

수풍부 형상에 따른 로드 셀형 풍향풍속계의 하중 비 비교

김태형* · † 한동섭

* 경남정보대학교 기계설계과 교수, † 동아대학교 기계공학과 교수

Comparison of Load Ratio of Load-cell type Anemometer with Windswept Shape Variation

Tae-Hyeong Kim* · † Dong-Seop Han

* Department of Mechanical Design, Kyungnam College of Information & Technology, Busan 617-701, Korea

† Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

요 약 : 풍향풍속계는 실시간으로 풍향과 풍속을 측정하는 기상관측기구로서 바람의 영향을 많이 받는 항만, 조선소, 해상구조물, 또는 건설현장에서 사용되는 크레인에 장착되어 작업가능 여부를 알리거나 전도 사고를 예방하기 위한 안전시스템과 연동되어 사용된다. 로드 셀형 풍향풍속계는 4개의 수풍부에 연결된 로드 셀의 하중 합을 이용하여 풍속을, 하중 비를 이용하여 풍향을 측정한다. 선행연구에 따르면, 풍향에 따른 인접한 두 수풍부의 하중 비는 날개 주위에 와류로 인해 불규칙한 값을 보이게 되며, 이는 풍향 오차를 증가시키는 원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 오차를 줄이기 위하여 세 가지 수풍부 형상에 따른 하중 비를 분석하고, 오차를 줄일 수 있는 수풍부 형상을 제시하고자 한다. 수풍부 형상에 따른 하중 비를 비교하기 위해 ANSYS CFX를 사용하여 유동해석을 수행하였으며, 설계변수로 0도에서 90도까지 11.25도 간격으로 9가지 풍향조건을 설정하였다.

핵심용어 : 풍향풍속계, 로드 셀, 하중 비, 수풍부 형상, 전산유동해석

Abstract : Anemometer is a meteorological instrument that measures wind direction and wind speed in real time, and is mounted to the cranes that are used at ports, shipbuilding yards, off-shore structure, or construction sites that are influenced by wind, and it is used in conjunction with the safety system. Load cell-type anemometer measures the wind direction through the ratio of load between 4 positions by mounting the thin plate to 4 load cells, and measures wind velocity through the summation of loads. According to previous research, the load ratio between two adjacent windswept with respect to the wind direction has unstable value due to vortex around windswept. This causes the result that increases an error on the wind direction. In this study we compared and analyzed the difference between the load ratio with respect to three type windswept shapes in order to suggest the proper windswept shape to reduce this error. The computational fluid flow analysis is carried out with ANSYS CFX to analyze the load ratio between three windswept shapes. Wind direction was adopted as the design variable, and selected 9 wind direction conditions from 0°~90° with 11.25° interval for computational fluid flow analysis.

Key words : anemometer, load cell, load ratio, windswept shape, computational fluid flow analysis

1. 서 론

풍향풍속계(anemometer)는 실시간으로 풍향과 풍속을 측정하는 기상관측기구로서 바람의 영향을 많이 받는 항만, 조선소, 해상구조물, 건설현장에서 사용되는 크레인에 장착되어 작업가능 여부를 알리거나 전도 사고를 예방하기 위한 안전시스템과 연동되어 사용된다. 현재 사용되고 있는 풍향풍속계는 크게 프로펠러 식(propeller type)과 초음파 식(ultrasonic type)으로 나뉜다(Kim, 1991). 프로펠러 식 풍향풍속계는 꼬리 날개를 이용하여 풍향을 측정하고 프로펠러의 회전속도를 이용하여 풍속을 측정하는 방식으로, 베어링의 마모로 인한 내

구성이 떨어지는 단점이 있다. 초음파 식 풍향풍속계는 여러 개의 고정된 초음파 송수신기 사이의 공기흐름에 의한 초음파의 도달시간을 측정하여 풍향과 풍속을 측정하는 방식으로 겨울철에 송수신기에 서리가 맺히거나 주변에 소음이 발생하면 오작동이 되는 단점이 있다(박, 2006). 이러한 기존 풍향풍속계의 단점을 보완하기 위해 제안된 방식이 로드 셀형(load-cell type) 풍향풍속계이다.

