



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0017101
(43) 공개일자 2018년02월20일

- | | |
|---|---|
| <p>(51) 국제특허분류(Int. Cl.) <i>F03D 1/06</i> (2006.01)</p> <p>(52) CPC특허분류 <i>F03D 1/0633</i> (2013.01) <i>F05B 2240/30</i> (2013.01)</p> <p>(21) 출원번호 10-2018-7000576</p> <p>(22) 출원일자(국제) 2016년06월10일 심사청구일자 없음</p> <p>(85) 번역문제출일자 2018년01월08일</p> <p>(86) 국제출원번호 PCT/N02016/050125</p> <p>(87) 국제공개번호 WO 2016/200277 국제공개일자 2016년12월15일</p> <p>(30) 우선권주장 1510113.2 2015년06월10일 영국(GB)</p> | <p>(71) 출원인 스타토일 에이에스에이 노르웨이 스타방게르 엔-4035 포루스빈 50</p> <p>(72) 발명자 크나우어 안드레아스 노르웨이 5215 라이세클로스터 드랑스바겐 390</p> <p>(74) 대리인 제일특허법인</p> |
|---|---|

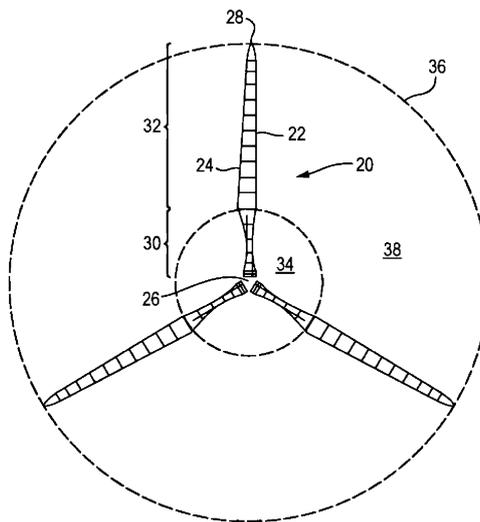
전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 발명의 명칭 후류 확산을 향상시키도록 형상지워진 로터 블레이드

(57) 요약

수평축 풍력 터빈 로터용 블레이드(20)는 반경방향-외측, 에너지-추출 부분(32) 및 반경방향-내측, 환기 부분(30)을 포함한다. 반경방향-내측 환기 부분(30)은, 종래 로터 설계로부터의 후류(wake)와 비교하여 더 많은 운동 에너지를 담고 있도록, 사용중에 로터 후류의 중앙 영역(34)을 환기하도록 형상지워진다. 후류의 중심(34)에서 증가된 바람 유동 속도는 추가적인 전단 응력을 생성하며, 증가된 후류 확산을 일으키는 대응하는 난류 확대(development)를 갖는다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류
Y02E 10/721 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

수평축 풍력 터빈용 블레이드에 있어서,

반경방향-외측, 에너지-추출 부분 및 반경방향-내측, 환기 부분을 포함하며, 상기 반경방향-내측 환기 부분은, 사용중, 바람으로부터 낮은 레벨의 에너지를 추출하고 그리고 선택적으로 후류(wake)의 중심 영역에 추가적인 에너지를 부여함으로써, 상기 로터의 후류의 중심 영역을 환기시키도록 형상지워지는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 반경방향-내측 부분은 상기 블레이드의 길이의 15%보다 더 큰, 그리고 바람직하게는 상기 블레이드의 길이의 50% 미만의 축방향 길이를 갖는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 블레이드의 상기 반경방향-내측 부분은, 사용중 상기 블레이드에 의해서 추출되는 전체 에너지의 2% 미만을 추출하도록 형상지워지는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 4

제 1 항 내지 제 3 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 반경방향-내측 환기 부분은, 정격 바람 속도에서 사용중에, 상기 로터의 즉각적인 다운윈드(downwind)의 상기 후류의 상기중심 영역에서 바람이 상기 로터의 즉각적인 업윈드(upwind)의 바람의 속도의 적어도 80% 속도를 갖도록 형상지워지는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 5

제 1 항 내지 제 4 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 블레이드의 상기 반경방향-내측 부분은, 바람으로부터 최대 에너지를 추출하기 위한 최적이지 아닌 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및/또는 공기 역학적 형상을 갖는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 블레이드는 상기 반경방향-외측 부분의 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및/또는 공기 역학적 형상으로부터 바람으로부터 최소 에너지를 추출하도록 형상지워진 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및/또는 공기 역학적 형상으로 전이되는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 7

제 1 항 내지 제 6 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 블레이드의 상기 반경방향-내측 부분은, 상기 로터가 최대 동력 계수에서 동작될 때, 상기 로터가 상기 반경방향-내측 부분에 의해서 휨쓸리는 영역에 대해 15% 미만의 평균 동력 계수를 달성하도록 형상지워지는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 8

제 1 항 내지 제 7 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 반경방향-외측 부분은, 상기 로터가 사용중이고 그리고 최대 동력 계수에서 동작될 때, 상기 블레이드의 상기 반경방향-외측 부분을 따라서 각각의 지점에서 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및 국부적인 블레이드 형상이 바람으로부터 에너지를 추출하기에 대략 최적이 되도록 형상지위지는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 9

제 1 항 내지 제 8 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 블레이드의 상기 반경방향-외측 부분은, 사용중에, 상기 로터가 최대 동력 계수에서 동작될 때, 상기 로터가 상기 반경방향-외측 부분에 의해서 휨쓸리는 영역에 대해 적어도 40%의 평균 동력 계수를 달성하도록 형상지위지는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 10

제 1 항 내지 제 9 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 블레이드는 적어도 40 미터의 길이를 갖는, 수평축 풍력 터빈용 블레이드.

청구항 11

수평축 풍력 터빈 로터용 로터에 있어서,

허브 및 상기 허브에 장착되는 제 1 항 내지 제 10 항 중 어느 한 항에 따른 적어도 2개, 바람직하게는 3개의 블레이드를 포함하는, 수평축 풍력 터빈 로터용 로터.

청구항 12

수평축 풍력 터빈, 바람직하게는 연안(offshore) 수평축 풍력 터빈에 있어서,

타워, 상기 타워의 상부에 장착되는 나셀(nacelle), 그리고 제 11 항에 따른 로터를 포함하며, 상기 로터는 상기 나셀의 발전기에 연결되어 전력을 생성하는, 수평축 풍력 터빈.

청구항 13

수평축 풍력 터빈의 배열에 있어서,

상기 풍력 터빈 중 적어도 하나는 제 12 항에 따른 풍력 터빈인, 수평축 풍력 터빈의 배열.

청구항 14

수평축 풍력 터빈 로터용 로터 블레이드를 설계하기 위한 컴퓨터의 지원을 받는 방법에 있어서,

바람으로부터 최대 동력을 추출하도록 상기 로터 블레이드의 반경방향-외측 부분을 설계하는 단계; 및

바람으로부터 낮은 동력을 추출하거나 또는 후류에 에너지를 부여함으로써, 그리고 낮은 항력을 생성함으로써, 상기 로터의 후류의 중심 영역을 환기시키도록 상기 로터 블레이드의 반경방향-내측 부분을 설계하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 15

제 14 항에 있어서,

상기 반경방향-내측 부분은 상기 블레이드의 길이의 15%보다 더 큰, 그리고 바람직하게는 상기 블레이드의 길이의 50% 미만의 축방향 길이를 갖는, 방법.

청구항 16

제 14 항 또는 제 15 항에 있어서,

상기 로터 블레이드의 상기 반경방향-외측 부분을 설계하는 단계는 적어도, 상기 반경방향-외측 부분을 따른 모든 지점에서 국부적인 블레이드 비틀림 각도를 에너지 추출을 위한 최적 받음각으로 설정하는 단계를 포함하는,

방법.

청구항 17

제 14 항 내지 제 16 항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 블레이드의 상기 반경방향-내측 부분을 설계하는 단계는, 상기 반경방향-내측 부분의 적어도 일부분을 따른 모든 지점에서 국부적인 블레이드 비틀림 각도를 에너지 추출을 최소화하는 최적 받음각으로 설정하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 18

수평축 풍력 터빈 로터용 로터 블레이드를 제조하는 방법에 있어서,

제 14 항 내지 제 17 항 중 어느 한 항에 따른 방법에 의해 로터 블레이드를 위한 설계를 생성하는 단계; 및 로터 블레이드를 상기 설계에 따라 제조하는 단계를 포함하는, 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 수평축 풍력 터빈용 로터 블레이드, 그리고 구체적으로 풍력 터빈 후류(wake)의 확산을 향상시키도록 형상지워진 로터 블레이드에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 수평축 풍력 터빈은 타워의 상부에 전기 발전기 및 수평 메인 로터 샤프트를 갖는다. 전력의 상업적 생산을 위해서 사용되는 수평축 풍력 터빈은 일반적으로 3-엽식(3-bladed)이고 그리고 컴퓨터-제어식 모터에 의해서 바람 안으로 요잉된다. 타워는 종종 70 내지 100 미터 높이의 범위이고 그리고 블레이드는 전형적으로 50 내지 75 미터의 길이를 갖는다. 그러나, 예를 들어 220 미터까지의 높이 및 85 미터까지의 블레이드 길이를 갖는 더 큰 풍력 터빈이 개발중에 있다.

[0003] 작동중에, 바람의 속도는 블레이드상에 양력을 발생시켜, 로터가 회전되게 하고, 이것은 다시 전기 발전기를 구동시킨다. 그러나 에너지의 추출은 바람을 감속시키고 그리고 후류(새도우(shadow))가 터빈뒤에 형성되도록 한다. 후류내의 바람은 로터 영역을 통과하지 않았던 바람보다 더 느린 속도를 갖는다. 또한, 로터에 의해서 영향을 받지 않은 바람의 속도에 비하여 후류내 바람의 더 느린 속도는 후류의 직경이 로터의 직경을 넘어서 팽창되도록 한다(즉, 후류 팽창).

