

상용차를 위한 무시동 에어컨 압축기용 공진형 DC/DC 컨버터 개발

한근우[†], 김성곤¹, 정영국², 임영철³

Development of the Anti-Start Air Conditioner Compressor Resonant DC/DC Converter for Commercial Vehicle

Keun-Woo Han[†], Seong-Gon Kim¹, Young-Gook Jung², and Young-Cheol Lim³

Abstract

This study deals with a resonant converter of an anti-start air conditioner compressor for commercial vehicles. The anti-start air conditioner compressor must generally have a high current, high efficiency, a low volume, and a low weight. To reduce the switching losses and voltage and current stresses of the device, the anti-start air conditioner compressor applies the full-bridge L-C resonant converter topology. Hardware parameters are designed to have a wide voltage range, and the switching frequency range of the L-C resonant converter is determined. Simulation is implemented using PSIM and an experiment is performed to verify the proposed converter.

Key words: Anti-start, Air conditioner compressor, Commercial Vehicle, LC resonant, Full-bridge, DC/DC converter

1. 서 론

차량용 에어컨시스템은 엔진의 가동(주행 또는 공회전)에 의해 발생하는 에너지를 이용하여 운전자가 원하는 차량실내온도를 유지시켜주는 장치를 말한다. 일반적인 에어컨시스템의 작동은 엔진 구동력의 일부를 활용한다. 특히 하절기 작업대기시, 차량내 야간취침 등 빈번한 상용차량의 운전자의 운행특성에 따라 그 이용률이 크게 좌우된다. 때문에 필요한 냉방 동력을 위해 대형엔진을 구동하게 함으로써 과도한 연료 소비와 배기가스에 의한 환경오염이 발생한다. 이외에도 Euro III Emission 규제에 맞춰 출시되는 차량은 5분 이상의 차량 공회전 발생 시 엔진이 자동으로 정지되는 제어시스

템의 장착이 의무화되어 있다. 때문에 화물차량 및 고속버스 차량 등과 같은 상용차량에 있어서의 정차시 냉방 문제는 반드시 해결해야 할 문제이다.

상용차량의 경우 24V 배터리 기반의 직류시스템이 사용된다. 차량의 무시동 상태에서도 동작이 가능한 에어컨의 압축기 인버터는 높은 전압을 사용하고 있어 260V 이상 승압(10배 이상)이 가능한 컨버터가 필수적이다.

따라서 고효율, 고전력밀도의 전력변환을 위해서는 고주파 스위칭에 의한 손실을 저감하기 위한 공진형 컨버터 토폴로지를 이용한 영전압 스위칭 기법(Zero Voltage Switching)^[1,2,3,4]이 요구된다.

본 논문에서는 승압을 위해 출력단에 다이오드와 콘덴서의 배압회로를 이용하는 공진형 DC/DC 컨버터를 사용했으며, 10배 이상의 승압을 위해 2개의 배압회로를 직렬 연결하였다. 제안된 방식의 컨버터는 직렬 L-C 공진을 이용하여 스위칭 손실을 저감 하였으며, L-C 공진 회로에서 필요한 리액턴스 성분은 변압기 누설리액턴스로 대체함으로써 전체 시스템 사이즈 및 비용을 감소시켰다.^[5,6,7]

끝으로 제안된 공진형 DC/DC 컨버터에 관한 연구의 타당성 검증을 위해 PSIM을 이용한 시뮬레이션과 프로토타입의 하드웨어를 통해 입증하고자 한다.

Paper number: TKPE-2014-19-6-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: tesla7930@gmail.com, Jeonbuk Institute of Automotive Technology(JIAT)

Tel: +82-63-472-2368 Fax: +82-63-472-2359

¹ Jeonbuk Institute of Automotive Technology(JIAT)

² Dept. of Electrical Engineering, Daebul University

³ Dept. of Electrical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

Manuscript received Sep. 29, 2014; accepted Oct. 20, 2014

— 본 논문은 2014년 전력전자학회 우수추천논문임

— 본 논문은 편집위원회에서 우수기술논문으로 추천됨

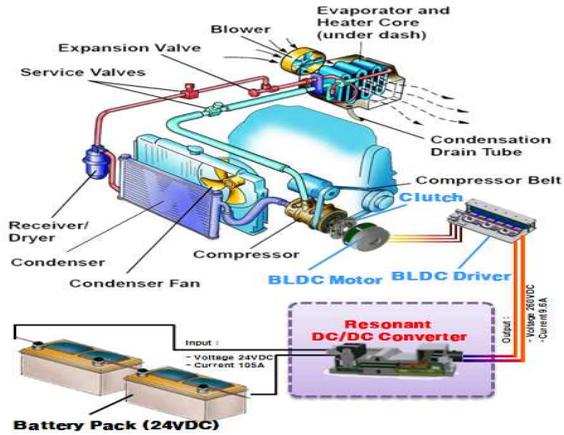


Fig. 1. Anti-start air conditioner compressor system.

