

<論 文>

# 기호방정식을 이용한 3차원 연쇄기구 운동해석의 일반화

김 호 룡\*

(1985년 9월 25일 접수)

## Generalized Kinematic Analysis for the Motion of 3-D Linkages using Symbolic Equation

Ho Ryong Kim

**Key Words:** Generalized Kinematic Analysis(운동학적 해석의 일반화), Symbolic Equation(기호 방정식), 3-D Linkage(3차원 연쇄기구), Coordinate Transformation(좌표변환), Euler Angle(Euler 각)

### Abstract

Based on the Hartenberg-Denavit symbolic equation, which is one of equations for the kinematic analysis of three dimensional(3-D) linkage, a generalized kinematic motion equation is derived utilizing Euler angles and employing the coordinates transformation. The derived equation can feasibly be used for the motion analysis of any type of 3-D linkages as well as 2-D ones.

In order to simulate the general motion of 3-D linkages on digital computer, the generalized equation is programmed through the process of numerical analysis after converting the equation to the type of Newton-Raphson formula and denoting it in matrix form. The feasibility of theoretically derived equation is experimentally proved by comparing the results from the computer with those from experimental setup of three different but generally employed 3-D linkages.

### 기 호 설 명

$A_i$  :  $i$  번째 대우의 Hartenberg-Denavit 행렬

$a_i$  :  $z_i$ 로부터  $z_{i+1}$ 까지의 수직거리

$\bar{A}_i$  :  $\bar{\theta}_i$ 에 대해서 계산된  $A_i$

$C$  : 원통대우

$n$  : 링크의 전체 수

$q_i$  :  $i$  번째 대우의 변수

$\dot{q}_i$  :  $i$  번째 대우의 상대속도

$\ddot{q}_i$  :  $i$  번째 대우의 상대가속도

$Q_0$  : 회전대우의 연산자 행렬

$R$  : 회전대우

$S$  : 구면대우

$S_i$  :  $+z_i$ 방향으로 측정한  $x_i$ 와  $x_{i+1}$  사이의 거리

$\alpha_i$  :  $+x_{i+1}$ 을 중심으로 반시계 방향으로 측정한  $z_i$ 와  $z_{i+1}$  사이의 각

$\theta_i$  :  $+z_i$ 를 중심으로 반시계 방향으로 측정한  $x_i$ 와

\* 정회원, 연세대학교 기계공학과

$x_{i+1}$  사이의 각  
 $\bar{\theta}_i$  :  $\theta_i$ 의 초기추정치  
 $d\theta_i$  :  $\theta_i$ 의 오차

1. 서 론

연쇄기구(linkage)는 이제까지 2차원 연쇄기구 즉 4절연쇄기구, 슬라이더크랭크기구, 제네바분할기구, 등에 국한되어 집중적으로 연구되어 왔기 때문에 2차원 연쇄기구의 운동해석법은 일반적으로 잘 알려져 있다<sup>(1,2)</sup>. 그러나 현대기계의 발달로 인한 생산성 향상 및 대량생산 요구를 만족시키기 위해 현대기계운동이 보다 복잡하게되고, 그 복잡운동을 만족시키기 위한연쇄기구가 필요하게 됨은 물론이다. 이에 3차원 연쇄기구의 필연성이 대두 되었고, 이 기구의 운동해석이 요구됨에 따라 많은 사람들이 3차원 연쇄기구를 연구 개발해오고 있다<sup>(3-6)</sup>.

Reuleaux<sup>(7)</sup>가 첫번으로 기호방정식(Symbolic equation)을 이용하여 저차대우(lower pair)기구의 운동 해석을 했으나 일반화 시키지는 못했다.

한편 현대 공학설계의 방향이 시스템의 성능을 보다 정확히 산출하기 위한목적으로 해석적 모델(analytical model)을 점차 정밀화 하는 동시에 그 극부적으로 적용된 산출방법을 일반화해 나갈으로써, 해석의 정밀화 및 일반화를 꾀하고 있다.

따라서 본 연구에서는 앞의 여러 연구자들이 시도한 3차원 연쇄기구의 운동해석법을 비교 검토하고, 이중 기호방정식을 이용하여 3차원 연쇄기구의 운동해석을 일반화 하고자 한다. 또 품질향상, 대량생산(mass production) 및 생산가 절하를 위해 복잡화 되고 있는 현대 기계의 운동요구를 만족시키기 위해, 기본해석모델인 2차원 연쇄기구에서 3차원연쇄기구로 정밀화 하면서, 가능한 모든 3차원 연쇄기구의 운동을 해석하기 위한 일반해석법을 개발하므로써 해석을 일반화시키고, 그것을 컴퓨터로 시뮬레이션하여 운동해석을 실행성있고 신속하게 수행토록 하며, 컴퓨터 결과를 실제모형 즉 구면 4-R 연쇄기구, R-S-S-R 기구 및 3C-R 기구등을 제작하여, 실제결과와 비교 검토하므로써 개발된 일반운동해석법의 타당성을 실험적으로 입증하려 한다.

