



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

지형복잡도에 따른 지상기반 라이다
바람데이터의 정확도평가
- 제주도 수망, 강정, 수산 측정캠페인

제주대학교 대학원

풍력공학부 풍력기계시스템전공

김 대 영

2016년 2월

지형복잡도에 따른 지상기반 라이다
바람데이터의 정확도평가
-제주도 수망, 강정, 수산 측정캠페인

指導教授 高 炅 男

金 大 煥

이 論文을 風力工學部 碩士學位 論文으로 提出함

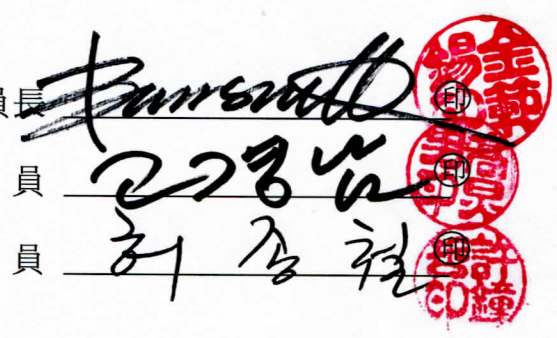
2016 年 2 月

金大煥의 風力工學部 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

委 員

委 員



濟州大學校 大學院

2016 年 2 月

The accuracy assessment of ground-based LiDAR
wind measurements with terrain complexity

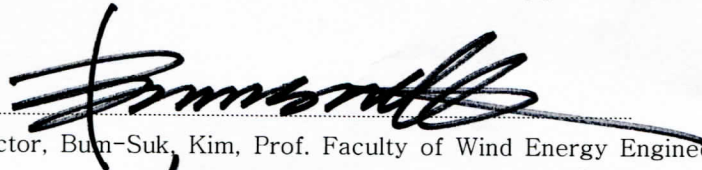
-Wind measurements campaign in Sumang, Gangjeong and Susan of Jeju

Dae-Young Kim
(Supervised by professor Kyung-Nam Ko)

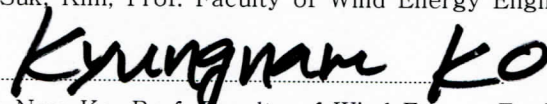
A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Science

2016. 2.

This thesis has been examined and approved.



Thesis director, Bum-Suk Kim, Prof. Faculty of Wind Energy Engineering



Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. Faculty of Wind Energy Engineering



Thesis director, Jong-Chul Huh, Prof. Mechanical Engineering

Dec, 2015

Date

Faculty of Wind Energy Engineering

Graduate School

Jeju National University

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	V
Abstract	1
I. 서 론	2
1. 연구배경	2
2. 연구목적	4
II. 대상지역 및 측정 캠페인	5
1. 계측장비설명 - LiDAR System	5
2. 측정사이트 및 측정 환경	7
3. 데이터 필터링 적용	11
4. CNR(Carrer to noise Ration)에 따른 분포	15
III. 지형분석 및 선형회귀분석	17
1. RIX(Ruggedness Index)	17
2. 방위에 따른 먹지수 분포	18
3. 기상탑과 라이다 데이터간의 선형회귀분석	20
IV. LiDAR error의 상세분석	25
1. 난류강도에 따른 분포	25
2. 기상탑 풍속에 따른 분석	27
3. 기상탑 풍향에 따른 분석	26
4. LiDAR error의 빈도 분포	28
5. Shear difference frequency distribution	30
6. α 파라미터에 따른 분포	32
7. LiDAR error rate 분석결과	34

V. CFD 분석	41
1. 분석대상 및 검사체적 구성	41
2. 경계조건 설정	41
3. 수망지역 CFD 분석 결과	41
VI. 결론	52
참고문헌	54

LIST OF FIGURES

- Fig. 2-1 Schematic diagram of LiDAR measurement principle
- Fig. 2-2 Location of Jeju Island and measurement sites
- Fig. 2-3 3D-image of terrain around the measurement sites
- Fig. 2-4 Schematic of LiDAR placement relative to the met mast
- Fig. 2-5 Gound-based LiDAR installation at site
- Fig. 2-6 The data availability of LiDAR for measurement heights
- Fig. 2-7 The correlation of wiper operation frequency, precipitation and data availability for LiDAR
- Fig. 2-8 Definition of CNR(Carrier to noise Ratio)
- Fig. 2-9 The distribution of LiDAR error according to the CNR
- Fig. 2-10 CNR for measurement heights at three sites
- Fig. 3-1 Analysis of RIX
- Fig. 3-2 Power law exponent distribution by sector and wind shear
- Fig. 3-3 The comparison of wind speed between LiDAR and met mast for measurement height
- Fig. 3-4 The comparison of wind direction between LiDAR and met mast for measurement height
- Fig. 3-5 The comparison of standard deviation of wind speed for measurement site
- Fig. 4-1 LiDAR error versus met mast turbulence intensity
- Fig. 4-2 LiDAR error versus met mast wind speed for the four different heights
- Fig. 4-3 Tower shadow for measurement sites
- Fig. 4-4 LiDAR error versus met mast wind direction for the two different heights
- Fig. 4-5 Frequency distribution of LiDAR error for all measurment heights
- Fig. 4-6 Wind shear maximum difference frequency distribution
- Fig. 4-7 LiDAR error versus power law exponent
- Fig. 4-8 LiDAR errors rate and the standard deviation for wind speed with all measurement heights
- Fig. 5-1 Distribution of parasitic cone at Sumang
- Fig. 5-2 3D image around measurement point

Fig. 5-3 Configuration of the control volume

Fig. 5-4 Normalized velocity with the height at Sumang

LIST OF TABLES

- Table 2-1 WindCube v2 Performance and Specifications
- Table 2-2 Information of met mast and measurement period
- Table 2-3 Models of wind sensors on met mast and LiDAR
- Table 2-4 Data recovery rate and the number of data after filtering
- Table 3-1 R^2 for the Standard deviation of the wind speed data at all measurement heights
- Table 4-1 Summary of the LiDAR error rate and the standard deviation at all measurement heights
- Table 5-1 3D image parasitic cones around measurement point
- Table 5-2 Input parameters for CFD analysis
- Table 5-3 Distribution of the normalised velocity and turbulence intensity under WD of 49°
- Table 5-4 Distribution of the normalised velocity and turbulence intensity under WD of 123°
- Table 5-5 Distribution of the normalised velocity and turbulence intensity under WD of 225°
- Table 5-6 Distribution of the normalised velocity and turbulence intensity under WD of 270°

Abstract

The measurement campaign was performed using LiDAR (WIND CUBE v2-Leosphere) and wind sensors on meteorological mast at three measurement sites, Sumang, Gangjeong and Susan, of Jeju Island, South Korea. Each site has a different topographical complexity, and wind data was collected from 11 days to 14 days in the winter. The Ruggedness index, RIX, calculations resulted in 2.91 % (Sumang), 0 % (Gangjeong) and 2.05 % (Susan), respectively. The LiDAR error defined as LiDAR wind speed minus meteorological mast wind speed. After data filtering, the linear regression analysis was performed with 10 minutes concurrent wind data measured at met masts and LiDAR. As a result, The coefficients of determination, R^2 , for wind speed was higher than 0.87 (Sumang), 0.99 (Gangjeong) and 0.94 (Susan), respectively. The average value of LiDAR error were calculated as the absolute values. The result of the average values of LiDAR error were 0.23 m/s at Sumang, 0.06 m/s at Gangjeong and 0.15 m/s at Susan, respectively. The standard deviation of LiDAR error were 0.54 m/s at Sumang, 0.19 m/s at Gangjeong and 0.50 m/s at Susan, respectively. In addition, the turbulence intensity and standard deviation were larger with an increase of the terrain complexity. LiDAR wind speed represented a tendency higher than met mast wind speed. The LiDAR error rate and standard deviation for wind speed showed about 2 - 6 % and 1.7 - 4.6 % difference, respectively. The CFD analysis of the Sumang area with the largest RIX, led to the conclusion that because of nearby hills (Parasitic cones), the normalized velocity at measurement point were about 0.6 at 40 m height and 0.7 at 70 m, respectively. Turbulence intensities were 0.11 at 40 m and 0.12 at 70m, respectively. Also, recirculation region occurred on parasitic cone's lee side with severe slope.

I. 서 론

1. 연구배경

풍력발전단지 초기 개발 단계, 마이크로사이팅, 출력성능평가 및 운영단계 전반에 걸쳐 정확하고 상세한 풍력자원 측정은 매우 중요하다. 바람데이터 측정을 위한 기존의 표준방법은 풍향계와 풍속계를 이용하는 방식이고,[1] 이와 관련된 기술과 측정 불확도가 잘 정립 되어있다.[2, 3] 정확한 풍력자원평가를 위해서는 풍속계는 반드시 풍력터빈의 허브높이 또는 허브높이 근처에 설치되어야 하며, 주변 지형 및 장애물 영향에 의한 유동왜곡이 없어야 한다.

지난 몇 년간 풍력터빈의 규모는 계속해서 대형화 추세를 보였고,[4] 이에 따라 허브높이와 풍력터빈의 로터 회전면적(Swept area) 또한 증가하였다. 그러나 기존의 기상탑을 이용한 방식은 지상에서 높이 100 m 이상일 때, 설치비용이 상당히 증가한다. 또한, 일반적으로 바람데이터 취득을 위한 측정높이는 허브높이보다 낮고 이에따라 취득된 데이터를 허브높이로 외삽보정(extrapolation)하는 과정에서 오차가 발생하게 된다. 이는 발전량 추정 시 불확도를 높이는 주된 요인이 된다. 더욱이 복잡지형에서는 주변지형의 영향에 의해 허브높이에서의 정확한 풍력자원측정이 쉽지 않다.

따라서 풍향계와 풍속계를 이용한 기존의 방법을 대체할 만한 또 다른 측정방법을 제시할 필요성이 있다. 현재 원격탐사(RS: Remote Sensing) 기술을 이용한 라이다(LiDAR; Light Detection And Ranging) 시스템이 풍력자원측정을 위한 적절한 대체방법으로 제시되고 있다. 이에 따라 지상기반 라이다를 이용하여, 풍력터빈 회전자 영역에서의 풍속 프로파일을 측정할 사례도 있다.[5, 6]

그러나 풍력자원평가를 위한 대체기술로써 라이다 기술을 활용하기 전, 이러한 기술의 비교·검증 및 이해가 반드시 필요하다. 유럽에서는 IEC(International Electrotechnical Commission)표준에 근거한 출력성능평가 및 풍력자원평가 시 표준 측정 장비로써 라이다를 활용하기 위한 다양한 검증 캠페인이 수행되고 있다.[7] 또한, 라이다 시스템을 활용하여 취득된 데이터의 불확도를 명확하게 하기 위한 다수의 검증 캠페인이 실시되고 있다.[8, 9, 10, 11]

2007년 독일 북해 연안에서 3개월간 120 m 높이의 기상탑과 QinetiQ ZephIR 라이다에 의해 취득된 데이터가 비교되었다. 이 캠페인에서 라이다 대 기상탑의 회귀 기울기는 높이가 높아짐에 따라 감소하였지만, 상관계수는 거의 1에 가까웠다.[12] A. Albers는 ZephIR와 WindCube를 이용한 평탄지형 측정 캠페인을 통해 라이더와 풍속계의 표준편차는 각각 0.3 m/s와 0.24 m/s로 나타났다.[13] WindCube v2를 이용하여 바람데이터를 측정한 다수의 캠페인을 종합한 결과, 컵형 풍속계와 비교하였을 때 단순지형에서 선형회귀 기울기(Linear regression slope)는 0.99~1.01로 나타났고 표준편차의 오차는 0.2 m/s로 분석되었다.[14] 2009년 D.Jaynes는 펄스타입 도플러 라이다의 검증 결과를 공개하였다.[15] 기상탑과 라이다 데이터의 풍속 기울기는 거의 1에 가까웠고, 결정계수는 0.99이상이었다.

반면, 관련 문헌에서는 라이다와 기상탑의 측정 자료를 비교했을 때 지형 복잡도에 따라 최대 4~6 %의 차이를 보인다고 제시되기도 하였다.[16] D. Foussekis의 3개의 라이다를 이용한 연구결과에서는 복잡지형에서 6 %이하의 풍속 저감이 발생하였다.[17] Bingöl F는 수직 윈드시어(Wind shear)를 라이다 측정자료 편차에 중요한 요소로 정의하고, 분석결과 평균풍속 편차는 5~10 %로 나타내었다.[18] 또한 지형복잡지수를 나타내는 RIX(Ruggedness Index)와 라이다 에러의 관계를 나타내는 데이터에서 낮은 RIX값에서 정확한 예측을 하였고, 높은 RIX값에서 부정확한 예측을 하였다.

전반적으로 평탄 지형에서 라이다 기술을 활용한 평균풍속 및 윈드 프로파일 측정의 정확도는 검증되었다. 하지만 복잡지형에서는 최대 10 %의 풍속차이를 보이기도 한다.[18] 따라서 최근 복잡지형에서 측정된 데이터의 편차를 보정 및 수정하기 위해, CFD(Computational Fluid Dynamics)분석 방법이 적용 및 응용되고 있다.[19-21]

2. 연구목적

현대 풍력발전기의 대형화에 따라 허브높이가 120 m를 넘어가고 있는 실정이다. 이러한 허브높이에서의 풍력자원 측정을 위해, 기존의 측정방법을 고수할 경우 설치 시 높은 비용이나 인허가를 위한 시간소비 등을 감수해야 한다. 이를 위한 대체방법으로 라이다 기술이 가장 적합한 대안기술로 여겨지고 있다. 단순지형에서의 기상탑과 라이다의 취득데이터 비교·검증은 상당히 이루어진 상태이지만, 복잡지형에서는 여전히 더 연구할 필요가 있다. 왜냐하면 복잡지형에서는 주변 지형에 의한 언덕가속 효과, 유동박리, 난류강도증가와 같은 현상이 발생하고 이러한 효과들이 측정지점에 영향을 끼친다면, 이는 데이터 신뢰도에 문제를 야기하기 때문이다. 이를 해결하기 위해 기술적 측면에서 라이다 에러를 줄이는 노력과 복잡지형에서 라이다에 의해 취득된 데이터가 어느 정도 에러가 발생하는지에 대한 검증과 연구가 필요하다. 이를 통해 풍력자원평가 시 라이다 기술의 활용범위를 계획 하고, 적합하게 활용할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 지형 복잡도에 따라 라이다와 기상탑에서 취득된 바람데이터를 비교·검증하였다. 또한 복잡지형의 CFD분석을 통해 관측지점이 주변지형에 의해 어떠한 영향을 받는지 분석 하였다.

II 장에서는 측정사이트와 측정 환경에 대해 설명하고, 취득된 동시간대 데이터의 필터링 기준을 제시하였다.

III 장에서는 지형분석과 바람데이터의 선형회귀분석을 실시하였다.

IV 장에서는 라이다 오차(LiDAR error)를 상세분석하고 지형 복잡도에 따른 라이다 오차율(LiDAR error rate)을 제시하였다.

V 장에서는 측정사이트 중 지형 복잡도가 가장 큰 지역에 대한 CFD 분석을 수행하였다.

II. 대상지역 및 측정 캠페인

1. 측정장비 설명 - LiDAR system

Fig. 2-1은 본 연구의 측정장비로 사용된 지상기반 라이다로써, 프랑스 Leosphere사의 WindCube v2 제품이다. WindCube v2는 펄스형 도플러 헤테로 다인(Pulsed Doppler heterodyne laser) 기술을 기반으로, 수직으로 1개(바람 벡터 W성분 측정), 90도 간격으로 4개, 총 5개의 빔을 사용한다. 대기 중에 발사된 빛이 검사 체적내의 미세먼지와 작은 물방울 등에 의해 후방 산란(Backscatter) 되어 되돌아오는 빛의 도플러 이동(Doppler Shift)을 검출하여 벡터를 계산한다.[22]

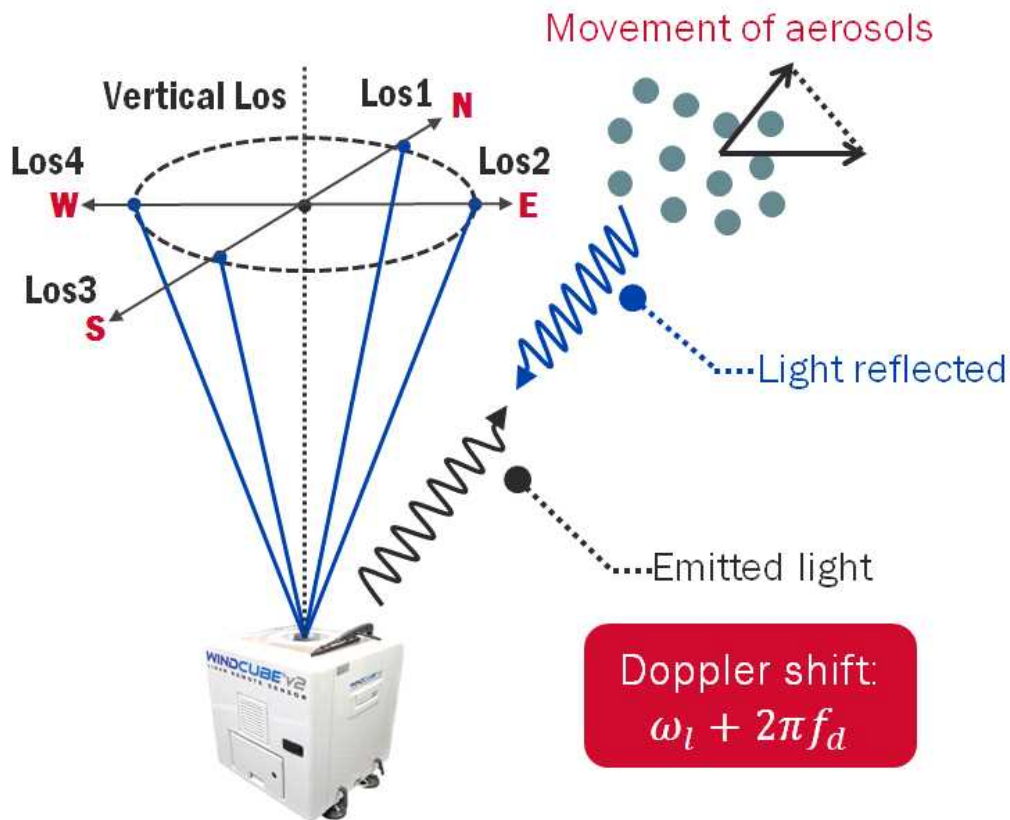


Fig. 2-1 Schematic diagram of LiDAR measurement principle

WindCube v2는 지상에서 40~200 m 까지 측정가능하며, 측정 높이는 총 12개

까지 설정 할 수 있다. 데이터 샘플링 시간(Data Sampling rate)은 1초이고, 측정 풍속 범위는 0~55 m/s 이다. 본 연구에 사용된 WindCube v2의 자세한 성능 및 사양은 Table 2-1에 명시되어 있다.