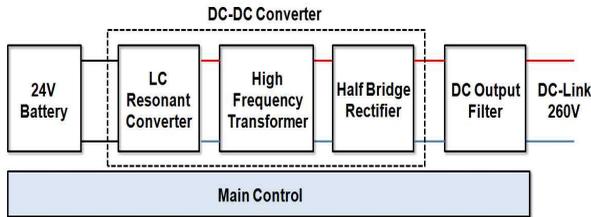


Fig. 2. Proposed system block diagram.

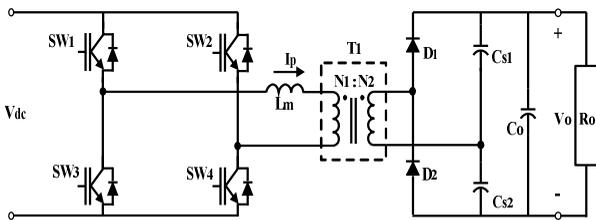


Fig. 3. L-C resonant converter.

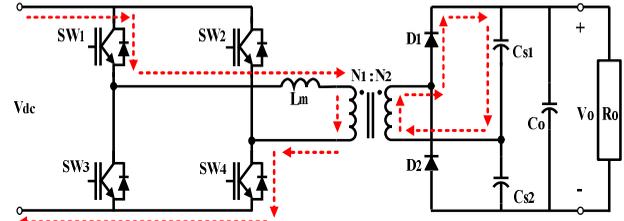
2. 제안된 시스템

2.1 시스템 구성 및 원리

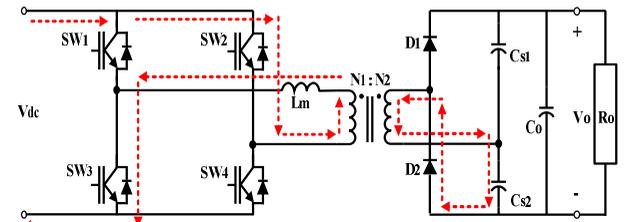
그림 1은 본 연구의 제안된 컨버터의 전체 구성도를 나타내고 있다. 시스템은 1차측의 24V 배터리 전원으로 부터 260V 이상의 출력전압을 발생하는 구조로 되어있다. 그림 2와 그림 3은 공진형 컨버터를 도식화한 것으로 고주파 변압기를 이용하여 1차와 2측을 절연분리 하였으며, 2측차은 다이오드와 캐패시터를 이용한 배압회로로 구성되었다.

컨버터의 효율 개선 및 고조파 노이즈 감소를 위해서는 L-C 공진을 이용한 영전류 스위칭기법(Zero Current Switching) 방식을 사용하여야 하며 이를 위해 컨버터에는 절연변압기의 누설 리액턴스와 배압회로의 콘덴서를 사용하였다. 그 결과 회로의 구조는 간단해지며, 비용 절감의 장점을 가질 수 있다.^[8,9,10]

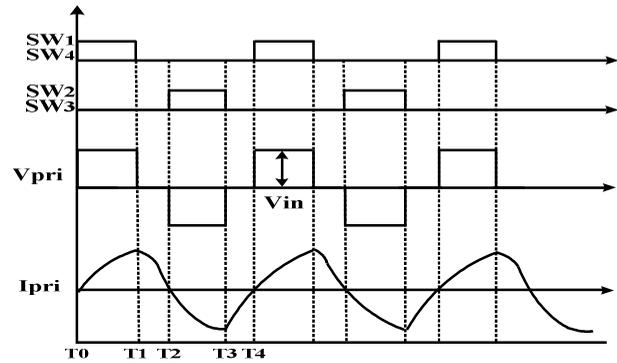
그림 4는 공진형 DC/DC 컨버터의 무부하 상태에서의 동작모드 천이를 나타낸 것으로 각 모드별 동작 원리는 다음과 같다.



(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Waveforms

Fig. 4. L-C resonant converter operation mode.

모드 1 : SW₁과 SW₄가 턴-온이 되고 SW₂와 SW₃이 턴-오프되는 시점으로 입력전류는 SW₁과 SW₄를 통해 고주파 변압기를 거쳐 2차측에 전달된다. 동시에 다이오드 D₁을 도통시켜 입력전원으로부터 C_{s1}이 충전되고 L_m과 C_{s1}을 통한 직렬 공진 형태가 된다. 이후 충전전류는 입력측의 전력을 부하측으로 공급하게 된다.

