

산화제 공급배관의 분기 위치에 따른 추진기관 성능 비교

김지훈*, 이한주**, 정동호***, 오승협****

An Investigation on the Performance of a Propulsion System
with the Branch Location of an Oxidizer Feeding Line

Ji-hoon Kim*, Han-ju Lee**, Dong-ho Jung***, Seung-Hyub Oh****

Abstract

It is an essential subject to decrease the mass of a launch vehicle for improving performance and efficiency of space launch system. Particularly, reducing the engine supporting area is necessary for high efficiency of propulsion system with clustered engine systems. The engine supporting area is related to the branch location of the oxidizer feeding line. This article deals the performance variation of the propulsion system such as the mass of the oxidizer feeding line, pressurization pressure of the oxidizer tank, and the onset of nucleation boiling in the oxidizer pipe with the branch location of the main feeding line.

초 록

발사체의 추진 성능 및 효율성을 향상시키기 위한 로켓 구조물의 무게 절감은 발사체 개발에 있어 필수적인 사항이다. 특히 다수의 엔진 시스템을 클러스터링할 경우에는 엔진 지지부의 공간 축소가 추진기관 시스템의 고 효율성을 위해 필요하다. 본 논문에서는 클러스터링 엔진 시스템을 채택한 추진기관 시스템에 있어서 산화제 공급 배관의 분기 위치에 따른 추진기관 성능을 무게, 산화제 탱크 가압압력, 그리고 산화제 배관 내 2상 유동 발생 측면에서 비교, 검토하였다.

키워드 : 우주발사체(launch system), 추진기관(propulsion system), 클러스터링 엔진(clustered engine system), 산화제 공급배관(oxidizer feeding line), 분기 배관, 2상 유동(nucleation boiling)

1. 서 론

우주 발사체를 설계할 때는 여러 가지 고려

할 사항들이 있는데 특히 미션을 결정하고 그에 따른 추력이 결정되면 발사체의 대부분을 차지하는 추진기관부를 설계하게 된다. 목표한 추력에 도달하기 위하여 추진기관부 엔진 성능을 결정하

* 추진기관체계그룹/jhk0622@kari.re.kr

** 추진기관체계그룹/leehj@kari.re.kr

*** 추진기관체계그룹/neopa@kari.re.kr

**** 추진기관체계그룹/shoh@kari.re.kr

게 되는데 이때 엔진을 한 개로 할 것인지 여러 개의 엔진을 클러스터링 할 것인지도 결정하게 된다.

기존 발사체들의 1단의 엔진 구성을 살펴보면 여러 개의 엔진을 클러스터링 한 경우가 상당히 많이 있다. 중국의 CZ 시리즈, 유럽의 Ariane 발사체, 러시아의 Energia, Proton, Zenit 등, 미국의 Space Shuttle, Titan 발사체 등 엔진을 2개에서 많게는 6개까지 클러스터링 하여 구성하였다.[1]

엔진 시스템 구성을 어떻게 하는가는 설계자의 결정에 따라 달라지겠지만 현재의 설계 기술 수준과 여러 가지 효율성을 따져서 설계가 이루어진다. 발사체의 추진 성능 및 효율성을 향상시키기 위해서는 무엇보다도 구조물의 무게 절감이 필수적인데 다수의 엔진 시스템을 클러스터링 할 경우에는 엔진 지지부의 공간 축소가 추진기관 시스템의 효율성을 높이기 위해 필요한 사항이다.

본 논문에서는 클러스터링 엔진 시스템을 채택한 추진기관 시스템에 있어서 산화제 공급 배관의 분기 위치에 따른 추진기관 성능을 무게, 산화제 탱크 가압압력, 그리고 산화제 배관 내 2상 유동 발생 측면에서 비교, 검토하였다.

2. 모델 개요

가상의 발사체 1단부의 구성은 상단부터 산화제 탱크, 연료탱크, 추진기관부로 이루어져 있으며 산화제 공급 배관을 추진기관부 직전인 연료 탱크 하단에서 분기하는 안 (1st case)과 산화제 탱크 하단부에서 직접 분기하는 안 (2nd case) 두 가지의 경우를 비교하였다.

2.1 연료탱크 하단부에서 분기 (1st case)

Fig. 1 과 같이 산화제 배관이 연료탱크 하단에서 분기되는 경우는 산화제 탱크로부터 메인 공급 배관이 연료탱크를 통과하여 내려오다가 매니폴드에서 4개의 분기 배관으로 나누어지게 된다.

