일을 매설하고 있다. Sampling rate은 2.5-10ms, 검지기간 거리는 약 4-7m, 매설깊이는 약 5cm- 10cm, HEAD의 루프 회전수는 약 3-4회전 등이다.

III. 속도측정 오차요인 분석 및 개선방안

1. 2중 루프검지기의 속도측정 오차요인

2개의 루프를 일정간격으로 설치하고 차량이 두개의 검지기를 통과한 시간을 측정하여 속도를 산출한다. 구체적으로 차량이 1차 루프에 접근함에 따라 1차 루프의 주파수가 증가(인덕턴스 감소, 주기 감소)하여 기준 이상 증가하는 시점  $t_1$ 을 측정하고, 차량이 2차 루프에 접근하는 경우도 동일한 방식으로 시점  $t_2$ 를 측정하여 속도  $V$ 를 산출한다.

1) 고유 오차

(1) 주사율(Scanning Rate)

차량통과시점  $t_i$ 를 측정하기 위하여 루프검지기는 일정 주기로 검지기 영역내 차량의 존재 여부를 확인한다. 이 존재확인 시간간격을 Scanning Rate(주사율)이라 하는데 구체적으로 루프의 주파수 값을 카운트하는 시간 주기를 말한다. Scanning 후에 다음 Scanning 시간까지의 시간 간격 자체에서 시간측정

〈표 1〉 무인과속단속시스템 설치업체별 루프검지기 사양

구분	제조국	인덕턴스 ( $\mu H$ )	Sampling Rate	루프 간격	루프 모양	루프 회전수	공진 주파수 (KHz)	매설 깊이
A사	미국	20-2500	10ms	6m	팔각형 1.5×1.8m	3회	20-50	7cm
B사	한국	50-300	2-4ms	7m	팔각형 1.2×1.8m	3회	50-150	5cm 이상
C사	미국	20-2500	5-9ms	4m	직사각형 0.5×1m	3-4회	14-85	10cm 이내

오차를 내포하고 있다. 두 개의 검지기간 거리가  $d$  (m)인 구간을  $V$ (km/h)로 주행하는 차량 속도를 Scanning Rate  $W$ (초)인 루프검지로 측정할 때 속도검지 오차율( $E$ )은 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$E = \frac{\text{Scanning Rate}(W)}{\text{주행시간}(\Delta t)} = \frac{W(\text{초})}{d(\text{m})/V(\text{km/시간})}$$

$$= \frac{W \times V \times 1000}{d \times 3600} \times 100 \quad (2)$$

따라서 동일한 속도인 차량의 속도를 구할 때  $W$ 가 10ms인 검지기의 오차율은 5ms인 검지기의 오차율보다 최대 두배에 달한다고 할 수 있다. 이와 같이 5ms 이하와 같이 루프검지기의 Scanning Rate이 작으면 작을수록 이론적인 정확도는 높아지나 루프채널수와 민감도 등에 의존하기 때문에 Scanning Rate의 감소에는 기술적인 한계가 있다.

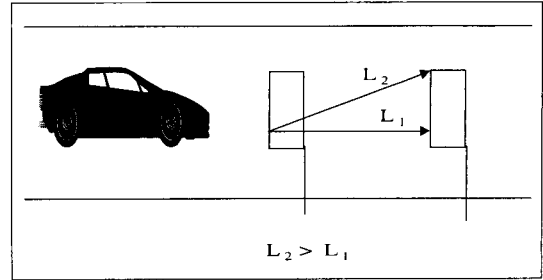
**(2) 검지거리**

2개의 루프간 거리는 차량 속도측정의 중요 변수이다. 루프간의 간격이 작을 경우 시간측정 오차의 비율이 상대적으로 증가하여 속도 오차가 커질 가능성이 있다. 반면 루프간의 거리를 길게 할 경우 식(2)에서 보듯이 이론적인 오차는 감소한다. 그러나 이 경우 검지영역 내에 차량이 2대 이상 동시에 존재하거나 비정상적으로 주행하는 차량들이 많아져서 또 다른 치명적 오차를 발생시키는 원인이 된다.

**2) 물리적 오차**

**(1)대각선 주행에 따른 오차**

차량이 검지영역을 주행할 경우 <그림 1>과 같이 직선 주행거리( $L_1$ ) 시보다 대각선 주행거리( $L_2$ )가 길어진다. 또한 1차, 2차 루프에서 차량의 점유시간이 다르며, 두 검지기의 주파수 파형이 달라서 검지시점을 부정확하게 측정하기 때문에 오차가 발생한다. 구체적으로 첫째 차량이 대각선으로 주행할 경우 차량의 주행거리가 속도측정을 위한 기준거리와 다르게 된다. 둘째 차량의 루프 점유율에 따라 루프검지기의 주파수 파형이 상이하어 차량의 검지 시점에서 오차가 발생한다.



