

SPICE 를 이용한 Forward DC-DC 컨버터 해석

김희준 이영선

한양대학교 전기공학과

An analysis of Forward DC-DC Converter using SPICE program

Hoe Jun Kim Young Seon Lee

Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

In this papers, SPICE which is widely used in analysis of general circuit and simulation in electric and electrical field is applied to DC-DC converter.

Be selected Forward which is widely used as SMPS(Switched Mode Power Supply) among DC-DC converter, and showed the waveforms of circuit operation and energy transfer, reset in transformer, we know that the converter is operated in normal.

Including the control circuit in converter, by controlling the duty ratio of switch, we know that the output voltage is stable from the transient state of converter.

Also, comparing SPICE simulation with experiment, the validity of simulate is showed.

1. 서론

안정된 전원을 필요로 하는 전자장비들이 급속히 확산되면서 직류안정화 전원장치는 더욱 중요한 위치를 차지하고있다. 이러한 안정화 전원장치는 크게 선형 제어방식과 스위칭 제어방식이 있는데, 최근의 전자장비들이 소형, 경량화 됨에 따라 스위칭 주파수를 증가 시킴으로써 전원장치를 소형화 시킬수 있는 잇점 때문에 스위칭 제어방식이 주류를 이루고 있다.

스위칭 모드 직류안정화 전원장치(Switched Mode Power Supply)는 크게 두가지 부분으로 나누어 지는데, 먼저 입력전압을 고주파 스위칭 과정을 거쳐 직류전압으로 변환시키는 DC-DC 컨버터 부분과 안정된 출력전압을 얻기위해 스위칭 상태를 제어하는 제어부분으로 구성된다.

DC-DC 컨버터 중에서 Forward 형 컨버터는 입력과 출력 사이에 변압기를 첨가시켜 입출력 간의 절연 및 권선비에 의한 출력전압 조절을 가능케하는 방식으로 다출력이 용이하고 중,소용량의 직류안정화 전원으로서 폭넓게 이용되고있다.

한편 1970년대 미국 캘리포니아 대학으로부터 반도체 집적회로 해석을 위해 개발된 시뮬레이션 프로그램인 SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)는 전기전자분야의 일반 회로 해석에 유용하게 사용할 수 있어 대학 및 산업분야에서 널리 이용되고있다.⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

특히 전력전자 분야에서 SPICE의 적용 해석은 모델링과 계산시간의 제한에도 불구하고 활발하게 연구되어 왔는데, 주로 POWER MOSFET, SCR, GTO 등의 능동 스위칭 소자에 대한 특성 해석과 전력변환장치의 모델링에 의한 단편적인 해석에 응용되었다.

최근에 DC-DC 컨버터에 대한 SPICE 이용 회로해석은 출력전압 안정도 판별 및 직류전압 변환비 등의 응용에 비교적 적합하다는 것을 증명 하였으나, 많은 부분들이 모델링 과정에서 생략되거나 축소 됨으로써 스위칭 과정의 파형 변화, 스노버 회로, 정류과정 등 자세한 특성변화의 관측에 어려움이 있었다.⁽⁸⁾⁽⁶⁾

본 논문에서는 직류안정화 장치로 가장 널리 사용되고 있는 DC-DC 컨버터의 회로방식인 Forward 컨버터를 제어회로 까지 포함하여 SPICE 적용 해석 과정을 보였고, 회로 동작중 파형의 변화 및 변압기 에서 이루어지는 에너지 전달, 리세트 과정을 실제 파형과 비교한 결과 일치함으로써 SPICE 를 이용한 해석결과 의 유용함을 보였다.

2. Forward DC-DC 컨버터 회로구성 및 동작원리

그림 1 에 제어회로를 포함한 Forward DC-DC 컨버터의 전체회로를 보여주고있다.

우선 컨버터 회로의 동작을 살펴보면 1차측 스위칭 소자인 FET가 Gate신호에 의하여 ON상태가 되면 변압기의 2차측에 에너지가 전달됨과 동시에 정류 다이오드 D_1 이 ON 되므로 2차측에 출력이 나타난다.

