




4단계 BK21사업 자율주행 xEV 혁신 인재 교육연구단

# 국제학회 결과보고서



|       |                                   |     |            |
|-------|-----------------------------------|-----|------------|
| 지원 기간 | 교육부, 한국연구재단                       | 사업명 | 4단계 BK21사업 |
| 과제명   | 4단계 BK21사업 (자율주행 xEV 혁신 인재 교육연구단) |     |            |
| 연구 기간 | 2020.09.01.~ 2027.08.31           |     |            |

|       |   |    |          |
|-------|---|----|----------|
| 이름    | 전 승 욱                                      | 학번 | A2020103 |
| 장소    | Guildford, Surrey GU2 7XH, United Kingdom   |    |          |
| 방문 기관 | University of Surrey  |    |          |
| 일정    | 2023.08.06 ~ 2023.08.12 ( 5 박 7 일)  |    |          |
| 목적    | 'Torque vectoring system for energy consumption and driving performance' 기술 교류를 위한<br>영국 서레이대학 (University of Surrey) 해외 연수 |    |          |

## 1. 해외연수 참가 세부 일정 및 활동 내역 (날짜순 기입)

| 일수 | 날짜  | 세부일정               | 활동내역  |
|----|-----|--------------------|---|
| 1  | 8/6 |                    | 국민대학교 → 영국, 서레이 대학 (University of Surrey) 이동                                    |
| 2  | 8/7 | 09:00 ~ 12:00 (오전) | 영국 서레이 대학 (University of Surrey) Aldo 교수 연구실과 국민대학교 참여교수 (우승훈 교수) 연구실 간 소개 및 기술 |

|   |     |                    |   |
|---|-----|--------------------|---|
|   |     |                    | 교류 계획 공유  |
| 3 | 8/7 | 13:00 ~ 17:00 (오후) | University of Surrey에서 Aldo 교수의 'Torque vectoring system for energy consumption and driving performance'에 대한 기술 설명 및 발표           |
| 4 | 8/8 | 09:00 ~ 12:00 (오전) | University of Surrey에서 Aldo 교수의 'Torque vectoring system for energy consumption and driving performance' 기술 관련 모델 및 코드 공유 및 전수    |
| 5 | 8/8 | 13:00 ~ 17:00 (오후) | 국민대학교 참여교수 (우승훈 교수) 및 참여대학원생 (하윤철, 전승욱 박사과정)의 'differential braking-based steering fail-operational system'에 대한 기술 설명 및 발표        |
| 6 | 8/9 | 09:00 ~ 12:00 (오전) | 국민대학교 참여교수 (우승훈 교수) 및 참여대학원생 (하윤철, 전승욱 박사과정)의 'differential braking-based steering fail-operational system' 기술 관련 모델 및 코드 공유 및 전수 |
| 7 | 8/9 | 13:00 ~ 15:00 (오후) | 연구실 간 (University of Surrey, Aldo / 국민대학교 우승훈 교수) 전수 기술 보완 설명 및 질의  |
| 8 | 8/9 | 15:00 ~ 17:00 (오후) | 영국 서레이 대학 (University of Surrey) Aldo 교수와 국민대학교 참여교수 (우승훈 교수)의 향후 기술 협력 및 기술 교류 계획 공유   |

|    |      |               |  |
|----|------|---------------|--|
|    |      |               |  |
| 9  | 8/10 | 09:00 ~ 12:00 | 영국 서레이 대학 (University of Surrey)<br>Aldo 교수와 국민대학교 참여교수 (우승훈<br>교수)의 공동 연구 주제 선정                 |
| 10 | 8/10 | 13:00 ~ 17:00 | 연구실 간 (University of Surrey, Aldo<br>/ 국민대학교 우승훈 교수) 보유 기술<br>설명 및 질의                            |
| 11 | 8/11 | 09:00 ~ 12:00 | 공동 연구 내용 분담을 위한 연구실 간<br>(University of Surrey, Aldo /<br>국민대학교 우승훈 교수) 수행 계획 및<br>의견 공유         |
| 12 | 8/11 | 13:00 ~ 15:30 | 영국 서레이 대학 (University of Surrey)<br>Aldo 교수와 국민대학교 참여교수 (우승훈<br>교수)의 향후 공동 연구 논문에 대한 상세<br>일정 계획 |
| 13 | 8/12 |               | 영국, 서레이 대학 (University of<br>Surrey) → 국민대학교 이동  |
| 14 |      |               |  |



