

코너프로텍션을 설치한 멤브레인식 LNG 저장탱크의 구조 안전성 해석

강현준, 김도현, 김청균
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Structure Safety Analysis of Membrane LNG Storage Tank Installed Corner Protection

Hyun Joon Kang, Do Hyun Kim, Chung Kyun Kim
Tribology Research Center, Hongik University

1. 서론

LNG저장탱크의 유형은 크게 9%니켈강식과 멤브레인식으로 나뉜다. 멤브레인 형식의 장점은 열응력에 대한 신축성이 양호하여 Cool-down, Warming-Up 및 Decommissioning을 신속히 할 수 있고 대용량 탱크의 건설도 가능하다는 것이다. 그러나 탱크 내부에 과도한 진공발생시 및 멤브레인 하부에 과도한 압력 발생시에는 멤브레인의 파손우려가 있다[1]. 멤브레인의 파손 시 콘크리트 외부탱크가 LNG액의 누설을 차단하게 되고, 외부탱크도 파손되는 최악의 상황에서는 저장탱크 외곽에 방류둑(dike)이라는 댐을 설치함으로써 저장탱크 파괴에 따른 누설 안전성을 확보하고 있다. 그러나, 저장탱크 파손에 따른 냉열에 의한 초저온 피해가 주변에 큰 영향을 미치기 때문에 최근에는 저장탱크를 완전 방호식(full containment type)으로 건설하는 경향이 있다[2].

코너프로텍션은 9%니켈강식 탱크에서 내부탱크 파손에 의한 LNG 유출 시에 콘크리트와 LNG가 직접 접촉하는 것을 차단하기 위해 외부 콘크리트 코너 내면에 단열재와 9%니켈강 라이너를 시공하는 구조물로 사용되고 있다[3]. 멤브레인이 파손될 경우의 추가적인 안전성 및 방류둑 제거에 따른 경제성 확보를 위해서 멤브레인식 탱크의 코너프로텍션 설치를 고려할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 코너프로텍션이 멤브레인식 탱크에 설치되었을 때의 구조 안전성을 유한요소 해석을 통해 점검하고자 한다[4].

2. 본론

2.1 해석 모델

2 mm의 두께를 갖는 SUS304 소재의 코너프로텍션을 폴리우레탄폼(polyurethanefoam, PUF) 내부에 바닥 및 벽 높이가 5m되는 지점까지 설치하였다. 초저온 LNG액의 단열효과를 위해 코너프로텍션 뒤에 기존의 합판(inner plywood)

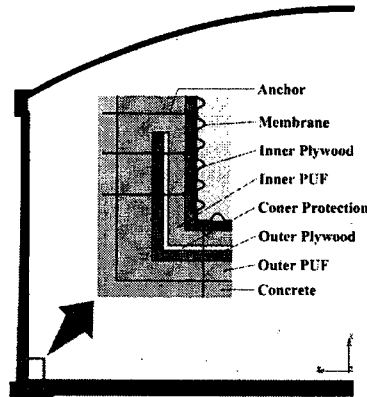


Fig. 1 Finite element model of LNG storage tank installed corner protection.

과 같은 두께를 갖는 합판(outer plywood)을 설치하였다. 그리고 각 소재들을 고정시키기 위해 그림과 같이 anchor를 1 m 간격으로 설치하여 외부탱크에 고정되도록 하였다. 코너프로텍션을 중심으로 안쪽과 바깥쪽에 있는 폴리우레탄폼을 각각 inner PUF와 outer PUF로 정의하였다. Fig. 1은 코너프로텍션이 설치된 멤브레인식 LNG 저장탱크의 유한요소 모델을 보여주고 있다.

해석의 편리성과 신속성을 위해서 2차원 축대칭모델로 정의하였으며 합판과 폴리우레탄폼의 단열재, 코너프로텍션, 콘크리트 외부탱크는 축대칭 4각요소(Axisymmetric quadrilateral element)를 사용하였고, 멤브레인은 축대칭 선형요소(Axisymmetric line element)를 사용하였다.

