

우주발사체용 추진제 요구조건 및 해외 케로신 개발현황 검토

임석희*, 정영석**, 조규식***, 이한주****, 오승협*****

A review of the Technical Requirements to Propellants for Launch-Vehicle and the Status of Kerosene Development in Abroad

SeokHee Lim*, YoungSuk Jung**, GyuSik Cho***, HanJu Lee****, SeungHyub Oh*****

Abstract

The technical requirements to the propellant of rocket engine using chemical energy are developed from the point of its performance, design and the exploration. The propellant, i.e. to get higher energy, to increase the cooling effect, and to be used in safety and comfort should be made. So from these aspect the technical requirements were written by the factors of physical chemistry. And the propellant combination used recently in Launch vehicles is liquid Oxygen and Kerosene, the main characteristics of this Kerosene as a fuel were reviewed. The toxicity and the safety of Kerosene, in specially, require the attention of the users. Also, it would be used in the development of Korean Kerosene by the comparative review of the several Kerosenes in Abroad.

초 록

화학에너지를 사용하는 로켓엔진의 추진제 요구조건은 성능, 구조설계 및 운용 관점에서 개발된다. 즉, 보다 큰 에너지를 얻을 수 있는, 보다 냉각효과를 높일 수 있는, 그리고 보다 안전하고 편하게 사용할 수 있는 추진제가 개발되어야 한다. 이런 관점에서 본 기술 요구 조건이 물리화학적 인자들로 정리되었다. 그리고, 최근 발사체에서 많이 사용되는 추진제 조합은 액체산소-케로신인데, 연료로서의 케로신에 대한 주요 특성을 검토하였다. 특히, 케로신의 독성과 안정성은 취급자들의 주의를 요구한다. 또한, 여러종류의 해외 케로신 개발 사례를 비교 검토함으로써, 한국형 케로신 개발에 사용하고자 하였다.

키워드 : 우주발사체(launch vehicle), 로켓(rocket), 액체로켓엔진(liquid rocket engine), 추진제(propellant), 케로신(kerosene), 기술요구조건(technical requirement)

1. 서 론

최근에 사용되는 로켓 추진제는 여러가지 기술 요구조건을 만족시켜야 한다. 반면, 이러한 요

* 추진기관체계팀/shlim@kari.re.kr

*** 추진기관체계팀/gscho@kari.re.kr

***** 추진기관체계팀/shoh@kari.re.kr

** 추진기관체계팀/ysjung@kari.re.kr

**** 추진기관체계팀/leehj@kari.re.kr

구조건의 만족을 논하기 이전에 우리는 로켓 발사체의 목적과 엔진의 작동 조건을 분명히 인식해야 한다. 왜냐하면, 이 조건들로부터 추진제가 일차로 선정되기 때문이다.

대체로 우주공간에서 사용되는 로켓 또는 장거리용 로켓의 경우에는 독성분이 있는 추진제가 많이 사용되고 있다. 따라서, 추진제에 대한 지식이 부족하거나 경험이 충분하지 않은 작업자가 이러한 추진제를 대량으로 사용하는 것은 허가되어선 안된다.

화학로켓엔진에 사용되는 추진제에 대한 요구조건은 크게 세가지로 나뉜다. 에너지원으로서의 추진제 요구조건, 엔진 냉각제로서의 추진제 요구조건, 그리고, 시험장 및 발사체에 사용되는 운용상의 추진제 요구조건이 이것이다.

100kg급 소형위성발사체 개발에는 산화제로 액체 산소를, 연료로 케로신이 사용된다. 따라서, 본 자료에서는 소형위성 발사체용 케로신-액체산소 조합의 추진제의 개발 요구조건을 위에서 언급한 세가지 분야에서 집중적으로 검토하였다.

또한, 현재 수입에 의존하고 있는 추진제를 국산화하기 위해 지난 50여년간 서방과 러시아에서 개발된 추진제의 개발현황을 살펴보고, 이를 토대로 한국형 추진제 개발을 위한 기본 자료로 삼고자 하였다.

