

초음파 홀로그램의 구성과 컴퓨터 영상재현

The Construction of Ultrasonic Hologram and the Image Reconstruction Using Computer

장 성 환*, 고 대 식**, 전 계 석*

(S. H. Jang, D. S. Ko, K. S. Jun)

요 약

본 논문에서는 컴퓨터에 의한 초음파 홀로그램의 구성과 영상 재생방법을 연구하였으며 이를 광학적 재생방법과 비교분석하였다. 초음파 홀로그램은 초음파 변환자를 기계적으로 c-scan (128×128 step)하여 구성하였고 물체에 대한 영상은 Rayleigh-Sommerfeld 식과 DFT 알고리즘을 이용하여 컴퓨터 재생하였다.

본 실험에서는 중심주파수가 5MHz이고 초점 거리가 5cm 인 초음파 변환자와 기계적인 c-scanning 시스템을 사용하여 음향 홀로그래피 시스템을 구성하였고 알루미늄 판에 S자 형태를 새긴 샘플을 제작하여 실험하였다. 실험결과 컴퓨터에 의해 재생된 영상은 실제와 동일한 고질의 영상임을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, the construction of ultrasonic hologram and the image reconstruction using computer have been studied, and it has been compared with optical reconstruction. The ultrasonic hologram has been constructed using c-scanning method(128×128 step)and the image of the object has been reconstructed by computer using Rayleigh-Sommerfeld formula and DFT algorithm.

In this experiment, the holography system has been built with the transducer of 5MHz center frequency and 5cm focal length, and the mechanical c-scanning system. It has been shown that the reconstructed image using computer for aluminum plane with the "S" shaped defect has been displayed image of high quality.

I. 서 론

홀로그래피는 물체의 영상에 대한 정보를 물체에서 산란된 파와 기준파의 간섭신호로써 2차원 평면에

기록한 후, 기록된 평면과 기준파와의 회절에 의해 영상을 재생하는 기술이다. 일반적으로 홀로그래피에 이용되는 파는 코히런트(coherent)한 레이저나 마이크로웨이브, 또는 음파등으로서 간섭성을 만족해야 한다. 특히 음파는 고체나 수중을 잘 투과하는 장점이 있으므로 물체 내부에 대한 영상 시스템에 유용하게

* 경희대학교 전자공학과

** 목원대학 전자공학과

응용될 수 있다.¹⁰⁾ 초음파 홀로그래피는 1966년 미국의 Thurstone에 의해 처음 발표된 후 비파괴 검사, 의료 진단, 수중 탐사등에서 광범위하게 응용되고 있으며, 현재 활발히 연구가 진행중에 있다. ⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

초음파 홀로그래피에는 스캐닝 방법과 액체 표면을 이용한 방법이 있으며 스캐닝 방법을 이용한 초음파 홀로그래피는 광학 장치가 필요없이 샘플한 데이터를 컴퓨터에 의해 3차원으로 재현할 수 있고, 디지털 영상 처리 기술에 응용할 수 있는 장점이 있다. ⁽³⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

본 연구에서는 초음파 홀로그래피를 비파괴검사 분야에 응용하기 위하여 중심주파수 5MHz, 초점거리 5cm인 초음파 변환자를 기계적으로 스캐닝하고 영상 데이터의 획득과 재생을 컴퓨터에 의하여 수행하는 초음파 홀로그래피 시스템을 설계 및 구성 하였다.

실험을 위하여 S자(12×12mm) 결함을 새긴 알루미늄 샘플을 선택하였고 제작된 위상검출기를 통하여 얻어진 영상데이터를 A/D 변환시켜 획득(acquisition) 하였으며 Rayleigh-sommerfeld 식을¹²⁾ 이용하여 영상을 컴퓨터 재생하였다.

