

# 브레이드 外形이 風力 터어빈의 空力性能에 미치는 영향

## Aerodynamic Performance of a Wind-Turbine Affected by Blade Configuration

손 병 찬\*  
(Son, Byung Chan)

### ABSTRACT

This paper presents the aerodynamic performances of horizontal axis wind turbines with non-twisted but tapered blades. Five configurations of blades, namely, one straight blade and four tapered blades with taper ratio of ranging from 0.1 to 0.7 have been simulated. The aerodynamic performances of the wind turbines have been determined over blade incidence angle of ranging from 2° to 6° and keeping same solidity and radius of them.

The results are presented comparing straight blade from four tapered blades for maximum power coefficient and tip losses against variation of taper ratio. It also shows that the wind turbine with taper ratio of 0.5 has the highest maximum power coefficient than others. And wind turbines with taper ratio below 0.2 have lower values of maximum power coefficients than straight one. The tip loss of straight blade is the largest and reduces slightly with the decrementation of taper ratio.

### 요 약

本 研究는 비틀림이 없는 테이퍼 날개를 갖는 수평축 風力 터어빈의 空力性能 변화에 관한 것이다. 風力 터어빈을 構成하고 있는 날개의 形態, 즉 테이퍼比가 터어빈의 空力性能에 미치는 영향을 알아보기 위해 回轉面積比와 터어빈의 반경을 일정하게 유지시키고 테이퍼比를 0.1에서 1까지, 날개의 붙임각을 2°에서 4°까지 차례로 변화시켜가면서 風力터어빈의 最大動力係數와 날개끝 손실의 변화를 比較하였다. 또한 날개의 外形을 간단화하기 위하여 날개의 비틀림을 0으로 하였으며, 날개단면은 NACA 4415를 선택하였다.

그 결과, 테이퍼比가 0.5인 날개를 갖는 風力터어빈의 空力特性이 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 테이퍼比가 0.2이하인 날개를 갖

는 風力터어빈의 最大動力係數는 구형날개의 最大動力係數보다 낮은 값을 가지므로 空力性能面에서 뒤떨어짐을 알 수 있다. 날개끝 손실은 구형날개일 경우 가장 크게 나타나며, 테이퍼比가 작아질수록 서서히 감소하였다.

### Nomenclature

- a : 축간섭계수
- a' : 회전간섭계수
- B : 날개 갯수
- C : 날개 시위
- C<sub>L</sub> : 날개 단면의 양력계수
- C<sub>D</sub> : 날개 단면의 항력계수
- C<sub>P</sub> : 풍력터어빈의 동력계수 (=  $P / \frac{1}{2} \rho V^3 \pi R^2$ )
- C<sub>P(max)</sub> : 풍력터어빈의 최대동력계수
- C<sub>R</sub> : 날개 밑 시위

\* 正會員 : 산업경제정책연구원

- $C_T$  : 날개 끝 시위
- $F$  : Prandtl의 보정계수
- $P$  : 풍력터어빈의 출력
- $R$  : 풍력터어빈의 반경
- $R_H$  : 허브 반경
- $r$  : 풍력터어빈의 국부 반경
- $V_\infty$  : 자유 풍속
- $V_1$  : 풍력터어빈의 후방의 풍속
- $V_r$  : 풍력터어빈의 회전면에서의 축방향 풍속
- $W$  : 날개 요소에 진입하는 상대 풍속
- $X$  : 날개 끝 속도비 ( $= R\Omega/V_\infty$ )
- $X_H$  : 허브에서의 속도비 ( $= R_H\Omega/V_\infty$ )
- $x$  : 국부 속도비 ( $= r\Omega/V_\infty$ )
- $\rho$  : 공기 밀도
- $\theta$  : 날개의 붙임각
- $\sigma$  : 회전면 적비 ( $= BC/\pi R$ )
- $\sigma_L$  : 국부 회전면 적비 ( $= BC/\pi r$ )
- $\Omega$  : 풍력터어빈의 각속도
- $W$  : 미끄럼 흐름의 각속도
- $\lambda$  : 날개의 테이퍼비 ( $= CT/CR$ )

I. 序 論

風力發電시스템은 부존 에너지 資源의 最大活用과 化石에너지 절감을 위해 석유과동 이후 代替에너지 開發의 일환으로 利用하기 위한 시도가 있었으며, 現在까지 研究를 계속하고 있다. 風力發電시스템에서 바람의 運動 에너지를 機械的인 에너지로 변환시켜 주는 장치를 風力터어빈이라 하며, 바람방향에 대한 터어빈 軸의 방향에 따라 수평축, 수직축 風力터어빈으로 區分하고 있다. 水平軸 風力터어빈의 대표적인 예로는 프로펠러형 風力터어빈을 들 수 있으며, 이러한 형태의 터어빈은 일반적으로 回轉速度가 크고 效率이 높으므로 현재까지 가장 많이 이용되고 있다.

