

# 저속 및 고속주행에서 안정영역을 갖는 3 Segment Leg 설계 연구

## Design Study of 3 Segment Leg with Stable Region at low and high Speed Running

권 오 석<sup>1</sup>, 이 동 하<sup>2</sup>

Kwon Oh-Seok<sup>1</sup>, Lee Dong-Ha<sup>2</sup>

**Abstract** In previous researches<sup>[2,3]</sup>, the self-stability was studied for the spring-mass model and the two segment leg model. In these researches, it was presented that the spring-mass model has the self-stable region at relatively high speed running and the two segment leg model has the self-stable region at relatively low speed running. If the model was run in the self-stable region, the cost of transport<sup>[1]</sup> is zero ideally. That is, actually, only the energy loss is needed to compensate for running. This means that the energy efficiency is high, running in the self-stable region. We want to have high energy efficiency at low and high speed running. So, in this paper, we propose the design direction of the three segment leg having the self-stable region at low and high speed running. And we prove the self-stable region of the three segment leg designed by the proposed design direction.

**Keywords:** segment leg, leg stiffness, self-stability, running robot

### 1. 서론

일반적으로 다리식 이동 로봇(legged mobile robot) 개발에 있어서 가장 큰 문제점 중 하나는 전원장치의 중량 및 지속가능시간이라 할 수 있다. 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 한 방안은 이동 에너지 비용(cost of transport=(energy used)/(weight x distance traveled)<sup>[1]</sup>)을 줄이는 것이다. 즉, 에너지 효율성을 높이는 것이라 할 수 있다.

기존의 연구<sup>[2,3]</sup>에서는 1 Segment Leg(SL)-일반적으로 spring-mass model이라고 하나 편의상 본 논문에서는 1SL이라고 함-과 2SL에 대한 running self-stable 영역에 대하여 연구하였다. 이상적으로는 running self-stable 영역에서 주행을 하게 되면 이동 에너지 비용이 0가 된다. 즉, 실제 주행에서는 에너지 손실분만을 보충하여 주면

된다는 것이다<sup>[2]</sup>.

기존의 연구<sup>[2,3]</sup>의 연구결과는 1SL은 상대적으로 고속주행에서 self-stable 영역을 가지고, 2SL은 상대적으로 저속주행에서 self-stable 영역을 가짐을 밝혔다.

본 연구에서는 저속 및 고속주행에서 self-stable 영역을 갖고자 하는데 목적을 두었고, leg 구조는 3SL을 이용하였다.

본 논문에서는 1, 2SL에 대한 기존의 연구결과<sup>[2,3]</sup>를 분석하고 이를 통해 저속 및 고속주행에서 self-stable 영역을 가질 수 있는 3SL 설계방향을 제시하고, 제시한 설계방향에 따라 설계된 3SL이 저속 및 고속주행에서 self-stable 영역을 가지는지를 검증하고자 한다.

본 논문의 저자가 아는 한 1SL이 가지는 self-stable 영역인 고속주행 구간과 2SL이 가지는 self-stable 영역인 저속주행 구간을 복합적으로 가지는 즉, 저속 및 고속주행에서 self-stable 영역을 가질 수 있는 3SL 설계방향을 제시한 것은 본 저자가 학술대회를 통해 발표한 논문<sup>[7]</sup>을 제외하고는 새롭게 제시된 내용으로 알고 있다.

Received : Mar. 31. 2011; Reviewed : Jun. 7. 2011; Accepted : Jul. 29. 2011

※ 본 연구는 교육과학기술부에서 지원하는 대구경북과학기술원 일반사업에 의해 수행되었습니다(11-BD-01).

<sup>1</sup> 대구경북과학기술원 선임연구원

<sup>2</sup> 대구경북과학기술원 책임연구원

## 2. 저속 및 고속주행에서 안정영역을 갖는 3SL 설계방향

이장에서는 저속 및 고속주행에서 self-stable 영역을 가질 수 있는 3SL 설계방향을 제시하고자 한다.

본 논문에서 다루는 1,2,3SL 모델과 running 모델은 그림 1과 같다.

