

## 속도 및 압력 복합형 증동 터빈 설계

정은환\*, 박편구\*\*, 김진한\*\*\*

## Design of Velocity and Pressure Compounded Impulse Turbine

Eunhwan Jeong\*, Pyun-Goo Park\*\*, Jinhan Kim\*\*\*

## Abstract

Design of velocity-compounded turbine for 75ton class LRE turbopump application and pressure compounded turbine for 30ton class LRE turbopump has been performed. 1D calculation and CFD analysis were conducted in determining blade and flow passage shape of velocity compounded turbine iteratively. Finally, 23.1% improved specific power and 5% reduced weight turbine to the original design was developed. In case of pressure-compounded supersonic turbine design, rotational speed was increased by 50% and the effect of carryover ratio, 2nd nozzle installation angle, leakage flow of 2nd nozzle, and work sharing factor was studied. Final 1D design resulted 36% increased specific power and 51% reduced weight comparing to the original single-row impulse turbine. It is anticipated that nozzle flow path design will be very important for the accomplishment of expected performance of pressure-compounded turbine and nozzle shape optimization will be conducted through the CFD analysis .

## 초 록

75톤급 터보펌프를 대상으로 한 속도복합형 터빈과 설계회전수를 50% 증가시킨 30톤급 터보펌프 터빈 적용을 위한 압력복합형 터빈 설계를 수행하였다. 속도복합형 터빈의 경우 1차원설계-유동해석-1차원설계의 반복적인 설계과정을 통해 원형노즐을 적용한 2열 초음속 증동터빈의 특성을 파악하였으며 최종적으로 기본형인 1열 증동형 터빈 대비 비출력 23.1% 향상, 무게 5% 감소된 ver. 14h 모델을 완성하였다. 압력복합형 터빈은 에너지 회수 비율, 2단 노즐 출구각, 2단 노즐 누설유량, 단별 출력 비율 등의 새로운 인자의 고려하여 각 변수의 성능에 미치는 영향을 검토하였으며 1차원 해석 기준 비출력이 36%가 증대되고 무게는 51% 감소한 터빈을 설계하였다. 압력복합형 터빈의 높은 성능을 위해서는 1단 및 2단 노즐의 형상설계가 매우 중요할 것으로 판단되며 유동해석을 통해 최적화할 예정이다.

키워드 : 속도복합형(velocity-compounded), 압력복합형 (pressure-compounded), 터보펌프(turbopump), 비출력(specific power), 효율(efficiency)

접수일(2010년 1월 13일), 수정일(1차 : 2010년 4월 19일, 2차 : 2010년 6월 18일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)

\* 터보펌프팀/jeh@kari.re.kr \*\* 터보펌프팀/pyun9@kari.re.kr \*\*\*터보펌프팀/jhkim@kari.re.kr

## 1. 서 론

가스발생기 사이클 액체로켓엔진의 경우, 펌프 출구에서 추출된 추진제를 고압, 고온으로 연소시켜 터보펌프 터빈을 구동한다.

엔진의 성능 향상을 위해서는 가능한 최소량의 연소가스의 사용이 요구되며, 큰 압력비의 터빈 운용환경을 고려할 때 높은 비출력 구현을 위한 초음속 충동형 터빈의 적용은 필연적 선택이라 할 수 있다.

초음속 충동형 터빈의 형태는 고온고압가스의 열에너지를 운동 에너지로 전환시키기 위한 팽창과정이 하나의 노즐에서 이루어지는 단단형과 다수의 노즐에서 이루어지는 다단형으로 구분할 수 있다. 단단형의 경우, 로터는 1열 또는 2열 이상으로 설계될 수 있으며 2열 이상의 로터를 적용하는 경우 속도 복합형(velocity compounded) 터빈이라 부른다.

다단형 터빈은 노즐-로터-노즐-로터의 유로구조를 통한 고에너지의 가스의 순차적 팽창으로 보다 높은 효율의 구현이 가능하며 일반적으로 압력 복합형(pressure compounded) 터빈이라 칭해진다. 단수는 가용에너지와 설계회전수에 따른 구현가능 효율과 무게, 제작 난이도 및 레이아웃 개념 등의 절충을 통해 결정되는데 2단 보다 큰 경우는 매우 드물다. 효율적인 터빈을 위해서는 속도/압력 복합형 터빈이 선호되나 사이클의 특성 및 설계 목적상 단단 1열로 설계되는 경우도 볼 수 있다.

