



# 수소연료전지차량용 210kW급 고전력밀도 FDC 설계 및 제어

2024. 07. 03

박상민, Ph.D., Senior Researcher

한국전자기술연구원 (KETI)  
전력제어시스템연구센터 전력변환연구팀

Tel: +82-32-621-2816 Fax: +82-32-621-2855  
<http://www.keti.re.kr> EML: [smpark@keti.re.kr](mailto:smpark@keti.re.kr)

# 목차

---

1

연구 배경 및 기술동향

2

연구 목표

3

FDC 시스템 설계

4

제어 알고리즘 설계

5

FDC 시스템 성능 검증

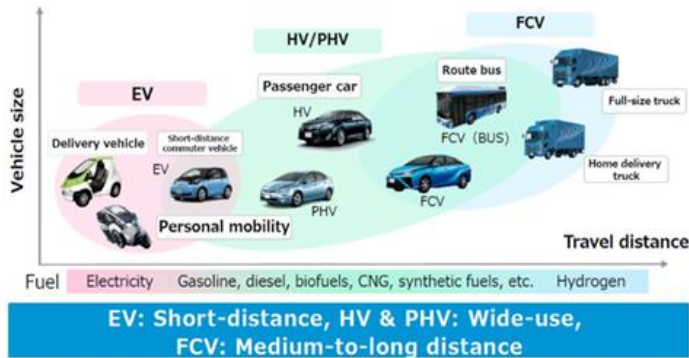
6

연구 결과 요약

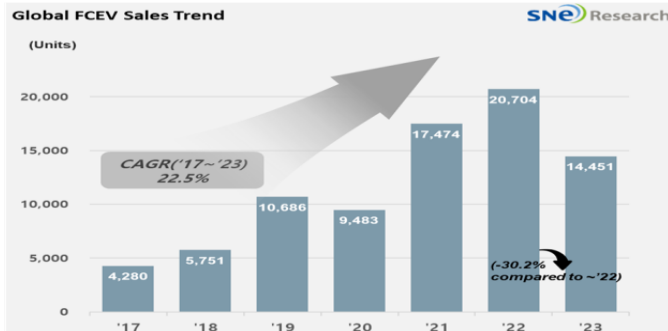
# 연구 배경 및 기술동향 (I)

## 수소연료전지차 (Fuel Cell :FCEV) 시장 동향

- 충전시간이 오래 걸리는 BEV와 달리 FCEV는 충전 시간이 5분 수준이며 내연기관차와 달리 **오염물질 대신 물만 배출함**
- 최근 수소연료전지 방식은 트럭 및 버스등 상용차 운송 부문에서 응용 가능한 대안으로 점점 인기를 얻고 있음
- FCEV 제조사별 판매량은 현대자동차가 시장 점유율 34.7%로 선두를 지키고 있으며 도요타는 26.6% 점유율로 2위 기록



[ Toyota社 친환경차 포트폴리오 전략 예시 ]



[ 글로벌 FCEV 판매량 (출처: 2024년 1월 Global FCEV Monthly Tracker, SNE Research) ]

[ 2023년 수소연료전지차 제조사별 판매대수 (상용차 포함) ]

Maker	2022Y	2023Y	CAGR	2022 M/S	2023 M/S
HYUNDAI	11,354	5,012	-55.9%	54.8%	34.7%
TOYOTA	3,696	3,839	3.9%	17.9%	26.6%
Chinese manuf.	5,238	5,362	2.4%	25.3%	37.1%
Others	416	238	-42.8%	2.0%	1.6%
Total	20,704	14,451	-30.2%	100%	100%

[ 2023년 수소연료전지차 국가별 판매대수 ]

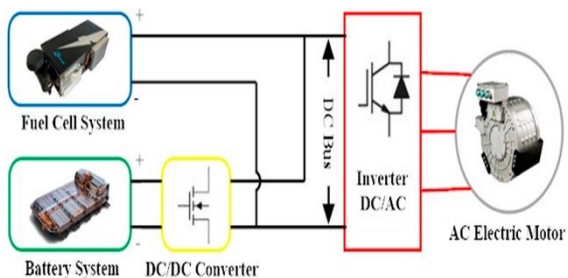
국가	2022Y	2023Y	CAGR	2022 M/S	2023 M/S
한국	10,336	4,631	-55.2%	49.9%	32.0%
중국	5,447	5,600	2.8%	26.3%	38.8%
미국	2,708	2,992	10.5%	13.1%	20.7%
유럽	1,278	773	-39.5%	6.2%	5.3%
일본	846	424	-49.9%	4.1%	2.9%
기타	89	31	-65.2%	0.4%	0.2%
합계	20,704	14,451	-30.2%	100%	100%

# 연구 배경 및 기술동향 (II)

※ FC Stack은 역전류가 들어가면 내구 문제 발생

## ■ Fuel Cell Stack / HV Battery / Converter / Inverter 연결 방식에 따른 특성 비교

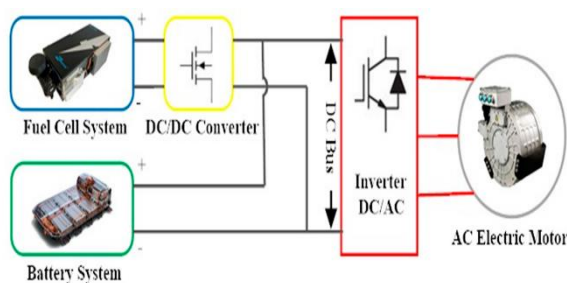
### Case I



- 양방향 DC-DC 컨버터로 HV 배터리 출력 전압을 제어하여 FC Stack 출력을 간접 제어함
- Hyundai社 넥쏘 적용



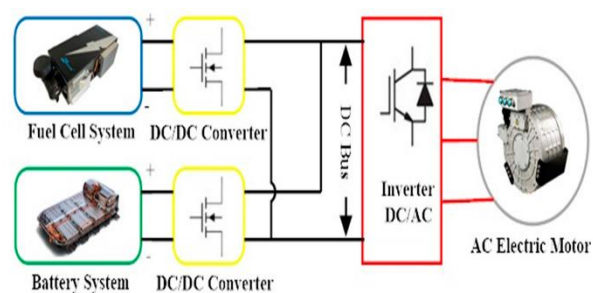
### Case II



- 단방향 DC-DC 컨버터를 활용하여 FC Stack 출력 직접 제어하는 방식
- Hyundai社 일렉시티, 엑시언트 적용



### Case III



- FC Stack 및 HV 배터리에 각각 DC-DC 컨버터를 연결하여 직접 제어하는 방식
- Toyota社 미라이 적용



# 연구 배경 및 기술동향 (III)

## 전세계 FDC (Fuel Cell DC-DC Converter) 제품 개발 동향



- **BRUSA (스위스)**
  - 최대 전력 180kW
  - 최대 효율 98.9%



- **ARADEX (독일)**
  - 최대 전력 180kW
  - 최대 효율 98.7%



- **BrightLoop (프랑스)**
  - 최대 전력 200kW
  - 최대 효율 99%



- **BOSCH (독일)**
  - 최대 전력 270kW
  - 최대 효율 98.5%



- **Denso (일본)**
  - 최대 전력 127kW
  - 최대 효율 99%



- **Mando (한국)**
  - 최대 전력 100kW
  - 최대 효율 99.18%



- **ZINSIGHT (중국)**
  - 최대 전력 220kW
  - 최대 효율 99%



# 연구 목표

## ■ Fuel Cell DC-DC Converter (FDC) 사양

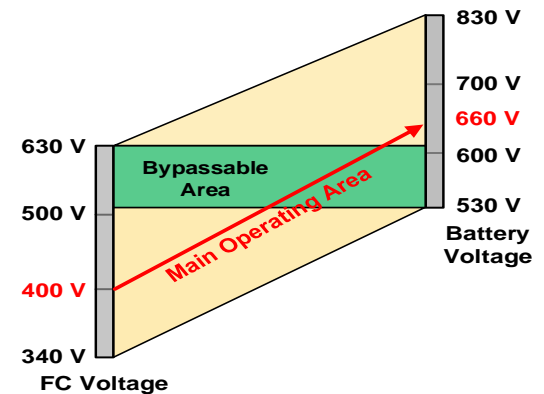
- FDC 적용 확장성을 위하여 승용차 및 상용차 모두 커버할 수 있게 **105kW급 FDC 모듈 설계 진행** ( $105\text{kW} * 2\text{EA} = 210\text{kW}$ )
- 주 운전영역 FC 전압 400V → HV 배터리 660V 이며, 배터리 전압이 FC stack 전압 보다 낮은 경우 bypass 동작