기존의 연구<sup>[2,3]</sup>(참고문헌[2]의 Fig. 5 및 참고문헌[3]의 Fig. 4 참고)에서는 1SL은 상대적으로 고속구간에서 안정한 touch down angle 범위가 넓으며, 안정한계최저속도가 높음을 밝혔다. 그리고 2SL은 안정한계최저속도가 낮으며, 상대적으로 저속구간에서 안정한 touch down angle 범위가 넓음을 밝혔고, 또한 초기관절각도  $\phi_0$ 가 클수록 안정한계최저속도가 낮고, 상대적으로 더 저속구간에서 안정한 touch down angle 범위가 넓음을 밝혔다. 안정한 touch down angle 범위가 넓은 것은 안정성에 있어서 강인성을 가짐을 의미한다. 이와 같은 결과는 표 1의 해석결과로부터도 알 수 있다. 여기서 주행

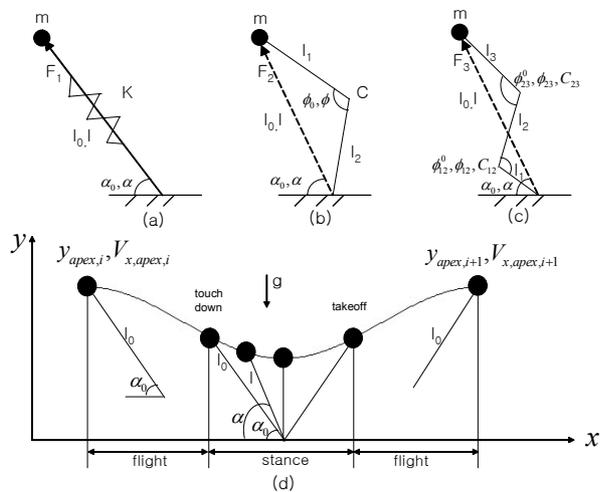


그림 1. (a) 1SL model m: point mass, K: linear stiffness,  $l_0$ : initial leg length, l: compressed leg length,  $\alpha_0$ : touch down angle(angle of attack),  $\alpha$ : varied leg angle,  $F_1$ : 1SL leg force (b) 2SL model  $l_1, l_2$ : segment lengths,  $\phi_0$ : initial joint angle,  $\phi$ : compressed joint angle, C: rotational stiffness,  $F_2$ : 2SL leg force (c) 3SL model  $l_1, l_2, l_3$ : segment lengths,  $\phi_{12}^0, \phi_{23}^0$ : initial joint angles,  $\phi_{12}, \phi_{23}$ : compressed joint angles,  $C_{12}, C_{23}$ : rotational stiffnesses,  $F_3$ : 3SL leg force (d) running model,  $y_{apex,i}, y_{apex,i+1}$ :  $i, i+1^{th}$  apex height,  $V_{x,apex,i}, V_{x,apex,i+1}$ :  $i, i+1^{th}$  velocity of x direction at apex, g: gravitational acceleration. 위 그림에서 leg segment mass는 0으로 가정함. 본 논문에서는 위의 그림에 표시한 기호를 사용함.

속도에 대한 안정한 touch down angle 범위는 self-stable 영역을 의미한다.

위의 결과로부터 고속구간에서는 1SL과 같은 특징을 가지고 저속구간에서는 2SL과 같은 특징을 가지면, 저속 및 고속구간에서 안정영역을 가질 수 있을 것이다.

1SL과 2SL의 stiffness 선도를 살펴보면 그림 2와 같다<sup>[3]</sup>.

그림 2와 같이 1SL은 leg 길이 압축량에 대해 일정한 stiffness값을 가지며, 2SL( $\phi_0 = 130^\circ, 150^\circ, 170^\circ$ )은 작은 압축량에 대해서는 큰 stiffness값을 가지며, 큰 압축량에 대해서는 작은 stiffness값을 가진다. 기존의 연구 [2,3] (참고문헌[2]의 Fig. 5 및 참고문헌[3]의 Fig. 4 참고)으로부터 1SL은 상대적으로 고속구간 그리고 작은 touch down angle값에서 안정한 touch down angle범위가 넓은 것을 알 수 있다. 고속이고 작은 touch down angle값일 때 leg의 압축량은 커진다. 즉, 그림2의 가로축의 값이 커진다. 이때 1SL은 2SL보다 stiffness값이 크다. 그리고 기존의 연구<sup>[2,3]</sup> (참고문헌[2]의 Fig. 5 및 참고문헌[3]의 Fig. 4 참고)으로부터 2SL 안정한계최저속도에서는 touch down angle값이 크다. 저속이고 touch down angle값이 클 때 leg의 압축량은 작다. 즉, 그림2의

