

융합연구리뷰

Convergence Research Review

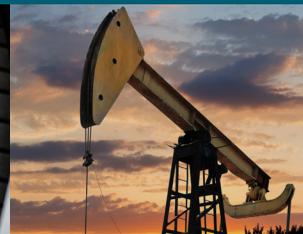
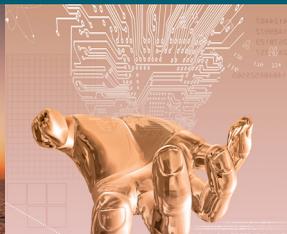
미래의 석유화학 산업을 대체할

시스템 대사공학 기술

-

차세대 자동차를 위한

스마트카 핵심 네트워크 기술



C o n v e r g e n c e R e s e a r c h R e v i e w

Contents

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2017 February vol.3 no.2

- 03 편집자주
- 04 미래의 석유화학 산업을 대체할 시스템 대사공학 기술
- 30 차세대 자동차를 위한 스마트카 핵심 네트워크 기술



발행일 2017년 02월 09일

발행인 하성도

편집인 안주명 김보림

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 승일미디어그룹 주식회사 Tel. 070-7416-4124

디자인 김진영 이숙현 최보람



| 우리의 일상을 바꿀 유망 기술 ‘시스템 대사공학’, ‘스마트카 핵심 네트워크 기술’

2016년 6월, 세계경제포럼(WEF, 다보스포럼)은 세계 주요 국가에 당면한 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대되는 ‘2016년 떠오르는 10대 유망기술’을 발표했다. 나노 센서와 사물인터넷(IoT), 차세대 전지, 무인 차량, 페로브스카이트 태양전지, 열린 인공지능 생태계, 시스템 대사공학 등 4차 산업혁명의 도래로 인한 기술 변화를 예측하게 하며, 사회적·경제적으로 중대한 영향을 미칠 기술로 세계적으로 주목을 받기에 충분했다. 본 호에서는 10대 기술 중 ‘Made in Korea’기술로 환경·에너지 문제에 독보적인 대안책으로 손꼽히는 ‘시스템 대사공학’기술과 우리의 삶을 바꿀 무인차량의 핵심기술인 ‘스마트카 핵심 네트워크 기술’에 대해 살펴보고자 한다.

| 미래에 석유화학 산업을 대체할 시스템 대사공학 기술

‘시스템 대사공학’은 한국과학기술원(KAIST) 이상엽 교수가 창시한 것으로 ‘미생물 공장’으로도 대변되는 기술이다. 이는 미생물의 대사 시스템을 기반으로 체계적인 시뮬레이션을 통해 가공, 실험적 유전자 재조합을 통해 다양한 화학물질과 연료, 고분자 등을 친환경적으로 생산할 수 있는 기술로, 기후변화 등의 환경 문제에 대응할 수 있는 기술로도 주목받고 있다. 이상엽 교수 연구팀은 20여 년간 미생물대사공학 연구에 매진하여, 최고 효율의 숙신산 및 부탄다이올 생산 기술, 세계 최초의 기술린 및 엔지니어링플라스틱 원료 등의 바이오 생산기술 및 기술분야로써 시스템대사공학을 창시, 그간 생물공학 분야에서 중요한 연구를 수행해왔다. 이에 이상엽 교수 연구팀을 통해 미래의 석유화학 산업과 환경문제의 대안이 될 수 있는 ‘시스템 대사공학’기술의 배경과 연구동향 및 전망에 대해 살펴보고자 한다.

| 차세대 자동차를 위한 스마트카 핵심 네트워크 기술

최근 스마트자동차, 자율주행자동차 등 차세대 자동차에 관한 활발한 연구를 통해 무인차량의 시대가 성큼 다가왔다. 이 자동차들이 상용화되기 위해서는 대용량 정보를 원활하게 전달하는 기술이 매우 중요하며, 특히 차량용 통신 네트워크 시장에서는 비용 부담과 차량 무게·부피 증가 없이 초고속 통신 네트워크를 구축하는 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 기존에 개발된 네트워크 기술은 차량 운영에 필요한 기본적 데이터 전송이 가능해 많이 활용되고 있지만, 자율주행자동차 같은 첨단 자동차에 대한 대응이 어려운 단점이 있다. 최근 이를 극복하고자 차량 통신 네트워크의 전송 속도를 최대 100배 높일 수 있는 기술이 대구경북과학기술원(DGIST) 최지웅 교수 연구팀을 통해 개발되었다. 이에 최지웅 교수 연구팀을 통해 차세대 자동차를 위한 차량 내부 네트워크 기술의 발전 과정 및 연구 동향에 대해 살펴보고자 한다.

01

미래의 석유화학 산업을 대체할 시스템 대사공학 기술

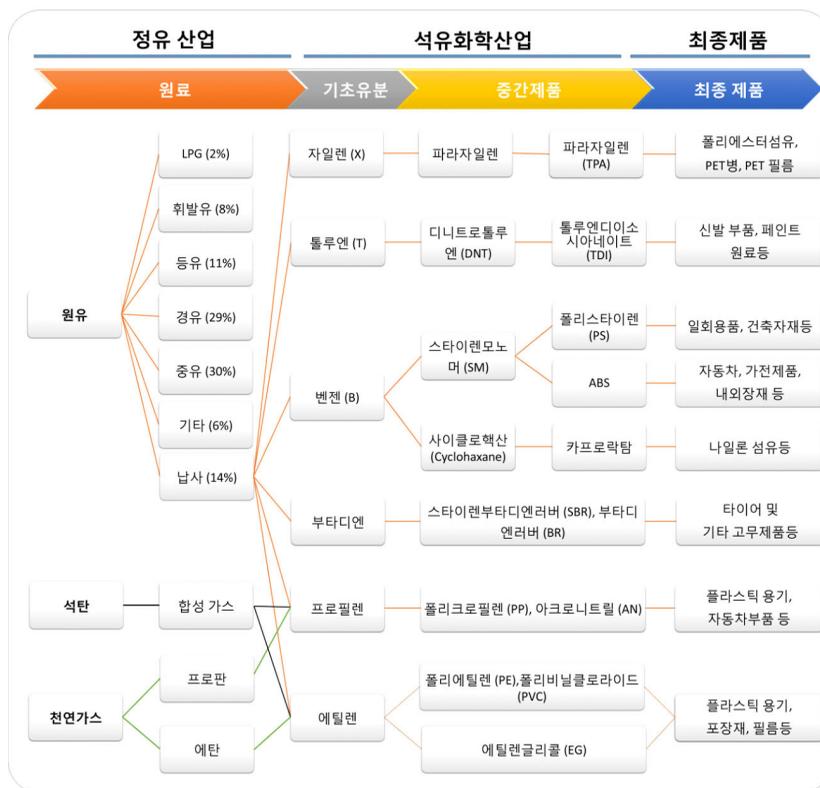
한국과학기술원 (KAIST) 생명화학공학과
이상엽 교수 (leesy@kaist.ac.kr)
유승민 박사 (smyoo@kaist.ac.kr)

01 서론

1.1 석유화학 산업

우리가 주변에서 볼 수 있는 모든 것들은 탄소, 산소, 수소를 주성분으로 하는 유기물과 그 이 외의 무기물로 나눌 수 있다. 현재 우리가 일상생활에서 접하는 대부분의 유기물기반의 소재와 제품들은 원유(또는 천연가스)로부터 만들어진다. 원유는 화학공정을 거쳐 화학공업의 쌀로 불리는 에틸렌, 프로필렌 뿐 아니라 톨루엔과 벤젠 같은 방향족 화합물로 바뀐다. 이들은 의복, 신발, 휴대폰 케이스, 자동차 내장재, 타이어, 컴퓨터와 핸드폰의 외장재와 디스플레이 등 우리의 일상생활에서 빠질 수 없는 다양한 물건들을 만드는데 널리 사용된다 (그림 1).

그림 1. 주요 석유 화학 제품의 계통도 (석유화학협회 및 산업은행 보고서 등을 참고로 재작성)



1900년대 초까지만 해도 대부분의 석유화학 제품은 석탄에서 얻어졌으며 원유는 화학산업의 원료로서 그다지 큰 관심을 끌지 못했다. 이후 세계대전을 거치며 원유의 중요성이 부각되기 시작하였으며 원유로부터 분리된 탄화수소로 고밀도 폴리에틸렌(HDPE), 스타이렌부타디엔러버(SBR)가 개발되어 전시에 군사용품으로 사용되면서 급격한 성장을 이루게 된다. 우리나라의 경우는 정부의 주도하에 1차(1962~1966년)와 2차(1967~1971년) 경제개발 5개년 계획을 통해 석유화학산업의 기틀이 마련되었고, 2014년을 기준으로 석유화학산업의 규모는 850만 톤으로 미국, 중국, 사우디에 이어 세계 4위를 차지하고 있다. 또한, 2015년 석유화학제품 수출액은 378억 달러로 수송기계, 전자제품, 산업용전자제품과 함께 4대 수출품목으로써 우리나라의 경제 성장을 이끌고 있다(석유화학협회).

석유화학산업의 시작 물질인 원유는 다양한 탄화수소로 이루어져 있으며 끓는 점의 차이를 이용하는 분별증류 과정을 거쳐서 중유, 경유, 등유, 납사, 가솔린, 천연가스 등으로 분리된다 (그림 1). 경유, 가솔린, 등유 등은 자동차나 가연기관 및 난방용 연료로 사용되고 천연가스는 난방연료와 석유화학제품의 원료가 되는 메탄, 에탄, 프로판, 부탄의 생산에 사용된다. 납사(Naphtha)는 crackingⁱ이라는 공정을 통해 방향족 화합물인 BTX(벤젠, 톨루엔, 자일렌)와 에틸렌, 프로필렌, 부타디엔과 같은 기초 유분과 다양한 제품에 사용되는 중간 원료로 분리된다. 이들을 중간 원료로 하여 우리가 흔히 플라스틱이라고 부르는 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 같은 합성수지, 자동차 타이어의 주성분인 스타이렌부타디엔러버와 같은 합성고무, 폴리에스터와 나일론 같은 합성섬유가 만들어진다. 나일론은 미국 DuPont사에서 개발, 생산되었는데 그 덕분에 면화, 비단, 모피 등의 자연 섬유에 의존하지 않고 의복의 재료를 값싸게 대량으로 생산할 수 있는 길을 연 세계 최초로 대량 생산된 합성섬유이다. 영국의 한 업체가 방향족 화합물과 에틸렌계 제품을 반응시켜 에스터 결합을 가지는 중합체를 만드는데 성공하여 이것이 현재 합성섬유 중에 가장 대량으로 폭 넓게 사용되는 폴리에스터의 시작이다. 폴리에스터의 장점 중의 하나는 다른 섬유들과 혼합하여 보다 나은 내구성과 보온성이 좋은 섬유를 만들 수 있는 것이다. 우리가 가지고 있는 옷들의 태그를 확인해 보면 대부분 “폴리에스터 100%”라는 표시를 볼 수 있을 것이다. 값싸고 대량 생산이 가능하다는 장점 외에도 합성섬유는 그 화학적 특성을 변형시켜 특수한 기능을 가지게 만들 수 있다는 장점이 있다. 내열성과 높은 강도가 요구되는 방탄복, 소방대원의 방열복, 우주복들은 아라미드라는 섬유로 만들어지는데 이러한 특수한 기능은 천연섬유를 통해서 얻을 수 없다.

i_ 중질(重質)인 석유를 분해하여 경질(輕質)인 석유유분(石油溜分)을 제조하는 석유 분해 법

1.2 석유화학 산업과 환경 문제

앞서 언급했듯이, 현재 우리의 편리한 생활들은 바로 원유 즉 화석연료가 있었기에 가능했다고 해도 과언이 아니다. 하지만, 빠른 산업화로 인해 원유 자원의 소비가 급격히 증가하였고, 이에 따라 에너지 자원 고갈뿐만 아니라 구분별한 원유의 이용으로 상상하지 못했던 환경문제까지 초래하게 되었다. 이를 심각하게 인지한 세계 각국에서는 지구온난화 방지를 위해서 1992년 온실가스 규제를 목적으로 리우환경협약, 1997년 선진국의 온실가스 감축 목표치를 규정하는 교토의정서, 2009년 코펜하겐 기후변화회의(교토의정서를 대체할 기후협약을 도출하려 했던 세계 정상회의), 그리고 드디어 2015년 파리협약 등을 통해 많은 노력을 기울이기 시작했다.

석유자원의 고갈에 대한 우려는 이미 1974년 및 1978년 두 차례 석유파동 이후부터 꾸준히 제기되어 왔고, 고갈 시기 및 가채매장량ⁱⁱ 예측은 기술의 발전과 동시에 변동되고 있으나, 생성되는 속도보다 사용하는 속도가 엄청나게 빠르다는 사실 하나만으로도 화석 원료는 머지않은 시간에 고갈한다는 사실에 대해서는 이견이 없다. 그래서 영국의 대형 석유회사인 British Petroleum(BP)사는 매년 석유자원의 총매장량을 연간 생산량으로 나눈 총매장량/연간생산량 비율(R/P ratio)을 발표하고 있는데, 2016년 발표된 자료에 따르면 총매장량/연간생산량 비율은 2015년 말 기준으로 원유 50.7년, 천연가스 52.8년, 석탄 114년으로 추정되고 있다. 셰일가스ⁱⁱⁱ가 거론이 되고 있지만, 이 또한 한정 자원이고 가스 채집과정에서의 환경오염 가능성이 제기되는 등 여러 문제들을 안고 있기는 마찬가지다.

지구 온도가 평균 2도 이상 증가되면 지구가 스스로 온도를 상승시키는 악순환이 진행되어 인간의 어떠한 기온 억제 노력도 무의미해진다는 우려 역시 계속해서 제기되고, 선진국 중심의 CO₂ 감축협약인 1997년 교토 체제가 기후변화대응에 한계를 보임에 따라 2015년 개도국/미개발국을 포괄하는 유엔기후변화협약 당사국 195개국이 참여하여 글로벌 신 기후체제인 파리협약이 체결된 바 있다. 지구의 온도 상승을 2℃ (바람직하게는 1.5℃) 이하로 유지하기 위해서 전 세계는 2010년 온실가스 배출량 대비 21% 감축해야 하는 것으로 나타났다. 유엔기후변화협약 당사국 195개국이 INDC(Intended Naturally Determined Contribution, 온실가스감축계획)를 제출하기로 합의함으로써, 우리나라는 2015년 6월 국무회의에서 2030년까지 BAU(온실가스배출전망치) 8.5억 톤 대비 37%인 BAU 3.1억 톤으로 온실가스 감축 목표를 확정하였다. 하지만, 우리나라 감축 계획에 대한 전문가들의 분석에 따르면, 주요국 대비 제조업의 비중(31%)이 높고, 철강, 석유화학 등 에너지 다소비업종의 에너지효율이 OECD 최고수준이기 때문에 추가 감축에는 한계가 있다는 전망이다. 따라서, 지금의 석유화학산업을 대체할 만한 친환경적인 생산시스템의 개발

ii_ 현재 실시하고 있는 채취 방법을 계속 쓰면서 현재의 원가 및 가격 수준으로 캘 수 있는 광업 자원의 매장량

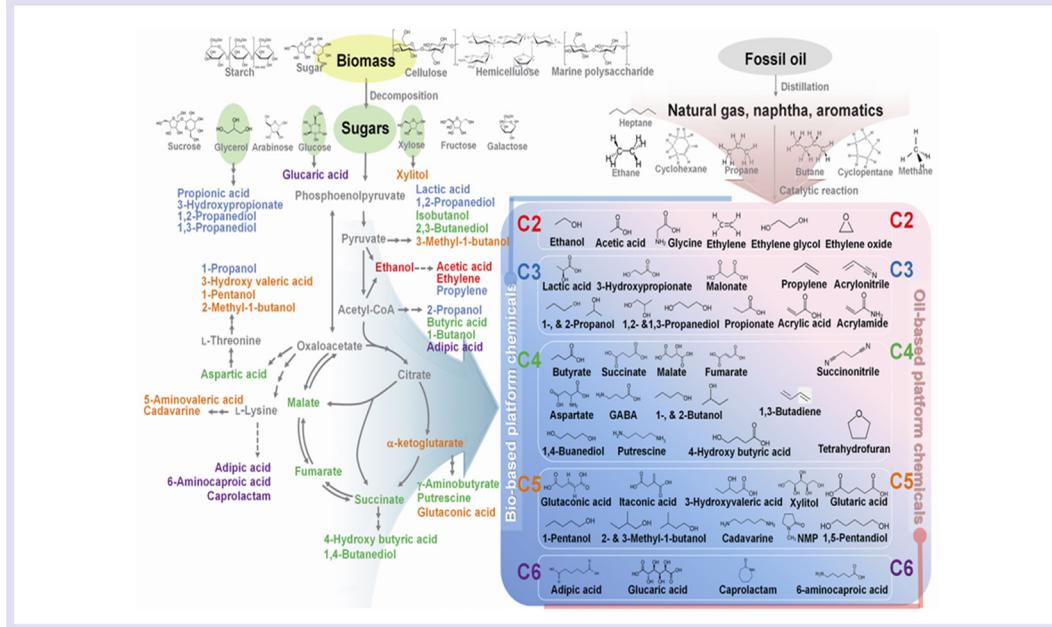
iii_ 모래와 진흙 등이 단단하게 굳어진 퇴적암 지층인 셰일층에 매장되어 있는 천연가스

및 이의 전환이 절실히 요구되고 있고, 전 세계 모든 나라들의 노력이 시급히 진행되어야 한다고 한 목소리를 내고 있다.

1.3 미생물을 이용한 친환경 산업 시스템

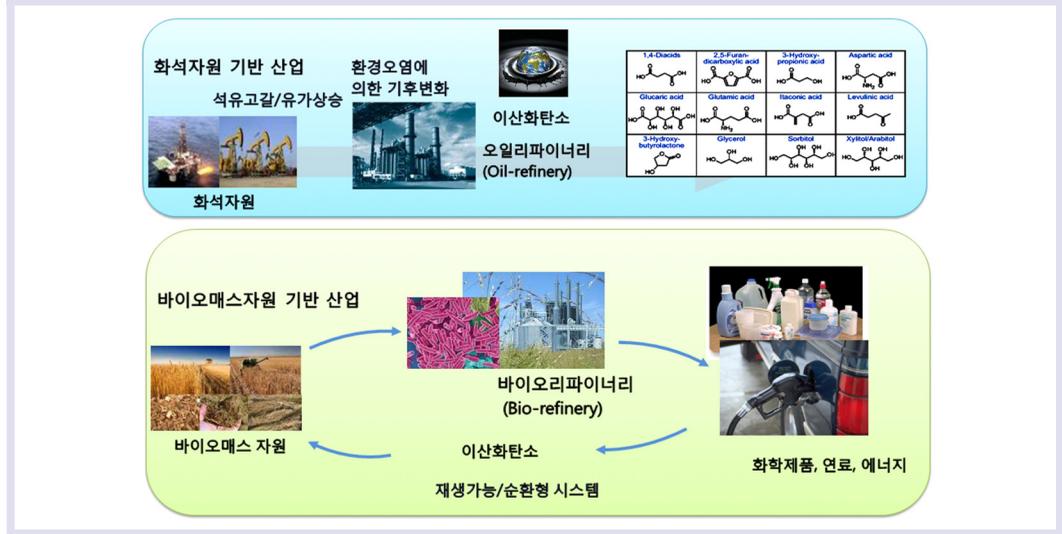
기존의 석유화학 공정에 의해 야기된 여러 가지 문제들을 해결하기 위한 국제사회의 노력 중 가장 현실성 있는 대안은 재생 가능한 바이오매스로부터 유용 화학물질들을 생산하는 지속 가능한 친환경 산업 시스템을 확립하는 것이다 (그림 2).

그림 2. 미생물의 중심 대사회로(왼쪽) 및 원유로부터 생산되는 화합물(오른쪽). 석유로부터 생산되고 있는 대부분의 화합물들은 미생물로부터 생산 가능하다. (Jang et al., 2012, Biotechnology and Bioengineering 에서 발췌)



바이오리파이너리는 원유로부터 생산되던 에너지 및 유용 화학물질들을 재생가능한 바이오매스(식물, 조류 등)를 통해 생산하는 것을 말한다 (그림 3). 최근에는 여기에서 더 나아가 이산화탄소와 햇빛으로부터, 또는 이산화탄소와 수소를 이용하여 원하는 바이오에너지와 바이오화학물질들을 생산하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

그림 3. 바이오매스 자원으로부터 유용 화학물질 등을 생산하는 바이오리파이너리

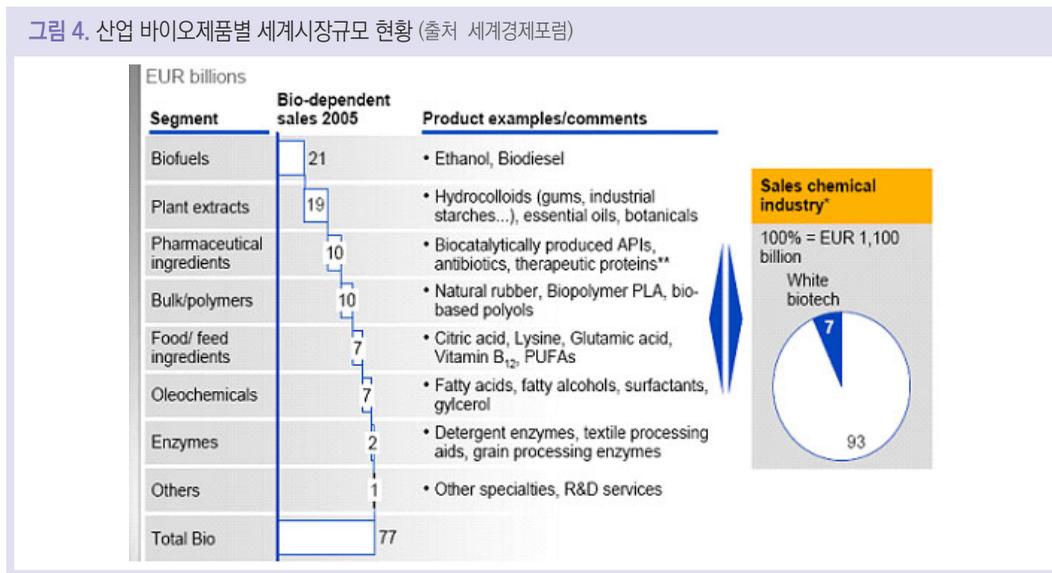


바이오리파이너리에 대한 연구는 선진국을 필두로 세계적인 거대 연구그룹들에 의해서 진행되고 있다. 미국에서의 신재생에너지 연구개발은 미국 에너지부(US Department of Energy; DOE) 산하의 국립연구소(National Laboratory)를 통하여 주도적으로 추진되고 있다. 특히 미국 캘리포니아 버클리에 위치한 로렌스 버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory; LBNL)는 2007년부터 영국계 다국적 정유회사인 BP사로부터 10년간 총 5억 달러의 연구비를 수주하여 목질계 바이오연료, 화석연료를 이용한 공정 개선 등의 원천기술 개발을 진행하고 있다. 연구사업은 LBNL 이외에도 캘리포니아대학교 버클리 캠퍼스(University of California at Berkeley; UCB)와 일리노이대학교 어바나-샴페인(University of Illinois at Urbana-Champaign; UIUC)이 공동으로 참여하는 세계 최대 규모의 바이오에너지 연구 컨소시엄으로서 Energy Biosciences Institute(EBI)를 설립하여 운영되고 있다. LBNL은 미국 DOE로부터도 목질계 바이오연료 개발을 위하여 5년간 1억달러의 연구비를 수주하여 LBNL이외에도 UCB, 캘리포니아 대학교 데이비스(University of California, Davis; UCD), Sandia National Laboratory(SNL), Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL) 등이 참여하는 연구소인 Joint Bioenergy Institute(JBEI)를 설립하여 버클리 인근의 Emeryville에서 운영 중이다. LBNL은 위 2개 연구사업을 기반으로 바이오 에너지 연구사업을 주도하고 있고, 이미 기초과학분야에서 세계적인 명성을 얻고 있다. 국내에서는 비식용 바이오매스로부터 주요 화학물질들과 바이오 연료로 사용 가능한 바이오부탄올, 바이오알켄 등을 생산하기 위한 미생물 및 생물 공정 기술을 개발하는 기후변화대응기술 개발 사업(미래창조과학부, 2009년), 글로벌프린티어 사업(미래창조과학부, 2011년), C1 가스 리파이너리 사업 (미래창조과학부,

2015년)을 통해 바이오리파이너지 및 바이오매스 이용에 대한 연구가 진행되고 있다. 비록 외국에 비해서는 작은 규모의 연구비이기는 하지만 이들 연구개발 사업을 통해 이산화탄소로부터 나무, 역새플, 조류 등 바이오매스 원료를 획득하여 이들 비식용 바이오매스로부터 주요 화학물질들과 바이오연료로 사용 가능한 바이오부탄올, 바이오알켄 등을 생산하기 위한 미생물 및 생물공정을 개발하거나 각종 산업 공정에서 파생되는 기체 형태의 탄소를 활용하는 C1 가스 전환 균주들을 이용하여 유용 물질을 생산하는 등의 다양한 연구들이 진행되고 있다.