[ 수소 전기차 모터 구동용 전력 시스템 개요도 ]

[ FDC 설계 사양 ]

항목	목표치
최대 출력	210 [kW] / (105kW * 2)
입력전압 범위	340 – 630 [V]
출력전압 범위	530 – 830 [V]
최대부하 효율	> 98%
전력밀도	> 10 [kW/L]
입력 전류 리플	< 10 [A <sub>pp</sub> ]
출력 전압 리플	< 20 [V]



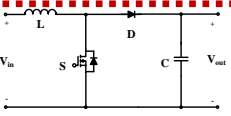
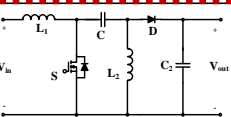
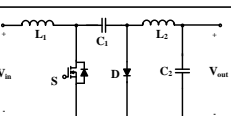
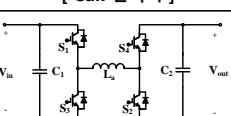
[ FDC 입출력 사양 ]

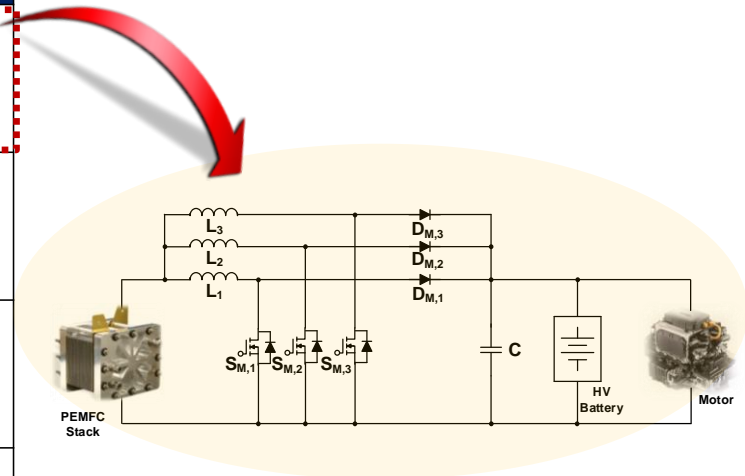
# FDC 시스템 설계 (I)

## ■ FDC 토폴로지 선정 (I)

- 제어 용이성 고려 → 단방향 및 승압형 토폴로지 요구 (강압 구간 : FDC의 bypass 동작 수행)
- 전력 반도체 소자의 전압/전류 스트레스 및 소자 수 고려 **Boost 컨버터 선정**
- 입력 전류 리플 및 인덕터 부피 고려 **3상 인터리브드 구조 선정** → 스위칭 손실 저감을 위하여 **Soft Switching Cell 적용**

[ FDC 토폴로지 후보군 분석 ]

종류	전압 극성	SW 전압 정격	소자 수	입력 전류	출력 전류
 <p>[ Boost 컨버터 ]</p>	비반전	낮음 ( $V_{out}$ )	SW : 1ea Diode : 1ea L : 1ea C : 1ea	연속	불연속
 <p>[ SEPIC 컨버터 ]</p>	비반전	높음 ( $V_{in} + V_{out}$ )	SW : 1ea Diode : 1ea L : 2ea C : 2ea	연속	불연속
 <p>[ Cuk 컨버터 ]</p>	반전	높음 ( $V_{in} + V_{out}$ )	SW : 1ea Diode : 1ea L : 1ea C : 2ea	연속	연속
 <p>[ Cascaded buck-boost 컨버터 ]</p>	비반전	낮음 ( $V_{in}$ or $V_{out}$ )	SW : 2ea Diode : 2ea L : 1ea C : 1ea	강압: 불연속 승압: 연속	강압: 연속 승압: 불연속

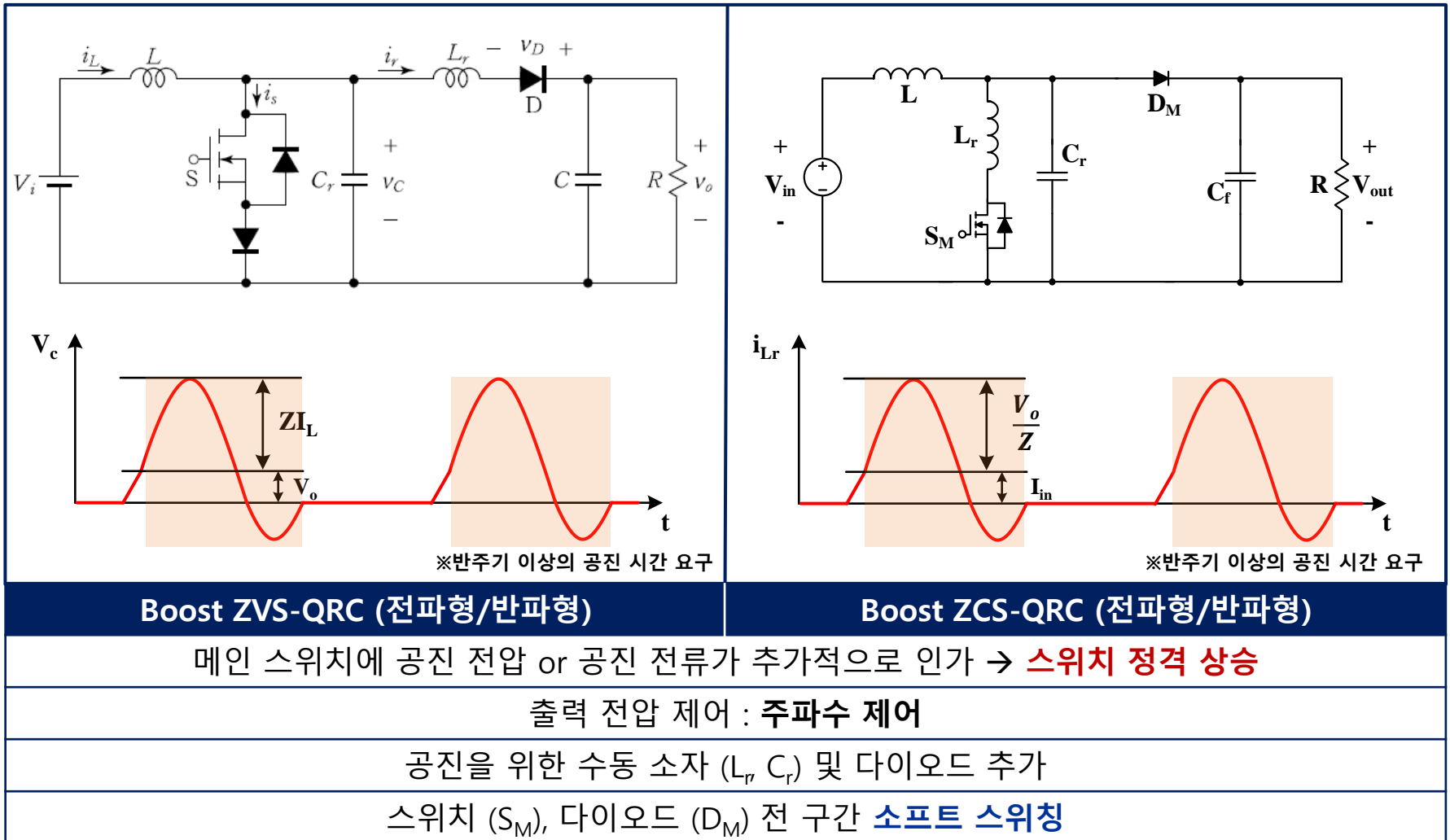


[ 105 kW급 3상 인터리브드 FDC 구성도 ]

