

## 풍력발전기용 쓰러스터 브레이크의 신뢰성 평가

정동수

한국기계연구원 신뢰성평가센터

### Reliability Evaluation of Thruster Break for Aerogenerator

Dong Soo Jung

Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials

#### Abstract

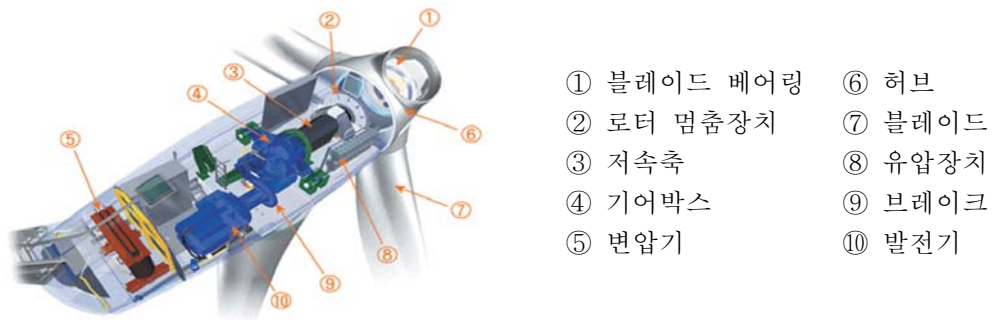
Thruster break for aerogenerator performs a role that is stopping the rotor in case of emergency such as strong wind, system abnormality or maintenance check.

In this study, failure analysis and test evaluation on the thruster break for aerogenerator are proposed, and the entire process to improve reliability of the product through design improvement is presented. The typical failure case is fatigue and wear, and failure cause on these are identified and improvement plan is presented. Lastly, reliability improvement is established to analyse test results before • after the life test.

Keywords: Aerogenerator, Thruster Break, Fatigue, Wear, Reliability, Qualification Life

## 1. 서 론

풍력발전기는 기후 온난화를 일으키는 주범인 CO<sub>2</sub> 배출도 없고, 몇 년 전 일본에서 발생한 방사능 누출 같은 위험성도 없다. 가장 자연 친화적인 발전 시스템으로 어떤 오염도 일으키지 않는다. 이러한 장점 때문에, 풍력발전기는 태양에너지 발전시스템과 함께 가장 유력한 대체 에너지원으로 인정을 받고 있으며 이미 전 세계적으로 널리 설치 운영되고 있고 지속적으로 증가세에 있다. 그림 1과 같이 풍력발전기는 블레이드, 로터, 기어박스, 발전기, 브레이크 등 많은 부품들로 이루어져 있고, 이러한 부품 중에서 주요 고장형태가 마모 및 피로인 브레이크는 보증수명이 상대적으로 짧기 때문에 완제품인 풍력발전기의 신뢰성 향상에 장애요인이 되고 있다. 풍력발전기용 쓰러스터(thruster) 브레이크는 강풍이 불거나 시스템 이상 시 또는 보수 점검 시 등 비상 상황에서 로터를 정지시키는 역할을 수행한다.



<그림 1> 풍력발전기의 주요 핵심부품

## 2. 쓰러스터 브레이크 구조 및 주요 고장

### 2.1 쓰러스터 브레이크의 작동 구조

쓰러스터(thruster) 브레이크는 전기식 모터로 와류를 발생시켜 쓰러스터의 압상력으로 작동하는 브레이크이다. 쓰러스터 브레이크는 크게 2가지 방식으로 분류가 된다. 쓰러스터의 압상력을 제동력으로 활용하는 방식과 평소에는 쓰러스터를 작동시켜 제동력을 해제시키다가 비상 상황발생으로 전원이 공급되지 않으면 쓰러스터가 작동을 멈춰 장착된 제동 스프링으로 제동을 하는 방식이다.

본 논문에서는 후자에 해당되며 타 브레이크와 달리 비상시 사용되는 것으로써 제동력 보다는 전원차단 시 제동력이 발생하는 시점까지의 반응속도가 매우 중요한 브레이크이다.




쓰러스터 브레이크의 주요 구성품은 전기식 쓰러스터와 제동력을 발생시키는 제동 스프링, 브레이크 작동 범위를 제어하는 리미트 스위치(limit switch)이다.



