

회전기 shaft의 rib 용접부 피로수명 평가 Fatigue life Evaluation of Rib Weldment for Generator Shaft

윤 중근*, 김현수*, 황 주환*

* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

ABSTRACT The purpose of this study is to evaluate the fatigue life at the rib weldment of generator shaft. In order to do it, the stress distributions at the weldment under design loading condition were evaluated using FEA and analytical approach. The fatigue strengths of the as welded and toe machined rib specimen were estimated using 3-points bending fatigue test. Based on the fatigue test results, the S-N curve for the rib weldment of the generator shaft with post treatment was established.

1. 서 론

대형회전기의 경우 shaft에 rib를 용접하고 rib 외경부에 core를 열박음하여 설치, 제작함에 따라 shaft 표면의 응력집중 및 용접 결함으로 인하여 shaft의 피로손상이 Fig. 1과 같이 발생하고 있다.

일반적으로 용접구조물의 피로강도는 작용된 nominal stress range를 기준으로 joint형상에 따라 각각의 피로선도를 규정하고 있으며, 최근에는 용접부 선단의 Hot Spot Stress(이하 HSS)를 기준으로 피로선도를 만들려는 많은 연구가 진행되고 있다[1,2]. 또한 용접부 피로수명 향상을 위하여 toe grinding, hammer peening 등의 post treatment를 실시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 열박음 및 굽힘과 비틀림 하중을 받는 회전기 샤프트 rib 용접부에 대하여 응력해석을 통한 피로수명 평가를 실시하였으며, 이를 위하여 환봉 rib 용접 시편을 제작하여, as-weld, toe machining 및 toe grinding의 용접부 후처리에 따른 응력분포를 응력해석 및 계측을 통하여 평가하고, 3-point 굽힘 시험을 실시하여 후처리에 따른 용접부 피로강도를 평가하였다.

2. 응력해석

본 연구에서는 Fig. 1(b)의 4100kw, 720rpm의 회전기 샤프트에 자중에 의한 굽힘응력, core 열

박음 응력 및 전달 토크에 의한 비틀림 응력이 중첩 작용하는 경우, 각각에 대한 응력해석을 실시하였다.

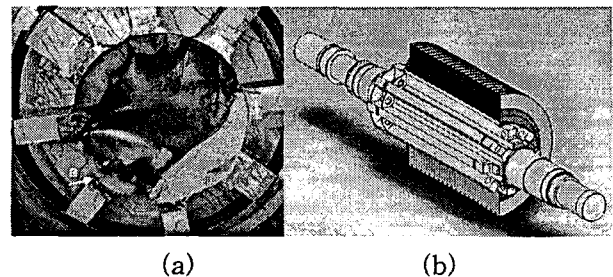


Fig. 1 (a) Fatigue failure of genertor shaft, (b) geometry of generator shaft

회전기 샤프트에 대한 이론 및 응력해석결과 평가부에 작용하는 각각의 nominal stress는 Table 1과 같이 잘 일치하며, 응력해석결과는 Fig. 2와 같다.

Table 1 Comparison of results between FEA and theoretical calculation[Unit:MPa]

	Stress		
	Shrink fit	Bending	Torsion
Theory	115.2	2.10	30.0
FEA	113~132	2.25	31.2

일반적으로 회전기 샤프트에는 Fig. 3 (a)와 같이 변동 굽힘응력이 작용하고 비틀림응력은 평균응력으로 작용한다. 그러나 엔진에 의하여 구동되는 발전기의 경우 Fig. 3 (b)와 같이 위상차에 따른 non-proportional load가 작용하며, 이 경우 최대 응력이 작용한다. 따라서 본 연구에서

는 최대 응력이 작용되는 non-proportional load의 경우에 대하여 응력해석을 실시하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

