

강우시 단속류 포화교통류율 변화 분석

김봉석¹ · 노창균^{2*} · 손봉수³

¹ 한국원자력연구원 원자력방재팀, ² 한국건설기술연구원 도로연구소, ³ 연세대학교 도시공학과

Analysis of Saturation Flow Rate on Interrupted Flow During Rainfall

KIM, Bongseok¹ · ROH, Chang-Gyun^{2*} · SON, Bongsoo³

¹ Nuclear Emergency Preparedness Team, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 989-111, Korea

² Highway and Transportation Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi 411-712, Korea

³ Department of Urban Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Abstract

The climate of Korea has clear rainy and dry season due to seasonal wind. In general, The rainy season in Korea is from early summer through to early fall. And precipitation accounted for more than half of the total annual rainfall in this period. This study is aiming to analysis of variation in saturation flow rate at signalized intersection during rainfall. The range of spatial is urban signalized intersections in Seoul and temporal is rainfall or ideal condition in daylight. Traffic data are collected through CCTV of Seoul Metropolitan Police Agency, and on-site video recordings directly. Weather condition data are collected from the Korea Meteorological Administration. In addition, the value of saturation headway and saturation flow rate, in rainfall condition, are derived through video frame analysis. As a results of analysis, decrease of saturation flow rate and increase of saturation headway during rainfall were confirmed by comparison with non-rainfall. The higher rainfall rate is, the more decreased saturation flow rate at the intersections. Rainfall rate is divided three area by the results of statistical test, and saturation flow rate decrease 7%, 17%, 21%, respectively.

우리나라는 지리적으로 중위도 온대성 기후대에 해당하며, 초여름부터 초가을까지 집중호우가 발생한다. 집중호우는 도로의 용량 및 서비스 수준에 직접적인 영향을 미치며, 이에 대한 분석의 필요성이 대두되었다. 본 연구는 신호교차로에서의 강우에 따른 포화교통류율 변화를 측정하여 강우가 도로용량에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 영상자료를 구축하였고, 영상의 프레임분석을 시행하여 차두간격을 조사하였으며, 조사된 결과를 바탕으로 포화교통류율을 산정하였다. 분석결과에 따르면 일반적인 기상상황에 비해 강우상황에는 포화차두시간이 증가하는 것을 확인하였으며 시간당 강우량이 증가함에 따라 포화교통류율이 점차 감소하는 것을 통계적으로 검정하였다. 통계적 검정 결과 일정 시간당 강우량 범위 내에서는 포화교통류율의 변화가 크지 않으므로 각 시간당 강우량의 범위에 따라 세 영역으로 분류하였으며 각 영역에 따라 포화교통류율은 약 7%, 17%, 21% 감소하는 것으로 나타났다.

Keywords

rainfall, rainfall effect adjustment factor, saturation flow rate, saturation headway, urban signalized intersection
강우, 강우보정계수, 포화교통류율, 포화차두시간, 도시부 신호교차로

* : Corresponding Author

rohcg@kict.re.kr, Phone: +82-31-910-0335, Fax: +82-31-910-0339

Received 1 September 2014, Accepted 23 November 2014

서론

1. 연구의 배경 및 목적

우리나라는 지리적으로 중위도 온대성 기후대에 위치하여 봄, 여름, 가을, 겨울의 사계절이 뚜렷하게 나타난다. 겨울에는 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조하고, 여름에는 고온 다습한 북태평양 고기압의 영향으로 무더운 날씨를 보이며, 봄과 가을에는 이동성 고기압의 영향으로 맑고 건조한 날이 많다. (Korea Meteorological Administration Website) 강우측면에서 볼 때, 우리나라의 평균 강수량은 1,277mm로 세계 평균 807mm의 1.6배에 해당한다(MLTM, 2011). 그러나 대부분의 강우는 초여름부터 초가을에 해당하는 6월에서 9월 사이에 집중되며, 이는 북태평양고기압을 따라 강한 남서풍을 타고 들어온 고온다습한 공기가 북측에서 남하하여 대기 중하층에 위치한 건조한 공기와 충돌하면서 대기가 불안정해짐으로 발생한다. 또한 연간 강우량 및 강우일수가 Figure 1과 같이 지속적으로 증가추세에 있다. 서울시의 강수량 정보를 검토한 결과, 최근 5개년(2009-2013년) 평균 강우일 수가 119일이며 이는 1년의 33%에 해당한다. 평균 강수량은 동일 기간 1,739.4mm로 이전 5개년인 2004년부터 2008년까지의 평균 강수량 1,421.6mm보다 317.8mm가 증가하였으며, 최근 국립재난안전연구원의 연구를 인용한 뉴스에 따르면 60년 뒤 한반도는 연강수량은 지금보다 200밀리미터 이상 증가될 것으로 전망되고 있다. 이러한 강우상황은 교통류에 많은 영향을 미치며, 특히 차량 Headway 변화를 유발시켜 도로의 용량에 직접적인 영향을 미치고 있다. 기존의 KHCM(2005)에는 강우시 교통측면의 변화를 고려한 서비스수준 산정 및 분석방법론이 제시되어 있지 않았다. USHCM(2010)에는 연속류 도로를 중심으로 기후의 영향을 고려할 수 있는 보정

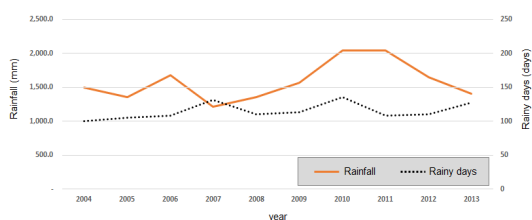


Figure 1. Variation of rainfall and rainy days in 10 years at Seoul

계수를 도입하였으며, 우리나라의 지속적인 강우량 및 강우일수의 증가와 같은 기상학적 변화에 따라 강우에 대한 영향을 도로용량산정에 반영하는 방법의 필요성이 대두되었다. 이러한 배경에 의해 본 연구가 시작되었으며, 본 연구의 결과를 바탕으로 개정된 KHCM(2013)에는 도로용량산정방안이 수록되었다. 본 논문은 KHCM(2013)의 강우시 단속류 신호교차로의 강우시 용량산정방안 및 강우보정계수의 도출방법론을 중심으로 작성되었다.

