

2 단 접이식 산업용 자동문의 동역학적 메카니즘 해석

Dynamical Mechanism Analysis of An Industrial Two-step Folding Automatic Door

윤성호^{1,✉}

Seong-Ho Yun^{1,✉}

1 금오공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

✉ Corresponding author: shyun@kumoh.ac.kr, Tel: 054-478-7324

Manuscript received: 2010.11.16 / Revised: 2011.4.26 / Accepted: 2011.4.26

This paper deals with an analysis of dynamic mechanism for the industrial two-step folding automatic door. A nonlinear equation of motion was derived in terms of folding angle to estimate driving forces. Based on this dynamic behavior, time taken during the door's opening well as their velocities were controlled so that the operating conditions can be obtained for the purpose of design. The stiffness of twisting spring was also investigated when the automatic door closed, because a dangerous accident takes place from the door's free falling. The current research will be a very useful tool in the near future for the dynamic analysis for the multi-step folding automatic door.

Key Words: Automatic Door (자동문), Two-step Folding Type (2 단 접이식)

1. 서론

현재 산업용 대형 2 단 접이식(two-step folding type) 자동문은 자재 및 제품을 지게차나 트럭 같은 운반기기들이 자유롭게 출입할 수 있도록 철강, 자동차, 조선, 플랜트, 물류 창고, 항공기 격납고 등의 업계에서 광범위하게 사용되고 있다. 이 대형문은 중량이 커서 개폐 작동시 동작이 불안정하기 때문에 이에 대한 대책을 강구 하기 위하여 많은 노력을 기울여 설계하여 왔다.

자동문의 자중에 의한 동작성과는 별도로 환경적인 요인으로서 풍압에 의하여 구조물이 변형될 수 있다. 제조시설에 안개와 우천시에 철강 등이 부식될 우려가 있어 방습과 항온을 유지하기 위하여 에너지 비용이 과다하게 지출되는 애로점이 있기도 하다. 하지만 물류 이동 산업의 활성화로 대형 자동문의 수요는 날로 증가하고 있으나 그 기술 수준은 아직도 초보단계에 있어 기술개발

이 미흡한 상태에 있다.¹ 또한 다단으로 절첩되어 승강하는 다단 접이식(multi-step folding type) 광폭의 자동문 경우도 2 단 접이식 자동문의 메카니즘 규명 없이는 동역학적인 해석을 수행할 수 없는 상태이다.

대형 자동문의 작동 방법은 구동모터의 회전 동력이 상부 판넬에 전달되어 그 회전방향으로 개폐가 시작하고 하부 판넬은 안내 궤도를 따라 상하측 방향으로 이동하도록 되어 있다. 또 다른 방법은 하부 판넬에 장력이 상하측 방향으로 전달되어 상부 판넬이 안내 궤도를 따라 개폐되도록 되어 있다. 특히 하강시에는 자중에 의한 갑작스러운 판넬의 자유낙하를 방지하기 위하여 비틀림 스프링의 복원력을 사용하기도 한다.^{2,3} 하지만 지금까지 자동문의 메카니즘을 이해하고자 역학적으로 접근한 연구는 거의 발견할 수 없으며 본 논문에서는 자동문의 동역학적 해석에 초점을 두고자 한다.

2. 구동 메커니즘

2.1 기하학적 해석

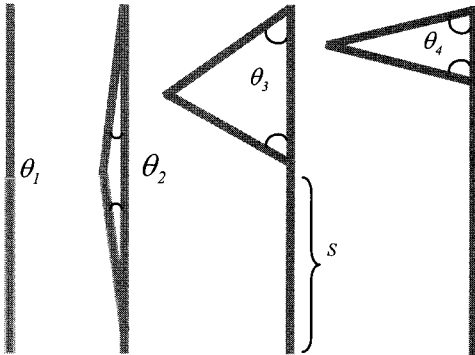


Fig. 1 Configurations of the opening process for a folding door

그림 1 은 상부 및 하부 판넬로 이루어진 접이식 자동문이 열리는 과정을 단계별로 나타내고 있다. 판넬 한 개의 크기는 길이를 l , 폭을 w , 두께를 b 라고 하자. 상하부 판넬이 가이드 레일과 이루는 접이각(folding angle)을 θ 라고 하면 문이 열릴 때 $\theta = 0 \rightarrow \pi/2$ 로 변화한다. 하부 판넬의 끝단으로부터 이동한 거리 s 는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$s = 2l(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

