

레이더/카메라 센서융합을 이용한 전방차량 충돌경보 시스템

문승욱* · 문일기** · 신광근**

Forward Collision Warning System based on Radar driven Fusion with Camera

Seungwuk Moon*, Il Ki Moon**, Kwangkeun Shin**

Key Words : forward collision warning, sensor fusion, radar, camera

ABSTRACT

This paper describes a Forward Collision Warning (FCW) system based on the radar driven fusion with camera. The objective of FCW system is to provide an appropriate alert with satisfying the evaluation scenarios of US-NCAP and a driver acceptance. For this purpose, this paper proposed a data fusion algorithm and a collision warning algorithm. The data fusion algorithm generates information of fusion target depending on the confidence of camera sensor. The collision warning algorithm calculates indexes and determines an appropriate alert-timing by using analysis results of manual driving data. The FCW system with the proposed data fusion and collision warning algorithm was investigated via scenarios of US-NCAP and a real-road driving. It is shown that the proposed FCW system can improve the accuracy of an alarm-timing and reduce the false alarm in real roads.

1. 서론

최근에 이르러 미국과 유럽에서 운전자 편의 및 능동안전에 대한 신차평가 프로그램(NCAP, New Car Assessment Program)이 강화되고 있어 전방충돌 예방장치에 대한 관심이 대두되고 있다. 미국에서는 2009년부터 신차평가 프로그램에 전방차량 충돌경보 시스템을 반영하고 있으며¹⁾, 유럽에서는 2014년부터 신차평가 프로그램에 자동 긴급제동(Autonomous Emergency Braking) 시스템을 반영하는 것으로 알려지고 있다. 이러한 장치 중의 하나인 FCW 시스템은 선행차량과 충돌위험이 예상되는 경우 경보를 제공하여 운전자가 충돌을 사전에 예방할 수 있도록 해주는

장치이다. 현재 FCW 시스템은 전방의 물체를 검지할 수 있는 레이더와 카메라를 이용하여 구현되고 있다. 레이더는 스마트 크루즈 컨트롤(Smart Cruise Control) 시스템에 주로 사용되는 센서로서 선행차량과의 상대속도와 상대거리, 등을 측정할 수 있기 때문에 FCW 시스템에 활용될 수 있다.^{4,6)} 카메라는 차선을 검지할 수 있기 때문에 차선이탈 및 차선유지시스템에 주로 사용되었으나 전방차량 인식기능이 추가되면서 FCW 시스템에 활용될 수 있다. 운전자 지원과 능동안전에 대한 사회적인 요구가 증대됨에 따라 향후 레이더와 카메라의 장착비율이 늘어날 것으로 전망되며, 레이더와 카메라가 모두 장착된 경우 충돌예방 장치의 성능이 향상될 것으로 기대된다. 이러한 맥락에서 본 논문에서는 전방충돌 경보기능을 향상시키기 위해 레이더/카메라 센서융합에 기반한 FCW 시스템을 제안하였다. "track-to-track" 기반의 센서융합 기법²⁾을 적

* 현대모비스

** 현대모비스

E-mail : moonsw@mobis.co.kr

용하고, 운전자 주행데이터 분석결과를 활용하여 경보 알고리즘의 파라미터를 설정하였다. 이와 같은 방법으로 개발된 센서융합 기반 FCW 시스템은 US-NCAP의 FCW 평가 시나리오와 공로주행을 통해 성능을 검증하였다.

2. 센서융합 기반 데이터 처리

본 논문에서는 레이더를 중점적으로 사용하고, 카메라를 보조적으로 사용하는 방식의 센서융합 기법을 적용하였다. 레이더는 비교적 외부 환경에 관계없이 검지된 물체에 대해 정확한 상대거리와 상대속도를 측정할 수 있다. 반면에 카메라는 레이더에서 측정할 수 없는 차선정보와 물체의 특징에 대해 측정할 수 있으나, 레이더보다 상대적으로 외부환경 변화에 취약하다. 따라서 레이더와 카메라 센서의 장점을 모두 사용하고, 각각의 한계점을 보완하기 위한 센서융합 기법을 사용하였다.