2. 연구의 방법 및 범위

문헌 및 선행 연구고찰에서 USHCM(2010)과 KHCM(2005)와의 비교를 통해 단속류 신호교차로 용량 산정방안을 검토하였으며 포화교통류에 관한 이론적 고찰 및 기존의 기상조건 변화에 따른 국내의 연구사례를 검토하였다. 이를 통하여 포화교통류율을 실측하기위한 포화차두시간의 개념 정의 및 산정방법, 기상조건에 따른 강우보정 계수(f_{re})의 도출방법 등을 제시하였다. 자료수집에서는 검토된 선행연구과정에서 제시된 방법들을 이용하여 단속류 신호교차로의 포화교통류율을 산정하기 위한 자료수집과정을 제시하였으며 분석결과에서는 자료 분석결과를 살펴보고 통계적 유의성 검정을 수행하였으며, 이를 통해 분석에 알맞은 모델을 제시하였다. 본 연구의 시간적·공간적 범위는 2011년 4-8월과 2012년 3-8월이며, 서울시 도시부 십자(十)형 신호교차로인 월드컵경기장사거리, 종로가사거리 및 안국역사거리 등 세 지점의 직진 차로의 데이터를 이용하여 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기상조건에 범위를 일반적인 강우로 한정하였으며 태풍, 폭우 등으로 인한 통행제한, 도로침수 등과 같은 피해가 발생하는 기상재해에 해당하는 강우에 대해서는 방재측면에서 고려해야 할 사항으로 판단하여 본 연구에서는 제외하였으며, 강우 및 일반적인 단속류 신호교차로 교통류 특성과 직접적인 관계가 없는 요소는 배제하고 분석을 시행하였다.

문헌 및 선행연구 고찰

1. 단속류 신호교차로의 포화교통류율 관련 연구

1) USHCM(2010)

USHCM(2010)에서는 신호교차의 용량 산정 및 서

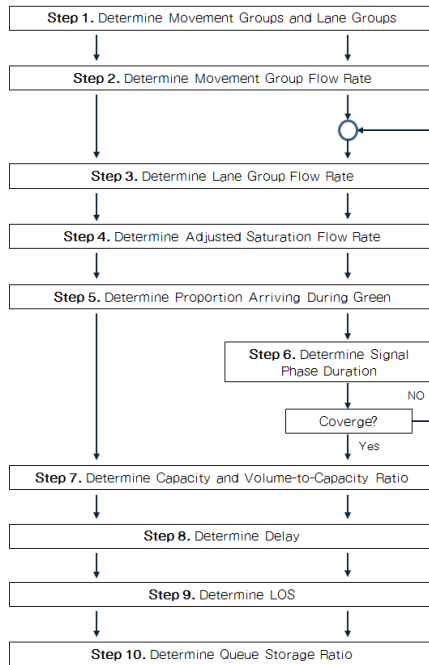


Figure 2. Analysis methodology of capacity at signalized intersection(USHCM(2010))

서비스수준 평가를 위한 방법으로 제어지체 및 v/c값을 이용하며, 이때 기준은 Table 1과 같다. 신호교차로 용량 분석을 위한 방법론은 고정식 및 감응식 신호기에 따라 Figure 2와 같이 별도로 구분하여 제시하고 있다. 신호교차로 분석을 위한 입력자료에 해당하는 기하구조 및 신호주기 등을 조사하고, 이를 이용하여 도출한 포화교통류율은 용량과 v/c를 산정하기 위한 투입자료로 이용한다. 이러한 과정을 거쳐 최종적으로 단속류에 해당하는 신호교차로의 서비스수준을 판정하게 된다.

USHCM(2010)에 제시된 식(1)은 이상적인 상태에서의 포화교통류율을 기준으로, 보정계수를 이용하여 도로용량에 영향을 미치는 요인을 반영하도록 하였다.

$$s = s_0 \times f_w \times f_{HV} \times f_g \times f_p \times f_{bb} \times f_a \times f_{LU} \times f_{LT} \times f_{RT} \times f_{Lpb} \times f_{Rpb} \quad (1)$$

여기서,

- s : 포화교통류율(veh/h/ln)
- s_0 : 기본 포화교통류율(pc/h/ln)
- f_w : 차로폭 보정계수
- f_{HV} : 중차량 보정계수
- f_g : 접근로 경사 보정계수

Table 1. LOS at signalized intersection (USHCM 2010)

Control Delay (s/veh)	LOS by Volume to Capacity Ratio	
	≤ 1.0	> 1.0
≤ 10	A	F
> 10-20	B	F
> 20-35	C	F
> 35-55	D	F
> 55-80	E	F
> 80	F	F

- f_p : 주차 영향 보정계수
- f_{bb} : 버스정류장 보정계수
- f_a : 토지이용 영향 보정계수
- f_{LU} : 차로이용 보정계수
- f_{LT} / f_{RT} : 좌회전 / 우회전 차로보정계수
- f_{Lpb} / f_{Rpb} : 좌회전 / 우회전 보행자 보정계수

2) KHCM (2005)

KHCM(2005)에서는 교차로의 기하구조, 교통조건, 신호운영조건을 포함하여 신호교차로 서비스수준을 분석하도록 하고 있다. 분석의 목적에 따라 운영분석, 설계분석 및 계획분석과정에 따라 서비스수준 분석 및 도로의 용량 산정방안을 제시하고 있으며, 이중 강우시의 포화교통류율의 변화 및 용량변화와 관련된 부분은 운영분석에 해당하는 부분이다.

