

진폭과 위상 특성이 우수한 링 하이브리드 발룬 설계

Design of Ring Hybrid Balun with Good Amplitude and Phase balance

나 원, 조 일 현, 이 문 규
(Won Na and Il-Hyun Cho, Moon-Que Lee)

Abstract: We present a ring hybrid balun with additional two $\lambda/4$ short stubs that offers excellent amplitude and phase balance performance. The phase difference which is essentially occurred in 180° ring hybrid is compensated by a $\lambda/4$ short stub in one output port. To compensate the amplitude imbalance inherent in the ring hybrid, the series resistance will be added to the second stub which is connected to another output port. The measured balun shows that phase imbalance is less than 2.5° and magnitude imbalance is less than 0.2dB over a 1.75-2.25 GHz.

Keywords: 180° Ring Hybrid Coupler, Phase balance, Amplitude balance, $1/4 \lambda$ Short stub

I. 서론

180° 링 하이브리드 결합기는 안테나 급전회로, 위상 천이기, 믹서, 증폭기 등 마이크로파 회로설계에서 폭넓게 사용되는 회로중 하나이다. 3dB 링 하이브리드 결합기는 입력신호를 두개의 같은 진폭과 정반대의 위상을 갖는 신호로 나누어 주는 역할을 하는데, 이 특성은 결합기의 중심주파수에서만 만족된다. 결국 링 하이브리드 결합기를 발룬으로 사용하기 위해서는 링 하이브리드의 대역폭을 증가 시켜야 함을 알 수 있다.

링 하이브리드의 위상과 진폭 특성을 개선하는 방법으로 링 하이브리드의 $3\lambda/4$ 전송선로를 집중소자를 사용한 Left-Handed 전송선로로 대체하거나[1], $\lambda/4$ 커플링 라인을 사용한 구조로 대체한[2] 연구가 있었다. 본 논문에서는 $\lambda/4$ 단락 스테브를 사용하여 넓은 대역에서 우수한 위상 및 진폭 특성을 보이는 발룬을 설계하였다. 먼저 단락II에서는 기존의 링 하이브리드의 위상 및 진폭 특성을 수식으로 도출하고, 위상을 $\lambda/4$ 단락 스테브를 사용하여 보정하는 과정에 대하여 다루었다. 단락III에서는 위의 링 하이브리드에 스테브를 추가하여 진폭 특성을 개선하였으며 이를 통한 링 하이브리드 발룬 설계 및 그 대역에 관한 내용을 기술 하였다. 그리고 마지막으로 단락 IV에서 제작 및 측정 결과를 나타내었다.

II. 기존의 링 하이브리드와 $\lambda/4$ 단락 스테브를 사용한 위상 보정

그림 1은 링 하이브리드의 모식도이다. 180° 하이브리드 발룬 설계를 위해 구해야 하는 S-Parameter는 입력이 그림 1의 1번 단자에 가해지고, 출력이 2번 단자와 4번 단자로 나오는 경우로, 이를 등가회로화 시키면 그림 1의 왼쪽처럼 단락 스테브, 전송선로, 단락스테브가 직렬로 연결된 형태로 나타내어 진다.

* 책임저자(Corresponding Author)

이문규: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
(mqlee@uos.ac.kr)