風力터어빈의 效率은 시스템의 出力特性 및 가동률 등에 영향을 미치며,<sup>1)</sup> 또한 시스템의 경제성에도 영향을 미치는 중요한 인자이기 때문에 터어빈의 效率을 증가시키려는 노력이 계속되고 있다. <sup>2,3,4,6)</sup> 風力터어빈의 效率은 回轉面積化, 날개 끝 速度比, 날개 단면, 날개의 붙임각 및 날개의 外形에 따라 크게 변하게 된다.

本 研究에서는 날개의 外形, 즉 테이퍼비가 風力터어빈의 空力性能에 미치는 영향을 比較하기 위해 비틀림율이 0인 단순한 테이퍼 날개를 선택하였다. 또한 風力터어빈의 空力性能을 分析하기 위해 “momentum theory” “blade element theory” 및 “strip theory”를 基本理論으로 하였으며, 유한날개수의 보정을 위해 Prandtl의 “tip loss theory”를 적용하였다. 風力터어빈의 最大動力係數와 날개 끝 손실의 변화를 比較하기 위해 날개의 테이퍼비를 0.1에서 1까지, 날개의 붙임각을 2°에서 6°까지 차례로 변화시켜 空力性能을 예측하였다.

II. 性能分析 및 모델

1. 性能分析

風力터어빈이 回轉하고 있을때 터어빈의 각속도를  $\Omega$ 라하고, 이보다 작은 값을 갖는 slip stream의 각속도를  $w$ 라 하면 回轉運動量理論에서 slip stream의 상태를 표시할 수 있는 회전간섭계수,  $a'$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.<sup>5)</sup>

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \dots\dots\dots (1)$$

또한 軸運動量理論에서 축간섭계수,  $a$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a = \frac{V_\infty - V_r}{V_\infty} \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $V_r$ 은 風力터어빈의 回轉面을 통과할

손병찬

때의 風速으로, 배루누이 방정식에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$V_r = \frac{1}{2} (V_\infty + V_1) \dots\dots\dots (3)$$