II. 영상의 기록과 재생이론

II-1. 홀로그래피에 의한 영상정보의 기록

홀로그래피에서 홀로그램은 영상정보가 포함된 음향파의 위상과 진폭을 2차원 평면에 기록한 것이며 홀로그램은 물체에서 산란된 파와 기준파와의 간섭으로 기록된다. 기록하고자 하는 물체에서 산란된 음파 신호를 A_1 이라 하고 기준 음파신호를 A_2 라고 하면 A_1, A_2 는 식(1)(2)로 나타낼 수 있다.

$$A_1(x,y) = a_1(x,y) \cos(\omega t + \phi_1(x,y)) \quad (1)$$

$$A_2(x,y) = a_2(x,y) \cos(\omega t + \phi_2(x,y)) \quad (2)$$

그리고 두 음파가 합쳐진 영역에서 자동검파기(square-law detector)로 수신된 신호는 식(3)(4) 같이 된다.

$$Y(t) = |A_1(x,y) + A_2(x,y)|^2 \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2} [\{ a_1^2(x,y) + a_2^2(x,y) \} + a_1^2(x,y) \cos(2\omega t + 2\phi_1(x,y))$$

$$+ a_2^2(x,y) \cos(2\omega t + 2\phi_2(x,y))$$

$$+ 2a_1(x,y) a_2(x,y) \cos(2\omega t + \phi_1(x,y) + \phi_2(x,y))$$

$$+ 2a_1(x,y) a_2(x,y) \cos(\phi_1(x,y) - \phi_2(x,y)) \quad (4)$$

그리고 식(4)의 신호를 저역통과필터에 통과시키면 $Y(t)$ 는 식(5)와 같이 표현된다.

$$Y(t) = \frac{1}{2} \{ a_1^2(x,y) + a_2^2(x,y) + 2a_1(x,y) a_2(x,y) \cos(\phi_1(x,y) - \phi_2(x,y)) \} \quad (5)$$

식(5)에서 음파 A_1 의 위상이 기록되었음을 알 수 있다.

그림1.은 전자적 기준신호를 이용한 홀로그램 구성 방법에 대한 모델이다. 그림1.에서와 같이 기준 음파의 source가 무한히 먼곳에 있다고 가정하고, 기준 음파 A_2 대신 전자방식의 기준신호(electronic reference) A_3 를 쓰면 잡음과 수조 내벽의 반향 영향등을 많이 제거할 수 있다. ⁽¹⁾⁽⁶⁾

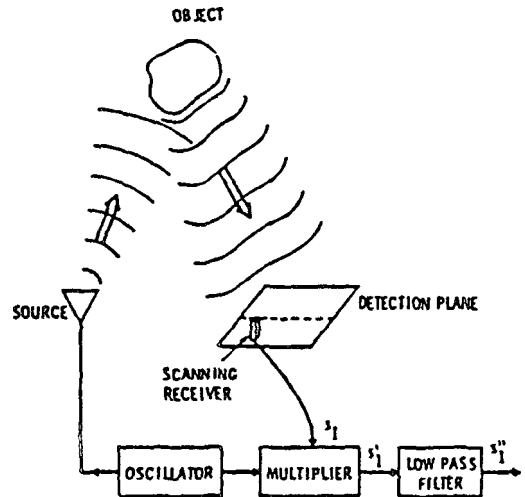


그림 1. 전자방식의 기준 신호를 이용한 홀로그램의 구성
The construction of the Hologram using electronic reference

위와같은 모델에서 전자방식의 기준 신호를 A_3 이라 할 때 최종 출력 $Y_2(t)$ 는 식(6)(7)과 같이 구할 수 있다.

$$A_3 = a_3 \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$Y_2(t) = \frac{1}{2} a_3 a_1(x,y) \cos(\phi_1(x,y)) \quad (7)$$

식(6)(7)은 음파 기준신호를 사용한 식(5)의 결과에 비해 불필요한 항이 제거되었음을 알 수 있다.

II-2. 영상의 재생

영상정보가 기록된 홀로그래프로 부터의 영상재생은 기록된 간섭신호 무늬의 기준파와의 회절에 의해 수행된다. 기록에 사용된 기준파 a_r 는 재생할 때에도 사용되며, 이때 재생된 파(reconstructed wave) a_r 는 식(8)과 같으며 기록했던 신호 A_1 의 진폭이 변조되어 재생되었음을 알 수 있다.

$$a_r = K Y(x,y) A_2(x,y) = \frac{1}{2} K a_2^*(x,y) a_1(x,y) \cos(\omega t + \phi_1(x,y)) \quad (8)$$