이처럼, 세계는 재생 가능한 바이오매스를 이용한 다양한 물질 생산에 대한 막대한 투자를 하고 있고, 세계적 컨설팅 회사인 맥킨지는 2050년 현 산업의 75%, 2065년경에는 100%가 바이오매스를 기반으로 한 산업으로 변모할 것이라고 예측하고 있다. 실제로, 2014년에 세계 바이오산업 시장은 규모는 약 3,231억 달러였으며, 연평균 7.2% 이상의 성장률을 보이고 있다(MarketLine, 2015, Global Biotechnology). 아래 그림은 바이오리파이너지와 직접 관련이 있는 산업 바이오시장을 분야별로 세분화하여 분석한 것으로, 전통적인 바이오산업분야를 제외하면, 바이오연료, 범용 화학소재 및 바이오폴리머 등의 시장 확대가 두드러진다.

그림 4. 산업 바이오제품별 세계시장규모 현황 (출처 세계경제포럼)



이러한 이유로, 국내외 기업들도 앞다투어 대사 공학을 이용하여 다양한 화학물질 생산에 박차를 가하고 있다 (그림 5). 예를 들면, 세계적인 기업인 미국의 DuPont 사에서는 대사공학을 이용하여 옥수수 녹말로부터 1,3-프로판디올(1,3-PDO)을 생산할 수 있는 균주를 개발하였고, DuPont Tate & Lyle Bio Product가 생산 및 상용화하였다. 또한, 2001년 Genencor 사와 협약(DuPont™

Genencore® Science)을 통해 대사공학을 통한 다양한 화합물의 생산에 투자하고 있다. 브라질 기업인 Braskem 사는 미생물 발효를 통해 당으로부터 바이오 에탄올을 생산하고, 촉매 이용 탈수 반응을 통해 에틸렌 생산 및 이를 화학 중합시켜 폴리에틸렌을 합성하였다. 또한, 이 기업은 바이오 에탄올을 기반으로 화학적 반응을 통해 프로필렌 및 폴리프로필렌 생산 연구개발도 진행 중이다. 더 나아가 일본 도요타 통상과도 함께 기술개발에 착수하여 에탄올로부터 HDPE(High Density Polyethylene)와 LDPE(Low Density Polyethylene)를 생산하고 상업화하는 계획을 세우는 등 그 개발 범위를 크게 넓히고 있다.

그림 5. 바이오 기반 화학물질 생산 업체

회사	개발 내용
 GS칼텍스	<ul style="list-style-type: none"> 석유 서비스, 벤젠, 톨루엔 등의 방향족 물질, 폴리프로필렌 생산. 근래에는 생명공학 기술을 응용하여 차세대 환경에너지 개발 중.
 LG화학	<ul style="list-style-type: none"> 정보전자소재 (디스플레이, 전지, 토너, 회로), 석유화학물질 (알콜, 아크릴레이트, 폴리카복실, 폴리머 등), 산업제 등을 생산. 생명공학 기술을 이용한 생분해성 고분자 개발.
 CJ	<ul style="list-style-type: none"> MSG, 핵산 (IMP, GMP, I&G), 아미노산 (라이신, 스프레오닌), 간염백신, 사이토카인, 성인병 치료제, 항생제 개발 및 생산. 발효기술을 이용하여 탁월한 생명공학 기술 보유.
 DAESANG 대성주식회사	<ul style="list-style-type: none"> 아미노산, 핵산, 유기산, 항생물질기능성 감미료, 전통식품류, 건강식품소재, 생물약품(백신, 생리활성물질), 항생제, 올리고당, 진통제, 산업용 효소, 환경 친화성 소재, 식품소재, 화장품 소재 등 개발 및 생산. 발효공학, 효소 및 단백질 제제, 생물전환 기술, 유도체 제조, 고분자소재 개발을 중점적으로 연구.
 DUPONT	<ul style="list-style-type: none"> 화학물질 (부탄올, 1,3-프로판디올, 폴리머), 섬유소재, 플라스틱, 전자, 자동차 관련 부품 생산중 생명공학 기술을 이용한 화학소재 생산비율을 점차적으로 증대. 석유회사인 브리티시페트롤리엄(BP)과 바이오부탄올 개발 및 상업화를 위해 지난 해 제휴 및 대사추세조금과대학(MIT)과 협력연구.
 BASF	<ul style="list-style-type: none"> 유럽 대표적 화학 회사 무기화학물질, 촉매, 석유화학물질, 중간생성물 (디올, 폴리알콜, 이마민 등), 플라스틱 (생분해성 플라스틱, 스티렌 등) 생산 발효공정과 같은 생명공학 기술을 지속적으로 도입하여 비타민, 아미노산, 광학활성 물질 생산 등에 투자 중 숙신산 상업화를 위한 생산 균주 자체 개발 및 외부기술도입 추진
 Cargill	<ul style="list-style-type: none"> 젖산, 에탄올, 바이오디젤, 바이오에 기반한 폴리올 등을 생산 Dow와의 전략적 제휴를 통하여 바이오올리머 사업 추진 중
 mitsubishi.com	<ul style="list-style-type: none"> 석유화학물질 (플라스틱, C4 화학물질 등), 실용화학물질 (식품 재료, 디스플레이, 배터리 물질 등)을 생산 Ajinomoto와 공동으로 숙신산 생산 개발 연구
 ADM	<ul style="list-style-type: none"> 미국 주요 바이오 화학 회사 (젖산) 바이오플라스틱뿐 아니라 바이오연료 (바이오디젤, 에탄올) 생산 연구 진행
 Purac	<ul style="list-style-type: none"> 네덜란드 주요 바이오 화학 회사 (젖산) 젖산 기반의 화학원료 (젖산, 젖산염), 고분자 (락타이드, 폴리락타이드) 생산 연구 프랑스 바이오 화학 벤처회사
 metabolic explorer	<ul style="list-style-type: none"> 유용한 화학원료(Chemical)의 대량생산을 위한 균주 및 효소 개발 연구(Metabolic evolution 기반)
 genomatica	<ul style="list-style-type: none"> 미국의 바이오 화학 벤처회사 1,4-BDO 생산기술 및 특허권 보유, adipic acid, caprolactam 등의 주요 building block chemical 들의 특허권 보유
 NatureWorks	<ul style="list-style-type: none"> 세계 최대의 PLA 생산 회사 바이오 플라스틱 PLA의 물성 개량 연구 다른 단량체, 고분자와의 공중합 및 블렌딩 연구
 AJINOMOTO	<ul style="list-style-type: none"> MSG를 최초로 발견한 한 회사로 세계적으로 아미노산 시장을 주도
 KYOWA HAKKO	<ul style="list-style-type: none"> 대부분의 아미노산과 핵산발효를 최초로 시도한 연구개발 회사
 GLOBAL Bio-Chem	<ul style="list-style-type: none"> 라이신, 스프레오닌 등에서 글로벌 Player
 EVONIK	<ul style="list-style-type: none"> 알라 케토글루타믹산, 옥탄, 폴리머, 폴리에테르 에테르 케텐 (고온 방어용), 세라믹, 아미노산, 폴리에틸 메타아크릴 등 생산
 BioAmber	<ul style="list-style-type: none"> 미국 바이오 기반 숙신산 연구개발 회사 숙신산의 대량생산을 위한 대량배양 연구

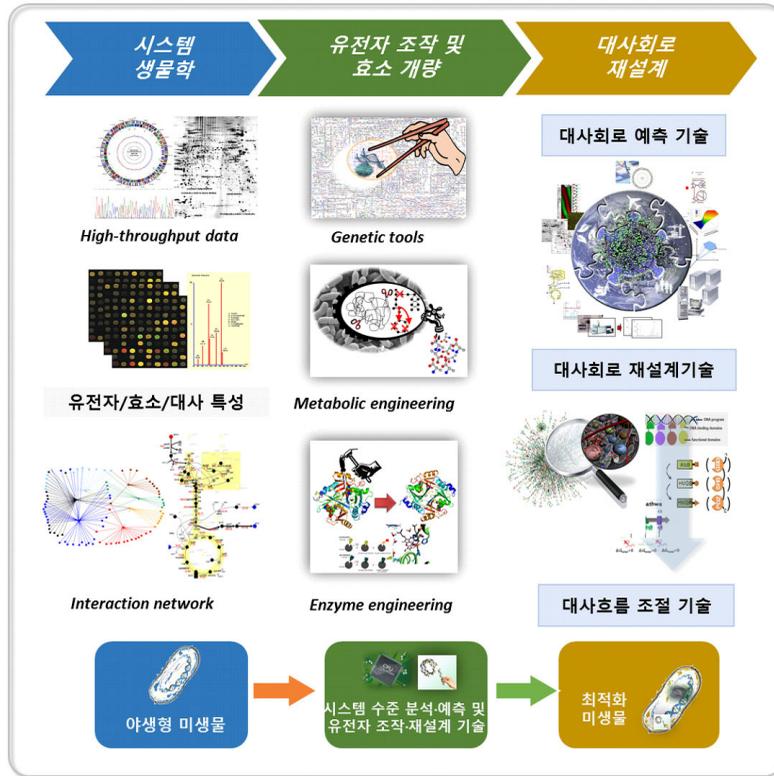
이와 같은 효율적인 바이오에너지 및 바이오 화학물질 생산에 있어서 대사공학 및 시스템 대사공학기술은 핵심 기술이라 할 수 있다. 다음 장에서는 이러한 대사공학에 대해 소개하고자 한다.

02 시스템 대사공학

2.1 대사공학이란

바이오에너지와 바이오 화학물질 같은 유용한 화합물을 대량생산하기 위해서는 미생물의 대사 회로를 적절히 조절해 주어야 하는데, 대사공학은 바로 이러한 세포의 대사과정을 인위적으로 조절하는 기술을 칭한다. 특히, 산업적인 수준에서 미생물을 이용하여 원하는 화합물을 생산하기 위해서는 동시에 수 많은 유전자를 조작하거나 다른 생물 종의 유전자를 도입하여 새로운 대사 회로를 구성하는 세포 재설계 차원의 대사공학이 필요하다. 하지만, 미생물의 대사 회로를 재구성하는 것은 매우 복잡하고 힘든 일이다. 단세포 생물인 미생물이라 할지라도 생명체내의 대사 네트워크와 생체 반응은 네트워크의 네트워크라고 할 만큼 각 세부 요소가 매우 긴밀하고 복잡하게 연결되어 있기 때문이다. 이러한 네트워크의 네트워크를 잘 이해하기 위해서는 대사산물, 대사회로, 유전체정보, 단백질-단백질 반응 등 수 많은 자료가 필요하다. 또한 그 복잡한 다차원 네트워크를 체계적으로 이해하기 위해서는 해석과 모델링을 위한 수학, 전산, 물리, 화학학적 방법론이 적용되어야 한다. 대사흐름분석, 대사조절분석과 같은 대사공학기법과 함께 네트워크 해석기법, 공정 해석에 이용되는 최적화기법 등이 적용된다. 이러한 시스템공학적 접근으로 대사 네트워크 모델링 기법이 확립되면 인위적으로 세포 내 대사 회로를 바꾸기 위해 특정 유전자를 제거하거나 새로운 유전자를 도입하였을 때의 영향을 미리 가상세포로 예측함으로써 대상 대사회로와 유전자의 선택이 컴퓨터상에서 가능해지고 최적화된 배양 환경을 제시할 수 있다. 이러한 일련의 기술들은 유전자재조합기술을 이용한 실제 실험에 드는 시간, 노력, 비용을 획기적으로 줄일 수 있다 (그림 6).

그림 6. 미생물 대사공학을 위한 기술 및 플랫폼



2.2 미생물 세포 공장 개발을 위한 전략

미생물을 이용한 대사공학에서는 앞서 언급한 것과 같이 미생물의 유전체 분석·조작을 위해 다양한 분자 생물학 및 컴퓨터 도구를 이용하여 미생물의 대사와 배양 조건을 거시적인 차원에서 체계적으로 분석함으로써 우리에게 유용한 물질들을 대량으로 생산할 수 있는 미생물 세포 공장을 개발하게 된다. 대사공학을 통해 유용 물질을 생산하는 전반적인 과정은 크게 균주 개발(strain development), 발효(fermentation) 및 분리 정제(separation and purification) 총 3 가지로 크게 구성되어 있다 (그림 7). 그리고, 미생물 세포 공장 개발에 있어서, 다음과 같이 10가지 개발 전략이 있다.²

>>> 10대 미생물 세포공장 개발 전략 <<<

- 1) **프로젝트 디자인** _ 시스템 대사공학을 통해 생산하고자 하는 화합물의 경제성 평가, 지적재산권 확보 등 산업미생물 제작 전략을 체계적으로 수립한다.
- 2) **생산속주의 선정** _ 화합물을 생산하는 미생물 속주를 선정할 때의 고려사항을 제시한다.
- 3) **대사회로 구축** _ 생산하고자 하는 화합물의 대사 회로를 분석하여 구축하고, 생산할 화합물이 선정된 속주에서 자연적으로 합성이 안 될 경우 외부 유전자를 속주 안에 도입하여 해당 대사회로를 구축한다.
- 4) **생산 화합물에 대한 속주의 내성 증진** _ 속주로부터 생산된 화합물의 농도가 일정 이상 높아지면 일반적으로 속주의 성장 및 생산에 악영향을 미치기에, 생산 화합물에 대한 내성을 증진시킬 수 있는 전략을 제시한다.
- 5) **화합물 생산을 저해하는 조절회로 제거** _ 특정 화합물을 대량생산하는 것은 미생물 내부적으로는 부담이 되는 대사 활동이기에 자연적으로 이를 억제하는 저해 조절회로가 존재하므로, 이를 제거하는 전략을 제시한다.
- 6) **세포 내의 전구체 및 보조인자 (cofactor) 농도 최적화** _ 목표 화합물의 대량생산을 위해서는 이에 필요한 전구체 및 보조인자의 세포 내 농도가 적절한 수준을 유지해야 하며, 이를 최적화하기 위한 전략을 제시한다. 여기서 보조인자란 세포 안에서 단백질의 작용을 돕는 인자로서 주로 유기물이나 금속 이온이 이에 해당한다.
- 7) **목표 화합물 생산을 위한 대사흐름분포의 진단 및 최적화** _ 앞서 언급된 일련의 전략들이 수행된 이후 속주가 목표 농도 만큼 화합물을 생산하는지 검증하고, 필요 시 추가적인 유전자 조작을 수행하여 대사흐름분포를 최적화한다.
- 8) **산업미생물의 배양조건 진단 및 최적화** _ 배양조건도 유전자 조작 못지않게 미생물의 화합물 생산능에 많은 영향을 끼치기 때문에 탄소원 등 배양조건에 영향을 검증하고 최적화한다.
- 9) **산업미생물의 생산능을 더욱 증진시키기 위한 시스템 수준의 게놈 조작** _ 생화학 지식을 기반으로 유전자들을 조작하는 상기 전략들과는 달리, 컴퓨터 모델링 및 초고속 게놈 조작 기술 (high-throughput genome-scale engineering)을 이용하여 일반 생화학 지식으로는 예측할 수 없는 유전자들을 추가적으로 조작한다. 여기서 초고속 게놈 조작기술이란 우리가 원하는 미생물의 표현형을 단시간에 얻기 위해 미생물 게놈의 여러 위치에 변이를 일으키는 일련의 기술들을 의미한다. 여기에는 유전자 회로 조작 및 지속적인 유전적·환경적 스트레스의 제공 등이 포함된다.
- 10) **산업 미생물 배양의 스케일업 (scale-up)** _ 산업미생물의 목표 화합물 생산능을 연구실 스케일 (5L-배양기) 뿐만 아니라 파일럿 스케일 (1500L-배양기)에서도 검증한다. 이 단계가 중요한 이유는 배양기 스케일 업이 이루어지면, 일반적으로 영양분의 전달이 부피가 작은 배양기에서보다 원활히 이루어지지 않기 때문에 미생물 생산능에 안 좋은 영향을 끼칠 수 있다. 한편 파일럿 스케일이란 연구실 스케일보다는 크지만 산업규모보다는 작은 중간 단계의 스케일을 일컫는다. 미생물의 발효 규모를 체계적으로 스케일업함으로써, 큰 규모의 발효기에서도 미생물의 생산성이 재현 가능 여부를 평가할 수 있다.

(a) L-arginine 대량생산 균주를 개발하기 위한 프로세스. 총 10가지 시스템 대사공학 전략 중 전략 3은 이 연구에서는 고려되지 않았다. (b) (a)에서 보여진 시스템 대사공학 프로세스에 따라서 유전자 조작된 코리네박테리움 균주의 대사 지도. 'X'와 함께 표시된 점선은 결실된 반응을 나타내며, 'X' 없이 점선만 있을 경우 발현이 하향 조절된 반응을 가리킨다. (c) 대사공학을 통해 조작된 코리네박테리움 균주의 L-arginine의 생산농도, 수율 및 생산성. 이들 수치는 모두 5 리터 생물반응기를 이용한 유가식 배양 (fed-batch fermentation)으로부터 얻은 결과이다. 상기 (a)와 (b)에 표시된 시스템 대사공학의 각 단계에 해당하는 (c)에서의 결과는 모두 동일한 색깔로 표시되어 있다. AR1, AR2, AR3 및 AR4 균주는 포도당만을 탄소원으로 사용된 반면, AR4*, AR5 및 AR6 균주는 포도당과 수크로스가 동시에 활용되었다. (c)에서 긴 막대 그래프와 짧은 막대 그래프는 각 균주의 생산농도와 수율을 나타낸다. 노란 다이아몬드를 잇는 선 그래프는 각 균주로부터 나온 L-arginine의 생산성을 나타낸다. PPP, pentose phosphate pathway; akg, α -ketoglutarate; arg, L-arginine; citr, L-citrulline; f6p, D-fructose 6-phosphate; g6p, L-glucose 6-phosphate; gln, L-glutamine; glu, L-glutamate (Lee et al., 2015, Nature Biotechnology 에서 발췌2).

다음 세션에서는 미생물 대사공학을 통해 유용 물질들을 생산한 대표적인 연구 사례들을 소개하고자 한다.

2.3 미생물 대사공학의 대표적인 연구 사례들

1) 거미 실크 단백질

2012년 영국 빅토리아 앨버트 박물관 패션쇼에서는 황금 거미 120만 마리로부터 무려 8년동안 뽑은 실로 만든 실크 망토를 선보여 세계적인 이슈가 되었다 (그림 9A). 거미 실크 단백질은 자연적으로 존재하는 초고분자량 실크 섬유로서 부드럽고 가벼우면서 강철보다 훨씬 강하고 탄성 또한 매우 뛰어난 것으로 알려져 있으며, 미국 DuPont사에서 개발한 고강력 합성 섬유인 케블라(Kevlar)에 견줄 정도로 평가되고 있다. 거미줄은 인체에서 거부반응을 일으키지 않고 생분해가 가능하기 때문에 수술용 봉합사로도 사용이 가능하고, 최근 David kaplan 교수팀은 거미 실크 단백질이 유전자를 운반할 수 있도록 변형시켜 특정 암세포를 타깃팅하고 DNA를 방출시켜 유전자 전달체로서의 사용 가능성도 보여줌으로써 그 활용도가 더욱 무궁무진해졌다 (그림 9B).³

거미는 총 7가지의 다른 거미줄을 생산할 수 있는데, 그 중에서 제일 강하다고 알려진 major ampullate 실크가 가장 주목 받고 있다. Major ampullate 실크(MaSp1,2)는 약 3,500개의 아미노산으로 구성된 단백질로 알라닌과 글리신이 중점으로 반복된 특수 단백질이다. 이 두 개의 아미노산의 반복으로 인해 거미

실크가 가지고 있는 특수한 물리적인 성질을 떨 수 있는 것이다. 알려진 아미노산으로 이루어진 반복 구간은 높은 인장강도를 보이는 반면 글리신 반복 구간은 고탄력성을 띄게 해준다. 거미 실크 단백질의 대량 생산 연구는 1996년 피치아 파스토리스(*Pichia pastoris*)에서 663 mg/L를 생산하면서 시작되었는데, 대장균, 식물, 누에, 그리고 쥐와 염소 등 여러 생물체에서 생산이 시도되었으나 작은 크기와 미량의 생산에 그쳤고, 단단한 질감과 탄성울면에서 거미 실크와 견줄 수 있지만 끈기면에서는 4.2배 떨어지는 것으로 나타났다.⁴ 또한, BHK (baby hamster kidney) 세포에서도 생산을 시도하였으나 훨씬 적은 수율을 나타내었다. 거미줄은 실크 망토와 같이 섬유 산업에서 사용하기 위해서는 대량 생산이 필수적이지만 거미를 대량으로 사육하는 것은 거미의 공격적인 특성으로 인해 사실상 불가능하다. 이뿐만 아니라 세포내의 불안정한 플라스미드의 존재와 반복적인 서열로 인한 유전자 재조합, 그리고 원치 않은 mRNA^{iv}의 2차적 구조로 인해 완전한 거미 실크 단백질 생산에 어려움이 있고, 알려진 거미 실크 단백질의 서열이 한정적이어서 다양한 단백질의 생산 또한 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하고 자연적 크기의 거미 실크 단백질을 대장균에서 생산한 연구가 국내 연구진에 의해 보고되었다.⁵ 세포내의 단백질체 분석을 통해 여러 개의 스트레스 유전자가 과발현된 것을 확인함으로써 이를 바탕으로 글리신 tRNA 관련 세포 내의 유전자 증폭 및 글리신 tRNA^v의 과발현을 시도하여 총 1.8 g/L의 단백질을 생산하였다 (그림 9C,D).