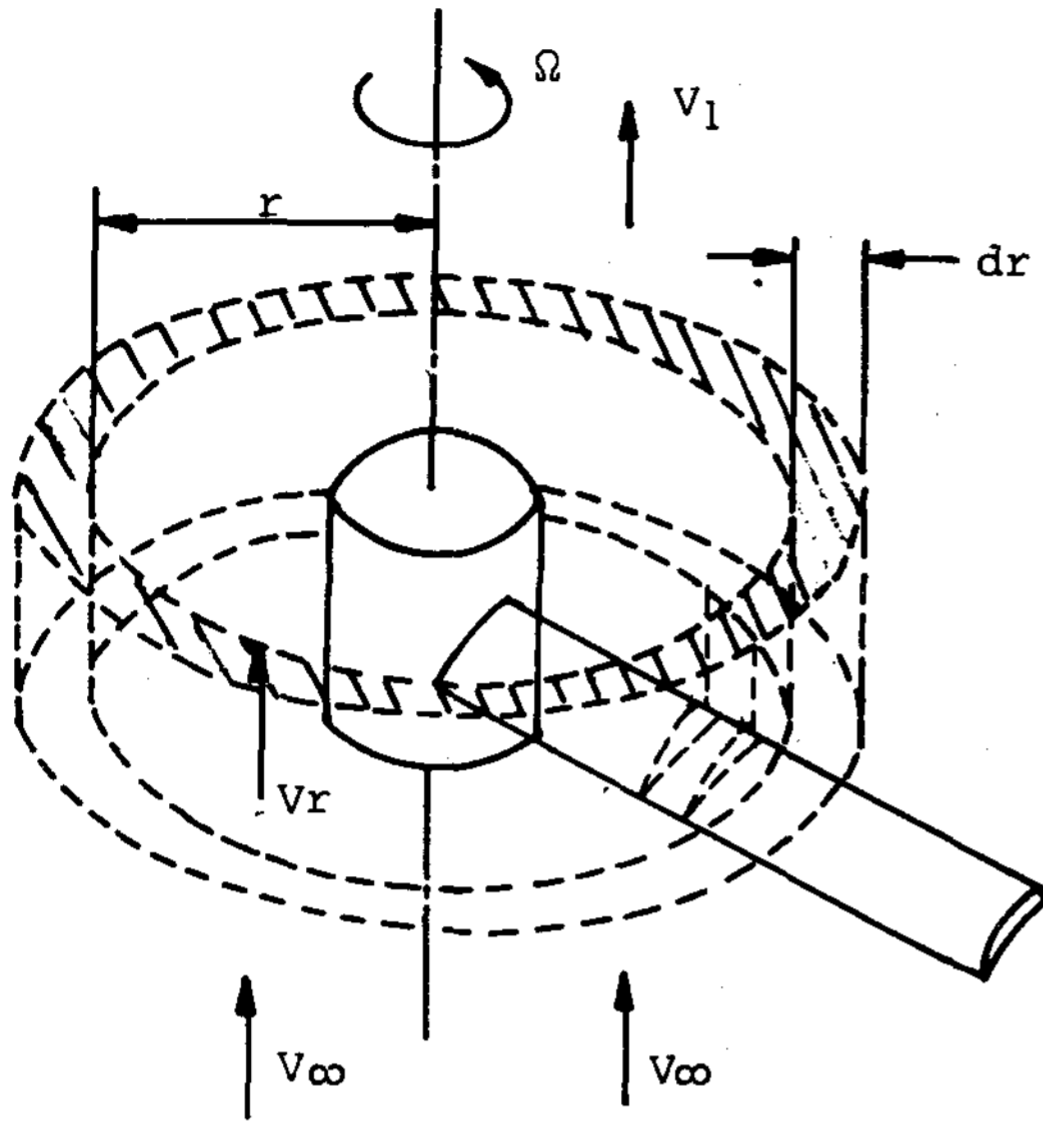


Fig. 1. Circular element of a wind turbine.

Fig. 1에서와 같이 원형미소면  $2\pi r dr$  에서 발생하는 미소출력,  $dT$ 와 미소토크,  $dQ$  는 運動量 理論에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$dT = 2\rho V_r (V_\infty - V_1) \pi r dr \dots\dots\dots (4)$$

$$dQ = 2\rho V_r (r\omega) \pi r^2 dr \dots\dots\dots (5)$$

식(1), (2), (3)을 이용하여 식(4), (5)를 바꾸어 쓰면

$$dT = 4\pi r \rho V_\infty^2 a (1-a) dr \dots\dots\dots (6)$$

$$dQ = 4\pi r^3 \rho V_\infty a' (1-a) \Omega dr \dots\dots (7)$$

을 얻을 수 있다. 風力터어빈에서 발생하는 動力,  $P$ 는

$$P = \int_{RH}^R 4\pi r^3 \rho V_\infty a' (1-a) \Omega^2 dr \dots (8)$$

로 風力 터어빈의 허브에서 팁까지 積分함으로 써 구할 수 있다. 터어빈의 날개끝 속도비,  $X$ 와 국부속도비,  $x$ 를 이용하여 식(8)을 바꾸어 쓰면

$$P = \frac{4\rho\pi R^2 V_\infty^3}{X^2} \int_{XH}^X (1-a) a' x^3 dx \dots\dots\dots (9)$$

로 되며, 動力係數,  $C_p$ 는

$$C_p = \frac{8}{X^2} \int_{XH}^X (1-a) a' x^3 dx \dots\dots (10)$$

가 된다.

