

## 액체로켓엔진의 2단 시동에 관한 연구

박순영\* · 조원국\*\*

### A Study on the 2-Stage Startup of Liquid Rocket Engine

Soon Young Park\* and Won Kook Cho\*\*

**Key Words** : Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Turbopump(터보펌프), Gas-generator(가스발생기), 2-Stage Startup(2단 시동), Transient Analysis(과도해석)

#### Abstract

Two stage startup of high thrust liquid rocket engine can reduce the abrupt impulse to the vehicle and engine by changing oxidizer flow rate to the combustion chamber. Also it ensures stable ignition of combustion chamber against hard start and to prevent pump stall by the sudden supply of large mass flow rate. However high discharge pressure of oxidizer pump or temperature rise in gas generator may be a problem in applying the preliminary stage. To solve this problem, we analyzed the effect of the slope of oxidizer pump's head curve and the oxidizer mass flow rate to combustion chamber during preliminary stage using the rocket engine startup analysis code. A moderate slope( $\Theta \sim 3$ ) of head curve and 80% mass flow rate during preliminary stage can reduce the oxidizer pump discharge pressure by 15 to 20% comparing with the condition of  $\Theta = 4.37$  head curve and 70% mass flow rate. Also it can maintain the turbine inlet temperature rise within 50K from the nominal value.

#### 1. 서론

액체로켓 엔진의 성공적인 시동을 위해서 다양한 방안이 고안되어 적용되고 있다. 가스발생기 사이클 엔진에 있어서 추력 및 연소압이나 터보펌프의 회전수 등을 한꺼번에 100% 작동 영역으로 바로 구동하기보다는 천이구간(Preliminary stage)을 일정 시간 둔 후에 다시 100% 작동 영역으로 옮겨 더욱 안정적인 시동을 구현하는 2단 시동이 여러 엔진에서 적용되고 있다. 실제로 RL10 엔진[1]의 경우 ramp startup 구간을 거쳐 정상 작동점으로 운행되는 2단 시동 방법을 적용하고 있으며, 발사체에 있어서 55% 추력 ramp startup은 두 엔진 간 시동시의 차이를 보상해주는 장점이 있으며 엔진, 발사체 및 페이로드에 가해지는 충격을 줄여줄 수 있다. 또한 추진제 탱크의 슬러시(slosh)를 줄일 수 있기 때문에 탱크 가압용 기체의 사용량을 줄여줄 수 있고 발사체 임무 성능을 높여줄 수 있다고 제시되어 있다.

일반적으로 케로신/액체산소를 사용하는 가스발생기 사이클에 있어서 2단 시동은 다음과 같은 효과를 거둘 수 있다.

- 부드러운 시동과정을 가능하게 하여 펌프나 연소기 및 발사체 전체에 가해지는 충격을 줄일 수 있으며, 1단 엔진 클러스터링 시에 엔진 간 추력 오차를 보정할 수 있는 여유 시간을 가질 수 있다.

- 종단밸브를 여는 과정에서 발생할 수 있는 산화제 펌프와 연료 펌프 후단의 급격한 압력강하를 완화하여 펌프의 stall을 방지할 수 있다.

이러한 2단 시동을 구현하기 위한 방법으로 연소기 점화 시의 산화제 유량을 제어하는 방법과, 가스발생기 유량을 감소시켜 터보펌프의 회전수를 낮추어 운전하는 방법이 있을 수 있다. 가스발생기의 유량을 감소시켜 운행하는 것은 터보펌프와 가스발생기가 이러한 저추력 모드에 대한 작동성이 보장되어야 하며, 이를 구현하기 위해서는 추력제어밸브와 가스발생기 혼합비를 유지시키기 위한 능동 유량 제어가 필요하다.

연소기로 공급되는 유량을 감소시키는 방법은 산화제 유량을 감소시켜 상대적으로 낮은 혼합비에서 운용할 필요가 있다. 이는 연료 유량을 감소시킬 경우 연소기가 초기에 높은 혼합비에서 점화되어 hard start 및 열상의 우려가 있기 때문이다. 이를 구현하기 위해서는 바이패스 라인과 밸브 및 오리피스가 추가적으로 필요하며, 또는 연소기 산화제 종단밸브가 multi-position으로 작동되는 형태의 밸브인 경우 추가적인 바이패스 라인을 설치하지 않고도 구현이 가능하다.

