

유도무기용 고온 내열재료

윤 남 군

1. 서 론

유도무기용 추진기관은 추진기관 연소실에서 형성된 고온, 고압의 추진제 연소 가스를 팽창시켜 이 가스를 노즐로 통과하게 함으로써 운동에너지를 형성하고 이를 비행체에 추력으로 공급하는 기능을 담당한다. 이때 비행체는 초음속으로 비행하게 되며 비행체를 구성하는 재료는 고성능의 재료 물성을 가져야만 한다. 예를 들어 비행체의 외피는 높은 내열성, 높은 강도의 물성과 적은 무게가 요구되며 연소관은 높은 압력과 높은 온도를 견뎌야 하고 노즐 재료는 높은 내열성과 적은 삭마 특성을 지녀야 한다.

추진기관에 사용되는 내열재료는 3,000 °C의 온도와 2,500 psi의 압력 환경을 가지게 되는데 그림 1에 실제 추진기관의 연소장면을 나타내었다. 내열재료는 일정 수준의 기계적 강도와 높은 내열성을 요구하기 때문에 내열재료의 사용에 극히 제한 조건을 가지고 있다. 본 총설에서는 추진기관에 사용되는 내열재료의 종류, 내열재료의 특성, 제작공정, 열설계/해석에 대한 일반적인 내용을 다루었다.



그림 1. Photograph of propulsion test firing.

diative system)와 흡수계(absorptive system)로 나누어지는데 이중 흡수계는 다시 heat sink, film 및 transpiration cooling, 삭마계(ablative system)와 대류계로 구분된다.¹ 고온 열 차폐계중 어떤 방법을 채택하는가 하는 문제는 계에서의 열 전달 속도, 열 충격의 지속 시간, 총 열 유입량, 부분압, 공기 역학적 전단력 등의 조건들을 고려하여 결정하는데 이중 삭마에 의한 냉각 방법(ablative cooling)은 유인

2. 삭마성 내열재료

고온용 내열재료는 외부로부터 유입되는 많은 양의 열을 강력한 탄소 결합 분해 에너지로서 효과적으로 차단하는 열 차폐 시스템이다. 이러한 목적으로 지금까지 개발된 열 차폐계는 주위에서 유입되는 에너지를 소산시키는 방식에 따라 크게 복사계(ra-



윤남균

1986 부산대학교 고분자공학과(학사)
1988 부산대학교 고분자공학과(석사)
1988~ 국방과학연구소 선임연구원
현재

High Temperature Ablative Materials for Rocket Propulsion

국방과학연구소 기-4-3(Nam-Gyun Yun, TRC-4-3, Agency for Defense Development, Yusong P.O.Box 35-5, Taejon 305-600, Korea)

또는 무인 우주선의 대기권 재돌입시 수반되는 많은 문제들의 경제적이며 효과적인 해결책으로 선정되어 많은 연구가 진행됨에 따라²⁻⁵ 고체 추진기관의 열차폐에 가장 널리 적용되고 있다. 본 장에서는 열 차폐용 삭마성 내열재료의 종류와 재료 선정을 위한 시험 방법, 설계 및 제작 기법, 성능 평가 기준 등에 관하여 소개하고자 한다.

2.1 내열재료의 종류

삭마현상은 “소량의 표면 물질을 소모함으로써 유입되는 많은 외부 열 에너지를 소산시키는 열과 물질의 전달과정”으로 정의할 수 있는데⁶ 이러한 내열재료로서 초기에는 열경화성 수지인 페놀수지, 에폭시 수지 등을 사용하였으나 그 후 재료의 기계적 강도를 향상시키기 위하여 강화섬유를 첨가한 복합재료가 개발되어 주로 사용되고 있으며 현재에는 모재(matrix)로서 수지뿐만 아니라 세라믹과 같은 무기재료, 금속재료 등과 이에 적합한 강화섬유를 조합하여 내열성과 강도를 겸비한 최적의 재료를 개발하려는 노력이 진행되고 있다.

삭마성 내열재료의 종류와 그 특성은 다음과 같다.

2.1.1 강화 플라스틱

강화 플라스틱 내열재의 수지로서는 대표적인 charring polymer인 페놀릭이 경제성이나 성능 등을 고려하여 가장 널리 사용되며 보강재로서는 그라파이트, 카본, 실리카, 유리, 석면 섬유 등이 사용된다. 그라파이트/페놀릭은 카본/페놀릭에 비하여 내삭마성이 우수하고 열적으로 다소 안정하며 카본/페놀릭은 가격, 강도면에서 유리하고 열확산 계수가 낮다. 실리카/페놀릭은 삭마가 심하지 않은 부위에 사용되며 유리/페놀릭과 석면/페놀릭은 주로 단열재료만 사용된다.

추진기관 노즐목 재료로서의 가장 중요한 기능이 노즐의 공력형상을 최대한 유지하고(내열기능) 외부 구조물의 온도상승을 일정 수준 이하로 제한하는(단열기능) 것인데 그라파이트/페놀릭 또는 카본/페놀릭은 실리카/페놀릭이나 석면/페놀릭에 비하여 내삭마성이 우수하나 열전도율이 많으므로 배면 구조물의 온도상승이 제한 받을 경우에는 1차적인 내삭마재료만 사용되며 바깥쪽에 다시 열전도도가 다소 낮은 실리카/페놀릭 등으로 열차단을 하는 기법이 사용된다.

2.1.2 흑연(Graphite)

가) 다결정 흑연(Polycrystalline Graphite)

다결정 흑연은 가격이 비교적 싸고 내삭마성이 크

며 2,000 °C 이상에서도 강도를 유지하는 장점이 있으나 열 충격에 약하여 두껍게 설계해야 하고 외부 구조물이 받쳐주어야 하는 제한 조건이 있으므로 노즐목 등 치수 안정성을 요하는 부분에 선별적으로 사용된다. 또한 열충격에 약한 흑연의 특성을 보완하기 위하여 한 부품을 몇 개의 조각으로 절단하여 사용하기도 하며 실리콘카바이드(SiC) 또는 지르코늄 옥사이드(ZrO_2)로 표면을 코팅하여 사용하기도 한다. 다결정 흑연은 열확산도가 높으므로 배면에 적절한 두께의 단열재와 전후방 지지링을 설치하는 경우가 많다.

나) 열증착 흑연(Pyrolytic Graphite)

열증착 흑연은 가스 상태의 카본을 화학증착시켜 제조되므로 밀도가 매우 크고 다결정 흑연과는 달리 비등방성(anisotropic)을 가진다. 따라서 층에 수직 한 방향으로의 내삭마성이 훨씬 우수하나 제조 공정상 두껍게 만들 수 없으므로 평판형으로 제조하여 와셔(washer)형으로 가공하여 여러개를 겹쳐 사용하는데 이때 제조가능한 평판 두께는 10 mm를 넘지 못한다. 열증착 흑연을 와셔형으로 사용할 때는 다결정 흑연 또는 페놀릭계의 백업 링을 함께 적용하는 것이 보통이다.

2.1.3 탄소/탄소 복합재료

탄소섬유는 4,000 K의 고온에서도 고체 상태로 유지되는 유일한 재료이며 저온에서 취성을 나타내지 않는 특징을 지니고 있다. 그리고 비강도와 비강성율이 금속재료보다 우수하여 영율 및 인장강도가 각각 200-700 GPa, 2,000-5,000 MPa 정도이다. 또한 그 이외에도 우수한 피로 저항성, 열충격 저항성 및 섬유축 방향에 대한 낮은 열팽창율을 갖고 있다. 그러나 탄소섬유가 이와 같은 우수한 성질을 갖고 있음에도 불구하고 섬유만으로는 구조물 형태로 응용이 불가하므로 섬유에 결합재 물질을 첨가한 복합재료의 형태로 사용된다. 탄소섬유에 탄소 소재를 결합재로 하는 탄소/탄소 복합재료는 1958년 미국 공군의 우주항공계획의 일환인 아폴로 연구를 통해 본격적으로 개발되기 시작했다. 국내에서는 1990년 초부터 국방과학연구소가 개발을 시작하여 현재는 항공기용 브레이크 디스크와 노즐용 내열재료를 생산하고 있다. 탄소/탄소 복합재료는 열안정성 및 높은 열전도도와 낮은 열팽창 거동으로 인하여 열충격에 대한 저항성이 우수하여 유도무기용 추진기관, 항공기의 브레이크 디스크, space shuttle의 nose cap과 날개의 leading edge 등으로 사용되고 있다.

