

바퀴구동형 로봇 메커니즘의 등반능력 해석

Analysis on Climbing Capability of Wheel Drive Robotic Mechanisms

김병호

Byoung-Ho Kim

경성대학교 전기전자메카트로닉스공학부 생체모방제어 및 로봇연구실

Bio-mimetic Control & Robotics Lab., Div. of Electrical and Mechatronics Eng., Kyungshung Univ.,
Busan, 608-736, Korea

요 약

바퀴구동형 메커니즘은 다양한 서비스 로봇에 유용하게 활용되고 있다. 이러한 로봇을 위하여 가장 기본적인 면서 중요하게 요구되는 성능중의 하나는 경사진 도로를 어려움없이 주행할 수 있는 등반능력으로 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 바퀴구동형 로봇 메커니즘의 등반능력을 고려하고, 경사면을 원활하게 주행하기 위한 구동기의 사양을 결정하는데 유용한 필요조건을 제시하고자 한다. 결과적으로, 이러한 조건은 이동로봇 메커니즘의 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

키워드 : 바퀴구동형 로봇 메커니즘, 등반능력, 필요조건

Abstract

It is well-known that a kind of wheel drive mechanism is usefully employed in various service robots. One of the essential requirements for such robots is regarded as the capability of climbing that enables them to run on an inclined road smoothly. So, this paper considers the capability of climbing in a wheel drive robotic mechanism and proposes a necessary discriminating condition to determine the specification of a driving actuator which will be employed. Consequently, it is expected that the proposed discriminating condition can be applied to wheel drive robotic mechanisms in the design aspect.

Key words : Wheel drive robotic mechanism, Climbing capability, Necessary discriminating condition

1. Introduction

최근에 첨단산업의 발전과 더불어 위험지역에서의 탐사작업뿐만 아니라 의료분야 등 높은 정밀도를 요구하는 작업과 반복적인 산업공정의 효율성을 향상시키기 위하여 인간의 기능을 대신할 여러가지 유형의 이동로봇 메커니즘(mobile robotic mechanisms)이 개발되고 있다 [1]. 이러한 메커니즘을 위해서는 기본적인 메커니즘의 기구적 설계이외에도 모델링, 인식, 판단 및 제어 등 다양한 연구가 필요하다 [2]- [7]. 현재 다양하

게 연구되고 있는 기존의 이동로봇 메커니즘은 이동수단의 관점에서 크게 3가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫째, 두 개의 다리를 사용하여 주로 이동하는 휴먼로봇(human robots) [8]이나 여러 개의 다리 메커니즘을 이용하여 이동하는 필드 로봇(field robots)을 들 수 있다. 둘째, 바퀴로 이동하면서 가정이나 반도체 공장, 병원 및 회의장 등에서 일어나는 다양한 서비스를 제공하는 바퀴구동형 서비스 로봇(wheel drive service robots)이 있다 [9]. 셋째, 다리와 바퀴의 조합을 환경의 상황에 따라 적절히 이용하는 하이브리드형 이동로봇(hybrid

접수일자 : 2007년 7월 6일

완료일자 : 2008년 1월 5일

이 논문은 2008학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

mobile robot)이 있다 [10].

본 논문에서는 두 번째 경우에 해당하는 바퀴구동형 이동로봇 메커니즘에 관하여 고려하며, 주어진 이동 경로가 경사진 경우에도 원활하게 등반하기 위한 조건의 관점에서 문제를 다룬다. 예를 들어, 그림 1과 같은 전동 휠체어(electric-drive wheel chair) [3] [4] [11]는 다리가 불편하거나 직접적인 다리의 관절운동에 장애가 있는 사람의 이동을 도와 줄 수 있는 유용한 보조 시스템이기 때문에 인간의 복지향상 측면에서 많은 연구가 진행되고 있을 뿐만 아니라 다양하게 상품화되고 있는 실정이다 [11] [12]. 이러한 바퀴구동형 로봇 메커니즘을 구현하는데 있어서 가장 기본적이면서도 필요한 요구사항으로는 적절한 주행속도와 등반능력이 될 수 있다. 왜냐하면, 휠체어를 탄 사람이 비교적 안정되어 있는 평지뿐만 아니라 경사면을 적절한 속도를 유지하면서 자유롭게 이동할 수 있어야 하기 때문이다.



그림 1. 전동 휠 체어 [11]

Fig. 1. An electric-drive wheel chair [11]

따라서 본 논문에서는 바퀴구동형 로봇 메커니즘의 등반능력과 직접적으로 관련이 있는 구동모터의 필요 출력을 판별할 수 있는 방법에 대하여 제시하고자 한다. 이러한 조건은 이동로봇 메커니즘을 위한 구동모터의 적절한 선정에 있어서 유용하게 활용될 수 있다.

2. 바퀴구동형 로봇 메커니즘 모델링 및 문제정의

본 장에서는 일반적인 바퀴구동형 로봇 메커니즘의 기본적인 모델을 고려한다. 그림 2는 사람이 타고 있는 전동휠체어가 경사진 도로를 주행하고 있는 상황을 형상화하여 사람과 전동휠체어를 하나의 바퀴구동형 로봇 메커니즘으로 모델링한 것을 나타낸다. 이 로봇 메커니즘은 좌우 대칭인 구조를 갖는 전형적인 이동로봇으로서 큰 지름을 갖는 두 개의 후륜바퀴가 있고, 작은 지름을 갖는 두 개의 전륜바퀴가 있다. 여기서, 전륜은 단순히 로봇의 이동 방향만 조정하는 역할을 하고, 후륜구동에 의해 주행이 가능하다고 가정한다.