이때 정류 다이오드 D_2 는 역전압에 의하여 OFF되고 Reset권선의 다이오드 D_3 역시 OFF된다.

다음에 FET가 OFF상태가 되면 N_p 권선에 축적 되어있던 자화 인덕턴스 에너지는 Reset회로로 방출하여 이때의 스위칭 양단간 전압 V_{DS} 에는 입력 전압이 나타나게된다.

여기서 Reset회로는 1차측 리액터의 자기포화를 방지한다.

또한 2차측의 정류 다이오드 D_1 은 역전압에 의해 OFF되고 L과 C에 축적되어있던 에너지는 정류 다이오드 D_2 를 통해 방출되어 순환전류가 흐른다.

한편 출력 전압 V_o 는 오차 증폭기 OP_1 의 입력에 연결되고 기준전압 V_R 에 대한 출력 전압 오차분을 오차 증폭기로 증폭한 다음 이를 비교기 OP_2 에서 삼각파와 비교하여 구형파 펄스를 출력하게되는데, 이 펄스로는 스위치를 구동시키기엔 충분치 못하므로 Gate driver 를 통하여 스위치 FET의 ON 시간을 제어해 줌으로써 출력 전압이 안정화 된다.

3. SPICE 모델링 및 해석

3.1 Forward DC-DC 컨버터 기본모델

SPICE를 이용한 Forward DC-DC 컨버터 해석을 위해 그림 2에 회로의 기본모델을 나타내었으며, 스위칭 동작주파수는 33KHz를 사용하였다.

또한 부록 그림 13의 왼쪽과 오른쪽에 각각 실험파형 및 SPICE 파형을 비교하였다.

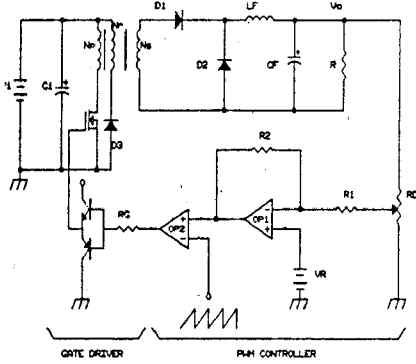


그림 1 제어회로를 포함한 Forward DC-DC컨버터
Fig.1 Forward DC-DC converter with PWM controller

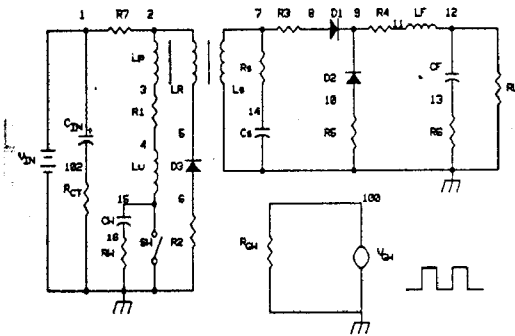


그림 2 Forward DC-DC 컨버터 기본모델
Fig.2 Modeling of Forward DC-DC converter basic circuit

3.2 제어회로 모델링

그림 3의 b)는 오차 증폭기 및 비교기에 대한 등가 모델회로를 나타내고있다.

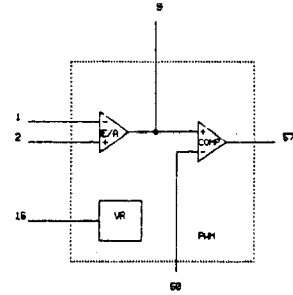
오차 증폭기의 입력 임피던스는 저항 R1과 커패시터 C1에 의해 모델화 되었고 저항R1과 전압제어 전류원 G1은 개루프이득이 $A_{OL} = G_1 * R_1 = 5\text{MEG}$ 로 주어지게되며 커패시터 C1은 오차증폭기의 대역폭으로 $B_w = (2\pi R_1 C_1)^{-1} = 200\text{KHz}$ 를 제공한다.