<그림 1> 대각선 주행에 따른 검지거리 변화

**(2) 동시진입에 따른 오차**

2중 루프검지로 속도를 측정할 경우 1, 2차 루프간의 간격이 크면 클수록 정확한 속도측정이 가능하게 된다. 그러나 루프간 거리가 길어짐에 따라 2개 루프사이에 2대 또는 그 이상의 차량이 동시에 존재하는 경우가 발생하여 치명적인 오차가 발생할 수 있다. 동시진입으로 오차가 발생하는 경우는 크게 2가지로 구분할 수 있다. 하나는 차량이 1차 루프를 통과하여 2차 루프에 진입하기 전에 1차 루프에 다른 차량이 진입하는 경우이다. 다른 하나는 1차 루프를 통과한 차량이 2차 루프에 진입하였을 때 1차 루프에 다른 차량이 진입하는 경우이다.

**(3) 기타 물리적 오차 요인**

기타 정체시 검지영역 내에 여러 대의 차량이 있게 되는 경우, 검지영역에서 차량의 가속 및 감속, 인접차로 통과차량에 의한 영향, 그리고 트럭, 버스 등 차종별 특성에 따라 루프발생신호가 달라지는데 따른 오차 등과 같은 물리적 오차요인이 존재한다.

**2. 오차 개선 방향**

이상과 같이 오차원인을 분류하였는데 오차원인별 개선방향은 다음과 같다. 첫째 하드웨어의 개선이다. 식(2)를 만족하는 일정 수준 이상의 주사율을 가진 검지기를 채택하고 루프검지기의 간격과 모양 측면에서 최적조합을 결정하는 것이다. 이는 이론적 방향제시는 가능하나 여러 가지 환경적 오차요인을 고려할 때 현장실험을 통하여 최적안을 찾아내야 할 것이다. 반면에 루프검지기의 성능과 배치가 주어진 조건에서 분리시켜 생각할 수 있는 물리적 오차는 루프검지기 신호처리와 소프트웨어로 개선할 수 있다. 본 연구에

서는 물리적 오차를 저감할 수 있는 방안에 주력하되 루프의 간격과 성능과 관련된 고유오차의 개선은 다른 연구에서 다루기로 한다.

### IV. 물리적 오차 개선 알고리즘 개발

#### 1. 복수 신호처리에 의한 정확도 개선

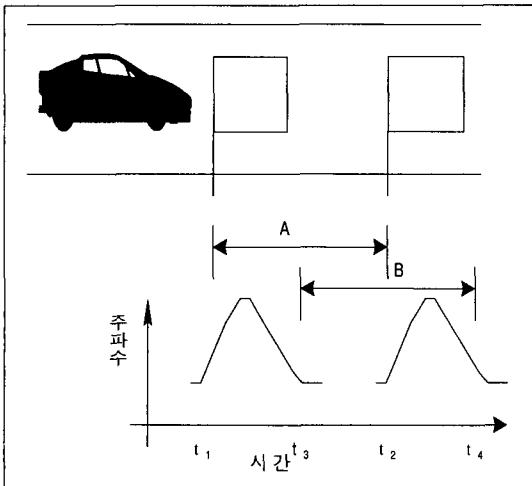
이 방안의 요체는 차량진입시 발생하는 신호만을 이용하여 속도를 계산하는 기존방안보다가 차량진출시 발생하는 신호를 추가로 활용하여 속도를 계산한다는 데 있다. <그림 1>에서 2중 루프검지기를 차량이 통과시 주파수가 기준값을 넘어서는 시점이 4개 발생한다는 것을 알 수 있다. 즉 차량 전면이 루프1과 2의 전면을 통과할 때, 그리고 차량 후면이 루프1과 2의 후면을 통과할 때이다. 따라서 이 4개의 시점을 이용하면 2개의 시점을 이용하는 것보다 정확한 속도측정이 가능하다.

$$\text{속도} = \frac{\text{검지기간격}}{(\text{검지시작시간})_2 - (\text{검지시작시간})_1}$$

$$V \text{ (km/h)} = \left(\frac{1}{2}\right) \left[ \frac{A}{t_2 - t_1} + \frac{B}{t_4 - t_3} \right] \left( \frac{3600}{1000} \right) \tag{3}$$

