



플랜트 탱크의 좌굴 거동에 근거한 풍하중 설계기준 비교 연구

배두병¹ · 박일규² · 박장호³ · 오창국^{4*}

¹교수, 국민대학교, 건설시스템공학부, ²석사과정, 국민대학교, 건설시스템공학부, ³교수, 아주대학교, 건설시스템공학부

Comparison of Wind Load Provisions Based on the Wind Buckling Behaviors of Plant Tank

Bae, Doobyong¹, Park, Il Gyu², Park, Jang Ho³, Oh, Chang Kook^{4*}

¹Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

²Master degree, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

³Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

⁴Associate professor, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707, Korea

Abstract - There are no consistent wind load provisions to design the plant tank in Korea. To suggest the appropriate design wind load, five kinds of specifications including KS B 6283, API 650, ASCE 7-10, EN 1991-1-4 are compared. To evaluate the adequacy of wind load specification in each code first, pressure coefficients were calculated in each code and compared with the results of wind tunnel test. Finite element analyses using linear bifurcation analysis were performed with the parameter of h/d and f/d (h : height of cylindrical part of tank, f : roof height, d : diameter of tank). By analyzing the results, appropriate wind load criteria which reflects the real wind actions and easy to apply will be suggested.

Keywords - Plant tank, Wind load provisions, Pressure coefficients, Wind buckling, Linear bifurcation analysis

1. 서론

플랜트 탱크 설계를 위해 적용할 수 있는 국내의 풍하중 기준으로 산업 표준화 심의회에서 제정한 기준이 'KS B 6283 액체저장탱크의 내풍압 및 내진에 대한 설계 요건', 소방방재청에서 제정한 '위험물 안전관리에 관한 세부 기준' 등 규정이 되어 있으나 일관성이 결여되어 있고 근거도 명확하지 않아 저장탱크 설계만을 위한 합리적인 풍하중 기준 정립이 필요한 실정이다^{[1],[2]}. 해외의 경우 API 650, ASCE 7-10 및 EN 1991-1-4(wind action)에서 제시된 풍하중 기

준이 저장탱크 설계 시 많이 적용되고 있으나^{[3],[4],[5]}, 이 또한 크기 및 적용 방법 등에서 있어 많은 혼동을 주고 있다. 이 연구에서는 국내의 플랜트 탱크 설계에 적용할 합리적인 풍하중 기준을 제안하고자, 국내에서 저장탱크 설계 시 많이 적용하는 위험물 안전관리에 관한 세부기준과 KS B 6283, 해외의 API 650, ASCE 7-10 및 EN 1991-1-4의 기본적인 풍하중 기준내용을 정리하고^{[2],[3],[4],[5],[6],[7]}, 축소모형에 대한 풍동 실험이 수행된 저장탱크를 대상 탱크로 하여 각 기준에 따라 계산된 압력계수인 C_p 값으로 나타내어, 각 기준의 풍하중 특성을 일단 비교하고 분석하였다. 또한 대상 탱크에 대해 각 기준에 따른 풍하중을 적용한 좌굴 해석을 수행하여 각 풍하중 기준을 적용했을 때의 좌굴을 발생시키는 풍속을 산정하고, 좌굴 형상과 함께 풍하중에 대한 좌굴 거동을 비교 분석하였다. 탱크지붕높이(f)와 지름(d) 비(f/d) 및 탱크 높이(h)와 지름(d) 비(h/d)를 변수로 한 좌굴 해석을 수행하여 각 기준별로 f/d 및 h/d 가 탱크의 좌굴 거동에 어떠한 영향을 미치는지 분석하여 탱크 설계를 위한 합리적이고 적용

Note.-Discussion open until December 31, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 23, 2016; revised May 31, 2016; approved on June 14, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-910-5444 Fax. +82-2-910-4939

E-mail. ockoogi@kookmin.ac.kr

하기 쉬운 풍하중 기준을 제시하고자 한다.

2. 풍하중 기준

2.1 위험물 안전관리에 관한 세부기준

위 기준은 특정옥외저장탱크에 관계된 풍하중의 계산방법을 다음과 같이 제시하고 있다^[1].

기본적으로 1m²당 풍하중은 다음 식에 따라 계산하며,

$$q = 0.588k\sqrt{h} \quad (1)$$

여기서, q : 풍하중 (kN/m^2)

k : 풍력계수 (원통형 탱크 0.7)
(그외 탱크 1.0)

h : 지반면으로부터 탱크의 높이 (m)

강풍을 받을 우려가 있는 장소 및 탱크의 높이가 25m보다 클 경우 형상에 따라 2.05kN/m², 또는 2.94kN/m²을 풍하중으로 제시하고 있다.

2.2 KS B 6283

기본풍속에 고도분포계수, 지형에 의한 풍속할증계수(V_z), 중요도계수를 곱하여 설계풍속하중(V_z)를 구하며^[2], 다음 식과 같은 설계속도압에

$$q_z = \frac{1}{2} \rho V_z^2 \quad (2)$$

q_z : 설계속도압

ρ : 공기밀도

V_z : 설계 지역의 지표면으로부터 임의 높이 Z 에 대한 설계풍속

노풍도 구분에 따른 가스트 영향계수(G_f)와 형상계수(평판형 1.0, 원통형 0.7 등)를 곱하여 설계풍압을 구한다.