<그림 2> 쓰러스터 브레이크의 주요 부품

## 2.2 쓰러스터 브레이크의 주요 고장

<표 1> 쓰러스터 브레이크의 주요 고장 사례

제품명	문제 현황
전기식 쓰러스터	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 쓰러스터 내부 모터의 샤프트 마모로 인한 과부하 발생</li> <li>- 모터 코일 소손으로 인한 고장 발생</li> </ul> 
브레이크 케이스	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 반복 작동으로 인한 핀 이탈 현상 발생</li> <li>- 고정부위 볼트 절단 및 풀림 현상 발생</li> </ul>  

### 3. 고장 모드 및 영향 분석

#### 3.1 고장영향 분석

쓰러스터 브레이크의 신뢰성 향상을 위한 평가에 앞서, 제품의 고장 영향과 고장 모드를 조사하고 잠재적인 고장을 확인한다. 이는 제품의 설계, 제작, 조립, 운용 등에서 제품의 불완전으로 인한 잠재적 결함을 찾아내기 위하여 구성요소들의 고장 형태와 그 상위 제품에 미치는 영향을 해석하여 설계개선으로 연결시키기 위한 중요한 부분이다. 표 2는 쓰러스터 브레이크를 생산 또는 수리하는 기업들로부터 풍력발전기 현장에서 발생된 고장부품들과 고장 내역들을 수집하여 주요 구성품들에 대한 고장모드와 고장영향을 분석한 결과를 보여주고 있다. 표 2에서 언급된 바와 같이 쓰러스터 브레이크의 주요 고장형태는 마모 및 피로 등으로 나타난다.

<표 2> 쓰러스터 브레이크의 고장형태 및 효과 분석

주요 구성품	기능	고장모드	고장 메커니즘	고장 원인	고장 영향
전기식 쓰러스터	브레이크 제어 및 작동	샤프트 마모	누적 마모	샤프트 마모	압상력 저하
		코일 소손	과부하	회전저항 증가	브레이크 작동불능
브레이크 케이스	구성품 장착 및 외관 형성	핀 이탈	누적 피로	습동부 윤활 부족	브레이크 작동불능
		체결부 파손	누적 피로	반복 작동	비정상 작동
제동 스프링	제동력 형성	탄성 저하	누적 피로	반복 작동	제동력 감소

<표 3> 쓰러스터 브레이크의 2단계 품질기능 전개

주요 구성품	고장 모드	중요도 점수	시험 항목			
			압상력 시험	제동력 시험	응답 속도 시험	수명 시험
전기식 쓰러스터	샤프트 마모	23	◎		●	◎
	코일 소손	25	◎		●	◎
브레이크 케이스	핀 이탈	17		◎	◎	◎
	체결부 파손	18		◎	◎	◎
제동 스프링	탄성 저하	16		◎	◎	◎
시험 유효성 점수 및 순위			240	255	399	495
(test effectiveness score and rank)			4	3	2	1

### 3.2 품질기능 분석

품질기능 전개는 시험항목들의 중요성을 평가하기 위하여 수행된다. 시험항목들은 사용자들의 요구조건 및 국내·외 유명규격(KS, ISO, IEC, MIL, 등)들을 참조하여 결정된다. 시험항목들이 많을 경우, 시험여건에 따라 우선적으로 수행해야 할 대표적인 시험항목을 선정할 때 유용하게 활용된다. 품질기능 전개는 1단계와 2단계로 나누어지며 표 3은 1단계에서 도출된 고장모드들의 중요도 점수와 시험항목들의 유효성 점수를 정리한 2단계를 보여주고 있다. 1단계는 표 2의 각 고장모드에 대하여 고장 심각도와 고장 발생빈도로부터 치명도 매트릭스를 분석(CMA)하고 사용자 요구조건들을 반영하여 중요도 점수를 도출한다. 본 연구에서는 1단계의 전개과정이 복잡하여 결과만을 언급한다.

