

접이식 자동문의 자유낙하 방지를 위한 토션 스프링 장치 설계

Torsional Spring Design of Big Industrial Folding-type Automatic Door to Prevent Free Fall

윤 성 호*
Yun, Seong-Ho

요 약

본 논문에서는 산업용으로 널리 사용되는 접이식 자동문의 개폐 거동을 관찰하기 위한 운동방정식이 유도되었다. 특히 자동문이 자유 낙하할 때 갑작스런 단힘으로 인하여 작업 환경에 초래할 위험을 방지하고자 토션 스프링을 사용하였다. 설정된 작동 시간 및 속도에 적합한 토션 스프링의 강성을 산정하였고, 이를 바탕으로 스프링의 제원을 결정하였다.

keywords : 접이식 자동문, 토션 스프링, 자유낙하

1. 서 론

일반적으로 산업용 접이식(folding type) 자동문은 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 강구하기 위하여 많은 노력을 기울여 설계하여 왔다. 또한 자동문의 자중에 의한 동작성과는 별도로 환경적인 요인으로서 풍압에 의하여 구조물이 변형될 수 있다. 하지만 물류 이동 산업의 활성화로 대형 자동문의 수요는 날로 증가하고 있으나 그 기술 수준은 아직도 초보단계에 있어 기술개발이 미흡한 상태에 있다.(윤성호, 2010)

대형 자동문의 작동 방법은 구동모터의 회전동력이 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.(윤성호, 2010) 특히 하강시에는 자중에 의한 갑작스러운 판넬의 자유낙하를 방지하기 위하여 토션 스프링의 복원력을 사용하기도 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 자동문에 설치되는 토션 스프링의 설계에 초점을 두고자 한다.

2. 자동문의 개폐 운동

그림 1은 자동문이 승강시 임의의 시간에서 개폐되는 순간을 측면에서 표현한 자유물체도이다.

* 정회원 • 금오공과대학교 기계공학과 교수 shyun@kumoh.ac.kr

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. OA 는 상부 판넬이고 AB 는 하부 판넬을 나타낸다. G 와 C 는 상하부 판넬의 무게 중심을 각각 나타낸다. 하부 판넬의 밑면을 기준으로 상하부 판넬의 전체 위치에너지 V 와 전체 운동에너지 T 를 구하면 다음 식 (1.a,b)로 표현된다.

$$V = 2mgl(1 - \cos\theta); \quad T = \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 \sin^2\theta \quad (1.a,b)$$

여기서 상기의 식에서 극관성 모멘트 I 는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 질량 관성모멘트는 하부 판넬의 질량중심 C 에 대하여 I_C 와 상부 판넬의 지점 O 에 대하여 I_O 를 다음 식 (3.a,b)로 표현될 수 있다.

$$I_C = \frac{1}{12}m(b^2 + l^2); \quad I_O = \frac{1}{12}mb^2 + \frac{1}{3}ml^2 \quad (3.a,b)$$

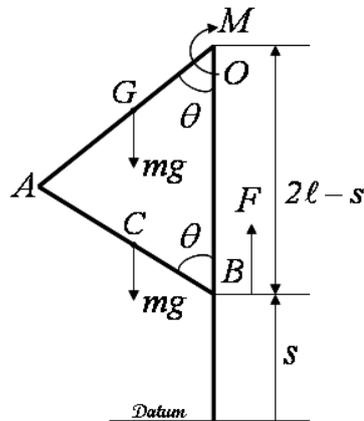


그림 1 접이식 자동문이 열릴 때의 자유 물체도

먼저 자동문을 개폐시 상부 판넬의 지점 O 에 모터의 출력축으로 회전모멘트 M 을 가하여 승강하는 경우와 하부 판넬의 지점 B 에서 장력 F 를 작용하여 승강하는 경우를 고려하여 식 (1.a,b)를 오일러-라그랑지 식을 이용하여 운동방정식을 구할 수 있다. (Meirovitch, 1970)

$$\ddot{\theta} \sin^2\theta = 2l(F - mg)\sin\theta - \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 \sin 2\theta \quad (4)$$

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

이러한 갑작스런 낙하를 방지하기 위하여 그림 1에서 지점 O에 토션 스프링을 설치하여 탄성 복원력을 이용하여 하강속도를 저하시킬 수 있다. 이에 따른 비틀림 탄성에너지 $K=(1/2)k_t\phi^2$ 이며, 여기서 k_t 는 토션 스프링 상수, ϕ 는 비틀림 스프링이 감겨 있는 봉의 회전각도이고 접이각 θ 와의 관계를 $\phi=\sqrt{3}\theta$ 가정하였다. 따라서 자동문이 닫힐 때 θ 가 $\pi/2 \rightarrow 0$ 으로 변할 때 스프링의 비틀림 각 ϕ 는 약 $2.7rad$ 정도 감기게 된다. 자동문에 비틀림 스프링이 장착되어 있는 상태에서 모멘트 M 과 직선력 F 가 동시에 작용한다면 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} \sin^2\theta = 2l(F - mg)\sin\theta - \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 \sin 2\theta - 3k_t\theta \quad (5)$$