그림 2에 나타난 사람과 휠체어 시스템을 하나의 로봇 시스템으로 고려하고, 로봇의 전체질량이 질량중심에서 작용된다고 가정하면, 이 로봇은 다음과 같은 운동방정식에 의해 움직인다.

$$f_r = m_r \frac{dv_r}{dt} \quad (1)$$

여기서, f_r 은 로봇이 주행하도록 가해진 힘을 나타내고, v_r 은 로봇의 주행속도를 나타낸다. 로봇의 질량 m_r 은 사람의 질량(m_h)과 휠체어의 질량(m_w)의 합으로 결정된다.

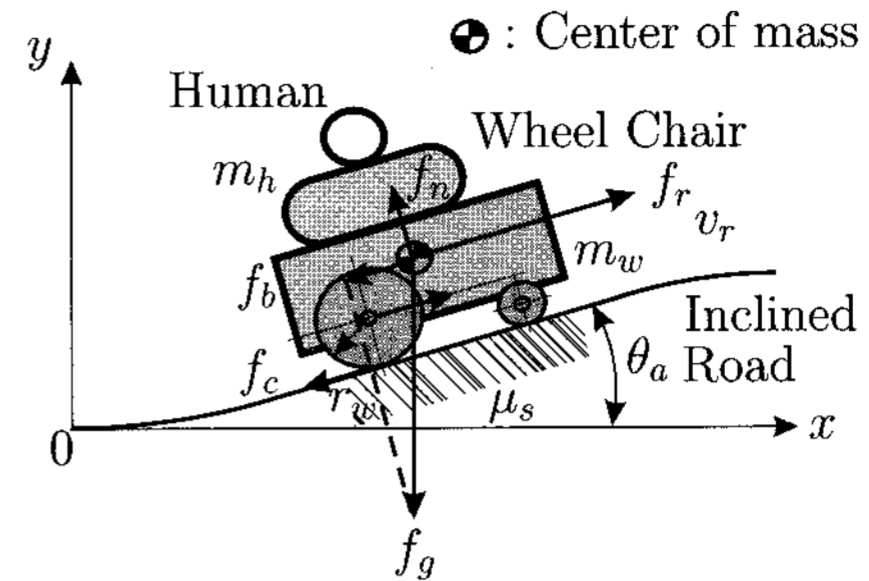


그림 2. 경사진 도로를 주행하는 바퀴구동형 로봇

Fig. 2. A wheel-drive robot climbing an inclined road

그림 2에 나타난 로봇은 사람(또는 물건)을 태우고, 평평하거나 경사진 면을 원활하게 이동하는 것이 주요 임무이다. 이러한 측면에서 이 로봇의 중요한 설계변수 중의 하나는 최대 등반할 수 있는 등반각이 될 수 있다. 궁극적으로 이러한 로봇이 평지뿐만 아니라 경사진 면을 원활하게 주행하기 위해서는 기본적으로 구동모터의 사양이 중요하고, 이를 면밀히 검토하여 선정할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 바퀴구동형 이동로봇이 주어진 도로면의 경사각 조건에 따라 원활하게 등반 및 주행하기 위하여 요구되는 구동모터의 사양을 결정하는데 초점을 맞춘다.

표 1. 바퀴구동형 로봇의 사양

Table 1. Specifications of the wheel drive robot

항목	파라미터	사양	단위
동력바퀴 반지름	r_w	0.15	m
동력전달 기어비	n	1/32.5	
휠체어 질량	m_w	60	kg
최대허용 질량	m_h	60	kg
최대 등반각	θ_a	15	degree
최대 주행속도	v_r	8	km/h
마찰계수	μ_s	0.6	

본 논문에서 해결하고자 하는 문제는 다음과 같다. 표 1과 같은 사양을 만족하기 위한 바퀴구동형 로봇에 적용할 구동모터의 출력(W) 및 정격회전수(rpm)를 등반능력의 관점에서 해석하고, 이를 결정할 수 있는 관계식을 구하라.

3. 등반능력을 위한 필요조건

바퀴구동형 이동로봇의 등반능력은 결국 구동바퀴에 사용된 구동모터의 출력에 직접적으로 관련이 있다. 따라서 이러한 로봇의 등반능력을 판단하기 위해서는 로봇이 주행해야 할 도로면의 경사각(또는 등반각)과

로봇시스템 구동을 위한 구동모터의 출력간의 관계를 파악하는 것이 매우 중요하다.

그림 2에서 로봇이 평평하거나 경사진 도로면을 주행할 경우, 일반적으로 다음과 같은 두 가지 조건을 고려할 필요가 있다.

1. 경사면에서 정지하기 위한 조건
2. 경사면에서 역주행 하지 않을 조건

즉, 1번 조건은 사람이 휠체어를 타고 가다가 잠시 경사면에 정지해야 할 경우를 고려하기 위한 조건을 나타내며, 2번 조건은 정지상태에 있거나 다시 주행할 경우에 있어서 적어도 후방으로 진행되지 않을 조건을 의미한다.