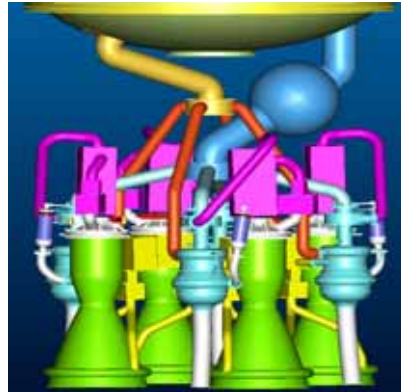


Fig. 1 The 1st case of the branch location of oxidizer feeding pipe

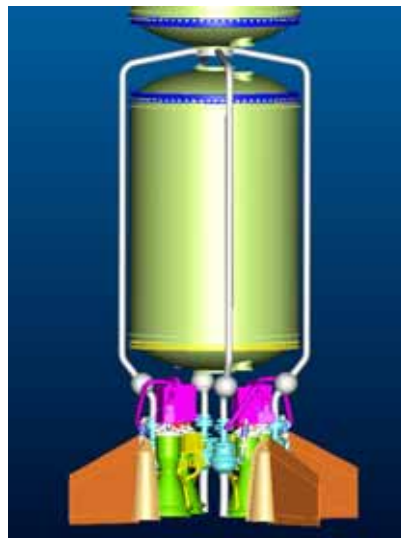


Fig. 2 The 2nd case of the branch location of oxidizer feeding pipe

2.2 산화제 탱크 하단부에서 분기 (2nd case)

이 경우는 Fig. 2 와 같이 산화제 탱크 하단부에서 공급배관이 매니폴드를 통해 바로 4개의 분기 배관으로 나누어져 연료탱크 외부를 지나서 내려와 엔진 시스템과 연결되는 구성이다.

3. 무게 검토

산화제 주배관 및 분기배관을 구성하는 구성품에 대해 두 가지 경우에 대한 무게 검토를 수행하였다. 이때, 벨로우즈의 무게는 주배관과 분기배관에 설치할 경우 즉, 1개를 사용할 경우와 4개를 사용할 경우가 같을 것으로 예상되어 무게 검토에서는 제외하였다.

무게 검토시에는 Fig. 1과 2의 2가지 분기위치 안에 대한 Pro/E 도면을 바탕으로 이론적인 무게 검토를 수행하고 기타 구성품 무게를 고려하여 각각에 대한 무게를 예측하였다.

Table 1 은 첫 번째 안에 대하여 무게 분석을 수행하여 도출된 산화제 배관의 자료이며 Table 2 는 두 번째 안에 대해 분석한 결과이다. 그런데 이것은 배관 및 플렌지의 무게만을 고려한 것으로 그 밖의 구성품에 대해서도 고려한 분석 결과는 Table 3 과 같다.

3.1 1st case 무게 자료로부터 플렌지 무게 예측

1st case의 무게 자료와 Table 1의 산화제 배관 정보로부터 다음과 같이 4"분기배관에 적용된 플렌지 무게를 산출할 수 있다.

Table 1. Data of the 1st case

	Main 배관	분기 배관
외경	$D_{main}=9in=228.6mm$	$d=4in=101.6mm$
두께	$t_{main}=2.8mm$	$t=2.1mm$
내경	$D'_{main}=223mm$	$d'=97.4mm$
단면적	$A_{main}=1986.24mm^2$	$a=656.4mm^2$
밀도	$\rho=8238kg/m^3$	$\rho=8238kg/m^3$
길이	$L_{main}=5400mm$	$l_1=1500mm$
수량	N=1	N=4

- 9"배관 총무게 = 150 kg
- 9"배관 순수배관 무게 = $L \times A \times \rho$
 $= (5400 \times 1986.24 \times 10^{-9}) \times 8238$
 $= 88.358 \text{ kg}$
- ∴ 9"배관 플렌지 총무게 = 150 - 88.358
 $= 61.64 \text{ kg}$
- 9"배관 플렌지 1개당 무게 = $61.64/7 = 8.8 \text{ kg}$
- 4"배관 1개 총무게 = 11 kg
- 4"배관 1개 순수배관 무게 = $L \times A \times \rho$
 $= (1500 \times 656.4 \times 10^{-9}) \times 8238$
 $= 8.1 \text{ kg}$
- ∴ 4"배관 1개 플렌지 총무게 = 11 - 8.1
 $= 2.89 \text{ kg}$
- 4"배관 1개당 플렌지 개수 = 4개
- ∴ 플렌지 1개당 무게 = $2.89/4 = 0.72 \text{ kg}$

