

## 컴퓨터 시뮬레이션(PC-CRASH)을 이용한 터널 내 피추돌 차량의 충돌 속도 추정에 관한 연구

한창평<sup>1</sup> · 최홍주<sup>†</sup>

상지대학교 스마트자동차학과<sup>1</sup> · 상지대학교 전자공학과<sup>†</sup>

### A study on the estimation of impact velocity of crashed vehicles in tunnel using computer simulation(PC-CRASH)

Chang-Pyeong Han<sup>1</sup> · Hong-Ju Choi<sup>†</sup>

Department of Smart Automobile Engineering, Sangji University<sup>1</sup>

Department of Electronic Engineering, Sangji University<sup>†</sup>

(Received December 06, 2020 / Revised December 28, 2020 / Accepted December 31, 2020)

**Abstract:** In a vehicle-to-vehicle accident, the impact posture, braking status, final stopping position, collision point and collision speed are important factors for accident reconstruction. In particular, the speed of collision is the most important issue. In this study, the collision speed and the final stopping position in the tunnel were estimated using PC-CRASH, a vehicle crash analysis program used for traffic accident analysis, and the final stopping position of the simulation and the final stopping position of the traffic accident report were compared. When the Pride speed was 0km/h or 30km/h and the Sorento speed was 100m/h, the simulation results and reports matched the final stopping positions and posture of the two vehicles. As a result of the simulation, it can be estimated that Pride was collided in an almost stationary state.

**Key Words:** PC-CRASH, Collision Velocity, Final Position, Prediction Model, Accident Reconstruction

#### 1. 서 론

산지와 구릉이 70% 이상인 우리나라의 지형 특징으로 고속도로 설계 시 터널의 수요와 터널의 장대화가 증가하는 추세를 보인다. 터널 진입 전후 조도 차, 폐쇄적이고 어두운 터널 내 주행환경에 따른 운전자의 터널 내 심리적 불안감 변화 등은 사고의 위험성을 높인다. 터널 내 교통사고 원인 중 약 80% 이상이 운전자 과실로 인한 것이다. 고속도로 터널 내 교통사고는 인명피해를 동반한 대형 사고가 잦고, 2차, 3차 사고를 유발할 수 있다. 터널 내 교통사고로 인한 사고처리 시간은 다른 구간보다 길게 나타날 가능성이 크다.

조병찬은 고속도로 터널을 대상으로 주간에 터널

구간에서 자유속도로 주행할 때 터널 구간에서의 속도 변화를 살펴보고 이러한 속도 변화에 영향을 미치는 요인을 분석하였다<sup>1)</sup>.

박주환은 터널 구간 교통사고에 영향을 미치는 교통 및 도로 조건 등 교통사고 영향 요인을 토대로 회귀 분석을 수행하여 터널 구간 교통사고 예측 모형을 개발하였다<sup>2)</sup>.

EDR 기록 정보 추출이 가능하지 않은 사고 차량에 대해서는 차량의 파손 사진과 최종 정지 위치 등을 바탕으로 사고 재구성을 해야 한다. 차대 차 사고에서 충격 자세, 제동 여부, 최종 정지 위치, 충격 지점 및 충돌 속도는 사고 재구성을 위한 중요한 요소이다. 특히, 충돌 속도는 가장 중요한 쟁점이다.

PC-CRASH는 교통사고 분야에서 사고 재구성에 사용하는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램이다. Newton 역학을 기반으로 충돌 전 속도 및 충돌 자세 등과 같은 다양한 변수들을 고려하여 차량의 충돌 후 거

1. 상지대학교 스마트자동차학과

† 교신저자: 상지대학교 전자공학  
E-mail: choifeilong@sangji.ac.kr

동을 모사할 수 있고 사고에 대한 해석 및 3차원 사고 재구성을 할 수 있다<sup>3-7)</sup>.

본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션(PC-CRASH)을 이용하여 터널 내 차대 차 충돌 사고 속도에서 충돌 속도와 최종 정지 위치를 추정하였고, 교통사고 조사 보고서의 최종 정지 위치와 비교하였다. 이를 토대로 시뮬레이션에서 추정한 충돌 속도 결과를 검증하였다.

## 2. 충돌 속도 추정

사고 장소는 영동고속도로 둔내터널 입구로부터 약 2.8km 진입한 터널 내이고, 사고지점으로부터 후방에 비상주차대가 위치한다.

