

비선형 히스테시스 모델을 채용하지 않는 압전구동기의 정밀위치제어

Precise Position Control of Piezoelectric Actuators without Nonlinear Hysteresis Model

송재욱, 송하성, 김호상(고등기술연구원 생산기술연구실)

J.W.Song, H.S.Song, H.S.Kim (Manufacturing Technology Lab., Institute for Advanced Engineering)

ABSTRACT

Piezoelectric actuator is widely used in precision positioning applications due to its excellent positioning resolution. However, serious hysteresis nonlinearity of the actuator deteriorates its open loop positioning capability. Generally, a nonlinear hysteresis model is used in feedforward loop to improve positioning accuracy. In this study, however, a simple lead compensator is proposed as a substitution for a complex nonlinear hysteresis model and tested through experiments for precision position control.

Key Words : piezoelectric actuator(압전구동기), precision control(정밀제어), feedforward(앞먹임), lead compensator(진상보상기)

1. 서론

압전구동기는 고분해능을 가져 정밀한 미소변위 제어가 요구되는 시스템에 많이 사용되고 있다. 그러나 압전구동기의 물성으로 인한 큰 비선형특성때문에 서브미크론급의 정밀위치제어에 적용하기 곤란하므로 정확한 비선형특성을 모델로 작성하여 Feedforward 방식으로 적용할 필요가 있다. 그러나 일반적으로 압전구동기는 전기적/기계적 동특성을 갖는 제어시스템의 한 구성요소로서 사용되므로 압전구동기뿐만 아니라 제어시스템의 비선형특성도 같이 고려하여 Feedforward 방식으로 미리 보상하여야 제어시스템의 비선형특성을 크게 줄여 개회로 또는 폐회로 제어 기법 적용시 위치제어 정밀도를 크게 향상시킬 수 있다. 그러므로 정밀위치제어를 위해서는 압전구동기 자체만의 비선형 특성뿐만이 아니고 시스템 전체의 전기적/기계적 특성에 의한 비선형특성도 함께 고려되어야 한다.

압전구동기의 비선형특성은 크게 천이현상(drift), 온도에 따른 비선형특성, 이력현상, 전기적 비선형특성으로 구분하나 특히 이력현상과 전기적 비선형특성이 가장 커서 입력전압에 대한 변위량이 히스테시스 비선형특성을 보인다. 기존의 압전구동기 히스테시스 모델링 기법들은 압전구동기의 이력현상에 의

한 비선형특성만을 주로 고려하여 위치정밀도의 향상을 꾀하였다.

S. Jung and S. Kim^(1,4)은 압전구동기의 비선형특성이 크게 전기적 비선형특성과 이력현상에 의해 좌우되는 것으로 보고 먼저 하드웨어로 압전구동기의 전기적 비선형특성을 억제하여 입력조건에 따라 비선형특성이 변하는 것을 억제한 후 이력현상의 모델기법을 시도하였다. 이력현상의 모델은 입력전압이 0에서 최대입력전압까지 증가/감소시의 히스테시스 경로를 Major loop으로, 그 외의 히스테시스 경로는 Minor loop으로 정의하고 Major loop과 Minor loop의 경로를 입력전압이 증가하는 경우와 감소하는 경우에 대해 각각 하나의 함수로 간결하게 표현하여 모델링이 간단하고 실시간 적용이 용이하다. P. Ge^(2,3)도 전압에 대한 변위량의 이력현상을 예측하는 모델을 Preisach model기법과 Look-up table 방식으로 구현하였다. 이 기법은 입력조건에 따른 압전구동기의 비선형특성 변화를 모델에 반영할 수 없을 뿐 아니라 원하는 변위량에 대한 출력전압을 구할 수 없는 기법으로 실시간 적용이 불가능하다. 따라서 이 기법은 Off-line으로만 적용이 가능하고 또한 입력신호도 Preisach model의 기본가정을 만족하는 일정한 크기의 변위를 갖는 정현파 혹은 삼각파 신호만 추종가능하므로 실용성이 떨어진다.