## 2. 해외연수 결과 보고

| 1. 주요 면담자      |           |                        |              |                          |
|----------------|-----------|------------------------|--------------|--------------------------|
| 성명             | 소속, 지위    | 전공 담당 업무               | 전화           | 이메일                      |
| Aldo Sorniotti | Professor | Mechanical Engineering | 1483-68-9688 | a.sorniotti@surrey.ac.uk |
| Kai Man So     | PhD       | Mechanical Engineering | -            | k.so@surrey.ac.uk        |
| Wang.Bo        | PhD       | Mechanical Engineering | -            | -                        |

## 2. 방문 기관에 대한 정보( 상세 설명 및 사진 첨부)

### 1. 방문 기관 정보

University of Surrey - Advanced Vehicle Engineering



The vehicle, known as ZEBRA (Zero Emission test Bed for Research on Autonomous driving), was welcomed onto campus on 23 May by academics from the Centre for Automotive Engineering within the Department of Mechanical Engineering Sciences.

## 2. Research interests

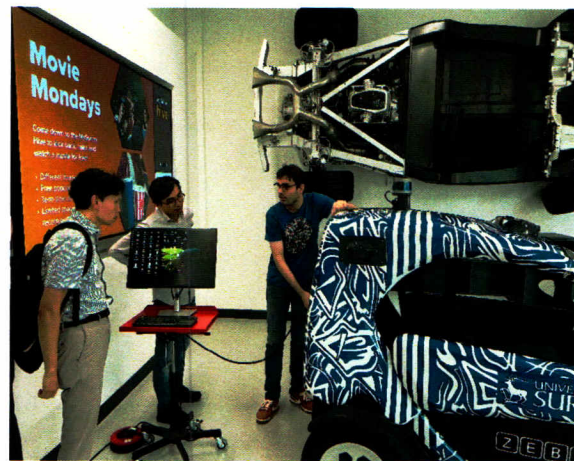
- Vehicle dynamics and simulation
- Vehicle dynamics control
- Vehicle chassis
- Transmission systems for fully electric vehicles
- Hybrid electric vehicles.

## 3. Publications

- Victor Vidal, Pietro Stano, Gaetano Tavolo, Miguel Dhaens, Davide Tavernini, Patrick Gruber, Aldo Sorniotti (2022) On Pre-Emptive In-Wheel Motor Control for Reducing the Longitudinal Acceleration Oscillations Caused by Road Irregularities, In: IEEE transactions on vehicular technology 71(9) pp. 9322-9337 IEEE
- Alessandro Scamarcio, Carmine Caponio, Mario Mihalkov, Petar Georgiev, Javad Ahmadi, Kai Man So, Davide Tavernini, Aldo Sorniotti (2022) Predictive anti-jerk and traction control for V2X connected electric vehicles with central motor and open differential, In: IEEE transactions on vehicular technology pp. 1-1 IEEE
- Matteo Dalboni, Davide Tavernini, Umberto Montanaro, Alessandro Soldati, Carlo Concari, Miguel Dhaens, Aldo Sorniotti (2021) Nonlinear Model Predictive Control for Integrated Energy-Efficient Torque-Vectoring and Anti-Roll Moment Distribution, In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 26(3) pp. 1212-1224 IEEE
- Mathias Metzler, Davide Tavernini, Patrick Gruber, Aldo Sorniotti (2020) On Prediction Model Fidelity in Explicit Nonlinear Model Predictive Vehicle Stability Control, In: IEEE transactions on control systems technology pp. 1-17 IEEE

## 4. 방문

(1) 8/7 영국 서레이 대학 연구실 및 시험 차량 견학



### \*상세 내용

- 9.00-9.30 am: Aldo introduces the Surrey team and the meeting plan
- 9.30-10.00 am: Kookmin university representatives present themselves and their institution
- 10.00-12.00: Introduction to the torque-vectoring project with Hyundai (Bo)
- 13.00-16.30: ZEBRA showcase (by Mario); Mario, Carmine and Philip to present the



pre-emptive traction controller and pre-emptive trail braking controller (from the TVT and IJAT papers)

16.30-16.45: wrap-up with Bo and Aldo (any further team member very welcome)