식 (1)을 시간 t 에 대하여 연속적으로 미분을 하면 상승할 때의 속도 v 와 가속도 a 는 각각 식 (2)와 (3)으로 주어진다.

$$v = 2l\dot{\theta} \sin\theta \quad (2)$$

$$a = 2l\ddot{\theta} \sin\theta + 2l\dot{\theta}^2 \cos\theta \quad (3)$$

여기서 $(\dot{\bullet})$ 는 시간 t 에 관한 미분이다. 즉, 접이각도 $\theta = \omega t$ 이며 접이속도(folding velocity) $\omega = \dot{\theta}$ 이다. 만일 자동문이 열리는 각도를 $\theta = 0^\circ \sim \alpha^\circ$ 이고 n 초 동안 작동하고 상하부 판넬이 절첩되어 상승하는 접이회전속도(folding rotational velocity) $\omega = \alpha\pi / 180n \text{ rad/s}$ 가 일정하다고 가정하자. 일례로서 그림 2 는 상하부 각 판넬의 길이가 $l = 4m$ 이고 6 초 동안 자동문이 완전히 상승할 때에 이

동거리, 속도, 가속도를 나타내고 있다. 이러한 기구학적 물리량의 궤적을 만족할 수 있는 메커니즘을 상용 프로그램인 아담스(Adams)에서 확인하였다.⁴ 이를 구현할 수 있는 알맞은 구동력을 찾아내야 된다.

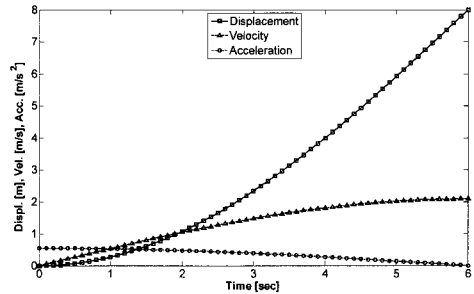


Fig. 2 A kinematic behavior of the opening process for a folding door

2.2 동역학적 해석

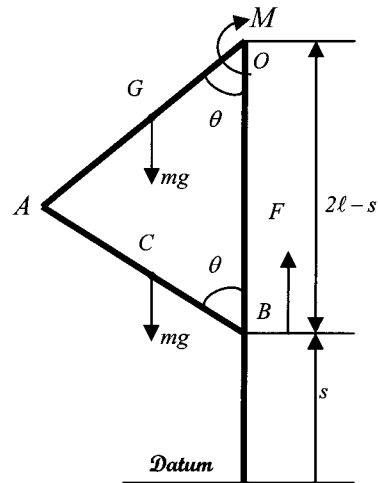


Fig. 3 A free body diagram of the opening process for a folding door

그림 3 은 자동문이 상승시 임의의 시간에서 개폐되는 순간을 측면에서 표현한 자유물체도이다. OA는 상부 판넬이고 AB는 하부 판넬을 나타낸다. G와 C는 상하부 판넬의 무게 중심을 각각 나타낸다. 하부 판넬의 밑면을 기준으로 각 판넬의 위치에너지 V_{AB} 와 V_{OA} 를 구하면 다음 식 (4a)와 (4b)로 표현된다.

$$V_{AB} = \frac{3}{2}mg\ell(1 - \cos\theta) \quad (4a)$$

$$V_{OA} = \frac{1}{2}mg\ell(1 - \cos\theta) \quad (4b)$$

여기서 상하부 판넬 각각의 질량은 m 이다. 또한 각 판넬의 운동에너지 T_{AB} 와 T_{OA} 를 구하면 다음 식 (5)와 (6)과 같다.

