

통영생산기지 Unloading Arm의 구조 안전성 평가

고재필, 김동현*

한국가스공사, *군산대학교

Safety estimation for Unloading arm of tongyeong LNG Receiving terminal

Koh,jaepil, Kim,donghyun*

korea gas corporation, kunsan national University

1. 서론

본 논문의 목적은 풍속의 확률적 변동성을 고려하여 통영생산기지 Unloading Arm의 구조해석을 수행하는 것이다. Unloading Arm이 설계기준풍속에 대하여 안전성을 확보하도록 설계되었지만 통영지역의 풍속변동성을 고려한 파괴 위험도를 정량적으로 평가하여 방재 대책 수립의 근거자료로 활용할 수 있도록 한다. 풍속의 확률적 변동성을 수립하기 위해서는 인근의 통영기상대 풍속관측 자료를 이용하였으며 구조해석은 unloading arm 제작업체인 Niigata에서 제공한 구조계산서와 일부의 설계도면을 이용하였다. 풍향에 대한 정보는 통계자료의 부족으로 정밀하게 고려할 수 없었으며 이를 보완하기 위해 서로 직각인 네 방향에 대한 구조해석을 각각 수행하였다.

2. 본론

2-1 구조물 제원

Unloading Arm의 정밀한 구조해석을 위해서는 구조물 치수에 대한 정보가 필수적이다. 구조물의 기하학적 정보를 정확히 알아야 정밀한 유한요소모델을 얻을 수 있고 결과적으로 정밀한 응답해석과 신뢰성 해석도 가능하다. 이를 위해서는 치수가 정확하게 기입된 정면도, 평면도, 측면도 및 상세도가 필요하지만 본 과업을 위해 취득한 자료로는 부재의 길이가 기재된 개략도와 base plate 의 상세도 그리고 구조계산서상의 개략도 등이다. 설계도에 미 기재된 치수정보를 얻기 위해서는 도면상에서 실측을 한 후 이미 기재되어 있는 다른 치수와와의 축적을 고려하여 추정하였다. 모델링 단계에서 어느 정도 오차를 수반할 수밖에 없는 제한사항이다. 이 구조물은 전체 높이 약 32m의 강구조물로서 가스 파이프를 탑재하고 있으며 파이프의 위치를 조절할 수 있는 두 개의 도르래(sheave)와 두 개의 counterweight를 탑재한 counterweight beam으로 구성되어 있다. 가스파이프와 counterweight beam은 outer riser에 의해 지지되고 있으며 outer riser는 잔교의 상단에 16개의 anchor bolt로 고정되어 있다. Unloading Arm은 구조적 관점에서 볼 때 외팔보의 형태를 취하고 있어 강풍에 의한 붕괴위험은 주로 구조물 하부에 집중되어 있다고 볼 수 있다. 따라서, 본 과업에서는 주로 anchor bolt와 base plate 그리고 outer riser 하단부를 중심으로 그 위험도를 평가하였다.

