

객체지향 데이터 모델을 이용한 다물체 동역학 해석 시스템 개발

박태원[†], 송현석*, 서종휘*, 한형석**, 이재경**

Development of a Multibody Dynamics Analysis System Using the Object-Oriented Data Model

Tae Won Park, Hyun Seok Song, Jong Whi Seo, Hyung Suk Han and Jai Kyung Lee

ABSTRACT

In this paper, the application of object-oriented Data Model to develop a multibody dynamic system, called O-DYN, is introduced. Mechanical components, such as bodies, joints, forces are modeled as objects which have data and method by using object-oriented modeling methodology. O-DYN, a dynamic analysis system, based on the object-oriented modeling concept is made in C++. One example is analyzed through the O-DYN. It is expected that the analysis program or individual module constructed in this paper would be useful for mechanical engineers in predicting the dynamic responses of multibody systems and developing an analysis program

Key Words : q : position vector, \dot{q} : velocity vector, \ddot{q} : acceleration vector, M : mass matrix, Φ_q : constraint Jacobian matrix, λ : Lagrange multiplier, Q : generated force
 γ : RHS of constraint acceleration

1. 서론

다물체 시스템은 구속요소들(constraint)과 연결된 힘(force)요소들에 의해 상호 연결된 물체(body)와 제어요소들로 구성된다. 이것들은 기계, 로봇, 그리고 자동차와 같은 메커니즘의 동역학 해석에 적합하다. 이러한 동역학 해석 메커니즘을 해석하는 프로그램은 범용 프로그램과 사용자의 기호에 맞는 특별한 기능들만을 구성하는 전용 프로그램으로 나눌 수 있다. 범용 프로그램으로는 ADAMS^[1] 나 DADS^[2], SIMPACK^[3] 그리고 RecurDyn^[4] 이 있다.

현재 객체지향을 개념의 데이터 모델로 동역학 프로그램을 구성하는 예는 없었다. 다만 건축분야, 조선분야, 구조해석 분야에서는 적용된 사례가 있다.^[5-7] 자동차 분야에서는 주로 MATLAB 에 기반을 둔 제어 시스템 시뮬레이션에 적용된 사례가 있다.^[8-10] 국외의 경우 객체지향 언어를 이용한 다물체 시스템에 대한 모델링이 수행된바 있으나 운동방정식이 일반적인 형식이 아니기 때문에 적용하

기 위해서는 관련 지식에 대한 깊은 이해가 필요하다.^[11-13]

본 논문에서는 이미 보편화된 다물체 동역학 방정식을 그대로 이용하면서 객체지향 개념을 도입하기 때문에 사용자 및 개발자가 쉽게 해석 시스템을 수정하거나 재 사용할 수 있는 방법을 제시한다. 또한 제시한 방법으로 객체지향 언어 C++를 이용하여 프로그램을 개발하였다. 그 결과 본 논문에서 제시하는 해석기는 수정이 쉽고, 재 사용성이 높으며, 확장성, 유연성의 장점을 가지기 때문에 사용자 중심적인 다물체 동역학 해석 시스템으로 기대된다.

2. 객체지향 데이터 모델

객체 지향 개념을 이용한 데이터 모델은 기존의 절차적 개념의 데이터 모델과는 다르게 구성된다. 여러 다른 데이터 모델의 검토는 다물체 시스템 해석시 절차적 데이터 모델에 비해 자연스럽게 효과적으로 공학적 적용 및 응용을 보여주었다. 이를 위해서는 단순하고, 중립적이고, 객체지향 데이터 모델을 기반으로 구성되어야 한다. 이러한 데이터

모델은 몇 가지의 특징을 가지고 있어야 한다.

첫째로, 데이터의 캡슐화가 이루어져야 한다. 캡슐화(encapsulation)라는 것은 자기 완결구조를 갖고 있는 한 단위의 속성이다. 그 캡슐화에는 '자료은닉'이라는 것이 구현되어 있다. 자료은닉이란 그 캡슐화된 한 단위의 내부 구조 및 동작원리를 잘 몰라도 사용될 수 있는 속성을 말한다. 둘째로, 상속성(inheritance)을 갖는다. 기존형의 확장인 새로운 형이 선언될 수 있다. 이 새로운 하위 클래스는 기존형으로부터 파생되었다고 표현하거나 파생형(derived type)이라 불리기도 한다. 셋째로 모든 객체는 신원(Identity)을 갖는다. 이 신원은 객체에 데이터에는 영향을 주지 않고, 객체를 구분하는데 유용하게 쓰여진다.