3.2 ProE 모델링에 대한 무게 검토

현재 구성된 현안과 변경안에 대한 ProE 모델링에 의한 산화제 배관 정보를 Table 2에 나타내었으며, 이를 바탕으로 산화제 배관의 무게를 예측하고자 한다.

Table 2. ProE 모델링 산화제 배관 정보

	1st case		2nd case
	main 배관	분기 배관	분기 배관
외경	$D_{main}=9in=228.6mm$	$d=4in=101.6mm$	$d=4in=101.6mm$
두께	$t_{main}=2.8mm$	$t=2.1mm$	$t=2.1mm$
내경	$D'_{main}=223mm$	$d'=97.4mm$	$d'=97.4mm$
단면적	$A_{main}=1986.24mm^2$	$a=656.4mm^2$	$a=656.4mm^2$
밀도	$\rho=8238kg/m^3$	$\rho=8238kg/m^3$	$\rho=8238kg/m^3$
길이	$L_{main}=7477.26mm$	$l_1=765.9mm$	$l_2=6357.68mm$
수량	N=1	N=4	N=4

1st case

- 9"배관 순수배관 무게 = $L \times A \times \rho$
 $= (7477.26 \times 1986.24 \times 10^{-9}) \times 8238$
 $= 122.35 \text{ kg}$
- 9"배관 플렌지 총무게 = 61.64 kg
 $\therefore 9" \text{ 배관 총무게} = 122.35 + 61.64 = 183.99 \text{ kg}$
- 4"배관 1개 순수배관 무게 = $L \times A \times \rho$
 $= (765.9 \times 656.4 \times 10^{-9}) \times 8238$
 $= 4.14 \text{ kg}$
- 4"배관 1개 플렌지 총무게 = 2.89 kg
 $\therefore 4" \text{ 배관 1개 총무게} = 4.14 + 2.89 = 7.03 \text{ kg}$
- \therefore Total 배관 총 무게
 $= 9" \text{ 배관 총무게} + 4" \text{ 배관 1개 총무게} \times 4$
 $= 183.99 + 7.03 \times 4$
 $= 212.1 \text{ kg}$

2nd case

- 4"배관 1개 순수배관 무게 = $L \times A \times \rho$
 $= (6357.68 \times 656.4 \times 10^{-9}) \times 8238$
 $= 34.38 \text{ kg}$
- 4"배관 1개당 플렌지 개수 = 10개
 $\therefore 4" \text{ 배관 1개당 플렌지 총무게}$
 $= 0.72 \times 10 = 7.2 \text{ kg}$
 $\therefore 4" \text{ 배관 1개 총무게} = 34.38 + 7.2 = 41.6 \text{ kg}$
- \therefore Total 배관총무게 = 4"배관 1개총무게×4개
 $= 41.6 \times 4$
 $= 166.4 \text{ kg}$

상기 결과는 배관 및 플렌지의 무게만을 고려한 것으로 그 밖의 구성품에 대해서는 Table 1 자료를 참조하여 현안과 변경안의 무게를 비교해보면 Table 3과 같다. 2nd case의 경우에 현안에 비해 11.7kg 감소함을 알 수 있으나, 탱크 외부로 분기되는 산화제 라인의 단열재 무게를 고려하면 현안과 변경안에 대한 무게 변화는 거의 없을 것으로 예상된다.