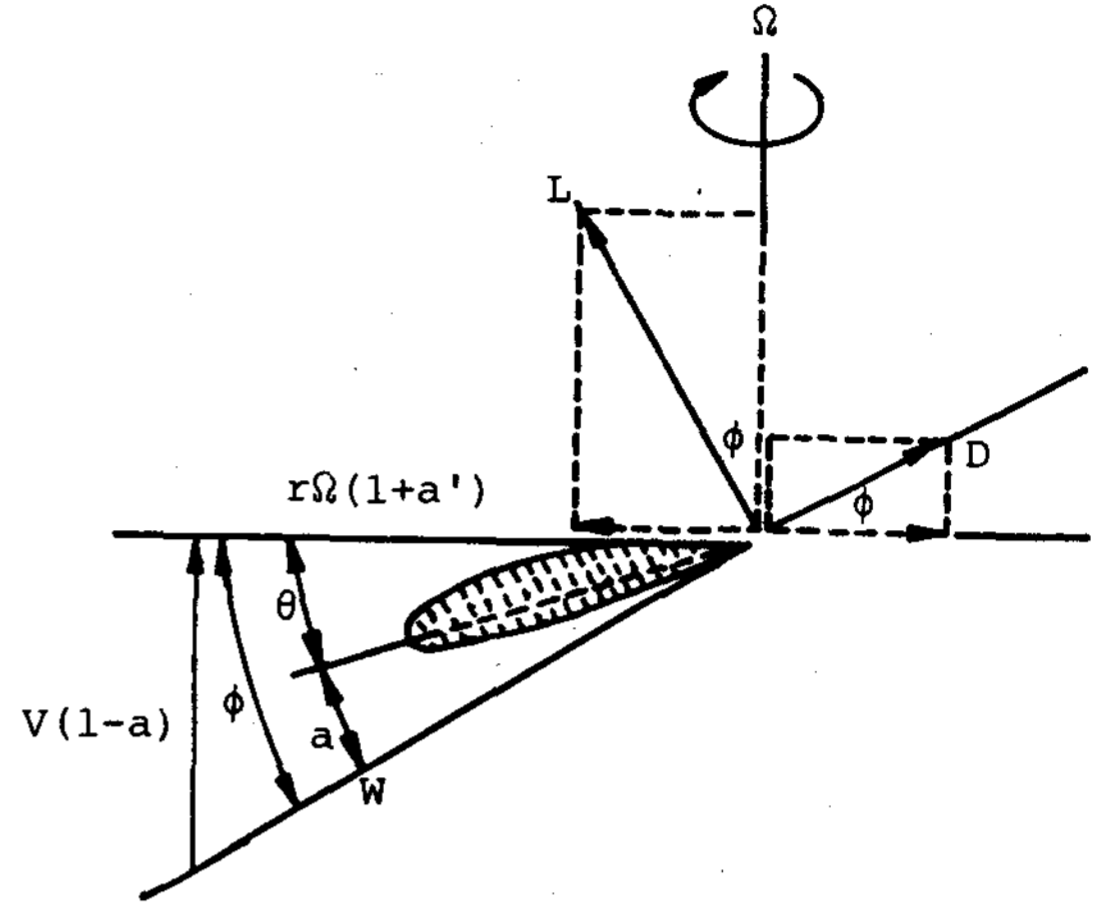


Fig. 2. Force and velocity diagram on the wind turbine element.

風力 터어빈이 回轉하고 있을때 날개요소에서 발생하는 空氣力과 速度線圖는 Fig. 2와 같으며 날개요소에서 발생하는 미소추력,  $dT$ 와 미소토크,  $dQ$ 는 다음과 같다.

$$dT = BC \left( \frac{1}{2} \rho W^2 \right) (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \dots\dots\dots (11)$$

$$dQ = BC \left( \frac{1}{2} \rho W^2 \right) (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r ds \dots\dots\dots (12)$$

또한 Fig. 2에서 風力 터어빈의 回轉面과 상대풍속  $W$ 가 이루는 각  $\phi$ 는 다음과 같다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V(1-a)}{r\Omega(1+a')} \dots\dots\dots (13)$$

이상에서 언급한 식에서 風力 터어빈의 空力性能을 결정할 수 있는 유용한 식을 얻기 위해 strip theory를 적용하여 식(6)과 식(11), 식(7)과 식(12)를 등치시키고 국부회전면적비,  $\sigma_L$ 을 이용하여 정리하면

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_L (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)}{8 \sin^2 \phi} \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_L (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)}{8 \sin \phi \cos \phi} \dots\dots\dots (15)$$

를 얻을 수 있다.<sup>9)</sup> 식(14),(15)에서 구한 간섭계수들은 風力 터빈의 날개갯수가 무한대인 경우와 같으므로 다음과 같은 Prandtl의 보정계수를 이용하여 유한날개수의 효과를 보정할 수 있다.

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f} \dots\dots\dots (16)$$

여기서 f는

$$f = \frac{B(R-r)}{2r \sin \phi} \dots\dots\dots (17)$$

이다. Prandtl의 보정계수를 식(6)과(7)의 우변에 포함시켜 다시 정리 하면

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_L (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)}{8F \sin^2 \phi} \dots\dots (18)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_L (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)}{8F \sin \phi \cos \phi} \dots (19)$$

로 된다. 식(18),(19)에서 a와 a'를 구하고 식(10)을 계산하면 유한날개수의 효과를 보정한 風力 터빈의 動力係數, Cp를 구할 수 있다.

### 2. 모델

風力 터빈의 空力特性을 比較하기 위하여 선택된 모델의 종류는 5가지이며 이의 諸元은 Table 1과 같다.

Distribution	Unit
Radius of Turbine R	2.94 m
Radius of Hub R <sub>H</sub>	0.43 m
Number of Blades B	3 개
Air Foil	NACA 4415 <sup>7,8)</sup>
Solidity Ratio BC/πr	0.065
Twist Ratio	0
Taper Ratio C <sub>T</sub> /C <sub>R</sub>	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1

모델로 결정된 風力 터빈은 風力發電用을 고

려하여 回轉面積比를 0.065로 하고 날개갯수를 3개로 하였다. 날개의 비틀림율은 터빈의 空力特性을 높여주는 역할을 하지만, 날개外形에 대한 性能比較를 위하여 비틀림율은 0으로 하였으며 구형날개를 비롯하여 4가지 다른 형태의 테이퍼比를 갖는 날개를 선택하였다.

### III. 結果 및 檢討

앞에 언급한 5가지 모델을 대상으로 風力 터빈의 空力特性을 分析하여 그 結果를 다음과 같이 比較하였다.