KHCM(2005)에서는 USHCM(2010)에서 제시하고 있는 보정계수 중에서도 일부가 제외된 식(2)와 같은 형태로 포화교통류율을 산정하도록 되어 있었다.

$$s_i = s_0 \times N_i \times f_{LT/RT} \times f_w \times f_{HV} \times f_g \quad (2)$$

여기서,

- s_i : 차로군 i의 포화교통류율(veh/h/ln)
- N_i : 차로군 i의 차로수

신호교차로의 서비스수준 분석의 효과측도는 제어지체를 사용하며, 여기서 제어지체는 분석기간 동안 차량당 평균 제어지체를 의미한다. 이 지체의 크기에 따라 Table 2와 같이 서비스 수준을 A, B, C, D, E, F, FF, FFF와 같이 총 8개 등급으로 구분하여 적용하고 있다. 제어지체는 교차로에서 신호운영으로 인한 총지체를 의미하며, 이는 접근지체(감속지체, 정지지체, 가속

Table 2. LOS at signalized intersection (KHCM 2005)

LOS	Control delay per Vehicle
A	≤ 15sec
B	≤ 35sec
C	≤ 50sec
D	≤ 70sec
E	≤ 100sec
F	≤ 220sec
FF	≤ 340sec
FFF	> 340sec

지체의 합)와 초기 대기행렬로 인한 초기지체를 합한 값이다. 여기서 초기 대기행렬에 의한 초기지체는 분석기간 이전에 교차로를 다 통과하지 못한 차량들에 의해 분석기간 동안 도착한 차량이 겪게 되는 지체를 의미한다.

2. 기상조건에 따른 연구

Joseph et al.(2003)은 기상조건에 따른 교차로의 적절한 신호시간 산정을 위해 교통변수의 변화를 분석하였다. 이를 위해 Tabel 3과 같이 도로노면 상태를 총 7가지 강도로 구분하였으며, 분석결과 노면상태의 강도가 높아짐에 따라 포화교통류율은 20% 감소, 속도는 최대 30%가 감소하는 것으로 나타났다. 강우의 영향으로 인해 포화교통류율 및 차량의 속도가 감소함을 수치적으로 제시한 연구로 본 연구의 의의와 직접적인 연관이 있다고 할 수 있다.

Smith et. al.(2004)의 연구는 강우의 영향으로 인해 변화하는 고속도로 용량과 속도를 분석하였으며, 이를 위해 강우강도에 따라 기준을 세분화 하였다.

고속도로 구간을 대상으로 강우의 영향에 따른 용량 및

Table 3. Inclement weather speed and saturation flow reductions (Joseph et al.(2003))

Condition	% of Speed Reduction	% of Saturation Flow Reduction
1 Dry	0%	0%
2 Wet	0%	6%
3 Wet and Snowing	13%	11%
4 Wet and Slushy	22%	18%
5 Slushy in Wheel Paths	30%	18%
6 Snowy and Sticking	35%	20%
7 Snowing and Packed	42%	-

Table 4. Rainfall intensity classifications(Smith et. al. (2004))

Rainfall Intensity	Rainfall (1/100 inch per hour)
1 None	< 1
2 Light	1-25
3 Heavy	> 25

속도를 분석하였으며 이때 강우강도를 Table 4와 같이 Light Rain 과 Heavy Rain 등 2가지로 구분하였다.

기존 연구 검토결과와 같이 기상상황이 교통류에 미치는 영향은 연속류를 중심으로 시도되었으며, USHCM(2010) 또한 연속류 날씨보정계수만 도입되었다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 단속류의 교통류 영향을 평가하는 방법을 차용하여 강우가 교통류에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 방법은 다음과 같다.

분석 자료 수집

1. 교통정보 수집대상 신호교차로 선정

본 연구를 수행하기 위해 KHCM(2005)의 신호교차로 부분에 제시되어 있는 이상적인 조건에 부합하는 지점을 선정하였다. 이는 포화교통류율을 감소시키는 요소를 최소화 하고, 강우만에 의한 영향을 측정하기 위함이다. 신호교차로의 이상적인 조건은 다음과 같다.

- 차로폭 3m 이상
- 경사가 없는 접근부
- 교통류는 직진이며, 모두 승용차로 구성
- 접근부 정지선의 상류부 75m 이내에 버스정류장이 없음
- 접근부 정지선의 상류부 60m 이내에 진출입 차량이 없음
- 십(十)자형 교차로
- 교차로 각 지점별 접근로 차로수가 거의 동일한 지점
- 중앙버스전용차로가 설치되어 있지 않은 지점
- 주변 도로공사구간이 없는 지점

본 연구에 적합한 교통자료 수집지점 선정을 위하여 서울시내 편도 4차로 이상 도로를 대상으로 검토하였다. 이와 함께 영상 레코딩장비 설치가 가능한 공간이 확보되는 지점의 존재 여부를 기준으로 최종적으로 월드맵경 기장 사거리, 종로2가사거리, 안국역사거리 등 세 지점을 최종 교통정보 수집대상 신호교차로로 선정하였다.

