

모니터링을 이용한 중형 풍력발전기용 증속기 주축의 부하특성 분석 연구

박 영준¹⁾, 이 근호²⁾, 이 종원²⁾, 남 윤수³⁾, 차 종환⁴⁾

Study on the Load Properties of Main Shaft of Medium Size Wind-turbine Gearbox using Monitoring

Youngjoon Park, Geunho Lee, Jongwon Lee, Yoonsu Nam, Jongwhan Cha

Key words : Load Properties(부하특성), Wind-turbine Gearbox(풍력발전기용 증속기),
Load Spectrum(부하스펙트럼), Life Prediction(수명예측), Monitoring(모니터링)

Abstract : To improve the reliability for a wind-turbine gearbox, the mechanical loads acting on the gearbox need to be monitored and analysed exactly. This study was conducted to identify the characteristics of torques and bending moments acting on the main shaft of the gearbox using the rainflow counting method and predict the fatigue life of the main shaft by using the modified Miner's rule. While the mean wind speed became 3.5 m/s, the life of the main shaft by the acting torques was predicted as 4.3×10^6 years, and it by the bending moments was as 2.3×10^4 years. If the life of the wind turbine was estimated as 20 years, the fatigue life of the main shaft was regarded as infinite. Also, it was suggested that the life of the main shaft must be predicted by not the torques but the bending moments.

Nomenclature

S_e : equivalent stress, MPa
 σ_a : stress amplitude, MPa
 σ_m : mean stress, MPa
 n_k : number of applied load cycles
at constant stress level S_k
 N_k : fatigue life at constant stress level
 S_k , obtained from the S-N curve
 X : total applied time of load acted on parts
Life : fatigue life of parts

1. 서 론

풍력발전기용 증속기는 일반적으로 15-30rpm정도로 회전하는 저 회전수, 고 토크의 풍력에너지를 1,200rpm에서 3,600rpm사이에서 회전하는 고 회전수, 저 토크의 운동에너지로 변환하여 동력을 전달한다. 증속기는 지상으로부터 높은 위치에 설치되며, 설치 후에는 수리 및 유지보수가 용이하지 않아 높은 신뢰성을 필요로 한다. 또한, 증속기는 단위 가격이 높고 고장이 빈번한 부품으로

보고되어 있어 신뢰성을 확보하기 위한 요구가 높다. 특히 풍력발전기의 대형화와 해상 풍력발전기의 상용화에 따라 증속기를 포함한 주요 부품의 정확한 작동환경에 대한 분석과 사전 파손 위험을 감지하기 위한 모니터링 기술의 필요와 중요성이 증대되고 있다.

증속기의 신뢰성을 확보하기 위하여 풍력발전기에 가해지는 작동 환경, 특히 부하특성에 대한 정확한 데이터를 필요로 한다. 정확한 부하특성을 얻기 위하여 블레이드에 작용하는 부하조건으로부터 다양한 시스템 해석과 시뮬레이션을 수행하여 증속기 개발에 필요한 데이터를 얻고 있다. 그러나 현장 실증 시에 증속기에 작용하는 부하특성을 모니터링하여 분석하는 것은 실제 작용하는 부하에 대한 정보로서 매우 중요하다. 이는 특히 증속기 개발 시에 적용한 부하조건을 검증하여 증속기

- 1) 한국기계연구원
E-mail : yjpark77@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7994 Fax : (042)868-7186
- 2) 한국기계연구원
- 3) 강원대학교 공과대학 기계·메카트로닉스공학부
- 4) 효성중공업 연구소

의 신뢰성을 예측하는데 필수적인 기술이다.

본 연구에서는 증속기의 주축에 작용하는 등가 부하와 이를 분석하기 위한 이론을 정리하여 증속기에 작용하는 부하특성을 분석하였다. 국내에서 개발된 중형(750kW) 풍력발전기용 증속기의 현장 실증 시험을 통하여 부하 데이터를 취득하였다.

2. 부하 스펙트럼 및 부하특성분석 이론

2.1 부하 스펙트럼

증속기 주축에 작용하는 하중은 바람 조건, 작동 조건 등에 의하여 변화되는 변동 하중으로서, 비결정적 신호이다. 이러한 변동 하중에 대한 부하의 크기별 빈도수를 결정하는 데는 여러 가지 방법이 있으나 레인플로우법(rainflow counting method)이 가장 합리적인 것으로 알려져 있다.¹⁾