터빈 형태의 선택은 터빈의 설계환경에 의해 결정된다. 예를 들어, 정압비열이 큰 고에너지의 작동가스를 이용하는 경우 터빈의 설계 속도비는 매우 낮아지며 이 경우는 속도복합형 터빈이 적절하다. 반면에 상대적으로 낮은 에너지의 작동가스로 구동되고 높은 회전수로 설계되어 속도비 0.2 이상이 가능한 경우에는 압력복합형이 적절하다고 볼 수 있다.

그림1에는 터빈종류에 따른 터빈효율의 변화를 속도비에 따라 비교하였다. 1열(single row) 충동터빈의 경우 속도비가 0.4가까이 되면 압력

복합형에 가까운 효율구현이 가능하나 터빈의 허용 선속도, 디스크 크기에 따른 무게 및 회전체 동역학등의 제한을 받는다.

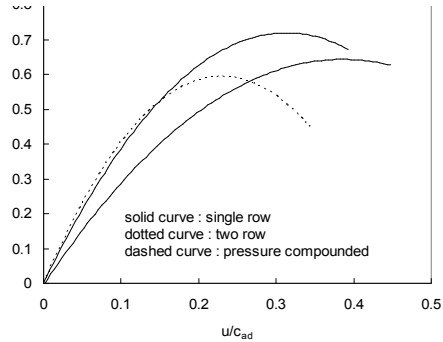


그림 1 터빈종류 및 속도비에 따른 터빈효율 비교

속도복합형 터빈은 그림1에서(two row) 보듯 속도비 0.2 이하에서 효과적인 설계가 이루어진다. 무게와 구조면에서 압력복합형보다 가볍고 단순하다. 이론적으로 2열 속도복합형 충동터빈은 각 익열에서의 속도계수가 동일할 경우 로터 선속도가 노즐출구속도의  $\cos\alpha_1/4$  배( $\alpha_1$ 는 노즐출구 유동각도) 일 때 최적효율이 달성되며 이때 출력은 1열 로터 75%, 2열 로터 25%로 배분된다. 설계상 어려움은 1열 익형보다는 2열 로터 익형과 1열과 2열 로터 중간에 위치하는 reversing vane의 설계에 있다. reversing vane은 낮은 초음속 유동(마하수 1.2 전후)영역에 있기 때문에 유로형상 및 유로면적의 설계가 적절히 이루어지지 않을 경우 큰 전압력 손실과 함께 초음속 유동의 유지가 힘들다. 2열 로터는 상대 입구 마하수가 천음속영역에 존재하기 때문에 익단형상 및 유동각의 설계가 중요하고 특히 blockage에 따른 정압력의 변화가 1열 로터 및 reversing vane의 작동에 영향을 주어 터빈의 전체적인 효율저하를 초래할 수 있기 때문에 세심한 설계가 요구된다.

압력복합형은 원하는 설계속도비 구현이 가능할 경우 최적 속도비 근방에서 효율 이득이 다른 두 종류의 터빈에 비해 큼을 그림에서 확인할 수 있다. 압력복합형 터빈은 고에너지의 기체가 1

단과 2단에서 순차적으로 팽창되기 때문에 각 단별 설계는 기술적으로 1열 총동형 터빈의 설계방법과 동일하다. 하지만 1단 하류의 유체 운동 에너지 회수 비율, 2단 노즐 출구각, 2단 노즐 누설 유량, 단별 출력 비율 등의 추가적인 설계인자가 고려되어야 한다.

본 논문에서는 속도복합형 터빈과 압력복합형 터빈의 설계에 대해 다루었다. 속도복합형 터빈은 75톤급 터보펌프를 대상으로 하였다. 현재 75톤급 터보펌프의 터빈은 1열 총동형으로 속도비는 무게 제약으로 인해 0.208로 설계되었는데[1] 그림 1에서 보듯 속도비 0.2 이하에서 속도 복합형 터빈을 적용할 때 얻을 수 있는 큰 효율 이득을 구현하고자 하였다. 속도복합형 터빈 적용을 위한 디스크 형상 및 커빅커플링 설계[2]는 마무리된 상태이며 reversing vane과 동익 익형 및 각 익

열의 스펠 조절을 통해 고비출력 (또는 효율)을 달성할 수 있는 유로 결정에 주안점을 두었다.