※입력 커패시터는 소자 개수에서 제외

# FDC 시스템 설계 (II)

## ■ FDC 토폴로지 선정 (II) – 소프트 스위칭 기법의 분류 (Quasi-Resonant Type)





# FDC 시스템 설계 (III)

## ■ FDC 토폴로지 선정 (III) – 소프트 스위칭 기법의 분류 (Partial-Resonant Type)

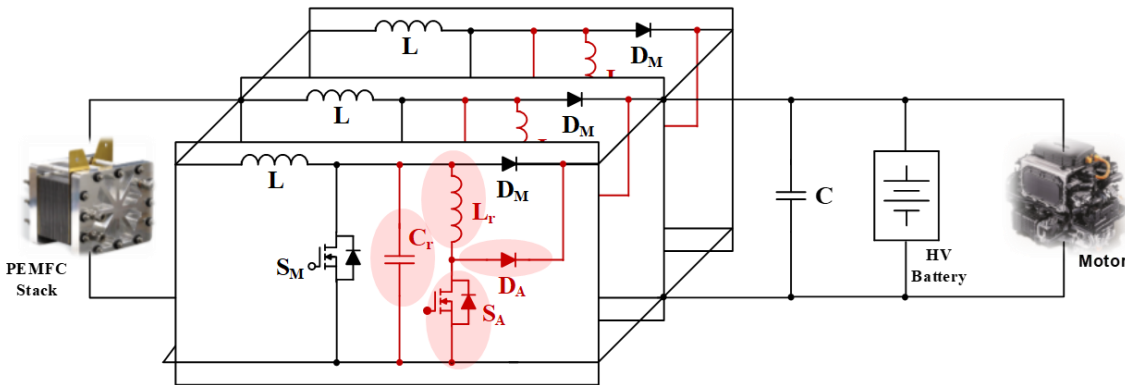
<p><b>Boost ZCT-PRC</b></p>	<p><b>Boost ZVT-PRC</b></p>
<p>QRC type 대비 공진을 위해 추가되는 소자 증가, 한 주기내 공진 구간 감소</p>	
<p>출력 전압 제어 : 듀티 제어</p>	
<p>보조 스위치(<math>S_A</math>, <math>D_A</math>) 및 수동 소자 (<math>L_r</math>, <math>C_r</math>) 추가</p>	
<p>스위치 (<math>S_M</math>), 다이오드 (<math>D_M</math>) <b>하드 스위칭 turn on</b></p>	<p>스위치 (<math>S_M</math>), 다이오드 (<math>D_M</math>) 전 구간 <b>소프트 스위칭</b></p>

→ 스위치 ( $S_M$ ) 및 다이오드 ( $D_M$ ) on, off 시 **소프트 스위칭이 가능한 ZVT-PRC 선정**

# FDC 시스템 설계 (IV)

## ■ FDC 토폴로지 선정 (IV) – 스위치 타입 선정

- 고효율 달성을 위하여 **소프트 스위칭이 가능한 ZVT-PRC 기반 FDC 컨버터 설계 진행**
- 3상 인터리브드 구조 + 각 상 ZVT-PRC 셀 고려 복잡한 회로 설계 요구됨
- ZVT-PRC 셀 추가 부품들을 고려하여 **TO-263 타입의 Discrete 소자 스위치 선정** (메인/공진용 다이오드 포함)
- 105kW 기준 200A 이상의 입력전류를 고려하여 **Metal PCB 설계 진행** (수냉 방열)



[ 소프트 스위칭 셀(ZVT-PRC) 적용 FDC 구성 ]

[ 스위치 타입에 따른 FDC 설계 예 ]

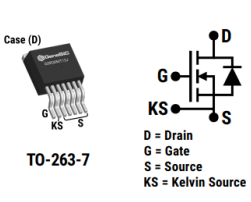
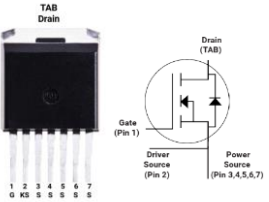
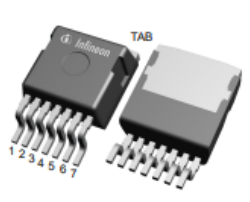
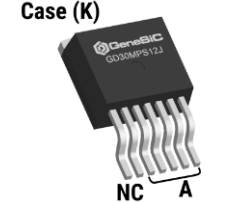

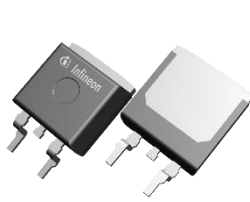
스위치 타입	제작 예시

# FDC 시스템 설계 (V)

## ■ FDC용 SiC MOSFET 및 Diode 선정

- Metal PCB 방열 및 배터리 전압을 고려하여 1200V급 TO-263 패키지 스위치 후보군 조사
- 소프트 스위칭 셀 효과로 인하여 스위칭 손실 매우 낮음 → 도통 손실을 고려하여 전류 정격이 높은 스위치 선정

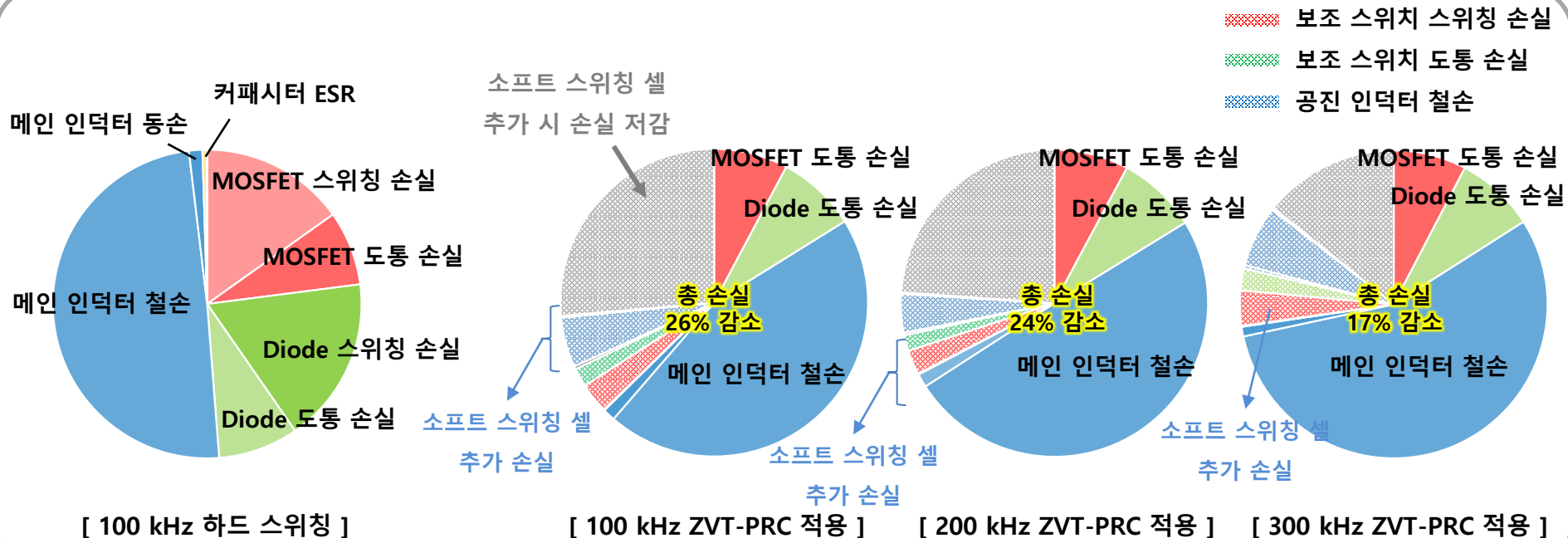
[ FDC용 SiC MOSFET 및 Diode 후보군 ]

