

압전 액츄에이터의 특성 및 기술동향

기술해설

Characteristics and Technical Trend of Piezoelectric Actuator

엄우식*, 송준광**, 이해욱**

(Woo-Sik Um, Jun-Kwang Song, Hae-Wook Lee)

Key word(중요단어) : Ceramic Actuator(세라믹 액츄에이터), Piezoelectric/Electrostrictive Actuator(압전/전왜 액츄에이터), Deformable Mirror(가변형 거울), Impact Dot-matrix Printer, Ultrasonic Motor(초음파 모터)

1. 서 론

1990년대 초에 들어 전기-기계적 작동 능력을 갖는 압전과 전왜 액츄에이터는 전자세라믹 재료와 구조 세라믹 재료 사이에서 새로운 분야를 형성하였다. 이런 세라믹 액츄에이터의 응용분야는 positioner, 모터 및 suppressor로 3가지로 나눌 수 있다. 레이저나 카메라 등에 응용되는 광학기구나 반도체 제조를 위한 positioning chip의 경우, 작동 정확도가 0.1 μ m 정도이여 하며, 이런 경우 고상 액츄에이터를 사용하여 조절하여야만 한다. 상용 전자기 모터를 고려해보면, 공장 자동화 장비에는 1cm³ 이하의 소형 모터가 요구되고 있으나, 이를 이용할 경우 충분한 에너지 효율을 얻기 어렵다. 초음파 모터는 그 효율이 크기 변화에 대하여 무관하며 이로 인하여 소형 모터 부분에서 우위를 점하고 있다. 압전 액츄에이터를 이용한 우주 산업과 군용 수송 수단에 사용되는 진동 suppressor 또한 유망한 기술이다. 지금까지 새로운 고상 변위 트랜스듀서(new solid-state displacement transducers)로서 온도(형상 기억 합금) 또는 자장(비정질 magnetostrictive 합금)에 의해 조절되는 것들이 제시되어 왔으나, 현재 기술 동향이 driving power를 줄이고, 소형화하는 추세에 있기 때문에 압전/전왜 액츄에이터의 응용이 주목 받고 있다.

2. 세라믹 액츄에이터 재료

전기장에 의해 유도되는 스트레인(L/ Δ L)에는 압전에 의한 변형, 전왜에 의한 변형, 및 상변화에 의한 변형의 세가지 유형이 있다.¹⁾ 압전 응용 분야에 있어서 Pb(Zr,Ti)O₃ (PZT)계를 기본으로 한 세라믹스가 주된 물질이다. 그 예로 PLZT 7/62/38

((Pb_{0.93}La_{0.07})(Zr_{0.62}Ti_{0.38})O₃)²⁾를 들 수 있다. Fig. 1(a)에 이것의 변형 곡선(strain curve)을 나타내었다. 그림에서 보듯이 전기장의 크기가 작은 범위에서는 유도 변형율은 전기장에 비례($x = dE$)하지만, 전기장이 커짐(100 V/mm 이상)에 따라 변형 곡선은 직선적 경향에 벗어나게 되고, 분극의 재배열에 의한 이력(hysteresis)이 나타나게 된다. 이러한 특성은 때때로 비이력 응답(nonhysteresistic response)이 요구되는 액츄에이터 응용에 제약이 되기도 한다.

Ba(Sn,Ti)O₃ 고용체로부터 제조된 새로운 액츄에이터가³⁾ 관심을 끌고 있다. 특히, Ba(Sn_{0.15}Ti_{0.85})O₃는 작은 전기장에서만 분극의 재배열이 일어나며 이로 인하여 높은 전기장에서도 큰 선형 영역을 갖는 비정상적인 변형 곡선을 보인다.(Fig. 1(a)의 오른쪽) 즉, 항전계가 매우 작으며, 이는 매우 유용한 특성이 다. 한편, Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃(PMN)계 세라믹스의 전왜 변형은 전기기계 결합이 이차함수($x=ME^2$)의 거동을 보임에도 불구하고 매우 큰 값(0.1% 이상)을 보인다.⁴⁾ 특히, 이 물질은 이력이 거의 없다는 점에서 관심을 끌고 있다.(Fig. 1(b))