2. 교통 및 기상자료 수집

본 연구를 수행하기 위해 강우시 신호교차로 현장에서 차량의 통행행태를 비디오 레코딩하였다. 이와는 별도로 서울지방경찰청 종합교통정보센터의 신호교차로 CCTV를 구독하였으며, 수집된 영상정보를 이용하여 포화교통류율의 변화를 측정하였다. 자료의 구독 측면에 있어 경찰청에서 구독한 CCTV는 특정 구간의 연속적인 영상을 확보하기 어려우며, 검지기를 이용한 차두시간 분석은 검지기의 상태 등 현실적인 제약에 의해 활용하지 못하였다. 포화교통류율은 포화차두시간을 기준으로 산정하였으며, 구독한 영상자료를 30프레임/초 단위로 분석하여 포화차두시간을 산출하였다.

본 연구에 필요한 기상자료는 기상청을 통해 구독하였다. 기상청에는 지역별 기상자료를 수집하기 위해 기상대와 자동기상관측장비(Automatic Weather System, 이하 AWS)를 설치하여 운영중에 있으며, 이를 통해 수집된 기상자료는 기상청 홈페이지를 통해 실시간으로 업

Table 5. Detail of collection data

Location of AWS	Data Collection Intersection	Date / Time	Rainfall per Hour (mm)	
MAPO	World Cup stadiums Intersection	2011.04.22 / 10:00-12:00	1.5	
		2011.05.20 / 14:00-16:00	1.0	
		2011.08.08 / 14:00-16:00	4.0	
		2011.05.17 / 14:00-16:00	- (Control)	
		2011.08.11 / 14:00-16:00	- (Control)	
SEOUL	Jongno 2-Ga Intersection	2012.03.06 / 08:10-09:10	1.0	
		2012.03.23 / 08:00-09:10	1.5	
		2012.04.03 / 08:00-09:10	2.0	
		2012.04.25 / 09:20-10:20	2.0	
		2012.07.06 / 11:20-12:00	3.0	
		2012.04.11 / 08:00-09:00	- (Control)	
		2012.05.30 / 08:00-09:00	- (Control)	
		Anguk Station Intersection	2012.07.05 / 11:50-13:00	0.5
			2012.07.05 / 13:00-13:30	16.5
			2012.07.05 / 13:30-14:00	2.0
	2012.07.05 / 14:00-15:00		15.5	
	2012.07.05 / 15:00-15:30		10.5	
			2012.07.05 / 15:30-16:00	3.0
			2012.08.15 / 11:20-16:30	4.5
			2012.08.28 / 11:30-12:46	5.0
		2012.04.25 / 13:00-15:00	- (Control)	
		2012.06.07 / 13:00-15:00	- (Control)	

Table 6. Distribution of rainfall

	Frequency	Cumulative Frequency	Cumulative Frequency Ratio
≥ 1mm	183	183	51%
≥ 6mm	86	269	74%
≥ 10mm	54	323	89%
≥ 20mm	25	348	96%
≥ 30mm	14	362	100%
sum	362	-	-

데이트 되고 있다. 본 연구에서는 실시간으로 업데이트 되는 기상자료 중 15분 강우량과 60분 강우량 자료를 활용하였다. 교통자료 수집지점의 강우량 데이터의 정확도 향상을 위해 서울시내 AWS 세부위치를 점검하였으며, 분석대상 신호교차로와 가장 인접한 AWS의 강우량 데이터를 이용하였다.

3. 현장자료 수집

현장의 영상자료의 수집은 Table 5와 같이 2011년 4-8월 및 2012년 3-8월 등 총 11개월간 수집하였다. 수집시간은 주·야 영향을 배제하기 위해 낮시간(오전 9시-오후 6시)으로 한정하였다. 서울시의 2009년부터 2011년까지 3년간 1시간 강우량 및 해당 강우량이 발생한 빈도는 Table 6과 같으며, 20mm/h이하의 강우량이 발생한 일수의 비율이 전체 강우일의 90%에 육박하는 비율을 차지하였다. 시간당 강우량이 20mm/h 이상일 경우는 태풍 및 이상기후에 의한 집중호우상황에 해당하며, 이때 재난 및 재해 상황에 가까운 피해가 발생하는 등 일반적인 강우상황이 아니므로 본 연구에서는 20mm/h이상의 강우일은 분석에서 제외하였다.

연구 방법론

1. 포화차두시간의 개념 및 포화교통류율 산정

포화차두시간은 전 차량의 차두시간의 합에서 출발손실시간을 제외한 값으로 정의한다. 적색신호시 대기하고 있었던 차량이 녹색신호로 신호변경에 의해 가속을 할 경우 정지상태에서 출발하기 때문에 지체(출발손실시간)가 발생한다. 따라서 녹색신호 전환시 초기차량의 출발손실시간을 제외한 이후 차량들의 차두시간 평균값을 사

용하였으며 본 연구에서는 출발손실시간을 제외한 차두 시간 측정을 위해 USHCM(2010)에서 제시한 Figure 3과 같이 5번째 차량부터 차두시간을 측정하였다.

