터보펌프용 커빅커플링의 개발

정은환* · 윤석환* · 김진한*

A Curvic-Coupling Development for the Turbopump Application

Eunhwan Jeong* · Suk Hwan Yoon* · Jinhan Kim*

ABSTRACT

Development of a curvic-coupling was presented in this paper. The research covers design, structural analysis, hot-temperature-torsion-test, curvic-coupling applied proto-type turbine disk manufacturing, and assembly test of a curvic-coupling rotor system for the turbopump application. Curvic-coupling was designed based on the Gleason-standard-tooth shape. The load capability of the designed curvic coupling was validated by the structural analysis and hot-temperature-torsion-test. A proto-type turbine disk which had adopted designed curvic-coupling was manufactured, assembled and tested to reveal that shaft-disk assembly run-outs in axial and radial directions were much smaller than the design requirements. The development will be finalized after spin test of shaft-disk assembly in near future.

초 록

본 연구에서는 커빅커플링의 설계, 구조해석, 고온 비틀림시험 및 실형상 축-디스크를 제작/조립성 검토를 통해 터보펌프 터빈에의 적용 가능성을 타진하였다. 커플링의 치형은 Gleason 치형을 기본형상으로 하여 설계운용조건의 1.5배의 토크값을 기준으로 설계를 진행하였다. 구조해석 및 고온비틀림 시험을 통해 하중조건하의 안정성을 확인하였으며 특히 비틀림시험 후 커플링의 변형은 미미함을 확인하였다. 커빅커플링을 적용한 실형상 디스크 제작 및 조립시험을 통해 설계요구조건을 하회하는 디스크의 외주 및 축방향 흔들림 그리고 조립재현성을 확인하였다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Turbine(터빈), Curvic-Coupling(커빅커플링), Hot temperature Tortion test(고온 비틀림시험), Spin Test(스핀시험)

1. 서 론

커빅 커플링은 40년대 미국 Gleason사에 의해 개발된 동력전달 방식이다. 커빅 커플링의 특징으로는 다른 축동력 전달 방식에 비해 제한된 공간에서 큰 토크 전달 능력을 갖고 있다는 점을 들 수 있다. 적절히 설계된 커빅커플링의 경

* 한국항공우주연구원 터보펌프팀
연락저자, E-mail: jeh@kari.re.kr

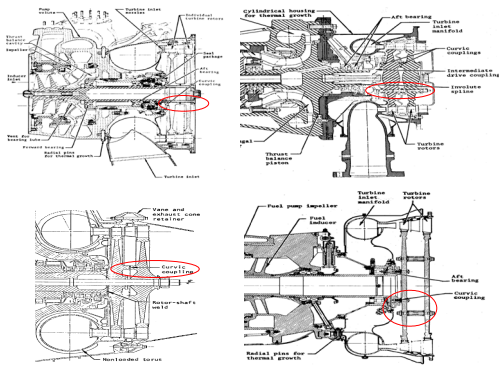

Fig. 1 커빅커플링의 터보펌프 적용예. J-2 LOX-TP, Mark29 LH2-TP, M-1 Fuel-TP, F-1 TP.

우 토크 전달능력은 동일 크기의 일체형 중공축의 50%에 이르는 것으로 알려져 있다. 아울러 커빅커플링의 형상에서 기인하는 자가정렬(self-alignment)기능에 따른 분해-조립시의 우수한 축정렬 재현성을 들 수 있다. 커빅 커플링의 자가정렬기능은 커플링 체결면의 암-수 치형에 의해 구현된다. 커빅 커플링의 체결면 치형은 정밀 평면 스플라인 형태로 컵 모양의 휠 그라인더를 통해 가공이 이루어진다. 암-수 한 쌍의 치형은 각각 일정한 압력각(pressure angle)을 갖는 휠 그라인더의 외측면과 내측면으로 가공되어 오목면과 볼록면 형태를 갖게 되는데 이러한 접합면의 곡률이 체결시 정확한 축정렬을 구현한다 (그림2,3 참조). 이러한 특징들로 인해 커빅커플링은 높은 토크와 회전수로 작동하는 가스터빈엔진, 터보펌프등의 터보기계에 적합한 장치로 자리매김하고 있다.