변형과 연관된 상변화를 고려해보면, 거시적인 측면에서의 무분극 상태에서부터 분극 상태로의 전이에 의한 분극 유도가 제시되어 왔다. Fig. 1(c)에 Pb_{0.99}Nb_{0.02}((Zr_xSn_{1-x})_{1-y}Ti_y)_{0.98}O₃ 계의 전기-유도 변형 곡선을 나타내었다.⁵⁾ 세로 방향으로 유도된 변형이 0.4%에 달하며, 이는 보통의 전왜 또는 압전체에 예상되는 값보다 훨씬 큰 값이다. Fig. 1(c)의 왼쪽 그림은 직사각형 모양을 보이고 있으며, 두 개의 on-off 변형 상태가 존재하여 "디지털 변위 트랜스듀서(digital displacement transducer)"라고 한다. 더욱이 특정 조성에서는 형상 기억 효과를 보인다.(Fig. 1(c) 오른쪽) 이 물질은 강유전성 상이 형성되면, 전기장이 제거되어도 강유전 상태를 기억하며,

작은 역방향 전기장을 가하면 이 상태가 소멸된다. 이런 형상 기억 세라믹은 에너지 저장 액츄에이터에 이용된다.

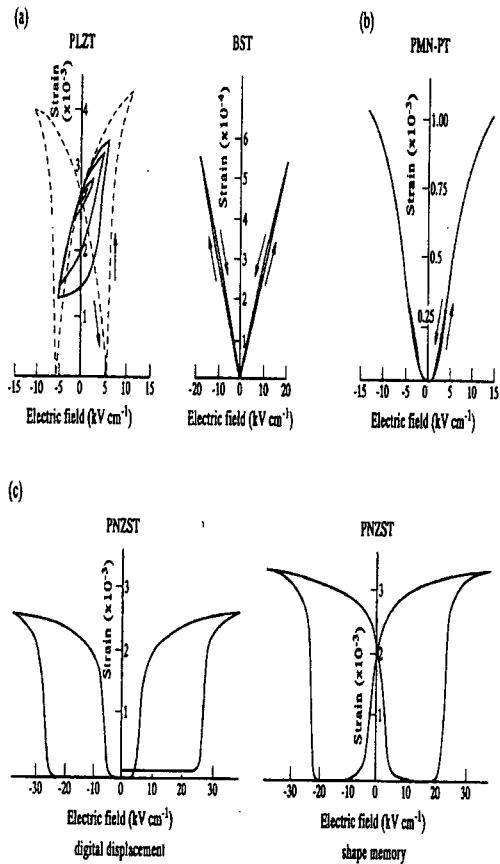


그림 1. 세라믹에서의 전기장 유도 변형
 Fig. 1. Electric field-induced strain in ceramics.
 (a) piezoelectric, $(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ and $\text{Ba}(\text{Sn},\text{Ti})\text{O}_3$,
 (b) electrostrictor, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{Ti})\text{O}_3$,
 (c) phase-change material $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Sn},\text{Ti})\text{O}_3$

세라믹 액츄에이터의 기본 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (a) 수십 마이크로미터 범위의 변위 및, $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 의 정밀도
- (b) $10 \mu\text{s}$ 단위의 응답속도
- (c) 400 kgf/cm^2 의 발생력
- (d) 전자기 모터보다 작은 단위의 driving power

세라믹 액츄에이터의 응용 분야가 특수화됨에 따라, 세라믹 특성의 재현성은 세라믹의 제조 과정에 기인한 불적합성에 영향을 받는다. 분말 및 입자의

크기를 엄격히 조절해야만 높은 재현성을 얻을 수 있으나, 이는 기존의 산화물 혼합법으로는 불가능하다. 1980년대 들어 초미세 세라믹 분말의 제조법의 개발로 인하여 신뢰성과 내구성을 갖춘 세라믹 액츄에이터의 제조가 가능하게 되었다.

3. 액츄에이터의 디자인

일반적으로 액츄에이터는 multilayer 형과 bimorph 형의 두 가지로 분류된다(Fig. 2.) Multilayer 형은 100개 정도의 압전/전왜 세라믹 층을 쌓아서 제조하며, 작은 유도 전압(100V), 빠른 응답 속도($10 \mu\text{s}$), 높은 발생력(100 kgf (900N)) 그리고 높은 전기기계 결합 계수 등의 이점을 갖고 있다. 그러나 $10 \mu\text{m}$ 정도의 변위를 보이며 이는 특정 분야의 응용에 제약이 된다. 이와 반대로 bimorph 형은 복합 압전층과 탄성층의 두 층으로 구성되며, 수백 마이크로미터의 매우 큰 굽힘 변위가 생성된다. 그러나 응답속도와 발생력은 각각 1ms와 100gf(0.98N) 정도로 작은 단점이 있다.

