

폴딩 도어 메커니즘 설계를 위한 기구학 및 동역학 해석 프로그램 개발

Development of the Kinematic and Dynamic Analysis Program for the Design of the Folding Door Mechanism

서명원*, 권성진**, 심문보**, 조기용**, 이은표**, 박승영***
Myung-Won Suh, Seong-Jin Kwon, Mun-Bo Shim, Ki-Yong Cho, Eun-Pyo Lee, Seung-Young Park

ABSTRACT

Since the bus is regarded as the one of the most public transportation systems, research on the safety and facilities of the bus has been increased actively in recent years. In this paper, we concern the design of the bus door mechanism that is composed of many linkages and actuators(or motors). In particular, the folding door mechanism is representative system installed in most of urban buses.

To design the folding door mechanism, we construct the kinematic and dynamic analysis model for computer simulation. Also, the dynamic analysis is accomplished by both direct dynamics and inverse dynamics. Since the folding door mechanism has many design variables, the analysis program is developed to perceive kinematic and dynamic characteristics according to the design variables and simulation conditions.

주요기술용어 : Bus door mechanism(버스 도어 메커니즘), Direct dynamics(정동역학), Inverse dynamics (역동역학), Folding door mechanism(폴딩 도어 메커니즘)

1. 서론

버스는 국내 최대의 교통수단으로써 기존의 연구개발 관점이 차량의 수송성 및 운반성에 집중되어 왔으나, 근래에는 차량의 내구성, 승객과 운전자의 편의성 및 안전성에 관한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다.

특히, 버스 도어 메커니즘(bus door mechanism)에 있어서도 개폐 빈도수를 고려한 내구력 확보,

승객의 승하차 편의성을 위한 유효 승강 폭 확대 등 수요자의 요구에 부응하고자 도어 메커니즘의 설계에 관한 연구가 진행되고 있다.

관련 연구들을 살펴보면, 이병훈 등의 연구^{1,2)}에서는 직교좌표와 상대좌표를 사용하여 다물체계에서 기구 구동력의 역동역학 해석방법을 제시하였고, 또한 역속도 변환을 이용하여 계산하는 알고리즘을 제시하였다. Yan³⁾은 임의의 4절링크와 구동링크의 입력속도를 이용하여 기구학적 구속조건 및 동적평형을 만족하는 최적화된 4절링크를 설계하는 알고리즘을 제시하였다.

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 회원, 성균관대학교 대학원

*** 회원, 현대자동차 상용제품개발연구소

이와 같이 다양한 링크 기구에 대한 기구학 및 동역학 해석에 관한 연구^{4,5)}는 많이 진행되어 왔으나, 버스 도어 메커니즘의 설계에 적용한 연구는 미비한 상태이다.

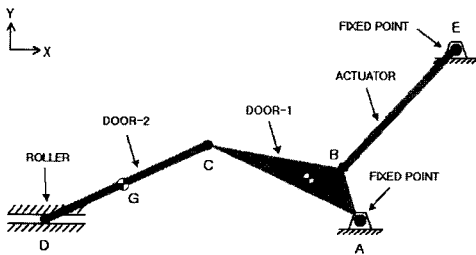
본 연구에서는 버스 도어 메커니즘의 기구학 및 동역학 해석 과정을 포함한 설계 프로그램을 개발하여 다양한 도어 설계 제원에 대한 해석 과정을 자동화하고, 실차 시험의 횟수 및 개발 비용을 절감하고자 한다. 특히 동역학 해석에서는 정동역학(direct dynamics) 및 역동역학(inverse dynamics) 해석을 포함하여 해석하고자 한다.

이를 바탕으로 버스 도어 메커니즘의 설계인자에 관한 연구를 수행하고, 다양한 설계인자 변화에 따른 도어 메커니즘의 성능 특성을 비교 분석하여 버스 도어 메커니즘 설계 기술의 확립에 본 연구의 목적이 있다.