3. 다물체 시스템을 위한 데이터 모델

3.1 다물체 모델의 객체화

객체지향 데이터 모델의 각 모듈들은 객체화 된다. Fig. 1 에서 보이는 것과 같은 기존의 다물체 시스템에서 쓰이는 모듈들은 객체 지향 개념을 이용하면 Fig. 2 와 같이 변화되어진다. 각 객체는 객체로서의 속성과 기능을 포함하며 서로 독립적으로 운영된다. 그리고 객체간의 데이터 인터페이스는 메시지를 통하여 직접적으로 이루어진다.

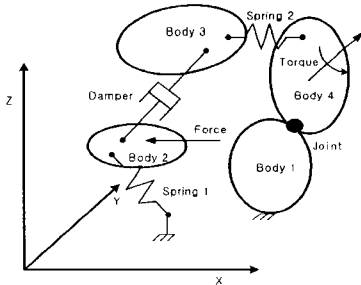


Fig.1 Conventional Multibody system

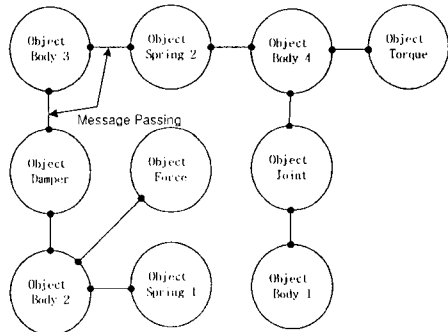


Fig. 2 Object-oriented representation of multibody system

3.2 클래스화

본 연구에서 제시하는 객체지향 데이터 모델 개념을 이용한 다물체계의 동적 모델링의 핵심은 클래스의 도입이다. 클래스는 동종의 객체를 정의하기 위한 템플릿이라고 할 수 있다. 전기와 같이 클래스는 속성 즉 데이터와 기능을 동시에 갖고 있다. 사용되는 클래스의 구조는 최상위 클래스가 아래 주요(primitive)클래스들을 관장하며 그 휘하에 모든 클래스들이 관리된다. 최상위 클래스는 모든 클래스의 공통속성과 기능을 포함하고 있다. 최상위 클래스 속성으로는 객체명, 클래스의 형식, 자유도 수, 구속조건 수, 객체번호, 인스턴스 번호, 자유도 번호, 구속조건 번호 등이다. 기능으로는 데이터의 초기화 및 읽기 그리고 결과출력이다.

3.3 수치해석

다물체계가 nb 개의 강체로 구성되어 있다면 공간에서 시스템의 운동을 표현하기 위해서는 $6 \times nb$ 개의 좌표가 필요하다. 이러한 일반좌표는 인접하는 물체들간의 조인트 때문에 모두 독립은 아니다. 각 물체들의 운동은 일반좌표와 일반좌표 속도 연관성을 정의하는 기구적 구속에 의한 영향을 받는다. 다물체 시스템의 운동을 제어하고 이해하기 위해서 공간에서의 물체, 조인트, 힘요소의 정의가 필요하게 된다. nb 개의 물체로 구성되는 시스템이 있다면 그 시스템의 일반좌표는 식(1)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{nb \cdot 6}]^T \quad (1)$$

만일 시스템에 m 개의 구속조건이 있다면 식(2)와 같이 표시되고 구속된 기계 시스템 운동방정식은 식(3)과 같이 정의된다.

$$\Phi(\mathbf{q}, t) = [\Phi_1(\mathbf{q}, t), \dots, \Phi_m(\mathbf{q}, t)]^T = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_q^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q} \quad (3)$$

식(3)을 유용하게 이용하기 위하여 식(2)의 1, 2 차 미분이 필요하다.

$$\Phi_q \dot{\mathbf{q}} + \Phi_t = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\Phi_q \ddot{\mathbf{q}} = -(\Phi_q \dot{\mathbf{q}})_q \dot{\mathbf{q}} - 2\Phi_{qt} - \Phi_{tt} \equiv \boldsymbol{\gamma} \quad (5)$$

식 (3)과 (5)를 이용하여 행렬형태의 시스템 운동방정식을 식(6)과 같이 정의하게 된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \Phi_q^T \\ \Phi_q & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{Q} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

이러한 다물체 동역학 시스템 운동방정식의 해법은 참고문헌 [14]를 참조바란다. 이러한 운동방정식에 기초를 둔 상용 프로그램들은 모두 절차적 프로그래밍 기법에 기초를 두고 있다. (6)의 구성 및 수치해석을 위하여 별도의 클래스를 정의하였고 동적해석은 Fig.3 과 같은 순서로 진행된다. 수치해석을 수행하는 클래스는 시스템 운동방정식을 구성하기 위한 벡터, 행렬, 수치해석 함수들을 가지

고 있게 된다.