2. 일반운동방정식의 유도

2.1 변위방정식

임의의 연쇄기구가 주어졌을 때 Hartenberg-Denavit

의 기호방정식으로부터 표현되는 운동행렬 방정식은 식(1)과 같다. 이식의 좌표계는 Fig. 1과 같이 설정하며 식을 일반화하는 과정에서 컴퓨터에 의한 수치해석 방법이 이용가능 하도록 행렬식형태로 전개한다.

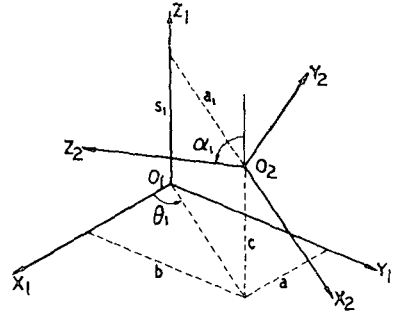


Fig. 1 Hartenberg-denavit coordinate transformation

$$R_1 \begin{pmatrix} a_1 \\ \alpha_1 \\ \theta_1 \\ S_1 \end{pmatrix} R_2 \begin{pmatrix} a_2 \\ \alpha_2 \\ \theta_2 \\ S_2 \end{pmatrix} \dots R_i \begin{pmatrix} a_i \\ \alpha_i \\ \theta_i \\ S_i \end{pmatrix} \dots R_n \begin{pmatrix} a_n \\ \alpha_n \\ \theta_n \\ S_n \end{pmatrix} = I \quad (1)$$

기구를 구성하는 대우중 다자유도를 갖는 대우는, 1 자유도를 갖는 회전대우와 직진대우의 결합으로 구성 되어 있으므로(예컨대 3차원 구면대우는 3개의 회전 대우로, 2차원 원통대우는 회전대우와 직진대우 각각 1개로 구성되어 있음) 먼저 회전 대우에 대하여 해석을 한 후 직진대우를 포함하는 기구의 해석으로 일반화한다.

Revolute 대우의 경우 Fig. 1의 좌표변환에서 Euler angle에 의한 축의 회전으로부터 얻은 변환행렬[A]을 이용하여 식(1)을 초기추정치( $\bar{\theta}$ )와 오차( $d\theta$ )의 합으로 표시하면,

$$A_1(\theta_1)A_2(\bar{\theta}_2+d\theta_2)\dots A_i(\bar{\theta}_i+d\theta_i)\dots A_n(\bar{\theta}_n+d\theta_n)=I \quad (2)$$

여기서,

$$A_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_i \cos \theta_i & \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i \\ a_i \sin \theta_i & \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i \\ s_i & 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix}$$

한편,

$$\begin{aligned} A_i(\theta_i) &\cong \bar{A}_i + \left[ \frac{\partial A_i(\theta_i)}{\partial \theta_i} \Big|_{\theta_i = \bar{\theta}_i} \right] d\theta_i \\ &= \bar{A}_i + Q_{\theta} \cdot \bar{A}_i \cdot d\theta_i \\ &= (I + Q_{\theta} \cdot d\theta_i) \bar{A}_i \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$Q_{\theta} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \text{도함수 연산자 행렬}$$

$\bar{A}_i :=$  초기추정치 ( $\bar{\theta}$ )의 변환행렬

이므로, 식 (2)를 식 (3)의 형태로 바꿔쓰고  $d\theta_i, d\theta_i$  이상의 고차항을 무시하여 정리하면 변위의 근사식인 행렬 운동방정식 (4)를 얻는다.

$$\sum_{i=2}^n B_i \cong I - B_1 \tag{4}$$

여기서,

$$B_1 = A_1 \prod_{i=2}^n \bar{A}_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{121} & B_{122} & B_{123} & B_{124} \\ B_{131} & B_{132} & B_{133} & B_{134} \\ B_{141} & B_{142} & B_{143} & B_{144} \end{pmatrix}$$

$$B_i = \left( A_1 \prod_{k=2}^{i-1} \bar{A}_k Q_\theta \prod_{k=i}^n \bar{A}_k \right) d\theta_i = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{i21} & B_{i22} & B_{i23} & B_{i24} \\ B_{i31} & B_{i32} & B_{i33} & B_{i34} \\ B_{i41} & B_{i42} & B_{i43} & B_{i44} \end{pmatrix}$$