부하 스펙트럼은 시간에 따라 변화되는 부하의 크기를 빈도수의 함수로 나타낸 것으로, 본 연구에서는 시간 함수의 부하 신호를 레인플로우법을 적용하여 부하의 크기와 빈도수의 관계로 나타내었다. 이때 부하가 완전 반복 하중이 아닌 경우에는 평균 하중의 영향(mean stress effect)을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 식 (1)과 같이 표현되는 스미스-왓슨-토퍼(Smith-Watson-Topper)²⁾식을 이용하여 평균 하중의 영향을 고려하였다.

$$S_e = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m)\sigma_a} \quad (1)$$

2.2 S-N 곡선

증속기 주축의 피로수명 예측을 위해서는 재료의 S-N 곡선이 반드시 필요하다. 재료의 정확한 S-N 곡선을 구하기 위해서는 일반적으로 회전축 시험(rotating beam test)을 수행하여 회전축이 파괴될 때의 완전 반복 응력의 크기와 반복수를 측정하여야 한다. 그러나 시험을 통한 S-N 곡선의 확보는 시간상의 한계로 인하여 적용하기가 쉽지 않다. 그래서 이미 알려진 재료의 S-N 곡선을 여러 가지 변수의 영향, 즉 크기효과, 하중형태에 대한 효과, 표면처리효과, 응력집중효과 등을 고려해서 수정하여 사용할 수 있다.

그림 1은 증속기 주축의 재료인 AISI4340의 S-N 곡선을 나타낸 것이다.

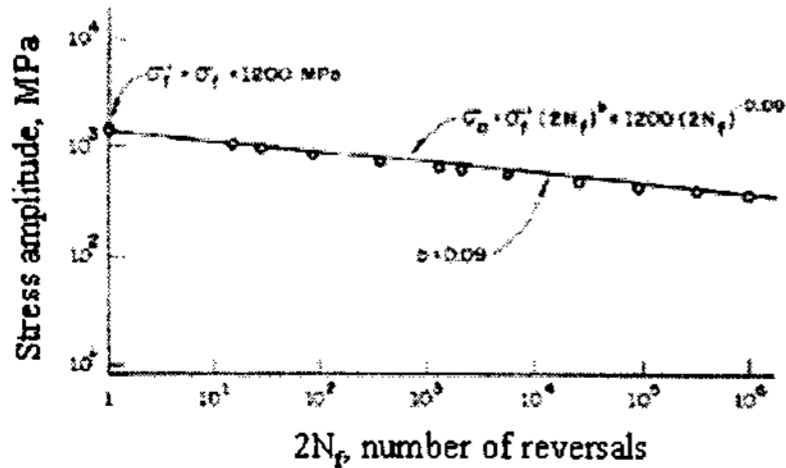


Fig. 1 S-N curve for AISI4340 steel.³⁾

2.3 피로 수명 예측

선형 누적 손상법(linear cumulative damage

rule)은 크기가 다른 다수의 반복 하중이 각각 일정한 반복수로써 작용할 때 피로수명을 예측하는 방법이다. 이 방법은 어떤 응력 수준에서 부품의 총 수명시간에 대한 사용 시간의 비는 같은 응력 수준에서 부품이 파괴될 때까지 기대되는 총 반복수에 대한 작용 반복수의 비와 같다는 이론에 근거한 것이다.⁴⁾ 이를 수학적으로 표현하면 피로파괴는 식 (2)와 같은 조건에서 일어난다. 이것을 팜그렌-마이너(Palmgren-Miner)식이라 한다.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} \geq 1 \quad (2)$$

부품에 작용한 하중의 총 작용시간을 X라고 하면, 이 부품의 피로수명은 식 (3)과 같다. 또한, 그림 2는 수정된 마이너법(modified Miner's rule)을 이용하여 피로수명의 예측을 나타낸 것이다.