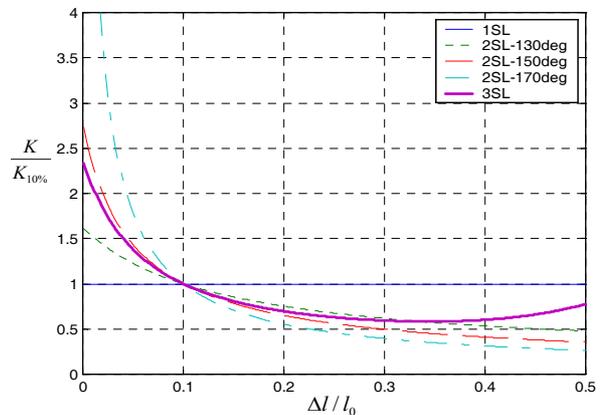


그림 2. 1SL, 2SL( $\phi_0 = 130^\circ, 150^\circ, 170^\circ$  and  $l_1 = l_2$ ) 그리고 제한하는 저속 및 고속주행에서 self-stable 영역을 갖는 3SL stiffness 선도, 가로축: 초기 leg 길이  $l_0$ 로 정규화된 leg 길이 압축량( $\Delta l = l_0 - l$ ), 세로축: 기준강성(reference stiffness)  $K_{10\%}$ <sup>[2,3]</sup>로 정규화된 stiffness K 여기서,  $K_{10\%} = F_{10\%} / \Delta l_{10\%}$ 로서  $\Delta l_{10\%} = 0.1l_0$ 이며,  $F_{10\%}$ 는  $\Delta l_{10\%}$ 일 때의 leg force를 의미한다. 위의 stiffness 선도를 얻는 방법은 부록에서 다룬다.

가로축의 값이 작은 값이 된다. 이때 2SL은 상대적으로 큰 stiffness값을 가진다. 그리고 2SL 안정한계최저속도로부터 안정한계최고속도 근방으로 속도가 증가할수록 안정한 touch down angle범위는 넓어지고 안정한 touch down angle값은 작아진다. 즉, 그림 2의 가로축의 값이 증가하게 되는 것이며, 이때 2SL의 stiffness값은 감소한다. 이와 같은 1SL과 2SL의 stiffness 특성이 1SL은 고속구간에서 안정영역이 넓고, 2SL은 안정한계최저속도가 낮으며, 저속구간에서 안정영역이 넓도록 하여준다.

따라서, 그림 2의 가로축-leg 압축량이 작은 그리고 중간정도의 값까지는 2SL stiffness 특성을 따르도록 하고 큰 압축량의 부분에서는 1SL stiffness 특성을 따르도록 하면, 저속 및 고속에서 안정영역을 가질 수 있을 것이다. 즉, 그림 2의 3SL stiffness 선도와 같이 3SL을 설계하면 저속 및 고속주행에서 self stable 영역을 얻을 수 있을 것이다.

본 논문에서는 그림 2의 3SL stiffness 선도와 같이 3SL을 설계하는 방법에는 생체를 모방하여 적용하고자 한다. 다음 장에서 생체를 모방한, 그리고 그림 2의 3SL stiffness 특성을 갖는 3SL 설계에 대하여 다루고 이와 같이 설계된 3SL의 안정영역을 검증하고자 한다.

### 3. 3SL 설계 및 안정영역 검증

그림 2의 3SL stiffness 특성을 갖는 3SL 설계에는 생체를 모방하여 적용하고자 한다. 본 논문에서 모방하고자 하는 대상 생체는 다리를 가진 지상동물 중 가장 빠른 치타(cheetah)이다. 치타의 뒷다리(hindlimb)<sup>[4]</sup>를 3SL로 재구성한 그림은 그림 3과 같다.

그림 3과 같은 초기각도  $\phi_{12}^0, \phi_{23}^0$ 와 segment 길이  $l_1, l_2, l_3$ 를 이용하고, rotational stiffness  $C_{12}, C_{23}$  또는 stiffness ratio  $R_c \equiv C_{12} / C_{23}$ <sup>[5]</sup>와  $K_{10\%}$ 를 선정하면 부록과 같은 방법으로 3SL에 대한 stiffness 선도를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 무차원 기준강성(dimensionless reference stiffness)  $\tilde{K}_{10\%} = K_{10\%} l_0 / m g$ <sup>[2][3]</sup>를 40으로 선정하여 비교한다. 그리고 참고문헌[2][3]에서 사용한 값과 같이  $m = 80\text{Kg}$ ,  $l_0 = lm$ 를 사용한다. 따라서,  $K_{10\%} = 31392\text{N/m}$ 를 사용하여 비교한다. 그리고  $R_c$ 는 구조적 안정