2.3 API 650

탱크의 원통형 표면에 작용하는 설계풍하중은 원통 벽체에 0.86kPa \times ($V/190$)²의 값을, 지붕에 연직 방향으로 1.44kPa

\times ($V/190$)²의 값을 적용하도록 규정하고 있다^[3]. 여기서 V 는 설계풍속이다.

2.4 ASCE 7-10

ASCE 7-10은 다음의 식과 같이 3개의 계수를 고려하여 q_z 를 구하도록 하고 있다^[4].

$$q_z = 0.613 \cdot k_z \cdot k_{zt} \cdot k_d \cdot V^2(N/m^2) \quad (3)$$

여기서, k_d 는 구조물 형태에 따른 풍향계수(wind directionality factor)이며, 원형탱크의 경우 0.95를 적용한다. k_z 는 속도압 노출계수(velocity pressure exposure coefficient)로 노출범주를 B, C, D로 분류하고, 각 범주별로 지상으로부터의 높이에 따라 계수 값을 제공하고 있다. k_{zt} 는 지형계수(topographic factor)로 노출 범주별로 지형요소에 따른 상수를 계산하도록 표를 제공하고 있고 이를 이용하여 지형계수를 산정하도록 하고 있다. 돔 지붕의 경우는 바람이 불어오는 방향 전면부(A), 중앙부(B) 및 후면부(C)로 나누어 각 위치에 대한 압력계수값을 탱크지붕높이 및 지름비(f/d)에 따라 구할 수 있도록 그래프를 제공하고 있다. 이는 EN 1991-1-4의 경우와 같다^[7].

2.5 EN 1991-1-4

EN 1991-1-4 기본풍속에 지역범주에 따른 변수를 적용하여 구한 조도계수(roughness factor)와 산악지계수(oroography factor)를 곱하여 평균풍속 $V_{m(z)}$ 을 구하고, 평균풍속에 난류강도(turbulence intensity), $I_{v(z)}$ 를 곱하여 우선최고 속도압(peak velocity pressure); $q_{p(z)}$ 을 다음과 같이 구하게 된다^{[5],[6],[7]}.

$$q_{p(z)} = [1 + 7I_{v(z)}] \frac{1}{2} \rho V_{m(z)}^2 \quad (4)$$

여기서, $I_{v(z)}$ 는 난류강도, ρ 는 공기밀도이다.

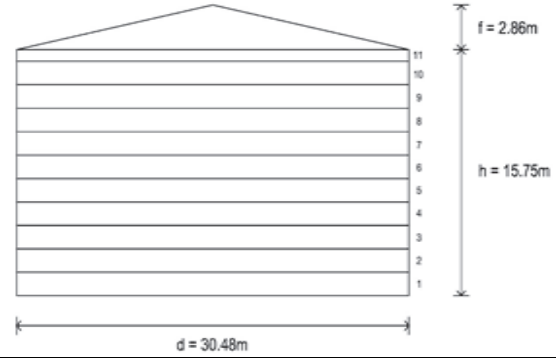
원통형 탱크의 경우 레이놀즈수와 단부효과 등을 고려하여 바람을 받는 각도에 따라 변하는 압력계수, C_{pe} 를 구하도록 하고 있으며, 이 값을 최고 속도압에 곱하여 원형탱크 표면에 작용하는 풍압을 다음과 같이 산정하게 된다.

$$w = q_{p(z)} \times C_{pe} \quad (5)$$

2.6 풍하중 기준 비교 분석

앞에서 기술한 바와 같이 국내의 두 기준은 풍압의 크기만 다를 뿐 표면에 풍압을 작용시키는 방법은 같음을 알 수 있으며^{[1],[2]}, API 650의 경우는 기본적으로 작용시키는 풍압의 크기가 모든 기준 중 가장 작으며 원통형 벽체에 작용시키는 방법은 국내 기준과 같으나^[3], 지붕에 상향의 풍압을 동시에 가하도록 하고 있다. ASCE 7-10의 경우^[4], 실험들로 결정된 풍향계수, 노출계수, 지형계수 등을 적용하여 풍압을 산정하도록 하고 있는데, 노출계수의 경우 노출범주를 나누고, 지상으로부터의 높이에 따라 적용하는 계수 값이 달라지므로, 탱크에 작용하는 풍압은 탱크의 하부에서는 작고 상부로 갈수록 커지게 된다. EN1991-1-4는 압력 산정 시^{[5],[6],[7]}, 난류강도와 레이놀즈 수 등을 고려하여 표면에 작용하는 풍압을 산정하게 하는 등 실제 공기의 흐름을 가장 잘 반영하여 풍압을 구하도록 한 것으로 보이나, 바람을 받는 각도에 따라 표면의 풍압이 달라져 거동해석 시 하중 입력이 매우 어려운 단점을 갖고 있다.

3.3절에 풍동 실험이 수행된 전형적 플랜트 탱크 모델에 각 기준에 따른 풍압의 크기를 압력계수 C_p 로 계산하여 비교할 수 있도록 하였는데, 이를 보면 탱크에 작용하는 풍하중 기준의 차이를 볼 수 있다.