한편 전압원 Va, Vb는 Node 9의 전압인 오차 증폭기의 출력을 제한하며 Node 16의 전압원 Vr는 오차증폭기의 기준전압이다.

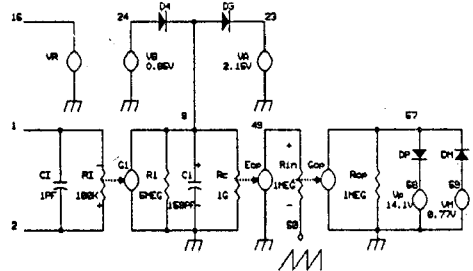
또한 전압원 Vp, Vm은 비교기의 출력인 구형파 펄스의 전압(Node 57)을 제한하여준다.

그림 a)는 모델화 된 PWM 회로를 나타내며 외부 Node에 연결하여 부 회로(Sub circuit)로 사용하도록 하였다.

그림 4는 그림 3의 a)를 사용한 오차증폭기의 입력전압 Vo 및 기준전압 Vr에 대한 출력전압 Vop(Node 9)과의 관계를 이론치와 비교하여 나타내었다.

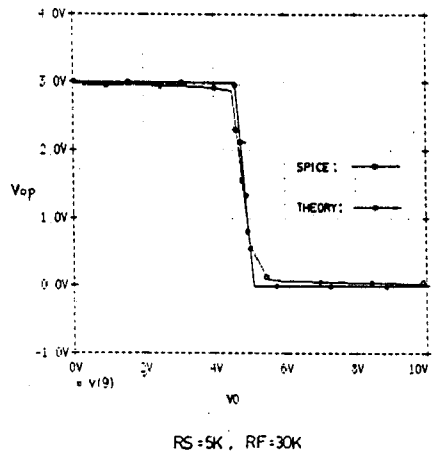


a) 모델화 된 PWM

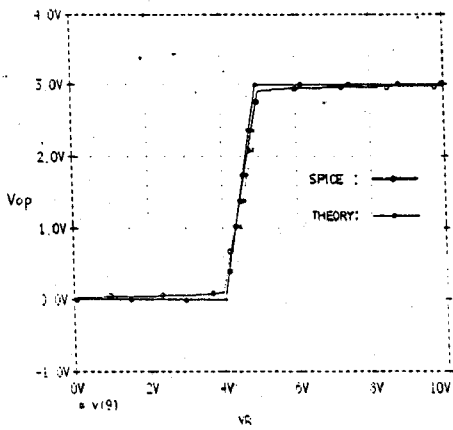


b) PWM 등가 모델회로

그림 3 제어회로 모델링
Fig.3 Modeling for PWM controller



a) Vo와 Vop의 관계



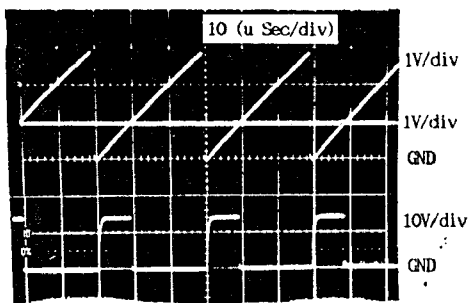
RS=5K, RF=30K

b) VR와 Vop의 관계

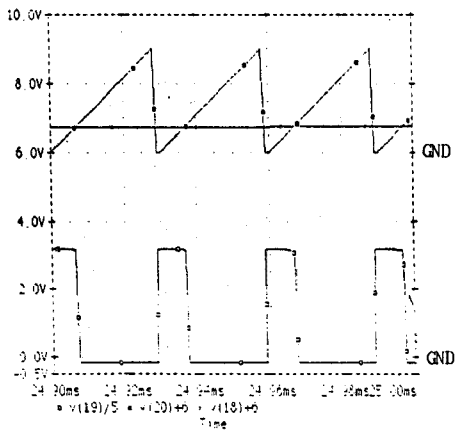
그림 4 Vo, VR에 대한 Vop 관계
Fig.4 Vo and VR vs Vop

비교기는 오차증폭기의 출력 전압(Node 9)과 Node 50의 볼티아와 비교하여 Node 57로 구형파 펄스를 출력하는 회로를 구성한다. 그림 5에 실험 파형 및 SPICE 파형을 나타내었는데 실험 파형과 비교 할때 거의 일치함을 보이고있다.