2.1.4 내화성 금속(Refractory Metal)

텅스텐, 텅스텐계 합금, 은 합침 텅스텐, 몰리브덴 등이 소규모 노즐목 재료로 사용되고 있는데 이러한 금속계 노즐목은 축방향 및 원주방향 열 팽창 간극을 충분히 주어야 하며 백업 링과 전, 후방링을 설치해야 한다. 은 합침 텅스텐은 모재로서 합침된 은의 기화에 의한 냉각효과가 있으며 열충격에도 강하다. 몰리브덴은 비교적 낮은 온도 조건에서만 사용된다.

2.2 내열재료의 설계

추진기관의 노즐재료(liner 또는 insulator)로 사용되는 내열재료는 다음의 사항들을 고려하여 그 두께를 결정한다.

- 예상되는 삭마(erosion) 두께
- 예상되는 숯층(char layer) 깊이
- 외부 구조물을 허용온도 이하로 유지시킬 수 있는 virgin material의 두께
- 안전 여유

이러한 항목들에 대한 간략한 계산 및 예측방법은 다음과 같다.

2.2.1 삭마율

삭마량은 각 재료별로 유사한 조건에서 측정하여 얻은 삭마율 data를 외삽하여 구하고, 변형된 Bartz식을⁷ 사용하여 삭마율을 예측한다. 즉

$$\text{삭마율} = (\text{측정된 삭마율}) \left(\frac{P_c}{P_{cm}} \right)^{0.8} \left(\frac{D_{tm}}{D_t} \right)^{0.2}$$

여기서 P_c : 설계된 모타의 연소실 압력

P_{cm} : 측정된 모타의 연소실 압력

D_t : 설계된 모타의 노즐목 직경

D_{tm} : 측정된 모타의 노즐목 직경

이 식에서 재료가 탄화성인 경우에는 추진제의 부식성에 대한 보정이 필요하다.⁸

2.2.2 숯층 두께(Char Depth)

숯층 두께는 측정된 데이터를 외삽하여 추정하며 시간과 온도에 따라 보정하여 사용한다. 즉,

$$X = A\theta^m \exp(-B/Q)$$

여기서 X 는 숯층 두께, θ 는 연소시간, A , m , B 는 실험상수, Q 는 열속(heat flux)을 각각 나타낸다. 위 식에서 A , m , B 는 주어진 재료에 따라 실험적으로 결정된다. Barker 등에⁹ 의하면 그라파이트와 실리카의 경우 위 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{그라파이트/폐놀} : X = 0.036 \theta^{0.65} \exp(-66.5/Q)$$

$$\text{실리카/폐놀} : X = 0.031 \theta^{0.68} \exp(-90.4/Q)$$

삭마율의 안전여유는 무인로켓의 경우 부분에 따라 0.1~0.5를 주고 유인 로켓인 경우는 모든 부분에 1.0을 준다.

3. 삭마성 내열재료의 제작 및 성능 평가 기준

3.1 내열재료의 제작

삭마성 내열재료는 기지재료로서 강화섬유(유리, 실리카, 탄소섬유)와 모재로서 열경화성 고분자계 수지(페놀릭, 폴리이미드, 에폭시)가 주로 사용되는데 제품의 특성에 따라 소량의 첨가제가 투입된다. 섬유강화재에 수지가 함침된 재료를 프리프레그(prepreg)라고 부르며 이 프리프레그를 특정한 삭마효과를 얻기 위하여 특정한 방향이 되도록 적층한 후 열경화하여 내열재 부품을 얻는다. 그림 2에 내열재료 제작 공정의 흐름도를 나타내었으며 그림 3에 여러 가지 제작 방법을 간략히 제시하였다. 제작 공정에 따른 내열재 제작 방법은 다음과 같다.

3.1.1 테이프 래핑(Tape Wrapping)

Tape wrapping 방법은 설계시 미리 결정된 섬유 배향 각도로 내열재 예비형상(preform)을 만들기 위하여 맨드릴 주위에 straight 또는 bias 형태의 프리프레그 테이프를 감아나가는 제작공법으로서 추진제 가스의 유동방향에 대하여 적층각도를 변화시킴으로써 삭마량의 조절이 가능하다(그림 3의 (a), (b)). 맨드릴과의 적층각도는 부품의 형상(외경, 내경)과 테이프의 폭, 작업자의 숙련도 등에 따라 정해진다.

이 방법은 테이프를 straight 또는 bias 형태로 절단한 후 연속적인 테이프 형태로 만든 다음 heating gun으로 열을 가하면서 테이프의 장력과 프레스 롤러의 압력으로 맨드릴 위에 압착, 감아나가서 preform을 형성시키게 된다. 압착된 테이프는 CO₂ 등의 기체로 즉시 냉각시켜 spring back(밀려 올라가는 현상)과 wrinkling(주름현상)을 최소화시킨다. 그림 4에 개략적인 테이프 래핑 공정을 그림으로 나타내었다.

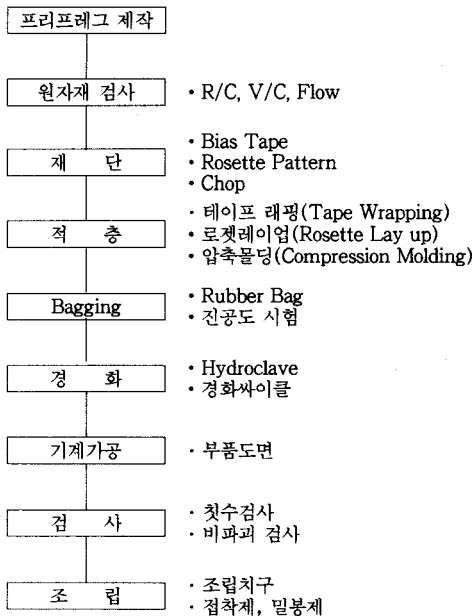


그림 2. Flow chart of manufacturing for ablative composite materials for rocket nozzle.

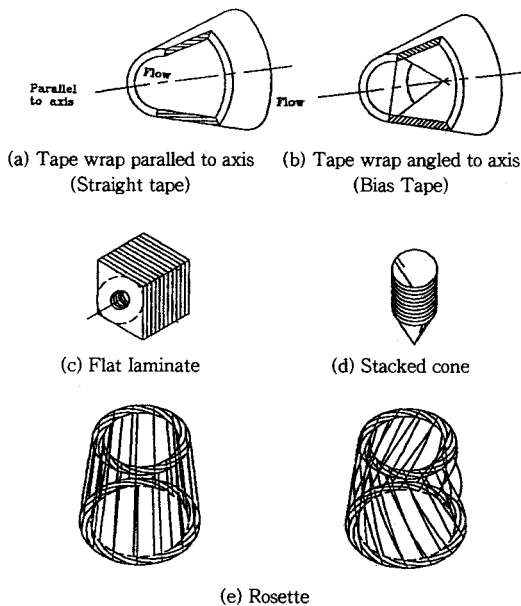


그림 3. Various methods for manufacturing ablative composite materials.

3.1.2 레이업(Lay-up)

부품의 적층 각도가 테이프래핑의 적층범위를 벗어나는 경우에 레이업 방법을 사용하는데 평면 레이

1) SCHEMATIC DIAGRAM OF TAPE WRAPPING M/C

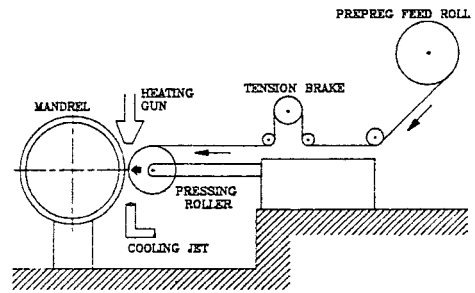


그림 4. Schematic diagram of tape wrapping process.

업, Stacked cone 레이업, Rosette 레이업 등의 방법이 있다.

가) 평면 레이업(Flat laminates)

프리프레그를 평판 적층하여 제작, 가공하여 사용한다. 기계흐름에 대하여 ply 각도가 90° 가 되는 부품을 제작할 수 있으나 제품의 크기에 제한이 따른다(그림 3(c)).

나) 스택트콘 레이업(Stacked cone lay-up)

Cone 형태로 제작된 여러장의 pattern을 적층하여 제작한다. Ply 각도가 축에 대하여 15° 이상일 때만 가능하며 작업자의 숙련이 필요하다(그림 3(d)).

다) 로제트 레이업(Rosette lay-up)

이 방법은 장미 꽃잎의 형상과 같이 여러 장의 pattern을 서로 끼워 넣어 배열시킴으로써 ply의 한쪽 끝은 부품의 내면에 나타나게 하고 반대편 끝은 부품의 외면에 나타나게 하는 제작 기법으로서 각 ply들은 같은 두께 및 형태의 pattern으로 제작되어 마치 카메라 셔터의 조리개와 같이 서로 겹치게 배열된다(그림 2(e)).

