대한조선학회 특별논문집
Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea
2015년 9월
pp. 74-78, September 2015

Wind Tunnel Test를 통한 Wind Moment의 적용 사례

김진호†·이상열·박세일·김양수
대우조선해양㈜

Application of Wind Heeling Moment with Wind Tunnel Test

Jin-ho Kim†·Sang-yeol Lee·Se-il Park·Yang-soo Kim
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering CO.,LTD.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

When floating platform or drilling unit is located at operating station during its design life, it has to have the sufficient stability considering external environment. To evaluate whether offshore structure is complied with the required design criteria for intact stability, the factors which decrease the righting moment have to be considered. Wind heeling moment is one of main factors because the direction is opposite to the righting moment. According to 2009 MODU CODE (Code for the construction and equipment of Mobile Offshore Drilling Units, 2009), wind heeling moment derived from wind tunnel test on scale model of offshore structure enables to apply as alternative given formula and method in 2009 MODU CODE. However, there is no the specific method for applying data derived from wind tunnel test. Based on the following reasons, this paper presents that the calculation method of wind heeling moment utilizing non-dimensional coefficient relative to wind loads (wind forces and moments) and the comparison with each method applying an example.

Keywords : Intact stability, Wind heeling moment, Wind tunnel test, Non-dimensional coefficients

1. 서 론

시추선 (drilling unit) 또는 FPSO (floating, production, storage and offloading)와 같은 부유식 구조물은 운용 (operation) 시 주어진 외부 환경 조건을 고려, 충분한 복원력 (stability)을 가지도록 설계 되어야 하며 IMO (International Maritime Organization, 국제해사기구) 산하 해사 안전 위원회 (Maritime Safety Committee)에 의해 제정된 요구 설계 기준 (required design criteria)의 만족 여부로 평가된다.

복원력, 특히 비손상 시 복원력 (intact stability)을 약화시키는 요소들 중 직접적인 것은 복원력과 반대 방향으로 작용하는 바람에 의한 풍경사 모멘트 (wind heeling moment, 이하 풍경사 모멘트)이다. 풍경사 모멘트는 바람에 노출된 외면의 투영 면적 (projected area of all exposed surfaces), 구조 부재 형상에 따른 계수 (shape coefficient depending on the shape of the structural member exposed to the wind), 풍속 (wind velocity) 및 모멘트 암 (moment arm) 등을 고려하여 IMO 2009 MODU CODE (code for the construction and equipment of mobile offshore drilling units, 2009)에 주어진 공식에 따라 계산이 가능하다.

또한, 이 공식의 대안으로 축척 모형 (scale model)의 풍동 시험 (wind tunnel test) 으로부터 도출되는 풍경사 모멘트를 적용할 수 있다. IMO 규정 (regulation) 또는 선급 규칙 (rule of classification society)에 풍동 시험 결과의 적용 가능함을 언급하고 있으나, 적용 범위 및 방법이 구체적으로 제시되어 있지 않다. 이로 인해 실제 적용하는 과정에서 선주 (owner)와 적용 방법에 대한 이견 발생 시 협의점을 찾는데 어려움이 발생한다.

본 연구에서는 풍동 시험을 통해 도출되는 풍하중 (wind loads)의 무차원 계수 (non-dimensional coefficients)를 이용한 풍경사 모멘트 계산 방법 및 사례를 비교함으로써 풍동 시험 결과 적용 방법에 대한 소개를 하였다.

2. 풍경사 모멘트와 비손상 시 복원력과의 관계

IMO는 MODU (mobile offshore drilling unit)의 비손상 시 복원력 판정을 위해 2009 MODU CODE를 제공하고 있으며, 다음의 요구 설계 기준을 만족하도록 규정하고 있다.

< 2009 MODU CODE Ch.3 Sec.3.3 Intact stability criteria >

The stability of a unit in each mode of operation should meet the following criteria:

† 교신저자 : TANMARYUJI@DSME.CO.KR, 010-4465-0414

1) For surface and self-elevating units the area under the righting moment curve to the second intercept or down flooding angle, whichever is less, should be not less than 40% in excess of the area under the wind heeling moment curve to the same limiting angle.

2) For column-stabilized units the area under the righting moment curve to the angle of downflooding should not be less than 30% in excess of the area under the wind heeling moment curve to the same limiting angle.

3) The righting moment curve should be positive over the entire range of angles from upright to the second intercept.