(2) 8/8 영국 서레이 대학 및 국민대학교 기술 교류



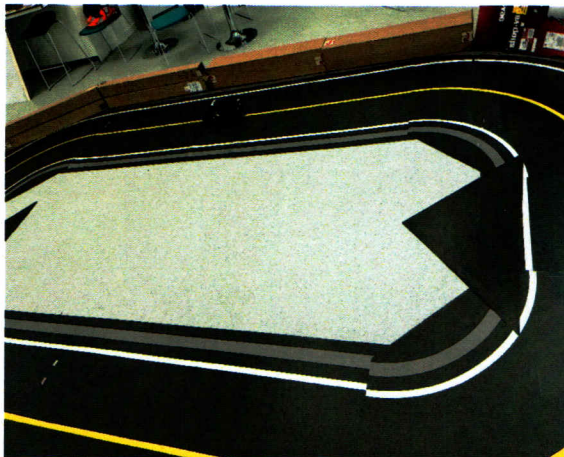
\*상세 내용

9.00-12.00: Detailed presentation of the steering controller by Kookmin University, with Dr Davide Tavernini popping in at approx. 10 am

14.00-15.30: Longitudinal acceleration compensation paper published by IEEE TVT (Pietro Stano)

15.30-17.00 Discussion on the content and potential novelty of the joint research paper combining respective control functions (Bo: academics and all other team members who would like to be involved)

(3) 8/9 영국 서레이 대학교 및 국민대학교 기술 전수 및 향후 협력 계획 논의





**\*상세 내용**

Agenda for the day (Dr Bo Wang to be continuously present)

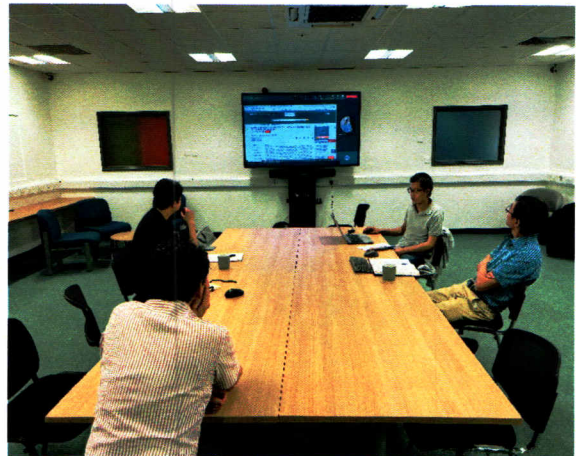
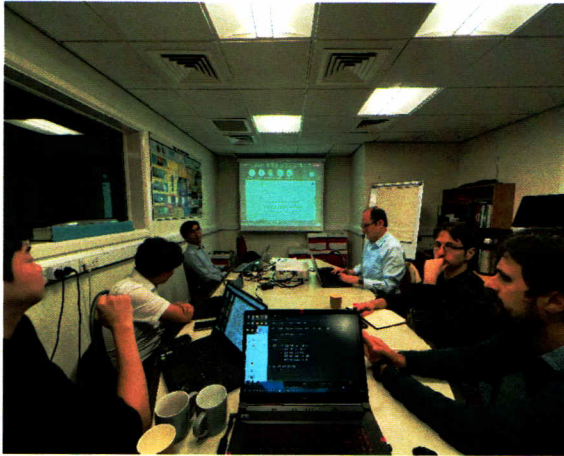
9.30-11.00: PnG research by Dr Philip So (IEEE Access paper)

11.00-12.00: Q-car laboratory visit and adaptive control activity (Dr Umberto Montanaro)

14.00-15.00: Action plan towards a joint Kookmin-Surrey journal paper (Dr Bo Wang to lead, Aldo and all)

15.00-16.30: Possible models/algorithms exchanges (Dr Bo Wang)

**(4) 8/10 공동 연구 내용 분담을 위한 연구실 간 수행 계획 및 의견 공유**



**\*상세 내용**

09.00-11.00 : Discussion for joint research topics and journal selection

11.00-12.00 : Share the journal that each lab is aiming for each lab

14.00-17.00 : Describe the NMPC algorithm and fault tolerance control algorithm

**(5) 8/11 향후 공동 연구에 대한 논문 게재 관련 상세 일정 계획 및 공유**





**\*상세 내용**

09.00-12.00 : Sharing the plan and opinions of each lab for collaborative research collaboration

14.00-15.30 : Detailed scheduling of each laboratory to conduct joint research and discuss research findings

**3. 연수 결과 (최대한 상세하게 1장 이상 작성)**

**\* 연구 결과 또는 주요 면담 결과를 중심으로 기재**

**\* 일정별 주요 논의사항 및 정보습득사항을 포함**

서레이 대학 (University of Surrey)와의 기술 교류를 통해, 아래 안전에 대한 구체적인 기술 교류 및 논의를 진행하였다.