Course	Elevation(m)	Thickness(mm)
1	1.50	19.1
2	3.00	15.9
3	4.50	14.3
4	6.00	12.7
5	7.50	12.17
6	9.00	9.15
7	10.50	7.9
8	12.00	6.3
9	13.50	6.3
10	15.00	6.3
11	15.75	6.3

Fig. 1. Dimensions and course separations

3. 풍하중 좌굴 해석

3.1 대상 탱크 및 해석모델

외국에서 수행된 상사율을 적용하여 만들어진 탱크에 대한 풍동 실험 결과를 활용하기 위하여^[8], 이 결과를 제공한 연구에 적용된 전형적인 탱크 제원을 해석에 적용하였으며, 기본적인 탱크 제원은 Table 1과 같다.

이 탱크의 높이에 따른 원통벽체의 두께는 API 650의 기준에 따라 결정되었으며 Fig. 1은 높이를 11개로 나눈 탱크 벽체 및 지붕의 형상 및 API 650기준(Foot-Method)에 따라 정해진 층별 벽체 두께를 나타내고 있다^[3].

ABAQUS/CAE 6-12-1을 사용하여 해석모델을 구성하

Table 1. Basic dimensions of tank

Diameter(d)	Height(h)	Roof Height(f)	Roof Thickness
30.48m	15.75m	2.86m	18.9mm

고 좌굴 해석을 수행하였으며, 고유치(eigenvalue)의 수렴도를 평가하여 해석모델의 요소크기를 결정하였다.

3.2 기준별 적용 지형 설정

지형요소는 탱크에 미치는 풍하중에 많은 영향을 미치므로, KS B 6283, ASCE 7-10, EN 1991-1-4는 탱크가 설치되는 지형을 분류해 서로 다른 계수를 적용하도록 하고 있는데^{[3],[4],[5],[6],[7]}, 본 논문에서는 조건을 같게 하기 위하여 플랜트 산업단지 내에 탱크가 건설되는 상황을 고려하여, 약간의 장애물이 있는 지역으로 설정하였다(KS B 6283 : 노풍도 C, ASCE 7-10 : surface roughness C, EN 1991-1-4 : Terrain category II).

3.3 풍동 실험 결과와의 비교

각 기준에서 산정한 풍하중 기준을 정량적으로 비교하기 위하여 바람을 받는 탱크 정면에서의 압력계수를(C_p) 다음의 식과 같이 산정하여 비교하여 나타내고자 한다.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (6)$$

- P : 탱크 표면에 가해지는 풍압
- ρ : 공기밀도
- V : 설계풍속

각 기준에 따라 계산된 압력계수 C_p 는 그림과 같이 풍동 실험 결과와 같이 Fig. 2에 나타냈다.

위험물 안전 관리 기준의 경우 최대 C_p 값이 10에 가까워 그래프에 나타내지 않았다. Fig. 2에서 보듯이 EN 규정이 풍동 실험결과와 가장 근접한 풍하중 기준을 제시하고 있는 것을 알 수 있으며, API 기준은 풍하중을 너무 과소평가하고 있는 것으로 보인다.

KS B 6283 기준은 풍하중을 너무 과도하게 보고 있고 ASCE 7-10은 정면의 풍압의 경우 비교적 풍동 실험결과와 유사한 값을 규정하고 있음을 알 수 있다. EN 1991-1-4의 경우 실제 작용하는 풍하중을 가장 잘 반영하고는 있으나, 풍하중에 대한 탱크 해석 시 정면 좌우 30° 정도까지는 양압력을 받고 나머지 부분은 서로 다른 크기의 음압력을 작용시켜야 하는 등 입력과정이 너무 어렵고 복잡한 것이 단점으로 볼 수 있다.

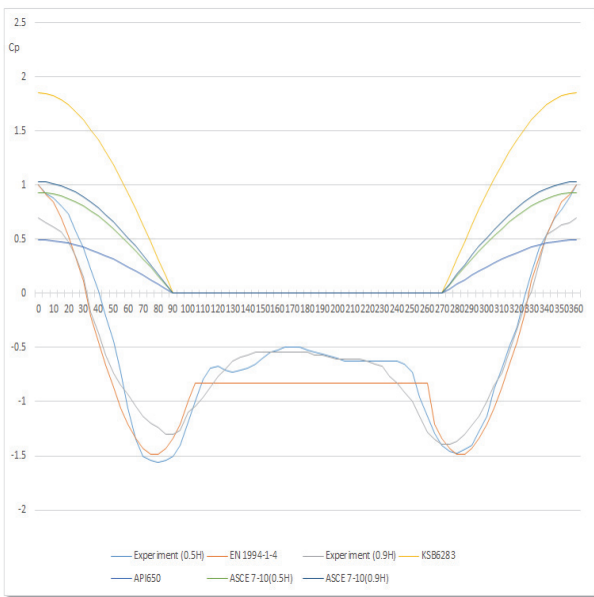
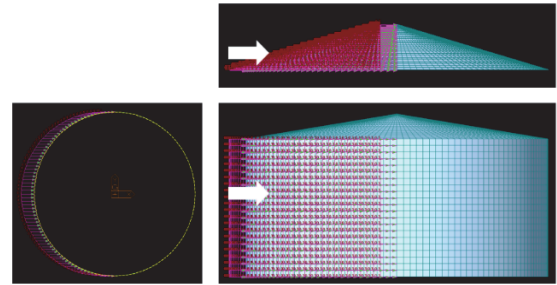


