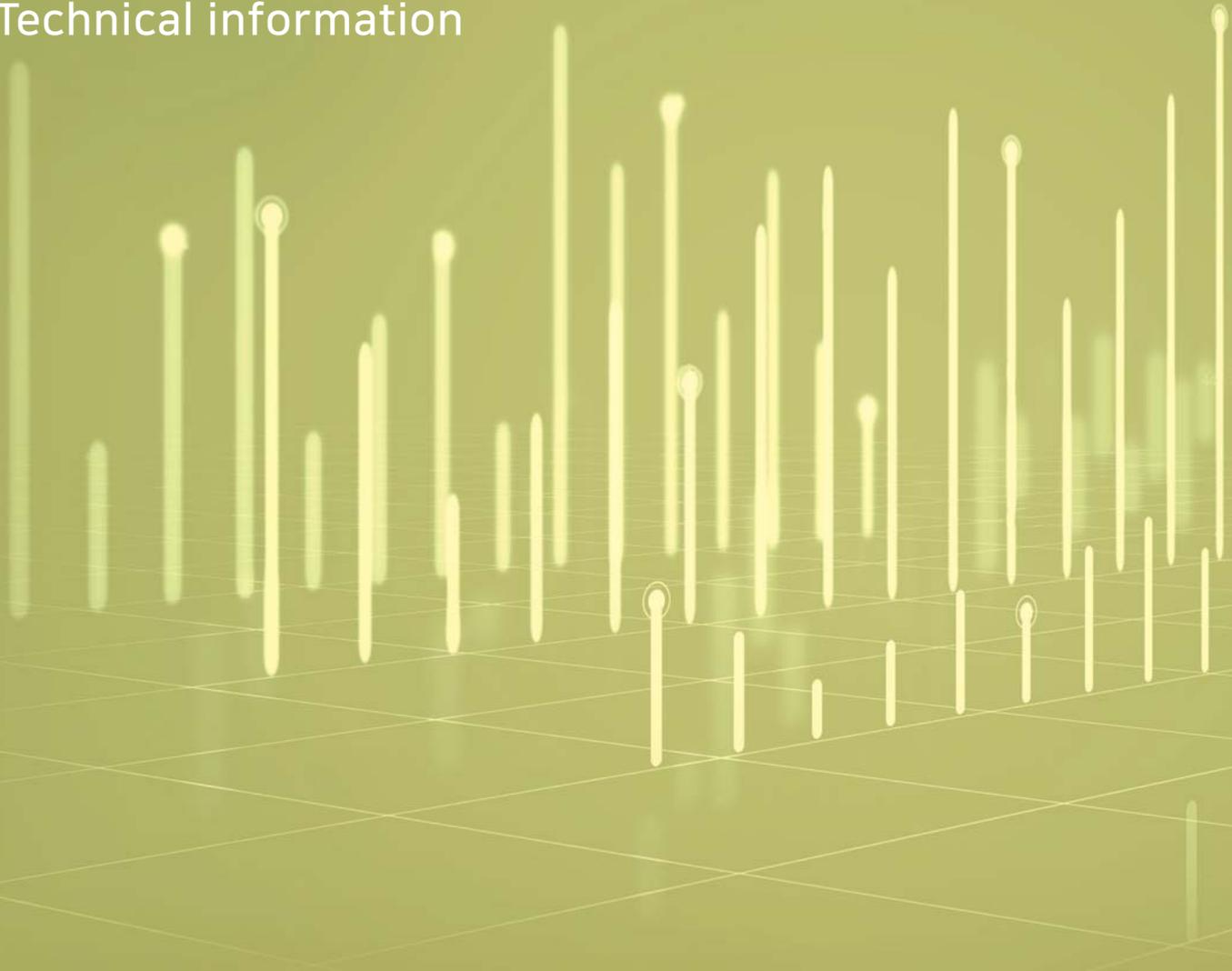


기술 자료

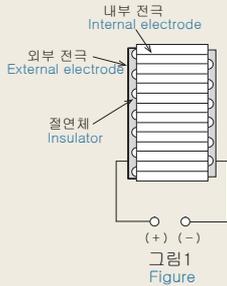
Technical information



179	압전소자의 특성 Characteristics of piezo-electric element
182	피에조 스테이지의 기구와 재료 Mechanism and material of piezo stage
183	정전용량식 변위 센서 Capacitance type displacement sensor
184	Open loop and closed loop
185	케이블 연장 Cable extension
186	진공사양 Vacuum specifications
187	피에조 스테이지의 설치 방향 Installation direction of piezo stage
188	스펙표를 보는 방법 (피에조 스테이지) How to read the specification table of piezo stage
189	공진주파수의 계산식에 대하여 Calculation formula of the resonance frequency diagram
189	동작기구의 특징 Operation mechanism features
190	검사방법 (피에조 스테이지) Inspection method of piezo stage
192	동작 데이터 예 (피에조 스테이지) Operating data example (Piezo stage)
194	PID 게인 조정 예 (피에조 스테이지) PID gain adjustment example (Piezo stage)
195	샘플 소프트웨어 (피에조 스테이지) Sample software (piezo stage)
196	단위 환산예 Examples of unit conversion

압전소자 특성 Characteristics of piezo-electric element

압전소자의 구조 Structure of piezo-electric element



압전 소자란 전압을 인가하면 변위가 생기는 고체 액츄에이터입니다. 압전 세라믹판 양면에 전극을 형성하여 전압을 인가하면 약 0.1%의 변형이 발생합니다. 그림 1은 적층형 압전 소자의 구조를 나타낸 것입니다. 압전 세라믹스 박판이 마주 보는 면에 내부전극을 형성하여 여러 장을 겹쳐 쌓고 측면에는 서로 다르게 한층 간격으로 절연체를 설치하여 외부전극을 형성합니다. 압전 소자 측면은 보호를 위해 수지로 덮여 있습니다. 또한 외기를 차단한 금속 케이스 봉입형도 있습니다.

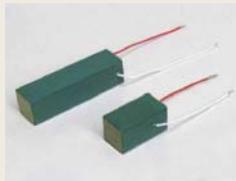
A piezo-electric element is a solid actuator subject to displacement when voltage is applied. Applying voltage with electrodes formed on both faces of the piezo-electric ceramic plate will cause distortion by about 0.1%.

Figure 1 shows the structure of stacked piezo-electric elements. Form many internal electrodes and stack them on the surface opposed to the piezo-electric ceramic thin plate.

On the sides, alternately fit an insulator to every two layers.

The piezo-electric element sides are covered with resin for protection. Some are packed in metal sealed case that shuts off outside air.

수지외장형
(樹脂外裝型)
Resin coated type



금속 케이스 봉입형
Metal sealed type



적층형 압전 소자의 특징은

- ① 대발생력 ② 고분해능 ③ 고속응답 ④ 전기기계 변환효율이 높음 등을 들 수 있습니다.

Features of stacked piezo-electric element include:

- ① large generative force; ② high resolution; ③ high response; and ④ high efficiency of electric-mechanical conversion.

압전소자의 변위 Displacement of piezo-electric element

히스테리시스 Hysteresis



그림 2는 적층형 압전 소자에 전압을 인가했을 때의 변위량입니다. 전압에 따라 압전소자는 신축되지만 전압을 올릴 때(승압 시)와 내릴 때(강압 시)의 변위곡선은 같은 궤적을 통과하지 않습니다. 이것을 히스테리시스(이력)라고 부르며, 최대 변위량의 약 15~20%정도 발생합니다.

또한 압전소자에 대한 전압인가를 여러 번 반복했을 때의 변위곡선을 보면 1회째와 2회째 이후에는 전압 0 V근방에서의 변위량이 시프트하여 이를 제로 시프트라고 부릅니다.

Figure 2 shows the displacement caused when voltage is applied to stacked piezo-electric element. Although the piezo-electric element expands and contracts according to the voltage, the displacement curve with increasing voltage (pressurizing) and that with decreasing voltage (depressurizing) are not on the same track. In this phenomenon, which is called hysteresis, about displacement of 15 to 20% of the maximum displacement occurs.

In addition, when looking at the displacement curve after repeated application of voltage onto the piezo-electric element, you will see that the displacement in proximity of voltage 0 V varies between the first one and subsequent ones. This phenomenon is called the zero shift.

크리프 Creeping

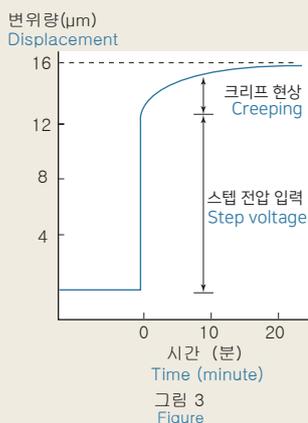


그림3은 압전소자에 일정한 전압을 인가하여 유지했을 때의 변위량의 시간변화에 대해 나타낸 것인데, 시간이 지남에 따라 변위량이 조금씩 변화하고 있음을 알 수 있습니다. 이러한 현상을 크리프라고 부르며 압전 세라믹스의 분극에 기인합니다.

크리프량은 직전의 전압값에서 입력전압의 폭에 따라 커지고 그 방향은 전압의 오르내림과 같은 방향으로 발생합니다.

Figure 3 shows the temporal change of displacement when retained with certain voltage applied onto the piezo-electric element. You may see that the displacement is gradually changing over time. This phenomenon is called creeping, which is caused by polarization of piezo-electric ceramics.

The creeping amount becomes larger according to the difference of input voltage from the previous voltage value and the direction will be the same as increase/decrease of the voltage.

이러한 히스테리시스나 크리프 등의 성질을 가지고 있기 때문에 압전소자의 변위량을 인가전압값만으로 일의적으로 결정할 수는 없습니다. 압전소자를 정밀위치 결정기기의 구동원으로 이용할 경우에는 변위센서를 병용하여 실제 변위량(이동량)을 측정하면서 항상 인가전압을 제어해야 합니다.

Due to the characteristics such as hysteresis and creeping, displacement of the piezo-electric element cannot be determined only in accordance with the applied voltage value. When the piezo-electric element is used as a driving source of a precision positioning device, it is necessary to also use a displacement sensor to measure the actual displacement (travel distance) while always controlling the applied voltage.