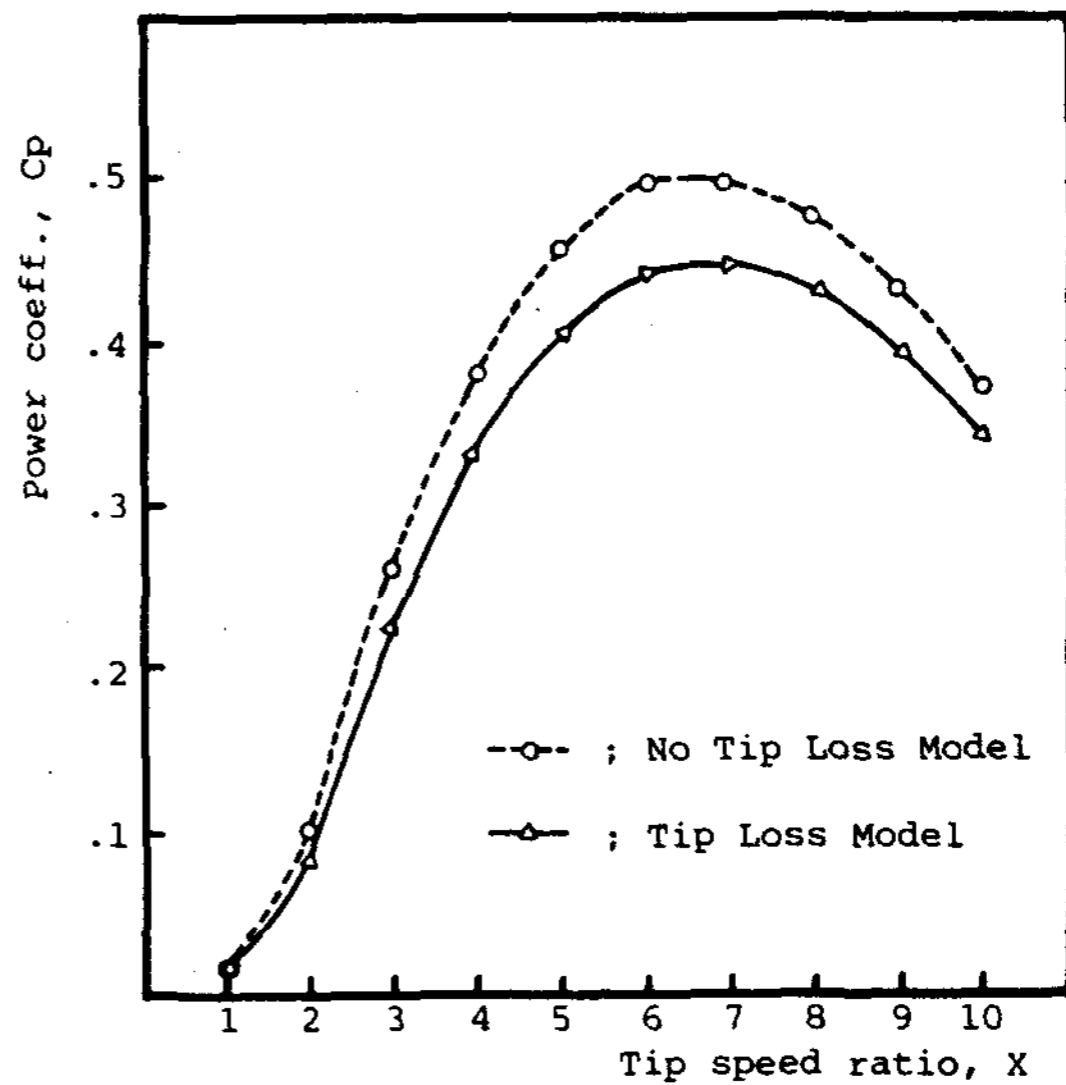


Fig. 3. Variation of power coefficient with tip speed ratio.

Fig. 3은 테이퍼比가 1인 구형날개를 갖는 風力 터빈의 날개끝 속도비에 따른 動力係數의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 점선으로 표시된 곡선은 날개끝 손실을 고려하지 않은 風力 터빈의 動力係數의 변화를 나타내며, 실선으로 표시된 곡선은 Prandtl의 날개 끝 손실 이론을 적용한 것이다.

Fig. 3에서 風力 터빈 날개의 붙임각은 6°로 고정되어 있는 상태이며, 날개끝 손실을 고려하지 않았을 경우 날개끝 속도비가 7일때 최

最大動力係數는 0.497의 값을 갖는다. 이에 반해 같은 상태의 風力 터어빈속에서 Prandtl의 보정계수를 적용한 결과 날개의 불임각이 6°일 경우 날개끝 속도비가 7일때 最大動力係數는 0.451의 값을 가져 약 9.3%의 동력손실이 발생함을 보여준다.

날개끝 손실을 보정한다는 것은 風力 터어빈의 回轉面積比를 증가시켜 a와 a'의 값의 변화를 가져오며, 특히 風力 터어빈에서 발생하는 토크에 직접 영향을 주는 a'의 값을 증가시킨다. 그러나 Prandtl의 보정계수, F는 1보다 작은 값을 갖는 것으로 날개끝 부분으로 갈수록 F의 값은 a'의 증가량보다 더 크게 감소하므로, 결국 風力 터어빈에서 발생하는 토크의 양을 감소시켜 風力 터어빈의 動力係數를 감소시킨다.