로봇이 경사면에서 정지하기 위해서는 다음과 같은 조건식을 만족하여야 한다.

$$f_r - f_b - f_c = 0 \quad (2)$$

$$f_n - f_g \cos\theta_a = 0 \quad (3)$$

여기서, f_r 는 로봇의 운동을 일으키는 주행력(necessary traveling force)을 나타내고, f_n 은 도로면에 의해 로봇이 받혀지는 힘의 법선성분(normal force)을 나타내며, $f_g (= m_r g, g$: 중력가속도)는 중력장에 의한 로봇의 힘 성분(gravity force)이다. 도로면의 경사각에 의해 로봇에 작용되는 힘 성분(backward traveling force) f_b 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_b = m_r g \sin\theta_a \quad (4)$$

또한, 바퀴와 도로면의 마찰력(frictional force) f_c 는 다음과 같이 결정된다.

$$f_c = \mu_s m_r g \cos\theta_a \quad (5)$$

여기서, μ_s 는 도로면의 마찰계수(frictional coefficient)를 나타내고, g 는 중력가속도(gravitational acceleration)를 나타낸다. 즉, 경사각이 커지면, 마찰력은 줄어들고, 로봇으로 하여금 경사면의 역방향으로 굴러내려가게 하는 힘은 점점 더 커지게 된다. 이것은 매우 자연스러운 현상이다.

결과적으로, 식 (2)~(4)로부터, 로봇이 경사면을 따라 적어도 역주행하지 않기 위해서는 다음과 같은 주행력 조건식이 만족되어야 함을 알 수 있다.

$$f_r \geq m_r g (\sin\theta_a + \mu_s \cos\theta_a) \quad (6)$$

다음은 식 (6)에 나타난 로봇의 주행력 f_r 을 발생시키기 위한 과정에 대하여 살펴본다. 여기서는 왼쪽과 오른쪽 동력바퀴는 대칭이며, 표 1에 제시된 기어비가 바퀴구동에 사용된 경우에 대하여 고려한다.

그림 3은 바퀴구동형 로봇을 위한 바퀴구동 메커니즘을 개념적으로 나타낸 것이다. 일반적으로, 구동 모터의 출력 P_m 은 다음과 같이 결정된다.

$$P_m = \tau_m \omega_m \quad (7)$$

여기서, ω_m 은 구동모터의 각속도를 나타내고, τ_m 은 모터의 구동토크를 나타낸다. 로봇 바퀴의 구동을 위하여 요구되는 모터의 구동토크는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_m = n r_w f_w \quad (8)$$

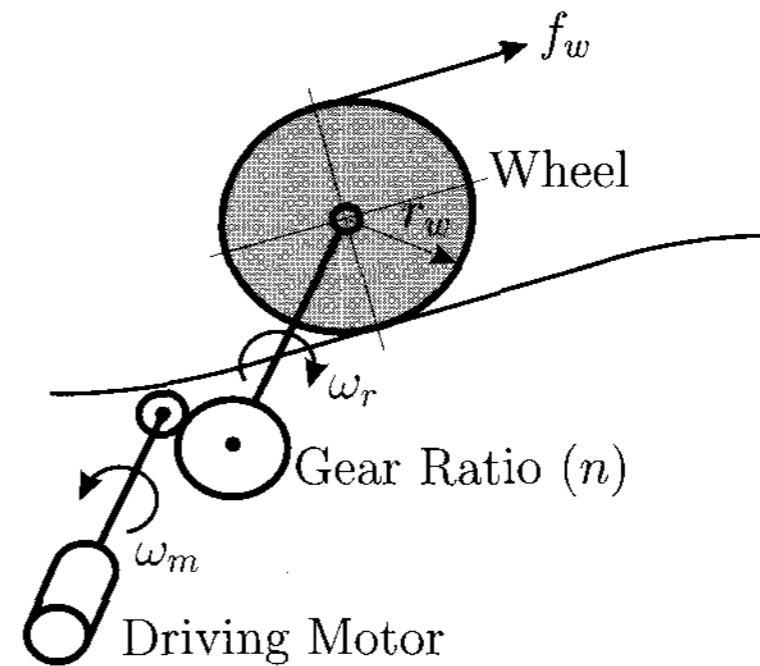


그림 3. 바퀴구동 메커니즘

Fig. 3. A wheel driving mechanism

또한, 그림 2와 그림 3에서 보는 바와 같이 로봇의 주행력은 다음과 같이 결정된다.

$$f_r = 2f_w \quad (9)$$

그리고 기어비에 의한 모터축과 바퀴간의 각속도 및 바퀴의 각속도와 선속도 관계식은 각각 다음과 같다.

$$\omega_r = n \omega_m \quad (10)$$

$$v_r = r_w \omega_r \quad (11)$$

여기서, ω_r 과 v_r 은 각각 로봇 바퀴의 각속도 및 선속도를 나타낸다.

그러면, 식 (7)과 식 (8)으로부터, 구동모터의 출력(P_m)에 의해 결정되는 로봇의 주행력(f_r)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_r = \frac{2}{r_w n \omega_m} P_m \quad (12)$$

결과적으로, 식 (12)를 (6)에 대입하여 재정리하면, 로봇이 경사면을 따라 적어도 역주행하지 않기 위하여 요구되는 구동모터의 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m \geq \frac{1}{2} m_r g r_w n (\sin\theta_a + \mu_s \cos\theta_a) \omega_m \quad (13)$$

또한, 식 (10)과 식 (11)을 사용하여 로봇의 주행속도(v_r)의 관점에서 식 (13)을 재정리하면, 구동모터의 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m \geq \frac{1}{2} (m_h + m_w) g (\sin\theta_a + \mu_s \cos\theta_a) v_r \quad (14)$$

그러므로, 식 (13)을 이용하면, 임의로 선정된 구동모터의 출력 $P_m(W)$ 과 정격회전수 $\omega_m(rpm)$ 에 따른 최대 등반가능각 $\theta_a(deg)$ 을 판단할 수 있다. 또한, 식

