

풍하중을 받는 구조물의 3차원 유한요소해석

Three Dimensional Finite Element Analysis of Structures under Wind Loads

김병완* · 김운학** · 이인원***

Kim, Byoung-Wan · Kim, Woon-Hak · Lee, In-Won

1. 서 론

풍하중을 받는 구조물의 해석은 단면형상에 따른 양력계수, 항력계수 및 모멘트계수 등을 이용하여 단순화된 2차원 보로 모델링하여 수행한 것이 일반적이었다. 본 논문에서는 평판구조물을 대상으로 하는 수치예제를 통해 단순화된 보해석과 압력계수 분포를 이용한 엄밀한 삼차원 평판해석의 결과를 비교 분석함으로써 기존의 단순화된 보해석의 정확도와 문제점 등을 고찰하였다.

2. 풍하중을 받는 구조물의 보해석 방법

풍하중을 받는 구조물의 보해석은 일반적으로 다음과 같은 절차를 따른다. 우선 구조물을 보요소들로 모델링한 후 보의 단면형상에 따라 양력계수 C_L , 항력계수 C_D 및 모멘트계수 C_M 을 결정하여 식 (1)과 같은 단위길이당 분포양력 L , 분포항력 D 및 분포모멘트 M 을 구한다(Simiu 등, 1996). 식 (1)에서 ρ 는 바람의 밀도이고 V 는 풍속이며 B 는 보단면의 폭을 나타낸다.

$$L=0.5C_L \rho V^2 B, D=0.5C_D \rho V^2 B, M=0.5C_M \rho V^2 B^2 \quad (1)$$

다음으로 식 (2)와 같은 운동방정식을 풀어 해석을 수행한다. 식 (2)에서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 나타내며 $\{u\}$ 는 변위벡터, $\{f\}$ 는 하중벡터를 나타낸다.

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{f\} \quad (2)$$

3. 풍하중을 받는 구조물의 평판해석 방법

풍하중을 받는 구조물의 평판해석 방법의 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다. 우선 구조물을 삼각형 평판요소들로 모델링한 후 각 요소에서의 압력계수 C_p 를 결정하여 각 요소에 작용하는 풍압력 p 를 구한다. 풍압력에 평판요소의 면적 A 와 평판요소의 법선벡터 n 을 곱하여 요소에 작용하는 풍하중 f_w 를 구하고 풍하중을 삼각형 평판요소의 세 절점으로 등분배함으로써 요소별 풍하중벡터 $\{f_w\}$ 를 최종적으로 구성한다. 식 (3)에서 n_x, n_y, n_z 는 n 의 성분을 나타낸다.

$$p=0.5C_p \rho V^2, f_w=0.5C_p \rho V^2 A n, \{f_w\}=(1/6)C_p \rho V^2 A [n_x \ n_y \ n_z \ n_x \ n_y \ n_z \ n_x \ n_y \ n_z]^T \quad (3)$$

* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정 · 공학석사 · 042-869-3658(E-mail:kimbw@kaist.ac.kr)

** 정회원 · 한경대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 031-670-5144(E-mail:whkim@hnu.hankyong.ac.kr)

*** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 교수 · 공학박사 · 042-869-3618(E-mail:iwlee@kaist.ac.kr)

다음으로 요소별 풍하중벡터 $\{f\}_w$ 를 취합하여 하중벡터 $\{f\}$ 를 구성한 후 식 (2)의 운동방정식을 풀어 해석을 수행한다.

4. 수치예제

보해석과 평판해석을 비교하기 위해 예제를 통한 수치해석을 수행하였다. 수치예제에 사용한 구조물은 양쪽 단부가 각각 일곱 개의 힌지로 지지된 평판이며 비틀림이 유발될 수 있도록 x축 중심 회전변위를 구속하였다. 수치예제에 사용한 바람의 풍속이력은 1993년 Norway의 Skipheia에서 관측된 자료에 기초하고 있으며 (Hansen 등, 1999) 받음각 α 를 15도에서 90도까지 15도 간격으로 변화시키면서 해석을 수행하였다.