여기서,

V : 주행속도(km/h)



<그림 2> 2중 루프를 이용한 차량속도 측정 방법

A, B : 검지기간 간격(m) (통상 A=B)

$t_1$  : 첫 번째 검지기의 검지 시작 시간(초)

$t_2$  : 두 번째 검지기의 검지 시작 시간(초)

$t_3$  : 첫 번째 검지기의 검지 끝 시간(초)

$t_4$  : 두 번째 검지기의 검지 끝 시간(초)

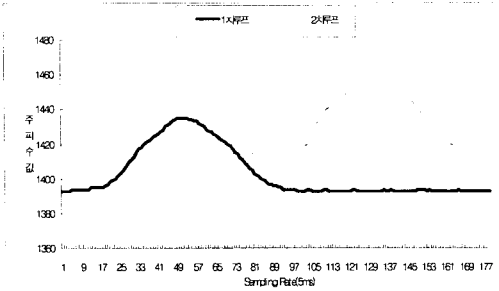
#### 2. 비정상 주행차량 필터링 방법

본 방법은 비정상적인 주행궤적을 가진 차량들은 정상적인 주행궤적을 가진 차량과 비교할 때 주파수 파형이 다르다는 점에 착안하여 제안하였다. 따라서 2쌍의 주파수의 파형이 일정수준 이상 차이가 날 경우에 비정상 주행차량으로 판별하여 제거하는 필터링 알고리즘을 적용하여 속도측정오차 발생원을 줄이는 것이다. 구체적으로는 대각선 주행차량을 필터링하는 방법, 동시진입 차량을 필터링하는 방법 등이다.

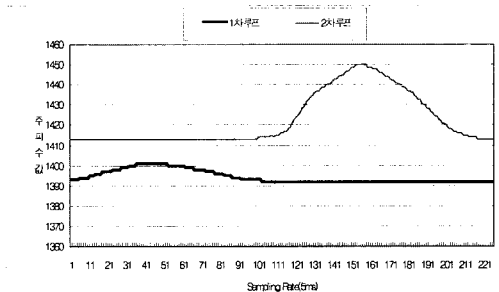
##### 1) 대각선 주행차량의 필터링

###### (1)주파수 특성

1999년도에 설치된 자동과속단속시스템 36개소 현장에 설치된 속도검지부의 예비검사시 평균 100개씩 총3,600대의 차량속도를 측정하여 정확도를 분석한 결과, 오차허용 범위  $\pm 5\%$  이상을 넘은 경우가 7건이었다. 루프시그널을 상세히 분석한 결과 4건이 1차 루프 점유정도와 2차 루프 점유정도가 다른 대각선 주행으로 인해 속도 오차가 발생한 것으로 나타났다. 대각선 주행은 먼저 주행거리의 증가로 인해 오차를 발생시킨다. 이론적으로는 직선주행거리( $L_1$ )과 대각선주행거리( $L_2$ )의 차와 직선주행거리의 백분율이 오차 범위를 넘어서는 과도한 대각선 주행의 경우가 해당한다. 이때 속도오차는  $(L_1 - L_2) / \Delta t$ 이기 때문에 속도가 빠를수록 오차가 크게된다. 그러나 대각선주행에 따른 발생시그널의 차이로 보다 근본적인 오차를 발생시킨다. 주파수특성을 분석한 결과 루프검지영역을 정상 주행하는 차량은 <그림 3>과 같이 1차와 2차 루프의 주파수 특성이 비슷하나, 루프 검지영역에서 대각선으로 주행하는 차량은 <그림 4>와 같이 1차와 2차 루프검지기의 주파수 특성이 다르게 나타났다.



〈그림 3〉 정상주행차량의 주파수 특성



〈그림 4〉 대각선 주행차량 주파수 특성

(2) 알고리즘

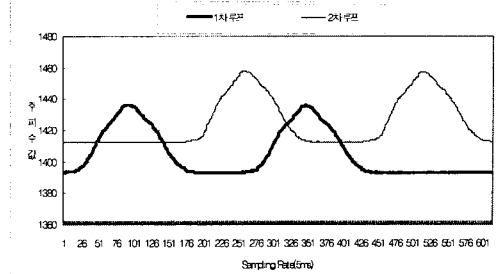
대각선 주행차량을 필터링하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 차량이 루프검지기를 통과하는 과정에 루프의 주파수 파형이 상승하였다가 하강한다. 따라서 1차, 2차 루프 주파수의 상승기와 하강기 신호를 이용하여 속도를 2회 측정하여 속도의 차이가 오차의 허용범위를 벗어날 경우 이상 주행차량으로 판별하여 제거한다.
- ② 차량이 1차 루프는 밟고, 2차 루프는 밟지 않고 진행한 경우와 반대로 1차 루프는 밟지 않고, 2차 루프만 밟고 진행한 경우는 버퍼(Buffer)를 이용하여 처리한다.
- ③ 1차, 2차 루프의 주파수 변화 값의 차이가 임계값을 넘는 경우 이상주행차량으로 판별하여 제거한다.