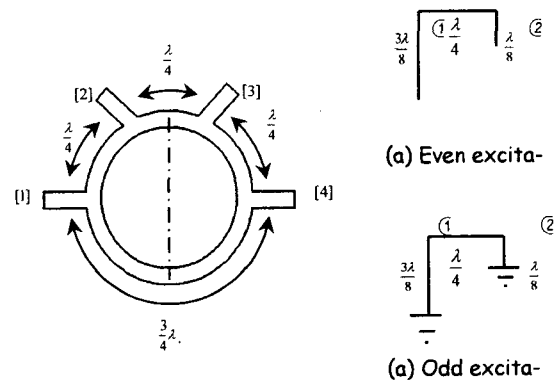


그림 1. 링하이브리드 결합기 모식도 및 등가 회로

Fig. 1. Conventional ring hybrid and even-odd mode equivalent circuit

이때 스테브와 전송선로의 전기적 길이 $\beta l_{line}, \beta l_{stub1}, \beta l_{stub2}$ 가 주파수에 따라 변하므로 주파수에 따른 전기적 선로의 길이를 $\beta l_{line} = f \times 90^\circ, \beta l_{stub1} = f \times 45^\circ, \beta l_{stub2} = f \times 135^\circ (f = f/f_c)$ 와 같이 표현하고, 이를 사용하여 우모드, 기모드 여기 상태의 ABCD매트릭스를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{odd} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{s2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta l_{line}) & j\sqrt{2}Z_0 \sin(\beta l_{line}) \\ j\frac{1}{\sqrt{2}}Y_0 \sin(\beta l_{line}) & \cos(\beta l_{line}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{s1} & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{s1} = \frac{1}{j\sqrt{2}Z_0 \tan(\beta l_{s1})}$$

$$Y_{s2} = \frac{1}{j\sqrt{2}Z_0 \tan(\beta l_{s2})}$$

- Even-mode excitation - (1)

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{even} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{s2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta l_{line}) & j\sqrt{2}Z_0 \sin(\beta l_{line}) \\ j\frac{1}{\sqrt{2}}Y_0 \sin(\beta l_{line}) & \cos(\beta l_{line}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{s1} & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{s1} = \frac{1}{-j\sqrt{2}Z_0 \cot(\beta l_{stub1})}$$

$$Y_{s2} = \frac{1}{-j\sqrt{2}Z_0 \cot(\beta l_{stub2})}$$

- Odd-mode excitation - (2)

즉 우모드와 기모드에서의 ABCD 행렬을 주파수에 대한 함수로 전개 할 수 있다. 이를 바탕으로 180° 하이브리드의 두 출력의 S-parameter S(2,1)과 S(4,1)을 구하면 다음과 같다.

$$S(2,1) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin\theta(\sqrt{2}-\tan\phi+\tan 3\phi) - j\sqrt{2}\frac{\sin 3\phi}{\cos\phi}}{2\cos\theta + \sin\theta(\sqrt{2}-\tan\phi-\tan 3\phi) + j\sqrt{2}\frac{\sin 3\phi}{\cos\phi}} \quad \frac{\sin\theta(\sqrt{2}+\cot\phi-\cot 3\phi) - j\sqrt{2}\frac{\cos 3\phi}{\sin\phi}}{2\cos\theta + \sin\theta(\sqrt{2}+\cot\phi+\cot 3\phi) - j\sqrt{2}\frac{\cos 3\phi}{\sin\phi}} \right]$$

$$S(4,1) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin\theta(\sqrt{2}-\tan\phi+\tan 3\phi) - j\sqrt{2}\frac{\sin 3\phi}{\cos\phi}}{2\cos\theta + \sin\theta(\sqrt{2}-\tan\phi-\tan 3\phi) + j\sqrt{2}\frac{\sin 3\phi}{\cos\phi}} \quad \frac{\sin\theta(\sqrt{2}+\cot\phi-\cot 3\phi) - j\sqrt{2}\frac{\cos 3\phi}{\sin\phi}}{2\cos\theta + \sin\theta(\sqrt{2}+\cot\phi+\cot 3\phi) - j\sqrt{2}\frac{\cos 3\phi}{\sin\phi}} \right] \quad (3)$$

여기서 $\beta_{line} = \theta, \beta_{sub1} = \phi, \beta_{sub2} = 3\phi$ 로 대치하였다. 여기서 목적 인 각 출력의 위상 및 진폭 특성을 살펴보기 위하여 위상의 위상과 진폭을 주파수에 대해 그래프를 그린 것이 그림 2 이다.

