

# 에일러론 링키지 해석을 통한 작동기 변위와 조종면 변위의 상관관계 규명

이석천\* · 이상종\*

## Investigation of Kinematic Relation Between Actuator and Control Surface Deflection Using Aileron Linkage Analysis

Sugchon Lee\* · Sang-Jong Lee\*

### ABSTRACT

An actuator should be added to a existing control linkage to make manned aircraft to unmanned. But it is quiet difficult to synchronize actuator with control surface because non-linear error necessarily occurs when four-bar linkage acts in three dimensional motion. In addition, in point of controller design view, while a real-time model needs the control surface deflection as its input, controller needs the actuator command as its output. Hence, the relation between both should be investigated. In this paper, the mathematical relation between actuator and control surface deflection investigated by kinematic analysis of a plant aircraft. The performance margin of the selected actuator also was verified.

Key Words: Linkage Kinematics, Control Surface, Position Analysis, Torque Transmittant

### 1. 서 론

유인항공기를 무인화하기 위해서는 비행조종 링키지에 조종면 작동기를 추가하여야 하는데, 이 때 작동기 변위와 조종면 변위를 동조시키는 것은 매우 어렵다.[1] 기계적인 비행조종계통의 필수 요소인 4절링크는 3차원 운동을 하게 되면 비선형 오차가 필연적으로 발생하기 때문이다.[2] 고익기 형태의 소형항공기에서 에일러론 링키지는 조종사의 탑승공간 확보를 위해 Fig.

1과 같이 복잡하게 구성되기 때문에 4절링크의 3차원 운동이 불가피해진다.

또한, 비행제어기 설계 관점에서 보면, 실시간 운동모델은 조종면 변위를 입력으로 하는 반면 비행조종컴퓨터의 출력은 작동기 명령이 되기 때문에 이 둘의 관계를 수학적으로 규명하는 과정이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 무인화 대상인 CTLS 항공기의 무인화를 위해서 장착된 조종면 작동기의 링키지 해석을 통하여 작동기 변위와 조종면 변위와의 수학적 관계를 규명하였으며, 선정된 Moog 935 조종면 작동기의 성능여유를 링키지 해석과정을 통하여 검증하였다.

\*2012년 8월 7일 접수 ~ 2012년 9월 14일 심사완료

• 정회원, 한국항공우주연구원  
연락처자, E-mail: sugchou@kari.re.kr

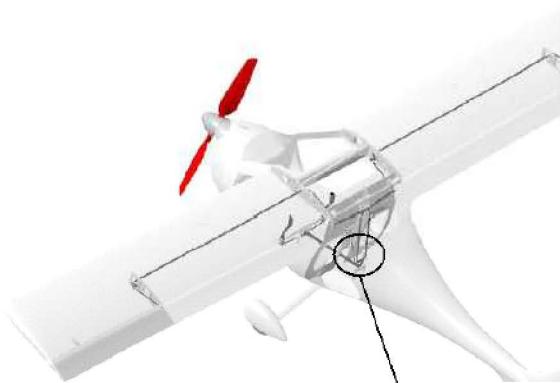


Fig. 1 Aileron Control System of CTLS

## 2. 본 론

### 2.1 관절 정의 및 링크 분해

대상 에일러론 링크는 Fig. 2와 같이 세 개의 4절링크로 표현할 수 있다.

- 링크1: 작동기레버(A-B)와 조종간레버(C-D)
- 링크2: 조종간레버(C-D)와 플랩믹서(E-M)
- 링크3: 플랩믹서(E-M)와 벨크랭크(J-K)

에일러론 링크는 좌우가 대칭이므로 계산작업을 줄이기 위해서 우측 에일러론에 대해서만 해석을 수행하였으며, 벨크랭크로부터 에일러론까지의 링크는 drag-follower 형상이므로 토크전달 손실이 없기 때문에 [1] 해석과정에서 생략하였다.