이러한 포화차두시간을 이용하여 포화교통류율을 산정할 수 있으며, 포화교통류율 산정을 위한 식은 다음 (3) 및 (4)와 같다.

$$\bar{h}_s = \frac{T_{last} - T_s}{N_{last} - N} \tag{3}$$

$$s = \frac{3600}{\bar{h}_s} \tag{4}$$

여기서,

\bar{h}_s : 포화차두시간

T_{last} : 대기행렬 마지막 차량의 통과시간

T_s : 출발손실시간이 마지막으로 적용된 차량 통과시간

N_{last} : 대기행렬 마지막 차량까지 통과대수

N : 출발손실시간이 적용된 차량대수

s : 포화교통류율

USHCM(2010)에서는 유의한 수준의 포화교통류율을 산정하기 위해서는 대기행렬 차량이 8대 이상이며,

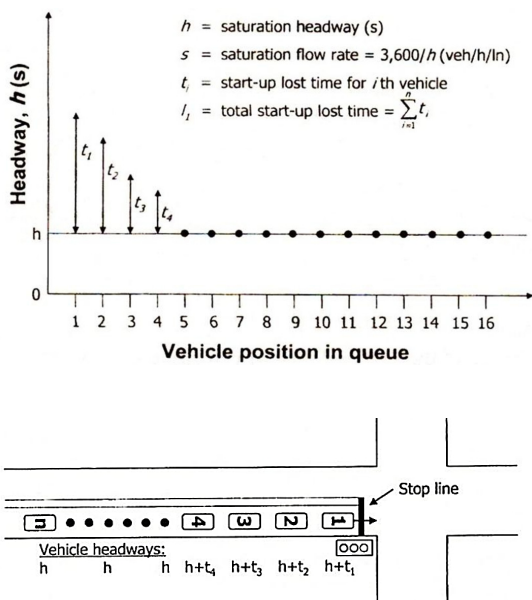


Figure 3. Methodology of headway measurement (USHCM (2010))

최소 15번의 신호주기를 반복측정해야 한다고 제시되어 있다. 본 연구에서는 USHCM(2010)에서 제시하고 있는 기준을 준수하여 포화교통류율을 산정하였다.

2. 강우보정계수(f_{rc}) 산정

본 연구에서 도출한 강우시의 포화차두간격과 비 강우시의 포화차두간격의 관계를 이용하여 강우보정계수를 도출할 수 있다. 즉, 강우보정계수를 강우에 의해 감소한 포화차두간격 정도를 통계학적으로 분석하여 산정하였다. 이때 강우보정계수를 산정하는 식은 식(5) 및 식(6)과 같다.

$$X = \frac{h_b - h_a}{h_a} \tag{5}$$

$$f_{rc} = \frac{1}{1 + X} \tag{6}$$

여기서,

\bar{h}_a : 비강우시 포화차두시간

\bar{h}_b : 강우시 포화차두시간

X : 강우시 증가한 포화차두시간의 비율

분석 결과

자료 분석을 통해 각 지점의 시간당 강우량별 포화차두시간 및 포화교통류율 값을 산출하였다. 각 지점의 시간당 강우량 별 포화차두시간 중 시간당 강우량이 동일한 포화교통류율 값을 통계적 검정을 통해 같은 시간당 강우량 별 포화차두시간 자료는 하나의 시간당 강우량 자료로 간주하여 분석에 활용하였다.

1. 지점별 분석결과

영상자료는 프레임 분석을 통해 포화차두시간간격을 도출하였다. 영상자료를 수집한 3개 지점별 시간당 강우량에 따른 포화차두시간, 표본표준편차, 포화교통류율 및 해당 강우시의 차량수를 검토한 결과는 Table 7-9와 같다. 3개 지점 모두 비강우시때 보다 강우시에 포화차두시간이 큰폭으로 증가하는 것을 알 수 있었으며, 도로의 용량에도 영향을 미침을 알 수 있다.

수집된 지점이 서로 다른 자료를 시간당 강우량이 동

일한 하나의 자료로 가공하기 위한 통계적 검증은 분산 분석(ANOVA test)을 시행하였다. 분석에 사용한 그룹은 총 4가지이며, 항목은 다음과 같다.

- 1.0mm/h: 월드컵경기장사거리, 종로2가사거리
- 1.5mm/h: 월드컵경기장사거리, 종로2가사거리
- 2.0mm/h: 안국역사거리, 종로2가사거리
- 4.0mm/h: 월드컵경기장사거리, 안국역사거리

분산분석을 위해 세운 귀무가설과 대립가설은 다음과 같다.

- H_0 (귀무가설): 그룹 내의 시간당 강우량에 따른 포화차두시간은 차이가 없다.
- H_1 (대립가설): 그룹 내의 시간당 강우량에 따른 포화차두시간은 차이가 없다고 할 수 없다.

각 그룹별 분산분석 결과는 Table 10과 같이 모두 귀무가설을 기각하지 못하였으며, 이를 이용하여 시간당 강우량 별 포화차두시간 자료를 구축하였다.

현실적 제약에 의해 Table 7-9과 같은 포화차두시간을 확보하였으며, Table 10과 같이 서로 다른 지점에서 수집한 데이터 일지라도 강우량에 따른 포화차두시간의 변화에는 큰 영향이 없음을 알 수 있었다. 즉, 본 연구에서 데이터를 구축한 3개 지점의 경우, 강우량이 동일할 경우 포화차두시간은 통계학적으로 큰 차이가 없음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 동일한 강우량에서 수집

Table 7. World Cup stadiums Intersection

Rainfall per Hour (mm/h)	Saturation Headway (sec)	Sample Standard Deviation	# of Sample	Saturation Flow Rate (veh/h/l)
None	1.94	0.26	751	1,856
1.0	2.01	0.35	83	1,795
1.5	1.99	0.46	372	1,808
4.0	2.21	0.43	61	1,632

Table 8. Jongno 2-Ga intersection

Rainfall per Hour (mm/h)	Saturation Headway (sec)	Sample Standard Deviation	# of Sample	Saturation Flow Rate (veh/h/l)
None	1.98	0.38	523	1,818
1.0	2.09	0.42	298	1,725
1.5	2.07	0.60	324	1,741
2.0	2.09	0.54	317	1,720

된 포화차두시간은 지점에 관계없이 통합하여 산출하여 분석에 활용하였다.