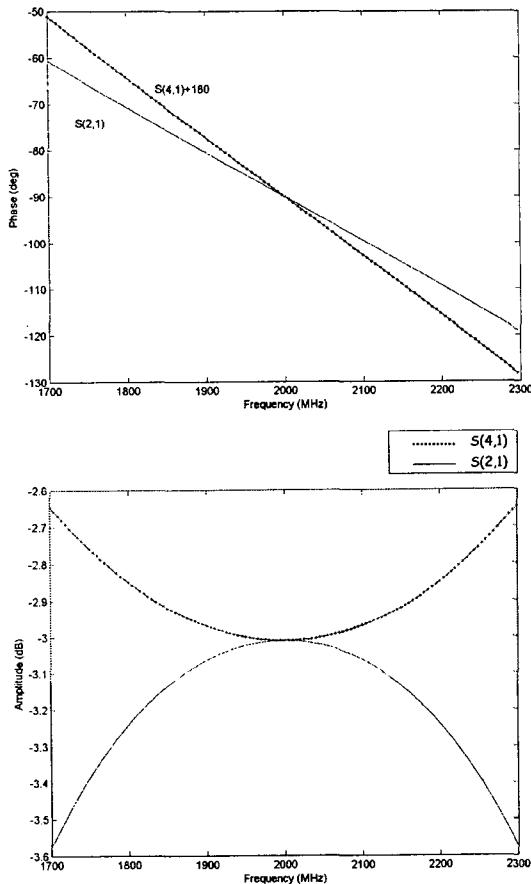


그림 2. 랑하이브리드 결합기 출력의 위상 및 진폭
Fig. 2. Phase and Amplitude of Output S-parameter

출력의 위상을 같은 축에서 도시하도록 S(4,1)의 위상에 180° 를 더해주었다. 그래프에서 보듯이 중심 주파수 에서는 위상 및 진폭 특성을 만족 하나, 그 이외의 주파수에서는 위상과 진폭의 크기가 다르므로 이를 보정 해주어야 한다. 또한 각 출력 S(2,1) 과 S(4,1) 을 살펴보면 중심 주파수에서 위상이 1차함수 형태의 직선으로 주파수에 따른 위상의 변화율이 일정함을 알 수 있다.

다음으로 제안된 회로의 주파수 보정 회로에 사용될 λ/4 단락 스테브의 특성을 수식으로 나타내었다. 먼저 λ/4 단락

스텝의 모식도는 그림4의 그림과 같다. 중심 주파수 근처에서는 스테브의 입력 임피던스 Z_{in} 이 무한대가 되므로 단자

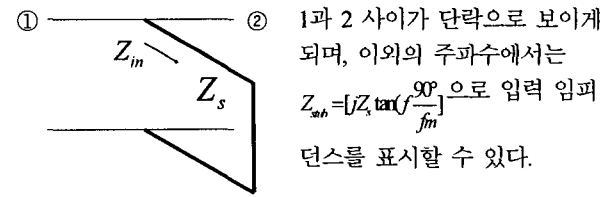


그림 3. λ/4 단락 스테브의 모식도
Fig. 3. Structure of shunt stub

이를 사용하여 λ/4 단락 스테브의 S(2,1)을 구하면

$$S(2,1) = \frac{2Y_0}{2Y_0 + \frac{1}{jZ_s \tan(f \frac{90^\circ}{f_m})}} \quad \square S(2,1) = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\frac{2Z_s}{Z_0} \tan(f \frac{90^\circ}{f_m})} \right) \quad (4)$$

이다. 이때, 중심 주파수에서의 위상은 항상 0 이지만, 그때의 변화율은 스테브의 임피던스에 따라 변화함을 알 수 있다. 이 관계를 살펴보기 위해 출력의 위상을 주파수에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d \square S(2,1)}{df} = \frac{Z_0}{2Z_s} \times \frac{90^\circ}{f_m} \quad (5)$$

즉, 위상의 변화율을 보정함으로서 180° 위상차이가 나는 구간을 증가 시킬 수 있음을 알 수 있다. 위에 제시된 식 (3) 을 통하여 중심주파수에서 180° 하이브리드의 주파수에 대한 위상 변화율을 계산하면 $s_{41} = 0.1273^\circ / \text{MHz}$, $s_{21} = 0.0955^\circ / \text{MHz}$ 이므로 식 (5)에서 스테브의 특성 임피던스를 계산하면 35.38 Ohm이 나오게 된다.