이 방법에 의하여 제작된 부품은 경화반응시 배출되는 휘발분의 제거가 용이하여 경화상태가 좋아지고 wrinkling이 감소되는 장점이 있다. 또한 제작공정이 단순하여 특별한 기술을 요하지 않아 제품의 신뢰도가 증가되는 이점을 가진다.

3.1.3 압축 몰딩(Compression Molding 또는 Matched Metal Die Molding)

썸(Chop) 형태의 chopped fabric 또는 chopped roving을 사용, 프레스에서 가열, 가압하여 부품을 성형하는 방법이다. 이 방법에 의하여 제작된 부품은 내삭마성이 낮고 표면에서의 spalling이나 chunking 등의 현상이 일어나기 쉬운 단점이 있으나 많은 양의 부품을 제작하는 경우 제작시간이 단축되고 제작비용이 절감되는 장점이 있어 삭마가 심

하지 않은 부위나 모양이 복잡하여 다른 방법을 사용할 수 없는 부품을 제작할 때 사용된다.

3.2 내열재료의 성능평가 기준 및 평가방법

내열재료의 성능은 각 환경조건에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 삭마열(heat of ablation), 단열지수(insulation index), 유효열용량(effective heat capacity) 등에 의하여 평가된다.

3.2.1 삭마열

내열재료의 설계상, 가장 중요한 변수인 유효삭마열은 소모된 단위 재료질량에 대한 재료의 열 흡수, 분산, 차단 능력을 나타내며 다음과 같이 정의된다.¹⁰

$$H_{eff} = \frac{q_o}{m}$$

여기서 H_{eff} 는 유효삭마열, q_o 는 표면에서 유입되는 열이고 m 은 삭마에 의하여 깎여 나가는 질량 삭마율이다.

3.2.2 단열지수

단열지수는 외부의 고온환경의 온도를 표면지역에 국한시키는 능력을 말한다. 즉, 온도적 측면에서 재료의 지정된 위치가 지정된 온도를 유지하기 위하여 필요한 재료의 상대적인 두께를 나타낸다. 단열재의 중량은 다음 식으로 계산한다.

$$W_{ins} = \frac{Q_o}{C_p(T_w - T_{bw})}$$

여기서 W_{ins} 는 단위 면적당 단열재 무게, Q_o 는 가열이 종료되었을 때의 재료내부에 축적된 열량, C_p 는 재료의 비열, $(T_w - T_{bw})$ 는 허용가능한 배면벽의 온도상승치이다.

3.2.3 유효열용량

내열재의 삭마성능을 삭마열과 단열지수를 종합적으로 고려하여 유효 열용량이라는 하나의 설계변수를 나타낼 수 있다. 즉

$$Q_{eff} = \frac{Q_{cw}}{\rho(X_{ab} + X_{ins})} \text{ for } T_{max}$$

여기서 Q_{eff} 는 유효열용량, Q_{cw} 는 총 유입열량, ρ 는 재료밀도, X_{ab} 는 총 삭마두께, X_{ins} 는 총 단열두께이고 T_{max} 는 허용가능한 배면벽의 최대온도이다.

이 식은 재료의 종류나 열차폐 방법에 관계없이 열차폐에 필요한 설계중량을 직접 비교할 수 있다는

특징을 가지고 있다.

3.2.4 내열재료의 평가방법

내열재료의 성능을 시험하고 내열 및 단열지수를 구하여 내열재 설계에 활용하기 위하여 여러 가지 평가 방법이 사용되고 있다.

Oxy-Acetylene Torch 시험, Arc-Image Pyrolysis 시험, CO₂레이저 시험, Plasma Arc Heater 시험, Arc-Wind Tunnel 시험, 그리고 로켓 모타 연소시험 등이 있는데 이중 Torch 시험은 적은 비용으로 간편하고 신속하게 재료의 선별이 가능한 반면, 열량이 낮고 노출면적이 작은 것이 단점이다. Arc-Image 시험은 가열속도의 조절이 용이하나 공기역학적 유동을 작용시킬 수 없는 단점이 있으며 CO₂레이저 방법은 Arc-Image 방법에 비하여 높은 열량의 적용이 가능하다. Plasma Arc Heater 방법은 여러 가지 성분을 가진 초고온의 가스를 사용할 수 있으나 질량 유동이 낮고 적용되는 표면적이 작은 결점이 있다. 끝으로 로켓모타 연소시험 방법은 실제의 연소조건으로 시험하므로 신뢰성은 가장 높지만 비용이 많이 들고 원하는 변수를 독립적으로 변화시킬 수 없다는 단점을 가진다.

4. 고온용 내열재료 열 설계/해석

고체 로켓 추진기관의 노즐은 연소실에서 생성된 배기가스를 팽창시켜 운동에너지를 효율적으로 변환 시킴으로써 비행체에 추력을 공급하는 기능을 담당한다. 비행체 추력의 약 65-75%는 노즐목까지의 아음속 영역의 가속에 의해 발생하고, 나머지는 초음속 영역의 팽창과정에서 발생한다. 노즐설계의 목적은 제한된 외면모양(envelope), 무게 및 비용 조건하에서 비행거리 및 적재폭발력(payload)을 최대화할 수 있도록 배기가스의 팽창을 조정하는 것이다. 따라서 노즐은 보다 큰 체계의 한 종합적인 구성요소이며, 그 체계를 고려하지 않고는 최적화될 수 없다. 이러한 상관성 때문에 노즐설계는 공력, 열, 구조, 제작 등을 고려한 반복적인 과정을 거쳐 이루어진다. 설계된 노즐은 먼저 열 및 구조적으로 상세 해석을 통해 평가되고, 그 다음에 전체 비행체 성능에 미치는 영향을 분석하게 된다. 이와 같은 이중의 반복과정은 실질적으로 가장 최적조건이 성립할 때까지 계속된다.

노즐설계에 대한 요구조건들은 체계에 의해서 제

시되거나, 또는 노즐 설계자의 자유재량에 맡겨진다. 체계에 의한 요구사항들은 노즐 무게, 성능, 외면모양 등에 기초를 둔다. 일반적으로 노즐설계를 위해 다음의 변수들을 정의한다.

- ① 설계 압력
- ② 예상 압력-시간 선도 : 평균압력, 연소시간, 그리고 필요한 경우 비행시간 등
- ③ 추진제 물성치 : 연소실 온도, 열역학 상수, 연소생성물의 열화학적 물성치(산화비, 분출계수, 부식지수 등)
- ④ 노즐목 크기
- ⑤ 노즐목 크기의 변화 허용치
- ⑥ 외면모양 제한조건
- ⑦ 팽창비
- ⑧ 출구 형상
- ⑨ 노즐 내삽정도
- ⑩ 추력방향조정 각도 또는 힘
- ⑪ 연소관 연결직경
- ⑫ 무게, 신뢰도, 비용 및 개발시간에 대한 지침
- ⑬ 생산소요시간 및 총생산갯수
- ⑭ 보관과 작동 환경

일정한 연소압력을 유지하기 위해서는 일정한 노즐목 면적이 요구된다. 그러나 그레인 설계자가 노즐목 삭마를 감안하여 설계할 수 있으며, 이 경우 그레인 설계와 노즐목 설계의 반복과정이 요구된다. 노즐목 삭마는 상대적인 노즐목 변화 때문에 큰 추진기관보다는 작은 추진기관에서 더 심각하며, 따라서 연소시간이 매우 짧은 경우를 제외하고는 작은 노즐목을 위하여 내삭마성이 보다 우수한 재료를 선택하여야 한다. 일반적으로 외면모양 제한조건(envelop limit)은 연소관 개구부(opening), 출구반각, 그리고 팽창비에 의해 정해진다. 경우에 따라서는 노즐 주위에 계층장비 또는 유도장치의 설치에 의해 외면모양의 조건이 더욱 제한되기도 한다. 특별한 조건이 없는 한 노즐의 외경이 추진기관의 외경 보다 크지 않게 하는 것이 보통이다.

노즐설계는 반복과정을 통해서 이루어진다. 먼저 치수를 정하기 위한 간단한 식, 설계 커브, 컴퓨터 프로그램, 공력형상이나 내열 및 단열재나 구조물 등을 배치하는 공학적 판단 등을 사용하여 설계가 시작되는 것이 보통이다. 이렇게 설계된 것이 바로 상세설계 그 자체가 되는 경우도 있다. 공력, 열, 구조 등의 의문시되는 영역이 있을 경우에는 그 부분을 보다 정교하게 해석하고, 그 해석결과를 사용하

여 필요에 따라 재료를 바꾸고 접촉면을 윤기는 등 설계를 수정한다. 설계된 형상은 다시 이전 보다 훨씬 더 정교한 방법으로 해석한다. 비용 절감, 제작상의 잠재된 문제 제거 등의 제작상의 문제는 이 시점에서 검토된다. 연소시험 후 분석결과가 다시 설계에 반영되며, 이와 같은 과정이 더 반복될 수도 있다.