$$T_{AB} = \frac{1}{2}I_C\omega^2 + \frac{1}{2}mv_C^2 \quad (5)$$

$$T_{OA} = \frac{1}{2}I_O\omega^2 + \frac{1}{2}mv_G^2 \quad (6)$$

여기서 질량 관성모멘트는 하부 판넬의 질량중심 C 에 대하여 I_C 와 상부 판넬의 지점 O 에 대하여 I_O 를 다음 식 (7)과 (8)로 표현될 수 있다.

$$I_C = \frac{1}{12}m(b^2 + \ell^2) \quad (7)$$

$$I_O = \frac{1}{12}mb^2 + \frac{1}{3}m\ell^2 \quad (8)$$

그림 3 에서 접이각속도 ω 가 일정하고 가이드 레일을 수직운동하는 OB 구간에서 속도 $v_B = v$ 라면 접이각의 끝단 A 점에서 속도 $v_A = v/2$ 이다. 하부 판넬의 v_A 와 v_B 에서, 상부 판넬의 v_A 와 $v_O = 0$ 에서 수직성분 속도가 선형으로 변하며 속도 v 관계는 운동 기구학적으로 식 (9)가 성립한다.

$$2v_A = v_B = \frac{4}{3}v_C = 4v_G = v \quad (9)$$

가이드 레일을 움직이는 속도 식 (2)를 상기의 식 (9)에 대입하고, 각 v_A, v_B, v_C 를 구한 다음에 식 (5)와 (6)에 대입하여 운동에너지 T_{AB} 와

T_{OA} 를 산출할 수 있다. 이에 따른 전체 위치에너지 V 와 전체 운동에너지 T 를 정리하면 다음 식과 같다.^{5,6}

$$V = 2mg\ell(1 - \cos\theta) \quad (10)$$

$$T = \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 \sin^2\theta \quad (11)$$

여기서 상기의 식 (11)의 극관성 모멘트 I 는 다음과 같이 표현된다.

$$I = I_C + I_O + \frac{5}{2}m\ell^2 \quad (12)$$

먼저 자동문을 개폐시 상부 판넬의 지점 O 에 모터의 출력축으로 회전모멘트 M 을 가하여 하부 판넬을 들어올리는 경우, 접이각 θ 만큼을 회전시킨다고 생각해 보기로 한다. 가상일 W_M 에 대한 변분 δ 을 구하면 회전 모멘트에 대한 비보존력은 다음과 같이 구해진다.

$$\delta W_M = \delta \int_0^\theta M d\theta = M\delta\theta \quad (13)$$

에너지 식 (10)과 (11)에 오일러-라그랑지 식을 이용하여 운동방정식을 구하면 다음 식과 같다.

$$I\ddot{\theta} \sin^2\theta = M - \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 \sin 2\theta - 2mg\ell \sin\theta \quad (14)$$

다른 방법으로서 하부 판넬의 지점 B 에서 윗 방향으로 장력 F 로 잡아 당길 때 가상일 $W_F = Fy$ 에 대한 변분 δ 을 식 (1)에 적용하여 구하면 다음과 같다.

$$\delta W_F = \delta \int_0^y F ds = F\delta s = 2F\ell \sin\theta \delta\theta \quad (15)$$

이에 따른 운동방정식을 구하면 다음 식과 같다.

$$I\ddot{\theta} \sin^2 \theta = 2\ell(F - mg)\sin\theta - \frac{I}{2}\dot{\theta}^2 \sin 2\theta \quad (16)$$

자동문이 하강할 때 자중에 의하여 급격하게 하강하는 현상을 관찰하기 위하여 모터에 어떠한 구동력도 작용하지 않는 상태인 $M = F = 0$ 을 고려하면 안내레일상에서 기하학적인 정보를 그림 4 와 같이 구할 수 있다. 그래프에서 관찰하는 바와 같이 하강 시간은 1.1 초만 소요된다. 하강 종료시 약 $100m/s^2$ 의 가속도가 발생하여 안내레일의 구조물에 과도한 충격력이 작용할 수 있음은 물론, 작동시 안전상에도 심각한 위험을 초래할 수 있다.