이를 사용한 위상보정된 링 하이브리드의 모식도는 다음과 같다.

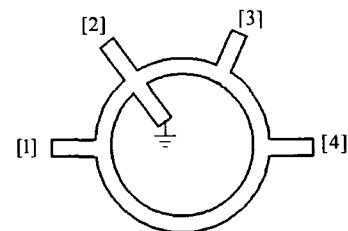


그림 4. 위상 보정된 링 하이브리드의 모식도
Fig. 4. Structure of proposed Ring hybrid

III. 링 하이브리드 발룬 설계

위에서 제안된 링 하이브리드는 위상 특성은 개선되었지만, 실제 스테브의 삽입손실로 인하여 양 출력의 진폭은 더 큰 차이를 보이게 된다. 이를 보정하기 위하여 그림 5의 4 번 단자에 직렬저항이 연결된 λ/4 단락 스테브를 추가 하였다.

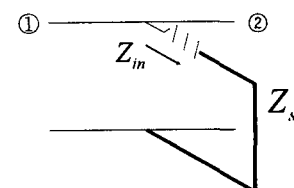


그림 5. 직렬저항이 추가된 λ/4 단락 스테브
Fig. 5. Structure of shunt stub with series resistance

위에서와 마찬가지로 위의 진폭과 위상을 식으로 풀게 되면 다음과 같다.

$$\text{진폭: } \sqrt{\frac{R^2 + Z_s^2 \tan^2(f \times \frac{90^\circ}{f_m})}{(2R+1)^2 + 4Z_s^2 \tan^2(f \times \frac{90^\circ}{f_m})}} \quad (6)$$

$$\text{위상: } \tan^{-1} \left[\frac{2R^2 + R + 2Z_s \tan^2(f \times \frac{90^\circ}{f_m})}{Z_s \tan(f \times \frac{90^\circ}{f_m})} \right] \quad (7)$$

다음으로 이 직렬저항이 연결된 $\lambda/4$ 스테브를 본론1의 위상 보정 180° 하이브리드 발룬의 나머지 출력단자 [4] 에 부착함으로써 위상과 진폭을 동시에 보정하는 180° 하이브리드 발룬을 설계하였다. 그림6 은 제안된 발룬의 모식도이다. 이때, 발룬의 대역폭과 그 성능과는 Trade-off 관계가 있는데, 즉 좁은 대역에서 성능이 좋은 발룬을 설계할 것인지, 혹은 넓은 대역에서 약간의 오차를 가진 발룬을 설계할 것인지를 용도에 따라 택할 수 있다.

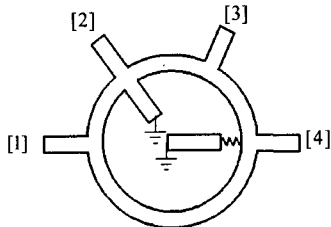


그림 6. 링 하이브리드 발룬의 모식도
Fig. 6. Structure of proposed Ring Hybrid Balun

본 논문에서는 180° 하이브리드 발룬의 두출력을 합한 S-행렬 값을 사용하여 대역폭을 결정하였다. 즉 위상이 정확히 180° 차이가 나고 그 진폭이 같다면 합한값은 0가 되므로 dB값은 음의 무한대가 될 것인데, 실제 오차가 있다면 이 값이 한정된 값이 나오게 될 것이므로 이때의 dB 값을 기준으로 대역을 결정해 주었다. 이 대역폭을 결정하는 것은 단자2 에 부착한 스테브 특성 임피던스 Z1과 단자 4에 부착한 스테브 특성임피던스 Z2의 값에 따라 결정 된다. 즉 중심주파수에서 각 출력의 위상변화율 차이, 즉 스테브 1과 스테브 2의 특성 임피던스에 따라 결정된다.

특성임피던스와 대역폭의 관계를 살펴보기위해 그래프를 그리면 다음과 같다.

