

기상상황에 따른 노면상태를 고려한 침단차량 추종거동 모형의 분석

Analysis of Car Following Model of Adaptive Cruise Controlled Vehicle Considering the Road Conditions According to Weather Circumstance

김 태 욱*
(Tae-uk Kim)

배 상 훈**
(Sang-hoon Bae)

요 약

침단차량 및 도로시스템 (AVHS)의 가장 핵심적인 모형인 추종거동 모형은 인간공학적 요소를 반영하거나 가속도 오차를 줄이는 등 다양한 측면에서 개발되고 있다. 하지만 침단차량 추종거동과 관련하여 기상상황을 고려한 안전성에 대한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 기상상황에 따른 노면상태와 차량 주행행태의 관계를 분석하여 침단차량 추종거동 시 차량의 주행행태 변화를 비교하였고, 이에 따른 노면상태 별 최적안전거리를 산정하였다. 노면상태는 기상상황에 따라 다양하게 분류 되지만, 본 논문에서는 건조, 습윤, 적설 노면상태로 분류하고 이에 따른 마찰계수를 추종거동 모형인 GMT 모형에 적용하였다. 제안된 추종거동 모형의 시뮬레이션 결과, 기상상황별 노면상태에 따라 추종차량의 속도와 가속도 및 차간거리가 변화되었다. 또한 변화하는 노면상태에 따라 달라지는 차간거리를 이용하여 기상상황에 따른 노면상태 별 최적안전거리를 산정하였다. 습윤노면상태에서의 최적안전거리는 건조노면상태에 비해 약 1.7배가 늘어났으며, 적설노면상태에서의 최적안전거리는 건조노면상태에 비해 약 5.6배가 늘어났다.

핵심어 : 침단제어차량, 추종거동, 노면 마찰 계수, 안전거리, 기상상황

Abstract

The car-following model is one of core models in Advanced Vehicle & Highway Systems (AVHS). The car-following model has been developed in aspects such as human factor and reduction error rates. However, the consideration of safety depending on weather condition has not been completed yet.

In this paper, therefore, changes of driving condition for car-following due to different road condition were dealt with, and optimal safety distance corresponding to road condition such as dry, wet and snowy were computed. The GMT(GM Model with Instantaneous T) model was picked over for simulation of adaptive cruise control applied the suggested optimal safety distance. As the results, the 1.7 times longer safety distance was required for wet road condition than dry road condition, and the 5.6 times longer safety distance was required for snowy road condition.

Key words : Adaptive Cruised Control, Car Following Model, Road Friction Coefficient, Safety Distance, Weather Circumstance

† 이 논문은 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.
† 이 논문은 제 76회 대한교통학회 학술대회에서 발표한 내용을 수정 및 보완한 연구입니다.
* 주저자 : 부경대학교 공간정보시스템공학과 석사과정
** 공저자 및 교신저자 : 부경대학교 공간정보시스템공학과 부교수
† 논문접수일 : 2013년 1월 10일
† 논문심사일 : 2013년 5월 2일
† 게재확정일 : 2013년 5월 9일

1. 서 론

1. 연구 배경 및 목적

정부는 지능형 교통 시스템(ITS)을 도입함으로써 효율적인 교통운영을 통해 교통정체를 해소하고 운전자의 안전성과 편의성을 증진하고자 한다. ITS 서비스의 한 분야인 첨단차량 및 도로시스템(Advanced Vehicle & Highway Systems; AVHS)은 이미 1980년대부터 미국, 유럽, 일본 등 각 선진 국가에서 추진되고 있으며, 21세기 교통 체계의 핵심적인 기술로 자리 잡고 있다. 현재 미국 교통국(United States Department Of Transportation; US-DOT)에서는 ITS 연구 계획의 핵심인 ‘Connected Vehicle’ 프로그램이 활발히 연구진행 중이며, 국내에서도 역시 지능형 첨단차량과 도로시스템의 개발을 통해 운행의 안전성을 높이고 도로의 용량을 증대하는 등 여러 가지 효과를 도모하고 있다.

Connected Vehicle은 무선 통신을 통한 교통정보 수집 기술과 첨단 기술을 활용하여 차량·인프라·운전자·휴대장치 등의 상호간 데이터 교환으로 차량과 도로 기반시설의 통합을 목적으로 두고 있다. 이러한 기술을 통해 Connected Vehicle은 환경성·이동성·안전성 향상을 위해 여러 세부 요소로 나누어 연구되고 있으며, 안전성 향상을 위한 연구로는 V2I(Vehicle to Infrastructure communication)와 V2V(Vehicle to Vehicle communication)가 있다. 특히, V2V 통신을 통해 차량 간 최소한의 간격을 유지하면서 속도를 제어하는 CACC(Cooperative Adaptive Cruise Control)에 관한 연구가 진행 중이며, CACC 구현을 위해 추종거동(Car Following) 모형을 기반으로 하고 있다. 기존의 추종거동 모형은 차량 간의 상대속도, 차간거리만을 고려하여 연구가 진행되었다.

