

# 폐쇄된 계의 장동 힘에 의한 이동장치의 컴퓨터 시뮬레이션 모델에 관한 연구

## (A study on the computer simulation model of the closed moving system using the nutation force )

정병태 (Byung Tae Chung)<sup>1)</sup>

### 요약

폐쇄된 계의 닫힌 운동을 회전운동으로 실현하는 것 중 수평운동은 코리올리시스힘[2], 가로힘에 의해서 나타날수 있는 반면 모터의 위치에 수직으로 발생하는 닫힌 운동이 장동 힘에 의해 발생되는 장동운동이다. 장동운동은 수직 닫힌 운동이며 그 수식을 구하여 수식 모델로 하고 컴퓨터 시뮬레이션 모델로 쓰기 위해 수식 모델로부터 시뮬레이션 데이터와 실제 장치의 데이터를 비교 검토 한후 첨가되는 변수 요소를 정하였다. 그 결과 중력장에서 마찰계수와 모터의 극수에 관계되는 부하에 대한 에너지 불균형 요소가 변수로 첨가된다. 이 시뮬레이션은 그래픽 게임을 실제와 같은 물리법칙으로 적용할 수있다.

### ABSTRACT

The closed movement produced vertically on the position of a motor is a nutation movement produced by a nutation force, while the horizontal movement can be shown by the coriolis force and the transverse force of realizing that the closed movement of the closed system is to be rotation motion. The nutation movement is a vertical closed movement and by searching the equation which becomes an equation model, after comparing the simulation data from the equation model with data of a real device to use it into the computer simulation model, the additional variable elements were decided. As the result, the energy imbalance element is added as a variable about load which is relevant to friction coefficient and pole of a motor in the gravitational field. The simulation can be applied as a real physical law of the graphic game and haptic program.

논문접수 : 2005. 5. 15.

심사완료 : 2005. 6. 10.

---

1) 정회원 : 인천전문대학 컴퓨터 정보과 교수

\*본 연구는 인천전문대학 교내 연구비 지원에 의한 논문임

### 1. 서 론

물체이동 방법에는 열린 운동과 닫힌 운동[1] 2가지로 볼 수 있다. 최근까지 특허가 난 이동형 폐쇄계[3]는 코리올리 힘[2]을 이용하였으나, 그 힘이 마치 열린 운동이 되는 힘처럼 해석되어 특허[3]를 획득하였으나, 실체는 닫힌 운동을 일으키는 힘으로 폐쇄계의 질량중심(CM)만 이동하는 현상[12.13.14]이다. 자이로스코프를 이용하는 모든 장치에서 장동운동은 바람직하지 않는 운동으로 역시 닫힌운동을 일으키는 현상이다. 본 논문에서는 오히려 그 운동이 최대화 되도록 하여 액츄에이터로 이용 하여, 지금까지 소개된 운동보다 그 장치가 가장 간단하고 회전각속도에  $w^2$ 에 비례하게 나타남으로 닫힌 운동 하는 액츄에이터로 이용하기에 적합하다. 이러한 힘은 고전역학에서는 내력또는 거짓힘[2]이라 하여 쓸모없는 힘으로 알려졌다.

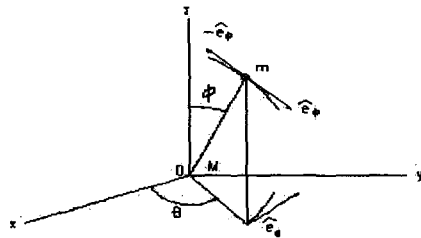
본 연구는 외력 없이 폐쇄계 내에서 장동력(일명 ;세로 힘  $f_b$ )의 발생으로 닫힌 운동을 만드는 기술적 백터 수식 모델을 제시하여 해석하고 데이터를 구한 후 컴퓨터 시뮬레이션으로 이용함을 목적으로 한다.

### 2. 회전운동의 비 관성 닫힌 운동 이론

폐쇄된 계내에서 회전운동에서 장동력은 회전 질량의 순간 중심[4]과 관계되어, 비관성계에 요인이 된다. 순간 중심 발생은 코리올리 힘과 가로 힘을 발생하듯이 장동 힘도 역시 회전 질량의 순간 중심이 나타나서, 관성 좌표계와 비관성 좌표계의 사이 시차[5]를 두고 작용 반작용 하는 데서 기인 된다. 폐쇄된 계내에서 강체의 회전 운동에 의한 비 관성 닫힌 운동을 만드는 방법은 코리올리스 힘[1]을 만드는 방법, 각 가속도에 의한 가로 힘[6]을 만드는 방법 있으나, 그림 [1,2]의 장동 운동을 만드는 방법으로도 가능하다.