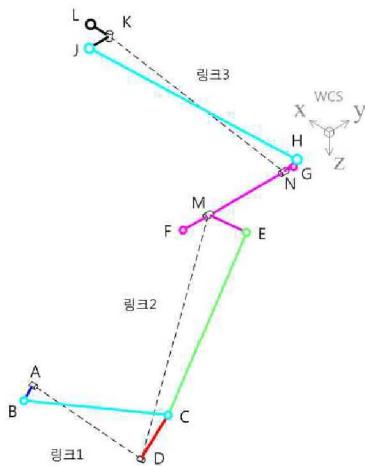


Fig. 2 Free body diagram

전체 링크를 표현하기 위한 WCS 좌표계를 임의의 지점에서 항공기 동체좌표계와 같은 방향으로 정의하였으며, 각각의 링크를 지역좌표계에서 해석한 후 WCS 좌표계에서 조립하였다.

링크들의 운동을 시뮬레이션하기 위해서 관절 A부터 관절 N까지 13개의 관절을 정의하였다. 이 중 관절 A, D, K는 회전운동만 하고 위치는 변하지 않는 고정점이며, B, C, E, H, J는 링크 운동에 따라 위치가 변화하는 이동점이다. 관절 F, G, M, N은 플랩각의 함수로 위치가 변하는 이동점이지만, 본 해석과정에서는 플랩 0도 위치에 고정된 고정점으로 간주하였다.

모든 관절들의 좌표행렬  $P_0$ 는 설계 도면으로부터 다음과 같이 조사되었다.

Table 1. Matrix  $P_0$ 

$P_0$	x	y	z
$A_0$	206.11	-176.81	589.05
$B_0$	200.09	-196.81	623.17
$C_0$	153.16	63.00	773.17
$D_0$	134.21	0.00	880.63
$E_0$	79.58	153.46	128.86
$F_0$	140.62	65.46	122.59
$G_0$	140.62	435.46	122.59
$H_0$	129.96	413.46	62.08
$J_0$	440.98	413.46	7.81
$K_0$	440.98	458.46	7.81
$L_0$	485.30	458.46	0.00
$M_0$	140.62	153.46	122.59
$N_0$	140.62	413.46	122.59

[단위: mm]

### 2.2 3차원 4절링크의 위치해석

본 논문에서는 부호 혼동의 여지가 없고 계산량이 적은 대수 알고리듬을 사용하여 링크해석을 수행하였다. 대수 알고리듬은 점의 좌표를 계산하기 때문에 애니메이션이 용이한 장점이 있다.[3]

또한 링크해석을 단순화하기 위해서 다음의 가정을 하였다.

- 모든 관절들의 기계적인 유격 무시
- 모든 관절들의 기계적인 마찰 무시
- 레버와 푸시로드의 기계적인 응력변형 무시
- 동력전달 손실 무시

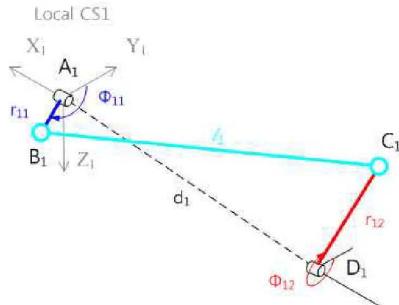


Fig. 3 Local Coordinate System for Link 1

첫 번째 링크의 좌표점을 Eq. 1과 같이 평행이동 및 방향코사인 행렬  $C_w^1$ 로 좌표변환하여 지역좌표계1(Fig. 3)에 표현할 수 있다.

$$P_1 = C_w^1 [P_o - A] \quad (1)$$

점  $B_1$ 의 좌표는 입력각  $\phi_{11}$ 으로부터 Eq. 2와 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} B_{1x} \\ B_{1y} \\ B_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ r_{11}\cos\phi_{11} \\ r_{11}\sin\phi_{11} \end{bmatrix} \quad (2)$$

나머지 링크들의 길이는 Eq. 3과 같다.