로드 셀형 풍향풍속계는 90도 간격으로 배치된 네 개의 로드 셀에 바람을 받기 위한 얇은 평판을 장착하여 네 지점의 하중 비를 통해 풍향, 하중 합을 통해 풍속을 측정한다. 따라서 로드 셀형 풍향풍속계를 개발하기 위해서는 측정된 네

† 교신저자 : 정희원, dshan@dau.ac.kr 051)200-1059

* 정희원, kimth@kit.ac.kr 051)320-1377

지점의 하중 비와 풍향, 하중 합과 풍속사이의 관계식을 각각 도출해야 한다. 그런데 로드 셀형 풍향풍속계는 구조적으로 네 지점의 하중 합이 풍향과 관계없이 일정하며, 풍하중이 풍속의 제곱에 비례하기 때문에 하중 합과 풍속사이의 관계식을 도출하는 것은 어렵지 않다(이, 2010). 그러나 네 개의 로드 셀을 사용하기 때문에 하중 비는 90도 간격으로 반복되며, 풍향에 따라 값이 비선형적으로 변하므로 정밀도가 높은 제품을 개발하기 위해 하중 비와 풍향사이의 정확한 관계식을 도출하는 것이 요구된다.

선행연구(한, 2012)에서는 기본적인 직사각형의 수풍부 형상에 대해 풍향 및 풍속변화에 따른 인접한 두 수풍부의 하중 비를 분석하여 하중 비와 풍향사이의 관계식을 3차식으로 도출하였다. 그러나 하중 비는 수풍부 주위에 와류로 인해 불규칙한 값을 보이게 되며, 이는 풍향 오차를 증가시키는 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 로드 셀형 풍향풍속계의 상용화를 위해 세 가지 수풍부 형상에 따른 하중 비를 분석하고, 오차를 줄일 수 있는 수풍부 형상을 제시하고자 한다. 수풍부 형상에 따른 하중 비를 비교하기 위해 ANSYS CFX를 사용하여 유동해석을 수행하였으며(ANSYS Inc, 2010), 설계변수로 0도에서 90도까지 11.25도 간격으로 9가지 풍향조건을 설정하였다.

2. 하중비와 풍향사이의 관계

로드 셀형 풍향풍속계의 구조는 Fig. 1과 같이 90°간격으로 배치된 막대형 로드 셀에 얇은 평판을 부착한 네 개의 수풍부와 중심 축 및 상하 덮개로 구성된다.

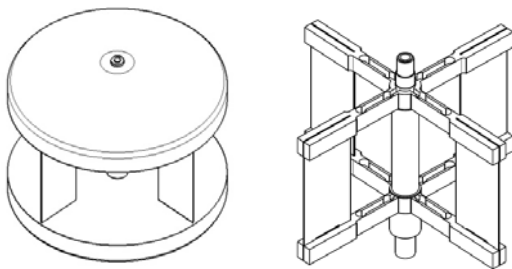


Fig. 1 Schematic of a load cell-type anemometer

네 수풍부에서의 하중은 각 상하 두 로드 셀 하중을 평균하여 측정하며, 네 수풍부의 하중 합을 이용하여 풍속을 산출하고, 바람이 부는 방향에 인접한 두 수풍부의 하중 비를 이용하여 풍향을 산출하는 방식을 취하고 있다. 풍하중은 풍속의 제곱에 비례하므로 풍속의 측정은 풍향에 관계없이 비교적 쉽게 이뤄지는 반면에, 풍향의 측정은 90° 간격으로 바람의 방향을 결정한 후 정확한 풍향을 결정하는 두 단계를 거쳐야 하므로 이에 대한 관계설정이 중요하다.

