

## 조준경 안정화장치에서 관성밸런서의 영향 (An Effect of the Inertia Balancer in a Sight Stabilization System)

강윤식\*, 김도종\*, 박용운\*, 김광준\*\*  
(\*:국방과학연구소, \*\*:한국과학기술원)

### ABSTRACT

Stabilization performance of a sight stabilization system can be improved by proper selection of control algorithm and mechanism. In that aspect, in this paper, effects of an inertia balancer are studied. Parameters of the inertia balancer were obtained from the governing equation by assuming there is no external force and friction. Simulation and experimental results show that the inertia balancer contributes significantly to the stabilization of the line of sight(LOS). In particular, it was found that the inertia balancer is more effective as frequency of the disturbance increases.

**Key Words:** Stabilization system(안정화장치), Line of sight(LOS,조준선), Inertia balancer(관성밸런서)

### 1. 서 론

무한궤도차량에 탑재하여 운용되는 조준경 안정화장치는 정지 및 기동중에 운용자의 속도명령을 안정적으로 추종할 뿐만 아니라 목표물에 대해 지속적인 인식과 탐지를 위해 안정된 조준선(Line of Sight, LOS)를 제공해 주어야 한다<sup>(1)</sup>. 이러한 안정화장치 역할은 관성센서인 자이로를 이용하여 속도제어루프를 구현함으로써 수행되고 있다. 그림 1.a는 안정거울을 이용하여 목표물을 관측하고, 운용자에 의해 목표물을 추적하는 조준경시스템을 나타낸다. 그림 1.b는 조준경이 탑재된 차량의 피치(pitch) 운동 발생시 조준선(LOS)을 안정화시키기 위한 안정거울의 운동을 나타낸다. 즉, 차량의 피치운동에 대해 안정거울은 이 운동 크기의 1/2 만큼 반대방향으로 운동하면 조준선이 안정화됨을 알 수 있다.

조준경 안정화장치의 서보성능과 안정화성능들은 주로 시스템의 외란크기 및 시스템 제어 알고리즘에 의해 결정된다. 안정화장치의 토크외란들은 베어링 마찰, 질량불균형, 센서 및 액츄에이터 케이블에 의한 스프링 힘, 상호 관성모멘트 및 기하학적인 관계식에 의해 나타나는 힘들로 구성된다. 이들중 마찰은 안정화장치의 성능저하에 기여하는 대표적인 외란이다<sup>(2)</sup> 마찰크기를 최소화하기 위해 구동축에 정밀한 베어링을 사용하고 정교한 밸런싱을 실시한 후에도 불구하고 베어링 마찰을 감소시키는데는 한계가 있게 마련이다. 특히 안정화장치의 피치방향은 구동축이 많고, 진동 및 충격에 대한 내구력

을 유지하기 위해 베어링에 예압을 인가하므로, 일정 크기 이상 마찰이 항상 존재한다. 안정화성능을 향상시키기 위해서는 이러한 마찰을 예측하여 제어 알고리즘으로 보상하는 방법과 고전 제어 알고리즘을 사용하면서 기계적인 미케니즘을 이용하는 방법이 있다<sup>(3,4,5,6)</sup>.

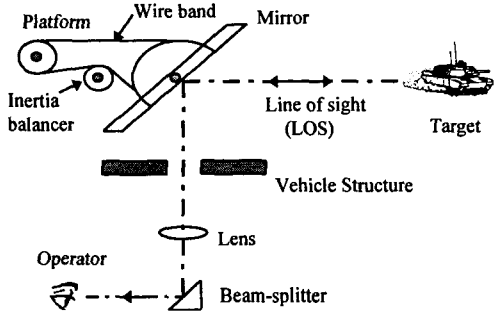


그림 1.a 조준경 시스템

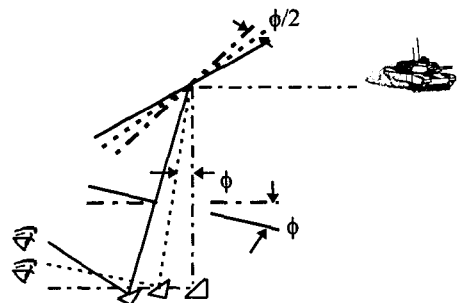


그림 1.b 조준선(LOS) 안정화

본 연구에서는 기계적인 기구 즉, 관성벨런서가 안정화성능에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 2 장에서는 안정화장치의 피치방향에 대한 운동방정식을 유도하여 관성벨런서의 변수를 결정하고, 3 장에서는 자이로를 이용하여 속도제어루프를 구성하고 차량의 피치운동에 대한 안정화성능을 예측해 보인다. 4 장에서는 안정화 제어루프를 구현하여 관성벨런서가 있는 경우와 없는 경우에 대한 실험결과를 보여준다.