변환행렬  $A_i$ 에서 회전운동성분과 병진운동성분을 분리하고 연산자 행렬의 비대칭성 (antisymmetricity), 회전운동성분  $3 \times 3$  서브행렬 (submatrix)의 직교성 (orthogonality) 및 비특이행렬 (nonsingular matrix)의 특성을 이용하여 식 (4)를 정리하면 다음과같은 9개의 선형 연립방정식을 얻는다. [자세한 유도과정은 참고문헌 (9) 참조]

$$[M] \{D\} \cong \{V\} \tag{5}$$

여기서,

$$[M] = \begin{pmatrix} B_{221} & B_{321} & \dots & B_{i21} & \dots & B_{n21} \\ B_{231} & B_{331} & \dots & B_{i31} & \dots & B_{n31} \\ B_{241} & B_{341} & \dots & B_{i41} & \dots & B_{n41} \\ B_{222} & B_{322} & \dots & B_{i22} & \dots & B_{n22} \\ B_{232} & B_{332} & \dots & B_{i32} & \dots & B_{n32} \\ B_{242} & B_{342} & \dots & B_{i42} & \dots & B_{n42} \\ B_{233} & B_{333} & \dots & B_{i33} & \dots & B_{n33} \\ B_{343} & B_{343} & \dots & B_{i43} & \dots & B_{n43} \\ B_{244} & B_{344} & \dots & B_{i44} & \dots & B_{n44} \end{pmatrix}$$

$$\{D\} = \begin{pmatrix} d\theta_2 \\ d\theta_3 \\ \vdots \\ d\theta_i \\ \vdots \\ d\theta_n \end{pmatrix}, \quad \{V\} = \begin{pmatrix} -B_{121} \\ -B_{131} \\ -B_{141} \\ 1 - B_{122} \\ -B_{132} \\ -B_{142} \\ 1 - B_{133} \\ -B_{143} \\ 1 - B_{144} \end{pmatrix}$$

한편  $i$ 번째 대우가 직진 대우이면 행렬운동방정식의 형태는 회전대우의 경우와 같으며 대우변수만  $S_i$ 가 된다.

### 2.2 속도방정식

어느 한순간에서의 식 (2)의 시간 도함수는,

$$\frac{dA_1}{dt} \prod_{i=2}^n A_i + A_1 \frac{dA_2}{dt} \prod_{i=3}^n A_i + \dots + \left( \prod_{i=1}^{j-1} A_i \right) \frac{dA_j}{dt} \cdot \left( \prod_{i=j+1}^n A_i \right) + \dots + \prod_{i=1}^{n-1} A_i \frac{dA_n}{dt} = 0 \tag{6}$$

한편 임의의 대우변수를  $q_i$ 라 하면  $q_i$ 의 시간도함수는  $\dot{q}_i$ 이므로

$$\frac{dA_i}{dt} = \frac{\partial A_i}{\partial q_j} \frac{dq_j}{dt} = Q_i A_i \dot{q}_i \tag{7}$$

여기서,

$Q_i = Q_\theta$ 와 같은 도함수연산자 행렬.

따라서 식 (6)은,

$$\sum_{i=2}^n B_i \dot{q}_i = -B_1 \dot{q}_1 \tag{8}$$

여기서,

$$B_i = \prod_{k=1}^{i-1} A_k Q_i \prod_{k=i}^n A_k$$

$$B_1 = Q_1 \prod_{k=1}^n A_k = Q_1 I = Q_1$$

식 (8)이 속도방정식이며 이식은 변위방정식 (4)와 유사 형태로써 변위방정식의 경우처럼 식 (8)로부터 다음과같이 9개의 선형연립방정식을 얻는다.

$$[M] \{D_v\} = \{C_v\} \dot{q}_1 \tag{9}$$

여기서

$M = B_i$  행렬의 대각선 이하에 해당되는 성분 (식 (5)의  $[M]$ 과 같음)

$D_v =$  미지량  $\dot{q}_i$ 의 벡터

$C_v =$  입력축이 회전 대우 또는 직진대우에 따라 결정되는 벡터.

### 2.3 가속도 방정식

$B_i$ 의 시간에 대한 도함수  $\dot{B}_i$ 를 도함수 연산자  $Q$ 로 표시하면

$$\frac{dB_i}{dt} = \dot{B}_i = Q_1 \prod_{k=1}^{i-1} A_k Q_i \prod_{k=i}^n A_k \dot{q}_1 + A_1 Q_2 \prod_{k=2}^{i-1} Q_i \prod_{k=i}^n A_k \dot{q}_2 + \dots + \prod_{k=1}^{i-2} A_k Q_{i-1} \prod_{k=i-1}^n A_k \dot{q}_{i-1} + O + \prod_{k=1}^{i-1} A_k Q_i Q_i \prod_{k=i}^n A_k \dot{q}_i + \dots + \prod_{k=1}^{i-1} A_k Q_i \prod_{k=i}^{n-1} A_k Q_n A_n \dot{q}_n \tag{10}$$