2) 동시진입차량의 필터링

(1) 주파수 특성

루프의 검지영역에 2대 이상의 차량이 동시에 진입할 경우에 관측된 2개 루프의 주파수 특성은 〈그림 5〉



〈그림 5〉 동시진입 차량의 루프검지기 주파수 특성

와 같다. 이 그림은 1차 루프를 통과한 1번 차량이 2차 루프를 채 빠져나가기 전에 2번 차량이 1차 루프에 동시 진입하여 4개의 피크가 형성되고 있다. 루프 간의 간격을 차량길이보다 작게 해서 동시진입을 막을 수 있는 방안도 고려할 수 있으나 식(1)의 관계에 비추어 볼 때 현실적인 어려움이 있다.

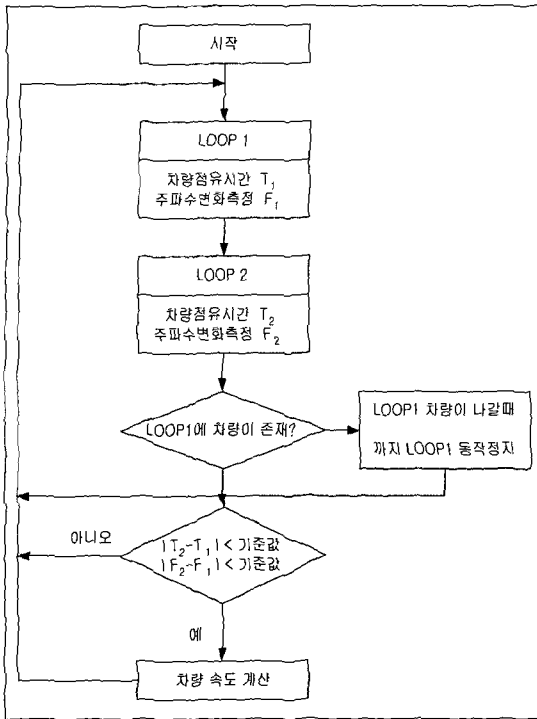
(2) 알고리즘

동시진입차량을 처리하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 차량이 2차 루프에 진입 시에 1차 루프에 다른 차량이 존재하면 1차 루프의 차량이 빠져나갈 때까지 1차 루프의 작동을 멈춘다.
- ② 1차 및 2차 루프의 주파수 변화값과 차량의 점유 시간을 측정하여 오차의 허용범위를 넘으면 필터링하여 데이터를 제거한다. 이 임계값은 하드웨어 설계에 따라 다르게 적용될 수 있으며 이 기준 값의 조정을 통해 필터링되어 제거되는 데이터의 양을 조절할 수도 있다.
- ③ 버퍼(Buffer)를 사용하여 1차 루프에 1번 차량의 진입 시간을 측정한 후, 1번 차량이 2차 루프에 진입하기 전에 2번 차량이 1차 루프에 진입할 경우 1번 차량의 데이터를 버린다.
- ④ 버퍼를 사용하여 1번 차량이 1차 루프는 밟지 않고 2차 루프에 진입하였을 때, 2번 차량이 1차 루프에 진입할 경우 1번 차량의 데이터를 버린다.

3) 비정상 주행차량 제거 알고리즘

종합적으로 대각선 주행차량과 동시진입차량을 처리하기 위한 알고리즘은 〈그림 6〉과 같다.



〈그림 6〉 속도측정용 알고리즘

V. 알고리즘 평가 및 현장실험

1. 현장실험 방법

1) 현장실험 시나리오

본 연구에서 현장실험은 크게 세가지로 구분하여 실시한다.