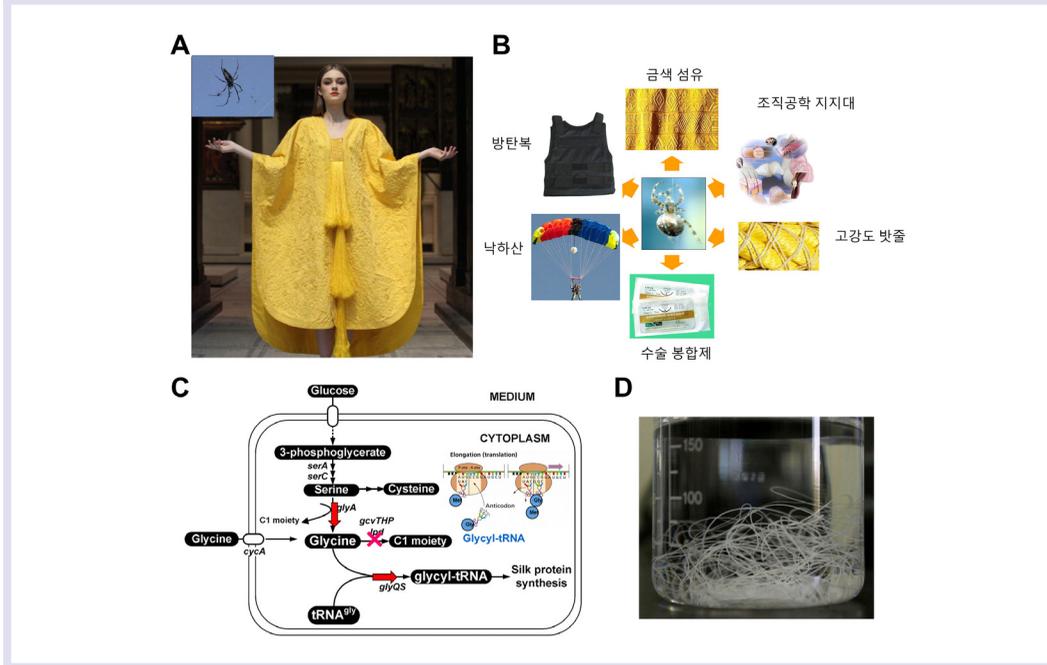
또 다른 연구팀은 ‘스타렛 말미잘’이 수축·팽창할 때 몸길이가 최대 5~10배까지 차이 나는 특성을 이용하여 이와 관련된 유전자를 대장균에서 발현시켜 거미 실크와 유사한 섬유를 만드는데 성공하였다.⁶ 10개의 펩타이드가 30번 반복되어 존재하는 aneroxin 단백질을 대장균에서 생산하고 이를 Ru(II) (bpy)₃²⁺를 촉매로 하는 광화산화 반응을 통해 dityrosine cross-linking^{vi}을 형성함으로써 aneroxin 단백질 하이드로젤을 만들었다. 이렇게 개발된 단백질 하이드로젤은 실크의 장점인 신축성과 생체친화성을 그대로 가지면서도 내구성을 가지는 것이 특징이다.

iv_ 핵 안에 있는 DNA 유전 정보를 해독하여 세포질 안의 리보솜에 전달하는 RNA의 하나. DNA의 유전 정보는 mRNA에 전사됨으로써 mRNA의 암호가 됨

v_ 단백질 합성 과정에서 각각의 코돈(mRNA의 유전암호)에 맞는 아미노산을 운반해 오는 RNA

vi_ 단백질과 단백질 사이, 단백질과 핵산 사이, 또는 DNA 2중 가닥 사이 등에서 공유결합(2개의 원자 간에 몇 개의 전자를 공유하고 있는 결합)이 일어나는 현상

그림 9. 거미 실크 단백질. (A) 황금 거미 120만마리로부터 얻은 실크를 이용하여 만든 망토 (출처: 황금 거미-비단 케이프의 과학 Andrew Purcell, NewScientist). (B) 거미 실크의 활용도. (C) 대장균으로부터 거미실크단백질 생산을 위한 대사회로 조절. (D) 대장균으로부터 생산된 거미 실크 단백질.



2) 바이오 에너지

바이오 에너지는 바이오 에탄올, 바이오 탄화수소, 바이오 가스, 바이오디젤 등이 있다 (그림 10A). 바이오 에탄올과 바이오부탄올로 대표되는 바이오 알코올은 휘발유와 비슷한 기화열, 옥탄가 등의 연료 성능을 가지고 있기 때문에 가솔린 엔진을 대체하여 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다. 바이오 탄화수소는 알칸 계열 연료로서, 전기화학 탈산화공정, 미생물 전기분해공정, 바이오포밍 기술 분리공정 등과 같은 발효공정과 열화학적 분해 공정을 통해 생산된다. 바이오 가스는 주로 메탄(CH₄)가스와 이산화탄소(CO₂)로 구성되어 있고, 일반 쓰레기, 식물, 오물과 같은 원료에서 만들어진다. 현재 발전용 및 지역난방용으로 공급되고 있는 것은 중질(重質) 바이오 가스이고, 천연가스의 대체제로 각광받고 있다. 바이오 디젤은 경유와 특성이 유사하나 경유보다 독성이 적어 이 역시 대체제로 각광받고 있다.⁷

바이오 에너지 중에서 긴 사슬의 탄화수소 생산을 위한 연구가 미생물에서 많이 진행되어 왔다. 유전자 조작 기술이 다른 종에 비해 잘 정립되어 있으며 대사 과정과 생리화학적 특성이 잘 연구되어 있는 대장균에서의 디젤(지방산 에틸 에스터) 생산은 2009년에 처음 보고되었다.⁸ 본 연구에서는 바이오디젤과

유사한 지방산 에틸 에스터(마이크로디젤)이 최초로 만들어졌는데 외래 유전자들인 자이모모나스 모빌리스(*Zymomonas mobilis*) 균주의 pyruvate decarboxylase(pdc) 및 alcohol dehydrogenase B(adhB)를 도입하여 호기배양상태에서 에탄올을 생성시키고 또 다른 외래 유전자인 아시네토박터 베일리(*Acinetobacter bayli*) 균주의 wax-dgaT 유전자의 도입과 올레산(oleic acid)를 배지상의 첨가를 통해 앞서 생성된 에탄올이 에스테르화 반응을 거쳐 지방산 에틸 에스터가 생성되도록 대사회로를 재설계하였다. 이렇게 제작된 재조합 대장균은 포도당으로부터 약 1.28 g/L의 지방산 에틸 에스터가 생산되었고, 파일럿 스케일의 발효를 수행하였을 때, 약 19 g/L의 지방산 에틸 에스터가 생산되었다.⁹ 또 다른 연구에서는 포도당 대신 재생가능한 바이오매스인 식물 유래의 당으로부터 올레산과 같은 지방산을 추가적으로 공급하지 않고도 지방산 에틸 에스터를 생산하는데 성공하였다. 외부의 지방산 공급 대신 대장균의 thioesterase(tesA) 유전자를 과발현시켜서 지방산이 세포내에 과량으로 생산되도록 하고 이렇게 생성된 지방산이 분해되지 않도록 β -산화반응에 관여하는 fade 유전자를 결실시키고, 다른 물질로도 전환되지 않도록 fadD 유전자 변이체를 도입하였다. 이렇게 제작된 균주에 앞선 연구와 동일하게 pdc, adhB 와 wax-dgaT 유전자를 함께 도입하였다. 추가로, 생산된 지방산 에틸 에스터의 증발까지 막음으로써, 최대 농도인 674 mg/L의 지방산 에틸 에스터를 포도당으로부터 생산하였다. 이렇게 제작된 균주를 이번에는 포도당이 아닌 자일란을 탄소원으로 사용할 수 있도록 만들기 위해, 2개의 외래 유전자인 클로스트리듐 스테르코아이눔(*Clostridium stercoainum*) 균주의 xyn10B 유전자와 박테로이드 오바투스(*Bacteoides ovatus*) 균주의 xsa 유전자를 도입하여 대장균의 osmY 유전자와 함께 발현시킨 후 2% 자일란을 이용하여 11.6 mg/L의 지방산 에틸 에스터를 생산하였다 (Steen et al., 2010, Nature).¹⁰ 대장균에서의 알칸(alkane) 생산 역시 보고되었다. 시아노박테리아(cyanobacteria)의 알칸 생합성 대사회로를 찾아서 그 회로내에 존재하는 지방산 대사물질을 알칸으로 전환시키는데 관여하는 두 효소 (aldehyde decarboxylase(Adc), acyl-ACP 환원 효소)를 암호화하는 유전자를 대장균에 도입하여 발현시킴으로써 길이가 다른 혼합 알칸(C13, C15, C17)을 0.3 g/L 생산할 수 있었다.¹¹ 최근에는, 다양한 길이의 알칸을 생산하기 위해서 지방산 신장의 첫 번째 단계에 포함되는 대장균 자체의 FabH를 효소 활성이 더 높은 고초균(*Bacillus subtilis*) 균주의 FabH2로 대체하여 탄화수소 생산 범위를 확대함으로써 C13, C15, C17과 더불어 C14, C16 알칸까지 생산하였다.¹²

긴 사슬 탄화수소와는 달리 가솔린을 대체할 수 있는 짧은 사슬(C4-C12) 탄화수소를 생산하는 데에는 많은 어려움이 있다. 그 이유는 미생물이 그들의 세포막 및 세포 구성성분으로 사용하기 위해서 자연적으로 생산하는 지방산의 길이가 C14-C18에 한정되어 있기 때문이다. 따라서 짧은 사슬 탄화수소를 생산하기 위해서는 짧은 사슬 지방산 및 그 유도체를 생산하는 것이 선행되어야 한다. 사슬 길이는 지방산이 생합성되는 지방산회로에 의해 조절된다. 지방산 생합성의 첫단계에서는 acetyl-coA가 카복실화되어서

malonyl-CoA가 생산되고, acetyl-coA와 malonyl-coA가 ketoacyl 합성효소에 의해 축합되면서 4개의 탄소를 갖는 β -ketoacyl-ACP인 acetoacetyl-ACP (C4 acyl-ACP)가 생성된다. 이 acetoacetyl-ACP는 또 다른 malonyl-CoA와 축합되면서 malonyl-CoA의 말로닐 그룹에 있는 3개의 탄소 중 2개가 지방산 사슬에 더해짐에 따라 추가적으로 2개의 탄소를 더 갖는 C6 acyl-ACP로 환원된다. 이처럼, 대장균은 지방산회로를 거치면 acyl-ACP에 2개의 탄소가 늘어나고 이 과정이 계속적으로 반복되면 짝수 탄소수만큼 길어지는 긴 길이의 알칸이 생성된다. 자연계에 존재하는 지방산은 거의 대부분 짝수인 탄소수로 되어 있다.

최근 발표된 연구에 따르면 ketoacyl 합성 효소를 조작하여 acyl-ACP에 탄소가 연장되는 속도를 늦춤으로써 짧은 사슬 탄화수소를 과량 생산하였다.¹³ 또한 홀수의 탄소 길이를 갖는 짧은 사슬 지방산을 생산하기 위해서 탄소수가 홀수인 프로피온산(propionic acid, 3개의 탄소를 갖음)을 기질로 사용하거나 propionyl-CoA 생합성 경로를 도입하여 생체내 propionyl-CoA 농도가 높아지도록 하여 지방산 생합성 초기에 acetyl-coA 대신에 propionyl-CoA가 관여하도록 대사회로를 설계하였다.¹³

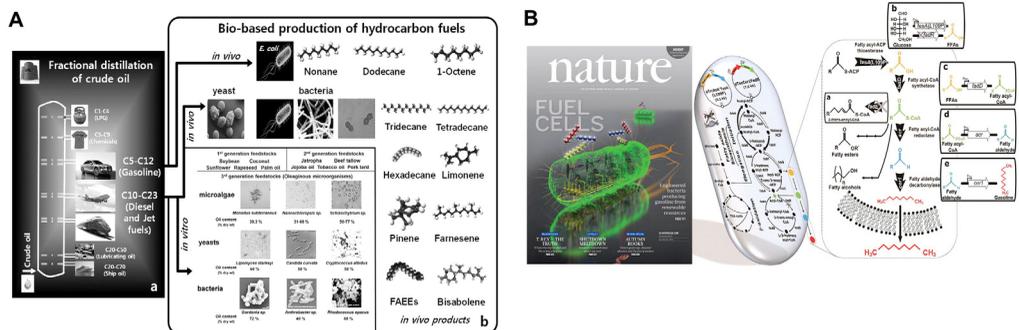
또 다른 연구에서는 짧은 사슬(C9-C12)로 구성된 알칸을 580.8 mg/L 생산하는 대장균 플랫폼을 보고 하였다 (그림 10B).¹⁴ 그 전략을 간략히 소개하면, 먼저 지방산 생합성 개시를 촉진하기 위해서 지방산 합성을 저해하는 요소들(fadE, fadR)을 결실시키고 촉진시키는 요소(fabH)의 생성은 강화시켰다. 그리고, 세포내에 생성된 지방산을 분해하는 요소(fadE)를 제거하여 대장균이 지방을 에너지원으로 사용하는 것을 막았다. 탄소수가 16개와 같이 긴 사슬의 acyl-ACP 만을 지방산으로 분리할 수 있는 TesA 효소의 구조를 변형시켜 탄소수가 작은 acyl-ACP도 지방산으로 분리할 수 있도록 디자인하였고, FadD 효소를 통해 지방산을 지방산 acyl-coA로 전환시켰다. 기존에는 지방산 acyl-coA 상태의 지방산을 추출하여 미생물 밖에서 추가공정을 실시하였으나, 이러한 공정 없이 생산하기 위해서 본 연구에서는 지방산 acyl-coA 에서 가솔린으로 생합성되는 경로를 대장균내에 새로이 설계하여 도입하였다. 애기장대에서 acr(acyl-CoA reductase), CER1(fatty aldehyde decarbonylase) 2개의 외래 유전자를 추출해 대장균에 넣은 것이다. acr 효소는 지방산 아실-CoA를 환원시키는데, 이 아실-CoA가 환원되면 CoA는 분리되고, 지방산 아실은 알데하이드로 바뀐다. CER1은 지방산 알데하이드에서 알데하이드기를 떼어내는 효소이고, 이를 통해 가솔린으로 최종 전환하게 된다.

그 밖에, 대체 연료의 생산 연구도 진행되었다. 모노테르펜(Monoterpene)은 10개의 탄소수를 갖는 아이소프레노이드이며 geranyl pyrophosphate(GPP)로부터 유래된다. GPP는 GPP 합성 효소에 의해 5탄소 단량체 즉, Isopentenyl pyrophosphate(IPP) 또는 dimethylallyl pyrophosphate(DMAPP) 두 분자의 응축을 통해 생성되며, 생성된 GPP는 이어서 모노테르펜 합성 효소에 의해 모노테르펜으로 전환된다. 모노테르펜은 대개 식품 첨가제 또는 방향제로써 사용되었지만 최근 대체 연료로서의 가능성이 많은 연구를 통해 증명되었다. 한 연구에 따르면 myrcene과 limonene의 환원체인 2,6-dimethyloctane과

1-isopropyl-4-methylcyclohexane은 기존의 디젤의 첨가제로서 좋은 성능을 보일 수 있다고 한다.¹⁵ 또 다른 연구에서는, 화학 촉매 반응으로 생성된 camphene, pinene, limonene과 같은 고리형 모노테르펜 이합체의 최대 39.5 MJ/L 체적발열량을 보임으로써 우수한 연료로서의 사용 가능성을 제시하였다.¹⁶ Amyris사는 구성 성분의 절반이 모노테르펜 유도체인 AMJ-700이라는 바이오 제트 연료(bio-jet fuel)를 사용하여 시험비행을 성공한 바 있다(URL: <http://www.amyris.com>). 이와 같은 모노테르펜의 우수한 가능성으로 인해, 대장균을 이용하여 모노테르펜을 생산하기 위한 플랫폼을 개발하기 위해 많은 연구가 진행되고 있으나, 생산은 아직 미비하다. 실제로 박테리아에서의 모노테르펜 생합성은 2003년 대장균에 *S. cerevisiae*의 mevalonate 대사회로에 관여하는 유전자들을 발현시킴으로써 처음 성공하였다.¹⁷

최근 연구에서는 대장균의 유전자 조작을 통해 모노테르펜 기반의 바이오연료 전구체인 사비넨(sabinene)을 생산하기 위한 플랫폼이 개발되었다. *S. pomifera* 균주 유래의 사비넨 합성 효소 발현을 통해 82.12 mg/L의 사비넨을 생산하였다. 이 균주를 이용하여 글리세롤을 탄소원으로 하여 발효한 결과 2.65 g/L의 사비넨을 생산하였다. 세스퀴테르펜(Sesquiterpene, C15 아이소프레노이드)은 또 다른 대표적인 아이소프레노이드 유래의 대체연료원이며, 이미 상용화되었거나, 상용화에 근접한 물질들이 존재한다. 예를 들어, 최근 Amyris 사는 대사공학을 통한 *S. cerevisiae*로부터 생산된 farnesene을 사용한 재생 가능한 디젤과 제트 연료 개발을 위해 Total-Amyris fuels partnership을 맺었다(URL: <http://www.amyris.com>). 그리고, 대장균 기반 bisabolane 생산을 위해 *Arabidopsis thaliana*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii*, 그리고 *Abies grandis* 균주들로부터 유래한 6종의 다른 bisabolene 합성 효소들을 조사하여 이중 최적의 효율을 보이는 효소를 적용한 결과 대장균에서 0.9 g/L 이상의 bisabolene 생산하였다.¹⁸

그림 10. (A) 탄화수소 생산을 위한 석유 및 바이오 기반 과정의 비교 (Lee et al., 2015, Curr. Opin. Biotechnol. 에서 발췌¹⁹)
(B) 대장균에서의 짧은 사슬 탄화수소 (가솔린) 생산을 위한 대사 회로 (Choi et al., 2013, Nature 에서 발췌¹⁴)



3) 생분해성 플라스틱

우리 주변에서 가장 널리 사용되고 있는 옷과, 포장재, 음료수 병과 같은 일상용품은 물론 자동차와 항공기, 우주선 소재까지 쓰이지 않는 곳이 없는 플라스틱 역시 미생물 대사공학을 이용하여 환경친화적으로 생산하고, 환경친화적으로 사용될 수 있다. 플라스틱은 우리 생활에 많이 사용되는 고분자로서, 전자기기, 일회용 컵, 접착제 등 여러 분야에 쓰이고 있지만, 대부분은 석유로부터 생산되고 있고 2014년 유럽플라스틱 제조업협회 PlasticEurope 보고에 따르면 전 세계 플라스틱 생산량은 3억 1천 100만톤이고, 이 중 2억 6천만 톤은 플라스틱 제품을 만드는 원료인 폴리머 재료 생산량이었다. 이러한 플라스틱의 대량 생산 역시 기후 변화 등 다양한 환경 문제를 일으키고 있어 재생 가능한 자원으로부터의 생산이 주목 받고 있다. 그 중, 생물학적 생산 경로를 통한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 대사공학적으로 개량된 미생물을 통한 생산이 크게 늘고 있다.

세계적인 미국 기업인 DuPont사는 식물성 바이오매스를 이용한 소로나(Sorona)등의 제품으로 바이오 폴리머 시장을 공략하고 있다. DuPont은 Tate & Lyle과 합작으로 총 1억 달러를 투자하여 연산 4만 5천 톤 규모의 Bio-PDO 공장을 미국 테네시 주, 루던(Loudon)에 설립하였고 이 외에 소로나의 물성을 개선하여 자동차 내장재 및 부품, 전자제품, 카펫, 섬유 등 다양한 분야에 적용하는 한편, 인비스타(Invista), 도레이(Toray) 등을 비롯한 다수의 섬유제품 메이커에 라이선스를 부여하여, 소로나 시장을 확대하고 있다. 또한, 최근에 개시한 Bio-PDO 공장의 경우 기존 석유화학 기반의 공정과 비교했을 때에 에너지 소비를 40% 절감할 수 있다고 발표하였으며, Frost & Sullivan 컨설팅은 10년 후 바이오폴리머가 전체 플라스틱 시장의 1.5~4.8%를 차지하면서 연간 400만 ~1,250만 톤의 규모에 이를 것으로 전망하고 있다.

