

초음파 전동기와 압전 세라믹 액추에이터

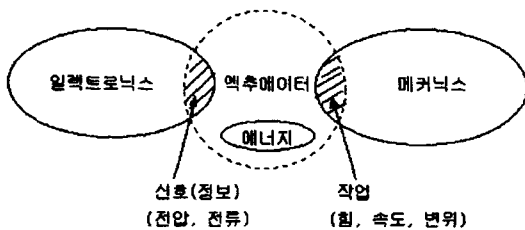
김진수, 이덕출*

한국교원대학교, 인하대학교*

I. 서론

액추에이터(actuator)란 입력 에너지를 기계적 출력 에너지(displacement/force)로 변환할 수 있는 변환기(transducer)로 정의할 수 있다. 액추에이터의 역사는 인류 발생의 역사와 함께라고 생각할 수도 있는데, 이는 인간이 어떠한 일을 하고자 할 때 그 효율을 높이기 위하여 도구를 사용하였다. 그 후로 오랜 세월을 거쳐 과학 기술과 산업이 발전하였고 특히 산업 생산 현장 및 정보통신기기 등에서는 다양한 고성능의 액추에이터가 필요하게 되었다.

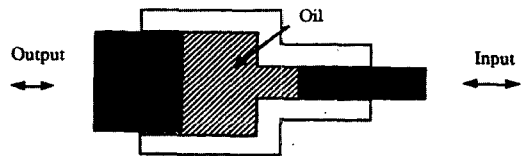
최근 산업의 생산 방식은 CAD, CAM, FA, CIM으로 점점 고도의 자동화로 향하고 있으며, 메카트로닉스(mechatronics)라는 용어 자체가 전자 기술(electronics)을 기계 기술(mechanics)과 접목시킴으로써 각종 시스템의 신뢰성과 정밀도를 높일 수 있는 에너지를 얻을 수 있는 것이다. 이를 위하여 필요한 전자 소자가 액추에이터이며, 액추에이터의 개념도를 그림 1에 나타낸다.



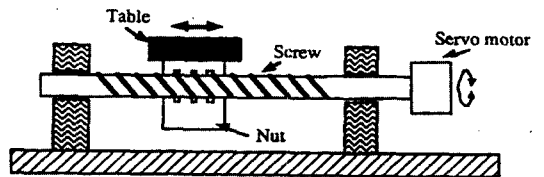
<Fig. 1> Concept of actuator

II. 기계식 액추에이터

기존에 사용하고 있는 액추에이터는 공기압(air pressure)이나 유압(oil pressure) 등을 많이 사용하고 있으며, 이들 방식의 특징은 변위 범위가 크지만, 응답 속도나 변위 정밀도는 작다. 그림 2에 나타낸 것은 종래에 많이 사용하는 액추에이터인데, 그림 2(a)는 유압식의 변위 축소기구(displacement reduction mechanism of oil pressure type)를 나타낸 것으로, 유압 실린더의 직경의 크기를 바꿈으로써 변위의 축소를 실현시킬 수가 있고, 이는 변위 크기가 크고 응답이 늦다. 그림 2(b)는 전동기를 사용한 변위 축소 기구로써, 나사 이송기구(screw positioning mechanism)에 의하여 작업대를 쉽게 이동시킬 수 있으며, 정밀도는



a) Oil pressure cylinder



b) Servo Motor

<Fig. 2> Structure of the conventional actuators

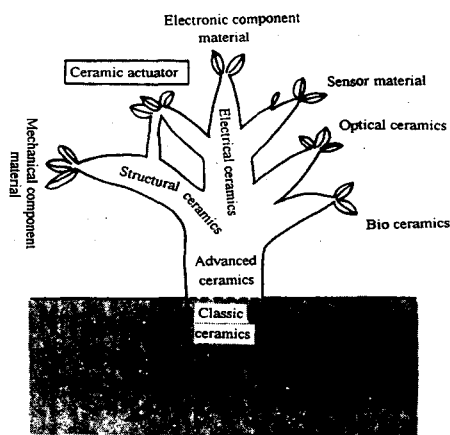
〈표 1〉 Displacement characteristics of conventional actuators.

