

누적손상이론을 이용한 풍력증속기의 가속수명시험법 개발

손 기수¹⁾, 곽 희성²⁾, 강 창훈³⁾, 조 준행⁴⁾

Development of accelerated life test method for the wind turbine Gearbox using cumulative damage theory

Kisu Son, Heesung Kwak, Changehoon Kang, Junhaeng Cho

Key words : Accelerated life test(가속시험), Wind-turbine Gearbox(풍력증속기), Cumulative damage theory(누적손상이론), Mechanical parts(기계류 부품들), Miner rule(마이너 규칙), Reliability(신뢰성)

Abstract : This study was performed to develop accelerated life test method of the wind-turbine gearbox using accumulated damage theory that used to model the fatigue of parts that receive variable load. The accumulated damage theory was introduced, and the estimation of life and calculation of accelerated life test time was illustrated. As the actual application example, accelerated life test method of the gearbox was described. Life distribution of the wind-turbine gearbox was supposed to follow Weibull distribution and life test time was calculated under the conditions of average life (MTBF) 140,600 hours and 99% reliability for one test sample.

According to the accumulated damage theory, because test time can shorten in case increase test load, test time could be reduced by 1.2 years when we put the load 1.2 times of rated load than 0.93 times of rated load that is equivalent load calculated by load spectrum of the wind turbine. This time, acceleration coefficient was 21.3.

This accelerated test method was used to develop accelerated test method of gear reducer, gear and bearing as well as the industrial gearbox and it is considered to be applied comprehensively to mechanical parts the fatigue of which is happened by load or pressure etc.

1. 서 론

고유가 시대를 맞이하여 전세계는 대체에너지원 개발에 전력을 다하고 있다. 우리 정부도 대체에너지원으로 상업성이 높은 풍력발전시스템을 국산화하는데 역점을 두고 있다. 풍력발전시스템의 주요 핵심 요소 부품 중 풍력증속기는 고부가가치 제품으로 일반 산업용 대형기어박스과 같이 높은 품질수준을 요구하고 있다. 풍력증속기는 고정밀기어로써 20년이라는 내구수명이 요구된다. 중대형급 풍력증속기 국산화 개발을 위해서는 기어, 축, 베어링, 소재류에 대한 설계검증과 신뢰성 확보가 필요하다. 이에 그 동안 개발한 풍력증속기에 관한 신뢰성시험 방안을 정의하고 신뢰성 증진을 위한 시험기법을 제시하고 자 한다. 또한 국제적인 인증기관에서 요구하는 풍력증속기 관

련 시험항목 등을 정의하고자 한다. 기어, 베어링류 부품의 신뢰성 시험의 종류에는 성능시험, 내환경 시험, 수명 시험 등이 있고, 이 중에서도 제품의 수명에 가장 밀접한 관련이 있으며 오랜 시험 시간을 요

-
- 1) (주) 효성 기전PU 감속기팀
E-mail : sonkisu@hyosung.com
Tel : (055)268-99771 Fax : (055)268-9783
 - 2) (주) 효성 중공업연구소 회전기팀
E-mail : hskwak@hyosung.com
Tel : (055)268-9924 Fax : (055)268-9928
 - 3) (주) 효성 기전PU 창원공장 감속기팀
E-mail : kchh@hyosung.com
Tel : (055)268-9771 Fax : (055)268-9783
 - 4) (주) 효성 중공업연구소 회전기팀
E-mail : onjoon@hyosung.com
Tel : (055)268-9922 Fax : (055)268-9928

구하는 것이 가속수명 시험이다. 풍력증속기 개발을 위해서는 각 지역별 풍력조건을 조사하여, Load Spectrum을 분석하고, 기어와 베어링의 강도설계와 해석, 그리고 증속기 수명예측을 위해 가속패턴, 가속계수 결정과 가속 시험법 작성하게 된다.

본 논문에서는 누적 손상 이론 (cumulative damage hypotheses)을 소개하고, 기계류 부품 중에서 풍력용 증속기에 대한 피로수명 예측과 가속 시험법을 서술하고자 한다.