(14)에 의하면, 사람의 중량 m_h (kg)과 휠체어 시스템의 중량 m_w (kg), 그리고 로봇에게 요구된 주행속도 v_r (km/h)과 등반각 사양을 고려한 구동모터의 출력을 결정하는 것이 가능함을 알 수 있다. 따라서 식 (14)에 나타낸 조건식은 사람과 바퀴구동형 이동로봇의 몸체에 대한 물리적 사양뿐만 아니라 주행속도와 등반능력에 알맞은 구동모터의 출력을 효율적으로 결정하는데 유용하게 이용될 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

어떤 바퀴구동형 로봇이 경사진 도로를 주행할 경우에 있어서 등반각에 따라 요구되는 구동모터의 출력을 확인하는 관점에서 표 1에서 제시한 파라미터를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

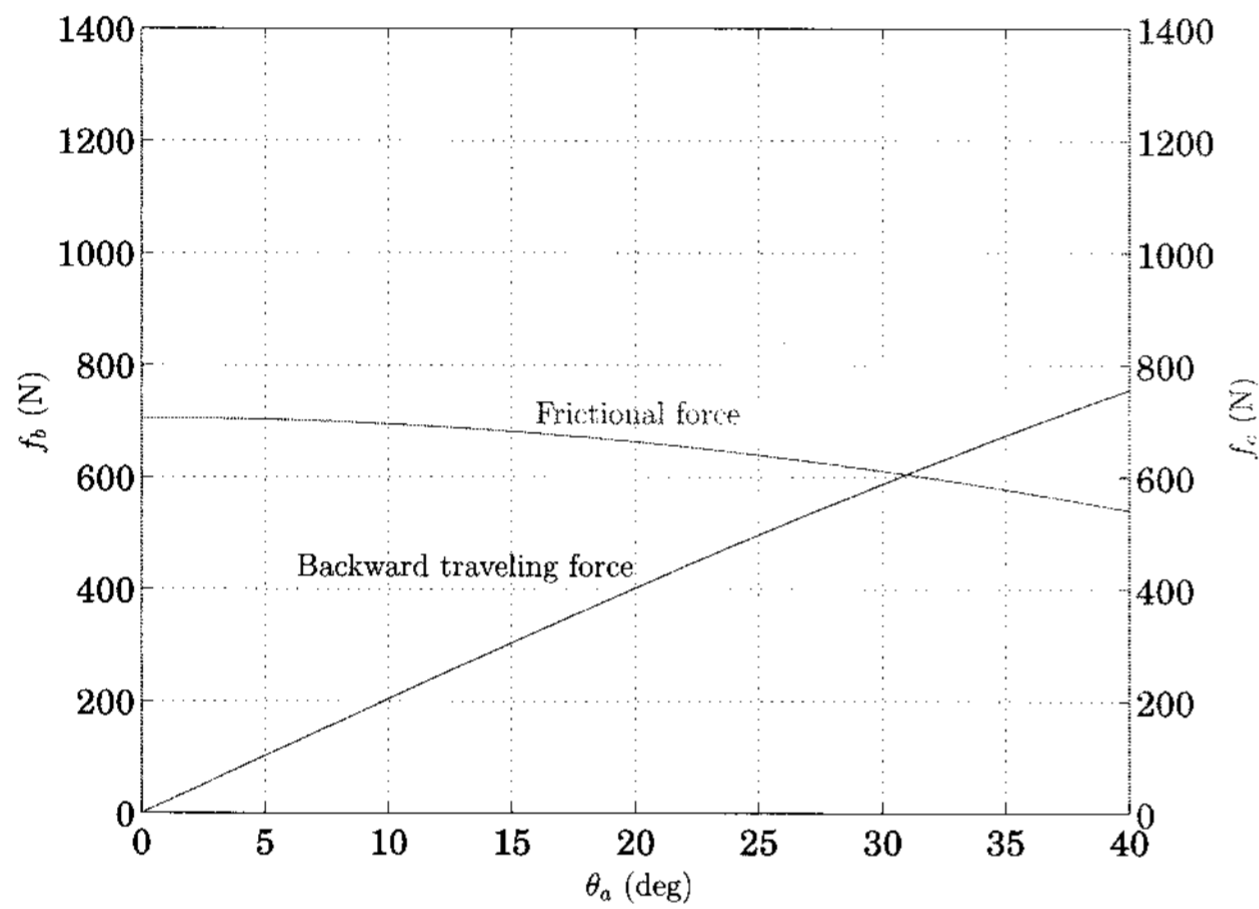


그림 4. 등반각에 따른 후진력과 마찰력

Fig. 4. Backward traveling force (f_b) and frictional force (f_c) according to climbing angle (θ_a)