(mechanical stability<sup>[5]</sup> or structural stability<sup>[6]</sup>)범위내에서 선정하여 비교한다. 여기서는  $R_c = 0.1645$ 와  $R_c = 0.7043$ 을 선정하여 비교한다. 위와 같이 선정된 3SL의 설계 파라미터  $\phi_{12}^0, \phi_{23}^0$ 와  $l_1, l_2, l_3$  그리고  $K_{10\%}, R_c$ 를 이용하여 부록과 같은 방법으로 3SL의 stiffness 선도를 그림 4와 같이 얻을 수 있다.

그림 4로부터 3SL- $R_c = 0.1645$ 의 stiffness 특성은 작은 압축량(대략  $\Delta l / l_0 = 0.25$ 이하)부분에서는 2SL- $\phi_0 =$

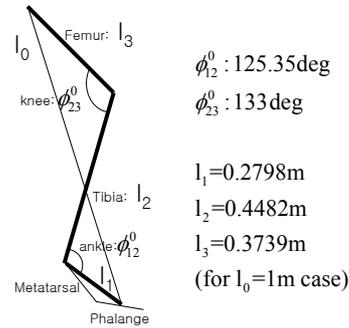


그림 3. 치타의 뒷다리는 segment로서 Femur, Tibia, Metatarsal, Phalange로 구성되며, joint angle로서 knee, ankle(원래의 ankle은 Tibia와 Metatarsal사이의 각도이며, 위그림의 ankle은 3SL으로 재구성한 ankle임), Metatarsal-Phalange (MTP)로 구성된다<sup>[4]</sup>. 이를 본 논문에서는 3SL로 재구성하기 위해 위의 그림과 같이 Phalange segment의 중앙과 ankle joint를 연결하여  $l_1$  segment로 하였고, 이에 따라 ankle각도도 위 그림과 같이 변경되었다. 이렇게 재구성된 3SL의 초기 각도  $\phi_{12}^0, \phi_{23}^0$ (참고문헌[4]의 footfall일 때의 값으로부터 얻은 값)와  $l_0 = 1\text{m}$ 인 경우 segment 길이  $l_1, l_2, l_3$ (참고문헌[4]의 hindlimb segment relative length로부터 얻은 값)는 위 그림의 우측에 나와있는 값과 같다.

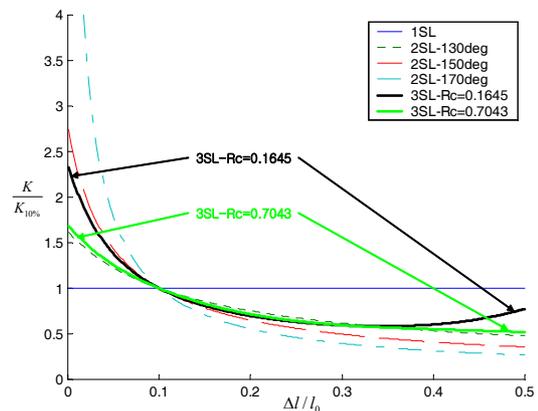


그림 4. 1SL, 2SL( $\phi_0 = 130^\circ, 150^\circ, 170^\circ$  and  $l_1 = l_2$ ) and 3SL( $R_c = 0.1645$  and  $R_c = 0.7043$  나머지 파라미터는 본문참조) stiffness diagrams, 가로축과 세로축은 그림 2와 같음.