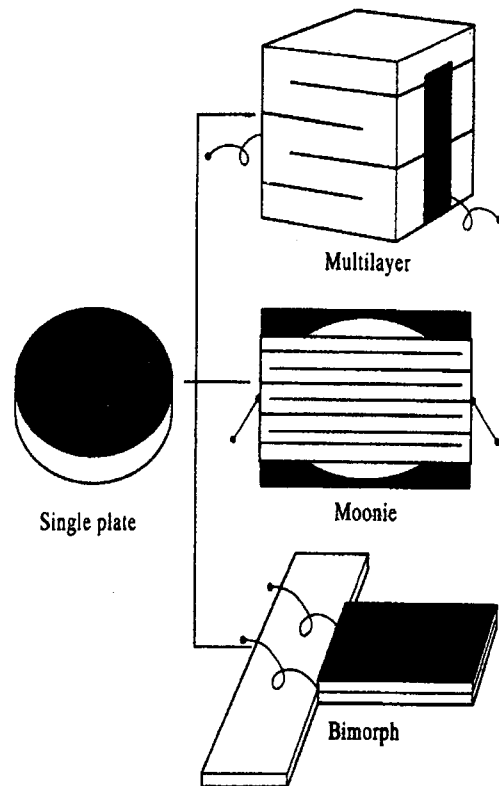


그림 2. 세라믹 액츄에이터의 디자인
 Fig. 2. Typical designs for ceramic actuators : multilayer, moonie and bimorph.

Multilayer와 bimorph 액츄에이터 사이에 중간층을 삽입하는 형태의 "moonie"라고 불리는 복합 액츄에이터 구조가 개발되었다.⁶⁾ 이 트랜스듀서는 변위는 multilayer 형보다 우수하고 발생력 및 응답속도는 bimorph 형보다 우수한 특성을 갖고 있다. Moonie는 Fig. 2에 나타낸 것처럼 얇은 압전층과 초생달 모양의 빈 공간을 갖는 두 개의 금속판으로 구성되어 있다. 5×5×2.5 mm의 크기의 moonie의 경우 60V에서 20 μ m의 변위를 보이며, 이는 같은 크기의 multilayer 형 액츄에이터에 변위에 8배에 해당한다. 이 새로운 액츄에이터는 소형 레이저 빔 스캐너의 제조에 응용되고 있다.

4. 압전/전왜 액츄에이터의 응용

압전/전왜 액츄에이터는 장치에 인가하는 작동 전압의 유형과 전압에 의해 유도되는 변형의 특성에 따라 두 가지 형태로 분류된다.

- (a) 인가된 직류 전압 방향으로 변형이 유도되는 rigid displacement devices
- (b) 기계적 공명 주파수에서 교류 전압에 의해 변형이 변화하는 resonating displacement devices (ultrasonic motors).

전자의 경우 위치 측정 신호를 이용한 피드백 시스템(feedback system)을 서보 변위 트랜스듀서(servo displacement transducer, positioners)와 간단한 on-off 스위칭 시스템에 의해 작동하는 펄스 유도 모터(pulse drive motors)로 다시 나눌 수 있다.⁷⁾

이런 종류의 장치에 요구되는 재료는 다소 차이가 있으며, 특별한 응용에는 특정 조성이 요구된다. 초음파 모터에는 대개 높은 기계 품질 계수(Q)를 갖는 hard-type의 압전체가 사용된다. 서보 변위 트랜스듀서는 변형 이력에 견뎌야 하며, 이 때문에 PMN 전왜 세라믹스가 사용된다. 또한 pulse-drive 모터는 작은 이력보다는 낮은 유전율을 갖고 있어야 하므로 강유전 PMN 보다는 soft PZT 압전체가 사용된다. 이제 세라믹 액츄에이터의 대표적인 응용을 소개하겠다.