## 2. 조준경 안정화장치

조준경 안정화장치는 김벌(Gimbal)하우징, 플랫폼, 안정거울 및 관성벨런서들의 강체들로 구성되어 있으며, 김벌하우징은 차량구조물에 장착되어 요(Yaw) 방향 운동을 한다. 플랫폼은 김벌하우징에 장착되어 피치(Pitch)운동을 하며, 관성센서인 2축 자이로와 토크모터에 의해 속도제어루프를 형성하고 있다. 안정거울과 관성벨런서 또한 김벌하우징에 장착되어 플랫폼 회전축과 평행한 회전축을 갖고 피치운동을 하며, 이 강체들은 와이어 밴드(Wire band)로 연결되어 있다(그림 2 참조).

### 2.1 운동방정식

관성벨런서를 포함하는 안정화장치의 피치운동방정식을 유도하기에 앞서 다음의 가정을 하였다.

- (1) 피치방향 운동만 있다.
- (2) 와이어 밴드의 강성은 무한대이다.

상기의 가정에 근거한 기하학적 관계식은 다음과 같다.

$$r_b \omega_{b/i} = -r_m \omega_{m/i} \quad (1.a)$$

$$r_m \omega_{m/i} = r_p \omega_{p/i} \quad (1.b)$$

여기서  $r_m$ ,  $r_p$ ,  $r_b$  는 각각 안정거울, 플랫폼 및 관성벨런서 구동축의 반경을 나타내며, 상대각속도는 다음과 같이 정의된다.

$$\omega_{m/i} = \omega_m - \omega_i \quad (2.a)$$

$$\omega_{p/i} = \omega_p - \omega_i \quad (2.b)$$

$$\omega_{b/i} = \omega_b - \omega_i \quad (2.c)$$

여기서  $\omega_i$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_m$ ,  $\omega_b$  는 각각 차량구조물, 플랫폼, 안정거울 및 관성벨런서의 절대각속도를 나타낸다. 그림 2 에서 각 강체에 대한 운동방정식을 구하여 벨트의 장력을 소거하고, 플랫폼축에 대하여 정리하

면 다음과 같이 안정화장치의 피치운동방정식이 표현된다.

$$J_p \dot{\omega}_p + R_1 J_m \dot{\omega}_m - R_2 J_b \dot{\omega}_b + \tau_p + R_1 \tau_m - R_2 \tau_b = T_p \quad (3)$$

여기서  $J_p$ ,  $J_m$ ,  $J_b$  는 플랫폼, 안정거울 및 관성벨런서의 관성모멘트,  $\tau_p$ ,  $\tau_m$ ,  $\tau_b$  는 각각 플랫폼축, 안정화거울축 및 관성벨런서축의 마찰을 나타낸다. 또한  $T_p$  는 플랫폼축에 내장된 토크모터의 토크,  $R_1$ ,  $R_2$  는 구동축의 회전비를 나타내며 다음과 같다.

$$R_1 = r_p / r_m, \quad R_2 = r_p / r_b \quad (4.a,4.b)$$

### 2.2 관성벨런서의 변수 결정

관성벨런서의 변수는 관성모멘트와 구동축 반경으로서 이들중 어느 하나가 결정되면 식(3)을 이용하여 결정할 수 있다. 안정화장치는 환경조건을 고려하여 가능한 간결하고(Compact) 견고하게(Stiff) 설계되어야 하므로 보통 기하학적인 간섭등을 고려하여 우선적으로 구동축의 반경을 결정하고 그 다음 관성모멘트를 결정한다. 이러한 관성벨런서의 변수를 결정하기 위해 다음의 가정을 하였다.

- (1) 회전축에서 회전요소들에 의한 마찰은 없다.
- (2) 토크모터에 의해 인가하는 외력은 없다.

