

# 교통소통과 안전 특성을 결합한 교통상황 모니터링 지표 개발

## Development of Traffic Situation Integrated Monitoring Indicators Combining Traffic and Safety Characteristics

주영빈\* · 채준병\*\* · 황재성\*\*\* · 이철기\*\*\*\* · 이상수\*\*\*\*\*

\* 주저자 : 한국토지주택공사 선교통계획처

\*\* 공저자 : 아주대학교 DNA플러스융합학과 학석사통합과정

\*\*\* 공저자 : 아주대학교 교통연구센터 연구원

\*\*\*\* 공저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

\*\*\*\*\* 교신저자 : 아주대학교 교통시스템공학과 교수

Young-Been Joo\* · Jun-Byeong Chae\*\* · Jae-Seong Hwang\*\*\* ·  
Choul-Ki Lee\*\*\*\* · Sang-Soo Lee\*\*\*\*\*

\* Dept. of Korea Land&Housing Corporation(LH), Prior Transport Planning Office

\*\* Dept. of Dept. of D.N.A.Plus Convergence., Univ. of Ajou

\*\*\* Dept. of Transportation Research Institute., Univ. of Ajou

\*\*\*\* Dept. of Transportation Systems Eng., Univ. of Ajou

\*\*\*\*\* Dept. of Transportation Systems Eng., Univ. of Ajou

† Corresponding author : Sang Soo Lee, sslee@ajou.ac.kr

Vol. 23 No.1(2024)  
February, 2024  
pp.13~25

pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.1.13>

Received 4 December 2023  
Revised 11 December 2023  
Accepted 20 December 2023

© 2024. The Korea Institute of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요약

교통관리에서 교통상황을 판단하는 판단지표의 중요성과 필요성은 계속해서 높아지고 있다. 기존 교통상황 판단지표들은 속도, 교통량, 밀도 기반으로 각각의 특성에 맞춰 개발되었지만, 속성별 가지는 문제점과 종합적인 상황을 보여줄 수 없어 모니터링 지표로는 적합하지 않았다. 이에 본 연구에서는 도로 소통상황과 안전도를 판단하는 지표들을 통합하여 모니터링에 적합한 통합지표 개발을 목표로 하였다. 교통상황의 변화를 판단할 수 있고 안전도를 판단할 수 있는 지표들을 검토하고 실시간 ITS 데이터를 적용할 수 있도록 지표를 재정립하였다. 요인분석을 통해 지표 간 관계성을 분석하여 가중치를 도출한 뒤 하나의 통합지표를 개발하였다. 통합지표는 교통상황의 변화와 안전도의 변화를 보여줄 수 있는 지표로 향후 교통정보센터에 적용하여 종합적인 교통상황을 모니터링할 수 있는 교통환경으로의 발전에 기여할 수 있을 것이다.

핵심어 : 교통상황, 교통안전, 모니터링 지표, 요인분석

### ABSTRACT

In traffic management, gaps in understanding traffic conditions continue to exist. While the self-belonging problem indicator develops relative to speed, belonging, and self-based relative inclination, it does not apply elimination criteria that may indicate situations that contrast with attribute-specific problems. In this study, we develop integrated indicators that specify communication situations and safety levels for modeling. We review indicators of changes in traffic conditions and raise safety issues, reviewing the indicators so that ITS data can be applied, analyzing the

relationships between indicators through factor analysis. We develop combined, integrated indicators that can show changes and stability in traffic situations and that can be applied in traffic information centers to contribute to the development of a traffic environment that can monitor related traffic conditions.

Key words : Traffic situation, Traffic Safety, Monitoring indicator, Factor Analysis

## I. 서 론

### 1. 연구 배경 및 목적

지자체 교통정보센터와 경찰청 UTIC(도시교통정보센터) 등 교통센터에서는 실시간으로 교통정보를 수집하고 분석하여 도로 이용자 또는 관리자에게 전달함으로써 이전보다는 빠르게 상황에 대처할 수 있는 환경을 구축하고 있다. ITS(Intelligent Transportation Systems)와 자율주행 시스템의 발전으로 교통의 관제 기능은 더욱 높은 수준을 요구하고 있다. 과거 ITS는 수집할 수 있는 정보가 속도와 일부 구간의 교통량에 한정되고 기관 간의 연계성이 낮아 속도정보만을 관제하고 있는 수준이었다면 현재는 교통정보 수집장치의 확산으로 여러 가지 교통정보를 수집하고 활용할 수 있는 수준이 지속적으로 발전하고 있다.

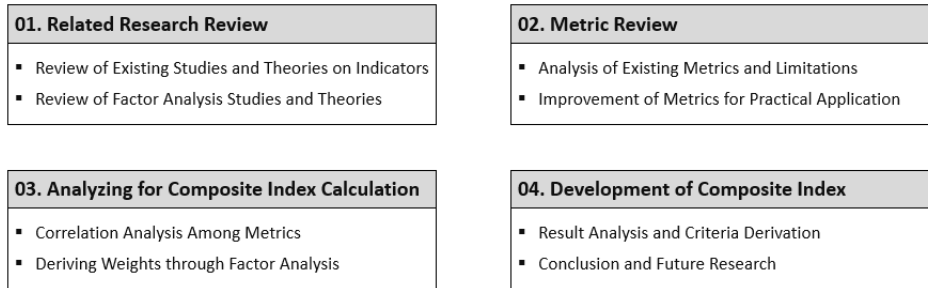
교통정보를 통해 교통상황을 정확하게 인식하기 위해서는 교통류의 변화를 판단하는 것이 중요하다(Kim et al., 2016). 이는 혼잡한 도로에서 평상시와 같은 수준의 혼잡한 상황에서의 혼잡 체감보다 일반적인 도로에서 혼잡이 증가한 상황이 도로 이용자들에게는 혼잡의 체감이 높게 느껴지기 때문이다. 기존 교통상황을 판단하는 지표들은 속도와 밀도 등을 활용하고 있으나, 속도의 경우 일정 수준의 임계점을 넘기기 전에는 일정 수준의 유사한 결과가 분석되며, 밀도의 경우 돌발 등에 따른 용량감소 상황을 판단할 수 없는 한계점을 가지고 있다(Cheon et al., 2001). 또한, 현재 교통상황에 대한 정보는 도로의 소통 정보에 국한되어 있어 도로의 안전 특성을 실시간으로 확인하는 것은 어렵고 도로 상황 위험도를 판단할 수 없다. 더불어 판단지표들이 개별적인 특성을 가지고 있어 한 화면에 표출할 수 없으며, 한 화면에 판단이 필요한 모니터링 상황에서 적합하지 않은 상황이다.