본 연구에서는 제어시스템의 비선형특성이 주로 동

특성에 의한 히스테리시스 특성을 보이는 경우에 압전구동기의 이력현상과 전기적 비선형특성에 의한 히스테리시스 현상이 제어시스템의 비선형특성과 연성(couple)된 상태에서 간단한 Lead보상기를 써서 전체 시스템의 비선형특성을 억제하고 개회로 제어시 위치 정밀도를 향상하는 방안에 대해 논의하고자 한다. 먼저 제어시스템의 비선형특성을 시험분석하여 압전구동기의 이력모델과 Lead 보상기를 설계한 후 이력모델과 Lead보상기에 대해 각각 개회로제어시험을 수행하고 두 경우의 실험결과를 비교검토한다.

2. 제어 시스템 구성 및 히스테리시스 특성시험

제어대상 시스템은 Fig. 1에 도시한 것과 같이 압전구동기를 이용하여 diamond tool의 위치를 정밀제어하는 공구대로서 100 Hz까지의 가공입력지령을 서브미크론 수준으로 추종하여야 한다. 제어시스템의 주요 구성요소는 적층형 압전구동기, 변위센서, 고전압앰프등으로 상세사양을 Table 1에 설명하였다. 이 시스템의 비선형특성은 공구대의 기계적 동특성보다는 압전구동기와 구동앰프의 전기적 동특성에 크게 좌우되나 공구대의 정밀위치제어를 위해서는 압전구동기를 포함한 구동시스템의 히스테리시스 특성과 압전구동기가 조립된 공구대의 기계적 동특성을 함께 고려하여야 하므로 Fig. 1과 같이 압전구동기가 공구대에 조립된 상태에서 입력전압에 대한 출력변위의 히스테리시스 특성시험을 수행하였다.

입력주파수 변화에 따른 히스테리시스의 형태변화를 관찰하고 또한 히스테리시스의 천이현상을 파악하기 위해 1Hz와 100Hz 사인파를 10분간 500V 진폭(500V 윽셋)으로 고전압앰프에 입력하였고 각 주파수 별로 10분간 4회(0분, 4분, 8분, 10분)동안 4 cycle/회의 데이터를 수집하였다. Fig. 2 a), b)에 도시된 실험결과를 보면 입력 주파수가 높아질수록 히스테리시스의 폭이 커지고 히스테리시스 모양이 타원형으로 변화하는 것을 알 수 있다. 특히 Minor loop의 행태는 더욱 큰 차이를 보여준다. 1Hz 입력시 1차 반전곡선이 Major loop를 따르다가 반전되는 양상을 보이나 (Fig. 2-a) 100Hz에서는 1차 반전곡선이 Major loop과 분리되어 Major loop과 닮은꼴의 loop이 형성된다 (Fig. 2-b). 이런 현상은 압전구동기의 이력현상과 제어시스템의 전기적/기계적 비선형특성이 복합되어 발생하는 것으로 저주파 입력신호시에는 이력현상에 의

한 비선형특성이 지배적이다가 입력신호의 주파수가 증가할수록 제어시스템의 동특성에 의한 비선형특성이 커지는 것으로 이해된다. 따라서 정확한 압전구동기의 이력모델을 구하기 위해서는 1Hz입력시의 히스테리시스 데이터를 사용하여야 한다. 또한 히스테리시스 루프가 동일 입력조건시에도 시간에 따라 변위축 방향으로만 천이하는 현상은 주로 압전구동기의 온도팽창에 기인한다⁽²⁾. 따라서 이 현상을 피하기 위해서는 압전구동기가 열평형상태에 이른 후 히스테리시스 모델링을 하고 개회로제어를 하여야 한다.

Table 1. Main specifications of experimental apparatus

장비	사양	
압전 구동기	제품명	PI(Physik Instrumente) P-245.23
	최대 변위량	20 $\mu\text{m}(\pm 10 \%) @ 0$ ->1000 V
	정전용량	100 nF ($\pm 20 \%$)
	온도팽창 계수	0.45 $\mu\text{m}/\text{K}$
고전압 증폭기	제품명	PI E-120 signal processing module
	출력범위	0 - 1000 V,
	대역폭	1.5 KHz
변위 센서	제품명	PI capacitive sensor D-050.00
	입력범위	50 μm
	출력범위	0 - 10 V, $\pm 5\text{V}$