여기서 본 논문에서 소개하는 객체지향의 장점이 수치해석 과정에서 잘 나타난다. 동적 해석을 위해서는 식(2)~식(6)의 구성이 필요하고 Fig.3과 같은 흐름으로 해석을 수행하는데 본 논문에서 소개하는 방법에서는 공통 메모리를 사용하지 않는다는 것이 가장 큰 특징이며 장점이다. 모든 데이터는 지역적 변수로 정의된다. 이를 좀더 상세히 설명하기 위하여 Fig.4를 예로 든다. Fig.4(a)에서와 같이 물체의 질량 행렬을 구성함에 있어 기존의 한 방법은 동등 배열을 이용한다. 반면에 본 논문에서 이용된 객체지향 데이터 모델에서는 Fig.4(b)에서와 같이 각 물체가 각 물체에 관련된 데이터를 포함하고 있으며 각 객체가 질량행렬을 갱신하여 가지고 있다. 시스템 질량 행렬을 구성하기 위해서는 각 물체에 각 물체의 질량행렬을 조화하여 수행된다. 이와 같이 공통 메모리를 사용하지 않기 때문에 프로그램의 전체적인 구조에 대한 지식이 없이도 새로운 클래스를 정의할 수 있게 된다. 실제 개발과정에서 새로운 클래스 개발자가 프로그램의 전체 구조에 대한 지식이 없이도 단시간 내에 클래스를 정의하고 수치해석 객체와의 통합을 수행하는 것을 경험하였다.

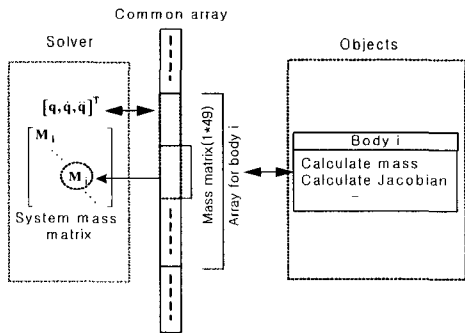


Fig. 4(a) Conventional data model

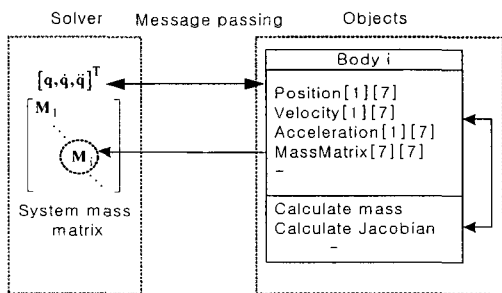


Fig. 4(b) Object-oriented data model

4. 적용

본 논문에서 제시한 방법으로 해석한 결과를 보기 위해서 자동차 엔진의 연소모델에 관한 시뮬레이션 예제를 수행하였다. 검증방법으로는 기존의 범용 다물체 동역학 해석 프로그램인 DADS와 P-DYN의 결과를 비교하였다.

예제는 Fig.5에서와 같은 연소모델로서 4행정사이클이며, 식(7)은 순수 폭발 압력이며, r 은 크랭크축의 길이, A 는 피스톤의 단면적이다. K 는 압축비이며, 실린더안의 부피는 식(8)로 구하며, X 는 피스톤이 상사점으로부터 이동한 거리이다. 실린더안의 압력은 크랭크 축의 각도 θ 에 의해서 식(9)~(12)와 같이 구한다. Table 1, 2는 연소모델의 동역학 모델을 보여준다.

Body	Mass(kg)	I_{xx} (kgm ²)	I_{yy}	I_{zz}
Block	5.0	20.0	0.05	15.02
Rotor	1.399	1.524	1.291	0.836
Connecting-rod	0.253	0.399	0.372	0.0349
Piston	0.643	0.457	0.506	0.653

Table 1. Inertia properties of the compressor

Bodies	Fixed Crank, Crank Axle Connecting-rod, Piston
Translational joint	Fixed Crank-Piston
Revolute joint	Fixed Crank-Crank Axle
Spherical joint	Crank Axle-Connecting-rod
Universal joint	Connecting-rod-Piston

Table 2. Dynamic Model

실린더 압력은 이상기체로 가정하고 펌핑 로스 및 다른 손실은 없다고 가정하고 가장 일반적인 오토 사이클을 이용하여 구했다.

$$P_{clear} = \frac{(k-1) \cdot 2k \cdot r}{V_{clear} (1 - P_{CY}^{1-k})} P_{me} \quad (7)$$

$$V_{CY} = V_{clear} + A \cdot X \quad (8)$$

1) $0 \leq \theta \leq \pi$ 일 경우 :

$$P_{CY} = P_{am}(\text{대기압}) \quad (9)$$

2) $\pi < \theta \leq 2\pi$ 일 경우 :

$$P_{CY} = P_1 \left(\frac{V_1}{V_{CY}} \right)^k = P_{am} \left(\frac{V_{clear} + 2r \cdot A}{V_{CY}} \right)^k \quad (10)$$