Drive Source	Name	Displacement Range	Displacement Accuracy	Generative Force	Response Speed
Air Pressure	Air pressure motor	Rotation	—	5kgm	10sec
	Air pressure cylinder	100mm	100 μ m	10 ⁻² kg/mm ²	10sec
Oil pressure	Oil pressure motor	Rotation	—	10kgm	1sec
	Oil pressure cylinder	1000mm	10 μ m	10kg/mm ²	1sec
Electricity	AC servo motor	Rotation	—	3kgm	100msec
	DC servo motor	Rotation	—	20kgm	10msec
	Step motor	1000mm	10 μ m	30kg	100msec
	Voice coil motor	1mm	0.1 μ m	30kg	1msec
	PIEZOELECTRIC ACTUATOR	0.1mm	0.01 μ m	3kg/mm ²	0.1msec

나사의 정밀도에 달려있다. 이러한 기계식 액츄에이터의 경우는 소형화가 곤란하므로 최근에는 전자식 액츄에이터에 대한 연구가 진행되고 있다. 표 1은 구동원(drive source)에 따른 변위 범위(displacement range), 변위 정밀도(displacement accuracy), 발생력(generative force), 응답속도(response speed) 등을 나타낸 것이다.

표 1에서 보는 바와 같이 압전 액츄에이터(piezoelectric actuator)는 크기가 매우 작고 변위 범위는 작지만, 변위 정밀도, 발생력, 응답 속도는 빠름을 알 수 있다.

electric ceramics)와 전왜 세라믹스(electrostrictive ceramics)를 액츄에이터에 사용하고 있다.



〈Fig. 3〉 Ceramic actuator in advanced ceramics.

III. 세라믹 액츄에이터

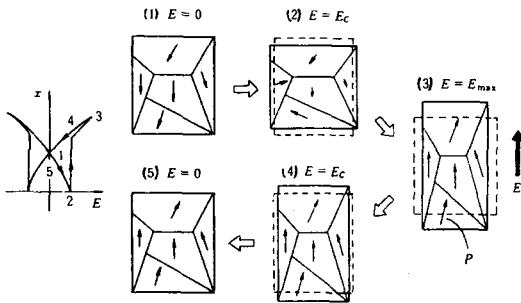
기계식 액츄에이터에 비하여 전자식 액츄에이터의 장점을 표1에 나타냈는데, 전자 액츄에이터는 소형의 크기로 만들 수 있으며, 사용 재료로는 전자 세라믹스를 사용하고 있다.

그림 3에서 보는 바와 같이 세라믹 액츄에이터(ceramic actuator)는 전자 세라믹스(electronics ceramics)와 구조 세라믹스(structural ceramics)의 기능 영역의 조합에 의하여 개발되고 있고, 특히 전자 세라믹스 중에서는 압전 세라믹스(piezo-

IV. 압전 세라믹스의 분극 반전 모델

세라믹 액츄에이터를 제작하기 위하여 사용되는 압전 세라믹 재료의 물리적 성질과 종류에 대하여는 다른 필자가 자세히 설명할 것이다. 압전 세라믹스에서 발생하는 변형의 미시적 기원(micro-

scopic origins of piezoelectric strains)에 관한 이론으로는 전계 유도 변형(field induced strain), 강체 이온 모델(rigid-ion model), 각 모델(shell model), 기타 여러 가지 모델이 있다. 특히 강유전체의 분역 회전에 따른 변형(strain accompanying the ferroelectric domain rotation)을 이용하여 변위(displacement)를 얻게 되는 세라믹 액츄에이터는 대부분이 전계 유도 변형 모델이 적용된다. 그림4는 강유전체 세라믹스에 있어서 외부에서 전계 인가시 분역 재배향(domain reorientation)에 따른 재료의 변형(strain) 상태를 나타낸 것이다.



(Fig. 4) Schematic explanation of the strain change in a ferroelectric ceramic associated with the polarization reorientation

우선 초기 상태로써 그림4의(1)과 같이 아래 방향으로 분극 처리된 시편을 고려하기로 한다. 전계를 윗방향으로 서서히 인가하게 되면, 분극 방향과 반대이므로 시편의 크기는 처음에는 수축(shrink)하게 된다. 그러다가 점2에 이르면 항전계 E_c (coercive field)에서 변형(deformation)은 최소가 되는데, 이는 분극 반전(polarization reversal)이 각각의 그레인(grain)에서 시작이 되는 것이다.

점2의 항전계 E_c 이상에서 결정체는 그림4의(3)과 같이 $E=E_{max}$ 될 때까지 팽창하게 된다.

E_{max} 부근에서는 반전할 수 있는 분극(reversible polarizations)은 모두 반전하고 있고, 결정체는 또 다시 작은 히스테리시스로써 압전 양상(piezoelectric behavior)을 나타낸다.