압력복합형 터빈은 유성기어등을 적용하여 30톤급 터보펌프 터빈의 설계회전수를 20000에서 30000rpm 으로 증가시킬 경우를 고려하여 설계가 이루어졌다. 30톤급 펌프의 효율증가를 반영하여 요구출력 1460kW를 기준으로 하였다. 30톤급 터빈의 경우 현재 20000rpm, 속도비 0.276의 1열 초음속 총동형터빈으로 설계되었는데 그림 1에서 보듯 2열 속도복합형 적용 시 직경 감소에 따른 무게 감소이외에 효율측면의 큰 이점이 없는 것으로 판단되어 속도복합형은 고려하지 않았다.

## 2. 속도복합형 초음속 터빈설계

75톤 터빈의 비출력 향상과 외경 감소에 따른

표 1 75톤 TP 속도복합형 터빈 설계 결과 (ver.14h)

구 분	단위	ver. 14h	구 분	단위	ver. 14h		
열 수	-	2	정 익	스 팬(입/출)	mm	31.1/33.2	
입 구 온 도	K	1000		정 의 코 드	mm	17.9	
입 구 압 력	bar	58		pitch-chord ratio	-	0.493	
출 구 압 력	bar	3.22		aspect ratio(입/출)	-	1.737/1.855	
압 력 비		18.0		정 의 수	-	121	
가스상수/비열비	J/kgK/-	274.4/1.125		외 경(입/출)	mm	372.4/374.6	
유 량	kg/s	10.33		내 경(입/출)	mm	310.2/308.2	
회 전 수	rpm	11000		입 구 각	deg	32.4	
속 도 비	-	0.168		출 구 각	deg	32.4	
평 균 직 경	mm	340		속도계수	-	0.856	
노 즐	개 수	-		11	정의-로터 간극	mm	4
	목 직 경	mm		13.2	동 익 스펠	mm	35.7
	출 구 직 경	mm		26.2	동 익 코 드	mm	17.0
	장 착 각 도	deg		19.5	pitch-chord ratio	-	0.582
	$\phi$ (속도계수)	-	0.96	aspect ratio	-	2.1	
1 열 로 터	노즐-로터 간극	mm	3	동 의 수	-	108	
	동 익 스펠	mm	28.5	팁 외 경	mm	377.6	
	동 익 코 드	mm	14.8	허 브 외 경	mm	306.2	
	pitch-chord ratio	-	0.768	입 구 각	deg	48.0	
	aspect ratio	-	1.926	출 구 각	deg	42.3	
	동 의 수	-	94	속도비	-	0.938	
	팁 외 경	mm	369.8	팁간극	mm	3	
	허 브 외 경	mm	312.8	슈라우드두께	mm	1	
	입 구 각	deg	24.7	단 열 일	kJ/kg	678.4	
	출 구 각	deg	24.7	예 상 효 율	%	55.2	
	$\psi$ (속도계수)	-	0.834	예 상출력 1열/2열	MW	3.869 2.958/0.911	
	로터-정익 간극	mm	3.5	예 상 비 출 력	kJ/kg	374.6	
팁간극	mm	3					
슈라우드두께	mm	1					

무게감량을 목적으로 속도복합형 터빈의 설계가 수행되었다. 비출력을 극대화하기 위해 터빈입구 온도는 1000K로 11% 증가시켰다. 압력, 회전수 조건 및 요구출력은 기본형 터빈과 동일하게 설정되었다.

터빈의 성능 및 기본형상 결정을 위한 1차원 설계는 터빈의 등가질량(equivalent weight)[3]을 최소화하는 방향으로 이루어졌으며 회전체 동역학적 마진 확보를 고려하여 평균직경은 1열 증동형 터빈에 비해 14.1% 감소한 340mm로 결정하였다. 표1은 속도복합형 터빈 최종설계(ver. 14h) 결과를 정리한 것이다.