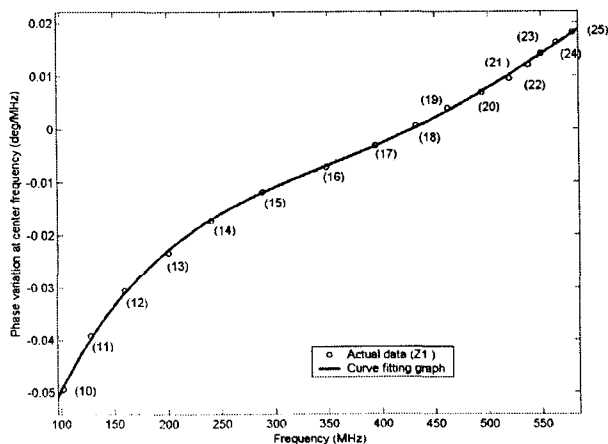


그림 7. 스테브의 위상변화율과 대역폭

Fig. 7. Phase variance of stub and bandwidth

그래프에서 굵은 실선은 Mat lab을 사용하여 curve fitting한 결과이며 원으로 표시된 실제 데이터는 스테브2의 특성임피던스 Z2 를 30Ohm으로 고정된뒤 스테브1의 특성임피던스 Z1을 100Ohm 에서부터 10Ohm 씩 이동하며 그때의 -30dB 대역폭을 기준으로 저항 값을 최적화한 결과이다. 즉 대역폭과 중심주파수에서의 위상 변화율과의 관계를 나타내는 그래프이다. 스테브의 특성 임피던스 Z1, Z2의 조합에 따른 최대 오차의 범위는 15MHz 이내로 중심주파수 대비 1.5 % 정도이다.

그림 9는 기존 180° 하이브리드와 제안된 180° 하이브리드 발룬에서 양 출력간의 진폭과 위상 차이를 나타낸 그래프이다. 얇은 선이 기존의 링 하이브리드 이며, 굵은 선이 스테브를 사용해 보정해준 결과이다. 그 결과 중심 주파수를 중심으로 180° 위상차와 같은 진폭을 유지하는 대역이 증가되었음을 살펴볼 수 있다.

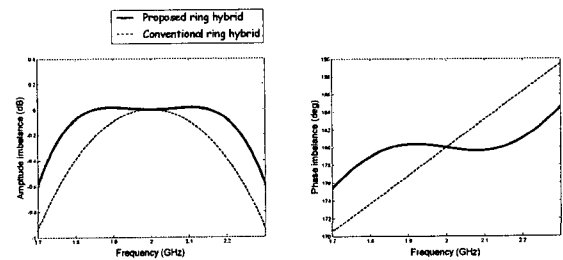
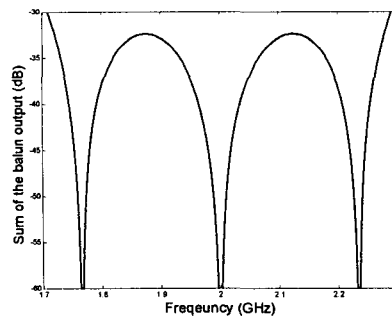


그림 8. 기존의 링 하이브리드와 제안된 링 하이브리드 발룬의 위상 및 진폭 특성

Fig. 8. Amplitude and phase balance of ring hybrid balun

위의 내용을 바탕으로 Agilent 사의 ADS2004A 를 사용하여 180° 하이브리드 발룬을 설계하였다. 직렬 저항의 값을 최적화를 통하여 계산하였다. 발룬의 성능을 나타내는 지표로는 위에서 설명한 두 출력의 합이며 그 값이 낮을수록 진폭과 위상차이가 정확함을 나타낸다. 실제 두 출력의 합이 -30 dB 이하이면 위상은 4° 내의, 진폭은 0.2dB 이하의 차이를 보인다.