4.1 가변형 거울 (Deformable Mirror)

광학 정보 처리 분야에서 입사 파장의 위상을 조절하기 위해서 가변형 거울이 제시되어 왔다. 가변형 거울은 볼록형과 오목형 두 가지 제조될 수 있다. 이런 종류의 거울은 망원경에 부속물로서 사용되는데, 대기의 산란에 의해 발생하는 상의 비틀림을 효과적으로 보정하는데 쓰인다.

2차원 multimorph 형 가변형 거울을 Fig. 3에 나타내었다.⁸⁾ 그림에서 보듯이 유리 거울에 3층의 전왜 세라믹(PMN)판 붙어있는 구조로 되어 있으며, 이 거울면은 PMN에 유도된 변형에 따라 여러 방향으로 변형되며, 이러한 변형은 인가 전기장의 분포와 전극 구성에 의해 결정된다. 유한 요소법에 의해 제조된 첫 번째 층은 일정한 전극 패턴을 가지고 있으며 구면 변형을 보이는 반면, 6가지 전극 패턴을 가진 두 번째 층은 코마 오차를 보정한다.

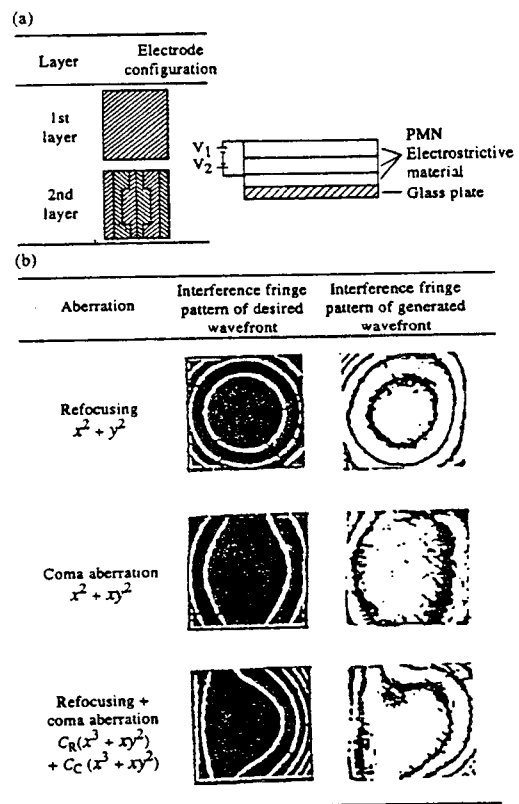


그림 3. Multimorph 가변형 거울의 구조(a) 및 파면 제어의 실제(b)

Fig. 3. (a) Structure of a multimorph deformable mirror, (b) actual control of light wavefront.

4.2 Impact Dot-Matrix Printer

Dot-matrix printer는 1990년대 초에 일반화되었으며, 이런 프린터에 의해 인쇄된 글자는 24×24 dot-matrix로 구성된다. Fig. 4에 multilayer 압전체로 구성된 printer head의 구조를 나타내었으며, 그림에서 보듯이 100 μ m 두께의 세라믹 판이 100 층으

로 적층된 구조를 갖고 있다.⁹⁾ Dot-matrix printer head로 multilayer 액츄에이터를 사용하게 되면 작은 구동 전압, 큰 변위, 높은 전기 기계 결합 계수 등의 이점 있다. 기존의 전자기형의 impact printer와 비교해 볼 때 압전 impact printer는 인쇄속도가 빠르며, 소비 전력이 작고, 작동시 열의 발생이 적어 방음제를 적용할 수 있어 소음을 줄일 수 있는 등의 장점을 가지고 있다.

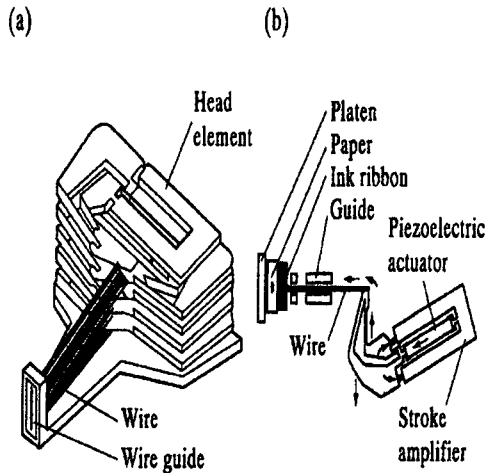


그림 4. 프린터 헤드의 구조 (a) 및 차동형 압전 프린터 헤드의 구성 요소 (b)
 Fig. 4. (a) Structure of a printer head, (b) a differential-type piezoelectric printer head element