서론에서 언급한 바와 같이 속도복합형 터빈 익형설계에 있어 reversing vane 및 2열 동익이 전체 성능에 미치는 영향이 크며, 이에 따라 익형 및 유로형상 확정을 위해 총 14종의 version, 그리고 각 version 별로 적게는 3종 많게는 12종의 variation에 대해 3차원 유동해석을 수행하여 최종적인 형상을 결정하였다. Ver.7c에 이르러 요구성능을 만족시킬 수 있는 형상이 구현되었으며 이후에는 유동각의 변화없이 유로 높이, LE/TE형상을 포함한 익형 변화에 주안점을 두어 설계가 진행되었다. 아래그림은 속도복합형 터빈의 최종형상(ver.14h)을 3차원 모델링한 것이다.

그림3은 ver.14h의 유동해석 결과로 평균직경에서 마하수 분포를 보여준다.

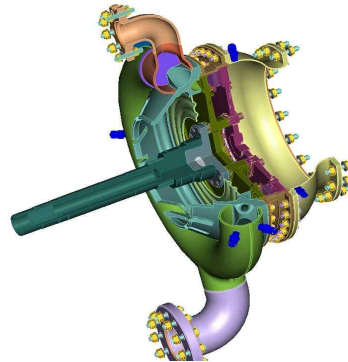


그림 2 속도복합형 터빈 3차원 모델링

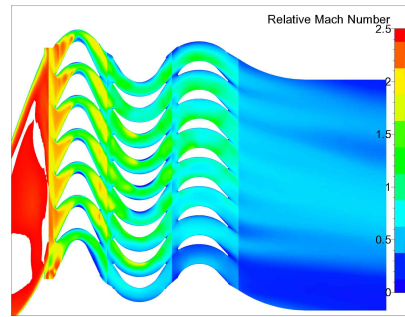


그림 3 상대 마하 수 (ver.14h)

표 2 개량형 터빈 유동장 설계 및 해석값 비교

Stations		Pt			Ps			Ts			Mach			Flow angle			
		no	design	v.7c	v.14h	design	v.7c	v.14h	design	v.7c	v.14h	design	v.7c	v.14h	design	v.7c	v.14h
1st. rotor	inlet abs.	1	4.457	4.303	4.776	0.322	0.314	0.305	746.8	744.8	744.5	2.329	2.332	2.336	19.5	21.7	18.3
	inlet rel.	2	2.192	2.103	2.306	0.322	0.314	0.305	746.8	744.8	744.5	1.949	1.955	1.950	23.5	26.2	22.1
	exit rel.	3	1.170	1.245	1.316	0.322	0.360	0.320	800.8	810.8	798.0	1.570	1.450	1.540	24.7	29.1	26.7
	exit abs.	4	0.720	<b>0.788</b>	0.786	0.322	<b>0.360</b>	0.320	800.8	<b>810.8</b>	798.0	1.223	<b>1.128</b>	1.201	32.4	41.2	36.9
stator	inlet abs.	5	0.577	<b>0.686</b>	0.721	0.322	<b>0.380</b>	0.323	800.8	<b>825.5</b>	803.0	1.034	<b>1.011</b>	1.165	31.8	35.9	34.0
	exit abs.	6	0.577	<b>0.586</b>	0.589	0.322	<b>0.323</b>	0.317	820.8	<b>827.3</b>	818.6	1.034	<b>1.003</b>	1.022	31.8	36.0	34.8
	inlet abs.	7	0.577	<b>0.566</b>	0.576	0.322	<b>0.332</b>	0.331	820.8	<b>832.4</b>	824.2	1.034	<b>0.959</b>	0.979	32.4	31.5	31.5
2nd. rotor	inlet rel.	8	0.434	0.435	0.442	0.322	0.332	0.331	820.8	832.4	824.2	0.733	0.670	0.681	48.0	52.2	50.4
	exit rel.	9	0.418	0.410	0.420	0.322	0.306	0.308	824.1	830.6	822.2	0.686	0.703	0.721	42.3	47.7	46.7
	exit abs.	10	0.366	0.363	0.367	0.322	0.306	0.308	824.1	830.6	822.2	0.477	0.538	0.547	75.5	84.0	82.3
Overall Performance																	
versions		Power			Specific Power			1st row power			2nd row power			efficiency			
design		3869			374.6			2958			911			55.2			
ver. 7c		3874			374.9			2967			907			55.2			
ver.14h		4080			394.9			3130			950			58.2			

units: P-MPa, T-Kelvin, Flow angle-deg, Power-kW, Specific Power-kj/kg, efficiency-%