하중 비와 풍향사이의 관계를 정립하기 위해 동서남북방향으로 각 로드 셀에 번호를 설정하여 Fig. 2에 나타내었다(#1 :

북쪽, #2 : 동쪽). 풍향은 북풍을 0°로 하며 회전방향은 시계방향으로 한다. Fig. 2를 살펴보면 풍향이 90도 간격으로 각 로드 셀의 값이 순차적으로 반복된다는 것을 알 수 있다. 따라서 바람이 몇 사분면으로 불어오는 지 판단할 수 있어야 하중 비를 구할 수 있다. 각 로드 셀의 경우 시계방향 회전굽힘을 양(+)의 값으로, 반시계방향 회전굽힘을 음(-)의 값으로 설정하였을 때 풍향에 따른 각 수풍부 응력의 부호는 Table 1과 같다.

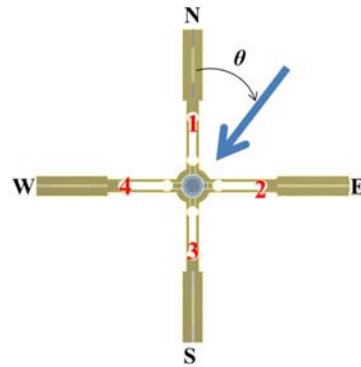


Fig. 2 Numbering of each load cell

Table 1 Sign of load in each load cell according to the wind direction

Position	Wind direction range (°)							
	0	0<θ<90	90	90<θ<180	180	180<θ<270	270	270<θ<360
1	0	-	-	-	0	+	+	+
2	+	+	0	-	-	-	0	+
3	0	+	+	+	0	-	-	-
4	-	-	0	+	+	+	0	-
Case	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧

바람이 각 사분면의 경계 각도에 있을 때(①, ③, ⑤, ⑦)는 0°, 90°, 180°, 270°의 값을 바로 표시하고, 각 사분면의 사이 각도에 있을 때(②, ④, ⑥, ⑧)는 각 사분면에 해당하는 두 개의 로드 셀의 하중을 이용하여 식 (1)과 같이 하중 비를 정의하여 풍향을 측정한다. 시계방향으로 각 사분면의 시작 지점의 로드 셀을 i, 끝 지점의 로드 셀을 j라고 하면 하중 비 (R_L)는 아래 식과 같이 정의된다.

$$R_L = \frac{|L_i|}{|L_i| + |L_j|} \quad (i = 1, 2, 3, 4, j = 2, 3, 4, 1) \quad (1)$$

3. 수풍부 형상에 따른 전산유동해석

3.1 해석모델

선행연구(한, 2012)에 따르면 직사각형 수풍부는 주변의 와류로 인해 10~30°와 60~80°의 풍향에서 불규칙적인 결과를

보였다. 이러한 결과는 하중 비와 풍향사이의 관계식을 도출할 때 편차를 발생시켜 측정오차를 발생시킨다. 따라서 오차를 최소화하기 위한 수풍부의 형상을 제시하기 위하여 세 가지 형상의 수풍부를 선정하여 수풍부의 형상이 하중 비에 미치는 영향을 평가하였다. 해석모델을 Fig. 3에 나타내었다. 흡은 평판이 풍하중을 충분히 받도록 폭의 1/3이 되도록 설정하였다.

