

## 음성 경고의 도로 공사구간 적용 가능성 평가

### Evaluation of the Feasibility of a Voice Alarm in a Highway Work Zone

문재필\*  
(Jaepil Moon)  
(Korea Institute of Civil Engineering  
and Building Technology)

박현진\*\*  
(Hyun-jin Park)  
(Hanyang University)

오철\*\*\*  
(Cheol Oh)  
(Hanyang University)

#### 요약

도로공사구간의 안전성 증대를 위해 공사구간에 진입하는 운전자에게 전방상황에 대한 사전인지와 적절한 회피행동을 유도할 수 있는 경고정보를 제공하는 것은 효과적인 기술적 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 지향성 스피커를 이용하여 운전자에게 음성경고를 제공하여 안전운전을 유도하는 기술의 타당성을 평가하였다. 이를 위해 현장실험을 수행하였으며, 운전자의 경고정보 인지도 및 선호도, 공사구간 접근차량의 속도, 그리고 소음을 평가지표로 설정하여 수집된 자료를 분석하였다. 분석결과, 음성경고가 도로공사구간에 접근하는 운전자의 주위 환기를 위해서 긍정적으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 반면 소음으로 인한 부정적인 효과도 발생할 수 있음을 관찰하였다. 따라서 음성 경고 제공 방식에 대한 개선을 통해 음성 정보 제공의 실효성을 증대시킬 필요가 있다. 또한 본 연구의 결과물은 향후 공사구간 안전성 증대를 위한 체계적인 음성경고정보시스템 개발을 위해 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심어 : 도로 공사구간, 음성 경고, 지향성 스피커, 회귀분석, 크리깅 기법

#### ABSTRACT

Providing a voice alarm to drivers approaching a work zone could be an effective alternative to mitigate the potential safety problems of the work zone. This study conceived a voice alarm with a direction sound speaker and a field test was conducted that evaluated the feasibility of the voice alarm at a highway work zone. During the field study, we carried out on-site driver surveys to obtain drivers' perception and preference, collected approaching speeds, and measured sound level during the off-peak 2-hour for two days, respectively. The results showed that while the voice alarm has the potential to be an effective tool in improving safety, the alternative appeared to have the negative effect of noise. Further refinement to a voice alarm with a directional speaker is required to improve feasibility, and the results are expected to be utilized as basic data useful for the refinement.

Key words : Work Zone, Voice Alarm, Directional Sound Speaker, Regression analysis, Kriging analysis

† 본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업(16TLRP-C096228-02) 지원 및 수행하였습니다.

\* 주저자 및 교신저자 : 한국건설기술연구원 수석연구원

\*\* 공저자 : 한양대학교 교통물류공학과 박사과정

\*\*\* 공저자 : 한양대학교 교통물류공학과 교수

† Corresponding author : Jae-Pil Moon(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology), E-mail jpmoon@kict.re.kr

† Received 29 July 2016; reviewed 17 August 2016; Accepted 23 August 2016

## I. 서 론

### 1. 연구의 배경 및 목적

국토교통부에서 발간한 ‘도로업무편람(2016)’에 의하면, 도로보수 비용이 2011년 4,858억원에서 2016년 9,473억원으로 매년 약 3% 증가하고 있는 것으로 나타났다[1]. 이런 도로보수 비용 증가 추세는 교통수요 및 보다 질 좋은 도로 서비스 요구로 도로점용 공사가 지속적으로 증가하는 추세와 상당히 연관성이 있다고 볼 수 있다. 도로점용 공사는 도로의 본질적인 기능 저하 및 도로 이용자 안전문제뿐만 아니라 도로 작업자의 안전에 큰 위협이 되고 있다. 특히 도로 작업자는 주행 중인 자동차의 위협에 노출되었기 때문에 사망사고 발생률이 일반 구간에 비해 상당히 높은 것으로 나타났다. 2013년 산업안전보건연구에서 발간한 업무상 사망재해 원인 분석에 의하면, 재해발생 형태 중에서 도로 공사구간에서 차량과 부딪힘·접촉 재해발생이 가장 높은 것으로 나타났다[2]. 또한 도로교통공단에서 분석한 2011년에서 2013년 간의 도로 공사장에서 발생한 교통사고 통계자료에 의하면, 연간 740건이 발생하였으며 3년간 총 102명 사망과 총 3,606명이 부상한 것으로 나타났다. 이런 사고는 차대차 사고에 의한 인명피해보다는 차대사람 사고 유형의 인명피해가 증가한 것으로 나타났다. 그 이유는 충격흡수 범위 등 도로 작업차에 대한 안전시설을 보강으로 인해 차대차 사고의 인명피해는 최소화된 반면, 차대사람 사고의 경우는 도로 작업자들은 무의식중에 교통사고가 발생하기 때문에 부상 심각도가 더 커진 것으로 판단된다.

도로 관리자와 보험 관계자의 면담 결과, 그들은 도로 공사구간에서 발생하는 대부분 교통사고는 휴대전화, DMB 조작 등 전방주시 태만과 졸음운전과 같은 운전자 부주의가 주원인 것으로 지적하였다. 이런 문제를 해결하기 위해 해당 도로 관리청에서는 경고음, 이동식 Rumble-strip 등 새로운 대안을 고려·적용하고 있다. 같은 맥락에서 본 연구에서는

도로 공사구간으로 접근하는 운전자에게 주의 환기를 위해 상용화된 지향성 스피커(Directional Sound Speaker)를 적용하여 음성 경고 메시지를 제공하는 방안을 고안하였다. 지향성 스피커는 특정한 공간에만 소리를 집중시킬 수 있으며 상대적으로 멀리 전달할 수 있기 때문에 박물관·시각장에 안내에서 해상 해적 퇴치용으로 다양한 범위에서 상용화하고 있다. 만약 음성 경고 시스템이 성공적으로 도로 공사구간에서 적용된다면 도로 작업자와 이용자 모두를 보호할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 지향성 스피커를 통한 음성 경고 메시지 제공 방안에 대한 적용 가능성을 현장에서 운전자와 차량을 대상으로 정량적 지표를 분석하여 평가를 수행하였다. 이 평가에서는 차량의 접근속도 측정, 음성 경고 정보에 대한 인지여부 및 정보 효용성에 대한 운전자 대상 설문조사, 지향성 스피커 작동에 따른 소음 측정을 수행하였다. 이러한 정략적 지표를 통해 도로 공사구간에서 음성 경고 시스템의 적용 가능성을 평가하였으며, 그 결과를 토대로 개선 방안 및 향후 연구 과제를 제시하였다.

