Technical Paper

DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.5.098

고속 비행체의 비행궤적별 유로개방장치 동역학 해석

정성민^{а,*} · 박정배^a

Dynamic Analysis of a Flow Passage Opening Device in Flight Profile of a High-speed Vehicle

Sungmin Jung^{a,*} · Jeong-Bae Park^a

^a The 4th R&D Institute, Agency for Defense Development, Korea *Corresponding author. E-mail: mannerjsm@add.re.kr

ABSTRACT

A flow passage opening device utilizing an acceleration follow-up technique allows fuel to flow continuously through a pressurized fuel tank system. It is very difficult to test the device in a real flight situation because of severe test condition and a cost problem. In this paper, therefore, the results of a basic negative g test conducted by low-speed airplane are compared with RecurDyn simulation. Dynamic behavior of the device in total flight profile of a high-speed vehicle is also analyzed by using RecurDyn to predict its performance.

초 록

가속도추종 유로개방장치는 고속 비행체의 가압식 연료탱크에서 연료가 쏠림현상으로 인해 단절되는 것을 막아 연속적으로 흐르게 한다. 기개발된 이 유로개방장치를 실제 고속으로 시험하는 것은 까다로 운 시험조건과 비용문제로 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 저속 항공기에 탑재해 기본적 인 역중력 시험(Negative-g test)을 수행하고 RecurDyn으로 해석한 결과와 비교하였다. 그리고 고속비 행체의 비행궤적에 따른 유로개방장치의 동역학적 거동을 RecurDyn으로 알아보았다.

Key Words: Acceleration Follow-up(가속도추종), Flow Passage Opening Device(유로개방장치), Flight Profile(비행궤적), RecurDyn(리커다인)

1. 서 론

여러 구획으로 나누어진 가압식 연료탱크의

Received 21 July 2015 / Revised 8 September 2015 / Accepted 14 September 2015 Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 경우 연료의 단절을 막기 위해 특별한 이송장치 가 필요하다[1]. 각 탱크 안의 연료는 비행체의 자세와 가속도에 따라 한쪽으로 쏠리게 되는데, 이 때 쏠려있는 쪽의 입구를 개방하여 연료가 지속적으로 흐르게 하는 장치가 바로 가속도추 종 유로개방장치이다[2,4]. 기개발된 이 유로개방장치는 지상시험을 통해 역중력 상태에서의 구동성능을 확인하였고[3], 동역학 해석 상용프로그램인 RecurDyn을 이용 해 지상시험을 모사하는 시뮬레이션을 수행해 이 해석 프로그램의 유효성을 보여주었다[5].

본 논문에는 유로개방장치를 저속 항공기에 탑재해 기본적인 역중력 시험을 수행하고, 그 결 과를 RecurDyn의 시뮬레이션과 비교한 내용을 실었다. 또한 까다로운 시험조건과 비용문제 등 으로 수행하지 못한 실제 고속비행시험 전에 비 행체 궤적에 따른 유로개방장치의 동역학적 거 동을 RecurDyn으로 해석해 보았다.

2. 본 론

2.1 유로개방장치의 형상과 기능

가속도추종 유로개방장치는 급변하는 연료의 위치를 쫓아가기 위해 중량물 모멘텀을 활용한 다. 이런 중량물(균형추)과 유로개폐판(차단판)을 연결해 어떠한 비행자세와 역중력 구간에서도 연료를 단절없이 이송하고 가압 시 유입되는 가 스를 최대한 차단시킨다. Fig. 1은 유로개방장치 에서 겉을 싸고 있는 하우징을 제외한 나머지 부품들의 3D 형상(위)과 연료의 이송경로(아래, 화살표)를 나타낸다. 연료가 들어오는 쪽에는 4 개의 입구가 있고, 빠져나가는 출구는 1개이다. 비행체의 자세와 가속도에 따라 균형추가 돌아 가고, 그것과 연결된 차단판이 열린 구멍으로 연 료만 장치내부로 들여보내고 다른 쪽의 가스는 차단한다. 각 부품들의 상세 형상과 기능에 대한 설명은 이전 논문[5]에 자세하게 나타나 있다.