Table 2-1 WindCube v2 Performance and Specifications

측정 성능	
측정 범위	40 ~ 200 m
데이터 샘플링 시간	1초
측정 높이 수	12
측정 풍속 범위	0 ~ 55 m/s
스캐닝 원추 각도	28 °
전원 및 전기	
입력 전원 공급	18 ~ 32 V DC
전력 소비	45 W (-5 °C ~ 30 °C 사이) 100 W (-5 °C 이하) 70 W (30 °C 이상)
환경적 요인	
측정 온도 범위	-30 °C ~ 45 °C
작동 습도	0 ~ 100 % RH (비 응결시)
IP 등급	IP67
충격 & 진동	ISTA/FEDEX 6B
치수	
라이다	543 x 552 x 540 mm
운송 케이스	705 x 775 x 705 mm
무게	45 kg
운송 케이스(Only)	28 kg
소프트웨어 및 데이터	
데이터 형식	ASCII
데이터 통신 및 전송	LAN/ USB 3G /GPRS (옵션) 위성 (옵션) Bus CAN (옵션)
출력 데이터	1초/10분 수평, 수직 풍속 풍향 Carrier to Noise Ratio (CNR) 수평/수직 풍속 표준편차 자료가용률 GSP 좌표

2. 측정 사이트 및 측정 환경

Fig. 2-2는 본 연구의 측정사이트인 제주도의 수망, 강정, 수산을 나타낸 지도이다. 제주도는 1950 m 높이의 한라산을 중심으로 약 360개의 기생화산(오름)이 분포해있다. 이 중 수망과 수산은 주변 오름의 영향을 받는 중산간에 위치해 있고 나무와 수풀로 이루어져있다. 반면 강정은 해안가에 위치해 있고, 측정지점에 영향을 미칠만한 규모의 지형지물은 위치하지 않는다. 수망의 해발고도는 약 360 m이며, 강정은 약 2.6 m, 수망은 약 114 m 이다.

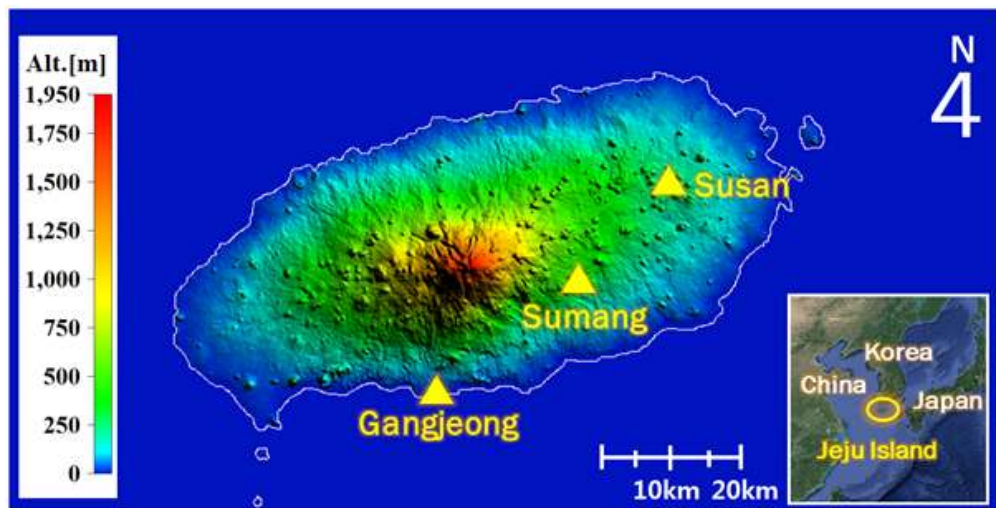


Fig. 2-2 Location of Jeju Island and measurement sites

Fig. 2-3은 3군데 측정사이트의 3D 이미지로, 기상탑과 지상 라이다가 설치된 지점을 중심으로 10 km x 10 km의 지형을 나타내었다. 수망지역은 측정지점을 중심으로 반경 약 5 km안에 9개의 기생화산이 분포해있으며, 기생화산의 해발고도는 429 ~ 717 m이다. 해안가에 위치한 강정은 측정지점을 중심으로 약 5 km 거리에 2개의 기생화산이 있으며, 이것의 해발고도는 약 200 m이하로 낮은 고도에 위치해있다. 수산지역은 5 km이내에 12개의 기생화산이 분포해있으며, 이것의 해발고도는 약 100 ~ 380 m 이다. 측정기간은 2015년 2월 ~ 3월로 겨울철에 측정 하였다. 기상탑과 지상 라이다를 이용하여 수망, 강정, 수산에서 각각 14일, 11일, 14일간 10분 평균 동시간대 데이터를 취득하였다. 측정 사이트 위치와 기간에 대한 자세한 사항은 아래 Table 2-2에 나타내었다.

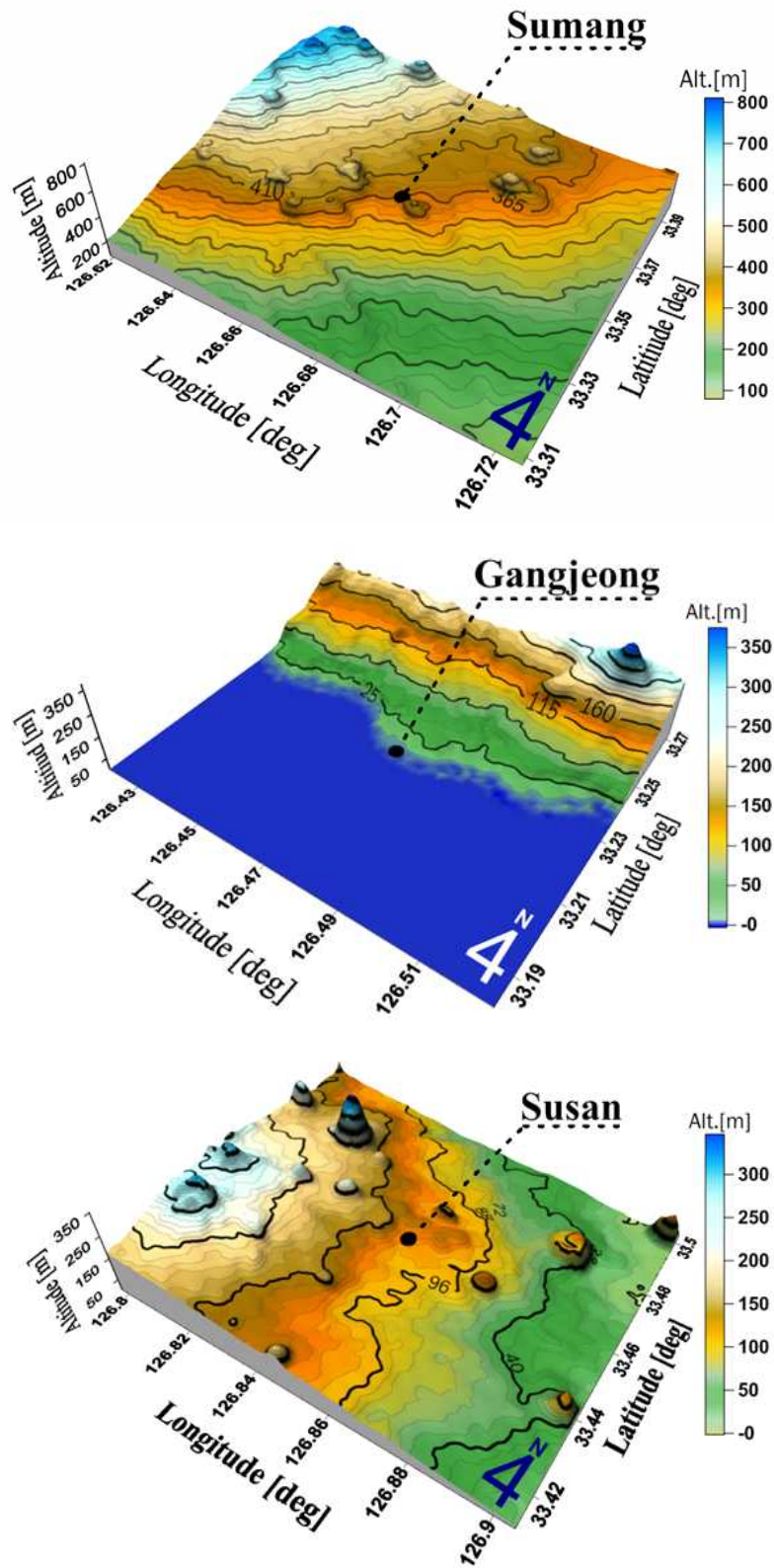


Fig. 2-3 3D-image of terrain around the measurement sites

Table 2-2 Information of met mast and measurement period

Parameter		Measurement site		
		Sumang	Gangjeong	Susan
Location	Latitude	33°21'9.94"N	33°13'37.67"N	33°27'25.97"N
	Longitude	126°40'20.45"E	126°28'24.03"E	126°51'3.88"E
Altitude [m]		362.2	2.63	113.58
Measurement period		4 Feb 2015~17 Feb. (14days)	27 Mar 2015~9 Mar. (11days)	10 Mar 2015~23 Mar. (14days)

수망과 수산에는 튜블러(Tubular) 타입의 70 m 높이 기상탑(Tilt-up mast)이 설치되어 있고, 강정에서는 라티스(Lattice) 타입의 80m 높이 기상탑이 설치되어 있다. 각 측정 사이트 마다 4군데 높이에서 측정을 하였으며, 수망과 수산의 70 m 높이 풍속계는 Class 0.9 A의 Thies First Class Advanced로 계측을 하였으며, 강정은 모든 높이에서 Class 2.4 A인 NRG #40C 제품으로 계측을 하였다. 바람 데이터 취득을 위한 자세한 바람 센서정보는 Table 2-3에 나타내었다.

Table 2-3 Models of wind sensors on met mast and LiDAR

Height	Type of sensor	Met mast sensor models			LiDAR
		Measurement site			
		Sumang	Gangjeong	Susan	
40 m	Cup anemometer	NRG #40C	-	NRG #40C	Remote sensor: Leosphere WINDCUBEv2
	Wind vane	NRG 200P	NRG 200P	NRG 200P	
50 m	Cup anemometer	NRG #40C	NRG #40C	NRG #40C	
60 m	Cup anemometer	NRG #40C	NRG #40C	NRG #40C	
70 m	Cup anemometer	Thies First Class Advanced	NRG #40C	Thies First Class Advanced	
	Wind vane	Thies vane	-	Thies vane	
80 m	Cup anemometer	-	NRG #40C	-	
	Wind vane	-	NRG 200P	-	

각 사이트마다 기상탑을 기준으로 10 ~ 15 m 떨어진 곳에 라이다 장비를 설치하여 측정을 실시하였다. 이유는 라이다 장비가 기상탑 및 인근 구조물과 근접할 시 라이다의 빔이 구조물에 막혀 대기 중의 검사체적 높이까지 방출되지 못하게 된다. 이로 인해 CNR(Carrier to Noise Ratio)에 영향을 끼쳐 데이터 취득에 문제가 발생하기 때문이다. 라이다시스템의 구성은 다음과 같다. (Fig. 2-5 참조)

- 야외 현장에서 원활한 전원공급을 위한 파워팩
- 전원 충전을 위한 태양광 판넬과 액체 메탄올
- 라이다 상단 이물질 제거용 와이퍼 및 수통
- 사람과 동물의 접근을 막기 위한 펜스

자북기준으로 라이다를 배치한 후 라이다 하단의 받침발을 이용하여 롤링(Rolling)과 피칭(Pitching)각도를 각각 오차범위 0.2도 이내로 설정을 한 후 데이터를 취득하였다.

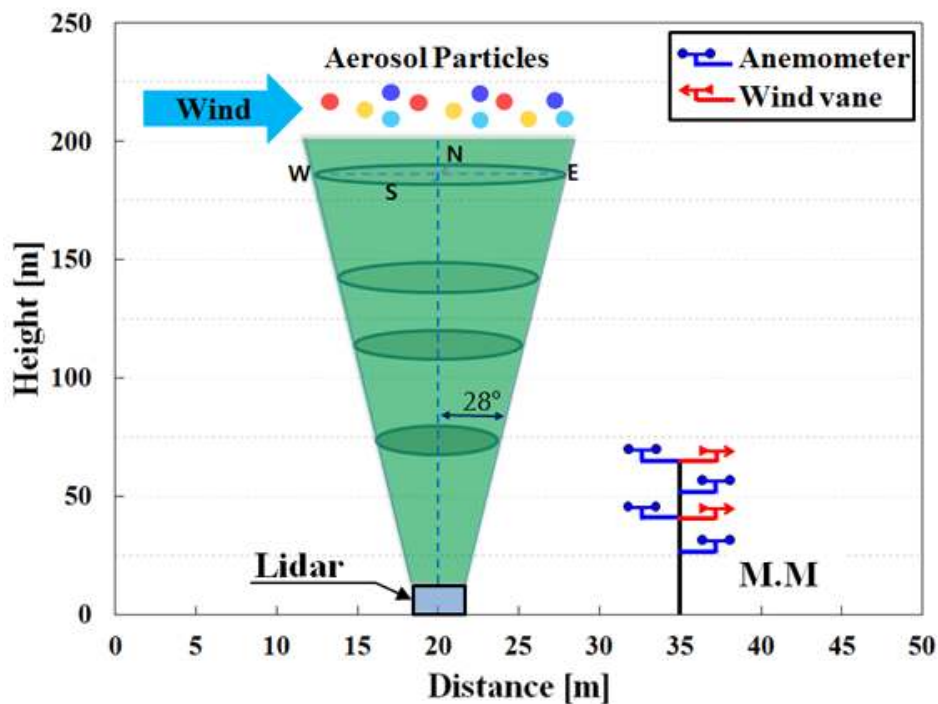


Fig. 2-4 Schematic of LiDAR placement relative to the met mast



Fig. 2-5 Ground-based LiDAR installation at a site

3. 데이터 필터링 적용

기상탑 데이터 복구율(Data recovery rate)은 모든 측정사이트에서 100 %를 보였다. 라이다 복구율은 모든 측정 높이에서, 수망 99.6 %, 강정 100 %, 수산 97.3 % 이상을 보였다. 수산의 데이터 복구율이 낮은 이유는 측정기간 중 강수량이 많은 기간에 데이터 취득이 이루어졌기 때문이다. 동시간대 10분 평균 데이터를 비교하기 전, 분석의 신뢰도를 높이기 위해, 비정상적이고 비합리적인 데이터는 제거하고자 아래와 같은 필터링을 실시하였다.

- 풍속: 4 ~ 16 m/s의 풍속 데이터만을 사용하였다.[23, 24]
- CNR(Carrier to Noise Ratio) threshold: CNR값이 -22 dB이상인 데이터만 사용하였다.[23]
- 라이다 자료가용율(Data availability): 10분 평균데이터의 가용율이 80 %이상인 데이터만 사용하였다.[25]
- 강수량: 강수량이 10 mm 이하인 기간의 데이터만 사용하였다
- 풍향: 데이터 취득기간 동안 주 풍향 위주의 바람이 주로불어 기상탑 타워에 의한 유동왜곡(Tower distortion) 데이터는 거의 발생지 않았다. 따라서 유동왜곡에 의한 데이터 제거는 없었다. 데이터 필터링에 대한 자세한 정보는 Table 2-4에 나타내었다.

Table 2-4 Data recovery rate and the number of data after filtering.

Item		Measurement site					
		Sumang		Gangjeong		Susan	
Measurement equipment		Met mast	LiDAR	Met mast	LiDAR	Met mast	LiDAR
Data recovery rate[%] (Counts*)	40 m	100(1830*)	99.6(1826*)	-		100(1834*)	98.5(1807*)
	50 m		99.8(1828*)	100(1476*)	100(1476*)		98.5(1806*)
	60 m		100(1830*)		100(1476*)		98(1797*)
	70 m		100(1830*)		100(1476*)		97.3(1785*)
	80 m	-		100(1476*)	-		
Number of concurrent data	Before filtering	1826		1476		1783	
	After filtering	935		820		1087	
Rainy day (precipitation: more than 10 mm)		1 days		1 days		1 days	
Data reducing rate		48.8 %		44.4 %		39.0 %	

데이터 필터링 전과 후의 데이터 감소율은 최대 48.8 %를 보였으며, 필터링 후의 10분 평균 데이터 수는 수망, 강정, 수산 각각 935, 820, 1087개이다. Fig. 2-6은 Table 2-4의 데이터 필터링 기준을 적용하기 전과 후 라이다 측정높이 별 자료 가용률이다. 측정높이가 높아짐에 따라 자료 가용율이 감소하지만, 데이터 필터링 후 3개 사이트 모두 약 90 % 이상을 보이고 있다.

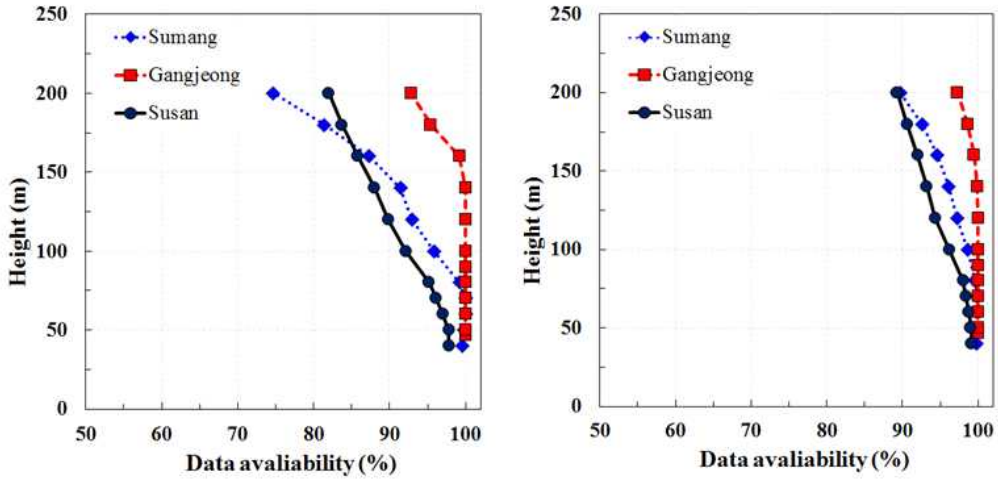


Fig. 2-6 The data availability of LiDAR for measurement heights
(Left: before filtering, Right: after filtering)

Fig. 2-7는 라이다의 자료 가용률, 와이퍼 동작횟수 및 강수량의 상관관계를 나타내는 그래프이다. 측정기간 중 강우가 기록된 시점에 와이퍼 동작횟수가 증가하였고, 이때 자료 가용률이 감소하는 것을 알 수 있다. 라이다를 이용한 풍속 측정 시 대기 중 미세입자에 의해 후방산란 되어 되돌아오는 빛의 도플러 이동을 통해 벡터 계산을 수행하는 만큼, 강우로 인한 세정효과에 의해 대기 중 미세입자 농도가 감소하여 이와 같이 자료 가용률이 감소하게 된다.

이에 따라 강우에 의해 자료 가용률이 떨어지는 데이터의 이용을 피하고자, 데이터 필터링을 통해 강수량이 10 mm이하인 데이터 중 자료 가용률이 80 % 이상인 데이터만 비교·분석에 사용하였다.