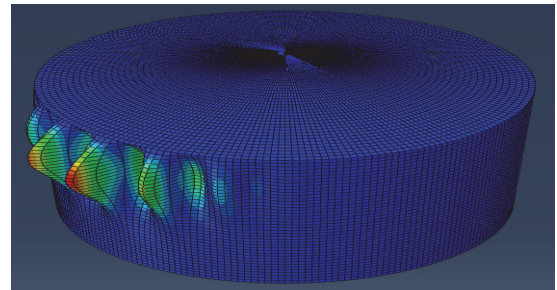
Fig. 2. Comparison of C_p

3.4 기준별 풍압작용형태 및 좌굴 형상

3.3에 언급한 바와 같이 탱크 단면에 작용하는 풍압을 산정하여, 탱크단면에 작용시켜 해석을 수행하였는데 하중이 작용되는 형태 및 좌굴 형상이 다음의 4개 그림과 같이 서로

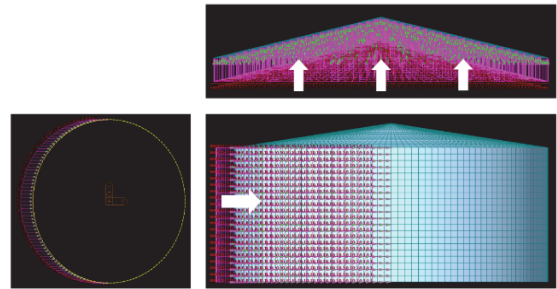


(a) Applied wind load

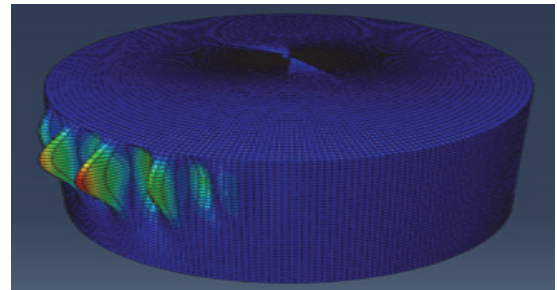


(b) Buckling shape

Fig. 3. Applied wind load and buckling shape (domestic code)



(a) Applied wind load



(b) Buckling shape

Fig. 4. Applied wind load and buckling shape (API 650)

다름을 알 수 있다.

국내 기준인 '위험물 안전관리에 관한 세부기준'과 KS B 6283에 제시된 풍하중 적용 형상은 크기만 다를 뿐 Fig. 3과 같이 계산된 풍압을 벽체 및 지붕 투영면에 작용하도록 하고 있으며, API 650의 경우는 Fig. 4와 같이 벽체에는 크기가

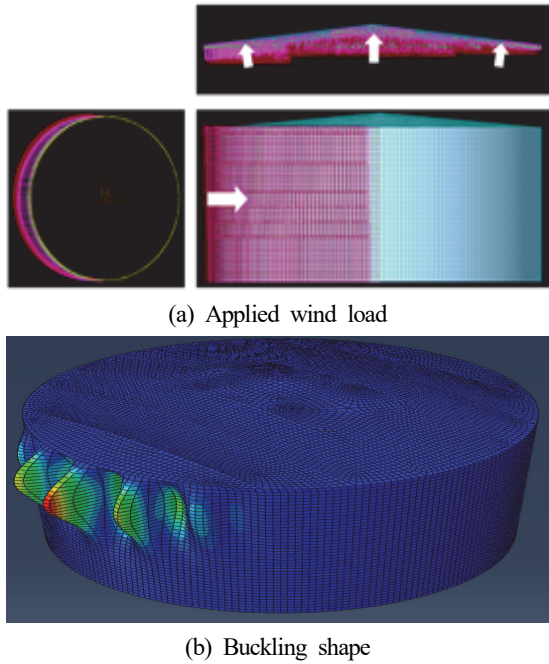


Fig. 5. Applied wind load and buckling shape (ASCE 7-10)

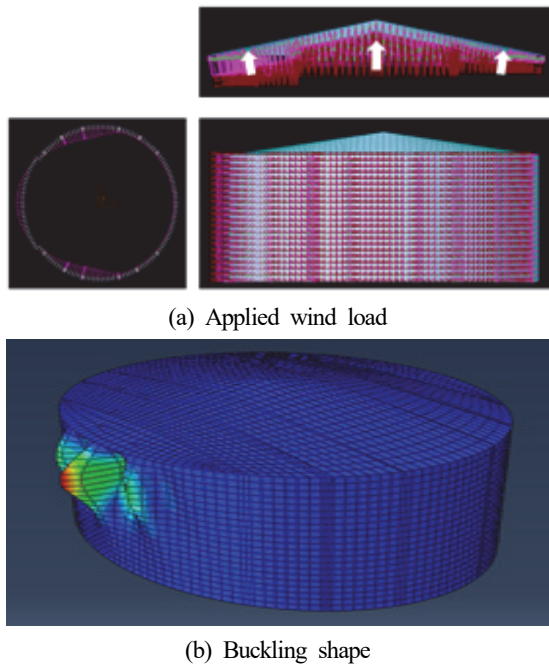


Fig. 6. Applied wind load and buckling shape (EN 1991-1-4)

다르나 국내 기준과 같고, 지붕에만 상향방향의 풍압을 작용 시키도록 하고 있다. ASCE 7-10의 경우는 Fig. 5와 같이 벽체 높이에 별로 서로 다른 풍압을 작용시키며, 지붕에도 전면, 중앙, 후면에 서로 다른 상방향 풍압을 작용시키도록 하고 있다. EN 1991-1-4의 경우는 앞의 기준들과는 달리 Fig. 6과 같이 탱크 앞면 일부에 정의 풍압을 옆면 및 후면에 부의 풍압을 작용시키도록 하고 있다.