2. 포화차두시간 분석결과

시간당 강우량에 따른 포화차두시간을 분석한 결과 시간당 강우량이 증가함에 따라 포화차두시간이 증가하는 추세를 보임을 확인하였다. 그러나 5mm/h 이상의 시간당 강우시에는 포화차두시간의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 포화차두시간의 표준편차 분포는 Figure 4와 같이 강우량이 증가함에 따라 증가하는 추세로 나타났다. 시간당 강우량의 증가시 차두시간의 최솟값의 변화는 거의 없으나 최댓값은 점차 증가하는 분포를 보인다. 시간당 강우량에 따른 포화차두시간 상세 자료는 Table 11과 같다.

Table 9. Anguk station intersection

Rainfall per Hour (mm/h)	Saturation Headway (sec)	Sample Standard Deviation	# of Sample	Saturation Flow Rate (veh/h/l)
None	1.74	0.26	427	2,069
0.5	2.04	0.43	326	1,768
2.0	2.18	0.42	211	1,651
2.5	2.26	0.50	105	1,592
3.0	2.29	0.54	119	1,575
3.5	2.32	0.64	572	1,550
4.0	2.31	0.62	208	1,556
4.5	2.36	0.64	1,165	1,528
5.0	2.41	0.67	601	1,491
6.0	2.41	0.71	400	1,492
7.5	2.38	0.74	378	1,511
8.0	2.37	0.60	368	1,517
9.5	2.38	0.73	407	1,513
10.0	2.43	0.73	850	1,482
10.5	2.43	0.65	138	1,483
13.5	2.36	0.66	250	1,527
15.5	2.40	0.74	427	1,498
16.0	2.35	0.69	297	1,533
16.5	2.42	0.74	230	1,489

Table 10. Result of ANOVA test

	F-Ratio	p-Value	F-Threshold value
1.0 mm/h	2.63	0.11	3.87
1.5 mm/h	3.58	0.06	3.85
2.0 mm/h	2.25	0.11	3.01
4.0 mm/h	1.63	0.20	3.88

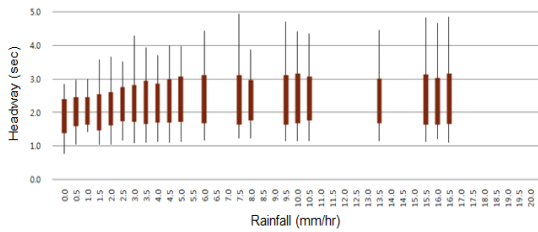


Figure 4. Box plot (Headway-Rainfall)

Table 11. Saturation headway distribution

Rainfall per Hour (mm/h)	Saturation Headway (sec)	Sample Standard Deviation	Max.	Min.	# of Sample
None	1.90	0.50	2.85	0.78	1,274
0.5	2.04	0.43	2.96	1.04	326
1.0	2.07	0.41	3.00	1.42	381
1.5	2.03	0.53	3.57	1.04	696
2.0	2.13	0.50	3.66	1.04	529
2.5	2.26	0.50	3.52	1.17	105
3.0	2.29	0.54	4.28	1.08	119
3.5	2.32	0.64	3.93	1.1	572
4.0	2.29	0.58	3.70	1.13	269
4.5	2.36	0.64	3.99	1.11	1,165
5.0	2.41	0.67	3.98	1.12	601
6.0	2.41	0.71	4.44	1.17	400
7.5	2.38	0.74	4.93	1.23	378
8.0	2.37	0.60	3.86	1.23	368
9.5	2.38	0.73	4.7	1.14	407
10.0	2.43	0.73	4.41	1.14	850
10.5	2.43	0.65	4.35	1.14	138
13.5	2.36	0.66	4.46	1.14	250
15.5	2.40	0.74	4.84	1.13	427
16.0	2.35	0.69	4.67	1.22	297
16.5	2.42	0.74	4.85	1.1	230

3. 통계적 검정

1) t-test

시간당 강우량에 따른 차두시간의 차이를 검정하였으며, 분석 신뢰도는 95%를 적용하였다. 적용한 귀무가설과 대립가설은 다음과 같다.

H_0 (귀무가설): 시간당 강우량에 따른 포화차두시간은 차이가 없다.

H_1 (대립가설): 시간당 강우량에 따른 포화차두시간은 차이가 없다고 할 수 없다.