그림 1은 터보펌프 터빈에 적용된 커빅커플링의 예를 나타낸다. 터빈의 설계 조건에 따라 다단 충동형 터빈은 압력 또는 속도 복합형으로 설계되며 이에 따라 커빅 커플링의 형태 및 체결방식도 다양한 형태를 보인다.

현재 항공우주연구원에서는 75톤급 액체로켓엔진에 적용할 수 있는 터보펌프를 개발중에 있으며 이는 30톤급 액체엔진용 터보펌프 설계, 제작 및 시험을 통해 검증된 기술을 기반으로 한다. 터빈의 경우 30톤급과 유사한 단단 초음속 충동형 터빈으로 축대칭 수축 확산형 노즐 및 디스크, 블레이드, 슈라우드 일체형 블리스크로 이루어져 있다. 하지만 75톤급 터보펌프의 개발과정 중 발사체 시스템 또는 엔진 레벨에서의 설계변경 요구에 유연성 있는 대응이 가능한 방안들도 준비하고 있다. 속도복합형 초음속 충동터빈 설계는 이러한 준비의 일환으로 첫 번째 로터를 구동시킨 유동의 큰 운동에너지를 회수할 수 있는 두 번째 로터를 장착하여 터빈의 효율 또는 비출력 증가시킨 설계로 이러한 성능향상은 터보펌프의 등가질량의 감소 또는 발사체 적재중량의 증가로 연결된다. 속도복합형 터빈의 구현을 위한 로터 연결방식으로 커빅 커플링을 도입하였으며 본 논문에서는 이와 관련된 현재까지의 개발 진행 내용을 정리하였다.

2. 커빅커플링 설계 일반

그림 2는 커빅커플링의 형상 및 가공의 개략도이다. 그라인더 휠은 치형의 두 면과 접촉하면서 가공이 이루어지고 이의 개수만큼 인덱싱이 이루어지면서 가공은 완료된다. 이의 개수 및 커플링의 평균반경은 그라인더 휠의 크기를 결정하는 독립변수가 된다.