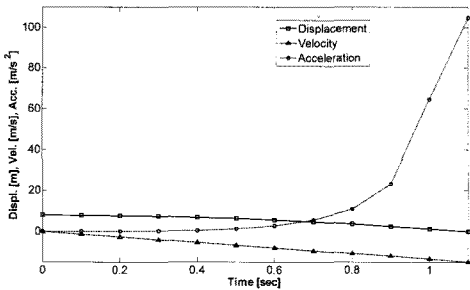


Fig. 4 A kinematic behavior of the closing process at free fall of the folding door

이러한 갑작스런 낙하를 방지하기 위하여 그림 1 에서 지점 O 에 비틀림 스프링을 설치하여 탄성 복원력을 이용하여 하강속도를 저하시킬 수 있다. 이에 따른 비틀림 탄성에너지 K 는 다음과 같다.

$$K = \frac{1}{2}k_t\phi^2 \quad (17a)$$

$$\phi = \sqrt{3\theta} \quad (17b)$$

여기서 k_t 는 비틀림 스프링 상수, ϕ 는 비틀림 스프링이 감겨 있는 봉의 회전각도이고 접이각 θ 와의 관계를 식 (17b)로 가정하였다. 자동문에 비틀림 스프링이 장착되어 있는 상태에서 모멘트 M 과 직선력 F 가 동시에 작용한다면 운동방정식은 다음과 같다.

$$I\ddot{\theta} \sin^2 \theta = M + 2\ell(F - mg)\sin\theta - \frac{I}{2}\dot{\theta}^2 \sin 2\theta - 3k_t\theta \quad (18)$$

상기에서 구동력의 종류와 관계없이 운동방정식 (14), (16)과 (18)은 접이각 θ 에 대하여 비선형성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3. 수치해석

수치해석의 예로서 상하 판넬 각각의 질량 $m = 500kg$ 이고 높이 $\ell = 4m$ 이며, 두께 $b = 0.1m$ 이다. 자동문이 상승한다고 가정하고 안내레일에서 시간에 따른 상승거리를 그림 5 에 나타냈다. 운동방정식 (16)에서 접이각 θ 와 접이회전속도 $\dot{\theta}$ 을 구한 다음에 식 (1)~(3)에 대입하여 이동거리, 속도와 가속도를 그림 5~7 처럼 구할 수 있다. 자동문에 여러가지 상승력 F 를 작용시켜 열 때 이동거리를 그림 5 에 나타냈다.

그림 1 에서 지정한 바와 같이 6 초 동안 8m 를 상승시킬 수 있는 구동력을 탐색해야 되는데 이 구동력이 5,067N 임을 알 수 있다. 이 보다 작은 5,000N 의 구동력이 작용하면 약 5m 만 상승하고, 더 큰 상승력 5,300~5,500N 이 작용하면 8m 를 상승시키는데 약 3~3.5 초가 걸림을 알 수 있다. 이에 따른 상승속도와 가속도의 완급을 그림 6 과 7 에서 각각 관찰할 수 있다. 6 초 동안 정상적으로 거동하는 속도의 변화는 그림 2 의 기하학적인 해석에서 거의 비선형적으로 변화하나 상승력을 작용시킬 때는 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 가속도의 경우 정상적인 구동력에서는 기하학적인 거동과 동역학적인 거동은 거의 일치함을 발견할 수 있다. 6 초 이하에서 상승을 완료시키는 구동력의 경우 가속도의 변화가 매우 심함을 알 수 있다. 따라서 작동시 안내레일에 과도한 충격력의 변화를 초래할 수 있다.