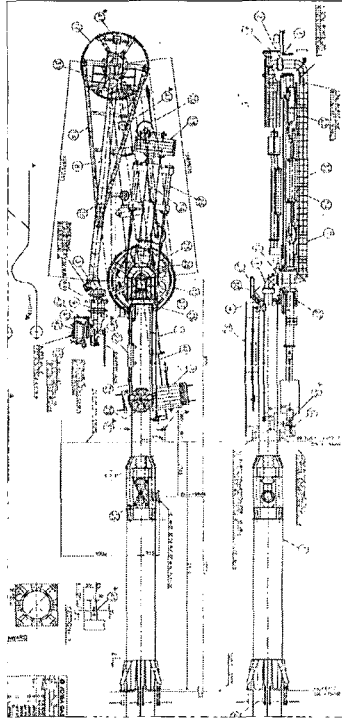


그림 1 LA-101A모델의 설계도

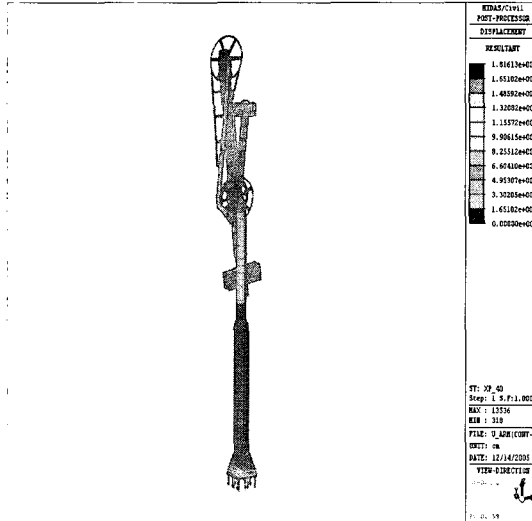


그림 2 유한요소모델

2-2 유한요소모델 및 경계조건

유한요소모델링과 구조해석에 사용한 프로그램은 MIDAS IT사의 MIDAS Civil이다. Unloading Arm의 유한요소모델은 그림 2와 같다. 사용한 총 절점은 44287개이며 요소는 총 27215개로서 그 중 입체요소가 14028개, 압축전담요소가 2152개, 판요소(Plate Element)가 11035개이다. 판요소(Plate Element)는 outer riser, counterweight beam, gas pipe, bottom plate 등 대부분의 구조부재 모델링에 사용되었고 입체요소는 counterweight와 anchor bolt, nut, washer등의 모델링에 사용되었다. 또한, 압축전담요소는 잔교의 상부 콘크리트와 Unloading Arm의 base plate사이를 모델링하여 인장에는 저항하지 못하고 압축에만 저항하도록 하였다. 경계조건은 3가지 종류를 사용하였다. 첫째는 그림 3.6과 같이 압축전담요소의 절점 중 콘크리트면과 닿아 있는 곳은 수직방향변위가 발생하지 않도록 하였다($D_z=0$). 나머지 두 개의 경계조건은 그림 3.7에서와 같이 anchor bolt에 대한 것으로 잔교에 매설되어 있는 부분에서는 수평변위가 발생하지 않도록 고정하였고($D_x=D_y=0$) 아래쪽 washer의 상단부에서 모든 방향의 변위를 고정하였다($D_x=D_y=D_z=\theta_x=\theta_y=\theta_z=0$).

2-3 풍하중모델링

하역구조물에 대한 풍압 산정식은 항만 및 어항 설계기준(1999) 및 JIS code에 다음 식(1)과

$$q = \frac{V^2}{30} \sqrt[4]{h} \quad (kg/m^2) \quad (1)$$

여기서, V (단위: m/sec)와 h (단위: m)는 각각 최대풍속(10분 평균)과 지면으로부터의 높이를 의미한다. 이 식은 지상고도 15m이상에 대하여 높이에 따른 변화를 고려하고 그 이하에서는 일정한 값을 사용하도록 하고 있다. 속도풍압을 이용한 최종 풍압력은 다음 식(2)와 같다.

$$F = qCA \quad (2)$$

여기서, A 는 풍하중을 받는 면적을 나타내고 C 는 풍압을 받는 단면의 형상을 고려하는 형상계수이다. 형상계수는 구조계산서에 제시된 대로 원형단면에서는 0.7, 사각단면에서는 1.7을 사용하였다. Unloading Arm의 설계에 적용한 기준풍속 40m/sec에 대한 구조해석을 수행하였고, 풍하중은 모두 4방향으로 재하 하였다. 그림 3의 기준좌표에서 X의 양의 방향을 XP, 음의 방향을 XN으로 정의하였고 Y방향에 대해서도 양과 음의 방향의 풍향을 각각 YP, YN으로 정의하였다. 구조해석에서 검토하고자 하는 사항으로는 구조물 부위별 변형 형상과 주요부위(anchor bolt, base plate, outer riser 하단)의 응력분포이다.

