KIGAS Vol.6, No.4, December, 2002
(Journal of the Korean Institute of Gas)

LNG저장탱크 코너프로텍션의 설계사양에 따른 건전성 비교

†김 형 식 · 홍 성 호 · 서 흥 석
한국가스공사 연구개발원
(2002년 9월 30일 접수, 2002년 11월 18일 채택)

Integrity comparison for various design specifications of corner protections in LNG storage tank

Hyoungsik Kim · Seongho Hong and Heungseok Seo
Center of LNG technology research center, R&D Division, Korea Gas Corporation
(Received 30 September 2002 ; Accepted 18 November 2002)

요 약

9%니켈형 LNG저장탱크는 내조와 외조가 독립적으로 초저온의 LNG를 저장할 수 있는 이중구조로 되어있다. 내조의 재료로는 초저온에서의 기계적성질이 우수한 9%니켈강을 사용한다. 그리고 내조파손에 의해 유출된 LNG를 저장할 수 있도록 콘크리트 외조가 설계된다. 코너프로텍션은 LNG유출시 콘크리트 외조 코너부에 발생하는 열응력을 감소시키기 위해 단열재와 9%니켈강 라이너를 시공하는 것을 말한다.

열하중에 의해 팽창과 수축이 반복되는 코너프로텍션의 경우 복잡한 응력상태가 발생되기 때문에 설계상의 어려움이 있다. 현재 한국가스공사에서 운용하고 있는 LNG탱크에는 TKK, KAWASAKI, WHESSOE사에서 설계한 코너프로텍션이 시공되어 있다. 본 논문에서는 유한요소해석을 통해 이들의 설계사양에 대해 ASME Section Ⅷ Div. 2. Appendix 4에 기초한 건전성을 비교/분석하였다.

Abstract - 9% nickel steel LNG storage tank have double containments that can store cryogenic LNG independently. Inner tank material is used as 9% nickel steel and outer tank is constructed by concrete. Corner protection which is installed on inner surface of concrete corner is consist of 9% nickel steel liner and form glass insulator that make reduce tension at corner when LNG is leaked from inner tank.

It is very difficult to design corner protection because expansion and contraction of liner make stress state complex. Corner protections of operating tank in KOGAS are designed by Japanese engineering company such as TKK, KHI and England company of WHESSOE. This paper is mainly focused on the integrity comparison of them according to requirements of Appendix 4 in ASME Section Ⅷ Div. 2 by using FEM.

Key words : LNG storage tank, corner protection, FEM

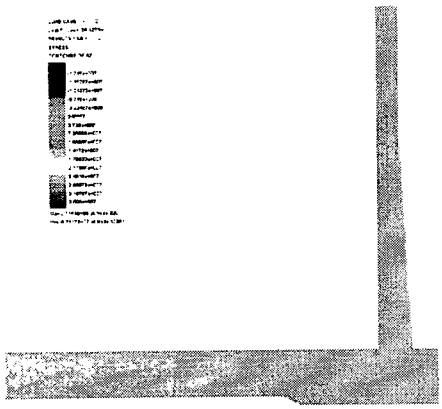
1. 서 론

9%니켈강 LNG저장탱크는 독립적으로 액체저장이 가능한 내조(inner tank)와 외조(outer tank)의 이중용기로 구성되어 있다.

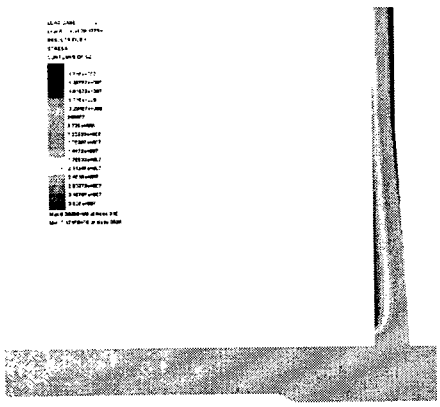
정상운전(normal operation) 시에 초저온의 LNG를 직접 접촉/저장하는 내조의 재료로는 초저온 성능이 우수한 9%니켈강이 사용된다. 그리고 외조는 콘크리트 구조물로서 내조의 파손 시에 2차적으로 LNG를 저장할 수 있도록 설계되어 있다[1].