## II. 선행연구 고찰

도로 공사구간에서 지향성 스피커 적용을 통해 접근하는 운전자에게 음성 경고 제공관련 국내 연구는 전무하며 국외의 경우는 최근 미국에서 두 개의 관련 연구가 수행되었을 정도로 상당한 제한적이다. 선행연구 고찰은 관련 국외 연구와 일반적인 음성 경고음에 대한 장·단점 및 요구사항으로 정리하였다.

### 1. 도로 공사구간에서 음성 경고 적용 사례 연구

Phanomchoeng et al.(2008)은 도로 공사구간에서 발생하는 교통사고의 심각성을 인지하고 도로 작업장으로 침범이 예상되는 차량의 운전자에게 경고를 주는 저가용 지향성 스피커를 개발·평가하였다. 그들은 파라미터 방식(Parametric array)의 초음파

(Ultrasound)가 장거리 음성 경고용으로 가장 적합한 것으로 제시하였다. 그러나 성능, 이동성, 비용, 유지보수를 고려하면 일반적인 확성기의 배열이 가장 실용적인 것으로 제시하였다. 또한 개발된 음성 시스템은 설치위치로부터 40m까지 대상 차로와 이웃 차로 간 6dB 이상 차이로 제공할 수 있는 것으로 나타났다. 비록 그들은 실내실험에서 제한적으로 음성 경고에 대해 연구를 수행하였지만, 도로 공사구간에서 음성 경고 시스템의 적용 가능성을 보여주었다는 점에서 가치가 있다고 판단된다[3].

Brown et al.(2015)은 상용화된 지향성 스피커를 이동 작업차량에 장착하여 현장에서 음성 경고의 효율성을 평가하였다. 그들은 저속으로 이동하는 작업차량과 작업차량에 접근하는 일반차량 간 속도 차이로 인한 잠재적 충돌 문제점을 지적하였다. 이를 해결하기 위한 방안으로 그들은 지향성 스피커를 통한 음성 경고를 제시하였다. 그들은 지향성 스피커이외에 일반 스피커도 같이 평가하였다. 그 밖에도 각 장비별로 음성 경고 제공 방식을 연속적, 인위적 그리고 감응식 방식으로 적용하여 효율성을 평가하였다. 각 방안에 대한 효율성의 평가 척도는 소음, 접근 차량의 합류 거리와 속도, 운전자 행위 형태를 측정하였다. 그 결과, 모든 방식에서 음성 경보 미작동시에 비해 일반차량의 이웃 차로로 합류하는 지점은 이동식 작업차로부터 훨씬 떨어진 것으로 나타났다. 특히 지향성 스피커의 연속적인 음성 경고 제공 방식이 차량 속도와 합류 거리의 표준편차가 가장 작은 것으로 분석되었다. 비록 도로조건에 따른 허위 경고 등 잠재적 문제점이 발생하였지만, 그들은 도로 공사구간의 안전 개선에 잠재적으로 효과적인 방안이라고 주장하였다[4].

도로 공사구간이 아닌 다른 분야의 청각 경고음의 효과를 보여주기 위해 Maddern et al.(2011) 연구를 고찰하였다. 그들은 응급 차량의 청각 경고음과 관련된 연구를 수행하였으며 위급정도, 위급 위치, 경고음의 차폐와 같은 요인들 분석하였다. 그들은

운전가 느끼는 위급정도는 경고음의 반복 횟수가 많을 수록 증가시킬 수 있으며 경고음의 주파수의 범위를 증가시키면 위급 위치를 더 빠르게 파악할 수 있는 것으로 주장하였다. 그 밖에, 저주파수 일수록 주변 배경 소음에 차폐될 가능성이 높다고 지적하였다[5].

## 2. 청각 경고음의 기본적인 요구 조건

일반적으로 청각 경고 시스템은 전방향식(Omnidirectional)이다. 즉, 시각적인 경고 시스템과 달리, 청각 경고는 우리가 위치하고 있는 방향과 관계없이 감지가 가능하다는 점이다. 게다가 Banbury et al.(2001)의 연구에서 “눈을 닫는 것보다 귀를 다는 것이 더 어렵다”고 주장하였다[6]. 이러한 이유로 음성 경고는 시각적 경고보다 높은 준수 비율을 유도할 수 있다고 판단된다.

청각 경고의 기본적인 요구 조건은 주변 환경의 소음보다 최소 15dB 높게 해야 하며 감지를 보장하기 위해서는 30dB를 보편적으로 요구한다. 두 번째로 사람의 청각 기능에 손상을 줄 수 있는 경고음은 피해야 한다. 세 번째로 너무 지나치게 갑작스럽게 혹은 깜짝 놀라게 하는 경고의 펄스(Pulse)는 피해야 한다. 마지막으로 위험상황에 대해 요구되는 행동을 유도할 수 있는 경고음(Informative)을 제공해야 한다[7].

비록 제한적인 선행연구 및 일반적인 청각 경고음의 장·단점과 요구조건을 고찰하였지만, 청각 경고음의 사용은 운전자에게 위험상황에 대한 공간 위치 정보를 제공하는 데 도움을 주는 것 이외에 충분히 주의를 환기시키는 데 도움이 된다고 판단된다.