전계가 감소해 가는 과정에서는 그림4의(2)와

같은 분역 회전은 필요없게 되고, 전계가 0으로 될 때까지 변형(strain)은 단조롭게 감소하게 되는데, 이를 그림4의(4)에 나타낸다. 최종 상태로써 그림4의(5)의 $E=0$ 에서는 초기 상태와 같지만, 모든 분극 방향은 정반대로 되어 있을 뿐이다. 만일 고주파 전계를 가하게 되면 분극의 반전에 따른 세라믹스의 변형에 의하여 상하로 압전체가 진동하게 될 것이다.

이때 종방향의 신장 변형(longitudinal expansion strain)에 대한 횡방향의 수축 변형(transverse contraction strain)의 비인 포아송비(poissons ratio) σ 는 페로브스카이트형 압전 세라믹스에서는 약 0.3정도의 값을 갖는다.

V. 세라믹 액츄에이터용 압전 재료

세라믹 액츄에이터에 사용되는 압전 재료로는 ABO_3 구조를 갖는 페로브스카이트형이며, ABO_3 형의 재료에는 결정 대칭성이 높은 고온의 상유전상(paraelectric)에서 상전이점인 큐리 온도(Curie temperature) 이하에서는 비중심대칭의 강유전상(ferroelectric) 구조를 갖기 때문이다. 세라믹 재료는 전계 유도 변형(field-induced strain)에서 항전계(coercive field)의 값에 따라 분류하는 것이 편하다.

즉, 항전계 E_c 가 10kV/cm보다 큰 경우의 재료는 hard piezoelectrics라 하고, E_c 가 1~10kV/cm 정도의 경우의 재료는 soft piezoelectrics라고 부른다.

Hard 압전체는 넓은 범위에 걸쳐 선형 동작 영역을 나타내지만 비교적 작은 변형의 크기를 나타내고, soft 압전체는 커다란 전계 유도 변형을 나타내지만 비교적 큰 히스테리시스를 나타낸다. 반면에 1kV/cm이하의 매우 작은 항전계를 갖는 재료를 전왜 재료(electrostrictor)라고 한다. 이들 세가지 액츄에이터용 재료는 상전이 온도(큐리 온도)가 다른데, hard 압전체의 큐리 온도는 250℃ 이상이고, 전왜 재료는 상온보다 낮은 큐리 온도를

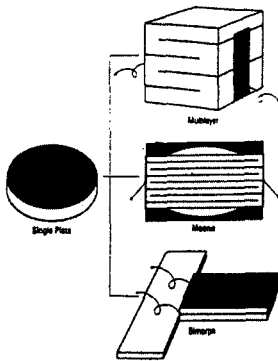
갖으며, soft 압전체는 150~250°C의 큐리 온도를 갖고 있다.

세라믹 액츄에이터에 사용되는 압전 재료로는 Pb(Zr,Ti)O₃(PZT), PbTiO₃계(PT), (Pb, La)(Zr,Ti)O₃(PLZT), PZT-based 3성분계 등이 있다.

VI. 세라믹 액츄에이터의 기본 구조

압전 세라믹 재료로 만드는 액츄에이터는 그림 5에서 보는 바와 같이 적층형(multilayer), 바이몰프(bimorph) 등으로 분류한다. 이때 multilayer형 액츄에이터는 얇은 세라믹 sheet를 수십개씩 적층시키고 그 사이 사이에 전극을 만드는 구조로 되어 있는데, 장점으로는 low driving voltage (100V), quick response speed(10 μsec), high generative force(100kgf) 및 high electro-mechanical coupling factor 등이다.

그리고 bimorph형은 금속 탄성체와 2개의 압전 세라믹스가 접착되어 있는 구조를 가지며, 수백 μm의 커다란 bending displacement가 발생되나, response가 늦고(1 msec), generative force가 작다(100gf). 특히 multilayer와 bimorph의 중간 특성을 나타내는 것으로는 “moonie” 액츄에이터가 있다.

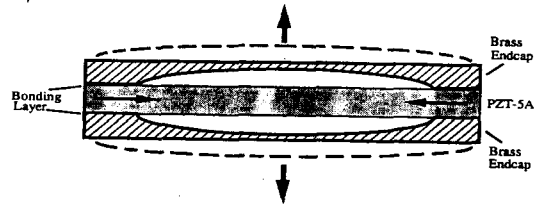


〈Fig. 5〉 Typical designs for ceramic actuator multilayer, moonie and bimorph.