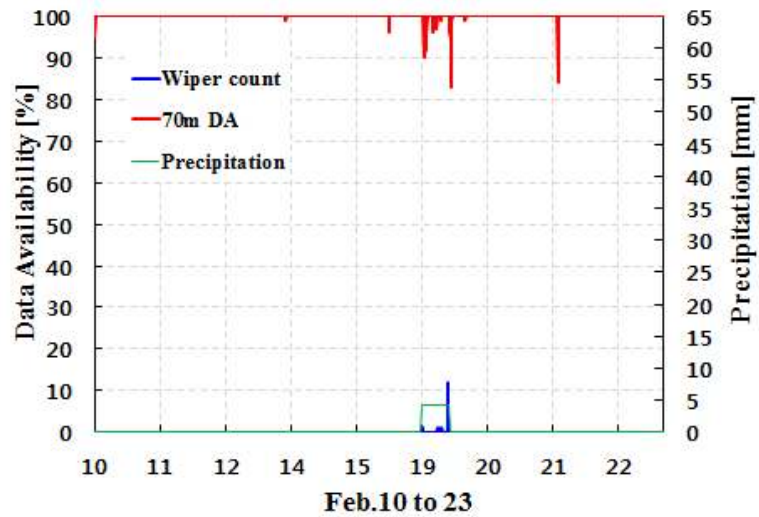
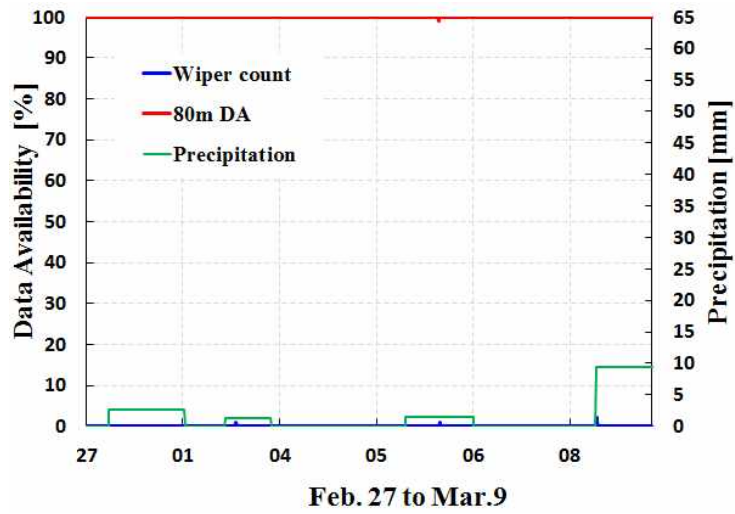
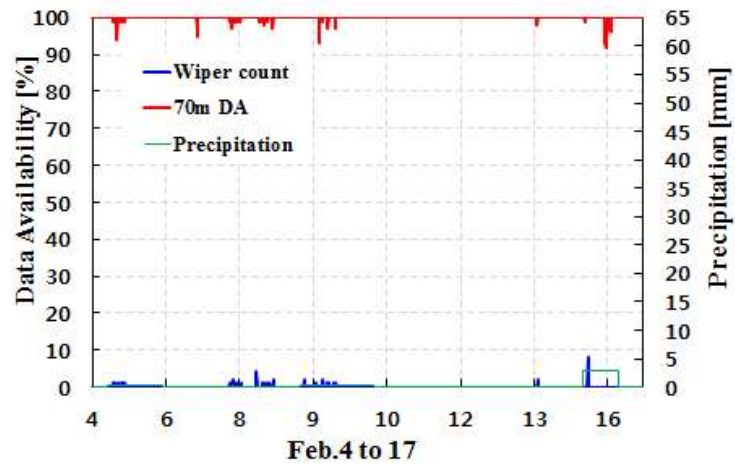


Fig. 2-7 The correlation of wiper operation frequency, precipitation and data availability for LiDAR (Top: Sumang, Middle: Gangjeong, Bottom: Susan)

4. CNR(Carrier to noise Ration)에 따른 분포

Fig. 4-1은 반송파와 잡음파의 진폭 차이인 CNR을 나타내고, 일반적으로 데시벨(dB)로 나타낸다. 측정 방법은 신호(반송파)를 표본 추출하여 푸리에 변환을 통해 진폭과 주파수의 그래프를 도출해내고, 특정 신호 주파수의 진폭과 배경 잡음 진폭의 차이를 측정함으로써 이루어진다. CNR은 다음 수식으로 구한다.

$$CNR=10\log_{10}\left(\frac{P_c}{p_n}\right) \quad (2-1)$$

여기서, p_n 는 잡음전력[W]이고 p_c 는 반송파 전력[W]이다. 라이다 설치 시 이러한 CNR 체크를 통해 데이터 취득 시 기상탑 및 주변 장애물에 영향유무를 확인할 수 있다.

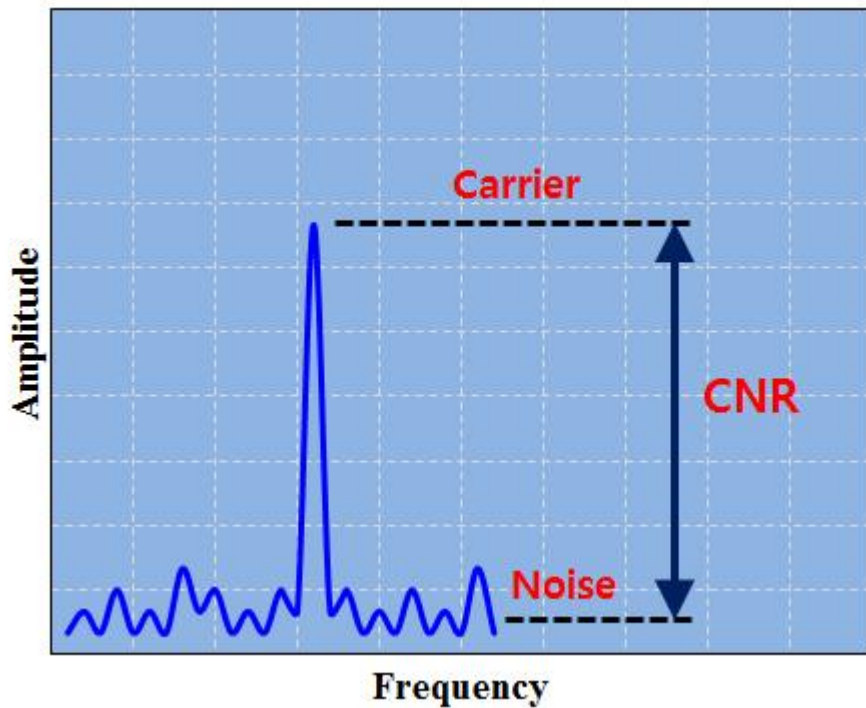


Fig. 2-8 Definition of CNR(Carrier to noise Ratio)

Fig. 2-9는 측정 사이트 3곳의 CNR 값에 따른 라이다 에러의 분포를 나타낸 그래프이다. 본 연구의 데이터 취득 시 라이다 CNR 임계값(Threshold)을 -23 dB로 설정을 하였다. 이후 데이터 필터링 과정에서 CNR > -22 dB 이상의 데이

터만을 활용하여 분석을 수행하였다. 전체적으로 CNR이 -15 dB ~ 0 dB 사이 분포를 하고 있다. 수망과 수산지역의 라이다 에러는 약 -2 m/s ~ 2 m/s 범위까지 분포해있고, 0 dB 이상에서 가끔 산발적으로 데이터가 기록되었다. 강정지역의 라이다 에러는 약 -0.75 m/s ~ 1 m/s 범위에 분포해있고, 0 m/s ~ 0.25 m/s 범위에 데이터가 집중적으로 분포하고 있다.

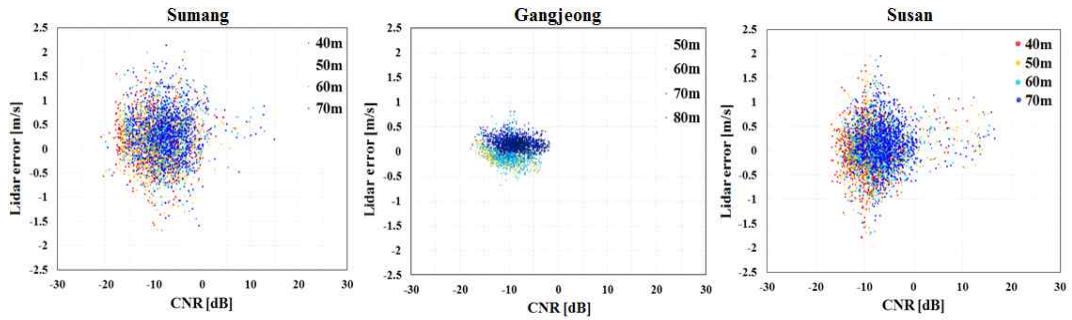


Fig. 2-9 The distribution of LiDAR error according to the CNR

Fig. 2-10은 3개 사이트 높이에 따른 CNR의 평균값과 표준편차(One standard deviation) 그래프이다. CNR값은 측정높이 40m ~ 100 m까지 증가하다가, 100 m부터 최대 관측지점인 200 m까지 감소하는 경향을 보인다. 이는 3군데 측정사이트 모두 유사한 경향을 보인다. CNR 분석을 통하여 분석에 활용될 데이터의 품질을 확인하였고, 3개 사이트 모두 양호한 측정상태를 확인하였다.

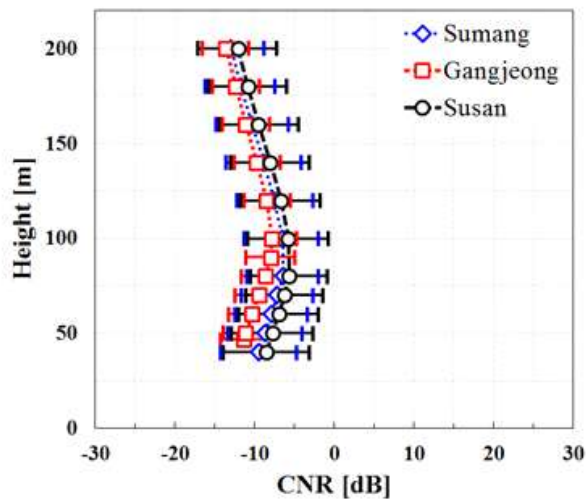


Fig. 2-10 CNR for measurement heights at three sites

III. 지형 분석 및 선형회귀분석

1. RIX(Ruggedness Index) 분석

지형 복잡도 평가를 위해 RIX분석을 수행하였으며, WAsP 9 Map Editor를 이용하여 계산을 수행하였다. RIX계산 시 해당 사이트의 임계경사도(Critical slope) 이상의 기울기를 갖는 지형에 대해 빨간색 선으로 표시가 된다.[26, 27] 이 표시는 유동박리가 관측되는 곳으로 일반적으로, RIX계산 시 측정지점을 중심으로 반경 3.5 km, 임계경사도(30 %), 5°간격 72개 방위구역으로 설정을 하여 계산을 수행 한다.[26, 28] 본 연구에서도 위의 설정값을 입력하여 RIX계산을 수행하였다. Fig. 3-1은 RIX계산 결과를 보여준다. 수망은 관측지점을 중심으로 인접한 곳에 임계경사도 이상의 기울기를 갖는 기생화산 3군데(1.35 km이내)가 위치해 있다. 강정은 임계경사도 이상의 지형이 관찰되지 않았으며, 수산은 관측지점을 중심으로 반경 1.3 km 부근에 가장 가까운 기생화산이 위치해 있다. RIX값은 수망 2.91 %, 강정 0 %, 수산 2.05 %를 보였다. 수망의 RIX값이 가장 큰 이유는 RIX 계산 반경 3.5 km안에 임계경사도 0.30 이상의 기울기를 갖는 7곳의 기생화산이 분포해있기 때문이다.

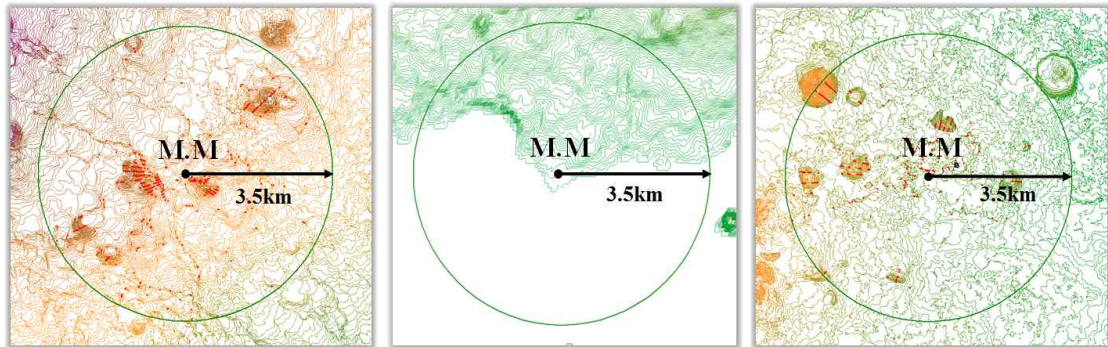


Fig. 3-1 Analysis of RIX(Left: Sumang, Middle: Gangjeong, Right: Susan)

2. 방위에 따른 먹지수 분포

각 사이트마다 측정사이트의 윈드시어를 아래의 Power law수식을 이용하여 계산하였다.

$$V_z = V_h \left(\frac{z}{h}\right)^\alpha \quad (3-1)$$

여기서 V_z 와 V_h 는 z 와 h 높이에서의 풍속이다. α 는 먹지수로써 측정 사이트의 지표면 거칠기를 나타낸다.[29]

Fig. 3-2는 각 사이트마다 방위별 먹지수 및 윈드시어 분포를 나타낸다. 강정 지역은 다른 측정사이트와 달리 윈드시어 기울기가 빠르게 완만해지는 것을 알 수 있고 남쪽 해안의 영향으로 먹지수 값이 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 반면 중산간에 위치한 나머지 측정 사이트는 평균 먹지수 값이 높은 것을 알 수 있다. RIX값이 가장 높은 수망의 경우 α 값이 기상탑 0.37, 라이다 0.39로 분석되었으며, 이러한 먹지수 값은 농경지와 숲의 지표면 상태에 해당한다.[30] 실제로 수망 측정 사이트 부근에는 숲 수풀이 많으며, 특히 서쪽(W)에 3개의 기생화산(큰거린오름, 작은거린오름, 머체오름)이 있고, 동남동쪽(ESE)에 1개의 기생화산(민오름)이 위치해 있다. 이 부근의 먹지수는 약 0.4로 분석되었다. 또한 동남동쪽 기상탑과 라이다의 먹지수는 약 0.1의 차이를 보이고 있다. 이는 측정지점에서 약 480 m의 가장 가까운 거리에 위치한 민오름에 의해 풍속과 난류강도 증감에 따른 영향으로 판단된다. 3개 사이트 먹지수 분석결과 라이다의 측정값이 높은 경향을 보이기는 하나, 그 차이는 미미한 수준으로 분석되었다. 따라서 라이다와 기상탑에서 측정된 동시간대 바람데이터는 거의 동일한 값을 갖는 것으로 판단된다.

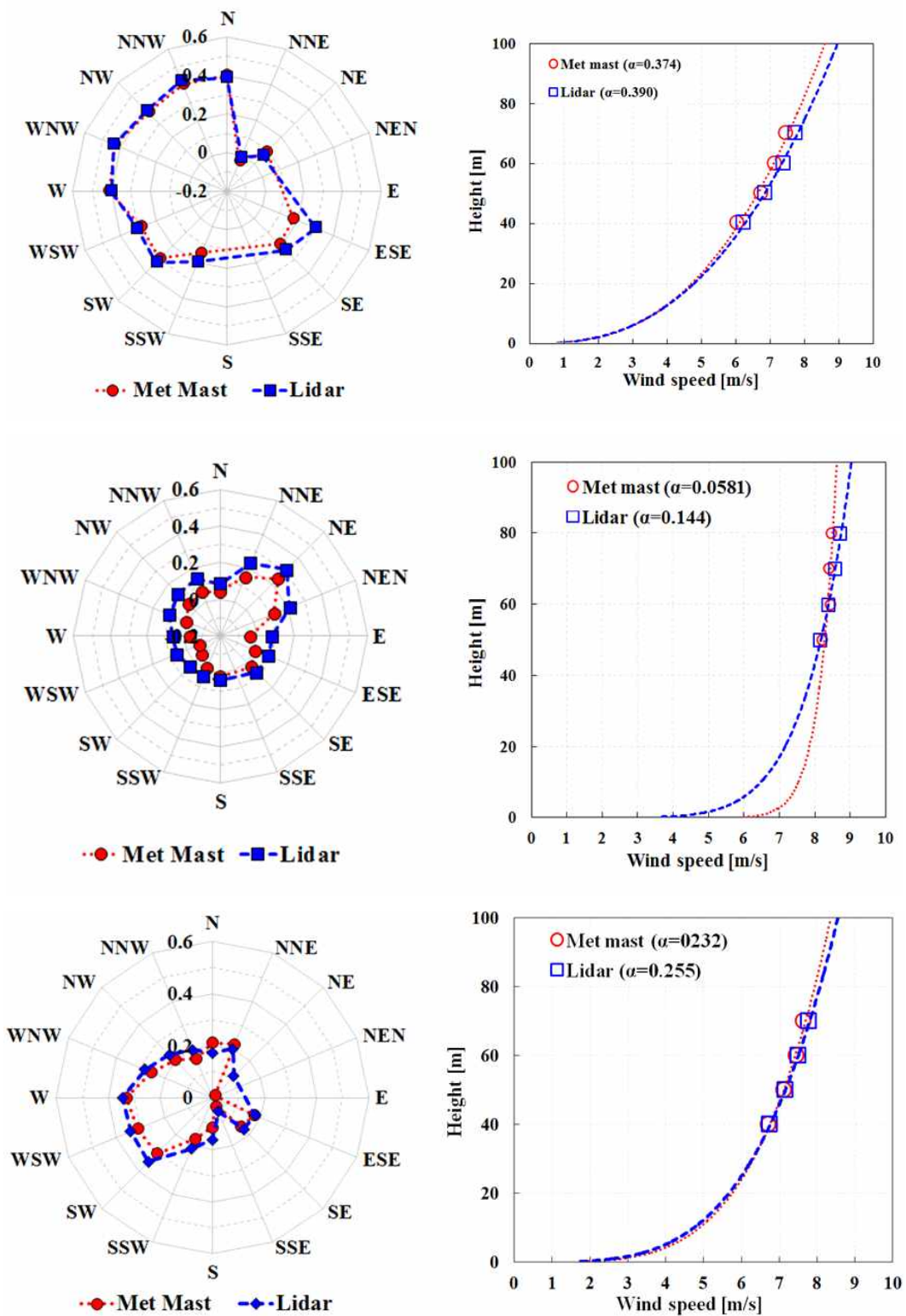


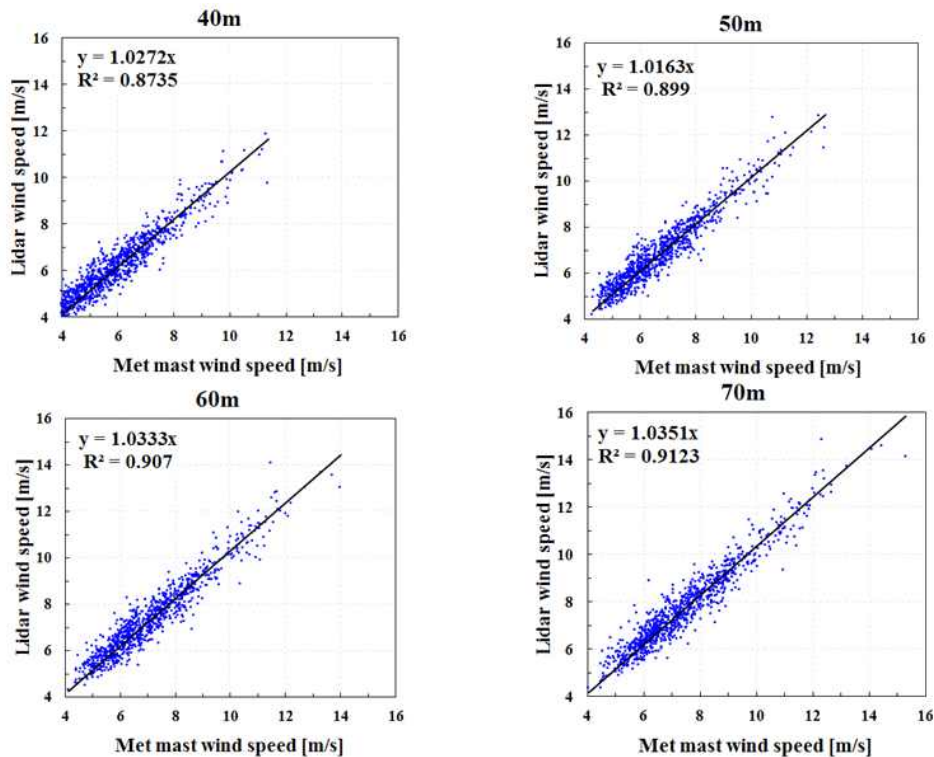
Fig. 3-2 Power law exponent distribution by sector and wind shear
(Top: Sumang, Middle: Gangjeong, Bottom: Susan)