제조사	GeneSiC (MOSFET)	Cree (MOSFET)	Infineon (MOSFET)	GeneSiC (Diode)	Cree (Diode)	Infineon (Diode)
제품 사진	 <p>Case (D) TO-263-7</p> <p>D = Drain G = Gate S = Source KS = Kelvin Source</p>	 <p>TAB Drain Drain (TAB) Gate (Pin 1) Driver Source (Pin 2) Power Source (Pin 3,4,5,6,7)</p>	 <p>TAB</p>	 <p>Case (K) GD30MPS12J NC A</p>		
제품명	• G3R30MT12J	• C3M0032120J2	• AIMBG120R020M1	• GD30MPS12J	• E4D20120G	• IDK20G120C5
$V_{ds,max}$	• 1200V	• 1200V	• 1200V	• 1200V	• 1200V	• 1200V
$I_{ds,max}$	• 85A ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ ) • 60A ( $T_c = 100^\circ\text{C}$ )	• 74A ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ ) • 53A ( $T_c = 100^\circ\text{C}$ )	• 104A ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ ) • 74A ( $T_c = 100^\circ\text{C}$ )	• 59A ( $T_c = 100^\circ\text{C}$ ) • 30A ( $T_c = 150^\circ\text{C}$ )	• 41A ( $T_c = 100^\circ\text{C}$ ) • 20A ( $T_c = 150^\circ\text{C}$ )	• 40A ( $T_c = 100^\circ\text{C}$ ) • 20A ( $T_c = 145^\circ\text{C}$ )
패키지	• TO-263-7	• TO-263-7	• TO-263-7	• TO-263-7	• TO-263-2	• TO-263-2
$R_{DS,on}$ or $V_f$	• 30m $\Omega$	• 32m $\Omega$	• 20m $\Omega$	• 1.5V ( $I_F = 30\text{A}$ , $T_c = 25^\circ\text{C}$ )	• 1.5V ( $I_F = 20\text{A}$ , $T_c = 25^\circ\text{C}$ )	• 1.5V ( $I_F = 20\text{A}$ , $T_c = 25^\circ\text{C}$ )

# FDC 시스템 설계 (VI)

## 스위칭 주파수 상향에 따른 손실 분석 (I)

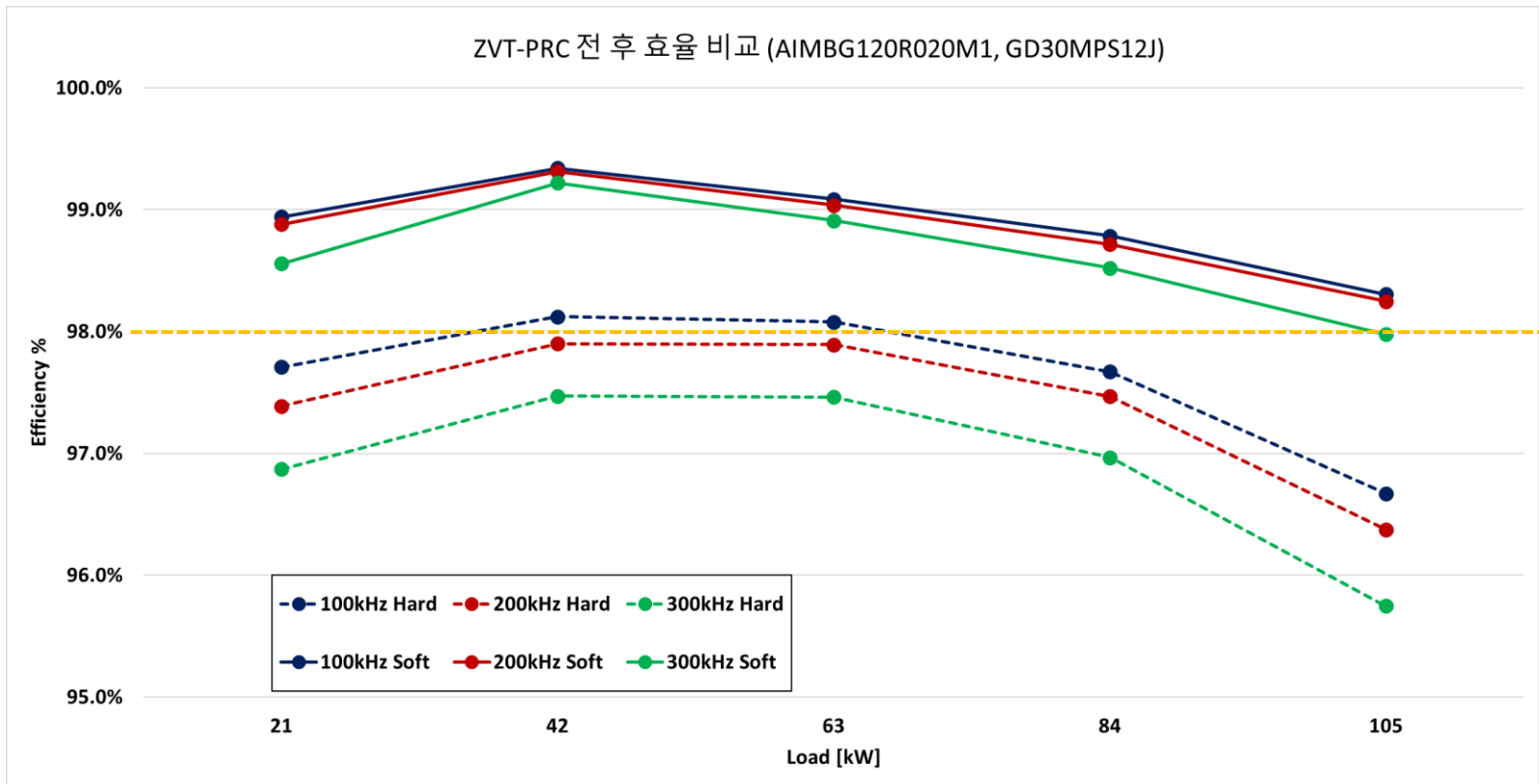
- 손실 분석 조건 : 주 운전영역 입력 400V, 출력 전압 660 V, 부하 조건 105 kW (주파수 변화에 따른 손실 경향 분석)  
 → 메인 스위치 4병렬 / 메인 다이오드 3병렬 / 공진 스위치 2병렬 / 공진 다이오드 2병렬
- 스위칭 주파수 변화에 따른 인덕터 소자 및 공진 셀 최적설계 재진행
- 인덕터 손실은 스위칭 주파수 120kHz 부근에서 최소 손실을 달성하며, 100kHz 및 200kHz 간 Total 손실 차이는 매우 적음  
 → 따라서, 고전력밀도 달성을 위해 스위칭 주파수 200kHz 선정하여 FDC 설계 진행



# FDC 시스템 설계 (VI)

## ■ 스위칭 주파수 상향에 따른 손실 분석 (II)

- 부하량에 따른 스위칭 주파수 / 소프트 스위칭 적용 유무 등의 조건에서 FDC 시스템 효율 분석 진행
- 스위칭 주파수 300 kHz 이상 상향 시 FDC 시스템 최대 부하 효율 98% 이상 만족 불가
  - ➔ 따라서, 고전력밀도/고효율 동시 달성을 위해 스위칭 주파수 200kHz 선정하여 FDC 설계 진행