- 2023. 08. 08

- Ha Yunchul (Ph.D Candidate, kookmin University) - "Fault-Tolerant Control of Steer-by-Wire with Differential Braking"

: Steer-by-wire 시스템의 고장 유형에 따라 차량의 위험상황이 발생할 수 있기 때문에, 이러한 고장 상황에 대응하기 위한 Fault-Tolerant 제어 시스템을 개발하였고, 이에 대해 공유하였다. 고장 중에서도 (1) 조향각이 고정되는 고장, (2) 조향토크가 생성되지 않는 고장,의 주요 고장에 대해서 다루었고, 양산 차량에 장착되는 기본 시스템을 활용하여 이에 대응하고, Fault-Tolerant 제어 시스템의 한계 성능에 대해 분석한 내용을 공유하였다.

조향각 고정의 경우, 최적 분배 기반으로 문제를 해결하였고, 분배오차 최소화, 액추에이터 고장 및 특성 반영, 제어량에 대한 제약, 마찰한계에 대한 제약 등을 고려한 최적화 문제를 정의하였다. 조향 토크 미생성의 경우, 차량의 suspension geometry에 다른 scrub radius가 조향 모멘트에 대한 모멘트 암으로 작용하는 점을 반영하여, 편제동에 의해 직접 조향 모멘트를 생성하는 전략으로 시스템을 설계하였다. 이러한 연구 결과는 국민대학교 차량동역학 및 제어통합 연구실에서 수행하고 있는 "Development of Hyper-safe Driving Platform based on Cooperative Domain Control"와 "Design and Validation of StBW Emergency Steering Logic"의 연구를 통해 수행되었다. 이러한 연구 내용은 향후 Surrery의 NMPC 기반 자율주행 시스템과 결합하여 자율주행 상황에서의 고장 발생에 대응하기 위한 전략 등에 대한 연구에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

- 2023. 08. 08

- Pietro Stano (Ph.D Candidate, University of Surrey) - "On Pre-Emptive In-Wheel Motor Control for Reducing the Longitudinal Acceleration Oscillations Caused by Road Irregularities"

: 불규칙한 도로의 노면은 차량의 수직방향 및 종방향 진동을 유발하지만, 기존 연구들에서는 종방향 동역학에 대해서는 연구가 부족하다. 또한, 내연 기관의 경우, 상대적으로 느린 응답으로 인해 도로의 불규칙한 영향에 대해 능동적 보상을 하기 어렵다. 따라서, 인휠 파워트레인의 차량의 경우 이러한 도로 상황에 선제적 제어와 함께 효과적인 보상이 가능할 수 있다.

인휠 모터가 장착된 차량에서 전방 노면 정보 기반의 비선형 모델 예측 제어 (Nonlinear Model Predictive Controller)를 이용해 효과적인 개선이 가능할지 연구하였고, 이에 대한 적용 방법 및 결과



에 대해 공유하였다.

실험에 따라, NMPC 기반 종방향 제어를 통해 종방향 가속 성능과 저크 관련 지표를 동시에 개선할 수 있다는 것이 주요한 이점이며, 전방 노면 정보 기반 예측 제어를 통해 가속 성능의 경우 20~45%, 종방향 저크 관련 성능의 경우 33~49%의 개선을 확인하였다.

이러한 연구 결과에 대해 공유하였고, 향후 국민대학교에서는 이러한 연구 결과를 반영하여, 전방 노면 정보 기반 예측 제어에 대한 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

- 2023. 08. 09

- KAI MAN SO (Postdoctoral researcher, University of Surrey) - "Vehicle Stability Control Through Pre-Emptive braking"

: Surrey University에서는 현재 차량 속도가 전방 예상 경로의 곡률에서 안전하지 않은 경우, 선제 제동하기 위한 연구를 수행하였고, 이에 대해 공유하였다. 연구에서는 한계 선회 상황에서 차량의 안정성을 향상시키고, 직접적인 요 모멘트를 발생시키지 않고 종방향 선제 제어 방식을 통해서도 안전 주행을 제한하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 비선형 모델 예측 기반 제어 (Nonlinear Model Predictive Controller)를 사용하였고, 자율주행과 운전자 수동 주행에 함께 적용 가능한 제어기를 설계하였다.

높은 횡가속도에서 언더스티어로 인한 경로 이탈을 방지할 수 있으며, 차량의 미끄럼각을 제한하는 형태의 능동적 안전성을 확보할 수 있다는 결과를 확인할 수 있었다.

이러한 내용은 국민대학교 차량동역학 및 제어통합 연구실에서 승차감을 고려한 차량 모션 제어 전략에 대한 연구들에 반영하여 연구를 수행하게 될 예정이다.