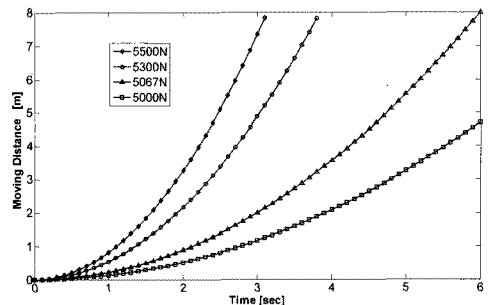


Fig. 5 The moving distance of the opening process depending on the pulling force

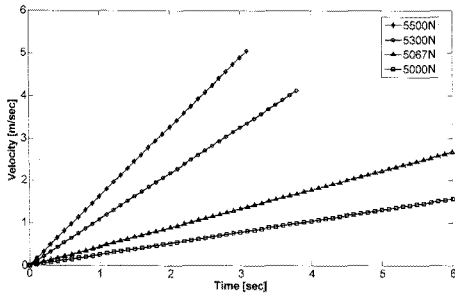


Fig. 6 The velocity of the opening process depending on the pulling force

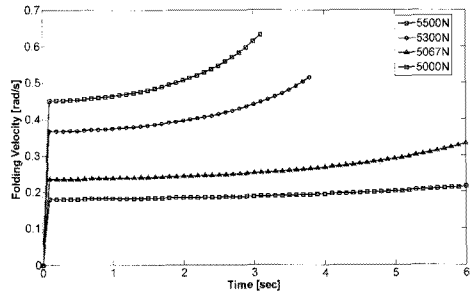


Fig. 9 The folding velocity of the opening process depending on the pulling force

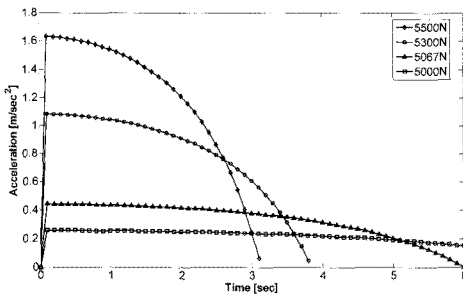


Fig. 7 The acceleration of the opening process depending on the pulling force

그림 8 과 9 는 그림 1 에서 정의한 접이각의 거동과 그 속도를 보여주고 있다. 정상적인 구동력이 작용하는 경우 $\theta = 0 \rightarrow \pi/2$ 의 접이각 변화가 일어남이 확인되었다. 이 보다 과소한 구동력의 경우 $\theta < \pi/2$ 에서 상승운동을 멈추고 과도한 구동력의 경우는 6 초에 훨씬 못미쳐 상승함을 알 수 있다. 정상적인 구동력일 때 속도의 경우 6 초 동안 평균 $\pi/12 \text{ rad/s}$ 와 거의 일치함을 알 수 있다.

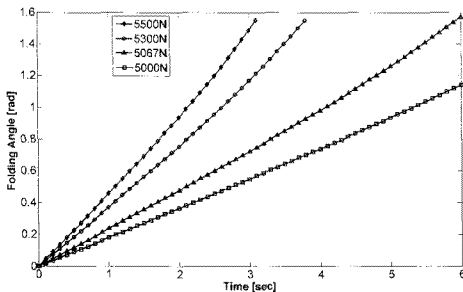


Fig. 8 The folding angle of the opening process depending on the pulling force

자동문이 하강시 그림 4 에서 관찰한 바와 같이 매우 짧은 시간에 자동문이 낙하하여 매우 큰 가속도를 유발함으로 안내레일 구조물에 급격한 충격력을 줄 뿐 아니라 위험을 초래할 수 있다. 그림 10 을 살펴보면 이를 방지하고자 비틀림 스프링의 강성 $k_t = 8,300 \text{ Nm/rad}$ 를 사용하면 6 초 동안 하강할 수 있음을 알 수 있다. 강성이 이 보다 작은 스프링을 사용하면 6 초 보다 훨씬 못미쳐 하강함을 알 수 있다. 이에 따른 속도는 그림 11 에서와 같이 정상적인 비틀림 강성의 경우 속도의 거동이 완만함을 알 수 있다.

그림 12 와 13 은 하강시 비틀림 스프링 상수에 따른 접이각과 접이속도를 나타낸다. 정상적인 구동력이 작용하는 경우 $\theta = -\pi/2 \rightarrow 0$ 로써 접이각의 변화가 일어남이 확인되었다. 만일 하강속도의 변화를 작게 하려면 강성 k_t 는 $8,300 \text{ Nm/rad}$ 가 필요함을 알 수 있다. 이 보다 작은 강성의 스프링을 사용하면 접이각 및 접이속도가 급격히 변화함을 알 수 있다. 따라서 설계자 입장에서 하강 시간과 속도를 정확히 정량적으로 제어할 수 있는 도구를 확보할 수 있다.