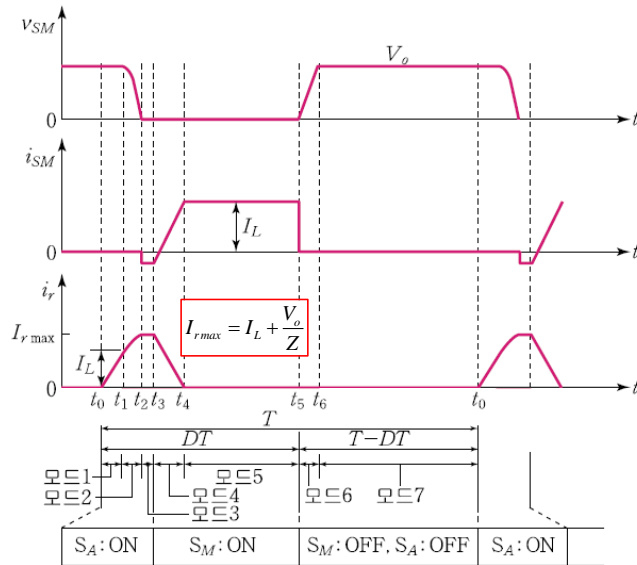


[ 전력 & 주파수에 따른 ZVT-PRC 전 후 효율 비교 ]

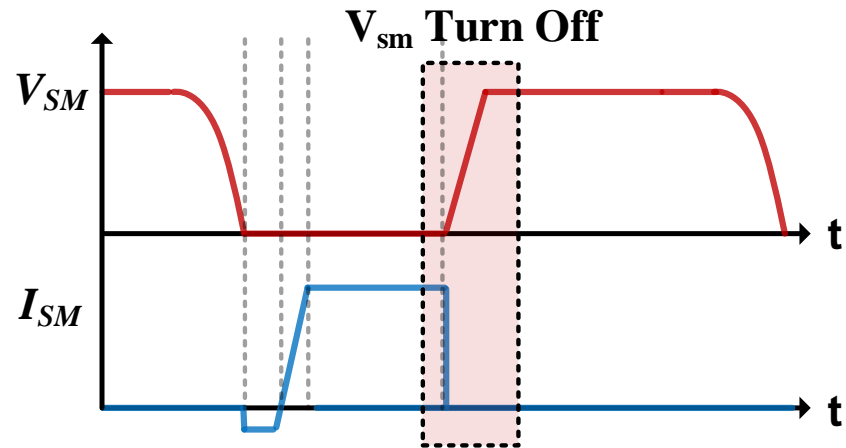
# FDC 시스템 설계 (VII)

## ■ 커패시터 설계

- FDC에 사용된 입출력 커패시터는 MLCC로 설계를 진행하였으며 총 100EA (Knowles Syfer社 2220Y1K00474KETWS2)
- $C_r$  선정 시 Z에 따른 공진 전류 최대 값 고려 (Z 증가 시  $I_{r,max}$  감소) → 공진 스위치 전류 stress 감소 및 시스템 효율 증가
- Z를 증가시키기 위해  $L_r$  증가 or  $C_r$  감소 필요  $\left( Z = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \right)$ 
  - $L_r$  증가 : 공진 인덕터 부피 증가
  - $C_r$  감소를 통한 효율 향상 진행 ( $C_r$ 이 과도하게 감소할 경우 메인 스위치 turn off 손실 발생)
- 4병렬로 설계된 메인 MOSFET  $C_{oss}$  커패시턴스를 활용하여 설계 ( $200\text{pF} * 4 = 800\text{pF} = 0.8\text{nF}$ )



[ 각 동작 모드 별 파형 ]

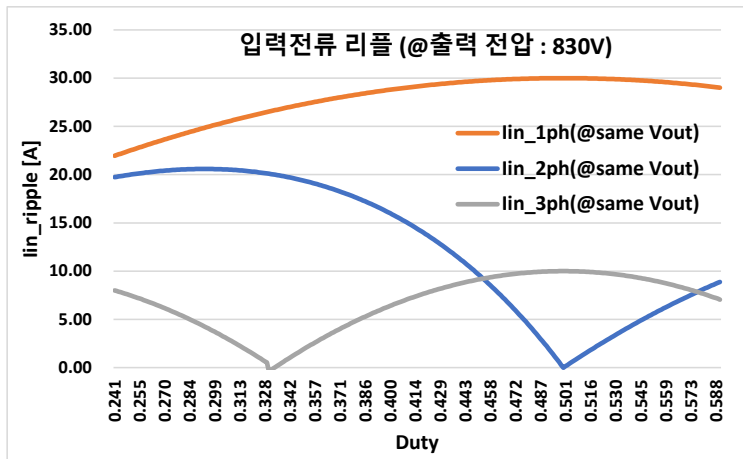


[ ZVS 턴 오프 시 동작 파형 ]

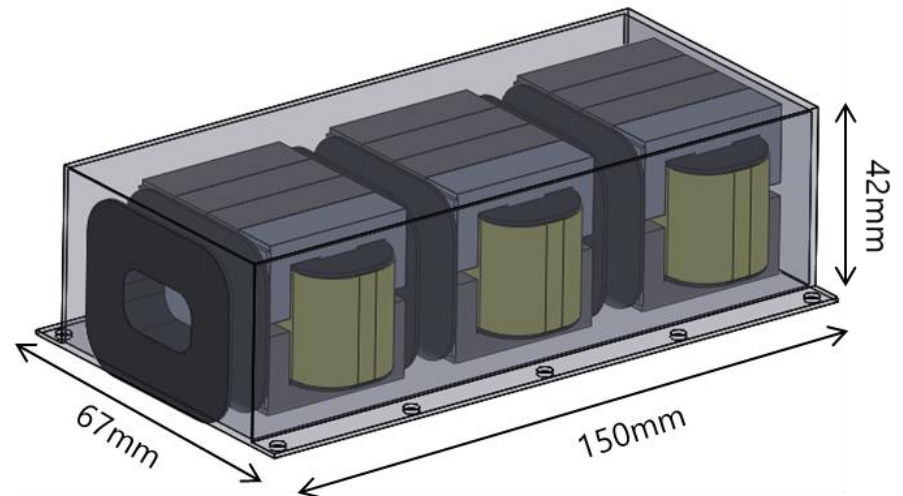
# FDC 시스템 설계 (VIII)

## 인덕터 설계

- 메인 인덕터 설계 : 설계 목표의 최대 입력전류 리플(10A<sub>pp</sub>) 고려 인덕턴스 계산  $\rightarrow L = \frac{V_i DT}{\Delta I_L}$   
 3상 인터리브드 고려 시 Duty = 0.5인 경우 입력전류 리플 최대  
 입력전류 리플 조건을 만족하는 각 상 인덕턴스 : 30uH 이상 (EE 코어 사용)
- 공진 인덕터 설계 : 최종 선정된 C<sub>r</sub> : 0.8nF 값을 토대로 L<sub>r</sub> 파라미터 설계 진행 ( $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ ,  $Z = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$ )  
 공진 주파수 (f<sub>r</sub>) 설계 시 스위칭 주파수의 10배 선정 : 3uH (공심 코일)



[ 출력 전압에 따른 입력 전류 리플 ]

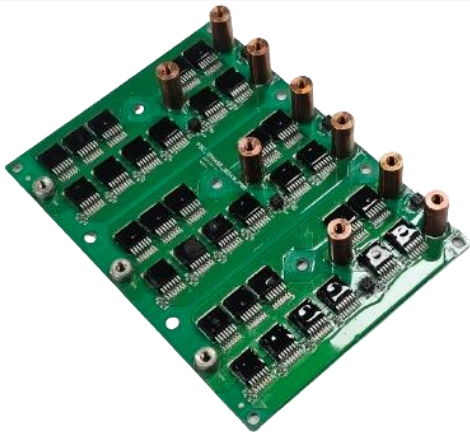


[ 3상 ZVT-PRC용 인덕터 세트 ]