본 연구에서는 이 세 가지 방안 중에서 연소기 점화의 안정성을 유지하기 위하여 바이패스 밸브를 이용하여 연소기 산화제 유량을 제어하는 방법에서 2단 시동의 특성에 영향을 미치는 대표적인 두 가지 변수에 대해서 시동해석을 통해 그 특성을 관찰

\* 한국항공우주연구원, psy@kari.re.kr

\*\* 한국항공우주연구원, wkcho@kari.re.kr

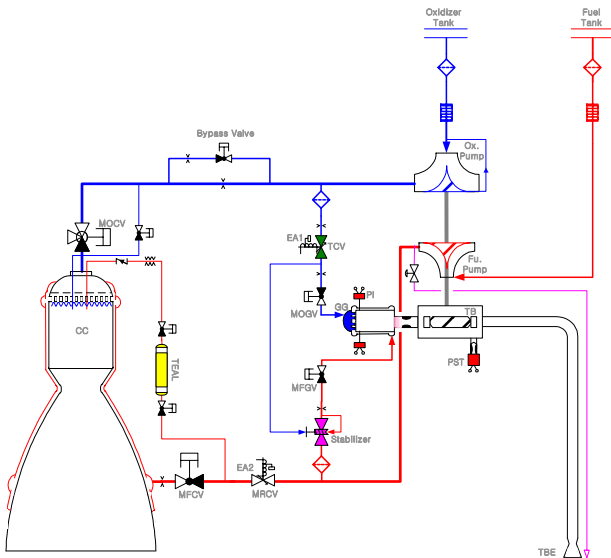


Fig. 1 Schematic diagram of 2 step startup

하였다.

## 2. 본론

### 2.1 엔진시스템

개방형 가스발생기 사이클 엔진은 Fig. 1과 같이 터보펌프 (Turbopump, TP), 가스발생기(Gas Generator, GG), 연소기 (Combustion Chamber, CC) 및 각종 밸브와 배관으로 구성된다. 탱크로부터 공급된 추진제는 펌프에서 가압되어 GG와 CC로 공급되며, GG에서 생성된 저혼합비 연소가스로 TP를 구동한다. CC의 점화를 위해 Triethylaluminium(TEAL)이 CC 연료 라인으로부터 분기된 점화라인에 앰플(ampoule) 형태로 구성되어 있으며, GG의 점화는 고체 파이로 점화기(Pyro-Ignitor, PI)를 이용한다. 터빈의 시동은 파이로시동기(Pyrostarter, PS)를 이용하여 GG 점화 이전에 구동한다. 2단 시동을 위한 CC 산화제 공급배관에 바이패스 라인과 밸브가 별도로 존재한다. 이 바이패스 밸브는 초기 2단 시동 단계(preliminary stage)에서는 닫혀있으며, 정상상태에서 열려 100% 산화제 유량이 흐를 수 있도록 한다.

### 2.2 해석적 접근

본 연구에서는 가스발생기 사이클 액체로켓엔진의 시동해석 프로그램을 이용하여 2단 시동의 특성을 파악하였다. 시동 해석은 Fig. 1의 엔진 모델을 기본으로 수행하였다. 해석에 사용된 엔진의 설계값은 참고문헌[2]에 제시되어 있는 것을 기본으로 하였다.

#### 산화제펌프 양정곡선 기울기의 영향

먼저 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 엔진의 정격유량과 정격 TP 회전수에서의 양정곡선 접선의 기울기를  $\Theta$ 라 하고,  $\Theta$  변화에 대한 시동 특성을 조사하였다. 이와 같이 산화제 펌프의 양정곡선 기울기에 대한 2단 시동의 영향을 검토한 이유는 preliminary stage는 산화제 펌프가 정격 운용점에 비하여 압력은