$$Life = X / \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

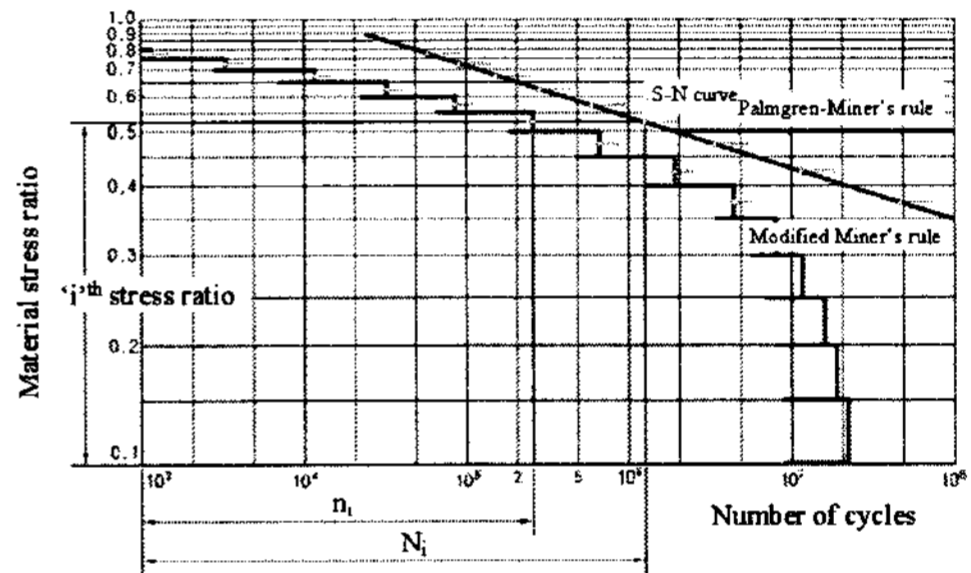


Fig. 2 Application of modified Miner's rule to estimate fatigue life.

3. 모니터링 시스템

풍력발전기의 증속기 주축에 작용하는 부하를 모니터링하기 위하여 그림 3과 같은 증속기 모니터링 시스템을 구성하였다. 주축에 작용하는 토크와 굽힘 모멘트를 측정하기 위하여 스트레인게이지를 설치하였으며, 스트레인게이지의 출력신호는 슬립 링(slip ring)을 통하여 LAN 통신 방식을 이용한 모니터링 시스템에 저장되었다. 저장된 신호는 보정식을 이용하여 토크와 굽힘 모멘트에 대한 시간 함수로 변환되었다.⁵⁾

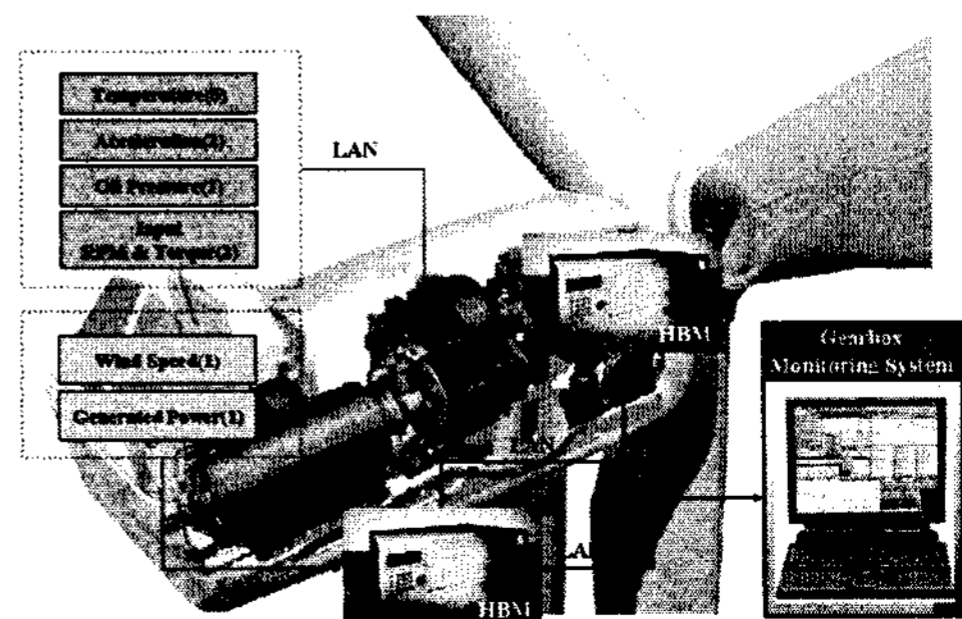


Fig. 3 Schematic diagram for monitoring system.

4. 증속기 부하의 특성 분석

4.1 부하 모니터링

그림 4는 평균 풍속이 3.5 m/s이고, 로터의 평균 회전수가 6.4 rpm일 때, 주축에 작용하는 토크와 굽힘 모멘트를 나타낸 것이다. 토크 신호는 1,332 N.m의 평균값과 0.315 Hz, 1.55 Hz의 주요한 주파수 성분을 가지고 있으며, 굽힘 모멘트는 3,877 N.m의 평균값과 0.315 Hz의 주요한 주파수 성분을 가지고 있다. 0.315 Hz의 주파수 성분은 블레이드에 의한 가진 주파수인 0.32 Hz와 거의 일치하였다.