2. 기초 이론

2.1 배경

풍량과 풍속은 시간, 지역, 계절에 따라서 변화한다. 풍력발전시스템과 풍력증속기는 이런 변동부하상태에서 작동하는 기계류 제품이다. 동적인 스트레스를 받는 기계 부품의 내구성 예측에 대한 방법은 정적 부하 또는 요동(oscillating)하는 부하 등을 기초로 하여, 최고 부하(peak load)나 운전 부하 팩터(operational load factor)를 도입하고 실제 부하와의 차이는 안전계수(safety factor)의 계산으로 보완하려고 했다. 그러나 이러한 방법들은 다단 기어트레인으로 구성된 기어트레인 설계에서 최적화설계에 대한 근거를 제시하지 못하고, 하나의 설계요소에 대해서만 할 수 있다는 단점이 있다. 누적손상이론에 기초한 임의 부하 피로 해석(random load fatigue analysis)은 실제 상황에서 예측한 Duty cycle을 기초로 하기 때문에 이러한 단점이 없으며 설계뿐 아니라 실내 시험(lab test)을 위한 자료를 제시한다.

2.2 누적손상이론

기계 소재류의 피로 파괴를 예측하기 위한 이론은 1920년도에 스웨덴 Palmgren의 볼베어링 변동 하중 연구에 기초가 된 누적 손상 가설(cumulative damage hypotheses)이다. 이를 기반으로 꾸준한 피로손상이론을 재정립한 Miner는 1945년에 항공기 피로 파괴 해석 문제 연구에 적용되었는데 이러한 선형 누적 손상법(linear cumulative damage rule)을 Palmgren-Miner rule 또는 일명 Miner rule이라고 한다.

2.3 선형 누적 손상법

선형 누적 손상법(linear cumulative damage rule)은 크기가 다른 다수의 반복 하중이 각각 일정한 반복수로써 작용할 때, 피로 수명을 예측하는 방법이다. 이 방법은 어떤 응력 수준에서 부품의 총 수명 시간에 대한 사용 시간의 비는 같은 응력 수준에서 부품이 파괴될 때까지 기대되는 총 반복수에 대한 작용 반복수의 비와 같다는 이론에 근거한 것이며, 차량의 기어 설계에서 가장 널리 이용되고 있는 방법이다.

어떤 부품에 반복 하중이 작용할 때, 이 부품의 수명을 N_1 사이클이라고 하면, 이 반복 하중의 한 사이클은 $1/N_1$ 의 수명을 사용한 것과 같다. 만약 n_1 사이클이 작용하였다면 사용 수명은 n_1/N_1 이 된다. 크기가 다른 반복 하중이 작용할 경우에도 같은 원리가 적용될 수 있다. 즉, 피로 수명이 N_i 사이클인 응력 수준에서 실제 작용한 반복 하중의 사이

클을 n_i 라고 하면 이 변동 하중에 의하여 소모된 수명은 n_i/N_i 가 된다. 이러한 원리를 적용하면 부품의 피로 파괴는 재료의 수명이 100% 소모되었을 때 일어난다. 이를 수학적으로 표현하면, 피로 파괴는 다음과 같은 조건에서 일어난다.

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

여기서 n_k 와 N_k 는 각각 특정 반복 응력 상태에서 작용 반복수와 총 반복수 즉, 피로 수명을 나타낸다.

부품에 작용하는 하중의 총 작용 시간을 X 라고 하면, 이 부품의 피로 수명은 다음과 같이 계산된다.

$$Life = \frac{X}{\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}} \quad (2)$$

2.4 부하 스펙트럼 분석

일정한 지역에서 풍향조건에서 측정된 부하는 모두 시간 함수로서 표현된다. 이러한 데이터를 설계 및 내구성 시험에 이용하기 위해서는 부하 스펙트럼으로 변환시켜야 한다. Load Spectrum은 풍력발전의 운전 조건에서 발전할 때 측정된 시간 함수의 부하를 통계적으로 처리하여 그림 1에서와 같이 빈도수의 함수로 나타낸 것이다.

일반적으로 사용되는 부하 스펙트럼은 직교 좌표계의 세로축에 부하 수준을 큰 것부터 작은 순서로 배열하여 표시하고, 가로축에 각 부하 수준의 빈도수를 나타낸다. 로그-로그 스케일을 기본으로 하지만 경우에 따라서 세로축은 일반 스케일로 표시한다.