4. 탱크 형상에 따른 풍하중 좌굴 하중

4.1 f/d 의 변화에 따른 좌굴 하중 및 형상

탱크 높이와 지름비인 h/d 를 0.5로 고정시키고 지붕높이와 지름비인 f/d 를 0.05에서 0.5까지 증가시키면서 각 기준에 따른 풍하중을 적용하여 좌굴해석을 수행한 결과 중 2개의 국내 기준과 API 650 적용 시와 유사한 좌굴 형상을 나타내는 ASCE 7-10 적용 시의 f/d 에 따른 좌굴 형상을 Fig. 7에, EN 1991-1-4를 적용했을 때의 좌굴 형상을 Fig. 8에 나타내었다.

f/d 에 따른 좌굴 형상의 변화는 거의 없는 것으로 보이며, EN 1991-1-4의 풍하중을 적용했을 때가 다른 기준을 적용

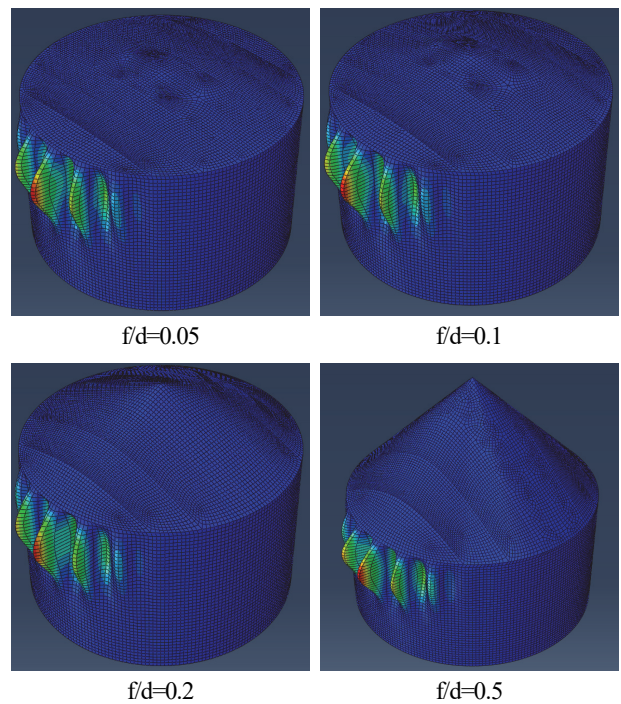


Fig. 7. Buckling shape with variable f/d (ASCE 7-10)

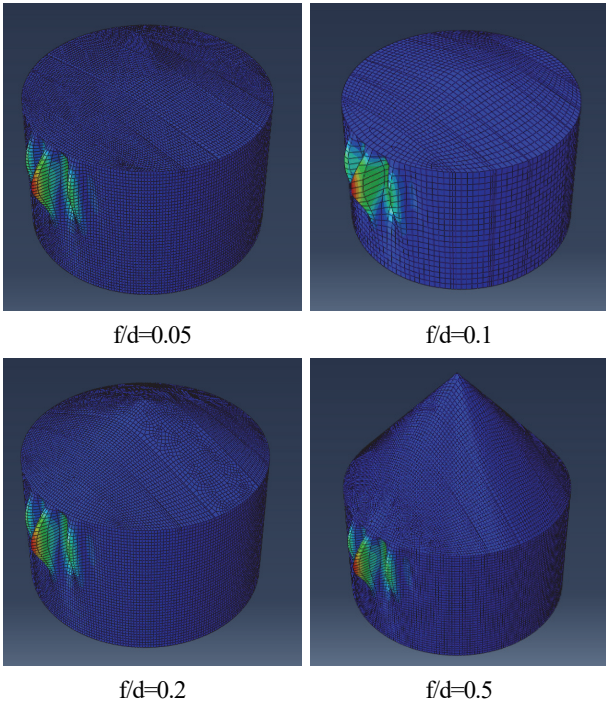


Fig. 8. Buckling shape with variable f/d (EN 1991-1-4)

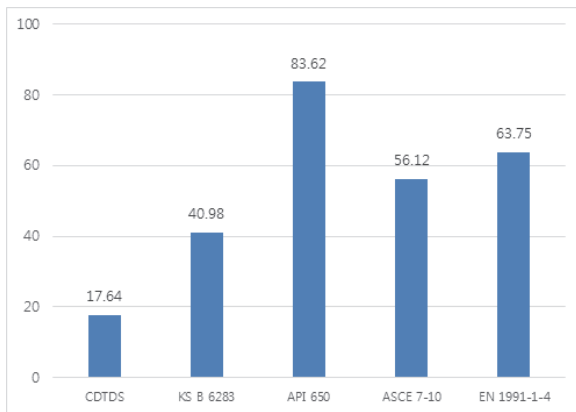


Fig. 9. Buckling wind speed ($h/d=0.5$, $f/d=0.1$)

했을 때와 비교하여 상대적으로 바람을 받는 전면 일부에 좌굴이 집중됨을 볼 수 있다.

