

풍향에 따른 로드 셀형 풍향풍속계의 인접한 두 날개 사이의 하중 비

† 한 동 섭

† 동아대학교 기계공학과 교수

Load Ratio between Two Adjacent Wings of Load Cell Type Anemometer according to Wind Direction

† Dong-Seop Han

† 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 진도 사고를 예방하기 위한 안전시스템과 연동되어 사용된다. 로드 셀형 풍향풍속계는 로드 셀을 이용하여 풍향 및 풍속을 측정하기 위한 것으로 4개의 날개에 연결된 로드 셀의 하중 합을 이용하여 풍속을, 하중 비를 이용하여 풍향을 측정한다. 본 연구에서는 하중 비와 풍향사이의 관계식을 도출하기 위하여 각각 이론적 접근, 해석적 접근, 실험적 접근 세 가지를 병행하여 결과를 비교 분석한다. 풍향을 설계변수로 설정하며, 해석 시 0°에서 90°까지 11.25° 간격으로 9가지 풍향조건을, 실험 시 10° 간격으로 10가지 풍향조건을 설정한다.

핵심용어 : 풍향풍속계, 로드 셀, 하중 비, 풍동실험, 유동-구조연성해석

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. In this study, we compared and analyzed the results in the theoretic approach, analytic approach and experimental approach to derive the correlation between load ratio and wind direction. Wind direction was selected as the design variable, and selected 9 wind direction conditions from 0o~90o with 11.25o space for analysis, and 10 wind direction conditions with 10o space for experiment.

Key words : anemometer, load cell, load ratio, wind tunnel test, fluid-structural interaction analysis

1. 서 론

풍향풍속계(anemometer)는 실시간으로 풍향과 풍속을 측정하는 기상관측기구로서 바람의 영향을 많이 받는 항만, 조선소, 해양구조물, 건설현장에서 사용되는 크레인에 장착되어 작업가능 여부를 알리거나 진도 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 꼬리날개를 이용하여 풍향을 측정하고 프로펠러의 회전속도를 이용하여 풍속을 측정하는 방식으로, 베어링의 마모로 인한 내구성이 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 90° 간격으로 배치된 네 개의 로드 셀에 바람을 받기 위한 얇은 평판을 장착하여 네 지점의 하중 비를 통해 풍향을, 하중 합을 통해 풍속을 측정한다. 따라서 로드 셀형 풍향풍속계를 개발하기 위해서는 측정된 네 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 로드셀을 사용하기 때문에 하중 비는 90° 간격으로 반복되며, 풍향에 따라 값이 비선형적으로 변하므로 정밀도가 높은 제품을 개발하기 위해 하중 비와 풍향사이의 정확한 관계식을 도출하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 하중 비와 풍향사이의 관계식을 도출하기 위하여 각각 이론적 접근, 해석적 접근, 실험적 접근 세 가지를 병행하여 결과를 비교 분석한다. ANSYS Workbench와 CFX

† 교신저자 : 정희원, dshan@dau.ac.kr 051)200-6989

를 사용하여 유동구조연성해석(FSI analysis)을 수행하며 (ANSYS Inc, 2010), 자체 제작한 풍동을 사용하여 시제품의 풍동실험을 실시한다. 풍향을 설계변수로 설정하며, 해석 시 0°에서 90°까지 11.25° 간격으로 9가지 풍향조건을, 실험 시 10° 간격으로 10가지 풍향조건을 설정한다.

2. 이론적 접근

2.1 로드 셀형 풍향풍속계

로드셀형 풍향풍속계는 네 개의 로드셀과 얇은 평판으로 구성되며, 와류 및 뒤틀림을 최소화할 수 있도록 각 로드셀은 평판의 상하를 고정한다. Fig. 1은 로드셀형 풍향풍속계의 개략도를 나타낸다. 로드셀은 막대의 중앙에 홈을 가공하고 스트레인 게이지를 부착하여 하중을 측정하는 구조로 되어있다.