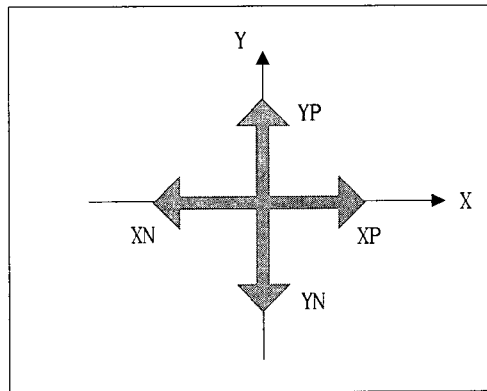


그림 3 풍하중 재하방향의 기호 정의

3. 결과 및 고찰

그림 4~7은 각각 XP, XN, YP, YN방향의 풍하중 재하시 Unloading Arm에 발생한 변형을 보여 주고 있다. 적색으로 갈수록 변형이 크고 청색으로 갈수록 변형이 작음을 나타낸다. 외팔보 형식의 구조이기 때문에 지면으로부터 거리가 멀수록 변위가 크게 발생하고 있으며, 각 방향의 최대변형은 18.16cm, 16.48cm, 40.96cm, 9.77cm 이다. YP방향의 풍하중에 의해 변형이 가장 큰 것은 풍압을 받는 면적이 크고 무게중심이 YP방향에 있기 때문이다. 반대로 YN방향에 대해서는 무게중심을 극복하면서 변형을 유발하는 것이 상대적으로 어렵기 때문인 것으로 판단된다. Base plate와 anchor bolt가 연결된 부위에서 발생한 변형은 그림 8~11에서 보여주고 있다. 바람이 불어오는 방향의 base plate 일부가 바닥면 으로부터 떨어지는 것이 확인되었으며 이러한 현상은 outer riser와 stiffener가 base plate와 접합된 부위에서 두드러졌다. 각 방향별 최대 변위는 $1.9 \times 10^{-3}cm$, $1.28 \times 10^{-3}cm$, $4.11 \times 10^{-2}cm$, $1.26 \times 10^{-2}cm$ 로 YP방향의 재하 시 최대 변위가 발생하였다.



그림 4 Unloading Arm의 변형도(XP)

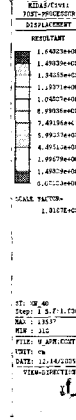


그림 5 Unloading Arm의 변형도(XN)

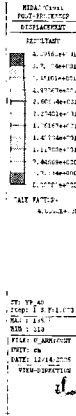


그림 6 Unloading Arm의 변형도(YP)

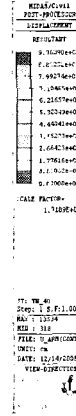


그림 7 Unloading Arm의 변형도(YN)

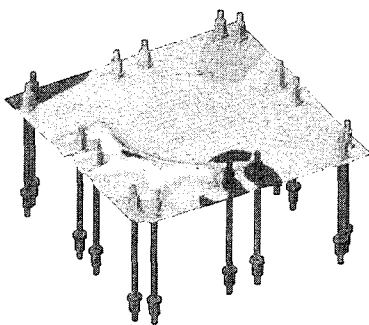


그림 8 Base plate와 anchor bolt의 변형도(XP)

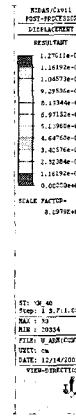
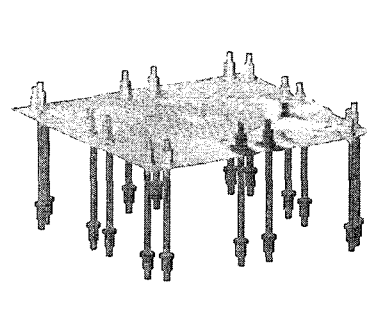


그림 9 Base plate와 anchor bolt의 변형도(XN)