†주저자 : hskim@kogas.re.kr

그러므로 콘크리트외조는 LNG유출에 의한 열하중을 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야만 한다. 내조의 파손에 의해 유출된 LNG는 원통형 콘크리트 외조의 내부 코너에 고이게 되므로 콘크리트와 LNG가 직접 접촉하게 된다. 이때 LNG와 직접 접촉되어 있는 내부콘크리트 표면과 상온의 대기와 접해있는 외부 콘크리트 표면간에 급격한 온도구배가 발생하게 되어 콘크리트코너에 원주방향으로 큰 인장응력이 발생하게 된다. Fig.1에 내조의 파손에 의해 LNG가 유출되었을 때 온도변화에 의해 콘크리트 외조에 발생하는 응력의 분포를 보여주고 있다.



(a) protected



(b) not protected

Fig 1. Results of stress analysis for leaked condition.

(a)에서와 같이 코너프로텍션이 있는 경우 콘크리트 내면에 약 4 MPa 정도의 인장응력이 발생하게 된다. 일반적으로 콘크리트의 경우 인장강도가 0에 가깝기 때문에 콘크리트외조에 가해지는 제하중들에 의해 발생하는 인장응력의 합이 0이 되도록 설계해야만 한다[1]. 그러므로 이러한 인장응력 4 Mpa을 지탱하기 위해 보강철근을 사용하고 또한 프리스트레싱에 의해 사전에 압축력을 가하는 방법에 의해 LNG유출시 콘크리트에 가해지는 전체 인장하중이 0이 되도록 철근의 양과 프리스트레싱의 크기를 결정하게 된다. 그러나 (b)에서 보는 바와 같이 코너프로텍션이 없는 경우 있는 경우에 비해 거의 9배에 가까운 35MPa 이상의 인장응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 과도한 인장응력에 대항하기 위해서는 코너프로텍션이 있는 경우에 비해 단순히 생각하면 9배의 보강철근와 프리스트레싱을 가해야만 한다. 이는 콘크리트 외조의 설계자체를 불가능하게 한다. 이와 같이 콘크리트 외조가 LNG를 독립적으로 저장할 수 있는 능력을 보유하기 위해서는 코너프로텍션의 설계가 필수불가결하다. 만약 이의 설계가 부적절하다면 콘크리의 외조의 이중용기 기능이 상실되게 된다.

운영중인 LNG저장탱크에 설치되어 있는 코너프로텍션의 경우 설계사에 따라 각기 다른 형태를 갖고 있다. 하지만 어떤 구조가 보다 안전한 설계인지에 대한 정확한 이해가 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 외국엔지니어링사의 설계사양에 대해 ASME Section Ⅷ Div. 2 Appendix 4 요건에 의거하여 구조적인 안전성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 코너프로텍션의 구조 비교

Fig.2에 각사의 코너프로텍션의 구조를 나타내었다.

(a)의 TKK가 설계한 코너프로텍션의 경우 벽체 라이너와 이와 연결되는 2차바닥의 9%니켈강 두께가 모두 5t로 되어있고 바닥과 벽체가 만나는 지점은 필릿용접으로 연결되어 있다. 탑링은 10t의 판재를 사용한다.

(b)의 KAWASAKI 설계의 경우 바닥과 벽체 그리고 탑링의 두께를 모두 5t로 설계하였다. 그리고 응력집중이 일어나는 코너부에 두

꺼운 ㄴ자형 넉클(9x20t)을 사용하여 취약한 필릿용접부를 제거하였다.

또한 (a), (b)의 일본 엔지니어링사 설계의 경우 2차바닥과 내조바닥이 단열재인 폼그라스나 퍼얼라이트콘크리트에 의해 열적으로 분리되어 있는 특징을 갖는다. 이는 정상운영상태에서 2차바닥이 상온에 가까운 온도에 있게 되므로 2차바닥의 수축에 의한 하중이 코너의 필릿용접부나 넉클에 가해지지 않은 상태로 있게 된다. 따라서 정상 운영중에 코너프로텍션에 가해지는 하중이 매우 작아 발생하는 응력 수준이 낮은 특징이 있다.

(c)의 웨소사의 경우 2차바닥은 5t, 벽체의 상단과 하단을 각기 9t, 15t 두께로 설계하였다. 그리고 코너부에는 165R의 원형 넉클로 설계하여 KAWASAK설계와 같이 필릿용접부을 제거하였다. 한편 일본 엔지니어링사의 설계사양과는 달리 2차바닥과 내조바닥이 근접하여 위치하고 있어 항상 같은 온도에 있게 된다. 그러므로 운영중에 2차바닥의 수축에 의한 하중이 코너프로텍션 코너부 넉클에 가해지는데 이는 원형넉클에 의해 흡수된다.