관성 운동은 뉴턴의 제1법칙을 만족할 때의 운동이며 닫힌 운동은 그림 [3]과 같이 힘이

$\Delta t$  초 동안  $+F, -F$ 로 발생 할 때만 즉  $\Delta t$ 초 동안만 작용되는 결과로 얻어진 운동이 닫힌 운동이다.



[그림 1] 구좌표 계  
[Fig.1] Spherical coordinates

[그림 2]. 장동 힘 발생 모델  
[Fig.2]The model of the nutation force production

운동의 종류 중 관성 운동은  $\Delta t$ 초 동안 계에 힘[9,10,11]을 가하면

$$\int^{\Delta t} f dt = P \tag{1}$$

이 되고 p를 다시 적분하면

$$\int_0^{\infty} P dt = \infty \tag{2}$$

즉 무중력 진공에서 무한히 진행 한다. 만일  $\Delta t$  초 동안 시차를 두고  $+F, -F$  작용되는 힘이 있으면

$$\int^{\Delta t} f[\delta(t)-\delta(t-\Delta t)] = F[u(t)-u(t-\Delta t)] = \bar{F}(\Delta t) \quad (3)$$

로 되어 이것이 곧 닫힌 운동이 된다.

$$\int^{\Delta t} \bar{F}(\Delta t) dt = C = m\Delta l \quad (4)$$

로  $c \neq 0$  이 되어 계 내에서  $m$  인 질량이 거리  $\Delta l$  만큼 이동하는 결과가 된다.

그림 1에서 좌표에서의 질량  $m$  에 대한 운동 방정식과 단위 벡터의 미분[7]은

$$\text{Position : } \bar{\rho} = \rho \hat{e}_\rho \quad (5)$$

$$\text{Velocity : } \bar{v} = \dot{\rho} \hat{e}_\rho + \rho \dot{\phi} \hat{e}_\phi + \rho \dot{\theta} \sin \phi \hat{e}_\theta \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Acceleration: } \bar{a} = & (\ddot{\rho} - \dot{\rho}^2 - \rho \dot{\theta}^2 \sin^2 \phi) \hat{e}_\rho \\ & + (2\dot{\rho}\dot{\phi} + \dot{\rho}\ddot{\phi} - \rho \dot{\theta}^2 \sin \phi \cos \phi) \hat{e}_\phi \\ & + (2\dot{\rho}\dot{\theta} \sin \phi + 2\rho \dot{\phi}\dot{\theta} \cos \phi + \rho \ddot{\theta} \sin \phi) \hat{e}_\theta \quad (7) \end{aligned}$$

$$\dot{\hat{e}}_\rho = \dot{\phi} \hat{e}_\phi + \dot{\theta} \sin \phi \hat{e}_\theta \quad (8)$$

$$\dot{\hat{e}}_\theta = -\dot{\theta} \sin \phi \hat{e}_\rho - \dot{\theta} \cos \phi \hat{e}_\phi \quad (9)$$

$$\dot{\hat{e}}_\phi = -\dot{\phi} \hat{e}_\rho + \dot{\theta} \cos \phi \hat{e}_\theta \quad (10)$$

이때  $\phi = \text{const}$  이고  $\omega = \text{const}$  이면

$$\bar{a} = -\rho \dot{\theta}^2 \sin \phi \cos \phi \hat{e}_\phi \quad (11)$$

값만 취하는데  $\hat{e}_\phi$  성분이 장동운동을 만드는 장동 힘으로  $\hat{e}_\theta$  [16] 성분과 유사하게 시차가 있다고 본다. 그림 [3]에서 관성계와 회전계간의 작용 반작용이 짧은 시간 동안 시차를 갖는다. 그 원인은 질량  $m$  에  $icM$ (순간중심)이 존재 하고 물체의 질량  $M$  와 질량  $m$  간에 작용 반작용하는 하는 힘이 시차가 있기 때문이다. 장동 힘은

$$\dot{\hat{e}}_\theta \times \dot{\hat{e}}_\rho = -\rho \dot{\theta}^2 \sin \phi \cos \phi \hat{e}_\phi \quad (12)$$

식 (12)의 단위 벡터들의 미분값이 회전성분의 결과로 RCM(회전중심)이 계의 총질량중심(TCM)에 일치하지 않을때 즉  $icM$  이 생기기 때문이다.