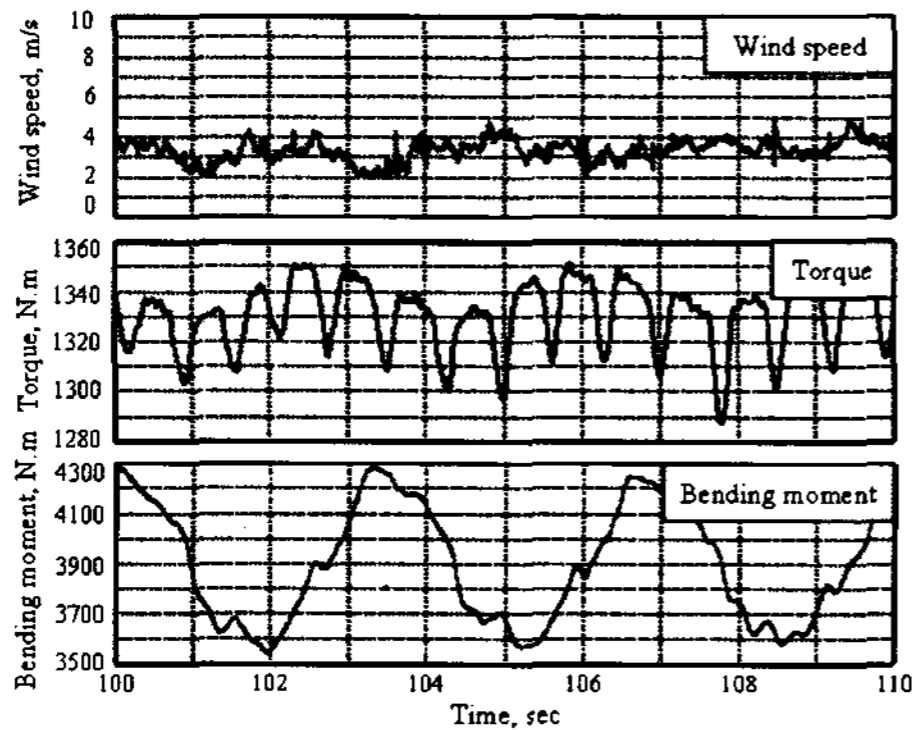


Fig. 4 Time history of torque and bending moment at constant wind speed.

4.2 부하 스펙트럼

토크와 굽힘 모멘트의 시간-부하 선도를 이용하여 부하 스펙트럼을 구하였다. 부하 스펙트럼을 구성하기 위한 시간-부하 선도는 200 Hz의 샘플링 주파수와 10 분의 측정 시간을 갖는 데이터로서, 총 120,000 개의 데이터로 이루어져 있었다.

그림 5와 6은 각각 주축의 토크와 굽힘 모멘트에 대한 부하 스펙트럼을 나타낸 것이다. x축은 응력 진폭(stress amplitude)을, y축은 평균 응력(mean stress)을, z축은 사이클수(cycles)를 의미한다. 토크에 대한 부하 스펙트럼을 살펴보면, 응력 진폭은 5.2 N.m 이하에 주로 분포하며, 5.2~21.6 N.m의 범위에는 저 사이클수로 넓게 분포하였다. 또한, 평균 응력에 대해서는 정규분포 형태를 나타내었다. 굽힘 모멘트에 대한 부하 스펙트럼에 대해서 응력 진폭은 10 N.m 이하와 280~420 N.m에 분포하며, 평균 응력에 대해서는 성질이 다른 두개의 정규분포가 함께 존재하는 형태를 나타내었다. 이와 같은 부하 스펙트럼의 특징은 시간-부하 선도에서도 유추할 수 있었다.