압전소자의 발생력 Generative force of piezo-electric element

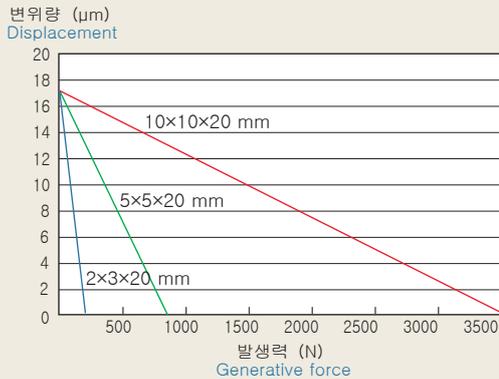
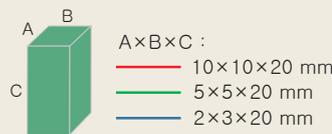


그림 4는 적층형 압전 소자의 발생력을 보여주고 있습니다. 압전 소자는 탄성체입니다. 때문에 압력(부하)을 가하면 줄어듭니다. 이에 정격전압을 인가해 원위치로 되돌릴 수 있는 힘을 최대발생력이라고 부릅니다.

A force that applies voltage to restore the original position is called the maximum generative force.



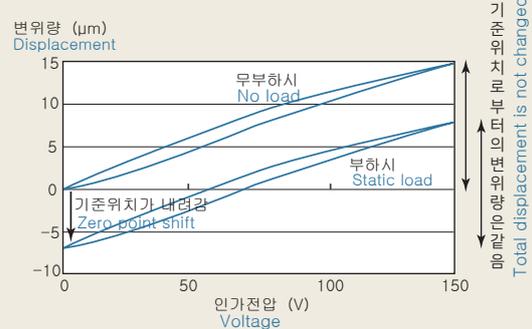
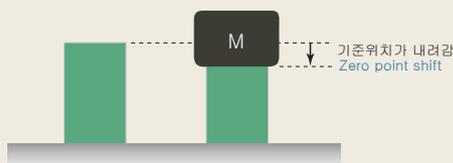
압전 소자의 변위량은 가해지는 압력(부하)이 추와 같이 일정하중과 스프링처럼 서서히 변화하는 경우에 다릅니다.

Displacement of the piezo-electric element varies depending on whether the applied pressure (load) is a constant load like a weight or a variable load that changes gradually like a spring.

■ 부하(壓力)일정의 경우 In case of constant load (pressure)

부하(압력)가 일정한 경우에는 줄어든 위치를 기준으로 하면 정격전압에 의해 정격변위를 얻을 수 있습니다.

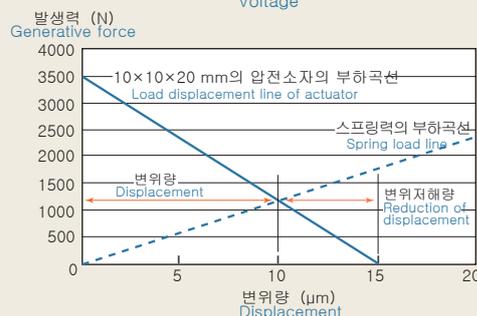
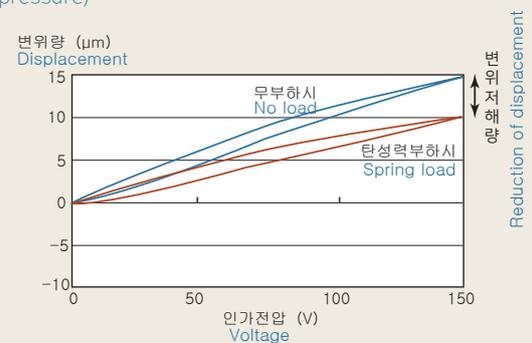
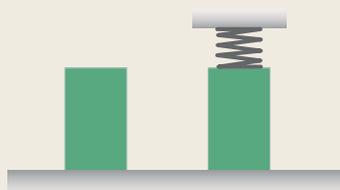
If the load (pressure) is constant, the rated displacement can be achieved by the rated voltage when the contracted position is taken as a reference point.



■ 부하(壓力)가 변화하는 경우 In case of variable load (pressure)

부하(압력)가 스프링과 같은 탄성력인 경우에는 변위는 압전소자의 강성과 스프링의 강성이 평등한 곳까지밖에 변위하지 않아 변위 저해가 발생합니다.

If the load (pressure) is an elastic force like a spring force, displacement only occurs in portions where rigidity of the piezo-electric element and that of the spring are balanced, which results in a displacement disorder.



『금속 케이스 봉입형』 압전소자 "Metal sealed type" piezoelectric actuator



스테이지 본체에 삽입
Assembled to the body of a piezo stage



금속 케이스 봉입 타입은 압전 소자를 외기로부터 차단한 구조로 함으로써 분위기의 영향을 잘 받지 않습니다. 수지 외장 타입의 압전 소자에 비해 주위 온도나 습도에 대한 내구성이 뛰어나고 장시간 정전압 인가에서도 열화(수명)가 잘 일어나지 않아 다음과 같은 기기나 환경 혹은 사용 방법에 적합합니다.

- 바이오 등 액체를 취급하는 기기나 현미경
- 가공기로 오일이나 미스트가 뿌려지는 환경
- 일정 위치에서 장시간 정지 (대기)하는 사용법 ※ 작동하는 시간이 더 짧다
- 고장 시 교환(탈부착)이 어려운 장소에서의 사용
- 높은 신뢰성이 요구되는 용도
- 고진공, 초고진공

The type enclosed in a metal case is designed to be less susceptible to the atmosphere by having a structure in which the piezoelectric element is isolated from the external air. It is more durable to the ambient temperature and humidity than the piezoelectric element incorporated in the type with a resin exterior. In addition, this type is less subject to deterioration (life shortening) even if it is applied with a constant voltage for a long time, and is therefore suitable for the following equipment, environments or usages.

- Equipment or microscope that handles liquids such as bio
- Environment with oil or mist due to processing machinery
- Cases where the stage is used in static (stand-by) state for a long time in a certain position
* The operating time is shorter.
- Use in a place where it is difficult to replace (remove) the stage in the case of failure
- Applications where high reliability is required
- High / ultrahigh vacuum

압전소자의 절연저하 Decreased insulation of the piezoelectric element

적층형 압전 소자의 고장 모드 중 하나로 절연성 저하에 의한 쇼트 모드(절연 파괴)가 있습니다. 절연성 저하를 일으키는 메커니즘은 완전히 해명되어 있지 않습니다만, 정적인 사용법(직류전압인가)의 경우와 동적인 사용법(펄스전압인가)의 경우에는 고장의 발생률이 크게 다른 것이 확인되었습니다. 또, 일반 전자 부품과 같이 인가 전압이나 환경 온도에 더하여 습도의 영향을 크게 받는 것이 확인되고 있습니다. 보관 시나 동작 시의 주위 환경에 의한 소자의 흡습은 마이그레이션에 의한 ※절연 저항 저하의 원인이 됩니다.

※ 마이그레이션

내부 전극의 Ag가 이온화되어 인가전계에 의해 입계(粒界)에 따라 침투해 절연 파괴에 이르는 현상. 고습도 환경에서 일정 전압을 연속 인가하는 경우에 발생하기 쉽다.

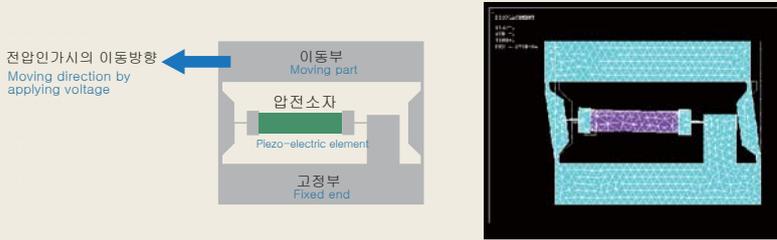
One of the failure modes of a laminated piezoelectric element is short-circuiting mode (dielectric breakdown) due to reduced insulation. The mechanism of such an insulation reduction has not been completely elucidated. However, it has been confirmed that the failure incidence ratio is substantially different between static use (direct current is applied) and dynamic use (pulsing voltage is applied). It has also been confirmed that a laminated piezoelectric element is greatly affected by the humidity in addition to the applied voltage and the environmental temperature, as with general electronic parts. Moisture absorption in the element due to the ambient environment during storage or operation may cause the reduction of the insulation resistance resulting from migration*.

* Migration

It is a phenomenon in which Ag in the internal electrode is ionized, and the ionized Ag penetrates into the element along the grain boundary due to the applied electric field, resulting in dielectric breakdown. It tends to occur in cases where a constant voltage is continuously applied in a high-humidity environment.

피에조 스테이지의 기구와 재질 Mechanism and material of piezo stage

탄성 힌지 기구 / 변위 확대 기구 Elastic hinge mechanism / Magnification mechanism

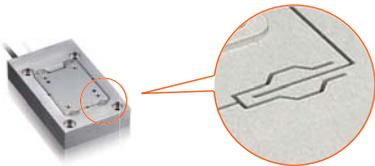


나노미터 오더의 위치 결정에 있어서는, 통상 문제가 되지 않는 백래쉬(backlash)나 마찰의 영향이 상대적으로 큰 값이 되어, 무시할 수 없게 됩니다. 그래서, 피에조 스테이지에서는 탄성 변형을 이용한 안내 기구나 확대 기구를 사용하고 있습니다. 예를 들어 위 그림과 같은 탄성 힌지를 이용한 피에조 스테이지에서는 확대기구와 평행스프링 안내기구로써 피에조의 특징인 높은 분해능을 유지하면서 큰 스트로크나 아주 작은 틸트, 더 높은 직직성을 실현할 수 있습니다.

For nanometer order positioning, effects of backlash and friction that are normally negligible becomes relatively significant and not negligible. Therefore, a guidance mechanism and magnification mechanism that utilize its elastic deformation are use in Piezo Stage. For example, a piezo stage with the elastic hinge as indicated in the above figure may maintain piezo's high resolution and also realizes a large stroke, ultra-small tilt and high straightness at the same time by using its magnification mechanism and spring-loaded guidance mechanism.