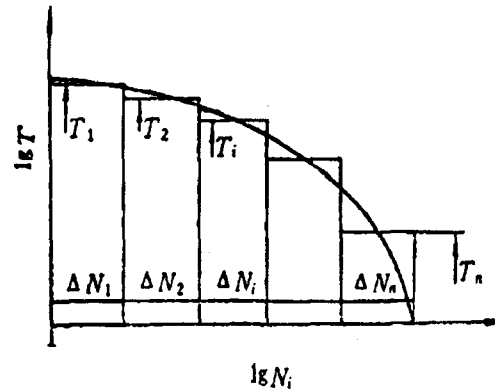


Fig. 1 Typical load spectrum.

풍력증속기가 20년 동안 가동 및 비가동 시간동안에 받게 되는 부하의 크기는 그림 2와 같이 시간에 따른 토오크로 표현된다. 일정한 토오크 범위에서 반복되는 부하사이클의 수로 정의되고, 이를 Duty cycle이라고 한다. 풍력용 증속기에 작용하는 부하는 비주기적이고, 시간, 계절, 지역에 따라서 변화되는 변동부하 형태를 나타내기 때문에 토크 선도에서 일정한 크기의 부하 토크가 발생한 회수를 정확하게 세기는 쉽지 않다.

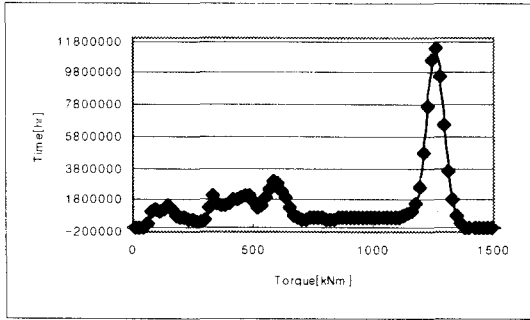


Fig. 2 Duty cycle of the 2MW WTG.

발생 빈도를 결정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 일반적으로 레인플로우법(Rainflow counting)을 많이 사용한다. 레인플로우법은 토크의 평균 응력과 응력의 크기를 고려하여 변형율-시간 선도에서 변형율 히스테리시스 루프를 세는 방법이다. 풍력증속기에 걸리는 부하 스펙트럼은 그림 3 Renius(1976)의 부하 스펙트럼 유사한 그림 4와 같다.

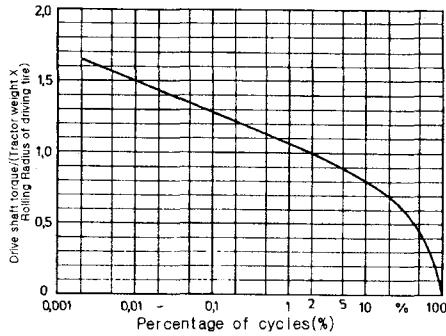


Fig. 3 Load spectrum of the tractor.

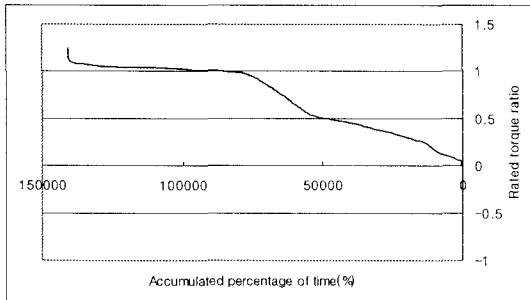


Fig. 4 Load spectrum of the 2MW WTG.

풍력증속기의 Load Spectrum으로부터 각 부하에 제품의 수명에 영향을 어느 정도 줄 것인지 예측하기 위해 누적손상율(cumulative damage)을 계산하면, 그림 5와 정격토크 부근에서 수명과 피로파괴에 가장 영향이 큰 것으로 나타나고 있다.

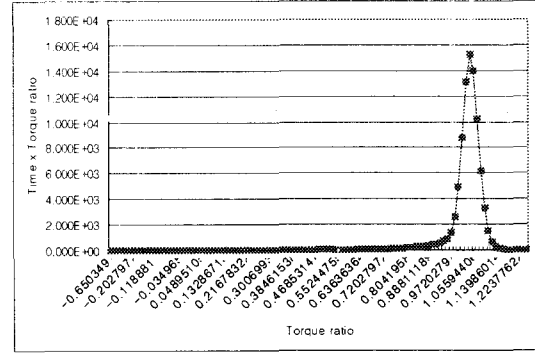


Fig. 5 The cumulative damage of the 2MW WTG.

