Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 27:2 (2018) 160~166

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.2.160

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Technical Papers

압축스프링을 이용한 수술등의 평형장치

신응수[a*]

Balancers for an Operating Lamp using Compression Springs

Eung-Soo Shin[a*]

[a] *School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk-do, 28644, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:

Received	22	January	2018
Revised	26	February	2018
Accepted	2	March	2018

Keywords:
Operating lamp
Spring balancers
Gravity compensation
Zero-free-length
Compression spring

ABSTRACT

This study presents an operating light system with spring balancers that perform gravity compensation at arbitrary positions in the workspace. The spring balancers, which are made of nominal compression springs with zero-free-length (ZFL) characteristics, are designed by determining the spring constant, spring attachment points, and the ZFL parameters. A test rig is developed to validate the performance of the balancers, and the unbalanced forces are measured by changing the vertical position of the astral lamp. Results show that the developed spring balancers effectively ensure gravity compensation, independent of the lamp position. Equilibrium errors are observed to be approximately 7-8 %, which are caused by some additional weight due to auxiliary linkages and the springs.

1. 서 론

수술등은 그림자 없는 광원을 제공하는 수술용 장비로서 균질한 빛을 조사하는 발광부와 임의의 위치 및 방향으로 이동하고 유지시키는 서스펜션 암으로 구성되어 있다[1]. 서스펜션 암에 요구되는 기능은 작은 힘으로도 부드럽고 신속하게 발광부를 이동시킬 수 있는 기동성과 중력으로 인하여 조인트에 발생하는 회전력을 보상하고 발광부의 자세를 유지시킬 수 있는 안정성을 들 수 있으며 안정성 확보를 위해 평형장치가 부착되어있다. 이러한 평형장치의 설계에서 중요한 점은 서스펜션 암의 기동성을 저하시키지 않으면서 작업공간 내에서 항상 중력 보상이 가능해야 한다는 것이다[2].

수술등의 평형장치로 가장 많이 채택되는 방식은 스프링 평형방식으로서 장치 도입으로 인한 무게 증가를 최소화할 수 있다는 점에서 기동성이 요구되는 수술 등에 효과적이다. 스프링은 오래 전부터 각종 기구의 정적 평형을 위해 활용되어 왔으며 최근 들어 의료기기나 로봇 분야에 이르기까지 다양한 분야에 적용되고 있다[3-5]. 하지만 스프링 평형방식은 위치의 변화에 따라 스프링 길이가 변하기 때문에 모든 위치에서 평형을 이루는 것이 쉽지 않다는 문제점이 있으며 이를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되어왔다. 이론적으로는 스프링 길이의 변화에도 불구하고 완전 평형이 가능하며[6] 스프링과 보조기구의 조합을 통해서 근사적 평형을 달성하는 다양한 방법이 제시된 바 있다[7,8].

기존 수술등에 채택된 스프링 장치는 대부분 근사 평형장치로서 수술등 무게의 일부를 사람이 지지해야 할뿐 아니라 조사되는 광원의 질을 저하시키기 때문에 수술에 심각한 문제를 초래할

* Corresponding author. Tel.: +82-43-261-3159
Fax: +82+43+263-2448
E-mail address: esshin@cbnu.ac.kr (Eung-Soo Shin).

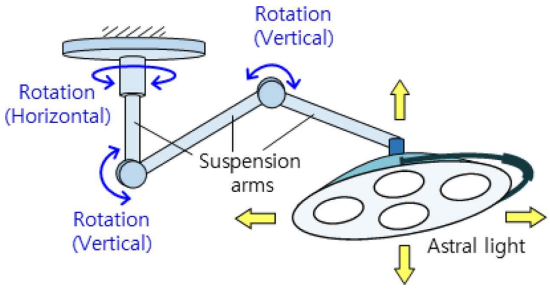


Fig. 1 Overview of an operating lamp

수 있다. 본 연구에서는 중력보상을 위한 평형장치의 중요성이 큰 중대형 수술등에 대해 작업공간 내에서의 위치에 상관없이 완전 평형을 이룰 수 있는 장치를 압축스프링을 적용하여 개발하고자한다.