복원 모멘트 곡선 (righting moment 또는 GZ curve)의 하부 면적과 풍경사 모멘트의 하부 면적은 각각 복원 에너지량과 전복을 일으키는 에너지량으로, 해양 구조물이 비손상 상태에서 전복 에너지량 대비 최소 30% 또는 40% 이상의 복원 에너지량을 가져야 함을 의미한다. 예를 들어, 흘수 (draft) 감소에 따른 풍압 면적 또는 모멘트 암의 증가는 풍경사 모멘트의 증가로 직결되며, 보유하고 있는 복원 에너지량의 감소를 의미한다.

복원력 계산 범위는 해양 구조물 내부로 외부 해수가 유입될 수 있는 개구부 (opening)까지의 각도인 해수 유입각 (down flooding angle) 또는 복원 모멘트 곡선과 풍경사 모멘트 곡선의 교차점 (second intercept)으로 제한하고 있다.

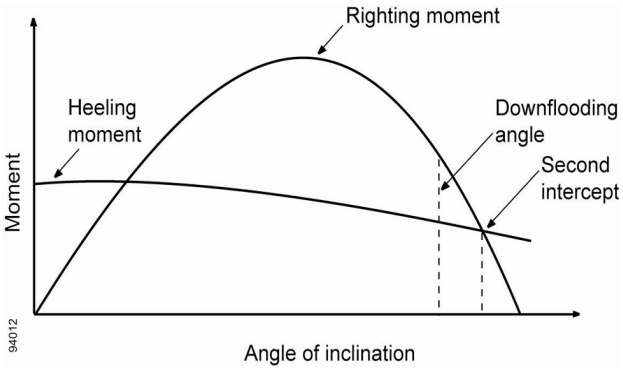

Fig. 1 복원력 곡선과 풍경사 모멘트 곡선

3. 풍동 시험 결과 DATA

축척 모형의 풍동 시험을 통해 계측되는 풍하중은 X, Y, Z 방향의 힘 (force, F)과 모멘트 (moment, M)이며, 풍속 (V), 측면 풍압면적 (A), 수선으로부터 풍압면적의 중심까지의 거리 (H) 에 의하여 무차원 계수로 변환 된다.

$$C_i = \frac{F_t}{0.5 \times \rho_{air} \times V^2 \times A}, with\ i = X,\ Y,\ Z \qquad (1a)$$

$$CM_i = \frac{M_i}{0.5 \times \rho_{air} \times V^2 \times A \times H}, with \quad i = X,\ Y,\ Z \qquad (1b)$$

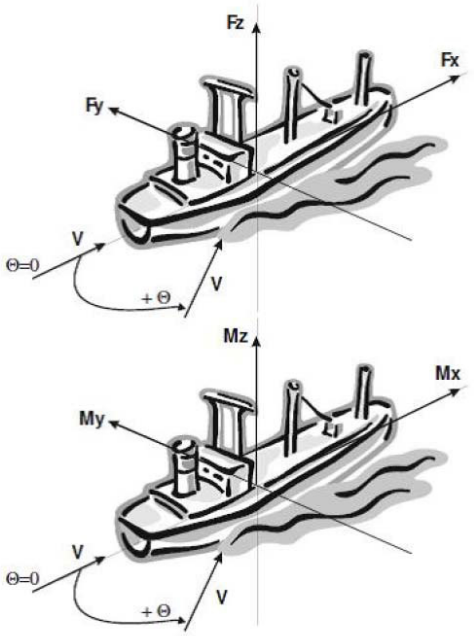

Fig. 2 풍동 시험 DATA의 좌표계와 부호 규약

이론상으로 Cy (Y방향으로의 힘 Fy의 무차원 계수)는 가로 방향으로 받는 경우 (Fig.2 기준 90 deg. 또는 270 deg.)가 가장 클 것이나, 해양 구조물의 경우 건현 (freeboard) 위 선체 부분 (topsides)의 형상, 크기 및 배치에 따라 가로 방향 이외의 입사각 (incidence angle)에서 최대 Cy가 발생 할 수 있다. 또한, 2009 MODU CODE에서도 풍력 (wind force)은 모든 방향 (any direction)에 대해 고려할 것을 명시하고 있다. 이를 근거로 복원력의 보수적 평가를 위하여 모든 방향의 Cy 값을 계측하고, 이 중 최대 Cy가 계측된 입사각에서의 무차원 계수들을 적용하였다.