따라서 본 연구에서는 소통상황뿐만 아니라 안전에 영향을 미치는 지표를 포함하여 도로상에 속도와 밀도의 변화를 파악하고, 안전도를 동시에 판단할 수 있도록 소통지표와 안전지표를 통합한 통합지표를 개발하고자 한다. 지표 하나의 변동성을 통해 도로의 이상징후 및 돌발상황 여부를 파악하고자 하는 것이 본 연구에서 개발하는 통합지표의 목표이다.

### 2. 연구수행 절차

본 연구에서는 현재 교통정보센터에 즉시 적용할 수 있는 통합지표 개발을 목표로 하고 있다. 현재 개발된 소통, 혼잡도, 안전도 지표들의 현황 및 이론적 고찰을 통해 ITS에 적용할 수 있는 지표인지를 분석하고 도로의 소통상황의 변화를 판단할 수 있는 지표들을 선정하였다. 선정된 지표들을 수집되는 데이터들로 적용할 수 있도록 지표의 개선을 수행한 뒤 지표들을 통합하기 위해 동일한 크기로 정규화를 수행하였다. 개발되는 통합지표는 특정 종속변수가 없기 때문에 요인 간의 관계성을 통해 하나의 지표로 통합하는 요인분석을 진행하였다. 상관분석과 KMO 검정을 통해 요인분석의 적합성을 확인한 뒤 요인간 관계성 분석을 통해 가중치를 도출하여 통합지표를 개발하였다. 이후 해당 지표가 도로의 상황을 대변할 수 있는지를 확인하기

위해 적용성 검증을 거쳐 지표의 타당성을 확인하였다.



<Fig. 1> Research Procedure

## II. 선행연구 고찰

### 1. 국내외 교통 분야 지표 검토

#### 1) 교통소통 관련 지표 연구

Lee(1997)은 교통밀도 변수를 기초로 한 새로운 도로교통 혼잡지표인 OCI(Occupancy Congestion Index)를 개발하였다. 교통류의 밀도와 포화 교통밀도를 통해 혼잡상황을 정규화하였고, 이를 계량적으로 표현하여 혼잡크기를 시간적, 공간적 범위에 대해 표현할 수 있다. 또한 지표값 크기에 의한 혼잡 강도를 표현하여 각종 정책이나 계획분석시 이용이 용이하도록 개발하였다.

Lee et al.(2005)은 지방 5개 광역권의 차량속도조사 자료를 이용하여 지역별 통행시간지표 분석 및 지역간 교통혼잡 정도를 비교 분석하였다. 통행시간지표로 TTI(Travel Time Index)를 활용하였으며 TTI의 자유흐름 속도 지표로 도심부와 외곽부의 평균 제한속도를 사용하였다.

Bok et al.(2009)은 소통 상태를 모니터링할 수 있고 계량적으로 표현할 수 있는 지표인 종합소통지수(TCI)를 개발했다. 종합소통지수(TCI)는 고속도로의 교통소통 상태를 종합적으로 평가하고 대상구간의 소통상태를 객관적으로 표현할 수 있다. 이동성과 자유성을 고려하기 위해 속도와 밀도를 변수로 사용하였으며 TCI 값에 따라 소통상태를 3가지로 구분 지어 혼잡수준과 교통 서비스 질을 판단할 수 있다. 또한, TCI를 개발하기 위해 다양한 혼잡지표를 검토하였는데 통행시간 기반 지표로 TTI, TRI(Travel Rate Index)를 교통량 기반 지표로 RCI(Roadway Congestion Index), CSI(Congestion Severity Index), 밀도기반 지표로 OCI를 검토하였다.

Han and Kim(2017)은 DTG 빅데이터 기반의 링크 평균통행시간을 이용하여 통행시간지표를 생성하는 방법을 제안하였다. 통행시간지표로 TTI를 선정하여 혼잡패턴 분석, 교통운영방식 변화에 따른 사전/사후 비교 분석으로 실제 교통 현장에서 활용 가능한 사례를 분석하였다. 연구 결과를 통해 도심 네트워크를 거시적으로 모니터링 할 수 있는 가능성과 함께 활용할 수 있는 방안을 제시하였다.

Lee et al.(2020)은 개별차량 위치 좌표 데이터를 이용하여 구간속도 자료를 산출하고, 다양한 혼잡지표를 종합하여 혼잡수준 평가지수를 도출하였다. 1초 단위 개별차량 위치좌표 데이터로 맵매칭과 함께 링크통행 속도를 산정하였으며 교통와해가 발생하는 경계 지점에서의 속도를 링크별로 산출하였다. 이를 통해 혼잡수준 측정 지표로 혼잡강도(CI), 혼잡지속시간(CD), 혼잡대기행렬길이(CQ), 혼잡발생비율(CR), 병목구간비율

(BR)의 5가지 지표를 사용하였으며 AHP 설문조사 방법으로 가중치를 도출하여 혼잡수준 평가지수(IF) 식을 산출하였다.

Jung et al.(2023)은 교통혼잡 판단에 필요한 주요 교통 변수를 선정하기 위해 VDS에서 검지되는 데이터를 활용하여 교통상황을 분류하였다. 교통상황 판단 기준으로 TTI를 사용하였으며 이를 위해 요인분석 및 군집 분석을 수행하고, TTI를 기준으로 분산분석을 통해 교통상황 유형을 분류하였다. 최종적으로 최대대기행렬 길이와 점유율의 값에 따라 교통상황을 5개의 유형으로 분리하여 각 유형들이 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다.

## 2) 안전관련 지표

So et al.(2020)은 사고건수와 KSI(Killed Serious Injured)를 활용하여 유클리드 거리 개념을 적용한 ARI (Accident Risk Index) 지표를 도출하여 각 도로유형별 기준값을 산출하였다. 일원배치 분산분석과 군집분석을 활용하여 도로유형을 4가지로 분류하고, 도로 유형별 사고 잦은 곳에 ARI 지표를 적용하여 교통사고 심각도가 높아 무인교통단속장비의 설치가 필요한 지점을 도출하였다. 현재 ARI는 도로교통법 시행규칙에서 무인교통단속장비 설치 판단 지표로 활용되고 있다.