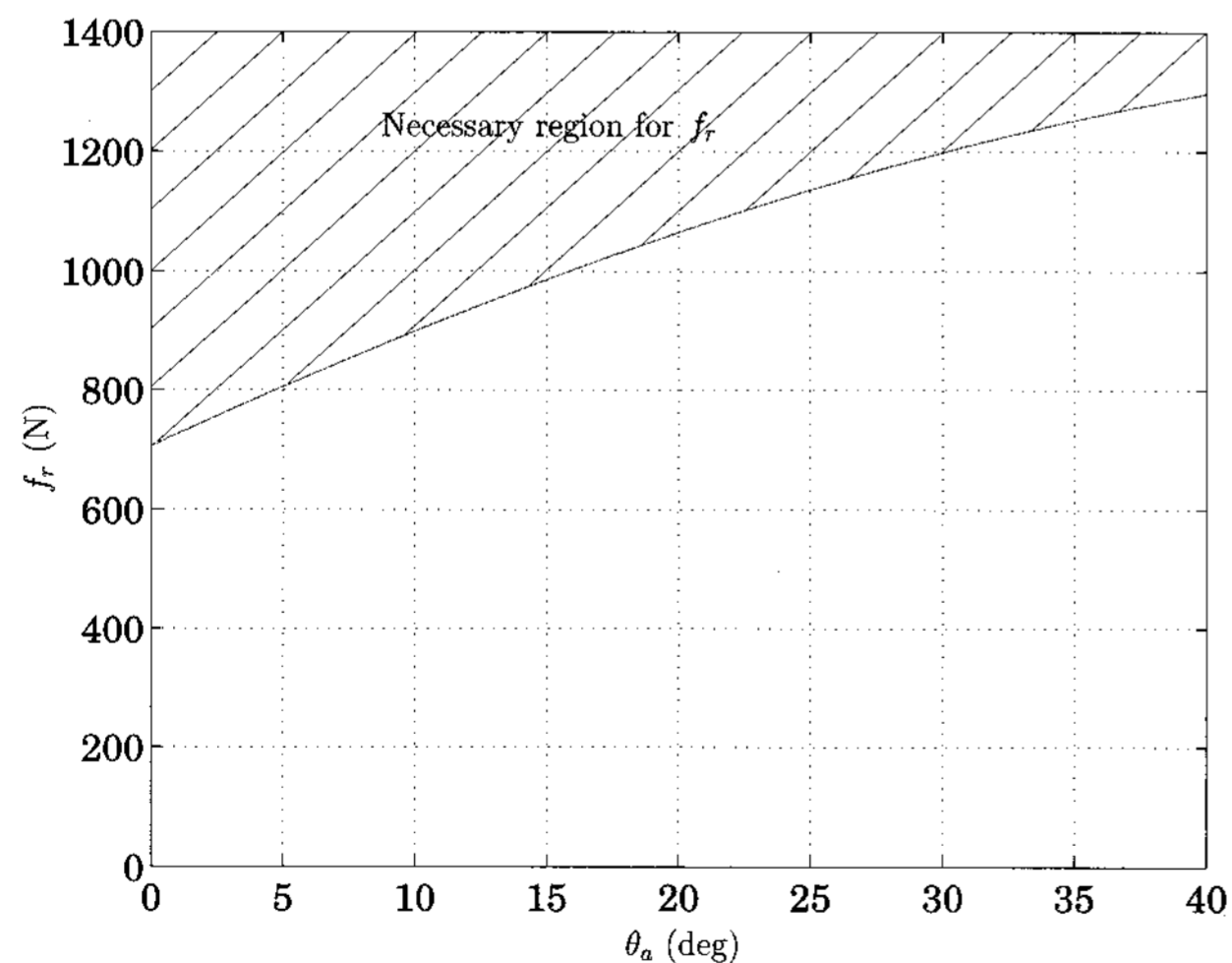


그림 5. 로봇 구동을 위한 주행력

Fig. 5. Necessary traveling force of the wheel drive robot

그림 4는 등반각에 따라 로봇이 받게 되는 후진력과 바퀴와의 접촉면에서 발생하는 마찰력의 추이를 나타

내며, 그림 5는 경사면에서 로봇이 적어도 역주행하지 않을 주행력을 나타낸다. 즉, 그림 4에서는 등반각에 따라 로봇이 받게 되는 후진력과 마찰력의 패턴을 확인할 수 있고, 그림 5에서는 경사면에서 로봇이 주행하기 위하여 요구되는 주행력의 영역(necessary region, 빗금친 부분)을 파악할 수 있다.