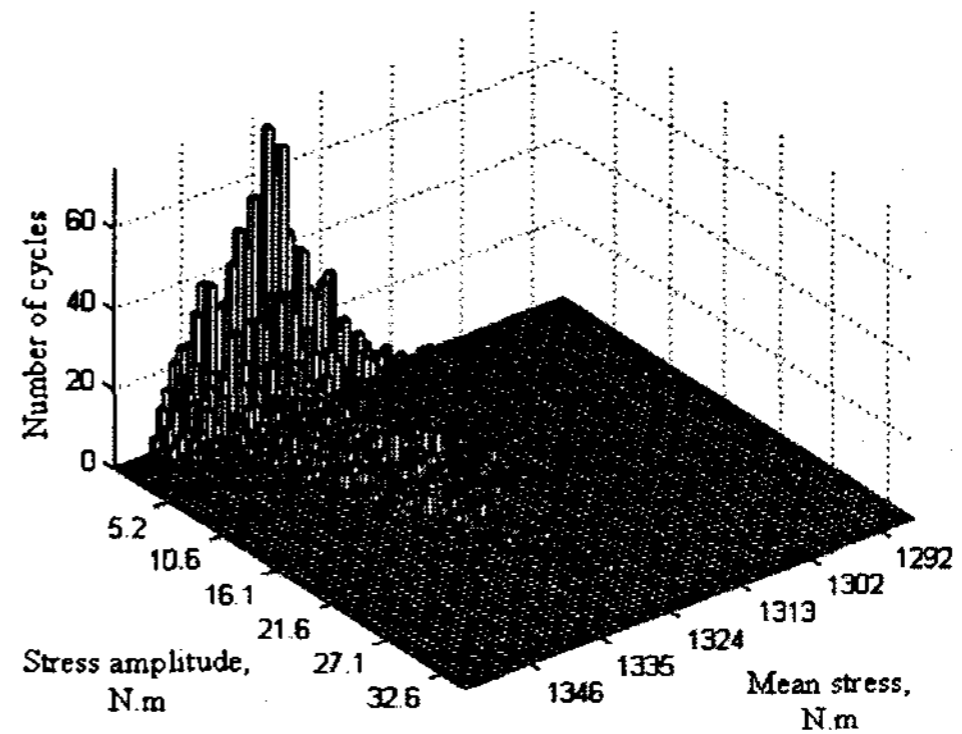


Fig. 5 3D load spectrum of main shaft about torque.

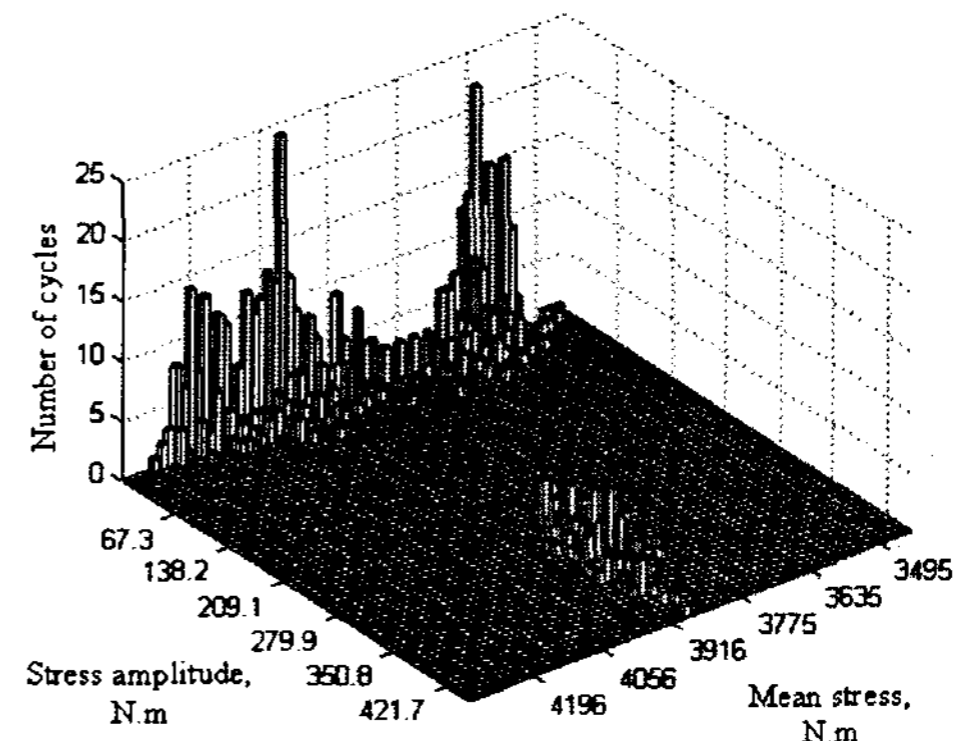


Fig. 6 3D load spectrum of main shaft about bending moment.

4.3 수정된 S-N 곡선

그림 1에 제시한 S-N 곡선은 일정한 조건이 갖추어진 회전축 시험에 의해서 구한 것으로서, 실제 사용되는 부품의 크기와 사용 조건 등이 다른 경우에는 피로수명 예측을 위하여 직접 적용할 수 없다. 그러므로 크기 효과, 응력집중효과 등을 고려하여 수정된 S-N 곡선을 사용해야 한다.

표 1은 토크와 굽힘 모멘트의 S-N 곡선에 대한 수정계수들을 나타낸 것이고, 그림 7은 표 1의 수정계수와 그림 1의 S-N 곡선을 이용하여 얻은 주축의 수정된 S-N 곡선을 나타낸 것이다.