4. 풍경사 모멘트 계산 방법

모멘트 암에 대한 정의 및 수면 하부 선체에 작용하는 유체력 적용 여부에 따라 직립 상태 (upright condition)에서의 풍경사 모멘트 계산 방법을 다음과 같이 3가지로 정리 하였다.

- 모멘트 암 정의1 : 수선 상부만 고려
- 모멘트 암 정의2 : 수선 하부도 고려
- 수면 하부에 작용하는 반력에 의한 모멘트 고려

4.1 모멘트 암 정의1 : 수선 상부만 고려

풍경사 모멘트는 오로지 수선 상부의 풍압면 (windage)과 관계가 있다는 가정하에, 모멘트 암을 수선으로부터 풍압면적 중심까지의 수직 거리 (Ha)로 정의 하였다. Ha는 풍동 시험 보고서의 정보 또는 복원력 계산 프로그램의 계산 결과를 적용하였다. 복원력 계산 프로그램을 활용할 경우 전체 측면 외곽

(lateral profile)의 정의가 필요하다.

풍동 시험 시 풍하중은 선체의 중앙 단면부 (midship)와 특정 흘수의 수선면 (water plane)의 교차점에서 계측 된다. 그러나, 풍경사 모멘트는 수선 하부에 위치한 모멘트 원점을 기준으로 발생하기 때문에 CMx (X축 중심으로의 모멘트 Mx의 무차원 계수)와 Cy의 비율을 고려, 모멘트 암 Ha'로 보정하였다

Total Wind Heeling Moment = Fy x Ha'
= Fy x {Ha x (CMx / Cy)} (2)

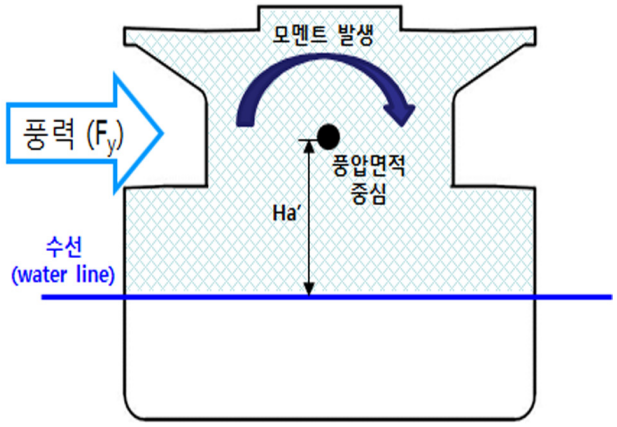

Fig. 3 풍경사 모멘트 도해1

4.2 모멘트 암 정의2 : 수선 하부도 고려

2009 MODU CODE에 따라, 모멘트 암을 수선 하부 선체의 중심으로부터 풍압면적 중심까지의 수직 거리로 정의 하였다. Ha는 4.1과 동일한 방법으로 보정하였으며, 수선으로부터 수선 하부 선체의 중심까지의 거리 Hu는 풍동 시험 보고서의 정보 또는 부력의 수직방향 중심 (vertical center of buoyancy)을 적용하였다.

Total Wind Heeling Moment = Fy x (Ha' + Hu)
= Fy x [{Ha x (CMx / Cy)} + Hu] (3)

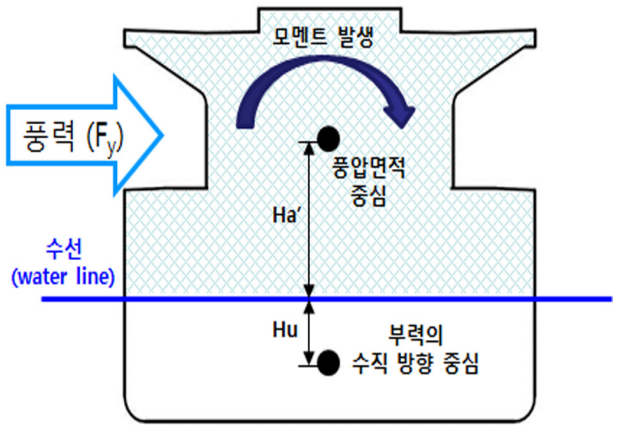

Fig. 4 풍경사 모멘트 도해2

4.3 수면 하부에 작용하는 반력에 의한 모멘트 고려

Fig. 5에 나타낸 것과 같이 해양 구조물이 바람을 받아 수선 상부의 선체에 풍력이 작용할 때, 수면 하부에 그에 상응하는 반력 (reaction force)이 발생을 하며 이로 인한 모멘트가 추가 발생한다는 가정이다. 반력은 풍력과 우력 (a couple of forces)으로서 풍경사 모멘트와 같은 방향의 모멘트를 발생시키므로, 경사 모멘트를 증가시키는 역할을 한다. 이 방법의 경우, Hu의 보정을 위해 Ha와 마찬가지 방법으로 수면 하부에 대한 CMx와 Cy의 비율을 고려 하였다.