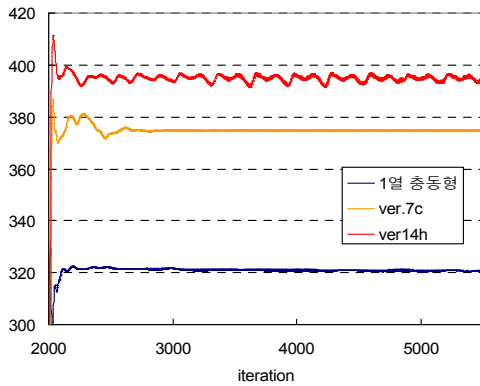


그림 4 모델별 비출력 비교

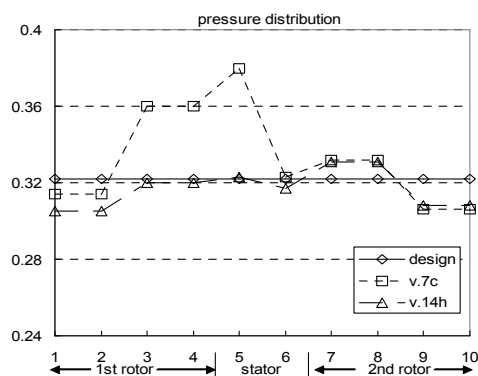
그림4는 75톤 터빈의 모델별 예측 비출력을 비교한 그림이다. 1열총동형, ver.7c, 그리고 ver.14h를 비교하였는데 최종 모델의 향상된 성능을 확인할 수 있다.

ver.14h의 성능향상은 ver.7c의 해석 평균값의 면밀한 검토와 ver.13까지의 해석을 통해 확인된 성능변화경향을 반영하여 구현할 수 있었다. 표2를 보면 효율과 출력은 1차원 설계와 ver.7c의 유동해석이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 표의 CFD 결과에서 로터전후의 유동 선속도  $c_\theta$ 의 합에 로터의 선속도  $u$ 를 곱한 값은 물리적으로 비출력에 해당하며 로터에서 구해진 토크에 의해 계산된 비출력 값과 거의 일치한다. 1차원 설계의 경우 2차 손실에 의한 각 유로에서 열역학 관계량 변화가 고려되어 있지 않기 때문에 선속도는 CFD 결과에 비해 다소 크지만 2차 손실 보정값(ver.7c의 경우 0.925)을 1차원 설계 선속도의 합에 곱하면 CFD 결과와 비슷한 수치를 나타낸다. 하지만 온도, 압력, 속도의 분포에서는 1차원 설계와 유동해석의 여러 가지 차이를 발견할 수 있는데 우선 1열 로터-reversing vane, reversing vane-2열 로터 사이에 존재하는 전압 손실 및 정압증가, 그리고 동압감소에 의한 재가열(reheating) 현상을 들 수 있다(표2, 붉은색). 유동해석상의 유속 감소량을 이용하여 재가열에 의한 온도 증가 및 전압력 감소를 계산하고 동압차이로 정압력 회복량을 계산하면 유동해석과 유사한 값이 나타난다.

이러한 현상은 전형적인 충격파에 따른 손실현상으로 1차원 설계시 에너지회수 비율을 적용하여 모델링함으로써 개선이 가능할 것으로 보인다. 유동해석 데이터를 기준으로 할 때 에너지회수 비율은 1열 로터-reversing vane 사이는 0.807, reversing vane-2열 로터 사이는 0.927로 계산된다.

1열 로터 출구 reversing vane 전방의 높은 정압은(표2, 붉은색 볼드)으로 여러 형상인자(유로스팬, reversing vane 익형, 2열 로터 익형)를 바꾸어 가며 유동해석을 수행한 결과(ver.8-13) 2열 로터 전단 형상에 의해 가장 큰 영향을 받게됨을 발견하였다. 초기 설계에서는 reversing vane 출구까지 모든 유동이 초음속이기 때문에 2열 로터의 형상은 상류에 큰 영향을 주지 않을 것으로 예상하였으나 축방향 유동 속도가 터빈 전 영역을 통해 아음속이고 이로 인해 2열 로터의 blockage가 1열 로터 출구 압력장에 영향을 주는 것으로 판명되었다.