3. 기상탑과 라이다 데이터간의 선형회귀분석

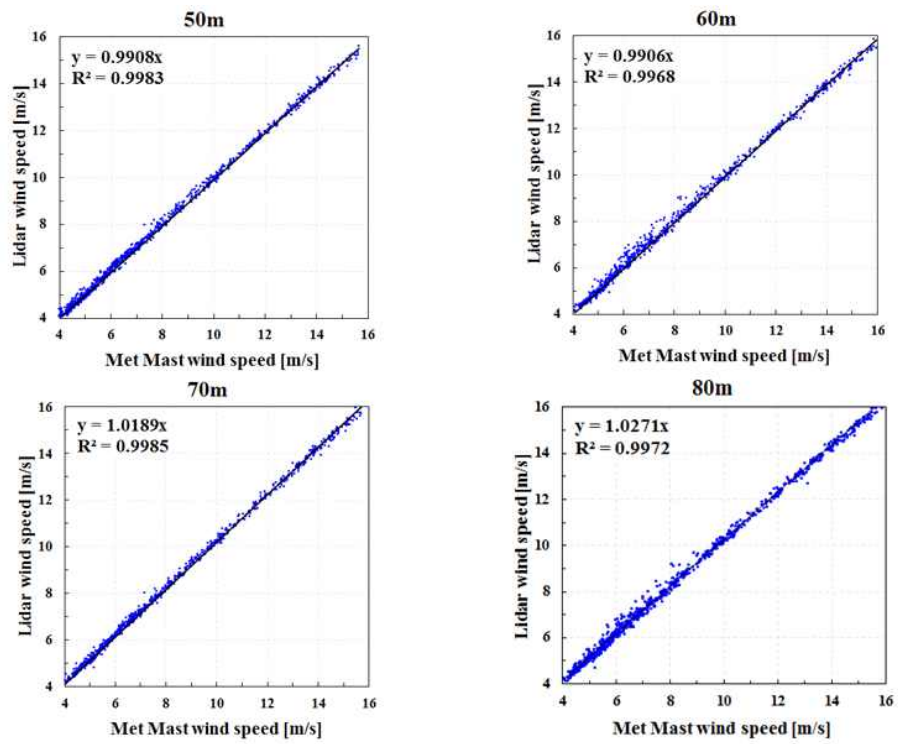
1) 풍속 선형회귀분석

Fig. 3-3은 3개의 측정사이트에서 각각 4개의 높이에서, 기상탑과 라이다의 풍속 데이터를 이용하여 선형회귀분석(오프셋 미적용)을 수행한 그래프이다. 수망지역은 높이에 따라 결정계수(Coefficient of determination) R^2 은 0.87~0.91을 보였고 기울기는 1.01~1.04를 보였다. 강정지역은 모든 높이에서 R^2 은 0.99이상을 보였고, 기울기는 0.99~1.03을 보였다. 수망지역은 높이에 따라 R^2 은 0.94~0.96을 보였고, 기울기는 0.99~1.01을 나타내었다.

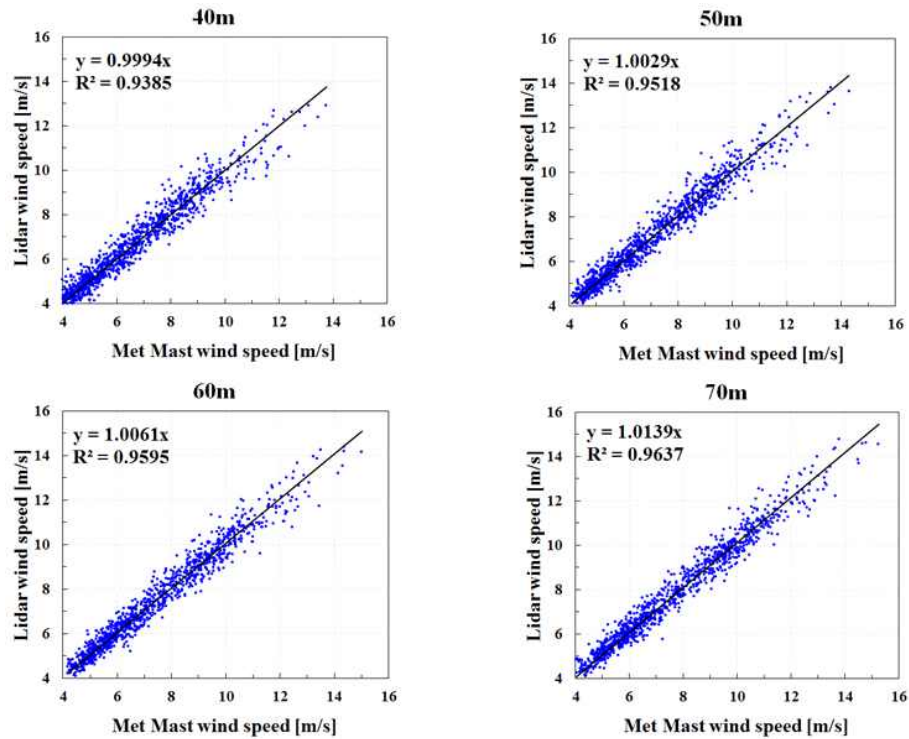
전체적으로 라이다와 기상탑의 풍속 데이터는 상당히 일치하고, 측정높이가 높아짐에 따라 R^2 도 증가하였다. 하지만 해안가 지형에 위치해있는 강정이 가장 높은 R^2 값을 보였으며, 그 다음 RIX 2.05 %의 수산이 높은 R^2 값을 보였다. RIX 2.91 %로 지형 복잡도가 가장 높은 수망지역이 가장 낮은 R^2 값을 보였다.



(a) Sumang



(b) Gangjeong



(c) Susan

Fig. 3-3 The comparison of wind speed between LiDAR and met mast for measurement height

2) 풍향 선형회귀분석

Fig. 3-4는 3개의 측정사이트에서 기상탑과 라이다의 풍향 데이터를 이용하여 선형회귀분석(오프셋 미적용)을 수행한 그래프이다. 수망지역은 40 m, 70 m 높이 데이터로 분석을 수행하였으며, 결정계수 R^2 은 0.93~0.94였고, 기울기는 0.99를 보였다. 강정지역은 80 m 높이에서 R^2 이 0.99, 기울기 0.99를 보였다. 수산지역은 40 m와 70 m에서 각각 R^2 은 0.87, 0.99를, 기울기는 1을 보였다. 전체적으로 높은 결정계수를 나타내고 있다.

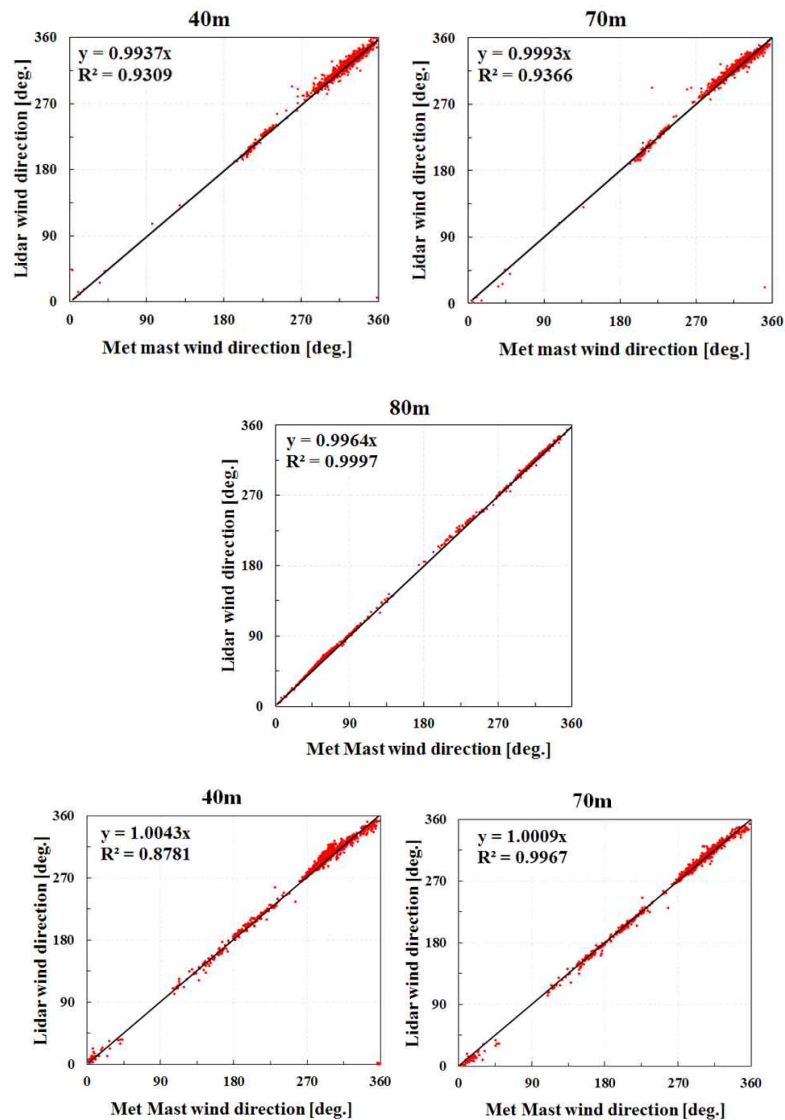


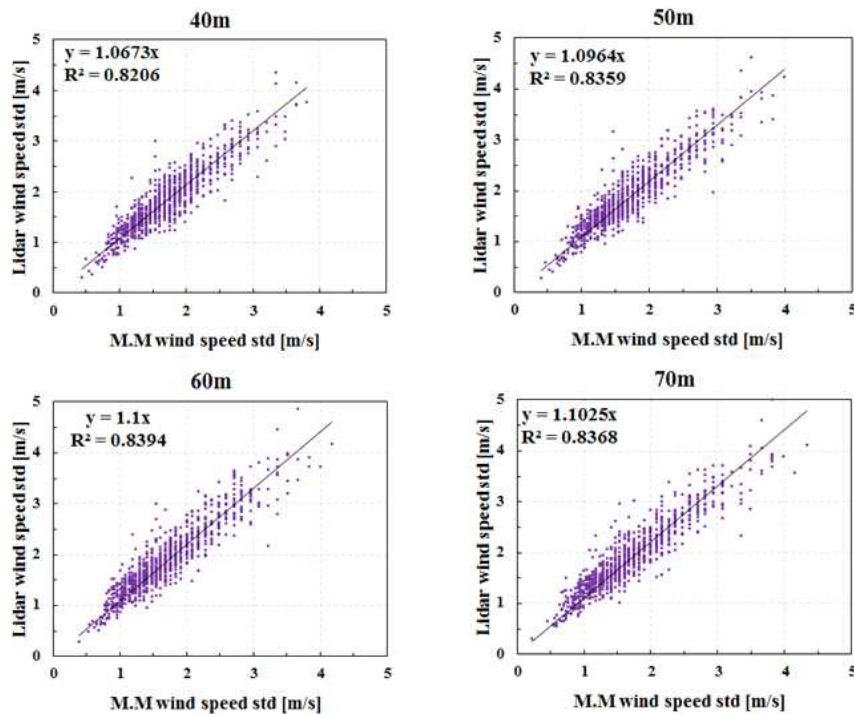
Fig. 3-4 The comparison of wind direction between LiDAR and met mast for measurement height (Top: Sumang, Middle: Gangjeong, Bottom: Susan)

3) 표준편차 선형회귀분석

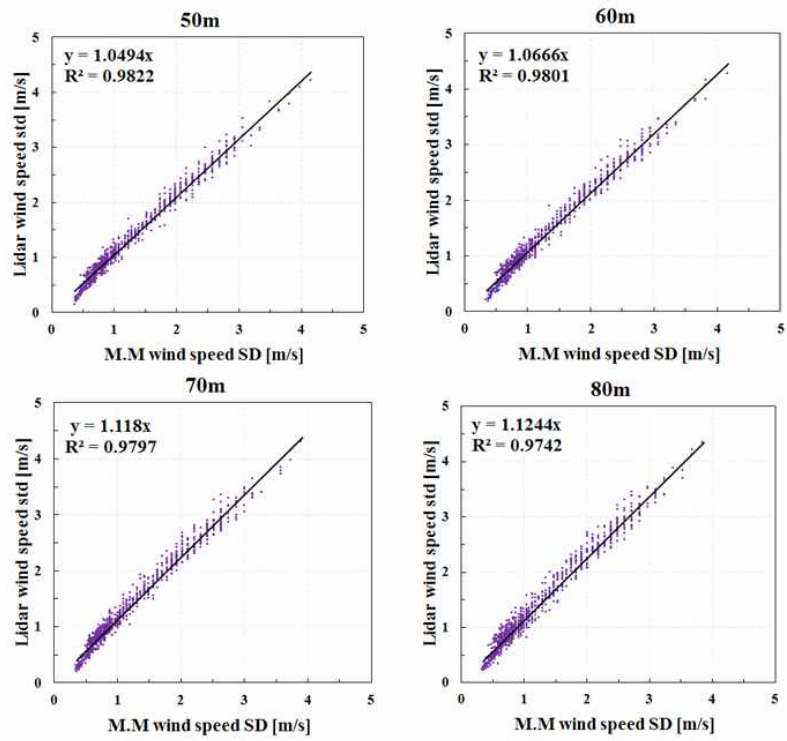
Fig. 3-5는 3개의 측정사이트에서 각각 4개의 높이에서 측정한, 기상탑과 라이더 풍속데이터의 표준편차를 선형회귀분석(오프셋 미적용)한 그래프이다. 수망 그래프의 경우 데이터간의 접합도는 낮고, 그 값 또한 크다. 수산도 이와 같은 경향을 보이기는 하나 값은 상대적으로 작은 값을 보인다. 반면 강정은 가장 높은 접합도를 보였다. 강정지역 R^2 은 0.97, 기울기는 1.07 이상을 보였다. 수망과 수산지역의 R^2 은 0.82, 기울기는 약 1.03 이상을 보였다. 높이에 따른 자세한 표준편차의 R^2 는 Table 3-1에 나타내었다.

Table 3-1 R^2 for the Standard deviation of the wind speed data at all measurement heights.

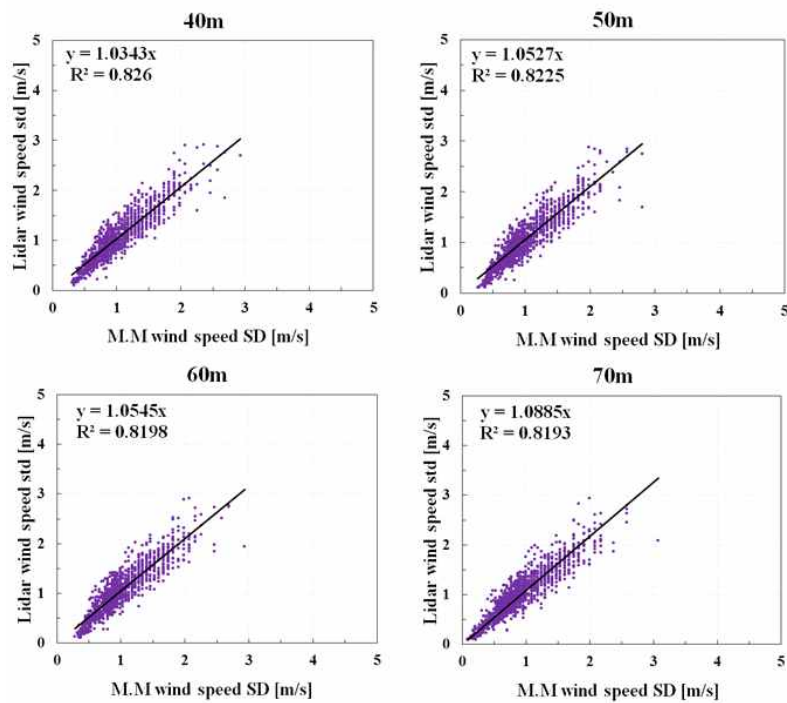
Height [m]	R^2		
	Sumang	Gangjeong	Susan
40	0.82		0.83
50	0.84	0.98	0.82
60	0.84	0.98	0.82
70	0.84	0.98	0.82
80		0.97	



(a) Suang



(b) Gangjeong



(c) Susan

Fig. 3-5 The comparison of standard deviation of wind speed for measurement site

IV. LiDAR error의 상세분석

IV장의 주된 분석내용은 각 측정사이트에 따른 라이다 에러(LiDAR error)의 분포 및 비교이다. CNR, 난류강도, 기상탑 풍속 및 풍향, α 파라미터 등에 따른 라이다 에러의 분포형태와 평균 및 편차값에 대해 분석을 실시하였다. 이때 사용된 라이다 에러는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{LiDAR error} = \text{LiDAR wind speed} - \text{Met mast wind speed} \quad (4-1)$$

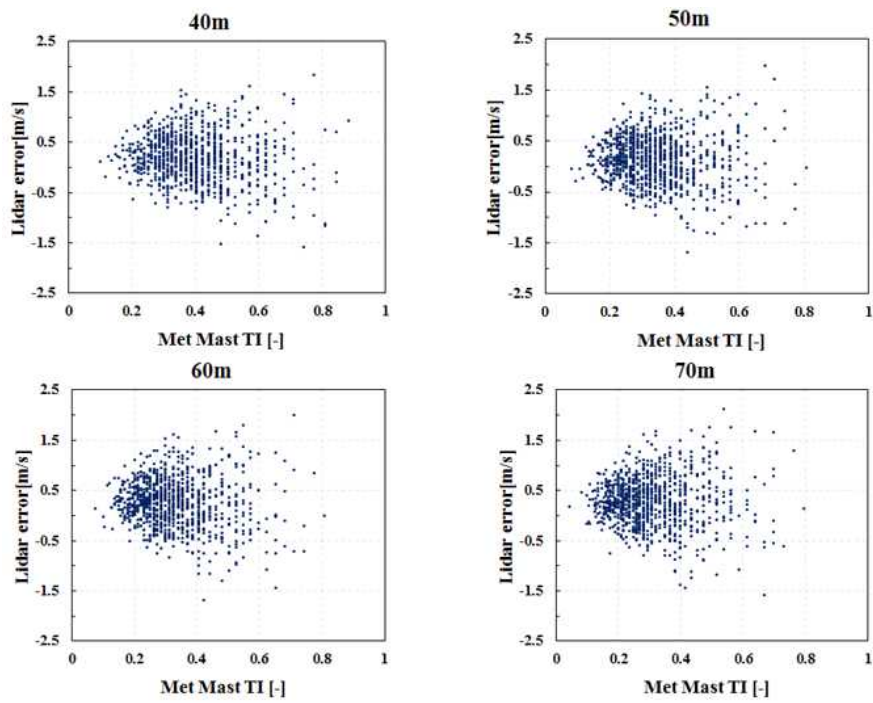
1. 난류강도에 따른 분포

Fig. 4-1은 측정사이트 3곳의 난류강도(기상탑 데이터)에 따른 라이다 에러의 분포를 나타낸 그래프이다. 난류강도 수식은 아래와 같다.