이때 각각들은

$$B^j = \prod_{k=1}^{j-1} A_k Q_j \prod_{k=j}^{i-1} A_k Q_i \prod_{k=i}^n A_k \dot{q}_i \tag{11}$$

로 되고 단위행렬  $\left(\prod_{k=j}^n A_k \prod_{k=1}^{j-1} A_k\right)$ 을 식(11)에 대입하면

$$B' = \left(\prod_{k=1}^{j-1} A_k Q_j \prod_{k=j}^n A_k\right) \left(\prod_{k=1}^{j-1} A_k Q_i \prod_{k=i}^n A_k\right) \dot{q}_i = B_j B_i \dot{q}_i \quad (12)$$

로 단순화된다.

식(12)를 식(10)에 대입하면

$$\dot{B}_i = \sum_{k=1}^n B_k B_i \dot{q}_k \quad (13)$$

가 된다.

속도방정식(8)을 시간에 대해 미분하면

$$\sum_{i=2}^n B_i \ddot{q}_i + \sum_{i=2}^n \dot{B}_i \dot{q}_i = -Q_1 \ddot{q}_1 \quad (14)$$

식(13)을 식(14)에 대입하고 그룹(group)별로 정리하면,

$$\sum_{i=2}^n B_i \ddot{q}_i = -Q_1 \ddot{q}_1 + \sum_{i=2}^n \left[ \left( \sum_{k=1}^i B_k \dot{q}_k + \underline{B}_1 \dot{q}_1 + \sum_{k=2}^{i-1} B_k \dot{q}_k \right) B_i \dot{q}_i \right] - B_i \dot{q}_1 \left( \sum_{i=2}^n B_i \dot{q}_i \right) \quad (15)$$

식(15)에서 밑줄친 항들은 편의상 더해주고 뺀 부분들이다.

$$\text{한편 } W_i = B_1 + \sum_{k=2}^i B_k \dot{q}_k \quad (16)$$

$$\left( \dot{q}_i = \frac{\dot{q}_1}{\dot{q}_1} = \text{정규화된 속도} \right)$$

이라하면, 가속도방정식(15)는

$$\sum_{i=2}^n B_i \ddot{q}_i = -Q_1 \ddot{q}_1 + \left[ Q_1 Q_1 + \sum_{i=2}^n (W_{i-1} + W_i) B_i \dot{q}_i \right] \dot{q}_1^2 \quad (17)$$

이 된다.

식(17)은 속도방정식(8)과 같은 형태로써 변위방정식의 경우처럼 식(17)로부터 다음과같이 9개의 선형연립방정식을 얻는다.

$$[M] \{D_a\} = \{C_v\} \dot{q}_1 + \{C_a\} \dot{q}_1^2 \quad (18)$$

여기서,

$D_a$ =미지량  $\dot{q}_i$ 의 vector

$C_a$ =식(17)의 [ ]내의 요소로 이루어진 vector

### 3. 컴퓨터시뮬레이션과 시뮬레이션에 의한 결과

3차원 연쇄기구의 운동, 즉 각대우에서의 변위, 속도, 가속도는 행렬운동방정식의 반복연산에 의해 구할 수 있도록 유도하였다. 시뮬레이션 프로그램은 서브루틴들로 구성된 패키지(package)형태로 작성하였다.