3) $2\pi < \theta \leq 3\pi$ 일 경우 :

$$P_{cyl} = P_3 \left(\frac{V_3}{V_{cyl}} \right)^k = (P_{atm} \cdot \gamma^k + P_{comb}) \left(\frac{V_3}{V_{cyl}} \right)^k \quad (11)$$

4) $3\pi < \theta \leq 4\pi$ 일 경우 :

$$P_{cyl} = P_{atm} \quad (12)$$

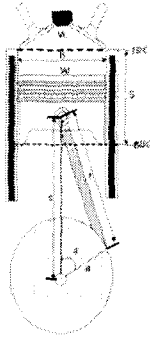


Fig.5 Combustion model example

결과데이터는 Fig. 6 와 Fig. 7 에서 보여주고 있다. 기존의 범용 다물체 해석 프로그램인 DADS 와 비교 검증하였다. 피스톤의 수직(Z)변위와 고정된 크랭크축의 Z축 반력을 보여주고 있다.

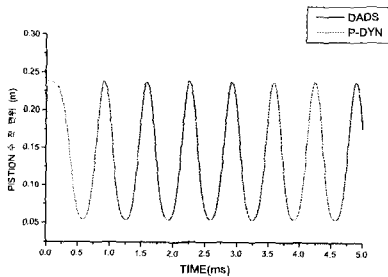


Fig. 6 피스톤 수직 방향 변위

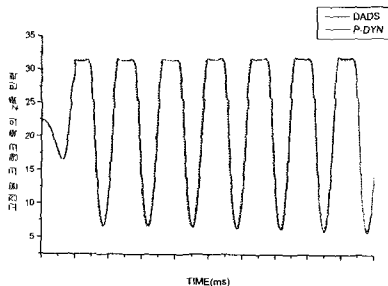


Fig.7 고정된 크랭크축 Z축 반력

5. 결론

본 논문에서는 객체지향 데이터 모델을 이용하

여 다물체 동역학 해석 시스템 개발 방법을 소개하였다. 이를 통하여 다물체 요소들의 수정 및 교환성, 분산개발성의 장점을 확인하였고, 사용자 중심의 프로그램으로서 개발방향을 소개하였다. 결과적으로 물리적 시스템의 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 소프트웨어 개발시 객체지향 데이터 모델링 개념을 이용하는 것이 합리적이라 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 주력산업의 고부가가치화 사업 “웹기반 범용 동력전달계 성능 해석 시스템 개발”과제의 연구비로 수행되었음을 밝히며 본 연구의 지원에 대하여 감사드립니다.

참고문헌

1. <http://www.adams.com>
 2. <http://www.lmsintl.com>
 3. <http://www.simpack.de>
 4. <http://www.functionbay.com>
 5. 김정호, 조철훈, 김승조, "객체지향기법에 의한 네트워크 환경에서 유한요소법의 분산병렬처리의 구현," 한국항공우주학회 논문집, 제 23 권 제 1 호, pp.97-106, 1995.
 6. 원영식, 서진국, 박영식, 최희욱, "PC 용 객체지향 구조해석 프로그램 개발," 전산구조공학 논문집, 제 5 권 제 4 호, pp.125-132, 1992.
 7. 김홍국, 이주영, 김재준, 이병해, "구조해석에서 객체지향 방법론의 도입," 전산구조공학 논문집, 제 8 권 제 3 호, pp.123-133, 1995.
 8. 윤팔주, 이상준, 선우명호, "객체지향 프로그래밍 기법을 이용한 엔진제어시스템에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제 8 권 제 3 호, pp.98-109, 1995.
 9. 영경진, 홍금식, 이교일, "가솔린 엔진/자동변속기 시스템의 객체지향형 모델," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 4 권 제 4 호, pp.534-542, 1998.
 10. 정병용, 조동일, "객체지향 방식의 프로그래밍과 차량 파워 시스템," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 2 권 제 2 호, pp.127-132, 1996.
 11. Otter, M., Elmqvist, H., and Cbllier, F.E., "Modeling of Multibody Systems with the Object-Oriented Modeling Language Dymola," Nonlinear Dynamics 9, pp. 91-112, 1996.
 12. Kecskemethy, A., and Hiller, M., "An Object-oriented Approach for an Effective Formulation of Multibody Dynamics," Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 115, pp. 287-314, 1994.
- Kecskemethy A., Lange, C., and Grabner, G.,