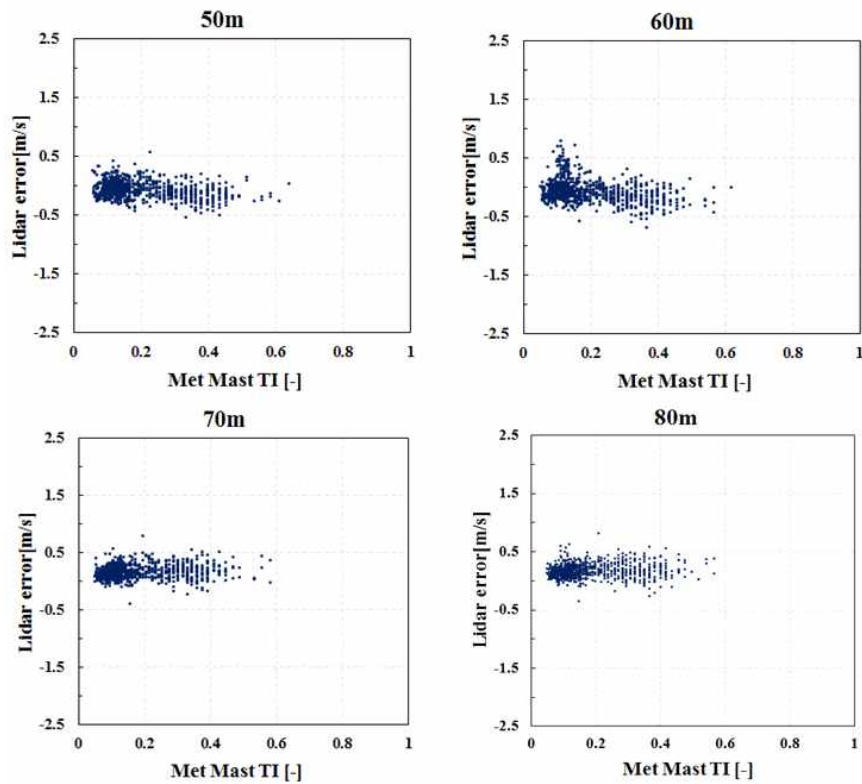
$$TI = \frac{\sigma_u}{u} \quad (4-2)$$

여기서 σ_u 는 풍속의 표준편차, u 는 평균풍속이다. 수망지역은 난류강도가 증가할수록 라이다 에러의 분포 범위가 넓어지며 더욱더 산발적인 형태를 나타내고 있다. 난류강도의 분포범위도 측정사이트 중 가장 넓은 범위에 형성되어있다. 강정지역은 난류강도가 증가하더라도 라이다 에러의 분포 범위는 크게 넓어지지 않음을 알 수 있다. 난류강도는 0.2이하에 집중적으로 분포되어있다.

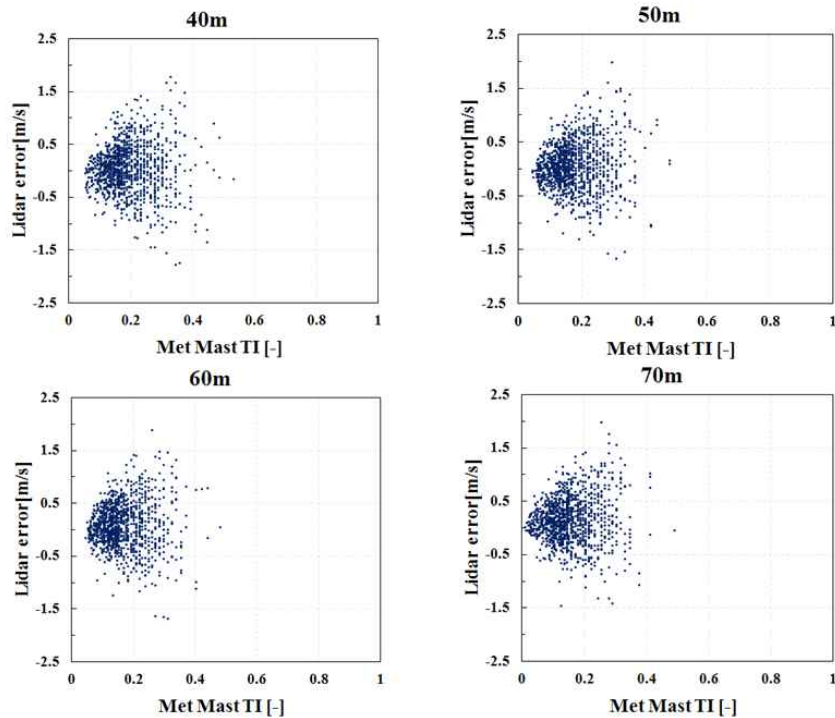
수산지역 또한 수망과 비슷한 양상을 보이고 있으나, 대부분의 데이터가 난류강도 약 0.4이하에 집중되어있다. 지형 복잡도가 높을수록 난류강도가 증가하고 이에 따라 라이다 에러도 증가하는 경향을 나타내었다.



(a) Sumang



(b) Gangjeong



(c) Susan

Fig. 4-1 LiDAR error versus met mast turbulence intensity

2. 기상탑 풍속에 따른 분석

Fig. 4-2은 각각의 측정사이트 4군데 측정높이에서 기상탑 풍속에 따른 라이다 에러의 분포를 나타낸 그래프이다. 0.5 m/s 구간으로 평균값을 표시하였으며, 이 구간 내 데이터수가 3개 미만일 경우 표시 하지 않았다.[3] 오차막대(error bar)의 편차는 단일 표준편차(One standard deviation)로 표시를 하였다.

수망지역은 측정기간 중 5 m/s ~ 7 m/s 데이터가 집중적으로 기록되었으며, 13 m/s이상의 풍속 데이터는 거의 기록되지 않았다. 4 m/s ~ 10.5 m/s 구간 라이다 에러의 평균값은 약 0.21 m/s이고, 단일 표준편차는 ± 0.49 m/s이고 풍속이 증가할수록 단일 표준편차는 증가하는 경향을 보인다. 그 이상의 풍속구간은 데이터 수가 부족하여 상대적으로 큰 변동폭을 보이는 것으로 판단된다.

강정지역은 4~7 m/s 데이터가 다른 구간에 비해 좀 더 기록되었으나, 데이터 분석 범위인 4~16 m/s 사이 비교적 일관된 데이터 수 기록을 보이고 있다. 분석구간 내에서 풍속에 따른 라이다 에러의 평균값은 0.04 m/s 이다. 단일 표준편차의 범위도 전체 측정사이트 중 가장 낮은 값인 ± 0.19 m/s를 나타내고 있다.

수산지역은 4~7 m/s 데이터가 다수 기록되었다. 4~11 m/s 라이다 에러 평균값이 일관된 기록을 보이고 있으며, 이 구간 내 평균값은 0.07 m/s이다. 단일 표준편차는 0.436 m/s이고, 11.5 m/s이상의 구간에서는 데이터 수가 부족하여 평균값 및 표준편차가 상대적으로 큰 변동폭을 보이는 것으로 판단된다.

전체적으로 라이다 에러의 평균값은 양수를 취하고 있으며, 이는 라이다 풍속이 기상탑 바람 센서 풍속보다 큰 것을 의미한다. 즉 기상탑 바람 센서를 기준으로 보면, 라이다를 이용하여 측정한 풍속은 조금 과대평가됨을 알 수 있다. 전체 라이다 에러 평균값은 수망, 수산, 강정 순으로 0.23 m/s, 0.06 m/s, 0.15 m/s를 보였으며, 단일 표준편차의 평균값은 0.54 m/s, 0.19 m/s, 0.50 m/s를 나타내었다.

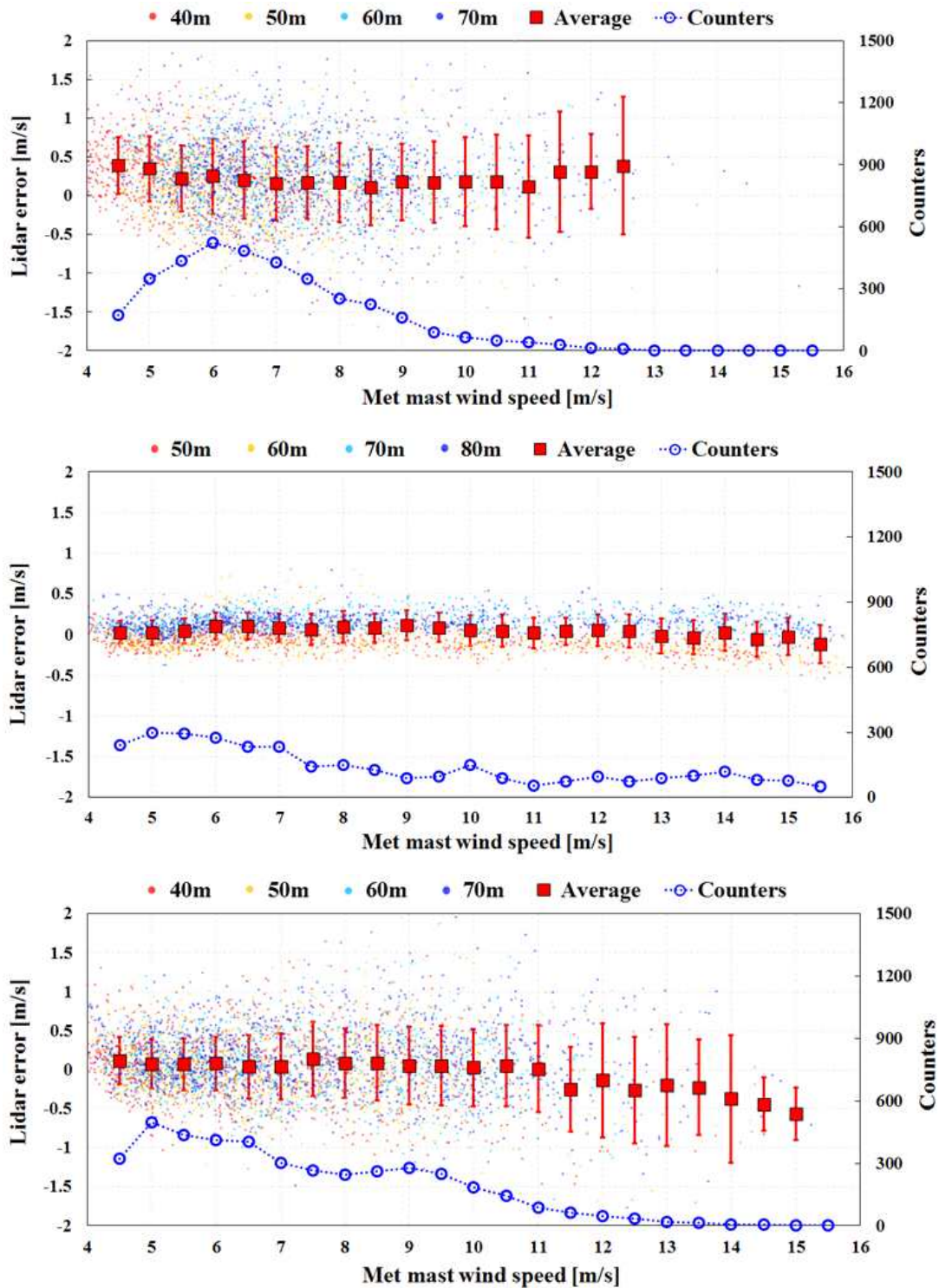


Fig. 4-2 LiDAR error versus met mast wind speed for the four different heights (Top: Sumang, Middle: Gangjeong, Bottom: Susan)

3. 기상탑 풍향에 따른 분석

Fig. 4-3은 타워 후류효과(Tower shadow)를 관찰하기 위해 풍향에 따른 라이다와 기상탑 풍속의 비를 나타낸 그래프이다. 풍속 비는 아래와 같다.

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Lidar windspeed}}{\text{Met mast windspeed}} \quad (4-3)$$

본 연구의 측정기간 중 대부분의 바람데이터는 주 풍향으로 기록되었다. 주 풍향을 중심으로 배치된 풍속계는 타워 후류효과에 의한 유동왜곡의 영향을 받지 않은 것으로 확인되었다.

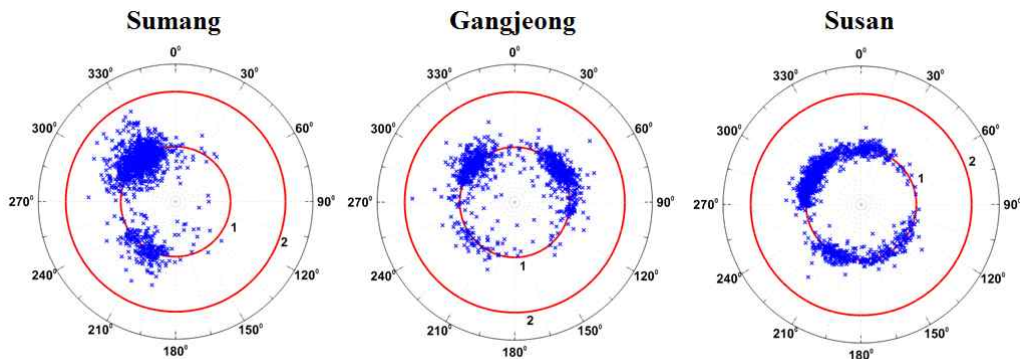


Fig. 4-3 Tower shadow at measurement sites

Fig. 4-4은 각각의 측정사이트에서 기상탑 풍향에 따른 라이다 에러의 분포를 나타낸 그래프이다. 10° 간격으로 평균값을 표시하였으며, 구간 내 데이터 수가 3개 미만일 경우 표시하지 않았다.[3] 오차막대의 편차는 단일 표준편차로 표시하였다. 수망지역의 주 풍향은 북북서(NNW)방향이고, 측정기간 동안 약 270°~360° 방위에서 다수의 데이터가 취득되었다. 이 구간 내 40m, 70m 측정높이 라이다 에러 평균값은 각각 0.30 m/s, 0.36 m/s이고, 가장 높은 라이다 에러 평균값은 260° 방위의 0.73 m/s이다. 강정지역의 주 풍향은 북서(NW), 북동(NE)방향이고, 측정기간 동안 약 295° ~ 335°, 35° ~ 75°방위에 다수의 데이터가 취득되었다. 이 두 개의 구간 내 50 m, 80 m 측정높이 라이다 에러 평균값은 각각 -

0.04 m/s, -0.11 m/s와 0.12 m/s, 0.18 m/s이다. 수산지역의 주 풍향은 서북서 (WNW)방향이고, 측정기간 동안 약 265° ~ 325°방위에서 다수의 데이터가 취득되었다. 이 구간 내 40 m, 70 m 측정높이 라이더 에러 평균값은 각각 -0.005 m/s, 0.12 m/s이다.

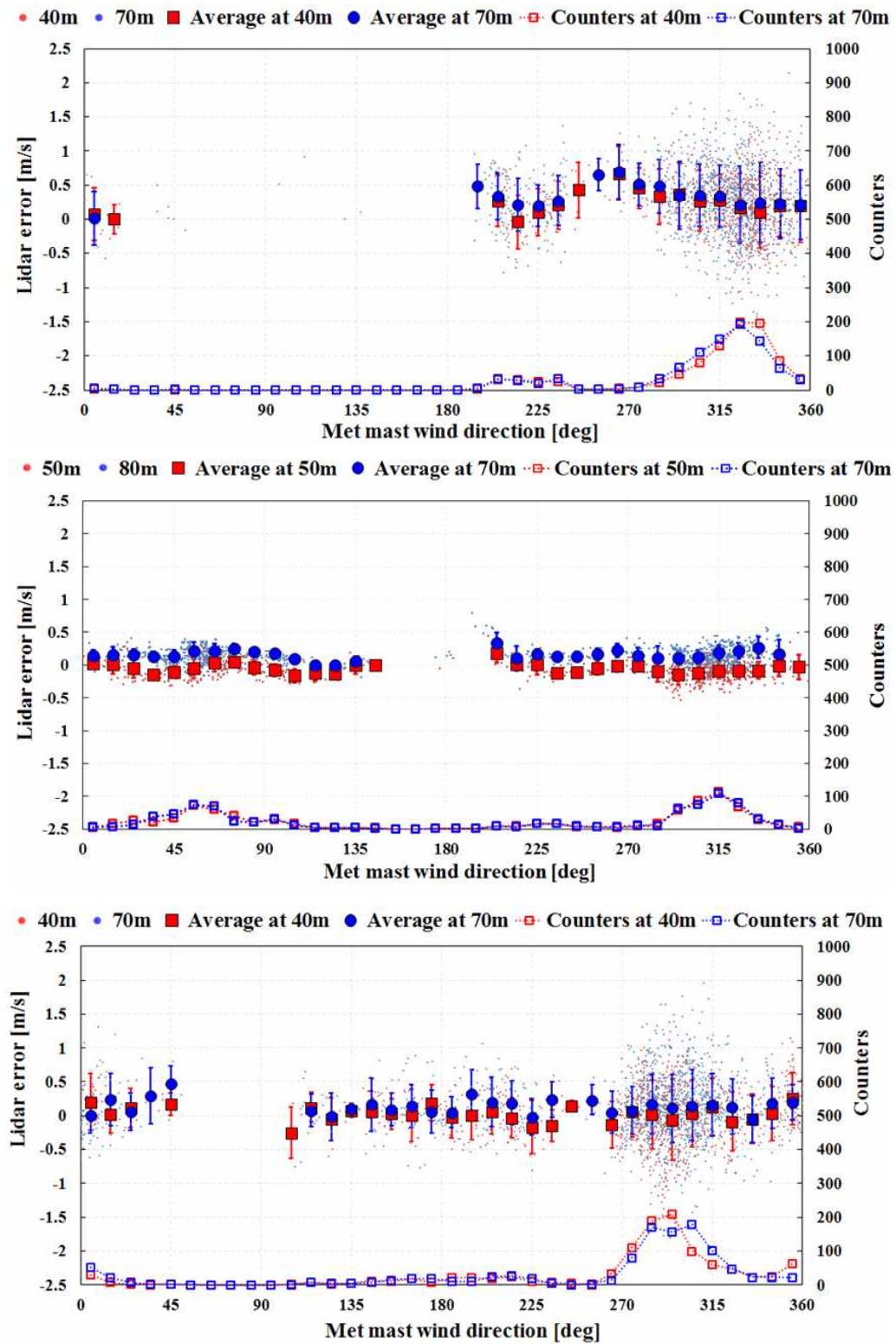
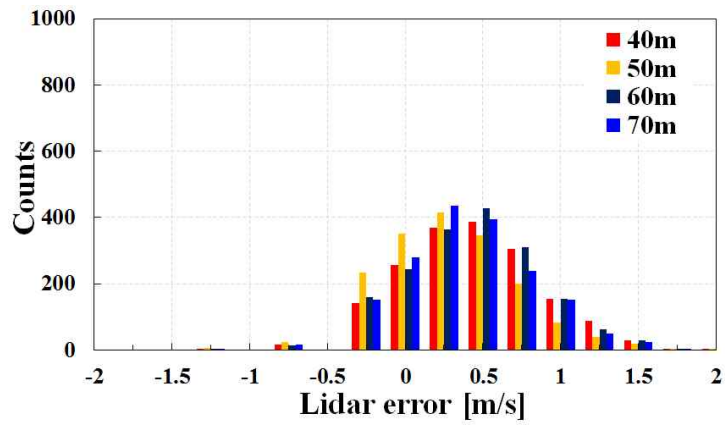


Fig. 4-4 LiDAR error versus met mast wind direction for the two different heights (Top: Sumang, Middle: Gangjeong, Bottom: Susan)

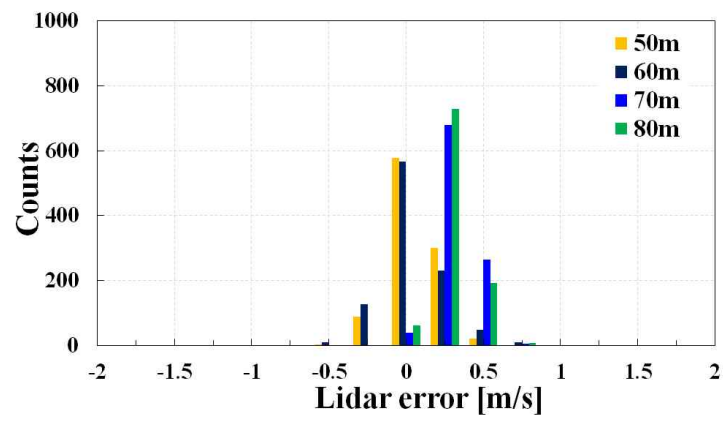
4. LiDAR error의 빈도 분포

Fig.4-5는 각 사이트에서 측정높이별 라이다 에러 빈도 분포를 나타낸 그래프이다. 라이다 에러의 구간은 0.25 m/s의 빈 간격으로 나누었다. 수망지역은 데이터 필터링 후 935개의 10분 평균 데이터가 분포하고, 0 m/s ~ 0.75 m/s의 라이다 에러가 주로 관측되었다. 라이다 에러 0 m/s ~ 0.25 m/s 구간의 데이터 빈도는 1584개, 0.25 m/s ~ 0.5 m/s는 1554개, 0.5 m/s ~ 0.75 m/s는 1053개이다. 최대 약 2 m/s까지도 기록되었다.