2. 본 론

2.1 추진제 개발 요구조건

2.1.1 에너지원으로서의 추진제 요구조건

추진제의 화학에너지는 연소실에서 열로 전환된다. 연소실에서 생성된 가스의 엔탈피 변화로부터 생성된 열량을 계산할 수 있다.

$$\Delta I = Q \cdot G \cdot \eta = H_u \cdot \eta [MJ/kg] \quad (1)$$

Q - 연소반응시 생성되는 열
G - 반응에 참여하는 추진제량
η - 연소실내의 열생성 효율
H_u - 단위 질량당 생성열

엔진의 노즐에서는 가스의 열 에너지가 노즐을 통과하면서 가스의 운동에너지로 전환된다.

$$W = \sqrt{2g \cdot H_u \cdot \eta_{ex}} \quad (2)$$

W- 노즐 출구에서의 가스 속도, m/sec
η_{ex}- 연소실과 노즐에서의 열생성 효율

엔진의 열역학 사이클과 작동 과정의 변수들을 사용하여, 이론적인 가스의 방출 속도, 가스의 실제 속도, 주어진 추진제 조합의 이론적인 비추력, 실제 비추력등이 계산된다. 이 식들로부터 노즐 출구에서 가스의 최종속도는 다음과 같이 정리된다.

$$W = f(H_u, T, T, \delta, k, u_k) \quad (3)$$

(3)에서 보는 바와 같이 노즐 출구의 가스 속도는 추진제의 엔탈피 뿐만이 아니라, 연소가스의 가스 상수, 단열팽창비, 연소 온도, 가스팽창 지수등과도 관련이 있다. 이에 대한 보다 자세한 설명은 [1]에 있다.

이 외에도 에너지 특성과는 직접적인 관련이 없으나, 여기에 해당하는 중요한 조건들은 다음과 같다.

추진제의 연소 속도는 엔진의 작동 프로세스에 있어 매우 중요하다. 즉, 연소 속도는 단위 시간당 소비되는 추진제의 양이다. 따라서, 연소속도가 빠르면, 추진제가 연소실에 체류하는 시간이 짧아진다. 따라서, 연소속도가 빠른 추진제의 경우, 연소실 길이가 짧아지고, 가벼워진다. 이로 인해 엔진 무게감량이 가능하다. 따라서, 설계자는 연소속도가 가장 빠른 추진제를 선택해야 한다.

점화 지연 시간이 짧은 추진제가 엔진의 점화 신뢰성을 높인다. 이때 추진제가 접촉한 순간부터 화염과 압력이 생성되는 즉, 연소반응이 시작되는 순간까지의 시간을 점화지연시간, τ_s이라고 부르는데, 이 값은 접촉발화성 추진제인 경우에 특히 중요하다.

로켓 추진제의 점화 과정에 있어 추진제, 즉

연료와 산화제는 혼합, 기화, 화학반응이 계속되는 연소실에 연속적으로 끊임없이 공급되어야 한다. 반응 초기에는 그 속도가 느리게 전개된다. 그래서, 열 발생량이 낮고, 온도도 그리 높지 않다. 압력이 미처 생성되기 전이다. 하지만, 대량의 추진제가 본격적으로 연소되면, 온도 상승, 열 발생 및 압력 상승등의 결과로 확실한 화염이 생성되고 연소 반응은 급격하게 발달한다.

따라서, 추진제가 접촉한 순간부터 반응이 시작되는 순간까지의 시간(점화지연시간)이 길수록, 연소 전까지 연소실로 공급되는 추진제량이 많아진다. 따라서, 연소반응이 본격적으로 시작되는 순간에는 일반적인 경우에 비해 상대적으로 많은 양의 추진제가 연소실에 누적되어 있는 셈이다. 이것이 급격한 압력 상승을 가져온다. 이런 압력 상승은 때로는 설계값의 3-5배에 해당하기도 하며, 이는 연소실의 파괴와 엔진 고장을 야기한다. 따라서, 추진제는 점화지연시간이 짧을수록 좋다.

이상과 같이 위에서 언급한 에너지원으로서의 추진제 개발요구조건을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 연소열이 커서, 비추력을 향상시킬 것
- 2) 밀도가 커서, 로켓의 속도를 높일 것
- 3) 연소가스의 분자량 μ 가 작거나 가스상수 R 이 커서, 노즐출구의 가스속도를 최대로 할 것. 노즐출구가스 속도의 증가는 비추력의 증가로 이어진다.
- 4) 연소 온도가 4000~4500K 이하여서, 연소실 구조면에서 문제가 없도록 할 것
- 5) 연소속도가 빨라서, 연소실내의 체류시간을 줄이고, 이로인해 연소실의 크기와 무게를 줄일 것
- 6) 점화지연시간을 줄여서, 엔진 점화의 신뢰성을 높일 것

2.1.2 냉각제로서의 추진제 요구조건

연소실에서 전개되는 화학반응은 고온고압하에서 진행된다. 이때 연소실 벽을 통해 전달되는 heat flux는 일반적인 증기기관에서 나오는 heat flux의 약 5-10배에 해당한다. 따라서, 엔진이 정상적으로 작동하기 위해서는 연소실 벽과 노즐에 신뢰성있고 집중적인 냉각시스템이 필요하다.