각 운동방정식에서 최종적으로 얻은 선형 연립방정식의 해는 IMSL 루틴 내의 서브루틴 LINV3F를

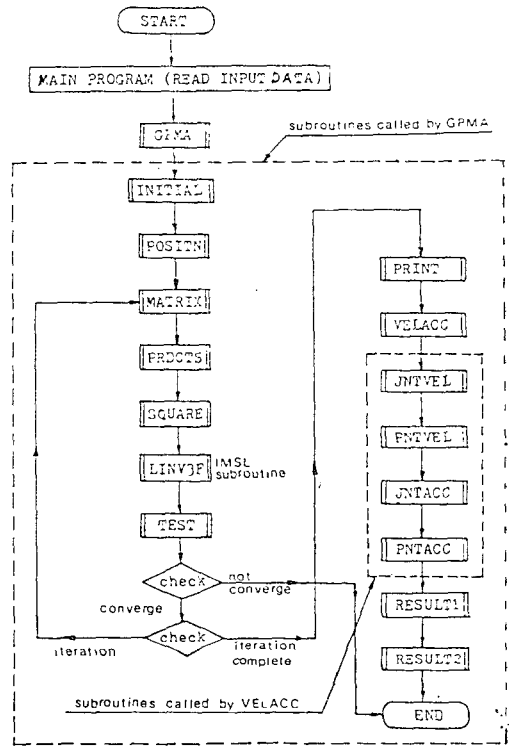


Fig. 2 Flow chart of program for the kinematics of 3-dimensional mechanism

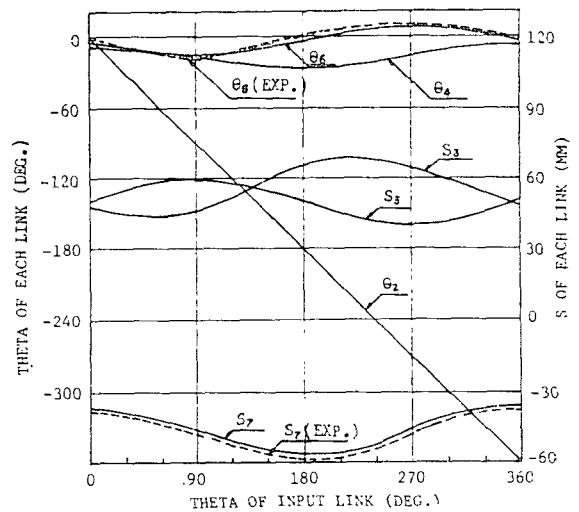


Fig. 3 Displacements of spatial RCCC mechanism

사용하도록 하였으며, 각 계산과정의 중간결과들을 알아볼 수 있는 서브루틴을 첨가하였다. 또한 반복과정의 결과, 오차항  $d\theta$ 가 0으로 수렴하는가의 여부를

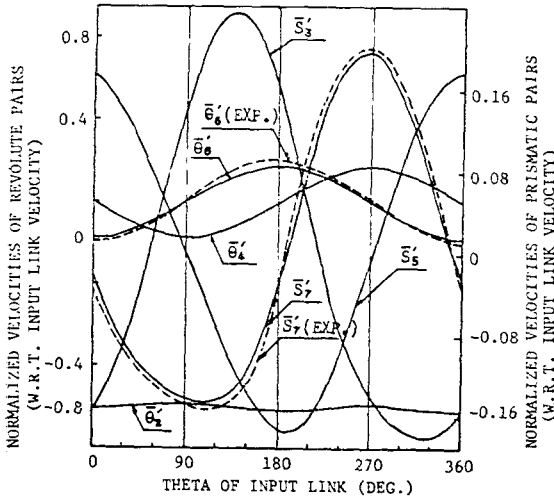


Fig. 4 Velocities of spatial RCCC mechanism

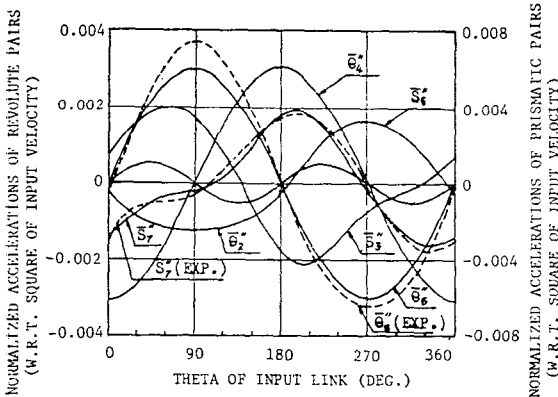


Fig. 5 Accelerations of spatial RCCC mechanism

검증하는 서브루우틴을 첨가 함으로써, 수렴하지 않을 경우 입력값들을 조정할 수 있도록 하였다. 전체적인 프로그램의 흐름도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서, 점선부분은 서브루우틴 VELACC에 의해 호출되는 서브루우틴들로서, JNTVEL은 대우의 정규속도  $q_i$ , PNTVEL은 속도행렬, JNTACC은 대우의 정규가속도  $\ddot{q}_i$ , PNTACC은 가속도행렬을 각각 계산한다.

본 연구에서는 일반 3차원 기구중 가장 보편적으로 사용되며 일반적인 3차원 기구 3개 즉, 4-R, R-S-S-R, 3C-R 기구를 예로써 사용했으며, 본 논문에서는 3C-R 기구의 시뮬레이션 결과를 Fig. 3, 4, 5에 각각 도시하였다.

### 4. 실험

본 연구에서는 상기한 3개의 다른 연쇄기구를 실험 대상으로 하였는데, 그 이유는 상기 3개의 연쇄기구가 일반적으로 사용되는 3차원 연쇄기구이며, 다른 연쇄기구들은 상기 연쇄기구의 대우들로써 조합되기 때문이다. 따라서 이들 3차원 연쇄기구의 실험치와 이론치를 비교해서 모든 일반 3차원 연쇄기구 해석에 대한 상기 일반이론의 적용 가능성 및 타당성을 입증할 수 있다.