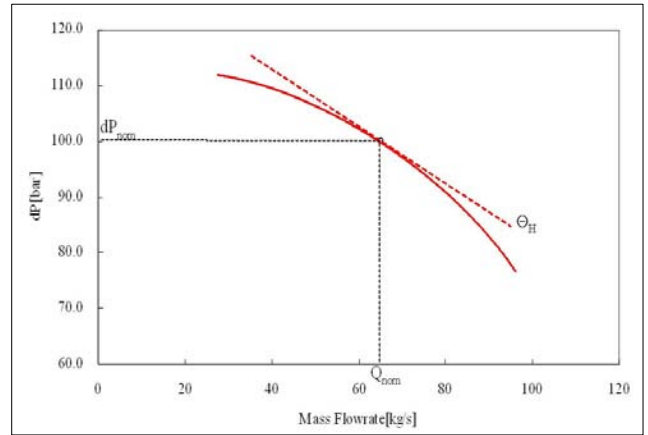


Fig. 2 Definition of theta ( $\Theta$ )

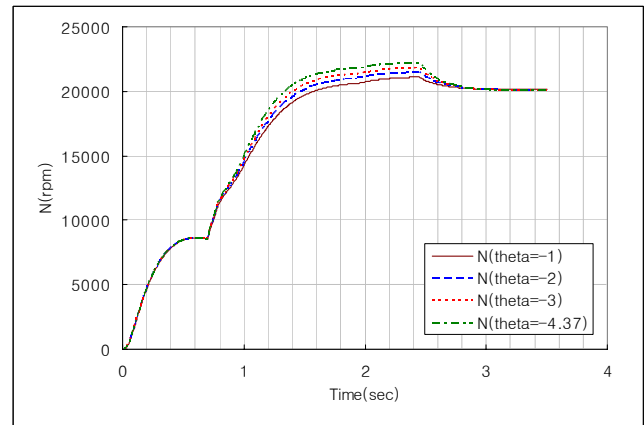


Fig. 3 Effect of  $\Theta$  to the startup characteristic of turbopump rotational speed

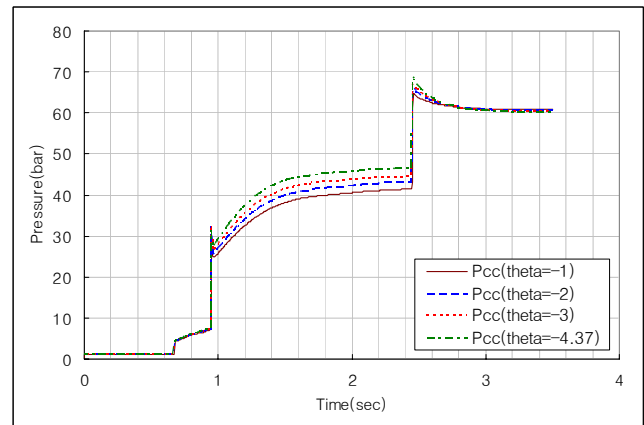


Fig. 4 Effect of  $\Theta$  to the startup characteristic of CC pressure

높은 반면 유량은 적게 흐르는 형태로 작동하기 때문에  $\Theta$ 의 절대값이 작을수록 저유량에서 토출압증가에 의한 영향이 감소하기 때문이다.

Fig. 3과 같이  $\Theta$ 의 절대값이 클수록 2단 시동에서 발생하는 회전수 피크가 크게 나타나며, Fig. 4와 같이 연소압이 높게 나타난다. 이는 앞에서 살펴본 것과 같이  $\Theta$ 의 절대값이 작을수록 산화제펌프가 저유량에서 작동하는 경우에 토출압이 비교적 적게 상승하기 때문에 동일한 유동저항에 대한 유량증가의 폭이 작기 때문이다. 무엇보다도 Fig. 5와 같이  $\Theta$ 의 절대값이 작을수록