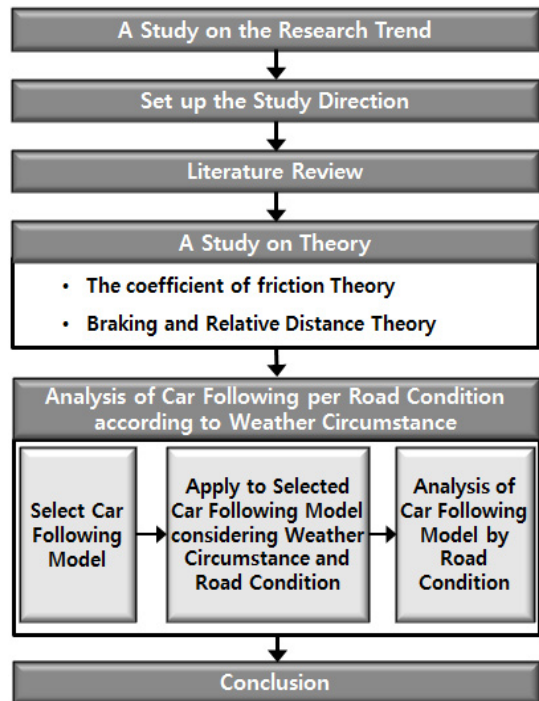
하지만 기상상태, 노면, 도로의 선형 등의 외부요소들은 운전자의 주행행태와 그에 따른 안전에 상당한 영향을 미친다[4, 9]. 일반적으로 운전자는 외부요소에 따라 변화하는 주행환경을 경험적으로 인지하기 때문에 직관적으로 차량 주행행태를 조정할

수 있지만, 이를 고려하지 않은 첨단차량시스템은 운전자의 안전을 보장하지 못한다.

따라서 본 연구에서는 외부요소 중 기상상황(건조, 습윤, 적설)에 따라 변화하는 노면상태를 반영할 수 있도록 개선된 추종거동 모형을 바탕으로 노면상태에 따른 선행차량과 후행차량의 주행행태의 변화를 분석하고자 하였다. 본 연구에서의 추종거동 주행행태 분석은 차량의 최대 감속도에 주안점을 두었으며, 이를 기반으로 첨단차량 추종거동 시 각 노면상태 별 최적안전거리를 산정하고자 하였다.

2. 연구수행 방법

본 연구에서는 국내외의 연구동향을 고찰하여 연구방향을 설정한 후 관련논문과 기존의 마찰계수 이론 및 제동거리에 관한 이론 고찰을 하였으며, 노면상태를 세 가지의 경우(건조, 습윤, 적설)로 분류하여 분석하였다.



<그림 1> 연구수행절차
<Fig 1> Flow of Study

또한 문헌고찰을 통해 기존의 추종거동모형을 선정하였으며, 선정된 추종거동모형에 기상상황에 따른 노면상태를 적용하였다. 구축한 첨단차량 추종거동 모형을 노면상태에 따라 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 노면상태에 따른 차량의 속도, 가속도, 상대속도, 차간간격을 비교 및 분석하였고 속도와 노면상태별 최적안전거리를 산정하였다.

본 연구의 수행을 위한 절차는 <그림 1>과 같다.

II. 문헌고찰

1. 추종거동

배상훈(2007)은 논문고찰을 통해 가장 성능이 뛰어난다고 판단된 GMIT모형을 제어의 기본 모델로 선정하였고, 추종모형에서는 선행차량의 급제동시 추종차량이 충돌을 피하면서 운전자의 쾌적성을 유지할 수 있는 최적의 안전거리를 속도별로 산정하였다. 시뮬레이션 결과를 기초로 할 때, 100km/h의 속도에서 15m의 안전거리를 확보하여 약 85%의 안전거리에 대한 감소효과가 발생하는 것으로 파악되었다. 또한 민감도를 변화시켜 속도별 최적 파라미터를 분석한 결과, 100km/h의 속도에서 8m의 안전거리를 확보하여 추종거동 모형을 적용한 안전거리에 비해 약 50%의 안전거리 감소효과가 발생하는 것으로 파악되었다.

정희진(2006)은 기존에 연구되었던 개별 거동인 추종(car following), 차로변경(lane changing), 진입(merging), 진출(exiting)들의 모형을 통합하여 연속 거동 모형을 개발하였다. 연속거동모형을 적용한 모형을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 단일 거동 모형일 경우와 달리 차로 변경과 추종모형이 연속적으로 수행 되었고 차로변경을 위한 사전거동 중 차로변경 여건이 되면 차로변경을 수행 해 차로변경에 드는 총 시간은 차량이 차로변경을 시도하는 시각에서 차로변경을 끝낸 후 차로변경한 차로 상의 모든 차량의 속도가 안정될 때까지의 시간으로 측정하였다.

이승석 외 1인(2000)은 차량추종상황을 가속상황, 감속상황, 출발상황과 정지상황으로 구분하여 차량 추종모형을 도출하였다. 이를 위해, 실측자료를 이용하여 모형을 추정하였으며, 통계적 검증, 가상자료, 실측치와의 비교를 통해 분석하여 구축모형의 적용성이 우수함을 도출하였다.

2. 기상상황과 차량 주행행태

Prakash Ranjitkar 외 2인(2005)는 GM계열의 추종 거동 모형, Gripps모형과 Leutzbach모형의 성능을 평가 및 비교하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, GM 계열의 모형 중 GMIT모형이 가속도의 오차율이 가장 적은 것으로 분석되었다.

Micheal Kyte et al(2000)은 환경적 요인이 차량의 속도에 미치는 영향에 대해 연구하였는데, 가시도, 도로표면상태, 강수량, 풍속에 의해 어떻게 변화하는가를 실험하였다. 그 결과, 도로가 눈이나 얼음에 의해 결빙되어 있을 때에는 평균속도보다 21km/h 감소하고 풍속이 48km/h이상일 때 평균속도가 9km/h 감소하였다.

Ibrahim, A. T(1994)는 기상상태와 명암이 속도에 주는 영향에 대해 15개 부분으로 나누어 연구하였다. 분석 결과, 운전속도는 어두울 때 5km/h 정도 감소하고, 젖은 2차로, 3차로 도로는 각각 9.5km/h, 12km/h 정도 속도를 감소함을 발견하였다.