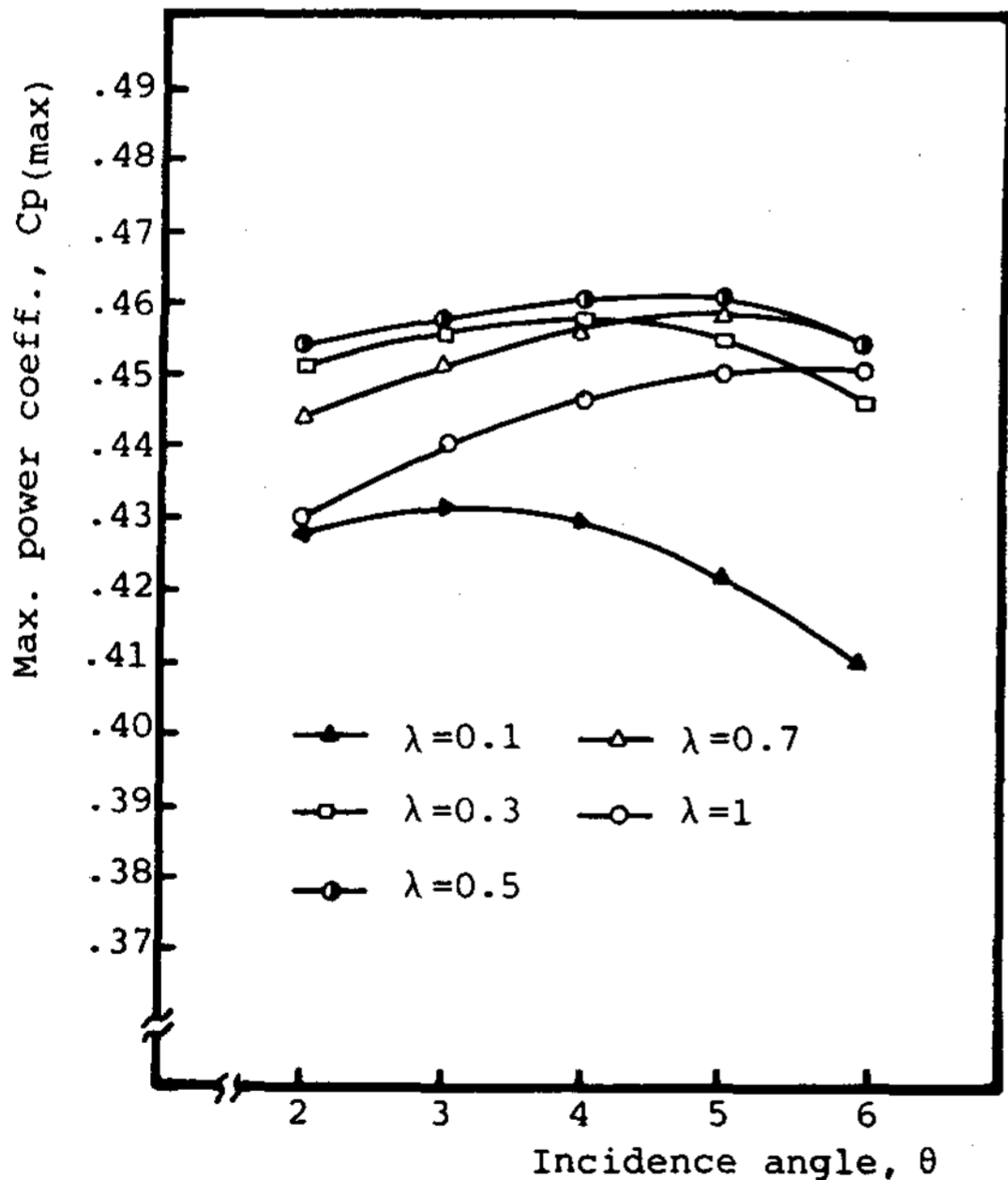


Fig. 4. Variation of max. power coefficient with blade incidence angle.

Fig. 4는 風力 터어빈을 구성하는 날개의 형태 및 불임각 변화에 따른 風力 터어빈의 最大動力係數의 변화를 나타낸 것이다. 이때 最大動力係數의 계산시 Prandtl의 날개끝 손실 이론을 적용하였다. Fig. 4의 각 점들은 날개

의 불임각에 따라 最大動力係數가 나타나는 것들만 표시한 것으로, 일반적으로 날개의 불임각이 風力 터어빈의 最大動力係數의 값에 큰 영향을 준다는 것을 보여준다.