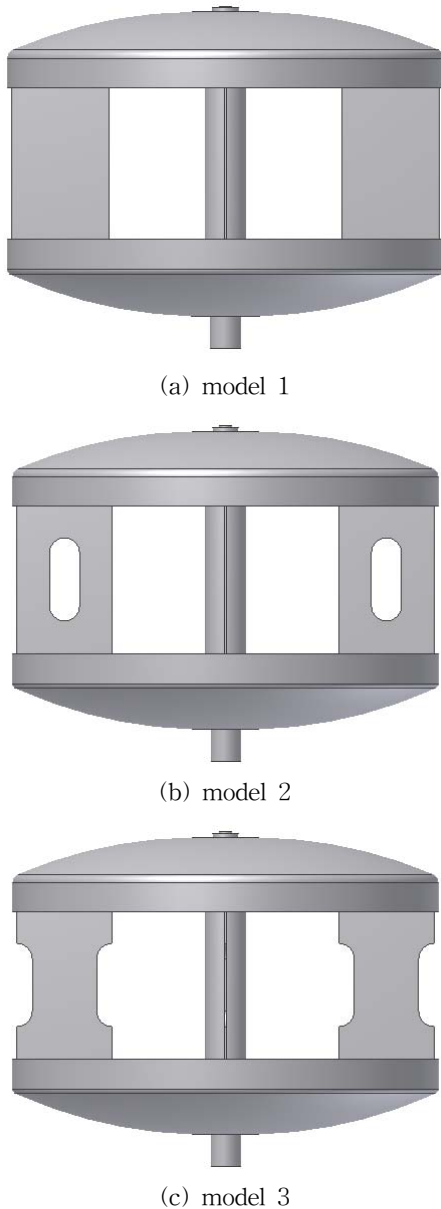


Fig. 3 Three types of windswept shape

3.2 해석조건

로드 셀형 풍향풍속계의 전산유동해석을 위한 유동장은 유동해석에 널리 사용되는 육면체로 구성하였으며, 경계면의 영향을 최소화하기 위하여 유동장의 폭과 높이는 해석 모델 크기의 5배, 전면부 길이는 4배, 후면부 길이는 10배로 생성하였

다. Fig. 4는 해석을 위한 유동장과 경계조건을 나타낸다. 사면체요소를 사용하여 유한요소를 생성하였으며, 요소의 크기를 해석모델 주변은 평판 두께로 설정하였으며, 경계면에는 Default 값을 적용하였다.

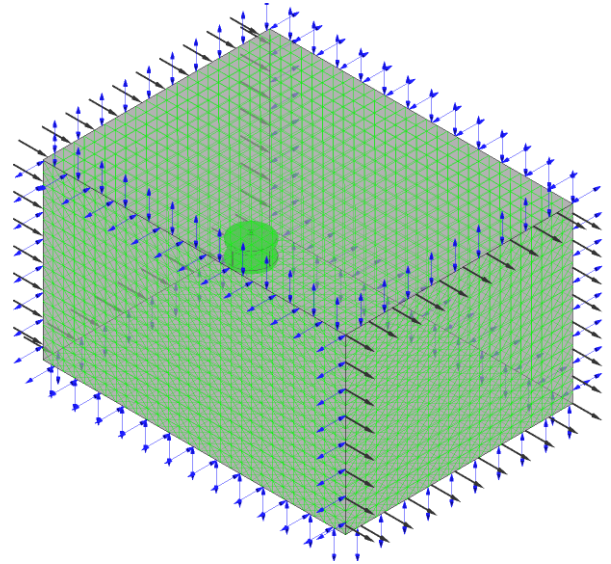


Fig. 4 Conditions for computational fluid flow analysis

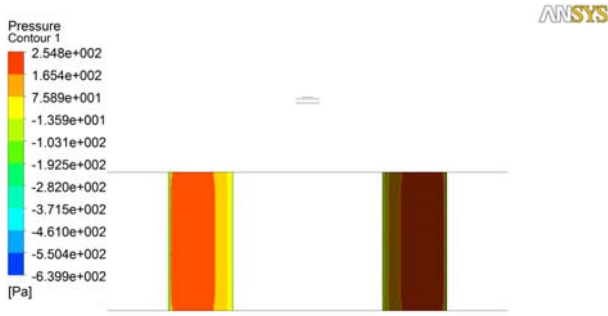
경계조건은 좌측 입구를 Inlet으로 설정하고 20 m/s의 풍속을 적용하였다. 우측 출구는 Outlet으로 설정하고 좌우와 상하면은 Opening으로 경계조건을 설정하고 작용압력은 대기압으로 하였다. 수풍부의 각 평판에 영역을 할당하여 유동해석 후 수풍부에 작용하는 압력을 확인할 수 있도록 하였다. 전산유동해석을 위한 난류조건으로 k-ε모델을 채택하였다(Teixeira, 2005).