모드 2 : SW₂와 SW₃이 턴-온이 되고 SW₁과 SW₄가 턴-오프되는 시점으로 입력전류는 SW₂와 SW₄를 통해 고주파 변압기를 거쳐 2차측에 전달된다. 동시에 다이오드 D₂를 도통시켜 입력전원으로부터 C_{s2}가 충전이 되어 충전전류는 L_m과 C_{s2}를 통한 직렬 공진 형태가 된다. 모드 1과 동일하게 입력측의 전력을 부하측으로 공급하게 된다. 이 때 모드 1과 모드 2의 직렬 공진으로 전류파형은 사인파의 형태로 스위칭 손실과 써지성 노이즈를 저감시킬 수 있다. SW₁, SW₄와 SW₂, SW₃은 서로 상보적으로 스위칭 턴-온과 턴-오프 되며, 출력전압은 2차측 다이오드와 캐패시터 조합을 통한 배압회로로 승압이 된다.

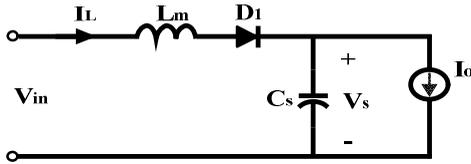


Fig. 5. Equivalent circuit of L-C resonant converter.

2.2 L-C 공진형 컨버터 설계

그림 5는 고주파변압기의 누설인덕턴스 성분 L_m 과 2차측 공진 캐패시터 C_{s1} 를 변압기 1차측으로 환원한 등가회로이다. L-C 공진형 컨버터의 복잡한 모델에 대해 정확한 해석은 쉽지 않지만, 1고조파 근사해석법(first harmonics approximation)을 사용하여 교류 등가회로를 나타내었다. 고주파 변압기가 이상적이라 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_s = C_{s1} \quad (1)$$

$$V_s = V_{s2} \quad (2)$$

등가화된 회로의 전압, 전류식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_L = C_s \frac{dv_s}{dt} + I_o \quad (3)$$

$$v_s = V_{in} - L_m \frac{di_L}{dt} \quad (4)$$

식 (3), (4)을 통하여 공진시 누설인덕턴스 전류는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \omega_r^2 (i_L - I_o) = 0 \quad (5)$$

$$\text{단, } \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_m C_s}}$$

식 (5)와 같이 공진 주파수는 인덕턴스와 캐패시턴스에 의하여 결정됨을 알 수 있으며, 캐패시턴스는 부하에 공급되는 전류를 기초로하여 용량이 결정 되어야 한다.

$$i_L = I_o + I_o \cos(\omega_r t) + \frac{V_{in} - V_{so}}{Z_n} \sin(\omega_r t) \quad (6)$$

$$v_s = V_{in} - (V_{in} - V_{so}) \cos(\omega_r t) - Z_n I_o \sin(\omega_r t) \quad (7)$$

$$\text{단, } Z_n = \sqrt{\frac{L_m}{C_s}} \text{ 는 특성임피던스 이다.}$$

정리된 수식을 이용하여 식(8)과 같은 공진 주파수를 도출할 수 있다.

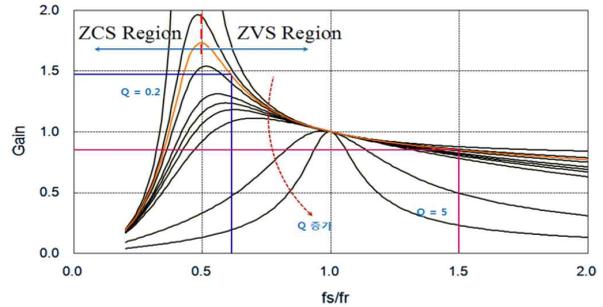


Fig. 6. DC characteristic of L-C resonant converter.

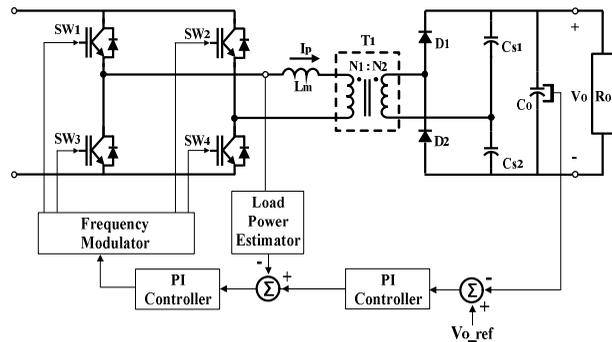


Fig. 7. Proposed control block diagram for L-C resonant DC/DC converter.