이 부근에서 풍력증속기의 운전조건을 개선하면, 좀 더 내구성 증진시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3. 풍력증속기 가속시험법

3.1 수명시험시간 계산

풍력증속기의 수명시험시간 계산을 위해서는 각 부품의 수명 분포 형태를 알아야 한다. 대부분의 기계류 부품의 수명은 Weibull 분포를 따르는 것으로 조사 되었으며, 풍력증속기의 수명은 문헌조사에 의해 형태모수 $\beta = 4.0$ (출처: Allison T/M사 시험자료)의 Weibull분포를 따른다.

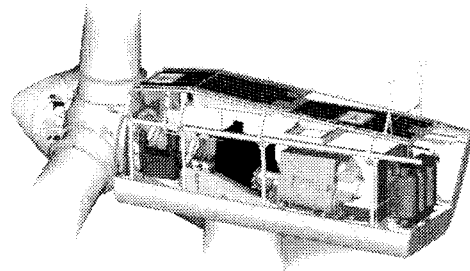


Fig. 6 2MW Wind turbine system

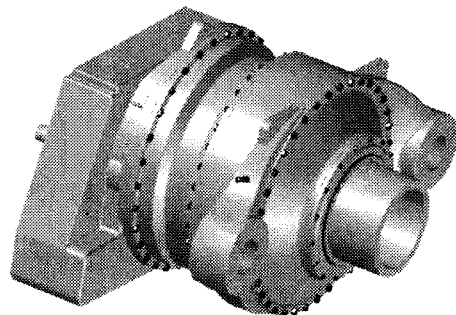


Fig. 7 2MW Wind turbine gearbox

풍력증속기의 사용시간을 계산하기 위해서는 총 20년 동안 그림 2로부터 풍력증속기의 평균 가동시간을 계산하여 한국에 설치되는 2MW급 풍력증속기는 140,600으로 한다. 그리고 시료 1개의 사용시간으로부터 추정된 평균수명(MTBF)의 99% 신뢰수준을 갖는다.

실 운전시간 140,600의 신뢰도 99%에서 평균수명(MTBF)으로 하고, 척도모수 θ 의 99% 신뢰하한의

식은 다음과 같다.

평균수명(MTBF)의 100(1-α)% 신뢰하한을 140,600 시간으로 하기 위하여 식(3)을 적용한다.

$$MTBF = \theta \Gamma \left(\frac{\beta+1}{\beta} \right) = \theta \Gamma \left(\frac{5.0}{4.0} \right) \quad (3)$$

여기서 $\Gamma \left(\frac{5.0}{4.0} \right) = 0.9066$ 이므로 식(3)에 대입하면,

$$\theta = \frac{MTBF}{\Gamma \left(\frac{5.0}{4.0} \right)} = \frac{140,600}{0.9066} = 155,084$$

각 시료의 시험 시간을 얻기 위하여, 척도모수 θ의 99% 신뢰하한 관계식으로부터 요구수명 시간은 다음과 같다.

$$t = \theta \left(\frac{-1 \times \ln(1-CL)}{n} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$= \left(\frac{-1 \times \ln(1-0.99)}{1.0} \right)^{\frac{1}{4.0}}$$

$$= 227,182 \text{ hr}$$

결론적으로 각 시료 1set를 신뢰수준 99%에서 140,600 시간 평균수명(MTBF)을 보장하기 위하여 227,182 시간을 수명시험을 실시하여야 한다. 그러나 227,182 시간의 수명시험을 실시하는 것이 현실적으로 불가능하므로, 풍력증속기의 부하 스펙트럼을 이용한 등가 평균 토크를 계산하여 풍력용 증속기의 가속 수명 시험 시간을 계산하였다.

3.2 가속 시험시간 산출

일반적으로 풍력증속기의 내구성 평가는 주로 기어와 베어링으로 구성된 동력전달부품의 피로수명을 평가 대상으로 하고 있으며, 기어류 부품의 수명과 인가하중 사이에는 일반적으로 다음의 식과 같은 가속 모델이 성립하는 것으로 알려져 있다. 그림 8은 K사에서 20대의 건설중장비용 변속기를 고부하 시험을 실시하여 얻은 피팅 Life S-N 선도를 참조하여 수명지수 X를 12로 하였다.