Table 1 Values of modified factors about main shaft

Factors	Torque	Bending moment
Surface	0.341	0.341
Size	0.6	0.6
Load	0.8	1
Temperature	1	1
Reliability	0.753	0.753
Fatigue stress concentration	0.59	0.43

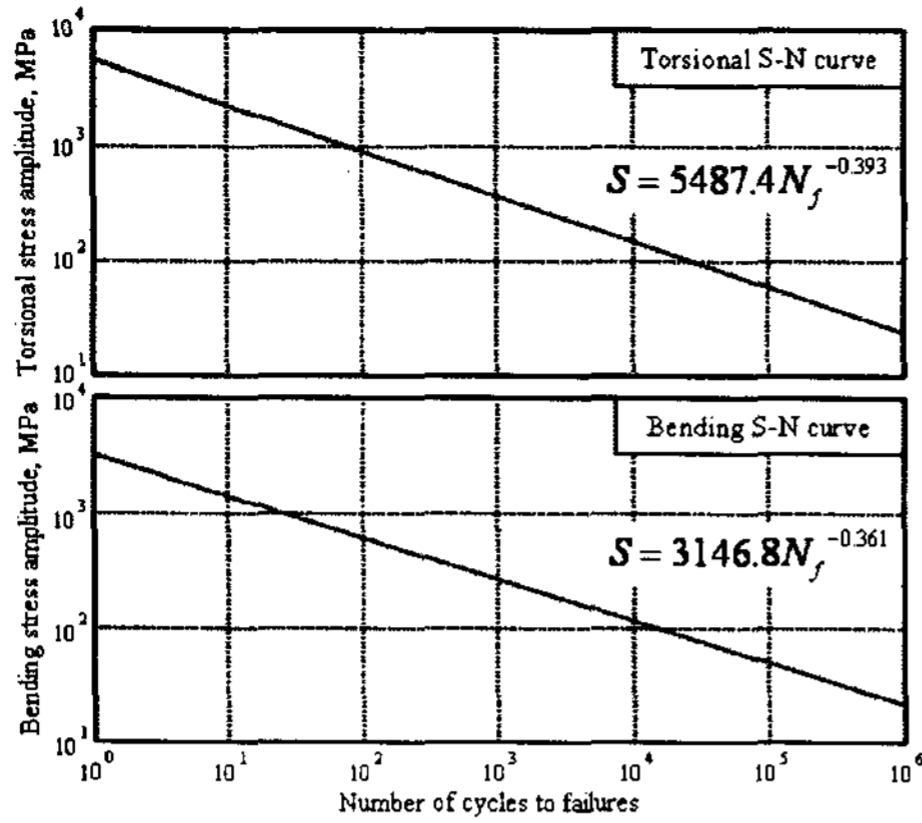


Fig. 7 Modified S-N curve for AISI4340 steel about torque and bending moment.

4.4 피로 수명 예측

그림 8과 9는 주축의 토크와 굽힘 모멘트에 대한 피로손상의 예측 결과로서, 피로 손상누적 분포를 보여준다. 토크 및 굽힘 모멘트의 응력 진폭이 클수록 피로손상은 크게 나타났으며, 그림 5와 6의 결과와 비교해 보면, 주축의 피로수명은 사이클수가 적어도 응력 진폭이 큰 변동하중에 의해 좌우될 것으로 추측된다.

그림 10과 11은 주축의 토크와 굽힘 모멘트에 대해서 수정된 마이너법을 적용하여 피로수명을 예측한 결과이다. 주축의 토크에 대한 예상수명은 3.8×10^{10} 시간으로서 4.3×10^6 년으로 예측되었고, 굽힘 모멘트에 대한 예상수명은 2.1×10^8 시간으로서 2.3×10^4 년으로 예측되었다.