평창 방면에서 원주 방면으로 설치된 둔내터널 길이는 약 3.3km이고 사고지점은 터널 입구로부터 약 2.8km 진입한 편도 2차로 상에서 앞서 주행하던 프라이드가 불상의 원인으로 제동 정지하는 것을 뒤늦게 발견하고 프라이드의 후미 좌측 부위를 쏘렌토의 전면 우측 부위로 충돌하여 프라이드가 앞으로 튕겨서 전면 우측 부위로 노견을 충돌하고 약 10시내외 방향으로 2차로 상에 최종 정지하고, 쏘렌토는 프라이드보다 앞으로 더 진행하여 1차로 상에 전면이 약 12시 방향을 향해 최종 정지한 사고이다.

사고 현장에서 타이어 흔적은 찾아볼 수 없었고, 프라이드 후미의 함몰된 손상 정도로 볼 때 쏘렌토의 우 전면으로 충돌한 사실이 있으나, 양 차량의 위치를 표시하지 않아 명확한 최종 위치를 알 수 없다. 두 차량의 파손 부위에 따른 충돌 거동을 검토하여 충돌 속도를 추정한다.

사고 현장에 프라이드의 속도를 추정할 만한 명확한 물리적인 흔적이 없어 충돌 직전 속도를 추정하기는 어렵다. 프라이드가 쏘렌토보다 앞서 진행한 점으로 보아 쏘렌토보다 속도가 낮은 것으로 추정 할 수 있고, 쏘렌토가 영동고속도로 최고 제한속도 보다 높게 주행했다면 CCTV에 적발되었을 것으로 사료되며, 속도 초과로 적발된 기록이 없다면 쏘렌토의 추정 속도는 최고 제한속도 범위 내외일 것으로 추정할 수 있다.

일차원 상대 충돌에서 쌍방이 50km/h 속도로 정면 충돌하였을 때, 상대 충돌 속도는 식 (1)처럼

$$V = 50 + 50 = 100 \text{ km/h} \quad (1)$$

이다. 추돌인 경우에는 대체적으로 1차원 충돌이다. 앞차의 속도가 50km/h이고 뒷차의 속도가 100km/h

로 추돌한 경우, 상대 충돌 속도는 식(2)처럼

$$V = 100 - 50 = 50 \text{ km/h} \quad (2)$$

이다. 충돌 전에는 추돌 차량(쏘렌토)의 속도가 피 추돌 차량(프라이드)의 속도보다 높지만, 충돌 후에는 피추돌 차량의 속도가 추돌 차량의 속도보다 높아진다.



Fig. 1 The front right side of Sorento is collapsed

Fig. 1처럼 쏘렌토의 우 전면부터 우 전륜 부위가 함몰되어 있고, 조수석 문짝에 부분적인 간접 손상이 발생하였다. 쏘렌토의 좌 전면을 포함한 좌측 부위 손상은 미미한 정도이다.

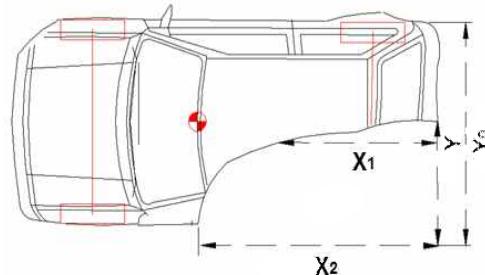


Fig. 2 Damaged part of pride

프라이드는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 좌측 후미 부위부터 운전석 부위까지 함몰되어 지붕이 손상되었다. 운전석 시트가 조수석으로 밀려 있고, 운전석 안전벨트가 기둥에 감겨 있다. 전면 유리 우측은 간접 손상으로 파손되고, 앞 범퍼 우측 부위가 파손되는 등 프라이드는 쏘렌토로부터 추돌 되어 차체 후부가 운전석 부위까지 심하게 압제 되었다.

프라이드의 파손 상태는 약  $X_1 = 1.30\text{m}$ ,  $X_2 = 1.91\text{m}$ ,  $Y = 0.96\text{m}$  및  $Y_o = 1.605\text{m}$ 로 추정된다.