[0004] 상대적으로 작은 지리적인 영역에서 풍력 터빈의 배열(즉, 풍력 발전 단지(wind farm))을 사용하는 것은 많은 장점, 예를 들어, 만약 동일한 개수의 풍력 터빈이 개별적으로 건설되는 경우에 비하여 더 싼 건설 비용, 공유된 사회 기반 시설 및 더 낮은 유지 관리 비용을 제공한다. 그러나, 배열내에서 풍력 터빈의 다른 풍력 터빈에 대한 근접성은 이들의 효율에 영향을 준다. 구체적으로, 하나의 터빈의 후류는, 다운윈드(downwind) 터빈이 상대적으로 더 낮은 바람 속도를 받기 때문에 다운윈드 터빈의 전력 출력을 감소시킬 것이다.

[0005] 전체 후류 조건에 있는 개별 풍력 터빈은, 업윈드에 위치한 터빈의 전력 출력에 비교하여 30-40% 만큼의 전력 출력 손실을 경험할 수도 있다. 그러나, 전체 단지에 걸쳐 평균된 전형적인 후류 손실은 대략 10-15%이다.

[0006] 터빈의 추가 다운윈드, 후류내 바람 속도는 난류 혼합에 의해서 후류를 둘러싸는 바람으로부터의 운동 에너지의 전달로 인해 증가된다. 난류 혼합은, 환경적 그리고/또는 해양환경(met-ocean) 조건, 예를 들어 지형 거칠기(terrain roughness) 또는 파고(wave height)로 인해서 뿐만 아니라 후류의 내측 및 외측에서 유동하는 공기 사이의 속도 차이로 인해 자연스럽게 발생된다. 따라서 후류-유발성 효율 손실의 문제는 풍력 터빈들을 더 멀리 분리시킴으로써 감소될 수 있고, 이로써 배열의 효율을 증가시킬 수 있다.

[0007] 이 이유 때문에, 대부분의 연안 풍력 터빈 단지에서, 약 6 내지 10 로터 직경의 터빈 간격이 일반적이다. 실제로, 이 간격은 단지의 가장 효율적인 전력 생산을 위한 상측 한계를 정의한다. 배열에서 풍력 터빈의 효율 및 따라서, 풍력 발전 단지의 면적을 증가시키지 않으면서 풍력 발전 단지의 전력 출력을 증가시키는 것이 바람직할 것이다.

[0008] 국제 공개 팜플렛 제 WO 2013/037374 호는 후류의 단면 형상을 조절함으로써 하류 터빈에 대한 풍력 터빈 후류

의 효과를 감소시키는 방법을 제안한다. 이것은, 더 적은 에너지가 후류의 2개의 대향측으로부터 추출되어, 타원형 후류를 일으키도록 회전중에 블레이드의 피치를 주기적으로 변경함으로써 달성된다. 이것이 하류 터빈에 대한 후류의 효과를 감소시키는 반면, 이것은 더 낮은 에너지 추출을 달성하는 큰 휩쓸리는 면적(swept area)으로 인해 개별 터빈에 대한 효율의 상당한 손실로 이어질 것이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) 국제 공개 팜플렛 제 WO 2013/037374 호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 본 발명은 수평축 풍력 터빈용 블레이드를 제공하며, 이 블레이드는 반경방향-외측, 에너지-추출 부분 및 반경방향-내측, 환기 부분을 포함하며, 상기 반경방향-내측 환기 부분은, 사용중, 바람으로부터 낮은 레벨의 에너지를 추출함으로써, 상기 로터의 후류의 중심 영역을 환기시키도록 형상지워진다. 선택적으로, 상기 블레이드는 어떤 실시형태에서, 즉 프로펠러와 같이 작동함으로써 유동에 약간의 에너지를 더 추가할 수도 있다.
- [0011] 이 블레이드 구성은, 터빈 후류의 중심이 종래의 로터 설계로부터의 후류에 비교하여 더 많은 운동 에너지를 포함한다는 것을 의미한다. 후류의 중심에서 이 증가된 바람 유동 속도는 추가적인 전단 응력을 생성하고, 증가된 후류 확산을 일으키는 대응하는 난류 확대를 갖는다. "에너지의 낮은 레벨을 추출하는 것"이 터빈을 구동하는 유용한 에너지를 추출하는 것 뿐만 아니라 항력으로 인한 에너지 추출 등을 가리킨다는 점이 이해되어야 한다. 예를 들어, 원형 형상을 갖는 루트 섹션은 상당한 항력을 생성하며, 이 항력은 유동으로부터 에너지를 추출하고 환기를 감소시킨다. 이러한 원형 형상이 유동에 에너지를 추가하는 양력을 생성하기 위해서 사용될 수 없다는 점이 또한 이해될 것이다.
- [0012] 반경방향-내측 영역을 통한 유동의 (바이패스(bypass) 또는 주입에 의한) 환기의 주된 효과는, 환기된 공기의 대량(mass) 추가에 의한 근-후류 영역(near-wake regime)에서 약간의 압력 증가를 제외하고, 터빈의 후방으로부터 발산되는 분출(jet)로부터의 운동량 추가이다. 로터의 상류의 증가된 압력과 로터의 하류의 더 낮은 압력 사이의 압력 차이에 의한 이 분출 유동은 후류의 중심에서 공기의 속도를 증가시킨다.
- [0013] 후류안으로 상대적으로 높은 속도 공기의 작은 분출을 도입함으로써(분출의 다운윈드 바람 속도는 자유-스트림 바람 속도보다 단지 조금 더 낮을 것이다), 후류의 상당한 확산이 터빈의 효율을 상당히 감소시키지 않으면서 달성될 수 있다(예를 들어, 반경방향-내측 부분은 블레이드의 25%인 경우, 이것은 터빈 효율의 단지 약 6% 손실과 균등하다)는 점이 발견되었다. 실제로, 하나의 실시형태에서, 로터의 즉각적인 다운윈드의 후류의 중심 영역은 로터의 즉각적인 업윈드의 바람 속도의 적어도 80%의 바람 속도를 갖는다.
- [0014] 바람직하게는, 반경방향-내측 부분은 블레이드의 길이의 15%와 40% 사이의, 그리고 바람직하게는 블레이드의 길이의 20%와 30% 사이의, 그리고 가장 바람직하게는 블레이드의 길이의 20%와 25% 사이의 축방향 길이를 갖는다. 바람직하게는 반경방향-외측 부분은 블레이드의 길이의 적어도 40% 및 바람직하게는 적어도 50%의 축방향 길이를 갖는다.
- [0015] 용어 반경방향-외측 및 반경방향-내측이 서로 상대적이라는 점이 주의되고 그리고 따라서 로터의 반경방향-최외측 및 반경방향-최내측 부분이 아닐 수도 있다. 특히, 반경방향-외측 부분은, 팁 효과가 설명되어야 하는 블레이드의 팁 부분을 포함하지 않을 수도 있다. 또한, 전이 부분은 반경방향 내측 부분과 반경방향-외측 부분 사이에 제공될 수도 있다. 전이 부분은 바람직하게는 반경방향-외측 부분의 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및/또는 공기 역학적 형상으로부터 반경방향-내측 부분의 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및/또는 공기 역학적 형상으로 부드럽게 전이된다.
- [0016] 반경방향-내측 부분의 길이가 더 클수록, 환기 효과가 더 크고 그리고 후류의 소산이 더욱 효과적이다. 그러나, 휩쓸리는 영역의 매우 큰 부분이 낮은 에너지 추출을 갖는다면, 개별 풍력 터빈의 에너지 손실은 하류에 대한 감소된 후류 효과의 이익보다 더 크다. 또한, 만약 환기 영역이 크다면, 팁 및 루트 와류(vortices)와 같은 2차적인 효과가 더 확연해질 것이다. 상기 범위는 터빈의 배열을 가로질러 최대 효율을 얻기에 최적이라

고 발견되었다.