대표적인 바이오플라스틱으로 알려진 폴리유산(PLA)산업은 미국 NatureWorks사가 시장을 선도하고 있는데, 2014년 기준으로 연간 15만 톤 규모의 폴리유산을 생산하고 있고, PLA 원료물질인 젖산 및 락테이트 역시 자체적으로 수급하고 있다. 그 다음으로는 중국 Hisun Biomaterials가 여러 업체로부터 원료 물질을 수급 받아 연간 1만 5천 톤 규모의 폴리유산을 생산하고 있다. 네덜란드 Synbra Technology는 연간 5천 톤 규모를 생산하고 있고, PLA의 모노머인 락테이트는 연간 7만 5천 톤 규모로 생산하는 Purac으로부터 공급받고 있다. 국내의 경우는 PLA의 국내 소비량은 연간 5,000 톤으로 추정되고 있으나 대부분 수입에 의존하고 있다.²⁰

최근에는 국내 연구진이 대장균에서 비천연물질인 락테이트를 락틸코에이(lactyl-CoA)로 전환 후 폴리락테이트(poly lactate)를 생산하고, 이를 바탕으로 락테이트와 글라이콜레이트의 공중합체인 poly lactic-co-glycolic acid (PLGA)를 생산하였다 (그림 11).²¹ PLGA는 생분해성 고분자들 중에서 미국 식품의약청(FDA)의 승인을 받은 생체 친화적인 물질로 약물전달체 및 인공혈액, 조직공학용 지지체, 수술용 봉합사 등 다양한 의학 분야에 적용되고 있는 대표적인 물질이다. PLGA는 공중합체 내

4) 금속 나노 입자

대사공학을 통해 미생물 내에서 다양한 금속 나노 입자들도 생산할 수 있다. 금속 나노 입자는 의료, 화장품, 에너지 변환 및 저장, 촉매 등의 광범위한 응용에 사용되고 있다. 금속 나노 입자는 일반적으로 화학적인 방법으로 합성되는데, 현재 생산되는 나노 입자는 합성과정에서 여러 화학물질을 환원제로 사용하고 있고, 유독한 유기용매 및 값비싼 촉매의 사용과 고온 및 고압의 조건이 필요하므로 환경오염 가능성이 매우 높고 많은 에너지를 소모해 경제성이 떨어진다는 문제점이 있다. 따라서 나노 입자의 합성방법에 있어 생물학적 환원제를 이용한 친환경적이고 경제적인 대안이 거론되고 있다. 최근 생물학적 나노 입자의 합성에 있어 미생물 및 식물 추출물 등을 이용하여 금속 이온들을 환원시켜 나노 입자를 만들고, 이를 이용하여 유용한 물질로의 합성이 가능함을 보이는 연구들이 속속 보고되어 있어 전 세계가 친환경적인 나노 입자 합성법에 대한 연구에 더욱 박차를 가하고 있다.²²

금속 나노 입자의 생합성은 1960년대부터 시작되었다. 생체 나노 입자에 대한 대부분의 연구는 미생물을 이용한 금속 회수 응용 및 광석 복합체에 대한 요구가 높기 때문에 귀금속 나노 입자, 특히 금과 은의 합성에 중점을 두었다.

미생물은 세포 내 항상성과 생존을 유지하기 위해 금속 양이온 수송을 필요로 하고, 세포 주위에 존재하는 금속 이온은 세포막을 통과하여 세포질로 전달될 수 있다. 세포내의 금속 이온의 농도는 세포막을 가로 지르는 세포질로부터의 역 흡수 및 유출의 흐름 평형 상태에 의해 유지된다. 세포막에 존재하는 대부분의 운송체(transporter)는 다양한 전이 금속 양이온을 운반할 수 있지만 이에 대한 메커니즘은 명확하게 알려져 있지 않다. *Synechocystis* 및 *Synechococcus* sp.와 같은 시아노박테리아는 금속 결합 단백질을 생산하고 금속 양이온은 광합성과 호흡 과정에서 전자 전달을 위해 세포에서 Fe, Mn, Cu와 같은 금속 클러스터로 조립된다. 일부 미생물은 Hg, Pb 및 As를 포함한 금속들을 원형질막공간(periplasm)에서 세포질에 있는 금속 결합 단백질로 직접 전달함으로써 중금속에 의한 손상을 방지하기도 한다. 또한 아시네토박터 바우마니(*Acinetobacter baumannii*), 폐렴간균(*Klebsiella pneumonia*), 결핵균(*Mycobacterium tuberculosis*), 녹농균(*Pseudomonas aeruginosa*), 살모넬라(*Salmonella* sp.), 콜레라균(*Vibrio cholera*)와 같은 독성 미생물 세포는 해독을 위해 은 결합 단백질을 생성하여 은 입자를 축적 및 배출한다. 이러한 여러 가지 이유와 메커니즘을 통해 야생형 미생물에서도 여러 유형의 금속 나노 입자가 생성되지만, 이 경우 생합성 효율이 낮고, 나노입자의 크기 및 조성을 제어하기가 어렵다.

최근에 phytochelatin(PC) 또는 metallothionein(MT)을 과량으로 발현하도록 개량된 대장균을 통해 다양한 금속 나노 입자를 생합성한 연구결과가 보고된 바 있다 (그림 12A).²³ 이 연구에서 재조합 대장균은 금속 나노 입자의 생합성을 위해 원하는 금속 이온 용액을 첨가한 배지에서 배양된다. PC는 Cd, Cu, Ag, Pb 및 Hg와 금속 복합체를 형성하는 반면, MT는 Cu, Cd 및 Zn 이온과 함께 금속 복합체를 형성한다는

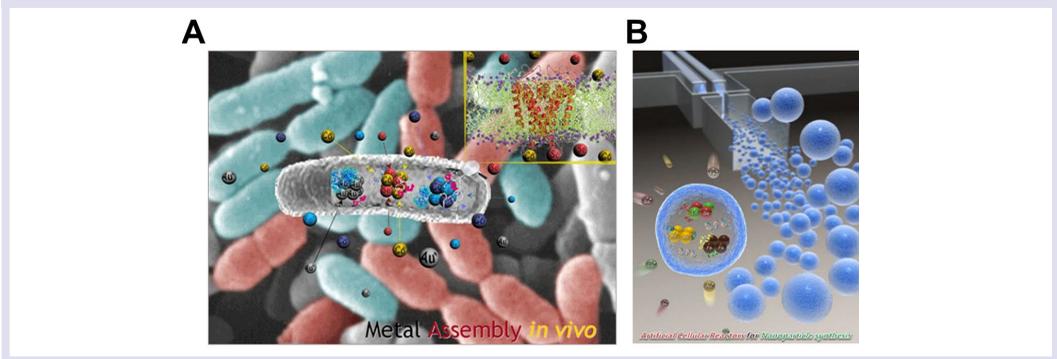
것이 입증되었다. 따라서, 본 연구에서는 금속 나노 입자의 스펙트럼을 넓히기 위해 PC와 MT를 함께 발현 시켜 금속, 2중 금속, 3중 금속, 반도체, 귀금속, 자성 및 희토류 금속 등 다양한 금속류를 생산할 수 있었다.

금속 나노 입자는 같은 성분일지라도 그 크기와 형태에 따라 다른 특성들을 가지므로, 산업적 응용측면에 있어서 이들의 입자 크기와 형태를 제어하는 것이 매우 중요하다. 하지만, 실질적으로 세포 하나하나의 이질성, 금속 독성이 세포의 생존력에 미치는 영향, 각 세포 주위의 다른 금속 이온 농도 등으로 인해 금속 나노 입자를 미생물에서 균일한 형태와 크기로 생합성하는 것이 매우 어렵고 또한 그것을 제어하는 것도 쉽지는 않다. 이 문제를 극복하기 위해 미세 방울을 생성하는 미세 유체 시스템이 개발되었다. 재조합 대장균 세포 및 금속 이온을 나노 리터 부피의 미세액에 캡슐화시키고, 개별적으로 캡슐화된 재조합 대장균 세포는 방울 크기와 5 mM 이상의 처리 된 금속 선구 물질(precursor)의 농도 및 기타 반응 조건의 조절을 통해 균질한 나노 입자를 합성할 수 있었다.^{24, 25} 금속 나노 입자의 합성을 위한 또 다른 시스템으로, 다양한 금속 나노 입자의 시험관내 생합성을 위한 인공 생물 반응기로서 작용하는 미세 방울 내에 금속 결합 단백질을 발현하는 재조합 대장균의 세포 추출물은 캡슐화시켰다. 이 생체 외 생합성 시스템을 이용하여 여러 종류의 금속 나노 입자를 합성할 수 있었다 (그림 12B).²⁴ 이 연구에서는 금속 결합 단백질을 완전히 발현시킨 재조합 대장균 세포를 용해시키고 세포내 성분들을 온도 반응성 하이드로겔의 단량체와 혼합한 후, 마이크로 유체 장치를 사용하여 고분자 미립자를 생성시켰다. 이들 미립자를 타겟 금속 전구체가 들어있는 용액에 분산시키면 금속 전구체가 미립자 안으로 유입되고 유입된 금속이온들은 금속 결합 단백질과의 반응을 통해 다양한 금속 나노 입자를 합성할 수 있는 개별적인 화학 반응기 역할을 하게 된다. 금속 나노 입자가 미생물 생체 내에서는 상대적으로 크기가 작고 낮은 수율로 합성될 수 있는 반면, 인공 마이크로 반응기를 사용하는 생체 외 생합성 시스템을 이용하면 균질한 크기의 금속 나노 입자를 보다 높은 수율로 합성할 수 있어 고효율 스크리닝, 분자 모니터링 및 기타 생체 의학 응용이 가능하다.

그림 12. 다양한 금속 나노 입자 생산을 위한

(A) 대장균 세포 공장의 모식도 (Park et al., 2010, Angewandte Chemie International Edition 에서 발췌²³)

(B) 생체 외 금속 나노 입자 합성을 위한 인공 마이크로 반응기의 모습 (Lee et al., 2012, ACS nano 에서 발췌²⁴)



03 맺음말

현재 인류는 인구폭발 문제, 식량 부족, 에너지 부족, 물부족, 노령화, 자원고갈, 지구 온난화 등 힘들지만 반드시 해결해야 할 여러 가지 문제들에 직면해 있다. 과연 이러한 문제의 답을 우리는 어디서 구할 수 있을까? 그 중 일부는 본지에서 언급한 시스템 대사공학으로 해결할 수 있을 것이다. 미생물의 체계적인 시스템을 기반으로 대사공학을 통해 다양한 화학물질과 연료, 고분자들을 친환경적으로 생산할 수 있는 기술인 시스템 대사공학. 이 기술은 앞서 언급한 인류가 직면해 있는 기후변화 등 환경 문제에 대응할 수 있는 기술로 꾸준히 주목 받아 왔고, 그 중요성은 최근 더욱 주목 받으며 2016 세계경제포럼(WEF, 다보스포럼)에서 떠오르는 10대 기술로 선정하기도 하였다. 본지에서는 언급하지 않았지만, 현재 미생물 대사공학은 생합성 경로 예측 시스템 및 인실리코-셀 모델링 기법^{vii}이 융합된 바이오 정보 통합 시스템과의 융합적 접근방법을 통해 보다 체계적인 시스템 대사공학으로 업그레이드되고 있다. 또한, 생물학적 요소들을 필요에 의해 새롭게 디자인하는 합성 생물학과의 또 다른 융합적 접근방법을 통해 기존에 존재하는 자연 상태의 생물학적 시스템을 개량 혹은 재설계하여 보다 향상된 유용 산물을 생산함으로써 대사공학의 효율성은 극대화되고 있다. 이처럼 시스템 대사공학은 여러 학문과의 융합을 통해 현재 인류가 안고 있는 문제들을 더 한층 명쾌하게 해결할 수 있는 열쇠들을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

vii_ 게놈 염기서열을 통한 데이터들과 실험 데이터들을 통해 구축한 게놈 수준의 대사 네트워크 모델 (인실리코-셀)을 이용하여 실제 세포의 모사, 분석, 유전자 조작 후보군을 예측하는 기법

PROFILE

저자 **이상엽**
Lee. Sang Yup

학력 Northwestern University 화학공학 박사
Northwestern University 화학공학 석사
서울대학교 화학공학 학사

경력 現) KAIST 생명화학공학과 특훈교수
現) KAIST 생물공정연구센터 소장
現) KAIST 생물정보연구센터 소장
前) KAIST 생명과학기술대학 원장
前) KAIST 연구원 원장

저자 **유승민**
Yoo. Seung Min

학력 KAIST 생명화학공학 박사
KAIST 생명화학공학 석사
동국대학교 응용생물 학사

경력 現) KAIST 연구교수
前) KAIST 연수연구원
前) (주) 메디제네스 팀장

참고문헌

1. Jang, Y. S., Kim, B., Shin, J. H., Choi, Y. J., Choi, S., Song, C. W., Lee, J., Park, H. G. & Lee, S. Y. Bio-based production of C2-C6 platform chemicals. *Biotechnol. Bioeng.* 109, 2437-2459 (2012)
2. Lee, S. Y. & Kim, H. U. Systems strategies for developing industrial microbial strains. *Nat. Biotechnol.* 33, 1061-1072 (2015)
3. Numata, K., Reagan, M. R., Goldstein, R. H., Rosenblatt, M. & Kaplan, D.L. Spider silk-based gene carriers for tumor cell-specific delivery. *Bioconjug. Chem.* 22, 1605-1610 (2011)
4. Fahnestock, S. R. & Bedzyk, L. A. Production of synthetic spider dragline silk protein in *Pichia pastoris*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 47, 33-39 (1997)
5. Xia, X. X., Qian, Z. G., Ki, C. S., Park, Y. H., Kaplan, D. L. & Lee, S. Y. Native-sized recombinant spider silk protein produced in metabolically engineered *Escherichia coli* results in a strong fiber. *Proc Natl Acad Sci USA.* 107, 14059-14063 (2010)
6. Yang, Y. J., Kim, C. S., Choi, B. H. & Cha, H. J. Mechanically durable and biologically favorable protein hydrogel based on elastic silk-like protein derived from sea anemone. *Biomacromolecules.* 16, 3819-3826 (2015)
7. 바이오 에너지 이슈분석 및 정책제언, 녹색기술센터, (2014)
8. Kalscheuer, R., Stölting, T. & Steinbüchel, A. Microdiesel: *Escherichia coli* engineered for fuel production. *Microbiology.* 152, 2529-2536 (2016)
9. Elbahloul, Y. & Steinbüchel, A. Pilot-scale production of fatty acid ethyl esters by an engineered *Escherichia coli* strain harboring the p(Microdiesel) plasmid. *Appl. Environ. Microbiol.* 76, 4560-4565 (2010)
10. Steen, E. J., Kang, Y., Bokinsky, G., Hu, Z., Schirmer, A., McClure, A., Del Cardayre, S. B. & Keasling, J. D. Microbial production of fatty-acid-derived fuels and chemicals from plant biomass. *Nature* 463, 559-562 (2010)
11. Schirmer, A., Rude, M. A., Li, X., Popova, E. & del Cardayre, S. B. Microbial biosynthesis of alkanes. *Science* 329, 559-562 (2010)
12. Harger, M., Zheng, L., Moon, A., Ager, C., An, J. H., Choe, C., Lai, Y. L., Mo, B., Zong, D., Smith, M. D., Egbert, R. G., Mills, J. H., Baker, D., Pultz, I. S. & Siegel, J. B. Expanding the product profile of a microbial alkane biosynthetic pathway. *ACS Synth. Biol.* 2, 59-62 (2013)

13. Torella, J. P., Ford, T. J., Kim, S. N., Chen, A. M., Way, J. C. & Silver, P. A. Tailored fatty acid synthesis via dynamic control of fatty acid elongation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 110, 11290–11295 (2013)
14. Choi, Y. J. & Lee, S. Y. Microbial production of short-chain alkanes. *Nature* 502, 571–574 (2013)
15. Tracy, N. I., Chen, D., Crunkleton, D. W. & Price, G. L. Hydrogenated monoterpenes as diesel fuel additives. *Fuel* 88, 2238–2240(2009)
16. Meylemans, H. A., Quintana, R. L. & Harvey, B. G. Efficient conversion of pure and mixed terpene feedstocks to high density. *Fuel* 97, 560–568 (2012)
17. Martin, V. J., Pitera, D. J., Withers, S. T., Newman, J. D. & Keasling, J. D. Engineering a mevalonate pathway in *Escherichia coli* for production of terpenoids. *Nat. Biotechnol.* 21, 796–802 (2013)
18. Peralta-Yahya, P. P., Ouellet, M., Chan, R., Mukhopadhyay, A., Keasling, J. D. & Lee, T. S. Identification and microbial production of a terpene-based advanced biofuel. *Nat. Commun.* 2, 483 (2011)
19. Lee, S. Y., Kim, H. M. & Cheon, S. Metabolic engineering for the production of hydrocarbon fuels. *Curr. Opin. Biotechnol.* 33, 15–22 (2015)
20. 바이오화학산업동향지, 한국생명공학연구원 (2015)
21. Choi, S. Y., Park, S. J., Kim, W. J., Yang, J. E., Lee, H., Shin, J. & Lee, S. Y. One-step fermentative production of poly(lactate-co-glycolate) from carbohydrates in *Escherichia coli*, *Nat. Biotechnol.* 34, 435–440 (2016)
22. Park, T. J., Lee, K. G. & Lee, S. Y. Advances in microbial biosynthesis of metal nanoparticles. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 100, 521–534 (2016)
23. Park, T. J., Lee, S. Y., Heo, N. S. & Seo, T. S. In vivo synthesis of diverse metal nanoparticles by recombinant *Escherichia coli*. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 49, 7019–7024 (2010)
24. Lee, K. G., Hong, J., Wang, K. W., Heo, N. S., Kim, D. H., Lee, S. Y., Lee, S. J. & Park, T. J. In vitro biosynthesis of metal nanoparticles in microdroplets. *ACS Nano.* 6, 6998–7008 (2012)
25. Jung, J. H., Park, T. J., Lee, S. Y. & Seo, T. S. Homogeneous biogenic paramagnetic nanoparticle synthesis based on a microfluidic droplet generator. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 51, 5634–5637 (2012)

02

차세대 자동차를 위한 스마트카 핵심 네트워크 기술

대구경북과학기술원 (DGIST) 정보통신융합공학전공
최지웅 교수(jwchoi@dgist.ac.kr), 최은민, 한성민

01 서론

최근 차량의 연비 향상, 운전자를 위한 편리성 및 안전성 향상을 위해 많은 연구자들과 자동차 업체에서 자율 주행 자동차나 커넥티드 카에 관한 연구를 진행하고 있다. 자동차의 자율 주행을 위해 고성능 카메라, 레이더, 라이더(LIDAR) 등을 이용하여 정확도가 높은 sensing 기술, 센서로 받은 데이터를 통해 사람, 자동차, 동물, 자전거인지 파악을 하기 위한 인지 기술, 센서로 감지 하지 못하는 곳의 상황을 인지하기 위한 차량 간 통신 (V2V: vehicle-to-vehicle), 효율적으로 교통 흐름을 관리하기 위한 차량과 인프라 간 통신 (V2I: vehicle-to-infrastructure) 등이 주목 받고 있다 (그림 1). 이와 같은 기술들이 발전함에 따라 차량 내부에도 많은 시스템들이 장착되고 있다 (그림 2).

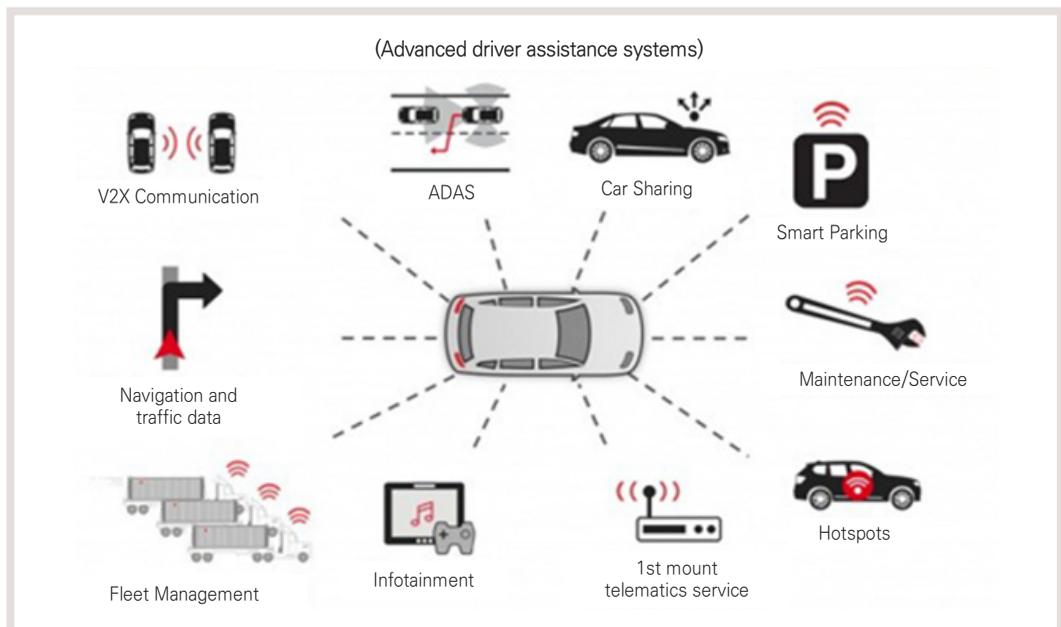


그림 1. 자율 주행 자동차를 위한 서비스들¹

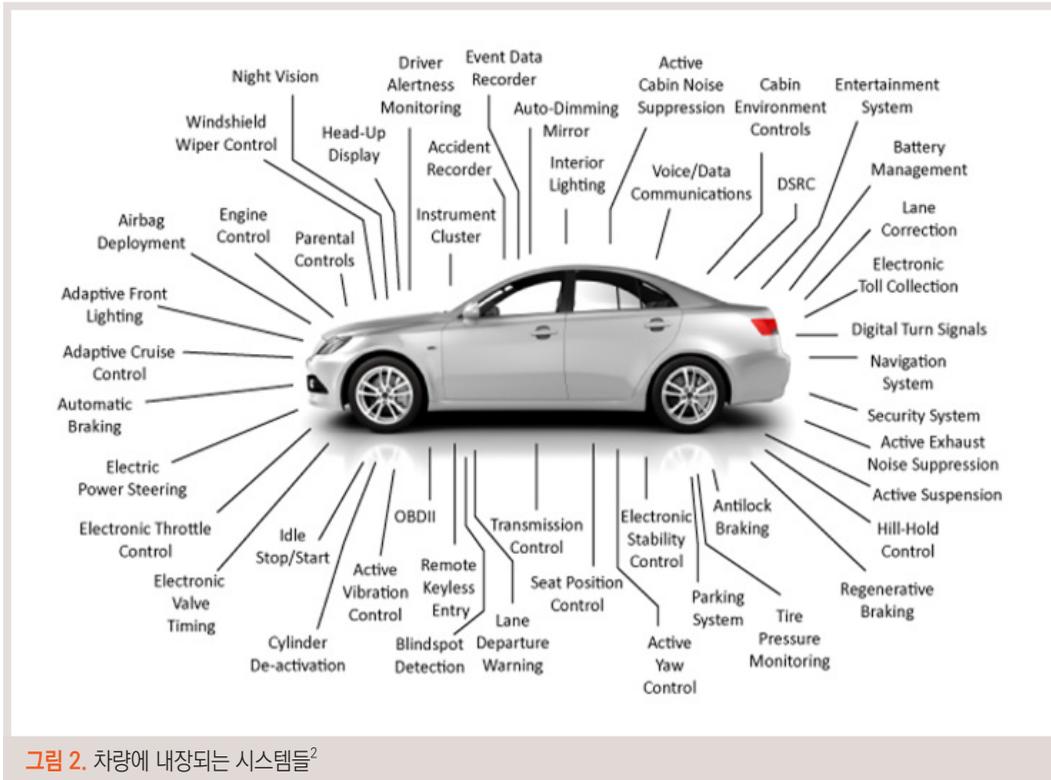


그림 2. 차량에 내장되는 시스템들²

각종 고성능 카메라 및 센서, 인포테인먼트 시스템, 첨단 운전자 지원 시스템 (ADAS: advanced driver assistance system), 차량용 헬스케어 시스템 등을 내장함에 따라 다수의 ECU (electronic control unit)¹에 의한 복합 제어가 요구되고 있다. 그 결과 차량 내부 네트워크의 데이터 트래픽 양이 증가하고, 실시간으로 많은 데이터를 전송하기 위해 차량 내부 네트워크에서도 높은 데이터 전송속도가 요구되고 있다. 본 리뷰에서는 차량 내부 장치 간의 효율적인 통신과 차세대 자동차를 위해 추가적인 채널 용량을 확보하기 위한 차량 내부 네트워크 발전 과정과 연구 개발 동향을 소개하고자 한다.