2.2 저속 항공기 탑재 시험 결과 비교

역중력 상태에 대응하는 이 장치의 성능이 본 연구의 최대 관심사인데, 이것을 고속의 조건에 서 실제로 시험하는 것은 구현하기 까다로운 조 건과 엄청난 비용으로 인해 많은 어려움이 따른 다. 따라서 저속의 항공기에 탑재해 장치가 동작 하기 시작하는 역중력 구간을 찾아내고, 기본적인 동작성능을 알아보았다. 그리고 RecurDyn으로



Fig. 1 Cross-sectional view of flow passage opening device.



Fig. 2 Comparison of negative-g test results with RecurDyn simulation.

이 시험을 모사하여 두 결과를 비교하였다(해석 과정은 이전[5]과 거의 동일하다).

Fig. 2에는 저속 항공기에 탑재된 장치의 역중 력 시험결과가 나타나 있는데, 위아래로 진동하 는 실선이 항공기가 기동한 수직축 방향의 가속 도이다. 실선 아랫부분에 바 형태의 표시(아래에 on 표시 추가)는 유로개방장치가 역중력에 반응 해 작동했다는 것을 알려준다. 반대로 바 표시가 없는 것은 역중력이 충분하지 않아 장치가 작동 하지 않았다는 것이다. 역중력 상태에서 균형추 가 회전해 위쪽에 위치한 경우를 작동한 것으로 보았다. RecurDyn으로 각 -g 값에 대해 장치의 동작을 시뮬레이션 해보았고, 그 결과로 -0.1 g 에 놓인 가로 점선 아래의 g에서 장치가 정상적 으로 작동하였다.

Table 1에 저속 항공기 시험결과와 RecurDyn 해석내용이 더 이해하기 쉽게 비교되어있다. 표에 나타나있듯이, 저속 항공기 시험에서는 유로개방

Acceleration (g)	Results from low-speed airplane test	Results in simulation
-0.1	No data	Not working
-0.26	Not working	Working
-0.31	Not working	Working
-0.44	Working	Working
-0.54	Working	Working
-0.81	Working	Working
-0.95	Working	Working
-1.15	Working	Working

Table 1. A chart of negative-g test results and RecurDyn simulation.

장치가 -0.31 g까지 작동하지 않다가 -0.44 g 가 되어서야 작동하기 시작한다. 그리고 RecurDyn 해석 시에는 -0.1 g 아래의 역중력에 서 장치가 동작한 것으로 나타났다. 이렇듯 해석 에서 장치가 실제보다 더 민감하게 반응하는 것 으로 나오는데 이런 차이는 모델링된 장치의 무 게가 실제와 정확히 일치하지 않고, 유체(연료) 의 유무, 그리고 부품 간의 작용(마찰력, 스프링 계수 등)이 조금씩 다르기 때문으로 볼 수 있다. 이러한 요소들의 차이를 줄여나가면 실제와 상 당히 유사한 해석 결과를 얻으리라 예상된다.

2.3 비행궤적별 구동 해석

다음은 비행궤적별로 유로개방장치가 작동하는 형태를 해석으로 알아볼 것이다. 각 부품들을 3D설계하고, RecurDyn의 각종 기능 설정들에 대한 설명들도 이전 논문에 자세히 나타나 있기 때문에 이 장에서는 생략한다. 이 해석의 단순화를 위해 비행체의 2차원 운동을 표현하는 수평, 수직성분과 pitch각을 주요 입력값으로 하고, yaw와 roll성분은 제외하였다. 비행체는 일반적으로 초기상승단계, 중간비행단계, 그리고 최종하강단계로 된 궤적을 따른다. 이런 궤적에 대한 수평, 수직성분과 pitch를 표현하기 위해서 x축 (수평)방향 가속도, z축(수직)방향 가속도, 그리고



Fig. 3 Revolute joint setup to express the pitch angle.

pitch각(degree)이 필요하다.

이전과 같이 수평, 수직 성분을 표현하기 위해 서 RecurDyn의 기능 중 하나인 Translate Joint 를 사용하고, pitch각을 표현하기 위해서 Revolute Joint를 사용한다. 앞의 해석과정과 다 른 점은 단순히 특정 시간 사이의 값을 Expression안의 함수로 입력하는 것이 아니라 매 시간 간격으로 달라지는 데이터를 순서대로 입 력해야한다는 것이다.

수평과 수직성분을 표현할 Translate Joint는 입력 데이터를 제외하면 전과 동일하므로 설명 을 생략하고, 달라진 Revolute Joint만 그림을 통 해 알아보도록 하겠다. Fig. 3에 Revolute Joint 의 설정사항이 잘 나타나있다. 유로가 개방되는 입구가 정면이고, 가상의 중심(Center body)를 기준으로 pitch각이 증가 또는 감소한다.