이에 대한 프로그램은 부록 그림 3의 중간 아래부분을 적용한 경우이다.



a) 실험 파형



b) spice 파형

그림 5 비교기의 입출력파형
Fig.5 input, output wave for comparator

3.3 Forward DC-DC 컨버터 모델

FWM 모델을 포함한 컨버터 회로를 그림 6에 나타내었다. 여기서 FWM 모델은 전체회로에서 부 회로(sub circuit)로 사용하였다.

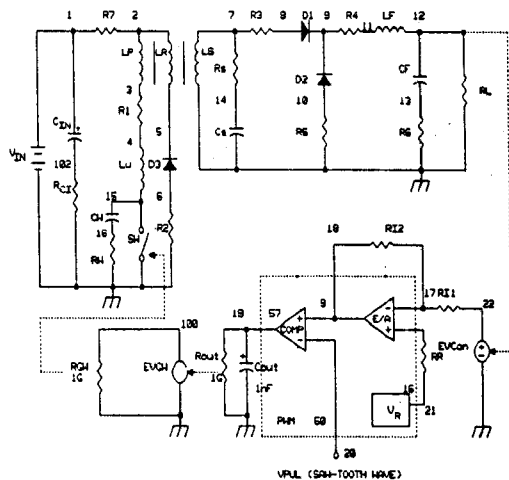


그림 6 제어회로를 포함한 Forward DC-DC 컨버터 모델
Fig.6 Forward DC-DC converter connected with PWM controller.

그림 6의 전체회로사용해서 정상상태에서의 시비율 D의 변화에 대한 출력전압 Vo(V)를 그림 7에 나타내었고 SPICE 및 실험치와 비교하였다.

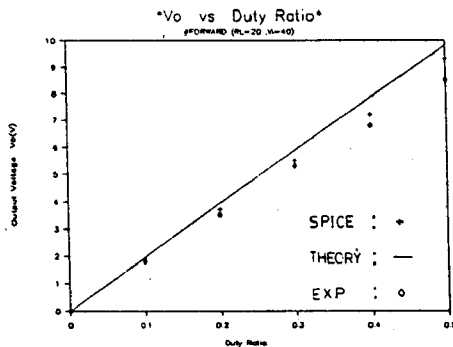


그림 7 시비율 D의 변화에 대한 출력전압
Fig.8 Output voltage for the variation of duty ratio

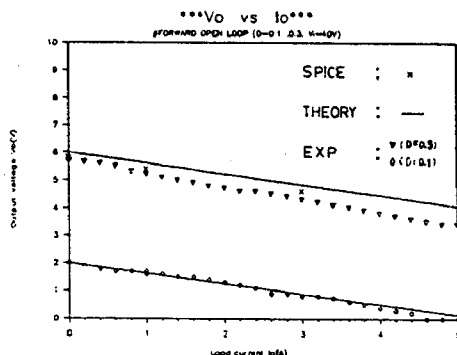
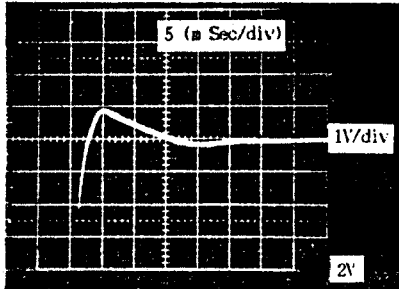


그림 8 부하특성
Fig.8 Load characteristics

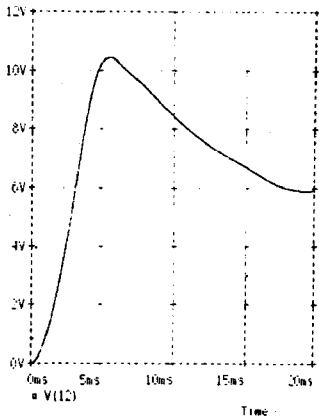
그림 8 에 OPEN LOOP 에서의 부하특성을, 그림 9 에 출력 전압 파형을 SPICE 및 실험치와 비교하였다.