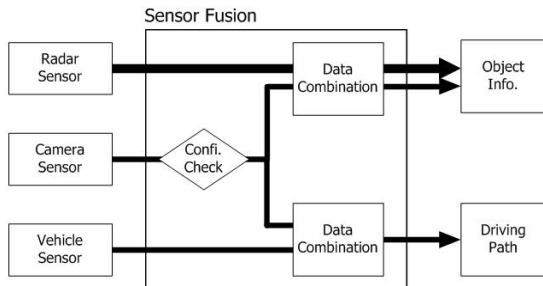


Fig 1. 레이더와 카메라의 센서융합 개념도

Fig 1은 본 논문에서 사용하고 있는 센서융합의 개념도를 도식화하고 있다. 레이더 센서정보는 정확하고 외부 환경에 강건하므로 항상 사용하고, 카메라 센서 정보는 검지한 차선과 물체의 신뢰도가 정확한 경우에만 제한적으로 사용하였다. 이와 같은 개념을 바탕으로 Fig 2와 같이 레이더를 중심으로 하고, 카메라를 보조적으로 사용하는 센서융합 알고리즘을 적용하였다.

제안한 센서융합 알고리즘은 검지된 물체에 대한 레이더와 카메라 정보를 융합하고, 차선정보와 요속도 기반의 정보를 종합하여 차차량의 주행경로를 도출한다. 융합물체 정보는 카메라의 정보와 레이더 정보를 병렬적으로 통합하여 생성된다. 이 때, 레이더에서 검지된 물체가 카메라에서 검지된 물체와 동일하다고 판

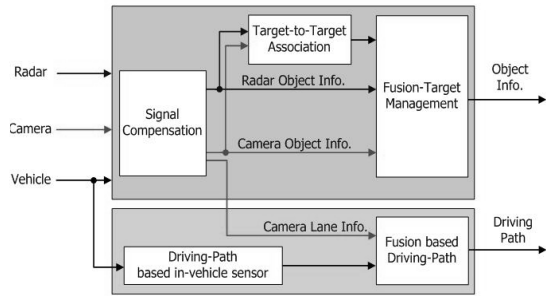


Fig 2. 센서융합 알고리즘의 구성도

단되는 경우에만 해당 물체에 대한 각 센서의 정보는 통합된다. Fig 2에 도식화한 바와 같이 융합물체 정보 처리부는 크게 측정신호 보상부, 타겟 간의 동일체 판단부, 타겟정보 관리부로 구성되어 있다. 측정신호 보상부에서는 각 센서의 업데이트 주기 및 프로세싱으로 인한 신호의 지연을 보정한다. 동일체 판단부에서는 Fig 3에서 보는 바와 같이 각 센서에서 검지된 물체의 위치, 속도와 같은 속성을 비교하여 개별 센서에 검지된 각각의 물체 간의 동일체 유무를 판단한다.

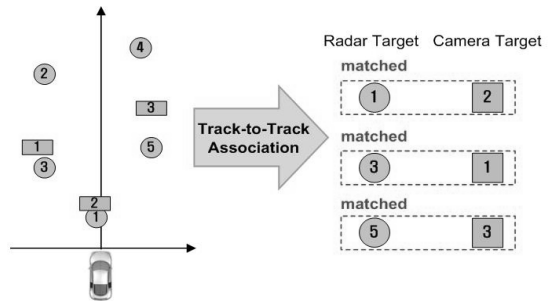


Fig 3. 동일체 판단기법의 개념도

각 센서로부터의 검지된 물체간의 유사성 수치가 임계값보다 작으면 두 타겟은 동일체로 간주된다. 식 (1)과 같이 종방향, 횡방향의 상대위치와 상대속도가 동일체인지 판단하기 위하여 기본적으로 사용된다.

$$\begin{aligned}
 e_{pos, long} &= P_{radar, long} - P_{cam, long} \\
 e_{pos, lat} &= P_{radar, lat} - P_{cam, lat} \\
 e_{vel} &= V_{radar, rel} - V_{cam, rel}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

추가적으로 각 센서에서 검지된 물체의 배열정보도 동일체 판단에 사용하였다. 타겟정보 관리부에서는 동일체로 판단된 융합물체의 정보를 주행상황에 따라 생성/소멸/유지하며 관리한다. 주행상황에 따라 물체가 지속적으로 검지될 수도 있고 검지되지 않을 수도 있기 때문에 물체에 대한 측정값의 유무에 따라 타겟정보를 동적으로 관리한다.