실제의 탄성 힌지 기구와 응력해석 예

Example of an actual elastic hinge mechanism and stress analysis



탄성 힌지 가이드 기구 (예)
Example of elastic hinge mechanism



- 마찰 마모가 없고 장기간의 반복 왕복 동작에서도 주행 정밀도의 열화가 없습니다.
- 그리스를 사용하지 않기 때문에 먼지 일으키미 없고, 유지 보수가 필요 없습니다.
- FEM해석에 의한 응력해석에서 반복피로강도를 고려한 힌지설계를 합니다.

- With no frictional wear, the running accuracy will not decrease even in long-term repetitive reciprocating motion.
- Since no grease is used, the product will not generate dust, and can be used on a maintenance-free basis.
- The hinge design will be conducted while considering the repeated fatigue strength through stress analysis based on FEM analysis.

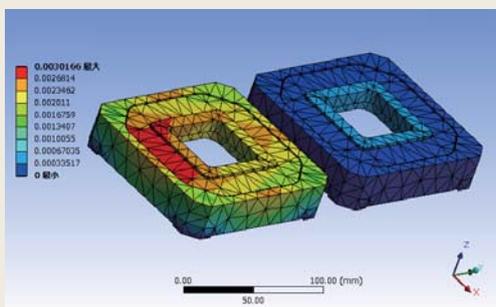
본체 재질 Body material

카탈로그 표준품은 본체 재질로 알루미늄합금 또는 강재를 사용하였으나 용도에 적합한 재질로 제작 가능 합니다.

- 알루미늄 합금 : 가볍고 가공성이 좋아 당사에서 가장 많이 사용합니다.
- 강철재 : 고강성으로 내하중성을 갖출 경우 적합합니다.
- 스테인리스 : 주로 마텐자이트계 재료가 사용되어 내환경성 및 비자성 용도에 적합합니다.
- 티타늄 합금 : 비자성 특성을 필요로 하는 기기에 삽입 시 사용합니다.
- 슈퍼 인바 : 열팽창률이 낮기 때문에, 주위 온도 변화의 영향을 특별히 줄이고 싶을 때 사용됩니다.

In the catalog standard product, aluminum alloy or steel is used as the material of the body. However, a product fabricated with material that suits the application can also be available.

- Aluminum alloy : Lightweight and well workable, and frequently used also at our company.
- Steel : Being highly rigid, suitable for applications where a load bearing capacity is required.
- Stainless steel : Mainly martensitic stainless steel is used. Suitable for environment-resistant and non-magnetic applications.
- Titanium alloy : Used if the product is to be incorporated in equipment that requires non-magnetic property.
- Super invar : Since its thermal expansion coefficient is low, this material is used in cases where the impact of change in the ambient temperature needs to be minimal.



알루미늄 합금과 슈퍼 인바의 열적 변형량의 FEM 해석 (투과홀 포함 스테이지의 비교 예)

FEM analysis of the thermal strain of aluminum alloy and super invar (an example where stages with an opening are compared)

정전용량식 변위 센서 Capacitance type displacement sensor

정전용량식 변위 센서 Capacitance type displacement sensor

정전용량형 변위 센서는 프로브와 타겟 간의 정전용량 변화를 측정하는 것에 의한 변위 센서입니다. 고분해능, 고재현성, 고안정이 특징입니다.

A capacitance type displacement sensor is a displacement sensor that measures the changes in capacitance between the probe and target. This sensor is featured by high resolution, high reproducibility and high stability.

분해능과 오프셋 Offset and resolution

센서의 출력은 센서 프로브와 측정 대상면이 어떤 일정한 거리가 되었을 때 0이 됩니다.이 때의 거리를 「오프셋」이라고 부릅니다. 이 오프셋거리를 기점으로 측정레인을 설정합니다.

오프셋은 보통 측정 레인지의 5~10%에 해당하며 측정 프로브의 외경에 따라 선택할 수 있는 측정 레인지가 다릅니다.

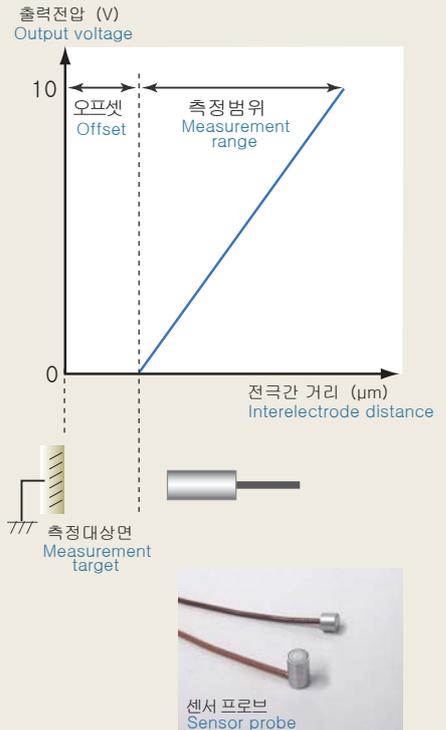
센서의 변위 검출 한계(분해능)는 이하의 식에 의해 산출됩니다.

$$\text{분해능} = \text{측정 범위} / \text{출력 전압폭} \times \text{노이즈 레벨}$$

The sensor output becomes zero when the distance between the sensor probe and the measurement target is a certain distance. The distance is called "offset." Set the measurement range based on the offset distance. Offset is normally equivalent to 5 to 10% of the measurement range and the measurement range that can be selected varies depending on external diameter of the measurement probe.

Sensor's displacement detection limit (resolution) is calculated by the following formula.

$$\text{Resolution} = \text{Measurement Range} / \text{Output Voltage Width} \times \text{Noise Level}$$



센서 앰프와 프로브의 조합 Capacitance type displacement sensor

정전 용량형 변위 센서는 프로브와 앰프의 조합으로 게인 및 리니어리티 등이 개별적으로 조정되어 있습니다. 따라서 프로브가 내장된 스테이지와 앰프가 탑재된 피에조 컨트롤러는 반드시 1대1 페어로 사용하셔야 합니다. 다른 쌍으로 사용하면 고장의 원인이나 소정의 성능을 얻을 수 없을 수가 있습니다.

특히 다축 구성의 스테이지를 사용할 때는 각각의 축에 대해 컨트롤러로의 접속 채널이 미리 정해져 있기 때문에 올바른 조합으로 접속하도록 주의가 필요합니다.

The capacitance type displacement sensor adjusts the gain and linearity separately by the combination of the probe and amplifier. Therefore, it is necessary to use a stage with an integral probe and Piezo Controller with an amplifier in a one-to-one pair. Wrong combination may cause a failure or impair the performance.

Especially when a multiple-axis stage is used, channels connected to the controller are predetermined for each axis, so care must be exercised to connect in right combination.



Open loop와 Closed loop

오픈루프 동작은 지령신호 0~10V를 단순히 15배로 증폭하여 피에조 스테이지로 0~150V를 전압인가하여 구동합니다. 그렇기 때문에, 압전 소자의 특성인 히스테리시스나 드리프트는 그대로 스테이지의 특성으로 나타나 위치 결정 오차를 일으킵니다. 클로즈드 루프 동작은 피에조 스테이지에 내장된 변위 센서의 신호를 피에조 컨트롤러가 항상 감시하고, 명령 신호 0~10V가 스테이지의 스트로크 0~최대 μm 과 일치하도록 항상 보정 제어를 실시합니다.

The open loop operations simply amplify the command signal 0-10 V fifteenfold and apply voltage of 0-150 V to the Piezo Stage onto the Piezo Stage for driving. Therefore, characteristics of piezo-electric element such as hysteresis and drift take effect as properties of the stage, resulting in positioning errors. In closed loop operations, the Piezo Controller always monitors signals from the built-in displacement in the Piezo Stage and compensates and corrects them so that the command signals 0-10 V become consistent with the stage stroke 0 to maximum μm .

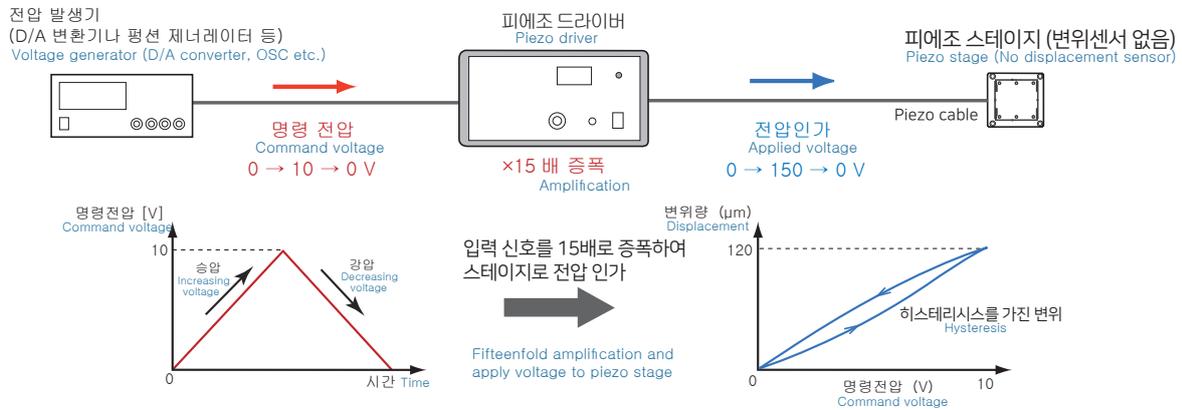
【예】 다음 사양의 피에조 스테이지에 아날로그 지령전압을 <0→10V→0V>로 직선적으로 부여한 경우의, 오픈루프와 클로즈드 루프 각 동작의 거동을 나타냅니다.