상기의 가정을 이용하여 식(3)를 안정거울축에 대해 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$J_m \dot{\omega}_m + J_p (\dot{\omega}_m / R_1 - (1/R_1 - 1)\dot{\omega}_b) / R_1 + J_b (R_2 \dot{\omega}_m / R_1 - (1 + R_2 / R_1)\dot{\omega}_b) R_2 / R_1 = 0 \quad (5)$$

식(5)을 안정거울의 각가속도에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\omega}_m = \dot{\omega}_i \frac{[J_p(1-1/R_1)/R_1 + J_b(1+R_2/R_1)R_2/R_1]}{J_m + J_p/R_1^2 + J_b(R_2/R_1)^2} \quad (6)$$

차량구조물이 피치운동을 하는 경우 조준선(LOS)을 안정화하기 위해서는 안정거울의 운동은 항상 차량구조물의 1/2 운동을 하여야 한다. 즉,

$$\dot{\omega}_m = 1/2 \dot{\omega}_i \quad (7)$$

또한 자이로 1 개를 이용하여 이러한 안정화시스템을 구현하기 위해서는 안정거울축의 반경과 플랫폼의 반경비는 2:1 로 고정되어야 한다( $R_1=0.5$ ).

그러므로 관성벨런서의 관성모멘트는 식(6)-(7)를 이용하여 다음과 같이 결정된다.

$$J_b = \frac{J_m}{4R_2(R_2 + 1)} \quad (8)$$

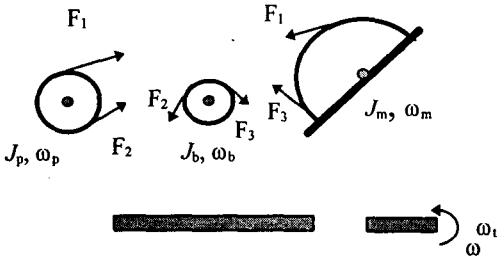


그림 2 피치방향 안정화 미케니즘

### 3. 시뮬레이션

관성벨런서의 영향을 살펴보기 위하여 안정화장치의 속도제어루프 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 안정화장치의 속도제어루프를 나타내며, 여기서  $K_i$  및  $G_g(s)$ 는 자이로 스케일 factor와 전달함수를 나타내며,  $G_c(s)$ ,  $G_m(s)$ ,  $G_p(s)$ 는 각각 제어기, 모터 및 플랜트의 전달함수를 나타낸다. 모터의 동역학은 계인으로 고려하였고, 제어기는 PI-Lead이며, 시스템의 대역폭은 30Hz로 설정하였다. 또한 관성벨런서가 없는 경우 시스템의 대역폭을 일치시키기 위해 제어기의 계인을 조정하였다. 다음은 시뮬레이션에 사용된 자이로 및 제어기 전달함수를 나타내며, 여기서  $G_{co}(s)$ ,  $G_{cw}(s)$ 는 관성벨런서가 없는 경우와 있는 경우 각각의 제어기를 나타낸다.

$$G_g(s) = \frac{5499614271}{s^3 + 2509s^2 + 4998601s + 5624602600} \cdot \frac{1719}{s}$$