4.3 초음파 모터

기존의 전자기 모터를 대체하기 위한 고출력 초음파 진동자 개발에 대하여 많은 노력이 있었다. 초음파 모터는 정상파형(standing-wave type)과 진행파형(propagating-wave type)으로 나뉜다.¹⁰⁾ 정상파형 모터는 종종 vibratory-coupler type 또는 wood-pecker라고도 하며, 그 구조는 진동체가 압전 유도체에 연결되어 있어 끝부분이 평면 타원운동을 하게 되어있다. 또한 축자(rotor) 또는 활자(slider)가 연결되면, 진동체는 회전 운동 또는 왕복 운동을 하게 된다. 일반적으로 정상파형 초음파 모터는 효율이 높지만, 좌우 방향 제어가 어렵다는 단점을 갖고 있다.

다층형 압전 액츄에이터와 포크형태의 금속 leg로 구성된 초음파 선형 모터가 개발되었다.(Fig. 5)¹¹⁾ 이 액츄에이터는 두 금속 leg 간에 기계 공진 추파수가 조금 차이 존재하며, 이 때문에 유도 주파수를 변화 시킴으로서 두 leg간에 위상차를 조절할 수 있다. 즉

활자는 말이 달릴 때와 유사하게 앞쪽 leg와 뒤쪽 leg를 이용하여 움직인다. 실험용으로 제작된 모터는 크기가 $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ 이고, 98 kHz, 6V(실제 출력 $\sim 0.7W$)에서 최고속도 20 cm/s, 최대 추진력 0.2 kgf(1.96 N), 최대 효율 20%를 보였다. 이 모터는 X-Y 정밀 조절용으로 사용되고 있다.

진행파형 모터(표면파형 또는 surfing 형)는 시간 및 공간에 대하여 90° 위상차를 갖는 두개의 정상파를 조합해서 회전을 조절할 수 있게 되어있다. 링형태의 활자는 압전체와 연결된 신축성 body의 rippled 표면에 연결되어 있으며, 압전 링의 의해 유도된 탄성파에 의해 입력되는 전압의 sine 또는 cosine의 변화에 따라 양쪽 방향으로 움직인다. 이러한 진행파형 모터는 모터를 얇게 만들 수 있기 때문에 VTR 또는 카메라용의 자동 초점용 모터로 쓰이고 있다.¹²⁾

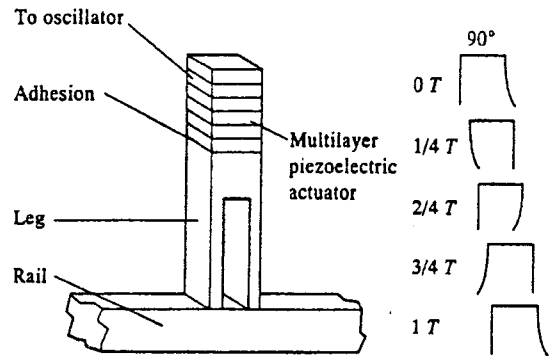


그림 5. 진동 결합형 초음파 선형 모터
 Fig. 5. Ultrasonic linear motor of a vibratory couple type

5. 세라믹 액츄에이터의 전망

세라믹 액츄에이터의 응용 분야가 매우 넓다는 점은 명백하지만, 상업적으로 사용되기 위해서는 아직도 내구성, 신뢰도 등의 해결해야 할 문제점들이 남아있다. 우선 연구해할 점은 재료의 준비과정, device의 디자인, 액츄에이터의 시스템화 등이다. 빛을 감지해서 작도-제어 전압을 스스로 생성하여 작동하는 photostrictive 액츄에이터가 1990년대 초에 개발되었다. 이는 특정 강유전체가 빛에 노출되면, 일정한 전자 유도력을 나타내는 점을 이용한 것으로서 photovoltaic 효과와 역압전 효과의 조합에 의한 photostrictive 변형을 이용한 것이다. PLZT(3/52/48) 세라믹에 약간의 Nb와 W를 도핑하여 bimorph형 액츄에이터가 개발되었는데, 첫째 PLZT 층은 판과 평