Kim(2022)은 도로안전 판단지표를 개발하여 단속장비의 설치기준을 제시하였다. 기존 단속장비 설치기준인 ARI 지표를 고도화하여 도로의 위험도를 판단하는 도로안전 판단지표(고도화 ARI)를 개발하였다. 기존 ARI는 단순 사고정보만을 사용하기 때문에 도로의 환경과 교통특성을 반영하지 못한다는 단점을 가지고 있어 상관분석을 통해 교통요인, 사고요인, 도로요인의 영향변수를 선정하였고 요인분석을 통해 가중치를 산정하여 도로 안전 판단지표 산정식을 도출하였다. 도출된 지표를 단속장비의 설치판단 기준점수를 도출하기 위하여 도로위험도점수의 군집분석을 수행하였다.

## 2. 요인분석

Cho et al.(2008)은 탐색적 요인분석을 이용하여 도로의 특성을 분류하였다. 도로 특성 분류를 위해 일한국도 상시시점 조사자료를 토대로 12개의 설명변수를 산출하였으며, 10개의 시나리오를 비교분석을 수행하였다. 그 결과, 12개의 설명변수를 모두 포함한 경우가 가장 우수한 것으로 분석되었으며, 요인분석을 진행하여 4개의 요인이 도로 특성 분류에 가장 적정한 것으로 나타났다.

Lee et al.(2010)은 가중치 산정방법을 이론적으로 비교 및 분석함으로써 최적의 세부지표 가중치 분석방법을 제시하였다. 요인분석 방법은 세부지표들 사이의 상관관계를 분석하여 공통차원을 추출하는 통계적인 기법으로 전체 세부지표를 소수의 요인들로 축약한다. 또한, 요인분석에 의해 추출된 요인에 미치는 영향의 크기, 즉 요인적재량에 따라 세부지표들의 가중치를 산정한다.

Choi and You(2017)은 탐색적 요인분석과 확인적 요인분석에 대한 특성과 그 차이점에 대하여 살펴보고, 동일한 데이터를 활용하여 분석과정 및 결과를 비교분석하였다. 탐색적 요인분석이란 변수들 간의 구조를 조사하고, 통계적 효율성을 높이기 위해 변수의 수를 줄이기 위한 방법으로 변수와 요인 간의 관계가 이론적으로 정립되지 않거나 논리적으로 체계화되지 않은 상태에서 활용된다고 하였다. 또한 변수들 간에 어느 정도의 상관관계가 있어야하며 KMO와 Bartlett의 구형성 검정을 통해 0.8 이면 바람직하고 최소한 0.5 이상이어야 한다고 하였다. 고유값을 기준으로 요인수를 결정하며 요인을 회전시켜 추출된 요인들과 변수들 간의 관계를 보다 명확하게 한다고 하였다.

### 3. 선행연구 시사점 및 차별성

현재 개발된 소통지표는 크게 통행시간 기반, 교통량 기반, 밀도 기반 지표로 구분할 수 있다. 통행시간 기반 지표는 도로의 통행성을 나타낼 수 있는 지표로 속도가 급감하는 임계점을 넘기 전까지 선호 속도로 주행하는 특성으로 큰 변화를 보이지 않는 특성을 가지며, 교통량의 경우 혼잡이 증가하면 교통량이 줄어들어 비혼잡과 혼잡의 상태를 정확하게 표현하지 못하는 단점이 있다. 밀도의 경우 통행 자유성을 나타낼 수 있는 지표로 활용된다.

교통량 기반 지표는 혼잡을 정확하게 판단할 수 없는 특성을 가지기 때문에 통행속도, 밀도 기반 지표를 활용하는 것이 적합하다 판단하였다. 연속류 특성을 분석하는 지표를 제외하고 실시간 ITS 데이터(속도, 교통량)를 변수로 사용하는 지표를 선정한 결과 TTI와 OCI는 기존 대비 현재 상황을 표현하는 지표로 기준이 되는 변수를 수정할 경우 충분히 활용 가능할 것으로 판단하여 TTI와 OCI를 소통판단 지표로 선정하였다.

안전도 지표의 경우 현재 도로교통법 시행규칙에서 사용하고 있는 ARI의 경우 사고정보 만을 가지고 있어 현재 도로상황에 대한 안전도를 판단할 수 없는 한계점을 가지기 때문에 사고정보를 포함하여 현재 교통정보에 대한 안전도를 분석한 고도화된 ARI를 선정하였다.

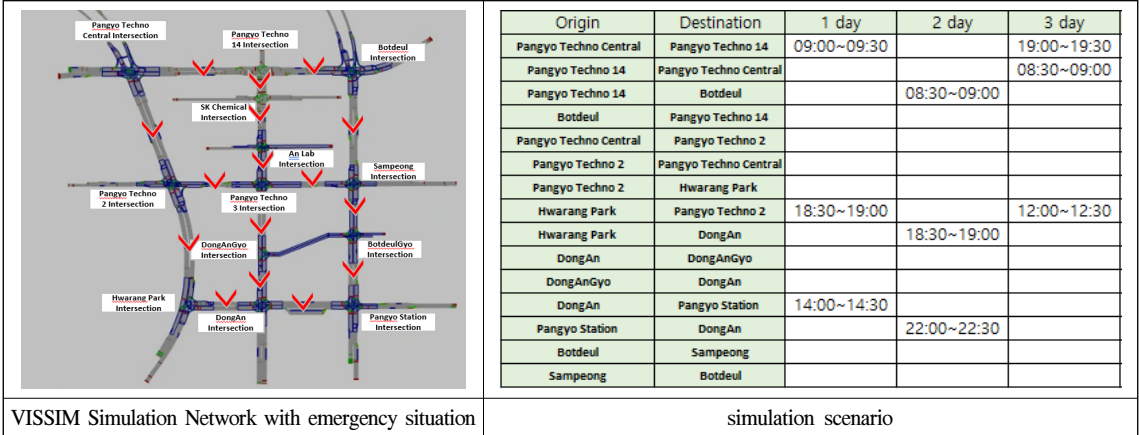
본 연구의 통합 교통상황 파악에 적용될 기존 각기 다른 목적으로 개별적으로 활용되고 있는 지표들을 속도와 밀도를 활용한 소통상태를 판단하고 현재 소통행태와 안전도 판단지표에 대한 관계성을 분석하였다. 또한, 실시간으로 교통상황의 변화를 식별할 수 있어 교통안전관리를 위한 도로 상황 판단 척도로써 적용이 가능하다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 도로의 소통정보와 안전 특성을 결합하여 요인분석을 통해 통합 교통상황 파악이 가능한 통합지표를 개발하고자 한다.