- 2023. 08. 09

- KAI MAN SO (Postdoctoral researcher, University of Surrey) - "On the Optimal Speed Profile for Electric Vehicles"

: 연비 주행은 주행 시간 내 특정 거리에서 에너지 소비를 최소화하기 위한 속도 또는 토크 프로파일을 도출해야 하는 문제로 정의된다. 이전 연구들을 통해 동적 계획법(DP)과 같은 최적화 알고리즘을 포함하여 전역적으로 최적의 에너지 효율을 갖는 주행 프로파일을 도출하는 연구들이 수행되었다. 하지만, EV의 최적 주행 프로파일에 대한 연구들은 부족하여, EV 차량의 최적화된 주행 전략을 개발하였고, 이에 대한 내용을 공유하였다.

연구의 주요한 내용은 EV용 PnG (Pulse-and-Glide)의 최적 조건을 증명하고, 현실적인 EV Powertrain Efficiency Map을 기반으로 최적 속도 프로파일을 도출한 것이다.

이러한 내용은 국민대학교 차량동역학 및 제어 통합 연구실에서 수행하고 있는 '허브연계형 L4 상용차 자율주행 예측구동제어 및 최적운행기술개발' 연구과제에 반영하여 연구를 수행하게 될 예정이다. 해당 과제는 전방 도로 선형 및 인프라, 신호 등에 주행 환경에서 상용 자율차량의 최적 연비 주행을 위해 속도 프로파일을 도출하는 것을 목적으로 하고 있다.

위 안전의 기술 교류를 통해 각 안전에 연관된 국민대학교 차량 동역학 및 제어통합 연구실에서 수행하고 있는 연구들에 대한 주요한 연구 내용 및 연구 결과를 확인할 수 있었고, 향후 연구 수행에도 적극적으로 반영할 예정이다.

추가로, 서레이 대학 (University of Surrey)와도 향후 지속적인 기술 교류를 통해 공통 연구 분야에 대한 연구를 수행할 예정이다.

#### 4. 해외연수 참가 소감 및 BK21사업에 활용계획방안

- \* 출장 소감, 연구, 사업 운영 등 BK21사업에 도움이 될만한 아이디어
- \* 기타 건의 사항 등 자유롭게 기재

국민대학교의 'Steer-by-Brake System for Steer-by-Wire Fault Tolerant Control' 기술과 영국 서레이대학교의 'Torque vectoring system for energy consumption and driving performance' 기술을 교류하기 위한 해외 연수는 8/7 ~ 8/9 총 3일간의 일정으로 진행되었습니다.

국민대학교 우승훈 교수님 및 참여 대학원생들은 전동화 조향 시스템 Steer-by-Wire의 고장 상황 발생 시, 대응할 수 있는 고장 안전 제어 기술을 설명하였다. SbW 시스템은 차세대 조향 시스템으로 전동화 차량 플랫폼에 적합한 구조/기능적 특징이 있기 때문에 현재 자동차 시장에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 영국 서레이 대학 알도 교수 연구실에서도 SbW 시스템에 대한 연구를 진행하고 있었다. 차량의 주행 성능을 주로 연구했기 때문에 기능 안전 관련 연구 기술을 설명할 때 관심을 보였고, 향후 협력 연구 주제로 긍정적인 의견을 받았다.

저는 차량 동역학과 기능 안전 프로세스가 적용된 전동화 차량 제어 및 검증 기술에 관한 연구를 진행하고 있습니다. 최근에는 Verification of safety mechanisms to ensure SbW system stability 를 주제로 연구를 수행하였습니다. 연구 내용은 SbW 시스템의 안정성을 확보하기 위해 리턴던시 안전 시스템을 개발/검증하는 것으로, 발생 가능성이 있는 모든 고장 상황에 대응하는 것을 목표로 진행하였습니다. 해외 연수를 통해 서레이 대학과의 기술 교류에서 개인이 진행하고 있는 연구 분야에 대해서도 의견 공유를 통해 부족했던 연구 내용 및 향후 연구 방향성 측면에서 많은 도움이 되었습니다.

향후 계획으로는 국민대학교와 영국 서레이 대학의 공동 연구 내용을 국제 학술지에 발표할 예정이며, 지속적인 연구를 통해 추가적인 연구 성과를 이룰 것으로 기대하고 있습니다.



- 
- \*보고서는 가능한 자세히기록
  - \*비행기내에서 숙박한 것은 숙박일수에 포함되지않음.
  - \*반드시 해외연수종료후 30일이내에 제출해야함.

위와 같이 해외연수 결과보고서를 제출합니다.

2023년 8월 25일

신청인 : 전 승 옥 (인)

참여교수 : 우 승 훈 (인)

자율주행 xEV혁신인재 교육연구단장 귀하