#### 4.1 3차원 연쇄기구의 제작

##### (1) R-S-S-R 3차원 연쇄기구

각 링크는 길이가 조정될 수 있도록 Link들을 나사로 연결하였다. 연결부 Link는 50 mm에서 100mm에 까지 조절 가능하게 제작하였다. 구면 대우(spherical pair)부분은 최대 회전 범위가  $120^\circ$ 되는 로드엔드베어링(Rod-end-Bearing)을 사용하였다.

##### (2) 4-Revolute 구면기구

입력, 연결부 및 출력 링크의 길이를 각각 100, 300, 200mm로 하여 반경이 200mm인 곡물을 만들었다. 작동시 원활한 회전을 위해 Link의 연결부분에 2mm 두께의 와셔를 사용하였다. 한편, 링크표면이 구면을 이루기 위해서는 표면의 반경이 200 mm인 곡물을 이루어야 하며 이러한 제작이 매우 어려워 가능한 한 링크의 너비를 작게하여 10 mm로 하였다.

##### (3) R-C-C-C 3차원 연쇄기구

이 기구는 원통(cylindrical)대우로 인한 미끄럼 마찰력 때문에 상당한 저항력을 받게 된다. 원통 부분은 연강을 사용하여 드릴로 구멍을 내고 마찰면을 매끄럽게 하여 마찰력을 줄였다. 또한 슬라이드부분은 강도가 큰 스테인레스 강을 이용하여 1,000 번 사포로 정밀 다듬질 하였다.

#### 4.2 실험장치

Fig. 6과 같은 회로로 구성된 EE-SB5V형 광전소자를 사용하여 링크가 임의의 위치에서 빛을 반사하는 시간을 측정, 출력 링크의 속도를 구하였으며, 검출물체가 빛을 반사하는 시간을 측정하기 위해서 출력단자 OG를 X-Y 기록계에 연결하여 광전자로 부터 나오는 신호를 기록하였다. 본 실험에서는 Hewlett-Packard 7015B X-Y 기록계를 사용하였다. 한편 2750 rpm, 45W의 전동기에 감속장치를 설치하여 60 rpm으로 감

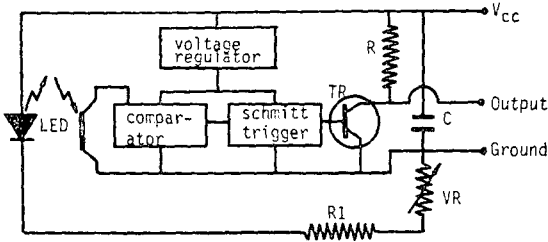


Fig. 6 Circuit for the photo-electric micro-sensor used in experiment

속시키고, 풀리의 지름비를 3:2로 하여 기구를 40 rpm으로 회전시켰다. 전동장치는 큰 동력의 전달보다는 정확한 감속비를 목적으로 하므로, A형 V벨트를 사용하였다. 상기와 같이 구성된 전체적인 실험장치는 Fig. 7, 8과 같다.

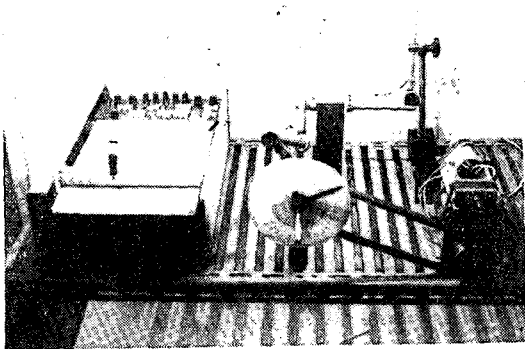


Fig. 7 Experimental set-up for the velocity measurement of R-S-S-R mechanism

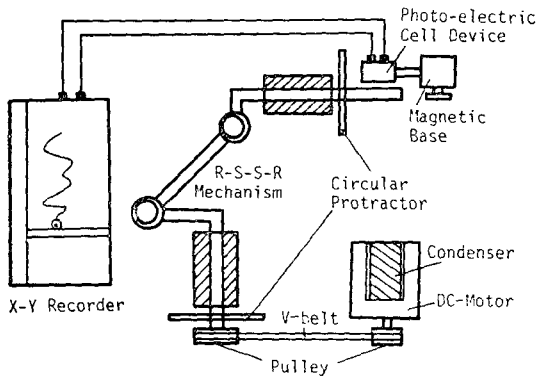


Fig. 8 Schematic diagram of experimental set-up

5. 실험방법

본 실험에서 변위는 입력력을 5°씩 회전시키면서 측정했고, 속도 측정시 검출물체로 1×10mm의 형광용 종이를 사용했으며 광소자의 투광용 발광은 적외선으