Fig. 9는 $f/d=0.1$, $h/d=0.5$ 일 때의 각 기준에 따른 좌굴을 발생시키는 풍속을 보여주고 있으며, 위험물 안전관리 세부 기준이 가장 작은 좌굴 풍속 API 650의 경우가 가장 큰 좌굴 풍속을 나타냄을 알 수 있다.

이는 위험물 안전관리 세부기준(CDTDS : Code for the Design of Tank with Dangerous Substances)의 풍하중 기준이 너무 과도하게 큰 값을 적용하고 있는 것으로 생각할 수 있으며, API650의 경우 상대적으로 상당히 작은 풍하중

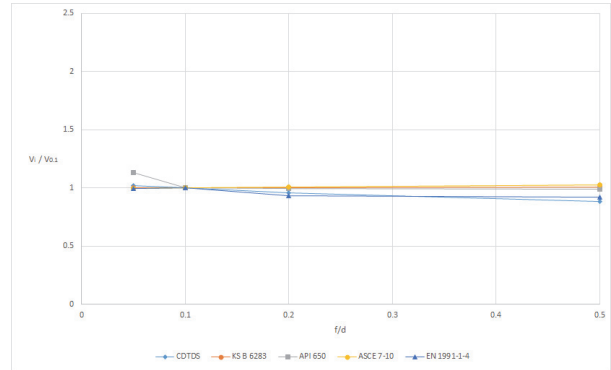


Fig. 10. Buckling wind speed with variable f/d

기준을 제시하고 있는 것으로 볼 수 있다.

h/d 는 0.5로 고정시키고 f/d 에 따라 좌굴을 발생 시키는 풍속을 구해 각각 $V_{0.05}$, $V_{0.1}$, $V_{0.2}$, $V_{0.5}$ 로 표기하고, $V_{0.1}$ 로 각 좌굴 풍속을 나누어 공칭화하여 f/d 에 따른 좌굴 풍속 변화를 보여주는 그래프가 Fig. 10이다.

Fig. 9와 10에서 보듯이 좌굴을 발생시키는 풍속은 서로 많이 다르나, 각 기준에서 f/d 변화에 따른 좌굴 풍속의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

4.2 h/d 의 변화에 따른 좌굴 하중 및 형상

f/d 를 0.1로 고정하고 h/d 를 0.25부터 2.0까지 증가시키면서 각 기준에 따른 풍하중 형태를 적용하여 좌굴 해석을 수행하였고, ASCE 7-10을 적용했을 때의 h/d 에 따른 좌굴 형상을 Fig. 11에, EN 1991-1-4를 적용했을 때의 h/d 에 따른 좌굴 형상을 Fig. 12에 나타내었다.

ASCE 7-10의 경우 h/d 가 커질수록 좌굴 범위가 지붕 쪽으로 움직이는 것을 볼 수 있다. 상대적으로 EN 1991-1-4의 경우 h/d 와 관계없이 탱크 중간높이에서 상단에 걸쳐 좌굴이 발생되는 것을 볼 수 있다.

h/d 에 따라 좌굴을 발생시키는 풍속을 구해 각각 $V_{0.25}$, $V_{0.5}$, $V_{1.0}$, $V_{2.0}$ 으로 표기하고, $V_{0.5}$ 로 각 좌굴 풍속을 나누어 공칭화한 그래프가 Fig. 13이다.

모든 기준이 h/d 에 따라 좌굴 풍속이 크게 차이를 보이며, 당연한 결과이겠지만 h/d 가 커질수록 좌굴 풍속이 작아짐을 알 수 있다.

국내 기준이 h/d 가 0.5보다 작은 경우 해외 기준에 비해 상당히 큰 좌굴 풍속을 보이며, h/d 가 0.5보다 큰 경우에는 EN 1991-1-4가 h/d 비에 따라 좌굴 풍속의 차이가 가장 큰 것을 알 수 있다. Fig. 9의 기준별 좌굴 풍속을 함께 비교해

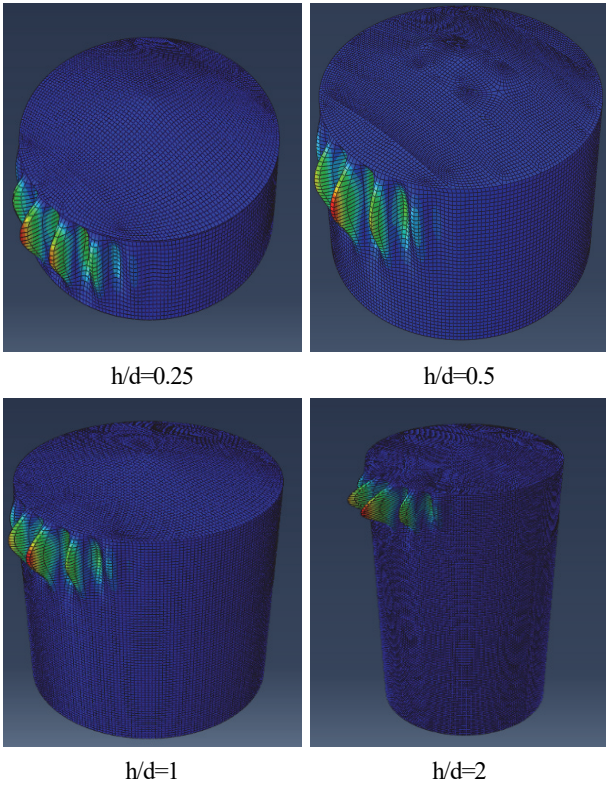


Fig. 11. Buckling shape with variable h/d (ASCE 7-10)