## Ⅲ. Data 수집 및 지표 재정립

### 1. 시뮬레이션 구축 및 데이터 수집

본 연구는 VISSIM 2021을 활용하여 시뮬레이션 모델을 구축하였으며 경기도 성남시 분당구 판교지역을 대상지로 선정하여 동일한 도로 조건을 가진 가상의 도로를 구축하였다. VISSIM 시뮬레이션은 시작 후 900초부터 분석을 진행하였으며, 분석 시간을 24시간으로 설정하고 주행 데이터를 1분 단위로 추출하였다. VISSIM을 통해 ITS에서 수집이 가능한 교통량과 속도를 차로별로 추출하고 python을 이용하여 링크별로 데이터를 전처리하였다. 시뮬레이션은 판교 대상지역에 대하여 10회 수행하였으며, 하루씩 총 10일간의 VISSIM 시뮬레이션 데이터를 수집하였다. 실 데이터를 사용하고자 하였으나 돌발정보와 ITS 데이터 관리기관이 서로 상이하여 직접 매칭시 매칭결과가 부정확하고, 교통류 변화에 영향을 미치는 돌발상황이 드물어 분석에 적합하지 않다고 판단하여 시뮬레이션 데이터를 사용하였다.

해당 방향 한 차로를 30분간 통제하는 가상의 돌발상황을 설정하여 하루에 3곳의 지점에 돌발상황을 발생시키는 총 10개의 시나리오를 작성하였다. 시간대는 오전 첨두시간, 오후 첨두시간, 비 첨두시간으로 나눠 돌발상황을 생성하였다. 돌발상황 발생 링크는 15개 시종점 구간으로 선정하였으며 돌발상황의 발생지점의 평상시 상황과 돌발이 일어난 상황을 비교하였다.



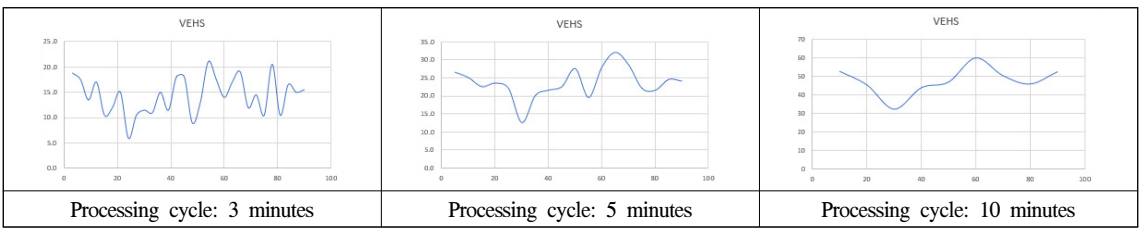
<Fig. 2> Simulation networks and scenarios

## 2. 기초 분석

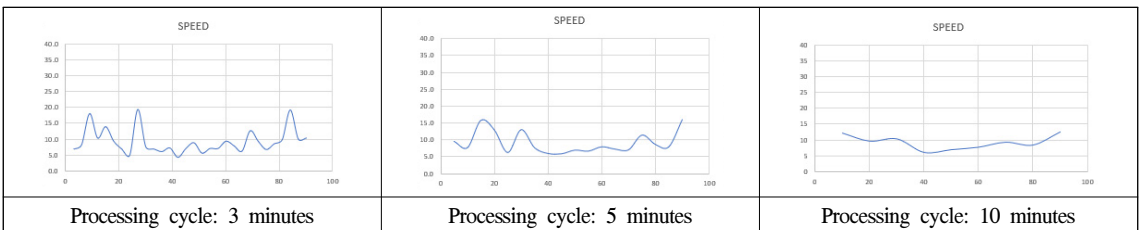
### 1) 가공주기 결정

ITS에서는 소통정보를 명확하게 판단하기 위해 가공주기 결정이 중요하다. 본 연구에서도 소통과 안전도 판단 명확하게 하기 위해 가공주기를 선행적으로 검토하였다. 가공주기가 짧을 경우 단속류의 특성인 신호에 따른 교통량과 속도의 변화가 급격하게 일어나며, 너무 길 경우 변화에 둔감하기 때문에 적절한 가공주기 설정이 중요하다. 일반적으로 지자체에서 가장 많이 사용하고 있는 3분, 5분으로 가공주기를 설정하였으나 변동이 급격하게 발생하여 10분을 추가 검토하여 가공주기를 10분으로 결정하였다.

<Fig. 3>은 가공주기에 따른 교통량의 변동성, <Fig. 4>은 가공주기에 따른 통행속도의 변동성을 확인한 그래프이다. 3분, 5분은 변화에 민감하게 반응하는 특성을 보이기 때문에 3분, 5분에 비해 안정적이며 변동이 안정적인 10분을 가공주기로 설정하였다.



<Fig. 3> Traffic Volume changes by Processing cycle



<Fig. 4> Travel Speed changes by Processing cycle

2) TTI, OCI, ARI 재정립

TTI와 OCI는 기준값 대비 현재 교통상황의 혼잡도를 나타내는 지표로 기준이 되는 값이 자유통행속도(자유통행시간), 포화통행밀도 등을 사용하여 설계 도면을 확인하지 않고서는 기준값을 설정할 수 없는 한계점을 가진다. Lee et al.(2005)은 이러한 한계점을 개선하기 위해 자유통행속도 대신 제한속도를 사용하는 방법으로 한계점을 해결하였다. 본 연구에서도 이와 같은 방법으로 현장에 적용할 수 있는 방법들을 검토하여 통합지표 개발에 적용한다.