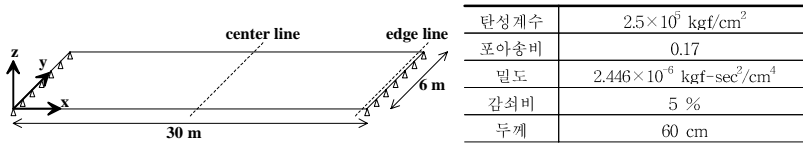


그림 1. 예제구조물의 제원

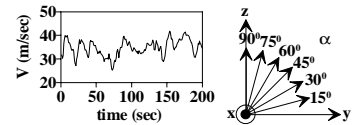


그림 2. 예제바람의 제원

평판해석을 위한 압력계수는 Abernathy의 논문에 근거하여 해석적으로 산출하였다(Abernathy, 1962). 한편, 보해석을 위한 양력계수, 항력계수, 모멘트계수는 압력계수의 적분과정을 통해 식 (4)와 같이 산출할 수 있다. 예제구조물의 경우 두께가 미소한 평판이므로 항력은 무시한다.

$$C_L = \left\{ \int_0^B C_p dy \right\} / B, \quad C_M = \left\{ \int_0^B C_p (B/2 - y) dy \right\} / B^2 \quad (4)$$

Abernathy의 해석적 방법에 따라 산출한 예제구조물의 폭 방향으로의 압력계수 분포형상을 그림 3에 제시하였고 식 (4)에 따라 산출한 예제구조물의 양력계수, 모멘트계수를 표 1에 제시하였다.

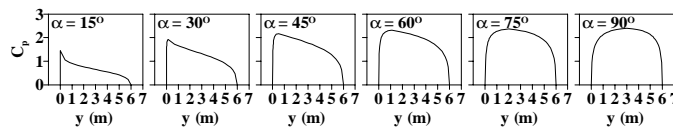


그림 3. 예제구조물의 압력계수 분포형상

표 1. 예제구조물의 양력계수, 모멘트계수

α (도)	15	30	45	60	75	90
C_L	0.626	1.218	1.611	1.873	2.009	2.066
C_M	0.057	0.086	0.090	0.074	0.041	0.000

표 1의 양력계수, 모멘트계수를 이용하여 식 (1)에 따라 분포하중들을 구하고 그림 4와 같은 유한요소 모델링을 통해 식 (2)의 운동방정식을 풀어 보해석을 수행하였다. 또한, 그림 3의 압력계수를 이용하여 식 (3)에 따라 풍하중벡터를 산출하고 그림 5와 같은 유한요소 모델링을 통해 식 (2)의 운동방정식을 풀어 평판해석을 수행하였다.

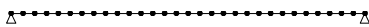


그림 4. 보요소 모델링

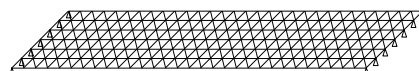


그림 5. 평판요소 모델링

5. 해석결과의 분석

그림 6은 예제구조물 중심부에서의 발생한 휨모멘트의 시간이력을 나타내고 있고 그림 7은 그 중 최대값을 나타내고 있다. 휨모멘트의 경우 보해석의 결과는 평판해석의 결과와 유사하다. 그림 8은 예제구조물 단부에서의 발생한 비틀림모멘트의 시간이력을 나타내고 있고 그림 9는 그 중 최대값을 나타내고 있다. 비틀림모멘트의 경우 보해석의 결과는 평판해석의 결과와 상당한 차이를 보여 오차가 크다. 그림 10은 예제구조물 중심부에서의 발생한 주응력의 시간이력을 나타내고 있고 그림 11은 그 중 최대값을 나타내고 있다. 휨모멘트와 마찬가지로 주응력의 경우 보해석의 결과는 평판해석의 결과와 유사하다.