로써 정지상태에서 실험한 결과 흑색스폰지가 빛을 반사하지 않으므로 형광용 종이를 흑색 스폰지 위에 부착하고 이것을 입력및 출력 링크의 같은 높이에 고정했다. 그리고 자석받침(magnetic base)에 부착된 광선소자를 검출물체의 5mm 안에 고정하여, 링크의 회전속도에 따라 변하는 시간을 기록기에 파형으로 기록했으며, 기록된 파형으로부터 최소점까지의 길이를 측정해서 얻은 속도는 링크의 선속도가 되지만 입력축에 대한 출력축의 정규화된 속도를 구함으로써 각속도를 구했다. 가속도는 실험으로 직접 구하기가 어려우므로 5° 간격으로 측정한속도 실험장치를 수치미분하여 값을 얻고 이때 생기는 오차를 줄이기 위해 Least Square 방법을 적용, 8차의 다항식으로 곡선맞춤(curve fitting)하여 간접적으로 얻었다.

6. 실험결과 및 고찰

이론해의 경우에서의 마찬가지로 건설한 3개의 3차원 기구의 운동을 실험측정 했으며 본 논문에서는 R-3C 기구의 이론결과와 실험결과를 비교하여 Fig. 9, 10, 11에 도시하였다. 한편 3개 기구에 있어 변위, 속도및 가속도의 이론치와 실험치사이의 편차를 비교하여 Fig. 12, 13, 14에 도시하였다. 편차를 비교한 결

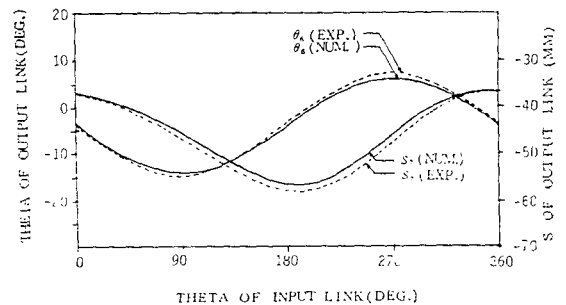


Fig. 9 Displacements of spatial RCCC mechanism

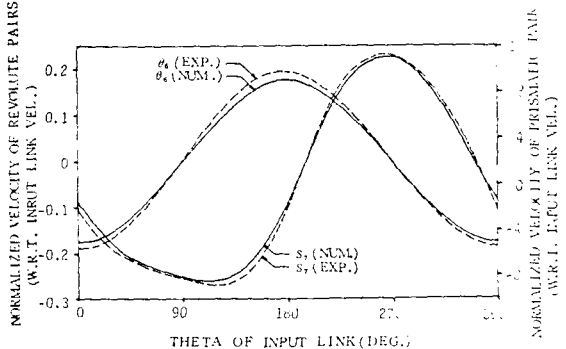


Fig. 10 Velocities of spatial RCCC mechanism

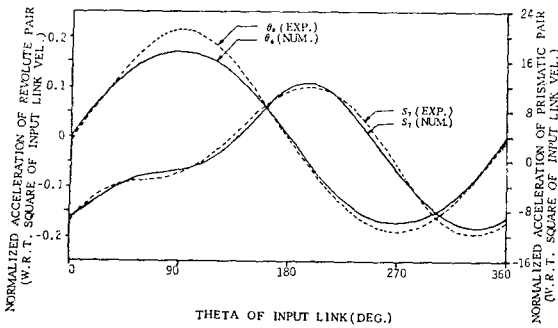


Fig. 11 Accelerations of spatical RCCC mechanism

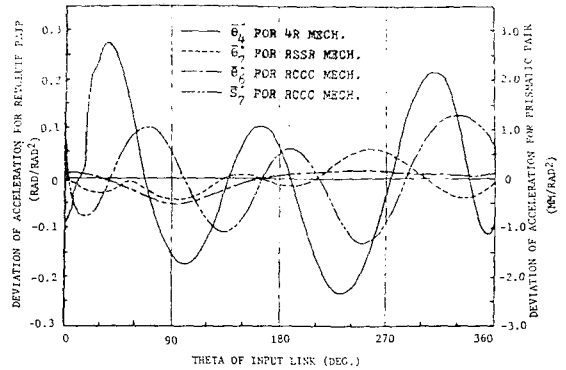


Fig. 14 Deviations between experimental results and numerical results for acceleration

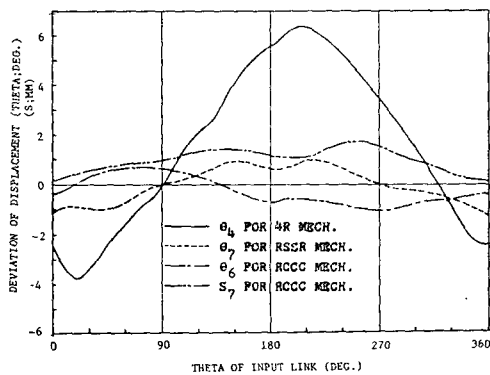


Fig. 12 Deviations between experimental results and numerical results for displacement