¹) 자동차의 엔진, 자동변속기, ABS 따위의 상태를 컴퓨터로 제어하는 전자 제어 장치

02 차량 내부 네트워크의 발전

2.1 CAN (Controller Area Network)

1) CAN의 도입 배경^{3,4}

초기에 자동차는 기계적인 방식으로 운전 기능을 수행하도록 발명되었다. 기계적인 방식으로 각 제어 장치를 개별적으로 구동시켜 차량 내의 다양한 기능들을 수행하도록 하는 것은 복잡도 증가와 효율성 저하를 야기하였다. 이에 따라 차량의 기본적인 기능을 효율적으로 제공하기 위해 하나의 제어 장치에서 다양한 기능을 제공하도록 집적시킨 ECU (electronic control unit)가 도입되었다. 차량 내에서는 전기적 신호를 이용하여 센서의 데이터를 받고 이를 ECU가 판단하여 액추에이터(actuator)에 제어 신호를 보내어 동작하도록 개발되었다. 자동차 산업이 발전되면서 차량의 기능(functioning), 진단(diagnostics) 과 스로틀(throttle)ⁱⁱ, 오락(entertainment), 등화 제어(lighting control) 등의 많은 기능들을 수행하기 위해 차량에 내장되는 ECU의 수가 증가하였다. 이에 따라 각각의 ECU를 연결하는 배선의 수가 증가하고 차체의 무게와 차량의 가격도 함께 증가하게 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 1983년 독일 Bosch 사에서 각각의 ECU들을 버스라는 공통된 네트워크 선을 통해 데이터를 송수신 할 수 있는 CAN(controller area network)를 개발하였으며, 버스형태의 CAN을 도입함에 따라 차량 내부의 배선 수가 크게 줄어 차량의 무게 및 가격이 감소하게 되었다 (그림 3). CAN은 차량 내부에서 호스트 노드(host node: 중앙 정보 처리 장치 역할을 하는 노드) 없이 각 노드들이 하나의 공통 네트워크 선인 버스에 연결되어 통신하는 시스템으로 네트워크 상의 모든 노드들 간의 직접적인 메시지 송수신이 가능하며 실시간 제어에 유리하다. 또한, 오류 검출 및 내고장성(fault tolerance)ⁱⁱⁱ이 뛰어나 차량 이외에도 우주 항공 산업, 철도 산업 각종 자동화 기술 등에 이용되고 있다.

ⁱⁱ 엔진의 실린더로 유입되는 연료공기의 혼합 가스 양을 조절하여 조종사가 원하는 동력 또는 추력을 얻기 위한 조종 장치

ⁱⁱⁱ 전기 장치에서 규정의 위험 판정 기준 값 이상이 되는 일없이 미리 정해진 전기적 이상 전류 상태의 영향에 견딜 수 있는 능력

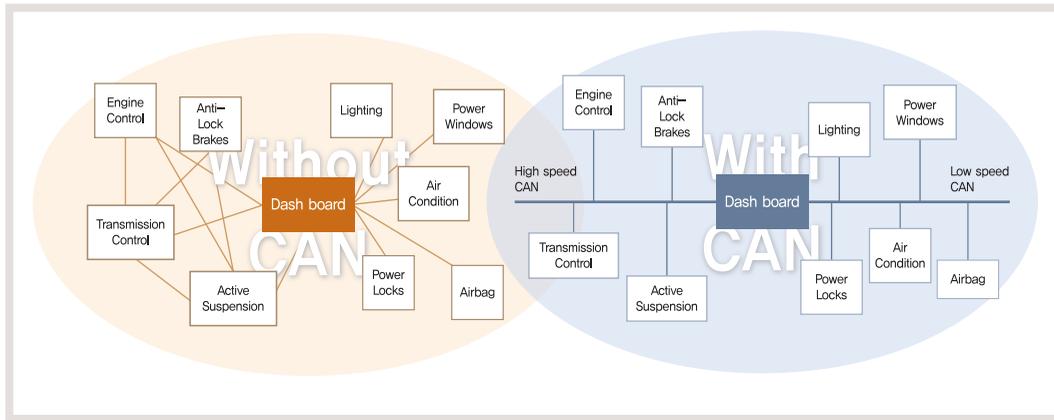


그림 3. CAN 도입 전과 도입 후의 차량 내부 배선도

2) CAN의 구조^{3,4}

CAN 버스의 모든 노드들은 각각 CAN frame에 맞춰 신호를 송수신하는 CAN transceiver와 받은 신호를 통해 데이터를 처리하는 CAN controller로 구성되어 있다. 데이터 송수신은 CAN_H와 CAN_L로 불리는 두 가닥의 선을 이용하여 차동 신호(differential voltage)의 형태로 이루어진다. CAN 버스를 이루는 CAN_H와 CAN_L는 UTP(unshielded twisted pair line)^{iv}형태이다. 차동 신호 및 UTP는 외부에서 들어오는 잡음과 유도 전류를 상쇄시켜, CAN이 EMI(electromagnetic interference)에 강한 특성을 지니게 만들어준다. CAN 버스의 양 끝 단에는 120Ω 종단저항을 달아 양 끝 단에서 신호가 반사되는 것을 방지하여 버스상의 신호가 안정적으로 송수신 되도록 구성되어 있다 (그림 4). 또한, CAN 버스는 최대 데이터 전송 속도 및 요구 오차율에 따라 고속 CAN (high-speed CAN)과 저속 CAN (low-speed CAN)이 있으며 이에 따라 버스의 최대 길이가 제한된다. 고속 CAN은 보편적으로 많이 사용되는 것으로 기어박스, 제동부, 엔진 제어부, 전력부 등에 사용되며 데이터 전송속도는 125Kbps~1Mbps으로 버스의 길이는 전송속도가 1Mbps 일 때 최대 40m까지 지원한다. 저속 CAN은 데이터 전송속도가 10Kbps~125Kbps으로 버스의 길이는 capacitive load에 따라 다르다. 저속 CAN은 CAN 버스의 line 중 하나가 open, short, incorrect loads가 되었을 경우에도 잘 동작할 수 있도록 설계되었으며 주로 오프닝(도어, 루프, 트렁크), 시트 조절, 카 라디오, 카 라디오 디스플레이, 내·외부 온도계 등에 사용된다. 고속 CAN에서는 버스에 종단저항을 장착하였

^{iv} UTP(비차폐 연선) : 전화선이나 이더넷 등에 많이 사용하며 처리가 간단하고 저렴하여 이더넷의 랜용도에 표준으로 사용

으나, 저속 CAN에서는 각 노드에 종단 저항 (500Ω~16KΩ)이 있어 내고장성이 고속 CAN 보다 뛰어나다 (그림 5). 이 외에도 고성능 및 안전성을 크게 요구하지 않는 곳에 사용되는 단일선 CAN이 있다.

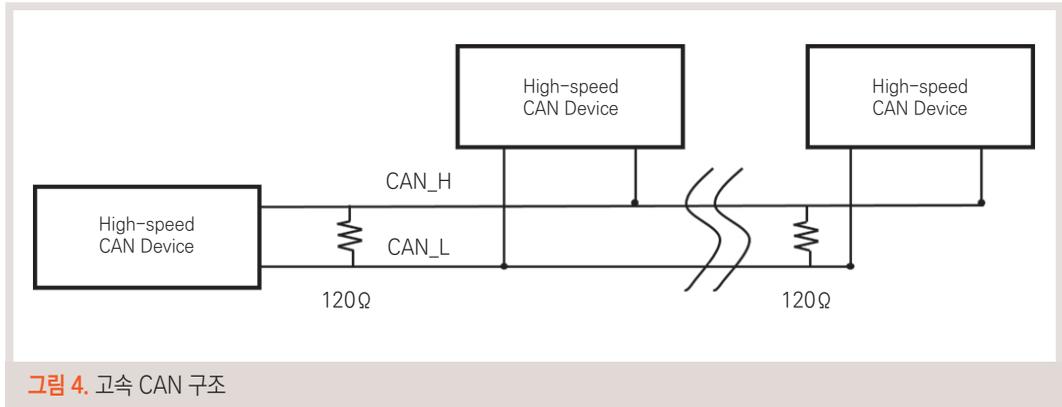


그림 4. 고속 CAN 구조

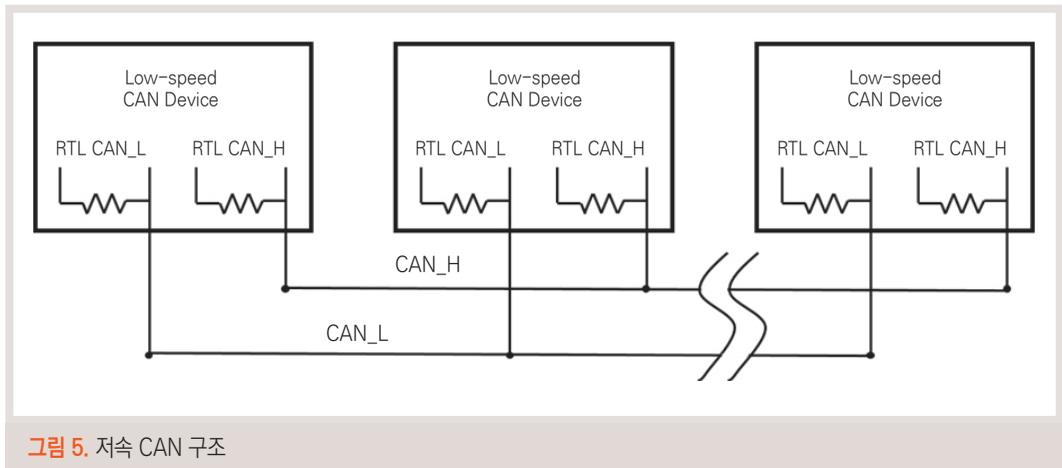


그림 5. 저속 CAN 구조

3) CAN의 데이터 송수신^{3,4}

CAN 버스 상의 모든 노드들은 언제나 CAN 버스상의 데이터를 획득할 수 있고(broadcasting), 버스가 휴지 상태(idle)에 있다고 판단될 경우 다른 외부 노드의 허가 없이 언제든지 송신이 가능

³⁾용량성 부하 : 부하에 흐르는 전류는 전압보다 위상이 앞서 있으며 앞선 전류를 형성

하다(multi-master). CAN 신호는 기저 대역 NRZ(non-return to zero) 변조 방식을 사용하는데, dominant(logical level: 0) 상태에서는 CAN_H와 CAN_L이 각각 3.5V, 1.5V로 차동 신호가 2V가 된다. 그리고 버스가 휴지 상태일 때와 recessive(logical level: 1) 상태일 때에는 CAN_H와 CAN_L이 2.5V로 CAN 버스의 차동 신호는 0V가 된다. Recessive bit 전송 시 CAN 버스는 floating 상태가 되어, 둘 이상의 노드가 동시에 전송을 시도하여 recessive bit와 dominant bit가 충돌이 발생하였을 경우 CAN 버스상에는 dominant bit가 전송 된다. 이와 같이 CAN은 dominant bit에 높은 우선순위를 두어 데이터 충돌이 발생하였을 때에도 데이터 전송을 중단하지 않고 계속 보낼 수 있어 긴급 메시지와 같은 실시간으로 전송해야 할 경우 긴급 메시지에 우선순위를 높게 하여 실시간성을 보장할 수 있다.

CAN의 데이터 프레임(data frame)은 그림 6과 같이 구성되어 있으며, 데이터 프레임을 전송할 때에는 transceiver에서 bit stuffing 규칙을 적용하여 전송한다. Bit stuffing이란, CAN 신호가 NRZ 변조를 사용하기 때문에 동일한 bit를 계속해서 전송하게 되면 네트워크에서 문제가 발생하여 동일한 bit로 감지되는 것인지 파악할 수 없게 되어 이를 방지하기 위해 동일한 5 bits 이후 반전된 bit를 전송하는 규칙으로, 수신 시 bit stuffing 된 값은 제거된다.

CAN 데이터 프레임 구조 및 설명

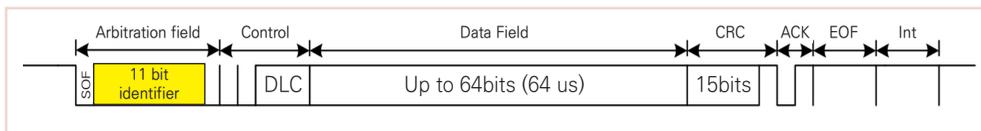
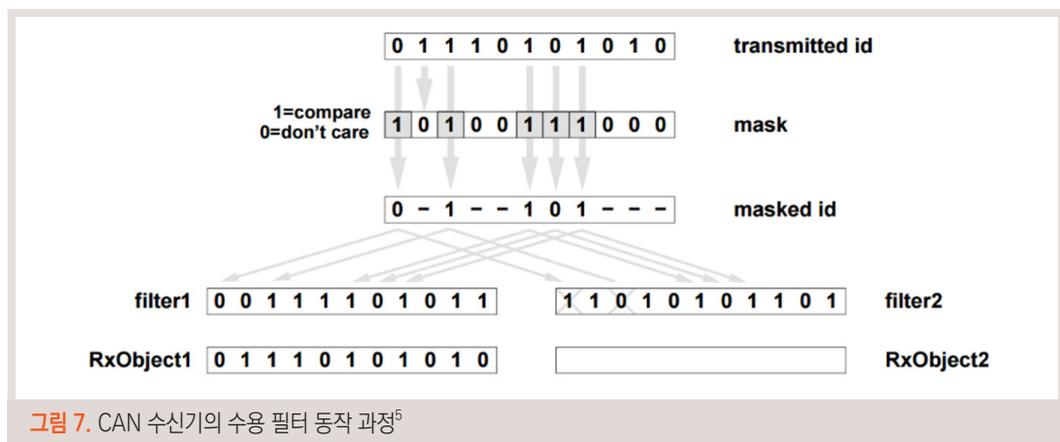


그림 6. CAN 데이터 프레임 구조

- ▶ **SOF(start of frame, 1 bit)** : 신호의 송신을 알리며 각 수신 노드에서 SOF의 transition를 통해 데이터 프레임 동기를 맞춘다.
- ▶ **Arbitration field(12 bits)** : 수신 노드가 자신이 처리해야 되는 신호인지 아닌지를 판단할 수 있는 정보가 포함되어 있으며, 식별자(identifier)가 있어 충돌이 발생하였을 경우 식별자의 우선순위를 통해 충돌을 중재할 수 있다.
- ▶ **Control field(6 bits)** : 데이터 프레임의 종류를 나타내며 데이터 길이 정보를 포함하고 있다.
- ▶ **Data field** : 송신하는 데이터의 정보를 포함하고 있으며 데이터 길이는 0~64 bits (0~8 bytes)로 제한되어 있다.

- ▶ **CRC(cyclic redundancy, 16 bits)** : SOF에서 data field까지 수신한 데이터를 15 bits CRC를 통해 비트 오류를 판단한다.
- ▶ **ACK(acknowledgement) field(2 bits)** : 2개의 bit로 구성되어 있으며 첫 번째 bit는 dominant bit로 ACK field 임을 나타내며, 두 번째 bit는 recessive bit로 수신 노드에서 데이터를 제대로 전송 받았을 경우 dominant bit를 전송한다.
- ▶ **EOF(end of frame, 7 bits)** : 데이터 프레임이 끝났음을 알리는 field로 recessive 7 bits로 구성되어 있다. EOF에서는 bit stuffing 규칙이 적용되지 않아 EOF임을 판단할 수 있다.

CAN의 데이터 프레임에는 특정 수신 노드의 주소를 포함하고 있지 않아 모든 노드들이 데이터 수신 가능하고(broadcasting), 송신하고 있지 않는 상태에서는 CAN 버스의 전압 크기를 감지하여 신호의 유무를 파악하고 SOF를 통해 데이터 프레임 동기를 맞추어 신호를 수신하기 시작한다. 이 때, 수신된 신호는 수용 필터(acceptance filter)에서 마스크(mask) 방식으로 arbitration field의 비트를 비교하여 자신이 처리해야 되는 데이터인지 아닌지를 판단한다 (그림 7). 이와 같이 CAN 버스를 통해 데이터가 송수신되며, CAN은 최대 1Mbps의 데이터 전송속도를 지원하며 충돌 중재, 오류 검출, 뛰어난 내고장성 등에 의해 현재까지도 차량 내부 네트워킹으로 많이 사용되고 있다. 하지만, 자율 주행 자동차와 같은 고속 통신 시스템을 필요로 하는 차량이 발전함에 따라 CAN의 데이터 처리량은 점차 불충분하다고 판단되며 더 높은 대역폭을 지원하는 시스템이 요구되고 있다.



2.2 LIN(Local Interconnect Network)

1) LIN의 도입 배경^{4,6}

CAN이 도입됨에 따라 대부분의 차량 내부 시스템들이 CAN 버스로 연결 되었다. 그러나, 자동차 업계에서는 로우엔드 애플리케이션(low-end applications)에 높은 성능이 필요하지 않아 CAN으로 구현하기에는 상대적으로 많은 비용이 요구된다고 판단하였다. 이에 1998년 자동차 회사 컨소시엄(BWM, Volvo, Volcano, Audi, DaimlerChrysler, Volkswagen)이 모여 저비용으로 구현이 가능한 LIN(local interconnect network)을 개발하였다. LIN은 CAN과 마찬가지로 분산된 전자 시스템을 위한 직렬 통신 시스템이며 CAN과 호환이 가능하나, UART(universal asynchronous receiver/transmitter)와 단일 선(single-wire)을 사용하여 CAN에 비해 낮은 대역폭을 저비용으로 구현이 가능하여 주로 로우엔드 애플리케이션인 자동차 문, 핸들 의자, 사이드 미러 등에 적용된다.

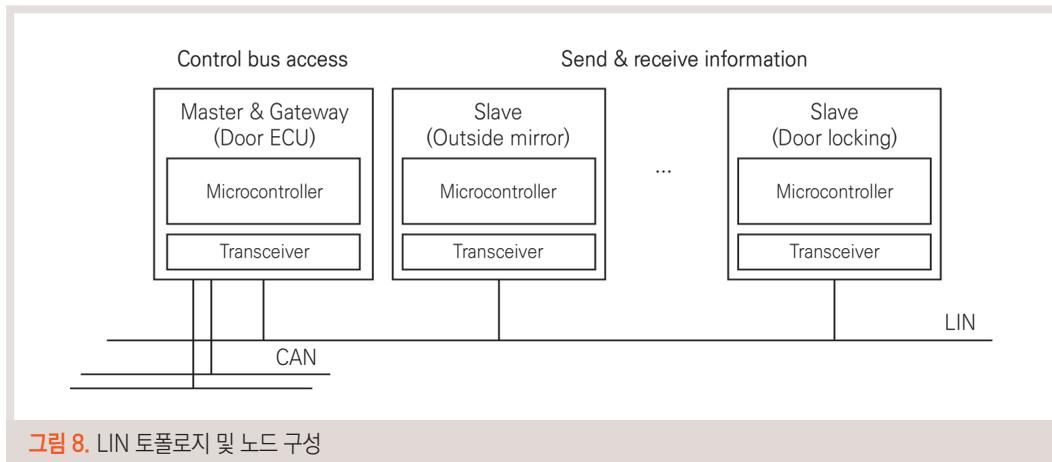


그림 8. LIN 토폴로지 및 노드 구성

2) LIN의 구조^{4,6}

LIN은 CAN과 마찬가지로 버스 형태의 네트워크 토폴로지(network topology)를 가지나, 저비용으로 구현하기 위해 단일 선(single-wire)을 사용하고 하나의 마스터(Master)와 다수의 슬레이브(Slave)로 구성된 점에서 CAN과 차이를 보인다 (그림 8). 단일 선을 사용하여 신호가 상대적으로 불안정하기 때문에 버스의 끝단 뿐만 아니라 각 노드에서도 종단 저항을 장착할 수 있도록 구성된다(마스

터: 1, 슬레이브: 30). LIN의 각 노드는 CAN과 마찬가지로 microcontroller와 transceiver로 구성되어 있으며, 마스터는 LIN 버스를 통해 슬레이브에 데이터를 전송할 뿐만 아니라 CAN 버스를 통해 CAN에 연결된 노드들과도 통신이 가능하도록 CAN과 LIN 버스 접근 용으로 2개의 transceiver로 구성된다. 앞서 말한 것과 같이 마스터에 의해 LIN 버스 접근이 제어되기 때문에 CAN과 마찬가지로 버스의 길이와 노드의 수가 증가할수록 데이터 전송속도가 감소한다. 따라서 효율적으로 대역폭을 사용하기 위해 LIN은 하나의 마스터에 최대 16개의 슬레이브, 최대 40m의 버스를 구성하도록 권장하고 있다.

3) LIN의 데이터 송수신^{4,6}

LIN은 접지와 단일 선을 이용해 마스터가 순차적으로 슬레이브에 데이터 송신 유무를 파악하여 요청이 있을 경우에 송신을 하도록 하고 그렇지 않을 경우 다음 슬레이브에 데이터 송신 유무를 요청하는 폴링(polling) 방식으로 데이터를 송수신한다. CAN과 마찬가지로 기저대역의 NRZ 변조방식을 사용하여 dominant(logical: 0) 와 recessive(logical: 1) 상태가 있으나, CAN과 다르게 단일 선으로 신호를 전송하기에 dominant는 공급 전압의 크기 로, recessive는 접지 로 전송한다. 마스터에는 마스터 태스크(task)와 슬레이브 태스크가 있고, 슬레이브는 슬레이브 태스크만 존재한다. LIN 프레임은 헤더(header)와 응답(response)이 있으며 헤더는 break, synchronization field, identifier field로 구성되어 있고 응답에는 data field, checksum으로 구성되어 있다 (그림 9). 항상 마스터 태스크가 헤더를 생성하여 전송하며, 헤더는 슬레이브의 버스 접근을 제어하고 어떤 메시지를 어느 시간에 보낼지 결정하고 이에 따라 슬레이브 태스크에서 응답 메시지를 생성하여 전송한다.

