

## NREL 5MW 풍력터빈의 블레이드 하중 저감을 위한 개별피치제어<sup>§</sup>

라요한<sup>\*†</sup> · 남윤수<sup>\*</sup> · 손재훈<sup>\*</sup>

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과

### Individual Pitch Control of NREL 5MW Wind Turbine Blade for Load Reduction

Yo Han La <sup>\*†</sup>, Yoon Su Nam <sup>\*</sup> and Son Jae Hoon <sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>School of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received April 27, 2012 ; Revised June 15, 2012 ; Accepted Jun3 15, 2012)

**Key Words:** Wind Turbine(풍력터빈), Load Reduction(하중저감), Individual Pitch Control(개별피치제어), Out-of-Plane Motion(회전 평면 외 운동)

**초록:** 풍력터빈이 점차 대형화 되면서 로터 직경도 점차 커지고 있다. 로터 블레이드는 윈드시어와 타워 교란 효과로부터 기계적 하중을 받게 된다. 이러한 기계적 하중은 풍력터빈의 수명을 단축시킨다. 따라서, 풍력터빈의 크기가 커짐에 따라 기계적 하중 완화를 위한 풍력터빈 제어 시스템 설계가 중요하다. 본 논문에서는 로터 블레이드의 기계적 하중 저감을 위한 개별 피치 제어에 대해 소개하고 IPC 성능 검증을 위해 시뮬레이션을 통하여 논의한다.

**Abstract:** As the size of a wind turbine increases, the rotor diameter increases. Rotor blades experience mechanical loads caused by the wind shear and the tower shadow effect. These mechanical loads reduce the life of the wind turbine. Therefore, with increasing size of the wind turbine, wind turbine control system design for the mitigation of mechanical loads is important. In this study, Individual Pitch Control in introduced for reducing the mechanical loads of rotor blades, and a simulation for IPC performance verification is discussed.

- 기호설명 -

$\psi_1$  : 첫 번째 블레이드의 회전 방위각

$Wc$  : 크로스오버 주파수

PM : 위상 여유

### 1. 서 론

최근 세계적으로 신 재생에너지에 대한 중요성이 대두되면서 풍력터빈에 대한 연구와 투자가 활발히 이루어 지고 있다. 그에 따라 풍력터빈의 용량이 점차 증가하고 있으며 기계구조물 또한 거대

화되고 경량화 되고 있다. 이로 인해 풍력터빈의 구조물들은 낮은 댐핑의 유연 구조물의 특성을 갖게 되고 바람에 의해 구조물이 진동하면서 기계적 하중이 발생하게 된다. 풍력터빈은 20 년 동안 작동되도록 설계되지만, 이러한 기계적 하중에 의해 문제가 발생된다. 풍력터빈 제어는 바람이 갖는 파워를 최대한 회수하면서 출력 품질을 향상시키고 공력 하중을 줄이는 데에 중점을 두고 있다.

각 회전날개 끝 단의 위치가 풍속이 가장 빠른 최상층부터 풍속이 가장 느린 지표면 근처를 지나 다시 최상층에 도달하는 1 회전 운동을 하면서 각 회전 날개는 로터(rotor) 회전 속도의 1 회전 성분의 하중이 발생하게 된다. 또한 회전 날개가 회전 하면서 타워 부근에서는 유속의 흐름이 방해받기 때문에 풍속이 급격히 감소하게 되어 회전 날개가 킁(kick)하는 형상이 일어난다. 즉, 풍력터빈은 회전날개의 1 회전마다 고도차이에 의한 윈드시어(wind shear)와 타워에 의한 바람 교란 효과

<sup>§</sup>이 논문은 2012 년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2012. 4. 11.-13., 제주 KAL 호텔) 발표논문임.