3. 시사점

최근 국내외에서는 첨단차량에 관한 연구가 많은 부분 수행되어 왔고, 이미 실용화 단계에 접어들었다. 하지만 대부분의 첨단차량 추종거동에 관한 연구는 외부요소를 고려하지 않고, 후행차량의 가속도 산출에 따른 주행행태에만 초점이 맞춰져 있다. 또한 교통류에 영향을 미치는 외부요소인 눈, 비, 안개 등과 같은 기상조건을 고려한 연구가 수행되어 왔지만, 첨단차량 분야에 있어 이와 같은 기상조건을 고려한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 기존 연구의 시뮬레이션에서는 기상상태에 따라 변하는 노면상태를 고려하지 못했다는 현실적인 문제점

을 내포하고 있다. 이 같은 상황에서 첨단차량의 시스템제어 모델에 기상조건을 도입함으로써 노면상태에 따라 달라지는 차량 안전거리 및 상대속도를 이론적으로 정량화하여 운전자의 안전성을 보장할 수 있는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

III. 이론적 고찰

첨단차량 추종거동은 선행차량의 속도변화에 따라 후행차량이 선행차량과의 충돌을 피하면서 같은 속도를 유지하기 위해 가속도를 조절하는 거동이다. 이때 후행차량은 t 시간에서 선행차량과 후행차량의 상대속도, 차간거리, 후행차량의 속도를 고려하여 후행차량의 가속도를 결정한다. 여기서 속도와 차간거리는 선행차량과 후행차량의 가속도에 의해 결정되는데, 이때 가속도는 노면의 거칠기, 즉 노면마찰계수에 따라 달라진다. 예를 들어, 건조한 아스팔트에서 주행하는 차량과 빙판길에서 주행하는 차량의 가속도는 많은 차이가 나게 되고, 이러한 가속도 변화에 의해 속도 또한 달라진다.

따라서 본 연구에서는 기상상황에 따라 변화하는 마찰계수를 고려하여 속도와 가속도 그리고 차간거리의 변화를 분석하기 위하여 다음의 이론을 고찰하였다.

1. 가속도와 노면 마찰계수와의 관계

물체가 표면상에서 움직일 때 물체는 주위환경과 상호작용하기 때문에 움직임은 방해 받는다. 이러한 방해를 마찰력이라고 하며, 마찰력은 표면의 거칠기와 물체의 수직항력에 의해 결정되므로 마찰력은 다음과 같다[7].

$$f_k = -\mu \times n \quad (n = m \times g) \quad (1)$$

- f_k : 운동마찰력
- μ : 마찰계수
- n : 수직항력
- m : 질량

- g : 중력가속도

또한 차량이 제동하여 정지하기까지의 거리를 제동거리라고 하며, 제동을 시작하여 정지하는 동안 일정한 가속도로 감속한다. 이때 가속도는 뉴턴 제 2 법칙($f = m \cdot a$)과 식 (1)을 이용하여 가속도와 마찰계수의 관계를 정의할 수 있으며, 감속도 d 와 마찰계수는 선형적으로 비례한다는 것을 알 수 있다.

$$a = -\mu \times g \quad (2)$$

$$d \propto \mu \quad (3)$$

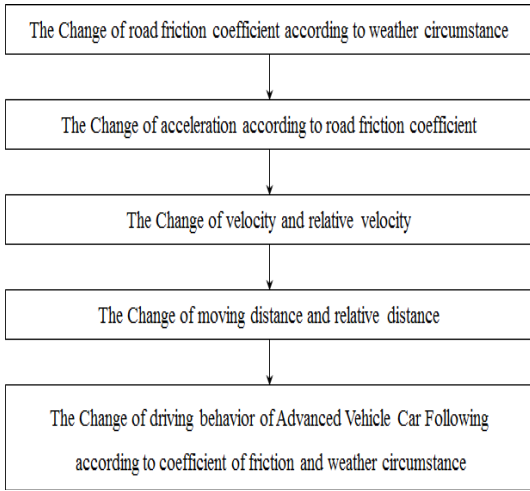
- a : 가속도 (acceleration)
- d : 감속도 (deceleration)

식 (2)에 의해 산출되는 감속도는 차량의 최대 감속도를 나타낸다[8].

이러한 마찰계수는 주행하는 차량의 속도와 도로의 노면상태마다 다르며, 속도가 높을수록 마찰계수 값이 작아진다. 기상상황에 따른 노면상태별 마찰계수는 <표 1>과 같다. 각 기상상황에 따른 노면상태는 기 수행된 연구에서의 데이터를 근거로, 습윤노면은 강우로 인해 수막의 두께가 약 0.7mm 이상인 도로 전체가 젖어있는 상태이며, 적설노면은 강설로 인해 부드러운 압설 상태 상에서 차량이

<표 1> 기상상황에 따른 노면상태별 마찰계수
<Table 1> The friction coefficient per road surface conditions

Designed Velocity (km/h)	Coefficient of friction on Dry road	Coefficient of friction on Wet road	Coefficient of friction on snow road
120	0.54	0.28	-
110	0.55	0.28	-
100	0.56	0.29	-
90	0.57	0.30	-
80	0.58	0.30	-
70	0.59	0.31	0.23
60	0.60	0.32	0.23
50	0.61	0.34	0.23
40	0.63	0.37	0.23
30	0.64	0.44	0.23



<그림 2> 노면마찰계수에 따른 추종거동 주행행태 변화
<Fig 2> Change of Car-following movement according to road friction coefficient

주행한다는 가정을 전제 조건으로 한다[6, 14-16].

따라서 본 연구에서는 <표 1>의 기상상황 및 속도별 마찰계수를 식 (2)에 적용하여, 각 기상상황에 따른 노면상태 및 속도 별 차량의 최대 감속도를 다음 <표 2>와 같이 도출하였다.