## Ⅲ. 분석방법론

### 1. 지향성 스피커 특징

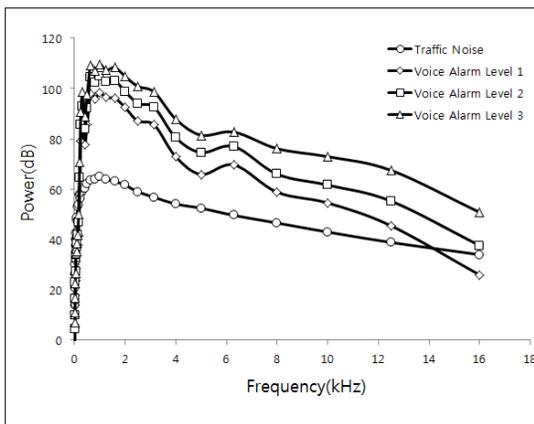
도로 공사구간에서 음성 경고를 제공하기 위해 현재 상용화된 지향성 스피커 중 하나의 제품을 선

택하였다. 보편적 지향성 스피커의 기준은 스피커 송출 지점을 기준으로 좌우 각 15도씩, 30도 지점에서 3dB 떨어지는 것이다.

<Fig. 1>에서는 현장에서 적용한 지향성 스피커를 보여주고 있으며, <Fig. 2>에서는 음성 경고 정보의 출력에 따른 음원과 도로 주변 소음의 연속적인 파워 스펙트럼(Continuous power spectrum of sound)을 보여주고 있다. 연속적인 파워 스펙트럼에 의하면, 음성 메시지는 주변 소음과 확연하게 변별이 있는 것으로 보여주고 있다. 그 결과, 청각 경고의 기본적인 요구 조건 중 최소 음원 조건은 만족하는 것으로 나타났다.



<Fig. 1> A directional sound speaker employed



<Fig. 2> Comparing continuous power spectrum of each sound source

## 2. 현장 조사 지점 및 평가 방법

### 1) 현장 조사 지점

도로 공사구간에서 음성 경고의 효율성 평가를 위해 경기도 고양시 일산서구 대산로에 위치한 2차 도로를 선정하였다.<Fig. 3> 참조) 이 도로는 제한속도 60km/h로 상·하부 교차로간 구간 거리가 약 600m이며 직선구간이다. 해당 구간내 이면도로와 접속지점 제외하고는 주요 교차지점은 없다. 또한 도로 주변은 대부분 농업지역이며 공업지역은 드물게 있는 것으로 나타났다.



<Fig. 3> Aerial imagery of a test site in Goyang-Si, Gyeonggi-Do

### 2) 평가 방법

조사지점으로 선정된 도로에서 공사구간을 구현하기 위해 국토교통부의 ‘도로 공사장 교통관리지침(2012)’에서 제시한 2차로도로 교대통행 방안을 적용하였다. 대상 도로의 한 차로는 점용공사, 다른 차로는 양방향 교대통행을 하도록 도로 공사구간 교통관리 방안을 구축하였다.<Fig. 4> 참조) 대상 도로의 길이와 접속도로를 고려하여 도로 작업장의 총 길이는 테이퍼 길이(각 방향별 30m)를 포함하여 150m로 선정하였다. 각 방향별 공사장 시점에 신호수를 각각 배치하여 차량을 통제하였다. 테이퍼와 도로 작업구간은 교통콘으로 설치하여 운전자를 안전하게 진행방향을 유도하였다. 각 방향별로 도로 공사구간의 상류부에는 접근하는 운전자에게 전방

공사 상황을 알리기 위해 안내표지판, 규제·주의 표지를 설치하였다.



〈Fig. 4〉 Field implementation

그러나 본 평가는 제한적인 도로 구간인 관계로 이웃 교차로로부터 차량의 정상적인 속도로 도달할 수 있는 거리(상류부의 첫 번째 검지기 지점)를 고려하여 서쪽 방향으로 공사구간의 상류부를 국한시켰다. 반대 방향 접근구간은 정상적인 속도에 도달하기 위한 거리가 짧기 때문에 평가 대상에서 제외시켰다. 따라서 지향성 스피커는 도로 작업장 시점으로부터 해당 상류부 165m에 설치하였다. 또한 지향성 스피커 설치지점으로부터 전방 50m에 음성 경고 메시지가 들리도록 스피커 방향을 조절하였다. 비록 해당 제품의 특성상 50m보다 더 멀리 음성 메시지 제공이 가능하지만 그 만큼 전기 출력이 높여야 한다. 이로 인해 보행자 및 도로 조사자의 청각 기능에 부정적 영향을 미칠 수 있기 때문에 50m로 제안을 두었다. 음성 경고 메시지는 “전방 공사 중 서행하세요”이며, 이런 경고 메시지를 최소 한번은 운전자가 들을 수 있도록 대상 도로의 차량 운행 속도를 고려하여 음원 제공 속도를 선정하였다.

평가는 총 2일(2016년 6월 22일/6월 29일)동안 교통량의 영향을 최소화하기 위해 비침두시간대(오후 13:30~15:30)에 진행하였다. 첫 날은 음성 경고 없이 도로 공사구간으로 인한 차량 속도와 소음

측정을 하였으며 두 번째 날은 음성 경고 제공으로 인한 차량 속도와 소음 측정이외에 운전자대상 설문조사를 수행하였다. 사전 조사 및 전문가 의견을 통해 주행중인 차량에서 운전자가 인지가 가능하며 지향성 스피커로 인해 발생할 수 있는 소음을 최소화하기 위해 음원 출력 세기를 3개 수준(23mVrms, 70mVrms, 161mVrms)으로 적용하였다. 각 음원 출력 수준별로 30분씩 운영하였으며 각 수준 간 15분씩 정지 시간을 두고 실험하였다. 여기서 음원 출력 세기는 장치에서 내보내는 신호의 세기이며 결국 전압 세기로 볼 수 있다.

### 3. 효과 평가 지표

본 연구에서는 지향성 스피커로부터 제공하는 음성 경고 메시지로 인해 차량과 도로 주변에 미칠 수 있는 긍정적·부정적 효과를 평가하기 위해 다음과 같은 평가 지표를 선정하였다.