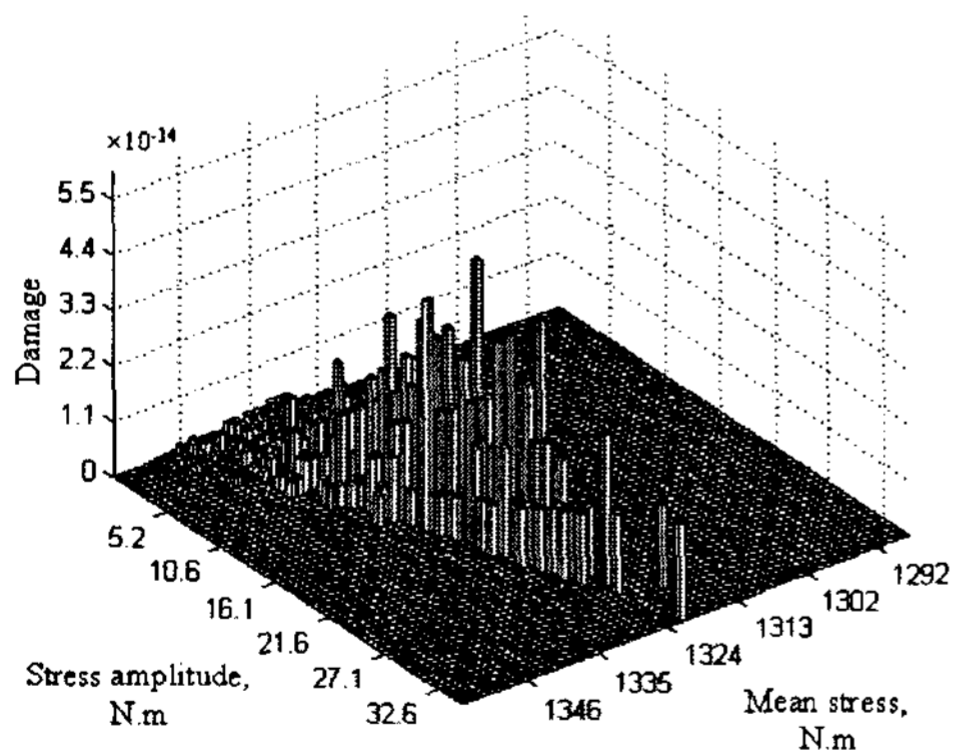


Fig. 8 Fatigue damage cumulative distribution of main shaft about torque.

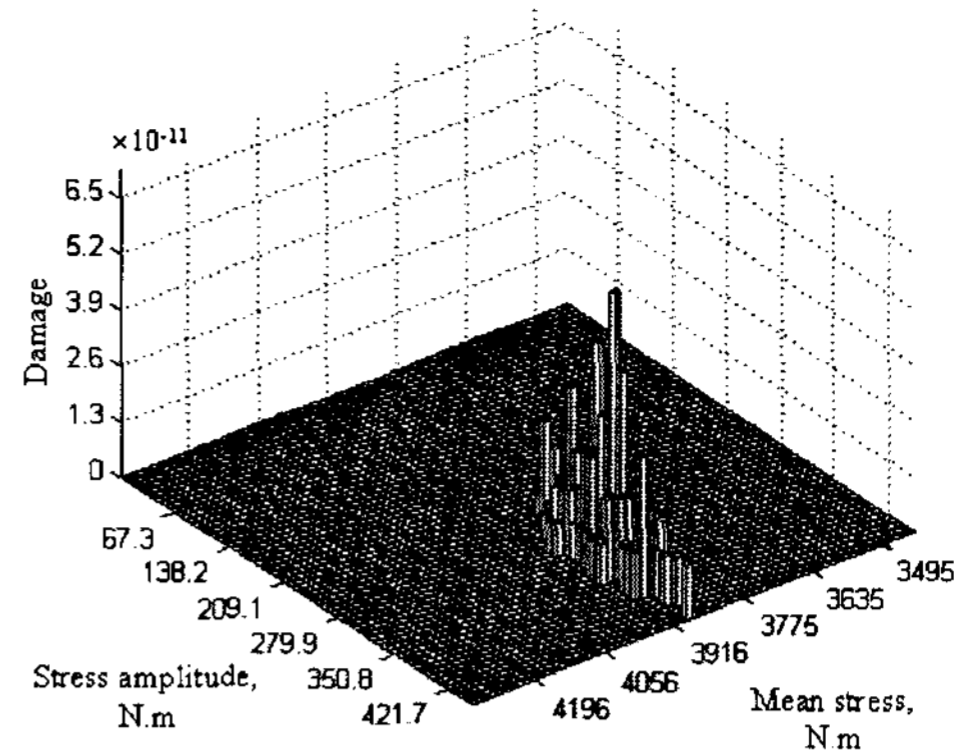


Fig. 9 Fatigue damage cumulative distribution of main shaft about bending moment.

5. 결론

본 연구에서는 증속기의 주축에 작용하는 등가 부하와 이를 분석하기 위한 이론을 정리하였고, 라인플로우 카운팅법을 이용하여 부하특성을 분석하였으며 선형피로누적손상법을 이용하여 피로수명을 예측하였다. 국내에서 개발된 750kW 풍력발전기용 증속기의 실증 시험을 통하여 부하데이터를