- [0017] 최대 효과는, 바람이 로터의 반경방향-내측 부분을 통해서 필수적으로 계속적으로 통과될 때 달성된다. 따라서, 블레이드의 반경방향-내측 부분은 바람직하게는 최소 에너지를 추출하고 최소 항력을 유발하도록 형성 지워진다. 일 실시형태에서, 상기 블레이드의 상기 반경방향-내측 부분은, 사용중 상기 블레이드에 의해서 추출되는 에너지의 2% 미만을 추출하도록 형성지워진다.
- [0018] 블레이드의 반경방향-내측 부분은 바람직하게는 바람으로부터 에너지를 추출하기 위한 최적 블레이드 각도로부터 비틀려진다. 다시 말해, 반경방향-내측 부분은 최대 에너지 추출을 위한 최적 각도에 있지 않은 국부적인 블레이드 비틀림 각도를 갖는다. 이것은, 제조 또는 복잡성의 이유 때문에 감소된 코드 길이로 인해 반경방향 내측 부분이 약간 더 낮은 에너지를 추출하는 종래의 터빈 블레이드에 반대이다. 전형적으로, 이러한 종래 기술의 블레이드는 여전히 설계 한계내에서 최대 에너지를 추출하고자 할 것이고, 그리고 그래서 여전히 최적의 국부적인 블레이드 비틀림 각도로 배향될 것이다. 이러한 블레이드는 후류의 확산을 향상시키기 위해 충분한 환기 효과를 생성하지 않는다. 이들은 또한 로터 평면에서 에너지를 추가하거나 재분배하도록 내측 섹션에서 프로펠러와 같은 기능을 하지 않는다.
- [0019] 블레이드의 상기 반경방향-내측 부분은 바람직하게는, 상기 로터가 최대 동력 계수에서(즉, 로터의 설계된 TSR에서) 동작될 때, 상기 로터가 상기 반경방향-내측 부분에 의해서 휩쓸리는 영역에 대해 15% 미만, 그리고 바람직하게는 10% 미만의 평균 동력 계수를 달성하도록 형성지워진다. 반경방향 내측 부분은, 비설계 조건에 대해서, 예를 들어 블레이드가 설계 TSR 위에서 동작될 때, 프로펠러로서 동작하게끔 형성지워질 수 있다.
- [0020] "동력 계수"(Cp)는 에너지 추출의 효율의 측정치이다. 동력 계수는, 주어진 휩쓸리는 영역에 대해서 바람 동력에 대한 추출된 동력의 비율이다. 동력 계수는 블레이드의 세그먼트에 의해서 휩쓸리는 고리와 같은 영역의 단지 일부분에 대해서 또는 전체 휩쓸리는 영역에 대해서 계산될 수 있다.
- [0021] 비록 이것이 국부적으로 초과될 수도 있으나, 이론적으로 수평축 풍력 터빈의 전체 휩쓸리는 면적에 걸쳐서 달성될 수 있는 최대, 이론적인 동력 계수는 Betz 한계로 알려진 약 59.3%이다. 실제로, 최적 주속비에서도 현대의 풍력 터빈은 50%를 넘는 동력 계수를 거의 달성하지 못하고, 그리고 좀더 일반적으로 약 45% 내지 48%의 동력 계수를 달성하지 못한다.
- [0022] 풍력 터빈의 "주속비"(TSR 또는 λ)는 블레이드의 팁의 접선방향 속도와 바람의 실제 속도 사이의 비율이다. 최적 또는 설계 TSR은, 풍력 터빈의 최대 Cp가 달성되는 TSR이다. TSR은 전형적으로 정격 바람 속도 아래의 설계 TSR에서 유지되나, 정격 바람 속도 위에서, TSR은 감소된다.

과제의 해결 수단

- [0023] 일 실시형태에서, 상기 블레이드는 상기 반경방향-외측 부분의 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및/또는 공기 역학적 형상으로부터 바람으로부터 최소 에너지를 추출하도록 형성지워진 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및/또는 공기 역학적 형상으로 전이된다.
- [0024] 바람으로부터 최소 에너지를 추출하도록 형성지워진 반경방향-내측 부분의 부분은 바람직하게는 블레이드의 반경방향-내측 부분의 길이의 적어도 50%를 포함한다. 상기 로터가 최대 동력 계수에서 동작될 때, 상기 로터는 바람직하게는, 바람으로부터 최소 에너지를 추출하도록 형성지워진 반경방향-내측 부분의 부분에 의해서 휩쓸리는 영역에 대해 10% 미만, 그리고 바람직하게는 5% 미만의 평균 동력 계수를 달성한다.
- [0025] 바람직하게는 블레이드의 반경방향-내측 부분의 적어도 이 부분은, 상기 로터가 사용중이고 그리고 최대 파워에서 동작될 때, 블레이드의 반경방향-내측 부분의 이 부분을 따라서 각각의 지점에서 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및/또는 공기 역학적 형상이 바람으로부터 최소 에너지를 추출하기에 대략 최적(예를 들어, 2° 내, 그리고 바람직하게 1° 내)이도록 형성지워진다. 선택적으로, 블레이드의 일부분에 대한 비틀림 각도는, 프로펠러로서 작동되도록, 바람으로부터 최소 에너지를 추출하기 위한 최적 각도보다 더 클 수도 있다.
- [0026] 블레이드의 반경방향-내측 부분은 바람직하게는, 로터가 최대 동력 계수에서 동작될 때, 최소 항력을 생성하기 위해서 형성지워진다.
- [0027] 반경방향-외측 부분은 바람직하게는 바람으로부터 높은 레벨의 에너지를 추출하도록 형성지워진다. 따라서, 블레이드는 중심에서 낮은 에너지를 추출하는 부분을 포함하나, (휩쓸리는 영역의 대부분을 덮는)블레이드의 외측 부분은 블레이드에 대해서 여전히 높은 전체 동력 계수를 달성하면서 여전히 높은 레벨의 에너지를 추출한다.

- [0028] 바람직하게는, 블레이드의 반경방향-내측 부분과 블레이드의 반경방향-외측 부분은 에어로포일 형상을 갖는다. 높은 공기 역학적 성능을 갖는 에어로포일은 바람직하게는 블레이드 설계에서 적용된다.
- [0029] 바람직하게는, 반경방향-외측 부분은, 로터가 최대 동력 계수에서 동작될 때, 블레이드의 반경방향-외측 부분을 따라서 각 지점에서 국부적인 블레이드 비틀림 각도 및/또는 국부적인 공기 역학적 블레이드 형상이 바람으로부터 에너지를 추출하기 위해 대략 최적(예를 들어, 2° 내, 그리고 바람직하게 1° 내)이도록 형상지워진다.
- [0030] 상기 블레이드의 상기 반경방향-외측 부분은, 사용중에, 상기 로터가 최대 동력 계수에서 동작될 때, 상기 로터가 상기 반경방향-외측 부분에 의해서 휨쓸리는 영역에 대해 적어도 40%, 그리고 바람직하게는 적어도 45%의 동력 계수를 달성하도록 형상지워질 수도 있다. 반경방향-외측 부분에 의해서 휨쓸리는 영역을 가로질러 동력 계수는 바람직하게는 실질적으로 균일(예를 들어, 약 5% 내)하다.
- [0031] 본 로터 블레이드는 바람직하게는, 사용중 최대 동력 계수에서 동작될 때, 적어도 30%, 바람직하게는 적어도 35%, 좀더 바람직하게는 적어도 40% 그리고 가장 바람직하게는 최소 43%의 전체 동력 계수를 달성하도록 형상지워진다. 따라서, 환기되는 중심 부분으로부터 낮은 에너지가 추출되는 사실에도 불구하고, 블레이드는 여전히 상대적으로 높은 동력 계수를 갖는다.
- [0032] 하나의 실시형태에서, 블레이드는 연안 풍력 터빈을 위한 것이다. 이 블레이드 구성은 특히, 전형적으로 약 $Z0 = 0.0002m$ 의 거칠기 길이를 갖는, 상대적으로 낮은 지형 거칠기 때문에 연안 풍력 터빈에 적용 가능하다. 낮은 지형 거칠기는 바람이 낮은 자연적 난류를 경험하고 그리고 따라서 후류가 더 먼 거리에 걸쳐서 확산되는 점을 의미한다. 그러나, 블레이드는 또한 육지(on-shore) 풍력 터빈에, 그리고 특히 연안 지역과 같은 범위의 지형 거칠기를 갖는 영역, 예를 들어 초목이 없는 부드러운 북극 지형에서 적용을 위해서 적용 가능할 수도 있다. 예를 들어, $Z0 = 0.005m$ 미만의 거칠기 길이를 갖는 영역.
- [0033] 바람직하게는 블레이드는 적어도 50 미터의 길이를 갖는다. 본 발명은 특히 연안 풍력 발전 단지에서 전력 생산을 위해서 사용되는 타입의 대형 로터 블레이드에 적용 가능하다.
- [0034] 바람직한 양태에서, 본 발명은 또한 허브 및 허브에 장착된 상술된 바와 같은 적어도 2개, 바람직하게는 3개의 블레이드를 포함하는 수평축 풍력 터빈 로터용 로터를 제공한다. 터빈은 바람직하게는 슈라우드리스(non-shrouded) 터빈이다.
- [0035] 다른 양태로부터 보았을 때, 본 발명은 수평축 풍력 터빈을 위한 로터를 제공하며, 상기 로터는 허브 및 허브에 장착된 (바람직하게는 상술된 바와 같은) 2개이상의 블레이드를 포함하고, 상기 블레이드는, 로터가 최대 동력 계수에서 동작되고 있을 때, 로터의 제1, 반경방향-내측 휨쓸리는 영역이 10% 보다 더 작은 국부적인 동력 계수를 갖고, 그리고 로터의 제2, 반경방향-외측 휨쓸리는 영역은 40%보다 더 큰 국부적인 동력 계수를 갖는다.
- [0036] 또다른 양태로부터 보았을 때, 본 발명은 타워, 상기 타워의 상부에 장착된 나셀(nacelle), 그리고 전력을 생산하도록 상기 나셀의 발전기에 연결되는 상술된 바와 같은 로터를 포함하는 수평축 풍력 터빈을 제공한다. 위에서와 같이, 풍력 터빈은 연안 풍력 터빈이다.
- [0037] 본 발명은 또한 수평축 풍력 터빈의 배열을 포함하는 풍력 발전 단지를 제공하며, 풍력 터빈중 적어도 하나는 상술된 바와 같은 풍력 터빈이다. 풍력 발전 단지는 바람직하게는 연안 풍력 발전 단지이거나 또는 $Z0 = 0.005m$ 미만의 거칠기 길이를 갖는 영역에 위치되는 육지 풍력 발전 단지이다.
- [0038] 위에서 논의되는 바와 같은 블레이드를 포함하는 풍력 발전 단지는 이러한 포함에 의해서 현저한 효율의 상승을 달성할 수 있다. 더 빠르게 소멸되는 후류는 감소된 터빈 간격을 제공하며, 주어진 영역에서 동일한 또는 더 작은 파크(park) 후류 손실에 대한 더 많은 터빈의 장착을 허용한다. 파크 효율은 따라서 증가된다.
- [0039] 다른 양태로부터 보았을 때, 본 발명은 수평축 풍력 터빈 로터용 로터 블레이드를 설계하는 방법을 제공하며, 이 방법은 최대 동력을 추출하도록 로터 블레이드의 반경방향-외측 부분을 설계하는 단계; 및 로터의 후류의 중앙 영역을 환기시키도록 로터 블레이드의 반경방향-내측 부분을 설계하는 단계를 포함한다.
- [0040] 이 방법은, 예를 들어 설계 TSR에서, 최소동력을 추출하고 그리고 최소 항력을 생성하도록 로터 블레이드의 반경방향-내측 부분을 설계하는 단계를 포함할 수도 있다. 선택적으로, 이 방법은, 블레이드가 로터 영역내에서 에너지 전달을 가능하게 하는 프로펠러와 같이 내측 섹션에서 그리고 로터와 같이 외측 섹션에서 작동될 수도 있는 비설계 조건에서 에너지를 부여하는 로터 블레이드를 설계하는 단계를 포함할 수도 있다.
- [0041] 실제, 이 방법은 컴퓨터 분석, 예를 들어, 전산 유체 역학(CFD) 모델링 및 블레이드 요소 운동량 (BEM) 모델링

을 사용하여 실시될 수도 있을 것이다. 따라서, 이 방법은, 바람직하게는 수평축 풍력 터빈 로터용 로터 블레이드를 설계하는 컴퓨터-조력 방법이다.