[그림 3] z 방향 장동 임펄스 힘 발생도

[Fig.3] The diagram of the production of the nutation impulse force in the Z direction.

### 3. 장동 힘을 이용한 비 관성 닫힌 운동의 시뮬레이션 모델

그림 1, 2에서 장동운동 발생 모델에서 Z방향의 장동 힘을 구하기 위해

$$f_b \bar{\delta}(\tau) = f_b^M \cos \phi \delta(t) - f_b^m \cos \phi \delta(t-\tau) = 0 \quad (13)$$

로 두고 그림[3]의 닫힌 운동을 구하면

$$\int_0^t f_b \bar{\delta}(\tau) dt = P \bar{U}(t) \neq 0 \quad (14)$$

이고 이식을 다시 적분하여 다시 질량 거리량 [8]을 구하면

$$\int^t P \bar{U}(t) dt = C = m\Delta l \quad (15)$$

이다 .z방향 이동거리는

$$Cz = -\rho \dot{\theta}^2 \sin \phi \cos \phi \hat{e}_\phi \quad (16)$$

이 된다.



[그림 4] 캡슐형 실제 이동 장치

[Fig.4] A real movement device of the capsule form

그림[4] 의  $m=2g$  , 물체  $M+m= 26g$  , 캡슐의 이동거리  $L_{TCM}$  보존 방정식은

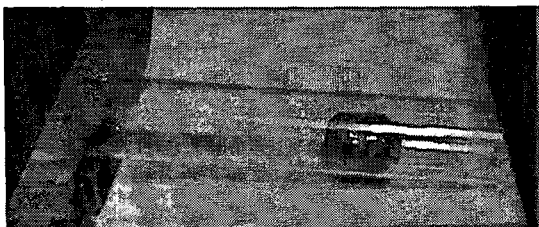
$mCz=(M+m)L_{tcm}$  의 관계로 보존되어야 한다. 실험 결과  $C_z$  는 마찰 계수  $h$ 와 모터의 회전 불균형에 관계되는 계수  $n$ 을 고려해야 되므로

$$c_z = hn\rho\omega^2 \cos\phi \sin\phi \quad (17)$$

로 둔다. 식 (17) 은 그림[5] 의 실험에서 내경 40mm  $\phi$ 의 아크릴 관이 기울기 5도 정도의 관 내에서 올라가는 방향으로 캡슐이 7초 동안 20회 평균  $L_{tcm} \approx 0.3m$  이동한 결과이다. 캡슐의 이동 거리에 대한 수식 모델에서 마찰계수 $h$ 는 실험결과 약0.4이고  $n \approx 0.002$  은 상기 보존식으로부터 구한 것으로 모터의 회전수가 높아지면 원하는 정확한 제어가 사실상 힘들게 되어 보존 장이 생기는 결과로 보존 장은 계의 질량 중심 (CM)을 고정하게 되어 계는 이동을 방해 받게 된다. 이것은 모터의 극수에도 관계되고 회전이 올라가면 작아지는 수에 관계되는 계수 임이 많은 실험결과로 알 수 있었다. 그림 [2,4]에서 질량  $m$ 의  $\phi$  는 45도로 하고 실험한 모터의 회전수는 약 10000rpm 이다. 따라서 캡슐이 닫힌 운동으로 시뮬레이션 할 수 있는 수식 모델은

$$L_{TCM} = \frac{m\rho\omega^2 \cos\phi \sin\phi h n}{M+m} \quad (18)$$

식 (18)과 같다. 이것은  $\omega$  에 따라서  $n$ 도 변하고 같은 시간에 이동 거리도 달라진다. 그러나 주어진 질량 및 회전수 와 아크릴 관내에서 식(18)은 90% 이상 잘 맞는다.



[그림 5] 관 내 에 있는 실제 캡슐 장치  
[Fig.5]The real movement capsule device in the pipe

#### 4. 결론

폐쇄된 계에서 장동 운동을 이용 하는 것은 그 계의 CM을 닫힌 운동 시키는 방법이다. 닫힌 운동은 중력장과 외력에 영향이 있을 시 또 다른 운동 특성을 만들 수 있다. 본 논문의 장동 힘을 이용한 폐쇄계의 CM 위치이동 현상은 새로운 비 관성 동역학 System의 시뮬레이션 모델[8,16]에 해당 된다고 볼 수 있다. 실험 시 중요 한 것은 그림 [4]와 같이 캡슐형 실제 이동 장치가 외력에 민 감히 영향을 받기 때문에 캡슐 내에서 제어 되어야 하므로 초소형 무선 수신기 (RC)가 내장되어 제어할 필요가 있다.