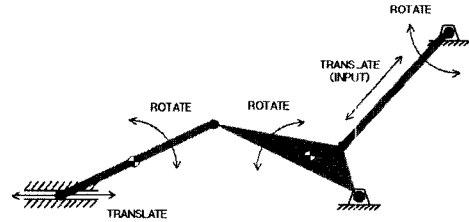
2. 기구학 해석

2.1 도어 메커니즘 구성

도어 메커니즘의 타입은 각 기구요소의 결합 형태, 구동 방식 등에 따라 다양하게 정의될 수 있다. 특히 버스의 경우에는 10개 타입 이상으로 세분화하여 분류할 수 있으나, 본 연구에서는 대표적으로 Fig. 1과 같은 폴딩 도어 메커니즘(folding door mechanism)을 적용대상으로 하였다. 이는 액추에이터(actuator)와 두 개의 도어로 이루어져 있고, 액추에이터의 구동에 의해 도어가 접히면서 열리는 구조로 되어 있으며, 주로 시내버스의 앞쪽 출입문에 사용된다.



(a) Composition of the folding door mechanism



(b) Motion of each linkage

Fig. 1 Schematic diagrams of the folding door mechanism

2.2 기구학 해석

액추에이터와 도어의 관계는 Fig. 2와 같이 정의할 수 있으며, 액추에이터 길이의 변화에 따른 도어의 위치 정보를 다음과 같은 방법으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_A = \cos^{-1} \left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \right) \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_A = \frac{a\dot{a}}{bc \sin \theta_A} \quad (2)$$

$$\ddot{\theta}_A = \frac{-1}{\sin \theta_A} \left(\frac{-\dot{a}\dot{a} - a\ddot{a}}{bc} + \cos \theta_A \dot{\theta}_A^2 \right) \quad (3)$$

여기서, a 는 액추에이터의 길이를 나타내고, b 는 고정된 E점과 고정된 A점 사이의 거리, c 는 고정된 A점과 액추에이터와 도어의 결합 지점인 B점 사이의 거리를 나타낸다. 따라서, θ_2 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_2 = \theta_A + \theta_K + \theta_L \quad (4)$$

여기서, θ_K 와 θ_L 은 폴딩 도어 메커니즘의 위

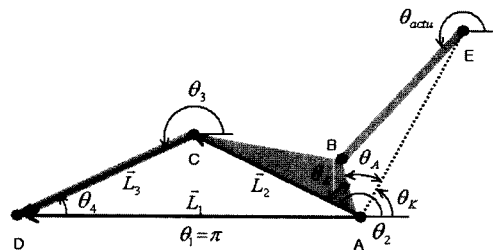


Fig. 2 The kinematic analysis model

치 정보에 의해 구할 수 있는 상수 값이다.

또한, 도어를 구성하는 링크 기구의 위치관계식을 벡터에 의해 정의된 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{L}_2 + \vec{L}_3 - \vec{L}_1 = 0$$

$$l_2(\cos \theta_2 + j \sin \theta_2) + l_3(\cos \theta_3 + j \sin \theta_3) - l_1 = 0 \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)를 바탕으로 액추에이터의 운동에 따른 각 링크의 위치, 속도, 가속도를 식 (6)~식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_3 = \sin^{-1}\left(\frac{-l_2 \sin \theta_2}{l_3}\right) \quad (6)$$

$$\theta_4 = \theta_3 - \pi \quad (7)$$

$$\omega_3 = \omega_4 = \frac{-l_2 \omega_2 \cos \theta_2}{l_3 \cos \theta_3} \quad (8)$$

$$\alpha_3 = \alpha_4 = \frac{-l_2 \alpha_2 \cos \theta_2 + l_2 \omega_2^2 \sin \theta_2 + l_3 \omega_3^2 \sin \theta_3}{l_3 \cos \theta_3} \quad (9)$$

여기서, ω 는 링크의 각속도, α 는 각가속도를 의미한다.

3. 동역학 해석

3.1 역동역학 해석

역동역학 해석을 위해 본 연구에서는 액추에이터의 병진운동에 대한 속도 및 가속도를 시간에 대한 함수로 설정하여 해석하였다.