가속모델과 Duty cycle로부터 등가평균토크 및 등가평균회전속도 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다. 등가평균토크 및 등가평균회전속도란 실측 데이터와 같이 실시간 변동하는 토크 및 회전속도조건에서 부품에 인가되는 피로손상과 동일한 크기의 피로손상을 유발하는 평균적인 토크 및 회전속도를 말한다.

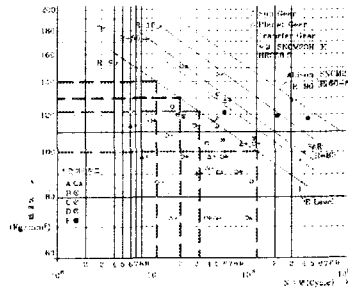


Fig. 8 S-N curve of the gearbox.

$$\omega_{eq} = \frac{\sum \Delta t_i \omega_i}{\sum \Delta t_i} \quad (4)$$

$$T_{eq} = \left[\frac{\sum \omega_i \Delta t_i T_i^X}{\sum \omega_i \Delta t_i} \right]^{1/X} \quad (5)$$

식 (4) 등가평균회전속도와 식 (5) 등가평균토크는 Duty cycle로부터 산출된다. 그런데 그림 2는 회전속도를 포함하고 있지 않다. 이 Duty cycle에는 주로 정격토크 상태에서 고토오크 회전을 하고, 이때 회전수는 일정한 범위 안에 있기 때문에 등가평균회전속도를 일정하게 가정한다. 즉, 위의 식에서 속도 항목을 빼면 다음과 같이 변형된다.

$$T_{eq} = \left[\frac{\sum \Delta t_i T_i^{XL}}{\sum \Delta t_i} \right]^{1/X} \quad (6)$$

상기 식으로 계산된 등가 토크비는 정격토크 대비 0.93이다.

시험토크를 정격토크의 1.2배로 하면, 가속계수는 다음과 같이 계산되고

$$AF = \left[\frac{T_{test}}{T_{field}} \right]^X = \left[\frac{T_{test}}{T_{eq}} \right]^X \quad (7)$$

$$AF = \left[\frac{1.2}{0.93} \right]^{12} = 21.3 \quad (8)$$

가속 시험 시간은 다음과 같다.

$$t_{test} = \frac{t}{AF} = \frac{227,182}{21.3} = 10,665 \text{ [hr]}$$

여기서 t는 식(6)에 의해 계산된 등가평균토크 $T = T_{eq}$ 에서 계산된 수명시험시간 10,605 시간이다. 따라서 신뢰수준 99%에서 140,600 시간 MTBF(평균수명시간, Mean rounds between failure)은 부하 스펙트럼과 정격토크의 120%로 부가되는 시험토크로 하는 경우의 가속계수 21.3을 적용하여, 실험가속 시간은 10,665시간으로 풍력증속기 20년 내구수명을 보장할 수 있다.

4. 시험장치

풍력발전용 증속기의 시험은 다이내모미터(Dynamometer)에서 수행하게 된다. 다이내모미터는 부하를 재현하는 방식에 따라 진기식, 유압식 및 기계

식 등 여러 가지 방식이 있다. 업체에서 시험항목과 설비비용, 부하 재현성 등을 고려하여 선택하게 되고, 금번 2MW급 풍력증속기 가속시험장치는 그림 9과 같이 전기식 방식으로 발전기를 브레이크로 사용한다.