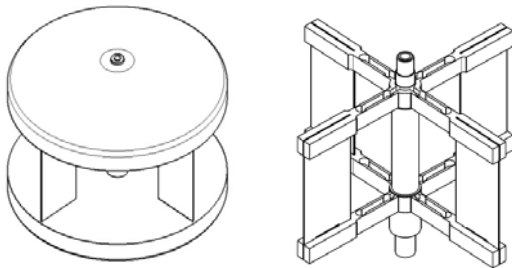


Fig. 1 Schematic of a load cell-type anemometer

2.2 하중 비와 풍향 사이의 관계

Fig. 2는 동서남북방향으로 각 로드 셀의 번호를 나타낸다 (#1 : 북쪽, #2 : 동쪽). 풍향은 북풍을 0°로 하며 회전방향은 시계방향으로 한다. Fig. 2를 살펴보면 풍향이 90도 간격으로 각 로드셀의 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.

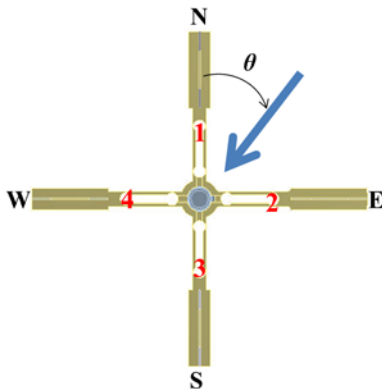


Fig. 2 Numbering of each load cell

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
I	0	-	-	-	0	+	+	+
II	+	+	0	-	-	-	0	+
III	0	+	+	+	0	-	-	-
IV	-	-	0	+	+	+	0	-
Case	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧

풍향이 각 사분면의 경계 각도인 0°, 90°, 180°, 270°에서는 마주보는 두 개의 값이 같고, 나머지 두 개는 0이 된다. 그리고 각 사분면의 중간 각도에서는 네 지점의 부호가 순차적으로 변한다. 따라서 Table 1과 같이 8구간으로 나누고 네 로드셀의 부호를 비교하면 바람이 몇 사분면에서 불어오는 지 판단할 수 있게 된다. 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.

$$R_L = \frac{F_i}{(F_i + F_j)} \quad (i = 1, 2, 3, 4, j = 2, 3, 4, 1) \quad (1)$$

여기서 풍하중을 F 라 할 때, F_i 는 풍향(θ)의 sine성분, F_j 는 cosine 성분이므로 식 (1)은 다음과 같이 삼각함수로 나타낼 수 있다.

$$R_L = \frac{\sin\theta}{(\sin\theta + \cos\theta)} \quad (2)$$

3. 유동-구조연성해석

3.1 해석 모델 및 설계변수

전산유동해석을 위한 유동장은 풍향에 관계없이 동일한 해석조건을 유지하기 위하여 Fig. 3(a)와 같이 원통형으로 구성된다. 경계면의 영향을 최소화하기 위하여 유동장의 크기를 직경과 높이방향으로 해석모델의 10배가 되게 한다. 경계조건은 원통의 측면을 Inlet으로 설정하며, Cart. Vel. Components를 적용하여 풍향의 방향과 풍속을 적용하여 작용토록 한다. 유동장의 윗면과 아랫면의 경우 Opening으로 경계조건을 설정하고 작용압력은 대기압으로 하였다. 유동장내의 모델 중 수풍부의 경우 각 날개에 영역을 할당하여 유동해석 후 수풍부에 작용하는 압력을 확인할 수 있도록 하고, 또한 구조해석 시 각 날개에 미치는 압력 값을 불러올 수 있도록 한다. 전산유동해석을 위한 난류조건으로 와류의 크기와 박리를 정확하게 예측하는 SST(Shear Stress Transport)모델을 채택한다 (Teixeira, 2005).