LIN 데이터 프레임 구조 및 설명

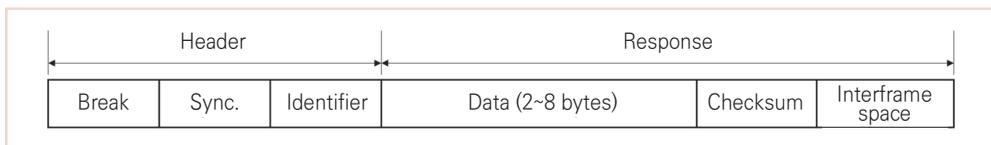


그림 9. LIN 데이터 프레임 구조

- ▶ **Break** : LIN 프레임의 시작을 나타내며, 13개의 dominant bits와 1개의 recessive bit로 구성되어 recessive bit를 통해 break field의 종료를 알린다.

- ▶ **Synchronization field** : 데이터 값 0x55(01010101)로 정의되어 있으며 인접한 두 개의 falling edge 간의 시간 간격을 통해 transmission rate을 결정하며 최대 데이터 전송 속도는 20Kbps 이다. 슬레이브 태스크에서는 sync. field를 모니터링하여 프레임 동기화를 수행한다.
- ▶ **Identifier field** : 6bits로 구성되며 0~63(0x3f)까지의 데이터 값을 생성할 수 있으며 이를 통해 어떤 노드가 수신하고 응답할 지와 데이터의 종류 및 길이를 결정한다. ID field 이후 ID bits의 패리티 검증(parity check)을 위해 2bits가 전송되며 슬레이브 태스크에서는 ID field를 모니터링하고 패리티 검증을 한 뒤 데이터를 송신할 것인지 수신할 것인지 자신이 받는 것인지 아닌지를 결정한다.
- ▶ **Data field** : 슬레이브 태스크에서 생성하며 응답 메시지에 포함되어 있다. 2, 4, 8bytes의 길이로 데이터를 전송할 수 있으며 이는 길이는 ID에 의해 결정된다(LIN 2.0 이전의 버전에서는 8bytes로 고정).
- ▶ **Checksum**: data field와 마찬가지로 응답 메시지에 포함되어 있으며 2개의 체크섬 알고리즘 중 하나를 이용하여 계산한다. 기존의 체크섬은 data field만을 계산하는 것이고 향상된 체크섬은 ID와 data field를 이용하여 계산한다.

이와 같이 데이터 송수신이 진행되며, 마스터 태스크에는 각 헤더의 ID와 각 프레임 간의 간격 등이 mini time slot 단위로 정의되어 있는 여러 가지의 스케줄 테이블이 있어 마스터 노드의 상위 단에서 이 중 하나를 선택하여 버스를 제어하는 time determinant로 동작하여 충돌이 발생하지 않는다 (collision free).

2.3 FlexRay

1) FlexRay의 도입 배경^{4,7}

차량의 연비, 안전성, 승차감을 향상시키기 위해 차량 내부 ECU 간의 데이터 송수신의 복잡도가 증가하고 있다. 차량 내부 시스템 간의 보다 정교한 제어를 수행하기 위해 전자기적 신호를 이용하여 차

⁴⁾(차 엔진 등의)반자동 제어 장치

량 내의 센서, ECU, 액추에이터를 제어하는 drive-by-wire^{vi}가 등장하게 되었다. drive-by-wire는 차량 내부의 기계적인 연결로 동력을 전달하던 것을 전기적인 신호를 이용하여 제어하도록 만들어 유압기구, 기계적인 배관 등이 줄어 차체의 무게를 감소시킬 수 있으며 설계의 자유도가 증가한다. 설계의 자유도가 증가하게 되면 엔진의 효율을 최적화 시킬 수 있어 연비도 향상시킬 수 있다. 이러한 drive-by-wire 시스템의 통신을 위해서는 기존의 CAN보다 높은 대역폭과 내고장성이 요구되어 자동차 업체와 주요 공급업체(BMW, DaimlerChrysler, Philips, Motorola)의 협력에 의해 FlexRay가 도입되었다. FlexRay는 주로 높은 안전성을 요구하는 곳에 적용되며 애플리케이션으로는 drive-by-wire(brake-by-wire, steer-by-wire 등)가 있다.

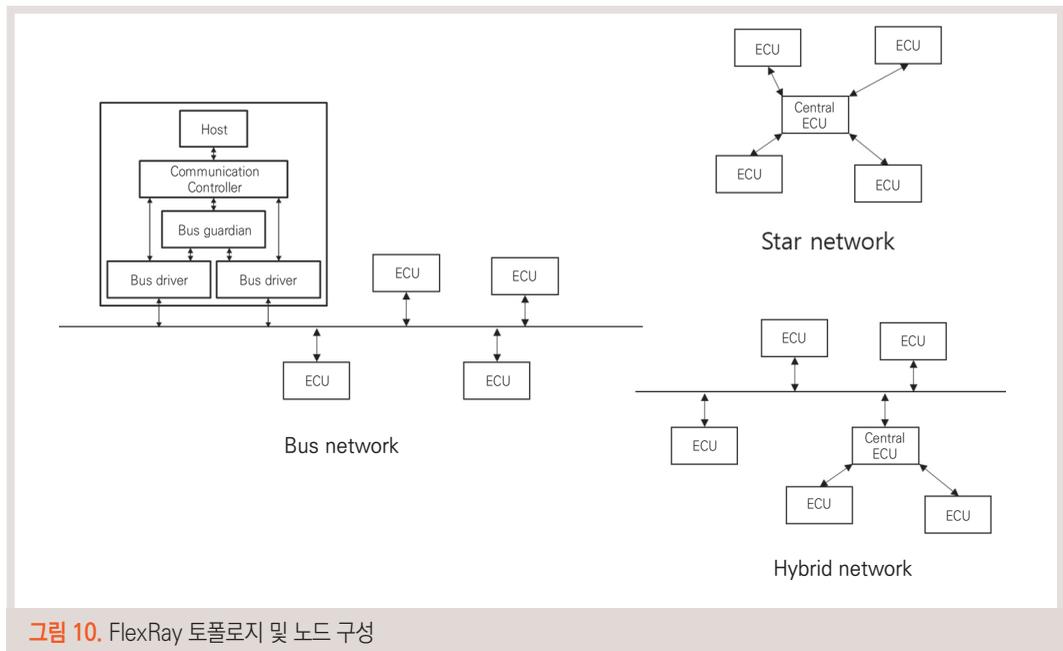


그림 10. FlexRay 토폴로지 및 노드 구성

2) FlexRay의 구조^{4,7}

FlexRay는 CAN, LIN과 달리 버스형, 스타형, 하이브리드형 등의 유연한 토폴로지를 지원한다 (그림 10). 버스형에서는 CAN 과 마찬가지로 양 끝 단에 종단저항이 달려있으며 상대적으로 짧은 분기선을 가지므로 배선 양을 줄일 수 있다. 스타형은 중앙의 활성 노드를 기반으로 개별 링크로 구성되어 있

며 특정 네트워크가 오작동을 일으킬 경우에도 다른 노드들은 지속적으로 동작이 가능한 장점이 있다. 하이브리드형은 버스형과 스타형이 함께 적용된 것으로 버스형을 사용하여 배선의 양을 줄일 수 있으면서 ECU들의 클러스터링(clustering)이 필요한 부분에 스타형을 사용하여 네트워크의 성능과 안전성을 향상시킬 수 있다. 또한, FlexRay는 추가적인 채널을 사용하여 데이터 전송속도를 2배로 향상시키거나 redundant^{vii} 채널로 사용하여 내고장성을 향상시킬 수 있다. 다른 네트워크 기술들과 마찬가지로 FlexRay도 안정적이며 효율적인 네트워크 관리를 위해 노드 간의 네트워크 선 길이는 최대 24m, 노드의 수는 최대 22개를 연결하도록 권장한다.

FlexRay 노드는 컨트롤러와 버스드라이버로 구성되어 있다 (그림 10). 컨트롤러에는 정보를 받아 처리하고 명령을 내리는 호스트(host), 프레임을 생성하고 오류 감지, 오류 처리(error handling), 동기화, 메시지 코딩 등의 역할을 하는 통신용 컨트롤러(communication controller)가 있다. 버스 드라이버는 통신용 컨트롤러에서 생성된 논리적 신호(logical signal)를 물리적 신호(physical signal)로 변환하여 버스로 신호를 전송하는 역할을 하고, bus guardian은 버스 접근(bus access) 감시와 통신 차단 역할을 한다. Bus guardian는 통신용 컨트롤러와는 독립적으로 프레임의 정적 세그먼트의 타이밍을 감시하며 문제가 발생할 경우, 호스트에 오류를 공지하고 송신 차단 신호를 전송하여 버스를 보호한다. 정리하면, 호스트에서 명령을 내릴 데이터를 생성하여 FlexRay의 프레임 구조에 맞춰 통신용 컨트롤러에서 논리적 신호를 생성하면 버스 드라이버를 통해 물리적 신호가 생성되어 정보가 전송 된다.

3) FlexRay의 데이터 송수신^{4,7}

CAN에서는 버스가 휴지 상태인지를 판단하여, 휴지 상태일 경우 데이터를 전송하는 CSMA(carrier sense multiple access) 방식으로 데이터를 전송 한다. 이와 같이 전송하는 경우 충돌이 발생할 수 있으며, 휴지 상태인지 판단하는 동안 아무도 전송을 시도하지 않아 시간적으로 네트워크를 충분히 활용하지 못한다. 반면, FlexRay는 효율적으로 네트워크를 활용하기 위해 정해진 시간에 데이터를 전송하는 TDMA(time division multiple access) 방식으로 동작하며 통신 사이클(communication cycle) 단위로 데이터를 송수신한다. 통신 사이클은 효율적인 대역폭 운용을 위해 time-triggered의 정적 세그먼트(static segment)와 event-triggered의 동적 세그먼트(dynamic segment)가 결합된 구조를 가지며 기본적으로 정적 세그먼트, window idle time으로 구성되어 있으며 동적 세그먼트, symbol window를 필요에 의해 추가적으로 구성할 수 있다 (그림 11). 통신 사이클은 매크로틱(macrotick)이라는 단위로 데이터를 전송하고 동기화가 진행되며 매크로틱 은

^{vii} 정보의 전송에서 정확을 기하기 위해 원래의 정보에 추가로 덧붙이는 정보

microtick으로 구성된다. 이는 노드 마다 crystal oscillator^{vi)}의 주파수가 정확히 일치하지 않기 때문에, 노드 마다 다른 길이의 microtick을 macrotick에 할당하여 각 노드의 동기를 맞춘다. 이와 같이 FlexRay는 정해진 통신 사이클 내에서 프레임이 송수신되며 FlexRay의 프레임은 헤더, 페이로드, 트레일러로 구성된다.

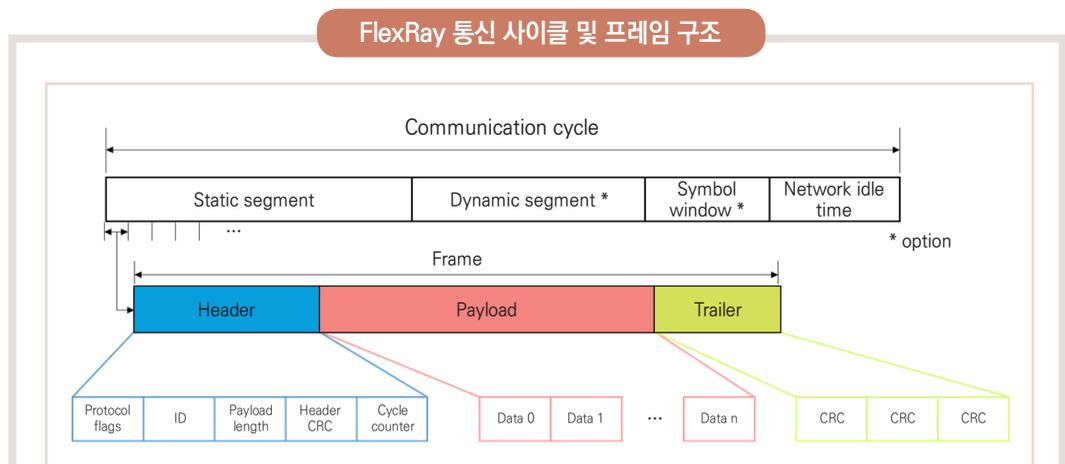


그림 11. FlexRay 통신 사이클 및 프레임 구조

- ▶ **정적 세그먼트(Static segment)** : static slot으로 구성되어 있으며, 각 노드 마다 정해진 static slot내에 프레임을 전송할 수 있다. 정해진 static slot에 전송하지 않으면 다음 자신의 static slot이 올 때까지 데이터를 전송할 수 없다.

< FlexRay Frame 구성 >

- ▷ **헤더(Header)** : 프레임의 종류를 나타내는 비트, 동적 세그먼트에서 프레임이 전송될 경우 우선순위를 판별할 수 있는 ID, 페이로드의 길이를 나타내는 비트, 헤더 CRC 검사를 위한 비트, 통신 사이클 카운터가 있다.

^{vi)} 수정 결정의 압전현상을 이용한 수정진동자를 발진주파수의 제어소자로 사용하여 안정도가 높은 발진주파수를 얻는 발진기(진동전류를 발생시키는 것)

- ▶ **페이로드(Payload)** : 호스트에서 만들어진 실제 데이터가 전송되는 구간으로 최대 254 bytes를 전송할 수 있다. (CAN의 30배 정도)
- ▶ **트레일러(Trailer)** : 프레임의 오류를 점검하기 위한 CRC 검사가 있다.

- ▶ **동적 세그먼트(Dynamic segment)** : 정적 세그먼트 다음에 오는 세그먼트로 CAN의 프레임 전송 방식과 마찬가지로 이벤트가 발생할 때 데이터가 전송되며 프레임의 ID를 통해 우선 순위를 결정한다. 동적 세그먼트의 길이가 정해져 있으므로 이 기간 내에 데이터를 전송하지 못할 경우 다음 동적 세그먼트를 기다려야 한다.
- ▶ **Symbol window** : 네트워크의 여러 가지 기능(wake up, bus guardian test 등)을 제공하기 위해 사용되며 필요에 따라 생성된다.
- ▶ **Window idle time** : 데이터가 포함되지 않고 macrotick 단위로 구성되어 각 노드의 클럭 동기를 맞추는 역할을 한다.

FlexRay가 2개의 채널 사용으로 인한 높은 데이터 전송 속도와 내고장성이 크다는 장점이 있으나, 네트워크 구축 측면에서 CAN과 LIN의 방식에 비해 상대적으로 고비용이라는 단점이 있어, 이들을 FlexRay로 완전히 대체할 수 없다. 따라서 저성능을 요구하는 애플리케이션에서는 LIN, 파워트레인에는 CAN, 고급 애플리케이션에는 FlexRay를 적용하여 성능과 비용 측면에서 최적의 네트워크 환경을 제공한다.

2.4 MOST(Media Oriented System Transport)

1) MOST의 도입 배경⁸⁾

차량 내에 HD(high-definition) 비디오, 오디오, 텔레메틱스(telematics)^{ix} 등의 인포테인먼트 시스템들이 도입됨에 따라 차량 내부 네트워크에서는 높은 데이터 전송속도가 요구되었다. 이

⁸⁾ 자동차와 무선통신을 결합한 새로운 개념의 차량 무선인터넷 서비스

를 위해 1998년 자동차 제조업체와 부품 공급업체들이 모여 MOST 협회를 설립하였다. MOST 협회에서 MOST 개발 시 고려했던 것이 두 가지가 있는데, 첫째, 기능 관점에서 시스템을 디자인 하는 것, 둘째, 스트리밍, 패킷, 제어 정보를 전송할 수 있도록 만드는 것이었다. 첫 번째 기능 관점에서 시스템 디자인을 위해 audio amplifier, auxin, DVD video player 등의 각 기능에 해당하는 FBlock(function block)을 만들어 이를 기본 구성요소로 두었고, 두 번째 각각의 정보를 전송하기 위해 3가지 채널; 동기 채널(synchronous channel), 비동기 채널(asynchronous channel), 제어 채널(control channel)을 만들었다. 이 두 가지 사항을 고려하여 2008년 최대 25Mbps의 데이터 전송속도를 제공해주는 MOST25가 개발되었고 이후 50Mbps, 150Mbps까지 지원해주는 MOST50와 MOST150이 차례대로 개발되었다.



그림 12. OSI 7 계층

2) MOST의 구조 및 데이터 송수신⁸⁾

MOST는 OSI(open systems interconnection) 7 계층을 포함하고 있다 (그림 12). MOST 에서는 크게 그림 13 와 같이 물리 계층, NIC(network interface controller), network service, FBlocks(function blocks)이 있다. 물리 계층에는 케이블 종류에 따라 optical 물리 계층과

electrical 물리 계층으로 구분한다. 초기의 MOST는 POF(plastic optical fiber)를 사용하였다. POF를 지원하기 위해서 송신단에서는 전기적 신호를 광 신호로 변환해주고 수신단에서는 광 신호를 전기적 신호로 변환해주는 FOT(fiber optical transceiver)를 사용한다. POF는 EMI와 외부 간섭에 강하고 외부에 간섭을 일으키지 않으며 단락될 위험도 없는 장점이 있다. 반면, 정상적으로 동작하기 위해서는 85 이하의 환경에서 동작하며 단가가 비싸다는 단점이 있다. 차량 내부에 점차 인포테인먼트 시스템들이 늘어나면서 이 단가 문제를 해결하기 위해서 MOST50, MOST150 개발 시점에는 기존에 차량에서 많이 쓰이던 UTP사용을 고려하였다. 하지만, UTP는 EMC(electromagnetic compatibility)가 낮기 때문에 차폐를 해야 했고 EMC 조건에 맞추기 위해 복잡한 driver circuit을 디자인함에 따라 단가가 증가하게 되었다. 그 결과 electrical 물리 계층에서는 EMC 기준과 transformer의 특성에 따라 UTP와 STP(shielded twisted pair)를 선택하게 되었다.

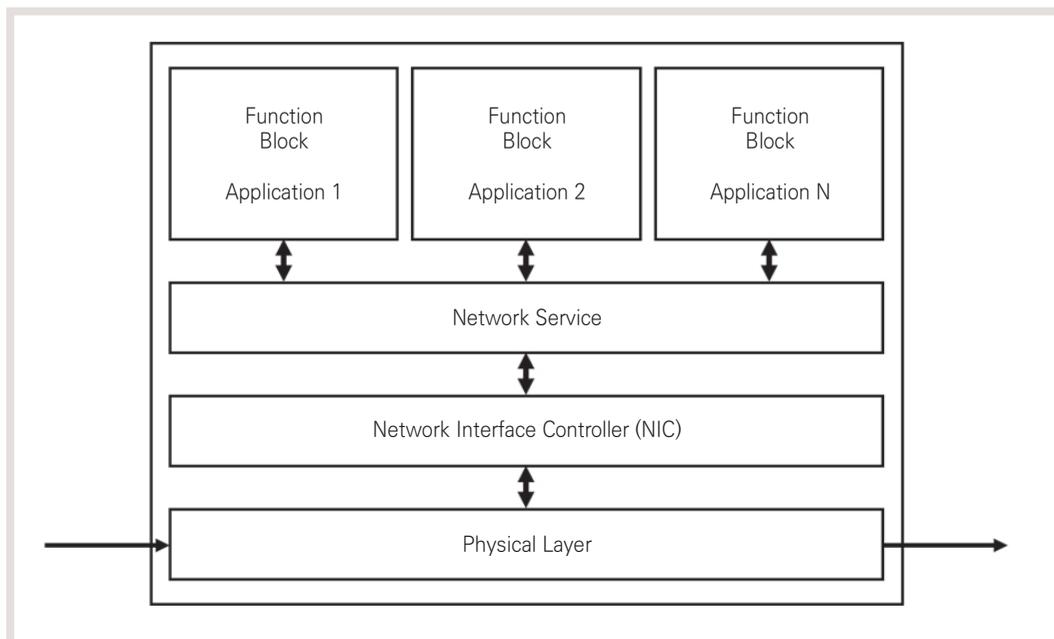


그림 13. MOST 노드 구조 (계층 구조 포함)

NIC에서 network service와 FBlocks이 있는 EHC(external host controller)에 가상의 채널을 할당해주며 실제로 물리 계층에서 할당된 채널로 신호를 송수신한다. 앞서 말했듯이 MOST에는 동기 채널(synchronous channel), 비동기 채널(asynchronous channel), 제어 채널(control channel)이 있다. 동기 채널은 스트리밍 데이터(streaming data: 비디오 데이터, 오디오 데이터 등)를 위해 예

약된 채널로 전송 중 지연, 중단, 데이터 충돌이 발생하지 않는다. 비동기 채널은 TCP/IP와 같이 비동기 데이터를 전송하기 위한 채널이다. 그리고, 제어 채널은 송수신기에서 어떤 스트리밍 데이터를 사용할 것인지 설정하기 위한 것이다. 이와 같은 채널들을 NIC의 NIC processor에 의해 결정하여 각 채널에 대응하는 포트를 통해 채널을 할당해 준다. 또한, NIC는 타이밍, 네트워크 설정 및 연결, 전력 제어를 위한 마스터들이 있다. 이 마스터들은 하나의 NIC에 존재하거나 여러 개의 NIC에 나누어 존재할 수 있다. 타이밍 마스터(timing master)는 각 노드의 동기를 제어하는 것이며, 네트워크 마스터(network master)는 노드 마다 주소를 할당하고 네트워크를 연결하는 역할을 한다. 그리고 연결 마스터(connection master)는 동기 채널에서 노드 간의 채널을 연결해주는 역할을 하며 전력 마스터(power master)는 전력을 감시하여 전력을 올리거나 차단시키는 역할을 한다. 이와 같은 역할들을 NIC에서 수행하며 채널이 연결되면 EHC에서 각 기능에 해당하는 역할들을 수행한다. MOST는 CAN, LIN과 달리 차동 맨체스터(differential Manchester) 코드를 이용하여 데이터를 전송한다. 그림 14는 MOST25의 프레임 구조를 나타낸 것이다. MOST 프레임에는 preamble, boundary descriptor, 스트리밍 데이터, 패킷 데이터, 제어 데이터, 프레임 제어, 패리티 비트가 있다.