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_m C_s}} \quad (8)$$

그림 6는 L-C 공진형 컨버터의 정규화주파수 변화에 따른 DC 특성곡선을 나타내고 있다. 이득의 크기 변화는 정규화 주파수의 가변에 영향을 있음을 알 수 있다. 그렇기 때문에 출력전압의 크기에 변화에 따라 스위칭 주파수의 가변 제어가 되어야 한다. 전부하 곡선은 설계 파라미터, 동작주파수에 따라 형성되며, 입력전압 기준으로 출력전압 운전영역과 전압 이득율과 연동하여 나타낸다. Q의 변화에 따라 전부하 분포곡선의 스위칭 주파수와 공진주파수가 같은 지점으로 좁거나 넓은 형태를 취하게 된다. 특성곡선을 이용한 설계는 물리적으로 가능한 범위 내에서 설계치의 반영할 수 있거나 그에 따른 구현범위를 미리 살펴볼 수 있다.

2.3 L-C 공진형 컨버터의 제어기 설계

그림 7은 제안된 L-C 공진형 컨버터의 제어기를 나타낸다. 주 제어 루프의 경우 L-C 공진형 컨버터의 출력전압을 주파수 변조를 통한 디지털 제어로 일정하게 유지한다.

출력전압이 일정한 상태에서 유지될 수 있도록 DC-Link단 전압을 검출하여 제어한다. 이때 검출된 전압은 턴 오프 시간에 비례하여 그 크기가 변하여 일정한 출력전압이 발생하게 한다.

TABLE I
PARAMETERS OF THE SIMULATION

Parameters	Value
Input Voltage	24[V]
Output Voltage	260[V]
Resonant Frequency	30[kHz]
Resonant Capacitor	10[μ F]
Snubber Capacitor	0.22[μ F]
Resonant Inductor	1.5[μ F]
Transformer Turn Ratio	1:12
Load Resistance	28[Ω]

3. 시뮬레이션 및 실험결과

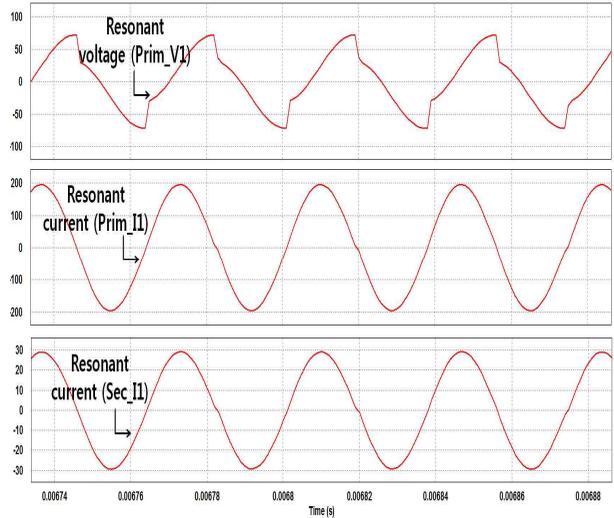
3.1 시뮬레이션 결과

제안된 공진형 컨버터의 동작을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 Powersim사의 PSIM을 이용하였으며, 파라미터는 표 1과 같다.

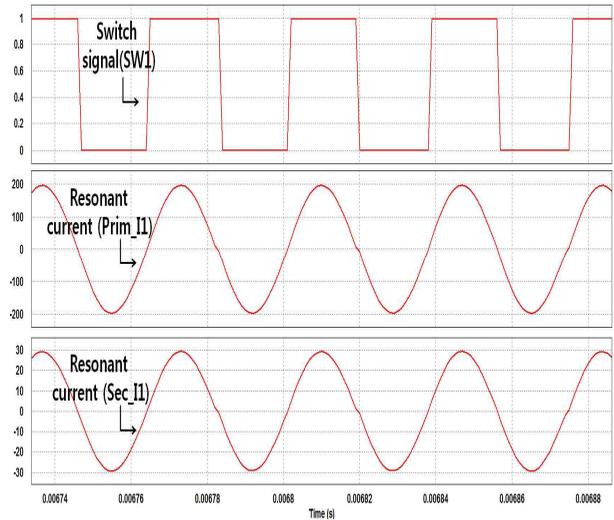
그림 8는 풀-브리지에 삽입된 스위칭(SW1~SW4) 소자에 인가된 게이트 신호이다. 각 스위치의 신호는 상보적으로 동작되며, 스위치의 온/오프 상태에 따라 에너지가 부하로 전달된다.