공력설계에서는 요구 추력을 구현하기 위한 수렴부, 노즐목 및 발산부의 형상을 정하고, 열설계에서는 공력형상을 유지하기 위한 노즐목 삽입재, 내열재 및 단열재의 재료와 형상을 정하며, 구조설계에서는 내열부품들을 지지하고 예상하중에 견딜 수 있도록 구조물의 재료와 형상을 정한다.

노즐입구 영역은 콘 모양의 외삽(external)모양이거나 또는 내삽(submerged)모양이다. 경우에 따라서는 긴 원통 또는 약간 경사진 토출관(blast tube)이 사용되기도 한다. 내삽노즐(submerged nozzle)의 경우 유동장은 포텐셜 유동영역, 유동박리 경계, 와류 유동영역의 성질들을 가진다. 현재의 해석 수준으로서는 이 영역에서의 유동을 적절하게 묘사하지는 못하고 있다. 와류유동 영역에서의 속도는 마하수 0.01에서 0.10 정도로 낮다. 일반적으로 노즐목에서 선단부(leading edge)까지의 길이는 노즐목 반경의 0.42-5.4배 범위를 가지며 평균적으로 보면 약 1배이다. 또한 수축비 즉 선단부에서의 유동단면적은 노즐목에서의 유동단면적의 1.5-8.8배 정도이며 평균적으로는 약 3.0배이다. 선단부로부터 노즐목을 연결하는 단면형상은 타원, 여러개의 원호를 접선방향으로 연결한 선, 쌍곡선 등이 주로 사용된다. 실험 및 이론적 고찰에 의하면 후자가 거의 균일한 가속을 일으켜 삭마를 감소시키고 또 균일하게 한다. 그러나 그 차이는 현저하지 않으며 위의 3가지 형상이 다 적절하다고 할 수 있다. 형상에 의한 영향들이 명확하지 않으며, 열적, 구조적 또는 역학적으로 고려하여 형상을 결정하는 것이 실질적이라 하겠다. 외삽노즐(external nozzle)의 경우 유동장은 포텐셜 유동의 성질을 가지고, 연소실과 노즐의 연결부의 수축비는 노즐설계 요구조건이라기 보다는 연소실 및 체계설계 요구조건인 것이 보통이다. 수렴반각은 1°에서 75°까지 변할 수 있으며 보통 45° 근처를 사용한다. 실험에 의하면 입구각도가 비추력에 미치는 영향은 미미하다. 그러나 각이 크면 클수록 내열재의 삭마(ablation)가 증가하며, 이것은 고체 입자의 충돌과 얇은 경계층 두께에 기인하는 것으로 보인다. 체계설계에서는 토출관의 직경을 최

소화하려고 하는 것이 보통이며, 무게, 비용, 외부모양 등을 고려하여 직경을 결정한다. 직경이 감소함에 따라 마하수가 증가하고 삭마와 슛도 따라서 증가하며, 이것으로 인하여 보다 고가의 내열재료가 불가피하게 적용될 때도 있다. 또한 마찰유동과 압력강하 등의 효과도 현저해지며 성능도 그만큼 저하된다. 몇몇 시험결과에 의하면 마하수가 낮은 긴 내열재료는 노즐목과 입구의 삭마를 감소시키는 것으로 나타난다.

노즐목의 형상은 기하학적으로 최소면적이 되는 위치에서의 상류 원호와 하류 원호로 구성된다. 많은 경우 노즐목을 짧은 원통모양(tubular type)으로 하기도 하는데 이 경우 다음과 같은 장점이 있다.

- 노즐 얼라인먼트를 좋게 해서 기하학적 목의 위치를 용이하게 한다.

- 노즐목의 기계가공을 용이하게 하여 그 직경의 허용오차를 쉽게 맞출 수 있다.

- 길이가 노즐목 반경의 1/2 이상되는 상대적으로 긴 원통길이는 노즐목 삭마를 현저하게 줄여주는 효과가 있다.

그러나 원통형 노즐목은 전체 노즐의 길이를 증가시킨다는 문제점도 있다. 상류원호의 반경은 보통 노즐목 반경의 0배(sharp throat)에서 5배까지 사용되며, 대부분의 경우 1배에서 2배의 범위이다. 하류원호의 반경은 노즐목 반경의 0배에서 6배 정도이며 1배에서 2배의 범위를 대부분 사용한다. 그러나 작은 배율을 적용하려고 하는 것이 일반적인 경향이며, 그 이유는 전체노즐 길이는 짧아지고 성능저하 효과는 크지 않기 때문이다.

노즐출구 모양을 직선형(conical)으로 하느냐 곡선형(contoured)으로 하느냐 하는 것은 성능, 무게, 비용 등을 고려하여 결정할 일이다. 무게 측면에서 보면 곡선형이 좋지만, 이 경우 출구 단면 바로 앞쪽에서 심한 삭마를 겪게 된다. 가격 측면에서는 금형비가 문제가 되나 양산일 경우에는 그 차이를 무시할 수 있다. 성능 측면에서는 곡선형이 비추력을 개선할 수 있다. 곡선형이 노즐 전체길이를 줄여준다는 것은 당연하다. 보통 성공적으로 사용하는 출구반각은 6°-28°이지만, 대부분의 경우 15° 또는 17.5°이다. 만일 성능의 최대화가 중요하지 않을 경우, 노즐직경이 10"(254 mm)까지는 출구반각 15°, 그 이상의 노즐직경에 대해서는 출구반각 17.5°를 적용하는 것이 표준적이다. 곡선형의 경우 곡선을 정의하기 위하여 원호, 포물선, MOC(method-of-

characteristics) 유동격자의 유선들 등이 사용된다. 노즐목의 하류원호와 접점이 되는 위치에서의 벽각도를 초기 확산각도 또는 최대 출구각도라 하고 출구평면에서의 벽각도를 출구각도라 한다. 초기 확산각도는 32°까지 성공적으로 사용되지만 20°-26°가 가장 일반적으로 사용되는 각도이다. 초기확산각도와 출구각도의 차이는 성능에 현저한 영향을 미치며, 실험자료에 의하면 그 차이가 12°를 넘어서면 비추력 손실이 매우 심한 것으로 나타난다.

4.1 열설계

열설계의 목적은 노즐의 공력형상을 최대한 유지하고 구조물의 온도상승을 일정 수준 이하로 제한하는 것이다. 내열재(thermal liner)는 전자의 목적으로 사용되고 단열재(insulator)는 후자의 목적으로 사용된다. 한편 노즐목은 삭마에 의한 노즐목 확공을 억제시키기 위하여 노즐목 부위에 특별한 내삭마성 내열재를 사용한다. 실제 설계에서 노즐목과 다른 내열재를 먼저 설계하고 그 다음에 단열재를 설계하는 것이 일반적인 순서이며, 노즐목과 내열재료로는 내삭마성이 좋은 재료를, 그리고 단열재료로는 열확산 계수가 낮은 재료를 선택하여야 한다. 일반적으로 내열재료가 단열재료에 비해서 비싸므로 내열재료의 적용을 최소화하는 것이 바람직하다. 또한 노즐목은 고가이면서 지지할 다른 부품들이 소요되어서 그 사용부위를 노즐목 부위에 국한한다.

Tungsten, pyrolytic graphite, polycrystalline graphite 등의 노즐목 전후방으로 페놀계를 적용시킬 경우 약 30초 이상의 연소시간에 대하여 노즐효율이 약 1-3% 떨어진다. 삭마나 슛에 대하여 노즐의 공력형상을 효율적으로 유지시키는 것을 "형상조절(contour contour)"이라 하며, carbon/carbon 및 pyrolytic graphite 코팅 등의 새로운 재료의 개발에 힘입어 이전에는 불가능하였던 정도의 형상조절이 가능하여졌다. Pyrolytic graphite 노즐목에 carbon/carbon을 사용할 경우 약 1%의 노즐효율상승이 있다는 보고도 있다. 이와 같이 열설계는 노즐효율 손실을 최소화하는 재료의 선택과 형상조절을 고려하여야 하며, 특별히 노즐목 부위에서 불연속적인 삭마를 최소화하도록 유의하여야 한다. 이와 같은 불연속은 노즐효율 손실의 주된 원인이 되기 때문이다.

4.1.1 노즐목

노즐목은 다음의 여섯 종류의 재료들이 주로 적용된다.