2. 수술등 중력보상을 위한 스프링 평형 조건

2.1 스프링 평형 조건의 이론적 유도

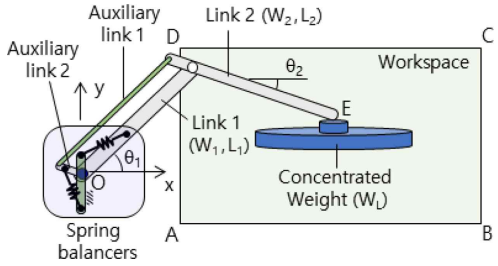
Fig. 2(a)는 본 연구에서 개발하고자하는 스프링 평형장치를 부착한 수술등 시스템을 개략적으로 나타낸 것으로 서스펜션 암을 구성하는 2개의 링크와 발광부, 각 링크의 중력에 의한 회전 모멘트를 보상할 수 있는 스프링 2개, 그리고 링크 2의 운동을 고정조인트 O에 전달하기 위한 보조 링크 2개로 구성된다. Fig. 1과 비교하여 수평 회전을 하는 서스펜션 암의 링크는 조인트 모멘트의 변화를 야기하지 않기 때문에 본 연구의 모델에서 제외하였다.

수술등이 스프링에 의해서 평형을 이루기 위해서는 수술등 무게에 의한 위치에너지와 스프링의 탄성 에너지의 합으로 주어지는 위치 에너지 V가 발광부의 위치에 상관없이 일정해야 한다[8]. Fig. 2(a)에서 스프링과 보조링크의 무게는 수술등의 무게에 비해 무시할 수 있다는 가정하에 V를 유도하면 다음과 같다.

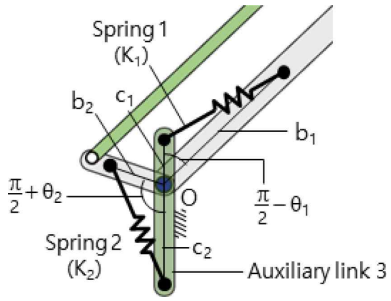
$$\begin{aligned} V = & W_1 L_{C1}\sin\theta_1 + W_2(L_1\sin\theta_1 - L_{C2}\sin\theta_2) \\ & + W_L[L_1\sin\theta_1 - (L_2 - L_D)\sin\theta_2] \\ & + \frac{1}{2}K_1(\ell_1 - \ell_{1F})^2 + \frac{1}{2}K_1(\ell_2 - \ell_{2F})^2 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 W_i, L_i 및 L_{ci}는 링크 i의 무게, 길이 및 회전조인트로부터 무게중심까지의 길이이고 W_L는 발광부의 무게, L_D는 보조링크 2의 길이이며 K_i, ℓ_{iF}는 스프링 i의 상수 및 자유길이이고 ℓ_i는 스프링 i의 길이, b_i 및 c_i는 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 조인트 "O"로부터 스프링 i의 끝단까지의 거리이다.

$$\ell_1 = \sqrt{b_1^2 + c_1^2 - 2b_1c_1\sin\theta_1}\,;\ \ell_2 = \sqrt{b_2^2 + c_2^2 + 2b_2c_2\sin\theta_2} \quad (2)$$



(a) Schematic of an operating lamp with spring balancers



(b) Spring balancers in detail

Fig. 2 An operating lamp with spring balancers

시스템 에너지 V가 링크각 θ_1, θ_2의 변화에도 불구하고 일정하게 유지되기 위해서는 θ_1과 θ_2를 포함하는 모든 항이 0이 되어야 한다. 식 (1), (2)로부터 V가 일정하기 위한 조건을 정리하면 아래와 같다.

$$K_1b_1c_1 = W_1L_{C1} + (W_2 + W_L)L_1 \equiv M_{U1} \quad (3)$$

$$K_2b_2c_2 = W_2L_{C2} + W_L(L_2 - L_D) \equiv M_{U2} \quad (4)$$

$$\ell_{1F} = 0;\ \ \ell_{2F} = 0; \quad (5)$$

2.2 Zero-free-length 스프링

식 (4)로 정의되는 스프링을 zero-free-length (ZFL) 스프링이라고 하는데 이러한 정의를 만족하는 스프링은 존재하지 않지만 등가적으로 이를 구현할 수 있는 다양한 방법이 있으며[9] 본 연구에서는 압축스프링을 이용하여 등가의 ZFL 스프링을 구현하고자 한다[10].