이제 각 성분에 대해 매 시간마다 달라지는 데이터를 입력하는 방법을 알아보겠다. 데이터는

파일 형식(<u>T</u>):

Text File (+,txt)

🗌 읽기 전용으로 열기(<u>B</u>)

	Home	SubEntity	Analysis	Professional	Flexible	Du	rability
α	۲	α	*	2.)	}	Ê
PV	PP	PVC	PPC	Spline Exp	ression U	SUB	Request
_	P	arameter	1		Expression		
Entity			*		- 💓 📮	02	0 4 -
🛃 traje	ct_fff.rdyr	n 🗋					
Model 1							
line List							
line List lines							
line List lines	Nam	A		In	formation		
line List Dines	Nam	e		In	formation		
line List lines	Nam	e		In	formation		
line List lines	Nam	e		In	formation		
line List lines	Nam	e		In	formation		
line List lines	Nam	e		In	formation		
line List lines	Nam	e		In	formation		
line List No Create	Nam	e		In	formation		
line List lines No Create	Nam	e		In	formation		

Fig. 4 Spline setup order 1 and 2.

상승/중간비행/하강에 대하여 가상의 궤적정보 를 생성해 입력하였다. 데이터의 양이 이전과 비 교해 상당히 방대하기 때문에 Expression 내의 step함수로는 표현하는데 제한이 있다. 따라서 RecurDyn 프로그램 내의 기능 중에 많은 데이 터를 한 번에 입력하기 위한 함수인 Akima spline을 이용한다. 먼저 데이터는 확장자가 txt 인 텍스트파일로 준비한다. 텍스트파일에 두 개 의 열을 만들어주는데 왼쪽 열의 숫자는 시간을 나타내며, 오른쪽 열의 숫자는 시간에 따라 변하 는 해당데이터의 값이다. 이 해석에서 시간은 0 초부터 98초까지 지정했으며, 가속도 성분은 mm/s², 각은 도(degree)를 기준단위로 입력하였 다.

텍스트 파일이 준비되면, RecurDyn으로 불러 들이는 작업이 필요하다. Fig. 4의 순서 1과 같 이 SubEntity 메뉴의 Spline을 클릭하여 Spline List를 연다. 그러면 새 창이 뜨는데(순서 2) 왼 쪽 아래의 Create를 선택해 새로운 Spline을 생 성한다. 이름을 정해주고 Fig. 5의 순서 3에 나 와 있듯이 Import를 눌러 텍스트 파일을 불러온 다. 텍스트 파일을 열면 Fig. 6의 순서 5의 형태 로 데이터가 입력되고, 아래 순서 6과 같이 전체 창 오른쪽에 Spline 요소가 생성된다.

No X Y 3. □ Cox Cancel	ame ax1 Data 💌			Reload
. [1 3. [1 [[[[]]]]]]]]]]]]]]]	No	X	Y	Add
OK Cancel 기 비행프로파일 이 양 등 10				Insert
(Cancel)) 비행프로파일 (조유 전철				3. Import
OK Cancel 기 비행프로파일 ····································				Export
OK Cancel 기 비행프로파일 ····································				
기 - 비행프로파일	(ок	Cance	si
) 비행프로파일 💽 🕑 🔅 🖻 🖽-	21			2
ax-f.bxt	🕽 비행프로파	일	🖌 🖸 🗗	
	ax-f.txt			

Fig. 5 Spline setup order 3 and 4.

×

취소



Fig. 6 Spline setup order 5 and 6.

여기까지가 Spline 요소 생성을 위한 단계이고 이제 각 Joint에 맞는 Spline을 지정해 주는 일만 남았다. 예를 들어 수평축을 기준으로 설명하면, Translate Joint - Property - Joint - Motion 으로 들어가 Fig. 7을 참고해 설정해 준다. 그림 에 나와 있듯이 함수를 적어주는데 akispl(time, 0, 1, 0)을 입력하면 된다. 함수 내의 time은 입 릭변수, 두 번째 숫자는 3차원 함수에서의 독립



Fig. 7 Spline setup for translate joint.