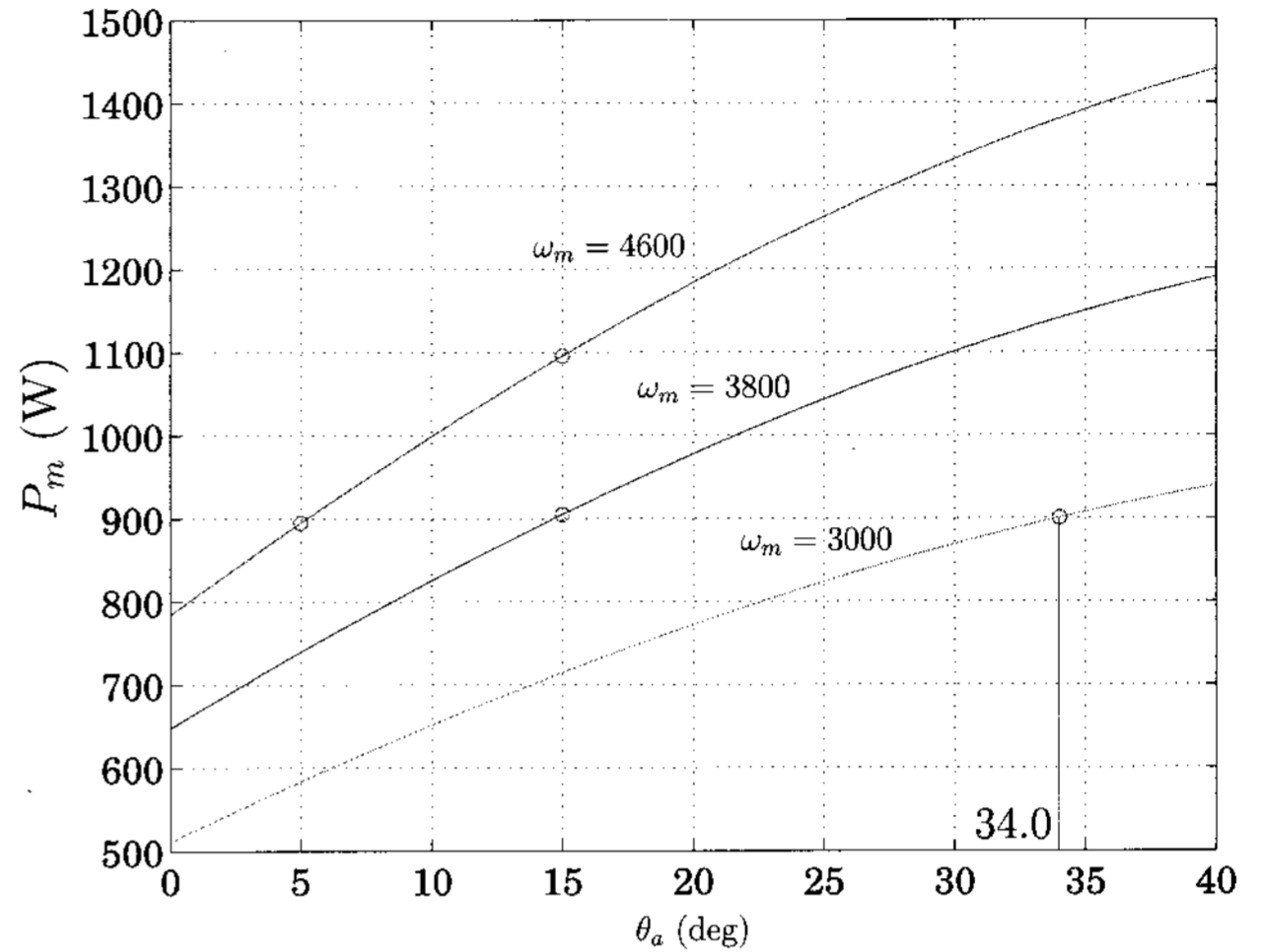


그림 6. 등반각에 따른 구동모터의 출력

Fig. 6. Output power of driving motor according to climbing angle

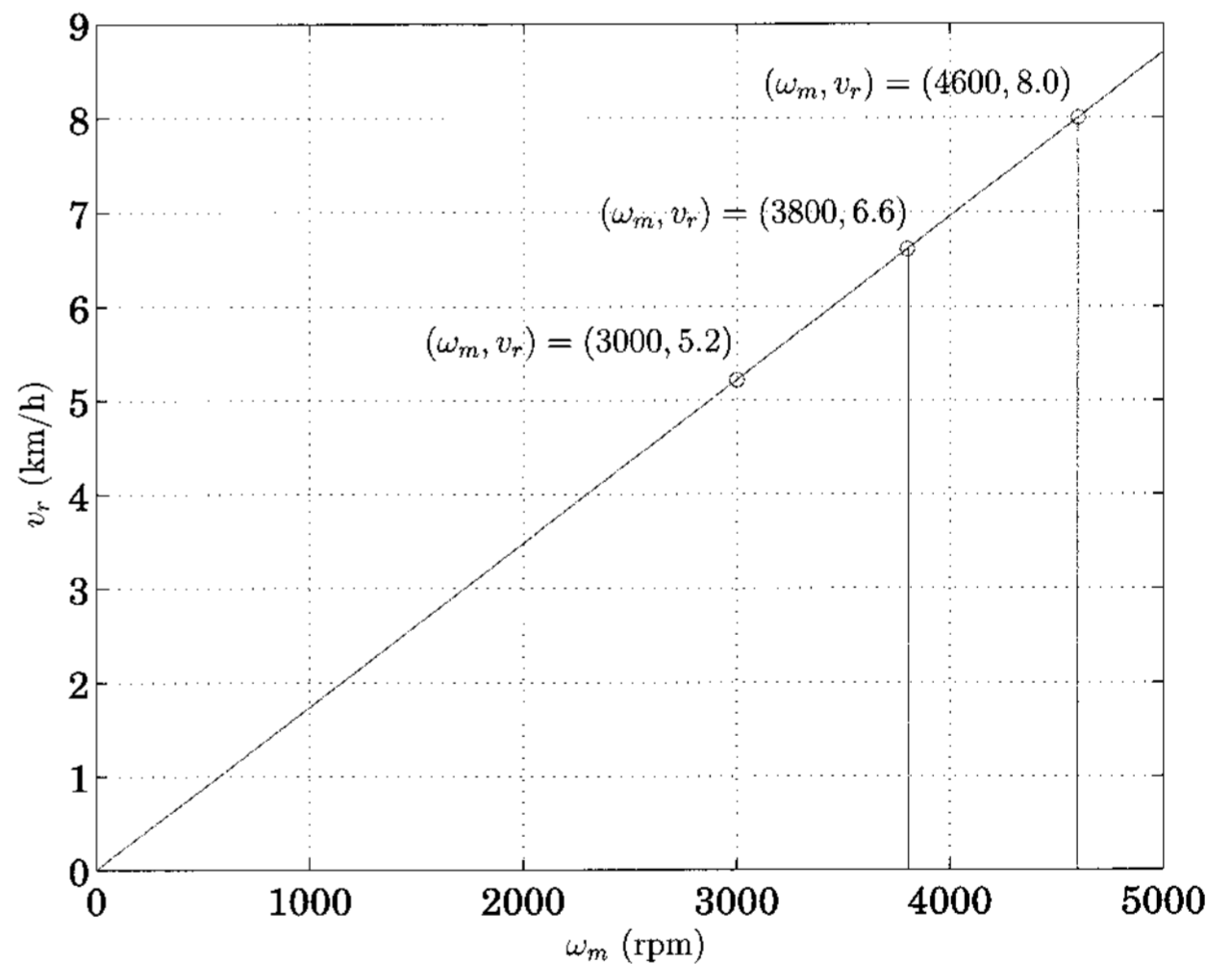


그림 7. 구동모터 및 로봇의 속도

Fig. 7. Driving motor velocity vs robot speed

그림 6은 등반각 및 구동모터의 회전수에 따라 요구되는 구동모터의 출력을 나타내며, 그림 5에 나타낸 로봇의 주행력 조건을 만족한다. 예를 들어, 구동모터의 출력이 900(W)인 모터를 선정할 경우, 정격회전수가 4600(rpm), 3800(W), 3000(W)이면, 각각 최대 5(deg), 15(deg), 34(deg)의 경사면을 등반할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 구동모터의 회전속도와 로봇의 주행속도의 관계는 그림 7에 나타내었다. 즉, 구동모터의 정격회

