

# 4족 로봇의 에너지 절약형 보행에 관한 연구

엄한성\* · 안병원\* · 배철오\* · 김현수\*

\*목포해양대학교

## A Study of Energy frugality style walk of Quadruped Walking Robot

Han-Sung Eom\* · Byong-Won Ahn\* · Cherl-o Bae\* · Hyun-soo Kim\*

\*Mokpo Maritime University

E-mail : mrehs@mmu.ac.kr

### 요 약

4족 보행로봇은 에너지원을 본체에 부착하고 다녀야 하기 때문에 산업용 로봇에서 크게 고려되지 않았던 에너지 효율이 중요한 문제로 부각되었고 이에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 현재까지 4족 보행로봇 에너지 효율에 관한 연구의 대부분은 수학적 모델링, 동역학적 해석 또는 시뮬레이션으로 주기(Period)당 에너지 소모량을 근거로 효율을 평가하였다. 실험적 결과에 의한 연구는 아직 부족하며 로봇은 단순히 한주기를 보행하는 것이 아니라 연속적으로 보행하는 것이기 때문에 한주기를 기준으로 효율을 평가하는 것은 적합하지 않을 수도 있다. 본 논문에서는 실험 로봇인 TITAN-VIII을 보폭이 0.1, 0.2, 0.3[m]일 때 주기를 1.0, 1.5, 2.0, 3.0[sec]로 변경하면서 12가지 경우에 대해서 2[m]를 Trot 보행 시키면서 에너지 소모량을 측정하고 실험적 결과를 근거로 에너지 효율관계를 분석하였다.

### ABSTRACT

Until present, most studies about energy efficiency of quadruped walking robot are mathematical modelings, dynamic analysis or simulation consumption energy per period by basic efficiency evaluate in this paper, a quadruped walking robot Titan-VIII is used for walking experience. The total moving length is about 2[m]. The stride length is 0.1, 0.2, 0.3, walking period is changed by 1.0, 1.5, 2.0, 3.0[sec] per each stride length. So consumption energy of 12 cases are measured. The energy efficiency of quadruped walking robot was analyzed by data that is saved by an experiment.

### 키워드

quadruped walking robot(4족 보행로봇), TITAN-VIII(로봇 모델명), energy efficiency(에너지 효율)

### 1. 서 론

무른 지형, 가파른 경사지 그리고 요철이 심한지형에 대해서 4개의 다리를 가진 동물들은 바퀴나 트랙이 달린 차량보다 훨씬 적은 에너지를 사용하여 움직인다. 또한, 그러한 극한환경에서 동물들의 기동성은 다른 차량에 비해 월등히 우수하다. 이러한 이유들로부터 동물과 같은 다리의 구조를 가진 관절구동 로봇에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 현재까지 개발되어 있는 관절구동 로봇은 대부분 하중운반 능력이 미약하며 보행속도가 느리고 많은 동력이 필요하며 제작비용이 비싼 문제점이 있다. 특히, 로봇은 에너지 공급원을 본체에 부착하고 다녀야하므로 공장 등에서 일정한 위치에 고정되어 상용 교류전원을 에너지원으로 사용하는

산업용 로봇에서 크게 고려되지 않았던 에너지 효율이 중요한 문제로 부각되었고 이에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 관절구동 로봇의 에너지 효율에 크게 영향을 미치는 것은 다리의 형상이며 여러 가지 조건이 고려되어야 한다<sup>[1]</sup>. 평지 보행시 다리의 발끝이 본체에 대해서 평행운동을 할 수 있어야 본체의 높이 변화로 인한 위치에너지 손실을 줄일 수 있고 필요한 액츄에이터(Actuator) 수를 줄임으로서 상당한 에너지 소모를 줄일 수 있으나 액츄에이터의 수를 줄이면 여러 지형조건 대해서 적응 능력이 떨어지는 단점이 있다. 관절구동 로봇의 다리에 사용되는 기구는 조인트(Joint)로 연결된 단순한 2개 또는 3개의 링크(Link), 4절(Joint), 6절의 직선기구가 많이 사용되고 있다. 기구가 결절이 되면 에너지 효율은 보행방법 즉, 본체의 높이, 보폭, 그

리고 보행속도에 따라 결정된다.