자차량 주행경로는 요속도 기반으로 추정된 곡률정보와 차선 곡률정보를 통합하여 계산된다. Fig 4에 도식화된 바와 같이 카메라의 차선검지 성능은 도로 상태와 외부 환경변화에 영향을 받기 때문에 차선검지 신뢰도(Confidence)가 곡률정보의 통합에 사용된다. 결과적으로 자차량의 주행경로는 식(2)와 같이 도출된다.

$$c = W \cdot c_{yawrate} + (1 - W) \cdot c_{lane} \quad \text{식(2)}$$

where $W = f(\text{Lane confidence})$

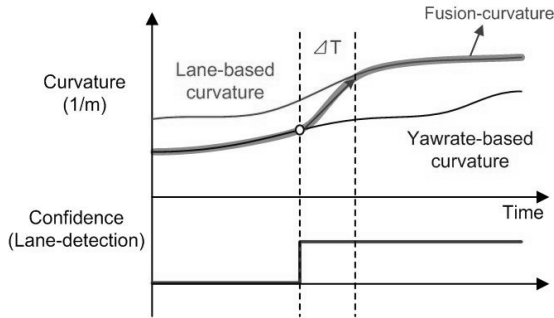


Fig 4. 곡률정보의 융합처리 방법

식(2)에서, $c_{yawrate}$ 는 요속도 기반의 곡률을 의미하고, c_{lane} 은 카메라 센서에서 계산된 곡률을 의미한다. 여기서 요속도 기반 곡률은 요속도, 차량속도, 조향각을 통해 계산된다. 카메라의 곡률값과 요속도 기반 곡률값을 주행 상황에 따라 연속적으로 전환되도록 차선검지의 신뢰도를 0과 1 사이의 가중치(weighting)함수로 사용하였다.

3. 충돌경보 알고리즘

선행차량과의 충돌위험이 예상되는 경우, FCW 시스템은 운전자에게 경보를 제공하므로 충돌경보 알고리즘에서 경보시점에 대한 운전자의 수용성은 매우 중

요하다. 경보는 운전자가 충돌에 대응할 수 있는 시점에 제공되어야 하며 불필요하게 제공되어 운전자에게 거부감을 유발하지 않아야 한다. 이를 위해서 본 논문에서는 Fig 5와 같이 구성된 충돌경보 알고리즘을 제안하였다. 충돌경보 알고리즘은 크게 신호 처리부와 인덱스 기반 판단부로 구성되어 있다. 인덱스를 계산하기 위해서 신호 처리부에서는 융합처리된 물체정보와 차량센서의 신호를 필터링 처리하거나 추가적으로 필요한 신호를 추정한다. 인덱스 기반 판단부에서는 경보시점 결정에 필요한 정량적 인덱스를 계산하며 운전자 주행태이터의 분석결과로부터 설정된 임계값과의 비교를 통해 경보시점을 결정한다.

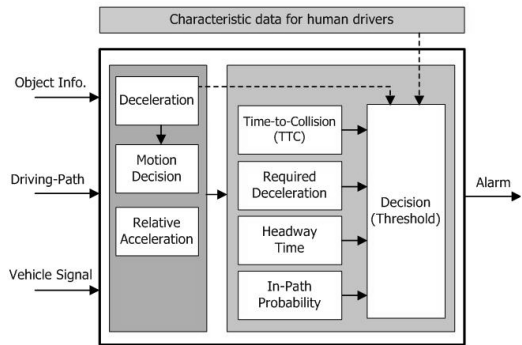


Fig 5. 충돌경보 알고리즘의 구성도

3.1 충돌위험 판단을 위한 인덱스

전방차량과의 충돌위험을 수치화하고 경보시점을 결정하기 위하여 충돌까지 소요시간(TTC), 차간거리시상수, 충돌방지를 위한 요구 상대가속도, 자차량 주행경로상의 진입율과 같은 4 가지 인덱스를 사용한다. TTC는 충돌예측에 많이 사용되는 인덱스로서 현재 상태를 유지할 경우 충돌발생까지 소요되는 시간을 의미한다. 본 논문에서는 등속이 아닌 등가속도 모델을 이용하여 TTC를 계산하였으며 식(3)과 같이 역수를 통해 계산하였다.

$$TTC^{-1} = -\frac{-v_{rel} \pm \sqrt{(v_{rel})^2 - 2 \cdot p_{rel} \cdot a_{rel}}}{2 \cdot p_{rel}} \quad \text{식(3)}$$