$$G_{co}(s) = 11.72 \cdot \frac{(s + 8.23)(s + 18.85)}{s(s + 4317.26)}$$

$$G_{cw}(s) = 17.39 \cdot \frac{(s + 8.23)(s + 18.85)}{s(s + 4317.26)}$$

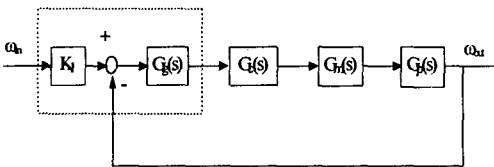


그림 3 안정화장치의 속도제어루프

관성벨런서의 변수 결정은 구동축에 마찰이 없다는 가정에서 구했으나, 실제로는 마찰이 존재한다. 여기서 마찰은 쿨롱마찰( $f_m, f_p, f_b$ )만 있다고 가정하고 또한 그 크기는 관성모멘트에 비례하는 것으로 설정하였다. 고전 제어기를 사용하는 경우 안정화성능은 마찰/관성모멘트에 반비례하며 실제 기계시스템 설계/조립에 있어서도 이 비가 되도록 작게끔 하고 있다. 여기서는 이 비가 1이 되도록 하여 안정화성능을 살펴보았으며, 또한 관성벨런서의 마찰크기를 2배로 증가시킨 경우에 대해서도 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 변수들을 나타낸다. 외란에 대응하는 차량구조물의 각속도 크기는  $4(^{\circ}/\text{sec})$ 로 고정하였고, 주파수는 0.5~200Hz까지 변화시켜 가면서 안정화성능을 예측하였다. 그림 4(a)는 외란주파수가 1Hz일 때 안정화오차를 나타내며, 여기서 실선은 관성벨런서가 없는 경우이고, 점선은 관성벨런서가 있는 경우이다. 또한 그림 4(b)는 관성벨런서의 마찰크기를 2배로 증가시켰을 때 안정화성능을 나타내며 실선은 마찰을 2배로 증가시킨 경우이고 점선은 마찰크기를 1배로 한 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 관성벨런서를 장착한 경우 그에 따른 마찰 증가로 인해 다소 위상지연이 있고 안정화오차는 관성벨런서가 없는 경우에 비해 다소 적음을 알 수 있다. 또한 관성벨런서축의 마찰을 2배 증가시킨 경우는 1배일 때와 유사함을 알 수 있다. 표 2는 관성벨런서 유무 및 베어링마찰 크기 정도에 대한 외란주파수별 안정화오차의 크기들을 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 관성벨런서가 있는 경우 안정화오차는 관성벨런서가 없는 경우에 비해 다소 감소하며, 또한 전체적으로 주파수가 증가할 수록 안정화오차들은 감소하고 있으나, 안정화오차 비율은 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

	Parameter	Value	Unit
Plant	$J_m$	0.3726	In-oz-sec <sup>2</sup>
	$J_p$	0.0192	In-oz-sec <sup>2</sup>
	$J_b$	0.0242	In-oz-sec <sup>2</sup>
	$r_m$	37.50	mm
	$r_p$	18.75	mm
	$r_b$	12.50	mm
	$f_m$	0.30	In-oz
	$f_p$	0.02	In-oz
	$f_b$	0.02, 0.04	In-oz
Motor	$K_m$	0.5	A/V
	$K_t$	9.25	In-oz/A
Gyro	$K_i$	$4\pi/180$	rad/sec/V

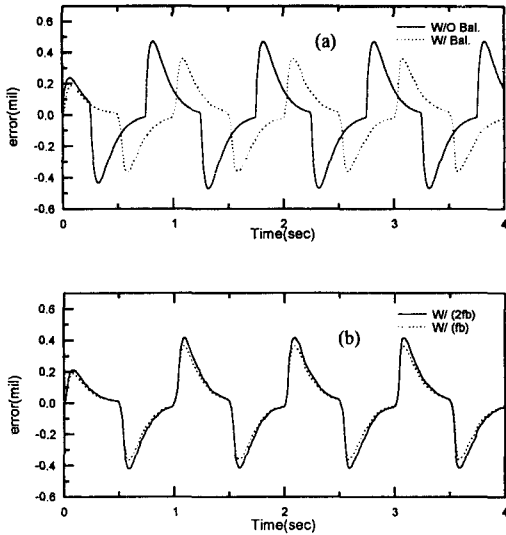


그림 4. 안정화오차 비교( $\omega_i=4\sin(2\pi t)$ )

표 2. 시뮬레이션 결과

외란주파수 (Hz)	안정화오차 크기(a)	안정화오차 크기(b)	안정화오차 크기(c)	오차비율 (a/b,c/b)
0.5	0.48(mil)	0.37(mil)	0.42(mil)	(1.30,1.14)
1.0	0.47(mil)	0.36(mil)	0.42(mil)	(1.31,1.17)
10.0	0.28(mil)	0.22(mil)	0.26(mil)	(1.27,1.18)
20.0	0.20(mil)	0.17(mil)	0.19(mil)	(1.18,1.12)
20.0	0.12(mil)	0.09(mil)	0.11(mil)	(1.33,1.33)
50.0	0.04(mil)	0.03(mil)	0.04(mil)	(1.25,1.25)
100.0	0.005(mil)	0.004(mil)	0.005(mil)	(1.30,1.14)
200.0	0.0012(mil)	0.0012(mil)	0.0013(mil)	(1.30,1.14)

⋄ 관성밸런서가 없는 경우, b: 관성밸런서가 없는 경우( $f_b=0.02$ )

⋄ 관성밸런서가 있는 경우( $f_b=0.04$ )

#### 4. 실험 결과

관성밸런서가 있는 경우와 없는 경우에 대해 속도 제어루프의 대역폭을 일치시키기 위한 대역폭 실험과 2축 정밀구동장치(Rate Table)를 이용하여 안정화오차를 측정하는 실험으로 구분하여 수행하였다.