유동구조연성해석은 20m/s에서 60m/s까지 20m/s간격으로 3가지 풍속조건과 0°에서 90°까지 11.25°간격으로 총 9가지 풍향조건 하에서 수행한다. 공기의 밀도는 $0.125\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ 를 적용한다(이, 2009). 연성해석 시 유동해석의 압력결과는 구조해석의 입력 값으로 사용되므로 정확한 해석결과를 도출하기 위해 Fig. 3(b)와 같이 유동해석과 동일한 바깥 면을 가진 모델링을 사용한다. 구조해석을 위해 각 절점에 3개의 자유도를 갖는 사면체 및 육면체 요소를 사용하여 유한요소를 생성하고, 경계조건으로는 풍향풍속계의 중앙 봉의 아래 면을 모든 축방향으로 고정한다(Shi, 2011).

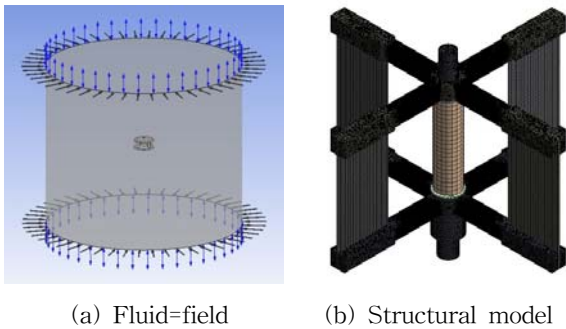


Fig. 3 Meshed shape for FSI analysis

3.2 해석 결과

ANSYS Workbench와 CFX를 사용하여 로드 셀형 풍향풍속계의 수평부에 대한 전산유동해석과 유동구조연성해석을 수행한다. 로드 셀형 풍향풍속계에서는 바람의 방향에 따라 인접한 두 개의 로드 셀에서의 하중을 검출하여 두 하중의 비에 의해 풍향을 산출하게 된다. 이 때 로드 셀은 스트레인 게이지를 부착하여 측정된 변형률을 이용하는 방식을 사용하므로 하중 비와 응력 비는 같은 값이 된다. 또한 해석에서는 로드 셀부에서의 하중보다는 응력을 검출하는 것이 용이하므로 해석결과는 로드 셀의 하중 대신 응력을 비교대상으로 하였다. Fig. 4는 풍향 0°, 풍속 20m/s의 조건에서 유동구조연성해석을 통해 도출한 각 로드 셀의 응력분포도를 나타낸다.

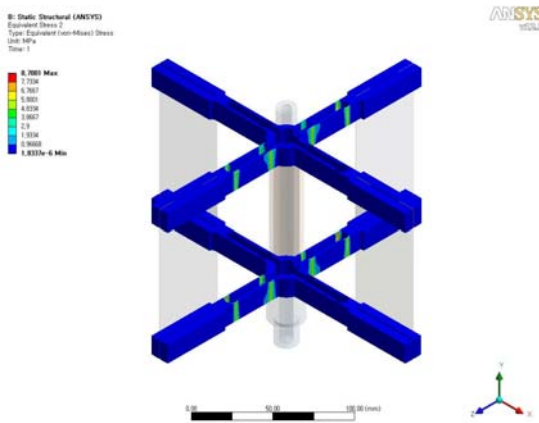


Fig. 4 Stress contribution of load cell part through FSI analysis (when $\theta=0^\circ$, $v=20\text{m/s}$)

로드 셀형 풍향풍속계에서는 인접한 두 로드 셀의 하중 비(또는 응력 비)가 90° 간격으로 반복되므로 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 구간인 Case ②에서 응력 비와 풍향사이의 관계를 도출하면 나머지 구간에서도 같은 식을 활용할 수 있다. Table 2는 20m/s, 40m/s, 60m/s의 풍속에서 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ (Case ②)구간의 풍향에 따른 응력 비(R_S)와 평균한 값을 나타낸다.