행한 방향으로 분극시키고 다른 한층은 반대방향의 분극을 갖게 한 구조를 갖고 있다.¹³⁾ 한쪽 PLZT 판에 보라색 광이 입사되면 꺾임 운동에 의해 0.7 kVmm의 photovoltaic 전압이 발생된다. 두께 0.4 mm 길이 20 mm의 액츄에이터에서 최대 변위 150 μ m를 보였으며, 응답시간은 1s 였다. 이러한 광 유도 미소 운동 소자 및 계전기는 특별한 전기 회로 없이 입사된 빛에 의해 작동하도록 디자인 되어있다. 종합적으로 압전/전왜 액츄에이터와 초음파 모터의 세계시장규모는 점점 증대될 것으로 생각되어지며, 2000년까지는 그 규모가 100억 달러에 달할 것으로 예측된다. 아울러 그 응용 분야도 더욱 넓어질 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. K. Uchino, "Ceramic Actuators : Principles and Applications," MRS Bull 18, 42-8 (1993)
2. K. Uchino, Piezoelectric/Electrostrictive Actuators. Morikita, Tokyo, 1986
3. J. von Cieminski, H. Beige, "High-Signal Electrostriction in Ferroelectric Materials," J. Phys. D: Appl. Phys., 24, 1182-6 (1991)
4. L. E. Cross, S. J. Jang, R. E. Newnham, S. Nomura, and K. Uchino, "Large Electrostrictive Effects in Relaxor Ferroelectrics," Ferroelectrics 23, 187-92 (1980)
5. K. Uchino, "Shape Memory Effect Associated with the Forced Phase Transition in Antiferroelectrics," Proc. MRS Int Mtg. Adv. Mats., 9, 489-503 (1989)
6. H. Goto, K. Imanaka and K. Uchino, "Piezoelectric Actuators for Light Beam Scanners," Ultrasonic Techno., 5, 48-51 (1992)
7. T. Ota, T. Uchikawa and T. Mizutani, "Printing Flight Hammer using Multilayer Piezoelectric Actuator," Jpn. J. Appl. Phys., 24 (24-3), 193-5 (1985)
8. T. Sato, H. Ishikawa, O. Ikeda, S. Nomura and K. Uchino, "Deformable 2-D Mirror using Multilayered Electrostrictors," Appl. Optics., 21, 3669-72 (1982)
9. T. Yano, I. Fukui, E. Sato, O. Inui and Y. Miyazaki, "Dot-Matrix Printer using Multilayer Piezoelectric Actuators," Proc. Electr. and Commun. Soc., 156-7 (1984)

10. K. Uchino, "Ultrasonic Motors," J. Precision Engng. Jpn., 55, 51-6 (1989)
11. K. Uchino, "Micro Walking Machines using Piezoelectric Actuators," J. Rob. Mech., 1, 124-7 (1989)
12. Y. Akiyama, Ultrasonic Motors/Actuators, Trieps, Tokyo, 1986.
13. M. Tanimura and K. Uchino, "Effect of Impurity Doping on Photostriction in Ferroelectric Ceramics," Sensors Mater., 1, 47-56 (1988)

저지소개

엄우식



1964년 7월 26일 생. 1987 한양대학교 무기재료공학과 졸업 (공학사). 1991 한국과학기술원 재료공학과 졸업 (공학박사). 1991-1992 한국과학기술원 전자세라믹연구소 센터 선임연구원. 1993-현재 생산기술연구원 산업기술시험평가연구소 재료평가팀 선임연구원

송준광



1969년 9월 19일 생. 1993 연세대학교 세라믹공학과 졸업 (공학사). 1995 연세대학교 세라믹공학과 대학원 졸업 (공학석사). 1995-현재 연세대학교 세라믹공학과 대학원 (공학박사과정). 1996-현재 생산기술연구원 산업기술시험평가연구소 재료평가팀 연구원

이해욱



1958년 6월 5일 생. 1982 고려대학교 금속공학과 졸업 (공학사). 1984 고려대학교 금속공학과 대학원 졸업 (공학석사). 1984-86 삼광특수금속(주) 개발부 차장. 1986-89 린나이코리아 중앙연구소 주임연구원. 1990-94 대삼특수소재산업(주) 소재사업부장. 1994-현재 (주) 메타텍 대표이사