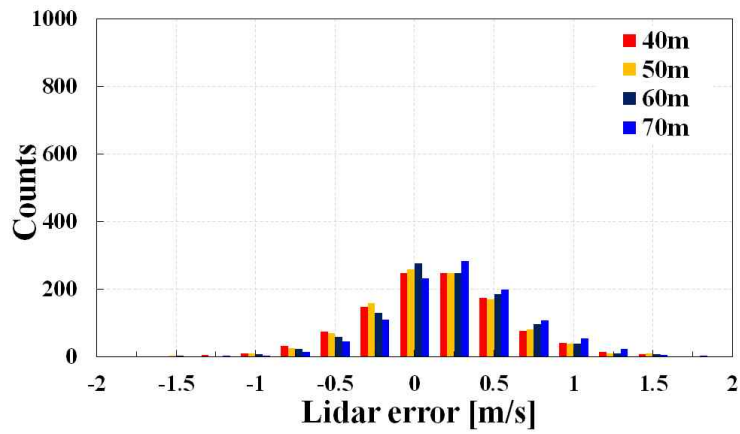
강정지역은 데이터 필터링 후 820개의 10분 평균 데이터가 분포하고, -0.25 m/s ~ 0.25 m/s의 라이다 에러가 집중적으로 관측되었다. 라이다 에러 -0.25 m/s ~ 0 m/s 구간의 빈도는 1248개, 0 m/s ~ 0.25 m/s는 1939개이다. 수산지역은 데이터 필터링 후 1783개의 10분 평균 데이터가 분포하고, -0.25 m/s ~ 0.5 m/s의 라이다 에러가 주로 관측되었다. 라이다 에러 -0.25 m/s ~ 0 m/s 구간의 빈도는 1015개, 0 m/s ~ 0.25 m/s는 1030개, 0.25 m/s ~ 0.5 m/s는 729개이다. 전체적으로 측정높이가 높을수록, 라이다 에러가 증가함을 알 수 있다.



(a) Sumang



(b) Gangjeong



(c) Susan

Fig. 4-5 Frequency distribution of LiDAR error for all measurement heights

5. Shear difference frequency distribution

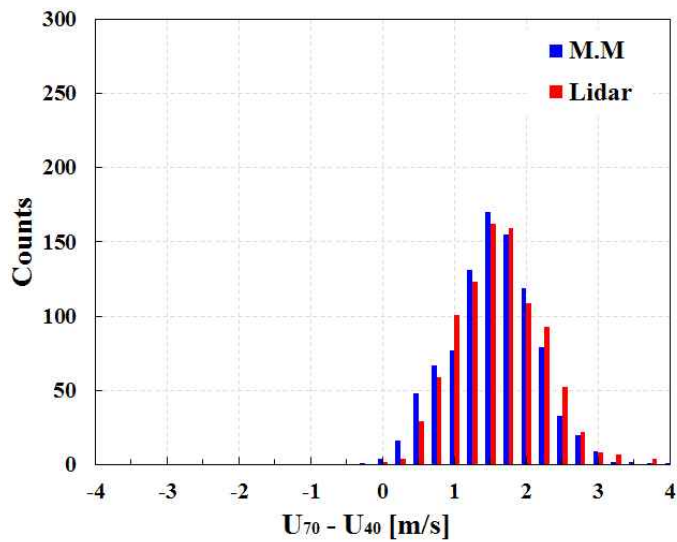
Fig. 4-6은 각 사이트별 라이다와 기상탑에서 측정된 최대 측정높이의 풍속과 최소 측정높이의 풍속차를 빈도 분포로 나타낸 그래프이다. 분석범위는 $-4 \text{ m/s} \sim 4 \text{ m/s}$ 이고, 0.25 m/s 의 빈 구간으로 나누어 빈도 분포를 나타내었다.

수망지역은 70 m풍속과 40 m풍속차가 대부분 $0 \text{ m/s} \sim 4 \text{ m/s}$ 에 분포해 있다. 가장 많은 빈도분포를 보이는 구간은 1.5 m/s , 1.75 m/s 이고, 이 구간의 기상탑과 라이다 빈도는 각각 162개, 170개 그리고 159개, 155개이다.

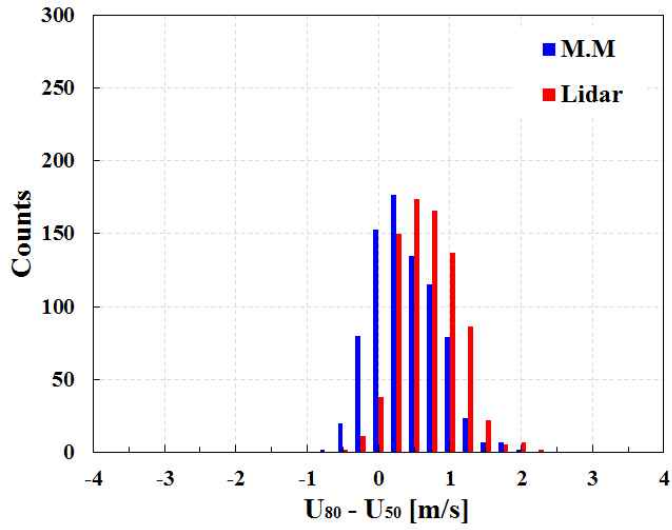
강정지역은 80 m풍속과 50 m풍속차가 대부분 $-0.5 \text{ m/s} \sim 4 \text{ m/s}$ 에 분포해 있다. 가장 많은 빈도분포를 보이는 구간은 0.25 m/s , 0.5 m/s 이고, 이 구간의 기상탑과 라이다 빈도는 각각 150개, 177개 그리고 174개, 135개이다.

수망지역은 70 m풍속과 40 m풍속차가 대부분 $-1 \text{ m/s} \sim 3.25 \text{ m/s}$ 에 분포해 있다. 가장 많은 빈도분포를 보이는 구간은 0.5 m/s , 1.25 m/s 이고, 이 구간의 기상탑과 라이다 빈도는 각각 153개, 131개 그리고 140개, 165개이다.

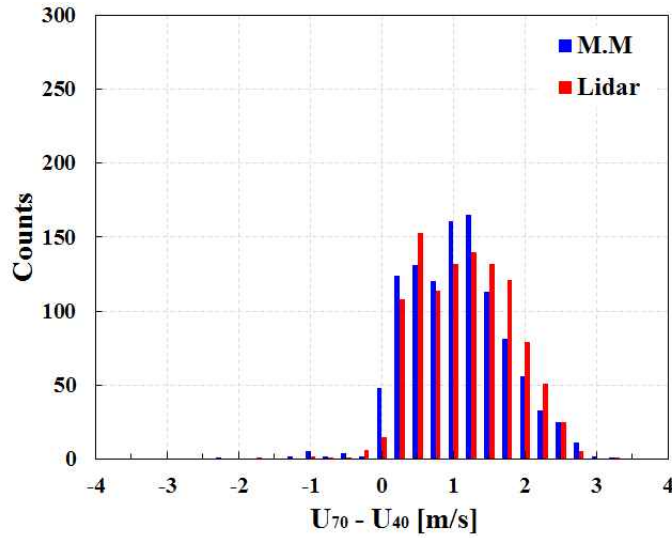
전체적으로 수망과 수산의 풍속차가 크고 그에 따라 넓은 분포범위를 보인다. 강정은 풍속차가 작고, 집중된 풍속차이 분포를 보이고 있다.



(a) Sumang



(b) Gangjeong



(c) Susan

Fig. 4-6 Wind shear maximum difference frequency distribution

6. α 파라미터에 따른 분포

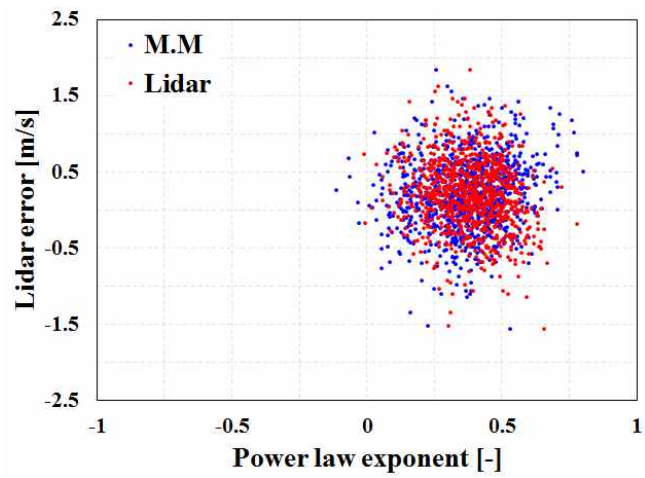
Fig. 4-7은 멱지수(Power law exponent)에 따른 라이다 에러의 분포를 나타낸다. 지표면 거칠기 상태와 라이다 에러의 상관관계를 파악하고자 나타내었다.

수망지역은 멱지수가 0.25 ~ 0.5에 라이다 에러의 중심이 형성되어있다. 멱지수의 평균값은 기상탑 0.370, 라이다 0.380이고, 멱지수의 표준편차는 기상탑 0.148, 라이다 0.126이다.

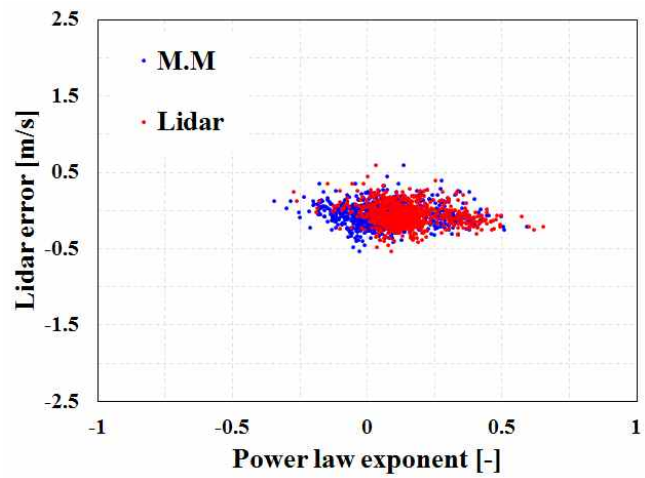
강정지역은 멱지수가 0 ~ 0.25에 라이다 에러의 중심이 형성되어 있다. 멱지수의 평균값은 기상탑 0.083, 라이다 0.155이고, 멱지수의 표준편차는 기상탑 0.159, 라이다 0.149 이다.

수산지역은 멱지수가 0.25에 라이다 에러의 중심이 형성되어 있다. 멱지수의 평균값은 기상탑 0.220, 라이다 0.243이고, 멱지수의 표준편차는 기상탑 0.175, 라이다 0.157 이다.

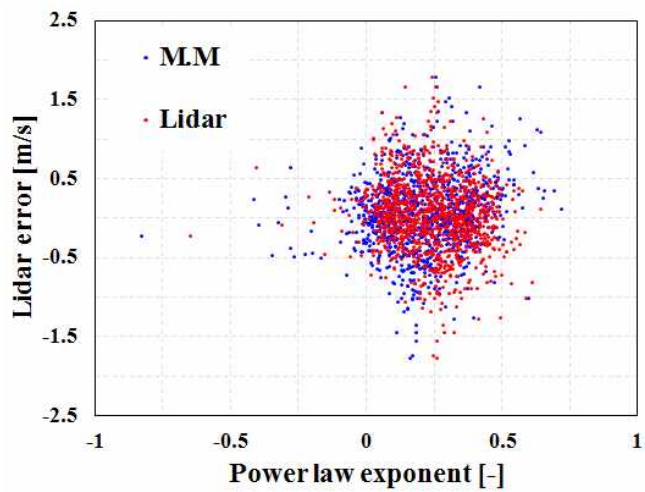
수망지역이 가장 높은 멱지수 값을 보였으며, 이는 농장과 수풀의 지표면 거칠기 상태를 나타낸다. 강정지역은 멱지수에 따른 라이다 에러의 변화가 미미하였다.



(a) Sumang



(b) Gangjeong



(c) Susan

Fig. 4-7 LiDAR error versus power law exponent

7. LiDAR error rate 분석결과

Fig. 4-8은 측정높이에 따른 라이다 풍속 에러율을 나타낸 것이다. 측정사이트별 평균 라이다 에러 비율은 수망 6.02 %, 강정 2.23 %, 수산 4.75 %이다. 이에 따른 표준편차는 수망 4.60 %, 강정 1.77 %, 수산 3.75 %이다. 전체적으로 라이다와 기상탑의 풍속데이터는 매우 잘 일치하고 있으며, 지형복잡도가 높아짐에 따라 라이다 에러율이 증가하는 것을 알 수 있다. 측정높이에 따라 라이다 에러율은 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 수망과 수산지역의 경우 지형이 복잡하여 지표면에서의 윈드 프로파일의 기울기 변화가 심해 측정높이인 40 m ~ 50 m에 영향을 준 것으로 판단된다. 강정은 높이가 증가함에 따라 라이다 에러율이 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 자세한 라이다 에러율과 표준편차는 Table 4-1에 나타내었다.

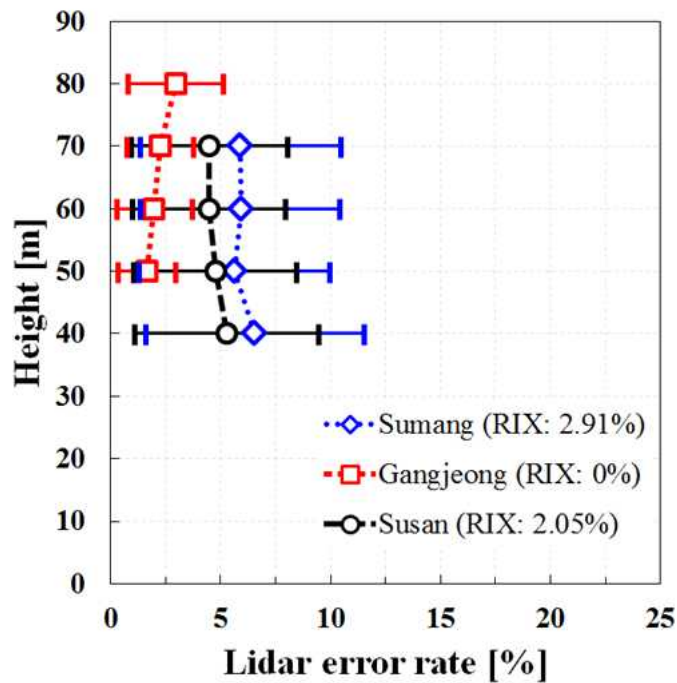


Fig. 4-8 LidAR errors rate and the standard deviation for wind speed with all measurement heights

Table 4-1 Summary of the LiDAR error rate and the standard deviation at all measurement heights

Height [m]	Sumang		Gangjeong		Susan	
	Relative error [%]	SD [%]	Relative error [%]	SD [%]	Relative error [%]	SD [%]
40	6.57	4.97			5.28	4.19
50	5.64	4.32	1.66	1.30	4.77	3.68
60	5.96	4.47	1.98	1.70	4.48	3.45
70	5.90	4.56	2.29	1.48	4.48	3.57
80			2.29	2.17		
Average value	6.02	4.60	2.23	1.77	4.75	3.75

V. CFD 분석

1. 분석대상 및 검사체적 구성

1) 분석지역

CFD 분석을 위한 사이트는 측정사이트 중 RIX값과 라이다 에러가 가장 높은 수망지역이다. Fig. 5-1은 수망지역의 항공사진으로써 측정지점 주위에 다수의 기생화산이 분포하고 있고, 수풀과 나무로 둘러싸여 있음을 확인 할 수 있다.

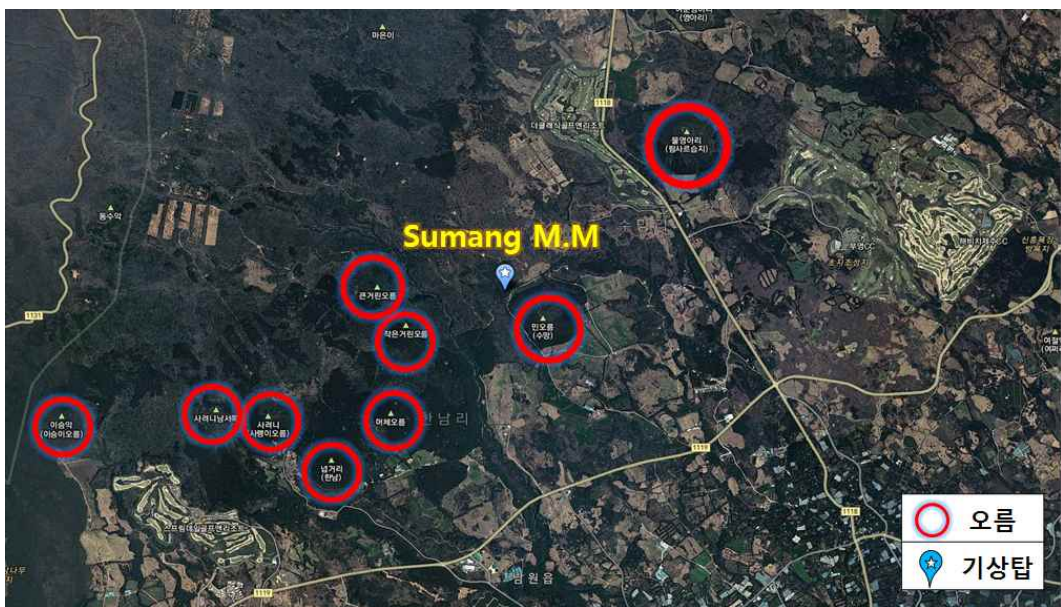


Fig. 5-1 Distribution of parasitic cones at Sumang

Fig. 5-2는 측정지점에 영향을 줄 수 있는 기생화산의 위치와 높이를 3D로 나타낸 그림이다. 특히 270도 방위에 위치한 큰거린 오름, 작은 거린 오름과 32도 방위에 위치한 민 오름의 거리가 각각 1350 m, 1100 m, 480 m로 이 오름은 풍속저감 및 난류강도 증가와 같은 직접적인 영향을 끼칠 수 있는 가까운 곳에 위치해 있다.