선행연구에서 인접한 두 날개 사이의 하중 비는 풍속과 무관함을 확인하였으므로 세 가지 해석 모델의 상대비교를 위해 20m/s의 풍속을 적용하였으며, 0°에서 90°까지 11.25°간격으로 총 9가지 풍향조건을 설계변수로 하여 해석을 수행하였다. 공기의 밀도는 1.225 N·s²/m⁴를 적용하였다(이, 2009).

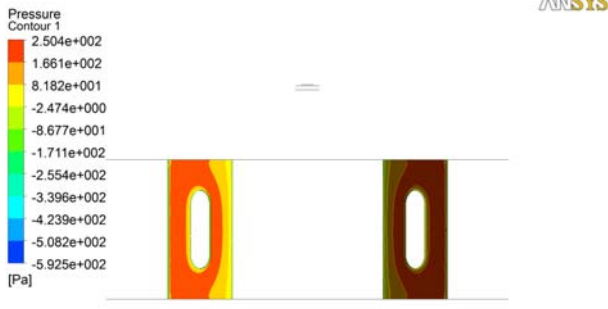
3.3 해석 결과

로드 셀형 풍향풍속계에서는 바람의 방향에 따라 인접한 두 개의 로드 셀에서의 하중을 검출하여 두 하중 비에 의해 풍향을 산출하게 된다. 하중 비는 90° 간격으로 반복되므로 본 연구에서는 0°에서 90°까지의 구간에서 1번(N)과 2번(E) 날개의 하중 비를 산출하였다. 풍향에 따른 각 수풍부의 압력 합은 결과적으로 각 막대형 로드 셀의 하중이 되므로 유동해석결과로 각 날개의 하중 합을 산출하여 하중 비를 계산하였다. 전산유동해석은 ANSYS CFX를 사용하여 수행하였다.

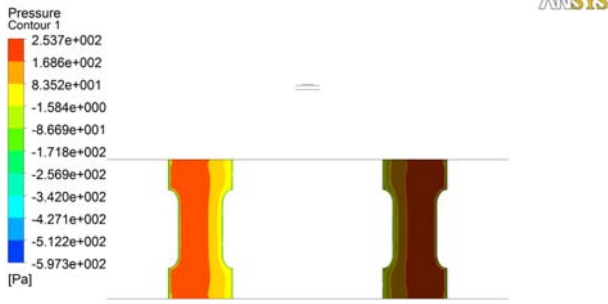
Fig. 5는 풍향 45°, 풍속 20m/s조건에서 유동해석을 통해 도출한 세 가지 모델에 대한 수풍부의 압력분포도를 나타낸다.



(a) model 1



(b) model 2



(c) model 3

Fig. 5 Pressure distribution of a windswept through fluid flow analysis (when $\theta=45^\circ$, $v=20\text{m/s}$)

풍향에 따른 각 모델의 1, 2번 수풍부의 압력 합(L_1 , L_2)과 식 (1)을 이용하여 계산한 하중 비(R_L)를 표 2~4에 나타내었다.

Table 2 Sum of pressure and load ratio for windswept 1 and 2 with respect to wind direction in model 1

Wind direction ($^\circ$)	Sum of pressure (kPa)		Load ratio
	L_1	L_2	
0.00	1.2	402.8	0.003
11.25	-186.4	401.0	0.317
22.50	-241.6	388.4	0.384
33.75	-358.1	405.2	0.469
45.00	-402.3	406.4	0.497
56.25	-405.2	358.1	0.531
67.5	-388.4	241.6	0.616
78.75	-401.0	186.4	0.683
90.00	-402.8	-1.2	0.997

Table 3 Sum of pressure and load ratio for windswept 1 and 2 with respect to wind direction in model 2

