

하이브리드 및 전기자동차 등 환경차 전장 부하용 LDC 시스템의 기술 동향

1. 서론

최근 그림 1과 같이 CO₂ 배출 규제와 같이 강화되고 있는 환경 규제에 대응하고, 차량의 연비를 향상시키기 위해서 하이브리드, 수소 및 전기 자동차와 같은 친환경 차량에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다^[1]. 이러한 친환경 자동차의 경우 효율적인 전력변환을 위해 인버터와 컨버터와 같은 다수의 전력변환장치를 필요로 하며, 이들 전력변환장치는 자동차의 전비와 밀접한 관계가 있으므로 높은 효율이 요구되고 있다. 더욱이 친환경 자동차의 전력변환장치는 엔진룸, 차량 후석 시트 하단, 또는 트렁크 공간에 장착되므로 공간적인 한계상 고밀도 및 경량화도 같이 요구되고 있는 실정이다. 하이브리드 및 플러그인 하이브리드 자동차는 특히 기존의 내연기관에 추가적으로 전력변환 장치가 적용되는 만큼 높은 가격 경쟁력 또한 환경차용 전력변환장치를 개발하는데 있어 매우 중요하다.

초창기 하이브리드 및 전기 자동차 등 친환경 차량의 경우 기존의 내연기관의 낮은 효율을 보완하고 연비를 향상시키기

위해 내연기관의 전동화에 개발 역량을 집중시켰다. 하지만 최근에는 자율주행 기술의 급격한 발전과 시장의 요구로, 자율주행을 위해 ADAS 시스템이 추가로 적용되고 있으며, 기존에 적용되어 있던 유압 장치와 같은 기계 전장 부품들이 빠르게 전동화되어 가고 있다.

차량의 전장부품에 전원을 공급하기 위해서는 기존 내연기관의 경우 엔진의 출력을 전기로 변환시키는 알터네이터를 적용해 왔으나, 환경차에서는 그림 2와 같이 고전압 배터리를 입력으로 12V 전장 부품에 전력을 공급하는 저전압 DC 컨버터 (Low voltage DC-DC converter, LDC)를 적용해 왔다^{[2],[3]}. LDC는 입력단과 출력단이 모두 배터리와 연결되어 있기 때문에 입력 200~400V, 출력 7~15V로 입출력의 전압의 변동폭이 크며, 앞서 언급하였듯이 증가하고 있는 전장 부품들로 인해 대용량 LDC가 요구되고 있다. 효율 및 전력밀도 등 강화되고 있는 LDC의 요구조건을 만족시키기 위해 지속적으로 연구 개발이 진행되어 왔으며, 본 기술 동향에서는 현재까지의 LDC의 연구 개발 현황과 더불어 추후 연구 방향에 대해 다루고자 한다.