TTI는 자유 통행시간 대비 실제 통행시간의 비로 TTI의 기존 식은 아래 식(1)과 같다.

$$TTI = \frac{T_{Actual\ Flow\ Time}}{T_{Free\ Flow\ Time}} = \frac{V_{Free\ Flow\ Speed}}{V_{Actual\ Flow\ Speed}} \dots\dots\dots (1)$$

TTI의 자유 통행시간 산출 시 제한속도와, 설계속도, 비침두시 85퍼센타일 속도를 사용한다. 따라서 통합 지표로 활용할 TTI지표를 선정하기 위해 자유통행속도로 제한속도, 링크 구간의 85퍼센타일 속도, 링크 구간의 최빈값 속도로 총 세가지 후보를 선정하였다. 후보로 선정한 세 가지의 변수들을 이후 OCI, ARI 지표와 요인분석의 KMO 검정과 주성분분석을 통해 가장 설명력이 높은 변수를 자유통행속도 지표로 선택할 수 있다. TTI의 후보로 선정한 세 가지 식은 아래 식(2)과 같다.

$$TTI = \frac{TT_{제한속도}}{TT_{현재속도}} = \frac{TT_{85퍼센타일속도}}{TT_{현재속도}} = \frac{TT_{최빈값속도}}{TT_{현재속도}} \dots\dots\dots (2)$$

OCI는 통행밀도 기반의 혼잡지표로 도로구간의 연장 길이, 시간 간격, 포화통행밀도, 통행밀도 변수를 활용하며 기존 식은 아래 식 (3)와 같다.

$$OCI = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \text{시간간격}_j \times \text{도로구간연장}_i \times \text{도로구간}_i \text{의 } j\text{시간대 혼잡강도}_{ij}}{\text{총 시간간격} \times \text{총 도로연장}} \dots\dots\dots (3)$$

기존 식은 도로 구간별 혼잡 밀도를 산출하는 방식으로 서로 다른 구간 간의 상대적 혼잡을 비교할 수 있지만, ITS는 표준노드링크 단위로 링크 또는 구간 단위로 교통정보를 수집·가공하기 때문에 구간연장을 변수에서 제외하였다. 또한, 분석단위가 링크로 고정되고 가공주기별로 분석하기 때문에 도로 전체의 혼잡이 아닌 각 링크의 혼잡을 산출하고 시간간격이 고정되기 때문에 연장길이와 시간간격을 변수에서 제외하였다.

기존 식은 포화밀도를 사용하지만 포화밀도는 산출할 수 없는 값이기 때문에 포화밀도를 대체할 수 있는 이전 1개월의 85퍼센타일 속도와 교통량을 적용하여 OCI 산출식을 재정립하였다. 본 연구에서 재정립한 OCI 식은 아래 식 (4)과 같다.

$$OCI = \frac{\text{통행밀도(현재교통량/현재속도)}}{\text{포화통행밀도(포화교통량/포화속도)}} = \frac{\text{현재교통량} * 85\text{퍼센타일속도}}{\text{현재속도} * 85\text{퍼센타일교통량}} \dots\dots\dots (4)$$

ARI는 KSI(사망자수+중상자수)와 사고건수를 활용한 사고심각도 지표로 교통의 안전도를 설명할 수 있지만, 교통영향변수가 없어 해당 도로의 여건이 반영되지 않아 Kim(2022)이 개발한 고도화 ARI를 활용한 도로

안전 판단지표는 ARI, 일 교통량, 제한속도, 통행속도, 교차로면적, 교차로 이격거리를 사용하였으며 기존 식은 아래 식 (5)과 같다.

$$\text{고도화 ARI(교차로)} = 0.384 * \text{ARI} + 0.0000299 * \text{일 교통량} + 0.0263 * | \text{제한속도} - \text{통행속도} | \quad (5) \\ + 0.000296 * \text{교차로 면적} + 0.00256 * \text{교차로 이격거리}$$

고도화 ARI에는 교통량의 단위를 일 교통량을 사용하고 있다. 일 교통량을 사용한 이유로는 개발목적이 무인교통단속장비 등 교통안전시설물의 설치를 위한 목적으로 교통량을 실시간으로 분석할 필요가 없지만, 본 연구는 실시간 모니터링을 목적으로 하기 때문에 교통량의 단위를 재정립할 필요가 있다. 또한, TTI, OCI의 변화지표와 통합하여 지표의 변동성을 확인할 목적이기 때문에 구간별로 값이 일정한 변수인 ARI, 교차로 면적, 교차로 이격거리를 변수에서 제외하였다. 이 값들은 동일구간에서 시간이 달라져도 고정되는 변수들이기 때문에 지표상에 점수만 증가시켜, 변동성을 확인하는데 변동성을 낮추는 요인들이다. 따라서, 1일 교통량을 [10분 교통량 × 144]로 수정하고, 값이 일정한 변수들을 제외하여 아래 식 (6)와 같이 재정립하였다.

$$\text{고도화 ARI} = 0.0000299 \times 144 \times 10\text{분간 교통량} + 0.0263 | \text{제한속도} - \text{통행속도} | \dots\dots\dots (6)$$

## IV. 통합 모니터링 지표 개발

### 1. 교통상황 통합지표 영향변수 지표 결정

교통상황 통합지표에 적용할 TTI 지표를 최종결정하기 위해 KMO 검정을 수행하였다. KMO 검정을 통해 재정립된 OCI와 고도화 ARI와의 요인분석 적합성이 가장 높은 산정식을 결정하였다. 후에 선정된 지표 간 상관분석을 수행하여 요인분석에 적합한 상관성을 가진 지표들인지 확인하였다.

#### 1) KMO 검정을 통한 지표 결정

앞서 TTI, OCI, ARI 지표를 재정립하여 통합지표로 사용할 지표들을 검토해보았다. 검토 결과, TTI의 경우 자유통행속도를 각 링크 구간의 제한속도, 85퍼센타일 속도, 최빈값 속도로 총 세 가지의 후보를 설정하였으며, 이 세 가지 변수를 OCI, ARI 지표와 요인분석의 KMO 검정과 주성분분석을 통해 어떤 변수를 선택할지 고려하였다. KMO 검정과 주성분 분석을 통해 도출한 결과는 아래 <Table 1>과 같다.