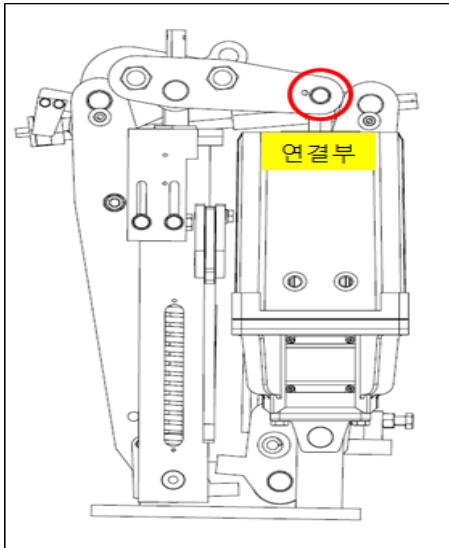
## 4. 시험평가기준 개발

### 4.1 시험평가기준

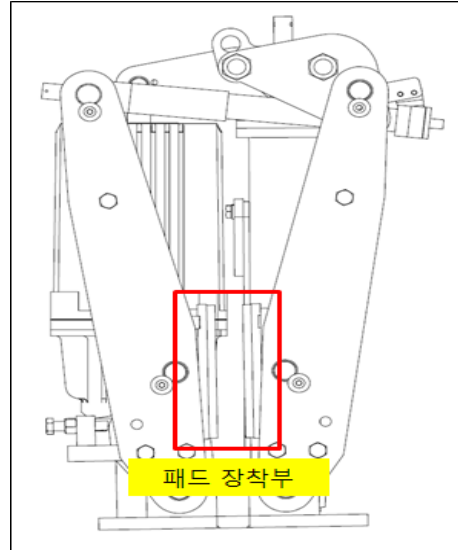
<표 4> 쓰러스터 브레이크의 시험방법 및 평가기준

시험 항목	시험방법	평가기준
압상력 시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 그림 3과 같이 쓰러스터와 케이스의 연결부를 분리한다.</li> <li>· 쓰러스터를 작동시켜 압상력을 3회 측정 후 평균값을 구한다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 압상력의 평균값은 80 kg 이상이어야 한다.</li> </ul>
제동력 시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 그림 4와 같이 브레이크의 패드 장착부에 제동력 측정을 위한 로드셀을 장착한다.</li> <li>· 브레이크를 작동시켜 제동한다.</li> <li>· 제동상태를 10 초간 유지 후 제동력을 측정한다.</li> <li>· 총 3회 실시하여 제동력의 평균값을 구한다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 제동력의 평균값은 900 kg 이상이어야 한다.</li> </ul>
응답속도 시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 브레이크의 패드 장착부에 제동력 측정을 위한 로드셀을 장착한다.</li> <li>· 1/100 초의 분해능을 가진 데이터 취득 장치를 사용하여 브레이크 작동 중 비상정지 시킨 후 제동력이 발생하는 시간을 측정한다.</li> <li>· 총 3회 실시하여 응답속도의 평균값을 구한다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 응답속도의 평균값은 0.03 초 이내이어야 한다.</li> </ul>
수명 시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 브레이크가 작동할 수 있는 전원을 공급한다.</li> <li>· 브레이크를 '7 초 작동 → 3 초 정지'를 1 사이클로 하여 <math>6.5 \times 10^5</math> 사이클까지 수명 시험을 실시한다.</li> <li>· 수명 시험 전과 후에 종합 성능 시험을 실시한다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시료 2개를 <math>6.5 \times 10^5</math> 사이클까지 수명 시험 한 후, 고장 없고 종합 성능 시험의 평가 기준을 만족하여야 한다.</li> </ul>

쓰러스터 브레이크의 2단계 품질기능 전개로부터 선정된 시험항목들에 대하여 시험방법과 평가기준을 정립하여 표 4에 정리하였다. 수명시험을 제외한 3가지 시험항목들은 수명시험 전에 먼저 수행되며 수명시험이 완료된 후에도 실시된다. 수명시험 후에 각 시험항목들은 다소 열화현상이 발생하더라도 각각의 평가기준들을 만족하여야 한다.



<그림 3> 압상력 시험



<그림 4> 제동력 시험

## 4.2 무고장 시험시간

쓰러스터 브레이크의 운용조건을 조사한 결과 연간 365일 가동, 1일 평균 작동 80 사이클로, 연간 작동 사이클은  $365\text{일/년} \times 80\text{ 사이클/일} = 29,200\text{ 사이클/년}$ 이다. 본 연구에서는 연간 운용조건을 기준으로  $B_{10}$  수명 3년( $365\text{일/년} \times 80\text{ 사이클/일} \times 3\text{년} = 87,600\text{ 사이클} \approx 8.8 \times 10^4\text{ 사이클}$ )을 신뢰 수준 90 %로 보증하고자 한다. 고장분석에 의하면 쓰러스터 브레이크의 주요고장은 작동 사이클이 누적됨에 따라 사프트의 마모에 의하여 모터의 과부하가 발생되고 궁극적으로 코일의 소손으로 나타나고 있다. 그리고 초기고장이 크지 않는 기계류 부품들은 와이블 분포를 적용하기 때문에 쓰러스터 브레이크의 수명도 이를 따르기로 한다. 따라서, 쓰러스터 브레이크는 형상모수에 대한 연구사례가 없기 때문에 유사한 주요고장을 나타내는 'Barringer & Associates, Inc. 와이블 데이터베이스' 에 언급된 AC Motors의 형상 모수( $\beta$ ) 1.2를 인용하였다.