고온의 열을 발생하는 최신 엔진들에는 연소실 내부와 외부에서 냉각하는 혼합형 냉각시스템이 적용되고 있다. 즉, 연소실 벽과 노즐에 냉각채널을 만들고, 추진제가 이 채널을 통과하며 열을 빼앗아 냉각을 하고, 동시에 연소실벽에 있는 특수 구멍을 통해 추진제를 엔진 내부에 흘리면, 일정량의 액체 막이 연소실 내부에 형성된다. 그 후 액체막은 기화되어 연소반응에 참여한다.

따라서, 보다 효과적으로 냉각을 하기 위한 냉각제로서의 추진제 개발 요구조건은 다음과 같다.

- 1) 큰 열용량을 가질 것. 이 때 단위질량당 추진제가 흡수할 수 있는 열량이 최대가 된다.
- 2) 열전도도가 클 것. 이런 액체가 보다 많은 양의 heat flux를 전달할 수 있다.
- 3) 기화시의 잠열이 클 것. 잠열이 크면, 냉각제는 보다 높은 온도에서 끓기 시작하고, 연소실 벽으로부터 보다 많은 열을 잡아낼 수 있다.
- 4) 끓는점이 높을 것. 그래야 냉각 채널 속의 액체가 기화되지 않고 냉각제로서의 역할을 다 할 수 있다.
- 5) 엔진의 냉각 채널 내에서 고온으로 존재할 때 냉각제가 고온에 의한 열분해가 일어나지 않는 화학적 안정성이 높은 물질일 것. 이는 설계시 물질의 동일한 물리화학값을 사용하여 보다 신뢰성 있는 냉각 효과를 예측 할 수 있다.
- 6) 가능한 점도가 낮을 것. 만약, 점도가 높으면 냉각채널내의 압력 손실이 급격히 증가하여, 펌프에 요구되는 토출압이 커지며, 이로인해 TP의 무게가 증가한다.

2.1.3 운영상의 추진제 요구조건

세 번째 요구조건 그룹은 추진제가 엔진 내부, 저장소 또는 발사체 탱크내에 위치한다는 점에서 나온다. 이러한 요구조건들은 추진제의 운송과 저장 조건, 대기 환경과의 상호 조건, 작업자와의 상호 관계, 엔진 및 발사체의 소재 조건등과 관련이 있고, 국가 경제에 있어 추진제의 전략적

의미도 관련이 있다.

따라서, 이런 관점에서 볼 때 추진제는 다음과 같은 특성을 지녀야 한다.

- 1) 외부 환경이 변하는 조건하에서(대기의 온도, 압력 등의 기후 변화, 빛의 양, 진동 등) 장기간 보관할 시 추진제의 물리-화학 특성이 변하지 않아야 한다.
- 2) 저장소, 발사체 및 엔진 소재와 화학반응을 일으키지 않는 물질이어야 한다. 특히, 추진제로 인한 구조물의 부식이 생기지 않아야 한다.
- 3) 어는점이 낮아야 한다. 그래야, 추진제의 저장, 공급, 운송 및 엔진/발사체에서 사용할 때 액체 상태를 유지할 수 있다. 즉, 대기 온도가 매우 낮은 경우에, 추진제가 응고되거나 어는 현상으로 인해 엔진을 점화하거나 정지할 때 수반되는 어려움을 피할 수 있다.
- 4) 추진제를 사용하고 저장함에 있어 화재안전성이 커야 한다.
- 5) 폭발 위험성이 적어야 한다. 왜냐하면, 추진제를 사용하는 동안에 물리적 기계적인 충격, 열 충격, 빛 충격 등과 같은 여러 형태의 충격이 가해지는 경우 생길 수 있는데, 이러한 추진제의 폭발 경향성으로 인해 운용 조건이 복잡해지고, 보다 숙련된 작업자가 요구되기 때문이다.
- 6) 독성이 적어야 한다. 만약, 독성이 있다면, 작업자에게 특별한 사전 교육이 필요하고, 추진제의 상태와 주변 환경에 추진제가 노출되었는지 여부에 대한 정기적인 검사가 필요하다. 독성 추진제를 다루는 지침서는 분명하고 정확하게 반드시 준수되어야 한다.