Wind direction ($^\circ$)	Sum of pressure (kPa)		Load ratio
	L_1	L_2	
0.00	0.5	480.3	0.001
11.25	-235.6	544.3	0.302
22.50	-314.8	480.7	0.396
33.75	-438.8	504.8	0.465
45.00	-514.7	515.5	0.500
56.25	-504.8	438.8	0.535
67.5	-480.7	314.8	0.604
78.75	-544.3	235.6	0.698
90.00	-480.3	-0.5	0.999

Table 4 Sum of pressure and load ratio for windswept 1 and 2 with respect to wind direction in model 3

Wind direction ($^\circ$)	Sum of pressure (kPa)		Load ratio
	L_1	L_2	
0.00	0.8	382.7	0.002
11.25	-191.6	373.0	0.339
22.50	-223.7	365.0	0.380
33.75	-316.2	397.3	0.443
45.00	-364.6	368.2	0.498
56.25	-397.3	316.2	0.557
67.5	-365.0	223.7	0.620
78.75	-373.0	191.6	0.661
90.00	-382.7	-0.8	0.998

Table 2~4에서 풍향이 0° 일 때, 모델에 따른 2번 수풍부의 압력 합(L_2)은 각각 402.8 kPa, 480.3 kPa, 382.7 kPa로서, 중앙에 홈이 가공된 model 2의 경우 기존 직사각형인 model 1에 비해 단면적이 줄어들었음에도 불구하고 압력은 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 바람이 중앙의 홈을 통과하기 위해 평판을 더욱 세게 밀어낸다는 것을 의미한다. 그리고 양 측면에 홈을 가공한 model 3의 경우 압력 값이 줄어든 것을 통해 볼 때 바람이 양 옆으로 잘 빠져간다는 것을 보여준다.

4. 결과 및 고찰

수풍부의 형상이 하중 비에 미치는 영향을 평가하기 위하여 각 모델에 대한 하중 비를 비교하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Comparison of load ratio among three models with respect to wind direction

Wind direction (°)	Model		
	1	2	3
0.00	0.003	0.001	0.002
11.25	0.317	0.302	0.339
22.50	0.384	0.396	0.380
33.75	0.469	0.465	0.443
45.00	0.497	0.500	0.498
56.25	0.531	0.535	0.557
67.5	0.616	0.604	0.620
78.75	0.683	0.698	0.661
90.00	0.997	0.999	0.998

0°와 90°는 하중 비와 관계없이 Table 1에 나타낸 네 날개의 부호에 따라 표시하게 되어 있으므로 Table 5에서 0°와 90°를 뺀 0° < θ < 90°구간에서 수풍부의 형상에 따른 하중 비의 경향을 살펴보기 위하여 Fig. 6에 그래프로 나타내었다.

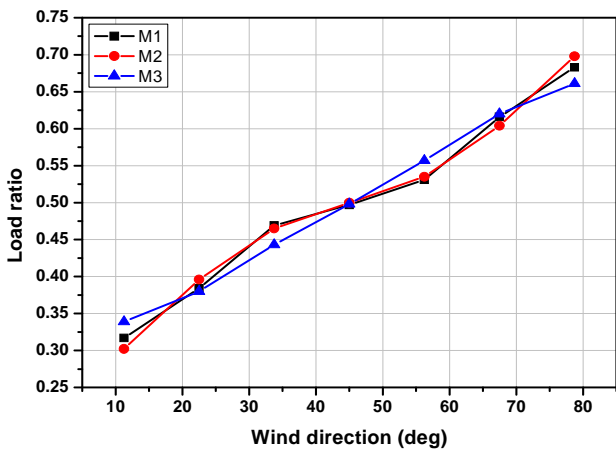


Fig. 6 Comparison of load ratio with respect to windswept shape

Fig. 6에서 풍향에 따른 하중 비 변화를 살펴보면, 단순 직사각형인 model 1과 중앙에 홈이 가공된 model 2는 곡선 형태로 비슷한 경향을 보였으나 양 측면에 홈이 가공된 model 3은 직선에 가까운 결과를 보였다. 이는 수풍부 평판의 중앙에 홈을 가공하게 되면 공기가 중앙의 홈으로 파고들어 정상유동(층류)을 왜곡시키는 와류의 영향으로 풍향에 따른 수풍부 사이의 하중배분을 왜곡시키게 되므로 기존 단순 직사각형일 때