각 시간당 강우량에 대해서 귀무가설을 기각한 검정 결과는 Table 12와 같으며, 비강우상황과 0.5mm/h, 1.5mm/h와 2.0mm/h, 2.0mm/h와 2.5mm/h, 4.0

Table 12. Result of t-test

	t-value	P (T<=t)	t-Threshold value	null hypothesis
<0.5mm/h	-4.84	8.55E-07	1.648	Dismissed
0.5-1.0mm/h	-1.05	1.47E-01	1.647	
1.0-1.5mm/h	1.46	7.17E-02	1.646	
1.5-2.0mm/h	-3.42	3.25E-04	1.646	Dismissed
2.0-2.5mm/h	-2.49	6.89E-03	1.655	Dismissed
2.5-3.0mm/h	-0.37	3.57E-01	1.652	
3.0-3.5mm/h	-0.63	2.63E-01	1.653	
3.5-4.0mm/h	0.74	2.31E-01	1.648	
4.0-4.5mm/h	-1.65	4.96E-02	1.648	Dismissed
4.5-5.0mm/h	-1.80	3.61E-02	1.646	Dismissed
5.0-6.0mm/h	0.06	4.77E-01	1.647	
6.0-7.5mm/h	0.56	2.89E-01	1.647	
7.5-8.0mm/h	0.22	4.13E-01	1.647	
8.0-9.5mm/h	-0.14	4.45E-01	1.647	
9.5-10.0mm/h	-1.13	1.29E-01	1.647	
10.0-10.5mm/h	0.03	4.86E-01	1.653	
10.5-13.5mm/h	1.00	1.58E-01	1.650	
13.5-15.5mm/h	-0.82	2.06E-01	1.648	
15.5-16.0mm/h	1.01	1.57E-01	1.647	
16.0-16.5mm/h	-1.10	1.36E-01	1.648	

mm/h와 4.5mm/h, 4.5mm/h와 5.0mm/h이며 이외의 검정 결과는 귀무가설을 기각하지 못하였다. 이는 비강우상황과 강우상황에는 포화차두시간이 같다고 할 수 없으며 2.0mm/h와 4.5mm/h의 시간당 강우량 지점에서 포화차두시간의 변화가 나타난다고 할 수 있다.

2) ANOVA-test

t-test의 검정결과 강우량에 따른 포화차두시간이 변화하는 그룹을 총 3개로 구분하였다. 해당 그룹 내의 경우 강우량에 따른 포화차두시간의 차이가 발생하는지를 별도의 분산분석을 통해 검증하였다. 귀무가설을 기각하지 못한 시간당 강우량의 포화차두시간 자료를 각 그룹으로 나누어 95% 신뢰수준을 기준으로 ANOVA-test를 시행하였다. 이를 위하여 검정을 시행한 그룹은 총 3가지이며 각 그룹의 분류는 다음과 같다.

- Group 1: 0.5mm/h, 1.0mm/h, 1.5mm/h (3개)
- Group 2: 2.5mm/h, 3.0mm/h, 3.5mm/h, 4.0mm/h (4개)
- Group 3: 5.0mm/h, 6.0mm/h, 7.5mm/h, 8.0mm/h, 9.5mm/h, 10.0mm/h, 10.5mm/h, 13.5mm/h, 15.5mm/h, 16.0mm/h, 16.5mm/h (11개)

각 그룹별로 ANOVA-test를 총 3회 시행하였으며 귀무가설과 대립가설은 다음과 같이 설정하였다.

H_0 (귀무가설): 그룹내의 시간당 강우량에 따른 포화차두시간은 차이가 없다.

H_1 (대립가설): 그룹내의 시간당 강우량에 따른 포화차두시간은 차이가 없다고 할 수 없다.

각 그룹별 ANOVA-test 시행결과는 모두 귀무가설을 기각하지 못하였으며 검정시행결과는 Table 13과 같다. 이는 검정시행에서 설정한 그룹 내에서는 시간당 강우량에 따른 포화차두시간의 차이가 있다고 하기는 어렵다는 것을 의미한다. 이를 바탕으로 그룹별로는 포화차두시간을 기준으로 신호교차로의 영향을 대표하는 값을 산정하였으며, 이러한 영향을 이용하여 강우시 보정계수를 산출하였다.

결론 및 향후연구

1. 포화교통류율 분석결과

시간당 강우량에 따른 포화차두시간의 자료를 이용하여 Table 14와 같이 포화교통류율을 산출하였다. 시간당 강우량에 따른 포화교통류율을 분석한 결과 시간당 강우량이 높아짐에 따라 포화교통류율이 감소하는 추세로 나타나는 것을 확인하였다. 그러나 5mm/h 이상의 시간당 강우량에서는 포화교통류율의 변동이 크지 않은 것으로 나타났다. 특히 비강우상황에서 강우상황으로 변화할 경우 큰 폭으로 포화교통류율이 감소하였으며 2.0mm/h와 4.5mm/h에서 포화교통류율이 큰 폭으로 감소하는 것을 확인하였다.

Table 13. Result of ANOVA-test

	Degrees of Freedom ¹⁾	Degrees of Freedom ²⁾	F-Ratio	p-Value	F-Threshold value
Group 1	2	1,400	0.99	0.37	3.00
Group 2	3	1,061	0.44	0.72	2.61
Group 3	10	4,335	0.58	0.83	1.83

¹⁾ Treatment degrees of freedom

²⁾ Residual degrees of freedom

Table 14. Result of saturation flow rate

Rainfall per Hour (mm/h)	Saturation Headway (sec)	Saturation Flow Rate	Reduction
None	1.90	1,891	0.0%
0.5	2.04	1,768	6.5%
1.0	2.07	1,740	8.0%
1.5	2.03	1,776	6.1%
2.0	2.13	1,692	10.5%
2.5	2.26	1,592	15.8%
3.0	2.29	1,575	16.7%
3.5	2.32	1,550	18.0%
4.0	2.29	1,573	16.8%
4.5	2.36	1,528	19.2%
5.0	2.41	1,491	21.2%
6.0	2.41	1,492	21.1%
7.5	2.38	1,511	20.1%
8.0	2.37	1,517	19.8%
9.5	2.38	1,513	20.0%
10.0	2.43	1,482	21.6%
10.5	2.43	1,483	21.6%
13.5	2.36	1,527	19.2%
15.5	2.40	1,498	20.8%
16.0	2.35	1,533	18.9%
16.5	2.42	1,489	21.3%