- 수명 분포 : 형상 모수( $\beta$ )가 1.2인 와이블(Weibull) 분포
- 보증 수명 :  $B_{10}$  수명  $8.8 \times 10^4$  사이클
- 신뢰 수준 : 90 %
- 시 료 수 : 2개

- 무고장 시험 시간( $t_n$ ) :

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[ \frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$= 8.8 \times 10^4 \cdot \left[ \frac{\ln(1-0.9)}{2 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{1.2}} = 645514.26 \approx 6.5 \times 10^5 \text{ 사이클}$$

- 여기에서  $t_n$  : 무고장 시험 시간  
 $B_{100p}$  : 보증 수명  
 $CL$  : 신뢰 수준(confidence level)  
 $n$  : 시험중인 전체 아이템의 개수(시료수)  
 $p$  : 불 신뢰도( $B_{10}$  수명이면  $p = 0.1$ )  
 $\beta$  : 형상 모수

### 5. 고장사례 분석 및 신뢰성 개선

수명시험 중 127,612 사이클에서 브레이크가 작동하지 않는 고장이 발생하였다. 원인 분석 결과 쓰러스터의 립셀이 모터의 샤프트를 마모시키면서 부하가 커져 모터 코일이 소손되어 작동을 멈추었다.

따라서 샤프트의 표면처리 강화를 통해 내구성이 향상된 개선품으로 성능 시험 및 수명 시험을 다시 진행하였다.



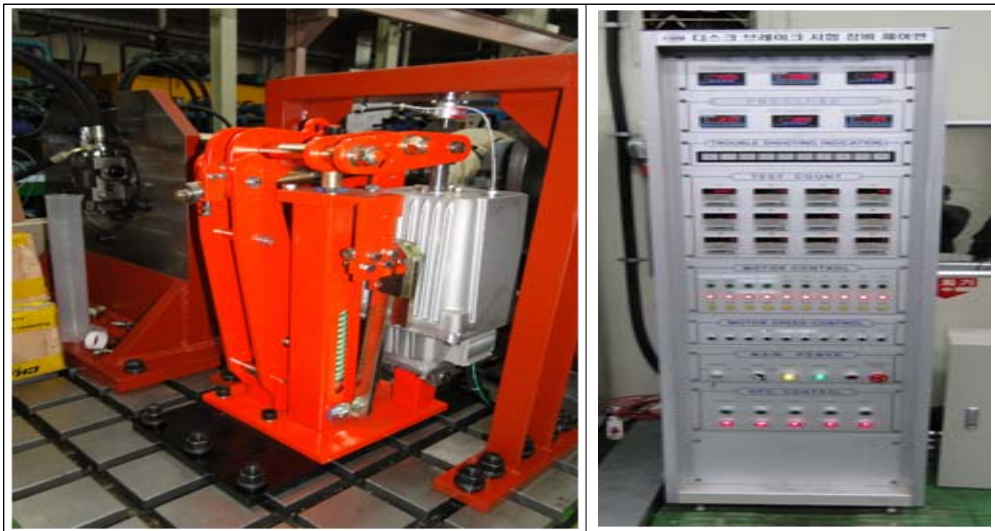
<그림 5> 쓰러스터의 고장 후 제품 개선



## 6. 시험장비의 구성 및 시험평가

### 6.1 종합 성능 및 수명 시험 장비

그림 6, 7은 쓰러스터 브레이크의 성능시험 및 수명시험을 수행하는 시험장비이다. 본 시험장비는 로드셀을 이용하여 압상력 및 제동력을 측정하게 되어있다. 본 시험장비는 수동운전에 의하여 시험장비 교정(calibration)이 가능하며 자동운전에 의하여 시험장비 제어 및 실시간 데이터를 취득하도록 LabView 3.0 프로그램에 의하여 운영된다.



