

스마트 무인기의 천이 스케줄러 설계개선

Design Update of Transition Scheduler for Smart UAV

강영신*, 유창선(한국항공우주연구원), 안성준(충남대학교)

1. 서론

스마트 무인기 기술개발사업은 산업자원부의 '21세기 프론티어 연구개발 사업'의 일환으로서 수직이착륙과 고속비행을 수행할 수 있도록 그림 1과 같이 틸트로터 형상으로 개발되고 있다.

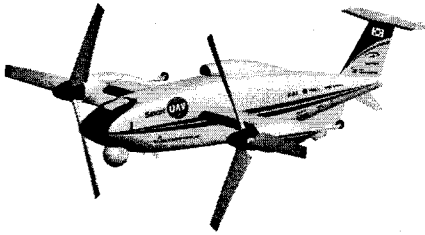


그림 1 SUAV TR-S4 (Airplane Mode)

틸트로터 항공기는 회전익모드로 이륙해서 나셀을 회전시킨 후 고정익모드로 비행하며, 천이과정을 그림 2에 도시하였다. 나셀각은 그림 2에서 도시된 바와 같이 고정익모드를 0°, 회전익모드를 90°로 각각 정의한다.

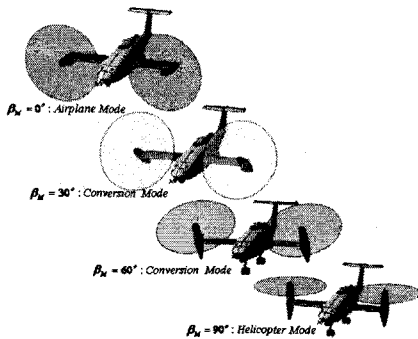


그림 2 SUAV TR-S4 천이 과정

틸트로터 항공기는 회전익모드, 천이모드, 고정익모드로 구분되며, 세 가지 모드에 대한 비

행특성을 모두 포함하는 복잡한 비선형성을 가진 비행체이다. 천이모드는 나셀천이모드와 로터 RPM 천이모드로 각각 구분된다. 이러한 다중 비행형상은 제어기의 설계를 각각의 모드에 대해 최적화 설계를 요구하며, 1단계 사업종료 시 초기 설계안이 도출되었다.[1]

초기스케줄러 설계안에 대해 각 설계그룹으로부터 피드백을 받아서 새로운 기준으로 스케줄러를 재설계하였다. 본 논문은 그림 3에 도시된 CAMRAD II의 해석결과[2]를 바탕으로 TR-S4에 적용된 나셀각, 플랩 및 콜렉티브 피치각에 대한 각 모드별 스케줄러의 개선사항에 대해 기술하였다.

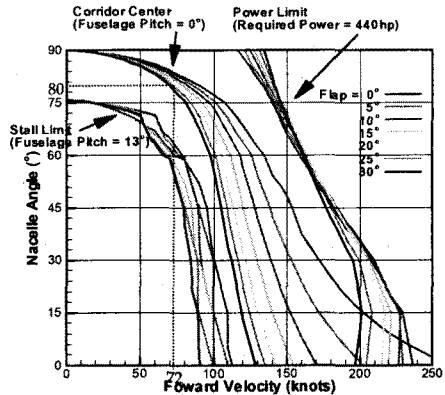


그림 3 CAMRAD II의 천이경로선 해석

2. 각 모드별 스케줄러의 개선

각 모드별 스케줄러는 천이모드를 기준으로 각 모드의 가장자리 조건을 연결하는 것으로 설정하였으며, 다음과 같은 제어기의 설계가 요구된다.

- 1) 나셀 틸트 스케줄러 및 천이경로선 제어기
- 2) 콜렉티브 스케줄러 및 로터 가버너

3) 양력제어를 위한 플랩 스케줄러

KARI에서 개발한 TR-S4 시뮬레이션 프로그램에서 콜렉티브 피치는 Root에서의 값을 나타내며[3], CAMRAD II의 콜렉티브 입력 값은 로터 블레이드 75% 위치에서의 피치 값을 나타낸다. CAMRAD II의 결과를 이용하기위해서 콜렉티브 피치의 기준을 75% 위치에서의 비틀림각을 사용하였다. 로터 중심에서의 콜렉티브 각과의 차이는 -38.3° 이다.[4]

2.1. 천이모드 (나셀각 천이모드)

천이모드의 개선은 CAMRAD II의 해석포인트가 15° 간격이었던 것을 10° 간격으로 재조정하였다.