- ① 내열 복합재료(ablative plastics)
- ② 다결정 흑연(polycrystalline graphite)
- ③ 열분해 흑연(pyrolytic graphite) 또는 실리콘 카바이드(silicon carbide)를 증착시킨 열분해 흑연
- ④ 내화 금속(refractory metals)
- ⑤ 탄소/탄소 복합재(carbon/carbon composites)
- ⑥ 세라믹(ceramics)

첫 네개의 재료는 흔하게 사용하는 것들이고, 탄소/탄소 복합재는 고성능 재료이다. 세라믹은 열충격에 매우 약하며 고체로켓에서는 별로 적용하지 않고 있다. 다결정 흑연은 비교적 낮은 강도 때문에 두께를 두껍게 하거나 또는 구조적으로 잘 지지해 주어야 한다. 이러한 성질 때문에 그 적용이 노즐목, 목 전후방, 토출관 등에 제한되며, 작은 시험 노즐의 경우에는 전 부위에 다 적용되기도 한다. 노즐에서 다결정 흑연의 실패는 연소 초기에 표면이 뜨겁고 배면이 아직 차가울 때 발생한다. 흑연은 취성이 큰 편이며 열응력으로 균열이 갈 때가 많이 있다. 특히 흑연이 그 길이 방향으로 균일하게 지지되지 않을 때는 더욱 그렇다. 또한 그 균열은 깨끗하지 않으며, 재료의 나선방향으로 진전되어 노즐목에서 빠져나가는 경우가 보통이다. 따라서 흑연은 축방향을 따라 링으로 분할하여 사용되기도 하며, 이때 그 단면은 대개 정사각형에서(축방향 길이 : 반경방향 두께가) 2 : 1의 직사각형으로 하는 것이 대부분이다. 이렇게 분할함으로써 응력 수준을 감소시킬 수 있으며 배면의 단열재에서 생성되는 분해가스가 쉽게 빠져나갈 수 도와준다(가스에 의한 압력상승으로 노즐이 와해되는 수도 있다). 다결정 흑연의 열확산도는 비교적 높아서, 연소시간이 매우 짧은 경우를 제외하고서는, 대부분의 연소시간 동안 그 배면의 온도가 높으며, 따라서 구조물의 온도를 일정 수준 이하로 유지하기 위하여 그 배면에 적절한 두께의 단열재를 설치하는 것이 보통이다. 또한 비교적 큰 열팽창계수도 설계에서 유의해야 될 점이다. 즉, 이웃하는 재료와 적절한 팽창 갭을 두어야 하며 그 갭은 낮은 온도에서 녹을 수 있는 재료로 채워 두어야 한다. 설계에서는 반경방향의 팽창도 고려해야 한다. 반경방향의 팽창(또는 그 팽창을 억제)이 노즐목의 응력에 중요한 영향을 미치기 때문이다. 이를 위하여 다음의 두 가지 방법이 사용된다.

- ① 배면에 원통형의 환상 공간을 둔다. 이 환상 공간은 축방향 갭처럼 채워도 좋고 안 채워도 좋다.

- ② 배면을 경사지게 하되 상류쪽의 직경이 더 크게 하고, 흑연의 상류방향 끝에 팽창 갭을 위치시킨다. 이렇게 함으로써 흑연이 상류쪽으로 쏠리기 모양으로 팽창되게끔 유도한다.

열분해 흑연(P/G)는 밀도(2.2 g/cm^3)가 매우 높고 내삭마성이 우수하며 기저부분에 탄소가스를 침적(deposition)시킨 고가의 흑연이다. 층층이 침적한 결과 다결정 흑연과는 판이한 비등방성의 재료이며, 그 층에 수직방향(보통 “c” 방향이라 부름)의 성질은 평면(“a”와 “b” 방향이라 함) 성질과 매우 다르다. P/G의 물성치는 재료공정 조건에도 민감하다. 중요한 공정변수로는 기저부분의 기하학적 형상, 탄소 침적온도, 가스 유량, 가스의 불순도 등을 들 수 있다. P/G는 와셔(washer)형태와 코팅(coating)형태로 적용된다. 노즐목 직경 100 mm이하인 고체로켓에서 다결정 흑연에 P/G 코팅을 적용하여 성공적인 시험을 수행한 적은 많지만 보다 큰 직경의 모타에서 성공한 적은 적다. 노즐설계에서 P/G의 적용은 다결정 흑연과 유사하다. 축방향의 열팽창이 훨씬 크기 때문에 그 갭을 보다 신중하게 결정하여야 하며, 부적절한 팽창 갭은 노즐실패의 원인으로 직결된다. 또한 당연히 배면의 단열 및 구조적 지지를 고려하여야 한다. 와셔 형태의 P/G 설계에서는 다결정 흑연 또는 페놀계의 백업 링을 와셔 팩의 길이만큼 설치하고, 다결정 흑연 또는 탄소/탄소 링을 그 와셔 팩의 전방과 후방에 설치하는 것이 보통이다. 백업 링은 와셔 팩을 구조적으로 균일하게 지지해 주고, 전방, 후방 및 백업 링은 와셔 팩의 온도를 떨어뜨리는 열싱크(heat sink) 기능을 담당한다. 또한 전후방에 다결정 흑연 또는 탄소/탄소 링을 사용함으로써 P/G 와셔 팩의 축방향 길이가 과도하게 길어지는 것을 방지하고 층간분리 경향을 줄인다. P/G 노즐목의 실패는 대부분 와셔들의 과도한 층간분리에 기인한다. 와셔 팩의 백업 링으로 다결정 흑연 대신에 방향을 노즐 축방향과 평행하게 한 P/G 링을 사용할 때도 많다. P/G 백업 링의 이러한 방향성은 전후방의 다결정 흑연 쪽으로 열이 더 많이 전달되게 해 주고, 따라서 와셔 팩의 온도와 배면의 단열재 쪽으로의 열전달을 감소시켜 준다. 보통 P/G 와셔는 그 외경이 460 mm까지 가용하며, 연소실 압력이 1,000 psi가 넘고 노즐목 직경 317 mm인 노즐에 P/G를 성공적으로 적용시킨 시험들이 소개되기도 한다.

노즐목 삭마를 없애거나 최소화하기 위하여 물리

브데늄(molybdenum), 텅스텐(tungsten), 텅스텐 합금(tungsten alloy), 함침 텅스텐(infiltrated tungsten), 화염분무 텅스텐(flame sprayed tungsten) 등을 노즐목으로 사용한다. 몰리브데늄은 온도가 낮고 에너지가 낮은 추진제에 한정적으로 사용되고 고체로켓에 사용되는 경우는 거의 없으며 작은 모터의 짧은 연소시간 시험에 사용될 때가 있다. 텅스텐과 텅스텐 합금은 단조, 압출, press-and-sintered form 등의 형태로 사용된다. 높은 온도에서는 은함침(또는 구리나 아연함침) 텅스텐(silver infiltrated tungsten)을 사용하여 함침된 금속이 기화하면서 냉각시키는 효과를 이용하기도 한다. 이때 열전달을 촉진시켜 열충격에 의한 민감도를 둔화시켜 주기도 한다. 텅스텐 삽입재를 성공적으로 사용하기 위해서는 축방향 및 반경방향의 팽창 갭을 고려하여야 하며, 열분해 후연 와셔팩의 경우와 마찬가지로 다결정 후연의 백업 링과 전·후방 링을 구비해야 한다. 텅스텐과 후연 경계면은, 텅스텐 성능을 상당히 저해하는 저융점의 텅스텐-탄소 공융합금(eutectic)의 형성을 방지하기 위하여, 탄타륨(tantalum) 또는 토륨(thorium) 코팅으로 보호한다.

탄소/탄소 내열재료는 매우 각광을 받는 신소재이다. 이 재료는 다결정 후연에 버금가는 내삭마성을 가지면서도 강도가 보다 크고 열적, 기계적 충격에 보다 잘 견디는 성질을 가진다. 따라서 탄소/탄소 내열재료는 다결정 후연에서 요구되던 지지 링들이 필요 없다. 또한 탄소/탄소 링은 열분해 후연 와셔 노즐목의 전 후방에서 다결정 후연 링 보다 더 신뢰성 있게 사용될 수 있다. 노즐재료로 탄소/탄소 내열재료를 사용함으로써 무게를 줄일 수 있고 노즐 효율도 개선시킬 수 있다. 이것은 탄소/탄소 내열재료가 훌륭한 내열재이면서 동시에 훌륭한 구조재이기 때문에 가능하다. 탄소/탄소 내열재료의 구조적 특성도 열분해 후연과 다결정 후연처럼 온도가 증가함에 따라 좋아진다. 탄소/탄소 내열재료의 밀도는 1.4 g/cm^3 이상의 것이 가치가 있으며, 밀도가 $1.4\text{--}1.5 \text{ g/cm}^3$ 인 탄소/탄소의 삭마율은 후연/페놀(graphite/phenolic)의 약 $1/3$, 탄소/페놀릭(carbon/phenolic)의 약 $1/2$ 정도이다. 밀도가 2.0 g/cm^3 정도로 높아지면 내삭마성이 증진되어 노즐목으로도 훌륭하게 적용될 수 있다.