스트로크 : 120 μm (오픈 루프시)
 100 μm (클로즈드 루프 시)
 명령 전압 : 0 → 10 V → 0 V

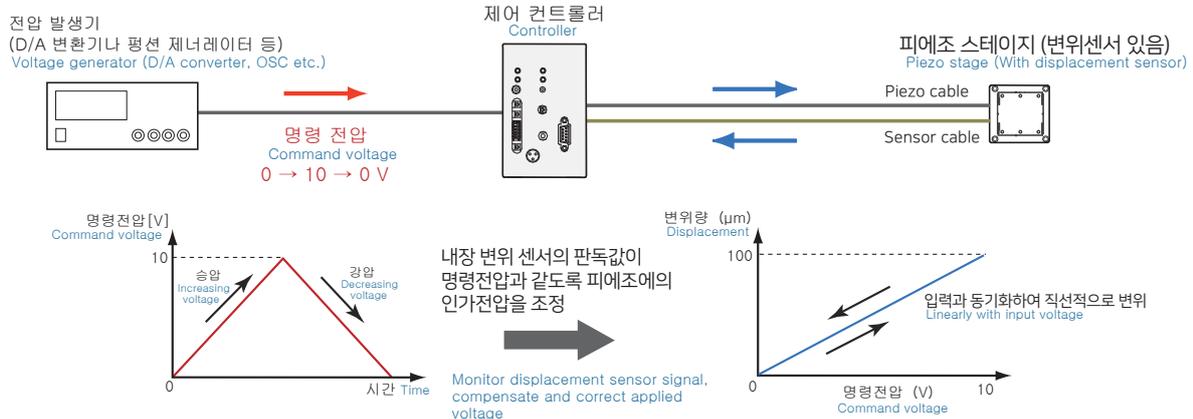
[Example] Described below is how open loop and closed loop operations act when analog command voltage is linearly applied to the piezo stage of the following specifications in order of "0 V > 10 V > 0 V."

Travel range : 120 μm (open loop)
 100 μm (closed loop)
 Command voltage : 0→10 V→0 V

오픈 루프에서의 동작 Operation in open-loop



클로즈드 루프에서의 동작 Operation in closed-loop



케이블의 연장 Cable extension

표준 사양에서는 「피에조 케이블」과 「센서 케이블」의 길이는 2 m입니다. 그러나 피에조 스테이지와 컨트롤러의 거리를 떼어놓고 싶을 때 등 케이블 길이를 늘릴 필요성이 있을 수 있습니다. 이때 단순히 케이블을 연장하면 전기적인 노이즈가 커져 분해능이나 반복 위치 결정 정밀도 등에 영향을 줍니다. 특히 정전 용량식 변위 센서의 전기 신호는 원래 미약하기 때문에 케이블 길이는 성능에 큰 영향을 미칩니다.

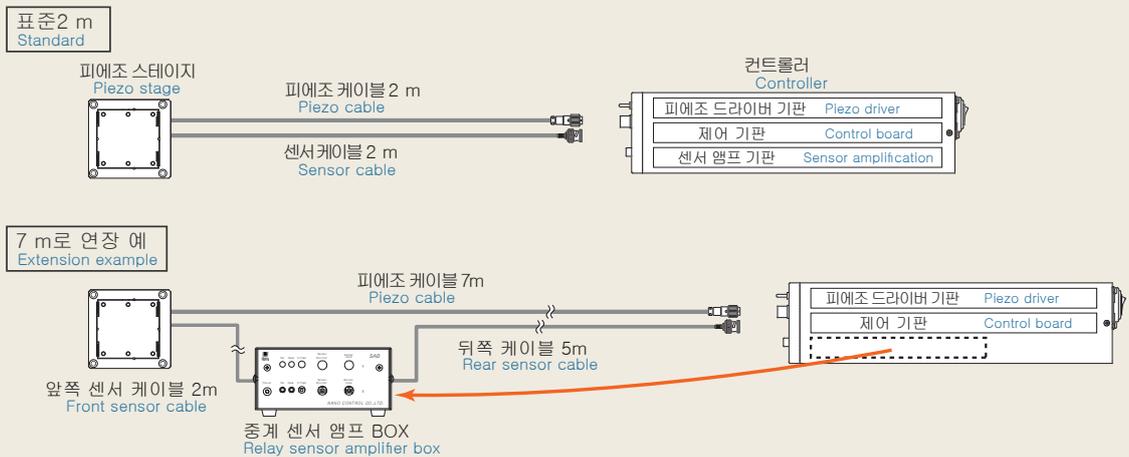
따라서 통상은 컨트롤러 내부에 탑재되어 있는 센서 앰프 기판을 분리하여 중계 앰프로서 피에조 스테이지에서 가까운 곳에서 일단 증폭시키고, 그 후 케이블 길이를 임의로 지연시킵니다.

이 방법을 통해 S/N비를 악화시키지 않고 원래의 피에조 스테이지 성능을 유지한 채 케이블 길이를 늘릴 수 있습니다.

The standard length of "piezo cable" and "sensor cable" is 2 m. However, for cable run within the device or increase of distance between the piezo Stage and Controller, it may be necessary to extend the cable length. At this point, extending the cable will increase the electric noise, which affects the resolution and repetitive positioning accuracy. Especially the cable length affects electric signals of the capacitance displacement sensor as they are is subtle by their nature.

Therefore, the sensor amplifier board can be apart from the controller and serve as a relay sensor amplifier to amplify the sensor signals near the piezo Stage. After passing the relay sensor amplifier, the signals may be connected to the controller via a cable of any length. This allows for extension of the cable length while maintaining the original performance of the piezo Stage without impairing the S/N ratio.

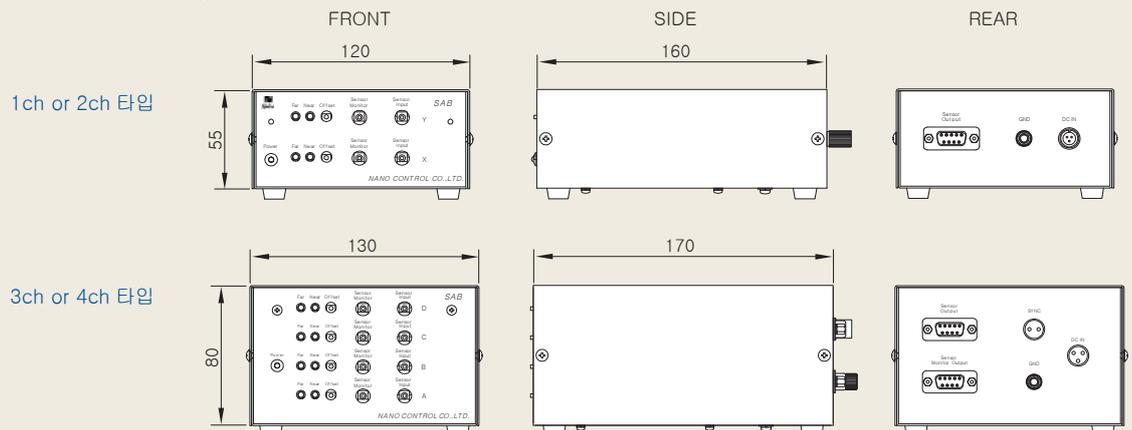
케이블 연장 예 Cable extension example



중계 센서 앰프 박스의 사양 Specification of relay sensor amplifier box

접속축수 Number of connectable axes	1ch or 2ch	3ch or 4ch
센서출력전압 Sensor output voltage	0 ~ +10 V	
출력단자 Output connector	Dsub connector (9pin)	
주파수특성 Frequency characteristic	DC ~ 1 kHz	
직선성 Linearity	± 0.1%	
전원 Power source	DC+24 V/0.2 A(1ch), 0.4 A(2ch), 0.6 A(3ch), 0.8 A(4ch)	
외형치수 Dimensions	W120×D160×H55 mm	W130×D170×H80 mm
본체무게 Weight	0.5 kg (1ch), 0.6 kg (2ch)	0.9 kg (3ch), 1.0 kg (4ch)
RoHS	○	○

외형치수도 Drawings



진공 사양 Vacuum specifications

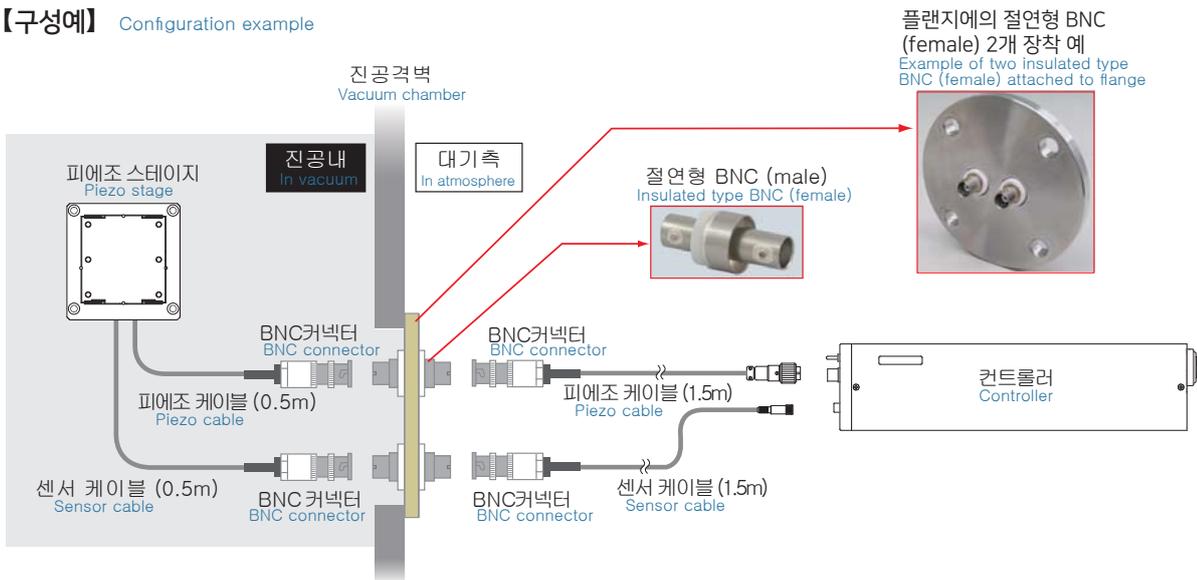
'본 카탈로그'에 기재된 제품은 대기에서의 사용을 상정하고 있으나 진공 사양으로 일부 부재를 변경하여 대응 가능합니다.

Although products indicated in "General Catalog" are assumed to be used in the atmosphere, they can also be used in vacuum with some vacuum specification parts.