- 차량 속도
- 운전자 인지 및 정보 효율성 여부
- 소음

여기서 차량 속도와 운전자 인지 및 정보 효율성은 음성 경고의 긍정적 효과를 평가하는 데 적용하였으며, 소음은 지향성 스피커로 인해 발생할 수 있는 부정적 효과를 평가하는 데 활용하였다.

차량 속도는 도로 작업장 시점으로부터 상류부로 50m 간격으로 설치된 이동식 검지기(NC-97)를 통해 수집하였다. 운전자 인지 및 정보 효율성 여부 조사는 교대통행 시점에서 정지하고 있는 승용차와 1.5톤 픽업트럭 차량의 운전자를 대상으로 무작위로 설문조사를 수행하였다. 본 연구에서 대형차량이 제외된 이유는 조사원과 운전자간의 높이 차이로 인해 설문조사를 수행하기가 어렵기 때문이다. 운전자 인지 및 정보 효율성 여부에 대한 설문조사의 내용은 제한적인 시간을 고려하여 다음과 같이 선정하였다.

- 운전자 성별(남·여)
- 운전자 나이(20대, 30대, 40대, 50대, 60대 이상)
- 음성 경고 인지 여부(예/아니오)
- 음성 경고 인지했을 경우 정보 효율성 (도움이 된다/안된다)

그 밖에, 소음 측정은 활용 가능한 장비, 인원 및 시간을 고려하여 지향성 스피커의 설치지점을 기준으로 상류부로 60m, 우측으로 60m로 측정 범위를 설정하였다. 상류부방면은 20m 간격, 우측방면으로는 5m 간격으로 B&K사의 Type4949 모델의 마이크로폰과 이동식 소음 측정기를 이용하여 측정하였다. 소음측정은 각 음원 출력 세기 수준별로 30분 동안 연속적으로 측정하였다. <Fig. 5>는 B&K사의 Type4949 모델의 적용 예를 보여주고 있다.



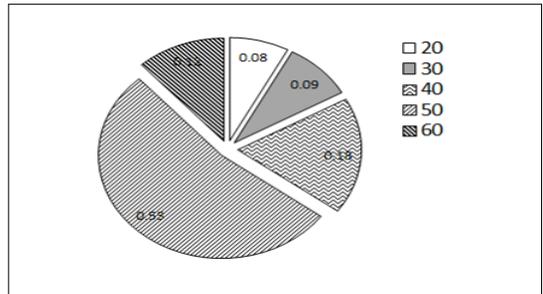
<Fig. 5> Implemented microphones for measuring noise

#### IV. 분석결과

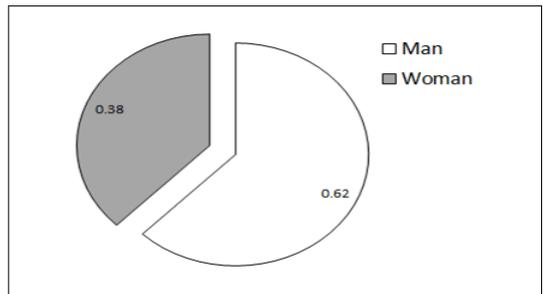
##### 1. 운전자 인지 및 선호도 분석

총 94명 운전자를 대상으로 설문조사를 했으며, 조사된 운전자의 성별과 나이 비율은 <Fig 6>과 <Fig. 7>에서 보여주고 있다. 30대 비율이 53%로 가장 많으며 20대 비율은 상대적으로 제일 낮게 나타났다. 남성 비율이 62%로 여성 운전자가 상대적으로

로 작게 조사되었다. 제한적인 인원, 시간, 비용으로 전 연령대와 성별에 대해 비슷한 샘플수를 얻지 못하기 때문에 연령대와 성별별 대신 전체 운전자에 대한 음성 경고의 인지 및 정보 효율성 여부에 대한 분석 결과를 제시하였다.



<Fig. 6> Percentage of the age of interviewed drivers



<Fig. 7> Percentage of the gender of interviewed drivers

분석 결과는 <Table 1>과 <Table 2>에서 보여주고 있다. 각각 표는 각 음원 출력 단계별로 운전자 인지 및 정보 효율성 여부에 대한 비율을 보여주고 있다. 기대했던 것처럼, 음원 출력 세기에 따라 운전자의 인지 비율은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 각 음원 출력 세기 단계별로 인지한 운전자를 대상으로 음성 경고음에 대한 효율성을 평가한 결과, 출력이 낮은 단계에서는 거의 50%가 효율성 있다고 대답한 반면, 높은 출력 세기에서는 대략 60% 이상으로 효율성 비율이 높아지는 것으로 나타났다. 그 밖에, 인지를 못한 운전자 중 5명은 음성 경고음이 효율성이 있을 것으로 추가적으로 대답하였다.

〈Table 1〉 Frequency of sensing voice alarm by each voice alarm level

Voice alarm volume level	Sensing		Sample size
	Yes	No	
1	14(42%)	19(58%)	33
2	17(55%)	14(45%)	31
3	19(63%)	11(37%)	30

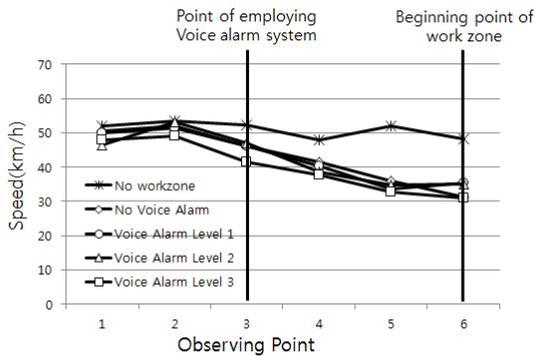
〈Table 2〉 Frequency of effectiveness of voice alarm by each voice alarm level

Voice alarm volume level	Effectiveness		Sample size
	Yes	No	
1	7(50%)	7(50%)	14
2	13(76%)	4(24%)	17
3	12(63%)	7(37%)	19