- ① 대표적인 2중 루프검지기가 설치되어 있는 도로현장에서 실제 주행하는 차량을 대상으로 각각 5ms, 10ms scanning rate와 1번, 2번 속도처리 알고리즘을 비교하여 정상주행차량의 속도측정정확도를 평가하는 것이다.
- ② 비정상주행차량의 필터링알고리즘을 평가하기 위하여 2중 루프검지기를 시험장에 시공한 뒤 대각선주행과 동시주행을 발생시켜 이를 자동으로 필터링하는 알고리즘을 평가한다.
- ③ 현장에 설치된 검지기를 대상으로 정상, 이상주행 차량이 혼합된 교통상황의 알고리즘 능력을 종합적으로 평가한다.

2) 현장실험 장비

루프검지기에서 신호를 취득한 관측값이나 참값은 비디오분석을 통하여 구한다. 본 연구에 이용되는 실험용 장비는 특수 제작된 현장제어기로서 루프검지기 1쌍을 연결할 수 있는 루프검지장치(Loop Detector Unit)이다. 1개의 주파수 단위 검지당 주사율(Scanning Rate)은 5ms이다. 검지기에 연결된 노트북 컴퓨터에 각 차량의 주파수 값을 5ms 간격으로 읽어 저장한다. 루프검지기가 매설되어 있는 측면과 정면에 영상촬영 장비를 설치하여 첫째의 실험과 동일한 시간 동안 검지영역내 차량을 비디오 촬영한다. 실험현장에서 촬영한 비디오 테이프의 분석은 1/300초까지 측정이 가능한 비디오 분석기를 이용해 속도를 계산한다. 현장실험에서 노트북PC에 저장된 주파수 값 데이터는 상기한 알고리즘에 따라 속도를 산출하는 프로그램을 Visual C++로 개발하였다. 프로그램의 출력 값은 차량의 속도와 차두거리이다.

2. 속도측정 회수 증가에 따른 정확도 향상

1) 현장실험

(1) 실험조건

경기도 과천시 성당 앞에 설치된 루프검지기에서 약 10분동안 데이터를 취득하였다. 본 현장의 루프검지기는 1.8m×1.8m의 8각검지기로서 2개 루프간 거리는 5.5m이다.

① 검지속도 산출

주사율 각 5ms과 10ms 검지방식으로 각 1번과 2번 측정하는 4가지 방식으로 검지속도를 산출하였다.

② 기준속도 산출

기준속도는 촬영한 비디오 테이프를 약 1/300초까지 분석이 가능한 비디오 분석기를 이용하여 산출하였다.

(2) 분석결과

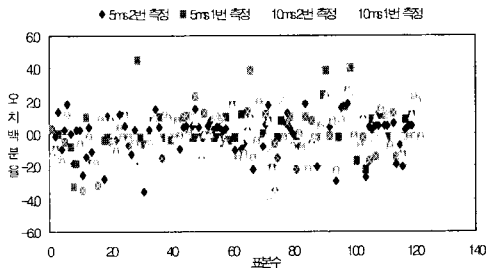
이상과 같이 비디오로 분석한 기준속도와 주파수값으로 산출한 검지 속도와 차이를 백분율로 표시하여 속도측정 오차를 분석한 결과는 〈표 2〉와 같다.



〈표 2〉 속도측정 오차 분석 결과(루프2개)

구분	5ms(I)	5ms(II)	10ms(III)	10ms(IV)
평균	-0.062	0.070	-0.253	-0.086
표준편차	1.326	1.384	1.447	1.643
분산	1.760	1.917	2.096	2.702
범위	7.603	7.940	7.525	8.720
최소값	-3.541	-3.454	-4.347	-4.646
최대값	4.061	4.485	3.177	4.074
표본수	121	122	118	122
필터링수	1	0	4	0

주: (I) 주사율 5ms, 1차·2차 루프 전/후면 2번 속도측정  
 (II) 주사율 5ms, 1차·2차 루프 전면 1번 속도측정  
 (III) 주사율 10ms, 1차·2차 루프 전/후면 2번 속도측정  
 (IV) 주사율 10ms, 1차·2차 루프 전/후면 1번 속도측정



〈그림 7〉 속도측정 오차 분포

우선 주사율(Scanning Rate)을 축소된 실험결과이다. 5ms의 주사율을 이용한 속도측정 방식이 10ms의 주사율의 속도측정 방식보다 오차 백분율의 분산이 작은 것으로 나타났다. 이는 주사율 5ms 검지방식의 속도측정 오차가 주사율 10ms 검지방식보다 작음을 의미한다

다음으로 속도측정 회수를 증가시킨 실험결과이다. 5ms이나 10ms으로 2번 차량의 속도를 측정하여 ±5%이상 속도 차이가 나는 데이터를 필터링하는 알고리즘을 적용하였다. 루프검지기 전·후면에서 2번 속도를 측정, 평균하여 오차허용 범위를 벗어나는 경우는 필터링하여 제거하고 그렇지 않은 경우는 대표속도로 이용하는 것이다. 10ms의 경우 4개의 데이터를 필터링하여 제거하였고, 분산측면에서도 작아지는 것으로 나타났다. 이는 2번 차량의 속도를 측정하는 방식이 1번 속도를 측정하는 방식보다 좋음을 의미한다.