의 하중 비가 곡선 형태를 띠는 경향을 더욱 가속화시킨다는 것을 의미한다. 이에 반해 평판의 양 측면에 홈을 가공하게 되면 바람이 자연스럽게 수풍부를 지나 빠져나가게 되므로 수풍부 사이의 하중배분이 이론에 가깝게 되어 곡선 형태를 띠는 경향을 직선에 가깝게 완화시키게 된다.

선행 연구에서 하중 비와 풍향 사이의 관계식을 1차식 보다는 오차가 적은 3차식의 형태로 제시하였으나 실제 제품을 제작하고 성능을 평가한 결과 3차식은 정확한 계수 값을 설정하지 못하였을 경우 오히려 오차를 증가시키는 문제가 발생하였다. 따라서 로드 셀형 풍향풍속계를 상용화하기 위해서는 하중 비와 풍향사이의 관계식을 위험요인이 높은 3차식보다는 안전한 1차식의 형태를 가져야 한다. 풍향과 하중 비 사이의 관계를 1차식으로 표현하였을 때 각 모델에 따른 오차를 정량적으로 정확하게 비교할 필요가 있다. 이를 위해 Table 5의 풍향을 수평축으로 하고 각 모델의 하중 비를 수직축으로 하는 그래프를 Fig. 7과 같이 그린 후, 최소자승법(least square method)을 사용하여 1차식으로 나타내었을 때 각 모델에 대한 상관계수와 오차를 산출하여 Table 6에 나타내었다.

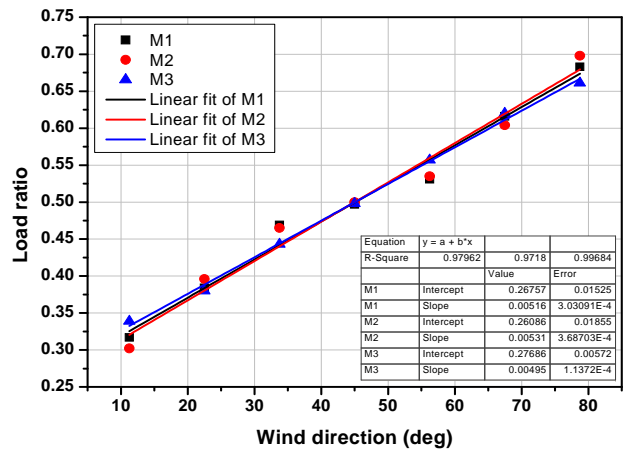


Fig. 7 Linear fitting of load ratio with respect to windswept shape

Table 6 Result of linear fitting of load ratio with respect to windswept shape

Types	Result of linear fitting	
	Correlation coefficient	Error
Model 1	0.9796	0.01525
Model 2	0.9718	0.01855
Model 3	0.9968	0.00572

Table 6을 살펴보면, 풍향과 하중 비 사이의 관계식을 1차식으로 설정하였을 때, 단순 직사각형의 수풍부 형상을 갖는 model 1의 오차(0.01525) 기준으로 중앙에 홈이 가공된 model 2의 오차는 0.01855로서 오히려 21.6% 증가하였으나, 양 측면에 홈이 가공된 model 3의 오차는 0.00572로서 62.5% 감소하