- [0042] 바람직하게는, 반경방향-내측 부분은 적어도 15%의 축방향 길이 및/또는 50% 미만의 축방향 길이를 갖는다. 바람직한 실시형태에서, 축방향 길이는 블레이드의 길이의 15%와 40% 사이, 그리고 바람직하게는 블레이드의 길이의 20%와 30% 사이의, 그리고 가장 바람직하게는 블레이드의 길이의 20%와 25% 사이이다. 바람직하게는 반경방향-외측 부분은 블레이드의 길이의 적어도 40%의 축방향 길이를 갖는다.
- [0043] 바람직하게는 상기 로터 블레이드의 상기 반경방향-외측 부분을 설계하는 단계는 상기 반경방향-외측 부분을 따라서 모든 지점에서 국부적인 블레이드 비틀림 각도를 에너지 추출을 위한 최적 받음각으로 설정하는 단계를 적어도 포함한다. 바람직하게는 상기 로터 블레이드의 상기 반경방향-외측 부분을 설계하는 단계는 상기 반경방향-외측 부분을 따라서 모든 지점에서 국부적인 블레이드 공기 역학적 형상을 최대 에너지 추출을 위한 최적 형상으로 설정하는 단계를 또한 포함한다.
- [0044] 블레이드의 반경방향-외측 부분은 바람직하게는 반경방향-외측 부분에 의해서 휩쓸리는 영역을 가로질러 실질적으로 균일한 동력 계수를 달성하도록 설계된다.
- [0045] 바람직하게는 상기 블레이드의 상기 반경방향-내측 부분을 설계하는 단계는, 상기 반경방향-내측 부분의 부분을 따라서 모든 지점에서 국부적인 블레이드 비틀림 각도를 항력을 최소화하고 그리고 에너지 추출을 최소화하도록 또는 프로펠러로서 작동하도록 최적 받음각으로 설정하는 단계를 적어도 포함한다.
- [0046] 최소 항력 및 에너지 추출을 위해서 설계된 블레이드의 반경방향-내측 부분의 부분은 바람직하게는 이 부분에 의해서 휩쓸리는 영역을 가로질러 부드러운 운동력 계수 기울기를 달성하도록 설계된다.
- [0047] 블레이드의 반경방향-내측 부분을 설계하는 단계는 반경방향-외측 부분과 에너지 추출 및 항력 생성을 최소화하도록 설계된 반경방향-내측 부분사이에 부드러운 전이 부분을 설계하는 단계를 더 포함할 수도 있다.
- [0048] 블레이드 설계는 상술된 특징의 어느 하나 또는 전부를 달성하도록 블레이드를 설계하는 단계를 포함할 수도 있다.
- [0049] 또다른 양태로부터 보았을 때, 본 발명은 수평축 풍력 터빈 로터용 로터 블레이드를 제조하는 방법을 제공하며, 이 방법은 위에서 설명된 방법에 의한 로터 블레이드를 위한 설계를 생성하는 단계 및 상기 설계에 따라 로터 블레이드를 제조하는 단계를 포함한다.
- [0050] 본 발명의 어떤 바람직한 실시형태는 이제 첨부된 도면을 참조하여 단지 예시의 방식에 의해서 더욱 상세히 논의되며, 여기서:

도면의 간단한 설명

- [0051] 도 1은 종래 기술의 풍력 터빈의 3개의 블레이드를 도해하고;
- 도 2는 본 발명의 일 실시형태에 따른 풍력 터빈의 3개의 블레이드를 도해하고;
- 도 3a는 풍력 발전 단지내의 풍력 터빈의 후류를 도시하는 시뮬레이션된 풍력 발전 단지의 평면도이고;
- 도 3b는 도 3a에 도시되는 선을 따라서 풍력 발전 단지를 통해서 어떻게 바람 속도가 변하는지를 도시하는 그래프이고;
- 도 4a는 기준 테스트 로터용 3개의 블레이드의 사시도이고;
- 도 4b는 제1 환기식 테스트로터용 3개의 블레이드의 사시도이고;
- 도 5는 기준 테스트 로터의 블레이드 및 제1 환기식 테스트 로터의 블레이드, 및 제2 환기식 테스트 로터의 블레이드의 블레이드를 따른 반경방향 위치에 대한 블레이드 비틀림 각도를 도시하는 그래프이고;
- 도 6은 3개의 블레이드에 대한 블레이드를 따른 반경방향 위치에 대해서 5.5 TSR에서 예측되는 양력 계수를 도시하는 그래프이고;
- 도 7은 3개의 테스트 로터에 대한 TSR에 대해서 측정된 동력 계수를 도시하는 그래프이고;
- 도 8은 3개의 테스트 로터에 대한 TSR에 대해서 측정된 추력 계수를 도시하는 그래프이고;
- 도 9a 내지 도 9c는, 각각 기준 테스트 로터, 제1 환기식 테스트 로터 및 제3 환기식 테스트 로터의 각각의 다

운윈드의 4개의 위치에서 정규화된 공기 속도 프로파일을 도시하는 그래프이고;

도 10은 로터의 2 터빈 직경의 거리에서, 기준 테스트 로터, 제1 환기식 테스트 로터 및 제3 환기식 테스트 로터 각각의 정규화된 공기 속도 프로파일을 비교하는 그래프이고; 그리고