Table 5-1은 측정지점 5 km이내에 분포되어 있는 기생화산의 해발고도, 방위를 거리 순으로 나타낸 것이다. 5 km이내에 9개의 기생화산이 분포하며, 한라산이 위치해있는 270도 방위의 기생화산들이 높은 해발고도를 보인다.

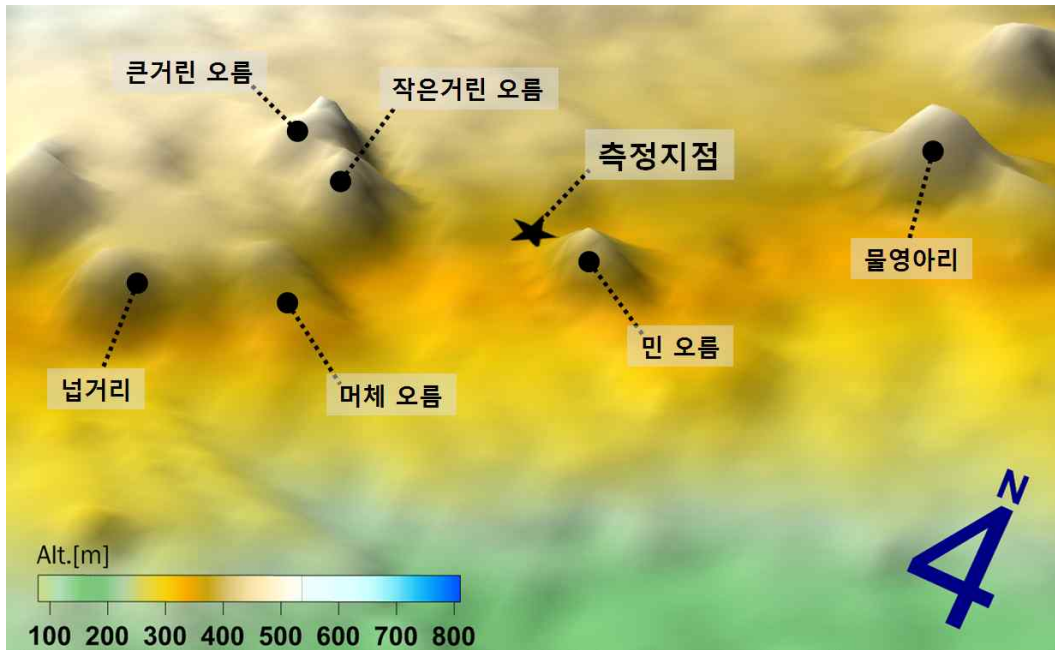


Fig. 5-2 3D image around measurement point in Sumang

Table 5-1 3D image parasitic cones around measurement point

기생화산	해발(m)	방위(°)	거리(m)
민	429	123	478
작은거린	493.2	248	1100
큰거린	532.7	269	1350
머체	425.8	221	1790
물영아리	508	49	2570
사려니	523	240	2850
이승악	539	247	4850
물чат	717.2	325	5020
챗망	444.6	21	5070

2) 검사체적(Control volume)의 구성

Fig. 5-3은 검사체적의 구성된 형태를 나타낸다. 해당 사이트의 검사체적은 1:5000의 수치지형도를 CAD 데이터를 바탕으로 삼각측량 알고리즘(Triangulation algorithm)을 이용하여 생성하였다. 크게 9개의 블록으로, 외각에는 24개의 면으로 구성되어있다. 수망지역 기상탑의 설치 위치를 중심으로 반경 5 km, 수직으로 2 km 크기의 검사체적을 구성하였다. 격자 해상도는 수평 50 m, 수직 30 m로 설정을 하였으며, 수직 확장율은 1.15로 설정을 하였다.[36] 지형 거칠기 데이터는 WAsP(The Wind Atlas Analysis and Application Program) 형식의 파일로 입력하였다. 총 노드 수는 772004개 이다.

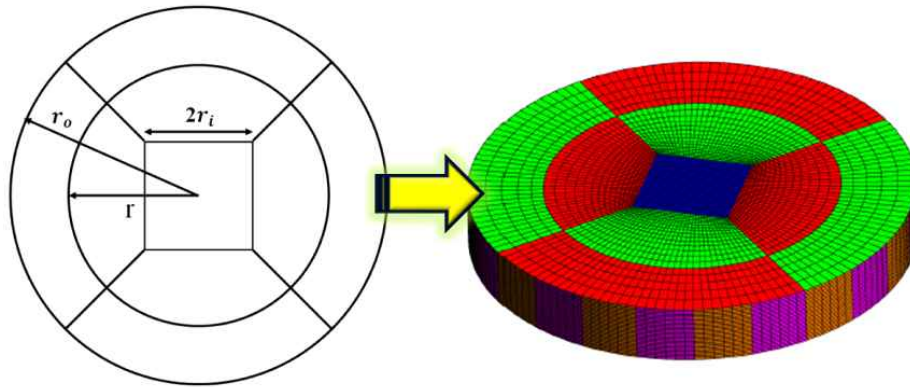


Fig. 5-3 Configuration of the control volume

Table 5-2는 CFD 분석 시 파라미터를 나타낸 표이다. 총 4개의 케이스로 CFD 분석을 수행하였으며, 측정지점에 영향을 끼칠 수 있는 기생화산이 위치한 49°, 123°, 225°, 270°를 유입풍향으로 설정하였다.

Table 5-2 Input parameters for CFD analysis

Parameter		Sumang			
		Case1	Case2	Case3	Case4
Wind direction [°]		49	123	225	270
Control volume	Radius [m]	5000			
	Height [m]	2000			
Vertical expansion factor		1.15			
Nodes		772004			

2. 경계조건 설정

CFD 분석 시 사용된 소프트웨어는 ANSYS CFX ver15.0이며, Reynolds Averaged Navier Stokes(RANS) 방정식, Shear Stress Transport(SST) $k-\omega$ 난류모델을 사용하였다.[32] 이 난류모델은 복잡형상에서 유동박리 처리에 장점이 있다.[33] 입력 경계조건의 바람 프로파일은 아래의 수식을 활용하였다.[34]

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5-1)$$

$$k = \frac{u_*^2}{C_\mu^{1/2}} \quad (5-2)$$

$$\epsilon(z) = \frac{u_*^3}{K(z+z_0)} \quad (5-3)$$

여기서, 마찰속도 u_* 은 기준높이 풍속에서 도출해낸다. k 는 난류운동에너지, ϵ 은 소산율, K 는 Von Karman 상수로써 0.41, z_0 는 조도계수, z 는 지표면에서 부터의 높이, C_μ 는 표준모델 상수로써 0.09를 나타낸다. 이때 지표면으로 부터 70 m 높이에서 7 m/s를 입력풍속으로 설정하였다.

3. 수망지역 CFD 분석 결과

Table 5-3 - 6은 수망지역 4개 입력풍향(49°, 123°, 225°, 270°)에 따른 CFD 분석 결과를 후처리과정을 통해 도시화한 그림이다. 지표면에서부터 40 m, 70 m 높이의 표준화된 풍속과, 난류강도를 나타낸다. 이때 사용된 수식은 아래와 같다.

$$V_{normalised} = \frac{V}{v_{ref}} \quad (5-4)$$

$$TI = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{V} \quad (5-5)$$

여기서, $V_{normalised}$ 는 표준화된 풍속을 의미하며, V 는 각 위치에서의 풍속이고, v_{ref} 는 기준풍속이다. 또한 TI 는 난류강도를 의미한다. Table 5-3은 CFD 분석 Case 1번의 결과를 보여주며, 측정지점에서 49° 방위에 위치한 물영아리 오름의 영향을 파악하기 위해 수행하였다. 물영아리 오름에 의해 풍속저감이 발생하였으며, 이로 인해 약 2570 m 떨어진 측정지점 40 m 높이에서 0.83, 70 m 높이에서 0.91의 표준화된 풍속이 예측되었다. 난류강도는 40 m 높이에서 0.088, 70 m 높이에서 0.085로 예측되었다.

Table 5-4는 CFD 분석 Case 2번의 결과를 보여주며, 측정지점에서 123° 방위에 위치한 민 오름의 영향을 파악하기 위해 수행하였다. 민 오름에 의해 풍속저감이 발생하였으며, 이로 인해 약 478 m 떨어진 측정지점 40 m 높이에서 0.64, 70 m 높이에서 0.83의 표준화된 풍속이 예측되었다. 난류강도는 40 m 높이에서 0.106, 70 m 높이에서 0.096로 예측되었다.

Table 5-5는 CFD 분석 Case 3번의 결과를 보여주며, 측정지점에서 225° 방위에 위치한 머체 오름의 영향을 파악하기 위해 수행하였다. 머체 오름에 의해 풍속저감이 발생하였으며, 이로 인해 약 1790 m 떨어진 측정지점 40 m 높이에서 0.81, 70 m 높이에서 0.91의 표준화된 풍속이 예측되었다. 난류강도는 40 m 높이에서 0.101, 70 m 높이에서 0.099로 예측되었다.

Table 5-6는 CFD 분석 Case 4번의 결과를 보여주며, 측정지점에서 270° 방위

에 위치한 큰거리린 오름과 작은거리린 오름의 영향을 파악하기 위해 수행하였다. 이 두개의 오름에 의해 풍속저감이 발생하였으며, 이로 인해 약 1100 m 떨어진 측정지점 40 m 높이에서 0.65, 70 m 높이에서 0.73의 표준화된 풍속이 예측되었다. 난류강도는 40 m 높이에서 0.106, 70 m 높이에서 0.115로 예측되었다.

CFD 분석을 통해 인근 오름에 의한 측정지점 및 수망지역 일대 풍속저감과 난류강도 증가를 확인하였다. 한라산이 위치한 측정사이트 좌측의 오름들이 해발 고도가 높았고, 이로 인해 측정사이트 우측에 위치한 오름보다 상대적으로 더 큰 영향을 측정지점에 미쳤다. 특히 큰거리린 오름과 작은 거리린 오름이 가장 직접적인 풍속저감 및 난류강도 증감에 영향을 미쳤다.

오름에 의한 후류는 수 킬로미터까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 측정지점 주변에 다수의 오름이 위치해 있어, 특정 풍향에서 오름이 중첩될 경우 후류에 의한 풍속저감은 주변부로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 5-3 Distribution of the normalised velocity and turbulence intensity under WD of 49°

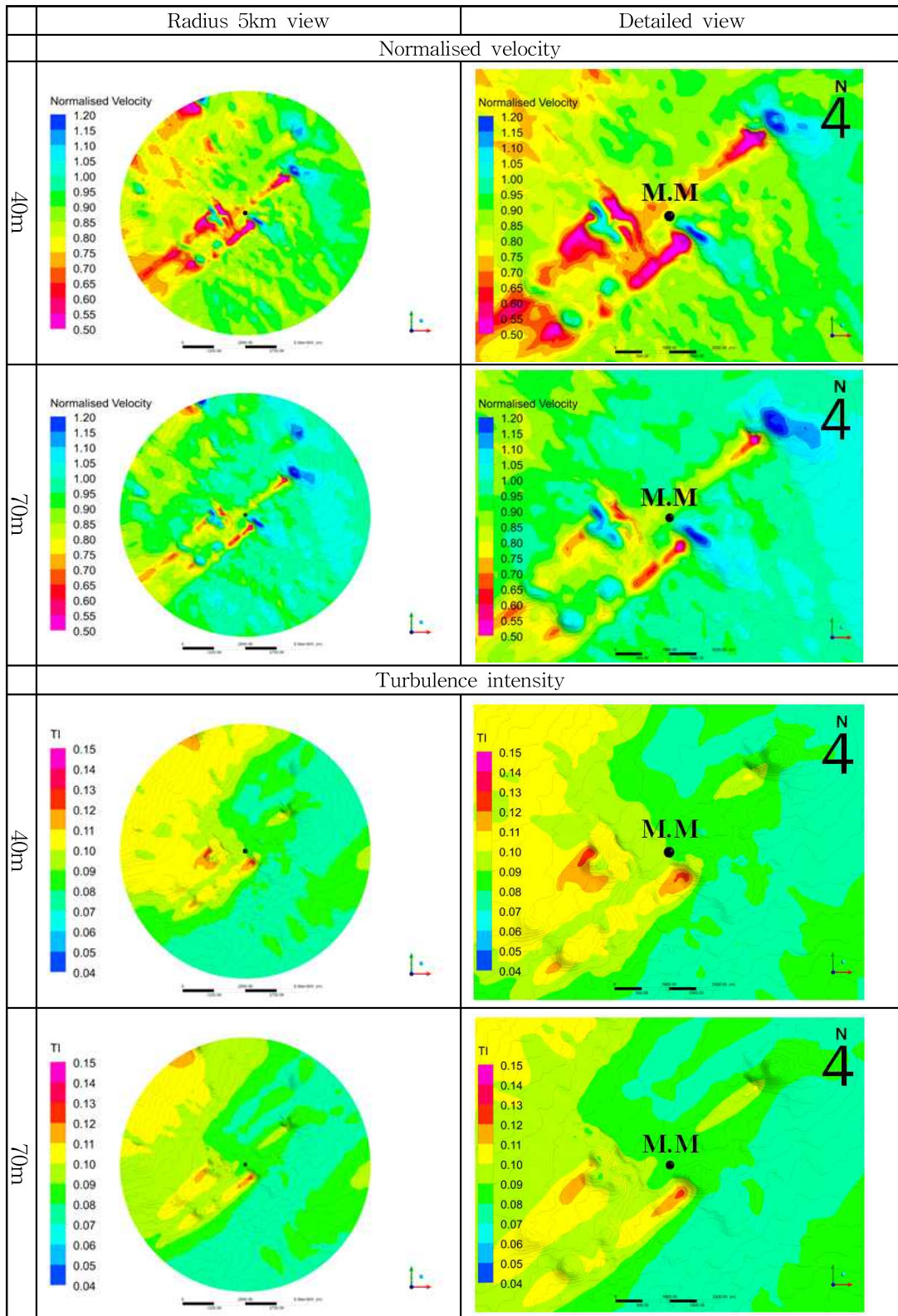


Table 5-4 Distribution of the normalised velocity and turbulence intensity under WD of 123°

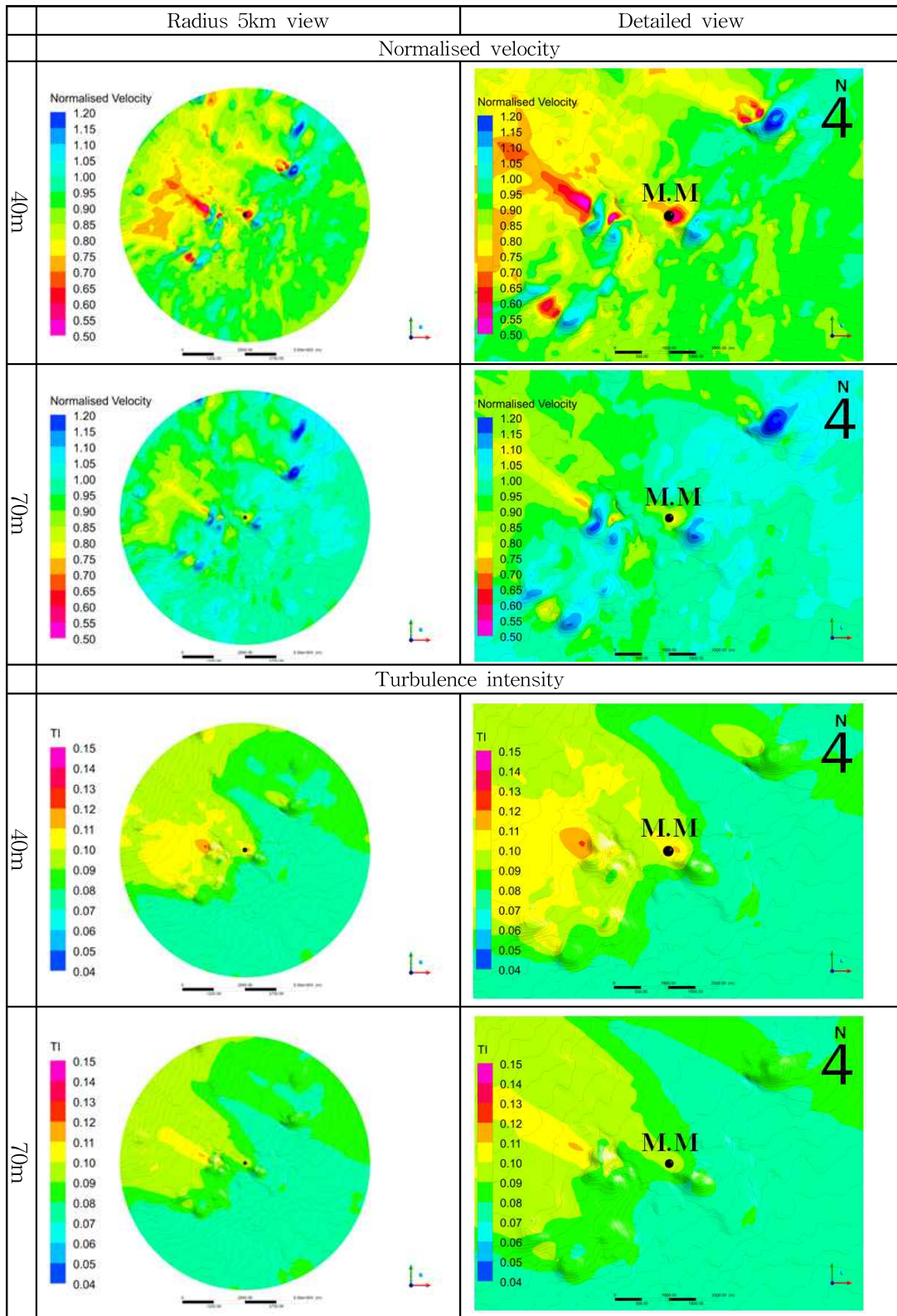


Table 5-5 Distribution of the normalised velocity and turbulence intensity under WD of 225°