<표 2> 노면상태별 급제동 최대 감속도
<Table 2> Maximum deceleration per road surface conditions

Designed Velocity (km/h)	Deceleration on Dry road (m/s)	Deceleration on Wet road (m/s)	Deceleration on Snow road (m/s)
120	5.292	2.744	-
110	5.390	2.744	-
100	5.488	2.842	-
90	5.586	2.940	-
80	5.684	2.940	-
70	5.782	3.038	2.254
60	5.880	3.136	2.254
50	5.978	3.332	2.254
40	6.174	3.626	2.254
30	6.272	4.312	2.254

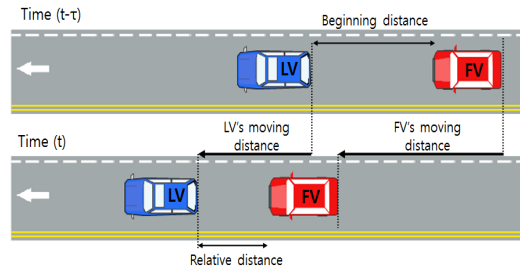
2. 노면 마찰계수에 따른 차량 주행행태 변화

본 연구에서는 기상상황에 따른 노면마찰계수와

차량의 속도에 따른 노면마찰계수의 변화를 고려하여 첨단차량 추종거동 차량의 주행행태 변화를 분석하고자 하였다. 첨단차량 추종거동 모형을 결정하는 주요 요소에는 후행차량의 속도, 차간거리 그리고 상대속도이다. 이러한 첨단차량 추종거동 모형 요소의 상관관계와 마찰계수 변화의 관계는 다음 <그림 2>와 같다.

3. 차간거리 산정

본 연구에서는 첨단차량 추종거동을 위한 차간거리 정보를 각 차량의 이동거리를 이용하였다. (t)



<그림 3> 차간거리 산정 개념도
<Fig 3> Conceptual diagram of relative distance calculation

시간에서의 두 차량의 차간거리를 다음 식(4)를 통해 도출하였다.

$$R_i(t) = R_i(t - \tau) + d_L(t) - d_F(t) \quad (4)$$

- $R_i(t)$: 시간(t)초에서의 차간거리
- $d_L(t)$: 시간(t)초에서 선행차량의 이동거리
- $d_F(t)$: 시간(t)초에서 후행차량의 이동거리
- τ : simulation interval (second)

IV. 기상상황에 따른 노면상태를 고려한 추종거동 모형 구축

1. 추종거동 모형 선정

본 연구에서는 논문고찰을 통해 GM계열 모형 중, 추종거동 모형의 성능 비교 결과, 가속도 예측

오차율이 적고 현재 가장 대중적으로 이용되는 GMIT 모형(GM Model with Instantaneous T)을 사용하였다[11]. GMIT 추종거동 모형은 다음 식 (5)와 같다.

$$a_F(t) = \alpha \frac{v_F(t)^m}{\Delta x(t-\tau)^l} \Delta v(t-\tau) \quad (5)$$

- $a_F(t)$: 시간(t)초에서 후행 차량의 가속도
- $v_F(t)$: 시간(t)초에서 후행 차량의 속도
- $\Delta v(t)$: 시간(t)초에서 차량의 상대 속도
- $\Delta x(t)$: 시간(t)초에서의 차간거리
- α : 운전자 민감도
- m, l : 모델 매개변수
- τ : 반응시간

여기서 α 는 추종거동에서 산출되는 가속도 전체에 영향을 미치는 민감도이며, m 과 l 은 각각 속도와 상대거리에 관여하는 매개변수다. 여기서 m 과 l 은 1보다 클 경우, 후행차량의 현재속도 및 차간거리 변화에 더 민감하게 반응하며, 1보다 작을 경우는 반대로 덜 민감하게 반응한다. 결국 이러한 민감도 및 매개변수는 추종차량의 가속도 크기에 영향을 미치며, 민감도 및 매개변수의 변화에 따라 추종거동의 주행행태는 달라진다[2, 11]. 본 연구에서는 노면상태 변화에 따른 첨단 차량 추종거동의 주행행태만을 분석하기 위해 민감도 및 매개변수의 변화를 고려하지 않았으며, 기존의 연구에서 제시된 parameter 값을 적용하였다. Prakash Ranjitkar(2005)의 연구에서 α , m 과 l 의 model parameter 값은 각각 0.62, 1.11, 1.01로 제시된 바 있다.

2. 기상상황에 따른 노면상태를 고려한 추종거동 모형 개선

노면상태별 차량이 감속할 때의 감속도는 식 (2)로부터 유도할 수 있다. 건조노면상태에서의 감속도는 $d(t) = \mu_d \times g$ 와 같이 나타낼 수 있으며, 노면상태 별 감속도는 $d_w(t) = \mu_w \times g$ 와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 g 는 상수 이므로 식을 정리하면,

$g = \frac{d(t)}{\mu_d} = \frac{d_w(t)}{\mu_w}$ 와 같다. 본 연구에서 기상상황 별 노면마찰계수 μ_w 는 <표 1>을 적용하였다. 따라서 기상상황 별 노면마찰계수를 고려한 감속도는 다음 식 (6)과 같다.

$$d_w(t) = d(t) \times \frac{\mu_w}{\mu_d} \quad (6)$$

- $d_w(t)$: 시간(t)초에서 기상상황 별 노면마찰계수를 고려한 차량의 감속도
- μ_w : 기상상황별 노면마찰계수
- μ_d : 건조 노면상태에서의 노면마찰계수