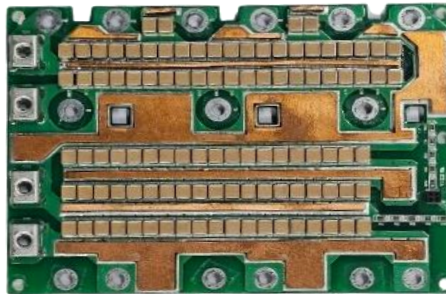
# FDC 시스템 설계 (IX)

## ■ 파워부 보드 설계/제작

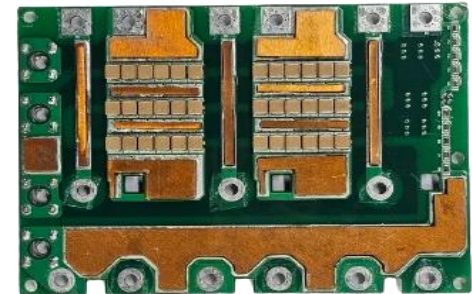
- 총 3층으로 이루어진 FDC 시스템 설계/제작 → 파워라인 대전류 고려 Busbar 설계 진행
- 각 층간 절연판 배치, DSP는 TI 社の TMS320F28377SPZPQ-100PIN 적용



[ 1층 : Metal PCB 기반 파워부 ]



( Top )



( Bottom )

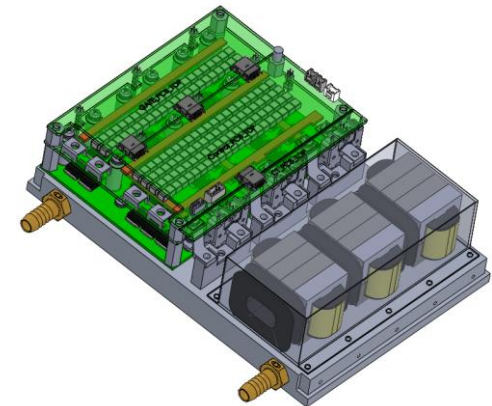
[ 2층 : 입출력 커패시터 보드 ]



[ 3층 : 게이트 / 컨트롤 / CT 보드 ]



[ 인덕터 세트 ]



[ 105kW FDC 시스템 ]

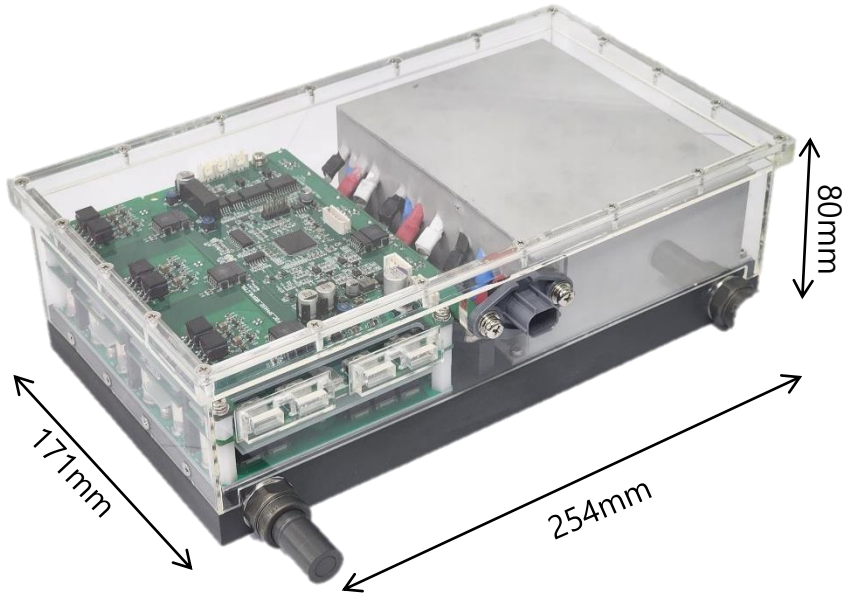


# FDC 시스템 설계 (X)

## ■ 최종 설계된 FDC 시제품

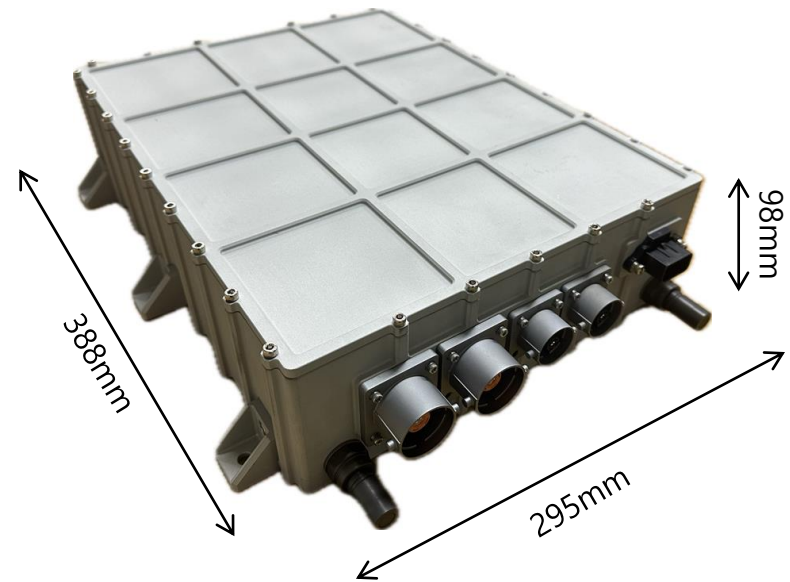
### 105kW FDC

※ A4 (210x297) 보다 작은 사이즈



- 전력밀도 30.21kW/L (3.47L)
- 중량 대비 출력 13.5kW/kg (7.8kg)

### 210kW FDC

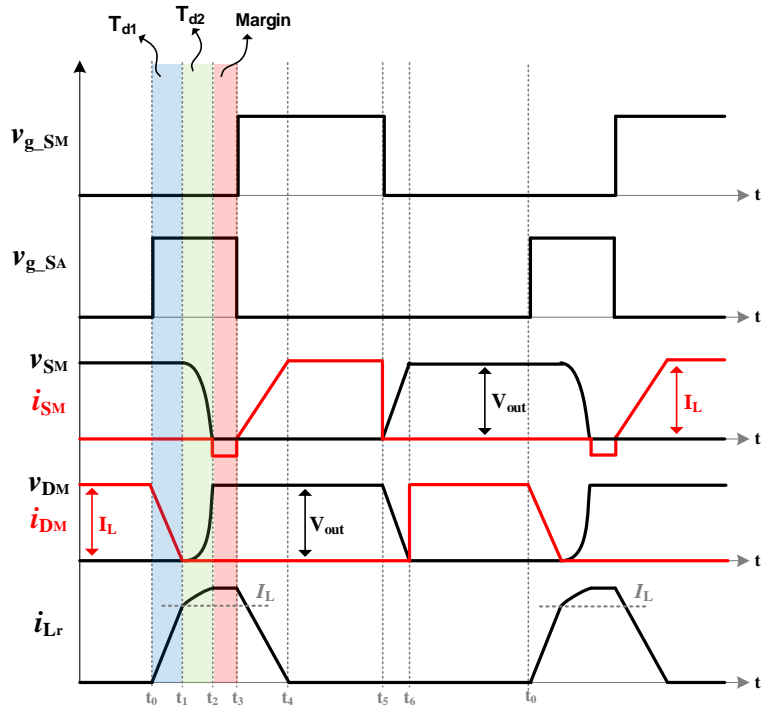


- 전력밀도 18.75kW/L (11.22L)
- 중량 대비 출력 10.8kW/kg (19.5kg)