(3) 실험결과 통계검정

5ms로 2번 차량의 속도를 측정하여 대표속도를

산출하는 방식, 5ms로 한번 측정하는 방식, 10ms로 2번 차량의 속도를 측정하는 방식이 기존의 속도측정 방식인 10ms로 1번 차량의 속도를 측정하는 방식보다 속도측정 신뢰도가 좋은 것으로 나타났으며 F검증의 결과 5ms로 2번 차량의 속도를 측정하는 방식은 p-값이 0.0194로 유의수준 5%에서 통계적으로 유의하며, 5ms로 한번 측정하는 방식은 p-값이 0.0603으로 유의수준 10%에서 통계적으로 유의하며, 10ms로 2번 차량의 속도를 측정하는 방식은 p-값이 0.1682로 유의수준 10%에서 통계적으로 의미가 없다. 이상의 결과로 볼 때 속도측정 회수의 증가나 scanning rate의 감소로 속도측정 오차를 줄일 수 있는 것으로 판단된다.

3. 이상 주행차량 필터링 알고리즘 평가

1) 대각선 주행차량

(1) 실험방법

본 실험을 위하여 경기도 용인군 수지읍 동천리에 소재한 왕복 2차로 도로에 6m 간격으로 1.5m×1.5m 2중 루프검지기를 배설하였다. 첫째 시험차량이 1차 루프의 좌측에서 2차 루프의 중앙으로 30회, 1차 루프의 우측에서 2차 루프의 중앙으로 30회로 총 60회를 평균 34.1km주행하도록 하였다. 둘째 시험차량이 루프검지영역을 50회 정상 주행하도록 하였다. 이 경우 대각선 주행길이는 약 6.06m로서 정상주행계보다 1%정도 길어진다.

(2) 분석 결과

본 실험에서 수집한 검지기 자료에 대각선 주행 처리 알고리즘을 적용한 실험 결과는 〈표 3〉과 같다. 기존 속도측정방법에 의한 결과 대각선으로 주행한 차량 54대의 평균검지속도는 41.1km/시로서 평균기준속도 34.1km/시보다 6.99km/시나 높았다. 또한 오차 백분율로 볼 때 54대 모두 모두 5%이상의 오차를 발생하였다. 반면에 대각선 차량 필터링 알고리즘을 적용하였을 경우 대각선으로 주행한 실험차량 54대 모두가 필터링되었다. 또한 정상주행차량 51대중 2대가 대각선 주행차량 필터링 알고리즘으로 제거되었고, 나머지 차량은 모두 정상적으로 속도가 측정되었다.

본 실험결과 속도측정 오차 백분율이 대부분 음의 오차를 발생하는 특징이 있다. 이는 현장실험시 1차

〈표 3〉 대각선 주행차량 검지속도 오차 분석 결과

구분 \ 루프 모양	1.5m×1.5m
오차평균(%)	-20.50
표준편차	5.43
분산	29.59
최대오차(%)	-31.72
최소오차(%)	-5.43
표본수	54

주 : 오차(%) = 100 \* (기준속도 - 검지속도) / 기준속도

루프는 일부만 밟고 2차 루프를 정상적으로 밟고 진행하는 방식으로 실험을 실시하였기 때문인 것으로 판단된다. 이 경우 차량의 검지영역에서 검지거리가 주행거리보다 작아지는 현상이 발생하며, 이로 인해 차량 속도가 실제보다 낮게 측정된다. 이는 어떤 차량이 1차 루프는 정상적으로 밟고 2차 루프는 일부만 밟고 진행할 경우 양의 오차가 발생한다는 것을 의미한다.

2) 동시진입차량

(1) 실험방법

동시진입 실험은 대각선 진입 실험과 동일한 조건에서 약 30회씩 실험차량 A가 1차 루프를 통과하고 2차 루프에 진입하기 전이나 진입하였을 때 실험차량 B가 1차 루프에 진입하도록 하였다. 이때 차량의 평균진입속도는 24.0km/시였으며 동시진입차량간의 차두거리는 약 1초를 유지하도록 하였다.