2.2 LNG의 유출

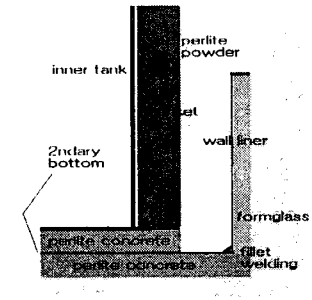
코너프로텍션의 경우 설계사양과 LNG의 유출 정도에 따라 발생하는 응력의 크기가 매우 다르다.

일반적으로 LNG가 유출되어 에뉼라공간에 적재되는 액위가 코너프로텍션의 하중을 결정하는 가장 큰 요소이다. 따라서 내조의 LNG전체가 유출된 상태를 가정하는 중대유출(major leak) 조건과 코너프로텍션 최상부에서 1m 하단까지 LNG유출을 가정하는 부분유출(minor leak)이 전체 유출과정을 대표할 수 있다[2].

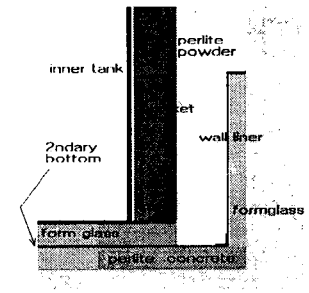
먼저 일본엔지니어링사 설계구조의 경우 LNG가 유출됐을 때 에뉼라 공간에만 국한될 가능성과 결국 단열재를 침투하여 LNG가 바닥까지 침투되는 경우를 구분하여 응력의 상태를 평가해볼 필요가 있다. 실질적으로 내조에서 LNG가 유출되면 에뉼라 공간에만 국한되어 적재될 가능성이 높다. 하지만 내조에서 LNG가 유출되었을 때 단열재가 라이너쪽으로 흘러가는 LNG를 완전히 차단한다는 것은 불가능한 일이다. 따라서 콘크리트 외조가 오랜 시간동안 LNG를 저장할 수 있도록 설계하기 위해서는 결국 2차바닥까지 LNG가 침투한 경우를 가정해서 해석하는 것이 필요하다.

그리고 LNG가 유출되면 초기에는 2차바닥으로 침투하는 LNG에 의존하여 매우 불균질한 온도분포가 일어날 것이다. 하지만 현실적으로 이러한 유출상태를 정의하여 설계하기는 어렵다.

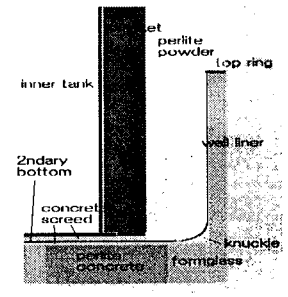
그러므로 본연구에서는 일본 엔지니어링사에서 설계한 코너프로텍션의 경우 LNG가 에뉼라 공간에 국한된 유출의 경우와 2차바닥 전체까지 완전 침투가 일어난 경우로 구분하여 해석하였다.



(a) TKK



(b) KAWASAKI



(c) WHESSOE

Fig 2. Sectional details for corner.

한편 WHESSOE의 설계구조의 경우에는 바닥이 항상 내조바닥과 동일한 온도에 있기 때문에 단순히 에뉼라 공간에 얼마만큼의 LNG가 유출되느냐에 따라 가해지는 하중이 결정된다. 따라서 위에서 설명한 두 경우를 구분하지 않아도 된다

2.3 유한요소해석 모델과 Appendix 4의 개념설명

해석에 사용한 유한요소해석 모델, 하중조건 그리고 ASME Section Ⅷ Div.2 Appendix 4, 에 대한 설명을 기존에 게재한 참고문헌(2)에 설명하였으므로 여기서는 따로 설명하지 않았다.

2.4 유출의 수준별 허용응력

Table 1에 각 유출조건별 허용응력을 나타내었다. 정상운전 시의 허용응력은 Appendix 4에서 요구하는 P_m=230, P_m+P_b=345, total 690MPa로 설계해야 한다. 하지만 부분유출이나 중대유출 등의 비상조건에 있어서는 좀더 허용응력을 높여서 설계하는 것이 바람직하다. 왜냐하면 확률적으로 발생하기가 어려운 상태이기 때문이다. 이렇게 허용응력을 높여서 설계하는 것은 내진설계에서도 찾아 볼 수 있다. 9%니켈강 내조의 내진설계시 OBE조건에서는 일반적으로 허용응력을 0.765YS인 340 MPa정도를 사용하며 SSE조건에는 허용응력을 재료의 YS인 400MPa까지 사용하여 설계하고 있다. 마찬가지로 부분유출이나 중대유출에 있어서도 OBE나 SSE조건에 해당하는 허용응력을 사용하는 것이 경제적인 설계측면에서 바람직하다[3].