<sup>†</sup> Corresponding Author, gara8282@kangwon.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

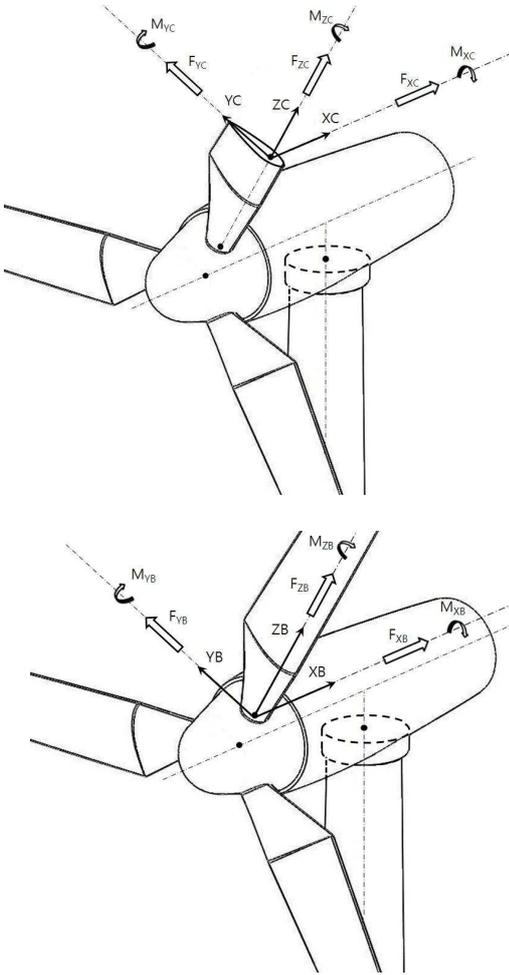


Fig. 1 Chord coordinate system and blade coordinate system

(tower shadow)에 의해 주기적인 하중의 영향을 받는다. 로터가 1회전 하면서 발생하는 sin, cos 성분들을 통틀어서 1P 라 지칭한다. 각 회전날개에서 발생하는 1P 성분의 진동은 블레이드(blade)에 반복하중을 발생시키며, 풍력터빈의 수명과 출력 품질을 저하시키는 요인이 된다. 개별피치제어(Individual Pitch Control)은 3개의 날개를 각각 제어함으로써 회전 날개로부터 발생하는 기계적 하중을 줄이는 제어 기술이다. 본 논문에서는 개별 피치제어를 소개하고 시뮬레이션 결과를 통해 성능을 검증하였다.<sup>(1)</sup>

2. 좌표계

풍력발전기의 각 시스템의 기계적 하중을 이해하거나 분석하려면 풍력 터빈 좌표계를 알아야 한다. 개별피치제어를 하려면 6개의 좌표계 중 3

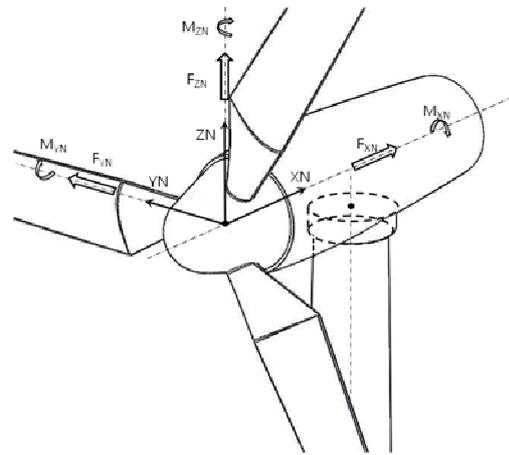


Fig. 2 Hub coordinate system

개의 좌표계를 정확히 숙지해야 한다. Fig. 1은 코드 회전 좌표계(chord coordinate system)와 블레이드 회전 좌표계(blade coordinate system)이다. 코드 회전 좌표계는 블레이드와 허브와 함께 회전하는 좌표계로서, 국지적 좌표계(local coordinate)라고도 부른다. YC 축 방향은 코드 길이 방향으로 블레이드의 뒷진(trailing edge)을 향한다. YC 축에 대한 블레이드 회전 운동을 플랩방향 운동(flapwise motion), XC 축에 대한 회전 운동을 엣지방향 운동(edgewise motion, or lead-lag motion)이라 부른다. 블레이드는 초기 뒤틀어져 제작되므로 비틀림 각(twisting angle)만큼 코드 회전 좌표계도 회전한다. 또한 블레이드가 피칭 운동을 하면 코드 회전 좌표계도 피치 각 만큼 회전한다. 블레이드 회전 좌표계는 허브와 함께 회전하는 좌표계로서 블레이드가 피칭운동을 하여도 좌표계는 변하지 않는다. GL 좌표계(GL coordinate)라고도 부른다. 블레이드가 XB 축에 대한 블레이드 회전 운동을 회전 평면내 운동(in-plane motion), YB 축에 대한 회전 운동을 회전 평면외 운동(out-of-plane motion)이라 부른다. 두 좌표계 사이의 관계식은 아래 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{XB} \\ M_{YB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\beta + \theta_t) & \cos(\beta + \theta_t) \\ \cos(\beta + \theta_t) & -\sin(\beta + \theta_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{YC} \\ M_{XC} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $\beta$  = 피치각(pitch angle)