VII. 무니와 심벌 액츄에이터

압전 세라믹스로 만든 액츄에이터에서 작은 변위를 증폭시키기 위하여 처음으로 고안된 것이 “moonie” 액츄에이터이다. 무니(moonie) 액츄에이터는 multilayer와 bimorph 액츄에이터의 중간 특성을 가지는데 multilayer보다 더 큰 변위(100 μm)를 나타내고, bimorph보다는 더 빠른 response (100 μsec) 속도로써 훨씬 큰 generative force (10kgf)를 나타낸다.

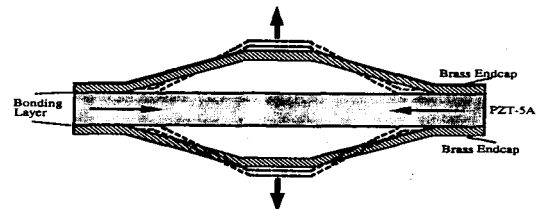
Moonie의 구조는 그림 6에 나타내는 바와 같이 PZT계의 압전 세라믹스 상하에 달 모양의 금속 endcap을 접착시켜 둠으로써 이 금속 엔드캡이 세라믹스의 경방향의 변위를 엔드캡의 수직 방향으로 운동하도록 증폭 변환시키는 기계적 변환자 역할을 한다. 즉 압전계수 d₃₃와 d₃₁이 액츄에이터의 축방향 변위(axial displacement)에 기여하게 된다.



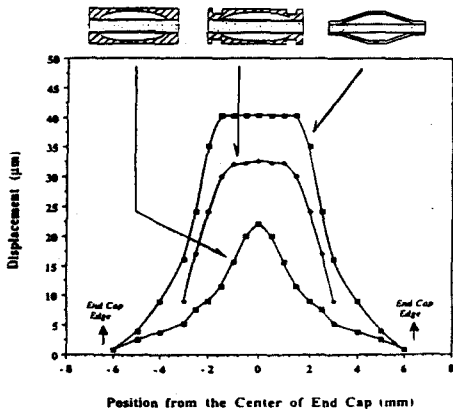
〈Fig. 6〉 Structure of a moonie actuator.

다음은 moonie 액츄에이터의 금속 endcap 구조를 심벌 모양으로 새롭게 변환하여 만든 것이 심벌(cymbal) 액츄에이터인데 이를 그림 7에 나타낸다.

이와 같은 cymbal 액츄에이터에서 변위는 moonie에 비하여 2배로 증가하게 되며, 발생 변위도 균일해지는데, 이들의 변위의 크기를 그림 8에



〈Fig. 7〉 Structure of a cymbal actuator.

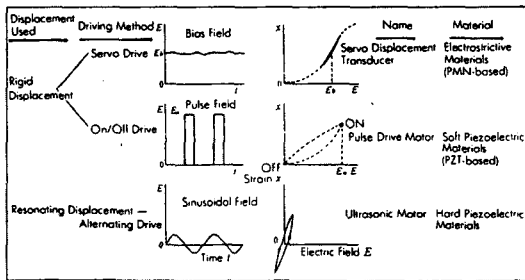


(Fig. 8) Displacement evolution in moonie and cymbal actuator.

나타낸다.

VIII. 압전 세라믹 액츄에이터의 응용 분야

압전 및 전왜 액츄에이터는 device에 인가하는 driving voltage의 유형과, voltage에 의해서 유도되는 strain의 속성에 따라 크게 둘로 나눌수 있으며, 이를 그림 9에 나타낸다.



(Fig. 9) Classification of piezoelectric and electrostrictive actuators.

하나는 strain이 인가된 dc field를 따라 한쪽 방향으로 유도되는 rigid displacement device이고, 다른 하나는 alternating strain이 기계적 공진주파수에서 ac field에 의하여 여기되는 resonating displacement device이다. 전자에 해당하는 것은

그림 9에서와 같이 크게 둘로 나누는데, position-detection signal을 통하여 feedback에 의해 제어되는 servo displacement transducer(positioner)와, dot matrix printer에 적용되는 단순한 on-off switching mode로 동작되는 pulse drive motor이다. 후자에 해당하는 것은 ultrasonic motor 등인데, 이것은 인가 전압에 직접 비례하는 것이 아니고, 대신에 drive frequency의 조절에 의존된다. 특히 초음파 전동기의 압전 세라믹 재료로서 요구되는 중요한 사항은 압전 상수(piezoelectric coefficient)가 아니고 heat generation을 최소화하기 위해서 low dielectric loss와 high mechanical quality factor를 갖는 hard 압전체의 개발이 필요하다.