Table 3. 1st case 와 2nd case 에 대한 무게 비교

	1st case	2nd case	비 고
배관 및 플렌지	212.1	166.4	
분기 매니폴드	18	18	변경안에서 Sump의 무게가 매니폴드 무게와 같다고 가정
벨로우즈	16	16	
PSD	32	60	- SRR자료에 PSD 가압을 위한 구성품이 제외되어 있어서 - IC15G0X0102참조 - PSD 가압용 He tank 무게 미포함
필터	2	2	
주입/배출 관련	44	50	
산화제공급계 총합	324.1	312.4	탱크로부터 펌프전단까지의 공급계 무게 고려

4. 성능검토

4.1 산화제 탱크 가압 압력

산화제 탱크 가압 압력은 다음의 식 (1), (2)를 사용하여 계산할 수 있다.

$$p_0 = p_{TPinlet} + \Delta p + \alpha \tag{1}$$

$$\Delta p = \Delta p_{friction} - \rho a (h_1 + h_2) \tag{2}$$

여기서, h_1 과 h_2 는 각각 배관과 탱크 내부의 추진제 수위를 의미한다. 또한 a 는 가속도를 의미하며, 가속도는 초기 1.4g로부터 연소종료시점에서 6g까지 선형적으로 변한다고 가정한다. α 는 산화제 배관내 설치된 필터에서의 압력손실을 의미하며, $\Delta p_{friction}$ 은 배관 내의 마찰저항 압력 강하를 나타낸다.

Table 4. Required pressure with the time

	1st case	2nd case
Thrust build-up, MPa	0.437	0.433
Lift-off, MPa	0.385	0.381
Cut off, MPa	0.19	0.182

산화제 탱크의 가압압력을 결정하기 위해서는 지상 발사 대기부터 비행시간별 최대 요구압력을 예측해야 하므로, 이륙이전 추력 상승 과정도 고려한다. 이와 같이 계산된 시간에 따른 탱크 가압 요구 압력은 Table 4와 같으며 탱크 압력 조절 범위는 Table 5의 기존 발사체 자료를 바탕으로 요구 가압력의 $\pm 5\text{psia}$ ($\pm 0.034\text{MPa}$)로 선정하였다. 또한 탱크 내의 overpressure를 방지하기 위한 vent valve 작동압력 (최대 조절압력의 10% 상위)을 고려하면, 1st case와 2nd case의 열리지 최대 사용압력은 각각 0.518MPa과 0.514MPa에 해당하며, 두 경우에 대해서 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

Table 5. Range of the pressure

	LOx	Fuel
Fastrac	58 \pm 3psia	50 \pm 3psia
Saturn-V	20.5 \pm 2.5psia	25.1 \pm 2.5psia

4.2 산화제 배관 내 공력가열량에 의한 과냉비등 (Subcooled Boiling) 발생 유무

산화제 주배관의 기능은 추진기관 작동시 펌프 입구단에서 다음과 같은 조건의 액체산소를 공급하는 것이다.

- 압력 : 0.475MPa
- 온도 : 95 K
- 균일도 : TBD

상기 항목 중 Fig. 2 와 같이 산화제라인이 탱크 외부로 배치될 경우에는 비행 중 공력가열에

의한 LOX 온도 상승량 및 과냉 비등 발생 가능성을 예측하여야 한다.

4.2.1 Nucleation 발생에 필요한 최소 조건 ($T_{wall} \geq T_{SAT}$)

산화제 주배관의 기능은 추진기관 작동시 펌프 입구단에서 액체산소를 정해진 압력과 온도를 유지시켜 공급하는 것이다.

Fig. 2와 같이 산화제 배관이 탱크 외부로 배치될 경우에는 비행 중 공력가열에 의한 액체산소의 온도 상승량 및 과냉비등 발생 가능성을 예측할 필요가 있다.

과냉비등이 발생할 수 있는 최소 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.[2]

$$(\Delta T_{SUB})_i \leq \phi \left(\frac{4z}{G c_{p,f} D} + \frac{1}{h_{fo}} \right) \quad (3)$$

여기서, G 는 질량속도, h_{fo} 는 액상의 열전달 계수, z 는 파이프 입구에서부터의 거리, ϕ 는 열유속을 나타낸다.

그러나 식 (3)은 관 내벽면 온도가 포화온도보다 클 경우에 벽면에서 기포가 발생할 수 있는 가능성이 있음을 나타내는 식으로 보다 정확한 핵비등 (Nucleation Boiling) 발생유무를 파악하기 위해서는 다음과 같은 핵비등 발생 시작점에서의 벽면과열도 $(\Delta T_{SAT})_{ONB}$ 와 열유속 ϕ_{ONB} 을 계산하여야 한다.