3. 비선형 역이력 모델

S. Jung and S. Kim^(1,4)이 사용한 모델은 주어진 입력 전압에 대해 변위량을 예측하는 Forward 방식으로 히스테리시스 모델을 제어 시스템에 적용하기 위해서는 원하는 변위량이 주어지면 이에 해당하는 입력전압을 예측하는 Inverse기법이 필요하다. 따라서 역함수 (H^{-1} : Inverse function)를 아래 식과 같이 과거의 제어입력신호중 부호가 반전된 반전점 $R = (V_R, X_R)$, 현재의 변위 (X_E), 변위 제어신호의 증감방향 sign (\dot{X}_E)의 함수로 나타내면 주어진 변위에 대한 전압을 예측할 수 있다.

$$V = H^{-1}(X_E, R, \text{sign}(\dot{X}_E))$$

S. Jung이 제안한 기법을 1Hz 사인파로 13.6 μm 과 6.8 μm 변위신호를 제어시스템에 가하여 Major loop과

Minor loop에 대한 역이력모델(Inverse hysteresis model)을 구하였다. 첫번째로 Major loop에 대해 3차 Least square fitting 방법으로 역함수를 아래와 같이 구하였다.

$$V_f = -6.2810 \cdot 10^{-2} X^3 - 2.3865 X^2 + 9.4902 \cdot 10^1 X - 8.3278 \cdot 10^1 \quad (1)$$

$$V_r = 6.2996 \cdot 10^{-2} X^3 + 6.7222 \cdot 10^{-1} X^2 + 4.7817 \cdot 10^1 X - 6.4298 \cdot 10^1 \quad (2)$$

윗 식에서 X 는 변위량 [μm], V_f 는 상승시 전압[V], V_r 은 하강시 전압[V]이다. 식(1)은 상승시의 변위량을, 식(2)에는 하강시의 변위량을 사용한다. 두번째로 Minor loop에 대해 상승시에는 식(3), 하강시에는 식(4)를 사용한다.

$$V_{mf} = V_f + \Delta V_R \cdot h_f$$

$$h_f = -3.1902 \cdot 10^{-1} X_n^3 + 1.5552 X_n^2 - 2.2351 X_n + 1.0376 \quad (3)$$

$$X_n = \frac{X - X_R}{X_{\max} - X_R}$$

여기서, V_{mf} 는 상승시의 전압[V], ΔV_R 은 반전점의 상승곡선과의 편차량, X_R 은 반전점에서의 입력변위, X_{\max} 는 히스테레시스 루프의 최대변위 그리고 X_n 은 normalized displacement를 나타낸다.

$$V_{mr} = V_r - \Delta V_R \cdot h_r$$

$$h_r = -1.1611 \cdot 10^{-1} X_n^3 + 1.1393 X_n^2 - 1.1911 X_n + 1.0196 \quad (4)$$

$$X_n = \frac{X_R - V}{X_R - X_{\min}}$$

여기서, V_{mr} 은 하강시의 전압[V], ΔV_R 은 반전점의 하강곡선과의 편차량을 나타낸다.

이 역이력모델을 10, 50, 100Hz 입력신호에 대해 feedforward 방식으로 제어시스템에 적용하여 위치제거시험을 수행하고 시험결과는 4장에서 자세히 논의한다.

4. Lead 보상기 설계

히스테레시스 특성시험에서 설명된 바 같이 입력주파수가 증가할수록 이력현상보다는 제어시스템의 전기적/기계적 동특성에 의한 비선형성이 증가한다. 따라서 이 비선형성을 입력에 대한 출력의 위상지연으로 해석하고 이 위상차를 제거함으로써 제어시스템의 위치정밀도를 향상토록 한다. 이를 위해 Fig. 1의 제어시스템에 개회로 상태에서 10Hz부터 200Hz까지 1Hz씩 입력주파수를 증가시켜 제어시스템의 입력과 출력의 위상차를 실험적으로 구하고 Fig. 3에 도시하

였다 Fig. 3에서 200Hz까지도 위상차가 거의 선형으로 증가하므로 이 위상차를 제거하기 위한 위상보상기는 수백Hz까지는 선형의 Lead성분을 지녀야 함을 알 수 있다. 제어시스템이 추종하고자 하는 최대 입력주파수가 100Hz이므로 100Hz에서 위상차가 영이 되도록 S평면의 Lead보상기를 다음과 같이 설계하였다.

