

GM모형을 이용한 철도건널목 차량추종모형의 정립

Establishment of a Car-following Model at Railroad Crossing By Using GM Model

강 중 구 박 호 진 엄 광 태 이 영 인
 (서울시립대, 석사과정) (서울시립대, 석사과정) (서울시립대, 석사과정) (서울시립대, 교수)

목 차

I. 서론	IV. 철도건널목 차량추종모형의 Prototype 구축
II. 문헌고찰	V. 결론
III. 철도건널목 진입차량의 행태 분석	참고문헌

I. 서론

1. 연구의 목적

철도건널목 통과차량의 통행 특성은 철도건널목의 안전 표지판, 차단기, 철로 등의 교통통제 시설에 의해 제약을 받는다. 철도건널목 통과 교통류는 단속류의 특성을 보이나, 신호등에 의해 통제되는 신호등 가로의 통과 교통류와는 다른 통행특성을 나타낸다. 철도 건널목 통제시설의 교통통제 효과는 철도 진입속도의 감소 등의 결과를 나타낸다. 따라서 철도건널목 통과차량의 통행행태를 미시적으로 분석하기 위하여 요구되는 미시적 시뮬레이터에는 철도건널목 통과차량의 통행 특성을 반영할 수 있는 차량추종모형의 구축이 요구된다 하겠다.

II. 문헌고찰

본 연구에서는 철도건널목에서 운전자의 가속행태를 유도하는 모형은 차량추종상황을 모형화한 차량추종모형과 자유속도상황에 모두 적용 가능한 일반 가속모형으로 구분할 수 있다. 운전자의 가속행태, 특히 차량추종모형의 경우 1950년대 이후로 폭넓은 연구가 수행되었다. 그러나 대부분의 경우 실측자료, 즉 추종차량의 속도, 선두차량의 속도, 차두간격, 추종차량의 가속도 등을 이용하지 않았고, 단순한 상관분석(correlation analysis)을 이용하여 모형을 추정하였다. 자유속도상황에 대한 연구는 1980년대 교통행태를 연구하고 교통제어와 관리전략을 개발 및 평가하는데 있어서 미시적 시뮬레이션이 유용한 도구로 등장하면서 진행되기 시작하였다. General Motor(GM) 모형은 일본의 Kometani와 Sasaki, Institute for Research의 Forbes, 그리

고 General Motor사의 연구원들이 차량추종이론에 많은 기여를 했다. GM사의 연구는 현장실험을 수행하였고 미시적 교통류 이론과 거시적 교통류이론 사이의 수학적 관계를 발견했다는 면에서 특히 중요하다.

III. 철도건널목 진입차량의 행태 분석

1. 자료수집

철도건널목의 교통소통상황을 통과교통량이 많은 지역과 통과교통량이 적은 지역으로 구분하여 각각의 통행특성 및 주행 특성을 분석하였다. 조사지역은 50km/h의 속도를 기준으로 삼았으며, 이를 기준으로 50km/h 이상은 교통소통이 원활한 교통량이 적은 지역과 50km/h 이하는 교통량이 많아 교통소통이 다소 원만하지 못한 지역으로 대상지역으로 조사지점을 선정하였다. 열차통과 횟수는 천안시 나사렛대학 앞(사레지역1)의 경우 시간당 3대꼴로 통과하며 조사지점/일시 및 현장특성은 <표 3-1>과 같고, 의정부시 경인대학교 앞(사레지역2)는 하루에 3번 통과하여 사례 1과는 대조를 보였다. 조사지점/일시 및 현장특성은 <표3-2>와 같다.