식 (6)에서, 습윤노면상태 및 적설노면상태에서 건조노면상태에서의 마찰계수 비가 고려되어 그 감속도가 마찰계수 비 만큼 줄어든다. 즉, $d(t)$ 는 차량이 제어하려는 감속도이고, 노면상태에 따라 실제 구현되는 감속도는 $d_w(t)$ 가 된다. 노면마찰계수를 고려한 차량의 감속도에 의해 GMIT 추종거동 모형 또한 변형된다. 따라서 본 연구에서는 건조 노면마찰계수와 기상상황 별 노면마찰계수의 비율을 고려하여 기상상황에 따른 노면상태 별 감속도를 산정하였다. 식 (6)에 의해 도출되는 기상상황에 따른 노면마찰계수를 고려한 후행차량의 가속도는 다음 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{if } a_w(t) < -\mu_w \times g \\ & \text{then } a_w(t) = -\mu_w \times g \\ & \text{else } a_w(t) = \alpha \frac{v_F(t)^m}{\Delta x(t-\tau)^l} \Delta v(t-\tau) \frac{\mu_w}{\mu_d} \end{aligned} \quad (7)$$

- $a_w(t)$: 시간(t)초에서 기상상황 별 노면마찰계수를 고려한 후행차량의 가속도
- g : 중력가속도

GMIT 추종거동 모형의 시뮬레이션 과정에서 후행차량의 감속도 값은 노면상태와 속도를 고려한 최대 감속도 값을 초과하는 경우가 발생하였다. 선

행차량이나 후행차량은 각 노면상태 별 최대 감속도를 초과할 수 없으므로 'if $a_w(t) \geq -\mu_w \times g$ ' 라는 조건을 두었다. 또한 기존의 GMIT 추종거동 모형에서 후행차량의 감속도를 기상상황에 따른 노면상태를 감안하기 위하여 노면상태별 마찰계수 비를 곱해 실제 노면습윤 상태나 노면적설 상태에서의 첨단차량 추종거동 시 후행차량의 주행행태 파악을 가능하게 하였다.

3. 시뮬레이션 수행 및 결과

1) 연구의 기본전제

본 연구는 실시간 V2V 통신을 통하여 추종차량의 속도 및 가속도, 선행차량과의 상대속도 및 차간거리 등 주행정보 교환이 가능하며, V2I 통신을 통해 도로의 노면상태를 파악할 수 있다고 가정하였다. 또한 첨단차량인 선행차량과 추종차량은 수집된 노면상태 및 차량 간 주행 정보를 기반으로, 개선된 추종거동 모형을 통하여 자동 차량제어를 한다고 가정하였다. 실시간으로 수집된 정보를 토대로 주행한다는 가정을 위하여 반응시간을 0.1초로 설정하였다.

2) 시뮬레이션 시나리오

본 연구에서는 첨단차량이 추종거동 시 기상상황이 주행행태에 미치는 영향을 분석하기 위하여 시나리오를 설정하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 시뮬레이션은 Matlab 7.1과 Micro office Excel 2007을 이용하여 수행하였다. 구축된 모형은 기상상황에 의한 노면상태를 건조, 습윤, 적설 상태인 세 가지 상황을 고려하였으며, 각 노면상태 별 속도 값에 따라 달라지는 노면마찰계수 값을 적용하였다.

시나리오는 <표 3>과 같이 설정하였다. 선행차량은 초기속도 70km/h로 주행하다가 최대감속도로 급제동하여, 최종적으로 7km/h의 속도로 감속하였다. 그리고 초기 차간거리는 100m이다.

<표 3> 시뮬레이션 시나리오
<Table 3> Simulation Scenario

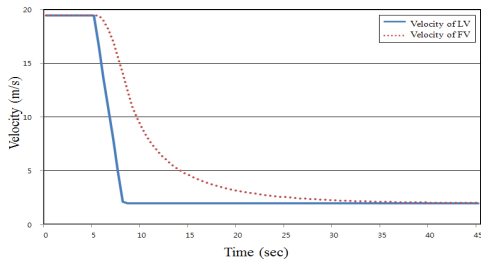
Simulation Data	Set Value
Simulation time	45s
Initial velocity of LV	70km/h
Initial velocity of FV	70km/h
Initial relative distance	100m
Final velocity of LV	7km/h
Reduction of velocity of LV	After 5 second

3) 시뮬레이션 결과

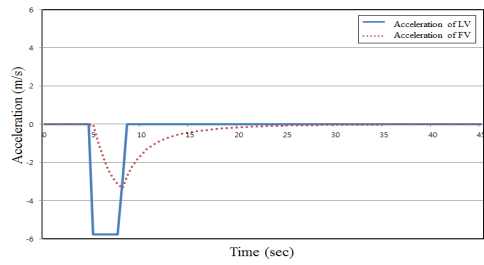
시뮬레이션 결과는 <그림 4~11>와 같으며 노면상태에 따라 차량의 속도 · 가속도 · 차간거리가 달라졌다. <그림 4, 6, 8>은 각 노면상태 별 선행차량과 후행차량의 속도 변화를 시간에 따라 나타낸 그래프이며, 이에 따른 가속도 변화는 <그림 5, 7, 9>과 같다.

<그림 5>를 살펴보면, 건조 노면상태에서 선행차량은 초기속도 70km/h에서의 최대 감속도(5.8m/s²)로 급제동 감속할 때 후행차량은 서서히 감속도를 변화시키면서 최대 3m/s²으로 감속하였다. 이 때 선행차량 감속도 대비 후행차량 감속도의 비율은 약 51.7%이다. 그리고 <그림 7>을 살펴보면, 습윤노면상태에서 선행차량이 최대 감속도(3m/s²)로 급제동 감속할 때 후행차량은 최대 2m/s²으로 감속하였다. 또한 <그림 9>는 적설노면상태에서의 선행차량과 후행차량의 가속도 변화를 나타낸 것이며, 선행차량이 최대 감속도2.3m/s²로 감속할 때 후행차량은 최대 1.9m/s²로 감속하였다. 습윤 노면상태 및 적설 노면상태에서의 선행차량 감속도 대비 후행차량 감속도의 크기 비율은 각각 66.7%, 81.8%이다.