Case #1 Goal: -34dB 1.7~2.3 GHz 대역



Case #2 Goal: -60 dB, 1.85~2.15 GHz 대역

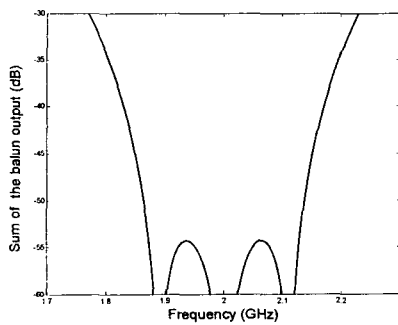


그림 9. 두가지 링 하이브리드 발룬 설계

Fig. 9. Design of Ring Hybrid Balun in two cases

IV. 제작 및 측정

위에서 설계된 발룬중, Case #1 에 해당하는 발룬을 제작하였다. 기판은 Teflon(비유전율 2.5) 0.5T 기판을 사용하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

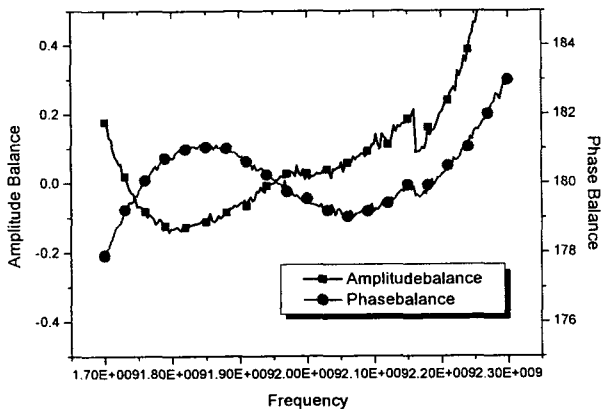
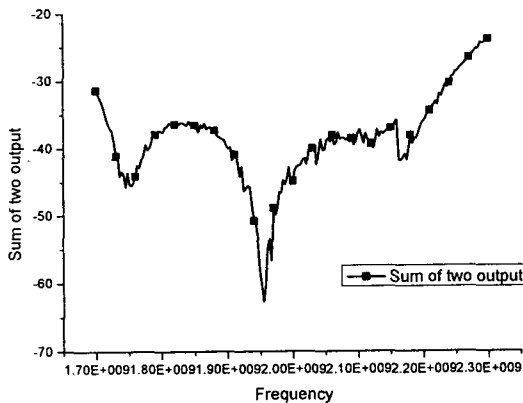


그림 10. 링 하이브리드 발룬의 측정 결과

Fig. 10. Measurement result of Ring Hybrid Balun

V. 결론

180° 하이브리드의 출력에 $\lambda/4$ 단락 스타브를 부착함으로써 중심주파수 이외의 대역에서 틀어지는 위상을 보정해

줄 수 있었으며, 이와 더불어 $\lambda/4$ 스타브와 저항을 직렬 연결하여 진폭을 보정해 줄 수 있었다. 이 기본 개념을 바탕으로 넓은 대역을 갖는 180° 하이브리드 발룬을 설계 및 제작하였다.

감사의 말

본 연구는 IT-SOC 의 부분 지원을 받았습니다.

참고문헌

[1] Hiroshi Okabe, Christophe Caloz, Tausuo Itoh, Member, IEEE, "A Compact Enhanced-Bandwidth Hybrid Ring Using an Artificial Lumped-Element Left-Handed Transmission-Line Section", 2004 IEEE MTT-S Int. Microwave. Symp. Dig

[2] chun-Hsiang Chi and Chi-Yang Chang, Member, IEEE, "A New Class of Wideband Multisection 180° Hybrid Rings Using Vertically Installed Planar Couplers", 2006 IEEE MTT-S Int. Microwave. Symp. Dig



나 원

2006년 8월 서울시립대학교 물리학과 졸업(이학사) 2006년 8월 ~ 현재 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터 공학부 석사 과정



조 일 현

2005년 2월 서울 시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 (공학사) 2005년 3월 ~ 현재: 서울 시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 석사과정



이 문 규

1992년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 1992년 3월 ~ 1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1994년 3월 ~ 1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)

1999년 2월 ~ 2002년 2월: 한국전자 통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원

2002년 3월 ~ 2006년 3월: 서울 시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 조교수

2006년 4월 ~ 현재: 서울 시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 부교수