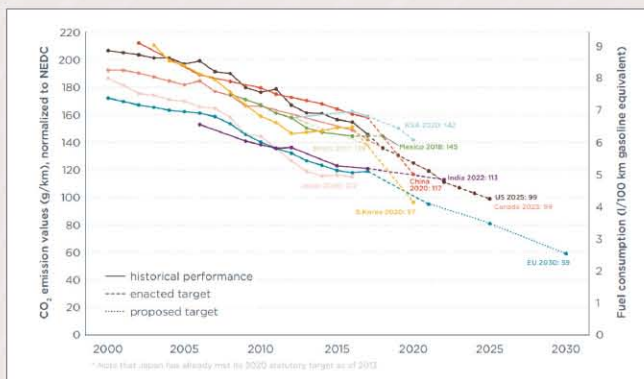


그림 1 승용차에 대한 국가별 CO₂ 배출 규제

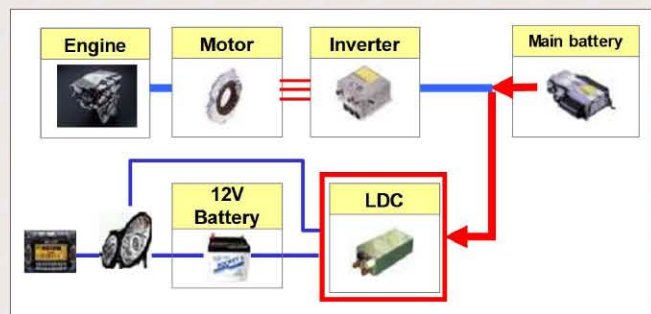


그림 2 HEV 파워트레인 시스템

2. LDC의 고효율화를 위한 연구

2.1 위상천위 풀-브리지(Phase-shifted full-bridge, PSFB) 컨버터

LDC의 경우 차량내 고전압 배터리를 전원으로 12V 저전압 배터리를 충전하거나 전장 부하를 공급한다. 또한 LDC의 경우 차종에 따라 상이하지만 정상시의 전장 부하의 소모량 및 최대 부하 시의 전력 소모량을 고려하여 일반적으로 2kW급의 출력을 가진다. 따라서 LDC의 출력 전류의 경우 130~180A로 대전류의 출력단을 가지며 대전류의 출력 전류 리플을 저감하고, 출력단 필터의 부피를 최소화 하기 위해 일반적으로 출력 인덕터가 적용된 토폴로지가 요구된다. 또한 정격의 경우 2kW급의 대전류 출력으로 설계되지만 일반적으로 환경차의 전장 부하는 출력 전류 20~40A의 경부하로 동작하며, 이에 따라 LDC의 경우 경부하에서 높은 효율이 필요하다. 따라서, 1번의 스위칭 주기에 2번의 전력전달로 주파수 향상 효과가 있고, 출력인덕터가 적용되어 출력필터 부피를 저감가능 하며, 넓은 전압전달비를 가지고 있어 큰 입출력 전압 변동에도 적합할 뿐만 아니라 1차측 전 스위치의 소프트 스위칭이 가능한 그림 3과 같은 위상천위 풀-브리지 컨버터(PSFB)를 주로 적용해 왔다^{[2],[3]}. 하지만 PSFB 컨버터는 넓은 입출력 전압 범위에 대응하기 위해 정상 입력 조건 시 적은 동작 듀티를 가지게 되고 이에 따라 부하가 증할 시 1차측 스위치의 순환 전류가 증가하여 도통 손실이 증가한다. 이와 같은 단점을 가진 PSFB 컨버터는 자율주행 등으로 상시 전장 부하가 지속적으로 증가하고 있는 현대 환경차량에 큰 도통손실과 낮은 효율로 적합하지 않으며, 이에 따라 중부하 이상에서도 높은 효율을 달성 가능한 토폴로지에 대한 연구가 지속되었다.