Fig. 3은 그 구조를 나타낸 것인데 링크에 연결된 상부와 고정단에 연결된 원통형 하부 사이에 압축 스프링을 조립한 형태로서 상부의 회전 중심 O_L과 하부의 회전 중심 O_F 사이의 길이 ℓ이 앞절의 Fig. 2와 식(2)에서 스프링 길이에 해당한다. 반면 Fig. 3에서 스프링의 실제 길이가 s이고 실제 자유길이를 ℓ_F라 할때 ZFL 스프링이 되기 위해서는 아래 조건을 만족해야한다.

$$\begin{aligned} K\ell &= K(\ell_F - s) \\ &= K[\ell_F - (e + f - \ell)] \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 Fig. 3의 시스템이 등가 ZFL 스프링이 되기 위한 조건은

다음과 같다.

$$\ell_F = e + f \tag{7}$$

또한 s는 작업공간 내에서 θ_1, θ_2의 변화에 따라 그 값이 바뀌므로 등가 ZFL 스프링은 추가적으로 아래 조건을 충족해야 한다.

$$e, f > s_{\max} + t_P \tag{8}$$

여기서 t_P는 상하부 끝단의 두께의 합이다. 식 (8)을 식 (7)의 조건을 고려하여 변형하면 스프링 길이의 범위를 구할 수 있다.

$$s_{solid} < s < \frac{1}{2}\ell_F - t_P \tag{9}$$

식 (9)에서 s_{solid}는 스프링이 최대로 압축되었을 때의 길이이다.

3. 스프링 평형장치 설계

3.1 설계 절차

앞장에서 유도한 식 (3), (4)의 평형조건과 식 (7)의 ZFL 스프링 조건을 만족하면서 동시에 식 (8), (9)의 구속조건을 충족할 수 있는 스프링 평형장치를 설계하기 위해 Fig. 4의 절차에 따라 스프링 i의 설계 변수 K_i, b_i, c_i, e_i, f_i를 결정하였다. 이를 간략하게 정리하면 다음과 같다.

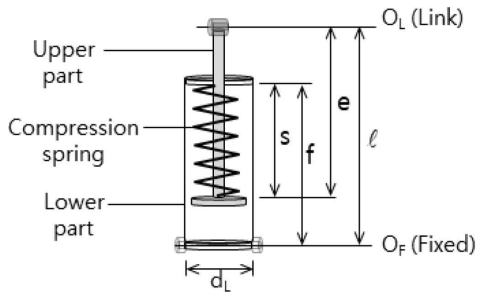


Fig. 3 Equivalent zero-free-length compression spring

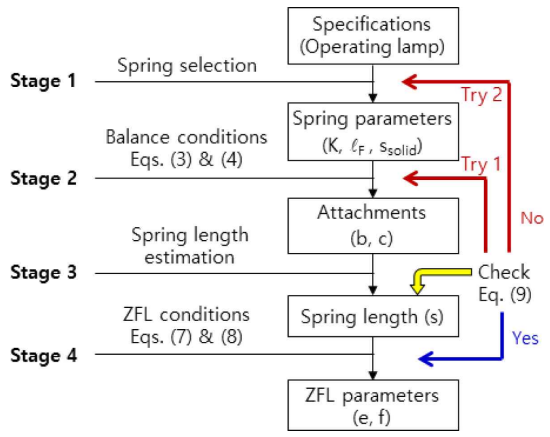


Fig. 4 Design procedure of the spring balancer

먼저 스프링 상수 K_i를 정한 상태에서 식 (3), (4)을 만족하는 b_i, c_i를 구한다. 그러면 스프링 길이가 링크의 회전각에 따라 변하는 범위를 구할 수 있는데 식 (9)의 조건을 만족하는지를 확인하여 만족하지 못하면 b_i, c_i 또는 K_i를 다시 선정하여 과정을 반복한다. 반면에 식 (9)를 만족하면 식 (7), (8)을 만족하는 e_i, f_i를 구하고 설계를 마무리한다.

Table 1은 본 연구에서 대상으로 하는 수술등의 제원을 나타낸 것으로서 중대형 수술등을 기준으로 설정하였다. 또한 Fig. 5는 수술등이 작업공간의 경계 A → B → C → D → A를 따라서 이동할 때 링크각 θ_1, θ_2의 변화를 나타낸 것이다.

3.2 평형조건을 만족하는 스프링 설계해 도출

Table 1의 수술등 제원으로부터 식 (3), (4)의 M_{U1}, M_{U2}를 구하면 각각 76.5 N-m와 36.9 N-m로서 $M_{U1} \approx 2M_{U2}$에 해당한다. 또한 Fig. 5에 나타난 바와 같이 링크각의 변화 폭은 $\Delta\theta_1 \approx \Delta\theta_2 \approx 90^\circ$ 이므로 식 (2)의 스프링 길이의 변화 폭도 $\Delta\ell_1 \approx \Delta\ell_2$가 된다. 따라서 $K_1 \approx 2K_2$로 하되 스프링 1의 강성을