그림 9는 누설인덕턴스를 가지고 있는 변압기 1차측 공진 전류 파형, 2차측으로 전달된 공진 전류 파형 그리고 변압기 1차측 공진 전압의 시뮬레이션 파형이다. 공진 인덕터와 캐패시터는 주 인덕터의 전류가 최고인 지점에서 공진을 하며, 인덕터에 축적된 에너지는 풀-브리지 컨버터의 스위치의 턴-오프 시 부하로 전달된다.

그림 10은 제안된 컨버터의 입출력 전압, 전류를 나타낸 시뮬레이션 파형이다. 24[V]의 전압을 입력으로 하여 260[V]의 출력전압과 9[A]의 출력전류가 발생하였으며, 출력전압의 평균은 입력전압의 10배가량으로 안정적으로 승압된 것을 볼 수 있다.



(a) Resonant voltage



(b) Resonant current

Fig. 9. Simulation waveforms of resonant voltage and current.

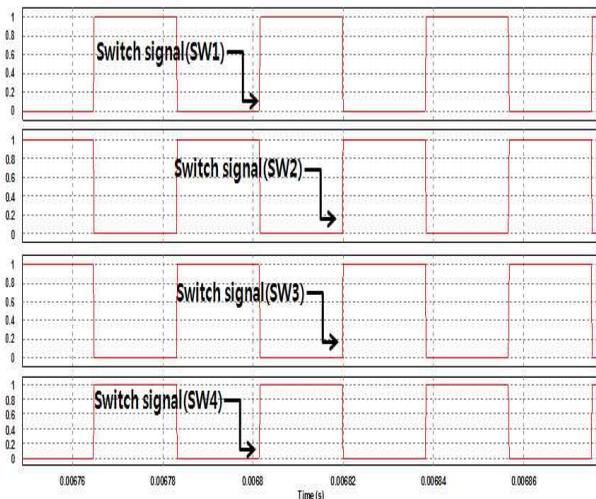
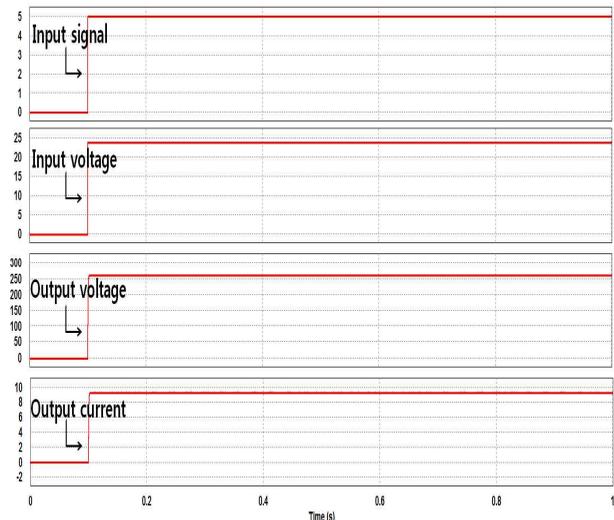
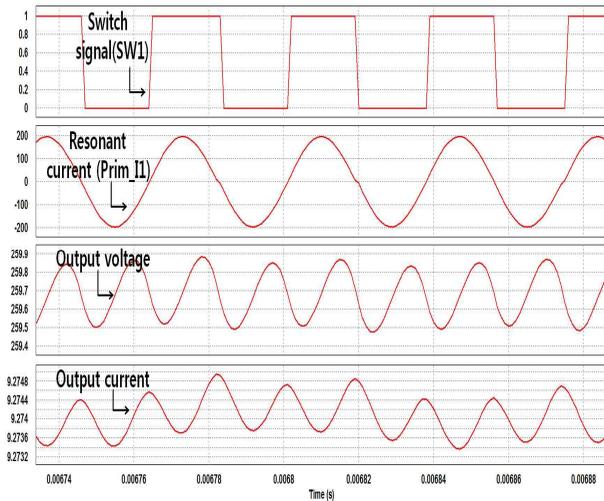


Fig. 8. Simulation waveforms of switching signal.



(a) Output waveforms



(b) Output and resonant waveforms

Fig. 10. Simulation waveforms of output voltage and current.