150°보다 조금 작은 각도의 stiffness 특성을 보이며, 압축량이 커지면서 stiffness 감소량이 줄어들고 대략  $\Delta l/l_0 = 0.35$  이상에서는 오히려 stiffness 값이 증가한다. 이로부터 3SL- $R_c = 0.1645$ 는 2SL- $\phi_0 = 150^\circ$ 보다 조금 작은 각도가 가질 수 있는 저속안정영역을 가질 수 있을 것으로 예상되고, 압축량이 커지면서 stiffness 감소량이 줄어들고 또한 증가하므로 고속안정영역도 가질 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 3SL- $R_c = 0.7043$ 의 stiffness 특성은 압축량 구간에 따라 조금의 차이는 있지만 거의 2SL- $\phi_0 = 130^\circ$  stiffness 특성과 유사하다. 따라서 3SL- $R_c = 0.7043$ 은 2SL- $\phi_0 = 130^\circ$ 가 가지는 안정영역과 유사한 안정영역을 가질 것으로 예상된다. 그리고 3SL- $R_c = 0.1645$ 와  $R_c = 0.7043$ 을 비교하면, 작은 압축량 부분에서  $R_c = 0.1645$ 는 2SL- $\phi_0 = 150^\circ$ 에 가까운 stiffness 특성을 가지고,  $R_c = 0.7043$ 은 2SL- $\phi_0 = 130^\circ$ 에 가까운 stiffness 특성을 가지므로 3SL- $R_c = 0.1645$ 가  $R_c = 0.7043$ 보다 안정한계최저속도가 더 낮고 더 저속구간에서 안정영역이 넓을 것으로 예상되며, 압축량이 커지면서는 3SL- $R_c = 0.1645$ 가  $R_c = 0.7043$ 보다 큰 stiffness 특성을 가지므로 더 고속구간에서 안정영역이 넓을 것으로 예상된다.

다음은 참고문헌 [2][3]의 안정성 해석 방법(Poincaré map or apex return map)과 같은 방법으로 안정영역을 검증한다. 그 결과는 다음의 표 1과 같다.

1SL과 2SL에 대한 안정영역 결과인 표 1(a), (b), (c), (d)는 기존의 1SL과 2SL에 대한 안정영역 연구결과<sup>[2][3]</sup>와 유사한 경향의 결과임을 알 수 있다(참고문헌[2]의 Fig. 5 및 참고문헌[3]의 Fig. 4 참고). 즉, 1SL은 고속구간에서 안정영역이 넓고, 2SL은 안정한계최저속도가 낮으며, 저속구간에서 안정영역이 넓다. 그리고 2SL- $\phi_0 = 130^\circ, 150^\circ, 170^\circ$ 중  $\phi_0 = 170^\circ$ 가 가장 안정한계최저속도가 낮으며 저속구간에서 안정영역이 넓고, 그 다음 순으로  $\phi_0 = 150^\circ, \phi_0 = 130^\circ$ 이다.

다음으로 그림 4와 같은 stiffness 특성을 갖는 3SL의 안정영역을 표 1(e), (f)로부터 확인한다. 3SL- $R_c = 0.1645$ 에 대한 안정영역 결과인 표 1(e)로부터 앞에서 예상한 바와 같이 저속구간에서는 2SL- $\phi_0 = 150^\circ$ 보다 조금 작은 각도가 가지는 안정영역과 같음을 표 1(c)와 비교하여 알 수 있다(즉, 2SL- $\phi_0 = 150^\circ$ 보다 조금 작은 각도로서 저속구간에서 안정영역이 2SL- $\phi_0 = 150^\circ$ 보다 조금 작다. 예를들어  $V_{x,apex,0} = 5m/s$ 에서 안정한  $\alpha_0$ 의

표 1. 그림 4의 stiffness 선도에 나타난 1SL, 2SL( $\phi_0 = 130^\circ, 150^\circ, 170^\circ$  and  $l_1 = l_2$ ) 그리고 3SL( $R_c = 0.1645$  and  $R_c = 0.7043$  나머지 파라미터는 본문참조)의 안정영역, 여기서 사용한  $m, l_0, y_{apex,0}$ 는 참고문헌[2][3]에서 사용한 값과 같이  $m = 80kg, l_0 = lm, y_{apex,0} = l_0$ 를 사용하였고,  $\bar{K}_{10\%}$ 도 앞에서 언급한 바와 같이 40을 사용하였다. 다음의 각 표 좌측은 초기 정점 속도  $V_{x,apex,0}$ (단위: m/s)를 나타내고, 우측은 해당  $V_{x,apex,0}$ 에 대한 안정한 touch down angle  $\alpha_0$ (단위: degree) 범위를 나타낸다. 그리고  $V_{x,apex,0} = 20m/s$ 이하의 속도범위까지만 안정영역을 해석하였고, 표 (a)와 (e)는  $V_{x,apex,0} = 20m/s$ 이상에서도 안정한 touch down angle 범위가 존재한다. 그리고 안정영역( $V_{x,apex,0}$  및  $\alpha_0$ )을 탐색하는 간격(scan resolution)은 편의상 비균등하고 크게 하였다.