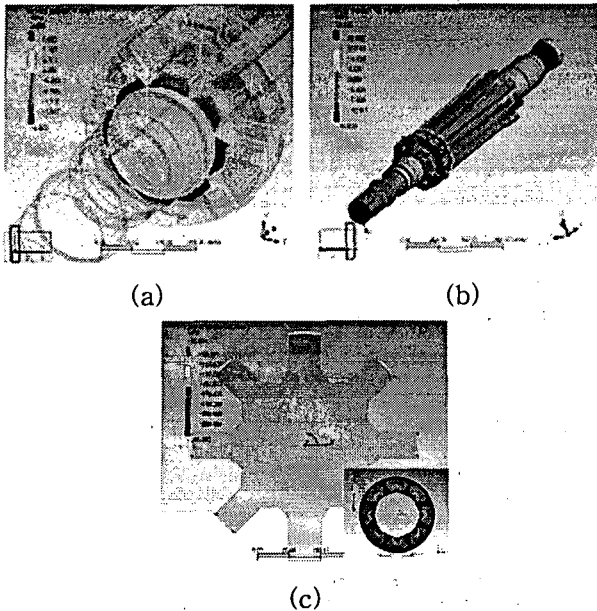


Fig. 2 FE analysis results : (a) bending stress distribution, (b) shear stress distribution, (c) radial stress distribution due to shrink-fit

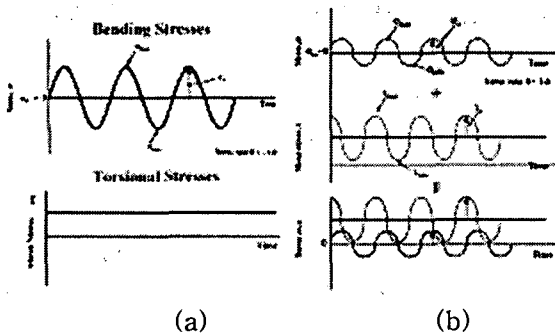


Fig. 3 Loads act on the generator shaft : (a) proportional load, (b) non-proportional load

회전기 샤프트에, 1)자중에 의한 굽힘응력, 2) 열박음 응력, 3) 자중, 열박음 및 비틀림 응력이 동시에 작용하는 경우의 3가지 하중조건에 대한 해석결과 rib 용접 토우부에 작용하는 응력은 Table 2와 같이 용접 토우부의 응력집중이 매우 작음을 알 수 있다. 이는 Table 1에서 나타낸 바와 같이 열박음에 의한 압축응력에 기인한 것이다.

Table 2 Stresses acting on the weld toe

obtained from FE analysis

Description	Stress Comp.	Load case 1	Load case 2	Load case 3
As-weld	Bending	2.1/-2.0	-2.6/-32.9	0.8/-35.6
	Torsion	0.7	3.3	14.1
	Equivalent	1.9	32.1	40.9
Toe-Machined	Bending	2.1/-2.1	-1.7/-31.1	1.2/-33.2
	Torsion	0.3	3.8	5.9
	Equivalent	2.1	32.4	40.6

Description	Stress and welding factor		
	Load case 1 (Only bending)	Load case 2 (Only shrink fit)	Load case 3 (all loads)
As-weld	1.9/4.6%	32.1/78.5%	40.9/16.9%
Toe-machined	2.1/5.2%	32.4/79.8%	40.6/15.0%

*all loads=bending+shrink fit+torsion

3. 피로강도 평가

회전기 샤프트 rib 용접부 피로수명 평가를 위하여 Fig. 4(a)와 같이 S25C 재질의 환봉 용접 시편을 제작하여 Fig. 4(b)와 같이 3-point 굽힘 피로시험을 실시하여 후처리에 따른 피로강도를 평가하였으며, S25C 환봉의 기계적 물성 및 평활시편의 피로강도는 Table 3과 같다.

Table 3 Mechanical properties of materials

재질	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)
S25C	Min. 284	Min. 470
	굽힘 피로강도 (MPa)	비틀림 피로강도, (10 ⁷ cycle, MPa)
	205~294	107~186

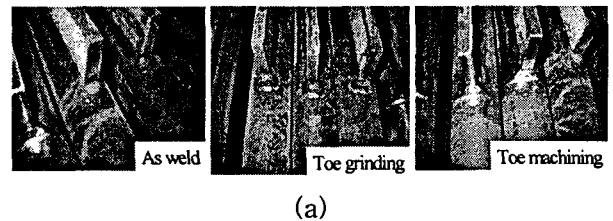


Fig. 4 (a) Configurations of test specimens, (b) 3-point bending fatigue test method

Fig. 4(b)의 각 시편에 2 ton의 굽힘 하중이 작용하는 경우 rib 용접 토우부에 1축 strain gage 5개가 1 set인 strain gage를 부착하여 2 ton의 집중 하중이 작용하는 경우 용접 토우부, 기계 가공부 및 toe grinding부의 굽힘 응력을 측정하여 응력해석과 비교한 결과, Fig. 5와 같이 기계 가공 및 toe grinding에 따른 원형 노치에 근접함에 따라 응력이 감소하며 응력 측정 결과에서 동일하게 확인할 수 있다. 따라서 toe grinding 및 기계가공 노치의 root에는 응력해석 결과와 동일하게 as-welded 용접부의 toe와 동일한 응력수준이 발생할 것으로 판단할 수 있다.