■ 피에조 스테이지의 진공 대응 예 Example of vacuum specifications for piezo stage

■ 피에조 스테이지의 진공 대응 예

【구성예】 Configuration example



진공 사양으로 할 경우는 주로 다음 내용에 대해 변경합니다.

- ① 피에조 케이블선을 진공 대응 타입으로 한다
 - ② 센서 케이블선을 진공 대응 타입으로 한다
 - ③ 진공 내 케이블 길이, 대기 측 케이블 길이를 각각 정함
(예) 진공측 0.5m, 대기측 1.5m 등
 - ④ 피에조 케이블단 및 센서 케이블단을 BNC 커넥터로 한다
 - ⑤ 접착제를 진공 사양으로 한다.
 - ⑥ 피에조 스테이지 본체 표면처리방법 정하기
- ~ 사용자 준비사항 ~
- ⑦ 진공 격벽의 도입 단자를 "절연형 BNC (female)"로 한다 (1축에 대하여 2개의 BNC 단자가 필요)

For vacuum specifications, mainly the following changes must be implemented.

- ① A vacuum-type piezo cable line shall be used.
- ② A vacuum-type sensor cable line shall be used.
- ③ The vacuum cable length and atmosphere cable length shall be determined.
(Ex) 0.5 m in vacuum and 1.5 m in atmosphere
- ④ BNC connectors shall be used for the ends of the piezo cable and sensor cable.
- ⑤ Adhesive for vacuum devices shall be used.
- ⑥ The surface treatment method for the Piezo Stage main unit shall be determined

Work(s) by customer

- ⑦ Please use "insulated BNC (female) terminals" as vacuum current feedthrough for the vacuum partition.
(2 BNC terminals are required for 1 axis).

피에조 스테이지의 설치방향 Installation direction of piezo stage



적층형 압전소자는 얇은 세라믹과 전극이 교대로 여러 층 겹쳐져 있는 구조이므로, 압축력에 강하고 당김력과 전단력에 약하다는 기계적 특징이 있습니다. 피에조 스테이지에 내장조립하는 단계에서 어느 정도의 예압이 가해지도록 고려하여 설계하였으나, 실제로 피에조 스테이지 취급 시 당김이나 전단 방향의 외력을 주지 않도록 유의하여야 합니다.

Stacked piezo-electric elements are mechanically characterized by strong compression force and weak tensile and shear strength due to alternately-stacked layers of thin ceramic and electrodes. Although they are designed so that certain preload is applied to them when being assembled onto the Piezo Stage, care must be exercised not to give any external force in pull or shear directions in actual handling of the Piezo Stage.

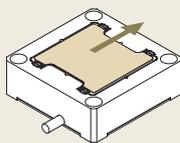
피에조 스테이지 취부, 설치에 대하여 Mounting and installation of Piezo Stage

본 카탈로그에 게재되어 있는 <피에조스테이지>의 치수도에는 이동 테이블면의 움직이는 방향을 화살표로 표시하고 있습니다. (아래 그림 참고).

이것은 전압인가에 의한 이동 테이블면의 동작방향을 나타내지만 동시에 압전소자의 신장방향을 의미합니다. 즉 화살표와 같은 방향으로 외력을 가하는 것은 압전 소자에 당기는 힘을 주게 되어 고장을 유발하는 요인이 됩니다. 특히 탑재물을 이동 테이블에 나사로 고정할 때 가해지는 "토크"나 "비틀림"의 방향이 압전 소자에게 당기는 방향이 되지 않도록 주의가 필요합니다.

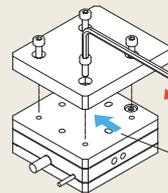
In dimensional drawings of "Piezo Stage" provided in this catalog, a direction of the trolley table surface travel is indicated by an arrow. (See the following figure.) The arrow not only represents the travel direction of the table surface under voltage but also indicates the direction of piezo-electric element expansion. That is, applying an external force to the direction of the arrow also gives a pull force on the piezo-electric element, which may result in any malfunction.

Especially, care must be exercised so that the "torque" and "torsion" generated when a work is fixed to the trolley table by screws do not pull the piezo-electric elements.



전압 인가 시의 테이블면 동작 방향
The arrow shows direction of motion by applying voltage

압전 소자의 신장 방향이며, 당기는 힘이 되는 방향
Tension force direction



나사를 체결할 때 또는 풀 때에 가하는 힘의 방향은 테이블 이동방향과 직각방향으로 한다.

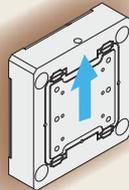
When installation or release, power shall not be given in the moving direction

테이블 이동방향
Moving direction

평면 설치 이외의 방향으로 장착하여 사용할 경우에도 "중력방향"이 압전소자에게 잡아당기지 않도록 주의해야 합니다.

Care must be exercised not to make the "direction of gravitational force" a pull force for the piezo-electric elements even when the unit is used in other than the horizontal posture.

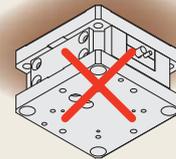
■ X축을 수직으로 세워 사용하는 경우
X-axis in an up-right posture



피에조 스테이지의 이동방향(전압 인가시에 움직이는 방향)이 위쪽이 되도록 설치해 주세요. 경사면에 설치도 마찬가지입니다. 벽면에 설치해 바닥면과 평행한 가로 방향으로 움직이는 경우는 특별히 제한이 없습니다.

Please install the unit so that the Piezo Stage moves upward (under voltage). The same shall apply to installation on an inclined plane. There are no constraints in installation on a wall if it travels horizontally in parallel with the floor surface.

■ Z축을 거꾸로 매달아서 사용할 경우
Z-axis hanged upside down



Z축 스테이지는 상판에서 거꾸로 해서 사용할 수 없습니다. 이러한 사용법에는 커스텀 사양으로 대응 가능합니다.

The Z-axis stage cannot be hanged upside down. Customization is required for such usage.

사양 보는 방법 (피에조 스테이지)

How to read the specification table of piezo stage

형번 Model number	
외관 Appearance	
스트로크 Travel range	크로즈드 시 Closed loop ① 오픈 시 Open loop
분해능 Resolution ②	
반복 위치 결정 정도 Repeatability ③	
내하중 Load capacity ④	
공진주파수 Resonant frequency	0 g부하시 Load ⑤ 100 g부하시 Load
Pitching/Yawing/Rolling ⑥	
내장 변위 센서 Built-in displacement sensor	
리니어리티 Linearity ⑦	
압전소자 정전용량 Capacitance ⑧	
강성 Stiffness ⑨	
본체 Body	무게 Weight ⑩
	재질 Material ⑪
	표면처리 Surface treatment

- ① 스트로크
closed loop 시 및 open loop 시 최대 이동량입니다.
※ open loop에 대해서는 대표치로서 기재하고 있습니다.
- ② 분해능
closed loop 제어시 분해능입니다.
- ③ 반복 위치 결정 정밀도
closed loop 제어시의 반복위치결정정도(精度)입니다.
- ④ 내하중
정상 동작할 수 있는 탑재 하중을 대표값으로 기재했습니다.
- ⑤ 공진 주파수
소정의 탑재 중량을 실은 경우의 기계적 공진 주파수를 대표값으로 기재했습니다.
- ⑥ 피칭/요잉/롤링
open loop로 가동 가능한 이동량 전역의 최대 각도차입니다.
(2축 또는 3축의 경우에는 치수도에 기재된 축방향을 기준으로 $\theta_x\theta_y\theta_z$ 의 순서로 기재합니다)
- ⑦ 리니어리티
closed loop 제어 시의 리니어리티입니다.
- ⑧ 압전소자 정전 용량
압전 소자의 정전용량을 대표치로 기재했습니다.
- ⑨ 강성
이동테이블 진행방향의 강성을 대표값으로 기재하였습니다.
- ⑩ 질량
피에조 스테이지 본체의 무게입니다. 케이블이나 커넥터는 포함되어 있지 않습니다.
- ⑪ 본체재질, 표면처리
피에조 스테이지 본체에 사용하는 재질과 표면 처리 방법입니다.

스테이지의 정밀도 검사 측정 시에 탑재하는 질량은 사내 기준으로 정하고 있어, 측정 항목에 따라 다소 다르지만, 기준으로서 약 50~100g 전후입니다.

고객께서 실부하량을 지시하시면 동등한 부하로 측정합니다.

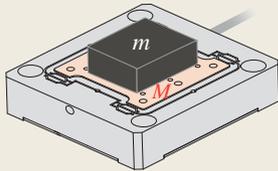
- ① Travel range
Maximum travel distance for closed loop and open loop.
*For the open loop, the value is a representative value.
- ② Resolution
Resolution for the closed loop control.
- ③ Repeatability
Repetitive positioning accuracy for the closed loop control.
- ④ Load capacity
The normal operating carry load is indicated as a representative value.
- ⑤ Resonant frequency
The mechanical resonance frequency under a prescribed carry load is indicated as a representative value.
- ⑥ Pitching/Yawing/Rolling
Maximum angular difference in the entire travelling range possible with the open loop.
(For 2 or 3 axes, the order of indication shall be $\theta_x\theta_y\theta_z$ based on the axial direction indicated in the dimensional drawing.)
- ⑦ Linearity
Linearity in closed loop control.
- ⑧ Capacitance
The capacitance of piezo-electric element is indicated as a representative value.
- ⑨ Stiffness
Rigidity in the travelling direction of the trolley table is indicated as a representative value.
- ⑩ Weight
Weight of the main unit of the Piezo Stage. (Cables and connectors are not included.)
- ⑪ Body material, surface treatment
Material and surface treatment method used for the Piezo Stage main unit.
Weight to carry in the accuracy inspection and measurement of the stage is prescribed in the internal standard, which is approximately 50 to 100 g as a reference. (This may slightly vary depending on items to measure.)
Please specify the actual load amount of your environment so we can make a measurement with the same load.

공진주파수 계산식에 대하여

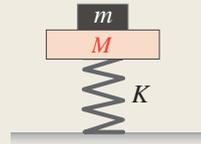
Calculation formula of the resonance frequency diagram

탄성힌지구조의 피에조 스테이지를 강성 K [N/m], 가동부 질량 M [kg] 스프링 매스로 했을 때, 이것에 부하 m [kg]를 가했을 때의 공진 주파수 f [Hz]를 단진동의 식으로 나타냅니다.