앞 절에서의 기구학 해석 정보를 바탕으로 Fig. 3의 자유 물체도로부터 운동방정식을 유도하면 식 (10)과 같다. 여기서, $R_x R_y$ 는 각 도어의 무

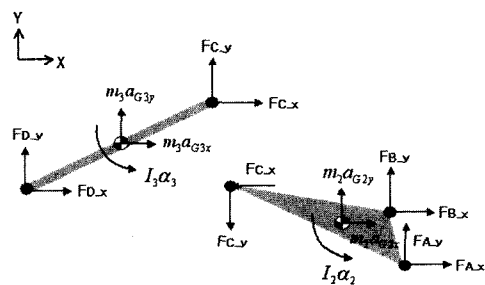


Fig. 3 Free body diagram for the dynamic analysis

계중심에서 각 절점까지의 거리를 나타낸다. 그리고, μ 는 도어 롤러의 마찰계수, m 은 각 도어의 질량, I 는 각 도어의 질량관성모멘트, a_G 는 각 도어의 무게중심에서의 가속도를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & \cos \theta_{act} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & \sin \theta_{act} & 0 \\ -R_{Ax} & -R_{Ay} & -R_{Cx} & -R_{Cy} & (R_{Bx} \cdot \sin \theta_{act} - R_{By} \cdot \cos \theta_{act}) & \pm \mu \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -R_{Cx} & R_{Cy} & 0 & R_{Dx} \mp \mu \cdot R_{Dy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Ax} \\ F_{Ay} \\ F_{Cx} \\ F_{Cy} \\ F_B \\ F_{Dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 a_{G2x} \\ m_2 a_{G2y} \\ I_2 \alpha_2 \\ m_3 a_{G3x} \\ m_3 a_{G3y} \\ I_3 \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

또한, 식 (10)을 단순화하여 표현하면 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$[A] \cdot [B] = [C] \quad (11)$$

여기서, $[A]$ 는 폴딩 도어 메커니즘에 대한 각 링크의 기하학적 정보를 가지는 행렬이며, $[B]$ 는 각 링크의 절점에 가해지는 반력을 나타내는 행렬, $[C]$ 는 각 링크 무게중심에서 작용하는 관성력을 나타내는 행렬이다.

이를 이용하여 수치해석 방법으로 $[B]$ 를 정리하면, 각 링크의 절점에 작용하는 반력을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 수치해석 방법으로 LU 분해법(LU decomposition)을 사용하여 동역학 해석에 적용하였다.

3.2 정동역학 해석

본 연구에서는 정동역학 해석을 위해 Fig. 4와 같은 방법으로 해석하였다. 또한 정동역학 해석은 시간에 대한 함수로 설정하여 해석하였다.

기구학 해석에서는 초기 입력 데이터를 바탕으로 θ_2 와 ω_2 를 우선적으로 계산하며, 이를 바탕으로 $\theta_3, \theta_4, \omega_3, \omega_4$ 를 구할 수 있다. 또한, α_3 와 α_4 는 식 (9)과 같이 α_2 의 함수로 표현된다.

식 (10)의 관성력을 나타내는 행렬에 식 (9)의 관계를 대입하고, 액추에이터의 병진운동을 야기하는 힘을 정리하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_B = f(\alpha_2)$$

$$\alpha_2 = f^{-1}(F_B) \quad (12)$$

여기서, F_B 는 액츄에이터에 입력되는 힘을 나타낸다. 따라서 식 (12)를 정리하면 α_2 를 구할 수 있다. 이를 수치적분 하여 새로운 θ_{2-new} 와 ω_{2-new} 를 계산하고, α_3 와 α_4 를 계산하는 기구학 해석을 통하여 동역학 해석을 수행할 수 있다.