$\lambda = 1$ 인 구형날개의 경우, 最大動力係數는 불임각이 증가할수록 서서히 증가하여 불임각 6°에서 최대값을 갖게 되며, 이 이상의 불임각에서는 最大動力係數의 값이 급히 감소하게 된다. 날개의 테이퍼比를 약간 줄여서  $\lambda = 0.7$ 로 하면 最大動力係數의 변화는  $\lambda = 1$ 일 경우와 비슷한 형태로 되며, 전반적으로 最大動力係數의 값이 증가한다. 또한 最大動力係數가 최대값을 갖는 불임각은  $\lambda = 1$ 인 경우보다 1°작은 불임각 5°에서 발생한다. 이러한 현상은  $\lambda = 0.5$ 로 하였을때까지 비슷하게 된다.

그러나 날개의 테이퍼比를 더욱 감소시켜  $\lambda = 0.3$ 으로 하면  $\lambda = 1$ 인 구형날개와 크게 다른 곡선으로 변하며 最大動力係數의 최대값도 구형날개에 비해 2° 낮은 불임각 4°에서 발생한다. 테이퍼比를 더 낮추어  $\lambda = 0.1$ 이 되면  $\lambda = 0.3$ 인 경우와 유사한 곡선을 이루며 最大動力係數가 변하게 되지만 最大動力係數의 최대값은 불임각 3°에서 발생하게 된다. 이와 같이 테이퍼比가 작아질수록 불임각이 감소하는 것은 風力 터어빈의 회전속도가 증가하여 발생하는 현상으로 판단된다.

Fig. 5는 날개의 테이퍼比에 따른 最大動力係數 및 날개끝 손실의 변화를 보여준다. 이때 最大動力係數의 값은 각각 최대값이 나타나는 불임각에서 얻은 것이며, 테이퍼比에 따라 다른 값의 불임각을 갖는다. Prandtl의 보정계수를 적용하지 않고 날개의 外形에 대한 空力性能의 변화를 살펴본 결과  $\lambda = 0.5$ 일때 最大動力係數의 값은 0.508로 다른 형태의 날개에 비해 가장 큰 값을 갖는다. 또한 테이퍼比가 0.3이하에서는 風力 터어빈의 空力性能이 급격히 감소하여  $\lambda = 0.1$ 인 경우 最大動力係數의 값이 0.448까지 감소하게 된다. Prandtl