$\theta_t$  = 비틀림 각도(twist angle)

마지막으로 고려되는 좌표계는 Fig. 2의 허브 고정 좌표계(hub coordinate system)이다. 즉, 로터가

회전해도 고정되어 있는 좌표계이다. YN 축에 대한 회전 운동을 틸팅 운동(tilting motion), ZN 축에 대한 회전 운동을 요잉 운동(yawing motion)이라 부른다. 개별피치제어를 하기 위해서 블레이드 회전 좌표계를 허브 고정 좌표계로 변환하는 과정이 필요하다.<sup>(4)</sup>

### 3. 개별피치제어

#### 3.1 제어 이론

앞 절에서 1P 성분은 주도적으로 윈드시어(wind shear)와 타워에 의한 바람 교란 효과(tower shadow)에 의해 발생된다고 말하였다. 1P 성분은 블레이드의 기계적 하중을 발생시킨다. 그로 인해 허브(hub), 너셀(nacelle), 타워는 블레이드의 움직임에 따라 영향을 받는다. 블레이드 날개는 3 개가 존재한다. 하지만 각 날개마다 받는 1P 성분은 120°간격으로 오차가 있을 것이다. 허브의 운동은 각 날개의 운동을 합산한 결과와 같다. 각 날개가 받는 힘을 푸리에 시리즈 전개한다면, 각 날개마다 1P, 2P, 3P... 가 존재한다. 전개한 이 식을 다 더하면 1P 와 2P 성분은 120° 간격 차이에 의해 상쇄되어 없어지고 오로지 3P, 6P, 9P... 성분만 남게 된다. 즉, 허브와 너셀, 그리고 타워는 3P 성분의 하중을 받는다. 각 블레이드의 루트(root) 부에 작용하는  $M_{YB1}, M_{YB2}, M_{YB3}$  (out-of-plane moment)에 대하여 식 (2)의 Coleman 역 변환을 수행하여 보자.  $M_{F1}$  은 각 블레이드에 작용하는 평면 외 방향 굽힘 모멘트의 산술 평균이고,  $M_{F2}$  와  $M_{F3}$  는 풍력 터빈의 너셀을 바람 방향으로 흔드는 틸팅 모멘트(tilting moment)와 요잉 모멘트(yawing moment)에 비례하는 량들이다.

$$\begin{cases} M_{F1} \\ M_{F2} \\ M_{F3} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3}\cos\psi & \frac{2}{3}\cos(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \frac{2}{3}\cos(\psi + \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{2}{3}\sin\psi & \frac{2}{3}\sin(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \frac{2}{3}\sin(\psi + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{cases} M_{YB1} \\ M_{YB2} \\ M_{YB3} \end{cases} \quad (2)$$

이번엔 계산된  $M_{F1}, M_{F2}, M_{F3}$  를 식 (3)의 Coleman 변환을 수행하여 보면, 다시  $M_{YB1}, M_{YB2}, M_{YB3}$  (out-of-plane moment)를 얻을 수 있는데, 여기서 중요한 점은 Coleman 역변환된 값을 제어하여  $M_{F2}, M_{F3}$  를 0 으로 만들 수 있다면, 각 블레이드에는 진동 성분이 제거된 DC 성

분의 힘만이 존재하게 된다는 것이다.

$$\begin{cases} M_{YB1} \\ M_{YB2} \\ M_{YB3} \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & \cos\psi & \sin\psi \\ 1 & \cos(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\psi + \frac{2\pi}{3}) \\ 1 & \cos(\psi + \frac{4\pi}{3}) & \sin(\psi + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{cases} M_{F1} \\ M_{F2} \\ M_{F3} \end{cases} \quad (3)$$