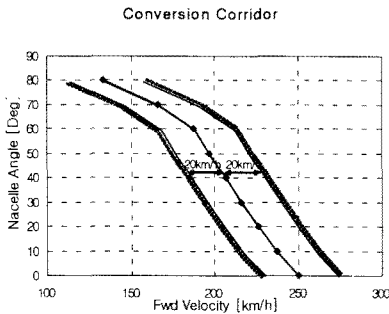


그림 4 천이 경로선의 속도여유(개선)

표 1 천이모드의 스케줄러(개선)

| fwd Velocity (km/h) | Nacelle Angle (deg) | Flap Angle (deg) | Collective Angle (deg) |
|---------------------|---------------------|------------------|------------------------|
| 133 | 80 | 25 | 6.21 |
| 166 | 70 | 25 | 7.52 |
| 188 | 60 | 25 | 9.38 |
| 197 | 50 | 25 | 11.54 |
| 207 | 40 | 25 | 13.66 |
| 216 | 30 | 25 | 15.74 |
| 226 | 20 | 25 | 17.51 |
| 237 | 10 | 25 | 19.10 |
| 250 | 0 | 25 | 20.50 |

나셀천이 모드의 시작은 회전익모드가 종료되는 72kts(=133km/h)에서 시작하며, 나셀천이 동안 플랩각은 25° 를 유지하여 250km/h까지 증속한다. 개선된 나셀천이모드 스케줄러는 표 1에 나타내었다.

천이모드에서의 실속 또는 과도한 추력을 요구하지 않는 범위내에서 안전한 비행을 위해 그림 4와 같이 20km/h의 속도여유를 두고 천이모드를 설계하였으며, 천이 경로선 제어기를

그림 5와 같이 설계하였다.

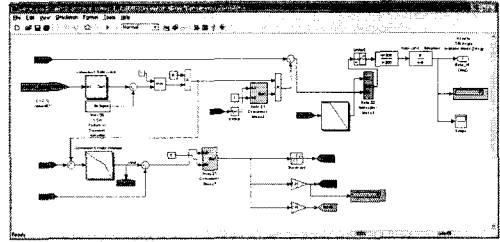


그림 5 천이 경로선 제어기

2.2. 천이모드 (로터 RPM 천이모드)

로터RPM 천이모드는 나셀각이 0° 에 도달후 6초동안 엔진과 로터의 RPM이 80%로 감소되는 구간이다.

고정익모드(4800RPM)의 CAMRAD II 재해석결과를 반영하여 콜렉티브 피치각을 표 2와 같이 개선하였다.

나셀각 천이모드가 종료되면 250km/h 속도에서 6초동안 플랩각은 25° 에서 로이더링을 위한 플랩각 10° 로 감소하고, 자세각은 0° 에서 5° 로 증가한다. 또한 RPM 감소에 따라 추력이 감소하므로 동일 속도를 유지하기위해서 콜렉티브 피치각이 4.5° 증가한다.

표 2 RPM천이모드(6초)의 스케줄러 비교

| | Rotor/Engine RPM | fwd Velocity (km/h) | Collective Angle (Deg) | Flap Angle (Deg) |
|----------|------------------|---------------------|------------------------|------------------|
| 나셀각 천이모드 | 1605 / 6000 | 250 | 20.52(기존) | 25 |
| | | | 20.50(개선) | |
| 고정익 모드 | 1284 / 4800 | 250 | 26.94(기존) | 10 |
| | | | 24.96(개선) | |

회전익과 천이모드시 100% RPM을 유지하고, 고정익모드시에 80% RPM을 유지하도록 로터피치 가버너를 그림 6과 같이 설계하였다.

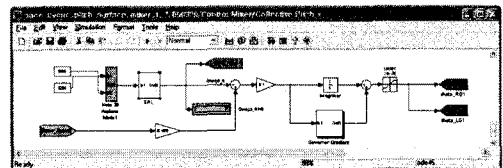


그림 6 로터 피치 가버너 제어기

2.3. 회전익 모드

본 논문의 개선사항이 가장 많은 모드로서 기존의 회전익모드 설계안을 그림 7에 도시하였으며, 다음과 같은 설계개선이 요구되었다.