Table 1 System parameters of the operating lamp

Description	Properties	Value
Link 1	Weight (N)	54.2
	Length (m)	0.90
	CG location (m)	0.45
Link 2	Weight (N)	23.5
	Length (m)	0.86
	CG location (m)	0.40
Astral lamp	Weight (N)	34.3
Workspace (m)	(A_x, A_y)	(0.5, -0.2)
	(B_x, B_y)	(1.5, -0.2)
	(C_x, C_y)	(1.5, 0.5)
	(D_x, D_y)	(0.5, 0.5)

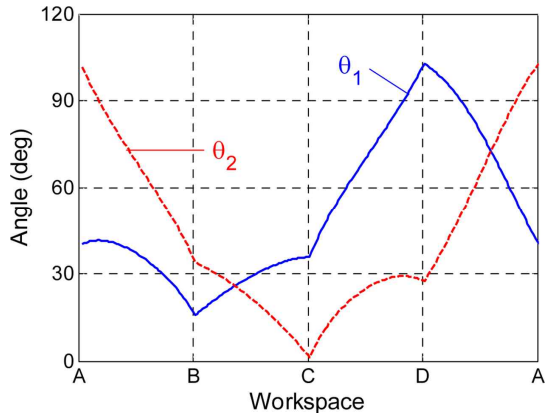


Fig. 5 Link angles vs. workspace

2배로 하는 대신 같은 강성의 스프링 2개의 병렬 조합으로 할 경우 식 (3), (4)의 평형조건과 식 (7), (8), (9)의 추가 조건을 만족하는 b_i, c_i, e_i, f_i를 효과적으로 찾아낼 수 있다. 본 연구에서는 규격 스프링집을 참고하여[11] 자유길이 ℓ_F가 크고 최대압축길이 ℓ_{solid}가 작은 2개의 스프링을 Table 2와 같이 선정하고 설계를 진행하였다.

다음 단계로서 평형조건을 만족하는 b_i, c_i를 구하기 위해 식 (3), (4)를 아래와 같이 무차원 변수 $\gamma_i(>0)$을 도입하여 변형하였다.

$$b_1=(1+\gamma_1)\sqrt{\frac{M_{U1}}{K_1}}\ ;\quad c_1=\frac{1}{1+\gamma_1}\sqrt{\frac{M_{U1}}{K_1}} \tag{10}$$

$$b_2=\frac{1}{1+\gamma_2}\sqrt{\frac{M_{U2}}{K_2}}\ ;\quad c_2=(1+\gamma_2)\sqrt{\frac{M_{U2}}{K_2}} \tag{11}$$

위 식에서 γ_i값에 따라 (b_i, c_i)값이 주어지는데 Fig. 2(b)를 보면 스프링 1의 경우는 c_1이 작을수록 스프링 평형장치를 고정하기 위한 보조링크 3의 크기가 줄어들기 때문에 $c_1<b_1$이 되는 조건을 적용하였으며 반면에 스프링 2의 경우는 b_2에 비례하여 회전하는 보조링크 2의 크기가 결정되기 때문에 $b_2<c_2$인 조건을 적용했다.

Fig. 6은 γ_i값을 변화시키면서 스프링 길이를 구하고 식 (9)를 만족하는지 여부를 확인하여 그 결과를 도시한 것으로 Table 2에서 선정한 2개의 스프링에 대해서 스프링 길이를 구하고 식 (9)를 만족하는 γ_i값의 범위를 빗금으로 표시하였다.

Case 1의 경우 스프링 1에 대해서는 $0.62\le\gamma_1\le0.65$일 때 식(9)를 만족하지만 스프링 2에 대해서는 식 (9)를 만족하는 γ_2가 존재하지 않는다. 반면에 Case 2의 경우 식 (9)를 만족하는 γ_1, γ_2의 범위가 존재하며 따라서 본 연구의 평형장치 조건을 만족하는 스프링이 될 수 있다. Table 2는 ZFL 특성에 관한 식 (7), (8)을 포함한 모든 설계 조건을 만족하는 b_i, c_i, e_i 및 f_i의 범위를 구한 결과이다.

Table 2 Feasibility study of the spring selection

Properties		Case 1	Case 2
Stiffness, K (N/mm)		5.1	9.8
Free length, ℓ_F (mm)		161.9	146.1
Solid length, s_{solid} (mm)		23.5	9.3
Spring 1	γ	0.62 ~ 0.65	0.81 ~ 1.26
	b (mm)	140.3 ~ 142.9	113.0 ~ 141.6
	c (mm)	52.5 ~ 53.4	27.6 ~ 34.5
Spring 2	γ	Not available	0.00 ~ 0.60
	b (mm)	Not available	38.3 ~ 61.3
	c (mm)	Not available	61.3 ~ 98.2
ZFL parameter	e, f (mm)	Not available	37.6 ~ 108.5

3.3 스프링 평형장치의 설계변수 결정

앞 절에서 구한 스프링 평형장치의 설계 결과로부터 최종적인 설계 변수의 값을 결정하기 위해서는 추가적인 고려가 필요하다. 본 연구에서는 평형장치의 소형화 관점과 설계 변수가 식 (8), (9)의 구속 조건에 대해 갖는 여유치 관점에 근거하여 결정하였다. 구체적으로 식 (8)에 대한 여유치는 다음과 같이 정의하였다.