II.3 Rayleigh-Sommerfeld 식에 의한 회절의 해석

그림 2.에서와 같이 단일한 Source로부터 나온 코히어런트한 파가 Aperture를 갖는 평면 스크린에 입사될 때 스크린으로부터 회절된 파를 r만큼 떨어진 거리에서 해석하면 Rayleigh-Sommerfeld 식에 의하여 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \iint U(P_1) \frac{\exp[jkr_{01}]}{r_{01}} \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) ds \quad (9)$$

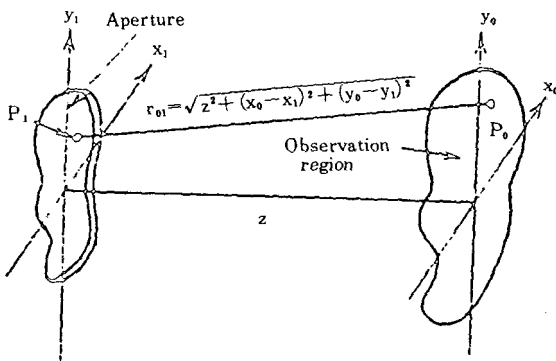


그림 2. Aperture를 가진 스크린으로부터의 파의 회절
Diffraction of the wave by an aperture in a plane screen.

이때 스크린과 관측점까지의 거리가 Aperture의 크기에 비해 매우 크다면

$$\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) = 1 \quad (10)$$

이라 할 수 있다. 그리고 스크린부터 관측점까지의 거리 r_{01} 은

$$r_{01} = \sqrt{z^2 + (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \quad (11)$$

이므로 식(9)는 식(12)(13)(14)와 같이 된다.

$$U(x,y) = \frac{\exp[jkz]}{j\lambda z} \iint U(x_1,y_1) \exp[jk\sqrt{z^2 + (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}] ds \quad (12)$$

$$= \frac{\exp[jkz]}{j\lambda z} \iint U(x_1,y_1) \exp[j\frac{k}{2z} \{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2\}] ds \quad (13)$$

$$= \frac{\exp[jkz]}{j\lambda z} U(x_1,y_1) * \exp(j\frac{k}{2z} (x_1^2 + y_1^2)) \quad (14)$$

식(14)에서 스크린으로부터 회절되어 r만큼 떨어진 관측점에서의 파는 콘볼루션의 원리를 이용하여 구할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 스크린을 홀로그래프라고 하고 기준파가 홀로그래프에 입사된다고 가정하면 재생되는 파는 기준파와 홀로그래프의 콘볼루션으로써 구할 수 있다.⁽¹²⁾⁽¹³⁾공간 영역에서의 콘볼루션은 공간 주파수 영역에서의 곱으로 표현할 수 있으므로 식(14)는 식(15)로 변환된다.

$$U(x_0,y_0) = \frac{1}{j\lambda z} \exp[jkz] \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}[U(x_1,y_1)] \cdot \mathcal{F}[\exp(j\frac{z}{\lambda k} - (x_1^2 + y_1^2))]] \quad (15)$$

그러므로 공간주파수 영역에서의 재생파는 홀로그래프 데이터의 푸리에 변환값과 전달함수와 곱으로서 구할 수 있으며, 이를 다시 역 푸리에 변환함으로써 공간 영역에서의 재생파를 구할 수 있다.

III. 실험 및 결과

III-1 시스템 구성 및 데이터 획득(data acquisition)

본 실험에서는 송수신 장치로서 비파괴검사에 많이 이용되는 주파수 영역인 5MHz 중심주파수와 5cm의 촛점거리를 갖는 초음파 변환자를 사용하였고 감쇠를 줄이기 위하여 음파의 전달매질로서 증류수를 사용하였으며 그림 3.은 실험장치의 불럭선도, 사진 1.은