전수가 3000(rpm)이면, 로봇의 주행속도는 5.2(km/h)가 되고, 구동모터의 정격회전수를 4600(W)으로 증가시키면, 로봇은 8(km/h)의 속도로 주행할 수 있게 됨을 알 수 있다.

한편, 그림 8에서 보는 바와 같이, 구동모터의 출력을 1100(W)로 선정한 경우, 기본적으로 평지에서는 약 11(km/h)의 속도로 주행이 가능하고, 15(deg) 기울어진 도로를 주행할 경우에 있어서 로봇의 주행속도는 8(km/h), 그리고 등반각이 30(deg)가 되면, 약 6.6(km/h)의 속도로 주행이 가능하다. 결국, 모터의 출력이 정해진 상태에서 로봇이 더 큰 경사면을 어려움 없이 등반하기 위해서는 주행속도를 줄여야 함을 확인할 수 있다. 이것은 물리적으로 쉽게 경험할 수 있는 자연스러운 결과이다.

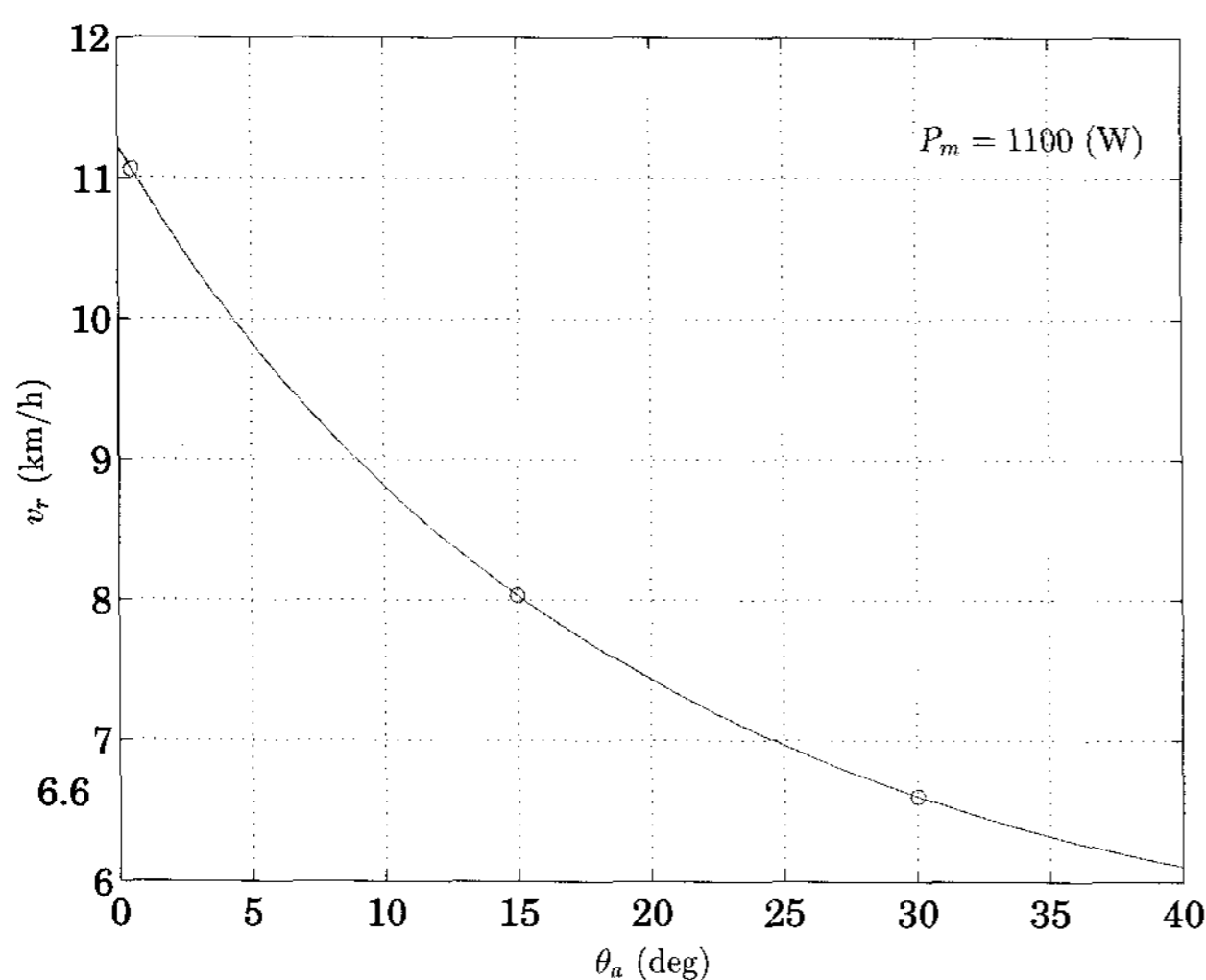


그림 8. 등반각에 따른 로봇의 속도 ($P_m=1100(W)$)

Fig. 8. Robot speed according to climbing angle when $P_m=1100(W)$.