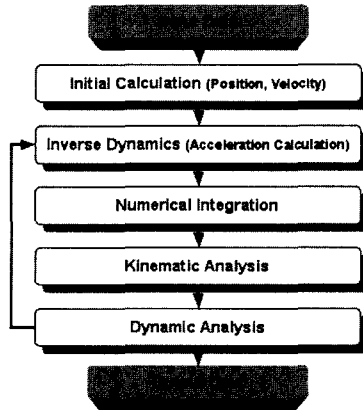


Fig. 4 Flow-chart of direct dynamics

4. 설계 프로그램 개발

본 연구에서는 폴딩 도어 메커니즘을 설계하기 위한 기구학 및 동역학 해석 프로그램을 PC 기반으로 개발하였으며, 프로그램 개발에 사용한 컴파일러는 Microsoft Visual C++ 6.0이다.

프로그램은 사용자의 편의성을 고려하여 다양한 설계변수의 입력과 해석 결과의 비교 분석이 가능하도록 구성하였으며, 이러한 설계 프로그램의 구성은 Fig. 5와 같다. 또한 프로그램은 크게 입력부, 해석부, 출력부의 세 부분으로 나누어지며 각각의 기능 및 역할은 다음과 같다.

4.1 입력부

설계 프로그램의 시작화면은 Fig. 6과 같이 설계 프로그램의 입력부로 구성하였다.

입력부에서는 폴딩 도어 메커니즘의 설계변수(각 링크 절점의 좌표, 무게중심의 좌표, 질량, 질량관성모멘트, 롤러의 마찰계수 등)를 설정할 수 있다. 또한 시뮬레이션 환경변수(시뮬레이션 시간, 스텝 시간, 시뮬레이션 종료 조건 등)를 입

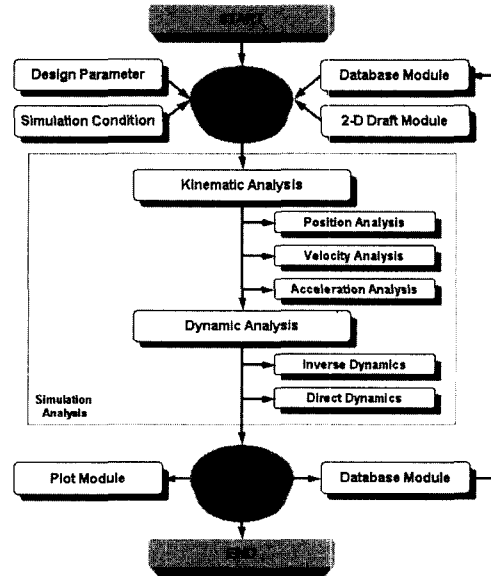


Fig. 5 Flow-chart of the design program

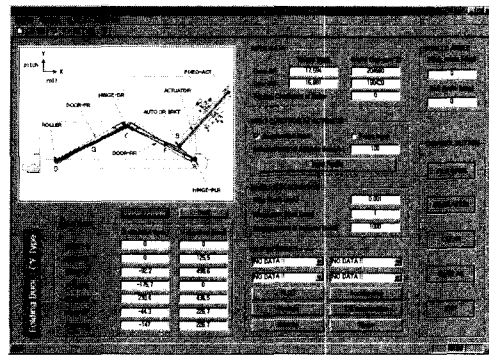


Fig. 6 Main screen of the analysis program

력할 수 있으며, 도어의 구동을 담당하는 액츄에이터의 가속도 또는 힘을 시간에 따른 함수로 설정할 수 있다.

이러한 데이터는 사용자가 직접 프로그램에서 입력하거나, 기존에 저장된 데이터베이스를 이용하여 입력 값으로 설정할 수 있도록 하였다.

그리고 사용자의 설계변수 변경 시 고려해야 할 설계 제약 조건을 참조하기 위하여 2-D 도면과 연계하는 모듈을 별도로 구성하였다.

4.2 해석부

설계 프로그램의 해석부에는 폴딩 도어 메커

니즘의 개폐 및 운동에 대하여 기구학 및 동역학 해석이 시간에 대하여 연속적으로 해석이 가능하도록 시뮬레이션 해석 기법을 적용하였다.