본 논문에서 보행실험에 사용된 관절구동 로봇 TITAN-VIII의 각 다리는 3자유도 총 12자유도를 가지고 있어 평지와 급한 경사면 등에 잘 적용할 수 있고, 하중 운반능력이 비교적 우수한 장점을 가지고 있으나, 12개의 액츄에이터를 동시에 구동해야 하고 본체 하중도 15[Kg] 이상으로 다른 4족 로봇보다 에너지 소모량이 큰 편이다. 그동안 보행 방법에 대한 연구 결과 정적보행(Static walking)은 안정성 면에서는 우수하나 보행속도가 느리기 때문에 많이 사용하지 않고 보행속도가 빠른 동적보행(Dynamic walking) 방법을 채택하고 있다<sup>2)</sup>. 동적보행 방법에는 Trot, Pace, Bound 보행방법이 제안되었으며, 1996년 TITAN-VIII 개발 이후의 연구 결과에 의하면 안정성과 에너지 효율 면에서 Trot 보행이 가장 적합한 보행방법임이 입증 되었다<sup>2,4)</sup>. 따라서, 본 논문에서는 Trot 보행에서 ZMP(Zero moment point)를 항상 지지관절 대각선상으로 이동시키는 보행방법을 채택하여 실험하였다.

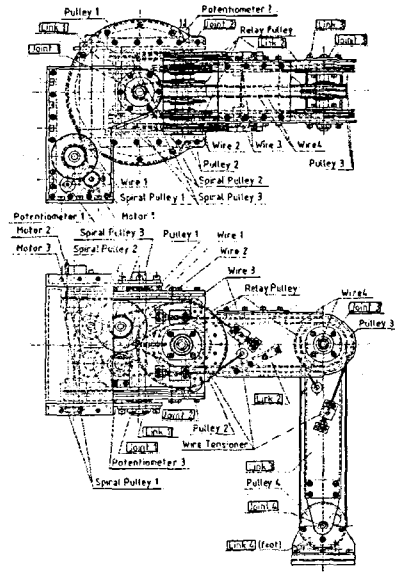
현재까지 발표된 4족 보행로봇의 에너지 효율에 관한 대부분의 연구는 수학적 모델링, 동역학적 해석 또는 시뮬레이션으로 주기(Period)당 소비에너지를 근거로 효율을 평가하였다<sup>2,5)</sup>. 실험적 결과에 의한 연구는 아직 부족하며 로봇은 단순히 한 주기를 보행하는 것이 아니라, 연속적으로 보행하는 것이기 때문에 한 주기를 기준으로 효율을 평가하는 것은 적합하지 않을 수도 있다.

본 논문에서는 2[m]의 보행거리에 대해서 여러 가지의 속도와 보폭을 조정하여 보행실험을 수행하고 이때 얻어진 결과 값을 근거로 주기당 에너지 효율과 전체 에너지 효율을 비교 분석하였다.

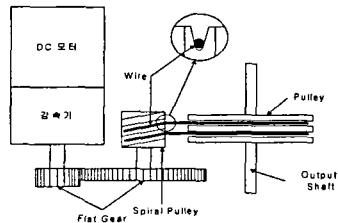
## II. 보행 장치

그림 1의 (a)와 같이 TITAN-VIII은 다리는 3자유도로 구성되어 로봇 전체는 12자유도를 가지고 있으며 Link1은 0.045[m], Link2는 0.155[m], Link3는 0.282[m]이다. (b)는 동력전달 장치를 나타낸 것으로 각각의 Joint는 DC 모터(정격전압 30[V], 정격전류 2.6[A], 전기자저항 1.7[Ω], 감속비 1:31.5, 정격회전수 500[rpm], 정격토크 7.8[kgcm])의 회전방향에 따라 1.2[mm]의 와이어(Wire)가 감기거나 풀림으로써 Link1, Link2, Link3의 위치가 변하고 이것으로 인해 관절각도가 조절된다.

그림 2는 모터 드라이브에 주어지는 위치지령 전압의 극성에 따른 관절의 회전방향을 나타낸 것이다. (a)는 위에서 내려다본 모습으로 M1(Motor 1) 모터에 가한 +, - 위치지령 전압에 따른 회전방향을 나타내고 있으며 (b)는 정면에서 본 모습으로 M2, M3 모터의 회전에 따른 관절이 움직이는 모습을 나타내고 있다. 앞다리와 뒷다리 사이의 간격은 0.4[m] 이고, 정면에서 본 폭이 0.6[m], M3에 의해서 동작하는 Link 3의 길이는 0.282[m]이다.