$$L(s) = \frac{\frac{s}{5000} + 1}{\frac{s}{50000} + 1} \cdot \frac{\frac{s}{2000} + 1}{\frac{s}{20000} + 1} \quad (5)$$

이 보상기를 0.1msec(10KHz)의 sampling시간으로 Tustin 변환기법을 적용하여 Z평면 전달함수를 얻어 주파수 응답특성을 Fig. 4에 도시하였다. Lead보상기를 제어시스템 입력단에 직렬로 연결한 경우의 입력과 출력간의 위상차는 Lead보상기와 제어시스템의 위상각의 합으로 표시되며 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

제어시스템에 1)개회로제어만 한 경우, 2)역이력모델을 적용한 경우, 3)Lead보상기를 적용한 경우에 대해 10 μm 의 입력변위를 10, 50, 100Hz로 가하여 히스테레시스 현상을 관찰하고 Fig. 5-7에 도시하였다. 2)의 경우는 10Hz시에 거의 선형특성을 보이나 50, 100Hz입력에 대해서는 총변위량에 대해 각각 13%, 29%의 이력폭을 지닌 히스테레시스를 나타낸다. 이에 반해 3)의 경우는 이력폭이 10, 50Hz시에 각각 11%, 5%발생하다가 100Hz시에는 거의 선형이 되어 Lead보상기가 효과적으로 위상지연을 보상하는 것을 알 수 있다. 1), 2), 3)경우의 추종성능을 히스테레시스 특성시험과 동일한 입력조건으로 시험하여 Fig. 8-10에 나타내었다. 10Hz경우에는 2)의 p-p(peak to peak)오차가 0.54 μm 으로 Lead보상기의 p-p오차인 1.59 μm 보다 월등히 작으나 50, 100Hz입력시 p-p오차가 2.7 μm , 4.06 μm 로 급격히 증가한다. 이에 반해 Lead보상기는 10Hz시에 2)경우보다 약 3배 오차가 크나 50, 100Hz입력에 대해서는 각각 0.71 μm , 0.64 μm 의 p-p오차를 보여 2)의 경우보다 각각 52%, 78% 추종오차 개선효과를 보인다. 역이력모델은 압전구동기의 이력현상에 의한 비선형성만 제거하므로 예상대로 저주파 입력시에는 큰 효과를 발휘하나 입력주파수가 증가할수록 추종오차가 커지고 Lead보상기는 이력현상에 대해 보정능력이 없어 저주파입력시에 큰 추종오차를 보이다가 주파수가 증가할수록 위상보정 효과가 커져 추종오차를 대폭 감소시킬 수 있다. 제어시험으로부터 역이력모델과 Lead보상기를 함께 사용하

는 것이 더 나은 추종성능을 얻을 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 비선형성이 큰 압전구동기를 이용한 공구대의 diamond tool을 개회로제어로 정밀위치제어가 가능토록 간단한 Feedforward 제어기법을 제시하였다. 이 기법은 역이력모델대신 Lead보상기를 사용하는 것으로 고주파 입력에 대해서 우수한 추종성능을 가짐을 제어시험을 통해 확인하였다.

참고문헌

1. S. Jung and S. Kim, "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feedforward model-reference control," *Precision Eng.*, vol.16, no.1, pp. 49~55, 1994.
2. P. Ge and M. Jouaneh, "Modeling hysteresis in piezoceramic actuators," *Precision Eng.*, vol.17, pp. 211~221, 1995.
3. P. Ge and M. Jouaneh, "Tracking control of a piezoceramic actuator," *IEEE Trans. on control systems technology*, vol.4, no.3, pp. 209~216, 1996.
4. 정승배, 박준호, 김승우, "주사터널링현미경을 위한 압전구동기의 비선형 모델링", 대한기계학회논문집, 제 18권, 제 9호, pp. 2272~2283, 1994.