Table 1 산화제펌프 양정곡선 기울기 변화에 대한 preliminary stage에서의 엔진시스템 작동 특성

	$\Theta=-1$			$\Theta=-2$			$\Theta=-3$			$\Theta=-4.37$		
	Nominal	Prelim.	%	Nominal	Prelim.	%	Nominal	Prelim.	%	Nominal	Prelim.	%
$P_{cc}$	61.1	41.4	67.8	60.8	43	70.7	60.6	44.4	73.3	60.5	46.3	76.5
$P_{gg}$	61.1	64.7	105.9	60.9	66.8	109.7	60.7	68.8	113.3	60.5	71.6	118.3
$P_{out,oxp}$	107	118	110.3	106.2	125.6	118.3	105.5	132.5	125.6	105	142.4	135.6
$P_{out,fup}$	143.5	151.8	105.8	143	157	109.8	142.7	161.7	113.3	142.3	168.1	118.1
$N_{tp}$	20116	21087	104.8	20081	21456	106.8	20053	21760	108.5	20033	22183	110.7
$G_{co}$	67.876	41.822	61.6	67.47	43.37	64.3	67.117	44.85	66.8	66.87	46.78	70.0
$G_{cf}$	27.54	31.83	115.6	27.5	32.33	117.6	27.48	32.76	119.2	27.46	32.148	117.1
$G_{go}$	0.796	0.863	108.4	0.791	0.905	114.4	0.787	0.944	119.9	0.784	0.994	126.8
$G_{gf}$	2.505	2.574	102.8	2.502	2.62	104.7	2.5	2.655	106.2	2.5	2.706	108.2
O/F <sub>gg</sub>	0.318	0.335	105.3	0.316	0.345	109.2	0.315	0.356	113.0	0.314	0.367	116.9
$T_{gg}$	895.9	921.9	102.9	892.9	937.2	105.0	891.3	954.1	107.0	889.8	970.9	109.1

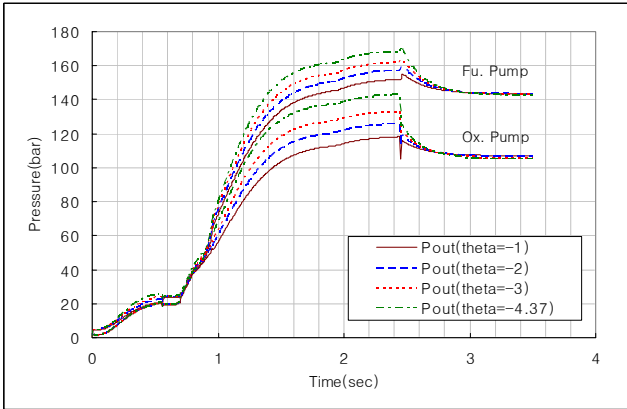


Fig. 5 Effect of  $\Theta$  to the startup characteristic of pump discharge pressure

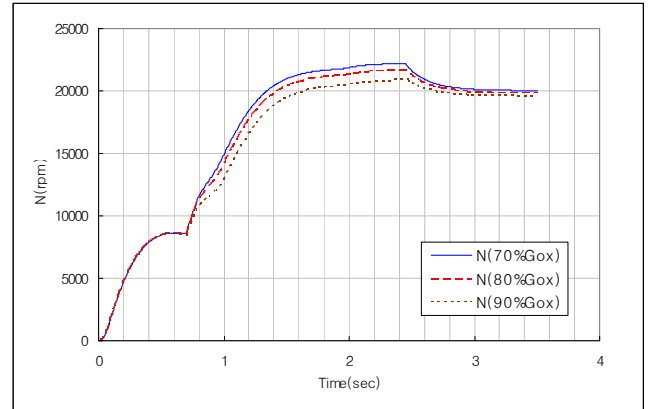


Fig. 7 Effect of oxidizer flowrate during the preliminary stage to the startup characteristic of turbopump rotational speed

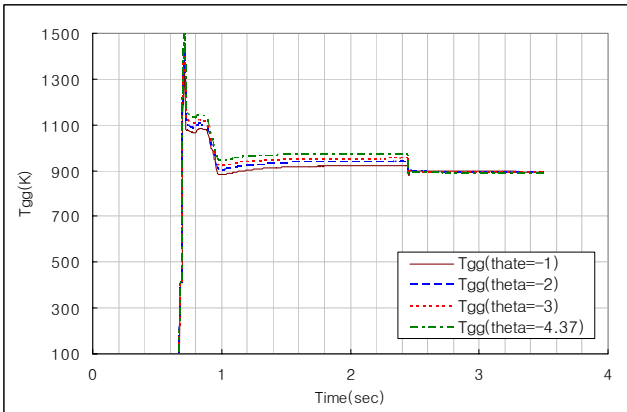


Fig. 6 Effect of  $\Theta$  to the startup characteristic of GG temperature  
 록 preliminary stage에서 산화제펌프 토출압( $P_{out,oxp}$ )이 정격 토출압에 비하여 높아지는 현상이 줄어들고, Fig. 6과 같이 가스발생기 혼합비 변화가 작아 터빈 입구 온도 변화가 최대 85K에서 30K 내외로 감소한다. 이는 그만큼 엔진시스템이 겪게 될 수 있는 터빈의 열부하가 감소함을 의미한다. 엔진의 제반 작동 특성은 Table 1에 제시하였다.