프라이드 소성 변형량을 토대로 충돌 유효 속도의 산출 방법을 적용하여 사고 당시 쏘렌토의 충돌 속도를 산출한다. 프라이드의 평균 손상 깊이를 식(3)과 같이 구하면

$$X = \frac{Y}{Y_0} \times \frac{X_1 + X_2}{2} = 0.96\text{m} \quad (3)$$

이므로, 유효 충돌 속도는 식(4)와 같이 구하면  
 $V = 105.3X \approx 101.1\text{km/h}$  (4)

이다. 즉, 프라이드의 후미를 추돌한 쏘렌토의 속도는 약 101.0km로 추정할 수 있다.

### 3. 피충돌 차량의 충돌 속도 추정

두 차량의 파손 부위에 따른 충돌 거동에 대하여 검토한 결과 교통사고 조사 보고서의 최종 정지 위치는 Fig. 3과 같다.

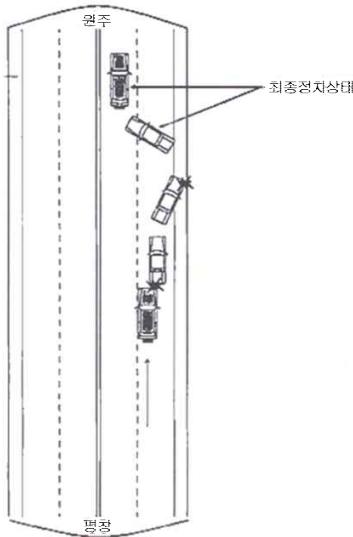


Fig. 3 Final position estimation

Fig. 3에서 프라이드는 1, 2차로에 걸쳐 10시 방향 각도로 최종 정지하였고, 쏘렌토는 1차로에 12시 방향 각도로 정지하였다.

교통사고 분야에서 사고 재구성에 사용하는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 PC-CRASH를 이용하여 충돌 속도와 최종 정지 위치를 추정한다. 쏘렌토 주행 속도는 100km/h로 일정한 상태로 정하고, 프라이드 속도를 90km/h부터 10km/h씩 감속하여 시뮬레이션을 수행하였다.

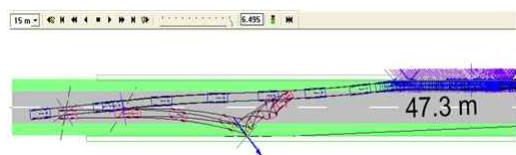


Fig. 4 Simulation 1

Fig. 4의 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Simulation 1

START VALUES	프라이드	쏘렌토
Velocity magnitude $v$ [km/h]	90	100
Heading angle [°]	0.71	5.20
Velocity direction $\beta$ [°]	0.71	5.20
Yaw velocity [rad/s]	0.00	0.00
Center of gravity $x$ [m]	35.54	29.92
Center of gravity $y$ [m]	-1.44	-1.35

Fig. 4에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 47.3m이다. 프라이드는 10시 방향 각도로 1차로에 최종 정지하며 Fig. 3의 결과와 유사하다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 옹벽을 충돌하며 진행하므로 좌측 부위 손상을 추정할 수 있고, Fig. 1과 일치하지 않는다. 쏘렌토는 12시 방향 각도로 최종 정지하고, 정지하기까지 시간은 약 6.495초이다.

Fig. 4에서 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

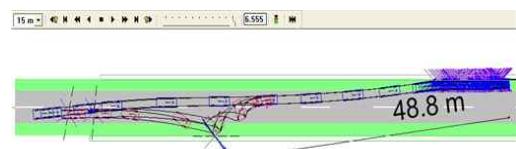


Fig. 5 Simulation 2

Fig. 5의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 80km/h로 변경하였다. Fig. 5에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 48.8m이다. 프라이드는 12시 방향 각도로 1차로에 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.555초 후에 최종 정지하므로 좌측 부위 손상을 추정할 수 있다.

Fig. 5에서 프라이드의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

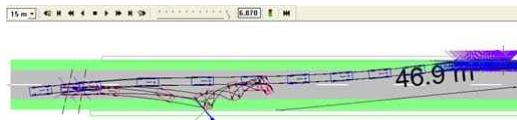


Fig. 6 Simulation 3

Fig. 6의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 70km/h로 변경하였다. Fig. 6에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 46.9m이다. 프라이드는 2시 30분 방향 각도로 1, 2차로에 걸친 자세로 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.870초 후에 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 6에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