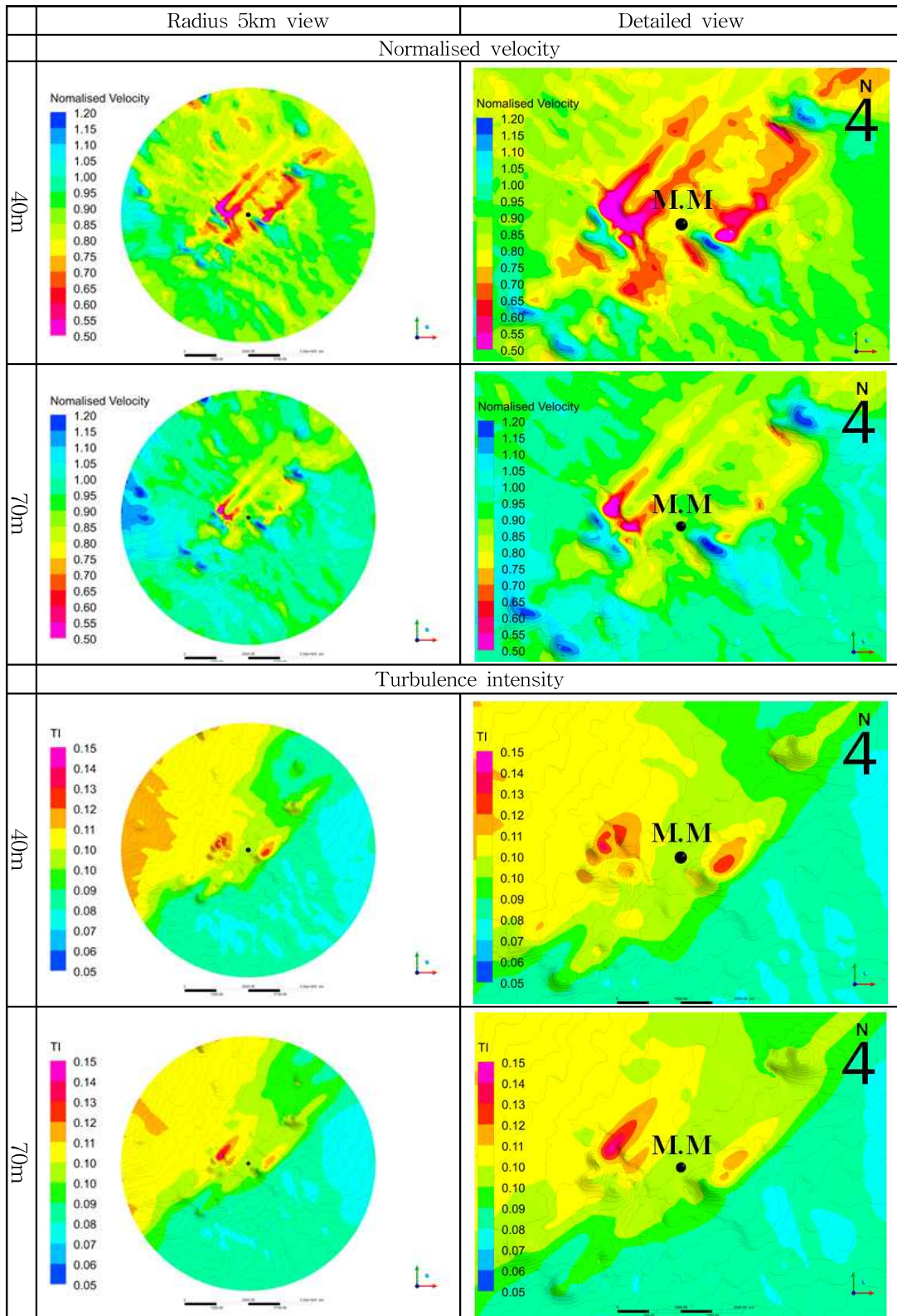


Table 5-6 Distribution of the normalised velocity and turbulence intensity under WD of 270°

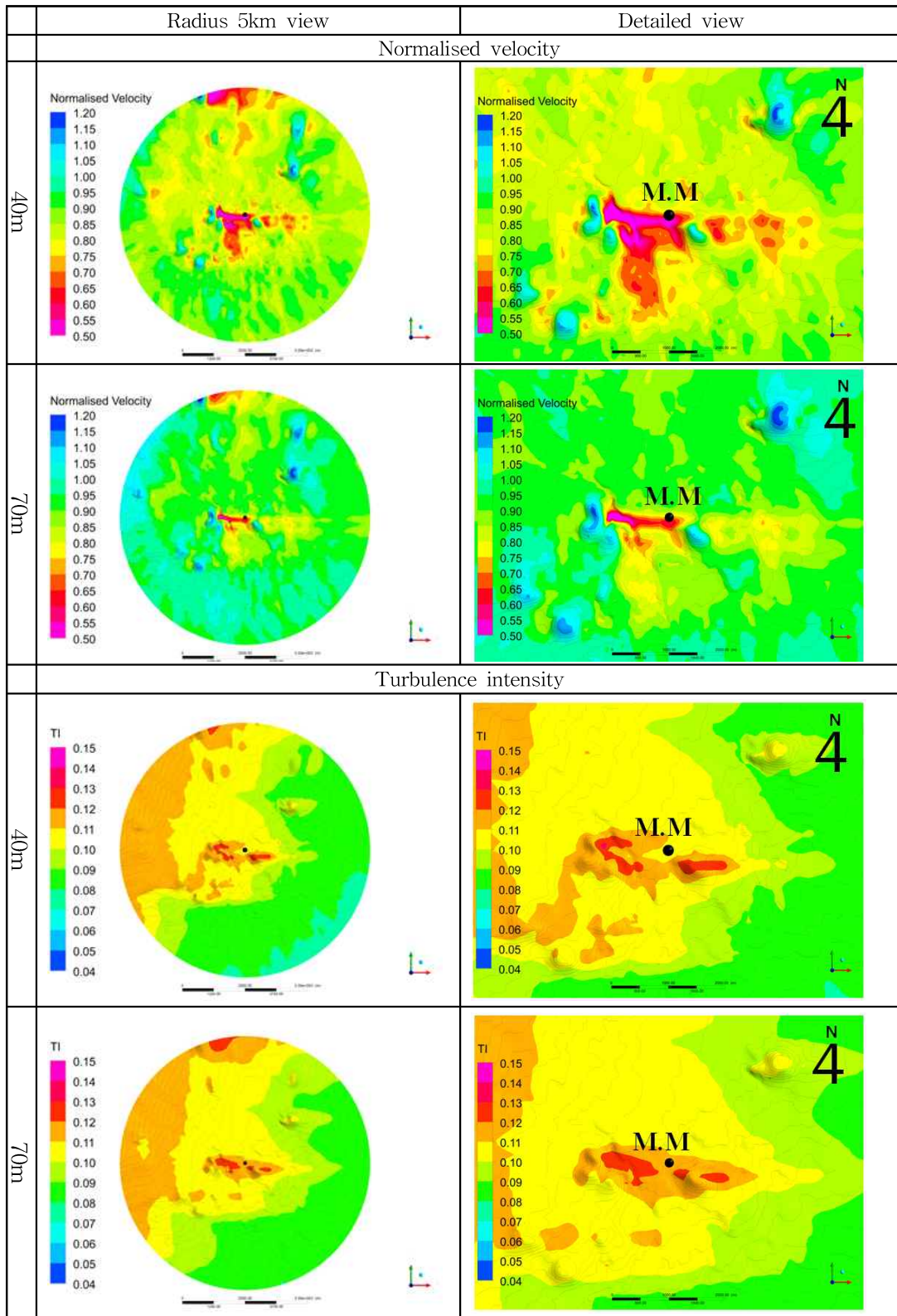


Fig. 5-4는 CFD 분석 중 측정지점에 가장 직접적인 영향을 미친 Case 4번 (270° 방위)을 후처리 과정에서 수직단면으로 잘라 지상으로 부터의 높이에 따른 표준화된 풍속으로 도시화한 그림이다. 기상탑 위치의 좌측 1.25 km거리 큰거리린 오름이 위치해있고, 표준화된 풍속 1.00은 7 m/s를 의미한다. 일반적으로, 오름의 앞쪽(바람이 불어오는 방향)부근 풍속이 증가하는 언덕효과가 관찰되며, 오름 뒤쪽 유동박리에 의해 풍속 저감이 발생하고 있다. 큰거리린 오름 뒤쪽 지면경사도가 가장 큰 부근의 각도는 약 38°이다. 이 부근을 Fig. 5-4의 확대창에 벡터로 표현을 하였다. 이를 통해 지표면부근 바람의 방향이 정반대가 되는 구간, 즉 재순환 영역이 관찰되었다. 큰거리린 오름의 풍속저감은 약 1.25 km떨어진 측정지점까지 영향을 미치며, 40 m 높이에서 0.65, 70 m 높이에서 0.73의 표준화된 풍속이 나타나고 있다.

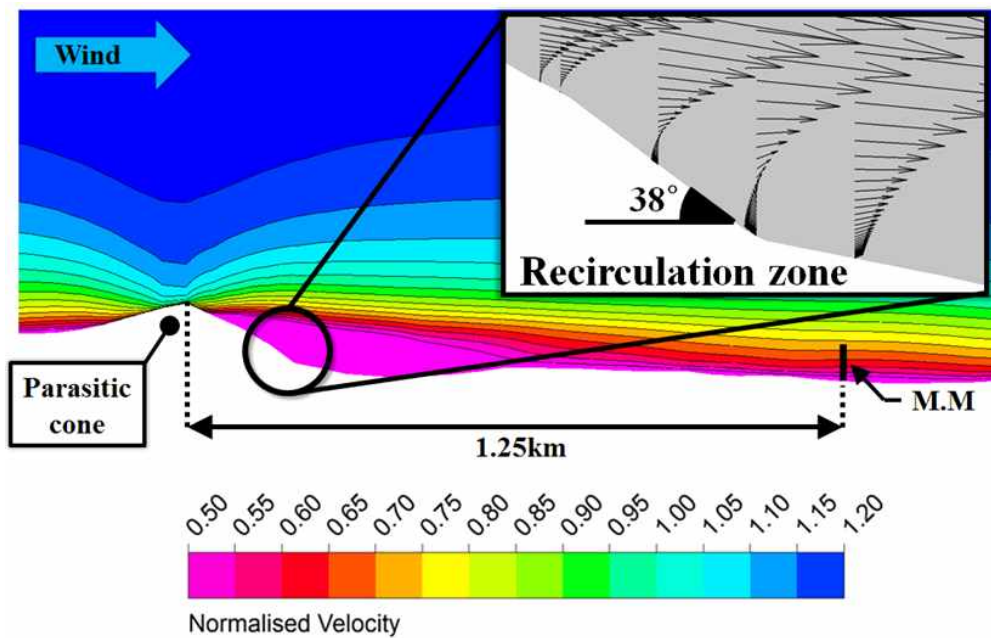


Fig. 5-4 Normalized velocity with the height at Sumang.

VI. 결 론

본 연구에서는 RIX값이 다른 제주도 측정사이트 3곳(수망, 강정, 수산)을 선정 한 후, 각 사이트 마다 4군데 측정높이에서 기상탑과 라이다의 10분 평균 바람데 이터를 취득하여 비교·분석을 수행하였다. 측정기간은 수망 14일, 강정 11일, 수 산 14일이며, 측정 캠페인은 겨울철 수행되었다. 정확한 비교·분석을 위해 취득된 동시간대 데이터에 풍향, 풍속, CNR, 자료가용률, 강수량에 대한 필터링을 실시 하였다. 이렇게 필터링을 거친 데이터를 이용하여 라이다 에러, 표준편차, 난류강 도의 분포형태와 빈도수를 분석하였다. 또한 지형 복잡도에 따른 라이다 에러 비 율을 정량적으로 구하였다. 추가적으로 RIX 값이 가장 높은 수망지역에 대해 CFD 분석을 수행한 후 후처리과정을 통해 표준화된 풍속과 난류강도 분포를 나 타내었다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) RIX 값은 수망 2.91 %, 강정 0 %, 수산 2.05 %였다. 수망, 강정, 수산지역 순서로 풍속의 결정계수 R^2 은 0.87, 1.00, 0.94 이상 이었으며, 풍향의 R^2 은 0.93, 1.00, 0.88이상을 나타내었다.

(2) 평균 풍속에 대한 라이다 에러율은 수망 6.02 %, 강정 2.23 %, 수산 4.75 %를 나타냈다. 또한 이 에러율의 표준편차는 수망 4.06 %, 강정 1.77 %, 수산 3.75 %를 나타냈다. 본 연구의 측정 사이트에서 기상탑과 라이다의 풍속데이터 차이는 약 2~6 %로 라이다 풍속이 기상탑 풍속보다 다소 높음을 확인하였고, 이 차이의 절대값은 수망 0.23 m/s, 강정 0.06 m/s, 수산 0.15 m/s를 보였다. 즉 RIX값이 높을수록 라이다 에러율 및 표준편차 또한 높게 나타났다.

(3) 수망지역 CFD 분석결과, 인근 오름에 의한 풍속저감 및 난류강도 증감이 발생함을 알 수 있었다. 특히 측정지점에서 270° 방위에 위치해 있는 큰거린 오 름의 영향에 의해 표준화된 풍속과 난류강도는 40 m에서 각각 0.65와 0.11, 70 m에서 0.73과 0.12로 예측되었다.

(4) 풍력자원평가를 위해 본 연구에 사용된 지상기반 라이다를 활용하는 것은 신뢰성 있는 대체방법으로 생각된다. 하지만, 복잡지형에서의 라이다 에러를 줄이기 위한 연구가 필요하고, 라이다 기술의 이해 및 검증데이터 확보를 위한 지속적인 노력이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] IEC 61400-12-1. Wind Turbines —Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines. 1st ed; 2005.
- [2] Pedersen TF. Development of a Classification System for Cup Anemometers-CLASSCUP. Risø-R-1348(EN); Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark; 2003.
- [3] Lackner MA, Rogers AL, Manwell JF. Wind Energy Site Assessment and Uncertainty. Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts, Amherst, MA, USA; 2006.
- [4] Wind Energy-The Facts. EWEA (European Wind Energy Association); 2009.
- [5] Courtney M, Wagner R, Lindelöw P. Commercial LiDAR profilers for wind energy—A comparative guide. EWEC (European Wind Energy Association); 2008.
- [6] Emeis S, Harris M, Banta RM. Boundary-layer anemometry by optical remote sensing for wind energy applications. Meteorologische Zeitschrift 16, Nr. 4, 2007. pp. 337-347.
- [7] Faghani D, Desrosiers E, Ait-Driss B, Poulin M. Use of Remote Sensing in Addressing Bias & Uncertainty in Wind Measurements. AWEA Wind Resource & Project Energy Assessment Workshop; 2008.
- [8] Smith, D, Harris M, Ciffey A, Mikkelsen T, Joergensen H, Mann J, Danielian R. Wind LIDAR Evaluation at the Danish Wind Test Site in Høvsøre. In Proceedings of the EWEA, European Wind Energy Conference, London, UK, 22-25 November 2004.
- [9] Deutsche WindGuard Consulting. Evaluation of ZephIR; Project No. VC 05250, Report PWG 06005; Deutsche WindGuard GmbH: Varel, Germany, 2006.

- [10] Jaynes DW. MTC Final Progress Report—LIDAR; Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts: Amherst, MA, USA, 2007.
- [11] Peña A, Hasager C, Gryning SE, Courtney M, Antoniou I, Mikkelsen T. Offshore wind profiling using light detection and ranging measurements. *Wind Energy* 2009, 12, 105–124.
- [12] Kindler D, Oldroyd A, MacAskill A, Finch D. An eight month test campaign of the Qinetiq ZephIR system; Preliminary results. *Meteorologische Zeitschrift*, 16, 2007; 479–489.
- [13] Albers A, Janssen AW, Mander J. Comparison of LiDARs, German Test Station for Remote Sensing Devices. In Proceedings of the German Wind Energy Conference, DEWEK 2008, Wilhelmshaven, Germany, 26–27 November 2008.
- [14] Parmentier R, Cariou J, Sauvage L, Valla M, Lindelöw P, Antoniou I. Accuracy and Relevance of Pulsed Doppler LiDAR Wind Profile Measurement in Complex Terrain. In Proceedings of the EWEA (European Wind Energy Conference), Brussels, Belgium; 31 March–3 April 2008.
- [15] Jaynes D. LiDAR Validation and Recommendations for Wind Resource Assessments. In Proceedings of the AWEA WINDPOWER 2009 Conference, Chicago, IL, USA, 4–7 May 2009.
- [16] Brower M, 2012. *Wind Resource Assessment, A Practical Guide to Developing a Wind Project*. Wiley & Sons. New Jersey.
- [17] Foussekis D, Georgakopoulos T, Karga I. Investigating Wind Flow Properties in Complex Terrain Using 3 LiDARS and a Meteorological Mast. In Proceedings of the EWEA (European Wind Energy Conference), Marseille, France, 16–19 March 2009.
- [18] Bingöl F, Mann J, Foussekis D. LiDAR performance in complex terrain modeled by WASP Engineering. EWEC 2009 Proceedings. Marseille,

March 2, 2009.

- [19] Brady O, Harris M, Girault R, Abiven C. Correction of Remote Sensing Bias in Complex Terrain Using CFD. In Proceedings of the EWEA European Wind Energy Conference, Warsaw, Poland, 20–23 April 2010.
- [20] Bouquet M, Parmentier R, Sauvage L, Cariou JP. Theoretical and CFD Analysis of Pulsed Doppler LiDAR Wind Profile Measurement Process in Complex Terrain. In Proceedings of the EWEA European Wind Energy Conference, Warsaw, Poland, 20–23 April 2010.
- [21] Hu CH. Applying CFD and LiDAR for Wind Profiling and Risk Assessment in a Forested Area. In Proceedings of the EWEA European (Wind Energy Conference), Warsaw, Poland, 20–23 April 2010.
- [22] Cariou JP, Paramentier R, Valla M, Sauvage L, Antoniou I and Courtney M. An Innovative and Autonomous 1.5 μ m Coherent LiDAR for PBL Wind Profiling 14th Coherent Laser Radar Conference, Snowmass, Colorado USA, 2007.
- [23] Cañadillas B, Westerhellweg A, Neumann T. Testing the Performance of a Ground-based Wind LiDAR System. DEWI GmbH. Wilhelmshaven. DEWI MAGAZIN NO. 38, FEBRUARY 2011.
- [24] Gottschall J, Courtney M. Verification test for three WindCube™ WLS7 LiDAR at the Høvsøre test site. Risø-R-1732(EN), Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy, May 2010.
- [25] WIND CUBE V2 LiDAR REMOTE SENSOR User Manual version 06. Leoshpere, France.
- [26] Bowen A.J. and Mortensen N.G. Wasp prediction errors due to site orography. Technical Report Ris-R-995(EN), RisNational Laboratory, 2004.
- [27] Niels G. Mortensen, Amy J. Bowen, and Ioannis Antoniou, editors.

- Improving WAsP predictions in (too) complex terrain, Proceedings of the 2006 European Wind Energy Conference and Exhibition. EWEA, February 2006.
- [28] Bingöl F, Mann J, Foussekis D. LiDAR performance in complex terrain modelled by WAsP Engineering. EWEC 2009, Parc Chanot, Marseille, France, 17 March 2009.
- [29] Ko KN. and Huh JC. The introduction to wind engineering. MunUnDang, Seoul, 2006, pp. 42-44
- [30] WindPRO 3.0 Manual, Chapter 3.0 ENERGY calculation, July 2015. <http://help.emd.dk/knowledgebase>.
- [31] Sloan SW. A fast algorithm for constructing Delaunay triangulations in the plane. Advances in Engineering Software. Vol.9, 1987. pp. 34-55.
- [32] Menter DR. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA-Journal, 32(8), 1994, pp269-289.
- [33] Montavon C, Jones L, Staples C, Strachan C, Gutierrez L. Practical issues in the use of CFD for modelling wind farms. EWEC Proceedings, 2009.
- [34] Durbin PA. and Petterson Reif B.A. Statistical theory and modelling for turbulent flows, John Wiley & Sons, Chichester. 2001.