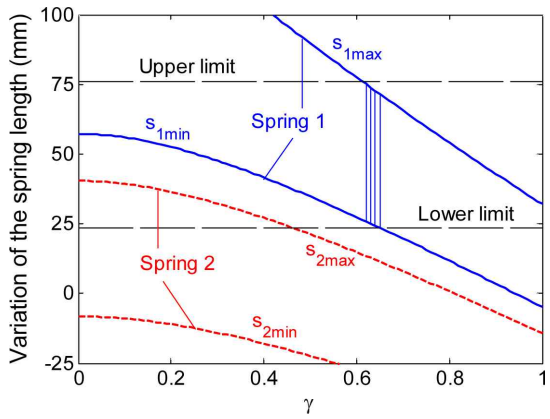
$$\Delta e_i=\left(1-\frac{e_i}{s_{\max}+t_P}\right)\times100 \tag{12}$$

$$\Delta f_i=\left(1-\frac{f_i}{s_{\max}+t_P}\right)\times100 \tag{13}$$

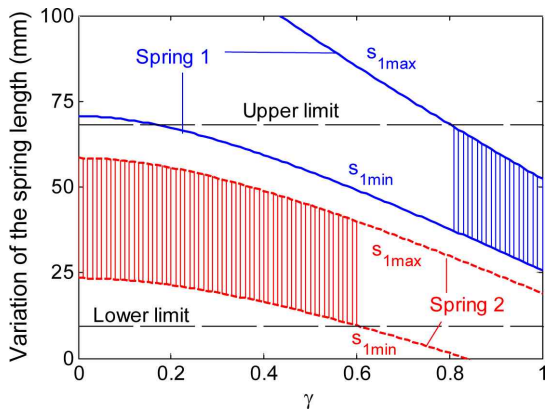
또한 스프링이 최대로 압축되었을 때의 길이가 s_{solid}에 근접할수록 스프링의 비선형 관점에서 바람직하지 않으므로 식 (9)에 대한 스프링 길이의 여유치는 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta s_i=\left(\frac{s_{i,\min}-s_{solid}}{\ell_F-s_{solid}}\right)\times100 \tag{14}$$

설계 비교를 위해서 Table 2의 K=9.8 N/mm인 조건에서



(a) Case 1



(b) Case 2

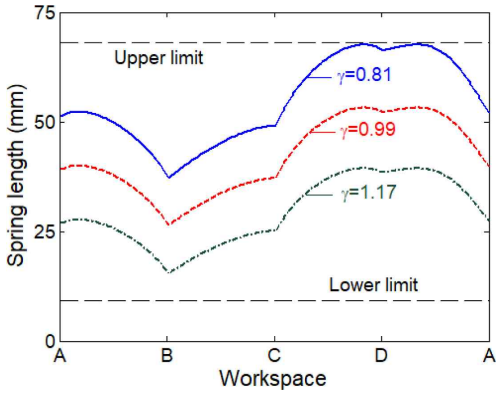
Fig. 6 Feasibility study with a variation of the spring attachment locations

스프링 1의 경우는 $\gamma_1 = 0.81, 0.99, 1.17$, 스프링 2의 경우는 $\gamma_2 = 0.00, 0.24, 0.48$에 대해서 추가적인 검토를 수행하였다. Table 3은 각 설계 변수 값과 설계 여유치를 정리한 것이고 Fig. 7은 작업 공간내에서 이동할 때 스프링 길이의 변화이다.