CC 산화제 유량의 영향

Preliminary stage를 운용함에 있어 연소기로 공급되는 연료의 유량에 비하여 상대적으로 유량이 많은 산화제의 유량을 줄임으로써 요구되는 펌프의 파워를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 초기

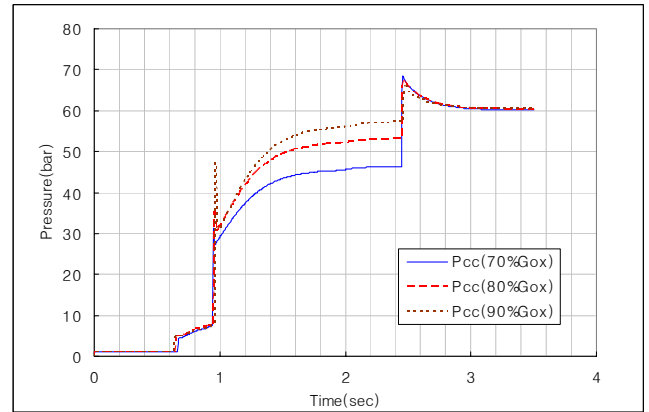


Fig. 8 Effect of oxidizer flowrate during the preliminary stage to the startup characteristic of CC pressure

연소기 점화 시에 연료 유량을 줄일 경우 이론당량비 (stoichiometric)에 상대적으로 가까운 조건에서 점화가 이루어져 연소실의 온도 상승이 커져 구조물의 열적인 피로도를 가중시킬 수 있다. 하지만 Table 2에 제시되어 있는 것과 같이 산화제펌프를 70% 저유량 모드에서 작동시킬 경우 펌프 토출압이 대략 35%나 높게 형성되고, 회전체 진동 안정성에도 부정적인 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 preliminary stage에서 연소기로 공급되는 산화제의 양을 정격 대비 70%보다 더 큰 값을 사용함으로써 2단 시동의 효과는 감소되지만 터보펌프의 작동 안정성을 보장하는 방안을 생각할 수 있다. Preliminary stage에서 연소기로

Table 2 Preliminary stage에서의 연소기 산화제 유량 변화에 대한 엔진시스템 작동 특성

	70% $G_{cc,ox}^{nom}$			80% $G_{cc,ox}^{nom}$			90% $G_{cc,ox}^{nom}$		
	Nominal	Prelim.	%	Nominal	Prelim.	%	Nominal	Prelim.	%
$P_{cc}$	60.5	46.3	76.5	59.5	53.1	89.2	60.4	57.2	94.7
$P_{gg}$	60.5	71.6	118.3	59.5	68.7	115.5	58.4	64.6	110.6
$P_{out,oxp}$	105	142.4	135.6	101.9	132	129.5	98.6	118	119.7
$P_{out,fup}$	142.3	168.1	118.1	139.8	162.1	116.0	136.9	152.3	111.2
$N_{tp}$	20033	22183	110.7	19828	21655	109.2	19598	20836	106.3
$G_{co}$	66.87	46.78	70.0	67.67	54.64	80.7	68.524	61.577	89.9
$G_{cf}$	27.46	32.148	117.1	27.0	31.60	117.0	26.49	29.51	111.4
$G_{go}$	0.784	0.994	126.8	0.765	0.937	122.5	0.745	0.861	115.6
$G_{gf}$	2.5	2.706	108.2	2.472	2.665	107.8	2.446	2.582	105.6
O/F <sub>gg</sub>	0.314	0.367	116.9	0.309	0.352	113.9	0.305	0.333	109.2
$T_{gg}$	889.8	970.9	109.1	882.1	947.9	107.5	876.0	918.9	104.9