(a) 1SL		(b) 2SL- $\phi_0 = 130^\circ$		(c) 2SL- $\phi_0 = 150^\circ$	
$V_{x,apex,0}$	$\alpha_0$	$V_{x,apex,0}$	$\alpha_0$	$V_{x,apex,0}$	$\alpha_0$
20	26-54	17	36-46	13	41-48
15	46-60	16	32-51	10	38-65
10	58-65	15	30-54	8	54-70
5	72-73	10	48-65	5	70-76
3.5	75	5	71-74	3	79-80
		3	77.5	2.5	80.5

(d) 2SL- $\phi_0 = 170^\circ$		(e) 3SL- $R_c = 0.1645$		(f) 3SL- $R_c = 0.7043$	
$V_{x,apex,0}$	$\alpha_0$	$V_{x,apex,0}$	$\alpha_0$	$V_{x,apex,0}$	$\alpha_0$
8	70-74	20	24-41	19	35-38
5	69-82	19	33-43	18	31-42
3	80-85	15	40-51	17	28-46
2	85	10	52-65	15	26-52
1.5	86.5	5	71-76	10	49-65
		3	79	5	71-74
		2.5	80.1	3	78

범위를 표 1(e)와 (c)로부터 비교하여 보면, 각각 71-76과 70-76으로서 표 1(c)의 경우인 2SL- $\phi_0 = 150^\circ$ 가 안정영역이 조금 더 크다. 그리고 표 1(c)와 같이 2SL- $\phi_0 = 150^\circ$ 의 안정한계최고속도는 대략 13m/s이지만, 표 1(e)에서 보는 바와 같이 3SL- $R_c = 0.1645$ 는 표 1(a)의 1SL과 같이 고속구간에서도 안정영역이 존재함을 알 수 있다. 그리고 표 1의 설명부분에서도 언급한 바와 같이 표 1(a)와 (e)는  $V_{x,apex,0} = 20m/s$ 이상에서도 안정영역이 존재한다. 그리고, 표 1(e)로부터  $V_{x,apex,0} = 2.5m/s$ 에서부터 10m/s까지는 안정한  $\alpha_0$ 의 범위가 넓어지다가 15m/s에서는 안정한  $\alpha_0$ 의 범위가 줄어들고 다시 20m/s에서는 안정한  $\alpha_0$ 의 범위가 넓어지는 것을 볼 수 있는 데 이와 같이 20m/s에서 안정한  $\alpha_0$ 의 범위가 다시 넓어지는 이유는 그림4의 3SL- $R_c = 0.1645$ 가 압축량이 큰 부분에

서 stiffness값이 증가하기 때문이다. 다음으로 3SL-- $R_c = 0.7043$ 에 대한 안정영역 결과인 표 1(f)를 보면 앞에서 예상한 바와 같이  $V_{x,apex,0} = 10m/s$ 까지는 표 1(b)의 2SL- $\phi_0 = 130^\circ$ 의 안정영역과 거의 같음을 알 수 있다. 하지만,  $V_{x,apex,0} = 15m/s$ 부터는 안정한  $\alpha_0$ 의 범위에 차이가 있는데 이는 그림 4의 큰 압축량 부분(대략  $\Delta l/l_0 = 0.35$ )부터 3SL- $R_c = 0.7043$ 의 stiffness값이 2SL- $\phi_0 = 130^\circ$ 의 stiffness값보다 커지기 때문이다. 이로인해 고속 구간에서 3SL- $R_c = 0.7043$ 이 2SL- $\phi_0 = 130^\circ$ 의 안정영역보다 더 넓어지고, 또한 안정한계최고속도도 2SL- $\phi_0 = 130^\circ$ 는  $17m/s$ 인 반면 3SL- $R_c = 0.7043$ 의 경우에는  $19m/s$ 으로 더 높은 것을 확인할 수 있다. 그리고 3SL- $R_c = 0.1645$ 의 안정영역 결과인 표 1(e)와 3SL- $R_c = 0.7043$ 의 안정영역 결과인 표 1(f)를 살펴보면, 마찬가지로 앞에서 예상한 바와 같이 3SL- $R_c = 0.1645$ 가 3SL- $R_c = 0.7043$ 보다 안정한계최저속도가 더 낮으며, 더 저속구간에서 안정영역이 넓음을 확인할 수 있다(예를들어,  $V_{x,apex,0} = 5m/s$ 에서  $R_c = 0.1645$ 의 안정한  $\alpha_0$ 범위는 71-76이며,  $R_c = 0.7043$ 의 안정한  $\alpha_0$ 범위는 71-74임.). 그리고, 3SL- $R_c = 0.1645$ 가 3SL- $R_c = 0.7043$ 보다 더 고속구간에서 안정영역이 넓음을 확인할 수 있다(예를들어,  $V_{x,apex,0} = 19m/s$ 에서  $R_c = 0.1645$ 의 안정한  $\alpha_0$ 범위는 33-43이며,  $R_c = 0.7043$ 의 안정한  $\alpha_0$ 범위는 35-38로서  $R_c = 0.1645$ 의 안정영역이 더 넓으며 또한  $R_c = 0.1645$ 는  $V_{x,apex,0} = 20m/s$  이상에서도 안정영역이 존재한다.). 하지만, 중간 속도 구간에서는 3SL- $R_c = 0.7043$ 이 3SL- $R_c = 0.1645$ 보다 안정영역이 넓다(예를들어,  $V_{x,apex,0} = 15m/s$ 에서  $R_c = 0.7043$ 은 안정한  $\alpha_0$ 범위로 26-52를 가지며,  $R_c = 0.1645$ 는 안정한  $\alpha_0$ 범위로 40-51을 가진다.).