2.2 코너프로텍션의 설치 위치

Fig. 2는 코너프로텍션이 설치되지 않은 기존의 멤브레인식 탱크와 코너프로텍션

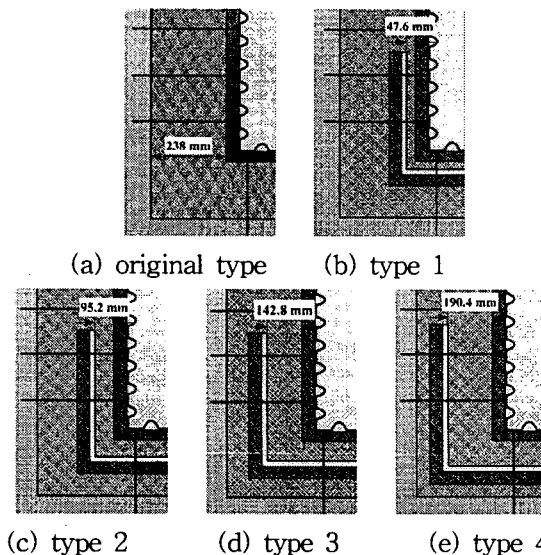


Fig. 2 Installation location of corner protection in polyurethane foam

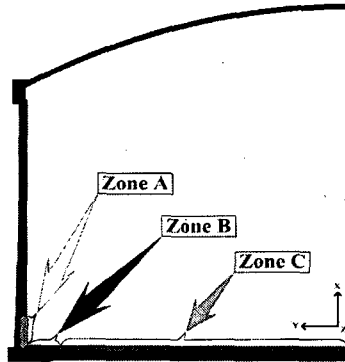


Fig. 3 Observation zones

의 설치 위치에 따른 4가지 유형의 코너 부분 단면을 보여주고 있다. 코너프로텍션의 설치는 type1에서 type4로 갈수록 폴리우레탄폼 내 안쪽에서 바깥쪽으로 일정한 간격(47.6 mm)을 가지고 멀어지도록 설계하였다.

2.3 관찰 영역 및 대상

코너프로텍션이 설치됨으로써 영향을 받게되는 부분을 관찰 영역으로 지정하였고, 데이터 추출의 편의성과 비교 해석의 유용성을 위해 관찰 영역을 Fig. 3과 같이 3개의 영역으로 나누었다. 코너에서 벽 높이 5m까지를 A영역, 코너에서 바닥 따라 5m되는 길이를 B영역, 코너에서 바닥 면을 따라 5m되는 지점, 즉 B영역이 끝나는 지점부터 중심축까지의 영역을 C영역으로 정의하였다.

관찰 대상은 응력 및 온도가 전달되는 과정에 있는 모든 소재, 즉 멤브레인과 내부 합판(inner plywood), 내부 폴리우레탄폼(inner PUF), 코너프로텍션, 외부 합판(outer plywood), 외부 폴리우레탄폼(outer PUF), 콘크리트의 응력과 변위를 측정하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 A영역에서의 결과 비교

코너프로텍션이 설치된 모델에서 멤브레인의 응력 및 변위 분포는 기존의 모델과 별다른 차이점을 나타내지 않으며, Fig. 4는 내부 합판의 응력 분포를 보여주고 있는데, 0.6m 높이와 4m 높이 지점에서 기존의 모델이 코너프로텍션이 설치된 모델보다 응력이 크게 나타난 것을 알 수 있고, X방향 변위도 크게 나타났다.

LNG 저장 탱크의 내부 탱크가 파손되어 콘크리트에 초저온의 LNG 액이 직접 접촉하게 되면 내부 콘크리트 표면과 외부 콘크리트 표면간에 상당한 온도구배가 발생하게 되어 콘크리트코너에 원주방향으로 큰 인장응력이 발생하게 된다. 따라서 인장응력에 대항할 수 있도록 압축응력에 해당하는 프리스트레스(prestress)를 콘크리트에 가하게 된다[3]. 그러한 프리스트레스의 영향으로 콘크리트 벽은 안쪽으로 미소한 변형이 발생하게 되어 내부 단열재의 변위에도 영향