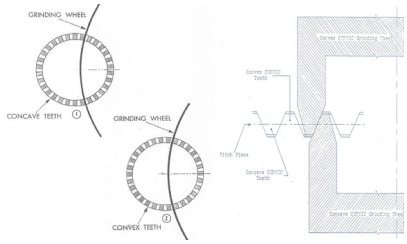

Fig. 2 커빅커플링 형상 및 가공원리

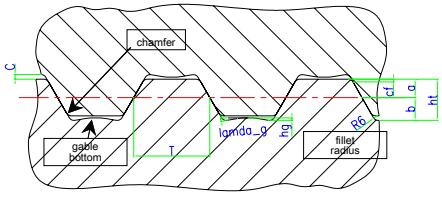

Fig. 3 커빅커플링 단면 및 설계 인자

그림 3에는 커빅커플링의 단면 형상 및 설계 관련 인자들을 나타내었다. 그라인더 휠이 원하는 치형을 인접한 치형에 간섭을 받지 않으며 가공되도록 하기 위해서는 커플링의 내경의 크기를 외경의 75%이상으로 설계하여야 한다. 커빅커플링 외경 크기는 식 $D=\sqrt[3]{T/1310}$로 구할 수 있다[1]. 여기서 D(inch)는 커플링외경을 나타내며 T(lbf- inch)는 동하중, 기동토크, 안전률등을 고려한 최대 토크를 의미한다. 커플링의 체결방식이 치형을 관통하는 스플릿 또는 관통 구멍 형태일 경우 치면 접촉이 줄어들게 되므로 이에 대한 영향은 외경 결정에 선 반영되어야 한다. 커빅커플링의 외경이 결정되면 이의 개수(N)와 치폭(F)이 결정되어야 한다. 이론적으로 치접합 면적은 이의 개수에 상관없이 일정하다. 이의 개수는 N/D(diametral pitch)에 근거하여 결정하는데 일반적으로 3~8 범위의 값을 사용한다. 커빅커플링 외경과 N/D의 상관관계는 Gleason사의 데이터[2]를 참고할 수 있다. 치폭은 커플링의 외경과 내경의 차이를 반으로 나눈 값이다. 커플링에 작용하는 응력은 이 값에 반비례한다. 치폭을 외경의 0.125배로 설정할 경우 표준 압력각(pressure angle)의 적용 및 형상의 구현이 용이하다. 표준압력각은 30도로 제작 및 운용상 가장 실용적인 값으로 알려져 있다. 커플링의 기본적인 외형이 결정되면 치형의 설계값이 정해지는데 이에 대한 관계식은 표 1에 정리하였다. 사용된 기호들은 그림3과 동일하다.

Table 1 Fixed curvic coupling 치형설계 항목[2]

구 분	기호	관계식
diametral pitch	Pd	N/D
whole depth	ht	0.88/Pd
clearance	c	0.1/Pd
chamfer height	cf	0.09/Pd
addendum	a	(ht-c)/2
dedendum	b	ht-a
contact depth	ho	ht-c-2cf=0.6/Pd
face width	F	min(0.125D,0.875 in)
mean radus	A	(D-F)/2
gable angle	λ_g	2 - 5 deg
fillet radius	rf	geometry dependant
pressure angle	ϕ	30 deg, standard

3. 75톤급 터보펌프 터빈용 커빅커플링 설계 및 시험

속도 복합형 터빈의 경우 전체토크의 75%가 첫 번째 로터에서, 나머지가 두 번째 로터에서 만들어지므로 100%의 토크가 전달되는 로터 축과 1단터빈의 커빅커플링의 설계가 중요하며 설계된 커플링이 설계조건을 만족할 경우 동일한 형상을 1단과 2단 연결부위에 적용할 수 있다. 1단형의 터빈역시 커빅커플링을 적용할 경우 분해 조립상의 이점이 있으며 현재 개발중인 터보펌프에도 약간의 설계변경을 통해 구현가능하다.

75톤급 터보펌프 터빈용 커빅커플링의 설계기준 토크는 정격운용값의 1.5배를 적용하였다. 커플링 외경은 다소 크게 설계하였다. 설계 토크를 고려할 경우 커플링의 외경은 선택된 외경의 약 60% 수준에서도 구현가능하나 단 단형 터빈에의 적용 고려, 스플릿 타입의 체결형상 적용시의 치접합면 감소(약 70%), 자가정렬기능의 향상, 그리고 축계 설계 변경가능성을 고려하였다.

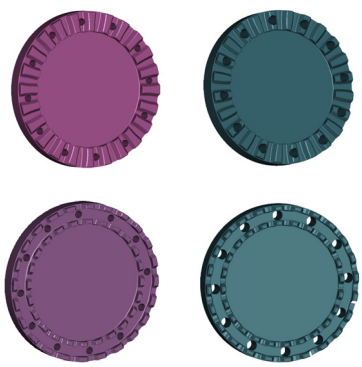

Fig. 4 설계 커빅 커플링 형상.