<표 3-1> 조사지점/일시 및 현장특성

	사레지역1(교통량이 적은 지역)	비고
조사장소	천안시 나사렛 대학앞 철도 건널목	
조사일시	2001년 4월 30일 오전 7시50분부터 오후12:30	
차 료 수	양방향 2차로(4차로)	
통과교통량	평균 414대/시간	
정상주행속도	55~60km/h	
분석대상 및 열차 통과시간	분석대상	열차통과시간
	① 나사렛대학→진입로(1차로)	AM 9:27
	② 나사렛대학→진입로(2차로)	AM 9:27
	③ 진입로→나사렛대학(1차로)	AM 9:27
피크시간대	오전8시~오전 9시	
조사방법	Video촬영(3대 분할촬영)	

〈표 3-2〉 조사지점/일시 및 현장특성

		사래지역2(교통량이 많은지역)	비고
조사장소	의정부시 가농3동 경민대학교 앞 (송추→동두천방향)		
조사일시	①	2001년 7월20일 12:00~20:00	
	②	2001년 7월24일 12:00~20:00	
	③	2001년 7월25일 12:00~20:00	
차로 수	일방향 2차로		
통과교통량	평균 1213대/시간		
정상주행속도	30~35km/h		
분석대상 및 열차 통과시간	분석대상		열차통과 (3대/일)
	① 송추→동두천방면(1차로)	7월20일 AM 12:02	
	② 송추→동두천방면(1차로)	7월20일 PM 3:01	
	③ 송추→동두천방면(1차로)	7월24일 PM 2:58	
	④ 송추→동두천방면(2차로)	7월24일 PM 2:57	
	⑤ 송추→동두천방면(1차로)	7월25일 PM 5:42	
피크시간대	시간대에 관계없이 꾸준한 통과교통량을 유지		
조사방법	Video촬영(3대분할촬영)		

2. 자료분석

1) 자료수집 및 분석 방법

철도건널목을 통과하는 차량의 행태분석을 위한 사전작업으로서의 자료수집 방법으로는 30frame/초의 Video 개별차량의 통과지점과 통과 시간자료를 수집하였다. 이를 다시 1/100초로 환산한 후 수집된 자료를 이용하여 개별차량의 순간주행속도 및 가속도 자료를 분석하였다.

2) 분석자료의 구분

철도건널목을 통과하는 각 개별차량을 다음의 5가지 그룹으로 구분하였다. 다음의 5가지 유형의 경우 진행하는 차량의 특성은 서로 상이하다.

- group1 : (정상시 주행차량) 차단기가 교통류를 차단하기 전에 건널목을 통과하는 차량그룹 (약 30대)
- group2 : (정지차량) 열차를 통과시키기 위하여 정지선에 정지하는 차량 (약 5-7대)
- group3 : (출발차량) 열차 통과 후 정지선에서 출발하는 차량 (약 5-7대)
- group4 : (대기연장차량) 열차가 통과한 후 그룹2의 후미에 도달하여 대기한 후 출발하는 차량 (약 1-2대)
- group5 : (철도통과 후 통과차량) 철도가 통과 한 후 철도건널목을 통과하는 차량 (약 2대)

철도건널목을 진입/통과하는 개별차량에 대한 행태 및 특성을 분석하면 대상지역으로 교통량이 많은 지역과 적은 지역으로 구분하여 현장조사를 실시, 자료를 분석하였다. 철도건널목에 진입/통과하는 차량을 정상주행 및 정지/출발상황 등의 5개 차량군으로 분류하였다.

3. 분석결과

철도건널목에 정지하지 않는 차량은 철도건널목의 안전시설물에 거의 영향을 받지 않으며, 일반가도에서의 차량 주행상태와 비슷한 행태를 나타내었다. 분석한 결과 분석대상에 따라 각기 다른 행태를 보임을 알 수 있었다.

〈표 3-3〉 분석결과

	사래지역1 천안시 나사렛 대학 앞	사래지역2 의정부시 경민대학교 앞
통과교통량	평균 414대/시간	평균 1213대/시간
정상주행속도	55~60km/h	30~40km/h
정상주행차량 (Group1)	• 통과속도 (진입구간) : 30~35km/h (하류구간) : 32~34km/h	• 통과속도 (진입구간) : 50~65km/h (하류구간) : 55~60km/h
정지/출발차량 (Group2)	• 통과속도 (진입구간) : 18~25km/h (하류구간) : 20~25km/h	• 통과속도 (진입구간) : 20~30km/h (하류구간) : 30~35km/h
정지/출발차량의 정지시 최대가속도	-1.84~-4.54m/sec ²	-3.58~-4.5m/sec ²
정지/출발차량의 출발시 최대가속도	2.20~4.07m/sec ²	3.16~4.52m/sec ²
대기차량의 평균 space headway	5.6m/대 (대기차량수 5~7대)	8.3m/대 (대기차량수 6~8대)
평균차두거리 (초)	-	2.086초
포화교통류율 (saturation flow rate)	-	1690~2086veh/hr