도 11은 로터의 7과 1/2 터빈 직경 다운윈드의 거리에서, 기준 테스트 로터, 제1 환기식 테스트 로터 및 제3 환기식 테스트 로터 각각의 정규화된 공기 속도 프로파일을 비교하는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0052] 도 1은 수평축 풍력 터빈의 종래의 로터용 전형적인 블레이드(2)의 예를 도시한다.
- [0053] 로터는 동일한 형상의 3개의 블레이드(2)를 포함한다. 각각의 블레이드(2)는 리딩 에지(4) 및 트레일링 에지(6)를 갖는 에어로포일(aerofoil)(그 길이를 따른 반경방향-가변 공기 역학적으로 형상지워진 섹션을 구비)이며, 이 에어로포일은 블레이드(2)의 반경방향-내측 루트(8)로부터 반경방향-외측 팁(10)까지 연장된다. 로터의 블레이드(2)는, 공기가 로터를 통과할 때, 양력이 바람방향에 수직인 방향으로 블레이드(2)의 각각에 의해서 생성되어 로터가 회전되도록 허브(미도시) 상에 이들의 루트(8)를 통해서 장착된다.
- [0054] 바람으로부터 최대 에너지를 추출하기 위해서, 현대의 풍력 터빈 블레이드(2)는 그 길이를 따라서 (국부적으로 최적화된 에어로포일의) 비틀림을 갖는다. 이것은 블레이드(2)의 최적 받음각이 주로 겹보기 국부적 바람 방향에 의해서 영향을 받기 때문이며, 이 겹보기 국부적 바람 방향은 증가되는 반경방향 위치에 따라 블레이드의 국부적 속도가 증가되기 때문에 반경방향 위치에 따라 변한다. 따라서, 블레이드(2)의 팁(10)이 로터의 허브에 더 근접한 블레이드(2)의 세그먼트보다 더욱 더 빠르게 이동되므로, 블레이드(2)는 터빈 블레이드(2)의 전체 길이를 따라서 최적 받음각을 달성하도록 그 길이를 따른 비틀림을 포함한다.
- [0055] 반경방향 블레이드 받음각 분포가 풍력 터빈의 설계 주속비(TSR)에서 단지 최적일 것이라는 점에 주의한다. 일반적으로 로터는 연간 평균 바람 속도(예를 들어, 북해에서, 약 10 m/s의 바람 속도) 및 설계 TSR(예를 들어, 약 8 내지 9의 TSR)에 근거하여 설계된다. 로터는 이상적으로 시동으로부터 정격 바람 속도(예를 들어, 북해의 예에서 12 m/s)까지 일정한 TSR을 달성하도록, 설계 TSR에서, 동작될 것이며, 이 정격 바람 속도는 최적 성능을 보장할 것이다. 따라서, 정격 속도 미만의 동작중에, 바람 벡터와 회전 속도 벡터 사이의 각도는 일정한 TSR 동작으로 인해 변하지 않는다. 정격 속도를 넘어서, 풍력 터빈 블레이드는 발전기에서 과도한 전력 생산 및 풍력 터빈 구조체에 대한 파손을 방지하기 위해서 바람으로부터 추출되는 에너지를 감소시키도록 피치된다.
- [0056] 풍력 터빈의 블레이드(2)는 일반적으로, 블레이드 팁 및 루트 영역을 제외하고 로터의 휩쓸리는 영역(12)을 가로질러, 실질적으로 균일한 에너지를 추출하도록, 즉 실질적으로 균일한 동력 계수를 갖도록 설계된다. 이것은 휩쓸리는 면적 전체에 대해서 가장 높은 동력 계수를 달성한다. 균일한 동력 계수는, 더 높은 속도에서와 같이 더 낮은 속도에서 동일한 에너지를 추출하도록 (도 1에서 보여질 수 있는 바와 같이) 감소되는 반경에 따라 블레이드의 코드 길이를 증가시킴으로써 달성된다.
- [0057] 제조 이유 때문에, 블레이드(2)의 반경방향-내측 부분(14)은 종종 대응하는 휩쓸리는 면적에 대한 균일한 동력 계수를 달성하기 위해서 요구되는 코드 길이보다 더 짧은 코드 길이로 설계된다. 이것은 짧은 반경에서 균일한 에너지 추출을 위해서 요구되는 코드 길이가 매우 크고, 그리고 어떤 경우에는 이송 또는 제조 능력을 넘기 때문이다. 또한, 공기 역학의 비-선형적 특성으로 인해, 매우 복잡한 공기 역학 설계가 짧은 반경에서 충분한 동력 생성을 달성하기 위해서 요구된다. 그러나, 반경방향-내측 부분(14)의 받음각은 여전히 최적 받음각에 있고 그리고 반경방향-내측 부분은 여전히 중간의 동력 계수를 달성한다.
- [0058] 도 2는 본 발명의 일 실시형태에 따른 수평축 풍력 터빈의 3-블레이드 로터용 3개의 블레이드(20)를 도해한다.
- [0059] 위에서와 같이, 각각의 블레이드(20)는 리딩 에지(22) 및 트레일링 에지(24)를 갖는 에어로포일을 정의하며, 이 에어로포일은 블레이드(20)의 루트(26)로부터 블레이드(20)의 팁(28)까지 연장된다. 그러나, 이 실시형태에서, 블레이드(20)는 환기 효과가 생성되게끔 블레이드의 반경방향-내측 부분(30)(예를 들어, 블레이드길이의 20% 내지 25%)이 바람으로부터 감소된 운동 에너지를 추출하도록 설계된다. 블레이드(20)의 반경방향-외측 부분(32)은 여전히 휩쓸리는 영역을 통과하는 바람으로부터 최대 레벨의 에너지를 추출하도록 설계된다.
- [0060] 이 블레이드 구성은, 터빈 후류의 중심이 도 1에서와 같은 종래의 로터 설계로부터의 후류에 비교하여 더 많은 운동 에너지를 포함한다는 것을 의미한다. 후류의 중심에서 이 증가된 바람 유동 속도는 추가적인 전단 응력을 생성하며, 대응하는 난류 발전을 구비하며, 이는 증가된 후류 확산을 일으킨다.

- [0061] 중심 영역(34)을 통한 환기 또는 바이패스 유동의 주요한 효과는 터빈의 후방의 중심으로부터 발산하는 상대적으로 높은-속도 공기의 분출로 인한 운동량의 추가이다. 로터의 상류의 증가된 압력과 로터의 하류의 더 낮은 압력 사이의 압력 차이에 의해서 부분적으로 구동되는 이 분출 유동은 후류의 중심에 난류 혼합 효과를 생성한다.
- [0062] 이 환기 효과를 달성하기 위해서, 로터 중심에서, 반경방향-내측 부분(30)의 블레이드 형상은 비틀려지고 그리고 유선형으로 된다(도 2 참조). 이 수단을 통해서, 로터의 휩쓸리는 영역(36)의 중심 환기 영역(34)은 낮은 동력 계수를 갖고, 즉 로터의 휩쓸리는 영역(36)의 반경방향-외측 부분(38)과 비교하여, 바람으로부터 실질적인 운동 에너지를 추출하지 않는다. 반경방향-내측 부분(30)은 설계 조건에서 최소 에너지 추출을 달성하도록 형상지워지면, TSR이 설계TSR보다 더 큰 비설계(off-design) 조건에서, 내측 부분(30)은 프로펠러와 같이 동작될 수 있고 그리고 유동에 에너지를 추가할 수 있다. 따라서, 로터 평면에서 에너지는 재분배된다.
- [0063] 도 2에 도시된 설계에 대해서, 반경방향-외측 부분(32)은 휩쓸리는 영역(38)을 가로질러 약 40%의 높은 동력 계수를 달성한다. 동력 계수는 최적 조건하에서 이 휩쓸리는 영역(38)을 가로질러 실질적으로 균일(즉, 약 5% 이내)하다.
- [0064] 반경방향-내측 부분(30)은 10% 미만의 평균값을 갖는 휩쓸리는 영역을 가로질러 낮은 동력 계수를 달성한다.
- [0065] 반경방향-내측 부분(30)은 이상적으로 바람으로부터 최소 에너지를 추출한다. 그러나, 공기 역학적 이유 때문에, 반경방향-내측 부분(30)은, 블레이드가 반경방향-외측 부분(32)의 내측 단부의 각도로부터 최소 에너지 추출을 위한 블레이드 각도로 비틀려지는 전이 부분을 포함한다. 반경방향-내측 부분(30)의 전이 부분은 블레이드의 길이의 약 10%이다. 반경방향-내측 부분(30)의 나머지는 최적 조건하에서 이 휩쓸리는 영역(34)을 가로질러 5% 미만의 실질적으로 균일한(즉, 약 5% 내) 동력 계수를 달성하도록 형상지워진다.
- [0066] 중심의 환기되는 영역(34)은 로터의 전체 휩쓸리는 면적(36)의 대략 4% 내지 6%에 해당된다. 따라서, 종래 로터가 실질적으로 균일한 동력 계수를 달성하는 것을 목표로 하기 때문에, 비록 종래의 로터에서, 로터의 반경방향-내측 부분(14)은 약간 낮은 동력 계수를 갖고 그래서 실제 동력 손실을 더 낮출 수도 있으나, 종래 로터에 비교하여 터빈의 효율의 손실이 또한 대략 4% 내지 6%이다. 비설계 조건에서, 동력 계수는 음으로 될 수도 있고 그리고 내측 구간은 프로펠러로서 작동된다.
- [0067] 동작중, 중앙 영역(32)을 통한 바람 유동은 (종래 로터에 비교하여) 증가되고, 그리고 터빈 뒤 후류의 각각의 내측 부분은 동력을 공급 받는다. 로터 뒤 유동장은 휩쓸리는 영역(36)의 반경방향-외측 부분(38)으로부터 추출되는 에너지로 인한 후류의 외측 유동장, 및 내측 동력 공급된 영역을 포함한다. 내측 후류 영역의 증가된 운동 에너지 및 터빈 뒤 바람 속도 회복율로 인해 혼합 효과 및 난류 증가가 20%까지 증가될 수 있다.
- [0068] 연안 풍력 발전 단지에 대해서, 바람 속도 회복 거리의 이 감소는 각각의 터빈으로부터 개별 동력 손실을 상쇄하기에 충분하게 배열내 다른 터빈의 효율을 향상시킨다. 배열의 구성에 따라, 단지의 전체 동력 생산은 이 실시형태의 로터 블레이드를 사용할 때 3%까지 상승할 수 있다. 대안적으로, 이 구성은 더 높은 터빈 밀도가 활용될 수 있도록 한다.
- [0069] 도 3a는 셰링엄 솔(Sheringham Shoal) 풍력 발전 단지의 평면도이다. 각각의 터빈의 FUGA(등록상표) 시뮬레이션 후류가 도해되며, 더 진한 그림자가 더 낮은 바람 속도와 동일시된다. 도 3b는 도 3a에 도시되는 선(50)을 따른 바람 속도를 도해한다.
- [0070] 셰링엄 솔 풍력 발전 단지는 1100 GWh 범위의 전형적인 연간 에너지 생산을 갖는다. 위에서 논의된 풍력 터빈 블레이드 설계의 성공적인 적용은 34 GWh(50¢/MWh의 UK 현물 가격에 근거하여, 매년 1.7m GBP와 균등함)까지 연간 에너지 생산을 증가시킬 것으로 예상된다.
- [0071] 이 개념을 테스트하기 위해서, 3개의 로터 세트가 BEM 이론에 근거하여 설계되었고 그리고 풍동에서 시험되었다. 이 세트는 하나의 표준 로터와 2개의 환기식 로터로 구성된다. 각각의 로터는 동일한 형상의 3개의 블레이드를 포함하였다. 로터 설계에서, 낮은 레이놀즈 넘버에서 작동 및 압축성 효과가 고려되었다. 테스트되는 블레이드는 0.4 미터의 길이를 가졌다. 그러나, 실제 스케일에서, 블레이드는 50 내지 75 미터의 영역 내 길이를 가질 것이다.
- [0072] 도 4a 및 도 4b는 이 로터의 2개(100, 200)의 블레이드를 도해한다(제3 로터(300)의 블레이드는 제2 로터(200)의 블레이드로부터 구별되기가 시각적으로 어렵고 그리고 여기에 도시되지 않는다. 도 5는 블레이드를 따른 반경방향 위치에 대해서 3개의 로터(100, 200, 300)의 블레이드 비틀림 각도를 도시한다. 도 6은 블레이드를 따

른 반경방향 위치에 대해서 로터(100, 200, 300) 각각의 BEM 예상 국부 양력 계수를 도시한다.