Table 2 Stress ratio of two adjacent load cells with respect to wind direction and speed in FSI analysis (Case ②)

Wind direction (°)	Wind speed (m/s)			
	20	40	60	Average
0.00	0.09	0.09	0.08	0.08
11.25	0.29	0.29	0.29	0.29
22.50	0.38	0.38	0.38	0.38
33.75	0.45	0.45	0.45	0.45
45.00	0.50	0.50	0.50	0.50
56.25	0.55	0.55	0.55	0.55
67.5	0.62	0.61	0.62	0.62
78.75	0.71	0.71	0.71	0.71
90.00	0.91	0.91	0.92	0.92

Table 2는 응력 비가 풍속과 무관한 것을 알 수 있다. 풍향을 수평축으로 하고 응력 비의 평균값을 수직축으로 하는 그래프를 그리고 3차식으로 나타내면, 응력 비(R_S)와 풍향(θ)사이의 관계는 식(3)과 같고, 상관계수는 0.998이다.

$$R_S = (887.9 + 206.6\theta - 3.843\theta^2 - 0.0285\theta^3) \times 10^{-4} \quad (3)$$

4. 풍동실험

4.1 실험조건

풍향에 따른 각 로드셀의 하중을 측정하기 위한 풍동실험을 위해 로드 셀형 풍향풍속계의 시제품과 풍속범위 0~10m/s인 풍동을 제작하였다. Fig. 5는 시제품을 풍동에 장착한 사진을 나타낸다.



Fig. 5 Prototype model installed in the wind tunnel

풍동실험은 5m/s, 10m/s의 두 가지 풍속조건과 0°에서 90°까지 10°간격으로 총 10가지 풍향조건 하에서 수행한다. 하중 비는 풍하중을 전면에서 받는 첫 번째와 두 번째 로드셀의 하중 값을 이용하여 하중 비를 산출한다. 각 조건에서 3번의 측

정을 실시한다(Lien, 2011).

4.2 풍동실험 결과

Table 3은 5m/s, 10m/s의 풍속에서 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ (Case ②)구간의 풍향에 따른 하중 비(R_L)와 평균한 값을 나타낸다.

Table 3 Load ratio of two adjacent load cells with respect to wind direction and speed in wind tunnel test (Case②)

Wind direction (°)	Wind speed (m/s)		
	5	10	Average
0	0.09	0.07	0.08
10	0.26	0.27	0.27
20	0.32	0.35	0.34
30	0.41	0.43	0.42
40	0.46	0.47	0.47
50	0.51	0.52	0.52
60	0.61	0.61	0.61
70	0.66	0.66	0.66
80	0.74	0.72	0.73
90	0.88	0.96	0.92

Table 3의 평균 값에 대해 풍향을 수평축으로 하고 하중 비의 평균값을 수직축으로 하는 그래프를 그리고 3차식으로 나타내면, 하중 비(R_L)와 풍향(θ)사이의 관계는 식(4)와 같고, 상관계수는 0.992이다.

$$R_L = (897.6 + 117.3\theta - 2.865\theta^2 - 0.0212\theta^3) \times 10^{-4} \quad (4)$$

5. 결과 및 고찰

2~4장까지 이론, 해석, 실험에서 각각 인접한 두 날개 사이의 하중 비(또는 응력 비)와 풍향사이의 관계식을 도출하였다. 세 조건에서의 값을 비교하기 위하여 식 (2)~(4)를 이용하여 0에서 90°까지 하중 비(또는 응력 비)를 그래프를 그리고 비교하여 Fig. 6에 나타낸다.

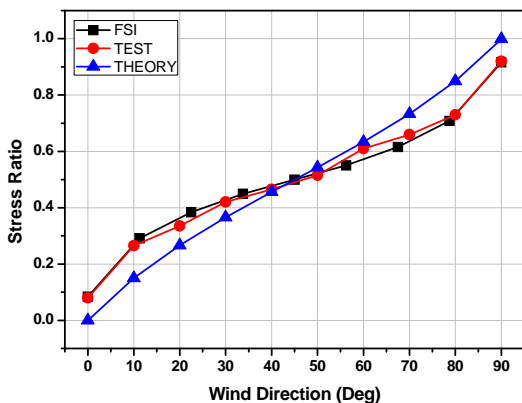


Fig. 6 Comparison of load ratio between two adjacent wings according to the wind direction