(2) 분석 결과

본 연구에서 개발한 동시진입차량 처리 알고리즘을 사용한 〈표 4〉와 같이 루프검지영역에서 동시진입을 시도한 관측대상 차량 모두가 정상적인 속도측정이

〈표 4〉 동시진입시 속도측정 오차분석결과

구분 \ 루프 모양	1.5m×1.5m
평균오차(%)	-2.91
표준편차	1.35
분산	1.84
범위(km)	6.41
최대오차(%)	-5.9
최소오차(%)	0.50
표본수	39

주 : 오차(%) = 100 \* (기준속도 - 검지속도) / 기준속도

가능하였다. 차량 39대의 평균검지속도는 23.3km/시로서 평균기준속도와 거의 일치하였다.

4. 현장 종합실험

1) 루프검지기 설치 모형 및 알고리즘

실험 환경에서 파악된 2회 속도측정, 대각선주행차량 필터링, 동시진입차량 필터링 알고리즘을 종합적으로 평가하기 위하여 최종 현장실험을 실시하였다.

(1) 실험개요

현장실험은 경기도 양평군 6번 국도상에 설치된 1.5m×1.5m의 팔각루프검지기를 대상으로 수행하였다. 루프간 거리는 6m이고 루프선 회전수는 3회이었다.

(2) 실험결과

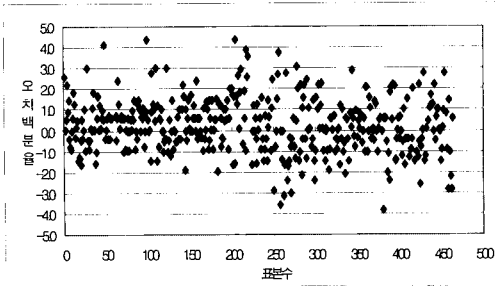
실험자료를 분석한 결과 〈표 5〉와 같이 관측된 차량 수는 총 461대이며 이중 422대의 차량이 정상적으로 검지되었고, 39대의 차량은 필터링 알고리즘에 의해 제거되었다.

정상적으로 검지된 차량 422대의 오차 백분율은 자동속단속시스템의 오차허용 범위인 ±5%를 벗어나지 않은 것으로 나타났다. 오차 백분율의 분산은 1.69, 표준편차는 1.30으로 오차 분포가 〈그림 8〉과 같이 매우 양호한 것으로 나타났다.

필터링 알고리즘으로 제거된 차량 39대의 속도측정 오차 백분율의 분산은 4.60, 표준편차가 2.145로 정상적으로 검지된 차량의 오차 백분율의 분산과 표준편차보다 크게 나타나고 있다. 또한 필터링된 차량 중 가장 오차가 큰 것은 9.5%로 오차허용 범위를 5%를 크게 벗어나고 있다.

〈표 5〉 속도측정 오차 분석 결과(종합실험)

구분 \ 종류	정상 검지된 차량(422대) 속도 오차	필터링 된 차량(39대) 속도 오차
평균	0.227	0.624
표준편차	1.300	2.145
분산	1.690	4.604
범위	8.157	14.112
최소값	-3.796	-4.567
최대값	4.361	9.544
표본수	422	39



〈그림 8〉 속도측정 오차 분포(종합실험)

## VI. 결론

본 연구는 자동과속단속시스템에서 활용되고 있는 2중 루프검지기의 속도측정 신뢰도를 높이기 위한 방안을 개발하기 위하여 수행되었다. 먼저 2중루프검지기의 속도측정 오차원인을 고유오차와 물리적오차로 분류하였다. 물리적오차의 주원인은 차량이 검지영역을 대각선으로 주행할 때와 검지영역내에 복수의 차량이 동시에 진입하는 경우로 나타났다. 대각선주행 차량과 동시진입차량의 물리적오차 개선 방향으로 복수신호처리, 비정상진입차량 필터링 등의 방향을 제시하였다.

첫째, 차량이 검지영역에서 대각선으로 주행할 경우 이를 적절하게 필터링하여 제거할 수 있는 알고리즘을 이용한다면 오차를 줄일 수 있다. 속도측정 오차의 대부분은 루프검지기의 검지영역을 대각선 주행하는 차량에 의해서 유발되며 이들 차량은 1차 및 2차 루프의 주파수 변화값이 상당히 다르다. 따라서 주파수 변화를 차이를 이용하여 대각선 주행차량을 필터링하는 알고리즘은 자동과속단속시스템의 속도측정 신뢰도 개선에 매우 효과적이다.