이 외의 MOST50, MOST150은 MOST25보다 스트리밍 데이터, 패킷 데이터의 길이가 길며, MOST25와 마찬가지로 boundary descriptor로 각 데이터의 길이가 결정된다.

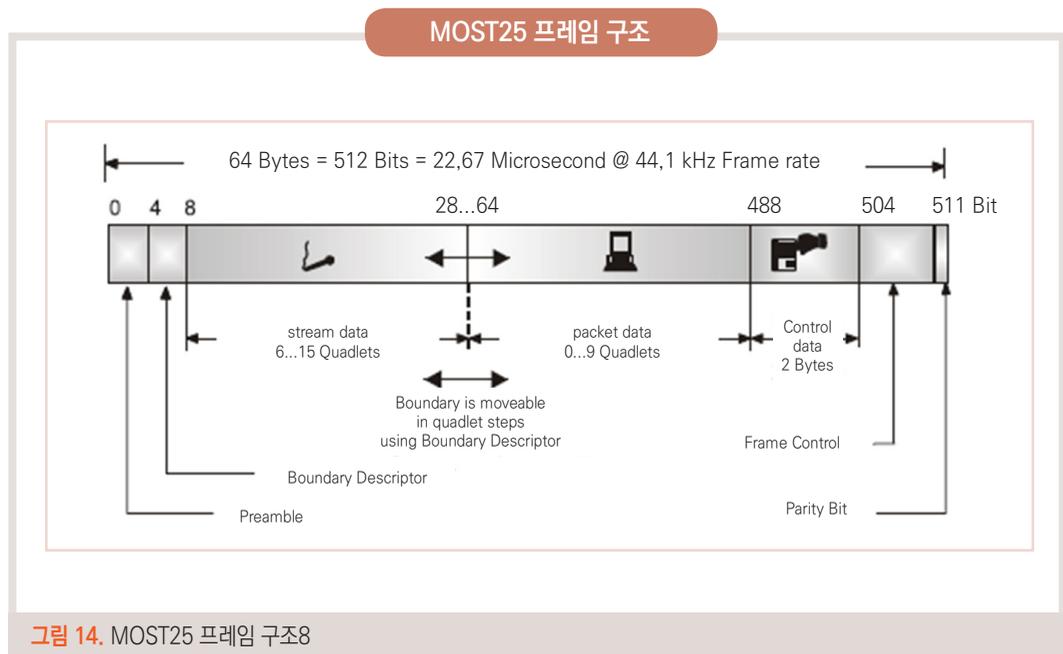


그림 14. MOST25 프레임 구조

- ▶ **Preamble** : 이는 프레임의 동기를 맞추기 위한 것이다. 타이밍 마스터의 발진기 주파수를 기반으로 preamble을 생성하며 타이밍 슬레이브는 타이밍 마스터가 생성한 preamble을 기반으로 PLL을 이용하여 동기를 맞춘다. 타이밍 마스터는 자신이 생성한 preamble이 모든 노드를 거쳐 다시 돌아오면 이를 이용하여 신호의 전파 지연을 보상하여 다시 preamble을 생성한다.
- ▶ **Boundary descriptor** : 이는 스트리밍 데이터와 패킷 데이터의 길이를 조절하기 위해 사용되며 6~15의 값을 가진다. 스트리밍 데이터와 패킷 데이터의 합은 60bytes가 되도록 만들어져 있으나 스트리밍 데이터의 길이는 24~60bytes, 패킷 데이터의 길이는 0~36bytes로 boundary descriptor에 의해 60bytes를 나누어 사용한다. 각각의 데이터 길이는 다음과 같은 방식으로 결정되며 이는 타이밍 마스터에 의해 결정된다.

스트리밍 데이터 길이 = boundary descriptor x 4

패킷 데이터 길이 = 60 - 스트리밍 데이터 길이

- ▶ **스트리밍 데이터(Stream data)** : 비디오, 오디오와 같은 데이터를 전송한다.
- ▶ **패킷 데이터(Packet data)** : TCP/IP, 네비게이션 맵 정보 등의 일시적으로 많은 데이터를 전송하기 위한 것이다.
- ▶ **제어 데이터(Control data)** : 명령, 상태, 진단 정보 등의 데이터를 전송한다.
- ▶ **프레임 제어(Frame control)** : 프레임 제어 정보를 나타내기 위한 예약된 영역 (reserved bytes)으로 특별히 ACK나 CRC를 쓰는지 정해져 있지는 않다.
- ▶ **패리티 비트(Parity bit)** : 프레임의 에러를 감지하기 위해 패리티 검사를 위한 것이다.

2.5 Ethernet

1) Ethernet의 도입 배경 및 개발 동향⁹⁾

자동차 산업이 발전함에 따라 차량에는 첨단 운전자 지원 시스템, 하이브리드와 전기 자동차, 인포테인먼트 등을 제공하기 위해 차체에 내장되는 전장 부품의 수와 복잡도가 증가하였다. 또한 트랜지스터 집적도의 증가에 의한 ECU 연산량의 증가가 차량 내부 네트워크에서는 CAN이나 FlexRay보다 훨씬 더 높은 대역폭

이 요구되었다. 높은 대역폭의 수요가 증가함에 따라 차량 내부 네트워크에 Ethernet 도입을 시도하였으나, Ethernet의 물리 계층에서 몇 가지 문제점으로 차량 내 적용에 어려움이 있었다. 즉, 기존의 Fast Ethernet은 2쌍의 UTP를 사용하고 Gigabit Ethernet은 4쌍의 UTP를 사용하여 Ethernet 케이블을 차량에 도입 시 비용과 차체의 무게가 증가하게 된다.¹⁰ 그리고, Fast Ethernet과 Gigabit Ethernet의 EMC 문제로 차량 내 적용에 어려움이 있었다. 하지만, 2010년 브로드컴에서 100Mbps BroadR-Reach 기술을 개발하여 1쌍의 UTP를 사용하여 비용과 무게 문제를 해결할 수 있으면서 고속의 데이터 전송속도를 제공할 수 있게 되었다.¹⁰ 100Mbps BroadR-Reach의 도입에 따라 브로드컴과 자동차 업체 및 반도체 업체들에 의해 설립된 OPEN Alliance SIG(one pair Ethernet alliance special interest group)에서 Ethernet 표준 제정 및 차량 내 Ethernet 도입을 위한 칩과 시스템을 개발하고 있으며, AVun Alliance에서는 네트워크 링크 계층 관련 표준을 제정하여 고품질의 음성, 영상 전송 개발을 진행하고 있다.¹¹ 그리고 하드웨어 의존적인 소프트웨어의 복잡도를 해결하기 위해 소프트웨어 재사용성과 호환성을 개선하기 위한 차량용 소프트웨어 플랫폼인 AUTOSAR(automotive open system architecture)에서도 Ethernet을 지원하기 위한 Ethernet 드라이버, Ethernet 트랜시버 드라이버, Ethernet 인터페이스 등을 개발하고 있는 등 Ethernet 도입을 위한 연구 개발이 진행 중이다.¹¹ Ethernet 적용 시 100Mbps의 데이터 전송속도를 제공해줌으로써 인포테인먼트 시스템과 고해상도의 카메라 및 센서 데이터를 송수신하여 첨단 운전 지원 시스템에 적용이 가능하다. 또한 그림 15와 같이 스위치를 사용하여 차량 내부에 혼재되어 있는 네트워크를 위한 백본망으로도 활용이 가능할 것이다.

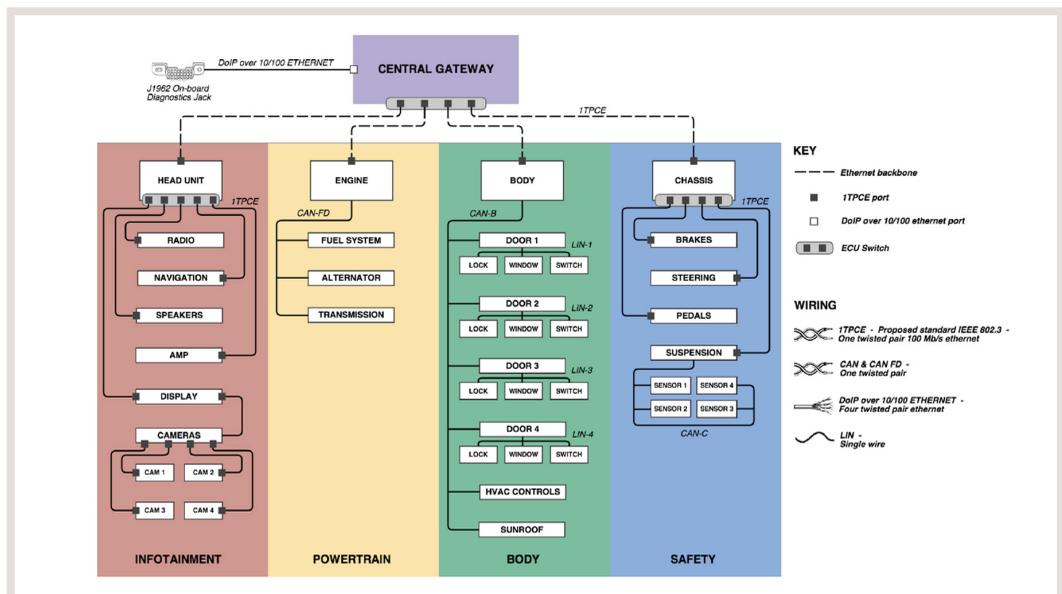


그림 15. Ethernet의 백본망 활용 예시⁹

2) Ethernet의 구조 및 개발 과제

Ethernet은 1쌍의 UTP를 사용하여 100Mbps의 데이터 전송속도와 양방향 통신(full duplex)을 지원한다.⁹ 차량용 Ethernet의 가장 큰 장점은 기존의 MII MAC(media independent interface media access control)^x과 호환이 가능하여 기존의 Ethernet infrastructure을 그대로 사용할 수 있는 것이다.¹² MII MAC은 MAC^{xi}과 물리 계층^{xii}간의 인터페이스를 의미한다. 그림 16과 같이 MAC은 바꾸지 않고 물리 계층만 바꿔서 사용하기 위해 만든 것으로 Ethernet 트랜시버 모듈만 바꿔서 사용할 수 있어 100Mbps BroadR-Reach를 물리 계층에 적용하고 IEEE802.3의 프로토콜을 그대로 적용할 수 있다. 그림 17과 같이 IEEE802.3의 Ethernet 패킷 형식을 그대로 적용하여 데이터를 송수신 할 수 있어 페이로드 효율(한 패킷에서 데이터가 차지하는 비율)이 최대 97.53%로 다른 차량 내부 네트워크 중에서 가장 큰 효율을 낼 수 있다.

Ethernet은 스위치를 적용한 스타형 토폴로지로 일대일(point-to-point) 통신 방식과 주소기반의 메시지를 사용한다.^{9,11} 주소기반의 메시지를 사용하여 송신자는 수신자의 주소를 패킷에 포함시켜 전송하고, 이는 중간에 스위치를 통해 수신자까지 전달된다. 이때, 수신자로 가는 경로가 없으면 스위치에서 패킷을 폐기하여 대역폭을 효율적으로 사용할 수 있다. 또한, 메시지를 패킹하고 재 분류하는 등의 작업을 해야 하는 게이트웨이 대신 스위치를 사용함으로써 지연과 시스템 설계의 복잡도를 줄일 수 있다.⁹

Ethernet을 사용함으로써 이와 같은 장점들이 있으나, Ethernet은 CSMA/CD(carrier sense multiple access/collision detect) 방식과 스위치를 사용하기 때문에 CAN이나 FlexRay에서 동작하는 실시간 제어장치 정보와 같은 시간 지연에 민감한 데이터(time critical data) 전송 시 실시간성을 보장할 수 없다.^{9,11} CSMA/CD는 데이터 전송 시 충돌이 발생할 경우 전송을 중단하여 일정 시간이 지난 후 재전송을 하고, 노드 간의 거리가 먼 경우 여러 스위치를 거쳐야 하기에 때문이다. 또한, 스타형 토폴로지 일대일 통신 방식을 사용하여 버스형을 사용하는 CAN에 비해 배선 양이 증가하고 이는 차체의 무게 증가의 원인이 된다. 그리고 100Mbps BroadR-Reach가 차량의 EMC 환경을 만족하기 위해서는 결합 커패시터, 커넥터, 케이블, common mode choke 등을 고려하여 최적화된 시스템이 개발되어야 한다.

^x 서로 상이한 LAN 물리계층 매체들에 의존하지 않도록 공통적인 논리 인터페이스를 MAC 부계층(프레임화, 매체 액세스 제어 관리, 주소처리 등 수행)에 제공하는 역할

^{xi} 여러 단말들이 공유 매체 사용에 대한 단말 간 충돌, 경합 발생을 제어하는 방식을 총칭

^{xii} 그림 12 OSI 7 계층의 Physical layer 참고

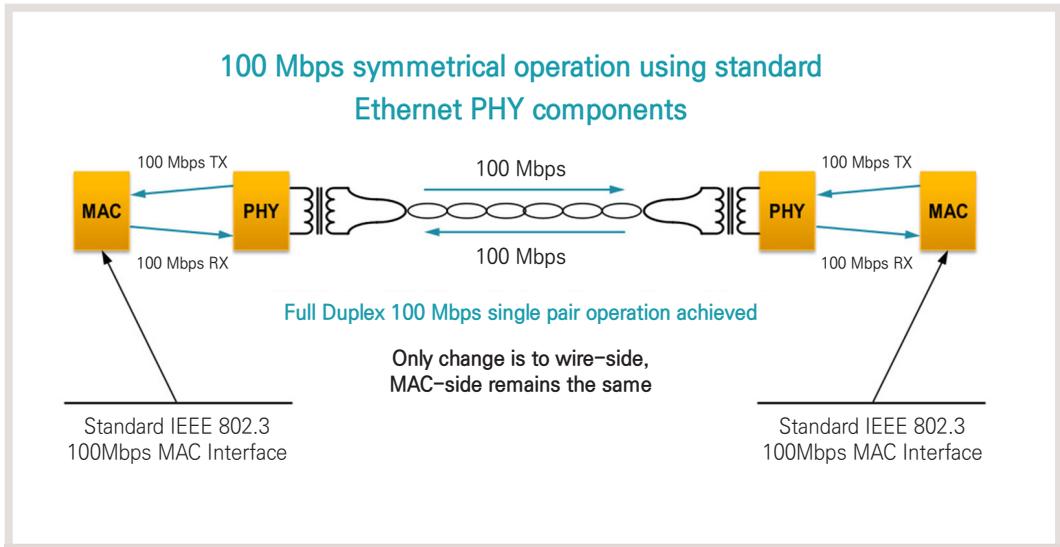


그림 16. Ethernet 물리계층 구조 및 IEEE802.3 MAC과 호환성 제공¹³

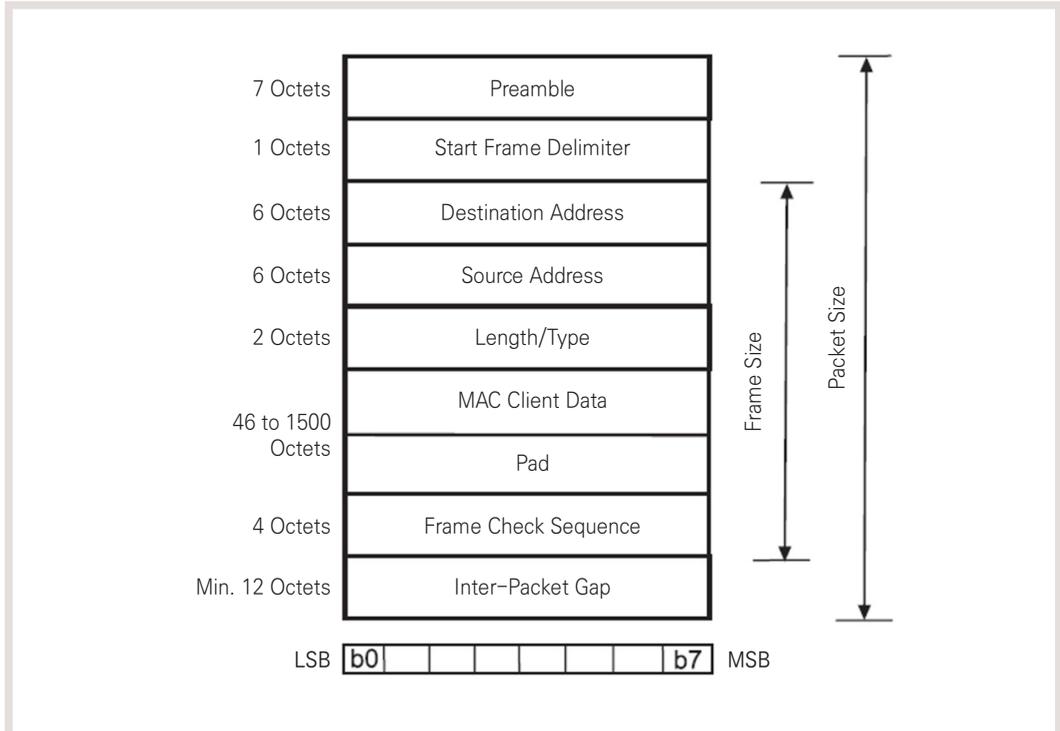


그림 17. Ethernet (IEEE802.3) 패킷 구조¹²

- **Preamble** : 송신기와 수신기의 비트 동기를 맞추기 위해 사용되며 '1' 과 '0' 을 반복해서 생성한다.
- **Start Frame Delimiter(SFD)** : 프레임 동기를 위한 식별용 문자로 '0xAB' 로 나타나며 마지막 두 비트는 '11' 이다.
- **Destination Address(DA)** : 프레임을 수신할 MAC 주소 정보가 포함되어있다.
- **Source Address(SA)** : 프레임을 송신한 호스트의 MAC 주소가 포함되어있다.
- **Length/Type** : 상위 프로토콜 정보를 담고 있으며 length 또는 type으로 정의되어있다. 0x600 이 하이먼 length(IEEE802.3)로 해석하고 이상이면 type(DIX 2.0^{xiii})으로 해석한다.
- **MAC Client Data, Pad** : 데이터를 나타낸다.
- **Frame Check Sequence** : 프레임에 문제가 있는지 판별에 사용하며, 데이터의 에러를 검출하기 위한 CRC가 포함되어있다.

2.6 TURBO CAN(Turbo Controller Area Network)

1) TURBO CAN의 도입 배경¹⁴

Ethernet과 마찬가지로 차량 내부에 장착되는 시스템의 수가 증가하고 많은 양의 데이터를 송수신함에 따라 차량 내부 네트워크의 데이터 전송속도를 향상시켜야 할 필요성이 생겨 2012년 Bosch사에서 CAN을 기반으로 한 CAN-FD(controller area network with flexible data rate)을 개발했다. CAN-FD는 CAN 프레임의 data field를 overclocking^{xiv}하여 data field 길이를 최대 8bytes에서 64bytes로 확장 시켜 데이터 전송속도를 최대 16Mbps까지 증가시킬 수 있다. 하지만, 16Mbps의 신호를 사용하기에는 FlexRay보다 낮은 데이터 전송속도이기 때문에 차세대 자동차에 적용하기에 여전히 부족한 수치이다. 또한, overclocking을 하여 데이터를 전송하기 때문에 기존의 CAN에 하위 호환이 불가능하다는 단점이 있다. 이를 고려하여 기존의 CAN과 호환이 가능하면서 데이터 전송속도를 CAN 대비 100배 이상 향상시키기 위해 TURBO CAN이 제안되었다. TURBO CAN은 그림 18과 같이 대역통과 신호(passband signal)를 사용하여 추가적인 대역폭과 전력을 사용함으로써 데이터 전송속도를 높이는 방법이다. 기존의 CAN 신호와 다른 대역을 추가적으로 사용하여 기존의 CAN

^{xiii}) Ethernet 은 Digital, Xerox, Intel 사에 의해 개발된 것으로, DIX 는 각 회사의 앞 글자를 따서 만든 Ethernet 사양 중 하나

^{xiv}) 의도적으로 동작 속도를 기준치 이상으로 높임

신호에 영향을 미치지 않으면서 대역통과 신호를 사용할 수 있기 때문에 기존의 CAN과 호환이 가능한 것이다. 이와 같이 하위 호환을 가능하게 하여 파워트레인과 같은 중요한 메시지가지만 데이터 전송속도가 크게 요구되지 않는 애플리케이션에는 기존의 CAN을 그대로 적용하고, 고용량 카메라 및 센서 데이터나 인포테인먼트는 TURBO CAN을 사용하여 효율적으로 네트워크를 운용할 수도 있다.

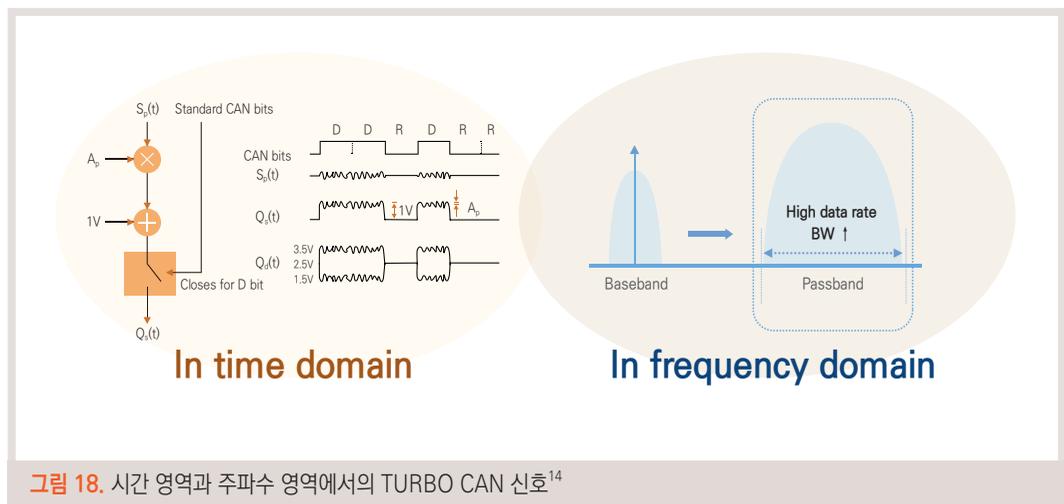


그림 18. 시간 영역과 주파수 영역에서의 TURBO CAN 신호¹⁴

- A_p (scaling factor) : 대역통과 신호의 전력 에 의해 결정되는 값으로, 시간 영역에서 대역통과신호의 피크 전압 크기(V_p)를 의미한다.
- $S_p(t)$: TURBO CAN 신호를 위한 대역통과 신호를 의미한다.
- $Q_s(t)$: 기존의 CAN 신호에 대역통과 신호인 $S_p(t)$ 를 더한 값으로 TURBO CAN 신호의 차동 신호이다.
- $Q_d(t)$: TURBO CAN 신호가 CAN_L 와 CAN_H 에 전송되는 신호이다.