Total Wind Heeling Moment
= Fy x (Ha' + Hu')
= Fy x [{Ha x (CMx / Cy)} + {Hu x (CMx_u / Cy_u)}]
Where, _u = underwater part (4)

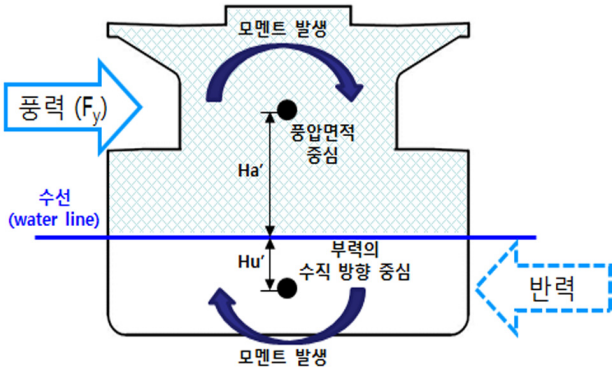

Fig. 5 풍경사 모멘트 도해3

5. 경사각에서의 풍동 시험 결과 적용

2009 MODU CODE에 따라, 풍경사 모멘트 곡선은 직립 상태에서의 값을 기준으로 경사각 별 COSINE 함수를 따라 달라지는 것으로 가정할 수 있다. 이와 같이 가정된 값과 실제 경사각 (θ_h, heeled angle)에서의 풍경사 모멘트 비교를 위해 축척 모형을 경사진 상태로 놓고 풍동 시험을 수행하였다. 해양 구조물이 기울어져도 수선 하부의 배수량은 동일하다 (constant displacement)는 조건하에, 경사각 별 예상 흘수 및 부력 중심과 같은 유체정역학 (hydrostatic) 정보를 풍동 시험 기관에 사전에 전달하여 시험 환경조건 및 결과의 신뢰도를 높였다.

Fig.6과 같이 경사진 상태에서의 바람을 받을 경우, 바람의 흐름에 대하여 수직 방향으로 발생하는 양력 (lift force) 및 이로 인한 모멘트가 발생하므로 추가 고려가 필요하다. 양력의 모멘트 암인 L (부력 중심과 구조물의 중심 간 거리)과 경사각 별 Hu의 정보는 흘수, 부력 중심과 경사각 간의 기하학적 관계를 통해 식 (5)에 따라 계산이 가능하다.

$L = TCB \times \cos(\theta_h) - (Draft - VCB) \times \sin(\theta_h)$ (5a)

$Hu = TCB \times \sin(\theta_h) + (Draft - VCB) \times \cos(\theta_h)$ (5b)

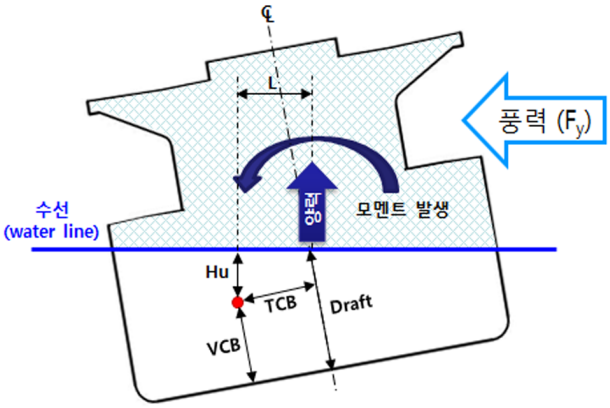

Fig. 6 풍경사 모멘트 도해4

6. 풍경사 모멘트 계산 예

계산 방법 별 풍경사 모멘트의 수치적 비교를 위해 다음의 Data를 사용하였다. 예로 적용된 모형 시험 결과의 경우 직립 상태에서 입사각 250 deg.일 때 최대 Cy가 계측 되었기 때문에, 수선 상부와 수선 하부의 무차원 계수는 각각 250 deg. / 70 deg. (반력 방향, 풍력 방향과는 정반대)의 값들을 사용하였다. Cy의 "-" 부호는 방향성을 의미하며, 좌현 (Port) 방향으로의 경사일 때의 유체정역학 정보를 고려 하였다.