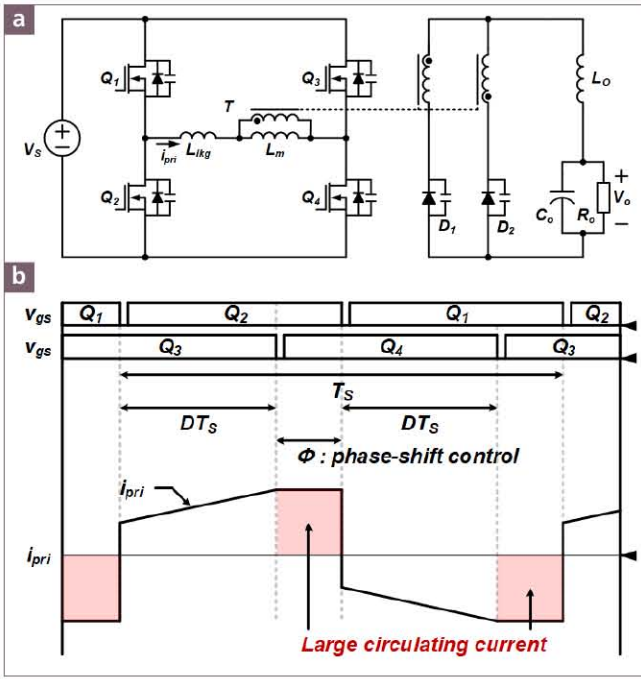


그림 3 PSFB 컨버터 (a) 회로도, (b) 주요 파형

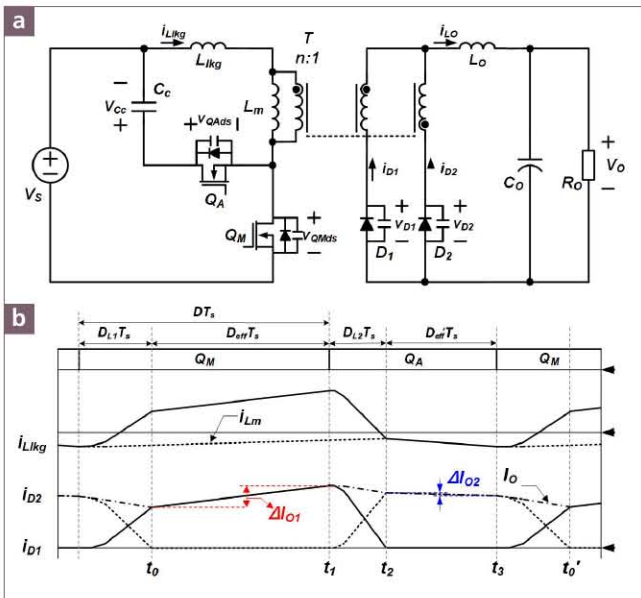


그림 4 ACF 컨버터 (a) 회로도, (b) 주요 파형

2.2 액티브 클램프 포워드(Active Clamp Forward, ACF) 컨버터

PSFB 컨버터의 대안으로 현대 및 차세대 환경차 LDC를 위해 연구된 토폴로지로는 액티브 클램프 포워드 (ACF) 컨버터가 있다. ACF 컨버터는 1번의 스위칭으로 2번의 파워링, 적은 출력 필터, 넓은 전압전달비, 1차측 스위치의 소프트 스위칭 등 기존의 PSFB 컨버터가 가지는 장점을 그대로 가지고 있을 뿐만 아니라, 1차측의 스위치의 순환전류를 저감 가능하고, 1차측 스위치를 2개만 사용하여 기존 PSFB 컨버터의 단점이었던 중부하 이상 영역에서 도통손실을 크게 저감시켜 그림 5와 같이 중 부하 이상 효율을 크게 증가시켰다. 그 결과 자율주행 등으로 인해 중부하 이상 영역의 효율이 중요한 현대 및 차세대 LDC에는 ACF 컨버터가 기존 PSFB 대비 효율 측면에서 더 적합하다^[3]. 이러한 ACF 컨버터는 구조상 1차측 스위치의 전압 스트레스가 증가하여 높은 가격의 스위치를

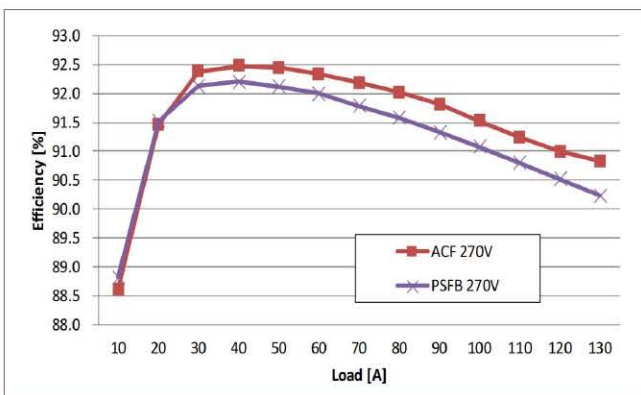


그림 5 PSFB와 ACF LDC의 270V입력 시 효율 비교

사용하는 단점을 가지고 있었으나, 기존 Si-MOSFET 대비 전압 내압이 증가하고 스위칭 특성이 향상된 SiC 스위치가 대중화되고 가격 하락함에 따라 기존 PSFB 컨버터와 동등한 가격으로 ACF 양산이 가능해 졌다. 그 결과 액티브 클램프 포워드 컨버터 토폴로지가 적용된 LDC는 2019년 출시된 소나타 하이브리드에 처음으로 탑재, PHEV, EV 등 전 차종에 탑재될 예정이다.