Reversing vane을 통과하여 2열 로터에 이르는 유동의 마하수 역시 설계의도와는 달리 아음속으로 나타났는데(표, 파랑색) 이는 앞서 설명한 터빈의 2차손실 관점에서 보면 설계목표치와 큰 차이가 없는 것으로 받아들일 수 있지만 터빈의 전체적인 성능향상을 위해서 높은 유속이 필요하다. Reversing vane 영역에서 전온도와 유량이 동일한 점을 감안하면 입-출구 유속의 감소가 초음속영역에서 이루어지기 위해서는 전압력과 유효면적의 곱  $P_t A$  역시 감소해야한다. 1차원 설계상 reversing vane에서의 속도계수와 전압력 손



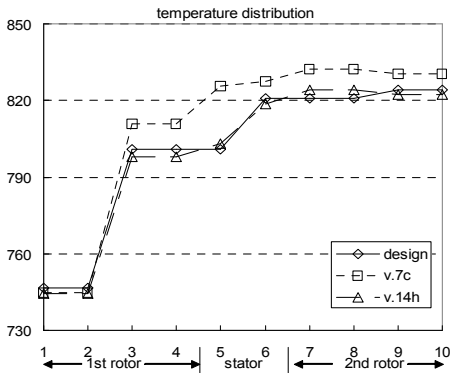


그림 5 Version 별 유로내부 압력/온도 비교

실, 그리고 원형노즐 적용에 따른 부분분사효과를 적용하면 입구 대 출구의 스패 비율은 약 1.15로 계산되나 원형노즐 적용에 따른 유효면적 산정의 불확실성, 3차원 유동효과등은 1차원 해석을 통한 reversing vane 출구스패를 결정을 부정확하게 만든다. 따라서, 유동해석을 통한 확인 작업이 필요하게 된다.

상기 지적한 문제점들을 바탕으로 최종적인 ver.14h의 개량설계가 이루어졌다. 그림5는 1차원 설계, ver.7c, ver.14h의 유로별 압력과 온도를 비교한 그림이다. Ver.14h에서 reversing vane 전단의 정압력 증가 및 reheating에 의한 온도 증가가 설계 목표에 맞는 수준으로 향상되었음을 확인할 수 있다. 속도복합형 터빈은 1열 중동형 터빈에 비해 비출력 23.1% 증가, 무게 5% 감소를 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 압력복합형 초음속 터빈설계

압력복합형 터빈설계는 30톤급 터보펌프 터빈 적용을 목표로 진행되었다. 30톤급 터보펌프의 레이아웃은 75톤급 터보펌프와 유사하며 산화제-연료펌프/터빈이 동일 축으로 스플라인 샤프트를 통해 연결되어있다. 터보펌프의 회전수는 산화제 펌프의 흡입성능에 의해 결정되기 때문에 연료펌프와 터빈은 수력/공력적으로 최적의 회전수에서

설계되기 힘들다. 이러한 난점을 유성기어와 같은 인라인 감속기를 통해 극복할 수 있고 이에 대한 연구가 현재 진행중이다. 압력복합형 30톤급 터빈은 설계회전수를 30,000rpm으로 50% 증가 시킬 경우에 대하여 그 설계를 진행하였다.

압력복합형 터빈설계를 위해서는 에너지 회수 비율, 2단 노즐 출구각, 2단 노즐 누설유량, 단별 출력 비율 등의 새로운 인자의 고려가 필요하다. 에너지 회수비율(carryover ratio)은 1단 하류 유동의 운동에너지가 2단 입구의 에너지로 전환되는 비율로 그 값은 유동속도, 유동각, turning angle, 2단노즐 입구형상에 영향을 받는다. 에너지 회수 비율은 일반적으로 0.4~1.0의 범위에 있으며[4] 그 값에 따라 터빈 효율은 최대 3% 까지 영향을 받을 수 있다. 단별 압력비가 1열 또는 복열 중동터빈에 비해 작고 따라서 1단 출구 마하수가 0.4~0.7정도의 영역에 있기 때문에 에너지회수 비율은 클 것으로 예상되나 보수적 관점에서 일반적인 1열 터빈로터 속도계수의 제공값에 가까운 0.7로 설계를 진행하였다. 에너지 회수비율과 함께 2단 노즐 설계시 고려되어야 할 사항으로 1단 익렬에서의 손실에 따른 재가열(reheating)효과가 있는데 1단의 효율이 낮으면 재가열량은 증가하기 때문에 2단에서 사용할 수 있는 가용에너지는 제한적으로 증가하게 된다.