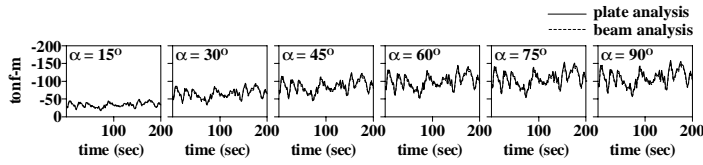


그림 6. 중심부에서의 휨모멘트 이력

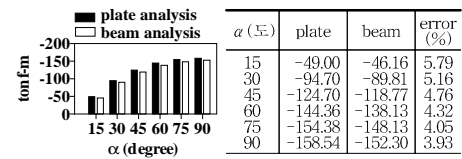


그림 7. 중심부에서의 최대 휨모멘트 비교

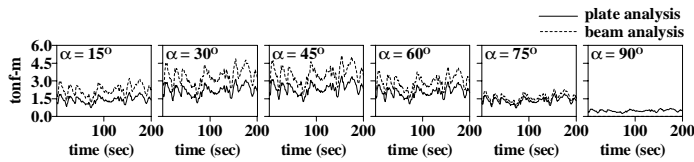


그림 8. 단부에서의 비틀림모멘트 이력

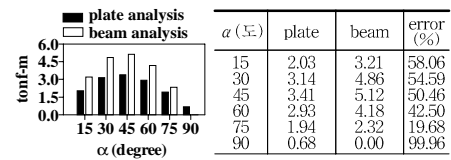


그림 9. 단부에서의 최대 비틀림모멘트 비교

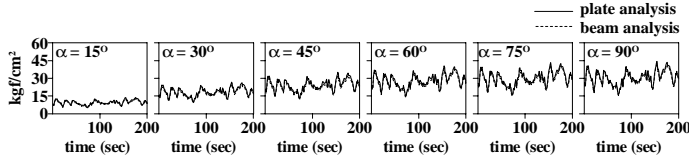


그림 10. 중심부에서의 주응력 이력

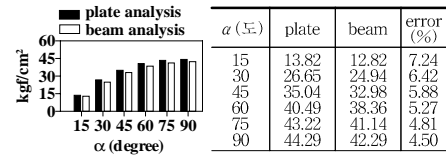


그림 11. 중심부에서의 최대 주응력 비교

그림 12와 표 2는 이력시간 154초에 대한 중심부에서의 분포 휨모멘트를 나타내고 있고 그림 13과 표 3은 이력시간 154초에 대한 단부에서의 분포 비틀림모멘트를 나타내고 있다. 평판해석의 경우 평판의 폭 방향에 따라 다르게 나타나는 부재력의 분포를 파악할 수 있지만 보해석의 경우 평판의 폭 방향에 따른 부재력의 분포가 상수이므로 폭 방향에 따른 부재력의 파악이 불가능하다.

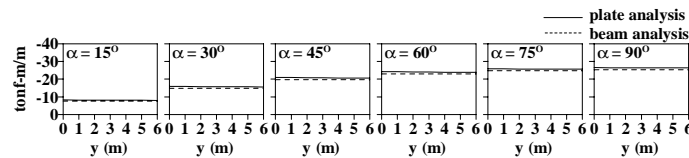


그림 12. 중심부에서의 분포 휨모멘트(이력시간: 154초)

표 2. 중심부에서의 분포 휨모멘트(이력시간: 154초, 단위: tonf-m/m)

y(m)	$\alpha=15^\circ$		$\alpha=30^\circ$		$\alpha=45^\circ$		$\alpha=60^\circ$		$\alpha=75^\circ$		$\alpha=90^\circ$	
	plate	beam	plate	beam	plate	beam	plate	beam	plate	beam	plate	beam
0	-8.29	-7.69	-15.99	-14.97	-21.03	-19.79	-24.30	-23.02	-25.93	-24.69	-26.57	-25.38
1	-8.24	-7.69	-15.89	-14.97	-20.90	-19.79	-24.17	-23.02	-25.81	-24.69	-26.46	-25.38
2	-8.19	-7.69	-15.82	-14.97	-20.82	-19.79	-24.09	-23.02	-25.74	-24.69	-26.42	-25.38
3	-8.15	-7.69	-15.76	-14.97	-20.76	-19.79	-24.03	-23.02	-25.70	-24.69	-26.39	-25.38
4	-8.12	-7.69	-15.72	-14.97	-20.71	-19.79	-23.99	-23.02	-25.67	-24.69	-26.39	-25.38
5	-8.11	-7.69	-15.69	-14.97	-20.69	-19.79	-23.98	-23.02	-25.68	-24.69	-26.41	-25.38
6	-8.08	-7.69	-15.64	-14.97	-20.63	-19.79	-23.92	-23.02	-25.62	-24.69	-26.37	-25.38