Assume, for the spring mass model, that the rigidity of a piezo stage with an elastic hinge mechanism is K [N/m] and the mass of the moving section is M [kg], and that the resonance frequency f [Hz] when a load m [kg] is applied to this can be expressed in a formula of simple harmonic motion.



등가 모델
Equivalent model



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M+m}}$$

f : 공진주파수 [Hz] Resonant frequency
 K : 강성 [N/m] Stiffness
 M : 가동부 (이동테이블) 무게 [kg] Mass of the moving section (moving table)
 m : 탑재부하 [kg] Applied load

어떤 부하 m_1 , m_2 를 추가했을 때의 공진주파수 f_1 , f_2 를 FEM 해석으로 계산함으로써 외관의 M 과 K 를 구하고, 상기의 식에 대입함으로써 각 피에조 스테이지마다의 단진동의 식을 얻을 수 있습니다. 여기서 임의의 m 에 대한 공진주파수가 구해집니다.

탑재부하에 의한 공진주파수 변화의 예
Example of change in the resonance frequency by the applied load



공진 주파수의 그림은 이것을 그래프화한 것입니다.

Calculating the resonance frequencies f_1 and f_2 when loads m_1 and m_2 are applied in FEM analysis will find the apparent M and K values, and assigning these values in the above formula will lead to a simple harmonic motion formula for each piezo stage. Then, the resonance frequency f for an arbitrary value m will be found.

The figure of resonance frequency is a graphic presentation of this.

FEM 해석에서 부여하는 부하는 임시직방체로 계산하기 때문에 부하의 형상이나 중심 혹은 테이블 탑재위치 등에 따라 실제 공진 주파수는 카탈로그의 그래프와 차이가 생기는 경우가 있습니다. 부하 정보를 주시면 동등한 모델을 설계하고 공진 주파수를 FEM 분석으로 계산하겠습니다.

The load applied in the FEM analysis is calculated with an assumed rectangular solid. Therefore, there may be a difference between the actual resonance frequency and the graph in the catalog depending on the shape or the center of gravity of the load or the position in which the product is installed on the table.

If the customer provides us with the information of the load, we will design an equivalent model and calculate the resonance frequency through FEM analysis.

동작기구의 특징

Operation mechanism features

그림은 이미지입니다.
Figures are for illustrative purposes only.

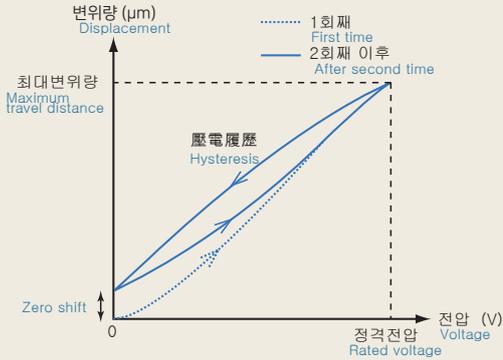


- 압전 소자가 이동 테이블을 직접 움직이는 기구입니다.
- 스트로크는 한정되지만, 분해능이나 응답성, 내하중성은 뛰어납니다.
- This is a mechanism by which the piezoelectric element directly moves the mobile table.
- Although the travel range is limited, it offers superior resolution, response, and load bearing

- 압전 소자의 신장을 기계적으로 확대하는 기구를 갖추고 있습니다.
- 확대율을 변경하여, 직접 구동의 몇배~십수배의 스트로크를 얻을 수 있습니다.
- It is equipped with a mechanism that mechanically expands the extension of the piezoelectric element.
- The expansion ratio can be changed to obtain a travel range several times to several 10s of times larger than direct drive.

검사 방법 (피에조 스테이지) Inspection method of piezo stage

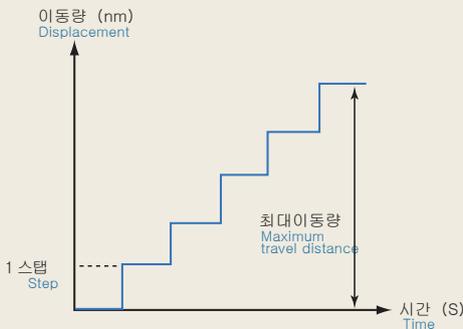
스트로크 (open loop시) Travel range (Open loop)



0V부터 일정간격으로 정격전압까지 전압을 상승시킨 후에 정격전압에서 일정간격으로 0V까지 전압을 하강시킨다. 상기 동작을 1사이클로 하여 5사이클 동작을 반복하고 5번째 히스테리시스 곡선(압전이력)에서의 최대변위량과 최소변위량의 차이를 오픈루프 시의 스트로크값으로 한다.

Increase the voltage from 0 V to the rated voltage at a constant rate and then decrease the voltage from the rated voltage to 0 V at a constant rate. Repeat the above cycle 5 times and take the difference between the maximum displacement and minimum displacement in the hysteresis curve (piezo-electric hysteresis) of the 5th cycle as a stroke value for open loop.

분해능 Resolution



임의의 1점(기준으로 하는 측정 포인트)에 대해 정(혹은 부)방향에서 최소 단계에 해당하는 위치 명령을 5단계 이상 순차적으로 입력하여 실제 위치를 측정한다.

최대 이동량에서 n단계 수로 나눈 값을 분해능이라고 한다. 분해능은 변위 센서를 내장한 클로즈드 루프 제어의 경우만 검사 대상으로 한다.

Input the minimum step position command for at least 5 steps successively in the positive (or negative) direction relative to an arbitrary point (a reference measurement point) and measure the actual position. The maximum travel distance divided by n (number of steps) is the resolution. The resolution shall be subject to inspection only for closed loop control with built-in displacement sensor.

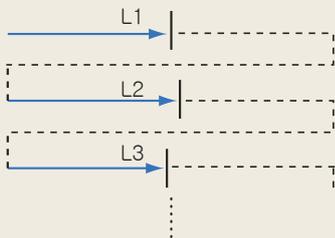
※ 오픈루프 제어 시의 분해능(이론분해능)에 대하여

오픈 루프 제어에서의 동작에서도 인가 전압을 작게 계단 모양으로 주어, 나노미터의 미소 스텝을 얻을 수 있습니다. 그러나 이것은 스테이지가 내장된 변위센서의 신호를 읽지 않고 인가전압을 작게 하여 결과적으로 미세하게 움직인 양이며 이론분해능 등으로 불리기도 합니다. 폐사에서는 피에조 스테이지를 컨트롤러로 피드백 제어하여 능동적으로 위치 제어가 가능한 상태에서의 미소 스텝을 분해능의 정의라고 하고 있습니다.

* Resolution for open loop control (theoretical resolution)

Even loop control operations may achieve fine steps in nm by applying in small steps. However, this resolution represents the amount of fine movements caused by small applied voltage without reading of displacement sensor signals in the stage, so it is also referred to as "theoretical resolution." We define resolution as fine steps in a condition that the piezo stage is controlled by the controller by means of feedback control and it can actively control the position.

반복 위치 결정 정도(精度) Positioning repeatability



임의의 1점에 같은 방향에서 위치 결정을 7회 이상 반복하여 정지 위치를 측정하고 측정값의 최대 차이인 1/2을 구한다.

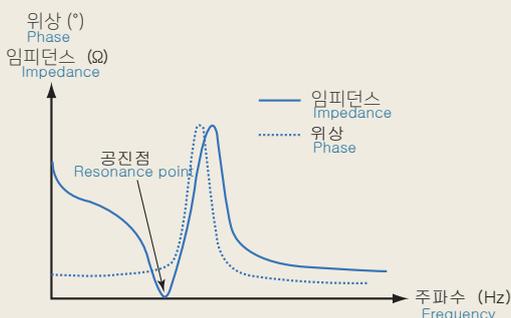
이 측정은 스트로크의 중앙에서 실시하고 필요에 따라서 양끝의 측정도 한다. 반복 위치 결정 정밀도는 클로즈드 루프 제어의 경우만 검사 대상으로 한다.

Repeat the positioning to an arbitrary point and measure the stop position at least 7 times and then obtain 1/2 of the maximum difference of the measurement values.

This measurement should be made at the center of the stroke and, as needed, at both ends of the stroke.

The repetitive positioning accuracy shall be subject to inspection only for closed loop control.

공진주파수 Resonant frequency



임피던스 애널라이저를 이용해 위상이 변화하는 부분을 확인하면서 공진점(임피던스가 가장 작은 부분)의 주파수를 측정한다.

이 밖에 다음과 같은 방법으로 측정하는 경우도 있다.

- 구형파를 입력하여 공진 주파수를 측정
- 정현파를 주파수 스위칭하면서 입력하고 공진주파수를 측정

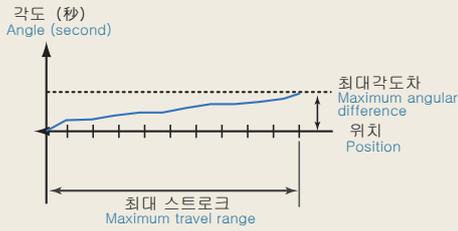
While checking the portion where the phase is changing by using an impedance analyzer, measure the frequency of the resonance point (a portion where impedance is the lowest).

There are also alternative measurement methods:

- Inputting rectangular wave and measuring the resonance frequency
- Inputting sine wave while frequency sweeping and measuring the resonance frequency (Measurement by impedance analyzer)

Piezo stage ▶ P.11
Piezo motor stage ▶ P.127
Force sensor ▶ P.153
Technical information
Characteristics of piezo-electric element
Mechanism and material of piezo stage
Capacitance type displacement sensor
Open loop and closed loop
Cable extension
Vacuum specifications
Installation direction of piezo stage
How to read the specification table of piezo stage
Calculation formula of the resonance frequency diagram
Operation mechanism features
Inspection method of piezo stage
Operating data example (Piezo stage)
PID gain adjustment example (Piezo stage)
Sample software (piezo stage)

Pitching, Yawing, Rolling



Pitching : 기준위치(스트로크 끝)에서 같은 방향으로 최대 스트로크까지 일정 간격으로 순차적으로 위치 결정을 행하고, 각각의 위치 결정 포인트에서 수직방향의 기울기를 오토 콜리메이터를 이용하여 측정하여 그 최대각도차를 구한다.