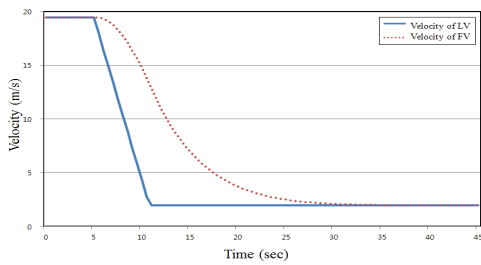
건조노면상태에 비해 습윤 및 적설노면상태에서 후행차량의 감속도는 선행차량의 최대 감속도에 가깝게 산출되었다. 이는 선행차량이 급제동으로 감속함에 따라 후행차량도 선행차량의 감속을 인지하여 감속을 시작한다. 하지만 마찰계수가 작은 노면상태에서 주행하기 때문에 후행차량은 충분한 감속을 하지 못하여 차간거리가 가까워짐에 따라 노면상태 별 최대 감속도에 가깝게 감속하는 것을 의미한다. 따라서 첨단차량 추종거동 모형에서도 노면상태에 따라 낮아지는 마찰계수에 의해 감속을 효



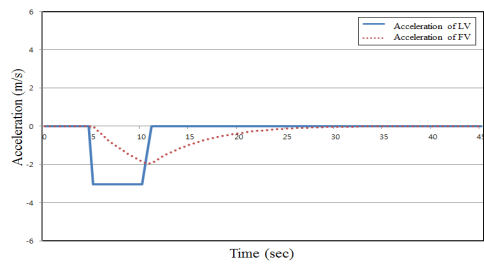
〈그림 4〉 건조노면 시 선·후행차량의 속도
 〈Fig 4〉 Velocity of LV / FV on dry road



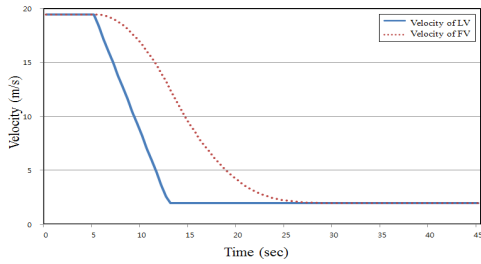
〈그림 5〉 건조노면 시 선·후행차량의 가속도
 〈Fig 5〉 Acceleration of LV / FV on dry road



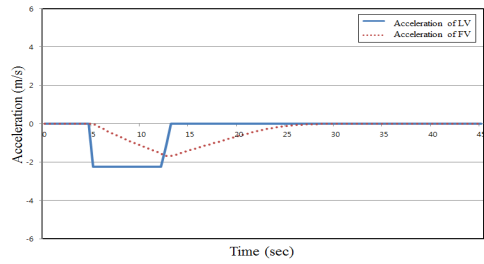
〈그림 6〉 습윤노면 시 선·후행차량의 속도
 〈Fig 6〉 Velocity of LV / FV on wet road



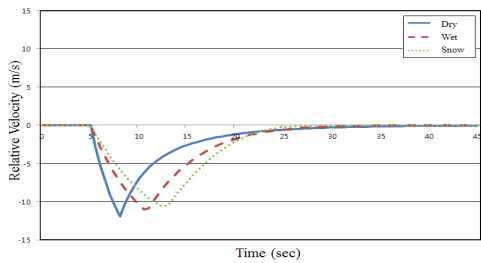
〈그림 7〉 습윤노면 시 선·후행차량의 가속도
 〈Fig 7〉 Acceleration of LV / FV on wet road



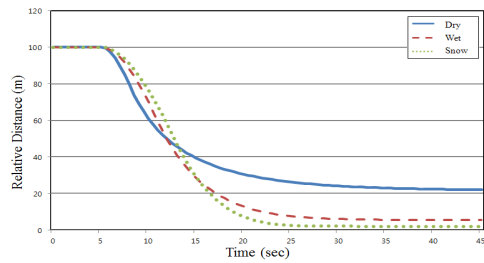
〈그림 8〉 적설노면 시 선·후행차량의 속도
 〈Fig 8〉 Velocity of LV / FV on snowy road



〈그림 9〉 적설노면 시 선·후행차량의 가속도
 〈Fig 9〉 Acceleration of LV / FV on snowy road



〈그림 10〉 건조·습윤·적설 노면상태의 상대 속도
 〈Fig 10〉 Relative velocity of dry, wet, snowy road



〈그림 11〉 건조·습윤·적설 노면상태의 상대 거리
 〈Fig 11〉 Relative distance of dry, wet, snowy road

울적으로 할 수 없다는 것을 나타낸다. 이러한 노면 상태에 따른 차량 주행행태의 변화는 상대속도와 상대거리 그래프 <그림 10, 11>에서 더욱 잘 드러난다.

<그림 10>은 각 노면상태 별 선행차량과 후행차량의 상대속도를 나타낸 그래프이며, 상대속도가 줄어드는 시간 t 는 건조노면 상태의 경우 8초, 습윤 노면 상태의 경우 11초, 적설노면 상태의 경우 13초가 소요되었다.

<그림 11>은 각 노면상태 별 선행차량과 후행차량의 차간거리를 나타낸 그래프이다. 건조 노면상태와 습윤 노면상태에서의 최종 차간거리는 각각 22m, 5m가 산출되었다. 습윤 노면상태에서의 차간거리는 건조노면상태에 비해 약 77.3% 감소되었다. 또한 적설 노면 상태에서 차간거리는 2m가 산출되었으며, 건조노면상태에 비해 차간거리가 약 90.1% 감소하였다.