- 1) 로터하중감소를 위한 회전익 최대속도제한
- 2) 회전익모드의 피치자세가 변화 최소화
- 3) 저속 회전익모드에서 나셀각 90° 유지

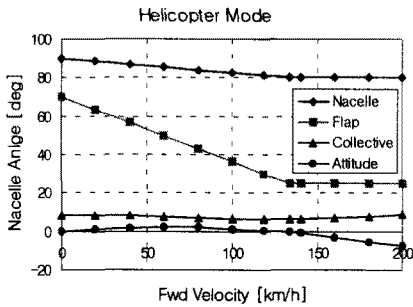


그림 7 회전익모드의 스케줄러(기존)

이러한 요구조건을 만족시키기 위해 그림 8과 같이 나셀틸트각 80°와 90°에서 각각 스케줄러를 설계하였다.

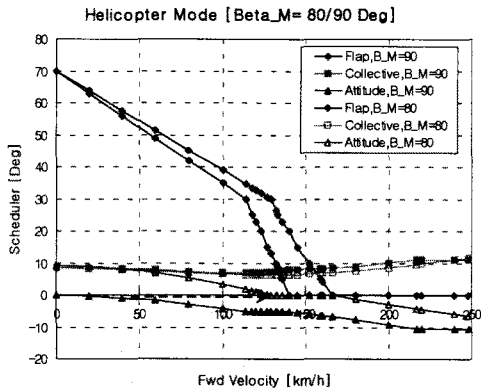


그림 8 나셀각 80°와 90°에서의 스케줄러비교 자세각의 최소화를 위해서 그림 8의 점선 화살표와 같이 피치자세가 $\pm 1^\circ$ 미만에서 유지되는 40km/h까지는 나셀각 90°를 사용하고 나셀각 80°에서 피치자세가 0°가 되는 129km/h까지 속도에 따라 나셀각을 감소시키는 나셀스케줄러를 설계할 수 있다.

또한 천이모드 진입시 속도인 133km/h에서 그림 4의 천이경로선의 속도여유 20km/h를 더한 153km/h를 회전익모드 최대속도로 제한하였다. 이와 같은 회전익모드의 개선된 스케줄러를 그림 9에 도시하였다.

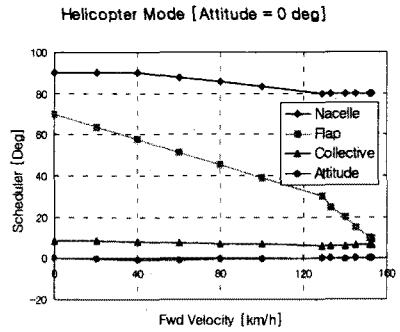


그림 9 회전익모드의 스케줄러(개선)

표 3 회전익 모드의 스케줄러(개선)

| fwd Velocity (km/h) | Nacelle Angle (deg) | Flap Angle (deg) | Collective Angle (deg) | Pitch Attitude (deg) |
|---------------------|---------------------|------------------|------------------------|----------------------|
| 0 | 90 | 70 | 8.49 | -0.03 |
| 20 | 90 | 63.8 | 8.38 | -0.30 |
| 40 | 90 | 57.6 | 8.12 | -0.87 |
| 60 | 87.8 | 51.4 | 7.69 | -0.69 |
| 80 | 85.5 | 45.2 | 7.26 | -0.51 |
| 100 | 83.3 | 39.0 | 6.84 | -0.32 |
| 129 | 80 | 30 | 6.22 | -0.06 |
| 133 | 80 | 25 | 6.24 | 0.05 |
| 140 | 80 | 20 | 6.29 | -0.09 |
| 145 | 80 | 15 | 6.39 | 0.02 |
| 152 | 80 | 10 | 6.55 | 0.01 |
| 153 | 80 | 9.3 | 6.59 | 0.07 |

표 3에서의 속도 129 km/h 는 선형보간시 플랩각이 30°이상의 데이터는 CAMRAD II의 해석결과에 물리적 의미가 없어서 30°를 최대값으로 사용하기 위한 기준값(Break Point)이다.