##### 4.1 대역폭 실험

대역폭 실험은 관성밸런서가 있는 경우와 없는 경우에 대해 시스템의 대역폭을 일치하기 위해 제어기 계인을 조정하는 것이다. 제어기는 시뮬레이션에서 설계된 PI-Lead 구조로 DSP 프로세서(TMS320C30)에 구현하였다. 실험은 디지털 신호처리기(HP35670A)를 이용하여 속도 제어루프에서 수

행하였다.

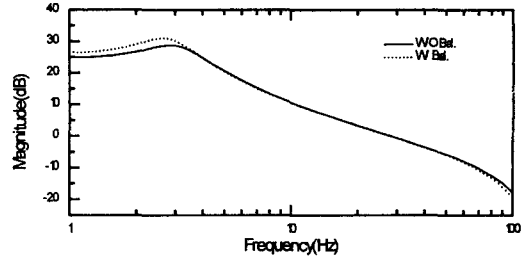


그림 5 개루프 주파수응답함수의 크기 비교

그림 5는 개루프 주파수응답함수의 크기들을 나타낸다. 그림에서 실선은 관성밸런서를 장착한 경우이고, 점선은 관성밸런서를 장착하지 않은 경우이다. 그림에서 시스템의 대역폭은 관성밸런서가 있는 경우와 없는 경우 모두 28.2Hz 이고, 상대안정도를 나타내는 계인여유와 위상여유는 각각 9.6(dB), 9.2(dB) 및 42.7(°), 43.1(°)이다. 그러므로 관성밸런서 영향을 실험하기 위한 제어기 계인은 비교적 정확하게 조정되었다고 판단된다.

##### 4.2 안정화 실험

안정화실험은 속도제어루프에서 안정화오차를 측정하는 것으로, 그림 6은 실험장치를 나타낸다. 차량구조물의 피치운동은 2축 정밀구동장치(Rate Table)를 이용하여 구현하였다. 신호발생기에서 정현파 신호가 Rate Table에 인가하면 이 신호에 비례하여 Rate Table은 정현파 운동을 수행하며, 안정화장치는 이러한 운동을 외란으로 고려하여 안정화기능을 수행한다. 안정화오차는 반사거울을 부착하여 광학측정장비(Optron)로 측정하였고, 디지털 신호처리를 이용하여 Rate Table의 출력운동과 안정화오차 신호를 기록하였다. Rate Table의 입력크기와 주파수 범위는 각각 4(°/sec)~6(°/sec)이며, 0.5Hz ~ 50Hz 이다.