<Table 1> TTI KMO Test and Principal Component Analysis Result

TTI Option	KMO Test Result	Explained Variance
TTI (Speed Limit)	0.658	59.2%
TTI (85Percentile Speed)	0.616	57.6%
TTI (Mode Speed)	0.614	55.0%

<Table 1>을 통해 TTI의 후보로 선정한 세 가지 산식 모두 KMO 검정 결과가 0.6 이상으로 요인분석에 적합하였고 제한속도를 사용한 산식의 KMO 검정결과가 0.658로 가장 높게 분석되었다. 주성분 분석을 통한



전체 분산의 설명력은 제한속도가 59.2%로 가장 높았으며 85퍼센타일 속도, 최빈값 속도 순으로 나타났다. KMO 검정과 요인분석을 통해 가장 적합한 TTI의 지표에서 자유통행속도를 대체할 변수로 제한속도로 나타났다. 또한 제한속도의 경우 도로구간에서 쉽게 얻을 수 있어 통합지표로 활용하기에 가장 용이하므로 자유통행속도 지표로 가장 적합하다고 판단하였다. TTI의 변경된 수식은 아래 식(7)과 같다.

$$TTI = \frac{TT_{Free\ Flow\ Speed}}{TT_{Actual\ Flow\ Speed}} = \frac{TT_{제한속도}}{TT_{현재속도}} \dots\dots\dots (7)$$

2) 선정지표 간 상관분석

본 연구에서는 3가지 지표(TTI, OCI, 고도화된 ARI)를 선정하여 통합지표를 개발하였으며, 요인분석에 앞서 교통상황 통합지표로 사용할 세 가지 변수에 대하여 상관분석을 수행하였다. 데이터의 표본 개수가 충분히 커 모수적 방법인 피어슨(pearson) 상관분석을 활용하였다. 상관관계가 ±0.3 이상인 경우에 요인분석에 적합하며, TTI, OCI, 고도화된 ARI 간의 상관관계는 모두 0.3 이상으로 요인분석에 적합하다고 할 수 있다.

<Table 2> Pearson' correlation analysis results

	TTI	OCI	Advancement ARI
TTI	1.00	0.40	0.37
OCI	0.40	1.00	0.39
Advancement ARI	0.37	0.39	1.00

2. 요인분석을 통한 가중치 산정

1) 요인분석 가능성 평가

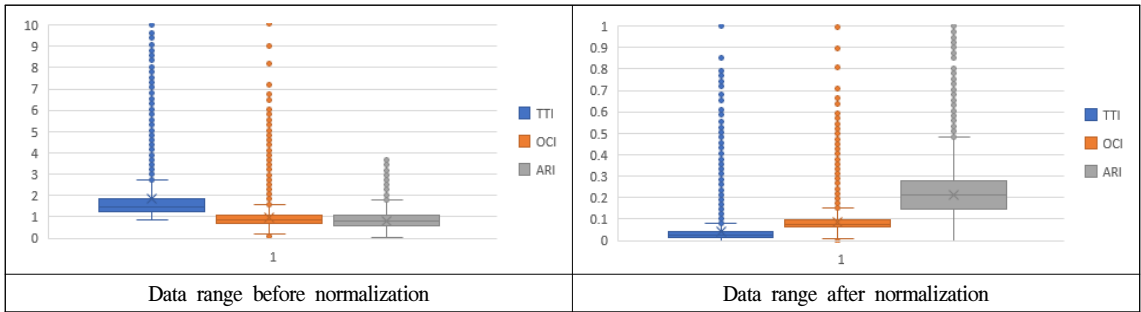
요인분석을 수행하기 전, 3가지 지표(TTI, OCI, 고도화된 ARI)에 대하여 요인분석 모형의 적합성 여부를 판단해야 한다. 즉, 데이터 셋에서 요인을 찾을 수 있는가를 의미하며, 이를 위해 Bartlett의 구형성 검정과 KMO 검정을 실시하여 요인 분석에 적합한지 판단한다. Python의 “factor-anlyzer” 패키지를 활용하여 실시한 결과, 바틀렛의 구형성 검정은, p-value가 0.05보다 작게 도출되어 요인분석에 적합한 셋으로 판별되었다. 또한 KMO 검정 결과, KMO 값이 약 0.66으로 도출되었다. 일반적으로 KMO 값이 0.6 이상인 경우, 요인분석에 적합한 셋을 의미하므로 해당 데이터 셋은 요인분석에 적합한 것으로 판별되었다.

2) 데이터 정규화 처리

정규화는 각 데이터의 상대적인 크기 차이를 제거하는 과정으로 데이터의 크기로 인한 변인을 제거하기 위해 수행한다. <Fig. 5>의 정규화 수행 전 데이터의 그래프와 같이 TTI와 OCI, 고도화 ARI는 값의 범위가 서로 상이하다. 속성마다 데이터 값의 범위가 다르므로 이를 요인분석 전에 정규화를 수행해야 각 속성의 영향도를 같은 선상에서 비교할 수 있다. 정규화는 데이터의 상대적 크기에 대해 영향을 일반화시켜놓은 것으로 값의 범위를 0~1로 변환한다(Blog ‘Beyond the Horizon’, 2023). 정규화는 최대-최소 정규화 방법을 적용하였으며 이는 특징 벡터의 최대값과 최소값을 지정하여 선형으로 사상하는 방법으로, 원본 데이터 선형변환을 수행하여 모든 데이터의 값을 0~1의 범위로 조정한다. 최대-최소 정규화는 특징값이 균일한 분포를 가진다는 가정하에 간단하면서도 효과적으로 많이 사용된다.

TTI와 OCI, 고도화된 ARI 3가지 지표를 최대-최소 정규화를 통해 지표 간 크기를 균등화하였으며, 측정

단위가 상이한 데이터를 <Fig. 5>와 같이 정규화 값으로 변환하였다.



<Fig. 5> Comparison before and after data normalization

### 3) 주성분 개수 선정

추출한 주성분의 개수를 선정하기 위해 초기 고유값(eigenvalue) 및 설명된 분산 비율(explained variance ratio)을 산출하였다. 고유값은 각 성분이 설명하는 분산의 정도를 의미하며, 고유값이 1인 경우 해당 주성분이 한 변수의 분산을 설명하고 있음을 의미한다. 일반적으로 최소한 하나 이상의 변수의 분산을 설명할 수 있는 성분을 주성분으로 선정하므로, 고유값이 1 이상인 주성분을 주요 주성분으로 선택한다.