3. LDC 초고밀도 달성을 위한 연구

3.1 고주파 동작 및 Planar 변압기를 적용한 LDC

LDC 컨버터는 차량 연비와도 밀접한 연관이 있기 때문에 높은 효율이 요구되지만 이에 못지 않게 차량 내부의 공간 제약으로 LDC의 전력밀도 극대화 또한 강력히 요구되고 있다. 또한 높은 가격의 하이브리드 및 플러그인 하이브리드 시스템으로 인해 원가 저감에 따른 가격 경쟁력 향상이 지속적으로 요구되고 있다. 결과적으로 최근 들어서는 기존의 LDC와 동등한 효율을 보이면서 전력밀도를 극대화와 더불어 부품 저감을 위한 연구들이 각광을 받고 있다.

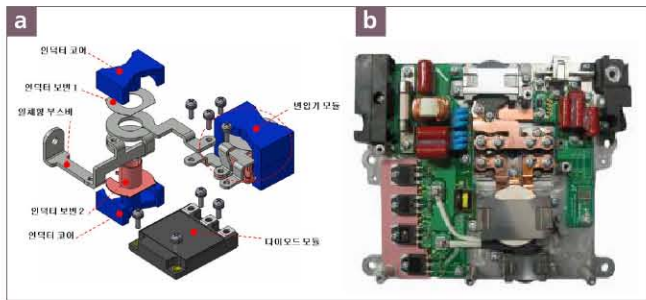


그림 6 기존 LDC 구조 (a) 자성체 모델, (b) 시제품

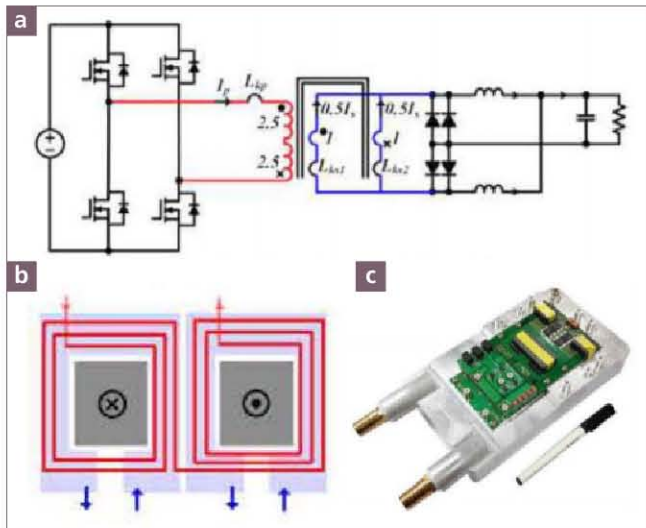


그림 7 700kHz 고주파 스위칭 LDC (a) 회로도, (b) 변압기 구조, (c) 시제품

전력밀도 향상을 위해 그림 6과 같은 기존의 양산 LDC를 분석하여 보면, 1-2차측 스위치와 다이오드 외에 LDC의 변압기 및 출력 인덕터와 같은 자성체와 이들 자성체를 지지하기 위한 구조물들이 큰 부피를 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 절연과 권선의 진동을 방지하기 위한 복잡한 구조의 권선과 보빈은 넓은 면적을 점유하고 있을 뿐만 아니라 자성체 가격을 상승시키고 있다. 따라서 최근 많은 산업체에서 LDC에서 큰 부분을 차지하는 자성체 및 관련 구조물의 부피를 저감하고 구조를 최적화하기 위한 연구를 지속적으로 진행하고 있다. 기존 다양한 연구 중, 그림 7에서 보이는 것과 같은 LDC 고주파 구동과 Planar 변압기를 적용하는 연구가 활발히 진행되었다^[2]. 해당 연구는 PSFB 컨버터 기반으로 1차측 스위치에 GaN 소자를 적용하여 스위칭 주파수를 700kHz까지 증가 시키고 2차측에 PCB 패턴을 간결화 하기 위한 current-doubler 정류기와 planar 변압기 및 인덕터를 적용하여 초고전력밀도의 LDC를 개발하였다. 하지만 개발된 고주파수 PSFB 컨버터는 고주파 구동을 위한 자성체 재질 변경으로 인해 스위칭 주파수가 약 7배 가량 증가 하였어도, 변압기의 부피는