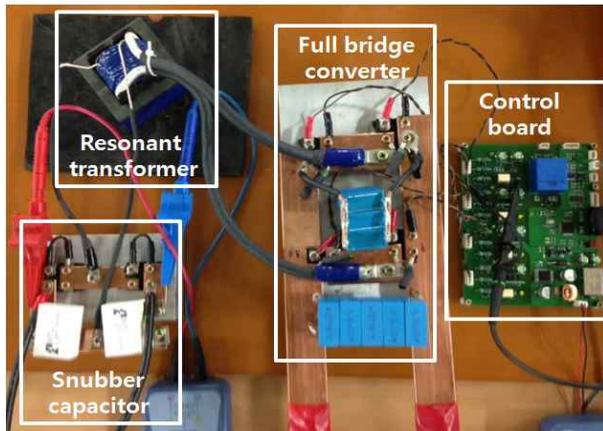


Fig. 11. Prototype of resonant DC/DC converter.

3.2 하드웨어 실험 결과

하드웨어는 제어부, 파워부, 게이트 드라이버로 구성된다. 그림 11은 실험을 위해 구성된 공진형 DC/DC 컨버터이다. 제어기는 DSP TMS320F28035를 사용하였다. 전압과 전류를 검출하여, A/D 컨버터로 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시킨다. 변환된 출력 전압의 디지털값과 기준 전압과 비교 후 PWM 신호가 생성되고 게이트 드라이버의 입력이 된다. 게이트 드라이버는 스위치가 구동할 수 있도록 구동 전압을 만든다. 게이트 드라이버의 출력은 MOSFET의 게이트와 소스에 연결된다. 실험을 위해 사용된 파라미터는 표 2와 같다

그림 12는 풀브리지단에 삽입된 MOSFET에 인가된 게이트 신호이다. 각 스위치의 신호는 상보적으로 동작되며, 스위치의 온/오프 상태에 따라 에너지가 부하로 전달된다.

그림 13은 누설인덕턴스를 가지고 있는 변압기 1차측 공진 전류 파형, 2차측으로 전달된 공진 전류 파형 그리고 변압기 1차측 공진 전압 파형이다.

TABLE II
PARAMETERS OF THE XPERIMENT

Parameters	Value
Input Voltage	24[V]
Output Voltage	280[V]
Resonant Frequency	39[kHz]
Resonant Capacitor	17[μ F]
Snubber Capacitor	0.22[μ F]
Resonant Inductor	1.7[μ F]
Transformer Turn Ratio	1:12
Load Resistance	28[Ω]
Output power	2.8[kW]

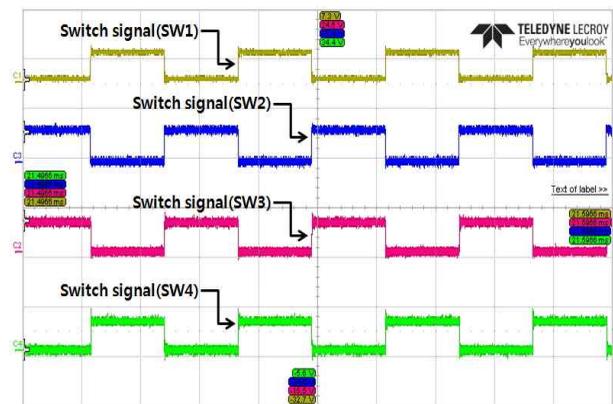
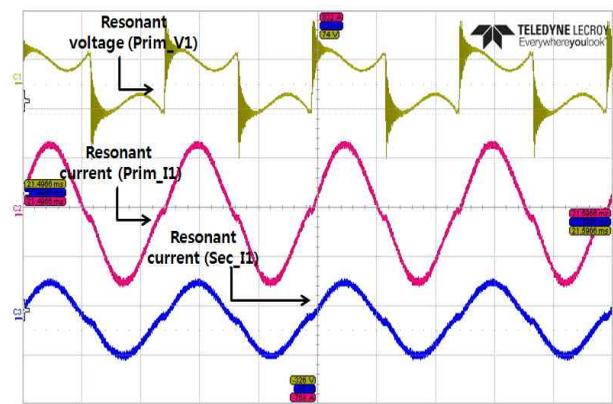


Fig. 12. Waveforms of MOSFET switch signal.