기구학 해석은 입력부에서 사용자가 설정한 데이터에 대하여 각 링크의 무게중심 및 절점에서의 위치, 속도, 가속도 해석을 수행하게 된다.

동역학 해석은 입력부에서 사용자가 설정한 액츄에이터의 구동조건에 따라 정동역학과 역동역학 해석을 수행하게 된다. 즉, 정동역학 해석은 액츄에이터의 병진운동을 야기하는 힘을 시간에 대하여 설정하였을 경우이고, 역동역학 해석은 액츄에이터의 병진운동에 대한 가속도를 입력하였을 경우에 해당된다.

이를 바탕으로 프로그램의 해석부에서는 기구학 및 동역학 해석을 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 기법을 적용하므로, 시간에 대한 도어의 상태 및 움직임을 예측할 수 있도록 하였다.

4.3 출력부

시뮬레이션 해석이 종료된 후 설계 프로그램의 출력부에서는 도어의 운동 및 성능특성을 분석할 수 있도록 해석 결과를 그래프 화하여 사용자에게 제공할 수 있도록 하였다. 또한 해석결과는 데이터베이스와 연계되어 다양한 설계인자 변화에 따른 해석 결과를 분석할 수 있도록 하였다.

해석 데이터는 각 절점의 위치, 속도, 가속도의 변화, 각 링크 무게중심에서의 가속도의 변화, 각 링크 절점에서의 반력의 변화 등을 분석할 수 있도록 구성하였다.

5. 설계 적용 예

본 연구에서 개발된 폴딩 도어 메커니즘 설계 프로그램의 유용성을 확인하기 위하여 Table 1의 설계변수를 가지는 도어 메커니즘을 해석 대상으로 하였다.

Table 1에서 Model A는 도어의 초기 설계 제원을 나타내고, Model B는 액츄에이터와 도어의 결합 위치를 변경한 설계 제원이고, Model C는

Table 1 Design Parameters of the folding door mechanism

Design parameters	Model A		Model B		Model C	
	X	Y	X	Y	X	Y
Point A (mm)	0	0	0	0	0	0
Point B (mm)	0	125.5	0	170	0	125.5
Point C (mm)	-92.2	498.6	-92.2	498.6	-92.2	498.6
Point D (mm)	-175.7	0	-175.7	0	-175.7	0
Point E (mm)	230.6	436.5	230.6	436.5	230.6	436.5
Point F (mm)	-44.3	226.7	-44.3	226.7	-80	300
Point G (mm)	-147	226.7	-147	226.7	-100	110

각 도어의 무게중심을 변화시킨 설계 제원을 나타낸다.

5.1 액츄에이터의 속도 입력

폴딩 도어 메커니즘을 구동하기 위한 조건으로 액츄에이터의 병진운동을 등속도 운동으로 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 이 때, 액츄에이터의 속도는 100mm/s, 시뮬레이션 스텝 간격은 0.001 sec, 시뮬레이션 시간은 도어가 완전히 닫히는 시점 즉, θ_2 가 변화하여 180° 가 되는 시간까지 설정하였다. 이 때, 도어와 액츄에이터의 결합점인 B점의 반력 변화를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

Model B는 도어의 B점이 변화하여, 액츄에이터의 힘이 작용하는 위치가 변화되어, Model A에 비하여 상대적으로 작은 힘으로 링크의 움직임을 발생시킨다. 따라서 액츄에이터의 등속도 운동에 대한 B점의 반력이 Model A에 비하여 작은 영역에서 나타난다.