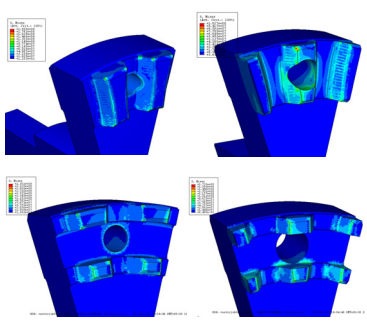

Fig. 5 커빅 커플링 구조해석 결과

75톤급 터보펌프 터빈용 커빅커플링의 체결방식은 관통구멍 형(그림4, 상)과 스플릿 형(그림4, 하)의 두 가지로 설계하였으며 각 형상에 대한 구조해석 결과를 그림 5에 나타내었다. 토크와 체결력은 설계와 동일한 값으로 해석을 수행하였다. 해석 결과 커빅커플링 운용 온도에서 Inconel 718기준 정적하중 안전율이 5.2 이상으로 나타났다.

설계된 커빅커플링의 토크전달능력을 검증하기 위해 비틀림 시험시편을 제작하여 고온에서 비틀림 시험을 수행하였다. 그림6은 제작된 시험시편과 시험 장면을 보여준다. 제작시편은 마스터 커빅에 올려놓은 상태에서 측정하였을 때 축방향 및 반경방향 흔들림이 10 μm 이내였으며

Fig. 6 비틀림 시험시편 및 시험장면

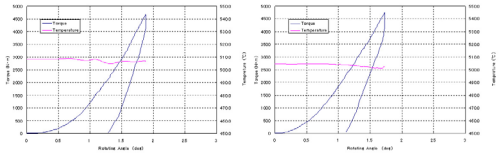

Fig. 7 커빅커플링 고온 비틀림 시험 결과

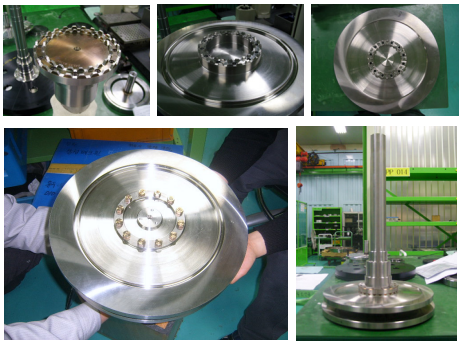

Fig. 8 커빅커플링 축, 로터 및 조립체

고온 비틀림 시험 후 변형은 미미하였다. 그림7은 약 780K가 유지된 상태에서 토크에 따른 비틀림 각을 나타낸다. 시험전후의 각도편차, 시험초기 및 말기의 토크-각도의 비선형성은 시험기의 유격에서 발생되는 것으로 확인되었다.

커빅커플링을 속도복합형 터빈에 적용하였을 때 축정렬 기능 확인 및 축 조립체 스핀시험을 위해 실 형상의 로터를 제작하였다. 1, 2단 디스크는 MAR-M 247 소재를 적용하였으며 축에 장착되는 커빅커플링은 SUS630으로 제작이 이루어졌다. 그림8은 제작된 축, 로터 및 로터 조립체를 나타낸다. 각 단품들은 커빅커플링 치면을 기준으로 외경 및 축 수직면을 규제하여 제작되었다. 최종 조립체에서 디스크 전후면 및 외경에서의 축방향/반경방향 흔들림은 15μm 이내로 설계요구값을 하회하였으며 결합의 각도를 바꾸어가며 측정된 값들도 동일 범주내에 듦을 확인하였다. 조립 재현성 또한 우수한 것으로 나타났다.

4. 결 론

75톤급 터보펌프 터빈에 적용가능한 커빅커플링의 설계, 구조해석, 고온 비틀림시험 및 실형상 축-디스크를 제작하였으며 이를 통해 커빅커플링 회전체의 적용가능성을 검증하였다. 향후 동익 익형을 확정하여 블리스크 형태의 로터를 완성할 예정이며 스핀시험을 통해 축조립체의 최종적인 적합성을 확인할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Severud, L. K. and Purdy, C. C., "Liquid Rocket Engine Turbopump Shafts and Couplings," NASA SP-8101, 1972
2. " Gleason. Curvic Coupling Design," The Gleason Works, 1000 University Ave., Rochester, NY, Mar. 1966.