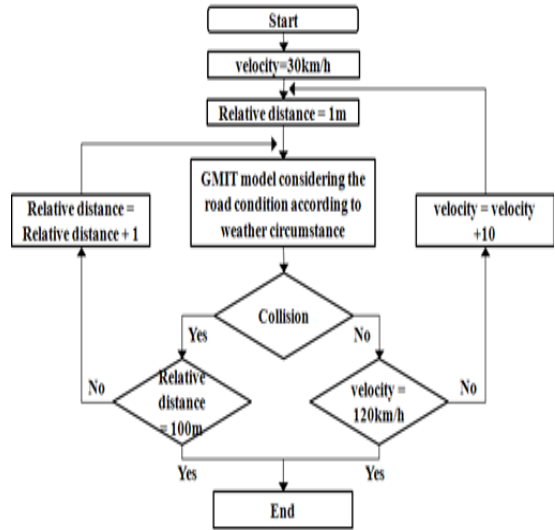
이와 같이 첨단차량 추종거동 시에도 노면상태에 따라 차간거리는 변화함을 알 수 있다. 노면상태에 따라 변화하는 차간거리로 인하여 안전성에 문제가 있다고 사료됨에 따라 본 연구에서는 노면상태별 최적안전거리를 산정하였다.

4. 노면상태별 최적안전거리 산정

본 연구에서는 앞서 구축된 기상상황에 따른 노면상태를 고려한 추종거동 모형을 통해 노면상태별 안전거리를 산출하였다. 이 때 선행차량은 일정 속도로 주행하다가 급제동을 하여 정지하고 후행차량은 식 (7)의 추종거동 모형을 통해 주행한다고 가정하였다.

건조노면상태와 습윤 노면상태의 선행차량과 후행차량 초기 속도는 30km/h ~ 120km/h 까지 10km/h 간격으로 나누었다. 적설노면상태의 경우 노면마찰계수 값이 70km/h 까지 산정되어있기 때문에 30km/h ~ 70km/h 까지 10km/h 간격으로 나누었다. 각 속도별 노면상태별 최적안전거리를 산정하기 위해 <그림 12>의 알고리즘을 이용하였다[2].

이 때 최적안전거리는 알고리즘에서 차간간격이 0m 가 나오면 충돌하게 설정하였으며 만약 충돌할



<그림 12> 속도별 최적안전거리 산정 알고리즘
<Fig 12> Algorithm of estimating optimal safety distance by velocity

<표 4> 속도 및 노면상태별 최적안전거리
<Table 4> optimal safety distance by velocity and road conditions

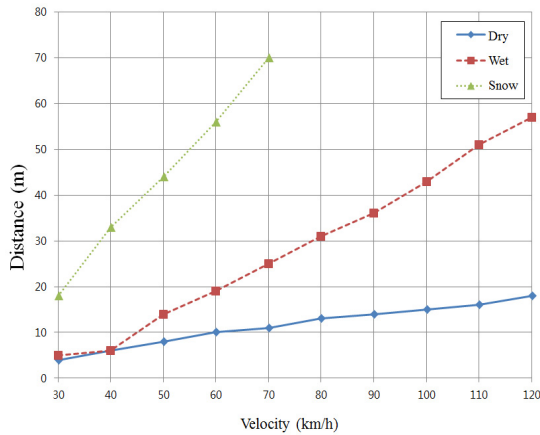
Velocity	Dry road	Wet road	Snow road
120km/h	18 m	57 m	-
110km/h	16 m	51 m	-
100km/h	15 m	43 m	-
90km/h	14 m	36 m	-
80km/h	13 m	31 m	-
70km/h	11 m	25 m	70 m
60km/h	10 m	19 m	56 m
50km/h	8 m	14 m	44 m
40km/h	6 m	6 m	33 m
30km/h	4 m	5 m	18 m

경우, 최대 차간거리 100m가 될 때 까지 1m 씩 증가하게 하였다. 그리고 충돌하지 않을 경우에는 속도 값이 120km/h가 될 때 까지 10km/h씩 증가하게 하여 속도 별 최적안전거리를 산정하였다.

<그림 12>의 알고리즘을 통해 산출된 속도 및 노면상태 별 최적안전거리는 다음 <표 4>와 같이 도출되었으며, <그림 13>은 최적안전거리를 그래프로 표현한 것이다.

<표 4>를 살펴보면, 선행차량과 후행차량의 초기 속도가 높을수록 차간 최적 안전거리가 높게 나온다. 건조노면 상태의 경우, 초기 속도 30km/h에서의 차간거리는 4m이며 초기 속도 120km/h에서의 차간거리는 18m로 산정되었다. 또한 노면상태에 따라 차간 최적 안전거리가 달리 산정되었다.

70km/h를 기준으로 건조 · 습윤 · 적설 노면상태에서의 최적안전거리는 각각 11m, 25m, 70m가 산정되었으며, 50km/h 기준에서의 각 최적안전거리는 8m, 14m, 44m가 산정 되었다. 건조노면상태에 비해 습윤 노면상태에서의 최적안전거리는 평균 1.7배 증가하였으며, 적설 노면상태에서의 최적안전거리는 평균 5.6배 증가하였다.



(그림 13) 속도-최적안전거리 그래프
(Fig 13) Graph of velocity-optimal safety distance

V. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 첨단제어차량분야에서 기초 시스템이라고 할 수 있는 추종거동 시스템을 여러 가지 기상상황에 따라 노면상태를 고려하여 추종거동 모형을 구축하였으며, 구축된 모형을 이용하여 각 상황별로 비교 및 분석 하였다. 즉, 논문고찰을 통해 추종거동 모델 중 가장 대중적이고 우수하다고 판단된 GMT 모형틀을 기반으로, 기상상황에 따라 3가지 노면상태(건조 노면상태, 습윤 노면상태, 적설 노면상태)로 나누어진 각각의 기상상황 별 노면마찰계

수 값을 적용한 추종거동 모형을 통해 노면상태 및 속도에 따라 변화하는 주행행태를 분석하였다.