[0073] 로터(100)는 도 4a에 도시되는 바와 같은 표준 또는 기준 로터(100)였다. 이 로터(100)는 6의 TSR에 대해 동력 계수를 최적화하도록 설계되었다. 이것의 블레이드 비틀림 각도는 도 5에서 선(102)으로서 보여진다. 도 6에서 선(104)으로부터 보여질 수 있는 바와 같이, 블레이드의 양력 계수는 전체 길이에 걸쳐서 상대적으로 고르다. 이 로터(100)는 따라서 양호한 성능을 갖는 표준 로터이다.

[0074] 제2 로터(200)는 환기식 중심을 제공하도록 설계되었다. 이 로터(200)는 비틀림 각도(θ)를 회전시킴으로써 에너지의 추출을 최소화하도록 설계되었다. 설계 TSR에서 추출되는 에너지를 최소화하기 위해서, 설계 비틀림 각도는 초기에 받음각과 동일하게 설정되며, 다음과 같이 주어진다:

$$\theta(r) = \text{atan}\left(\frac{1}{\text{TSR} \cdot \frac{r}{R}}\right)$$

[0075]

[0076] 여기서:

[0077] TSR = 주속비

[0078] R = 로터 반경

[0079] r = 반경방향 위치

[0080] 이 기본 등식은, 제로(0) 받음각에서 양력이 발생되지 않는 대칭 에어로포일에 대해서만 유효하다는 점이 주의된다. 비대칭 포일에 대해서, 제로 양력 발생을 위한 각각의 각도는 최적화에서 고려되어야 할 것이다.

[0081] 도 4b의 선(202) 및 도 5의 선(204)은 블레이드의 반경방향 외측 부분(32)의 블레이드 비틀림 각도 및 코드 길이가 제1 로터(100)의 블레이드의 것과 유사함을 보여준다. 그러나, 반경방향 내측 부분(30)에 대해서, 비틀림 각도는 기준 로터(100)에 대한 것보다 더 크고 그리고 블레이드 코드 길이는 기준 로터(100)에 대한 것보다 더 짧다. 이것은 결합되어 도 6에서 보여질 수 있는 바와 같이, 반경방향 내측 부분의 상당히 더 낮은 양력 계수로 귀결된다.

[0082] 반경방향 내측 부분(30) 및 반경방향 외측 부분(32) 사이에, 비틀림 각도 및 코드 길이가 에너지 추출을 최소화하는 각도로부터 에너지 추출을 최대화하는 각도로 전이하는 전이 부분(31)이 있다.

[0083] 제3 로터(300)는 환기식 중심을 제공하도록 또한 설계되었다. 이 로터(300)는 제2 로터(200)에 비교하여 후류의 환기를 증가시키도록 설계되었다. 로터(300)의 반경방향 내측 부분(30)은 음의 축방향 유도를 부여하도록 형상지워진다. 다시 말해, 로터(300)의 이 부분(30)은 추가적인 에너지를 후류안으로 전달하도록 프로펠러로서 동작한다.

[0084] 도 5의 선(302)으로부터 보여질 수 있는 바와 같이, 반경방향 최내측 부분(30)의 블레이드 비틀림 각도는 제1 환기식 로터(200)에 대한 것보다 더욱더 높다. 이것은, 도 6의 선(304)으로부터 보여질 수 있는 바와 같이, 양력 계수를 더 감소시키며, 이는 실제로 블레이드가 프로펠러로 작동되는 블레이드의 부분에 대해서 음으로 된다.

[0085] 로터(100, 200, 300)의 동력 계수(C_p) 및 추력 계수(C_t)는 많은 TSR 값에서 풍동 테스트 동안 측정되었고, 그리고 결과는 도 7 및 도 8 각각에 보여진다.

[0086] 기준 로터(100)는 $C_p = 0.44$ 의 최대 동력 계수에 도달되었으며, 각각의 $C_t = 0.8$ 이며, 이는 종래의 풍력 터빈 로터에 대한 전형적인 값들이다. 제1 환기식 로터(200) 및 제2 환기식 로터(300)는 $C_p = 0.42$ 및 $C_p = 0.37$ 의 각각의 최대값에 도달되었다. 이는 각각 대략 5% 및 대략 16%의 감소에 대응하였다. 효율의 감소는, 유동의 운동 에너지가 추출되지 않는 내측 로터 섹션의 환기로 인해서였다.

[0087] 공기 속도 프로파일은 또한 로터의 다운윈드에서 2, 4, 6 및 7.5 터빈 직경의 위치에서 측정되었다. 공기 속도는 기준 속도(터빈의 상류의 공기 속도)에 대해서 정규화되었고 그리고 결과가 기준 로터(100), 제1 환기식 로터(200) 및 제2 환기식 로터(300)에 대해서도 9a 내지 도 9c에 도시되었다. 도면에서, X는 로터의 다운윈드 거리이고, Z는 로터의 중심 축선위의 높이이고, 그리고 U는 X 방향으로 공기 속도이다.

[0088] 기준 로터(100)의 후류는, 공기 속도가 전체 테스트된 길이를 따라서 후류의 중심에서 낮게 남아 있는 채로, 상당히 소산되지 않았다. 역으로, 6 로터 직경의 거리로부터, 제1 및 제2 환기식 로터(200, 300)는 상당한 후류

확산을 보여준다.

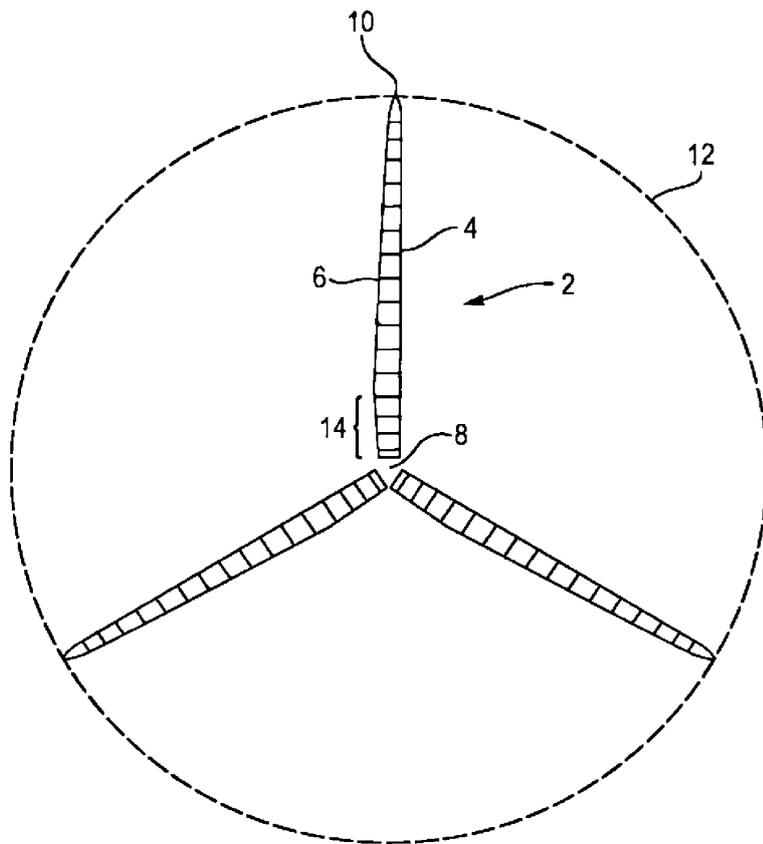
[0089] 비교의 목적을 위해서, 도 10은 로터의 즉각적인 다운윈드 2 로터 직경에서 3개의 테스트 로터(100, 200, 300)의 바람 속도 프로파일을 도시하고, 도 11은 로터의 다운윈드 7.5 로터 직경에서 3개의 테스트 로터(100, 200, 300)의 바람 속도 프로파일을 도시한다.

[0090] 이해되는 바와 같이, 환기식 로터(200, 300)의 공기 하류의 평균 속도는 기준 로터(100)의 하류의 것보다 상당히 더 높다. 이것은 터빈 다운윈드에 의한 바람으로부터의 향상된 에너지 추출을 허용한다.