압전 세라믹스를 사용하여 만드는 초음파 전동기에 관한 자료는 본 연구자가 발표한 참고문헌 등의 논문에서 자세히 설명하고 있다.

이러한 점에서 압전 세라믹 액츄에이터가 현재 응용되고 있거나 응용 가능한 분야를 들면 다음과 같다.

(1) Servo displacement transducer 응용 분야

- High precision interferometric dilatometer,
- Deformable mirrors, Microscope stages
- Precision linear motion guide mechanism,
- Cutting error correction mechanism
- Oil-pressure servo valves, VCR head tracking actuators
- Vibration suppression systems

(2) Pulse drive motor 응용 분야

- Swing CCD image sensor, Inchworm devices,
- Dot-matrix printer heads
- Ink-jet printers, Piezoelectric relays

(3) Ultrasonic motor 응용 분야

- Autofocus mechanism of cameras, Watch,
- Card-forwarding device
- Paper sheet-forwarding device, Positioning

mechanisms, Window blind control
Coordinate plotter, Workpiece stopper

(4) 기타

Ultrasonic surgery knife, Piezoelectric fan/
pump, Piezoelectric transformer

IX. 세라믹 액츄에이터의 개발 현황과 전망

압전 세라믹 재료를 사용하여 만드는 세라믹 액츄에이터는 일본, 미국 및 유럽에서 활발하게 연구가 진행되어 오고 있으며, 각국의 개발 목표와 주요 제조 회사를 표 2에 나타낸다.

표에서 보는 바와 같이 미국에서의 개발은 주로 군사 관련 정부 연구소에 의해서 지원되고 있으며

액츄에이터의 크기는 30cm 이상의 비교적 대형 액츄에이터를 사용한 active vibration control에 주로 초점이 맞추어져 있다.

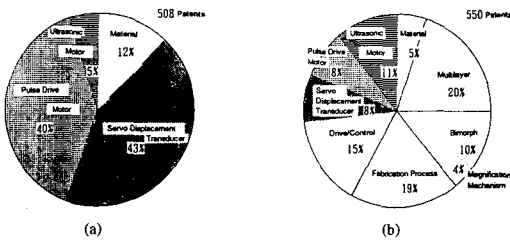
일본은 주로 개인 기업에서 압전 액츄에이터와 초음파 전동기를 개발해 오고 있으며, precision positioner에 관련된 응용 분야와 1cm 이하의 초소형 액츄에이터인 compact motor 등의 응용 분야에 목표를 두고 개발하고 있다. 즉 일본 정부에 의해서 지원되고 있는 R&D 는 너무 소비자 지향적인 것이다.

유럽에서 개발하는 것은 미국과 일본의 중간 size로서 가능한 모든 응용 분야에 대하여 연구하고 있는데 10cm 이하 정도의 크기를 갖는 액츄에이터이다.

이러한 압전 세라믹 액츄에이터 분야에 대한 연구가 국내에서는 매우 미진한 실정이며, 외국에서의 연구 개발은 25년 이전부터 시작이 되었다.

〈표 2〉 Summery of ceramic actuator developments comparing US, Japan and Europe

	US	Japan	Europe
target	Military-oriented product	Mass-consumer product	Lab-equipment product
category	Vibration suppressor	Mini-motor Positioner	Mini-motor Positioner Vibration suppressor
application field	Space structure Military vehicle	Office equipment Camera Precision machine Automobile	Lab stage/stepper Airplane Automobile Hydraulic system
actuator size	Up-sizing (30cm)	Down-sizing (1cm)	Intermediate size (10cm)
major manufacturer	AVX/Kyocera Morgan Matroc Itek Opt. Systems Burleigh AlliedSignal	Tokin Corp. NEC Hitachi Metal Mitsui-Sekka Canon Seiko Instruments	Philips Siemens Hoechst CeramTec Ferroperm Physik Instrumente



(Fig. 10) The ratio of piezoelectric actuators related patents with respect to the technical content disclosed during (a) 1972-1984 and (b) 1988-1990

그림.10(a)은 일본에서 지난 1972-1984년 사이에 공개된 508개 특허의 압전 액츄에이터의 각 영역별 현황이고, 그림 10(b)는 일본에서 지난 1988-1990년 사이에 공개된 550개 특허의 압전 액츄에이터의 각 영역별 현황을 나타낸 것이다.