2.2 액체 산소 - 탄화수소계열의 추진제

로켓엔진에서는 여러 가지 형태의 탄화수소계열 연료가 광범위하게 사용된다. 이러한 탄화수소연료는 원유의 처리과정에서 발생하는 케로신, 리그로인 등과 테레핀유, 침엽수 뿌리 추출물로부터 얻어지는 것들이 있다.

이런 연료는 분자 각각의 특성으로 표현되지 않고, 화합물을 구성하는 그룹의 성분에 의해 그 물리화학적 특성이나 운용상의 특성이 결정된다. 그룹 특성, 즉, 벌크 특성에 따라 원료로부터 얻어지는 화합물은 파라핀 계열, 올레핀 계열, 아로마 계열로 구분된다. 이 그룹들에 속하는 개별적인 탄화수소의 일반적인 특성은 약 300여종류를 구성한다.

과거에 연료로 많이 사용되었던 알콜은 한 개 혹은 몇 개의 수소 분자들이 하이드로산화제 그룹에 섞여있는 형태로 존재하는 경우에만 국한해서 칭한다.

로켓 기술에서 가장 널리 사용되었던 알콜은 에틸, 메틸, furfurool 계열 등이다. 이들은 냉각특성이 좋고, 가격 또한 충분히 저렴하다.

현재 국내에서 개발중인 KSLV-I에서와 마찬가지로, 대부분의 발사체에 있어 추진제는 주로 탄화수소를 연료로 사용한다. 이러한 추진제 조합의 경우, 가장 큰 발열량은 2200kcal/kg 으로, 이는 산소와 케로신 조합이다. 이 조합은 최근에 개발되는 액체추진기관에 가장 널리 사용되고 있다.

액체산소와 케로신의 혼합물을 사용하는 것은 로켓 개발 초기단계에서부터였다. 이러한 조합을 사용함에 있어 어려운 점은 연소 온도가 높다는 것이다. 또한, 적은 양의 케로신으로 냉각 조건을 구성하는 것이 어렵다는 것이다. 이 문제는 현재까지도 액체산소-케로신 계열의 엔진을 적용함에 있어 그 한계를 가지고 있다.

초기에 사용된 연료는 에틸 및 메틸 알콜류였다. 알콜의 발열량은 케로신보다 낮다. 이는 알콜의 생성열이 매우 큰 음의 값을 가지기 때문이다. 그러나, 케로신에 비해서 연소 생성열이 낮아서 엔진을 만드는 것이 용이하다. 알콜의 밀도는 그리 크지 않다. 끓는점도 충분히 높기 때문에 냉각제로서 충분히 사용 가능하다.

이뿐만이 아니라, 알콜 자체에 충분히 많은 산소를 함유하고 있기 때문에, 케로신에 비해서 냉각효과가 우수하다.

알콜의 열용량은 그리 크지 않으며, 약 0.6kcal/kg이다. 알콜은 물과 혼합이 가능하다.

따라서 여러 가지 발열량을 가지는 조합물을 생성할 수 있다. 즉, 연소실내의 온도 조절이 가능하며, 경우에 따라서는 연료의 열민감성을 조절할 수 있다. 이렇게 해서 제작된 로켓이 75% 농도의 알콜로 조절해서 사용한 바로 A-4(V-2)이다. 물론, 이 경우 엔진의 비추력은 많이 떨어진다.

2.3 연료로서의 케로신

케로신은 152~302℃에서 원유를 증류하거나 크래킹(열분해) 할 때 얻어지는 개별적인 탄화수소 혼합물이다. 투명하고, 특별한 냄새를 가지는 푸른 노란색의 액체다. 평균 밀도는 0.82-0.86kg/m³이며, 분자량은 원유의 종류에 따라 다른데, 164-188 사이이다. 로켓 분야에서 액체산소, 질산, 농축 과산화질소, 수소등과 함께 연료로 광범위하게 사용된다. 케로신은 가격이 싸며, 러시아 국가 내에서 그 매장량은 거의 한계가 없다.