2.4. 고정익모드

고정익모드는 나셀각이 0°상태에서 엔진 및 로터 RPM이 80%로 유지되는 모드이다.

로터링 속도는 최대 채공시간조건(프로펠러 항공기의 경우 최대 $L^{3/2}/D$ 조건)을 기준으로 플랩각 10°에서 250 km/h가 선정되었으며, 틸트로터의 고속성능을 적극적으로 활용하기 위해 순항속도는 400km/h로 선정하였다.

표 4 고정익모드의 스케줄러(개선)

| fwd Velocity (km/h) | Collective Angle (deg) | Flap Angle (deg) | Pitch Att (deg) |
|---------------------|------------------------|------------------|-----------------|
| 250 | 24.96 | 10 | 4.01 |
| 275 | 26.85 | 5 | 4.19 |
| 300 | 28.58 | 0 | 4.82 |
| 320 | 29.95 | 0 | 3.90 |
| 340 | 31.24 | 0 | 3.12 |
| 360 | 32.43 | 0 | 2.47 |
| 380 | 33.55 | 0 | 1.91 |
| 400 | 34.60 | 0 | 1.44 |
| 420 | 35.57 | 0 | 1.03 |
| 440 | 36.47 | 0 | 0.67 |
| 460 | 37.31 | 0 | 0.36 |
| 466 | 37.55 | 0 | 0.28 |

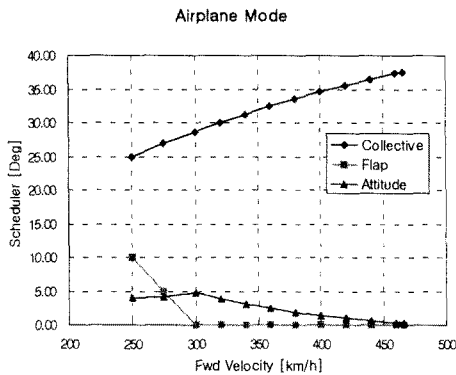


그림 10 고정익모드의 스케줄러(개선)

최대속도는 엔진최대마력인 440HP를 넘지 않도록 466km/h로 제한하였다. 고정익모드에서의 CAMRAD II 해석결과를 개선하여 표 4와 같이 스케줄하였으며 그림 10에 도시하였다.

3. 설계 종합

개선된 나셀, 플랩, 콜렉티브의 스케줄을 모든 속도영역에 대해 종합하면 그림 11과 같다.

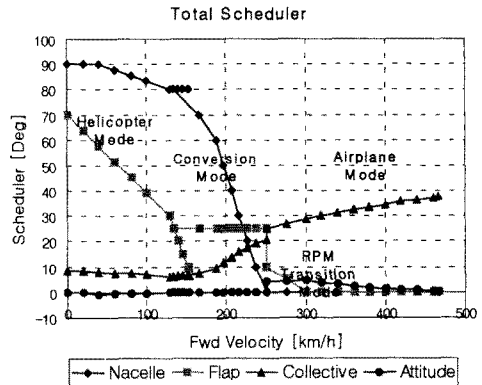


그림 11 전체 비행영역에 대한 스케줄(개선)

4. 결론

본 논문은 스마트 무인항공기의 CAMRAD II 해석결과를 바탕으로 틸트로터 항공기의 전체 비행영역에 대해 개선된 천이스케줄러를 제시하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 기술개발사업(스마트무인기기술개발사업)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 강영신, 김유신, 유창선 “스마트무인기의 천이스케줄러 설계”, 2005 항공우주공학회 춘계학술발표회.
- [2] 김유신, 최성욱, 김재무, “CAMRAD II를 이용한 스마트무인기 전기체 트립해석”, 2004 항공우주공학회 추계학술발표회.
- [3] P. B Harendra, M. J. Joglekar, T. M. Gaffey, R. M. Marr, “A Mathematical Model for Real Time Flight Simulation of The Bell 301 Tilt Rotor Research Aircraft,” NASA CR 114614, 1973.
- [4] 최형식*, 이장호, 김유신, 유창선, 박범진, “틸트로터 항공기 로터모듈 시뮬레이션”, 2004 항공우주공학회 추계학술발표회.