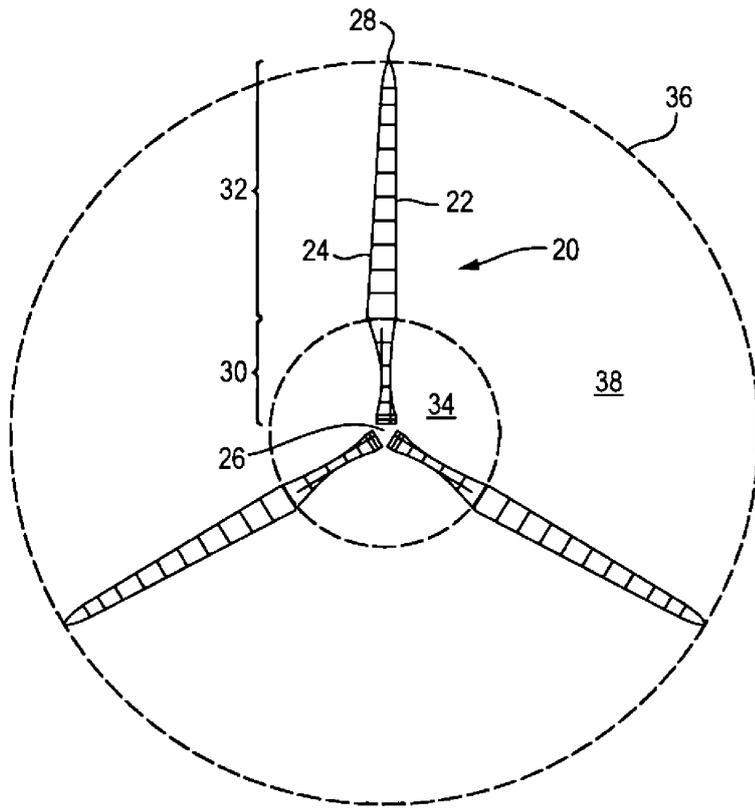
도면

도면1

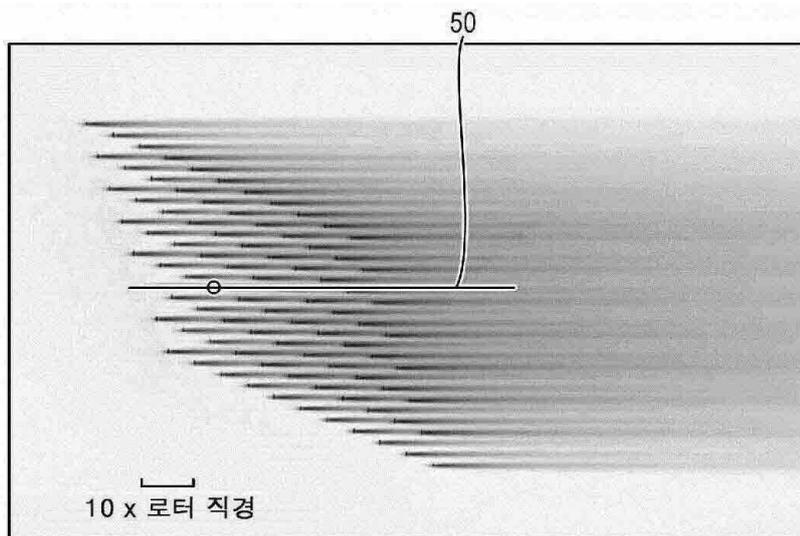
종래 기술



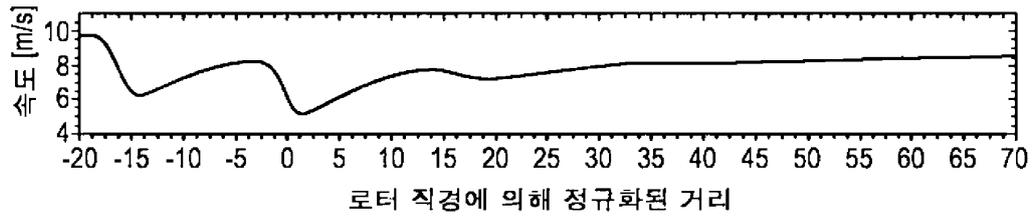
도면2



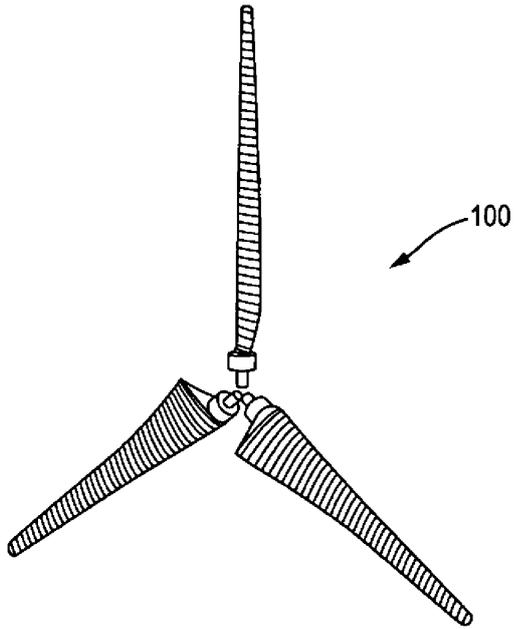
도면3a



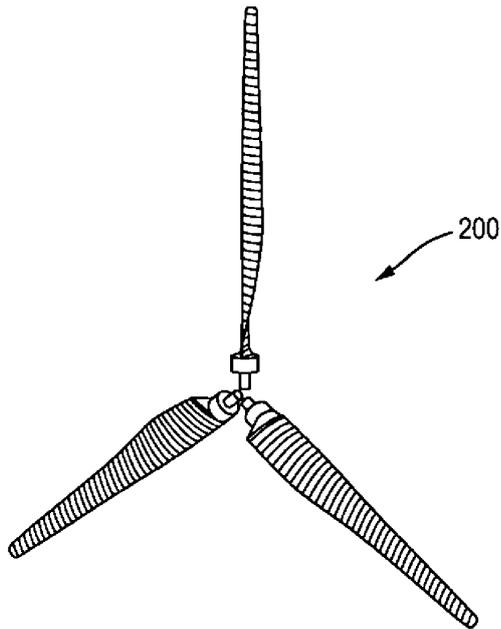
도면3b



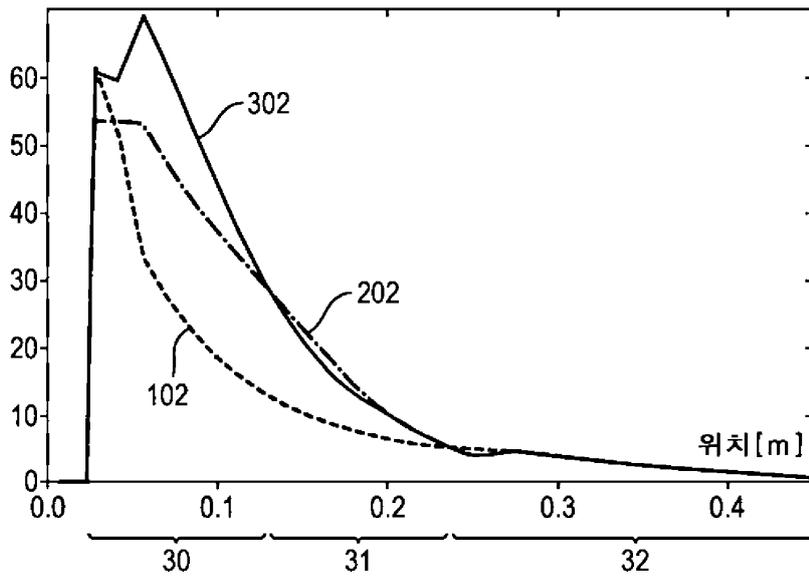
도면4a



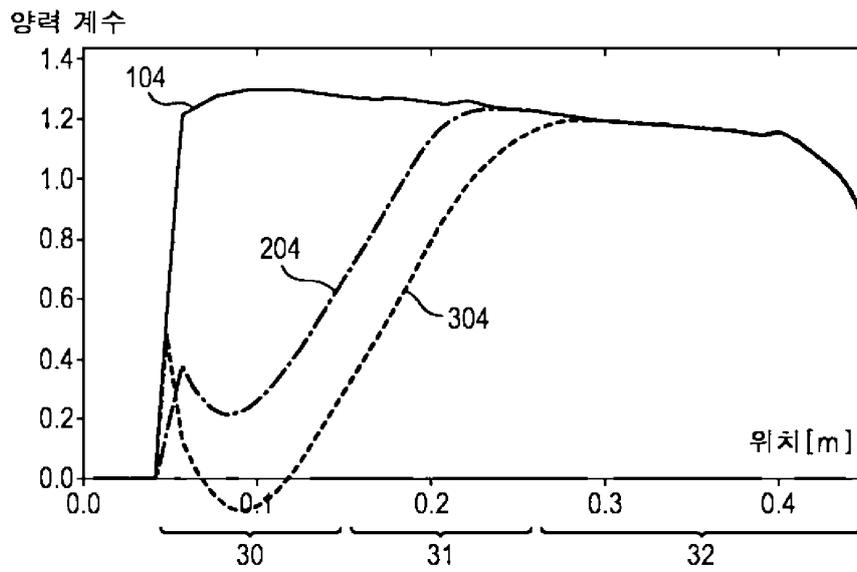
도면4b



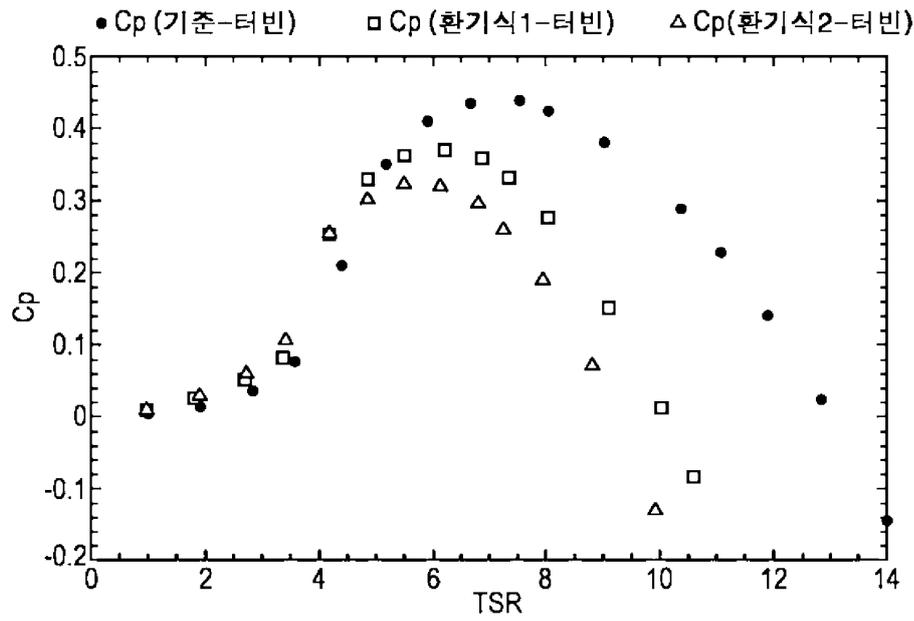