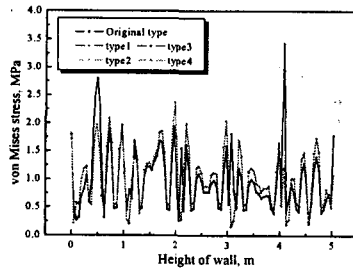


Fig. 4 Distribution of von Mises stress of inner plywood in zone A

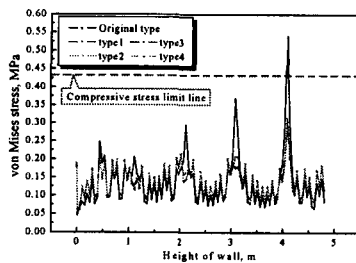


Fig. 5 Distribution of von Mises stress of inner PUF in zone A

을 미치게 된다. 프리스트레스에 의해 콘크리트의 변위가 안쪽으로 발생했는데, 5m 높이 지점에서 기존 모델의 변위가 코너프로텍션이 설치된 모델보다 약 0.1 mm 더 발생했음을 알 수 있었다. 그 이유는 type1에서 type4는 코너프로텍션의 설치로 인해 기존의 모델과는 달리 안쪽으로 발생하는 변위가 억제되었기 때문이다. 결국, 코너프로텍션이 설치된 모델의 내부 합판보다 기존 모델의 내부 합판이 압축을 더 많이 받게 된다. 따라서 X방향 변위도 더 크게 발생하게 되고, 변위가 크면 클수록 고정된 anchor주변에 걸리는 응력도 커지게 된다.

Fig. 5는 내부 폴리우레탄폼의 응력 분포를 보여주고 있다. 내부 폴리우레탄폼의 거동 또한 내부 합판과 매우 흡사함을 알 수 있다. Fig. 5에서 코너프로텍션이 설치된 모델은 압축 강도를 넘지 않아 안정적인 반면 기존의 모델은 4m 높이 지점에서 압축 강도인 0.43 MPa를 초과하는 0.55 MPa이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 사실 또한 위에서 언급한 것처럼 코너프로텍션이 변위를 억제한 만큼 압축응력을 담당했기 때문이다.

Fig. 6은 코너프로텍션의 응력 분포를 보여주고 있는데, 코너프로텍션의 코너(corner)에서는 type1에서 type4로 갈수록 즉, 코너프로텍션의 설치 위치가 폴리우레탄폼 안쪽에서 바깥쪽으로 이동할수록 응력과 X방향 변위가 1.5~2배씩 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 type1에서 type4로 갈수록 코너프로텍션의 위치가 내부와 조금씩 멀어지면서 콘크리트에 작용하는 프리스트레스에 의한 영향을 점점 더 많이 받게 되고, 변형이 억제되면서 상대적으로 압축응력이 많이 작용하기 때문이다.

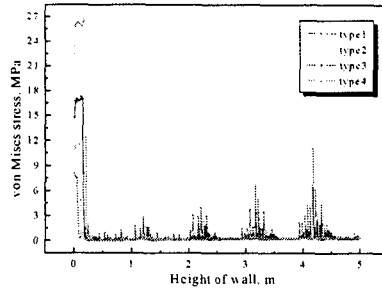


Fig. 6 Distribution of von Mises stress of corner protection in zone A

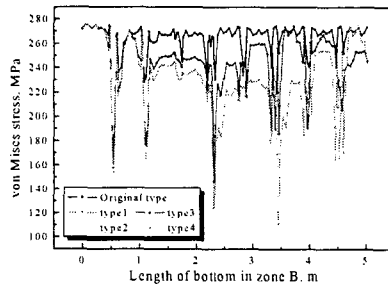


Fig. 7 Distribution of stress and displacement of membrane in zone B

외부 합판과 외부 폴리우레탄폼의 응력과 변위 분포도 코너프로텍션과 거의 흡사한 경향을 보이고, 콘크리트는 프리스트레스에 의한 Y방향 변위를 제외하면 기존의 모델을 포함한 각 모델간의 별다른 차이점을 보이지 않았다.

3.2 B영역에서의 결과 비교

Fig. 7은 멤브레인의 응력 분포를 보여주고 있다. 1~4.5m 길이 구간에서 코너 프로텍션이 설치된 모델의 응력이 기존의 모델보다 30 MPa 정도 더 낮게 절린 것을 알 수 있다. 이는 코너프로텍션이 설치된 모델의 멤브레인이 변형을 일으키면서 응력을 흡수했기 때문이다.

Fig. 8은 내부 합판의 응력과 변위 분포를 보여주는데, 코너프로텍션이 설치된 모델이 기존의 모델보다 응력은 1.5 MPa 정도 더 높게 발생하고, 변위는 X방향으로 0.02 mm 정도 더 크게 나타났다. Y방향의 변위는 3.5 m와 4.5 m 지점에서 2배 가량 크게 나타나는 것을 제외하면 전체적으로 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. B영역은 A영역과는 달리 콘크리트 바닥이 고정되어 있기 때문에 내부 LNG 액압의 영향만 대부분 받게 되는데, 단열재 보다 훨씬 강도가 높은 코너프로텍션의 설치로 인해서 내부 합판은 더 큰 압축 응력을 받게 되고, 이로 인해 변위도 평균적으로 크게 발생하는 것이다.