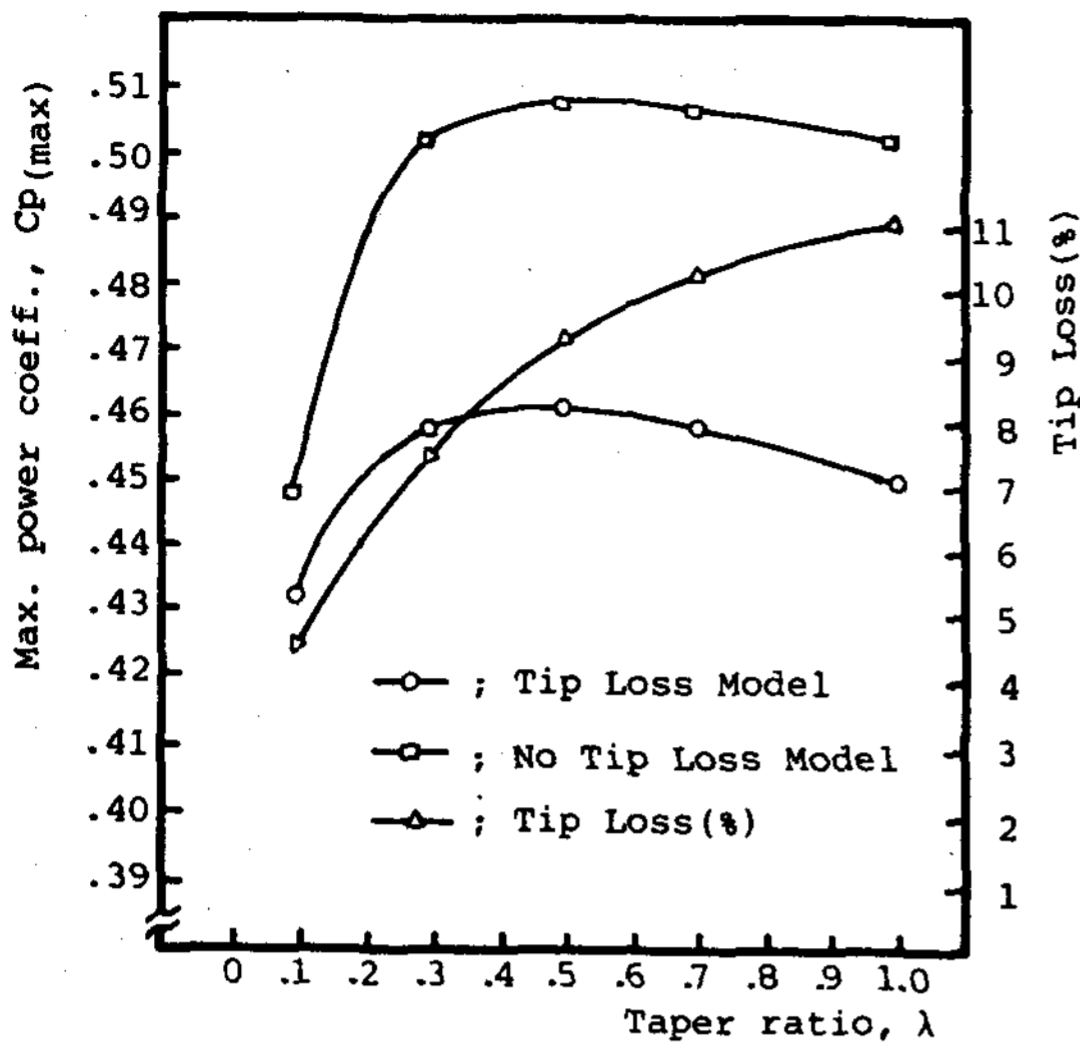


Fig. 5. Variation of max. power coefficient and tip loss with taper ratio.

의 보정계수를 사용하여 테이퍼비에 따른 날개 형태별 最大動力係數의 값을 比較한 결과  $\lambda = 0.5$ 인 경우에 最大動力係數의 값이 0.461로 최대가 되며 다른 경향은 Prandtl의 보정계수를 적용하지 않은 경우와 같게된다. 이때  $\lambda = 1$ 인 구형날개 및  $\lambda = 0.1$ 인 날개를 갖는 風力 터빈의 最大動力係數는 각각 0.451과 0.431이므로,  $\lambda = 0.5$ 인 날개를 갖는 風力 터빈은 구형날개 및  $\lambda = 0.1$ 인 날개를 갖는 風力 터빈에 비해 각각 2.2% 및 7%의 성능증가를 가져온다. 또한  $\lambda = 0.2$ 이하인 경우는  $\lambda = 1$ 인 구형날개보다도 最大動力係數의 값이 작아지므로 風力 터빈의 성능이 저하됨을 알 수 있다.

날개의 형태별로 날개끝 손실의 크기를 알아보기 위해  $Tip\ loss = \{ Cp_{(max)N \cdot T \cdot L} - Cp_{(max)T \cdot L} \} / Cp_{(max)N \cdot T \cdot L} (\%)$ 로 하여 정리한 결과  $\lambda = 1$ 인 구형날개에서 약 11%로 가장 크게 나타나며, 테이퍼비가 감소할수록 서서히 감소하여  $\lambda = 0.1$ 인 경우 약 4.5% 정도가 된다. 따라서 날개끝 손실은 어느 特定한 테이퍼비에서 最適狀態로 가장 작아지는 것이

아니라 테이퍼비와 더불어 서서히 감소된다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 結 論

本 研究를 통하여 얻은 結論은 風力 터빈의 空力性能에 영향을 미치는 요소는 여러가지가 있으나, 특히 風力 터빈의 最大動力係數는 날개의 붙임각과 날개의 外形에 의해 가장 큰 영향을 받는다는 것이다. 날개의 外形, 즉 테이퍼비는 風力 터빈의 空力性能을 향상시키지만  $\lambda = 0.2$ 이하의 테이퍼 날개를 갖는 風力 터빈은 구형날개를 갖는 風力 터빈보다도 空力性能이 저하된다. 또한 테이퍼 날개를 갖는 風力 터빈의 경우  $\lambda = 0.5$ 인 경우 空力性能이 가장 우수하다.

날개끝 손실은 特定한 형태의 날개에서 최소가 되지 않고 테이퍼비의 감소에 따라 서서히 감소하며, 구형날개일 경우 가장 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

#### REFERENCES

1. Gary L. Johnson, "Economic Design of Wind Electric Systems," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 2, March/April, 1978.
2. C.N. Jones, "Blade Element Performance in Horizontal-Axis Wind Turbine Rotor," Wind Engineering Vol. 7, No. 3, 1983.
3. R.E. Wilson, P.B.S. Lissaman and S.N. Walker, "Aerodynamic Performance of Wind Tubines," Oregon State Univ., June, 1976.
4. P.K.C. Tu and V. Kertesz, "SEACC; The Systems Engineering and Analysis Computer Code for Small Wind Systems," Rocky Flats Wind Energy Research Center, Golden, Colorado, August, 1983.

5. W.F Durand, "Aerodynamic Theory," Vol. 5, Stanford Univ., California, Jan., 1934.
6. C.G. Justus, et. al., "National Assessment of Potential Output from Wind-Powered Generators," J. Applied Meteorology, Vol. 15, No. 7, pp. 673-678, 1976.
7. Ira H. Abbott and Albert E. Von Doenhoff, "Theory of Wing Sections," Dover Publications, Inc., New York, June, 1958.
8. S.J. Miley, "A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications," Department of Aerospace Engineering Texas A & M Univ. College Station, Texas, Feb., 1982.
9. 손병찬외, "풍력발전기술개발", KE83-4, 한국동력자원연구소, 1983.