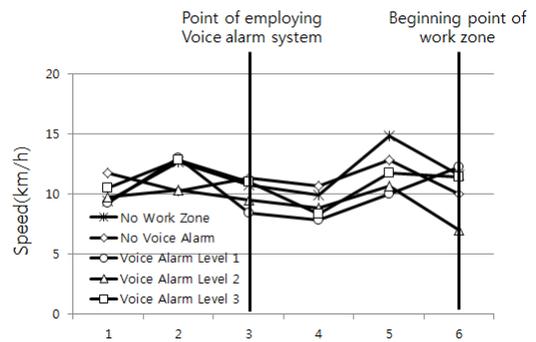
## 2. 차량의 접근속도 분석

교대통행 시점으로부터 전방 50m 간격으로 설치된 이동식 검지기를 통해 접근하는 개별 차량의 속도를 측정하였다. 각 지점별로 첫 번째 날은 총 458개, 두 번째 날은 총 475개 속도 자료가 수집되었다. 측정된 속도자료는 음성 경고 제공에 따른 순수 속도 차이 효과를 분석하기 위해 차량간 상호작용으로 인한 영향을 배제시키기 위해 각 차량 간 차 두시간 15초 이상에 해당되는 각 차량의 속도만 분석에 포함시켰다. 각 지점별로 15초 이상에 해당되는 속도 자료는 최소 120개 이상이다.

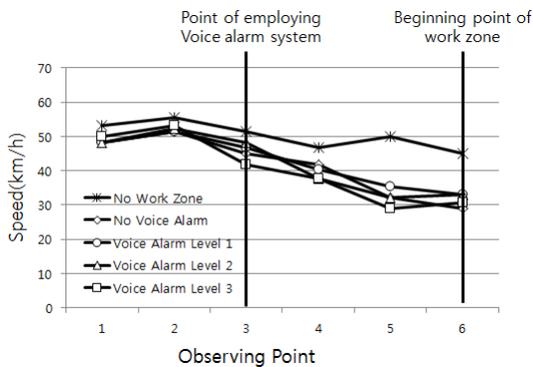
분석은 기초 통계분석과 회귀 분석을 통한 순수 속도 변화 효과에 대한 통계적 유의여부를 분석하였다.



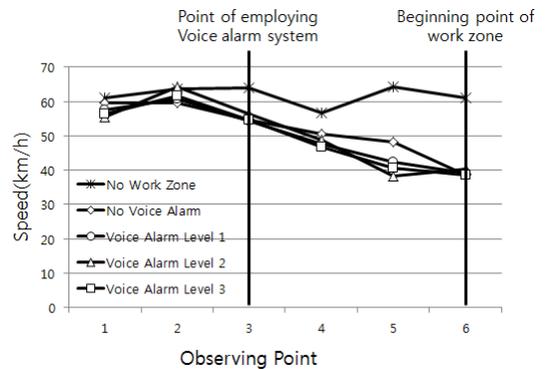
〈comparing average speed(km/h)〉



〈comparing standard deviation of speed(km/h)〉



〈comparing 50th percentile speed(km/h)〉



〈comparing 85th percentile speed(km/h)〉

〈Fig. 10〉 Fundamental statistics analyses for speeds at each point

## 1) 기초 통계 분석

각 지점별로 차두시간 15초 이상의 차량을 대상으로 평균 속도, 50<sup>th</sup> percentile, 85<sup>th</sup> percentile, 표준편차를 평가하였다. 비교분석은 음성 메시지 제공시 미제공시로 구분하여 각 지점별 속도 변화를 비교하였다. 또한 도로 간 구축전의 속도도 비교하였다. 그 결과, 음성 경고 제공시와 미제공시 평균 속도, 50<sup>th</sup> percentile 속도, 85<sup>th</sup> percentile 속도 및 표준편차는 거의 미소한 차이를 보이는 것으로 나타났다.(Fig. 10> 참조) 이러한 차이가 각 지점별로 통계적으로 유의한지를 분석하기 위해 회귀분석을 통해 수행하였다.

## 2) 회귀분석

음성 경고 제공에 따른 도로 공사구간 접근 속도의 차이를 각 지점별로 통계적으로 정량화하기 위해 선형 회귀분석 모델을 다음과 같이 적용하였다 :

$$Speed = \beta_0 + \beta_1 \times sound + \beta_2 \times point \cdots (1)$$

회귀분석 모델의 종속변수는 속도(Speed)이며, 독립변수는 음성 경고 제공 여부(Sound)(음성 경고 미작동, 음원 출력 세기 1단계의 음성 경고, 음원 출력 세기 2단계의 음성 경고, 음원 출력 세기 3단계의 음성 경고) 그리고 각 속도 측정 지점(Point)(6개 지점)이다. 여기서 음성 경고 변수이외에 다른 요인으로 인한 속도에 미치는 영향을 구분하기 위해 속도 측정 지점의 변수는 고정효과(Fixed effect)보다는 임의효과(Random effect)으로 모델에 고려하였다. 또한 각 지점별로 시간적으로 상관관계가 존재할 수 있기 때문에 이러한 부분을 설명·배재하기 위해 Autoregressive(AR) 모델도 적용하였다[8].

제안된 모델을 적용하여 음성 경고 제공에 따른 접근속도의 차이를 평가하였으며 그 결과는 <Table 3>과 <Table 4>에서 제시하고 있다. <Table 3>에서는 회귀 모델의 주요 변수들은 95%수준에서 통계

적으로 유의한 것으로 나타났다. <Table 4>에서는 각 속도 관측 지점별로 음성 경고 미제공 대비 음성 경고 제공에 따른 순수 속도 효과를 평가하였다. 그 결과, 음원 출력 세기 3단계의 음성 경고 제공시 음성 경고 미제공에 비해 도로 공사구간의 시점으로부터 100~150m 지점에서 접근속도가 약 3km/h 감소한 것으로 나타났으며 95% 수준에서 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다. 다른 출력 세기의 음성 경고 제공의 경우도 속도 차이가 1km/h로 미소하게 감소한 것으로 나타났으며 통계적으로 유의하지 않는 것으로 분석되었다.