$\psi$  = 첫 번째 블레이드의 회전 방위

$$M_{YB1} = M_{F1} + M_{F2} \cos\psi + M_{F3} \sin\psi \quad (4)$$

위 식 (3)을 첫 번째 날개에 대하여 풀어 쓰면 식 (4)를 얻을 수 있다.  $M_{F2}$  와  $M_{F3}$  는 허브 고정 좌표계에서의 모멘트이며, 0P, 3P, 6P... 의 성분만을 가지고 있다. 아래 식 (5)를 보면 이 식에 의해 sin 과 cos 의 곱셈을 덧셈으로 변경할 수 있다.  $M_{F2}$  와  $M_{F3}$  가 3P 성분으로 sin 또는 cos 으로 진동한다면 식 (5)에서 x 는 3P 성분이며 y 는  $\psi$  이며 이는 로터 회전의 상수로 1P 성분이다. 즉, 식 (5)에 의해 곱셈에서 덧셈으로 식이 변경된다면 각 sin, cos 의 주파수 값은 1 이 더해지거나 빼지게 된다. 이와 관련된 그림이 Fig. 3 이다. Fig. 3 을 살펴보면, 고정 좌표에서 0P 성분은 회전 좌표에서 1P 와 관련 있으며 고정 좌표에서 3P 성분은 회전 좌표에서 2P, 4P 와 관련이 있다. 즉, Coleman 역 변환된 값의 0P 성분을 줄여서 다시 Coleman 변환한다면 1P 성분이 줄어 든다는 뜻이다.<sup>(3,4)</sup>

$$\begin{aligned} \sin x \sin y &= \{-\cos(x+y) + \cos(x-y)\} / 2 \\ \cos x \cos y &= \{\cos(x+y) + \cos(x-y)\} / 2 \\ \sin x \cos y &= \{\sin(x+y) + \sin(x-y)\} / 2 \end{aligned} \quad (5)$$

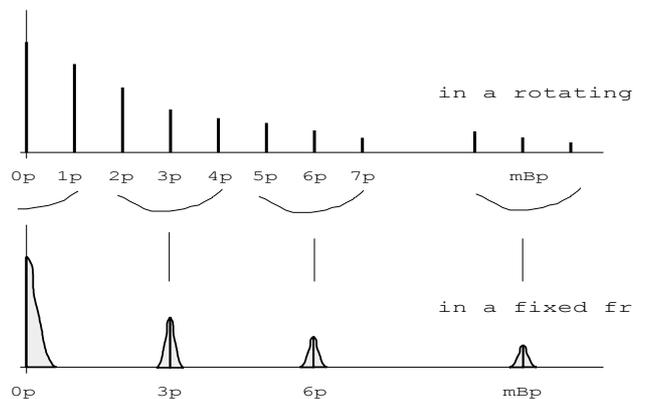


Fig. 3 Relations between rotating and fixed

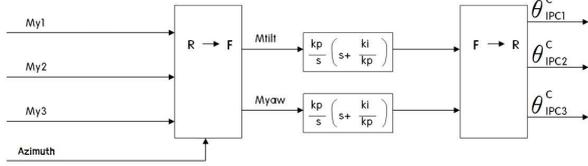


Fig. 4 Individual Pitch Control scheme

물리적인 시각에서 본다면, 블레이드는 회전 평면을 기준으로 전후 방향으로 움직일 것이다. 블레이드가 평면보다 앞에 있다면 이 운동은 마이너스 모멘트이며, 평면보다 뒤에 있다면 이 운동은 플러스 모멘트이다(블레이드 회전 좌표계를 참고). 우리의 목적은 반복 하중인  $M_{YB}$  을 줄이는 데 있는데,  $M_{YB}$  를 줄이려면 플러스 모멘트 일 때는 피치를 더 사용하여 바람을 맞는 면적을 줄이고, 마이너스 모멘트 일 때는 피치를 덜 사용하여 바람을 맞는 면적을 늘이면  $M_{YB}$  가 줄을 것이다.