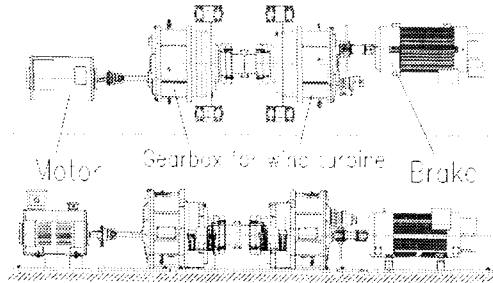


Fig. 9 Concept of the dynamometer

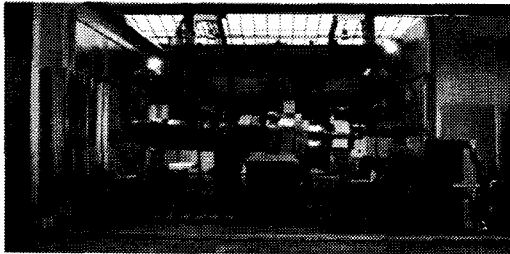


Fig. 10 풍력증속기 부하시험장치

풍력증속기는 입력측은 저속으로 고토오크라는 특징 때문에 구동용 모터로부터 토오크를 증가시키기 위해 1차적으로 감속하는 기어박스를 부착하여 증속기를 구동하게 된다. 또한 부하시험장치의 부하변동폭을 제어하고, 동력측정을 위해 토크미터(Torquemeter)와 같은 계측 장비를 설치하게 된다. 또한 풍력증속기의 이상현상을 진단하기 위해 예방진단 시스템을 부착하여 증속기의 진동, 소음, 오일온도, 베어링 이상현상 등을 진단하게 된다. 위와 같은 구성으로 풍력증속기용 부하시험장치를 구축하고자 한다.

5. 결론

본 논문은 풍력발전용 증속기의 시험인증을 위한 가속 시험법을 개발하기 위해 수행 되었으며, 기초 이론은 풍향과 같은 변동하중을 받는 상태에서 풍력증속기의 피로파괴 가속모델을 가정하고, 누적손상이론을 이용하여 풍력증속기의 가속시험법을 제시하였다. 풍력증속기의 수명 분포는 Weibull 분포를 따르는 것으로 가정하였고, 시료수는 1개, 풍향조건과 운전조건을 고려된 Duty cycle로부터 풍력증속기의 평균수명(MTBF)의 140,600시간과 신뢰도 99%가 되도록 수명시험시간을 계산하였다. 계산된 수명시험시간은 227,182시간이었고 이것은 일정한 하중으로 시험할 경우 등가하중에 해당하는 시험시간이다. 누적손상이론에 따르면 시험 하중을 증가시킬 경우 시험시간을 단축시킬 수 있기 때문에, 부하 스펙트럼으로부터 계산된 등가하중과 가속부하 하중을 계산하여, 정격부하·비율의 0.93보다 높은 가속부하 1.2배로 시험시간을 10,665hr(1.2 years)으로 줄일 수 있었다. 이때

가속계수는 21.3이었다.

국제적인 풍력증속기 설계인증과 시험인증을 얻기 위해서는 이러한 가속시험법을 이용하여 설계검증을 할 수 있는 시제품 시험 등이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 우리나라에서 아직 2MW급 부하시험장치가 없는 관계로 이를 구현하고, 일반산업용 기어박스과 같이 활용 가능한 부하시험장치 그림 9처럼 구현되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 2004-2007년도 전력산업연구 개발사업인 “ 국제기술제휴 및 협력에 의한 2.0MW급 풍력발전시스템 상용화 개발” 사업의 일환으로 수행된 연구결과이다.

References

- [1] GL Wind 2003. Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, 2003. 9.
- [2] Renius, K. Th. Last- und Fahrgeschwindigkeitsskolektive als Dimensionierungsgrundlagen für die Fahrgetriebe von Ackerschleppern. Fortschr.-Ber. VDI-Z, Reihe 1, Nr.49. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1976.
- [3] Renius, K. Th. Application of cumulative damage theory to agricultural tractor design elements. KONSTRUKTION 29(3):85-93, 1977.
- [4] Lechner, G and H. Naunheimer. Automotive transmissions. Springer ;184-194, 1999.
- [5] Cumulative Damage Analysis for Hydraulic Hose Assemblies - SAE J 1927, SAE Information Report,1988.
- [6] SAE Test Program on Cumulative Damage for Hydraulic Hose Assemblies, SAE Technical Paper Series 880713, 1988.
- [7] 이근호, 김형의, 김도식, 중형풍력발전시스템용 기어박스 개발기술, 기계와 재료, 2004. 12
- [8] 박경수, 신뢰성개론, 영지문화사, 1994.
- [9] 이상용, 신뢰성공학, 형설출판사, 1995.