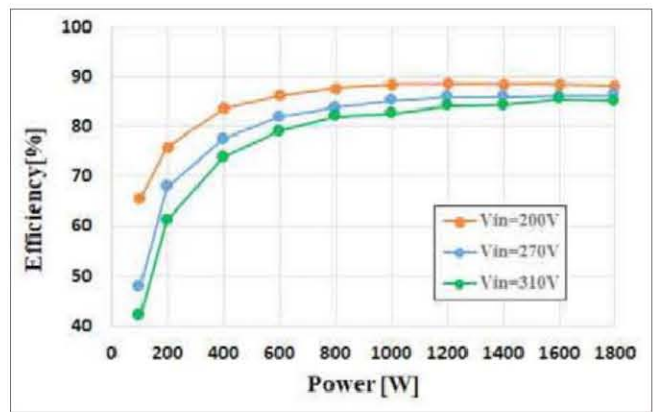


그림 8 고주파 PSFB LDC 컨버터 측정효율

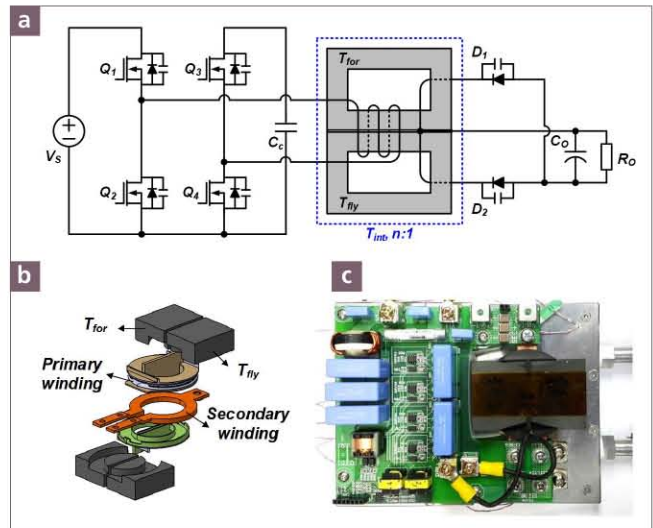


그림 9 자성체 통합 LDC 컨버터 (a) 회로도, (b) 자성체 구조, (c) 시제품

오직 50%만 절감되어 주파수 상승치 대비 효과가 미비하다. 더욱이 GaN 소자를 사용하였음에도 높은 스위칭 주파수에 의해 큰 스위치 턴오프 손실이 발생하였다. 더욱이 PCB 권선의 높은 전류밀도와 current-doubler 정류단의 복잡한 구조로 인해 도통 손실이 추가로 발생함에 따라 초고전력밀도를 달성하였음에도 불구하고 효율은 그림 8과 같이 기존 LDC 대비 하락하였다. 해당 연구를 통해 고주파 LDC의 가능성을 확인하였기 때문에 현재는 고주파 구동으로 저하된 효율을 개선하기 위한 토폴로지 변경 및 개선 등의 연구들이 학계와 산업계에서 수행되고 있다.