는 것으로 나타났다. 또한 상관계수 기준으로 보더라도 1차식으로 관계식을 도출하였을 때 model 3은 0.9968로 0.9796과 0.9718인 model 1과 2에 비해 높은 상관관계를 보임을 알 수 있다. 따라서 로드 셀형 풍향풍속계의 상용화에 필요한 풍향과 하중 비 사이의 관계식을 1차식으로 설정할 때, 오차를 최소화 할 수 있는 수풍부 형상은 양 측면에 홈이 가공된 형상을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 로드 셀형 풍향풍속계를 상용화하는데 있어서 풍향과 하중 비 사이의 관계식을 1차식으로 유도하는 데 적합한 수풍부의 형상을 제시하기 위해 세 가지 수풍부 형상을 해석모델로 설정하고 전산유동해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 풍향과 하중 비 사이의 관계식이 이론적으로는 직선에 가깝지만 실제로는 공기가 수풍면을 따라 흘러가기 때문에 곡선(3차식)의 형태를 띠게 된다. 그러나 이러한 곡선은 정확한 계수를 설정하지 않으면 오히려 오차를 키우는 문제를 안고 있다. 따라서 로드 셀형 풍향풍속계를 상용화하기 위해서는 관계식이 직선에 가까운 수풍부의 형상이 요구된다.

2) 세 가지 수풍부의 형상에 대해 전산유동해석을 수행한 결과 단순 직사각형일 때와 평판 중앙에 홈을 가공한 모델의 풍향에 따른 하중 비는 곡선의 형태를 띠는 반면에 양 측면에 홈이 가공된 모델은 직선에 가까운 형태를 보였다.

3) 로드 셀형 풍향풍속계의 상용화에 필요한 1차식으로 풍향과 하중 비 사이의 관계식을 도출하였을 때, 단순 직사각형의 수풍부 형상을 갖는 model 1의 오차 기준으로 중앙에 홈이 가공된 model 2의 오차는 오히려 21.6% 증가하였으나, 양 측면에 홈이 가공된 model 3의 오차는 62.5% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 상용화를 위해서는 양 측면에 홈이 가공된 수풍부의 형상을 채택하여야 함을 알 수 있다.

4) 본 연구결과는 해석과 실험을 병행한 선행 연구의 결과를 토대로 세 가지 수풍부 형상에 따른 전산유동해석을 수행하여 상용화에 필요한 적정 수풍부 형상을 제시하였으며, 이 연구 결과는 풍하중을 받는 다양한 구조물의 설계에 활용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2012년도 Brain Busan 21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

[1] 박도현, 예윤혜(2006), “위상측정방식을 이용한 3차원 초음파 풍향풍속계의 특성분석”, 센서학회지, 제15권, 제6호,

pp. 442-448.

- [2] 이수홍, 한동섭, 한근조(2009), “컨테이너 크레인의 전산유동해석과 풍동실험에 의한 풍하중 분석”, 한국항해항만학회지, 제33권, 제3호, pp. 215-220.
- [3] 이재훈, 송창근, 박성훈(2010), “풍동용 3축 로드 셀의 구조 최적설계”, 한국정밀공학학회지, 제28권, 제2호, pp. 226-232.
- [4] 한동섭(2012), “풍향에 따른 로드 셀형 풍향풍속계의 인접한 두 날개 사이의 하중 비”, 한국항해항만학회지, 제36권, 제5호, pp. 357-361.
- [5] ANSYS Inc(2010), ANSYS CFX, Release 12.0 Documentations.
- [6] Kim, K. S., Lee, Y. N., Kim, J. S., Jung, J. R., Seo, D. J., Ga, C. H., Kim, D. S., Son, S. M., Go, H. J., Cha, K. H., Lee, J. D., Moon, C. J., and Kim J. S.(1991), “The Research about Anemometer”, Ministry of Science and Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 2-18.
- [7] Teixeira, F. P. and Awruch, M. A.(2005), “Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction using the Finite Element Method”, Computers & Fluids, Vol. 34, pp. 249-273.

원고접수일 : 2012년 10월 18일
 심사완료일 : 2012년 11월 14일
 원고채택일 : 2012년 11월 14일