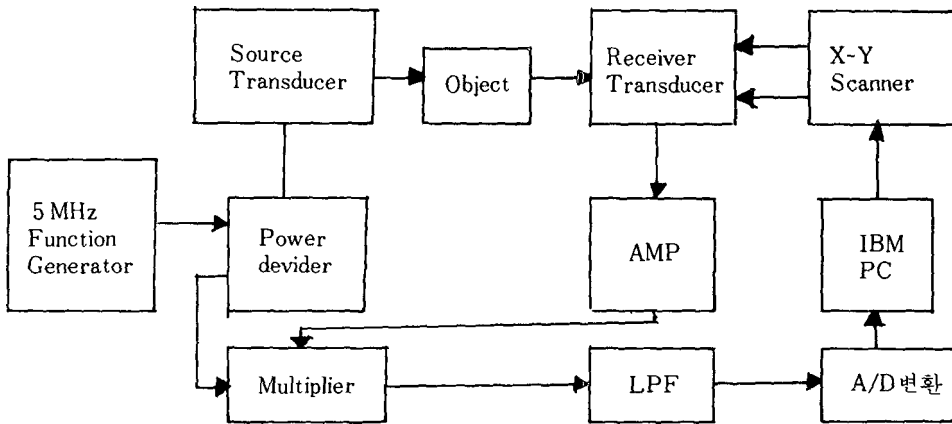


그림 3. 실험장치의 블록선도
The block diagram of the experimental equipment.

샘플과 초음파 변환자를 배치한 모습이다.

실험에서 샘플로는 샘플은 두께 1.5mm, 크기 8×1 2cm의 알루미늄판에 S자(12×12mm)를 새긴 것을 사용하였으며, 샘플에서 산란된 음파를 수신측 변환자가 3.015×3.015cm의 스캔면적을 스캔하면서 수신하도록 하였다. 위상변화에 커다란 영향을 미치는 기계적인 스캐너의 진동을 최소화하기 위하여 샘플과 스캐너를 분리 설치하였고 스캔하면서 한 지점에서 하나의 데이터를 획득하였으며 수신신호는 미약하므로 2단 증폭하였다. 수신된 신호와 전자방식의 기준신호의 간섭은 multiplier를 통하여 수행하였고 위상변화는 직접 제작된 위상검출기에 의하여 진폭으로 변환한 후 A/D 변환시켜서(128×128×8으로 샘플링) 컴퓨터에 저장하였다. 이때 스캐너로 사용된 스텝모터와 A/D변환은 IBM PC로 제어하여 정확히 동기되도록 하여야 하며 획득된 데이터는 디지털 영상처리 기법과 푸리에 변환 기법을 이용하여 처리하였다.

III-2 컴퓨터에 의한 영상의 재생

초음파 홀로그래피 시스템에서 영상 재생은 구성된 홀로그래피데이터를 Rayleigh-Sommerfeld 식과 DFT 알고리즘에 의해 처리한 후 모니터에 디지털 영상처리 기법에 의하여 디스플레이 하는 단계로 수행된다.

수신된 홀로그래피 데이터로부터 Rayleigh-Sommerfeld 식을 이용하여 영상을 얻는 과정은 다음과 같다.

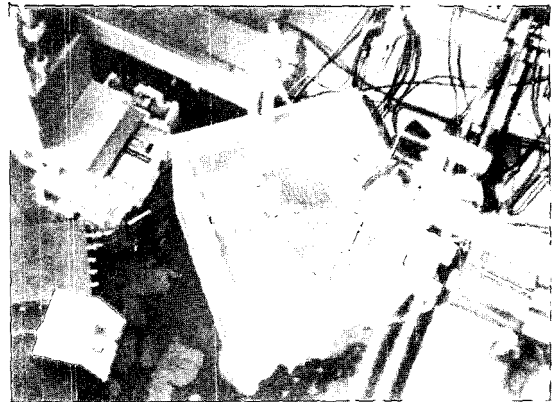


사진 1. 샘플과 음향 변환자의 배치
The position of the sample and the Acoustic transducer

- (1) 홀로그래피 데이터 $U(x,y;0)$ 를 수신한다.
- (2) 공간 주파수 영역에서의 홀로그래피 스펙트럼 $S(f_x, f_y; 0)$ 를 얻기위해 2 차원 푸리에 변환을 수행한다.
- (3) 관측점에서 스펙트럼 $S(f_x, f_y; z)$ 를 얻기위해 $S(f_x, f_y; 0)$ 에 전달함수 $H = \exp(-2\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2))$ 를 곱한다.
- (4) 구해진 $S(f_x, f_y; z)$ 의 2차원 역 푸리에 변환을 하여 $U(x,y;z)$ 를 구한다.
- (5) $|U(x,y;z)|$ 를 plot 한다.