변수인데 사용하지 않으므로 0을 기입, '1'은 argument 번호, 마지막 '0'은 함수 보간 방법정 의인데 미분 값을 반환하지 않을 경우 0을 기입 한다. 그리고 빠지지 않아야 할 것이 Argument List이다. 이 List에 방금 전에 생성했던 Spline 요소를 더해주어 Spline 지정을 마무리한다.

이런 식으로 나머지 Translate 과 Revolute Joint들을 모두 입력한 후 시간에 맞게 해석을 시작하면 된다.

비행궤적별 해석의 결과가 Fig. 8부터 Fig. 10 까지 나타나 있다. 그림들은 0초부터 98초까지 일반적인 궤도를 따르는 비행체 내의 유로개방 장치가 각 구간에서 작동하는 형상을 보여준다. 결과는 초반 상승과 중간 수평 비행, 마지막의 하강까지 시간 순서대로 잘 보여주고 있다. 특히 90초 이후로 비행체가 하강하면서 생기는 역중 력으로 인해 연료가 위로 쏠리는 것을 유로개방 장치의 균형추가 잘 쫓아가 연료가 통할 수 있 게 하는 움직임이 뚜렷하게 나타났다.



Fig. 8 Simulation result (0 to 20 second).



Fig. 9 Simulation result (30 to 70 second).



Fig. 10 Simulation result (80 to 98 second).

3.결 론

본 논문은 고속 비행체의 가압식 연료시스템 에서 중요한 역할을 하는 가속도추종 유로개방 장치의 비행궤적별 구동을 RecurDyn으로 해석 한 내용을 다루었다.

먼저 장치의 형상과 기능을 간략히 기술하였 고, 저속 항공기에 탑재해 역중력 시험을 한 결 과와 RecurDyn을 이용해 해석한 장치의 성능을 비교하였다. 시험과 해석의 결과에는 차이가 있 었는데, 해석에서의 장치가 좀 더 빠르고 민감하 게 반응하였다. 이것은 두 경우 간의 미세한 무 게 차이, 연료의 유무, 그리고 부품 간의 작용 등이 조금씩 다르기 때문으로 추측하였다. 차후 실제와 매우 유사한 해석 결과를 얻기 위해서는 이러한 차이를 줄여야 할 것으로 보인다.

일반적인 비행체의 궤적인 상승, 수평, 하강 비행 시에 장치의 작동 특성 또한 RecurDyn으 로 해석하였다. 시간에 따라 변하는 수평, 수직, pitch를 표현하기 위해 많은 양의 데이터를 RecurDyn에 입력할 수 있는 Spline 기능을 적용 하는 방법을 설명하였다. 해석 결과는 장치가 예 상대로 각 비행구간에 따라 잘 작동하는 것을 보여주었다. 특히 역중력 구간에서 연료가 쏠리 는 방향을 잘 찾아가 유로를 개방해주는 움직임 이 뚜렷한 것이 인상적이었다.

이 시뮬레이션을 검증하기 위해 실제 고속비 행을 통해 유로개방장치를 시험하고 그 결과들 과 비교해볼 필요성이 있겠다. 본 논문을 통해 실제 시험과 RecurDyn 프로그램을 통한 해석의 차이를 파악하였고, 차후 개선을 한다면 유로개 방장치뿐만 아니라 고속 비행체에 탑재되는 다 양한 장치와 구성품의 동역학 해석 도구가 될 수 있을 것이라는 결론을 내렸다.

References

- Langton, R., Clark, C., Hewitt, M. and Richards, L., *Aircraft Fuel Systems*, 1st Ed., John Wiley & Sons. Ltd, Wiltshire, UK, 1989.
- 2. Agency for Defense Development, "Omnidirectional Fluid Valve and a Fuel Feeding Apparatus Applied with The Same, Capable of Continuously and Stably Feeding Fuel with a Fuel Tank Regardless of The Posture Variation of a Flight System," 10-1295319, 5 Aug. 2013.
- 3. Agency for Defense Development, "Valve Test Module, Capable of Performing a Performance Test With Reliability without a Practical Flight Test in a Ground, and a Gravity Follow Testing Device Applied to Thereof," 10-1295320, 5 Aug. 2013.
- Park, J., Min, S., Kim, Y. and Park, B., "Development of Flow Path Opening Device using Weight Momentum," 2012 *Conference of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Gyeongju, Korea, pp. 1875-1878, June 2012.
- Jung, S., Kim, Y., Park, J. and Jun, P., "Analysis of a Flow Passage Opening Device using RecurDyn," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 78-83, 2014.