3.2 자성체 통합을 통한 고밀도화

고주파 LDC 컨버터의 연구와 더불어 LDC 컨버터의 자성체를 절감하여 전력밀도와 가격 경쟁력 향상을 위한 연구가 활발히 진행되었다. 자성체 절감을 위해 기존 변압기와 인덕터를 통합하는 연구가 진행되었으며, 액티브 클램프 포워드-플라이백 (Active Clamp Forward-Flyback, ACFF) 컨버터를 기반으로, 1차측 권선을 통합하고 2차측 버스바를 최적화한 그림 9와 같은 통합 자성체 토폴로지가 연구 개발되었다^[3]. 해당 통합 자성체 ACFF 컨버터의 경우, 비록 자성체 자체의 유효 단면적 (Effective Area, A_e)은 기존과 유사하지만, 자성체와 권선의 복잡한 구조를 간결화 하고, 자성체 고정을 위한 구조물은 절감할 수 있을 뿐만 아니라 2차측 정류단의 구조를 최적화하여, 부피를 절감하고 가격 경쟁력을 향상시킬 수 있었다. 더욱이 개발된 컨버터는 기존 양산된 ACF 컨버터와 동작이 유사하고 동일한 효율을 보인다는 장점을 가지고 있다. 하지만 결과적으로 자성체 자체의 부피 저감에 한계가 있기에 전력 밀도를 향상시켰음에도 초고밀도 LDC를 개발하는 데 한계가 있다.

결과적으로 고주파 구동과 자성체 통합의 장단점을 동시에 보완할 수 있는 연구가 필요하며 현재 산업계에서도 차세대 제품 개발을 통해 연구를 지속적으로 진행되고 있는 실정이다.

4. LDC와 타 전력변환장치 토폴로지 통합을 통한 고밀도화 연구

LDC 자체의 전력밀도를 향상시키는 연구 외에도, LDC와 차량에 적용되는 타 전력변환장치, OBC 및 SDC (solar-cell dc-dc converter)를 통합하여 전력변환장치 전체의 부피를 절감하는 연구도 동시에 진행 중에 있다. 특히 그림 10과 같이 OBC의 DC/DC단의 1차측 스위치와 LDC의 1차측 스위치를 공유하는 토폴로지에 대한 연구가 진행되었으며, 또 충전 중에만