$$\begin{aligned} l_1^2 &= (C_{1x} - B_{1x})^2 + (C_{1y} - B_{1y})^2 + (C_{1z} - B_{1z})^2 \\ r_{12}^2 &= (D_{1x} - C_{1x})^2 + (D_{1y} - C_{1y})^2 + (D_{1z} - C_{1z})^2 \end{aligned} \quad (3)$$

구속조건  $B_{1x} = 0$ ,  $C_{1x} = D_{1x}$ 을 적용하면 Eq. 3을 Eq. 4와 같이 단순화 시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} l_1^2 &= D_{1x}^2 + (C_{1y} - B_{1y})^2 + (C_{1z} - B_{1z})^2 \\ r_{12}^2 &= (D_{1y} - C_{1y})^2 + (D_{1z} - C_{1z})^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Eq. 4를  $C_{1y}$ 에 대해 정리하면 Eq. 5와 같다.

$$C_{1y} = S_1 - \frac{(D_{1z} - B_{1z})}{(D_{1y} - B_{1y})} C_{1z} \quad (5)$$

Eq. 5를 Eq. 4에 대입하여  $C_{1z}$ 에 대해 정리하면 Eq. 6과 같다.

$$C_{1z} = \frac{-Q_1 \pm \sqrt{Q_1^2 - 4P_1R_1}}{2P_1} \quad (6)$$

여기서, 매개변수  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $R_1$ ,  $S_1$ 은 Eq. 7과 같다.

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{(D_{1z} - B_{1z})^2}{(C_{1y} - B_{1y})^2} + 1 \\ Q_1 &= 2 \left[ \frac{(D_{1y} - S_1)(D_{1z} - B_{1z})}{(D_{1y} - B_{1y})} - D_{1z} \right] \\ R_1 &= (D_{1y} - S_1)^2 + D_{1x}^2 + D_{1z}^2 - r_{12}^2 \\ S_1 &= \frac{l_1^2 + d_1^2 - r_{11}^2 - r_{12}^2 - 2D_{1x}^2}{2(D_{1y} - B_{1y})} \end{aligned} \quad (7)$$

출력각  $\phi_{12}$ 는 두 점  $C_1$ ,  $D_1$ 으로부터 Eq. 9와 같이 구할 수 있다.

$$\phi_{12} = \tan^{-1} \frac{(D_{1z} - C_{1z})}{(D_{1y} - C_{1y})} \quad (8)$$

$C_1$ ,  $D_1$ 을 Eq. 10과 같이 WCS로 좌표변환하여 업데이트하였다.

$$P_o = C_w^{1-1} P_1 + A \quad (9)$$

두 번째 링크와 세 번째 링크에 대해서도 같은 방법으로 위치해석을 수행하였다.

### 2.3 속도비와 토크전달율

작동기 변위인 입력각  $\phi_{11}$ 과 전체 링키지의 최종 출력각  $\psi_{32}$ 에 대해서 이산미분법을 사용하여 속도비를 계산하였다.

$$\eta_\omega = \frac{\dot{\psi}_k}{\dot{\phi}_k} = \frac{\phi_{k+1} - \phi_k}{\psi_{k+1} - \psi_k} \quad (10)$$

토크전달율은 동력전달손실이 없다는 가정에 따라 속도의 역수로 표현하였다.

$$\eta_\tau = \frac{1}{\eta_\omega} \quad (11)$$

### 2.4 시뮬레이션 결과

매틀랩을 이용한 시뮬레이션 결과 Fig. 4의 빨간선과 같이 작동기와 조종간 축 사이에 약 5%정도의 비선형성이 존재하는 것으로 나타났

다. 작동기와 조종면 사이에는 Fig. 4의 파란선과 같이 비선형성과 더불어 심한 비대칭성이 확인되었는데, 이는 링크 C-D의 3차원 운동에 의한 특징으로 CTLS 항공기의 고유 특성으로 확인되었다.