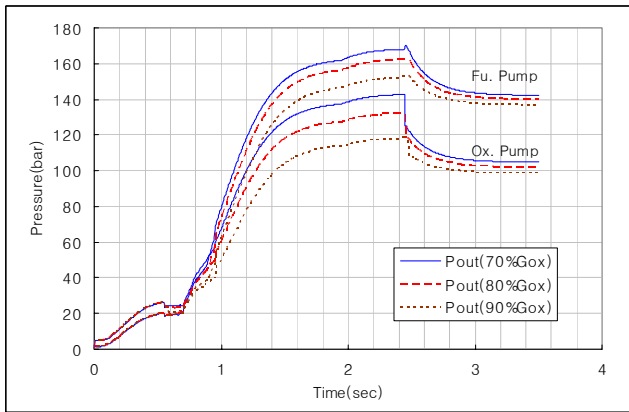


Fig. 9 Effect of oxidizer flow rate during the preliminary stage to the startup characteristic of pump discharge pressure

공급되는 산화제 유량을 증가시키에 따라 연소압도 상승하여 2단 시동의 효과는 감소되지만 산화제펌프의 토출압도 정격대비 135%에서 130%, 120% 수준으로 떨어지고 가스발생기의 혼합비 편차도 줄어들어 터빈 입구 온도에 가해지는 변동 요인도 감소한다.

### 3. 결론

액체로켓 엔진의 시동 시에 발생하는 급격한 점화충격을 줄이고 안정적인 연소기의 점화와 급격한 펌프 유량 상승으로 인한 펌프 오작동을 방지하기 위한 방안으로 연소기로 공급되는 산화제 유량을 두 단계로 나누어 공급하는 2단 시동의 특성을 관찰하였다. 이러한 2단 시동을 운용함에 있어서 발생할 수 있는 문제는 산화제펌프의 저유량 고회전수 운영으로 인한 높은 토출압 및 가스발생기로 공급되는 추진제 혼합비 변화로 인한 터빈 입구 온도 상승이다. 본 연구에서는 산화제펌프 양정곡선의 기울기를 변화시키는 방법과 preliminary stage에서 연소기로 공급되는 산화제 유량을 조절하는 두 방법의 타당성을 시동해석을 통해 해석하였다. 완만한 형태( $\Theta=3$ )의 산화제펌프 양정곡선과 preliminary stage에서 정격유량의 80% 정도의 산화제 유량을 연소기로 공급하는 형태의 2단 시동이 preliminary stage에서 산

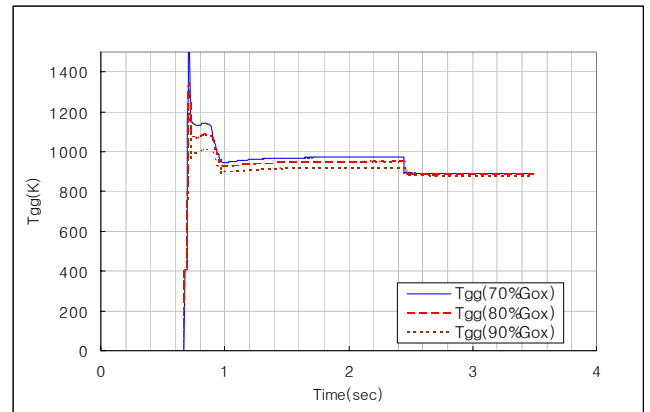


Fig. 10 Effect of oxidizer flowrate during the preliminary stage to the startup characteristic of GG temperature

산화제펌프 토출압을 기존에 비하여 15~20% 낮추고 터빈 입구 온도 상승을 40~50K로 유지할 수 있었다. 향후 액체로켓엔진의 다양한 시동 방법에 대한 다각적인 해석적·시험적 분석이 보안되어야 할 것이며, 특히 2단 시동을 구현함에 있어 비정상과도 상태에서의 펌프 작동 특성·양정곡선의 형태 및 preliminary stage에서의 유량 등을 적절히 고려한 설계가 수반되어야 할 것이다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 특정연구개발 사업인 “소형위성발사체 개발사업” 연구결과의 일부입니다.

### 참고문헌

- [1] J.L. Emdee, C.S. Fentress and M.R. Malinowski, Development Testing of the RL10E-1 Engine, AIAA(1997)
- [2] 박순영, 남창호, 문인상, 설우석, 터보펌프 공급식 액체 로켓 엔진의 시동 과도해석, 항공우주기술, 4권 2호(2005), pp142~152