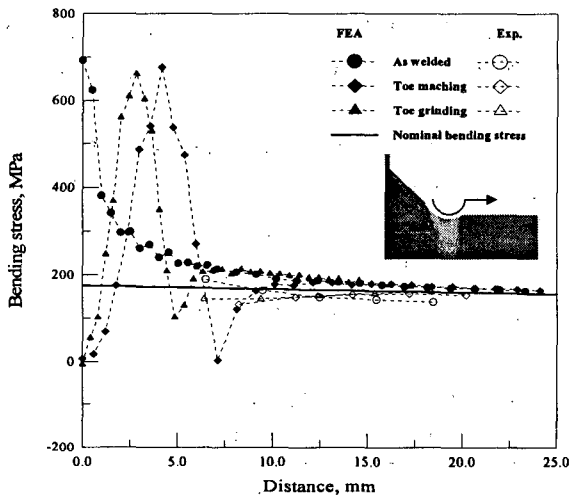


Fig. 5 Bending stress distribution at the welded specimens under 3-point bending load of 2ton

응력비 R=0.1의 3-point 굽힘 피로시험 결과 nominal stress를 기준으로 환봉 용접시편의 피로강도는 Fig. 6과 같이 as-weld, toe machining 및 toe grinding 후처리 시편 모두 유사함을 알 수 있다. 이는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 굽힘 하중이 작용하는 경우 용접 토우부와 후처리에 따른 노치 저면의 응력집중 정도가 같기 때문으로 판단된다. 이는 as-welded의 경우 용접부 결함이 없다면 후처리를 실시하지 않아도 충분한 피로강도를 확보할 수 있음을 의미한다. 또한 환봉 rib 용접부는 IIW의 필렛 용접부에 굽힘 및 전단 하중이 작용하는 경우 FAT 46 및 36 기준 피로선도와 비교하여 충분히 안전함을 알 수 있다.

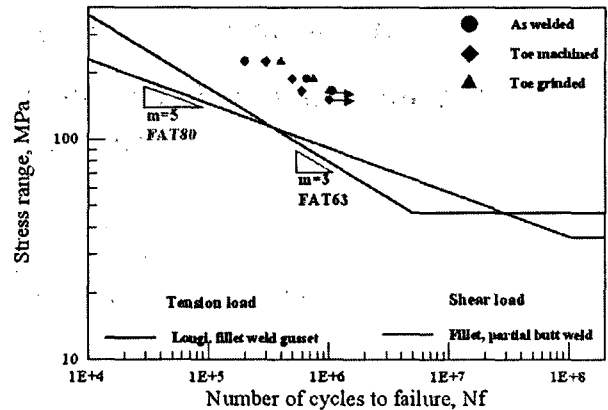


Fig. 6 Fatigue life at each specimen under constant nominal stress amplitude

4. 결 론

회전기 샤프트 rib 용접부 특히 토우부에 대한 피로수명 평가를 위하여 열박음의 영향을 고려한 응력해석과 환봉 rib 용접 시편을 제작하여 후처리에 따른 피로강도를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Rib 용접 토우부에는 열박음에 의하여 전체의 약 80%의 응력이 작용되고, 굽힘 응력은 약 5%, 비틀림 응력은 약 15% 작용한다.
- 2) As weld, toe machining 및 toe grinding 후처리 용접 시편에 대한 피로시험결과 모든 시편이 거의 유사한 피로강도를 보이고 있다.

참고문헌

1. P.J. Haagenen : Fatigue of high strength steels, 2nd Int. Sym on high strength steel, Stiklestad Apr. 2002
2. H.O. Fuchs et. al.: Metal fatigue in engineering
3. IIW Recommendation, XIII-1539-94