Fig. 6을 살펴보면 이론 식에 의한 값은 직선에 가깝고 해석과 실험을 통한 값은 3차식과 같은 곡선의 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 이론 식이 하중의 단순 성분분해를 통해 도출된 것인데 반해 실제 공기는 유체이므로 경사진 면을 따라 흘러가기 때문에 각도에 따른 힘의 성분 값보다 작은 값이 작용된다. 또한 각 날개 주위에서 발생한 와류와 차폐효과 등으로 인한 결과라 할 수 있다. 따라서 정밀도가 높은 로드 셀형 풍향풍속계를 개발하기 위해서는 풍향을 하중 비에 관한 3차함수로 나타내어야 한다. 본 연구에서는 가장 신뢰할 수 있는 해석결과를 역으로 이용하여 하중 비(응력 비)의 평균값을 수평축으로 하고 풍향을 수직축으로 하는 그래프를 그리고 3차식으로 fitting하여 하중 비(R_L)에 따른 풍향(θ)을 산출하기 위한 관계식을 아래와 같이 제시하였다.

$$\theta = 9.16 - 163.32R_L + 705.28R_L^2 - 470.31R_L^3 \quad (5)$$

이식은 하중 비의 조합을 시계방향으로 적용시키면 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 구간(Case ②)뿐만 아니라 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 구간(Case ④), $180^\circ < \theta < 270^\circ$ 구간(Case ⑥), $270^\circ < \theta < 360^\circ$ 구간(Case ⑧)에서도 적용할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 로드셀형 풍향풍속계를 개발하기 위해 이론, 해석, 실험적 접근을 통한 인접한 두 날개 사이의 하중 비와 풍향사이의 관계를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중 비와 풍향사이의 관계식이 이론적으로는 직선에 가깝지만 실제로는 공기가 날개의 수평면을 따라 흘러가기 때문에 곡선의 형태를 띠는 것을 알 수 있다. 또한 해석과 실험결과가 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.
- 2) 로드 셀형 풍향풍속계의 정밀도를 높이기 위해서 풍향은 하중 비에 대한 고차함수로 정의되어야 한다. 본 연구에서는 풍향과 하중 비 사이의 관계식을 유동-구조연성해석의 결과를 기준으로 3차식으로 제안한다.
- 3) 하중 비에 따른 풍향을 본 연구에서 제안한 3차식을 사용한다면 측정결과와 비교하여 유동구조연성해석만으로 관계식을 도출할 때 2% 이내의 오차(이론식을 사용할 때 8%의 오차를 보임)로 정밀도를 높일 수 있을 것으로 사료된다.
- 4) 본 연구결과는 이론, 해석, 실험을 병행하여 비교함으로써 유동구조연성해석 만으로 풍하중을 받는 구조물의 설계를 위한 관계식을 도출할 수 있음을 보여준다.

참고 문헌

[1] 박도현, 예윤혜(2006), “위상측정방식을 이용한 3차원 초음파 풍향풍속계의 특성분석”, 센서학회지 15권 6호, pp. 442-448.

- [2] 이수홍, 한동섭, 한근조(2009), “컨테이너 크레인의 전산유동해석과 풍동실험에 의한 풍하중 분석”, 한국항해항만학회지 33권 3호, pp. 215-220.
- [3] 이재훈, 송창곤, 박성훈(2010), “풍동용 3축 로드셀의 구조 최적설계”, 한국정밀공학회지 28권 2호, pp. 226-232.
- [4] ANSYS Inc(2010), ANSYS CFX, Release 12.0 Documentations.
- [5] 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(1), pp. 2-18.
- [6] Lien, C.C. and Ting, C.H.(2011), "A Computerised Wind Tunnel for Measuring Aerodynamic Properties of Forage Corn Stalks", Adv. Sci. Lett. Vol. 4, pp. 2092-2098.
- [7] Shi, B.J. and Yang, T.Y.(2011), "Pressure Simulation of Sliders with Ultra-Low Flying Heights in Hard Disk Drives by Using Finite Volume Method", Adv. Sci. Lett. Vol. 4, pp. 1578-1582.
- [8] 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 4월 30일
심사완료일 : 2012년 6월 27일
원고채택일 : 2012년 6월 27일