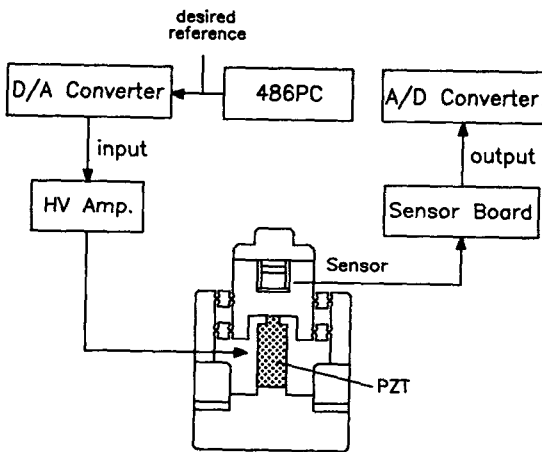


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

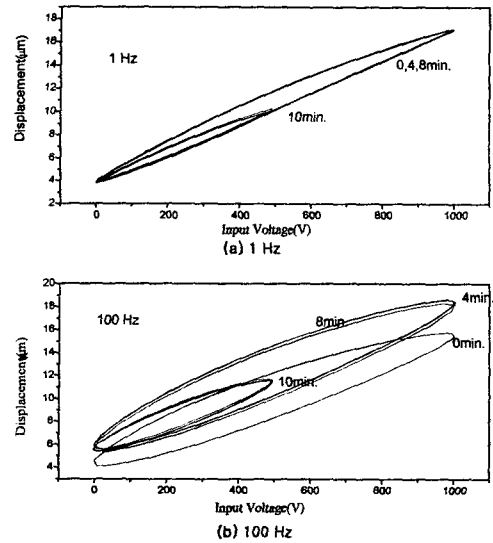


Fig.2 Hysteresis characteristics in open loop control

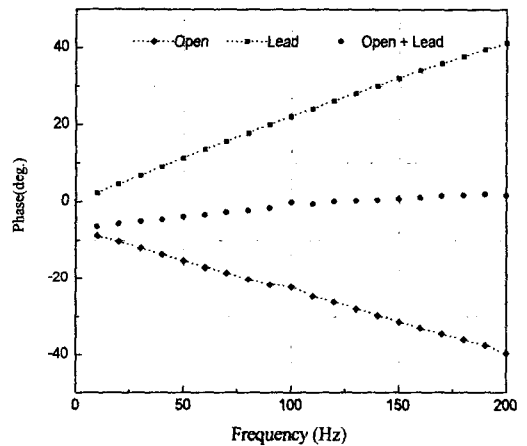


Fig.3 Comparison of phase with open loop, and lead compensator

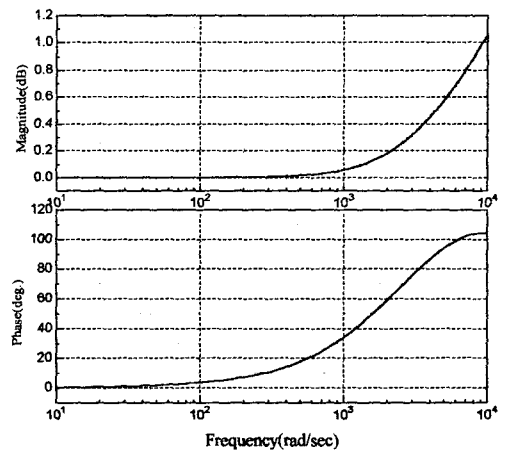


Fig.4 Frequency response of lead compensator

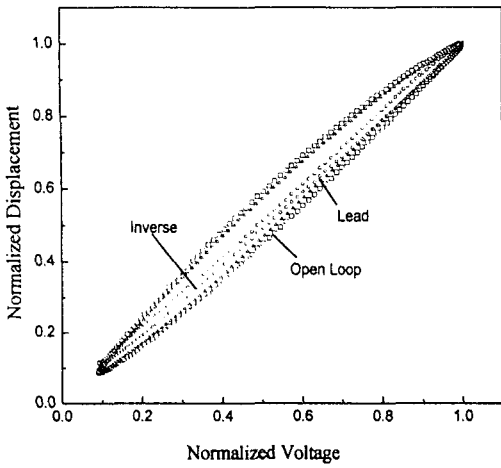


Fig. 5 Hysteresis loop of open loop, inverse hysteresis and lead compensator (10Hz sine)