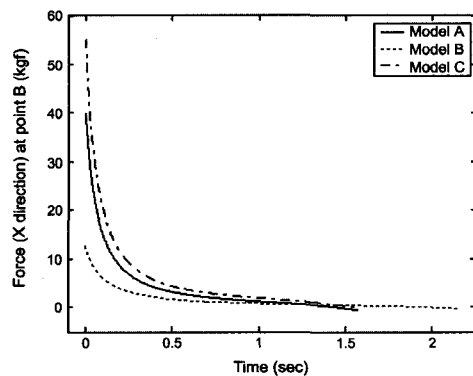


Fig. 7 Force at point B to the X direction

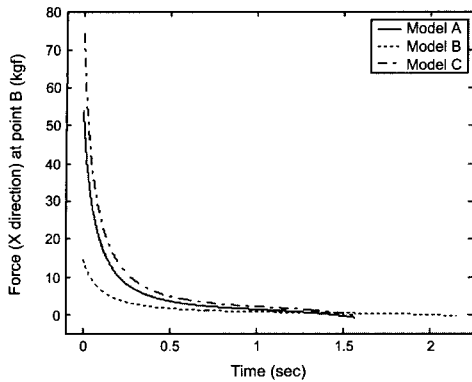


Fig. 8 Force at point B to the Y direction

Model C는 링크의 무게중심 변화로 인하여, 각 링크의 관성력이 변화하게 되며, 액츄에이터의 등속도를 유지하기 위해서 Model A에 비하여 상대적으로 큰 힘이 필요하게 되고, 이 때 도어가 받는 B점의 반력 역시 Model A에 비하여 큰 영역에서 나타난다.

이러한 B점의 반력 변화는 도어 연결부의 강도 및 도어의 안전성에 매우 중요한 영향을 미칠 수 있는 인자이며, 본 연구에서는 이러한 도어의 연결부가 받는 반력을 고려하여 설계자가 도어의 강도를 고려한 설계변수를 선정하는 것이 가능하도록 하였다.

5.2 액츄에이터의 힘 입력

액츄에이터의 균일한 작용 힘을 10kgf, 시간간격 0.001sec, 시뮬레이션 시간은 도어가 완전히 닫히는 시점 즉, θ_2 가 변화하여 180°가 되는 시간까지 설정하였다. 이 때, 링크 Door-1의 각속도와 슬라이더의 속도 변화를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

Model B는 링크 Door-1의 무게중심에서 고정점 A와 힘 작용점까지의 거리가 증가되어 상대적으로 작은 힘으로 링크의 회전운동을 발생시킬 수 있게 된다. 따라서 링크 Door-1의 각속도 및 슬라이더의 속도가 Model A보다 빠르게 변화하며, 도어가 닫히는 시간은 감소하게 된다.

Model C는 링크의 무게중심점 변화의 영향으

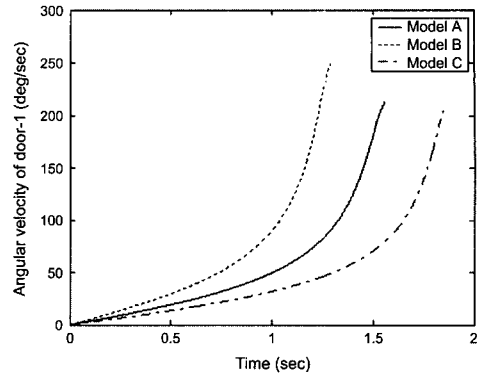


Fig. 9 Angular velocity of the door-1

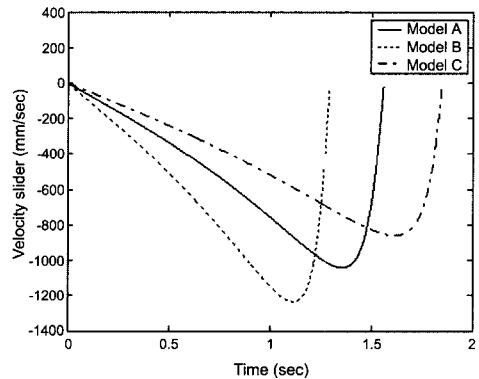


Fig. 10 Velocity of the slider

로 각속도와 슬라이더의 속도가 Model A에 비하여 느리게 변화하며, 도어가 닫히는 시간은 증가하게 된다.

이러한 시뮬레이션 결과는 설계자가 도어 기구의 제원 변화에 따른 액츄에이터의 용량을 결정할 수 있음을 나타낸다.