3.2 제어 구조

Fig. 4 는 개별피치제어의 개략적인 구조이다. 풍력발전기로부터  $M_{YB}$  (out-of-plane moment)와  $\psi_1$  (azimuth angle)을 센싱하여 Coleman 역 변환을 한다. 그러면  $M_{F1}$   $M_{F2}$   $M_{F3}$  를 얻을 수 있는데 우리의 주 관심사는  $M_{F2}$   $M_{F3}$  이며, 이 두 신호를 0 이 되게 피드백 제어를 한다. 목표 값이 0 이므로 피드백 루프에서 고려하지 않는다. 피치 제어량을 산출하여 이 두 신호를 다시 Coleman 변환한 것이 피치 명령 신호가 된다. 개별피치제어의 피치명령은 통합피치제어기에서 계산된 신호와 합산되어 각각의 피치를 구동하는 명령신호가 된다.

3.3 제어기 설계

제어기를 설계 하려면 우선 Matlab 에서 해석을 하여야 한다. Fig. 5 는 개별피치제어를 포함한 풍력발전기 제어 시스템의 개략도 이다. 이 그림의 아래 부분은 파워 커브 추종을 위한 제어 구조이며, 위 부분이 개별피치제어 구조이다. 이 구조를 기반으로 Matlab Simulink 에서 모델링 하여 주파수 응답을 해석한다. Fig. 6 은 풍속이 18m/s 일 때, 개별피치제어를 포함한 피치루프의 주파수 응답이며 Ki/Kp 비에 따른 응답이다. Ki/Kp 비는 위에서부터 1 에서 10 까지 변경한 것이다.

$W_c$ (cross over frequency)을 1r/s 로 정하였다. 그 이

Table 1 Phase margin of IPC loop

Ki/Kp	1	2	3	4	5
PM	107.1	88.7	80.5	76.1	73.4
Ki/Kp	6	7	8	9	10
PM	71.6	70.2	69.2	68.4	67.8

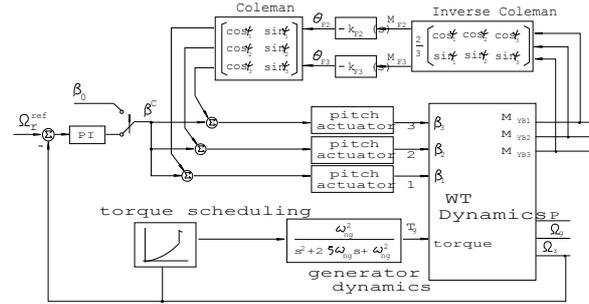


Fig. 5 Wind turbine control structure with IPC

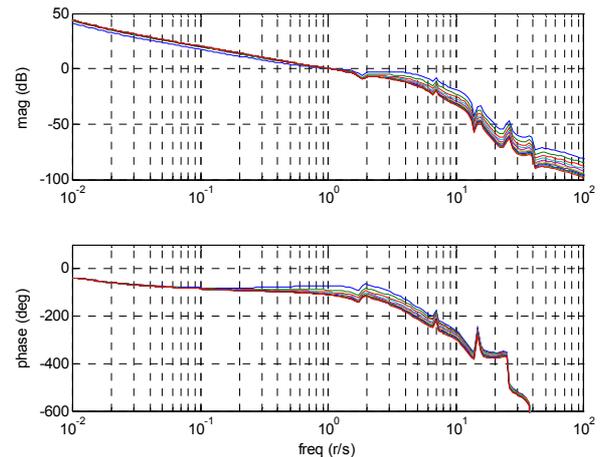


Fig. 6 Bode diagram for frequency response of IPC loop at 18m/s

유는 풍력의 난류특성과 윈드시어에 의해 발생하는 1P 성분(1.26r/s) 때문이다. 1r/s 이상으로 올리지 못하는 것은 고주파수 성분이 올라가기 때문이다. Table 1 은 Ki/Kp 비에 따른 PM 을 보여준다. Ki/Kp 비가 작을수록 PM 이 좋아지는 것을 알 수 있다. 적당한 PM 을 선정하게 되면 Ki/Kp 비를 정할 수 있으며,  $W_c$  가 1r/s 이기 때문에  $K_p$  의 값을 알 수 있다. 즉,  $W_c$  와  $K_i/K_p$  비율로  $K_p$ ,  $K_i$  계인을 구할수 있는 것이다. 계인을 정확히 정하기 위해서 GH Bladed 를 이용하여 시뮬레이션 결과를 분석한 후 계인을 최적화 한다. 결론적으로,  $W_c$  가 크거나  $K_i/K_p$  비율이 작을수록 PM 과 블레이드  $M_y$  의 하중 감소가 좋아지지만 피치 응답과 로터 스피드의 표준편차가 나빠지고,  $W_c$  가 작거나  $K_i/K_p$  비율이 클수록 그와 반대의 결과를 가져온다.