따라서 오너의 결정에 의해 유출의 수준에 따라 P_m, P_m+P_b, total 응력에 대한 허용값을 각각 230~400, 345~600, 690~800 MPa사이에서 결정할 수 있다. 여기서 400Mpa는 강도설계의 기준이 되는 용접부의 강도이다.

Table 1. Allowable stresses.

condition	weld YS (MPa)	W.E	stress(MPa)		
			mechanical		total (3Sm)
			Pm (Sm)	Pm+Pb (1.5Sm)	
operation	400	1	230 (2/3YS or 1/3 UTS)	345	690
minor	400	1	230-400 (from Sm to YS)	345-600	690-800
major	400	1	400 (YS)	600	800

2.5 유한요소해석결과

2.5.1 TKK 설계

TKK사 설계는 단열형으로 1차바닥과 2차바닥이 열적으로 분리되어 있다. 앞에서 설명하였듯이 유출의 상태를 2가지로 가정해 해석하였다. 즉 LNG의 유출이 에뉼라공간에 국한된 경우(CASE Ⅰ)와 유출이 에뉼라공간과 2차바닥 전체에 침투한 경우(CASE Ⅱ) 이다. CASE Ⅱ의 경우 2차바닥의 수축에 의한 하중이 코너부 필릿용접부에 가해지기 때문에 CASE Ⅰ에 비해 높은 응력을 나타내게 된다.

Table 2와 3에 두 경우에서의 해석결과를 나타내었다. 정상운전시의 경우 허용응력에 비해 발생하는 응력이 매우 낮게 나타나고 있다. 이는 2차바닥의 수축에 의한 하중이 가해지지 않기 때문이다.

Table 2. Analysis results of TKK protection for CASE Ⅰ.

position	stress(MPa)								
	operation			minor			major		
	primary		total	primary		total	primary		total
	P_n	P_L+P_b		P_m	P_L+P_b		P_m	P_L+P_b	
fillet weld	8	167	max 221	21	409	max 423	365	678	max 609
lower liner	71	140		375	147		355	421	
upper liner	70	73		320	324		383	385	
top ring	2	42		3	12		10	333	
allowable stress	230	345	690	230-400	345-600	690-800	400	600	800

Table 3. Analysis results of TKK protection for CASE Ⅱ.

position	stress(MPa)								
	operation			minor			major		
	primary		total	primary		total	primary		total
	Pm	PL+Pb		Pm	PL+Pb		Pm	PL+Pb	
fillet weld	8	167	max 221	25	392	max 437	63	882	max 964
lower liner	71	140		350	424		363	735	
upper liner	70	73		297	298		380	382	
top ring	2	42		3	118		12	344	
allowable stress	230	345	690	230-400	345-600	690-800	400	600	800

CASE Ⅰ의 부분유출이 일어난 경우 코너프로텍션의 P_L+P_b응력이 허용응력에 근접하고 있다. P_m은 모든 하중조건에서 코너프로텍션이 수축한 후 LNG의 무게에 의해 다시 원상복귀되면서 발생하는 응력이다. 이러한 응력은 $\sigma=E*\varepsilon$에 의해 계산할 수 있다. 여기서 E는 영의 계수이고 $\varepsilon(=\alpha\Delta T)$는 열변형율($\alpha$=열팽창계수, ΔT=온도차)이다. 그러므로 P_m= 210E9*9.21E-6*195 =377MPa이다. 해석결과도 이와 비슷한 결과를 보여주고 있다. P_L+P_b의 경우 Fig.3.에서 보는 바와 같이 코너프로텍션 벽체 원주는 ΔT만큼 수축하지만 상온에 있는 2차바닥이 수축되지 못해 에뉼라공간에 있는 2차바닥이 들리면서 굽힘응력이 필릿용접부에 크게 발생한다.

또한 중대유출의 조건에서는 이와 같이 들려있는 2차바닥에 다시 24m의 LNG의 무게가 가해지면서 필릿용접부에 허용응력이상인 678 MPa의 응력이 발생하게 된다.