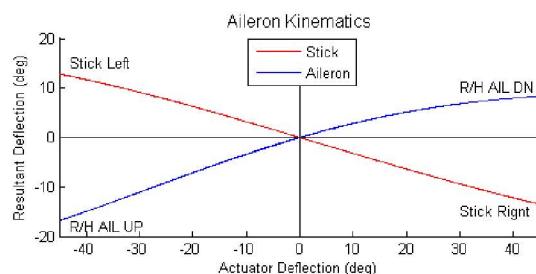


Fig. 4 Deflection Analysis Result

작동기레버의 위치에 따른 속도 및 토크전달을 해석 결과 Fig. 5의 빨간선과 같이 우측에 일러론이 상향일 때 속도비가 0.4배로 가장 빠르게 나타났으며, 하향일 때에는 비선형성에 의해 속도가 느려지는 것을 알 수 있다.

토크전달율은 에일러론 상향에서 최소 2배 이상은 확보가 되는 것을 알 수 있다.

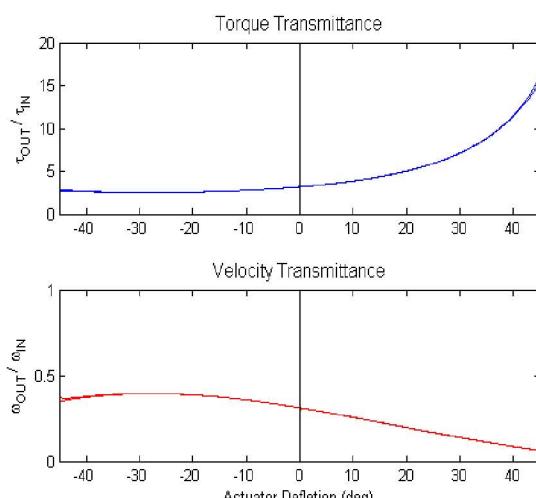


Fig. 5 Transmittance Analysis Result

### 3. 결론 및 고찰

본 연구를 통하여 무인화 대상 항공기의 작동기 변위와 조종면 변위의 상관관계를 수학적으로 규명하였다. 또한 토크전달율을 분석함으로써 선정된 작동기 용량의 적정성을 수학적으로 검증하였다.

또한 작동기 분해능이 조종면 변위에 미치는 영향이 Fig. 6와 같이 조사되었다. 작동기 분해능이 크면 3차원 링크 운동에 의해 조종면 변위의 히스테리시스가 급격하게 증가함을 발견하였다. 그러나 대상 작동기의 분해능인 0.1도에서는 조종면 변위의 히스테리시스가 0.01도로 매우 적음을 확인하였다.

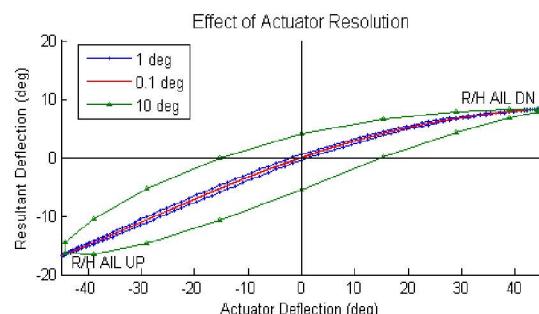


Fig. 6 Hysteresis Curve of Control Surface

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 항공우주부품기술개발사업 “정밀비행시험용 통합기술 개발” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 이석천, 이상종, 성기정, “다중화 작동기의 배치에 따른 작동기 링크의 운동학적 해석”, 한국항공운항학회, 2010년 추계학술대회, KSAF 2010-2017, 2010.
- [2] 이석천, 김재은, 이상종, “3차원 조종면 변위센서 링크의 운동학적 해석을 통한 비선형

- “오차 영향 연구”, 항공우주시스템공학회지,  
제 5권, 제 1호, 2011, pp.1-6.
- [3] John Uicker, Gordon Pennock, Joseph Shigley, “Theory of Machines and Mechanisms,” fourth edition. Oxford University Press., 2010.