그림 8 로부터 OPEN LOOP시 부하전류 $I_o(A)$ 의 증가에 따라 출력 전압 $V_o(V)$ 가 감소하는 부하특성을 보이고 있음을 알수 있다.

SPICE 로 얻은 결과와 실험 결과를 비교해 볼때 거의 일치 하고 있음을 보여준다.



a) 실험 파형



b) SPICE 파형

$V_i = 40V, D = 0.3, R_L = 20$

그림 9 OPEN LOOP 시 정상상태 에서의 출력 전압
Fig.9 The output voltage in the steady state (OPEN LOOP)

그림 10 에 CLOSED LOOP시의 레귤레이션 특성을, 그림 11 에 출력 전압 파형을 SPICE 및 실험치와 비교하였다.

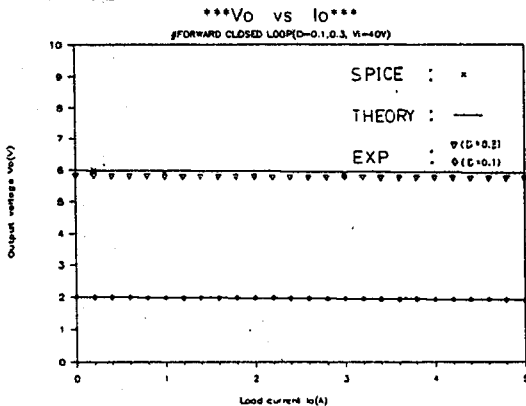
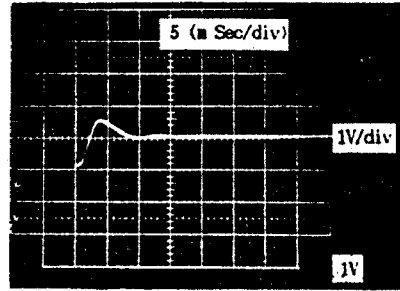
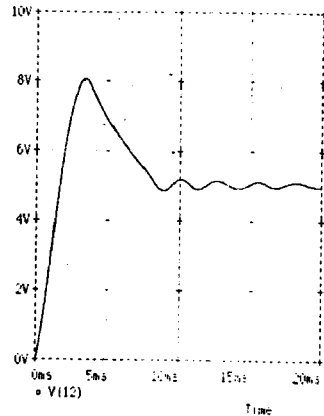


그림 10 CLOSED LOOP 특성
Fig.10 CLOSED LOOP characteristics

부하전류 $I_o(A)$ 가 증가 하여도 출력 전압이 거의 일정하게 유지 하고 있음을 보이고있으며, 출력 전압 파형 에서는 OPEN LOOP 시의 그림 9 와 비교 할때에 제어회로를 통한 출력 전압 보상으로 인해 정상상태에 이르는 시간이 짧아진 것을 보여주고 있다.



a) 실험 파형

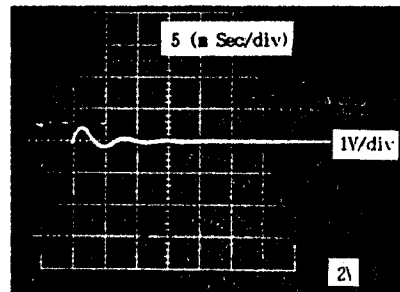


b) spice 파형

$V_i = 40V, D = 0.25, R_L = 5$

그림 11 CLOSED LOOP 시 정상상태 에서의 SPICE 출력 전압
Fig.11 The output voltage of SPICE in the steady state (CLOSED LOOP)