그림4는 홀로그래피 평면과 스펙트럼 평면과의 관계를 나타낸 것이다.

그림 4에서 홀로그래피 평면이 $L_x \times L_y$ 이고, 샘플한 데이터의 갯수가 $M \times N$ 일때 스펙트럼은 이산 푸리에

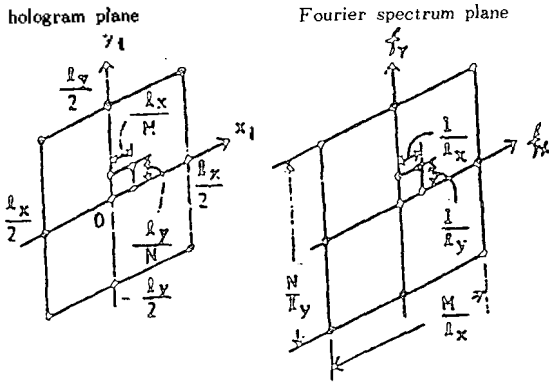


그림 4. 홀로그램 평면과 스펙트럼 평면과의 관계
The relation of Hologram Plane and Spectrum plane

변환(DFT) 알고리즘에 의해 구하여진다.

m, n 을 공간에서의 샘플링 좌표, m', n' 을 공간 주파수 영역에서의 샘플링 좌표라고 하면

$$S(m', n') = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} U\left(\frac{L_x}{M} m, \frac{L_y}{N} n\right) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{m'm}{M} + \frac{n'n}{N}\right)\right] \quad (16)$$

$$H(m', n') = \exp\left[-j\pi\lambda z \left\{ \left(\frac{m'}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n'}{L_y}\right)^2 \right\}\right] \quad (17)$$

이 된다.

사진 2와 사진 3은 컴퓨터에 의해 얻어진 초음파 홀로그램과 재생영상의 모습이다.

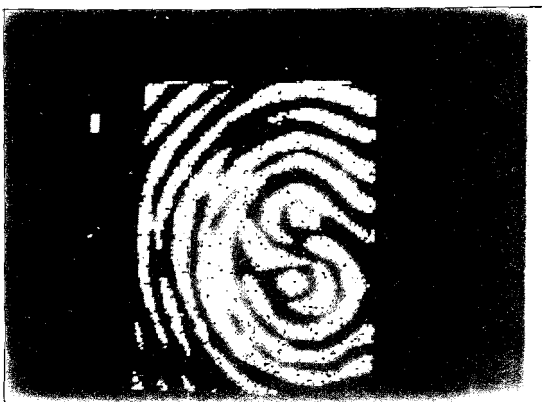


사진 2. 컴퓨터에 의하여 구성된 홀로그램
The constructed Hologram using computer.

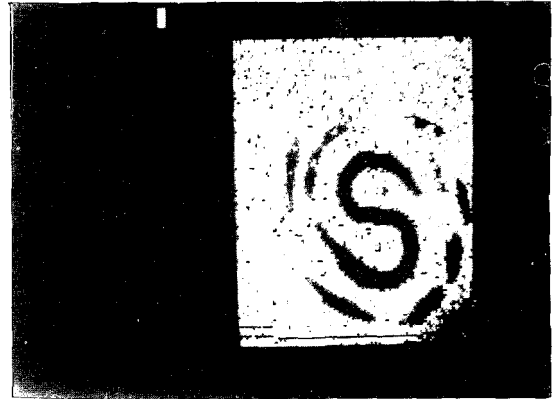


사진 3. 컴퓨터에 의하여 재생된 영상
The reconstructed image using computer method.