IV. 철도건널목 Car-following 모형의 Prototype 구축

1. 철도건널목 차량추종모형의 구축

일반가속모형은 차량이 처할 수 있는 상황을 자유속도상황과 차량추종상황으로 구분하여 적용한다. 그러나 본 연구에서는 자유속도상황에 대한 연구는 수행하지 않으며 차량추종모형을 가속상황, 감속상황, 출발상황, 그리고 정지상황으로 구분하여 모형을 구축하였다.

1) 모형구축

차량추종모형을 구성하기 위한 기본 모형은 다음과 같이 표현된다. 본 연구의 기본모형은 아래 식으로 표현되는데, 기본모형은 GM 모형의 민감도요소 중에서 속도부분을 시점 t 와 시점 $t + \Delta t$ 로 구분하며, 자극은 먹지수 n이 비선형으로 가정하여 모형을 추정하였다.

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = \alpha \frac{[v_{n+1}(t+\Delta t) \text{ or } v_{n+1}(t)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [v_n(t) - v_{n+1}(t)]^n$$

- $a_{n+1}(t+\Delta t)$ = 반응시간 후 후행차 가속도
- Δt = 반응시간
- l, m, n, α = 모형 파라미터
- $v_n(t)$ = 시간 t에서 선행차량 속도
- $v_{n+1}(t)$ = 시간 t에서 후행차량 속도
- $v_{n+1}(t+\Delta t)$ = 반응시간 후 후행차 속도
- $x_n(t) - x_{n+1}(t)$ = 차두간격

본 연구에서는 각 모형의 4개의 파라미터를 추정하기 위하여 다중회귀모형을 적용하였으며, 이를 위해서 GM 5번째 모형 양변에 자연로그를 취함으로써 선형화하였다. 이렇게 모형을 선형화하여 앞서 설명한 차량추종모형의 각 상황마다 4개의 파라미터를 추정한다. 결국 각 회귀계수를 계산함으로써 모형의 4개의 파라미터를 추정할 수 있다. 가속모형의 파라미터를 추정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 가장 단순한 다중회귀모형을 이용한다. 위에서 설명한 가속상황과 감속상황에 대한 차량추종모형을 실측자료를 통하여 추정하였다. 그리고 출발상황과 정지상황은 추정된 감속상황의 모형을 이용하여 구성하였다.

$$\ln(a_{n+1}(t+\Delta t)) = \ln(\alpha) + m \ln(v_{n+1}(t+\Delta t)) + l \ln(x_n(t) - x_{n+1}(t)) + n \ln(v_n(t) - v_{n+1}(t))$$

① 가속상황의 모형 구축

모형의 추정에 사용된 292개의 관측자료의 형태는 <표 4-1>과 같다. <표 4-2>는 가속상황에서 추출한 데이터를 다중회귀분석을 통해 구한 결과이다. 가속상황의 GM 5번째 모형은 R²값이 0.518로서 나타났다.

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = 0.021 \frac{[v_{n+1}(t+\Delta t) \text{ or } v_{n+1}(t)]^{2.867}}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^{-0.825}} [v_n(t) - v_{n+1}(t)]^{0.482}$$

<표 4-1> 가속상황 추정에 이용된 자료형태

독립변수 관측 수	후행차량의 가속도 (m/sec ²)	상대속도 (m/sec)	선행차량과 후행차량의 거리차 (m)	후행차량의 속도 (m/sec)
1	0.060	0.517	8.753	4.446
2	0.135	0.539	9.230	4.526
3	0.250	0.527	10.099	4.771
4	0.374	0.451	11.142	5.198
5	0.484	0.330	12.084	5.717
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
292	0.360	0.940	14.872	6.066

<표 4-2> 가속상황 차량추종모형추정에 이용된 자료통계

	Parameter	표준오차	t 통계량
Y 값	0.021	0.529	-7.275
속도차	0.482	0.072	6.66
거리차	-0.825	0.171	-4.815
후행차량의 속도	2.867	0.175	16.316
R ²	0.518		
표준오차	0.704		
관측수	292		

② 감속상황의 모형 구축

모형의 추정에 사용된 276개의 관측자료의 형태는 <표 4-3>과 같다. <표 4-4>는 감속상황에서 추출한 데이터를 다중회귀분석을 통해 구한 결과이다. 감속상황의 GM 5번째 모형은 R²값이 0.781의 값을 얻었다.