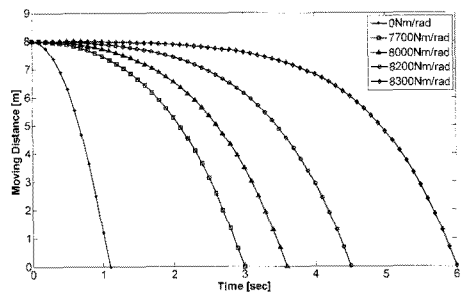


Fig. 10 The moving distance of the closing process depending on the spring force

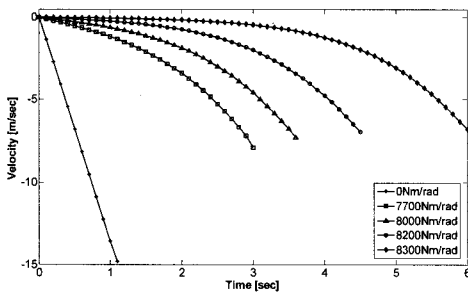


Fig. 11 The velocity of the closing process depending on the spring force

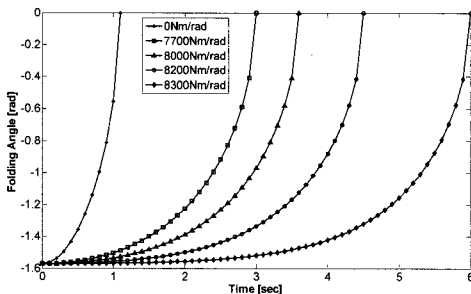


Fig. 12 The folding angle of the closing process depending on the spring force

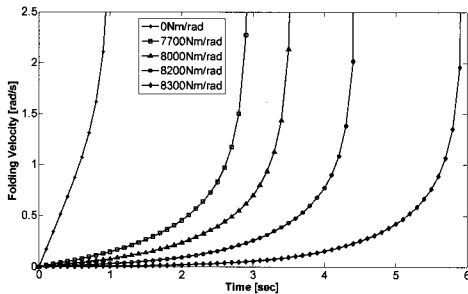


Fig. 13 The folding velocity of the closing process depending on the spring force

4. 결론

본 논문은 초대형 접이식 자동문의 메카니즘을 해석하였다. 자동문이 승강할 때 구동력을 산정하기 위하여 운동방정식을 접이각에 대하여 유도하였으며 비선형 거동을 하고 있음을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 승강시간 및 속도를 정량적으로 제어함으로써 설계자가 원하는 작동조건을 얻을 수

있으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 2 단 접이식 자동문 상승 및 하강의 경우 기하학적 및 동역학적 해석을 수행하였다.

(2) 작동시간을 설계목표로 하여 자동문이 상승할 때 구동력을 산정하였으며, 하강할 때 낙하 충격력 완화를 위하여 사용되는 비틀림 스프링의 강성을 평가하였다.

(3) 향후 다단 접이식 자동문의 동역학적 해석 시 모터의 구동력 및 비틀림 스프링의 강성을 산정할 수 있는 기반을 마련하였다.

후 기

본 연구는 2009 년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문임.

참고문헌

1. Oh, J. O., Hwang, Y. E., Lee, G. H., Kang, H. K., Kwak, B. C. and Yoon, S. H., "Development of Multi-folding Roman Shaded Ultra-wide Automatic Door," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 935-936, 2008.
2. Yun, S.-H. and Park, J.-C., "CAE Analysis for Impact Suppression of Industrial Big Folding-type Automatic Door," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 921-922, 2010.
3. Yun, S.-H., "Dynamical Mechanism Analysis of the Industrial Folding Automatic Door," Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 619-620, 2010.
4. MSC Software Corp., "Adams Package," 2009.
5. Norton, R. L., "Design of Machinery 3rd Edition," McGraw-Hill, pp. 561-575, 2004.
6. Meriam, J. L. and Kraige, L. G., "Dynamics, 5th Edition," Wiley, pp. 460-486, 2003.