케로신은 정상상태(25℃)에서 액체상태이며, 어는 점은 약 -60℃, 끓는점은 액 152℃로 액체상태의 온도 범위가 넓어서 사용상 편리하다. 러시아에서는 GOST 10227-62에 의거, 로켓 분야에서 사용하는 케로신의 종류를 T-1, T-2와 TS-1등으로 지정하였다. 이들은 증류성분이 가볍고, 잔여물이 없어 좋다. T-1과 TS-1 케로신은 일반적으로 원유의 직접 증류 과정에서 얻어진다. 따라서, 이들은 충분히 안정적이며, 장기간 보관이 가능하다. (최장 몇 년). T-2 케로신은 벤진 성분을 포함한다. 따라서, 벤진과 마찬가지로 화재의 위험이 크다.

2.3.1 원유 산지별 케로신 특징

케로신의 가장 중요한 물리 화학 상수와 지수들은 케로신의 원료인 원유를 얻는 장소에 따라 다르다. 각기 다른 지역에서 얻어진 원유로부터 생산된 케로신의 온도별 증기압은 다음 표와 같다.

표 1. 원산지별 케로신 증기압

원유 생산지별 케로신	증기압, mmHg		
	335K (62℃)	375K (102℃)	425K (152℃)
바쿠 유전	50	120	415
마이크로프 유전	42	85	245
엠펜 유전	33	53	149
그로즈네이 유전	28	49	139
T-1 케로신	59	212	605

바쿠는 아제르바이잔 공화국의 수도이며, 마이크로프는 크라스노다르 지방에 위치한다. 그로즈네이는 북카프카스에 있다.

표에서 보는 바와 같이 원유를 채굴한 장소에 따라 점도, 증기압, 밀도, 분자량 및 조성이 다르다.

2.3.2 아로마틱 탄화수소 함량에 따른 물의 용해도

또한 아로마틱 탄화수소물의 함량에 따른 물의 용해도는 다음 표에 있다.

표 2. 아로마 함유량에 따른 물의 용해도

밀도 g/cm ³ (15℃)	끓는점 온도 범위		아로마 탄화수소 함유량, %	물의 용해도, % (15℃)
	℃	K		
0.825	184-297	457-563	4.4	0.003
0.806	158-275	431-553	8.6	0.006
0.834	143-265	416-538	21.9	0.008

2.3.3 압력 상승에 따른 자연발화점 변화

밀폐된 공간에서 압력이 상승하면 케로신은 자연발화를 하는데, 압력이 증가함에 따라 발화점 온도가 낮아진다. 이에 따른 자연 발화점을 다음 표에 나타내었다.

표 3. 압력별 케로신 자연발화점

p. kgf/cm ²	t, °C	T, K
3	420	695
4	400	675
9	275	550
11	260	535
15	220	495
20	210	485
30	205	480

1기압하인 대기중에서 케로신의 최저 자연발화점은 약 260°C이다.

2.3.4 케로신의 열적부피팽창

케로신을 연료로 사용하는 경우에 각종 손실을 미리 고려해야 한다. 즉, 케로신의 증발에 의한 손실과 낮은 온도에서 연료에 녹아있던 공기가 대기로 방출될때 함께 묻어 나가는 액체의 손실이 이에 해당한다. 압력이 낮아지면, 용해되어 있던 공기가 급격히 분리된다. 이때의 손실은 크지 않아서, 전체 추진제 탱크에 담긴 액체 무게의 약 0.025~0.03%이하이다. 그러나, 추진제가 끓는 경우와 벤트되어 날아가는 양의 총합은 충분히 큰 값이다. 벤트를 통해 날아가는 케로신 증기는 약 32.5%의 산소를 함유하고 있다. 이 정도 값은 일반적인 대기중에 있는 산소의 양보다 훨씬 큰 값이다. 따라서, 벤트는 화재 측면에서 볼 때 매우 위험하다는 것을 간과해서는 안된다. 또한, 압력이 낮은 경우, 용해되었던 가스가 분리됨으로 인해 케로신은 급격히 기화하고 끓는 경향을 가진다. 케로신을 사용하는 관점에서 볼 때, 액체의 온도와 밀도에 따른 열적부피팽창 특성이 우수하다. 비행체가 초음속 비행을 하게 되면, 탱크 벽은 102~202°C까지 가열될 수 있다. 이로 인해 케로신의 부피는 원래 액체 부피의 약 10~15%정도 팽창할 수도 있다. 이것은 탱크내 얼리지 공간의 압력 증가로 이어지고, 이로 인해 탱크 벽에 과도한 압력이 작용하는 원치 않는 하중이 소재에 가해지게 된다.