Table 1 풍압면 정보

흘수 (m)	측면 풍압면적 (m^2)	정면 풍압면적 (m^2)	Ha (m)	Hu (m)
21.0	17,000	4,500	26.50	9.80

Table 2 입사각 70 deg의 무차원 계수 - 수선 하부

경사각 (deg.)	Cy	CMx
0	-0.72	1.20

Table 3 입사각 250 deg.의 무차원 계수 - 수선 상부

경사각 (deg.)	0	10	20	30	40
Cy	-1.30	-1.35	-1.41	-1.32	-1.23
Cz	2.30	2.12	1.69	1.01	0.45
CMx	1.80	1.36	1.04	1.00	0.68

Table 4 경사각 별 유체정역학 정보 - 동일 배수량 기준

경사각 (deg.)	0	10	20	30	40
Draft (m)	21.00	20.67	19.70	18.64	17.57
TCB (m)	0.00	2.10	4.66	6.69	8.29
VCB (m)	11.20	11.41	12.10	13.04	14.16

풍속 51.4 m/s, 공기 밀도 1.25 kg/m^3 일 때 계산된 풍경사 모멘트들은 Table 5와 6에 정리하였으며 다음의 내용이 확인되었다. Table 6의 경우 비교를 위해 "4.2 모멘트 암 정의2" 계산 방법에 의한 풍경사 모멘트를 기준으로 하였다.

- 모멘트 암의 증가 또는 외부 힘이 추가될 수록 풍경사 모멘트는 증가한다
- 경사각이 증가할수록 수선 상부와 하부 간 모멘트 암이 감소하기 때문에, 해양 구조물에 발생하는 풍경사 모멘트는 감소한다.
- 풍동 시험을 경사각 별로 수행한 결과를 적용할 경우 양력에 의한 모멘트가 추가 고려 되지만, 2009 MODU CODE의 제시된 방법 대비 풍경사 모멘트는 작게 계산된다. 즉, COSINE 함수를 적용하는 것 보다 경사각 별 계측값을 적용하는 것이 전복 시키려는 에너지량이 작게 계산된다.

Table 5 풍경사 모멘트의 비교1 - 직립 상태

계산 방법	풍경사 모멘트 (t-m)
모멘트 암 정의1 : 수선 상부만 고려	136,704
모멘트 암 정의2 : 수선 하부도 고려	173,215
수면 하부의 반력에 의한 모멘트 고려	197,556

Table 6 풍경사 모멘트의 비교2 - COSINE 함수 Vs. 경사각 풍동 시험 결과

경사각 (deg.)	COSINE 함수 적용 (A, t-m)	경사각 풍동 시험 결과 적용 (B, t-m)	차이 (B-A)
10	170,583	141,533	-29,863 (-18%)
20	162,769	116,565	-46,203 (-28%)
30	150,009	109,946	-40,063 (-27%)
40	132,690	81,506	-51,635 (-39%)

7. 결 론

지금까지 풍동 시험 결과를 적용하여 풍경사 모멘트를 계산할 경우의 방법에 대해 정리하고, 계산 결과를 예를 들어 비교해 보았다. 해양 구조물의 종류별 및 풍동 시험 결과에 따라 본 연구에 기술된 수치 및 비율은 상대적일 수 있으나, 경사각 별 풍동 시험 결과를 적용하는 것이 비손상 시 복원성 확보에 도움이 되는 것을 확인할 수 있었다.

서론에 언급된 것과 같이 풍동 시험의 데이터로부터 풍경사 모멘트 계산 시 표준화 된 공식이 없기 때문에, 본 연구의 기술된 계산 방법을 선택 적용 시 선주 및 선급과의 논의와 검토가 필요하다.

심해의 자원 개발로 날이 갈수록 해양 구조물이 처한 환경조건은 악화되고 있으며, 이 조건 하의 복원성 유지 및 확보를

위한 선주의 요구 설계 기준 또한 높아지고 있다. 본 연구에서 제시된 풍경사 모멘트 계산 방법은 비손상 시 복원성의 확보를 위한 여러 방법들 중 하나가 될 수 있다고 판단 된다.

References

IMO Intact Stability Code 2008

IMO Code for the Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units, 2009 (2009 MODU CODE)

김 진 호

이 상 열

박 세 일

김 양 수