문헌[4]에는 압력복합형의 경우 1, 2단 유동각 및 익형을 일반적으로 동일하게 설계한다고 기술되어 있으나 고정된 평균직경과 1, 2단의 체적유량의 큰 차이로 인해 현실적으로 구현이 쉽지 않으며 이는 MB-3 엔진 터보펌프 터빈에서 확인된 바 있다. 1단 노즐은 설계 경험을 토대로 장착각 18도로 설정하였으며 2단노즐 장착각은 효율저하가 크지 않은 범위에서 유로면적을 연속적으로 변화시키기 위한 값으로 24도가 적절한 것으로 나타났다.

2단 노즐 누설량도 보수적인 값을 적용하여 해석을 수행하였다. 개략적인 레이아웃을 정하였으며 이를 기준으로 1단과 2단로터 사이의 labyrinth

seal 직경 기준 0.2mm 간극을 설정하면 누설유량은 약 0.065kg/s으로 계산되는데 이는 전체 유량의 약 0.7%에 못 미치는 양이다. 해석에는 2%의 누설을 가정하였는데, 이 경우 기본 레이아웃 기준,

표 3 압력복합형 v.s. 1열 총동형 터빈

구 분	압력 복합형	1열 총동형	단위
Turbine inlet Pressure	58	58	MPa
Pressure Ratio	18	14.5	-
Turbine inlet Temperature	1,000	900	Kelvin
Rotational Speed	30,000	20,000	rpm
Mean Diameter	167	280	mm
Velocity Ratio	0.225	0.276	-
Flow Rate	3.22	4.85	kg/s
Static Efficiency	66.8	59.7	%
Estimated Turbine Mass	20.2	39.3	kg
Specific Power	453.5	335.7	kJ/kg

간극설정 0.35mm가 가능할것으로 판단된다. 참고로 누설 2%는 전체 효율의 0.37%의 저하를 초래하는 것으로 계산된다.

단별 출력비율은 산술적으로 50:50 비율이 효율면에서 가장 이상적이다. 누설손실을 줄이고 2단 로터 설계를 경량화하기 위해서는 1단의 팽창을 크게 하여 출력을 증대시키는 것이 좋지만 에너지회수 비율이 낮아져 전체적인 효율을 떨어지게 된다.

표3에는 압력복합형 터빈과 1열 총동형터빈의 성능 및 무게를 비교 정리하였다. 압력복합형터빈은 성능과 무게 모든 면에서 향상되는 것으로 나타났다. 비출력은 36%가 증대되며 무게는 단 수의 증가에도 불구하고 직경 감소로 인해 1열 총동형 터빈의 51% 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.

표4 에는 압력복합형 터빈의 주요 설계값을 나타내었다. 출력은 1,2단 각각 53.5, 46.5%로 배분되었으며 압력비는 4.63과 4.36으로 설정되었다. 1단 로터 블레이드의 종횡비는 약 0.79로 다소 작게 설정되었다. 이는 로터 유로내부의 속도계수가 줄어들어 효율에 좋지 않은 영향을 줄

수 있으나 코드길이를 감소, 블레이드 수가 증가를 통해 조절 가능하다. 2단 수준의 종횡비를 위해서는 1단 블레이드의 코드는 약 5mm 수준으로 줄고 블레이드 수는 두 배 가까이 증가해야 하는데 이는 추후 유동해석 및 제작성 검토를 통해 설계변경 가능성을 판단할 예정이다. 1, 2단 익형은 입출구각이 각각 24.5, 36.0의 대칭익형으로 설계가능토록 하였다. 2단 노즐은 입구 -47도에서 출구 24도로 약110 도의 유동방향 변동이 발생하므로 입구에서 전압력 손실을 최소화 할 수 있는 형상설계가 이루어져야 할 것으로 보인다.