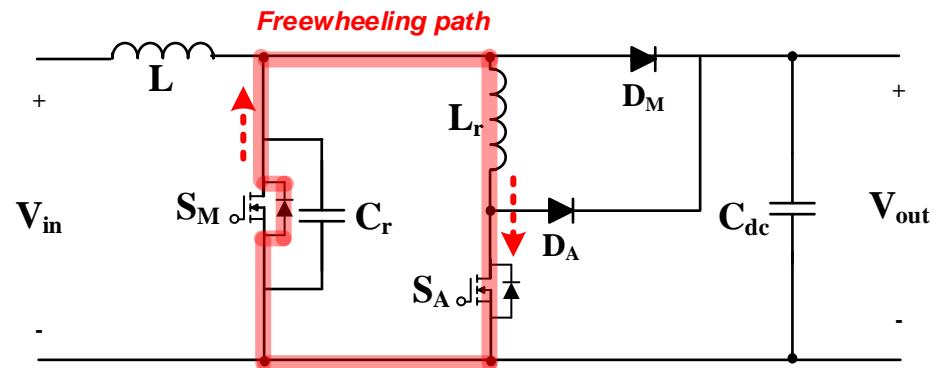
# 제어 알고리즘 설계 (I)

## ■ ZVT-PRC 동작 분석

- 보조 스위치 Duty :  $T_{SA} = T_{d1} + T_{d2} + Margin$
- $T_{d1} + T_{d2} = I_L \cdot L_r / V_{out} + T_r / 4$  ( $T_r = 1/f_r$ ) → 부하가 감소할 경우 보조 스위치 Duty 감소
- Margin 구간에서 메인 스위치 역병렬 다이오드를 통하여 환류전류가 흐르는 환류구간 발생 → 도통 손실 발생



[ ZVT-PRC 구간별 동작 모드 ]

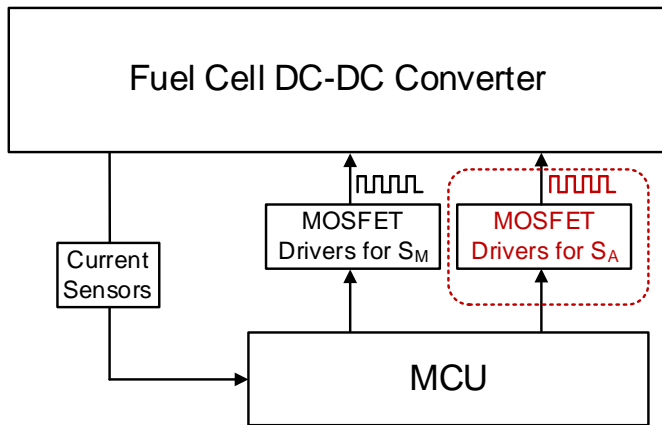
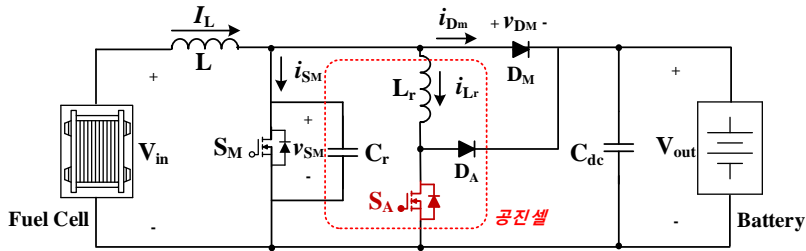


[ ZVT-PRC 공진 Cell 환류 구간 ]

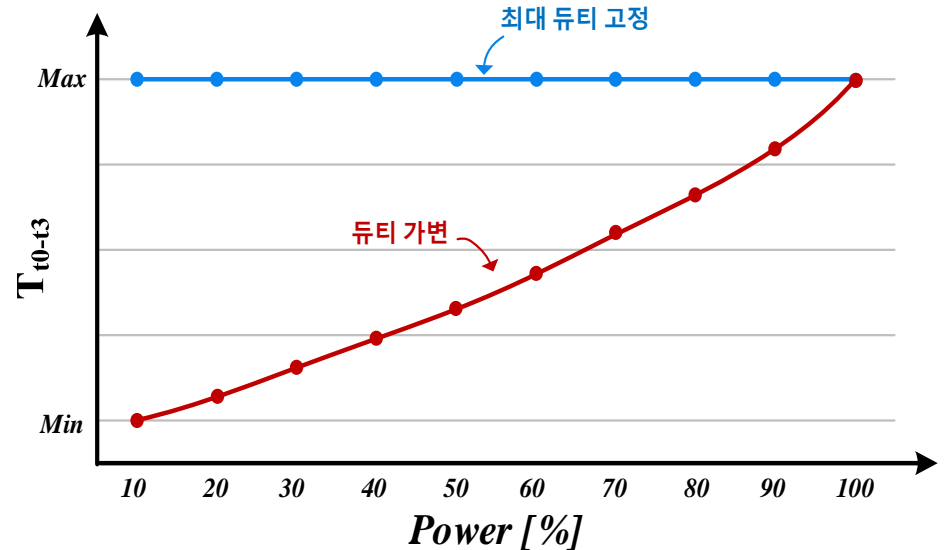
# 제어 알고리즘 설계 (II)

## 부하량에 따른 보조 스위치 능동 Duty 제어

- 최대 Duty 고정 : 제어가 간편하고 Worst Case 최대 Duty 고정 → 전 부하에서 Soft Switching 만족하나 환류 구간 상승
- 가변 Duty 제어 : Curve-fitting 활용하여 최적 Duty 정보 습득 → 중부하 이하 구간에서 환류 구간 대폭 감소



[ ZVT-PRC 회로도 및 제어 블럭도 ]

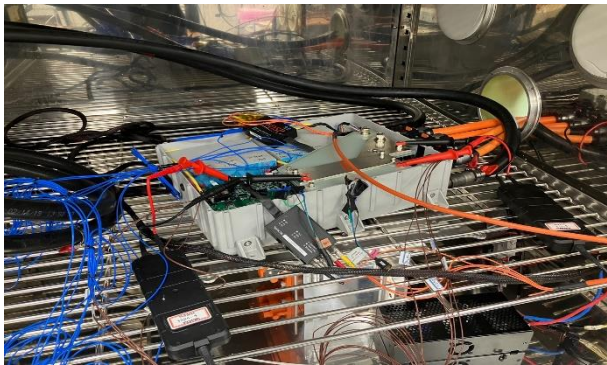


[ 부하량에 따른 보조 스위치 듀티 제어 방식 비교 ]

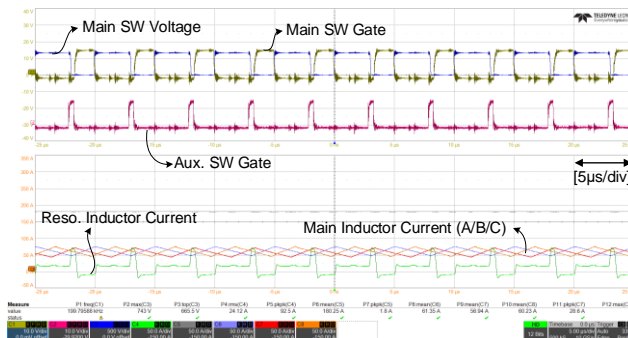
# FDC 시스템 성능 검증 (I)

## Experimental result – 210kW FDC

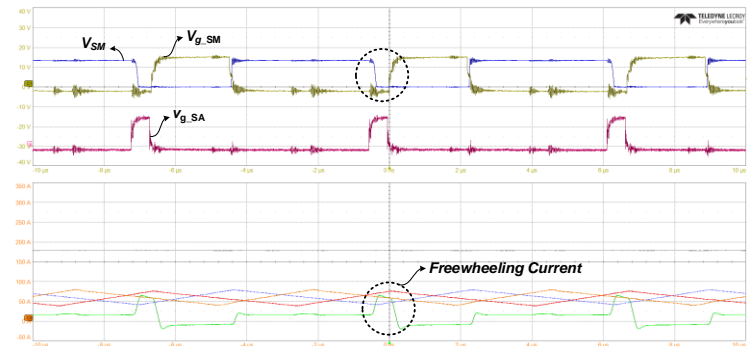
- 성능 검증 실험은 상온 25°C의 환경에서 냉각수 온도를 20°C로 관리하면서 실험 진행 (10 LPM)
- YOKOGAWA 社 온도 타점기로 FDC 시제품의 각 부품별 온도 측정 진행
- 210kW 최대 부하 조건에서 보조 스위치의 온도는 75°C로 가장 높은 온도를 기록함 ( $\Delta T$  55°C)
- 입출력 최소/최대 전압, 저온/고온 동작, EMI/EMC 등 신뢰성 평가 추가 진행 (HMC96200-00 규격)