2. 강우보정계수(f_{rc})

강우영향을 회귀모형으로 분석한 결과를 Figure 5와 같다. 회귀모형으로 강우보정계수를 산출하는 방안보다 포화교통류율 분석결과를 바탕으로 특정 강우량을 기준으로 구분하여 강우보정계수를 산정하는 것이 보다 설명력이 높게 나타났다. 자료 분석 결과 비강우상황과 강우상황, 2mm/h 지점과 4.5mm/h 지점에서 차두시간의 차이가 크게 나타나므로 이 지점을 기준으로 시간당 강우량을 구분하여 강우보정계수를 제시하였다. 강우상황에서 0mm/h 이상에서 2mm/h 미만, 2mm/h 이상에서 4.5mm/h 미만, 4.5mm/h 이상으로 3구간으로 나누어 강우보정계수를 제시하며, 그 값은 범위 내의 시간당 강우량 별 강우보정계수의 평균값을 사용하였다.

이에 따라 각 시간당 강우량의 범위별 강우보정계수는 Table 15 및 Figure 5와 같다. 모형의 설명력 검토결과, 회귀모형에 의해 도출된 결과보다 Figure 6과 같이 강우량을 기준으로 구분한 결과가 더욱 높게 나타났으며, KHCM(2013)은 이와 같은 방법론을 이용하여 신호교차로 강우시 영향을 산정하도록 하고 있다.

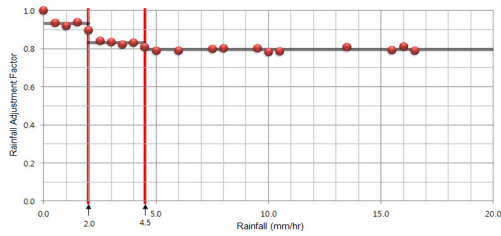


Figure 5. Rainfall adjustment factor

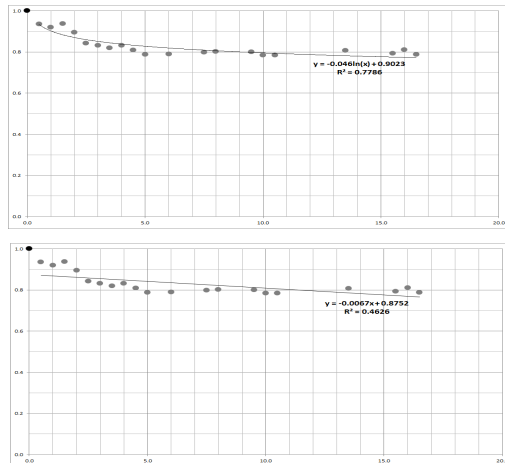


Figure 6. Regression model

Table 15. Rainfall adjustment factor

Rainfall per Hour (mm/h)	Adjustment Factor (f_{rr})
None	1.00
0 - 2	0.93
2 - 4.5	0.83
> 4.5	0.79

3. 결론 및 향후연구

강우상황은 일반적으로 도로교통에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 특히 도로의 포화교통류율에 미치는 영향이 크며, 강우빈도 및 강우량이 점차 증가하는 국내 기상상황을 고려할 때 이와 관련된 도로용량 및 서비스수준 판정방법이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 영향을 분석하기 위해 강우강도별로 차두시간을 실측하여 포화교통류율을 산정하였다. 강우량과 포화교통류율, 차두시간간의 상관관계를 분석하였으며, 강우에 의해 변화 발생하는 강우량을 기준으로 강우보정계수를 산정하여 결과를 제시하였다. 이 결과는 KHCM(2013)에 반영되어 적용되고 있다.

본 연구는 실험적인 연구로, 향후에는 통행속도 및 차두간격에 영향을 미칠 수 있는 외부적 요인에 대한 통제를 명확히 하여 보다 정밀한 값을 측정 및 비교·검토하여 활용도를 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

REFERENCES

Highway Capacity Manual (2000, 2010), TRB.
 KBS NEWS, 60 Years Later, the Annual Average of 16.7 Peninsula Also Vulnerable to Natural Disasters, (2014.03.26).
 Korea Highway Capacity Manual (2010, 2013), Korean Society of Transportation.
 Korea Meteorological Administration (2009, 2010, 2011, 2012, 2013), Annual Climatological Report.
 Korea Meteorological Administration, Website: <http://www.kma.go.kr/>
 Perrin J.Jr., Martin P.T., Hansen B.G.(2001), Modifying Signal Timing During Inclement Weather, University of Utah Traffic Lab, TRB 80th Annual Meeting, Washington, D.C.
 Roess R.P., Prassas E.S., McScane W.R.(2004), Traffic Engineering Third Edition, Pearson Prentice Hall, 473-476, 587-599.
 Smith B.L., Byrne K.G., Copperman R.B., Hennessy S.M., Goodall N.J. (2004), An Investigation into the impact of Rainfall on Freeway Traffic Flow, TRB, Washington D.C.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제67회 학술발표회(2012. 10. 20)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

- ✉ 주 작성자 : 김봉석
- ✉ 교신저자 : 노창균
- ✉ 논문투고일 : 2014. 9. 1
- ✉ 논문심사일 : 2014. 10. 16 (1차)
2014. 11. 23 (2차)
- ✉ 심사판정일 : 2014. 11. 23
- ✉ 반론접수기한 : 2015. 6. 30
- ✉ 3인 익명 심사필
- ✉ 1인 abstract 교정필