그림6에는 1차원설계 결과를 바탕으로 구성한 압력복합형 터빈의 개략 형상을 나타내었다. 각단의 로터는 주축에 센터볼트를 통해 고정되는 방식을 취했으며 원주를 따라 배치된 여섯 개의 핀을 통해 토크가 전달되는 형태이다. 로터와 로터사이에는 2단 노즐에 고정된 labyrinth seal을 설치하였으며 내경은 55mm로 설계하였다. 노즐은 wrap around 형태의 annular cascade 형태를 기본으로 하였다. wrap around 형태를 취

표 4 압력복합형 터빈 1차원 설계 결과

구 분	1st stage	2nd stage
Pressure ratio	4.63	4.36
Power, kW(%)	781(53.5)	680(46.5)
Mean Diameter, mm	167	167
Nozzle AR	1.557	1.450
Number of nozzles	18	18
Nozzle throat width, mm	5	8.8
Nozzle exit span	5.1	13.9
Nozzle installation angle, deg	18	24
Number of rotor blades	90	90
Blade span, mm	7.1	16.4
Chord, mm	9	11
Aspect ratio	0.789	1.49
Blade inlet angle, deg	24.4	35.4
Blade exit angle, deg	24.7	36.6
Nozzle inlet total pressure, MPa	5.80	1.41
Nozzle inlet total temperature, K	1000	893.9
Nozzle exit Mach number	1.64	1.57
Rotor exit Mach number	0.546	0.649

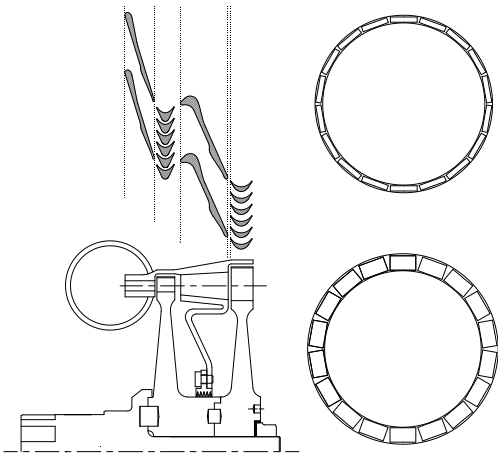


그림 6 평균직경 유로형상(좌상), 레이아웃 (좌하), 1단노즐 array 출구형상(우상), 및 2단노즐 array 출구형상(우하)

할때 초음속 유동일 경우 노즐 팽창 영역의 허브 부위에서 유동박리로 인해 성능이 크게 감소하는 경향이 있으나 1열 또는 2열 충동터빈과는 달리 설계대상 터빈은 노즐압력비 4.5, 출구 마하수는 1.6근방의 보다 완화된 조건에서 운용되기 때문에 성능저하는 상대적으로 적을 것으로 기대된다. 하지만 최적성능을 위해서는 3차원 유동해석을 통한 유로형상 최적화는 필수적이며 이에 대한 설계는 추후 이루어질 예정이다.

#### 4. 요약

75톤 터보펌프를 대상으로 한 속도복합형 터빈과 설계회전수가 20000에서 30000rpm 으로 증가된 30톤급 터보펌프 터빈 적용을 위한 압력복합형 터빈 설계를 수행하였다.

속도복합형 터빈의 경우 1차원설계-유동해석-1차원설계의 반복적인 설계과정을 통해 원형노즐을 적용한 2열 초음속 충동터빈의 특성을 파악하였으며 최종적으로 기본형인 1열 충동형 터빈 대비 비출력 23.1% 향상, 무게 5% 감소된 ver14h 모델을 완성하였다.

압력복합형 터빈은 에너지 회수 비율, 2단 노

즐 출구각, 2단 노즐 누설유량, 단별 출력 비율 등의 새로운 인자의 고려하여 각 변수의 성능에 미치는 영향을 검토하였으며 1차원 해석을 기존 30톤급 터빈 대비 비출력이 36%가 증대되고 무게는 51% 감소한 터빈을 설계하였다. 높은 성능을 위해서는 1단 및 2단 노즐의 형상설계가 매우 중요할 것으로 판단되며 이는 유동해석을 통해 최적화할 예정이다.

#### 참고 문헌

1. 정은환, 박편구, 이항기, 김진선, 김대진, 김진한, "초음속 충동형 터빈의 설계성능 검증방법에 대한 해석 및 시험적 고찰", 한국추진공학회지, 제13권, 제5호, 2009, pp.7-14
2. 정은환, 윤석환, 김진한, "터보펌프용 커빅커 플링의 개발", 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2009, pp.22-25
3. "Turbopump System for Liquid Rocket Engine", NASA SP-8107, 1974
4. D. K Huzel, D. H. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engine", Vol. 147, Progress in Astronautics and Aeronautics, 1992, AIAA