$$(\Delta T_{SAT})_{ONB} = X Pr_f \phi_{ONB}^{0.5} \quad (4)$$

여기서, $X = \left[\frac{8\sigma T_{SAT}}{i_{fg} k_f \rho_f} \right]^{0.5}$ 이며, Pr_f 은 프란틀수, σ 는 표면장력, i_{fg} 는 증발잠열, k_f 는 열전도계수, ρ_f 는 밀도를 나타낸다. ϕ_{ONB} 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\phi_{ONB} = h_{fo} ((\Delta T_{SAT})_{ONB} + \Delta T_{SUB}(z)) \quad (5)$$

4.2.2. 산화제 주배관 분기 위치 변경에 따른 공력 가열량

산화제 주배관의 분기위치가 엔진지지부에서

산화제 탱크로 바뀌며, 로켓 스킨 외부로 돌출될 경우에는 공력가열에 의한 열유속이 공급되기 때문에 이 경우에 있어서 산화제 배관 내에서 2상 유동 형성 유무를 파악하는 것이 중요하다. 물론 전체 가열량은 작아서 산화제 펌프 전단의 유체의 온도 상승은 크지 않지만 국부적인 집중 열유속 조건일 경우에는 Nucleation Boiling 발생 여부를 파악해야 한다.

공력해석 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 배관 선두부의 최대 공력가열량은 Swept Cylinder option과 Sphere option을 적용할 경우에는 각각 135kW/m²과 350kW/m²임을 알 수 있다. Swept Cylinder option인 경우의 열유속 조건일 경우에는 식 (5)의 판단조건에서 Nucleation Boiling이 발생하지 않음을 알 수 있다.

4.2.3 Nucleation Boiling 발생 유무 파악

계산한 결과 Fig. 3의 Swept cylinder 모델을 사용할 경우에는 Fig. 4에서 볼 수 있는 것과 같이 비등이 발생하지 않는 영역에 해당한다. 그러나 Sphere option을 사용할 경우에는 비등이 발생 가능성이 있으므로 식(4)와 (5)를 이용하여 Nucleation boiling 발생 유무를 파악하여야 한다.

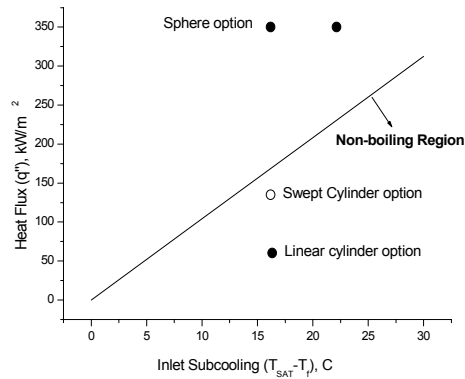


Fig. 4 Nucleation boiling 발생 가능성 파악

계산의 편의상 산화제 배관 형상을 Fig. 5와 같이 단순화한다. Fig. 5에 도시한 열유속은 Fig. 3의 최대 공력가열량 발생 시점 (연소종료시점 (116.7s)과 유사)에서의 열유속으로 350 및 60kW/m²에 해당한다. Fig. 5의 point 1과 2에서의 포화온도는 각각 106.2K과 113.6K에 해당하며, 산화제 펌프 입구 압력 (point 3)은 722.1kPa에 해당한다.

열유속이 60kW/m²에 해당하는 직선구간 (Linear cylinder option in Fig. 3)에서는 Fig. 4에서 볼 수 있는 것과 같이 Non-boiling 구역에 포함된다. 따라서 Fig. 3의 Sphere option을 사용한 구간에 대해 식 (4)와 (5)를 사용하여 ONB (Onset of Nucleation Boiling)에서의 조건을 알아보면 다음과 같다.

	$(\Delta T_{SAT})_{ONB}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\phi_{ONB}, \text{ kW/m}^2$	$T_{wall, ONB}, \text{ K}$
선두	21.35	395.24	128
후미	41.9	674.17	155.5

또한 이 때의 산화제의 bulk 온도와 관 내벽 온도, 그리고 포화온도를 도시하면 Fig. 6과 같다. Fig. 6으로부터 ONB에서의 벽면 온도가 예측 벽면온도보다 높기 때문에 ONB는 발생하지 않을 것으로 예상된다. 그러나 선두부의 경우에