X. 결 론

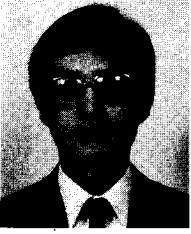
이상에서 살펴본 바와 같이 압전 세라믹 액츄에이터의 응용 분야는 앞으로 정보 통신 기기에 널리 사용될 전망이다므로 국내에서도 연구가 확대되어야 할 것으로 생각된다. 다만 세라믹 액츄에이터의 상업화를 위해서는 선결해야 할 문제점으로 reliability와 durability를 들 수 있다. 이를 위하여는 heat generation 등의 재료 성능 개선 문제와 device의 lifetime 증가 문제 및 drive/control 기법이 연구되어야 할 것이며, 이미 외국에서는 이를 위한 high power piezoelectric ceramic material에 관한 연구에 착수하고 있다.

참 고 문 헌

[1] 内野研二, 壓電/電歪アクチュエータ 森北出版 株式會社, 日本 (1986)

- [2] Y. Sugawara, K. Onitsuka, S. Yoshikawa, Q. Xu, R.E. Newnham, K. Uchino, "Metal-Ceramic Composite Actuators", J. Am. Ceram. Soc., 75, 4, 996-98, (1992)
- [3] Kenji Uchino, "Ceramic Actuator: Principles and Applications", MRS Bulletin /APRIL, 42-48, (1993)
- [4] J. F. Tressler, R. C. Xu, S. Yoshikawa, K. Uchino, R. E. Newnham, "Composite Flextensional Transducers for Sensing and Actuating", Ferroelectrics, 156, 67-72, (1994)
- [5] H. Aburatani, S. Harada, K. Uchino, A. Furuta, Y. Fuda, "Destruction Mechanisms in Ceramic Multilayer Actuators", JJAP. 33, 5B, 3091-3094. (1994)
- [6] Jin-Soo Kim, et al, "Ceramic-Polymer Composites Materials for Underwater Distance Sensor", Mol, Cryst, Liq, Cryst., Gordon and Breach Sci. Pub., 247, 341-350 (1994)
- [7] J. F. Tressler, W. Cao, K. Uchino, R. E. Newnham, "Capped Ceramic Electroacoustic Transducers", 17th Smart Actuator Symp, ICAT, State College, USA (1996.4)
- [8] Jin-Soo Kim, Kenji Uchino, "Effect of Sintering Temperature on Piezoelectric Properties in 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ Ceramics for Ultrasonic Motor Applications", 19th ICAT Smart Actuator Symp, State Collere, PA, USA. (1996.10)
- [9] 지승한, 이덕출, 김진수, "압전 세라믹스를 이용한 풍차형 초음파 전동기의 제작과 특성", 전기전자재료학회지, 10, 9, 889-894 (1997)
- [10] 김진수, 이덕출, "압전 세라믹스에 의한 초음파 전동기의 개발 동향", 전기학회지, 46, 9, 23-28, (1997)

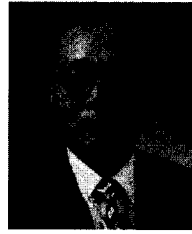
저 자 소 개



金 鎮 洙

1960年 9月 6日生 1986年 2月 인하대학교 공대 전기공학과(공학사), 1988年 2월 인하대 대학원 전기공학과(공학석사), 1992年 8월 인하대 대학원 전기공학과(공학박사), 1996年 1월~1997年 1월 미국

Pennsylvania State University의 Mat. Res. Lab.에 Post-doc.(한국과학재단) 1992年 9월~현재 한국교원대학교 기술교육과 전임강사, 조교수 jskim@cc.knue.ac.kr, <주관심 분야: 압전 세라믹스, 초음파 전동기, 압전 액츄에이터, 압전 센서>



李 德 出

1939年 1月 22日生, 1963年 12월 인하대학교 공대 전기공학과(공학사), 1966年 2월 인하대 대학원 전기공학과(공학석사), 1976年 9월 일본 Nagoya대학 대학원(공학박사) 1978年 2월~현재 인하대학교

전기공학과 교수, 1996年 3월~1998년 2월 인하대학교 공대 학장, 1998年 1월~현재 대한전기학회 회장, <주관심 분야: 강유전성 고분자 박막 제조, 플라즈마 중합, 유동 대전>