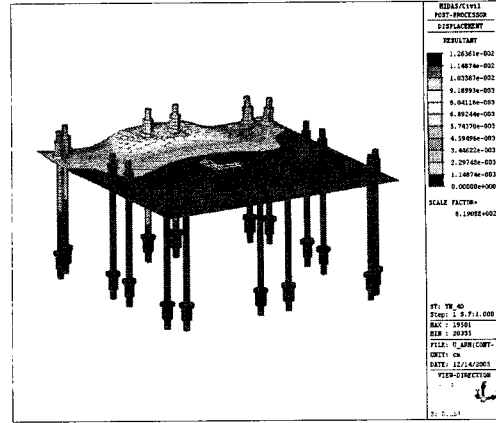
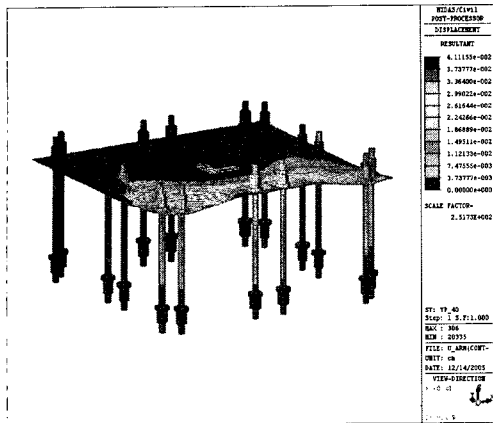


그림 10 Base plate와 anchor bolt의 변형도(YP) 그림 11 Base plate와 anchor bolt의 변형도(YN)

4. 결론

설계풍속을 재하하여, 부재에서 발생한 최대응력(von Mises응력)을 표 3.1에 제시한 각 부재의 허용응력 및 항복응력과 비교하였다. 우선, 설계기준풍속에서의 base plate응력분포는 그림 8~11과 같다. 앞의 변형형상에서 보았듯이 outer riser 와 stiffener 연결부위에서 응력이 집중되었고 특히 바람이 불어오는 방향의 면에 속해 있는 중앙부 볼트 부근이 최대 응력 발생부위로 파악되고 있다. 각 방향별 최대응력(von Mises응력, 단위: kg/cm^2)은 280.75(XP), 172.30(XN), 978.75(YP), 326.31(YN) 등이다. 네 방향 모두에서 최대응력이 허용응력($1597.7 kg/cm^2$)을 초과하지 않는 것으로 판명되었다. Anchor bolt의 응력해석 결과도 역시 바람이 불어오는 방향의 중앙에 위치한 bolt에서 응력이 가장 크게 발생하였다. 또한, bolt가 base plate와 연결되어 있는 곳에서 전단력과 모멘트가 집중되므로 최대응력이 발생한 것으로 파악된다. 각 방향별 최대응력(단위: kg/cm^2)은 176.63(XN), 110.76(XP), 1507.68(YP), 444.34(YN) 등이다. 모두 허용응력($4935.8 kg/cm^2$)과는 상당한 차이를 보이고 있다. Outer riser의 응력분포는 최대응력이 stiffener 바로 위에서 관찰되었으며 YP방향 재하 시 응력이 $923.39 kg/cm^2$ 으로 가장 크게 나타났다. 이는 허용응력 $1638 kg/cm^2$ 보다 매우 낮은 수준이다. 결론적으로 설계풍속 40m/sec에 대한 풍하중 재하 시 base plate, anchor bolt, outer riser 등에서 발생하는 최대응력은 각 부재의 허용 응력치를 크게 밀도는 것으로 확인되었다.

5. 참고문헌

1. A. Haldar & S. Mahadevan, *Reliability assessment using stochastic finite element analysis*, John Wiley & Sons, 2000.
2. A. H. S. Ang & W. H. Tang, *Probability concepts in engineering planning and design*, Vol I and Vol II, John Wiley & Sons, 1975.
3. A. Haldar & S. Hahdevan, *Probability reliability and statistical methods in engineering design*, John Wiley & Sons, 2000.
4. Rules for the design of cranes, Part I. specification for classification, stress calculations and design criteria for structures, BSI, 1983.
5. Specification for the design of crane structures(JIS, B8821), 1976.
6. 김동현, 오병철, 전인식, 풍속변화가 컨테이너크레인 타이다운의 안전율에 미치는 영향 대한 토목학회, Vol. 25, No. 6A, pp. 1127-1131, 2005. 12.