식(3)에서 a_{rel} 은 자차량과 선행차량간의 상대가속

도, v_{rel} 은 상대속도, p_{rel} 은 상대거리를 의미한다. TTC의 역수는 Looming Effect 현상과 관련되어 있어 운전자의 주행특성 파악에도 많이 활용되고 있다.⁵⁾

요구 상대가속도는 충돌을 방지하기 위해 필요한 선행차량과 자차량 간의 상대가속도를 의미한다. 요구 상대가속도는 선행차량과 충돌하지 않고 선행차량의 속도와 동일하게 유지하기 위해 필요한 상대가속도량으로 해석할 수 있으며, 식(4)에서 보는 바와 같이 상대속도와 상대거리를 통해 계산된다.

$$a_{rel,req} = \frac{(v_{rel})^2}{2 \cdot p_{rel}} \quad \text{식(4)}$$

차간거리 시상수는 자차량의 속도와 차간거리와의 비율을 의미하며 수식(5)를 통해 계산된다. 수식(5)에서 v_s 는 자차량의 속도, p_{rel} 은 선행차량과의 차간거리를 의미한다

$$\tau = \frac{p_{rel}}{v_s} \quad \text{식(5)}$$

자차량 주행경로 상의 진입율은 Fig 6에 도식화한 바와 같이 선행차량이 자차량의 주행경로 상에 진입한 정도를 수치적으로 판단하기 위해 사용된다. 식(6)에서 ρ 와 같이 주행경로를 표현하는 곡률반경과 선행차량과의 종방향, 횡방향 상대위치를 이용하여 계산된다.

$$P_{offset} = \sqrt{(p_{lat} - \hat{\rho})^2 + (p_{long})^2} - |\hat{\rho}|$$

$$P_{inv-pah} = \frac{P_{offset}}{\left(\frac{W}{2}\right)} \times 100 (\%) \quad \text{식(6)}$$

식(6)에서 ρ 는 곡률반경, p_{long} 은 종방향 상대위치, p_{lat} 는 횡방향 상대위치, W 는 검지물체의 폭을 의미한다.

3.2 운전자 주행 데이터 기반 파라미터 선정

본 논문에서는 앞 절에서 제안한 4 가지 인덱스를 이용하여 경보시점을 결정한다. 매 순간마다 계산된 4 가지 인덱스가 각각의 조건을 모두 만족한 경우, 충돌

위험 경보가 운전자에게 제공된다. 운전자에게 최적의 경보시점을 결정하기 위해 운전자의 주행특성에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다⁴⁾. 이와 같은 맥락에서 본 논문에서도 운전자의 주행데이터 분석결과를 활용하여 충돌경보 시점결정에 필요한 파라미터를 설정하였다.

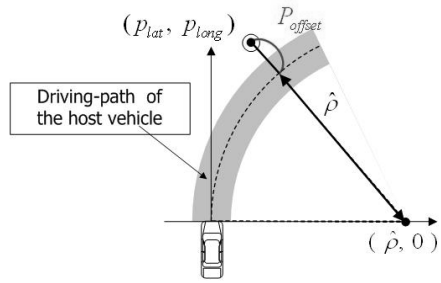


그림 6. 주행경로 상의 진입율 개념도

첫번째 인덱스인 TTC에 대한 임계값은 US-NCAP의 평가 시나리오에 기준으로 제시된 값으로 설정하였다.¹⁾ US-NCAP에는 FCW에 대한 3가지 평가 시나리오와 각 시나리오에 대해 충돌 전 경보발생 시간을 평가기준으로 제시하고 있다. 선행차량의 모션(감속/등속/정지)에 따라 경보발생 시간이 상이하므로 선행차량의 속도와 가속도를 고려하여 TTC의 임계값을 식(7)과 같이 설정하였다. 매 순간마다 계산된 TTC 값이 임계값 이하인 경우, 경보가 활성화될 수 있다.

$$TH(TTC^{-1}) = f(a_p, v_p) \quad \text{식(7)}$$

두번째 인덱스인 요구 상대가속도에 대한 임계값은 운전자가 사용한 가속도의 분포를 활용하여 결정하였다. 운전자의 가속도 분포는 정상적인 주행 상황이라고 판단되는 데이터 베이스를 추출하여 분석하였으며 Table 1과 Fig 7을 통해 확인할 수 있다.³⁾