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = 0.068 \frac{[v_{n+1}(t+\Delta t) \text{ or } v_{n+1}(t)]^{1.519}}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^{-0.307}} [v_n(t) - v_{n+1}(t)]^{0.228}$$

<표 4-3> 감속상황 추정에 이용된 자료형태

독립변수 관측 수	후행차량의 가속도 (m/sec ²)	상대속도 (m/sec)	선행차량과 후행차량의 거리차 (m)	후행차량의 속도 (m/sec)
1	-0.865	-1.720	16.376	8.552
2	-0.798	-1.439	14.584	7.945
3	-0.705	-1.075	12.471	7.170
4	-0.653	-0.890	11.498	6.783
5	-0.579	-0.643	10.329	6.278
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
292	0.360	0.940	14.872	6.066

<표 4-4> 감속상황 차량추종모형추정에 이용된 자료통계

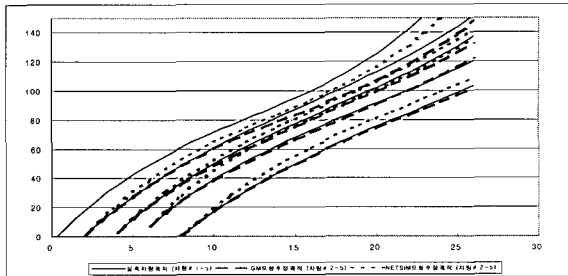
	Parameter	표준오차	t 통계량
Y 값	0.068	0.131	-20.287
속도차	0.228	0.018	12.053
거리차	-0.307	0.07	-4.366
후행차량의 속도	1.519	0.069	22.003
R ²	0.781		
표준오차	0.31		
관측수	276		

2. 모형결과 분석

본 절에서는 구축된 GM 5번째 차량추종모형과 NETSIM모형의 현장 적용성을 실측자료와 비교하여 분석하였다. 모형의 적용성은 대상지역 2(의정부시 경민대학교 앞 철도건널목)에서 7월 20일 12시 2분 1차선에서 수집한 연속된 5대의 차량 궤적자료를 이용하여 분석하였다. <표 4-5>는 선두차량을 추종하는 2-5번째 차량의 실측치와 GM 모형 추정치, NETSIM 모형 추정치를 나타낸 것이다. <그림 4-1>은 선두차량을 추종하는 2~5번째 차량의 실측치와 GM 모형 추정치, NETSIM모형 추정치를 그래프로 나타낸 것이다.

〈표 4-5〉 GM모형 및 NETSIM모형의 적용 결과

구분	시간 (초)	거리 (m)	1	2	3	4	5	6	.....	23
			선두 차량	실측자료	2.95	10.21	16.98	23.32	29.28	34.92	.....		135.82
차량2	실측자료			2.19	10.62	18.25	25.17	.....		120.92
	GM 추정치			2.19	10.61	18.15	24.91	.....		121.27
	NETSIM 추정치			2.19	10.81	18.71	25.77	.....		124.93
차량3	실측자료				-10.06	-1.14	7.03	.....		97.35
	GM 추정치				-10.06	-1.15	6.97	.....		94.15
	NETSIM 추정치				-10.06	0.04	10.24	.....		110.30
차량4	실측자료							.....		88.31
	GM 추정치							.....		87.47
	NETSIM 추정치							.....		89.94
차량5	차량5							.....		72.29
	GM 추정치							.....		71.82
	NETSIM 추정치							.....		81.55



〈그림 4-1〉 실측치와 예측치의 비교

카이제곱 검정결과는 〈표 4-6〉과 〈표 4-7〉에 나타나 있다. 이를 보면, 시간~거리에 따른 카이제곱 검정은 GM 모형과 NETSIM 모형 모두에서 유의수준 5%에서 철도건널목을 정상 주행하는 차량의 실측치 거리와 예측치 거리가 차이가 없다고 나타났다. 따라서 카이제곱 검정결과로 볼 때 파라미터가 추정된 GM모형과 NETSIM 모형 둘 다 철도건널목을 정상주행하는 차량추종모형에 적합한 모형이라고 판단된다.