<Table 3> Analysis of variance for speeds

Effect	Degree of Freedom	Chi-Square	F-value	p-value
Terminal data rate	3	9.45	0.0238	0.0250
Packet arrival rate (mobile terminal)	5	438.12	<0.001	<0.001

기대보다 접근속도 감소 효과가 크지 않았던 이유는 정상적인 도로조건에서 차량의 평균 자유속도는 약 50km/h로 낮기 때문에 음성 경고의 효과도 그만큼 낮게 나타난 것으로 볼 수 있다.

비록 음원 출력 세기 3단계에서 접근속도의 낮은 저감효과가 나타났지만, 대상 도로의 운영 특성 및 운전자 설문조사 결과를 고려한다면 도로 공사구간에서 음성 경고의 긍정적인 안전 효과를 제공할 수 있는 것으로 판단된다.

## 3. 지향성 스피커의 소음영향 분석

음성 경고 제공에 따른 발생하는 소음이 도로 주변에 어떻게 영향을 미치는지를 분석하였다. 환경정책기본법 시행령 제29조의 2제3항에 의하면, 소음원인 확정기가 옥외설치·운영할 경우는 주간시간대(08 : 00~18 : 00)에서 소음원의 크기는 80dB 이하로

<Table 4> Effect of voice alarm on speeds by each observation point

Site	Effect difference	Estimate	95% confidence	p-value
1 (Upstream)	Voice alarm's Level 1 - No voice alarm	-0.2	-5.1 to 4.1	0.8335
	Voice alarm's Level 2 - No voice alarm	-1.7	-8.9 to 0.7	0.0992
	Voice alarm's Level 3 - No voice alarm	-1.1	-6.9 to 1.9	0.2626
2	Voice alarm's Level 1 - No voice alarm	-0.4	-5.4 to 4.5	0.8616
	Voice alarm's Level 2 - No voice alarm	1.2	-4.0 to 6.3	0.6471
	Voice alarm's Level 3 - No voice alarm	-2.9	-7.6 to 1.9	0.2299
3	Voice alarm's Level 1 - No voice alarm	-0.1	-4.7 to 4.7	0.9927
	Voice alarm's Level 2 - No voice alarm	0.8	-4.2 to 5.8	0.7425
	Voice alarm's Level 3 - No voice alarm	-4.6	-9.2 to 0.0	0.0506
4	Voice alarm's Level 1 - No voice alarm	-1.0	-4.7 to 2.8	0.5957
	Voice alarm's Level 2 - No voice alarm	-2.8	-6.9 to 1.2	0.1710
	Voice alarm's Level 3 - No voice alarm	-3.8	-7.6 to 0.0	0.0514
5	Voice alarm's Level 1 - No voice alarm	-2.4	-7.8 to 2.9	0.3643
	Voice alarm's Level 2 - No voice alarm	-1.5	-7.2 to 4.3	0.6142
	Voice alarm's Level 3 - No voice alarm	-3.4	-9.0 to 2.2	0.2299
6 (Beginning point of work zone)	Voice alarm's Level 1 - No voice alarm	4.4	-0.4 to 9.2	0.0687
	Voice alarm's Level 2 - No voice alarm	3.9	-0.7 to 8.6	0.0937
	Voice alarm's Level 3 - No voice alarm	-0.1	-5.3 to 5.1	0.9691

규제하고 있다. 따라서 지향성 스피커를 확성기로 간주하여 관련 기준을 만족하는 지를 평가하였다. 이런 평가를 통해 소음문제로 인한 도로 주변 민간인에게 피해를 미칠 수 있는지를 판단하는 데 활용하였다.

앞에서 언급했듯이 제한적인 장비, 인원 그리고 측정 지점으로 결측 지점이 발생하였으며, 이로 인해 지향성 스피커로부터 발생하는 소음 패턴 분석이 다소 어렵기 때문에 적절한 통계기법이 요구된다. 이러한 결측된 부분을 보완을 위해 크리깅(Kriging) 통계 기법을 적용하였다. 크리깅 통계는 공간기반 자료를 모델링하는 데 가장 널리 사용되는 기법이다. 간략하게 설명하면, 공간상에 분포하는 관측자료들의 구조적 특성을 베리로그램(Variogram)을 통해 모델링 한 다음, 원시자료의 변동과 매수 유사한 분포를 토대로 결측지점에 추정치를 산정한다. 관측자료의 분포 경향을 분석하는 베리로그램의 대표적인 3가지 모델은 구상형 모델(Spherical model), 가우시안 모델(Gaussian model),

지수형 모델(Exponential model), 파워 모델(Power model)이며 공식 (2), (3), (4), (5)가 각각 해당된다.

$$\gamma_z(h) = c_0 \left[ \frac{3h}{2a_0} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a_0} \right)^3 \right] (h \leq a_0) \dots\dots (2)$$

$$\gamma_z(h) = c_0 (h > a_0)$$

$$\gamma_z(h) = c_0 \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{h}{a_0} \right)^2 \right) \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$\gamma_z(h) = c_0 \left[ 1 - \exp \left( - \frac{h}{a_0} \right) \right] \dots\dots\dots (4)$$

$$\gamma_z(h) = c_0 h^{a_0} \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $\gamma(h)$ 는 거리  $h$ 만큼 떨어진 자료들간의 반베리로그램,,  $c_0$ 는 'sill'로 일정한 범위(range)를 넘어서 반베리로그램의 상관성 없어지고 안정된 상태의 값,  $a_0$ 는 반베리로그램의 상관관계를 가는 범위(range),  $h$ 는 자료간 공간 거리이다. 반베리로그램의 모델 선택은 그래프를 이용하여 유사한 패턴을 보

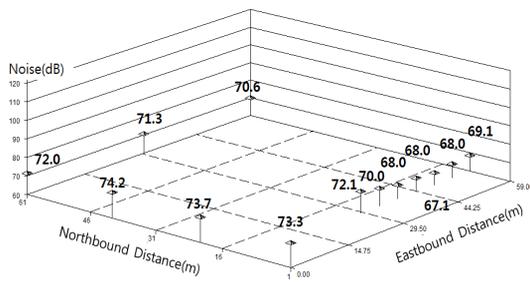
이는 모델을 선택한다. 선택된 베리로그래프 모델을 적용하여 예측값을 산정하며, 이것을 토대로 공간 기반 소음 분포 패턴을 제시하였다[9].