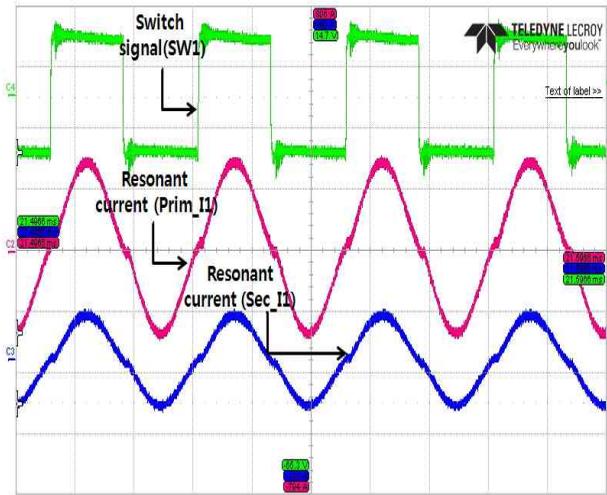
MOSFET 스위칭 신호 SW1의 온/오프에 따라 ZCS (Zero Current Switching)와 공진이 잘 이루어짐을 볼 수 있으며, 실험 결과는 시뮬레이션 결과 파형과 일치함을 볼 수 있다.

그림 14은 제안된 컨버터의 입출력 전압, 전류를 나타낸 파형이다. 24[V]의 전압을 입력으로 하여 280[V]의 출력전압과 10[A] 전류가 발생하였으며, 출력평균 전압은 입력전압의 10배가량으로 안정적으로 승압되었다.

그림 15는 제안한 컨버터의 효율을 나타내며 최고효율은 2.8[kW]에서 3.2[kW] 대역에서 95.6[%]을 나타냈다.

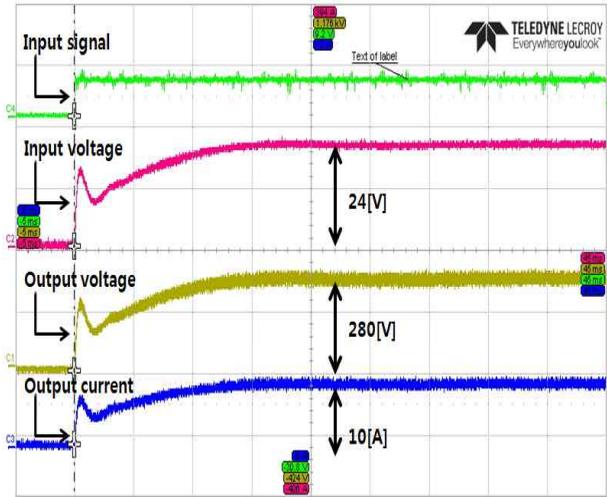


(a) Resonant voltage

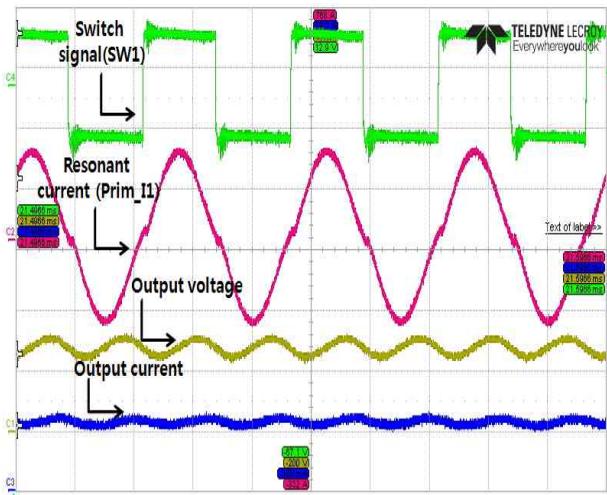


(b) Resonant current

Fig. 13. Waveforms of resonant voltage and current.



(a) Output waveforms



(b) Output and resonant waveforms

Fig. 14. Waveforms of output voltage and current.

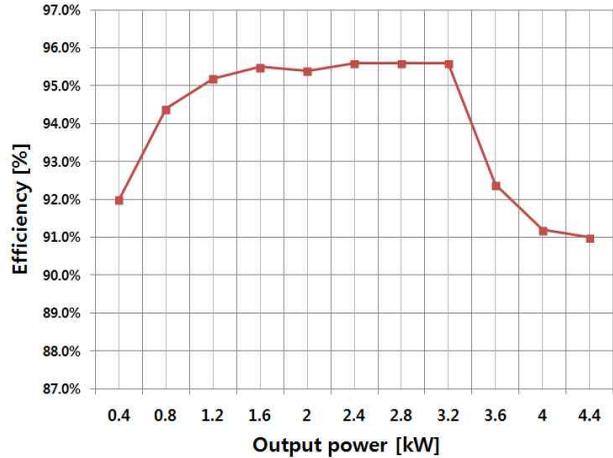


Fig. 15. Measured efficiency of the proposed converter.