〈표 4-6〉 X² 테스트 (7월20일 12시2분 1차선)

관측수	실측치 (e)	GM 모형 (o)	(o-e)	(o-e) ²	(o-e) ² /e	NETSIM (o)	(o-e)	(o-e) ²	(o-e) ² /e
1	9.152	9.144	-0.007	0.00	0.00	9.947	0.795	0.632	0.069
2	10.336	10.327	-0.009	0.00	0.00	11.207	0.871	0.759	0.073
3	12.489	12.479	-0.010	0.00	0.00	12.880	0.391	0.153	0.012
4	16.160	16.152	-0.009	0.00	0.00	17.437	1.276	1.629	1.101
5	17.130	17.096	-0.034	0.001	0.00	19.335	2.205	4.861	0.284
...
84	151.275	147.247	-4.028	16.226	0.17	171.849	20.574	423.295	2.798

〈표 4-7〉 실측치와 추정치의 카이제곱검정결과

	카이제곱값 (X ²)	자유도 (df)	카이제곱 검정량	검정 결과
GM 모형	105.267	83	4.496	차이가 없음
NETSIM모형	105.267	83	39.981	차이가 없음

4. 철도건널목 차량추종모형의 제안

본 연구의 결과 철도건널목 통과차량의 시뮬레이터 개발에 적용될 수 있는 차량추종모형으로서 현장자료를 토대로 구축된 GM 5th 모형이 적용 가능할 것으로 판단된다. 따라서 철도건널목 통과차량의 시뮬레이터 개발에 적용될 수 있는 차량추종모형의 모형식을 다음과 같이 제안한다.

가속모형 :

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = \frac{[v_{n+1}(t+\Delta t)]^{2.867}}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^{-0.825} [v_n(t) - x_{n+1}(t)]^{0.482}}$$

감속모형 :

$$a_{n+1}(t+\Delta t) = 0.068 \frac{[v_{n+1}(t+\Delta t)]^{1.519}}{[x_n(t+\Delta t) - x_{n+1}(t)]^{-0.307} [v_n(t) - v_{n+1}(t)]^{0.228}}$$

$a_{n+1}(t+\Delta t)$: 반응시간 후의 후행차량 가속도

Δt : 반응시간

$v_n(t)$: 시간 t에서 선행차량 속도

$v_{n-1}(t)$: 시간 t에서 후행차량 속도

$v_{n-1}(t+\Delta t)$: 반응시간 후의 후행차량 속도

$x_n(t) - x_{n-1}(t)$: 차두간격

V. 결론

본 연구에서 철도건널목 차량추종 모형의 구축결과 현장자료를 토대로 구축된 GM 5th 모형과 NETSIM 모형의 차량추종모형을 철도건널목 통과차량의 시뮬레이터 개발에 적용될 수 있는 차량추종모형으로서 제안하였다. GM 모형은 운전자 행태를 잘 반영할 수 있다는 장점에도 불구하고 모형을 정밀하게 구축하기 위해서는 다양한 교통상황에서의 현장자료를 토대로 모형 파라미터를 추정해야 한다는 한계를 가지고 있다. 따라서 미시적 시뮬레이터를 활용하여 다양한 운전성향을 가진 운전자의 차량추종 상황을 분석하기 위해서는 본 연구 결과를 토대로 운전행태와 교통류 이론을 접목시킬 수 있는 차량추종모형에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 신치현 외, 1994, "연속류 도로의 한국형의 실험 프로그램 개발(I)"
- [2] 최대순 외, 1995, 1996 "연속류 도로의 한국형 모의 실험 프로그램개발(II)(III)" 한국건설기술연구원, 서울
- [3] 이영인 외, "미시적 시뮬레이션 모형을 위한 차량추종모형의 정립" 대한교통학회지 제18권 제6호, pp.47-61, 2000년