고유값 및 설명된 분산 비율의 산출 결과는 아래 <Table 3>과 같으며, 고유값이 1 이상인 성분이 한 개이므로 주성분의 개수는 한 개로 선정하였다. 이 때, 주성분이 전체 분산의 60.2%를 설명하는 것으로 나타났으며, 하나의 성분만을 추출하였기 때문에 요인 회전을 진행하지 않았다.

<Table 3> Eigenvalue and explained variance

component index	eigenvalue	explained variance ratio	cumulative explained variance ratio
1	1.776	0.59	0.60
2	0.628	0.21	0.80
3	0.596	0.20	1

### 4) 요인분석을 통한 가중치 산정 및 산정식 도출

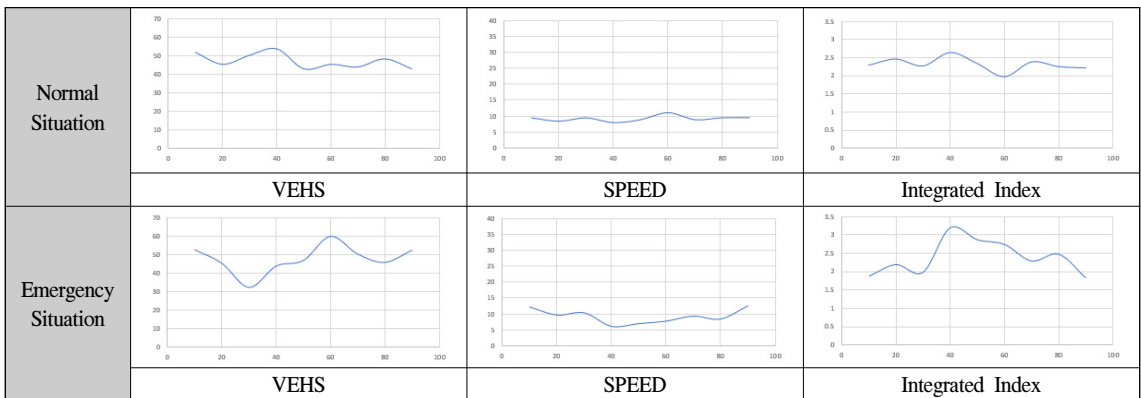
변수 중 전체 분산에 대한 기여도에 따라 변수에 가중치를 부여하는 방식으로 전체 데이터 셋의 전체 분산에 대한 기여도에 따라 가중치를 적용하였다. 모든 요인은 전체 분산에 다르게 기여하며, 개별적으로 각 매개변수는 개별 요인 분산에 대해 다르게 기여한다. 변수들 간의 상대적인 중요성을 고려하기 위해 전체 분산에 대해 기여도를 다르게 하여 해당변수가 통합지표에서 차지하는 영향력을 정량화할 수 있다. Python의 “FactorAnalysis” 패키지를 활용하여 객체를 생성하고 “components”를 활용하여 요인분석에서 도출된 요인의 적재값을 구한다. 요인의 적재값은 각 변수와 각 요인 간의 관계를 설명하며, 각 변수가 해당 요인에 대해 얼마나 영향을 주는지 알 수 있다. 적재값은 가중치로 사용하여 상대적인 영향력을 계산하고, 선택한 변수들에 대해 상대적인 가중치는 아래 식(8)와 같다.

$$\text{통합지표 산정식} = 0.256 * TTI + 0.229 * OCI + 0.515 * ARI \dots\dots\dots (8)$$

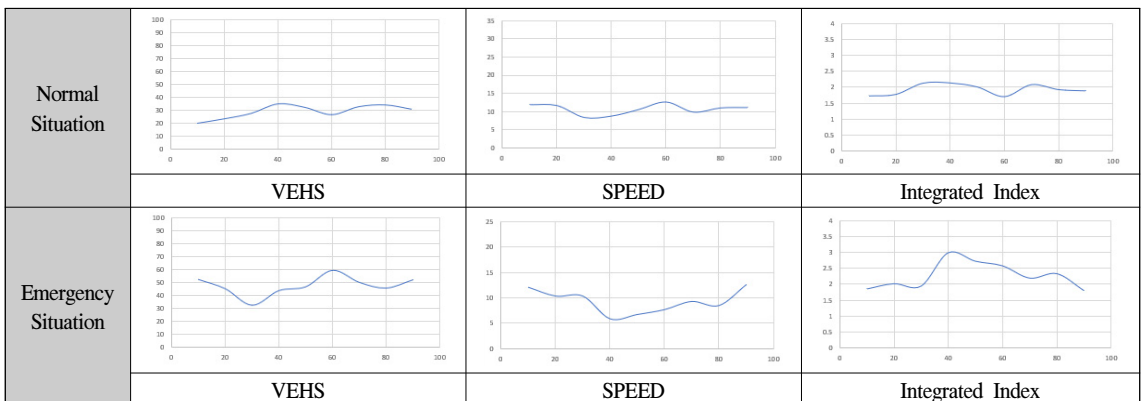
### 3. 지표 적용을 통한 적용성 검토

요인분석을 통한 가중치를 산정하여 통합지표 산정식을 도출하였으며, 이를 링크별로 지표를 적용하였다. 분석 시간은 총 90분으로 설정하여 0~30분은 돌발상황이 발생하지 않은 상황, 30~60분은 돌발상황이 발생한 상황, 60~90분은 돌발상황 종료 이후 상황으로 나눠 분석을 진행하였다. 분석 링크 구간은 판교테크노14 사거리에서 SK케미컬 사거리로의 남쪽 방향 및 판교테크노3 사거리에서 동안교 사거리로의 남쪽방향으로 선정하였다. 각각의 구간은 <Fig. 6>과 <Fig. 7>로 아래와 같다.