5.3 시뮬레이션 결과 검증

본 연구에서 개발한 폴딩 도어 메커니즘 설계를 위한 기구학 및 동역학 해석 프로그램의 결과 검증은 ADAMS⁶⁾ 해석 결과와의 비교를 통해 수행하였다.

결과 검증의 타당성을 확인하기 위하여, Fig. 11에 본 연구에서 개발한 프로그램과 ADAMS의 해석 결과를 비교하였다. 적용 대상은 앞서 설계 적용 예로 제시하였던, Table 1의 설계 제원을 가

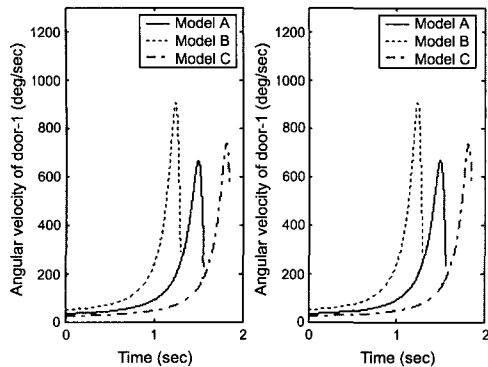


Fig. 11 Verification of the simulation result

지는 도어 메커니즘이다.

시뮬레이션 조건으로는 액츄에이터의 균일한 작용 힘을 10kgf, 시간간격 0.001sec, 시뮬레이션 시간은 도어가 완전히 닫히는 시점 즉, θ_2 가 변화하여 180° 가 되는 시간까지 설정하였다.

결과에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 개발한 프로그램은 상용 동역학 해석 프로그램인 ADAMS와 비교하여 일치하는 결과를 얻을 수 있었으며, 본 연구에서 개발한 프로그램의 타당성을 검증할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 폴딩 도어 메커니즘에 대한 기구학 및 동역학 해석 모델을 구성하였다. 특히 동역학 해석에서는 정동역학 및 역동역학 해석을 모두 포함하여 도어 메커니즘의 동특성을 해석하고자 하였다.

또한, 폴딩 도어 메커니즘의 설계를 위해 기구학 및 동역학 해석과정을 시뮬레이션 해석이 가능한 설계 프로그램으로 개발하여 해석과정을 자동화하고 사용자의 편의성을 극대화하고자 하였다.

이러한 설계 프로그램을 바탕으로 폴딩 도어 설계인자에 관한 연구를 수행하였고, 다양한 설

계인자 변화에 따른 도어 메커니즘의 성능특성을 분석하였다. 또한 본 연구에서 개발한 설계 프로그램의 해석결과를 ADAMS와 비교하여 검증하였다.

이를 통하여 사용자의 다양한 설계인자 입력과 시뮬레이션 환경에 따른 폴딩 도어 메커니즘의 성능해석 및 설계 기반을 확보할 수 있었다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로써, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 이병훈, 양진생, 전우정, “속도변환기법을 이용한 기계시스템의 역동역학 해석,” 대한기계학회 논문집(A), 제20권 제12호, pp.3741-3747, 1996.
- 2) 이병훈, “탄성 다물체계에 대한 조인트 좌표 공간에서의 역동역학 해석,” 대한기계학회 논문집(A), 제21권 제2호, pp.352-360, 1997.
- 3) H. S. Yan, R. C. Soong, “Kinematic and Dynamic Design of Four-Bar Linkages by Links Counter-weighting with Variable Input Speed,” Mechanism and Machine Theory, Vol.36, pp. 1051-1071, 2001.
- 4) 이동찬, 이상호, 한창수, “구속된 다물체 시스템에 대한 운동방정식의 미분 방정식화 및 동역학 해석,” 한국자동차공학회 논문집, 제5권 제1호, pp.154-161, 1997.
- 5) E. J. Haug, Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Allyn and Bacon, pp.243-281, 1989.
- 6) Basic ADAMS, Mechanical Dynamics, Inc., Full Simulation Package Training Guide Ver. 10, 1999.