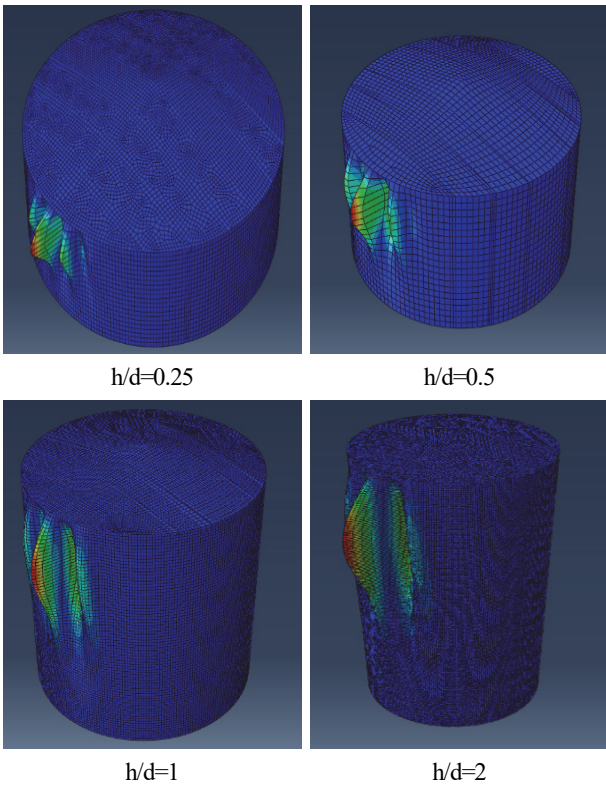


Fig. 12. Buckling shape with variable h/d (EN 1991-1-4)

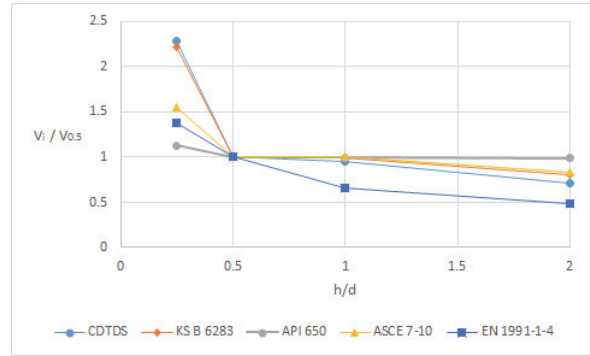


Fig. 13. Buckling wind speed with variable h/d

보면 h/d가 1.0보다 큰 경우 KS B 6283과 EN 1991-1-4의 좌굴 풍속이 거의 같음을 알 수 있다.

4.3 분석 및 풍하중 제안

3.3절에서 언급한 바와 같이 EN 1991-1-4의 풍하중 기준이 실제 풍동 실험의 결과를 가장 잘 반영하는 것으로 나타났으므로 이 기준에 따른 좌굴 풍하중이 실제 탱크의 풍하중에 의한 좌굴 거동을 가장 잘 반영한 것으로 판단되어 이 기준에 의한 좌굴 풍속으로 다른 기준의 좌굴 풍속을 나누어 그 값의 변화를 Fig. 14에 나타내었다.

그래프에서 보는 바와 같이 KS B 6283의 좌굴 풍속이 h/d=0.25, 1.0, 2.0에서 거의 같은 값을 보임을 알 수 있다. 단, h/d=0.5인 경우 약 36% 정도의 작은 좌굴 풍하중을 보여주고 있다. 현실적으로 h/d가 0.25보다 작은 경우는 거의 없고 풍하중에 의한 좌굴로 발생하지 않을 것이다. 그러므로, 해석 시 적용하기 편리한 KS B 6283 풍하중 기준을 기본적으로 적용하되, h/d가 0.25보다 크고 0.5보다 작은 경우와 h/d가 0.5보다 큰 경우에 적용하는 압력 계수 값을 조정하면 실제 풍하중에 의한 좌굴 거동을 반영하는 풍하중 기준을 제안할 수 있을 것으로 생각된다.

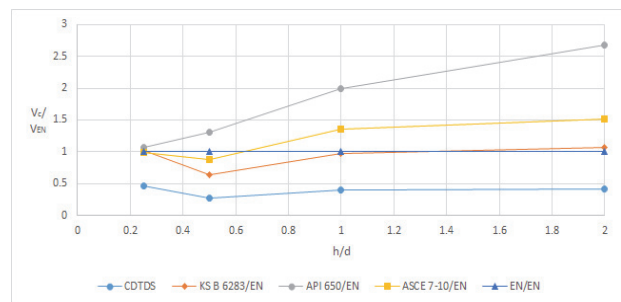


Fig. 14. Ratio of buckling wind speed

KS B 6283의 풍하중 압력 계수 C_p 값은 형상에 따른 계수 (c)와 가스트 계수(G_f)의 곱이라 볼 수 있는데, 이 값에 다음의 식과 같은 보정 계수, α 를 곱하여 h/d에 따른 C_p 값을 구하고 이를 설계 풍하중 산정에 적용하면 될 것으로 판단된다.