돌발상황이 발생한 지점에서 통합지표 변화구간이 발견되어 도로 상황 판단의 척도로써 활용이 가능하다. 또한, 해당구간의 개별지표(TTI, OCI, 고도화된 ARI)를 확인하여 지표상의 변화를 살펴보고 그에 따라 맞춤 대응이 가능하다. 도로 시설의 이상 징후나 돌발상황 발생 시 통합지표 활용으로 실시간 교통상황을 종합 판단하여 즉각적인 안전관리를 할 수 있다. 동일 구간의 평소 상황 역시도 지표상에서 큰 변동 없이 안정적으로 지표가 표출되어 일반 상황에 사용이 적합하다. 따라서 교통 운영 및 교통 안전관리를 위한 실시간 도로 상황 판단 척도로써 활용이 가능하며 도로의 이상 징후나 돌발상황의 발생 여부를 한눈에 파악할 수 있어 교통상황 모니터링에 적합하다고 판단된다.



<Fig. 6> From Pangyo Techno 14 Intersection to SK Chemical Intersection in the south direction



<Fig. 7> From Pangyo Techno 3 Intersection to DongAnGyo Intersection in the south direction

## V. 결론 및 향후연구

본 연구는 도로상의 교통혼잡과 안전도를 동시에 판단할 수 있는 통합지표를 개발하였다. 통합지표의 목표에 부합하고 도로 상의 소통상황과 안전도를 판단할 수 있는 지표 선정에 위해 기존 개발된 지표들을 검토하였고, 실시간 ITS 데이터를 사용할 수 있는 지표들을 선정하였다. 선정된 지표들을 실시간 산출이 가능하고 시스템에 적용이 가능하도록 재정립을 수행하였고, 요인분석을 통해 지표 간 관계성을 분석하고 가중치를 도출하여 지표들을 통합하여 하나의 통합지표를 개발하였다.

연구 결과를 통해 도로의 소통정보와 안전 특성을 통합하여 실시간으로 도로 상황의 위험도를 판단할 수 있을 것이라 예측한다. 더불어 도로시설의 돌발상황과 이상징후 발생 시 통합지표 활용으로 즉각적인 안전관리를 할 수 있을 것이라 기대한다. 향후 교통정보센터에서 한 화면에 본 지표를 모니터링하여 교통상황과 안전도의 변화를 동시에 모니터링 할 수 있는 체계로 발전할 수 있을 것이라 기대한다.

본 연구에는 실 데이터 적용에 한계가 있어 시뮬레이션 데이터를 활용해 연구를 진행하였다. 더욱더 명확한 판단을 위해서는 다양한 상황과 교통 데이터의 변화에 따라 통합지표의 등급을 구분하는 판단기준이 필요하지만 시뮬레이션 데이터와 실 데이터 간의 차이가 있고, 시뮬레이션으로 구현한 몇몇 시나리오로 판단 기준을 수립하는 것이 부적절하다고 판단되어 판단 기준 설정은 수행하지 않았다. 향후 더욱 방대한 데이터를 기반으로 다양한 돌발상황에 대한 Labeling이 정리된 데이터를 사용하여 판단기준 수립 연구가 필요하다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2023년도 정부(경찰청)의 재원으로 과학치안진흥센터의 지원을 받아 수행하였습니다. (No.09 2021C28S01000, 자율주행 혼재 시 도로교통 통합관제시스템 및 운영기술 개발)

## REFERENCES

- Blog ‘Beyond the Horizon’(2022.5.25), [Big Data Analysis Certification] Principal Component Analysis, <https://it-utopia.tistory.com/entry/%EB%B9%85%EB%8D%B0%EC%9D%B4%ED%84%B0%EB%B6%84%EC%84%9D%EA%B8%B0%EC%82%AC-%EC%A3%BC%EC%84%B1%EB%B6%84%EB%B6%84%EC%84%9DPrincipal-Component-Analysis>, 2023.11.10.
- Bok, G. C., Lee, S. J., Choe, Y. H., Gang, J. G. and Lee, S. H.(2009), “Development of a traffic condition index (TCI) on expressways”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 27, no. 5, pp.85-95.
- Cheon, H. Y. and Lee, E. E.(2001), “A Study on Lateral Characteristics of Traffic Flow on Rural Freeway and Calibration of Lane Number Adjustment Factor”, *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, vol. 21, no. 6, pp.775-783.
- Cho, J. H., Kim, S. H. and Rho, J. H.(2008), “A study on road characteristic classification using exploratory factor analysis”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 26, no. 3, pp.53-66.
- Choi, C. H. and You, Y. Y.(2017), “The study on the comparative analysis of EFA and CFA”, *Journal*

- of *Digital Convergence*, vol. 15, no. 10, pp.103-111.
- Han, Y. and Kim, Y.(2017), “A study of measuring traffic congestion for urban network using average link travel time based on DTG big data”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 16, no. 5, pp.72-84.
- Jung, S. H., Han, K. H., So, J. H. and Lee, C. K.(2023), “A Study of Classification Analysis about Traffic Conditions Using Factor Analysis and Cluster Analysis”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 22, no. 1, pp.65-80.
- Kim, D. K.(2022), *Study on the Development of road safety indicators for the installation of automated traffic enforcement devices*, Master’s Thesis, Ajou University.
- Kim, H., Jang, K. and Kwon, O. H.(2016), “Methodology for Real-time Detection of Changes in Dynamic Traffic Flow Using Turning Point Analysis”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 34, no. 3, pp.278-290.
- Lee, H. S. and Im, J. H.(2017), *SPSS 24 Manual*, Seoul: Jyphyunjae.
- Lee, J. H., Ryu, C. H. and Chung, T. Y.(2010), “Calculating the weights of indicators for science and technology innovation capability index”, *Kyungsung University Industrial Development Institute*, vol. 26, no. 3, pp.1-34.
- Lee, S. B., Kim, J. M. and Cheon, S. H.(2020), “Recurring Congestion Priority Analysis Methodology Based On Mobility Big-Data”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 39, no. 2, pp.164-176.
- Lee, S. G.(1997), *A Study on the Development of Road Congestion Index*, The Korea Research Institute of Human Settlements(KRIHS), pp.33-57.
- Lee, S. M., Shin, H. C. and Park, J. H.(2005), “Analysis of Travel Time Index of 5 Metropolitan Cities”, *Korean Society for Civil Engineers Conference*, pp.4235-4238.
- So, H. J., Kim, Y. M., Kim, N. S., Hwang, J. S. and Lee, C. K.(2020), “Study on Estimation of Unmanned Enforcement Equipment Installation Criteria and Proper Installation Number”, *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 19, no. 6, pp.49-60.