이로서 2장에서 제시한 저속 및 고속 주행에서 안정영역을 가질 수 있는 3SL stiffness 특성을 갖는 3SL에 대한 설계 및 안정영역 검증을 위의 3SL- $R_c = 0.1645$ 와  $R_c = 0.7043$ 을 통하여 하였다. 앞에서 살펴본 바와 같이 작은 압축량 부분에서는 큰 초기관절각도를 갖는 2SL의 stiffness 특성을 따르고, 큰 압축량 부분에서는 1SL과 같은 stiffness 특성을 따르며 더 저속 및 고속구간에서 안정영역을 가질 수 있음을 3SL- $R_c = 0.1645$ 와  $R_c = 0.7043$ 을 통하여 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 상대적으로 고속주행에서 self-stable

영역을 갖는 1SL과 저속주행에서 self-stable 영역을 갖는 2SL의 특성을 분석하고 이로부터 저속 및 고속 주행에서 self-stable 영역을 가질 수 있는 3SL 설계방향을 제시하고 이를 검증하였다.

서론에서 언급한 바와 같이 self-stable 영역에서 주행을 하게 되면 에너지 효율성이 높다. 즉, self-stable 영역에서 주행을 하게 되면 안정성을 유지하기 위한 외부의 제어 에너지 소모가 필요치 않으며, 또한 주행시 touch down에서부터 leg 압축량이 최대가 될 때까지 에너지 (leg의 탄성에너지)가 저장되며, 다시 leg 복원시 저장된 에너지를 재생하여 사용함으로써 이상적으로는 주행에 필요한 에너지 소모가 없게 된다. 따라서, 실제 주행에서는 에너지 손실분만을 외부 에너지로 보충하여 주면 된다. 이로써, self-stable 영역에서 주행을 하게 되면 에너지 효율성이 높다.

따라서 본 논문에서 제시한 저속 및 고속 주행에서 self-stable 영역을 가질 수 있는 3SL 설계방향에 따라 3SL을 설계하였을 때 3SL은 저속 및 고속주행에서 에너지 효율적 주행을 할 수 있다. 이는 현재의 다리식 이동 로봇 개발의 문제점 중 하나인 전원장치의 중량 및 지속가능시간의 제약 등에 유용한 기술로서 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

#### 부 록

그림 1의 질점(point mass) m에 대한 운동방정식은 다음과 같다<sup>2,3,5</sup>.

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F} + m\mathbf{g} \quad (\text{A1})$$

여기서  $\mathbf{r} = [x \ y]^T$ 이고  $\mathbf{F} = [F_x \ F_y]^T$  그리고  $\mathbf{g} = [0 \ -g]^T$ 이다. 그림 1(d)의 flight 구간에서는  $\mathbf{F} = [0 \ 0]^T$ 이다. 그림 1의 1,2,3SL에 대한 leg force vector  $\mathbf{F}$ 의 스칼라 값  $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ 는 다음과 같다.

$$F_1 = K(l_0 - l) \quad (\text{A2})$$

$$F_2 = \frac{lC(\phi_0 - \phi)}{l_1 l_2 \sin \phi} \quad (\text{A3})^{[2,3]}$$

$$F_3 = \frac{1}{2} \left( \frac{M_{12}}{h_1} - \frac{M_{23}}{h_3} \right) \quad (A4)^{[5]}$$