$$\alpha = -1.428(h/d)+1.357 \quad (0.25 \leq h/d \leq 0.5) \quad (7)$$

$$= 0.714(h/d)+0.286 \quad (0.5 \leq h/d \leq 1.0) \quad (8)$$

$$= 1.0 \quad (1 \leq h/d) \quad (9)$$

5. 결론

플랜트 탱크 설계에 적용하는 국내의 풍하중 기준이 일관성도 없고 기준의 적합성이 평가된 적이 없어 이 연구에서는 외국에서 탱크 설계 시 적용하는 API 650, ASCE 7-10, EN 1991-1-4 등의 풍하중 기준과의 기본적인 차이점을 분석하고, 풍동 실험 결과와의 비교 및 탱크 형상(f/d, h/d)에 따른 각 기준 적용시의 좌굴 풍하중을 산정하고 비교하여, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 국내 기준은 구조물 해석 시 적용은 쉽게 할 수 있도록 되어있으나, 위험물안전관리에 관한 세부 기준에 규정된 풍하중 기준은 풍하중을 너무 과도하게 보도록 하고 있고^[1], KS B 6283의 풍하중 기준은 가장 흔하게 적용되는 원형 탱크 형상에 대해 비경제적인 풍하중 기준이 제시되어 있다^[2].
- (2) API 650의 경우 일반적인 풍하중 기준은 풍동 실험 결과 값보다 너무 작은 값을 제시하고 있으며^[3], ASCE 7-10의 경우도 API650정도는 아니지만 h/d가 0.7 이상인 경우 풍하중을 과소평가하고 있는 것으로 생각된다^[4]. EN 1991-1-4의 풍하중 기준이 풍동실험 결과와 가장 근접한 값을 보임을 알 수 있었다^{[5],[6],[7]}.
- (3) EN 1991-1-4의 풍하중 기준이 실제의 바람에 의한 거동을 가장 잘 반영하고 있는 것으로 보인다^{[5],[6],[7]}, 정면 일부에 양압력, 측면 및 후면에는 서로 다른 크기의 음의 압력을 적용해야 하는 등 해석 시 하중 적용이 매우 복잡한 단점이 있다. 따라서 앞의 4.3에서 언급한 바와 같이 기본적으로 KS B 6283의 풍하중 기준을 따르되 압력계수 C_p 에 h/d비에 따라 제시된 보정계수를 적용하

여 풍하중을 구하면, 실제 바람에 의한 좌굴 거동을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

h/d비를 좀 더 세분화하여 좌굴 풍속을 구하여 보정계수를 검증하는 작업이 필요할 것으로 보이나, 이 논문이 향후 탱크 설계 시 적용할 풍하중 기준 정립에 필요한 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(14CTAP-C077504-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] 위험물안전관리에 관한 세부기준(2013). Detailed Guideline for Safety Control of Hazardous Substances (2013, Republic of Korea, in Korean).
- [2] 국가기술표준원(2006) 액체저장탱크의 내풍압 및 내진에 대한 설계요건(KS B 6283: 2006). Korean Agency for Technology and Standards (2006) *Design Requirements for Windpressure-Proof and Earthquake-Proof of Liquid Storage Tanks* (KS B 6283: 2006), Korea (in Korean).
- [3] American Petroleum Institute (2013) *Welded Storage Tanks for Oil Storage* (API 650), USA.
- [4] American Institute of Steel Construction (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-10), USA.
- [5] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 1: Actions on Structures, Part 1-4: General Actions - Wind Actions* (EN 1991-1-4), Belgium.
- [6] European Committee for Standardization (2007) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 4-1: Silos* (EN 1993-4-1), Belgium.
- [7] European Committee for Standardization (2007) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 4-2: Tanks* (EN 1993-4-2), Belgium.
- [8] Burgos, C.A., Jaca, R.C., Lassig, J.L., Godoy, L.A. (2014) Wind Buckling of Tanks with Conical Roof Considering Shielding by Another Tank, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.84, pp.226-240.

요 약 : 국내의 플랜트 탱크 설계를 위한 풍하중 기준은 KS B 6283 액체 저장 탱크의 내풍압 및 내진에 대한 설계 요건 등 여러기준에 제시되어 있으나, 그 내용이 서로 다르고 연관성도 없으며 실제의 풍하중을 반영하고 있는지 명확하지 않다. 국내 풍하중 기준의 정당성을 평가하고 적합한 풍하중 기준을 제안하기 위해 외국의 저장 탱크 설계를 위한 대표적 기준인 API 650, ASCE 7-10, EN 1991-1-4의 풍하중 기준 들과 비교분석하였다. 풍동 실험이 수행되어 보고된 논문에 적용된 탱크 제원을 적용하여 기본적으로 각 기준에 의한 압력계수 C_p 값을 산정해 비교하고, 탱크 지붕 높이와 지름 비(f/d) 및 탱크 깊이 및 지름 비(h/d)를 변수로 한 각 기준에 의한 풍하중 좌굴해석을 수행하였다. 결과를 분석 종합하여 실제 풍하중에 의한 좌굴 거동을 반영하면서도 설계 시 쉽게 적용할 수 있는 풍하중 기준을 제안 하였다.

핵심용어 : 플랜트 탱크, 풍하중 기준, 양력 계수, 풍좌굴, 선형 좌굴 해석