Table 1. 운전자의 가속도 분포

Percentile	Deceleration [m/s ²]				
	5%	25%	Mean	75%	95%
Low (Under 40kph)	-0.77	-1.19	-1.73	-2.18	-2.97
High (Over 70kph)	-0.28	-0.36	-0.76	-1.18	-1.82

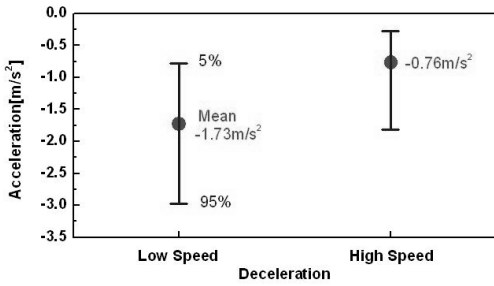
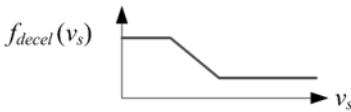


Fig 7. 속도별 운전자의 가속도 분포

저속에서는 -0.77 에서 -2.97 (m/s^2)범위 사이에 90%의 데이터가 분포하고 있다. 또한 고속에서는 -0.28 에서 -1.82 (m/s^2)의 범위에 90%의 데이터가 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 경향과 수치를 바탕으로 요구 상대가속도의 임계값은 식(8)과 같이 표현할 수 있다. 즉 매 순간마다 계산된 요구 상대가속도가 임계값을 초과한 경우, 경보가 활성화될 수 있다.

$$TH(a_{rel,req}) = f_{decel}(v_s) \quad \text{식(8)}$$



세번째 인덱스인 차간거리 시상수에 대한 임계값은 운전자의 차간거리 시상수 분포를 활용하여 설정하였다. 차간거리 시상수에 대한 분포는 Table 2와 Fig 8에서 보여준다.³⁾

Table 2. 차간거리 시상수 분포

Following driving situation					
Percentile	5%	25%	Mean	75%	95%
Headway time[s]	0.85	1.21	1.68	1.98	2.96

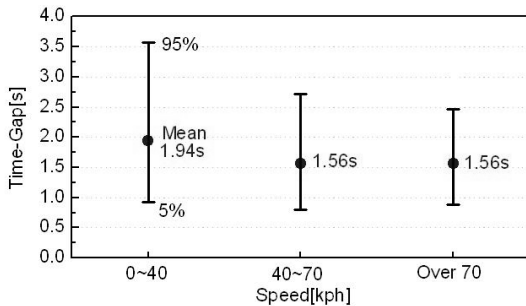
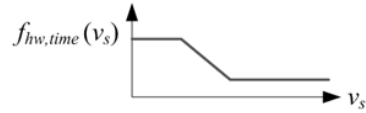


Fig 8. 속도별 차간거리 시상수의 분포

분석결과를 기반으로 차간거리 시상수에 대한 임계값은 식(9)와 같이 설정하였다. 매 순간마다 계산된 차간거리 시상수가 임계값 이하인 경우, 경보가 활성화될 수 있다.

$$TH(\tau) = f_{hw,time}(v_s) \quad \text{식(9)}$$



네번째 인덱스인 주행경로 상의 진입율에 대한 임계값은 Table 3에 보는 바와 같이 Cut-in 상황의 데이터 분석결과를 바탕으로 설정하였다. 결과적으로 운전자는 식(6)에 의해 계산된 인덱스 값이 평균적으로 0.51이상인 경우, Cut-in 차량을 선행차량으로 인식하는 경향이 있다. 이와 같은 분석결과를 바탕으로 주행경로 상의 진입율에 대한 임계값은 식(10)과 같이 표현된다. 매 순간마다 계산된 주행경로 상의 진입율이 임계값을 초과하면 경보가 활성화될 수 있다.

$$TH(P_{in-path}) = 0.5 \quad \text{식(10)}$$

Table 3. 주행경로 상의 진입율 분포

Cut-in driving situation					
Percentile	5%	25%	Mean	75%	95%
In-path Probability (0~1)	0.45	0.48	0.51	0.55	0.63

4. 시험 결과

본 논문에서 개발한 센서융합 기반 FCW 시스템을 실차에서 구현하고, US-NCAP 시나리오와 공로 테스트를 통해 성능을 검증하였다. Fig 9와 같이 시험 차량을 구성하고, 전방 레이더와 카메라 센서를 장착하였다.