케로신의 열 팽창은 일반적으로 다음 식으로

계산된다.

$$v_t = v_o(1 + \alpha t) \quad (4)$$

v_t - t°C에서의 액체 부피

v_o - 초기 온도에서의 액체 부피

t - 가열 온도°C

α - 부피팽창계수

단위 중량에 따른 부피 팽창 계수값은 표에 있다.

표 4. 밀도 구간별 케로신 부피팽창계수

밀도 변화 구간, kg/m ³	팽창계수, α
0.8-0.82	0.000937
0.82-0.84	0.000882
0.84-0.86	0.000831
0.86-0.88	0.000782
0.88-0.9	0.000734
0.9-0.92	0.000688

2.3.5 케로신의 독성

온도가 낮은 경우 케로신 증기압은 상대적으로 낮다. 따라서, 사람들의 건강에 해가 되는 위험한 농도가 만들어지지 않는다. 그래서 케로신 증기로 인해 건강을 해치는 경우는 매우 드물다. 그러나, 케로신 증기는 호흡하거나 접촉하게 되는 경우에 호흡기를 통해 눈의 각막을 자극하고 기침을 유발하기도 한다. 작업장에서 대기 중 케로신 증기의 최대 허용 농도는 0.3 kg/l 이하이다. 만약 케로신에 의해 심하게 중독되는 경우에는 졸음, 구토, 이명, 소화불량, 상부호흡기 자극이 생긴다. 만성 중독은 두통, 식욕부진, 피부발진, 심장통증, 무기력증, 야위 및 불면증등을 유발한다. 오랜 기간동안 케로신이 피부와 접촉하면 심각하고 만성적인 피부염 질환과 습진을 야기한다. 특히 높은 압력의 케로신이 피부와 접촉을 하게 되면, 예를 들어, 케로신 액체줄기, 이는 매우 위험하다. 이 경우 초기에는 통증과 놀란 부분의 마비가 오며, 약 2-3시간이 경과하면 심하게 붓고, 이 부종은 경우에 따라서 약 7-10일

정도 지속된다. 이 때, 경우에 따라서는 심지어 뼈까지도 침투할 수 있을 만큼 매우 깊숙이 손상된 조직이 파열될 수도 있다.

가장 위험한 것은 몸 전체 혹은 신체의 상당부분을 케로신으로 뒤집어 쓴 경우이다. 이때, 케로신이 사망의 원인이 되기도 한다.

케로신에 의해 발생할 수 있는 이런 사고를 방지하기 위해서는 다음을 준수해야 한다.

- 1) 고농도 케로신을 사용하는 작업장에서는 반드시 강제대류 설비가 작동해야 한다.
- 2) 케로신 증기의 농도가 매우 높아지게 되면, 수동 혹은 자동으로 반가스 설비가 사용되어야 한다.
- 3) 액체가 피부에 떨어지게 된 경우에는 특수 보호복을 착용해야 한다.
- 4) 고농도 케로신 증기의 대기중에서 작업하는 모든 작업자 혹은 액체 케로신을 다루는 모든 작업자는 정기적인 의료 검사를 실시해야 할 필요가 있다.
- 5) 액체를 한 용기에서 다른 용기로 이동시키기 위해서 구강으로 케로신을 빨아들이는 것(관을 사용하지 않고)은 절대로 금지된다.
- 6) 피부 자극을 피하기 위해서 보호 연고(A.B.Selisskii)를 사용하는 것이 권장된다.

2.3.6 케로신 중독시의 1차 조치법

심하게 중독된 경우에는 환자를 신선한 공기가 있는 곳으로 옮기고, 즉시 의사를 부른다. 의사가 도착할때까지 환자가 흥분을 하는 경우에는 환자에게 신경진정제를 줄 것이 권장된다.

중독이 심각한 경우에는 즉, 호흡이 급격히 떨어지거나 정신을 잃는 경우에는 암모니아수 냄새를 맡게 하고 산소 호흡기로 순수 산소를 공급해 준다. 호흡이 멈추는 경우에는 인공호흡을 해야 한다. 그 후에도 환자 스스로 호흡하는 것이 완전해질 때까지 인공호흡을 계속한다. 환자의 호흡이 돌아온 후에는 진한 차 또는 커피를 마시게 하고, 병원으로 이송한다. 만약 눈의 각막이 손실된 경우에는 다량의 깨끗한 물 또는 2%의 식염

수로 눈을 씻어야 한다.