<그림 6> 쓰러스터 브레이크의 종합성능 시험장비 및 제어반



<그림 7> 쓰러스터 브레이크의 수명시험 및 제어반



## 6.2 신뢰성 평가 결과

시험 대상품은 2대이며 성능시험 및 수명시험을 진행하였다. 성능시험은 수명시험 전과 후에 순차적으로 1대씩 진행하였으며 수명시험은 두 대를 동시에 진행하였다. 시험 대상품 2대 중 1대는 수명시험 약 20 % 진행 중에 모터코일이 소손되어 작동이 멈추는 고장이 발생하였다. 두 대 모두 동일한 설계개선을 행한 후 처음부터 모든 시험을 다시 진행하였다. 그림 8~10은 쓰러스터 브레이크의 성능시험이 진행되는 그림들이다. 표 5는 시험 대상품 2대 중 고장이 발생되었던 제품에 대하여 개선 전의 성능시험과 개선 후에 수명시험 전과 후의 시험결과를 보여주고 있다. 시험결과와 신뢰도를 높이기 위하여 각각의 시험항목에서 3회씩 시험을 진행하였다. 개선 후에는 제동 성능 및 마모량 측정 시험 등에서 성능이 많이 개선되었음을 볼 수 있다. 특히 모터 샤프트의 열처리 및 연마 등 표면 처리를 개선함으로써 개선품의 압상력이 50 %(개선 전 : 119.6 kg, 개선 후 : 183.4 kg) 정도 향상되었다. 개선 제품은  $6.5 \times 10^5$  사이클의 수명시험을 완료한 후에도 모든 시험항목들의 기준치를 만족하고 있으며, 성능열화도 미미한 수준으로 확인되었다. 이는 기대수명이 보증수명보다 훨씬 클 수 있다는 것을 미루어 짐작할 수 있다.



<그림 8> 압상력 시험



<그림 9> 제동력 시험



<그림 10> 응답속도 시험

<표 5> 시험 평가 결과 요약

평가항목	평가 결과									
	수명 시간	단위	시료							
			개선 전				개선 후			
			1회	2회	3회	평균	1회	2회	3회	평균
압상력 시험	0 %	kg	119.9	119.8	119.2	119.6	183.2	183.6	183.4	183.4
	100 %		-	-	-	-	182.1	182.5	182.2	182.3
제동력 시험	0 %	kg	982	983	982	982	1,015	1,015	1,016	1,015
	100 %		-	-	-	-	945	945	946	945
응답속도 시험	0 %	초	0.025	0.024	0.025	0.025	0.023	0.024	0.023	0.023
	100 %		-	-	-	-	0.027	0.026	0.027	0.027

## 7. 결 론

본 연구에서는 고장모드 및 영향분석에 의하여 시험평가기준을 개발하고 현장고장 및 시험고장을 통하여 설계개선안을 도출하여 쓰러스터 브레이크의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 대표적인 고장사례로는 쓰러스터 내부 모터의 샤프트가 립셀에 의해 마모되면서 부하가 커져 코일이 소손된 것이다. 이를 개선시키기 위하여 모터 샤프트의 열처리 및 연마 등 표면처리를 개선하였다.

개선 전·후의 시험결과에 의하면 압상력이 50 %(개선 전 : 119.6 kg, 개선 후 : 183.4 kg) 정도 향상 되었으며 수명 시험도 끝까지 마칠 수 있었고 수명 시험 후 열화현상도 거의 나타나지 않았다. 그리고 개선된 제품에 대하여 무 고장으로  $6.5 \times 10^5$  사이클의 수명시험을 완료함으로써 신뢰수준 90 %에서 보증수명  $8.8 \times 10^4$  사이클을 확보하였다.

## 참고문헌

- [1] G. K. Hobbs(2000), Accelerated Reliability Engineering HALT and HASS, John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Jhon W. Evans and Jillian Y. Evans(2001), Product Integrity and Reliability in Design, Springer.
- [3] Wayne Nelson(1985), Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures, Journal of Quality Technology, Vol.17, No.3, 140-146.
- [4] Wayne Nelson(1990), Accelerated Testing; Statistical models, test plans, and data analysis, Wiley.
- [5] 하호진과 김광섭(2009), 유압 브레이크의 고장분석을 통한 수명분석 연구, 신뢰성응용연구, Vol.9, No.3, 177-193.