둘째, 루프검지기 검지영역에 2대 이상의 차량이 동시에 진입하였을 경우도 차량의 속도측정 오차를 유발한다. 동시진입에 의한 차량 속도측정 오차를 줄이기 위한 알고리즘은 매우 효과적이었다.

셋째, 본 연구에서 제안한 알고리즘을 종합적으로 평가하기 위하여 도로현장에서 평가한 결과 모든 통과차량의 속도를 정확하게 측정하거나 필터링 해낼 수 있었다. 본 연구에서 제안한 방법론은 국내에 설치한 일부 자동과속단속시스템에 성공적으로 이식되어 사용하고 있다.

종합적으로 본 연구에서 제안한 이중처리 알고리즘

은 속도측정의 분산을 줄여주며 필터링 알고리즘은 오차한도를 넘어서는 검지대상을 제거해 냄으로서 직접속도측정의 정확성을 높여주는 것으로 평가된다.

향후 본 연구와 관련하여 다음과 같은 분야가 연구될 필요가 있다.

첫째, 현재 국내에서 고속도로 콘크리트 포장도로, 일부 ITS, 중요터널관리시스템 등에서 교통정보 수집용으로 2중 루프검지기를 사용하고 있다. 이들 시스템에서는 개별차량의 속도를 측정하는 것보다는 30초나 5분 등 특정시간단위의 평균속도를 구하는 것이 주목적이기는 하지만 본 연구에서 제시한 알고리즘을 적용할 경우 정확도 개선이 가능할 것이다.

둘째, 루프검지기의 조합에 따라 속도측정의 정확도가 달라질 수 있기 때문에 최적 조합에 관한 연구가 요구된다. 실제 현장에서 사용하는 검지기의 간격은 본 연구에서와 같이 6m 내외인데 이는 현재 검지기의 고유오차와 물리적오차를 최소화시키는 결과이다(도로교통안전관리공단, 1999). 그러나 향후 2중루프검지기의 크기, 간격 뿐 아니라 3중검지기의 대안까지 고려할 필요가 있다.

## 참고문헌

1. 강정규·현철승·오세리(1999), "자동과속단속시스템의 교통안전개선 메커니즘 분석", 대한교통학회지, 제17권 제1호, 대한교통학회, pp.187~196.
2. 오영태·이철기(1995), "실시간 교통신호제어를 위한 루프 검지기의 최적형태 결정에 관한 연구", 대한교통학회지, 제13권 제3호, 대한교통학회, pp. 67~85.
3. 우석철(1993), "루프검지기에 의한 도시간선도로의 통행시간 예측", 아주대학교 대학원, 석사학위 논문.
4. 이현진(1990), "인덕턴스 루프를 이용한 차량종류 판별에 관한 연구", 원광대학교 대학원, 석사학위 논문.
5. 조형기(1998), "신경망을 이용한 루프-기반 실시간 차종인식모형 개발", 아주대 대학원, 공학박사 학위논문.
7. 도로교통안전관리공단(1994), "루프식검지기의 형태별 성능비교분석".
8. 도로교통안전관리공단(1995), "신전자교통신호 시스템 현장종합실험(대체 검지기부문 최종보고서)".

9. 도로교통안전관리공단(1997), "무인단속시스템 설치기준 및 효과분석".
10. 도로교통안전관리공단(1999), "과속 교통사고 방지 종합대책".
11. 도로교통안전관리공단(1999), "루프검지기 속도 측정신뢰도 제고 방안 연구".
12. 도로교통안전관리공단(1995), "과속차량 단속기의 운영체계 및 신뢰도 분석".
13. 도로교통안전관리공단(1996), "첨단교통신호 제어시스템 표준화제정 연구".
14. 도로교통안전관리공단(1998), "전자신호체계 기술지원에 관한 연구".
15. 서울시립대(1998), "도시가로상에서 교통정보 수집을 위한 매설형 검지기의 성능 평가 연구".
16. Institute of Transportation Engineers(1985), "Traffic Detector Field Manual".
17. Institute of Transportation Engineers(1991), "Traffic Detector Handbook".

✉ 주 작 성 자 : 강정규

✉ 논문투고일 : 2002. 6. 29

논문심사일 : 2002. 8. 12 (1차)

2002. 8. 27 (2차)

2002. 9. 2 (3차)

심사판정일 : 2002. 9. 2

✉ 반론접수기간 : 2003. 2. 28