Fig. 9는 내부 폴리우레탄폼의 응력 분포를 보여주고 있는데, 0.8 m 지점에서 코너프로텍션이 설치된 모델의 응력이 폴리우레탄폼의 압축 응력인 0.43 MPa보

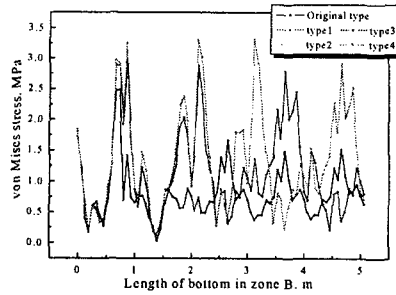


Fig. 8 Distribution of von Mises stress of inner plywood in zone B

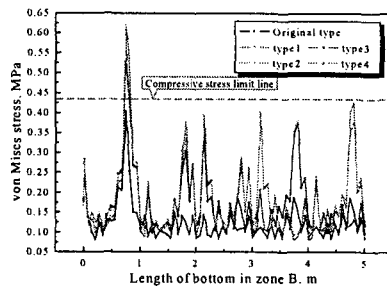


Fig. 9 Distribution of von Mises stress of inner PUF in zone B

다 최고 0.2MPa을 초과하여 발생함을 알 수 있다. 이 또한 강도가 큰 코너프로텍션의 영향으로 압축응력이 크게 작용했기 때문이다.

Fig. 10은 코너프로텍션의 응력과 변위 분포를 나타내고 있다. 코너프로텍션의 코너에서 type1에서 type4로 갈수록 응력이 1.5배씩 증가함을 알 수 있다. 코너를 제외한 다른 구간에서는 type1에서 type4로 갈수록 응력이 감소함을 볼 수 있다.

외부 합판과 외부 폴리우레탄폼 역시 코너프로텍션의 응력 및 변위 분포와 거의 흡사한 거동을 나타내며, 콘크리트는 기존의 모델을 포함한 각 모델간의 별다른 차이를 보이지 않았다.

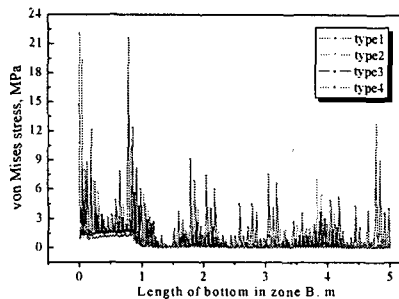


Fig. 10 Distribution of von Mises stress of corner protection in zone B

3.3 C영역에서의 결과 비교

멤브레인의 응력과 변위 분포는 기존의 모델과 코너프로텍션이 설치된 모델간에 조금 다른 경향을 보이지만, 응력과 변위의 크기에는 큰 차이가 없다. Fig. 11은 외부 합판의 응력 분포를 보여주고 있다. 15m 지점에서 기존의 모델에 걸리는 응력이 4.25 MPa 정도로 크게 나타나는 것을 제외하면 코너프로텍션이 설치된 모델의 응력이 기존의 모델보다 전체적으로 1.5배 가량 높게 나타남을 알 수 있다. 기존의 모델보다 코너프로텍션이 설치된 모델의 변위도 전체적으로 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 기존의 모델은 바닥의 중심 위치인 15m 지점에서 응력이 집중되는 현상과 함께 변위 또한 크게 나타나지만 코너프로텍션이 설치됨으로써 응력과 변위가 전체적으로 고르게 분산되어 조금씩 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 12는 내부 폴리우레탄폼의 응력 분포를 보여주고 있는데, 15m 구간 이내에 기존의 모델과 코너프로텍션이 설치된 모델이 폴리우레탄폼의 압축 응력 한도인 0.45 MPa를 넘어서는 것을 알 수 있다. 기존의 모델과 type1은 0.1 MPa 정도를 초과하지만, type4는 약 0.05 MPa를 초과함으로써 type1보다는 안정적으로 나타났다. 내부 폴리우레탄폼의 X방향 변위는 위의 내부 합판과 매우 흡사한 분포를 보였다.