사진 2,3에서, 홀로그램 데이터에는 스캐너의 진동에 의해서 잡음이 많이 포함되어 있으며, 영상이 재생될 때 이 잡음의 영향을 다소 받았으나 컴퓨터에 의하여 재생된 영상은 원래의 영상과 잘 일치됨을 볼수 있다. 이와같이 본 연구에서 제시한 컴퓨터 영상 재생 방법은 종래의 광학적 재생 방법에 비하여 고도의 실험장치가 불필요하고 최근 활발히 연구되고있는 디지털 영상처리 기법을 용이하게 이용할 수 있는 장점이 있기 때문에, 첨단 재료분야의 비파괴검사에 매우 유용한 도구임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 중심 주파수 5MHz, 초점거리 5cm 인 초음파 변환자를 사용하고 가계적인 스캔 방법과 전자방식의 기준신호를 이용하여 컴퓨터 처리된 양자화 홀로그램을 구성하였으며 Rayleigh-sommerfeld 식과 DFT 알고리즘을 이용한 영상재생 방법을 연구 분석하였다.

실험결과, 재생된 영상은 주변에 다소 잡음이 포함되었으나 원래의 결합영상인 'S'형태가 뚜렷한 매우 고질의 영상임을 확인하였다. 영상에 포함된 잡음은 전자방식의 기준신호를 이용함으로써 외부와 수조면의 반향에 의한 잡음은 제거되었지만 스캐너의 진동에 의한 잡음과 양자화 잡음등이 영상에 포함되었다고 판단된다.

본 연구의 결과, 컴퓨터에 의한 영상재생 방법은 비파괴검사분야의 유용한 영상시스템임을 알 수 있었고 특히 레이저와 광학장치가 불필요하고 스캐닝 면

적, 샘플링 갯수등을 용도에 따라 소프트웨어로 조정할 수 있으며 다양한 디지털 신호처리의 응용이 가능한 장점이 있음을 확인하였다. 앞으로 진동에 의한 잡음을 제거하고 3차원 영상의 구현등에 관한 연구가 계속된다면 첨단재료분야나 의료분야, 그리고 군사분야등 그 응용범위를 확대할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. B.P.Hildebrand, B.B.Brenden "An Introduction to Acoustical Holography," Plenum Press 1972.
2. Joseph W.Goodman "Introduction to Fourier Optics," mcGraw Hill 1968 pp 30~60
3. Yoshinao Aoki "Image reconstruction by computer in Acoustical Holography," Acoustical Holography Vol 5, pp5 51-572
4. J.W.Goodman "Digital image formation from detected holographic data," Acoustical Holography Vol 1, 173~185.

5. J.Ylitao, E.alasaarella, A.Tauriainen "Three dimensional ultrasound C-scan imaging using holographic reconstruction" IEEE Transactions on Ultrasonic Vol UFFC 33 No.6 1986 pp 731~738
6. Glen Wade "Acoustic Imaging" Plenum Press, 19776 pp 79~98.
7. B.Hildebrand, T.Davis, A.Boland, R. silta "A portable digital ultrasonic holography system for imaging flaws in heavy section metals" IEEE trans.son. & ultrason Vol su-31 pp 287-294 July 1984
8. A.Boyer, J.Jordan, D.Rooy "Computer reconstruction of images from ultrasonic hologram" Acoustical Holography Vol2, pp 211-223
9. J.Powers, J.Landry, G.Wade "Computed reconstruction from phase only an amplitude only holograms Acoustical holography" Vol 2, pp185-202
10. T.Huang "Digital holography" IEEE Vol.59, No.9 September 1971. 1335-1346
11. "초음파 홀로그래프의 제작과 광학적 영상 재생," 황선에 경희대학교 전자공학과 석사학위논문, 1989.2

▲장성환

1964년 3월 10일생
 1989년 2월 경희대학원전자공학과 졸업(공학석사)
 1989년 9월~현재: 석사장교
 ※관심분야: 비파괴검사 장비, 초음파 시스템

▲고대식

1959년 4월 24일생
 1987년 8월 경희대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1987년 9월~현재: 동대학원 박사과정
 1989년 9월~현재: 복원대학 전자공학과 전임강사
 ※관심분야: 초음파영상시스템, 전자회로, 신호처리



▲전계석

1946년 9월 30일생
 1969년 연세대학교 전기공학과 공학사학위 취득
 1973년 연세대학교 대학원공학석사학위 취득
 1983년 연세대학교 대학원공학박사 학위취득
 1984년 1월~1985년 1월 미국 스탠포드 대학교 W. Hansen Lab.



현재: 경희대학교 전자공학과 교수