부하전류 $I_o(A)$ 가 급변하는 동안에 제어회로 에서 시비율을 보상 해줌으로써 출력 전압 V_o 가 과도응답을 보인뒤에 다시 정상상태로 출력 전압을 유지하고 있는것을 그림 12 에 나타내고 있다. 여기서 부하전류 $I_o = I_{rc}$, 출력 전압 $V_o = V_{(40)}$, 제어 전압 $V_6 = V_{(19)}$ 로 표시하였다.



a) 실험 파형

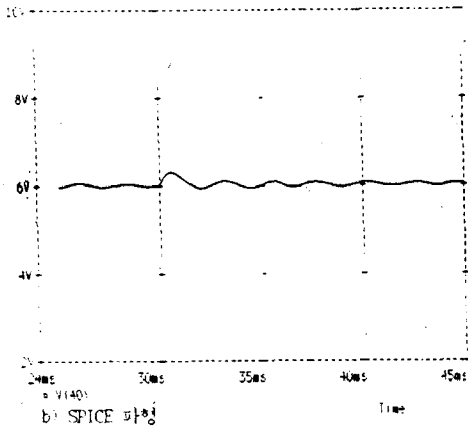


그림 15 출력전압의 과도응답
Fig. 15 The transient response of the output voltage

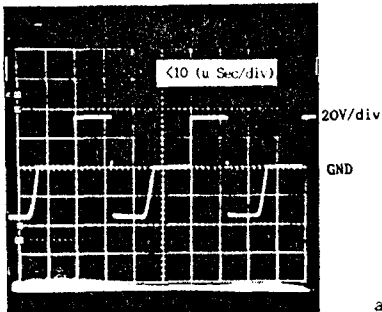
4. 결 론

본 논문에서는 전기전자 분야에서 일반적으로 해석 및 모의 실험용으로 널리 사용되고 있는 SPICE 프로그램을 DC-DC 컨버터에 적용 하였다.

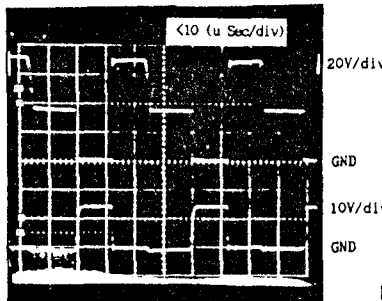
DC-DC 컨버터 중 직류 안정화 전원장치로 가장 널리 사용되고 있는 Forward 컨버터 를 선택하여 회로동작중 파형의 변화 및 변압기 에서 이루어지는 에너지 전달, 리세트 과정을 SPICE 를 이용한 모의 실험으로 보여 줌으로써 컨버터가 정상 동작됨을 알 수 있었고, 컨버터에 제어회로 를 포함시켜 스위치의 시비율을 제어 함으로써 출력 전압을 안정화 시키는 과정을 컨버터 과도 상태로 부터 알 수 있었다.

또한 SPICE 모의 실험과 실제회로의 실험을 서로 비교 함으로써 본 논문 에서 해석한 회로 모의 실험의 유용함을 보였다.

부 록



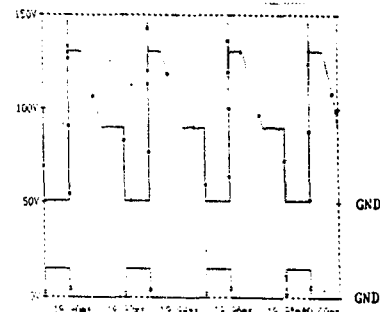
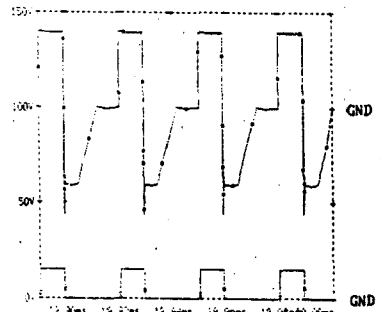
a) 1차측 변압기 양단간 전압