먼저 70km/h의 속도에서 선행차량이 급제동하여 7km/h의 속도로 주행할 경우를 분석하였다. 분석 결과, 적설 · 습윤 · 건조 노면 순으로 선행차량과 후행차량의 최종차간거리가 길게 나타났다. 이러한 분석을 토대로, 습윤 노면상태나 적설 노면상태에서 기 첨단차량 추종거동 시스템을 이용하였을 경우, 시간에 따른 차간거리가 지나치게 줄어들어 안전거리에 심각한 문제가 발생할 것으로 사료되어 각 노면상태 및 속도 별 최적안전거리를 산출하였다. 산출 결과, 습윤노면상태에서의 최적안전거리는 건조노면상태에 비해 약 1.7배 늘어났으며, 적설노면상태에서의 최적안전거리는 건조노면상태에 비해 약 5.6배가 늘어났다. 따라서 첨단차량 추종거동이라도 노면상태에 따라 주행행태에 많은 변화가 있음을 알 수 있었다.

그러나 현재 첨단차량 추종거동 행태를 모사하기 위한 보편적인 모형은 없는 상태이며, 이에 따라 본 연구에서는 Human driving 추종행태를 모사하는 GMT 모형을 적용한 한계성을 내포하고 있다. 그리고 기상상황에 따라 노면상태는 다양하게 분류되며 마찰계수도 다양한 값을 가지지만, 본 연구에서는 기상상황에 따른 노면상태를 3가지로 분류된 상태만을 고려한 한계점이 있다. 따라서 향후 다양한 노면상태에 따른 마찰계수 및 외부 요소들을 고려한다면 다이나믹한 추종거동이 가능할 것으로 판단 된다. 또한 본 연구에서는 시나리오 가정 하의 시뮬레이션 수행만을 기반으로 하였으므로 현장실험을 통한 검증이 필요하다. 그러므로 이러한 한계점을 극복하기 위해 실제 도로상에서의 여러 가지 변수들을 고려한 연구가 수반되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] H. J. Park, "Development of car following model of adaptive cruise controlled vehicle considering human factors in ubiquitous traffic," Master Dissertation, Pukyong national university, 2008.

- [2] S. H. Bae, "Optimal safety spacing for the car following of adaptive cruise controlled vehicle," Korean society of civil engineers, vol. 27, no. 1D, pp.1-7, Jan. 2007.
- [3] H. J. Jung, "Development of integrated simulation model for intelligent vehicle control under ubiquitous computing environment," Master Dissertation, Pukyong national university, 2006.
- [4] J. H. Lee, H. J. Cho, "A study on the characters of traffic accidents in the foul weather according to weather condition," The 30th KSCE Annual Conference, pp.3867-3870, Gangwon Province, Korea, Oct. 2004.
- [5] Y. I. Lee, S. S. Choi, "Estimation of a car- following model for microscopic simulation model based on GM 5th model," Korean society of transportation, vol. 18, no. 6, pp.47-61, Dec. 2000.
- [6] B. S. Cheon, Road engineering, Sae-ron(새론), 2nd ED., pp.132-136, 1998.
- [7] Paul A. Tipler, Physics, ChungMoonGak, 4th ED., pp.81-86, 1999.
- [8] C. W. Do, The principles of transportation engineering(1st volume), ChungMoonGak, 3rd ED., pp.25-33, 2009.
- [9] Ibrahim, A. T, Hall, F.L, "Effect of adverse weather conditions on speed - occupancy relationships," Transportation Research Board, vol. 1457, pp.184-191, 1994.
- [10] Michael Kyte, Zaher Khatib, Patrick Shannon, and Fred Kitchener, "Effect of environmental factors on free-flow speed," Transportation Research Circular presented at the Fourth National Symposium on Hightway Capacity, pp.108-119, Maui, Hawaii, pp.108-119, June. 2000.
- [11] Prakash Ranjitkar, "Experimental analysis of car following dynamics and traffic stability," Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, vol. 1934, pp.22-32, 2005.
- [12] Vincenzo Punzo, Fulvio Simonelli, "Analysis and Comparison of Microscopic Traffic Flow Models with Real Traffic Microscopic Data," Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, vol. 1934, pp.53-63, 2005.
- [13] Kaveh Bevrani, Edwaad Chung, Marc Miska, "Evaluation of the GHR car following model for traffic safety studies," In Proceedings of the 25th ARRB Conference. ARRB Group Ltd, pp.1-11, Perth, W. Australia, Sep. 2012.
- [14] Henry, J.J., "Evaluation of Pavement Friction Characteristics," NCHRP Synthesis 291, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C. 2000.
- [15] Al-Qadi, I.L., Loulizi, A., Flintsch, G.W., Roosevelt, D.S., Decker, R., Wambold, J.C. & Nixon, W.A., "Feasibility of Using Friction Indicators to Improve Winter Maintenance Operations and Mobility", Transportation Research Voard of the National Academies, NCHRP(National Cooperative Highway Research Program) Web Document 53 (Project 6-14) : Contractor's Final Report., 2002.
- [16] Helsinki, "Winter maintenance policy", Finnish Road Administration, 2008.

저자소개



김 태 욱 (Kim, Tae-Uk)

2013년 부경대학교 대학원 석사과정 공간정보시스템공학과 ITS 연구실
e-mail : tukim0403@gmail.com



배 상 훈 (Bae, Sanghoon)

1995년 미국 Virginia Tech. 박사
2002년 한국교통연구원 ITS 팀장
현재 부경대학교 부교수(공간정보시스템공학과)
e-mail : sbae@pknu.ac.kr