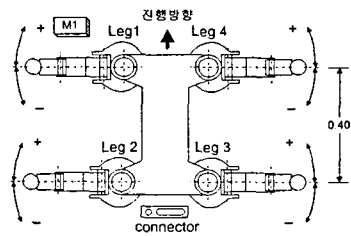


(a) 다리 구조

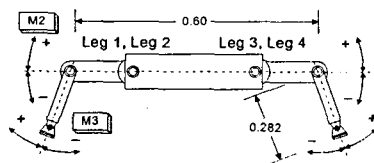


(b) 동력 전달장치

그림 1. TITAN-VIII의 다리 구조



(a) 위에서 본 모습



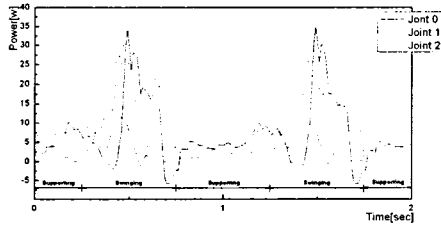
(b) 정면에서 본 모습

그림 2. TITAN-VIII의 관절 회전방향

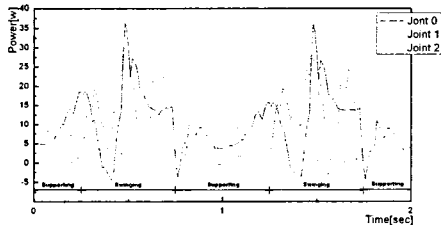
### III. 보행실험 및 결과

TITAN-VIII을 ZMP를 지지관절 대각선상으로 이동시키면서 이동속도가 일정하게 주기적으로 반복되는 주기 걸음새(Period gait)형태의 Trot보행 방법을 선정하여 보행실험을 수행하고, 에너지 소모량을 측정하여 그 결과를 분석하였다. 각 관절을 구동하는 DC 전동기에 가해지는 전압과 전류를 구해서 소비전력을 구하고 이것을 적분한 값을 10[ms]마다 A/D보드를 통해 컴퓨터로 입력받아서 데이터를 수집하였다.

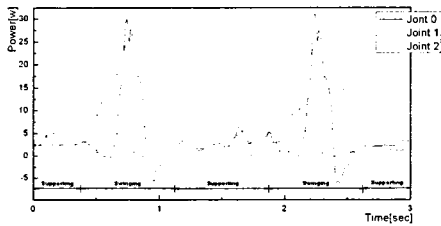
디듀티(Duty factor)은 0.5로 일정하게 하고 보폭이 0.1, 0.2, 0.3[m]일 때 주기를 1.0, 1.5, 2.0, 3.0[sec]로 변경하면서 12가지 경우에 대해서 2[m]를 보행하면서 에너지 소모량을 측정하였다.



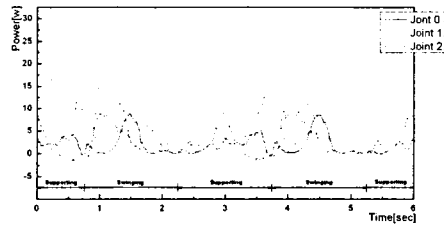
(a) 주기 1.0[sec], 보폭 0.2, 0.3[m]



(b) 주기 1.5[sec], 보폭 0.2, 0.3[m]



(c) 주기 2.0[sec], 보폭 0.2, 0.3[m]



(d) 주기 3.0[sec], 보폭 0.2, 0.3[m]

그림 3. TITAN-VIII의 보행 실험 결과

그림 3은 2[m]를 보행할 때 보행 중의 2주기 동안 에너지 소모량을 나타낸 것이다. 디듀티가 0.5이므로 한 주기에 대해서 로봇의 본체가 진전하는 Swinging 구간과 ZMP를 지지관절 대각선상으로 이동시키는 Supporting 구간이 서로 같다. Joint 0와 Joint 1은 Swinging 구간에서 에너지 소모량 변화가 심하게 나타나는데, 이것은 Swinging 구간에서 Joint 0와 Joint 1의 속도변화가 심하고 운동방향이 바뀌기 때문이다. Joint 2는 ZMP의 이동이 완료되는 Supporting 구간의 끝점에서 운동방향이 바뀌게 되는데, 이때 역시 에너지 소모량 변화가 가장 심하다. 주기가 짧아지거나 보폭이 길어지면 로봇 본체의 전진 속도가 빨라지게 되고 관절의 회전방향이 바뀌는 속도가 증가하는데 이때 에너지 소모량이 급속히 많아짐을 알 수 있다.

표 1. 보폭 0.1[m]에서 주기당 에너지 소모량

T [sec]	J0 [J]	J1 [J]	J2 [J]	Total [J]
1.0	4.13	10.25	3.71	18.09
1.5	2.65	9.34	4.35	16.35
2.0	2.62	8.39	5.72	16.74
3.0	5.42	12.48	9.65	27.57

표 2. 보폭 0.2[m]에서 주기당 에너지 소모량

T [sec]	J0 [J]	J1 [J]	J2 [J]	Total [J]
1.0	9.46	10.31	3.63	23.42
1.5	8.49	8.67	4.64	21.82
2.0	7.09	7.68	6.77	21.55
3.0	6.28	10.98	9.70	26.97