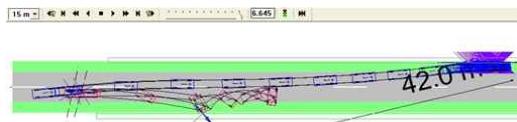


Fig. 7 Simulation 4

Fig. 7의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 60km/h로 변경하였다. Fig. 7에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 42.0m이다. 프라이드는 3시 10분 방향 각도로 2차로에 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.645초 후에 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 7에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

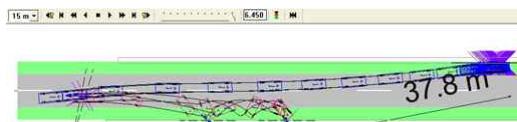


Fig. 8 Simulation 5

Fig. 8의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 50km/h로 변경하였다. Fig. 8에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 37.8m이다. 프라이드는 2시 방향 각도로 노견에 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.45초 후에 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 8에서 프라이드의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

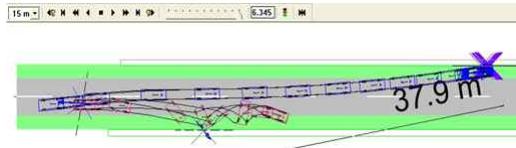


Fig. 9 Simulation 6

Fig. 9의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 40km/h로 변경하였다. Fig. 9에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 37.9m이다. 프라이드는 1시 방향 각도로 노견에 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.345초 후에 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 9에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

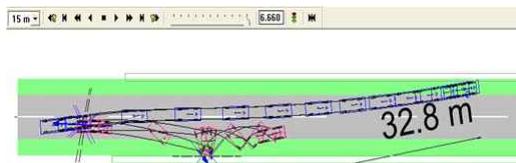


Fig. 10 Simulation 7

Fig. 10의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 30km/h로 변경하였다. Fig. 9에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 32.8m이다. 프라이드는 11시 30분 방향 각도로 노견을 일부 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.660초 후에 11시 30분 방향으로 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 10에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

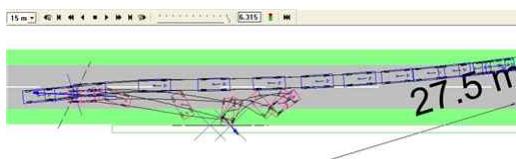


Fig. 11 Simulation 8

Fig. 11의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 20km/h로 변경하였다. Fig. 11에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 27.5m이다. 프라이드는 11시 방향 각도로 노견에 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 벗어나 벽을 계속 충돌하며 진행하다 약 6.315초 후에 11시 30분 방향으로 최종 정지하므로, 좌측 부위 파손을 추정할 수 있다.

Fig. 11에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치하지 않고, 쏘렌토의 좌측 부위 손상이 Fig. 1과 일치하지 않는다.

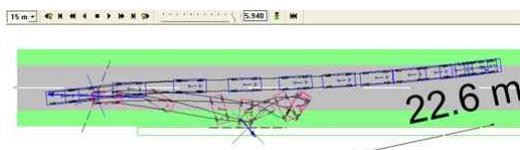


Fig. 12 Simulation 9

Fig. 12의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드 속도만 10km/h로 변경하였다. Fig. 12에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 22.6m이다. 프라이드는 옹벽을 1회 충돌하고 10시 방향 각도로 후미가 노견에 걸쳐 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 약간 벗어나 약 5.940초 후에 11시 30분 방향으로 최종 정지한다. Fig. 12에서 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치한다.

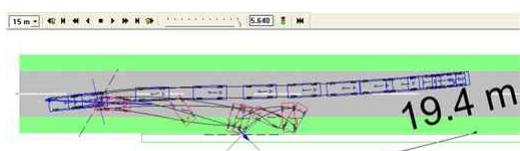


Fig. 13 Simulation 10

Fig. 13의 시뮬레이션 조건은 Table 1에서 프라이드는 정지 상태로 변경하였다. Fig. 13에서 두 차량의 최종 위치에서 거리는 약 19.4m이다. 프라이드는 옹벽을 1회 충돌하고 10시 방향 각도로 노견에 최종 정지한다. 쏘렌토는 차로를 약간 벗어나 약 5.640초 후에 11시 50분 방향으로 최종 정지한다.

Fig. 12에서 프라이드와 쏘렌토의 방향과 최종 위치가 Fig. 3과 일치한다.