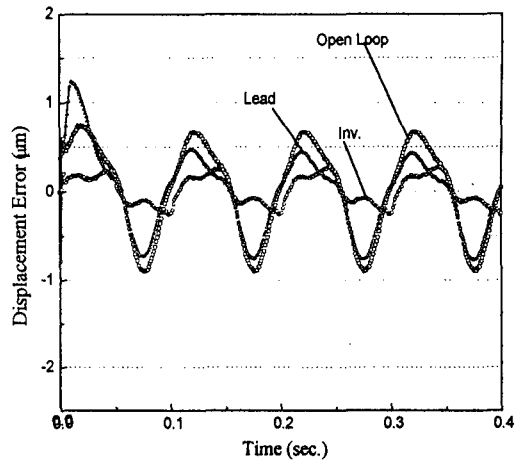


Fig. 8 Tracking accuracy of open loop, inverse hysteresis and lead compensator (10Hz sine)

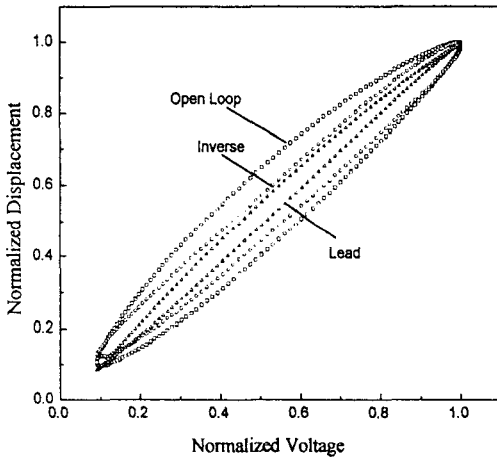


Fig. 6 Hysteresis loop of open loop, inverse hysteresis and lead compensator (50Hz sine)

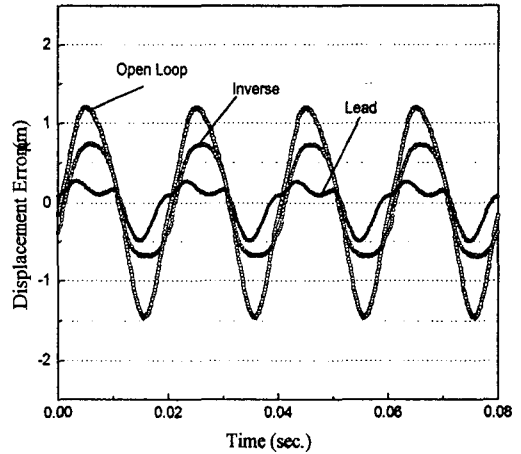


Fig. 9 Tracking accuracy of open loop, inverse hysteresis and lead compensator (50Hz sine)

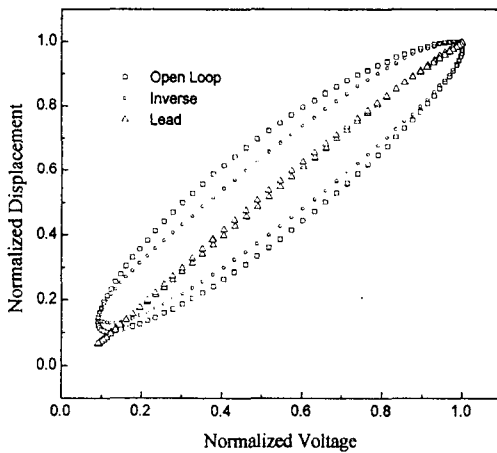


Fig. 7 Hysteresis loop of open loop, inverse hysteresis and lead compensator (100Hz sine)

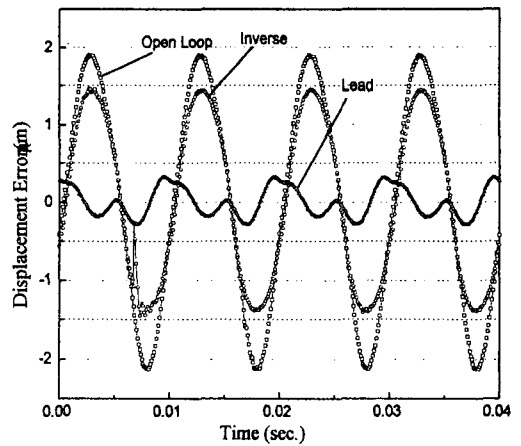


Fig. 10 Tracking accuracy of open loop, inverse hysteresis and lead compensator (100Hz sine)