도면5



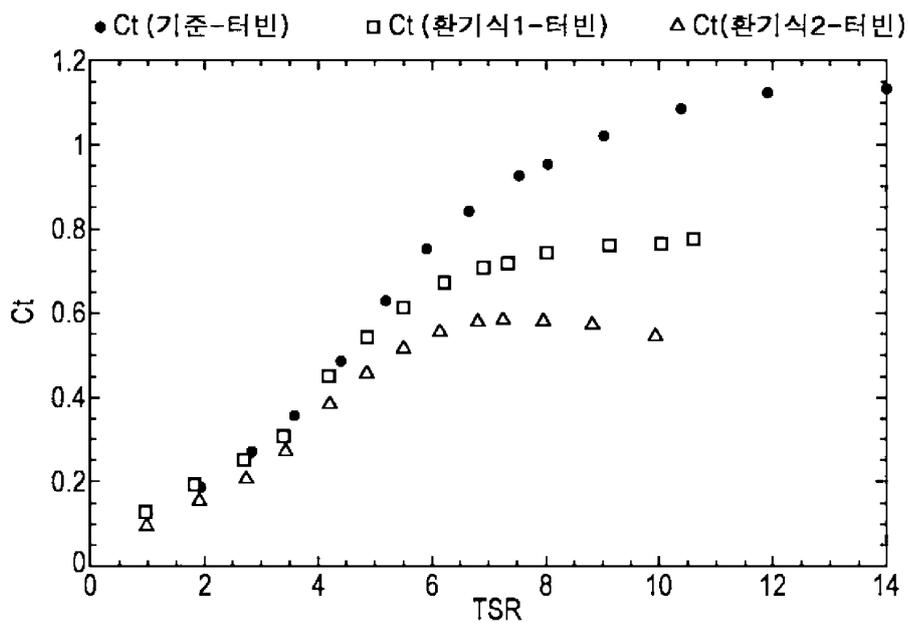
도면6



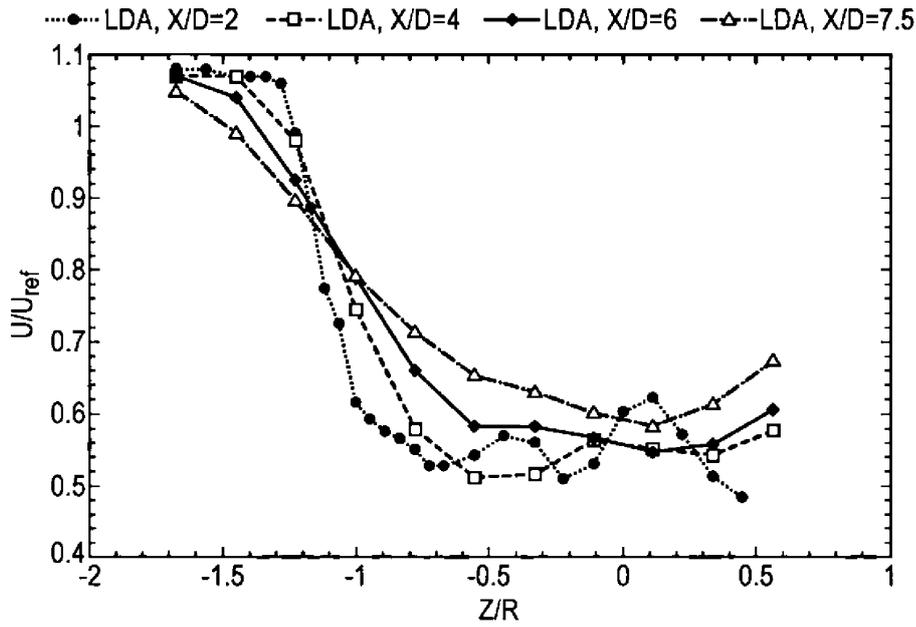
도면7



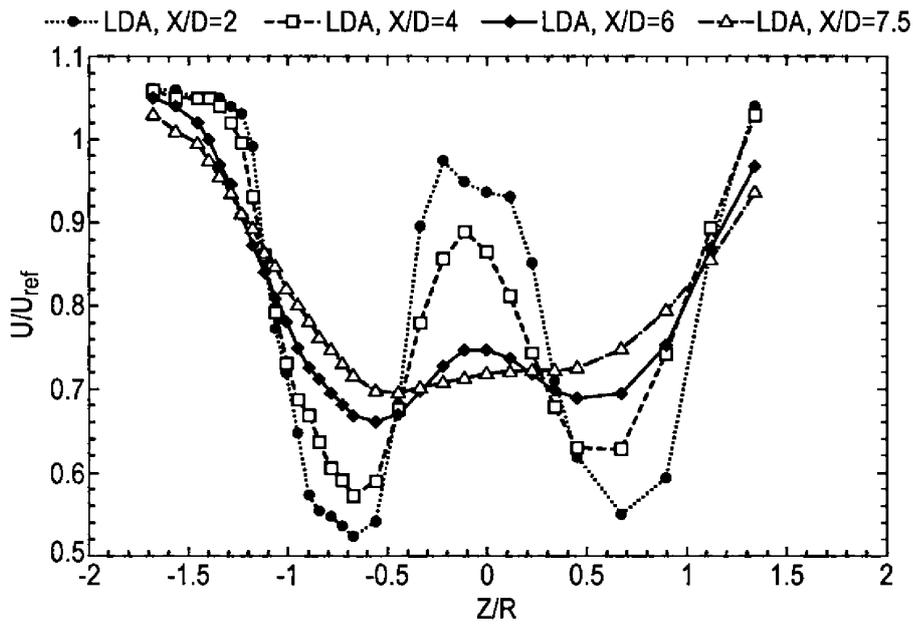
도면8



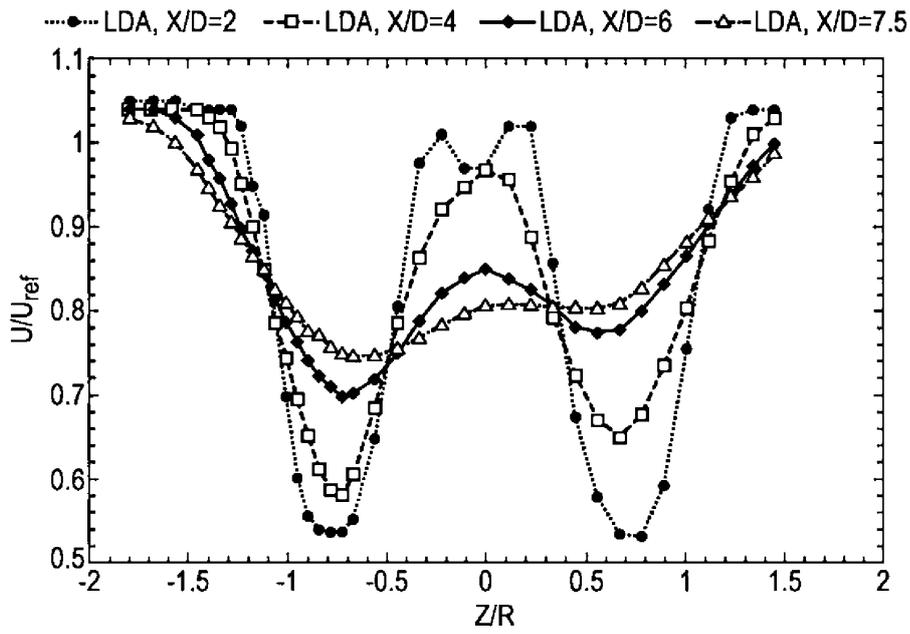
도면9a



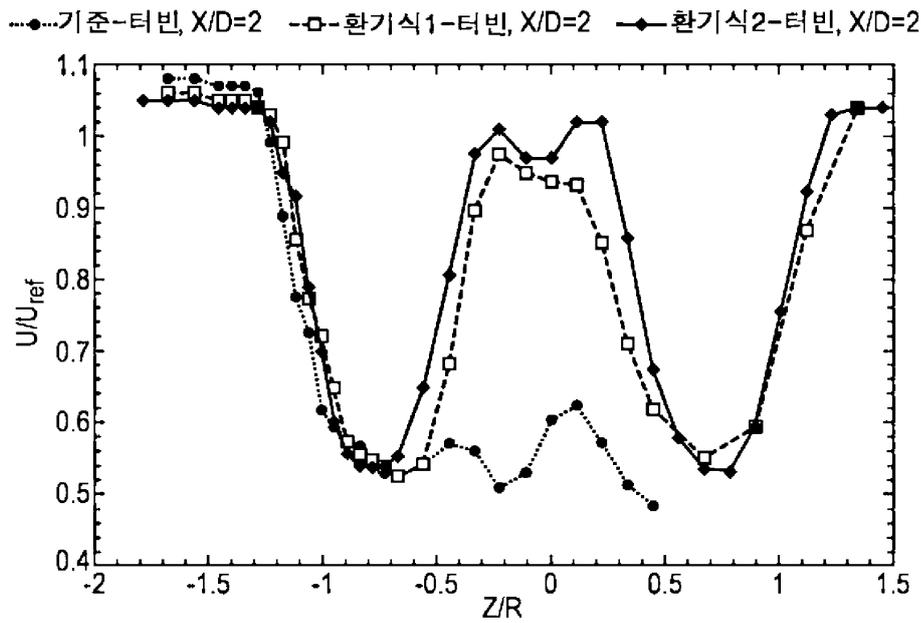
도면9b



도면9c



도면10



도면11

---●--- 기준-터빈, X/D=7.7 ---□--- 환기식1-터빈, X/D=7.5 ---●--- 환기식2-터빈, X/D=7.5