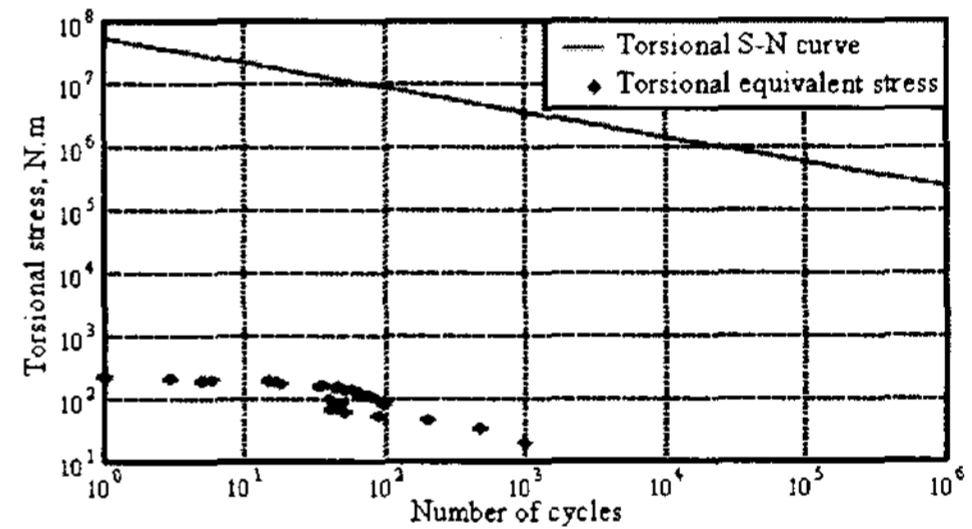


Fig. 10 Application of modified Miner's rule to estimate fatigue life about torque.

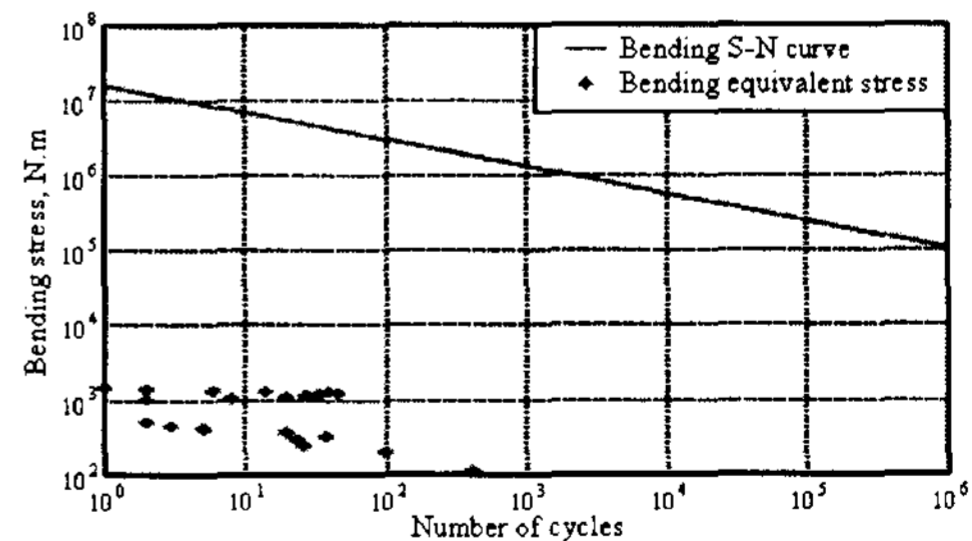


Fig. 11 Application of modified Miner's rule to estimate fatigue life about bending moment.

모니터링하였으며, 취득한 데이터를 이용하여 부하특성을 분석하였다.

주축에 작용하는 토크와 굽힘 모멘트에 대한 특성을 살펴보면, 풍력발전기의 수명을 20년으로 가정하였을 때 각 부하에 대한 주축의 피로수명은 무한 수명으로 간주할 수 있다. 또한, 굽힘

모멘트에 의해 예측된 피로수명이 토크에 비하여 짧은 것으로 나타났으므로 주축의 수명을 예측할 때 굽힘 모멘트에 의한 피로수명을 이용해야 할 것으로 판단되었다.

향후 과제로서, 충분한 부하데이터가 수집되면 이전에 제시한 부하 스펙트럼법과 피로수명 예측법을 이용하여 증속기 개발 시 적용된 부하 조건의 검증과 증속기의 피로수명을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] 송지호. 1990. “변동 하중하의 피로파괴” . 대한기계학회지. 30, 2:115-130.
- [2] Bannantine, J.A., J.J. Comer, J.L. Handrock. 1990. “Fundamentals of metal fatigue analysis” . Prentice Hall.
- [3] Boyer, H.E. 1986. “Atlas of fatigue curves” . American Society for Metals.
- [4] Stephens, R.I., A. Fatemi, R.R. Stephens, H.O. Fuchs. 2001. “Metal fatigue in engineering” . John Wiley & Sons, Inc.
- [5] 남윤수, 유능수, 이정환. 2006. “풍력발전 시스템의 기계부하 신호 모니터링 및 보정” . 한국풍력에너지학회 2006춘계학술대회. 2006. 6.15, 287-293.