<Fig. 11>은 각 음성 경고 미작동시와 음원 출력 세기 단계별 작동시 현장에서 관측된 소음 값을 보여주고 있다. 관측값을 가지고 위에서 제시한 크리닝 기법을 이용하여 분석 대상 구간의 결측 지점에 대한 추정값을 산정 후 소음 분포 경향을 <Fig. 12>와 같이 분석하였다. 음성 경고 미작동의 경우는 일반적인 교통소음 수준(70dB 이하)에서 유지하는 것으로 나타났다. 또한 도로변에서 이격거리가 증가할수록 소음이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 음성 경고 작동시는 지향성 스피커의 기준으로 상류부와 우측방향으로 소음이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 음원의 출력 세기가 증가할수록 80dB 이상의 소음이 더 멀리 미치는 것으로 나타났다.

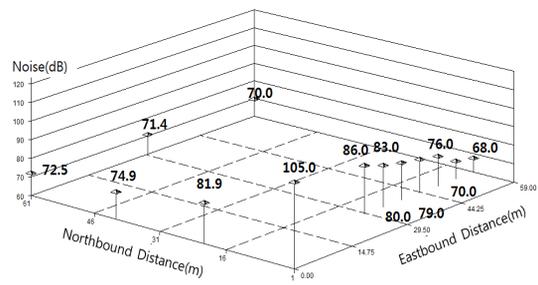
## V. 결론

본 연구는 도로 공사구간의 안전을 향상시키는 하나의 방안으로 지향성 스피커를 이용한 음성 경고에 대한 적용 가능성을 평가하였다. 이를 위해 2차로도로를 대상으로 도로 공사구간을 구축하여 차량 속도, 운전자의 인지 및 정보 효율성 여부, 소음을 관측하여 적용 가능성 평가를 위한 공학적인 지표를 제시하였다. 이런 공학적 지표를 통해 음성 경고음에 대한 긍정적·부정적 효과를 분석하였으며, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

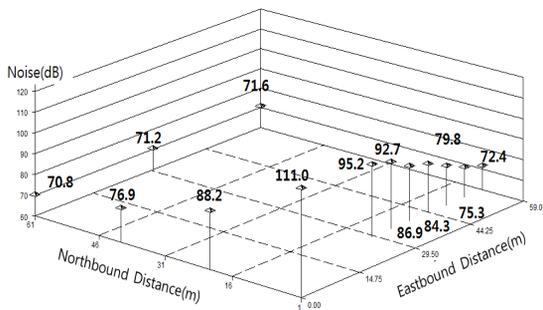
1. 음원 출력 세기가 클수록 운전자의 인지비율은 증가하며 음성 정보가 유용하다고 대답하는 비율도 유사하게 증가하는 것으로 나타났다.
2. 통계적 분석 결과에 의하면, 음성 경보 제공에 따른 도로 공사구간 접근 차량의 속도 저감효과는 그렇게 크지 않는 것으로 나타났다. 다만, 음원 출력 세기의 3단계에서는 음성 경보 미작동의 경우보다 약 3km/h 감속효과가 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.



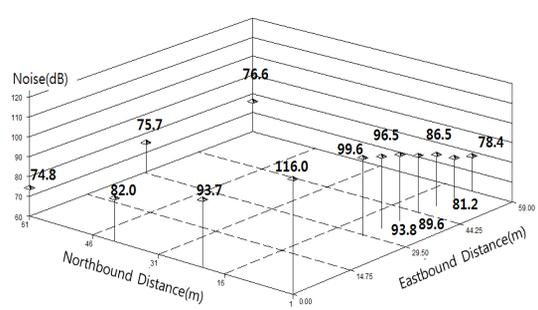
<No voice alarm>



<voice alarm volume's level 1>



<voice alarm volume's level 2>



<voice alarm volume's level 3>

<Fig. 11> Measured sound levels at several points by each condition

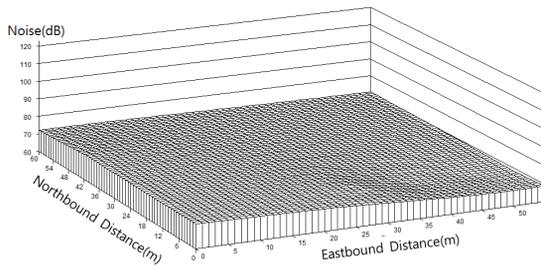
그러나 이런 감속효과는 조사대상 도로의 낮은 운행 속도와 밀접한 관계가 있다고 판단된다.

3. 운전자 설문조사와 감속효과 분석결과에 의하면 음성 경고를 제공함으로써 도로 공사구간의 안전을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

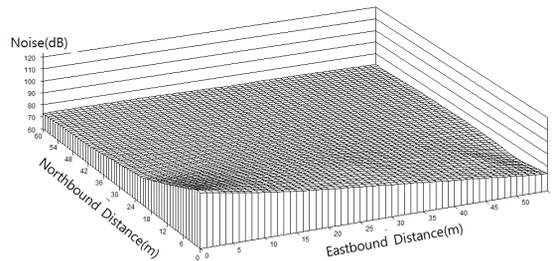
4. 이러한 긍정적인 가능성이 있는 반면, 지향성 스피커에서 발생하는 소음이 부정적인 요인으로 나타났다. 소음 분석 결과에 의하면, 음원 출력 세기가 증가할수록 생활소음 기준인 80dB 이상에 해당되는 범위가 상류부와 우측방향으로 증가하는 것으로 나타났다. 비록 소음으로 인한 부정적 효과와 낮은 속도 저감효과가 나타났지만, 음성경고가 도로 공사구간에 접근하는 운전자의 주의 환기를 위해서 긍정적으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 그러나 본 연구는 하나의 저속 구간과 제한적인 운전자 대상으로 적용 가능성 평가를 수행하였기 때문에 음성 경보 방안에 대한 효율성을 평가하는 데 다소 한계가 있다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 한계점