**Table 2** NREL 5MW Wind turbine data

Rotor diameter	126 m
Hub height	90 m
Gearbox ratio	97
Rated rotational speed	12.1 rpm
Cut in, cut out wind speed	4 m/s, 25 m/s
Rated wind speed	11.3 m/s

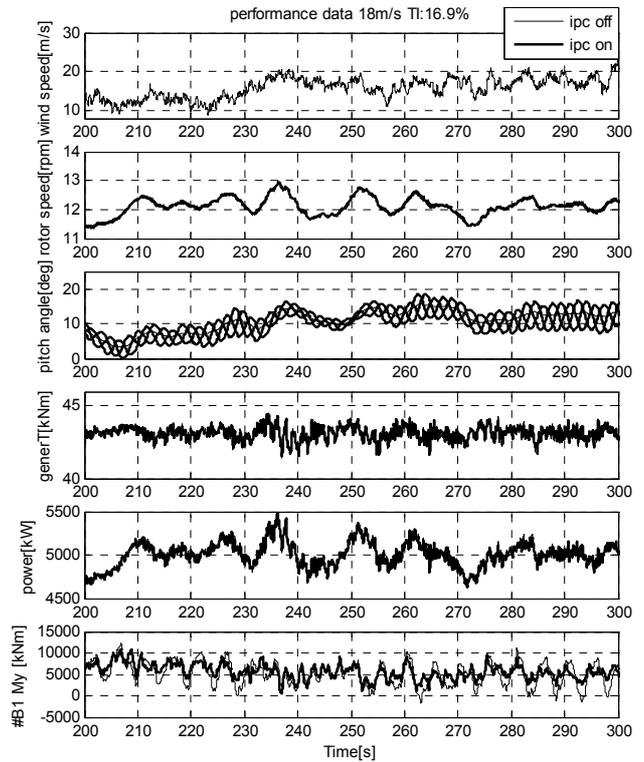
**Table 3** IPC on/off Quantitative Analysis

	$\Omega_{rotor}^{mean}$	$\Omega_{rotor}^{STD}$	$P_{elec}^{mean}$	$P_{elec}^{STD}$	$M_{YB1}^{DEL}$
unit	rpm	rpm	kW	kW	kNm
IPC off	12.1	0.283	5002.14	133.65	10010
IPC on	12.1	0.282	5002.12	132.49	6425
(on-off) /off [%]	0	-0.35	0	-0.9	-36