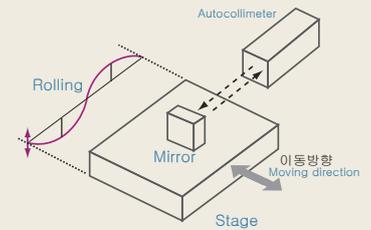
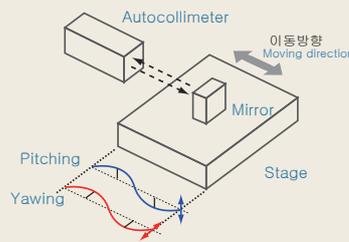
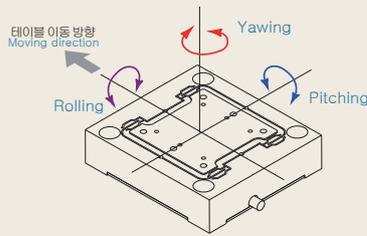
Yawing : 수평방향의 기울기를 최대 스트로크로 측정하고 그 최대 각도차를 구한다.

Rolling : 오토 콜리메이터와 스테이지 이동 방향을 수직으로 세팅하여 측정한다.

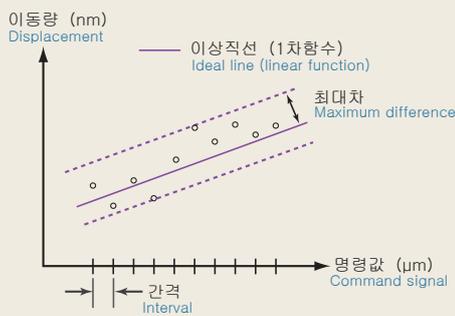
Pitching : Perform positioning from the reference position (stroke end) to the maximum stroke in the same direction successively at certain intervals and use an autocollimator to measure the inclination in the vertical direction in each positioning point to obtain the maximum angular difference.

Yawing : Measure the inclination in the horizontal direction with the maximum stroke to obtain the maximum angular difference.

Rolling : Set an autocollimator at right angle to the stage travel direction to make a measurement.



리니어리티 Linearity



기준위치(0위치)부터 한 방향으로 일정 간격으로 순차적으로 위치 결정을 하고 진행방향에서의 위치를 측정한다.

측정결과에서 최소제곱법으로 이상직선(1차함수)의 근사를 실시하고 이상직선을 기준으로 실제 측정값과의 차이가 최대가 되는 포인트를 측정한다.

리니어리티는 변위 센서를 내장한 클로즈드 루프 제어의 경우만 검사 대상으로 한다.

Perform positioning from the reference position (zero position) successively in one way at certain intervals and measure the position in the travelling direction.

Approximate the ideal line (linear function) by the method of least squares based on the measurement result, and take the ideal line as a reference to identify a point where the difference from the actual measurement becomes the highest.

The linearity shall be subject to inspection only for closed loop control with built-in displacement sensor.

동작 데이터 예 (피에조 스테이지) Operating data example (Piezo stage)

게재한 동작 데이터는 하나의 예입니다.
 위치 결정 정밀도나 동특성 등의 성능은 스테이지의 스트로크나 공진 주파수, 탑재물의 중량, 형상, 제어 컨트롤러의 종류, PID 게인의 조정 상태 등 여러 조건에 따라 다릅니다.

This data is an example.
 Positioning accuracy and dynamic characteristic performance depends on various conditions such as stage stroke, resonant frequency, weight and shape of the load, controller type, and PID gain adjustment.

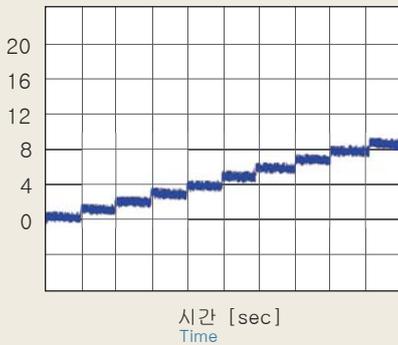
■ 분해능 · 반복재현성

Resolution · Positioning repeatability

미소 이송 분해능

Minute travel resolution

변위량 [nm]
Displacement



반복 재현성 ①

Positioning repeatability 1

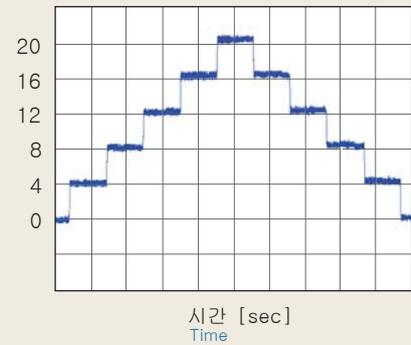
변위량 [nm]
Displacement



반복 재현성 ②

Positioning repeatability 2

변위량 [nm]
Displacement



■ 오픈 루프 동작에서 압전 소자의 클리프(드리프트)

Creep (drift) of piezoelectric elements in open loop operation

압전소자 : 5×5×40mm, 변위량 약 42μm (150V 인가시)

Piezoelectric element

피에조 드라이버 : PH103

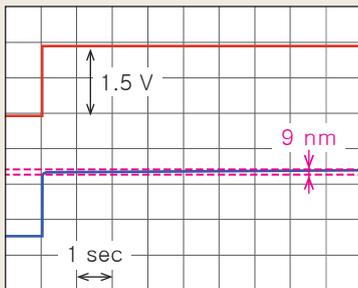
Piezo driver

— 인가전압 (Applied voltage) — 압전소자의 늘어남 (伸長) (Piezoelectric element extension)

인가전압 : 0→1.5 V

Applied voltage

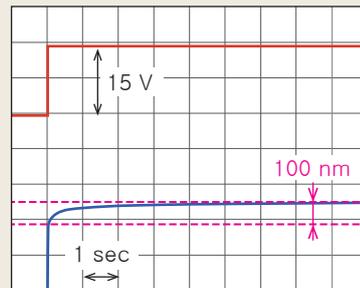
변위량
Displacement



인가전압 : 0→15 V

Applied voltage

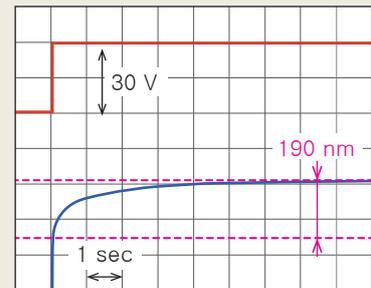
변위량
Displacement



인가전압 : 0→30 V

Applied voltage

변위량
Displacement



■ 정현파(sin파) 구동(클로즈드 루프 제어)

Sine wave motion in closed-loop control

스테이지 : PS1H60-060U
Stage

컨트롤러 : NCS6101C
Controller

[동작조건] Operating condition

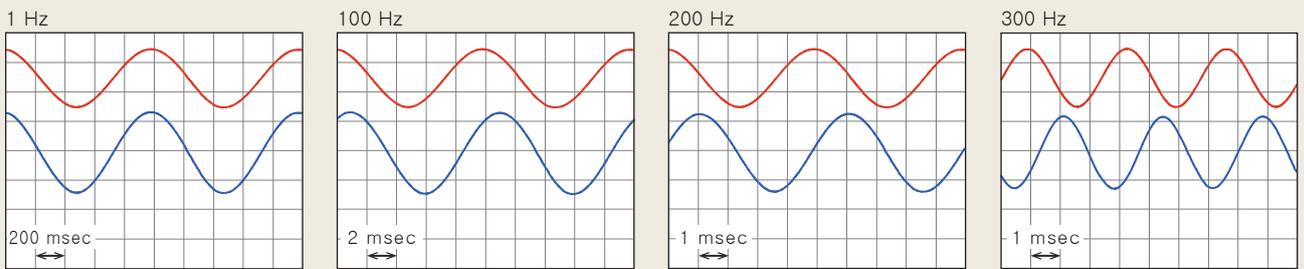
탑재부하 : 100 g
Loading weight

공진주파수 : 1 kHz (100 g 부하시)
Resonant frequency Load

명령진폭 : 0 ~ 7 μm
Command amplitude



— 명령신호 Command signal — 스테이지 동작 Stage motion



■ 삼각파 구동(클로즈드 루프 제어)

Triangle wave motion in closed-loop control

스테이지 : custom design 스테이지
Stage

컨트롤러 : NCS6101C
Controller

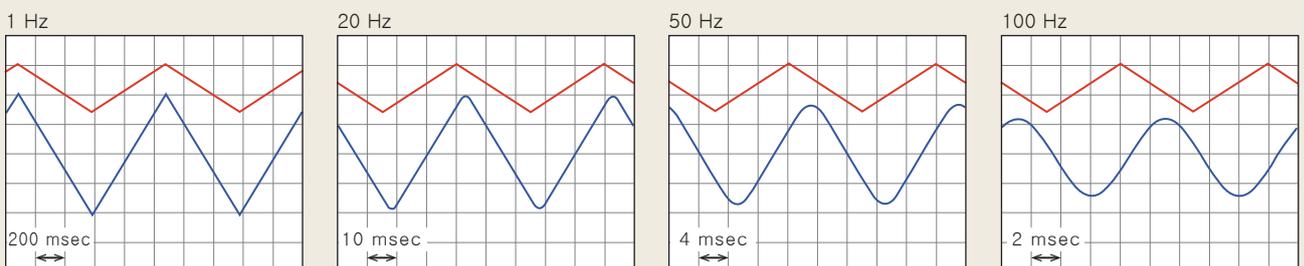
[동작조건] Operating condition

탑재조건 : 500 g
Loading weight

공진주파수 : 430 Hz (500 g 부하시)
Resonant frequency Load

명령진폭 : 0~0.5 μm
Command amplitude

— 명령신호 Command signal — 스테이지 동작 Stage motion



PID 게인 조정 예 (피에조 스테이지) PID gain adjustment example (Piezo stage)

필터나 PID 게인 조정에 의한, 스테이지의 응답성 변화의 일례입니다.
 조정 효과는 스테이지의 특성이나 탑재물의 중량, 형상, 제어 컨트롤러의 종류, 지령파형 등 여러 조건에 따라 다릅니다.