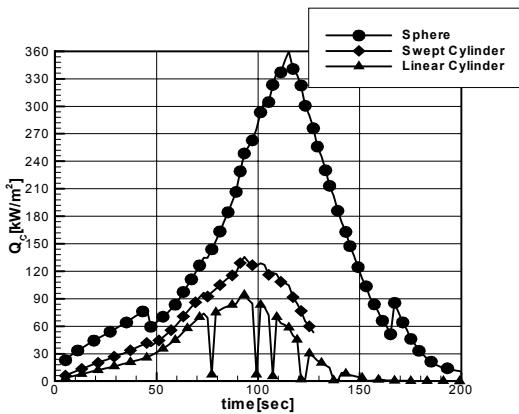


Fig. 3 산화제 배관 공력가열량 (DR62582X0000-0001 참조)

는 예측 벽면 온도와 ONB에서의 벽면온도가 큰 차이 (약 4.4°C)가 없으며, Fig. 4 에서 볼 수 있는 바와 같이 일단 Nucleation 이 발생할 수 있는 가능성이 존재하므로 주의를 요한다.

이는 식 (4)를 이용해 예측할 수 있으며 약 4.2m 에 해당한다. 이로부터 관 내에서 Nucleation boiling이 발생하지 않을 것으로 예상된다.

$$z_{NB} = \frac{Gc_{p,f}D}{4} \left(\frac{(\Delta T_{SUB})_i + (\Delta T_{SAT})_{ONB}}{\phi} - \frac{1}{h_{fo}} \right) \quad (8)$$

5. 결 론

가상 발사체 산화제 공급배관을 연료탱크 하단에서 분기하는 안 (1st case)과 산화제 탱크 하단부에서 직접 분기하는 안 (2nd case) 두 가지 경우에 대해 무게 및 성능 측면에서 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산화제 배관을 탱크 하부에서 분기할 경우에, 1st case에 비해 무게의 변화는 거의 없는 것으로 예측된다.
2. 두 가지 안에 있어서, 산화제 탱크 가압 요구 압력에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.
3. 최대 공력가열량 발생 시점 (Fig. 3)에 대한 산화제 배관에서의 ONB 조건을 검토한 결과 과냉비등은 발생하지 않을 것으로 예측된다. 그러나, Fig. 4와 같이 Nucleation 발생 가능 영역에 포함되며, ONB 조건에 해당하는 벽면 온도와 예측 벽면 온도와의 차이가 그리 크지 않기 때문에 적절한 구조적인 대책이 요구된다.

참 고 문 헌

1. Steven J. Isakowitz, , "Space Launch Systems," Second Edition, AIAA. 1995.
2. John G. Collier, Jorn R. Thome, "Convective Boiling and Condensation," Clarendon Press, 1996.
3. 한국항공우주연구원 우주발사체사업단 설계 보고서, DR62582X0000-0001.

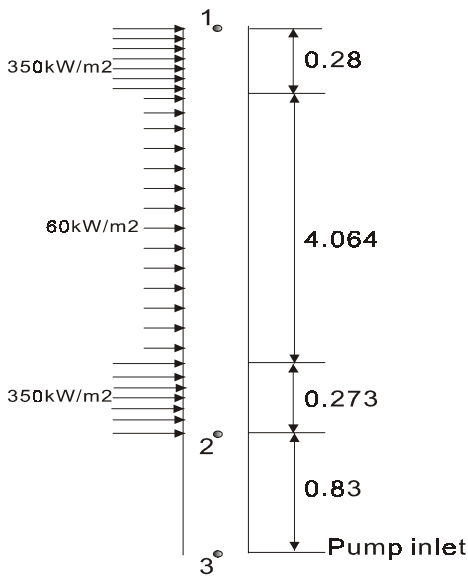


Fig. 5 산화제 배관 단순화

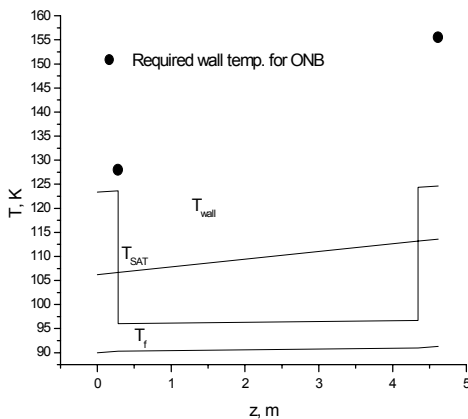


Fig. 6 산화제 주배관에서의 온도 분포

만약 선두부의 열유속(350kW/m2)이 관 전체에 걸쳐 공급될 경우에 ONB에 필요한 요구 길