시뮬레이션 결과 두 차량의 충돌 직전 속도가 높을수록 충돌 후 이동하는 거리가 크다는 것을 확인할 수 있다.

프라이드 속도 10km/h, 쏘렌토 속도 100km/h인 조건의 시뮬레이션 9와 프라이드 속도 0km/h, 쏘렌토 속도 100km/h인 조건의 시뮬레이션 10의 결과가 교통사고 조사 보고서에서 나타난 두 차량의 최종 정지 위치 및 자세와 유사하다는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 시뮬레이션 9보다 시뮬레이션 10의 결과가 두 차량의 최종 정지 위치 및 자세와 유사하다는 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 영동고속도로 둔내터널 입구로부터 약 2.8km 진입한 터널 내에서 발생한 사고의 충돌 속도를 PC-CRASH를 통한 시뮬레이션을 이용하여 추정하였다.

후미 좌측 부위가 대파된 프라이드와 전면 우측 부위가 함몰된 쏘렌토의 물적 자료는 있지만 양 차량의 최종 정지 위치를 마킹하지 않아 명확한 위치가 불분명하여, 두 차량의 파손 부위에 따른 충돌 거동에 대하여 검토한 결과를 토대로 작성한 교통사고 발생 보고 실황조사서에 명시된 두 차량의 최종 정지 위치 및 자세를 토대로 시뮬레이션을 수행하였다.

프라이드 소성 변형량을 토대로 충돌 유효 속도의 산출 방법을 적용하면, 쏘렌토의 충돌 직전 속도는 약 101.1km/h로 추정할 수 있다.

피추돌 차량인 프라이드의 충돌 속도를 추정하기 위하여 PC-CRASH 시뮬레이션을 적용한 결과 100km/h의 속도로 진행하던 쏘렌토가 불상의 이유로 정지하였거나 10km/h 미만의 속도로 진행하던 프라이드를 추돌하였다는 것을 확인할 수 있었다.

향후 EDR 기록 정보가 존재하는 사고 사례와 비교 분석을 통해 PC-CRASH를 통한 시뮬레이션에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 1) Cho Byeong-chan, "A Study on the Factors Affecting the Speed Change in Tunnel", Hanyang University, 2010. 2.
- 2) Joo-Hwan Park, "Development of Traffic Accident Prediction Model for Highway Tunnel Section", Chonnam National University, 2012. 2.
- 3) Sanghyeon Lim, Wontae Oh, Jihun Choi and

Jongchan Park, "Estimation Collision Speed of Vehicle by Using PC-CRASH Collision Optimizer", Transactions od KSAE, Vol. 27, No. 12, pp. 911-917, 2019.

- 4) Jong-Duck Kim and Jun-Kyu Yoon, "Reliable Study on the Collision Analysis of Traffic Accidents Using PC-Crash Program", he Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 12, No. 5, pp. 115-122, 2012. 5.
- 5) Wang-su Ha and Seok-young Han, "Establishment of Important Impact Parameters of Traffic Accident Reconstruction Program 'PC-CRASH'", Journal of Korean Society of Transportation, Vol. 21, No. 2, pp. 155-164, 2003. 04.
- 6) Jihun Choi, Jonhcheol Bag, Woosik Park, Myungchul Park and Seungchul Bae, "Study on the collision analysis by genetic algorithm in PC-CRASH", Korean Journal Science, Vol. 10, No. 1, pp. 39-44, 2009.
- 7) Yong-Soon Choi, Se-Ryong Baek, Jong-Kil Jung, Jeong-Kwon Cho and Jun-Kyu Yoon, "A Study on the Rollover Behavior of SUV and Collision Velocity Prediction using PC-Crash Program", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 18, No. 2, pp.

227-235, 2018.

## 저자 소개

### 한 창 평(Chang-Pyeong Han)

[정회원]



- 1994년 2월: 경희대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 3월~2019년 2월: 상지영서 대학교 자동차과, 부교수
- 2020년 3월~현재: 상지대학교 스마트자동차학과, 부교수

< 관심분야 >  
교통사고 분석 및 재현, 자동차 설계 및 안전

### 최 홍 주(Hong-Ju Choi)

[정회원]



- 2000년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2012년 3월~2020년 2월 : 상지영서 대학교 국방정보통신과, 조교수
- 2020년 3월~현재: 상지대학교 전자 공학과, 조교수

< 관심분야 >  
안테나 설계, RF 회로 설계, 이동통신시스템