표 3. 보폭 0.3[m]에서 주기당 에너지 소모량

T [sec]	J0 [J]	J1 [J]	J2 [J]	Total [J]
1.0	12.88	10.30	3.70	26.90
1.5	12.06	8.45	5.83	26.35
2.0	11.81	7.52	8.29	27.62
3.0	10.67	10.05	13.06	33.79

표 4. 보폭 0.1[m]에서 전체 에너지 소모량

T [sec]	J0 [J]	J1 [J]	J2 [J]	Total [J]
1.0	82.68	205.01	74,223.71	361.92
1.5	53.03	186.87	87.15	327.06
2.0	52.53	167.90	114.49	334.93
3.0	108.492	249.79	193.15	551.44

표 5. 보폭 0.2[m]에서 전체 에너지 소모량

T [sec]	J0 [J]	J1 [J]	J2 [J]	Total [J]
1.0	94.69	103.18	36.37	234.25
1.5	84.96	86.75	46.49	218.21
2.0	70.90	76.87	67.74	215.52
3.0	62.88	109.84	97.01	269.73

표 6. 보폭 0.3[m]에서 전체 에너지 소모량

T [sec]	J0 [J]	J1 [J]	J2 [J]	Total [J]
1.0	85.96	68.73	24.74	179.44
1.5	80.45	56.37	38.93	175.76
2.0	78.81	50.15	55.29	184.27
3.0	71.20	67.06	87.17	225.43

표 1, 2, 3은 주기당 각 관절의 에너지 소모량을 나타낸 것으로 표에서 T는 주기, J0는 Joint 0, J1은 Joint 1, J2는 Joint 2를 의미한다. 보폭과 주기에 따라 각 관절에서 소모되는 에너지의 양이 서로 다를 수 있다. 같은 주기에서 보폭이 커지면 에너지 소모량이 많아지지만, 보폭이 일정할 때 주기가 길어진다고 해서 에너지 소모량이 비례적 관계로 커지지 않음을 알 수 있다. 즉, 주기 1.5[sec]일 때가 모든 보폭에 대해서 에너지 소모량이 제일 적다.

표 4, 5, 6은 2[m]를 보행 하는 동안 각 관절의 전체

에너지 소모량을 나타낸 것이다. 같은 주기에 대해서 보폭이 작을수록 에너지 소모량은 많아지고, 같은 보폭에서 주기와 에너지 소모량은 비례적 관계에 있지 않음을 알 수 있다. 주기 1.5[sec]와 2.0[sec]는 모든 보폭에 대해서 에너지 소모량이 적었으며, TITAN-VIII이 평지를 2[m] 보행할 때 본 논문의 12가지 실험조건 중에서 주기 1.5[sec], 보폭 0.3[m]일 때 에너지 효율이 제일 좋았다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 실험 로봇인 TITAN-VIII을 평지에서 보폭이 0.1, 0.2, 0.3[m]일 때 주기를 1.0, 1.5, 2.0, 3.0[sec]로 변경하면서 12가지 경우에 대해서 2[m]를 Trot 보행시키면서 에너지 소모량을 측정하고 실험적 결과를 근거로 에너지 효율관계를 분석하였다.

주기가 짧아지거나 보폭이 길어지면 관절의 회전방향이 바뀌는 속도가 빠르게 되며 이때 에너지 소모량 급속히 많아지는데 회전방향이 바뀔 때 적절한 속도 제어를 병행한다면 로봇의 에너지 효율을 많이 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

같은 주기에 대해서 보폭이 작을수록 전체 에너지 소모량은 많아지고, 같은 보폭에서 주기와 에너지 소모량은 비례적 관계에 있지 않음을 알 수 있었으며, 보행 실험조건 중에서 주기 1.5[sec], 보폭 0.3[m]일 때가 에너지 효율이 가장 좋았다. 실험 결과 TITAN-VIII이 평지를 보행할 때 에너지 효율을 고려한다면 주기를 1.5[sec]와 2.0[sec] 사이의 값으로 선택하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1]. S.M.Sonf, V.J.Vohnout "Computer Aided Design of a leg for An Energy Efficient Walking Machine", Mech & Machine Thy. Vol.19, pp.17-24, 1984.
- [2]. Hrioshi Kimura 外三人, "四足動物ロボットの力學的解析", 日本ロボット工學會誌, Vol.6, No.5, pp.367~379, 1988.
- [3]. Kan Yoneda 外三人, "4足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御", 日本ロボット工學會誌, Vol.19, No.3, pp.380~386, 2001.
- [4]. Shigeo Hirose 外二人, "4足歩行機械のスカイフックサスペンション制御", 日本ロボット工學會誌, Vol.12, No.7, pp.1066~1071, 1994.
- [5]. Ryo Kurazume 外二人, "4足歩行機械の3D揺動歩容", 日本ロボット工學會誌, Vol.19, No.5, pp.632~637, 2001.