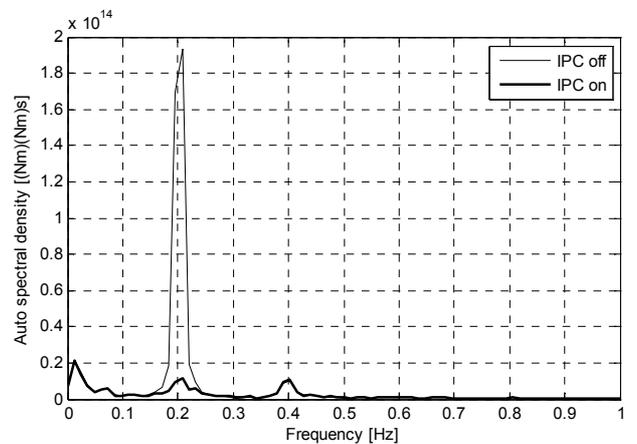
4. 시뮬레이션

본 논문은 NREL 5MW 풍력터빈을 기반으로 개별피치제어의 성능을 검증 하였다. NREL 5MW 풍력터빈의 제원은 Table 2 와 같다.<sup>(5)</sup> Fig. 7 은 Bladed 를 이용하여 평균풍속 18m/s, 난류 강도 16.9%로 시뮬레이션 한 결과이다. 가는 선이 IPC 를 사용하지 않은 결과이며, 굵은 선이 IPC 를 사용한 결과이다. 위에서부터 풍속, 로터 스피드, 각 블레이드의 피치 응답, 발전기 토크, 발전기 출력, 첫 번째 블레이드의 My 의 순으로 나열되어 있다. 총 600 초로 시뮬레이션 하였으며 Fig. 7 은 200 초에서 300 초 구간만 첨부한 것이다. 세 번째 창의 피치 응답을 보면 블레이드는 각각 개별적으로 작동되고 있으며 그 결과 여섯 번째 창의  $M_{YB1}$  (out-of-plane moment)가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 하지만 개별피치제어를 사용하더라도 로터 스피드, 발전기 토크, 발전기 출력 즉, 성능에는 아무런 영향을 미치지 않는다는 것을 볼 수 있다. Table 3 은 개별피치제어를 포함한 제어기의 성능과 블레이드 하중에 대해 정량적 분석을 한 결과이다.

성능 분석에는 로터 스피드와 발전기 출력의 평균 값과 표준편차를 IPC 를 사용한 것과 사용하지 않은 것에 대해 비교 분석 하였으며, 블레이드 하중 분석에는 첫 번째 블레이드 My 를 DEL(Damage Equivalent Load)로 계산하였다. DEL 은 동 등가하중으로 아래 식 (6)과 같다. m 은 S-N slope, n 은 사이클



**Fig. 7** Time simulation result



**Fig. 8** Autospectrum of #1 blade My

수, S 는 사이클 범위, T 는 시뮬레이션 시간, f 는 주파수 이다. 여기서, m 은 10 을 사용하였으며, 시뮬레이션 시간은 600 초, f 는 1 이다.<sup>(4)</sup>

$$DEL = \left( \frac{\sum_i n_i S_i^m}{Tf} \right)^{\frac{1}{m}} \tag{6}$$

로터 스피드와 발전기 출력을 비교하여 보면 두 사이의 값은 차이가 거의 없다. 하지만 첫 번째

블레이드 My 의 DEL 값을 비교하여 보면 36%의 큰 폭으로 하중이 감소하였다.

Fig. 8 은 위의 600 초 시뮬레이션 결과에 대해 첫 번째 블레이드 My 의 자기 스펙트럼(auto spectrum)을 그린 결과이다. X 축은 첫 번째 블레이드의 My 의 주파수이며, Y 축은 그에 해당하는 자기 스펙트럼 밀도이다. 가는 선이 IPC 를 사용하지 않은 것이며, 굵은 선이 IPC 를 사용한 것이다. 주파수가 0.2Hz 와 0.4Hz 일 때 크기가 큰 것을 확인 할 수 있다. NREL 5MW 의 정격 rpm 은 12.1 rpm 이므로 0.2Hz 가 바로 1P 에 해당한다. 마찬가지로 0.4Hz 는 2P 이다. 그래프에서 IPC 를 사용하게 되면 1P 성분이 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

NREL 5MW 풍력터빈의 블레이드 하중을 감소시키기 위한 개별피치제어에 대한 이론과 구조에 대해 설명하였고 제어기 설계에 대해 언급하였다. 시뮬레이션을 통해 개별피치제어에 대한 타당성을 검증하였으며 최종적으로 첫 번째 블레이드 My 가 받는 하중을 정량적으로 나타낼 수 있는 DEL 로 환산한 결과 36%의 하중이 감소함을 확인할

수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2010 년 정부(지식경제부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. (풍력발전시스템용 제어기술 및 기기 개발 2 차년도-20103010020040)

## 참고문헌

- (1) Nam, Y. S., 2009, *Wind Turbine Control*, GS Interscience, pp.175~191.
- (2) Bossanyi, E. A., 2003, "Individual Blade Pitch Control for Load Reduction," *Wind Energy*, Vol.6, pp.119~128.
- (3) van Engelen, T. G., 2006, "Design Model and Load Reduction Assessment for Multi-Rotational Mode Individual Pitch Control (Higher Harmonics Control)," ECN-RX-06-068. 2006 European Wind Energy Conference (EWEC 2006), Athens, Greece, 27 February-1 March.
- (4) Bossanyi, E. A., 2009, *GH Bladed Theory Manual*, Garrad Hassan, pp. 91~92.
- (5) Bossanyi, E. A., 2009, "Controller for 5MW Reference Turbine," *UpWind report*, pp. 11~18.