2.3.7 케로신의 안정성

다량의 파라핀 계열 탄화수소를 포함하는 원유의 증류 혹은 크래킹 과정에서 얻어진 케로신은 장기간 보관시 충분히 안정적이지 않으며, 급히 수지(혹은 타르)가 생긴다.

미국의 연구 결과에서 보는 바와 같이 환형 탄화수소는 보관 기간 동안과 엔진에서 냉각되는 조건에서 안정성이 크다. 이 때문에 미국은 인위적으로 환형 탄화수소 성분을 첨가하여, 그로 인해 kokes 생성 경향을 낮추는 케로신 (상품명 R-1)을 많이 사용한다. 미국 학자들은 저장하는 동안과 냉각제로 사용되어 가열이 되는 동안에 연료의 코킹 현상을 줄임으로서 안정성을 향상시킬 목적으로 R-1 케로신과 유사한 특성을 가지는 합성 연료를 얻고자 연구하였다. 그들의 연구 결과, 가장 좋은 생산물은 일반식이 $C_{10}H_{20}$ 또는 $(C_2H_5)_2C_2H_2(H_2C)_4$ 인 디에틸싸이클로헥산임이 밝혀졌다. 디에틸싸이클로헥산은 분자량이 140이고, 밀도가 0.8~0.81kg/m³이며, 어는점은 -80℃이다. 색이 없으며, 케로신과 같은 냄새를 가지는 액체이다.

2.3.8 케로신의 부식성

케로신은 부식성이 약하다. 그래서 재료 선정에 제한은 없다. 그러나, 황이 포함된 (황 결합) 물과 유기산이 사용되는 경우, 케로신의 부식성은 급격히 증가한다. 특히 흑색 금속의 경우에는 더욱 심하다.

2.4. 해외 케로신 개발

초기의 로켓용 케로신은 항공유를 사용했으며, 각국은 목적에 맞도록 항공유를 개량해 왔다. 서방과 러시아의 항공유 개량 과정 및 주요 특징은 다음과 같다.

표 5. 서방의 케로신

종류	개요
RJ-4	- 테트라하이드로메틸사이클로펜타디엔 이량체 - 수분결정생성방지제(FSII) 첨가 - 로켓 개발에 사용되는 재료와의 접촉에 문제가 없음(구조물) - 눈과 피부에 자극은 없으나, 냄새가 역겹고, 상부호흡기를 자극함
RJ-5	- 탄화수소물의 혼합물 - 독성은 운용 가능한 범위에 해당 - 눈과 피부에 자극을 주지는 않지만, 매우 역겨운 냄새가 나고, 호흡기 자극이 심함 - 위험을 최소화했을 경우 미국 독성연구자들은 이 연료의 돌연변이 유발 성분은 없는 것으로 간주함
RJ-6	- 고점도성 RJ-5와 저점도성 RJ-10의 혼합물 - 독성 3등급
JP-9	- JP-9A(개량형) - 열안정성 우수하여 타 구조물과의 반응성 및 재료의 기밀 문제 없이 장기보관 가능(5년) - 독성 3등급 - 장기 취급시 부종 발생
JP-10	- 고체생성물(엔도-테트라하이드로사이클로펜타디엔)을 발생 - 저온에서도 좋은 특성을 가짐 - 독성 3등급
SI-80	- RJ-5와 같은 독성을 지님

표 6. 러시아의 케로신

종류	개요
TC-1(T-1)	- 초음속 및 아음속에 사용(단, 초음속 비행시 사용 시간 제한있음)
RT	- TS-1과 규격이 완벽하게 일치하므로, TS-1의 대체가 가능 - TS-1보다 열적으로 안정(TS-1보다 고온에서 사용 가능), 따라서,

	초음속 구간이 길어서 공력가열이 심한 비행체에 사용이 권장됨
T-8V	- TS-1, RT보다 밀도가 높음(0.8g/cm ³ 이상) - 비행시간이 긴 초음속 비행체에 사용
T-6	- 열안정성 높음 - 밀도 높음(0.84g/cm ³ 이상) - 낮은 증기압 - 초음속 비행구간이 긴 고속 비행체에 적용
T-2	- 밀도가 0.755 g/cm ³ 이상인 브로드중류제품 - 중류층이 넓은 관계로 원유로부터 TS-1보다 1.3~1.8배 더 추출 가능 - 제한적으로 TS-1, RT, T-8V 대체용으로 사용됨
RG-1 (나프틸)	- 원유의 재처리 과정에서 얻어짐 - 열특성은 T-6에 못미침 - 열 안정성이 매우 우수(장기보관 가능. 3년 이상)
NG-1	- T-6 및 나프틸 개발 후 열량 향상을 위해 개발 - 실험실에서 축소형 엔진에 대해 시험 성공했으나, 연소가스내에 붕소(B)함량이 많고, 연료와 연소가스내에 독성분이 많아서 실제 적용은 어려움