Fig. 13은 코너프로텍션의 응력과 분포를 보여주고 있다. type1에서 type4로 갈수록 LNG액압에 의한 영향을 크게 받아서 응력이 약 2배씩 증가하는 경향을 나

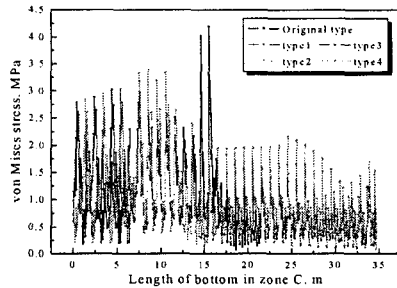


Fig. 11 Distribution of von Mises stress of inner plywood in zone C

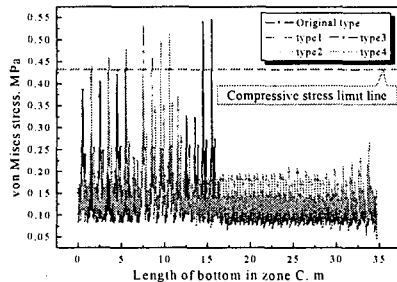


Fig. 12 Distribution of von Mises stress of inner PUF in zone C

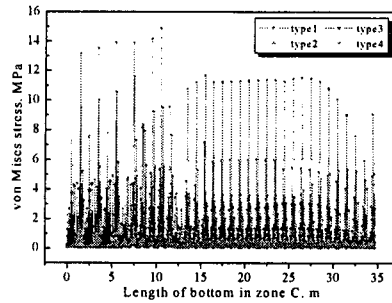


Fig. 13 Distribution of von Mises stress of corner protection in zone C

타낸다. 그에 따른 X방향의 변위도 약 2배씩 증가함을 알 수 있었다. Y방향의 변위는 매우 미소하여 모델간의 별다른 차이를 보이지 않았다.

외부 합판과 외부 폴리우레탄 폼의 응력 및 변위 분포의 경향은 위의 코너프로텍션과 흡사하고, 콘크리트는 각 모델간에 굉장히 미소한 차이만을 보였다.

4. 결론

본 논문은 멤브레인식 LNG 저장 탱크 내부에 코너프로텍션을 설치하여 안전성과 경제성을 확보하는 완전 방호식 설계를 함으로써 그에 따른 구조 안전성을 유한요소해석 방법을 통해 각 영역별로 고찰하였다.

해석결과에 의하면 멤브레인식 LNG 저장 탱크에서 코너프로텍션이 설치되면 설치되지 않은 모델과 비교할 때 멤브레인, 단열재, 외부탱크 등 모든 구조물의 벽면에서는 응력과 변위가 감소하여 구조안전성 측면에서 개선된 결과를 나타내었다. 그러나 구조물의 바닥면에서 발생한 응력과 변위는 코너프로텍션을 설치한 멤브레인식 LNG저장탱크가 기존보다 증가하여 오히려 구조안전성 측면은 악화되었다.

코너프로텍션의 코너에 발생하는 응력 집중현상을 저감시키는 방법이 고안되고, 바닥면에서의 응력을 흡수할 수 있는 소재가 첨가된다면 코너프로텍션이 설치된 멤브레인식 LNG 저장탱크는 구조안전성이 개선될 것으로 판단되며, 코너프로텍션을 설치하는 경우에는 본 논문에서 고려한 4가지 모델 중 바닥면에서 응력과 변위가 다른 모델보다 작게 나타나는 type4가 가장 적합한 코너프로텍션이 설치된 멤브레인식 LNG저장탱크라고 할 수 있다.

5. 참고문헌

1. 한국가스공사, 현대엔지니어링주식회사, "LNG 저장탱크형식검토보고서", 인천 인수기지 본설비 설계 및 감리 기술용역, pp33-44, (1992)
2. 김청균, 조승현, "안전 밀폐형 PC 구조물의 누설 안전성에 관한 연구", KIGAS, 5(4), pp85-86, (2001)
3. 김형식, 홍성호, 서홍석, 양영철, "ASME section VIII div.2에 따른 LNG저장탱크 코너프로텍션의 설계개념 고찰", KGAS, 5(3), pp73-74, (2001)
4. "MARC user's manual," Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.