결론적으로 관내에서 이동 체의 장동 힘을 이용한 수식 모델은 모터의 회전 불균형에 기인 하는 계수 $n$ 과 관내 마찰계수 $h$ 가 고려되어야 컴퓨터 시뮬레이션 수식 모델로 쓸 수 있다. 계수  $n$ 은 모터의 종류와 제어에 많은 연구가 필요 하다. 장동힘의 수식모델은 시뮬레이션 데이터를 수집 하여 플레쉬나 응용 프로그램에 쉽게 적용 할 수있다. 그 응용으로 관내의 바퀴나 다리가 없는 이동 로봇의 컴퓨터 시뮬레이션 또는 햅틱 프로그램[17 ]에 적용 할 수 있다

#### 참고 문헌

- [1] Byung-tae chung "The Effect of Nonconserved Movement at the Relation between ICM and Coriolis Force of Rigid Body in the Closed System." Proceedings of the KSAS Spring Annual Meeting 2002 The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 2002. 4.12. pp568-571
- [2] 高在杰 "力學 " 請文閣pp214,1993
- [3] Mukherjee et al." Simple Motion Planning Startegies for Spherobot: A Spherical Mobile Robot,", IEEE., Dec.1999. pp.2132-2137,
- [4] Ferdiand P. Beer, E. Russell Johnston "Mechanics for Engineers ,DYNAMICS"

- pp598-600,1990
- [5] Byung-tae chung "A New method of Enforced CM Movement For A Dynamically Fully Closed System in the Outer Space "Proceedings of the KSAS Spring Annual Meeting 1996.4.27. pp405-408
- [6] Byung-tae chung "The Analysis of the Pulsed Rectilinear Movement by the Angular Acceleration" 2002 Spring Conference of the Korea Society Industrial Information Systems 2002.6.15-16 PP353-355
- [7] Richard C. Dorf " The Engineering Handbook "1996 by CRC press, Inc. pp 111-115
- [8] 정병태 "물체의 충돌시 질량 중심의 위치 이동 효과의 컴퓨터 그래픽 표현" 한국 컴퓨터 산업교육학회 논문집 2001.6.24
- [9] 최성진 "역학" 북스힐 ,1999,,pp353
- [10] 주해호, 김기일 "동력학" pp67, 형설출판, 1994
- [11] 박상준 , 고신관, 주광태, 신영호, 공 편저 "대학일반물리학" 정훈 출판사, pp91-92, 1995
- [12] Li, Z., and Canny, J. "Motion of Two Rigid Bodies with Rolling Constraint" ]IEEE Transactions on Robotics and Automation. vol.6, No.1, pp.62-72, 1990.
- [13] Koshiyama, A., and Yamafuji, K. "Design and Control of all Direction Steering Type Mobile Robot", International Journal of Robotics Reserch, vol, 12, No.5, pp.411-419, 1993
- [14] Brown, Jr., H.B., and Xu, Y., "A Single-Wheel, Gyroscopically Stabilized Robot" IEEE Robotics & Automation Magazine, Sep. 1997
- [15] Marcelo Alonso, Edward J. Finn, "PHYSICS" ADDISON-WESLEY, pp301, 1992
- [16] 정병태 "코리올리스 힘을 이용한 폐쇄된 계의 컴퓨터 시뮬레이션에 관한 연구" 한국 컴퓨터 산업교육학회 논문집 vol 5, no.6, June 2004
- [17] 대한 기계학회 "2001년도 2월 동역학 및 제어부분 동계워크숍 논문집 " 2001.2

정 병 태



'68- '75 : 광운대학교 전자  
공학과(공학학사)

'78-'81 : 고려대학교 대학원  
전자공학과 (공학석사)

'96-'99 : 한양대학교 대학원  
전자 통신과 박사과정 수료)

'74-'76 : 주식회사 흥전사  
개발부 계장 (초고주파 필터

개발)

'76- '78 : 남미산업 개발과장 (자동 기계  
전자제어 개발)

'78- '79 : 경남기업 기전부 사원 (바레인 근무)

'82-'85 : 인천전문대학 전자과 전 임

'85- '87 : 인천전문대학 전자계산과 조교수

'87-'88 : 인천전문대학 전자계산 소장

2005 : 현 인천전문대학 컴퓨터 정보과 교수