4.1.2 내열재 및 단열재

내열재 및 단열재의 두께는 예상 삭마량에 안전여유분을 더하고 또 예측 솟 두께와 충분한 단열두께

를 더하여 결정된다. 만일 내열재가 저삭마의 노즐목과 같은 경우에는 너무 얇아 구조적으로 문제가 되지 않도록 충분한 구조적 고려가 있어야 한다.

삭마율은 유사한 시험자료를 이용하여 평가되며, 보통 앞에서 설명한 Bartz의 방법을 사용하여 계산한다.

솟두께는 시험자료를 적절히 외삽하거나 앞에서 제시한 솟층 두께 예측식을 이용하여 계산할 수 있다.

삭마량에 대한 안전여유는 man-rated가 아닌 추진기관인 경우 노즐목과 입구에서 0.1-0.5를 출구에서는 0.1-0.5를 보통 적용하며, man-rated 추진기관의 경우 전 영역에 걸쳐 1.0을 적용한다. 대부분의 설계에서 솟 두께에 대해서는 안전여유를 적용하지 않는 편이며, 적용하더라도 삭마에 대한 안전여유 보다 작은 값을 취하고, 다만 man-rated 노즐의 경우 0.25의 안전여유를 고려한다.

경우에 따라서 비교적 큰 노즐목의 변화가 허용될 경우에는 규소/페놀릭 또는 석면/페놀릭을 노즐목에 사용하기도 하지만, 대부분의 경우 팽창비 2-4 정도되는 노즐목 직상·하류에는 후연/페놀릭 또는 탄소/페놀릭을, 그 보다 큰 팽창비의 위치에서는 보통의 내열재를 사용한다.

서로 다른 재료의 경계면은 두 재료의 어느 한쪽 적층 각도와 평행하게 하는 것이 좋다. 내열재와 단열재 사이는 계단지게 하는 것이 보통이다. 이때 계단 경계면은 가능하면 축방향과 평행한 원통모양이 좋은데, 이것은 가공이 용이하고 화염의 경로가 구조물을 보호하는 쪽으로 형성되기 때문이다. 노즐출구의 내열재가 die-molding 제품이거나 단열재가 석면/페놀릭일 경우에는 보통 배기구멍을 마련하여 열분해된 가스가 표면으로 빠져나가게 한다. 배기구멍이 없으면 가스형성에 의한 압력이 증대하여 die-molding된 내열재를 부서지게(spalling)한다. 테이프 래핑 제품의 경우에는 적층면 사이로 가스가 자연히 빠져나오므로 배기구멍이 별도로 필요 없다. 그러나 적층 각도가 배기가스 유동방향과 평행하거나 배면의 단열재가 석면/페놀릭이면 배기구멍을 필히 설치하여야 한다. 석면/페놀릭은 많은 양의 수분을 함유하고 있어 솟으로 변할 때 방대한 가스를 배출하기 때문이다. 또한 석면/페놀릭이 수분을 흡수하거나 잃을 때 부풀어오르거나 수축하여 인접한 접착층에 큰 응력을 일으킬 수 있고, 결과적으로 접착력을 잃은 상태에서 출구 콘이 이탈되는 수도 있으므로 석면/페놀릭을 기계적으로 구속시키는 설계가 필요하다.

다. 직경 1.5-2.4 mm의 구멍을 25 mm의 간격으로
숫두께 만큼 배기구멍을 내는 것이 보통이다.

내열재는 배기가스와 접촉하는 노즐의 면을 형성
하는 재료이다. 노즐목을 제외한 다른 부위의 내열
재는 주로 강화 플라스틱이다. 어떤 노즐에 있어서
는 고무탄성체를 사용하기도 하는데, 수렴-발산 노
즐의 큰 입구 끝이나 내삽노즐의 연소실 쪽과 같이
마하수가 매우 낮은(보통 $Mach < 0.2$) 영역에서만
주로 사용한다.

페놀 수지는 강화재와 함께 노즐 내열재로서 광범
위하게 사용되어 왔으며, 이를 탄소계 내열재라 칭
한다. 흑연/페놀릭(graphite/phenolic)과 탄소/페
놀릭(carbon/phenolic)은 모든 크기의 노즐의 토출
관, 목 접근부위, 목 연장부위와 큰 노즐의 목부위에
주로 사용된다. 흑연/페놀릭이 탄소/페놀릭에 비해
내삭마성이 우수하고, 중간분리를 일으키는 경향이
적으며, 열적으로 다소 안정하다. 반면에 탄소/페놀
릭은 가격이 1/4-1/3 정도로 싸고, 다소 강하며, 열
확산계수가 현저하게 낮다. 규소/페놀릭(silica/
phenolic)과 주로 단열재로 사용되는 유리/페놀릭
(glass/phenolic) 및 석면/페놀릭(asbestos/phenol-
ic)은 노즐 후방출구부와 같은 삭마가 심하지 않는
노즐부위에 내열재 및 단열재로 사용된다. 일반적으
로 흑연/페놀릭 또는 탄소/페놀릭을 규소/페놀릭로
치환하는 위치는 팽창비 2 또는 4가 적당하다. 서로
다른 재료의 경계면에서 삭마가 계단모양으로 형성
되어 원래의 설계된 공력현상이 최소한으로 변형되
도록 유의해야 한다. 재료선정과 설계에서 고려해야
할 사항중에 슬래깅(slagging: 배기가스가 노즐 내
열재 표면에 응축 또는 침적되는 것)의 가능성이 있
다. 슬래깅은 점화 직후에 내열재 표면이 차가운 상
태에서 연소생성물이 응결되거나 연소말기에 압력
및 속도가 낮은 상태에서 연소생성물이 침전되는 현
상으로 거의 대부분의 노즐에서 발생한다. 어떤 모
타에서는 추진제의 특성상 연소시간 전반에 걸쳐 슬
래깅이 일어나는 경우도 있으며, 점화직후 또는 연
소말기에 발생하는 슬래깅은 대수롭지 않은 반면,
이것은 공력형상의 변화, 열전달의 변화, 찌꺼기 배
출에 따른 불균일한 추력곡선 야기 등으로 노즐 성
능에 영향을 줄 수 있다. 흑연/페놀릭이나 탄소/페
놀릭과 같은 탄소계 내열재료는 규소, 유리 및 석면/
페놀릭에 비해 슬래깅 현상이 심하지 않으며, 이것
은 탄소계 재료의 표면이 더 고온상태로 유지되는
것에 기인하는 것으로 보인다.

강화 플라스틱은 테이프 래핑(tape-wrapping),
레이업(lay-up), 다이몰딩(die molding) 등의 공법
으로 제작된다. 유동에 대하여 모서리방향(적층면이
표면의 직각방향)이 가장 내삭마성이 좋은 방향이
며, 유동에 대하여 약 10° 정도의 낮은 각일 때 보다
25-50% 정도 삭마율이 감소된다. 반면에 모서리방
향은 낮은 각도에 비해서 25-50% 정도 열침투 깊이가
깊어진다. 테이프 래핑의 경우 노즐목과 그 전후
방 부품 (약 1,000 psi, 155°C 에서 약 2시간)은
하이드로클레이브 성형을 하게 되며, 출구, 단열재,
성형된 부품위에 구조적으로 재 래핑하는 부품과 같
이 보다 덜 심각한 부위(약 250 psia, 155°C 약 2
시간)는 오토클레이브 성형을 하게 된다. 강화 수지
부품은 후성형(post-cure) 사이클을 거치는 것이
대부분이며, 보통 177°C 에서 12시간 또는 150°C
에서 24시간의 사이클을 사용한다. 이렇게 함으로써
잔류응력을 줄일 수 있으며, 부품 내의 휘발성분도
줄일 수 있다. 부품내의 휘발성분은 오랜 보관 중에
빠져 나와서 추진제와 화학반응을 일으킬 수 있다.
후성형 전에 표면에 빠져 나와 있는 수지는 제거하
는 것이 좋다. 테이프 래핑에서 그 제한성 때문에
불가능했던 방향성을 플랫 라미네이트(flat lami-
nate), 스택 콘 레이업(stacked-cone lay-up), 로
젯 레이업(rossette lay-up) 등을 이용하여 구현할
수 있다. 플랫 라미네이트는 적층 방향이 축에 직각
이 되게 직물을 적층하여 만든다. 스택 콘 레이업은
콘 모양으로 짜른 각 직물을 적층하여 만든다. 축에
대해 15° 이상이 되는 각도를 얻을 수 있으며 15°
미만의 경우에는 그 제작이 매우 어렵다. 로젯 레이
업은 장미꽃 모양의 패턴을 겹쳐올려 만든다. 로젯
은 유동에 대하여 항상 모서리 방향으로 위치하며,
각 턴이 부품의 표면에서 배면까지 연결되어 있어
항상 처너층이 존재한다는 장점이 있다. 레이업 부
품들도 테이프 래핑 부품들과 유사한 과정을 거쳐
성형 및 후성형된다.