Fig 9. 레이더/카메라 센서장착 위치

4.1 US-NCAP 시나리오

센서융합 기반 FCW 시스템의 성능을 평가하기 위해 US-NCAP 에서 제시한 시나리오를 바탕으로 실차 시험을 수행하였다. Fig 10은 NCAP 시나리오 #1에 대한 시험 결과를 보여주고 있다. Fig 10에서 보는 바와 같이 제안한 FCW 시스템은 20초에 센서융합을 통해 정지물체를 차량으로 인식하였다. 이후 충돌경보 알고리즘에 따라 US-NCAP 평가기준을 만족하도록 TTC 2.1초 이전에 경보가 제공되었다.

4.2 공로 주행

US-NCAP 시나리오에 대한 평가를 수행한 후, 실제 도로에서 운전자가 일반적인 주행을 하는 동안 오경보의 발생여부를 확인하였다. 센서융합 FCW시스템의 성능을 평가하기 위해 레이더 센서만을 이용하는 FCW시스템 및 카메라 센서만을 이용하는 FCW 시스템을 장착하여 동일한 주행상황에 대한 결과를 비교하였다. Table 4는 공로 주행시험의 결과로써, 동일한 주행상황에 대한 각 FCW 시스템의 오경보 비율을 보여주고 있다. 결과적으로 센서융합 기반 FCW 시스템이 오경보 발생률이 가장 작다는 것을 확인할 수 있다.

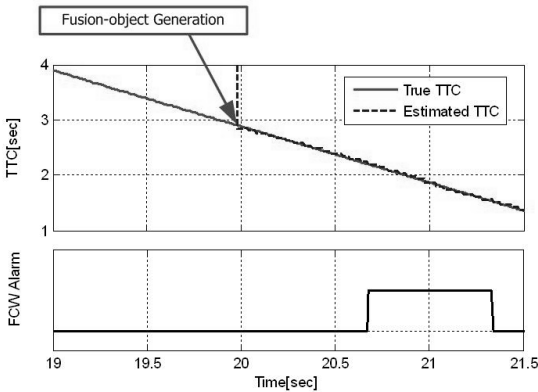


Fig 10. US-NCAP #1 시나리오에 대한 실차시험 결과

Table 4. Comparison of a false alarm

	The number of false alarm (normalized)
Radar-based FCW	1
Camera-based FCW	0.2
Fusion-based FCW	0.1

5. 결론

본 논문에서는 레이더/카메라 센서융합 기반 FCW 시스템을 개발하고 US-NCAP 시나리오와 공로주행을 통해 성능을 검증하였다. 레이더와 카메라 센서융합기술과 운전자 주행데이터 분석결과를 활용한 파라미터 설정으로 오경보를 최소화하였으며, 평가기준을 만족하기 위해 정확한 시점에 경보를 제공하였다. 카메라 기반 FCW 시스템과 비교한 경우, 제안한 시스템은 다양한 주행상황에 대하여 일관성 있게 정확한 시점에 경보를 제공할 수 있다. 또한 레이더 기반 FCW 시스템과 비교한 경우, 제안한 시스템은 차량 이외의 정지물체에 대한 오경보를 최소화할 수 있다.

References

- (1) NHTSA: Forward Collision Warning System NCAP, Confirmation Test, December 2008, Docket : NHTSA - 2006 - 26555.
- (2) D. Canveney, et al., "Comprehensive Framework for Multi-sensor Multi-target Tracking in the Adaptive Cruise Control Environment", Proceeding of the 6th International symposium on advanced vehicle control (AVEC), 2002
- (3) S. Moon and K. Yi, "Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm", Vehicle System Dynamics. 46(8), pp. 661-690, 2008
- (4) M. Schiebahn et al., "Improved Active Safety through Collision Mitigation System based on single forward looking Radar Sensor", IFAC symposium in Advances in Automotive Control (AAC), Munich, 2010
- (5) K. Lee and H. Peng, "Data-based evaluation and design of automotive collision warning/collision avoidance algorithm", Proceeding of 7th International symposium on advanced vehicle control (AVEC), 2004
- (6) A. Vahidi and A. Eskandarian, "Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 4(3), pp.143-153. 2003

후 기

본 연구는 국토해양부 및 한국 건설교통기술평가원의 연구비 지원(12TSI-C054118-04)으로 수행되었음