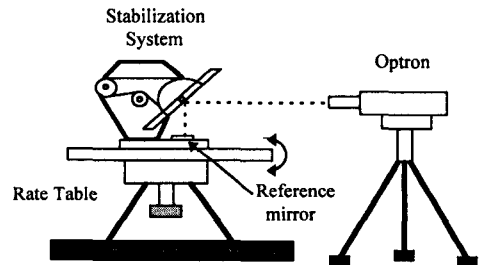


그림 6 안정화오차를 측정하기 위한 실험장치

그림 7-8은 Rate Table에 정현파를 인가하고 광학 측정장비를 이용하여 측정된 안정화오차를 나타낸다. 여기서 실선은 관성벨런서가 없는 경우이고, 점선은 관성벨런서가 있는 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 관성벨런서가 있는 경우 안정화오차가 작게 나타난다. 표 3은 이러한 정현파 속도 외란입력들에 대해 안정화오차들의 크기를 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 관성벨런서가 있는 경우, 없는 경우에 비해 안정화오차가 작고, 또한 주파수가 증가할 수록 오차비율은 증가하고 있다. 즉, 주파수가 증가함에 따라 안정화성능에 대한 관성벨런서의 영향은 증가됨을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 기계적인 기구 즉, 관성벨런서를 도입하여 조준경 안정화장치의 성능에 관한 고찰을 수행하였다. 마찰이 없다는 가정하에서 구한 관성벨런서의 변수를 이용하여 시뮬레이션과 실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 관성벨런서가 있는 경우 안정화장치의 안정화오차는 없는 경우에 비해 작다.
- (2) 관성벨런서는 외란주파수 즉, 차량구조물의 주파수가 증가함에 따라 효과적이다.
- (3) 시뮬레이션에서 예측된 안정화오차들은 실험에서 측정된 값들과는 정량적으로 일치하고 있지 않고, 또한 주파수증가에 따른 경향이 다소 다르다. 이것은 시뮬레이션에서 사용된 마찰형태 및 크기가 실제 회전축에서 작용하는 마찰과 상이하기 때문이며, 따라서 이 분야에 대한 연구도 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. 박용운, 김종규, 박영필, "미러 안정화장치의 제어 기 설계", 한국자동제어 학술대회, 1988, 10.21
2. Stockum, L., Profeta, J., and Ballou, L., "Precision Stabilization System Design to Reduce the effects of Friction," Proceedings SPIE Acquisition, Tracking, and Pointing II, Vol.887, pp.159-167, 1998.
3. Comfort, G. C., "Friction Effects on Inertia Compensators used for Heliostat Base Motion Isolation," SRL-TR-73-0007, Frank J. Seiler Research Laboratory, USAF, Academy, CO80840, June, 1973.
4. Maqueia, B., and Mastern, M.K., "Adaptive Friction Compensation for Line-of-Sight Pointing and Stabilization," Proceeding of the American Control Conference, pp.1942-1946, Sanfrancisco, CA, June

1986.

5. Walrath, C. D., "Adaptive Bearing Friction Compensation Based on Recent Knowledge of Dynamic Friction," Automatica, Vol.20, No.6, pp.717-727, 1984.
6. Kyung-so Kim and Youngjin Park, "Adaptive Friction Compensation for Motion Stabilization," KSME, Vol.10, No.1, pp.31-36, 1996.

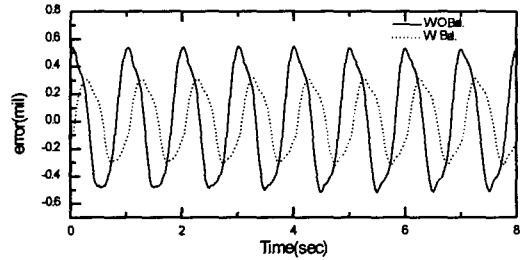


그림 7. 안정화오차 비교( $\omega_r=6.09\sin(2\pi t)$ )

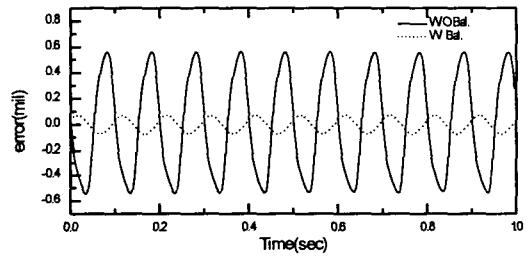


그림 8. 안정화오차 비교( $\omega_r=2.52\sin(20\pi t)$ )

표 3. 실험 결과

외란주파수 (Hz)	외란크기 ( $^{\circ}/\text{sec}$ )	안정화오차 크기(a)	안정화오차 크기(b)	오차비율 (a/b)
0.5	4.04	0.38(mil)	0.24(mil)	1.6
1.0	6.09	0.53(mil)	0.32(mil)	1.7
2.0	6.22	0.66(mil)	0.29(mil)	2.3
5.0	6.92	0.72(mil)	0.19(mil)	3.8
10.0	6.14	0.56(mil)	0.08(mil)	7.0
20.0	2.52	0.31(mil)	0.03(mil)	10.3
30.0	1.12	0.21(mil)	0.02(mil)	10.5
40.0	1.23	0.12(mil)	0.01(mil)	12.0
50.0	0.53	0.04(mil)	0.01(mil)	4.0

a: 관성벨런서가 없는 경우, b: 관성벨런서가 있는 경우