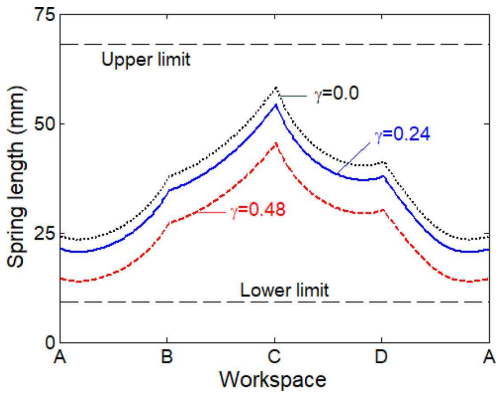
스프링 1의 경우 $\gamma_1 = 0.81$일 때는 Δf_1의 설계 여유가 거의 없고 $\gamma_1 = 1.17$인 경우는 c_1의 감소에 의한 장치 소형화 효과에 비해 스프링 길이의 여유치 Δs_1의 감소가 더 크므로 $\gamma_1 = 1.17$을 최종 설계로 결정하였다. 또한 스프링 2의 경우 $\gamma_2 = 0.24$인 경우가 $\gamma_2 = 0.0$인 경우와 비교하여 b_2의 감소에 의한 장치 소형화 효과가 크면서도 Δs_2의 감소폭은 크지 않기 때문에 최종 설계로 결정하였다. Table 4는 최종 설계 값을 정리한 것이다.

Table 3 Design comparison of the spring balancers

Properties		Spring 1			Spring 2		
γ		0.81	0.99	1.17	0.00	0.24	0.48
Design parameter (mm)	b	113.0	124.3	135.5	61.4	49.5	41.5
	c	34.5	31.4	28.8	61.4	76.1	90.8
	e	73.0	82.9	96.8	77.6	81.6	90.6
	f	73.1	63.2	49.3	68.5	64.5	55.5
Spring length (mm)	s_{max}	67.6	53.2	39.3	58.5	54.5	45.5
	s_{min}	37.2	26.4	15.4	23.4	20.5	13.8
Design margin (%)	Δs	20.4	12.5	4.4	10.3	8.2	3.3
	Δe	0.7	29.8	54.2	18.3	27.0	44.2
	Δf	0.7	7.9	10.1	7.3	7.7	9.0



(a) Spring 1



(b) Spring 2

Fig. 7 Variation of the spring lengths in the workspace

4. 스프링 평형장치의 성능시험

4.1 성능시험 개요

Fig. 8은 앞장의 설계 결과를 바탕으로 제작한 스프링 평형장치의 성능을 시험하기 위한 장치의 구성도이다. 수술등 발광부의 상단 중심에 로프를 걸고 윈치와 풀리를 거쳐 로프 길이를 변화시키면서 그 장력을 로드셀로 측정하였다. 본 연구에서 개발한 스프링 평형장치가 수술등의 중력보상을 완전하게 한다면 로프 장력은 발생하지 않으므로 로프 장력은 스프링 평형의 오차에 해당한다.

실험은 발광부의 수평 방향 위치를 일정하게 유지한 상태에서 윈치에 의해 로프를 80 mm씩 풀어서 수직 하강시키면서 정적 상태에 도달했을 때 장력을 측정하였으며 5회에 걸쳐 반복 수행하였다.

Table 5는 장력 측정 시 발광부의 위치와 그때의 로프각 및 링크각을 정리한 것이고 Fig. 9는 성능시험 장치의 사진이다.

Table 4 Design summary of the spring balancers

Properties		Value
Spring	Stiffness, K (N/mm)	9.8
	Free length, ℓ_F (mm)	146.1
	Solid length, s_{solid} (mm)	9.3
	Outer diameter, d_s (mm)	48.7
Attachment parameters	b_1, c_1 (mm)	(124.3, 31.4)
	b_2, c_2 (mm)	(49.5, 76.1)
Zero-freelength parameters	e (mm)	81.6
	f (mm)	64.5
	d_L (mm)	60.0

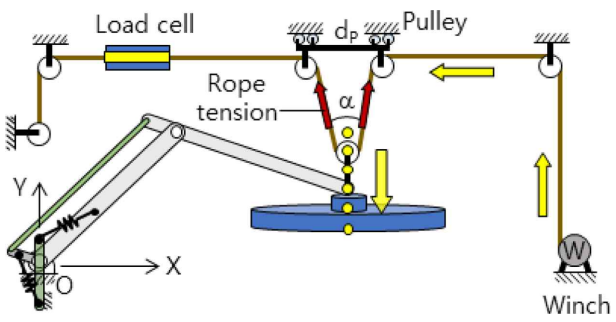
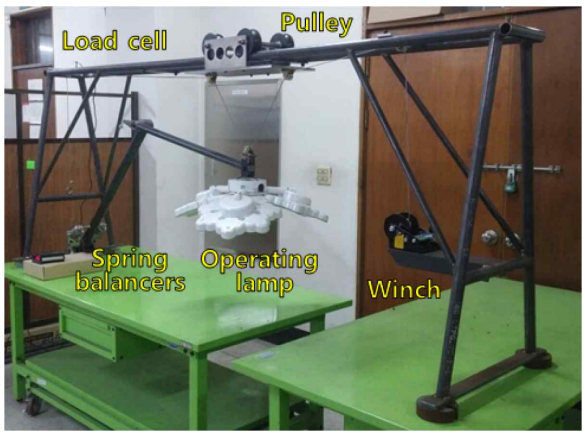