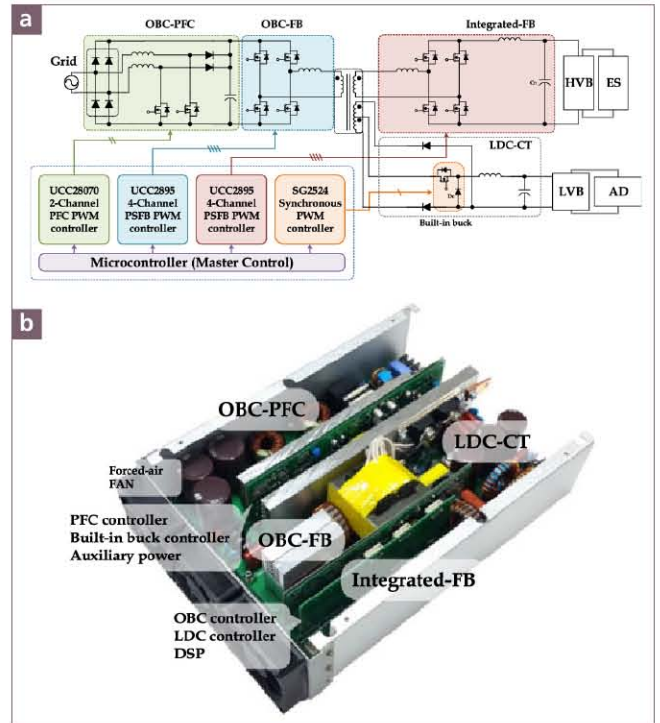


그림 10 통합 OBC+LDC 시스템 1 (a) 회로도, (b) 시제품

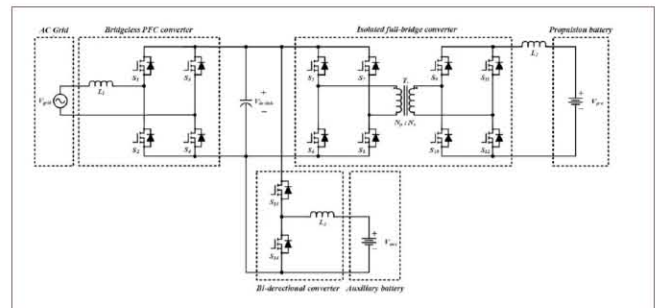



그림 11 통합 OBC+LDC 시스템 2

OBC가 동작한다는 특성을 고려하여 충전 중일 경우 OBC를 통해 충전하고 운행 중인 경우 OBC의 DC/DC단을 LDC로 활용하는 그림 11과 같은 회로 및 양방향 벡컨버터를 추가하여 LDC와 OBC를 통합하는 등 다양한 연구가 수행되었다^{[4][6]}. 이러한 토폴로지의 통합 연구들은 전력변환장치가 개별 제품으로 장착되는 것에 비해 방열, 방수 및 고정을 위한 하우징의 크기를 대폭 경감할 수 있다는 장점을 가진다. 비록 기존 OBC, LDC, SDC와 같은 개별 전력변환장치의 높은 효율을 달성하기 어렵다는 단점이 있지만, 통합 토폴로지 최적화 및 신규 회로 개발 등을 통해 단점들을 지속적으로 보완하고 있으며, 산업계에서도 부피와 가격경쟁력을 이유로 활발히 연구가 진행되고 있다.

5. 결론

자동차들이 점차 전장화 되고, 자율주행 등 차량에 부가 기능들이 추가 적용됨에 따라 자동차의 전장부하는 지속적으로 증가하고 있으며, 이들 장치에 전원을 공급하는 LDC의 용량 또한 증가되고 있다. 하지만 LDC의 경우 한정된 공간에 탑재가 되는 특성상 고전력 밀도와 고효율이 필요로 하게 된다. 또한 추가되는 전장 부품과 증가하는 전력변환장치의

용량에도 높은 가격 경쟁력을 가지기 위해 지속적으로 가격 절감이 요구되고 있는 실정이다. 본 기술동향에서는 이와 같이 강화되고 있는 LDC의 요구사항을 충족시키기 위한 LDC 토폴로지 및 관련 기술에 대해 살펴보았다. 이들 제안된 기술들을 검토 및 확보하고, 이를 개선하여 높은 상품성을 가진 차량용 LDC 개발할 경우 향후 세계 환경차 전력변환장치 시장을 선도하는데 매우 중요한 역할을 수행할 것이라 판단 된다. 

참고문헌

- [1] CO2 emission standards for passenger cars and light-commercial vehicles in the European Union, Available online: <http://theicct.org/publications/ldv-co2-stds-eu-2030-update-jan2019>.
- [2] 김상진, Adhis, 김규영, 최세완, 양대기, 홍석용, 이윤식, 여인용, “GaN소자 기반 8kW/L, 700kHz 전기자동차용 LDC 개발,” 전력전자학술대회 논문집, pp. 68-70, 2019. 7.
- [3] J. Baek and H. S. Youn, “Full-bridge active-clamp forward-flyback converter with an integrated transformer for high-performance and low cost low-voltage DC converter of vehicle applications,” *Energies*, 13, 863, 2020.
- [4] Y. Kim, C. Oh, W. Sung and B. K. Lee, “Topology and control scheme of OBC-LDC integrated power unit for electric vehicles,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 3, pp. 1731-1743, Mar. 2017.
- [5] D. Heo, Y. Kwak, and F. Kang, “Integration of OBC and LDC using adaptive DC link voltage,” 2019 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE), Ho Chi Minh, Vietnam, 2019, pp. 261-264.
- [6] 김형식, 전죽혁, 김희준, 안준선, “전기자동차용 OBC 일체형 1.5kW 급 LDC 컨버터에 대한 연구,” 한국정보전자통신기술학회논문지, 12권, 4호, 2019.

윤한신 인천대 전기공학과 조교수

2017년 KAIST 전기전자공학과 졸업(공학).
2017년~2019년 현대자동차 전력변환제어설계팀 책임연구원.
2019년~현재 인천대 전기공학과 조교수.