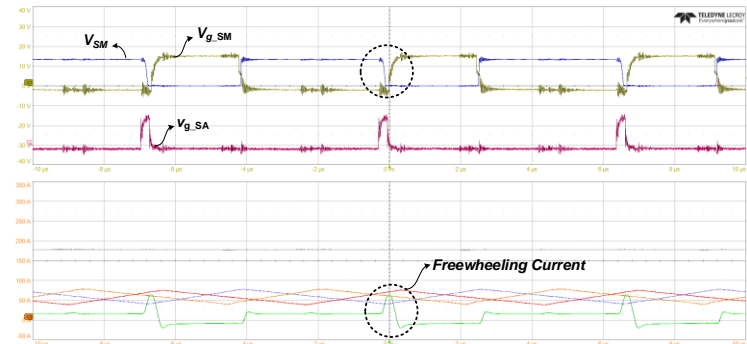
[ 210kW FDC 시료 ]



[ FDC 각부 주요 파형 ]



(a) 고정 Duty 제어



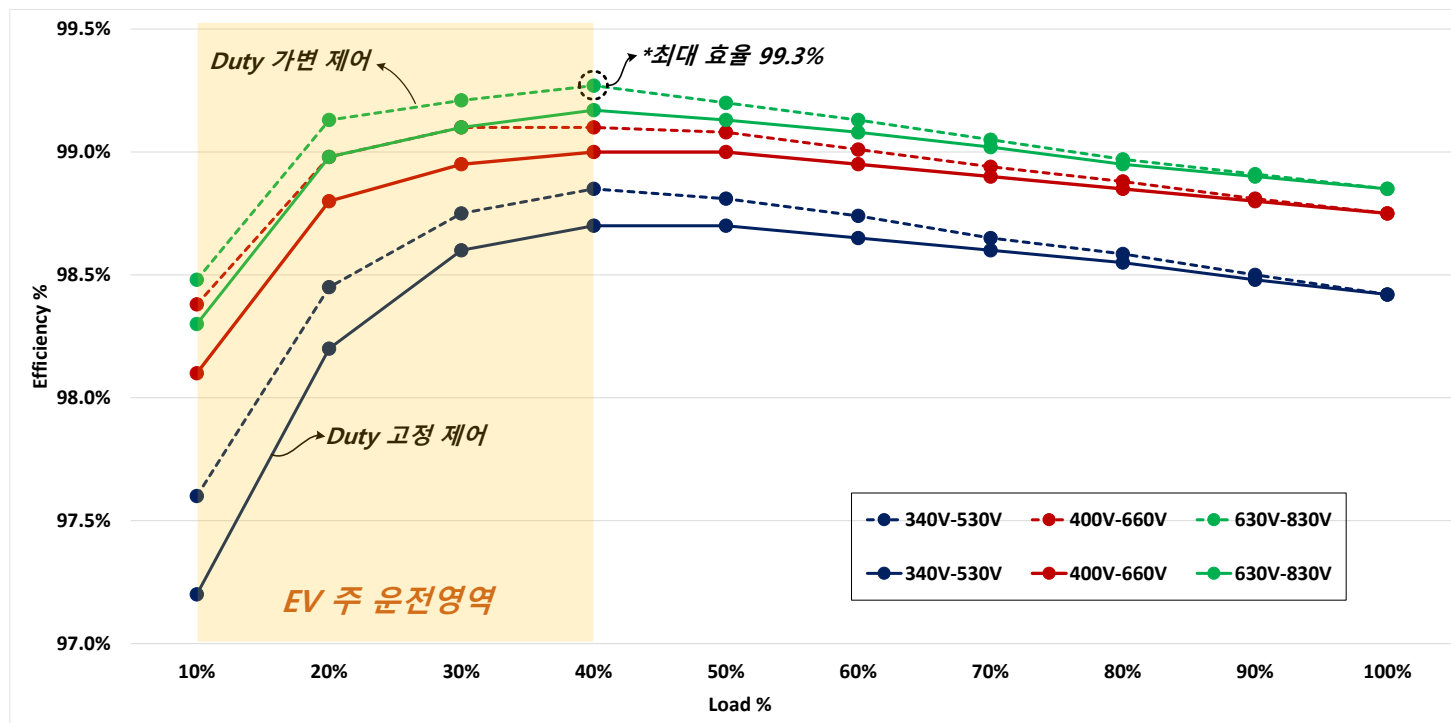
(b) 가변 Duty 제어

[ 보조 Duty 제어 적용 비교 파형 ]

# FDC 시스템 성능 검증 (II)

## Experimental result – Efficiency

- 210kW FDC 시스템의 최대 효율은 99.3%이며, 주 운전영역 210kW 풀부하에서는 98.75% 효율 달성
- 부하량에 따른 보조 스위치 능동 Duty 제어를 통해 경부하 효율 최대 0.37% 상승
- 실제 전기차는 주행시간의 95% 동안 정격부하의 40% 이하 구간에서 주로 동작 (주 운전 구간에서의 효율 대폭 향상)  
 → 주 운전영역대에서 능동 Duty 제어를 통한 손실 저감으로 인하여 FCEV 주행거리 증가 가능










[ 부하량에 따른 FDC 제어 모드별 효율 곡선 ]

# FDC 시스템 성능 검증 (III)

## ■ 선진사 FDC 성능 비교

- 여러 중국 제조사들이 FDC를 생산하고 있으나 공개된 정보 미흡 → 중국 제외 일본 / 유럽 강세
- 최근 제조된 FDC 신제품들은 대부분 180kW 이상의 전력을 가지며, 99%에 가까운 효율을 지님

[ 주요 FDC 시제품 성능 비교 표 ]

회사	BRUSA	Toyota	Denso	BOSCH	AREDEX	Mando	KETI
제품사진							
국가	스위스	일본	일본	독일	독일	한국	한국
최대출력	180 kW	114 kW	127 kW	<b>270 kW</b>	180kW	110 kW	210 kW
전력밀도	12.5 kW/L	8.77 kW/L	10.61 kW/L	-	5.054kW/L	12.31 kW/L	<b>18.75 kW/L</b>
중량대비 출력	7.14 kW/kg	<b>12.99 kW/kg</b>	11.97 kW/kg	-	6 kW/kg	-	10.8 kW/kg
최대효율	98.9%	99%	99%	98.5%	98.7%	99.18%	<b>99.3%</b>

# 연구 결과 요약

## Topology 선정

- FCEV 전력변환 시스템 구조 분석 및 FDC Topology 선정
- ZVT-PRC 기반 3상 인터리브드 부스트 컨버터 2병렬 구현 (105kW \* 2EA)

## FDC 설계

- 고밀도 설계를 위한 SMD 타입 TO-263 패키지 SiC MOSFET/Diode 적용
- Metal PCB 기반 파워부 설계 및 대전력 Busbar 설계 진행
- 200kHz 고주파 기반 105kW & 210kW FDC 시제품 설계/제작

## 알고리즘 구현 및 시스템 성능 검증

- 부하량 기반 CFM 방식 적용 보조 스위치 Duty 가변 제어 알고리즘 구현
- 210kW FDC 기준 18.75kW/L 전력밀도 및 99.3% 최대 효율 달성

*Thank  
you*