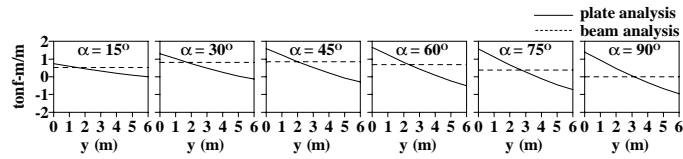


그림 13. 단부에서의 분포 비틀림모멘트(이력시간: 154초)

표 3. 단부에서의 분포 비틀림모멘트(이력시간: 154초, 단위: tonf-m/m)

y(m)	$\alpha=15^\circ$		$\alpha=30^\circ$		$\alpha=45^\circ$		$\alpha=60^\circ$		$\alpha=75^\circ$		$\alpha=90^\circ$	
	plate	beam	plate	beam	plate	beam	plate	beam	plate	beam	plate	beam
0	0.74	0.53	1.30	0.81	1.59	0.85	1.66	0.70	1.58	0.39	1.40	0.00
1	0.60	0.53	1.02	0.81	1.22	0.85	1.24	0.70	1.12	0.39	0.94	0.00
2	0.45	0.53	0.74	0.81	0.85	0.85	0.81	0.70	0.67	0.39	0.46	0.00
3	0.33	0.53	0.50	0.81	0.53	0.85	0.45	0.70	0.28	0.39	0.06	0.00
4	0.20	0.53	0.26	0.81	0.22	0.85	0.08	0.70	-0.11	0.39	-0.33	0.00
5	0.08	0.53	0.04	0.81	-0.06	0.85	-0.24	0.70	-0.44	0.39	-0.67	0.00
6	-0.01	0.53	-0.13	0.81	-0.29	0.85	-0.50	0.70	-0.72	0.39	-0.96	0.00

6. 결 론

풍하중을 받는 구조물의 해석에 있어서 기존의 단순화된 보해석의 정확도와 문제점 등을 고찰하기 위해 평판구조물을 대상으로 하는 수치예제를 통해 단순화된 보해석과 엄밀한 삼차원 평판해석의 결과를 비교분석하였다. 휨모멘트와 주응력의 경우 보해석의 결과가 평판해석의 결과와 유사하지만 비틀림모멘트의 오차는 크게 나타나므로 비틀림모멘트의 경우 보해석의 정확도를 신뢰할 수 없다. 또한 평판해석의 경우 평판의 폭 방향에 따라 다르게 나타나는 부재력의 분포를 파악할 수 있지만 보해석의 경우 평판의 폭 방향에 따른 부재력의 분포가 상수이므로 폭 방향에 따른 부재력의 파악이 불가능하다. 따라서 정확한 풍하중의 해석을 위해서는 기존의 단순화된 보해석이 아닌 엄밀한 삼차원 평판해석이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국가지정 연구실인 구조물 내진제어 연구실의 지원 하에 이루어졌습니다. 지원에 깊은 감사 드립니다.

참고문헌

1. Abernathy, F.H. (1962) Flow over an Inclined Plate, *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME, Vol. 84, pp. 380-388.
2. Hansen, Kurt S. and Courtney, Michael S. (1999) <http://www.winddata.com>, 1999 *European Wind Energy Conference*, Nice, France.
3. Simiu, Emil and Scanlan, Robert H. (1996) *Wind Effects on Structures*, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y.