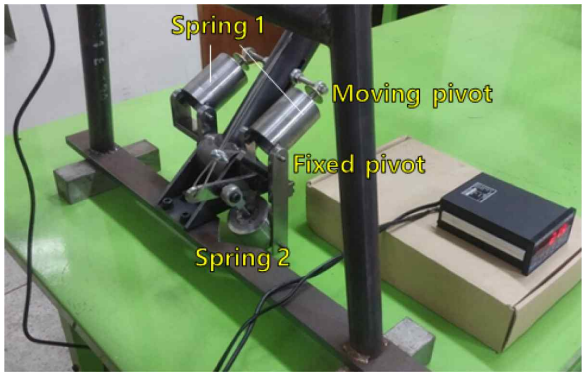
Fig. 8 Experimental setup

Table 5 Measurement conditions

Position	x (m)	y (m)	α(°)	θ_1(°)	θ_2(°)
1	1.2	0.47	65.5	59.2	22.6
2	1.2	0.37	53.5	56.6	28.2
3	1.2	0.29	45.4	53.8	33.4
4	1.2	0.20	39.4	50.6	38.2
5	1.2	0.12	34.9	47.1	42.8
6	1.2	0.03	31.3	43.3	47.0



(a) Overview of the test rig



(b) Spring balancers

Fig. 9 Photograph of the experimental setup

4.2 결과 분석

Table 6은 로프 장력 값의 측정 결과이고 Fig. 10은 로프 장력으로부터 환산한 수술등 발광부 중심에서의 비평형 힘과 비평형 모멘트를 도시한 것이다. 또한 Fig. 11은 비평형 모멘트를 식 (15)에 따라 수술등 중력에 의한 모멘트에 대한 비율로 나타낸 것이다.

$$\epsilon_{ui} = \left[\frac{2T_i \cos\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)\{L_1 \cos\theta_{1i} + (L_2 - L_D)\cos\theta_{2i}\}}{M_{U1}\cos\theta_{1i} + M_{U2}\cos\theta_{2i}} \right] \times 100 \tag{15}$$

Fig. 11에서 비평형 모멘트의 비율이 대략 7~8 % 라는 것은 본

Table 6 Measured rope tension

Position	Measurement (N)					Mean (N)
	1	2	3	4	5	
1	2.35	2.47	2.43	2.63	2.47	2.47
2	2.59	2.78	2.81	2.68	2.72	2.72
3	2.60	2.68	2.51	2.47	2.80	2.61
4	2.30	2.51	2.31	2.64	2.74	2.50
5	2.63	2.77	2.65	2.51	2.65	2.64
6	2.79	2.79	2.75	2.57	2.76	2.73

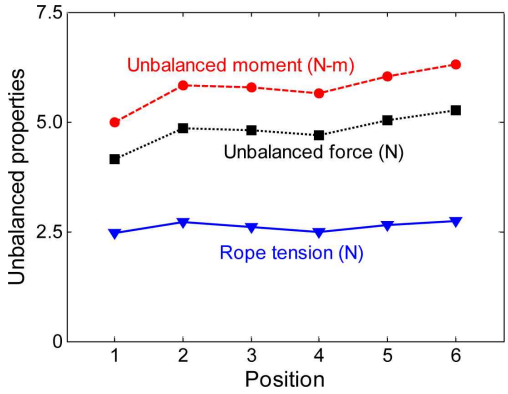


Fig. 10 Unbalanced properties vs. measured positions

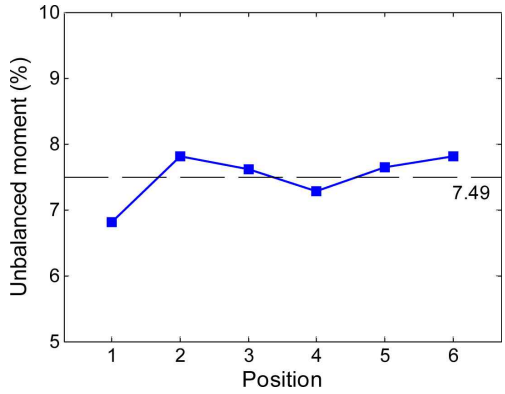


Fig. 11 Unbalanced moment in percentage

연구에서 개발한 평형장치가 위치에 상관없이 매우 효과적으로 수술등의 정적 평형을 달성한다는 것을 알 수 있다[12]. 또한 측정 위치에 따른 로프 장력 및 비평형 모멘트의 변화 폭이 매우 작은데 이는 스프링 평형장치가 수술등 위치에 상관없이 효과적으로 중력 보상을 하고 있음을 의미한다.