4. 결 론

본 논문에서는 상용차량을 위한 무시동 에어컨용 압축기 인버터의 전원공급용 공진형 DC/DC 컨버터를 제안하였다. 제안된 방식의 컨버터는 상용차량에서 사용하고 있는 24V 저압의 배터리 전원 기반으로 260V 이상 승압(10배 이상)이 가능한 공진형 DC/DC 컨버터이다. 제작된 하드웨어는 ZCS를 이용한 소프트 스위칭 방식으로 손실을 최소화 하였다. 또한 L-C 공진을 위한 인덕터와 커패시터를 절연형 변압기의 누설리액터와 배압회로의 커패시터로 대체하여, 시스템의 간소화와 가격경쟁력을 확보 하였다.

제안된 방식의 공진형 DC/DC 컨버터 설계에 대한 타당성의 검증하기 위해 시뮬레이션 툴인 PSIM과 프로토타입의 하드웨어를 구성하여 실험하였다. 실험 결과 ZCS에 의한 공진특성으로 컨버터의 안정적인 동작과 약 95.6[%]의 효율을 확인 하였다.

향후 자동차와 함께 신재생 에너지, 연료전지 등 다양한 DC전원 공급용 컨버터로 활용이 예상된다.

References

- [1] M. S. Choi, S. G. Song, S. J. Park, D. K. Kim, and Y. G. Kim, "Development of high efficiency boost DC/DC converter for EV," *Journal of KIPE*, Vol. 15, No. 2, pp. 127-133, 2010.
- [2] I. A. Khan, "DC-to-DC converters for electric and hybrid vehicles," *Power Electronics in Transportation*, 20-22, pp. 113-122, Oct. 1994.
- [3] T. S. Park, "Energy conversion system using a novel multi-mode DC/DC converter for hybrid electric vehicles," *Journal of KIPE*, Vol. 18, No. 2, pp. 192-198, 2013.
- [4] C. Y. Oh, J. S. Kim, and B. K. Lee, "Design of optimal resonant frequency for series-loaded resonant DC-DC

converter in EVs on-board battery charger application," *Journal of KIPE*, Vol. 17, No. 1, pp. 77-84, Feb. 2012.

- [5] H. S. Choi, "Design consideration of half bridge LLC resonant converter," *Journal of Power Electronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 13-20, Jan. 2007.
- [6] B. C. Kim, K. B. Park, C. E. Kim, B. H. Lee, and G. W. Moon, "LLC resonant converter with adaptive link-voltage variation for a high-power-density adapter," *IEEE Trans on Power Electronics*, Vol. 25, No. 9, Sep. 2010.
- [7] G. Pledl, M. Tauer, and D. Buecherl, "Theory of operation, design procedure and simulation of a bidirectional LLC resonant converter for vehicular applications," in *Proc. IEEE Vehicle Power and Propuls. Conf.*, pp. 1-5, Sep. 1-3, 2010.
- [8] W. C. P. Rong, and Z Lu, "Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 57, pp. 3075-3086, Sep. 2010.
- [9] G. Pledl, M. Tauer, and D. Buecherl, "Theory of operation, design procedure and simulation of a bidirectional LLC resonant converter for vehicular applications," in *Proc. IEEE Vehicle Power and Propuls. Conf.*, pp. 1-5, Sep. 1-3, 2010.
- [10] J. S. Park and S. W. C, "Development of 12V, 1000A isolated bidirectional resonant DC-DC converter," *Journal of KIPE*, Vol. 19, No. 1, pp. 57-63, Feb. 2014.



한근우(韓勤牛)

1978년 9월 28일생. 2004년 대불대 전기공학과 졸업. 2006년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. 2005년~2010년 LG이노텍 Power Lab 선임연구원. 2010년~2013년 삼성전자 생활가전 사업부 책임연구원. 현재 (재)전북자동차기술원 전장시스템연구팀 선임연구원.



김성곤(金成坤)

1977년 9월 1일생. 2003년 경상대 제어계측공학과 졸업. 2005년 동 대학원 졸업(석사). 2013년 동 대학원 졸업(공학박). 2006년~2007년 넥스타테크놀로지 FPD사업부 근무. 2007년~2009년 자동차부품연구원 지능제어 연구센터 근무. 현재 (재)전북자동차기술원 전장시스템연구팀 선임연구원.



정영국(鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2000년 일본 오카야마대학 연구방문. 현재 대불대 융합기술학부 부교수.



임영철(任永徹)

1953년 4월 23일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년 호주 모나시대 Visiting Scholar. 1998년~2007년 산업자원부 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RFC)소장. 현재 전남대 전기공학과 교수. 2009년 당 학회 회장 역임.