및 잠재적 문제를 개선하기 위해 향후 연구내용 및 개선방향을 제시하였다. 먼저 도로 주변에 소음 발생이 가장 중요한 문제인 것으로 나타났기 때문에 이러한 부정적인 효과를 완화하기 위해 저주파수를 활용하여 저소음 발생하는 출력 방식, 정보 제공 지점에 더 국한(Localization)하는 방식 등 도로 공사조건에 적합한 음원 출력 방식이 필요한 것으로 판단된다. 또한 비록 운전자 대상으로 인지 및 효율성 여부를 조사 수행하였지만 더 다양한 운전자대상으로 조사를 수행할 필요가 있으며 자동차내의 소음 측정하여 운전자의 청각 기능에 미치는 부정적 영향에 대한 조사가 추가로 필요하다. 또한 주의 환기 및 안전속도 유도를 위해 가장 적절한 음성 혹은 단순 경고음에 대한 연구도 필요하다고 판단된다. 그 밖에 다차로도로에서 음성 경고에 대한 적용 가능성 평가도 필요하다.

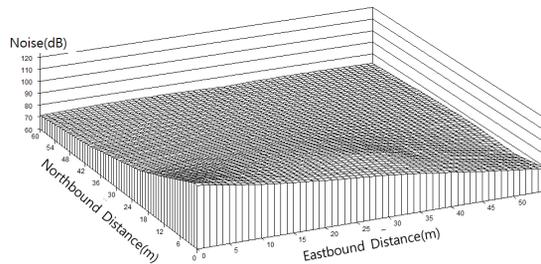
따라서 본 연구의 결과물은 향후 공사구간 안전성 증대를 위한 체계적인 음성경고 정보시스템 개발을



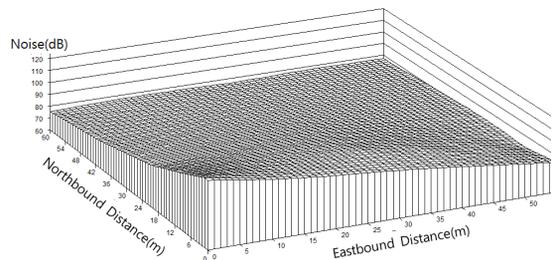
<No voice alarm>



<voice alarm volume's level 1>



<voice alarm volume's level 2>



<voice alarm volume's level 3>

<Fig. 12> Surface plot for each condition

위해서 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Highway Plan and Policies(2016), No. 11-1500000-0014800-10, pp.444-467.
- [2] Korea Occupational Safety & Health Agency(2013), *2013-year Occupational Health-related Accident Fatalities Cause Analysis*, p.93.
- [3] Brown H., Sun C. and Cope T.(2015), "Evaluation of Mobile Work Zone Alarm Systems," Transportation Research Record, 2485, *Journal of the Transportation Research Board*, pp.42-50.
- [4] Phanomchoeng G., Rajamani R. and Hourdos J.(2008), "Directional Sound for Long Distance Auditory Warnings from a Highway Construction Work Zone," *Intelligent Transportation Systems*, pp.1-37.
- [5] Maddern A., Privopoulos E. and Howard C.(2011), "Emergency Vehicle Auditory Warning Signals : Physical and Psychoacoustic Considerations," *Acoustics 2011-Proceedings of the Annual Conference of the Australian Acoustical Society*, pp.1-5.
- [6] Banbury S. P., Machen W. J., Tremblay S. and Jones D. M.(2001), "Auditory Distraction and Short-term Memory : Phenomena and Practical Implications," *Human Factors*, no. 43, pp.12-29.
- [7] Christopher D. W., Lee J. D., Liu Y. and Becker S. E. G.(2003), "An Introduction to Human Factors Engineering", *Pearson & Prentice Hall Books(Second Edition)*, pp.91-119.
- [8] SAS, [https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm#statug\\_mixed\\_sect022.htm](https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm#statug_mixed_sect022.htm), 2016.0720.
- [9] SAS, "Spatial Prediction Using the SAS system," SAS/STAT Technical Report, pp.1-68.

## 저자소개



문 재 필(Moon, Jae-Pil)  
 2007년 North Carolina State University 박사 취득 (교통전공)  
 2009년 2월~현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원  
 2007년 5월~2009년 1월 : North Carolina Department of Transportation Engineering I  
 2002년 5월~2007년 5월 : North Carolina State University 학생 연구원  
 1999년 2월~2001년 10월 : 한국건설기술연구원 연구원  
 e-mail : jpmoon@kict.re.kr



박 현 진(Park, Hyunjin)  
 2004년 3월~2014년 2월 : 한양대학교 교통시스템공학과 공학사  
 2014년 3월~현재 : 한양대학교 교통공학과 석박사통합과정  
 e-mail : snowboard@hanyang.ac.kr



오 철(Oh, Cheol)  
 2006년 3월~현재 : 한양대학교 교통시스템공학과 교수  
 1989년 3월~1993년 2월 : 한양대학교 교통공학과 공학사  
 1993년 3월~1997년 8월 : 한양대학교 대학원 교통공학과 석사  
 1999년 9월~2003년 12월 : University of California, Irvine, 토목환경공학과 공학박사 (교통시스템전공)  
 1998년 9월~1999년 8월 : 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원  
 2004년 1월~2004년 3월 : Post-Doctorate Researcher, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine, CA, USA  
 2004년 4월~2006년 2월 : 한국교통연구원 첨단교통기술연구실 책임연구원  
 e-mail : cheolo@hanyang.ac.kr