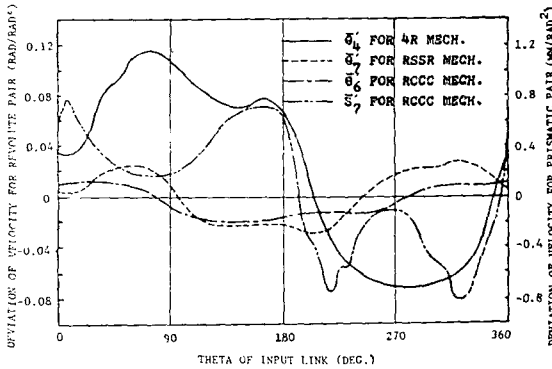


Fig. 13 Deviations between experimental results and numerical results for velocity

과, 변위의 최대편차는 7% 이내, 속도의 최대편차는 10% 이내에서 이들 값이 잘 일치 하였으며, 가속도의 최대편차는 15% 미만임을 알 수 있다.

본 연구에서 변위는 5°간격으로 입력축을 회전시키면서 측정하였으며 속도는 X-Y 기록계에 기록된 파형으로부터 Fig. 15와 같이 최소점까지의 길이 X를 측정하여 구했다. 즉, 입력력 파형에서의 길이가 a, 출력축 파형에서의 길이가 b 라면, 출력축의 정규화된 속도

V는

$$V = \frac{b}{a} \tag{9}$$

가 된다.

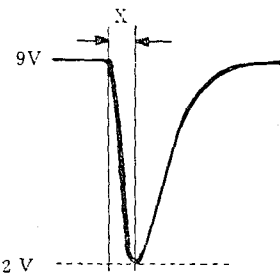


Fig. 15 How to measure the time from a voltage wave recorded

실제 제작한 실험장치는 이론에 의한 기구와 약간의 오차가 존재하는데 이 오차는 조립시의 부정확성, 측정시 오차 및 Link의 상대운동을 결정하는 기구 대우와 조인트사이의 틈새에 의한 것이다. 또한 링크에 작용하는 힘이 링크를 변형시킬 수 있고, 이러한 변형은 온도의 변화나 그 밖의 영향으로 생길 수도 있다. 따라서 상기한 실험치와 이론치 사이의 오차는 이러한 불확실성 요인에 기인 되었다고 생각한다.

### 7. 결 론

(1) 3 가지 다른 3 차원 연쇄기구의 이론치와 실험치의 편차 비교에 있어, 최대 변위차는 7% 이내 최대 속도편차는 10%, 최대 가속도편차는 15% 이내로서 실험치와 이론치의 결과가 잘 일치하였다.

(2) 1의 결과로 부터, 유도된 일반 운동방정식은 평면연쇄기구를 포함하여 임의의 모든 3 차원 연쇄기구 운동해석에 타당성 있게 적용할 수 있다.

후 기

본 연구는 1983년도 한국과학재단의 연구지원에 의하여 수행되어졌으며, 이에 깊은 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

- (1) F. Freudenstein, "Structural Error Analysis in Plane Kinematic Synthesis", J. of Eng. for Ind., Trans., ASME, Series B, Vol. 81, Feb., pp. 15~22, 1959
- (2) K.C. Gupta, A. Banerjee and R.L. Fox, "Automated Kinematic Analysis of Planar Mechanism", ASME, Paper No. 72-Mech-90, 1972
- (3) A.T. Yang and F. Freudenstein, "Application of Dual-Number Quaternion Algebra to the Analysis of Spatial Mechanisms", J. of Appl. Mech., Vol. 31, Trans. ASME, Vol. 86, Series E, pp. 300~308, 1964
- (4) D. Kohli and A.H. Soni, "Kinematic Analysis of Spatial Mechanisms via Successive Screw Displacements", ASME, Paper No. 74-DET-88
- (5) C.Y. Ho and K.C. Hsei, "Tensor Method of Designing Spatial Four-Bar Mechanisms", Proc. of Int. Cong. on the Theory of Machines and Mechanisms, Zahopane, Sept., 1978
- (6) J.J. Uicker, Jr. "Dynamic Behavior of Spatial Linkages," ASME, Paper No. 68-Mech-5
- (7) F. Reuleaux, "Theoretische Kinematik", Vieweg und Sohn, Braunschweig, Germany, Vol. 2, 1900
- (8) J. Denavit and R.S. Hartenberg, "A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms based on Matrices", J. of Appl. Mech., Vol. 22, Trans. ASME, Vol. 77, pp. 215~221, 1955
- (9) 김호룡 "3차원 연쇄기구의 운동해석법이 일반화 및 그 컴퓨터 시뮬레이션 언어의 개발", 한국과학재단 연구보고서, p.104, 1985