다이몰딩은 500 mm 이하의 부품을 양산하는 경
우에 테이프 래핑이나 레이업보다 다소 가격이 싸
다. 금형을 만드는 비용이 비싸기 때문에 매우 큰
노즐의 부품으로는 부적합하다. 원하는 성형압력을
적용할 만한 프레스를 찾기 어렵다는 것도 또 하나
의 이유가 된다. 다이몰딩 부품들은 내삭마성이 낮
고 강도가 낮으며 표면이 스폐링(spalling)되거나
천킹(chunking)되는 경향이 높다.

탄소, 흑연, 규소, 유리, 석면 등이 아닌 강화재와

페놀이 아닌 수지는 내열재로 사용되지 않는 것이 보통이지만, 유리 강화 에폭시는 내열재와 구조재로서 광범위하게 사용된다. 보통의 내열재에 비해 가격이 1/2 또는 1/4 정도인 천/페놀릭(canvas-cloth/phenolic)도 사용된다. 또한 보통의 탄소/페놀릭에 비해 그 가격이 1/4에 불과한 핏치계 탄소에서 만드는 염가의 탄소/페놀릭이 개발 중에 있어 기대된다. 에폭시와 같은 상압 경화 수지계가 성공적으로 사용되기도 한다.

단열재로는 유리-, 규소-, 석면-강화 페놀 또는 에폭시가 주로 사용되며, 합침 고무탄성체(filled elastomer)도 사용되기도 한다. 내열재와 구조물 사이에 단열재를 설계하는 것이 바람직하며, 단열재의 열전도도가 낮기 때문에 내열재와 단열재의 이중 기능을 담당할 때 보다 전체 두께를 줄일 수 있고, 단열재의 가격이 탄소/페놀릭 또는 흑연/페놀릭의 내열재 보다 싸고, 어떤 단열재는 탄소/페놀릭 또는 흑연/페놀릭의 내열재 보다 구조적 강도가 우수하여 단열재와 구조재의 이중 기능을 담당할 수 있는 설계가 가능하다. 단열효과를 최대한으로 높이기 위해서는 적층각도를 가스의 유동방향에 평행하게 한다. 단열재의 경우에는 다이몰딩이 광범위하게 사용된다. 다이몰딩과 레이업과의 선택기준은 경제성에 있지만, 때로는 강도적인 측면에서 테이프 래핑이 바람직할 경우도 있다.

Mach < 2 정도의 낮은 마하수 영역에서는 내열재와 단열재로 합침 고무탄성체를 많이 사용한다. 낮은 마하수에서 삭마는 별로 문제가 되지 않으며 단열기능이 중요하다. 비행형의 설계에서는 가열 가압 성형의 고무탄성체만 사용되는 편이다. 보통의 고무탄성체 단열재에 사용되는 첨가제는 탄소, 규소, 석면 등을 단독으로 쓰거나 또는 혼합하여서 가루형태 또는 조각형태로 사용한다. 고온 가압 성형 합침 고무탄성체의 기본재료는 보통 butadiene-acrylonitrile 이고, 상온 상압 성형 고무탄성체의 기본재료는 polysulfide epoxy이다. 많은 고무탄성체는 그 취성 때문에 저온에서의 보관 및 사용이 어렵다.

4.2 열해석

노즐해석은 공열해석(aerothermal analysis)과 구조해석으로 나눌 수 있다. 공열해석은 연소생성물의 열역학적 물성치 및 성분의 정의, 이동물성치 결정, 공력학 해석, 열전달 해석, 재료반응 해석 등으로 이루어진다. 구조해석은 응력분포 예측, 구조물의 변위 계산, 열응력 효과 예측 등을 포함한다(그림 5).

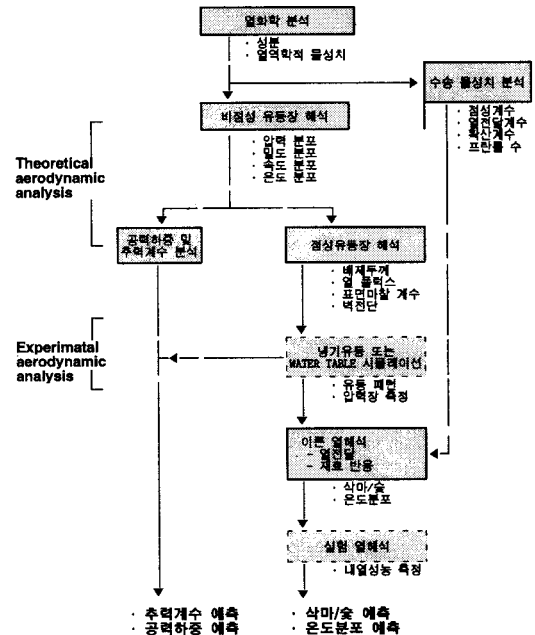


그림 5. Flow diagram of thermal design.

4.2.1 열화학 및 이동 물성치 해석(Thermochemical/Transport-Property Analysis)

추진제 연소생성물의 열역학적 물성치와 성분을 정의한다. 평형성분(equilibrium composition) 또는 고정성분(frozen composition)의 가스팽창에 대하여 추진제 조성과 연소실 압력으로부터 이러한 파라미터들을 쉽게 결정할 수 있다. 구해진 열역학적 물성치와 화학조성은 공역학 및 재료반응 계산에 사용된다. 또한 kinetic theory로부터 가스혼합물의 각 성분들에 대한 점성계수, 열전도계수, 확산계수, 프란틀 수 등을 계산한다.

비점성유동의 물성치를 계산한다. 이 물성치들은 점성유동장 계산에 사용되어 대류열전달 계수를 결정하게 한다.

4.2.2 공력 해석

노즐유동장은 아음속, 천이음속, 초음속 영역으로 나누어진다. 노즐이 매끄럽고 연속적인 입구와 출구를 가지고 있고 수렴반각이 크지 않으면(<45°), 그래서 국부적인 유동 감속의 불균일 또는 유동박리 현상이 생기지 않으면, 1차원 해석으로도 합리적인 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이와 같지 않은 노즐(예: 내삽노즐, 가동노즐 등)에서는 아음속, 천이음속, 초음속 유동의 하나 또는 그 이상을 엄밀하게 분석해야 한다. 복잡한 노즐입구 형상의 아음속 영

역은 포텐셜 유동 이론으로부터 어렵지 않게 해석된다. 연소 또는 삭마에 의한 질량 추가를 고려하며, 특히 추진제 표면이 노즐 입구에 근접해 있을 때 그 영향을 고려한다. 유동속도, 압력비, 마하수 등의 유동 물성치를 계산하여 점성유동장 계산을 위한 경계층 경계면에서의 비점성 유동장을 정의한다. 천이음속 영역($0.8 < M < 1.2$)은 포텐셜 이론으로 해석할 수 없다. 그러나 입구 형상이 유동을 균일하게 가속시킬 경우 천이음속 영역으로의 외삽에 의해 적절한 결과가 얻어질 수 있다. 그러나 이것도 음속지점이 기하학적 노즐목의 지나친 하류(> 0.15 노즐목 직경)가 되면 적절치 못하다. 초음속 유동장에서는 열 해석 목적으로는 1차원 이론으로 무난하다. 그러나 정확한 성능예측을 위해서는 비점성 유동장의 보다 정확한 정의가 요구된다. 초음속 영역에서 유동교란을 일으키는 노즐의 경우에는 1차원 이론으로 해석하기 어렵다. 보다 정교한 성능예측을 계산하려면 이상 비평형 유동 계산이 이루어져야 한다.

고체 로켓노즐에서는 경계층이 난류인 경우가 대부분이지만 Reynolds 수를 검토하여 확인하는 것이 보통이다. 경계층에 대해 운동량과 에너지에 대한 적분방정식을 풀어 배제두께, 대류 및 복사 열 플럭스, 표면마찰계수, 벽전단 등을 계산한다. 유동 박리와 재부착이 발생하는 경우에는 재부착 지점에서부터 경계층 계산을 다시 시작하여야 하며, 이 영역에서의 재부착 가열을 고려하여 조건들을 수정하여야 한다. 박리영역의 유동을 묘사하기 위한 적절한 해석방법은 아직 없으며, 반경험적인 방법들이 사용되고 있다. 초음속 영역에서도 마찬가지로 박리영역에 대한 해석은 아직 개발되지 못하고 있다. 그러나 대부분의 경우 박리지점과 재부착지점을 적절히 보완하여 합리적인 결과를 얻고 있다.