결과적으로, 그림 6과 그림 7을 종합하면, 표 1에서 제시한 로봇의 최대 주행속도가 8(km/h)이므로, 이 조건을 만족시키기 위하여 채용될 구동모터의 정격회전수는 적어도 4600(rpm)이 되어야 한다. 이 경우, 최대 15도 각도의 경사면을 등반하기 위해서는 1100(W) 이상의 모터출력이 요구됨을 그림 6으로부터 알 수 있다. 따라서 식 (13)과 식 (14)에 나타난 조건식은 사람을 태운 바퀴구동형 이동로봇의 주행속도와 등반능력에 알맞은 구동모터의 사양을 판단하는데 유용하게 활용될 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 사람이 타고 이동하는데 사용되고 있는 전동휠체어 메커니즘을 하나의 바퀴구동형 이동로봇 메커니즘으로 모델링하고, 이 로봇이 평지나 경사진 면을 주행하는데 있어서 요구되는 구동모터의 출력을 등반능력의 관점에서 결정할 수 있는 필요조건식을 제시하였다. 이러한 조건식을 이용하면, 이동로봇 시스

템의 중량과 추가적으로 더해지는 사람의 중량문제를 적절히 반영할 수 있을 뿐만 아니라, 사전에 정해진 로봇 시스템의 설계사양에 따라 결정되어야 할 로봇의 주행속도와 등반각 조건을 만족시키기 위한 구동모터의 출력을 용이하게 결정할 수 있다. 따라서 이러한 연구 결과는 상용화되고 있는 전동휠체어 메커니즘 [11] 뿐만 아니라 다양한 유형의 바퀴구동형 이동로봇 메커니즘의 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

- [1] E. T. Baumgartner, R. G. Bonitz, J. P. Melko, L. R. Shiraishi, P. C. Leger, A. Trebi-Ollennu, "Mobile manipulation for the Mars exploration rover - a dexterous and robust instrument positioning system," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 27-36, June 2006.
- [2] D. Wettergreen, J. Teza, and B. Staszal, "Robotic astrobiology in the Atacama desert," *Video Proc.(220005.wmv) of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2006.
- [3] J. Minguez, L. Montesano, and L. Montano, "Autonomous motion generation for robotic wheelchair," *Video Proc. (220013.wmv) of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2006.
- [4] R. Morales, V. Feliu, A. Gonzalez, and P. Pintado, "Coordinated motion of a new staircase climbing wheelchair with increased passenger comfort," *Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3995-4001, 2006.
- [5] K. Ioi, H. Igurashi, and A. Muramami, "Design of a gravitational wheeled type robot," *Proc. of the 32nd Int. Symposium on Robotics*, pp. 175-179, 2001.
- [6] A. Salerno and J. Angeles, "The control of semi-autonomous two-wheeled robots undergoing large payload-variations," *Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1740-1745, 2004.
- [7] K. Pathak, J. Franch, and S. K. Agrawal, "Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization," *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 21, no. 3, pp. 505-513, 2005.
- [8] Y. Ogura, H. Akikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H.-O. Lim, and A. Takanishi, "Development of a new humanoid robot WABIAN-2," *Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 76-81, 2006.

- [9] Y. Hada, K. Takese, H. Gakuhari, and E. I. Hemel-dan, "Delivery service robot using distributed acquisition, actuators and intelligence," *Proc. of the 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2997-3002, 2004.
- [10] S. Nakajima, E. Nakano, and T. Takahashi, "Motion control technique for practical use of a leg-wheel robot on unknown outdoor rough terrains," *Proc. of the 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1353-1358, 2004.
- [11] <http://www.daese.com/>, Daese M. Care, Ltd., Korea.
- [12] <http://www.korec.re.kr/>, Korea Orthopedics & Rehabilitation Engineering Center, Korea.

저 자 소 개



김병호(Byoung-Ho Kim)

1989년 : 금오공과대학교 전자공학과
(공학사)

1994년 : 동 대학원(공학석사)

2001년 : 한양대 전자공학과
(공학박사)

1995년~2001년 : 한국과학기술연구원 지
능로봇연구센터 학생연구원

2002년~2004년 : Ritsumeikan대학(일본) 로봇공학과 JSPS
Post-Doctoral Fellow

2004년~2005년 : RIKEN 생체모방연구센터(일본) 연구원

2005년~현 재 : 경성대학교 전기전자메카트로닉스공학부
메카트로닉스공학전공 조교수

2006년, 2007년 : 한국퍼지 및 지능시스템학회 국제이사.

관심분야 : humanoid robots, biomimetic mechanism
modeling and control, multifingered robot/ar-
tificial hands and multiple arm control, mac-
ro/micro mechanism and intelligent control,
and neural network applications.

Phone : 051-620-4692

Fax : 051-624-5980

E-mail : kimbh@ks.ac.kr

Homepage : <http://www.ks.ac.kr/~kimbh/>