2) TURBO CAN 의 구조 및 개발 과제

그림 19는 TURBO CAN의 송신기를 나타낸 것이다. TURBO CAN 데이터를 생성하여 반송파(carrier wave)에 실어 대역통과 신호를 생성한다. 생성된 대역통과 신호를 기존 CAN 신호의 dominant bit에 실어서 CAN 버스를 통해 다른 노드로 전송한다. 시간 영역에서 TURBO CAN 신호를 보면 그림 18과 같은 형태로 신호가 전송되며 A_p 를 통해 대역통과 신호의 전력을 결정한다. TURBO CAN은 기존 CAN과 호환이 가능하여 TURBO CAN과 CAN 간뿐만 아니라 TURBO CAN과 TURBO CAN 간의 데이터 전송이 가능하다. CAN 수신기에는 저역 통과 필터(low-pass filter)

와 히스테리시스 필터(hysteresis filter)에 의해 필터링 된 신호의 크기를 통해 dominant 또는 recessive 신호 여부를 결정한다.¹⁵ TURBO CAN이 CAN에 신호를 전송할 경우, 대역통과 신호의 A_p 를 조절하여 dominant와 recessive으로 나누는 기준을 침범하지 않는 범위에서 TURBO CAN 신호를 전송하면 CAN 수신기에서 오류 없이 동작하여 호환성을 제공해준다. 그림 20는 TURBO CAN 수신기를 나타낸 것이다. TURBO CAN 간의 데이터 전송 시, TURBO CAN 수신기에서 받은 신호는 신호 변환기(signal converter)를 통과하여 차동 신호로 변환 된다. 차동 신호를 기존 CAN 수신기를 통해 기존 CAN 신호를 구하고 대역통과 필터(band-pass filter)를 통해 기존 CAN 신호를 제거한 대역통과 신호(그림 18의 $S_p(t)$)를 구한다. 대역통과 신호는 dominant에만 전송되기 때문에 기존 CAN 신호는 recessive에서 dominant로 전환하는 위치를 찾아 그 시점에서 대역통과 신호를 복조하기 위해 사용된다. 대역통과 신호는 주파수 하향 변환(down conversion)으로 기저대역 신호로 변환 후 등화기(equalizer)와 slicer를 통해 TURBO CAN 데이터를 검출한다.

TURBO CAN은 이와 같이 동작하며 기존 CAN과 호환이 가능하기에 비트 단위의 충돌 중재, 브로드캐스팅, 멀티마스터가 가능하여 실시간 제어에 유리하다는 장점을 모두 활용할 수 있으면서 대역통과 신호를 사용하여 데이터 전송속도를 100Mbps이상 향상시킬 수 있다. 하지만 TURBO CAN 신호는 높은 주파수 대역을 사용하기 때문에 채널의 왜곡이 크기 때문에 등화기가 필수적이며 변조의 차수(modulation order)가 높을수록 고성능 등화기가 필요하여 이에 대한 연구도 필요하다.

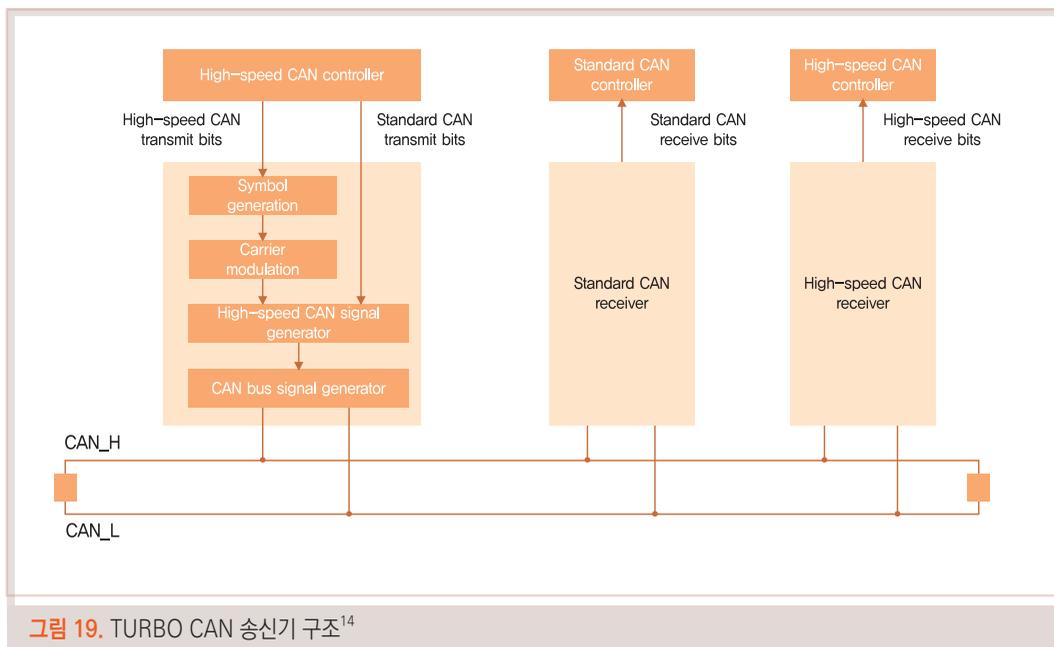


그림 19. TURBO CAN 송신기 구조¹⁴

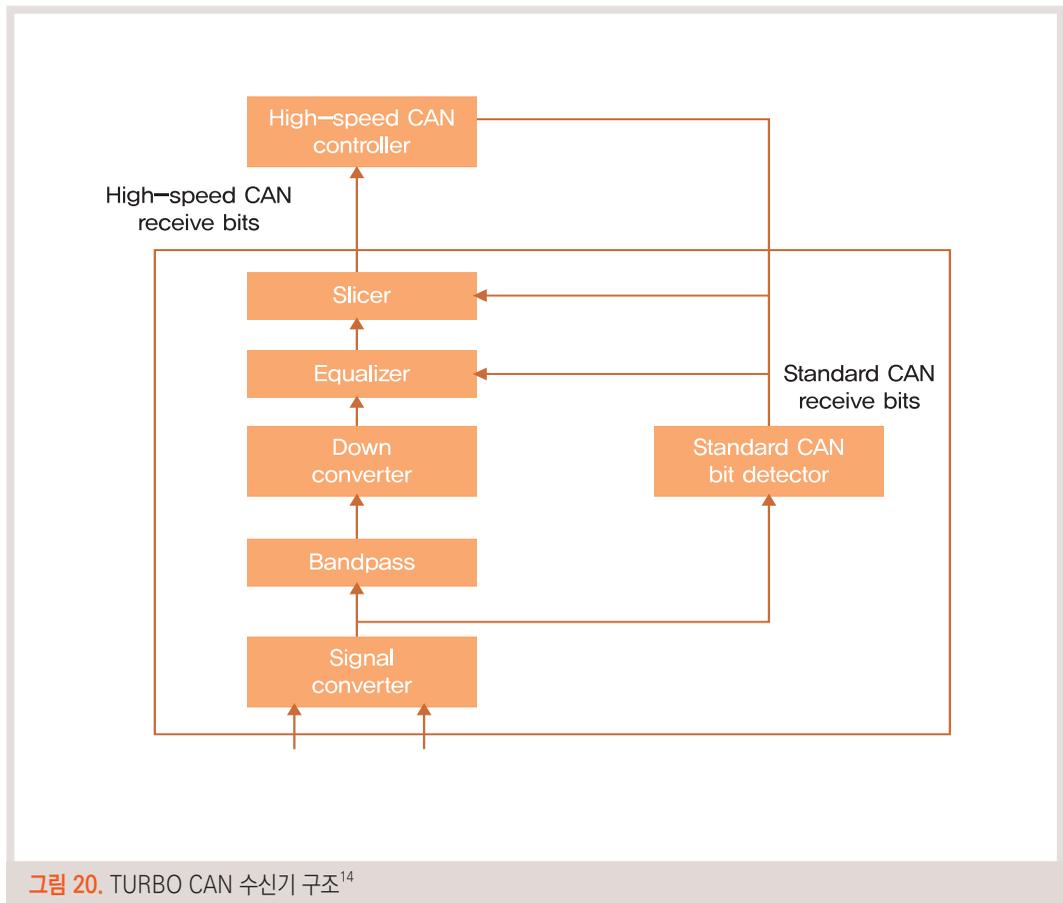


그림 20. TURBO CAN 수신기 구조¹⁴

2.7 연구 개발 동향

차량 내부 네트워크로 기존의 대부분의 차량에서 CAN을 사용하고 있지만, 고속 대용량의 데이터 처리가 가능한 네트워크의 필요성이 증대됨에 따라 Ethernet 을 중심으로 표준화가 진행되고 있다. 대표적으로 BMW, 브로드컴, 프리스케일 반도체, 하만 인터네셔널, 현대자동차, NXP 반도체 등을 중심으로 설립된 OPEN Alliance SIG(special interest group) 와 브로드컴, 시스코 시스템, 하만 인터네셔널, 인텔, 현대 자동차 등의 구성원을 지닌 AVnu Alliance 가 있다. OPEN Alliance SIG 는 차량 내부 환경에 적합한 Ethernet 표준을 제정하고자 설립되었다. 주 목적은 차량 네트워크에 차

량용 Ethernet 기술 적용 및 표준 제정, 차량 내부의 확장 가능한 Ethernet 기반의 망을 구축하는 것이며 이를 위해 5개의 기술위원회(technical committee)를 구성하였다.¹¹ 각 그룹에서는 100Mbps BroadR-Reach 표준 설명, 진단 요구 사항, 장비 요구사항 등에 대한 지침을 마련하는 중이며, 다양한 상위 계층 프로토콜들이 제대로 작동하는지 등을 검증하고 있다.¹¹ AVnu Alliance는 전문적인 품질의 음성 및 영상 전송을 개발하는 산업포럼이다. AVnu Alliance에서는 네트워크로 연결된 오디오, 비디오 장치 간의 AVB(audio video bridging)^{xv} 상호 연동성을 확인하기 위한 프로세스 및 테스트 절차를 제공하며, Ethernet AVB의 시간 동기화 프로토콜, 우선권에 따른 스위칭 표준 등의 표준안을 개발하고 있는 중이다.¹⁶ 이 외에도 차량의 전장부품이 증가하고 복잡해짐에 따라 하드웨어 의존적인 소프트웨어의 복잡성을 해결하기 위해 개발된 차량 통신용 소프트웨어(SW) 플랫폼인 AUTOSAR(AUTomotive Open System ARchitecture)에 Ethernet을 도입하기 위한 연구가 진행 중이다. AUTOSAR는 BMW, DaimlerChrysler, Volkswagen, Bosch, Continental, Siemens VDO 등을 중심으로 다수의 자동차 제조업체와 부품 개발 업체들에 의해 생성된 산업표준이다. AUTOSAR에서 Ethernet 도입을 위해 다양한 Ethernet controller와 Ethernet transceiver들로 구성된 Ethernet 통신 시스템 인터페이스를 제공해주며, 상위 계층에 공통된 형식으로 하위 버스 시스템 사용을 가능하게 해주는 등의 소프트웨어 플랫폼을 구성하고 있다. 국내에서는 Ethernet 표준화 작업에서 ETRI, 현대자동차, 현대오트론 등이 OPEN Alliance SIG, AVnu Alliance, AUTOSAR에 가입하여 활동을 하고 있지만, 차량 내부 네트워크 개발보다 주로 커넥티드 카를 위한 클라우드 서비스, 전장 부품 개발, 소프트웨어 개발 등에 집중하고 있는 실정이다.

03 맺음말

앞서 기술한 차량 내부 네트워크 기술들의 발전 과정을 보면 차량 내부의 배선 양을 줄이기 위해 CAN이 개발되었으며, 간단한 애플리케이션들을 보다 저렴한 비용의 네트워크로 구현하기 위해 도입된 LIN, 시스템의 안정성 및 실시간성과 고성능 애플리케이션을 위한 FlexRay, 멀티미디어를 위해 데이터 전송속도에 따라 MOST25, MOST50, MOST150가 개발되는 등 주로 차량 내부의 배선 양을

^{xv} LAN 위에서 오디오 및 비디오 등 멀티미디어 스트림을 원활하게 전달하기 위한 전송 품질 보장형기술을 위한 표준

줄이고, 네트워크 구축 비용의 절감, 데이터 전송속도를 향상시키는 방향으로 발전해 왔다. 특히 최근 자율 주행 자동차에 대한 연구가 활발하게 진행됨에 따라 차량 내부에서는 다수의 시스템들이 내장되고 다양한 서비스들을 지원하기 위해 방대한 양의 데이터를 처리해야 하기 때문에 차량 내부 네트워크의 데이터 트래픽이 증가하고 있으며 이를 해결하기 위해 더욱 높은 데이터 전송속도가 요구되고 있다. 기존의 CAN, LIN, FlexRay는 각각 데이터 전송속도가 최대 1Mbps, 20Kbps, 20Mbps로 첨단 운전자 지원 시스템, 인포테인먼트, 방대한 센서 및 카메라 데이터를 처리하기에 부족한 수치이다. 또한, MOST의 경우는 최대 150Mbps의 데이터 전송속도를 제공하지만 광케이블을 이용하기 때문에 네트워크 구축 비용이 증가하고 링 형태의 네트워크 구조로 낮은 latency를 요구하는 시스템에 적용하기 어려운 점이 있다. 이러한 이유로 첨단 운전자 지원 시스템을 지원하기 위해 차량 내부 네트워크에서는 100Mbps 이상의 데이터 전송속도를 제공해주는 새로운 기술을 개발하였고, 그것이 Ethernet과 TURBO CAN이다. Ethernet과 TURBO CAN은 높은 데이터 전송속도를 제공하지만 차량에 적용하기에 아직 검증해야 할 부분이 많다. Ethernet의 경우 근거리통신망으로 컴퓨터 통신망으로 많이 사용되고 연구가 되었기 때문에 차량에 적용하기 용이하나, BroadR-Reach를 사용하기 위해서는 EMI/EMC 문제를 해결해야 하고 스타형 토폴로지의 일대일 통신을 지원하기 때문에 실시간으로 데이터를 전송해야 할 경우 한계가 있다. 반면 TURBO CAN의 경우 기존의 CAN과 호환이 가능하여 물리 계층에서는 CAN 버스를 변형하지 않고 그대로 적용할 수 있어 CAN의 장점인 브로드캐스팅, 멀티마스터, 우선순위에 의한 충돌 중재로 실시간 데이터를 전송할 수 있는 장점이 있으나, 상위 계층에 어떠한 것을 적용할 것인지 아직 결정된 바가 없다. 따라서 Ethernet과 TURBO CAN의 장점을 이용하여 물리 계층에는 기존 차량 내부 네트워크에도 적용 가능한 TURBO CAN을 사용하고, 상위 계층에 Ethernet을 적용함으로써 보다 효율적으로 차량 내부 네트워크를 구축하는 방법도 고려 가능하다.

앞서 소개된 차량 네트워크는 외부와 연결이 없는 폐쇄적인 성격을 가지고 있어 차량의 내부 환경만을 고려하여 발전되어 왔지만 차세대 자동차는 DSRC, cellular network, telematics 등의 기술에 의해 차량 외부와의 연결성이 증가하고 있다. 이처럼 차량 내부 네트워크가 점차 외부로 개방됨에 따라 차량의 보안 또한 자동차 산업에서 고려해야 할 부분으로 대두되고 있다. 2015년 미국 국가안전보장국(NSA) 해커 출신 Charlie Miller와 보안 전문회사 IO 액티브 연구원 Chris Valasek은 운전자의 편의성을 위해 지프 체로키에 제공된 U-connect를 해킹하여 차량 내부 네트워크인 CAN에 대한 통제권을 확보해 차량의 주요 기능들을 제어하는 시연 영상을 공개하여 차량의 보안 문제를 제기하며 차량보안 중요성을 강조하였다.¹⁷ 뿐만 아니라, 2015년 독일 운전자 협회(ADAC)에서 공개한 스마트 키 해킹 위협¹⁸, 테슬라S의 FreeRTOS 기반의 게이트웨이 사용으로 인한 외부 해킹으로부터의 취약

성¹⁹ 등 보안의 위협이 점차 증가하고 있다. 이러한 위협으로부터 차량을 보호하기 위해서는 차량 외부 통신 기술의 보안도 중요하지만 차량 내부 네트워크에서도 보안을 강화해야 한다. 이를 위해 우선 차량 내부 네트워크의 취약점을 파악하고 검증하는 선행연구가 진행되어야 하며 이를 기반으로 차량 내부 네트워크를 보호하기 위한 기술들을 연구하고 개발해야 할 필요가 있다. 예를 들면, 차량에서 많이 사용하고 있는 CAN은 자동차의 주요 애플리케이션인 파워트레인 시스템 간의 통신을 지원하고 있지만 각 시스템 간의 인증 절차 없이 데이터를 송수신 할 수 있다. 또한 데이터 송신 시 네트워크 내의 모든 시스템에 동시에 전송하기 때문에 외부에서 쉽게 도청할 수 있고 데이터를 보낼 수 있는 취약점이 있다. 이를 해결하기 위해 데이터를 암호화하고 인증 절차를 추가하는 방법이 있으며, 이를 적용하기 위한 추가적인 연구가 진행 되어야 한다. 기존의 CAN 프로토콜에서 암호화를 위해 추가적인 데이터를 사용한다면 페이로드가 감소하여 전체 시스템의 처리율(throughput)이 감소하기 때문에 보다 넓은 대역폭을 제공하는 Ethernet이나 TURBO CAN을 도입하여 데이터 전송속도도 향상시키면서 보안을 강화해야 할 것이다. 이 외에 차량과 외부 통신 시스템과 내부 통신 시스템 간의 연결을 위한 게이트웨이 설계에 대한 연구가 필요하며 게이트웨이에서의 보안성 향상 기술 개발도 요청된다.

스마트폰이나 가전 등과 달리 현재 자동차 전장 반도체 관련 세계 기업 순위에서 국내 기업들은 높은 위치를 차지하지 못하고 상황이다. 세계적으로 앞선 기술과 노하우를 갖고 있는 통신 및 네트워크 기술들을, 급속히 성장하고 있는 차량 네트워크 관련 산업에 적용할 경우 관련 선도 산업을 선도할 수 있는 기회를 마련할 수 있을 것으로 기대된다. 차량 내부 네트워크를 비롯하여 V2X를 포함한 차량과 외부간 네트워크 등의 차량 네트워크 분야는 향후 폭발적인 성장이 예상되는 블루오션으로, 관련 산업계, 학계, 연구계 등의 적극적인 참여와 노력이 요청된다.

PROFILE

저자 **최지웅**
Choi, Ji-Woong

학력 서울대학교전기컴퓨터공학부 박사
서울대학교전기공학부 석사
서울대학교전기공학부 학사

경력 現) DGIST 정보통신융합공학 교수
前) Marvell Semiconductor Senior /Staff Engineer
前) Stanford Univ. 박사후연구원

저자 **최은민**

학력 경북대학교 전자공학부 학사
현재 DGIST 정보통신융합공학 전공 석사과정

저자 **한성민**

학력 한국기술교육대학교 전자공학과 학사
현재 DGIST 정보통신융합공학 전공 석·박사 통합과정

참고문헌

1. In-vehicle LTE - Use Cases and Opportunities for the Connected and Autonomous Car
RF Design: News. Available at: <http://rf-design.co.za/in%2%80%91vehicle-lte-use-cases-opportunities-connected-autonomous-car/> (2016).
2. Clemson Vehicular Electronics Laboratory: Automotive Electronic Systems. Available at: <http://www.cvel.clemson.edu/auto/systems/auto-systems.html>.
3. Farsi, M., Ratcliff, K. & Barbosa, M. An Overview of Controller Area Network. Comput. Control Eng. J. 10, 113-120 (1999).
4. Paret, D. Multiplexed Networks for Embedded Systems: CAN, LIN, Flexray, Safe-by-Wire (John Wiley & Sons, 2007).
5. CANBUS ID Filter and Mask. Available at: <http://www.cnblogs.com/shangdawei/p/4716860.html> (2015).
6. LIN Specification Package, Revision 2.2, LIN Consortium (2010).
7. Makowitz, R. & Temple, C. R. FlexRay—A Communication Network for Automotive Control Systems. Proc. IEEE Int. Workshop Factory Commun. Syst. 207-212 (2006).
8. Grzempa, A. MOST®: The Automotive Multimedia Network from MOST25 to MOST150 (Franzis, 2008).
9. Intrepid Control Systems, Inc. Available at: <http://www.intrepidcs.co.kr/uploads/2/5/0/1/25016645/sample-korautomotiveethernetthedefinitiveguide.pdf> (2016).
10. 차량용 Ethernet, 차세대 차량 네트워킹 표준을 위한 종합적 접근법. NXP Semiconductors. Available at: <http://www.autoelectronics.co.kr/article/articleView.asp?idx=1124> (2013).
11. 이정환, 황현용. 차량용 이더넷 기술 및 표준 동향. 한국정보통신기술협회 (2013).
12. Zeng, W., Khalid, M. & Chowdhury, S. In-Vehicle Networks Outlook: Achievements and Challenges. IEEE Commun. Surveys Tuts. 18, 113-120 (2016).
13. Wong, W. Automotive Ethernet Arrives. Available at: <http://electronicdesign.com/automotive/automotive-ethernet-arrives> (2011).
14. Kang, S., Han, S., Cho, S., Jang, D., Choi, H. & Choi, J.-W. High Speed CAN Transmission Scheme Supporting Data Rate of over 100 Mbps. IEEE Commun. Mag. 54, 128-135 (2016).

-
15. Microchip Technology Inc. High-Speed CAN Transceiver. Available at: <https://www.sparkfun.com/datasheets/DevTools/Arduino/MCP2551.pdf> (2010).
 16. 윤현정, 차량 내부 네트워크 기술 표준화 현황. 한국정보통신기술협회 (2015).
 17. Greenberg, A. Hackers Remotely Kill a Jeep on the Highway - With Me in It. Available at: <https://www.wired.com/2015/07/hackers-remotely-kill-jeep-highway/> (2015).
 18. Key Fob Hacking Vulnerability In 24 Vehicle Models Revealed By German Researchers. DrivingSales News. Available at: <http://www.drivingsales.com/news/key-fob-hacking-vulnerability-in-24-vehicle-models-revealed-by-german-researchers/> (2016).
 19. 손경호. 스마트카?...좀비자동차 될 수 있다. ZDNet Korea. Available at: http://www.zdnet.co.kr/news/news_view.asp?artice_id=20150810000128 (2015).



융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5 (TEL) 02-958-4984