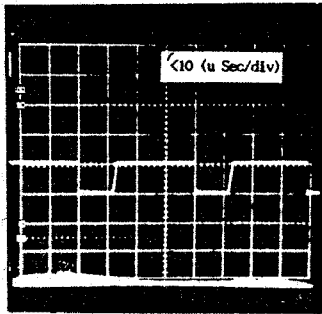


b) 상: 스위치 양단간 전압
하: 스위치 제어 전압

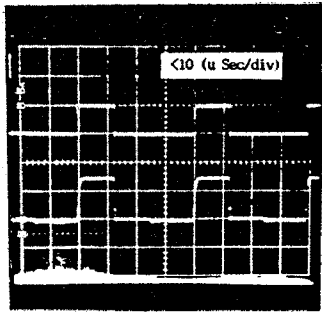
참고문헌

- (1) R. D Middlebrook and S. CUK ; "A general unified approach to modelling switching converter power stage", IEEE PESC '76 Record, pp.18-34 (June 1976)
- 2) 김 의 준 ; "DC-DC 컨버터의 소형화와 안정성", 대한 전기학회 논문집. pp. 528-533 (1988)
- (3) H. J. Kim and K. Harada ; "A high frequency switching and circuit configuration", JTC - CAS '87 proceeding pp. 35-39 (July 1987)
- (4) 김 의 준 외 ; "1MHz 공진형 DC/DC 컨버터", 추계 학 술발표회 논문집. pp. 74-77(1988)
- (5) K. Harada ; "state of the art in DC-DC converters", IEEE INTELEC '83 pp. 35-42 (oct.1983)
- (6) P.R.K CHETTY ; "Switch-Mode power supply Design", TAB Books Inc. 1st EDITION (1986)
- (7) S. CUK, R. D. Middle brook ; "Advances in switched mode power conversion", TESLA co (1983)
- (8) Vincent G. Bello ; "Using the SPICE2 cad package for easy simulation of switching regulators in both continuous and discontinuous conduction modes", Powercon 8' PP H3-H14 (Apr ill 27-30, 1981)
- (9) W. Banzhaf ; "Computer-aided circuit analysis using spice"
- (10) "PSpice" MicroSim co. (January 1986)





c) 정류 다이오드 D1 양단간 전압



d) 상: 전류 다이오드 D2 양단간 전압
하: 스위치 제어 전압

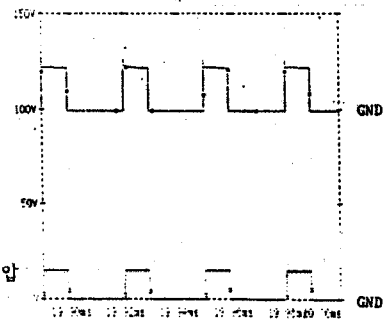
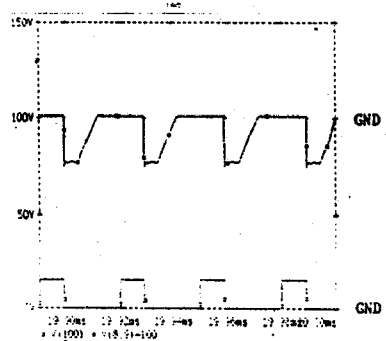


그림 13 컨버터 각부분 파형
Fig.13 The waveforms of converter

```

FORWARD.CIR FORWARD BASIC CIRCUIT
.OPTION ACCT ITLS=0 ABSTOL=1E-3
VGM 100 0 PULSE(0 15 0 100N 100N 9U 30U)
RGW 100 0 1G
VIN 1 0 40
CIN 1 102 1000UF IC=40V
RCI 102 0 1M
D1 8 9 DIODE
D2 10 9 DIODE
D3 6 5 DIODE
R1 3 4 1M
R2 8 0 1M
R3 7 8 1M
R4 8 11 1M
R5 10 0 1M
R6 13 0 1M
R7 1 2 1M
LP 2 3 0.875mH
LR 5 2 0.875mH
LE 7 0 0.332mH
RE 7 14 100
CS 14 0 0.01UF
RP-R LP LR 0.999
RP-S LP LS 0.999
RR-S LR LS 0.999
LF 11 12 1.5mH
CF1 12 13 1000UF
CF2 12 13 1000UF
RL 12 0 4
LM 4 15 5mH
SM 15 0 100 0 SHOD
CM 15 16 500PF
RM 16 0 100
.MODEL DIODE D
.MODEL SHOD VSWITCH
.TRAN 1N 20N
.PROBE
.END
    
```