A4식에서  $M_{12}$ ,  $M_{23}$ ,  $h_1$ ,  $h_3$ 는 다음과 같다.

$$M_{12} = C_{12}(\phi_{12}^0 - \phi_{12})$$

$$M_{23} = -C_{23}(\phi_{23}^0 - \phi_{23})$$

$$h_1 = (l_1 l_2 \sin \phi_{12} - l_1 l_3 \sin(\phi_{12} - \phi_{23})) / l$$

$$h_3 = (l_2 l_3 \sin \phi_{23} + l_1 l_3 \sin(\phi_{12} - \phi_{23})) / l$$

그림 2의 stiffness 선도를 얻는 방법은 다음과 같다<sup>[3]</sup>.

$$K(\Delta l) = F(\Delta l) / \Delta l$$

여기서,  $\Delta l = (l_0 - l)$ 이고  $F(\Delta l)$ 은 leg 길이가  $\Delta l$ 만큼 변하였을 때 상응하는 힘이며, 1,2,3SL 각각의  $F_1(\Delta l)$ ,  $F_2(\Delta l)$ ,  $F_3(\Delta l)$ 를 대입하여 상응하는 1,2,3SL의 stiffness  $K(\Delta l)$ 를 얻는다. 변화된 leg 길이  $l$ 과 2SL의 변화된 관절 각도  $\phi$ 와의 관계식은 다음의 식 A5와 같으며, 3SL의 변화된 관절각도  $\phi_{12}$ ,  $\phi_{23}$ 와의 관계식은 다음의 식 A6와 같다.

$$l^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos \phi \quad (A5)$$

$$l^2 = l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 - 2l_1 l_2 \cos \phi_{12} - 2l_2 l_3 \cos \phi_{23} + 2l_1 l_3 \cos(\phi_{12} - \phi_{23}) \quad (A6)$$

A5식에서는 주어진  $l$ 에 대하여 2SL의  $\phi$ 는 유일하게 결정되지만, A6식에서는 주어진  $l$ 에 대하여 3SL의  $\phi_{12}$ ,  $\phi_{23}$ 는 미지수가 2개이므로 A6식만으로는 결정할 수 없다. 따라서, 식이 하나 더 필요로 하며 그 조건식은 다음과 같은 토크평형식<sup>[5]</sup>이다.

$$Q \equiv M_{12} h_3 + M_{23} h_1 = 0 \quad (A7)^{[5]}$$

이로서 주어진  $l$ 에 대하여 3SL의  $\phi_{12}$ ,  $\phi_{23}$ 를 A6, 7식을 이용하여 유일하게 결정할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, and M. Wisse, "Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers", *Science* 307, 1082 (2005)
- [2] J. Rummel and A. Seyfarth, "Stable Running with Segmented Legs", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.27, No8, pp.919-934, August, 2008.
- [3] J. Rummel, F. Iida, J. A. Smith and A. Seyfarth, "Enlarging Regions of Stable Running with Segmented Legs", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.367-372, 2008.
- [4] L. M. Day and B. C. Jayne, "Interspecific scaling of the morphology and posture of the limbs during the locomotion of cats (Felidae)", *The Journal of Experimental Biology* 210, pp. 642-654, 2007.
- [5] A. Seyfarth, M. Günther and R. Blickhan, "Stable operation of an elastic three-segment leg", *Biological Cybernetics*, Vol.84, No.5, pp.365-382, 2001.
- [6] R. Blickhan, A. Seyfarth, H. Geyer, S. Grimmer, H. Wagner and M. Günther, "Intelligence by mechanics", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol.365, No.1850, pp.199-220, 2007.
- [7] 권오석, 신동환, 김영식, 안진웅, "저속 및 고속 주행에서 안정영역을 갖는 3 segment leg 설계 연구", *한국정밀공학회 2010년도 추계학술대회논문집*, pp.203-204, 2010.



### 권 오 석

2001 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)  
2001~2005 LG생산기술원 주임연구원  
2005~현재 대구경북과학기술원 선임연구원

관심분야: 로봇 설계 및 제어



### 이 동 하

- 1985 경북대학교 전자공학과  
(공학사)
- 2001 경북대학교 전자공학과  
(공학석사)
- 2005 경북대학교 전자공학과  
(공학박사)

1987~2005 LG전자 연구실장

2005~현재 대구경북과학기술원 연구부장/책임연구  
구원

관심분야: CPS(Cyber Physical Systems), 영상 및 신  
호처리