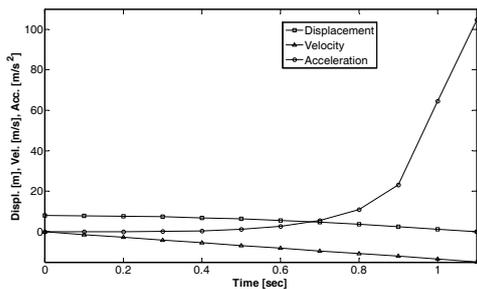


그림 2 자동문의 자유 낙하시 기하학적인 거동

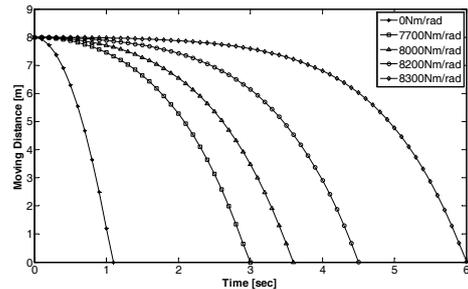


그림 3 토션 스프링 강성에 따른 자동문의 거동

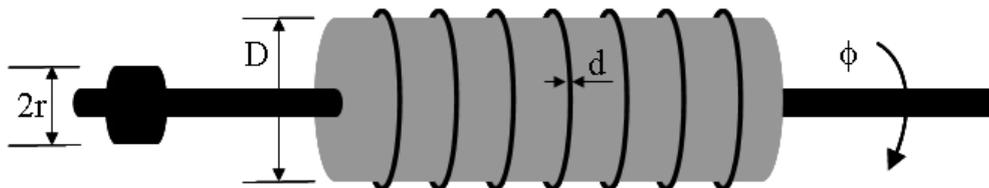


그림 4 토션 스프링 장치의 제원

3. 해석결과 및 결론

수치해석의 예로서 상하 판넬 각각의 질량 $m=500kg$ 이고 높이 $l=4m$ 이며, 두께 $b=0.1m$ 이다. 그림 3을 살펴보면 자유낙하의 속도를 지연시키고자 토션 스프링의 강성

$k_t = 8,300Nm/rad$ 를 사용하면 6초 동안 하강할 수 있음을 알 수 있다. 이 보다 작은 강성을 가진 스프링을 사용하면 6초 보다 훨씬 못 미쳐 하강함을 알 수 있다.

그림 4에서 보는 바와 같이 토션 스프링에서 암(arm)의 길이를 고려하지 않는 경우 스프링의 유효부 전 개길이 $l = \pi Dn$ 이며, 여기서 D 는 스프링 코일의 평균지름이고 n 은 코일의 감김수로 보통 3이상이다. 토션 모멘트 M 은 케이블 드럼의 반경 r 에 작용하는 직선력 F 에 의하여 발생하며, 스프링의 비틀림 각 ϕ 와 스프링 강성 k_t 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi = \frac{64MDn}{Ed^4}; \quad k_t = \frac{Ed^4}{64Dn} \quad (6a,b)$$

여기서 E 는 스프링 재료의 탄성계수이며 d 는 스프링 강선의 지름이다. 그림 5는 스테인레스 강선 STS3xx 계열을 사용하고, 감김수 $n = 5$ 일 때 스프링의 강선과 코일 직경에 따른 토션 강성의 변화를 보여 주고 있다. 6초 동안 8m를 하강할 때 코일 직경이 80 ~ 120mm에서 강선의 지름은 약 32 ~ 36mm가 필요함을 알 수 있다.

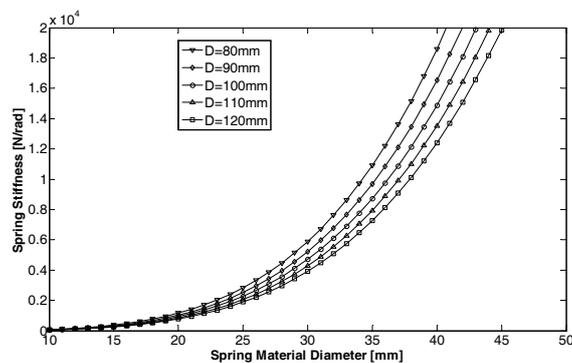


그림 5 스프링 강선과 스프링 코일 직경에 따른 강성 변화

참고문헌

윤성호, 박종천 (2010) 초대형 산업용 접이식 자동문의 충격완화를 위한 CAE해석, 한국정밀공학회 추계학술대회지, pp.921~922.
 윤성호 (2010) 산업용 접이식 자동문의 동역학적 메카니즘 해석, 한국정밀공학회 추계학술대회지, pp.619-620.
 Meirovitch L. (1970) *Method of Analytical Dynamics*, McGraw-Hill, New York.