그림 14 SPICE 프로그램
Fig. SPICE Program

```

OP AMP.CIR ERROR AMP MODEL
.OPTION ACCT ITLS=0 ABSTOL=1E-3
R1 2 1 10K
R2 9 0 1G
RC 9 0 1G
VA 23 0 2.1V
VB 24 0 0.9V
CI 2 1 1PF
C1 8 0 150PF
G1 0 9 2 1 1
VR 16 0 4.37V
D3 9 23 DIODE
D4 *R4 9 DIODE
RS 4 1 5K
RF 9 1 30K
RR 2 16 0.01P
VO 4 0 5V
*RIW 49 50 1MEG
*ROP 49 0 9 0 1
*VFUL 50 0 PULSE(0 3 0 28U 1U 500N 30U)
*COF 0 57 49 50 1MEG
*ROP 57 0 1MEG
*DP 57 58 DIODE
*DH 59 57 DIODE
*VF 58 0 1.4V
*VH 59 0 0.77V
.MODEL DIODE D
.DC VR 0 10 0.5
.PROBE
.END
    
```

그림 15 SPICE 프로그램 (오차 증폭기 및 비교기)
Fig.15 SPICE Program (E/A, Comp.)

```

FORWARD.CIR FORWARD CLOSED LOOP CIRCUIT
.OPTION ACCT ITLS=0 ABSTOL=1E-3
EVMG 100 0 19 0 1
RGW 100 0 1MEG
VIN 1 0 40
CIN 1 102 1000UF IC=40V
RCI 102 0 1M
D1 8 9 DIODE
D2 10 9 DIODE
D3 6 5 DIODE
R1 3 4 1M
R2 8 0 1M
R3 7 8 1M
R4 8 11 1M
R5 10 0 1M
R6 13 0 1M
R7 1 2 1M
LP 2 3 0.875mH
LR 5 2 0.875mH
LE 7 0 0.332mH
RE 7 14 100
CS 14 0 0.01UF
RP-R LP LR 0.999
RP-S LP LS 0.999
RR-S LR LS 0.999
LF 11 12 1.5mH
CF1 12 13 1000UF
CF2 12 13 1000UF
RL 12 0 5
LM 4 15 5mH
SM 15 0 100 0 SHOD
CM 15 16 500PF
RM 16 0 100
.SUBCKT PFM 1 9 57 50 16
R1 2 1 1K
R1 9 0 5M5G
RC 9 0 1G
VA 23 0 2V
VB 24 0 1V
CI 2 1 1PF
C1 8 0 150PF
G1 0 9 2 1 1
D3 9 23 DIODE
D4 24 9 DIODE
RR 2 16 0.01P
RIN 49 50 1MEG
EOP 49 0 9 0 1
COF 0 57 49 50 1MEG
ROP 57 0 1MEG
DP 57 58 DIODE
DH 59 57 DIODE
VF 58 0 1.4V
VH 59 0 0.8V
.MODEL DIODE D
.ENDS PFM
XIC PFM 17 18 19 20 21 PFM
EVC0N 22 0 12 0 1
R11 22 17 5K
R12 17 18 10K
ROUT 19 0 1G
COU2 19 0 1M
VFUL 20 0 PULSE(0 3 0 28U 1U 100N 30U)
VREF 21 0 3.25V
.MODEL DIODE D
.MODEL SHOD VSWITCH
.TRAN 1N 20N UIC
.IC V(19)=0
.PROBE
.END
    
```

그림 16 SPICE 프로그램 (CLOSED LOOP)
Fig.16 SPICE Program (CLOSED LOOP)