4.2.3 이론 열해석

4.2.3.1 열전달 해석

고체로켓 노즐의 열해석은 배기가스와 노즐 내열재 사이의 열전달을 정의하는 일과 재료들의 열반응을 계산하는 일로 나누어진다. 배기가스와 노즐벽 사이의 열전달은 대류, 복사, 입자침적(particle impingement) 등에 의해 이루어진다. 초음속유동 영역에서는 주로 대류 열전달이 지배적이다. 열원의 온도와 유효 복사율은 어느 정도 불확실성을 가지고 있다. 이상 유동에서의 산화 알루미늄에 의한 복사는 등온입자운(isothermal particle cloud) 해석방법으로 계산된다. 이 방법에 의하면 알루미늄을 적

당량(5%) 포함하고 있는 대부분의 고체추진제의 복사율은 1이다. 그러나 작은 모타 또는 압력이 낮은 경우에는 1보다 작은 값으로 나타난다. $Mach < 0.8$ 의 영역에서는 복사열전달의 비중이 상당하다. 전체 열플럭스의 예측치와 측정치를 잘 맞게 하려면 복사를 반드시 고려해야 하며, 아음속 영역에서의 복사율을 1로 보면 대체적으로 합리적인 결과를 얻을 수 있다. 입자침적 가열은 아음속 영역에서 현저하고, 천이음속과 초음속 영역에서는 거의 고려할 필요가 없다. 실제 계산에서는 먼저 공력해석으로 가스의 유동장을 정의한 다음, 운동 제2법칙과 여러 종류의 입자 크기에 대한 drag law를 사용하여 각 입자의 속도와 유동방향을 추적한다. 입자침적 영역에서 노즐 재료의 삭마가 더 심하게 일어나며 그 거동은 잘 알려져 있지 않다. 따라서 이 문제에 대한 해석적인 해는 대부분이 부적절하며 유사한 연소시험 측정 데이터를 이용하여 그 효과를 분석하고 있는 실정이다. 대류 열전달 계수는 보통 삭마에 의한 표면후퇴가 없는 경우에 대해 경계층 유동을 해석하여 결정된다. 내열재가 열분해되어 경계층으로 질량이 이동될 경우, 실험적으로 결정된 분출상수(blowing constant)를 사용하여 열전달 계수를 다음과 같이 수정한다.

$$\frac{St}{St_D} = 1 - aB$$

여기서 St = local Stanton number

St_D = Stanton number for zero blowing

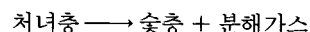
a = blowing rate constant

B' = blowing-rate parameter, a quantitative measure of the species that can react with carbon

이다. a 는 보통 0.2-0.4의 범위에 있다. 대류 열전달 계수는 추진제의 그레인 형상에 의해서도 영향을 많이 받는다.

4.2.3.2 재료의 반응

노즐의 표면은 고온의 연소생성물에 의해 기계적 삭마, 화학적 삭마, 증발, 용융, 숯화등 여러 가지 거동으로 반응하게 되며, 보통 이것을 통칭하여 삭마라 부른다. 삭마는 그 현상의 복잡성에도 불구하고 다음과 같이 단순하게 표시될 수 있다.



연소생성물과 내열재료의 성분 및 분해가스 사이의 삭마에 의한 표면후퇴는 순전히 화학적인 현상으로 가정한다. 입자침착에 의한 기계적 침식, 국부적 조개짐, 그리고 표면마찰에 의한 용융층의 제거 등은 해석적으로 고려하기 어렵고, 이와 같은 영향을 무시할 수 없을 정도가 되면 경험식을 개발하여 적용하는 것이 일반적인 방법이다. 내삽노즐의 입구 부분과 곡선형 출구 콘의 하류 부분에서는 입자침착에 의한 삭마효과가 심각하다.

4.2.4 실험 열해석

노즐의 연소시험으로부터 설계를 검증할 수 있으며 해석적 예측에 필요한 재료의 물성치와 특성치를 구할 수 있다. 스케일링 데이터의 부정확성을 제거한다는 점에서 축소형 시험보다는 실제형 시험이 유리하다. 적은 비용으로 데이터를 얻기 위해서는 축소형 시험이 유리하다. 그러나 축소형 시험을 하려면 설계와 해석을 두 번 해야 하고, 도면도 두 종류가 필요하고, 제작공정도 두 번 설계해야 하고, 또한 데이터를 스케일링하기 위한 해석비용도 별도로 든다. 무엇보다도 스케일링된 데이터는 항상 어느 정도 문제점을 안고 있다는 것을 염두에 두어야 한다. 종종 실제형에서는 발생하지 않는 문제가 축소형에서는 발생해서 그 해결에 투자한 불필요한 비용 때문에 예상했던 것 보다 더 비싼 축소형 계획일 경우도 있다. 안전여유가 별로 없다면 첫 번째 실제형 시험이 실패할 가능성이 높다. 대부분의 데이터를 잃을지도 모를 이와 같은 실패를 피하기 위하여, 추진제의 충전량을 줄여 압력과 유동율은 실제 추진기관의 값을 유지하되 연소시간을 단축시키는 방법이 좋다. 시간에 대해서는 외삽함으로써 믿을 수 있는 데이터를 얻을 수 있고(설계된 연소시간 동안 시험해서 실패할 경우에), 초기의 데이터도 잃어버릴 위험성이 없기 때문이다. 매우 큰 노즐의 경우 실제형 시험은 비용이 너무 많이 들기 때문에 설계자는 축소형 시험에 의지해야만 할 것이다.

축소형 시험에서는 실제형 노즐의 형상과 재료를 잘 모사할 수 있도록 해야 한다. 또한 유동특성이 유사하도록 추진제의 조성하고 그레인 설계를 선정해야 한다. 축소형 시험의 삭마와 슛층 깊이로부터 실제형 노즐의 성능을 예측하기 위해서는 해석적 기법을 사용한다. 축소형 시험에서 온도를 측정할 경우 그 데이터로부터 실제형 노즐 내열재의 온도구배를 예측할 수 있도록 한다.

입자침착 영역의 삭마와 박리유동 현상은 이론적

으로는 적절하게 해석이 안되기 때문에, 해석 모델을 보완할 수 있도록 축소형 시험을 준비해서 실제형 노즐의 삭마와 온도구배를 예측할 수 있도록 해야 한다. 축소형 노즐의 삭마 측정치로부터 적절한 상관계수를 유도해서 그 값을 삭마 계산 프로그램의 입력으로 사용하여 실제형 노즐의 삭마를 예측할 수 있도록 해야 한다. 이때 상관계수는 과도기 열전달과 크기 효과를 고려하여 결정한다.

예비설계 과정에서는 크기가 다른 두 노즐에 있는 동일한 재료의 삭마 속도를 계산하는 간단한 방법이 있다. 추진제의 조성이 다를 경우 구조계 내열재료는 화학조성에 대한 수정이 필요 없지만, 탄소계 내열재료는 추진제의 전 산화성분의 질량 비율의 비율에 정비례한다. 동일한 재료이면서 밀도가 다를 경우 삭마 속도는 밀도에 반비례한다. 압력과 직경이 다를 경우 Bartz의 방법으로 열전달 계수와 질량전달 계수를 조정한다. 단, 이것은 삭마열이 열플럭스의 함수가 아님을 가정한 것이다. 그러나 이와 같은 간단한 방법은 초기의 과도기적 현상을 고려하지 못한다. 또한 이것은 압력과 직경이 일정한 경우에 대한 순간적인 삭마를 계산하기 때문에 긴 시간 동안 압력과 직경의 변화가 심한 경우에는 그 정확도가 떨어질 수 밖에 없다.

참 고 문 헌

1. H. Hurwicz and J. E. Rogan, "High Temperature Thermal Protection Systems", McGraw-Hill, New York, 1973.
2. I. S. Chang, *J. of Propulsion and Power*, **16**(5), 853 (2000).
3. M. R. Dusi, W. I. Lee, P. R. Ciriscioli, and G. S. Springer, *J. of Comp. Materials*, **21**, 243 (1987).
4. H. L. McManus and G. S. Springer, *J. of Comp. Materials*, **26**(2), 206 (1992).
5. A. F. Mills, A. V. Gomez, and G. Strouhal, *J. Spacecraft and Rockets*, **8**(6), 618 (1971).
6. H. Lew and J. Fanacci, "A Study of Melting Surfaces", General Electric Co. TIS Report R5PSD381, 1959.
7. D. R. McDonald, *AIAA J.*, **3**, 1250 (1965).
8. A. J. McDonald, *AIAA J.*, **3**, 1250 (1965).
9. D. H. Barker, *AICHE Chem. Eng. Prog. Symp.*, **61**, 108 (1965).
10. D. L. Schmidt, "Engineering Design for Plastics", ed. by E. Baer, p. 815, Reinhold, New York, 1964.