평형 오차의 발생 요인으로는 스프링 평형장치의 설계 시 보조링크 및 스프링의 무게를 고려하지 않았던 점과 서스펜션 암의 무게중심의 설계 위치와 실제 위치의 차이 등을 들 수 있다. 또한 서스펜션 암의 링크 1,2와 스프링 평형장치의 부착을 위해 도입한 보조링크 1,2가 이루는 평행사변형에 대한 기하학적 오차도 비평

형 모멘트가 발생하는 요인이 될 수 있다. 또한 평형 오차와 별개로 동일한 위치에서 반복 측정한 로프 장력 값의 변동은 로프와 풀리의 마찰에 기인한 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 수술등의 중력보상을 위한 스프링 평형장치를 설계 제작하고 성능 시험을 수행하여 결과를 검증하였다. 평형장치는 압축스프링을 이용하여 등가의 zero-free-length 특성을 갖도록 스프링 강성 및 부착 위치, 스프링 길이 변화의 폭을 결정함으로써 수술등이 작업공간 내에서 완전평형을 이룰 수 있도록 설계하였다. 수술등의 수직 위치를 변화시키면서 평형장치의 성능 시험을 수행한 결과 7~8 %의 오차 범위 내에서 위치에 상관없이 효과적으로 평형을 이루는 것을 확인하였다. 오차 발생은 설계 단계에서 평형장치 부착을 위해 추가되는 보조링크 및 스프링의 무게를 고려하지 않은데 기인한 것으로 보인다.

본 연구의 결과는 중력보상의 필요성이 큰 중대형 수술등을 대상으로 규격 스프링을 활용하여 간단한 구조의 소형 평형장치를 개발했다는 점에서 의의가 있으며 작업 공간에서의 위치에 상관없이 완전평형에 근접하는 성능을 구현했다는 점에서 기존 수술등과 차별화된다. 또한 본 연구에서 확인한 스프링 장치의 평형오차는 향후 설계 단계에서 추가적인 무게에 대한 고려를 통해 개선 가능하다.

후 기

이 논문은 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] Jung, H. H., Kim, J. W., Kim, S. M., 2013, Operating Room Equipment-Operating Light, Operating Table, KHIDI Medical Device Market Research Report 13 1-5.

[2] Ahn, S. S., Lee, I. S., Kwon, K. J., 2014, Design and Implementation of The LED Surgical Light System Applicable for Various Surgical Procedures, J. KIIT. 12:3 39-49.

[3] Gosselin, C. M., Wang, J., 2000, Static Balancing of Spatial Six-Degree-of-Freedom Parallel Mechanisms With Revolute Actuators, J. Robotic Sys. 17:3 159-170.

[4] Schorsch, J. F., Keemink, Q. L., Stienen, A. H., Abbink, D. A., 2014, A Novel Self-Aligning Mechanism to Decouple Force and Torques for a Planar Exoskeleton Joint, Mech. Sci. 5 29-35.

[5] Lin, P. Y., Shieh, W. B., Chen, D. Z., 2010, A Stiffness Matrix Approach for the Design of Statically Balanced Planar Articulated Manipulators, Mech. Mach. theory 45 1877-1891.

[6] Deepak, S. R., Ananthasuresh, G. K., 2012, Perfect Static Balance of Linkages by Addition of Springs But Not Auxiliary Bodies, ASME J. Mech. Rob. 4 1-12.

[7] Koser, K., 2009, A Cam Mechanism for Gravity-Balancing, Mech. Mach. theory 36 523-530.

[8] Herder, J. L., 2001, Energy-free Systems: Theory, Conception and Design of Statically Balanced Spring Mechanisms, Doctoral Dissertation, Delft University of Technology The Netherlands.

[9] Schenk, M., Guest, S. D., 2013, On Zero Stiffness, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Mech. Eng. Sci. 228 1701-11714.

[10] Shin, E. S., Lee, Y. H., 2000, A Passive Gravity-Compensation System for Articulated Robots, Trans. KSME A 24:2 481-488.

[11] Century Spring Corp., 2017, Spring Catalog, Century Spring Corp..

[12] Song, S. W., Song, J. B., 2016, Development of a 5 DOF Manipulator for Weight Handling Based on Counterbalance Mechanism, J. KRS 11:4 242-247.