This is an example of the change in stage response due to filter and PID gain adjustment.
 The effect of adjustments depends on various conditions such as the characteristics of the stage, weight and shape of the load, controller type, and command waveform.

■ S 슬로프의 효과 ※6000 시리즈만 탑재 Effect of S slope * 6000 series only

일어설 때 경사가 완만해지고 링잉이 줄어듭니다.
The initial slope is gentler so there is less ringing.



■ P게인 효과 Effect of P gain

응답 속도는 떨어지지만, 오버슈트가 작아집니다.
Response speed is reduced, but overshoot is smaller.



■ I게인 효과 Effect of I gain

목표 위치로의 수렴 시간이 짧아집니다(차분신호에서 경사가 가파르게 됩니다).
The convergence time to the target position is shorter (the differential signal slope is steeper).



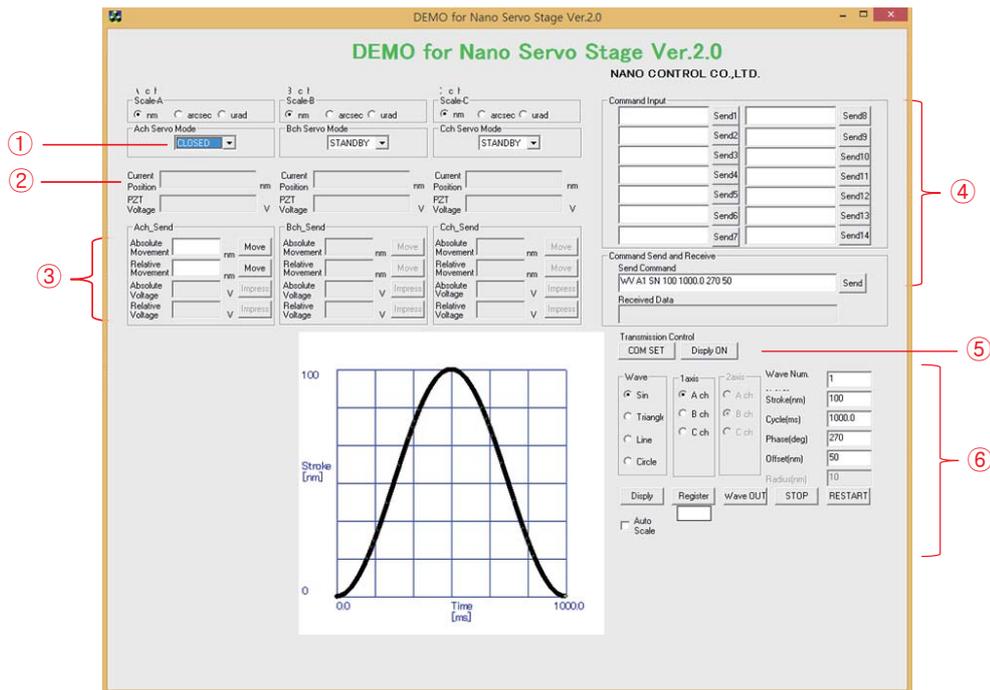
■ D게인 효과 ※ 7000 시리즈만 탑재 Effect of D gain * 7000 series only

직사각형파에 의한 위치를 결정할 때 목표 위치 부근에서의 작은 링잉을 억제합니다.
Small ringing near the target position is suppressed during square wave positioning.



샘플 소프트웨어 (피에조 스테이지) Sample software (piezo stage)

- 피에조 스테이지용 시리얼(RS232C) 통신에 의한 샘플 소프트웨어입니다. 제어 컨트롤러에 시리얼 인터페이스가 있는 경우만 사용할 수 있습니다.
- 홈페이지에서 실행형식(.exe)으로 파일을 무상 다운로드 할 수 있습니다.
- 조작 화면이나 기능은 예고없이 변경할 수 있습니다.
- This sample software uses serial (RS232C) communication for a piezo stage. It can be used only if the controller has a serial interface.
- The executable file (.exe) can be downloaded for free from our website.
- Control screens and functions may be modified without advance notification.



- ① 서보 모드로서 [Standby] [Closed] [Open] 을 선택합니다.
- ① Select a servo mode from [Standby], [Close], or [Open].
- ② 내장 변위 센서의 신호를 항상 읽어, 현재값을 1 nm 단위로 표시합니다.
- ② The signal from the built-in displacement sensor is continuously read. The current value is displayed in 1 nm units.
- ③ 지정한 위치로 이동하는 '절대값 이동'이나, 현재 값에서 지정량만큼 이동하는 '상대량 이동'을 할 수 있습니다.
- ③ Either "absolute value movement" (movement to a specified position) or "relative amount movement" (movement by a specified amount from the current value) can be performed.
- ④ 취급 설명서에 기재된 임의의 커맨드를 송신할 수 있습니다. 컨트롤러로부터 회답이 있는 경우는 수신 데이터란에 텍스트 표시되어 수신 내용을 확인할 수 있습니다.
- ④ Any command listed in the instruction manual can be sent. If there is a response from the controller, the return value will be displayed as text in the "received data" area, allowing the received data to be confirmed.
- ⑤ PC 와 컨트롤러의 시리얼 통신 접속을 확립하기 위해서, COM 포트 번호나 통신 설정을 입력합니다.
- ⑤ Enter the COM port number and communication settings to establish a serial connection between the PC and controller.
- ⑥ 지정한 축에 정현파나 삼각파등의 파형 데이터를 생성해 시리얼 인터페이스내에 저장시켜 출력할 수 있습니다. 생성한 파형 데이터는 도형 표시란에서 시각적으로 확인할 수도 있습니다.
- ⑥ Waveform data (such as a sine wave or triangle wave) can be generated on the specified axis to save and output data to the serial interface. The waveform data that was generated can also be confirmed by sight in the "graphic display" area.

단위 환산 예

본 카탈로그 사용상의 보조로 계산한 예입니다. $\pi = 3.14$ 으로 하고, 소수점 이하의 숫자는 자릿수 잡는 방법에 따라 다를 수 있습니다.

각도

秒 ["]	度 [°]	라디안 [rad]
0.01	0.000028	0.048 [μ rad]
0.1	0.00028	0.48 [μ rad]
1	0.0028	4.8 [μ rad]
10	0.028	0.048 [mrad]
100	0.28	0.48 [mrad]
250	0.069	0.0012
400	0.11	0.0019
500	0.14	0.0024
1000	0.28	0.0048
3600	1	0.017

주파수

주파수 [Hz]	주기 (周期) [s]	주기 (周期) [μ m]
0.1	10	10000
0.5	2	2000
1	1	1000
3	0.3	333
5	0.2	200
10	0.1	100
30	0.03	33
50	0.02	20
100	0.01	10
200	0.005	5
300	0.0033	3.3
400	0.0025	2.5
500	0.002	2
600	0.0017	1.7
700	0.0014	1.4
800	0.0013	1.25
900	0.0011	1.1
1000	0.001	1
1500	0.0007	0.7
2000	0.0005	0.5

데시벨의 전력, 전압 및 전류 환산

데시벨 표시 [dB]	감 쇠 비	
	전력	전압 또는 전류
	$10 \log(P_o/P_i)$	$20 \log(V_o/V_i)$
0	1.0000 (100.0%)	1.0000 (100.0%)
-0.2	0.9550 (95.5%)	0.9772 (97.7%)
-0.4	0.9120 (91.2%)	0.9550 (95.5%)
-0.6	0.8710 (87.1%)	0.9333 (93.3%)
-0.8	0.8318 (83.2%)	0.9120 (91.2%)
-1.0	0.7943 (79.4%)	0.8913 (89.1%)
-1.2	0.7586 (75.9%)	0.8710 (87.1%)
-1.4	0.7244 (72.4%)	0.8511 (85.1%)
-1.6	0.6918 (69.2%)	0.8318 (83.2%)
-1.8	0.6607 (66.1%)	0.8128 (81.3%)
-2.0	0.6310 (63.1%)	0.7943 (79.4%)
-2.2	0.6026 (60.3%)	0.7762 (77.6%)
-2.4	0.5754 (57.5%)	0.7586 (75.9%)
-2.6	0.5495 (55.0%)	0.7413 (74.1%)
-2.8	0.5248 (52.5%)	0.7244 (72.4%)
-3.0	0.5012 (50.1%)	0.7079 (70.8%)
-3.2	0.4786 (47.9%)	0.6918 (69.2%)
-3.4	0.4571 (45.7%)	0.6761 (67.6%)
-3.6	0.4365 (43.7%)	0.6607 (66.1%)
-3.8	0.4169 (41.7%)	0.6457 (64.6%)
-4.0	0.3981 (39.8%)	0.6310 (63.1%)
-4.2	0.3802 (38.0%)	0.6166 (61.7%)
-4.4	0.3631 (36.3%)	0.6026 (60.3%)
-4.6	0.3467 (34.7%)	0.5888 (58.9%)
-4.8	0.3311 (33.1%)	0.5754 (57.5%)
-5.0	0.3162 (31.6%)	0.5623 (56.2%)
-5.2	0.3020 (30.2%)	0.5495 (55.0%)
-5.4	0.2884 (28.8%)	0.5370 (53.7%)
-5.6	0.2754 (27.5%)	0.5248 (52.5%)
-5.8	0.2630 (26.3%)	0.5129 (51.3%)
-6.0	0.2512 (25.1%)	0.5012 (50.1%)

압력

파스칼 [Pa]	토르 [Torr]
133.322	1
13.332	0.1
1.333	0.01
0.1333	1×10^{-3}
0.0133	1×10^{-4}
1.3×10^{-3}	1×10^{-5}
1.3×10^{-4}	1×10^{-6}
1.3×10^{-5}	1×10^{-7}

힘

중량 [kgf]	중량 [N]
1	9.80665
0.1	0.980665
0.01	0.0980665
1×10^{-3}	9.80665×10^{-3}
1×10^{-4}	9.80665×10^{-4}
1×10^{-5}	9.80665×10^{-5}
1×10^{-6}	9.80665×10^{-6}