서방과 러시아의 케로신 규격을 비교한 결과, 서방에서 말하는 JetA-1은 러시아의 T-1(혹은 TS-1 또는 RT)와 유사하고, JP-4는 T-2와 유사함을 알 수 있었다.

2.5. 해외 케로신 사용규정(예)

해외에서는 발사체의 추진제로 사용되는 케로신을 취급함에 있어 작업자의 생명과 시설물의 보호 및 원활한 시험 수행을 위해 취급안전 규정을 별도로 지정하여 관리하고 있다. 그 중 한 예

는 다음과 같다.

1. 보관, 저장, 이송등 케로신 사용시 인화점 (60도) 아래에서 운용되어야 한다.
2. 정격전류로부터 보호하기 위해서 모든 장비는 접지 되어있어야 한다.
3. 저장탱크의 안전거리 확보는 필수이다.

45kg까지	최소 10m
4530kg까지	최소 28m
22700kg까지	최소 37m
136000kg까지	최소 50m
4. 무색 혹은 옅은 황색이다.
5. 일반적으로 인체에 무해하나 약한 독성 보유.(눈의 각막과 코와 목을 자극할 수 있으며, 피부막 자극을 유발할 수 있다)
6. 대기중 최대 허용 증기 밀도는 300mg/m³이다.
7. 100도 이하에서 공기와 접촉이 없는 경우 열적으로 안정하다.
8. 고온에서 산소 혹은 산화성 공기와 접촉하는 경우 연소된다.
9. 케로신 증기는 공기와 함께 폭발 혼합물임 :GOST 기준 4등급에 해당(위험도)
10. 저장 및 사용 공간에서 불이 직접 노출되어서는 안된다.
11. 증기가 발화하는 경우 충격에 의한 불꽃을 유발할 수 있는 장비의 사용이 금지된다.
12. 연료를 배분하는 경우, 이는 별도의 공간에서 수행되어야 하며, 흘렸을 때는 마른 수건으로 닦는다.
13. 연료 배분 시 그 장소는 개방된 공간이어야 한다.
14. 연료를 사용하는 공간은 강제 환기시설이 반드시 필요하다.
15. 개인보호장비를 착용한다.

4. 결 론

연료의 개발 및 확보는 독자적인 발사체를 개발함에 있어 가장 필수적인 요소 중의 하나이다.

안정적인 연소 조건을 만족하는 추진제를 선택하고 개발할 때 요구되는 각종 기술요구조건을 에너지원으로서의 성능, 냉각 효과측면에서의 설계 조건, 그리고 취급과 안정 및 독성등과 관련된 운용면에서 일차적으로 정리하였다.

또한, KSLV-I에 사용되는 케로신에 대한 보다 전문적인 물리화학 특성자료를 확보하여 발사체 설계 및 분석에 활용하고자 하였다.

그리고, 지난 50여 년간 서방 및 러시아에서 개발된 케로신의 종류와 그 특징을 조사하여, 국내에서 사용 중인 케로신의 특성과 비교, 한국형 케로신 개발에 사용될 예정이다.

특히, 설계 단계에서는 간과하기 쉬운 취급시의 주의 사항 및 케로신의 독성과 중독에 대해 관련 설계자 및 작업자들이 미리 인식함으로써, 케로신 취급 시 야기될 수 있는 각종 안전사고를 예방할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 임석희, 정영석, 조기주, 오승협, "로켓용 추진제요구조건 및 해외연료개발현황", KARI 기술자료문서, 2006.
2. M.I. Shevelyuk,, Theoretical principles of LRE Design, Moscow, National science-technical press., 1960.
3. GOST 12308-89.
4. N.F.Dybovkin, Fuels for Air-breathing Engines.
5. G. B. Sinyarev and M. V. Dobrovolsky, Liquid rocket engine, Moscow, Voennoe izdatelstvo, 1955.
6. M. S. Shtekher, Propellant and working material of rocket engine, Moscow, Mashinostroenie, 1976.