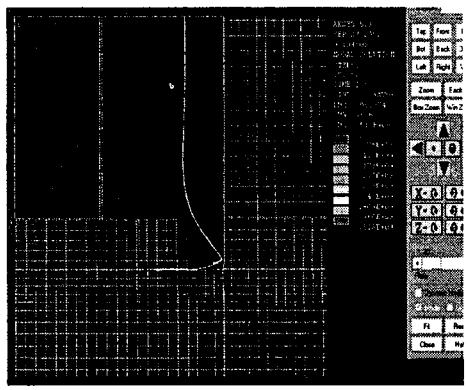


Fig 3. Deformation behavior of TKK corner protection at minor leak. of case Ⅰ.

CASE Ⅱ의 경우 부분유출된 조건에서는 Fig.4에서 보는 바와 같이 70mm 정도의 2차바닥의 수축하중이 수직의 필릿용접부에 적절히 흡수되지 못해 코너부가 심하게 이격되면서 큰 굽힘응력이 P_b가 발생한다. 특히 여기에 다시 높이 24m의 LNG의 무게 하중이 가해져 용접부 항복강도의 2배를 초과하는 약 882MPa이 발생한다.

또한 기계적하중과 열차중을 합한 전체하중의 경우도 964MPa로 용접부 항복강도의 2배인 800MPa 훨씬 상회하는 결과를 나타내었다.

이와 같이 TKK사 설계의 해석결과 CASE Ⅰ, Ⅱ의 중대유출조건에서 유한요소해석에 적용하는 코드요건에 부적합한 것으로 나타났다. 하지만 Appendix 4에서는 유한요소해석결과가 코드요건에 위배되는 경우 실험을 통해 안전성을 증명하는 것을 허용하고 있다. TKK사의 경우 이 요건에 근거하여 실험을 통해 안전성을 검증하여 코너프로텍션을 설계하였다[4].

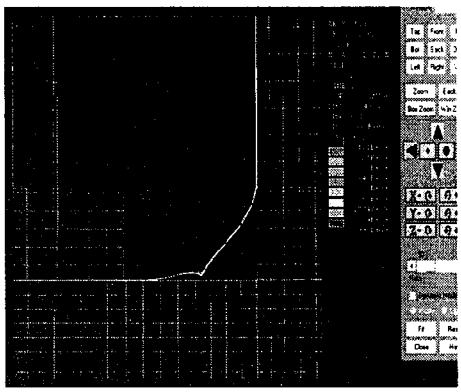


Fig 4. Deformation behavior of TKK corner protection at minor leak of case Ⅱ.

Table 4. Analysis results of KAWASAKI protection for CASE Ⅰ.

position	stress(MPa)								
	operation			minor			major		
	primary		total	primary		total	primary		total
	Pm	PL+Pb		Pm	PL+Pb		Pm	PL+Pb	
fillet weld	2	74	max 216	42	142	max 437	5	203	max 623
lower liner	66	136		356	430		378	416	
upper liner	64	64		277	279		365	366	
top ring	4	89		8	478		23	814	
allowable stress	230	345	690	230-400	345-600	690-800	400	600	800

2.5.2 KAWASAKI

KAWASAKI사의 경우 TKK사와 마찬가지로 단열형 구조를 갖고 있으며 탑링을 5t 판재를 사용한 것과 필릿용접부 대신 두꺼운 ㄴ자형 넉클을 사용한 것이 다른 점이다.

CASE Ⅰ, Ⅱ조건에서의 해석결과를 Table 4, 5에 나타내었다. TKK사 해석결과와 비슷한

경향을 나타내고 있음을 할 수 있다. 다만 탑링의 경우 TKK는 10t를 KAWASAKI는 5t의 판재를 사용하였는데 이로인해 CASE Ⅰ의 P_L+P_b값이 탑링에서 814MPa로 높게 나타났다. 하지만 중대유출시 필릿용접부에 가해지는 큰 하중을 두꺼운 넉클을 사용하여 882에서 732MPa로 감소시켰다. 또한 전체하중의 경우도 두꺼운 넉클효과에 의해 964에서 787MPa로 감소되었다.

Table 5. Analysis results of KAWASAKI protection for CASE Ⅱ.

position	stress(MPa)								
	operation			minor			major		
	primary		total	primary		total	primary		total
	Pm	PL+Pb		Pm	PL+Pb		Pm	PL+Pb	
fillet weld	2	74	max 216	12	204	max 413	38	541	max 787
lower liner	66	136		340	414		371	732	
upper liner	64	64		307	308		385	390	
top ring	4	89		10	304		24	751	
allowable stress	230	345	690	230-400	345-600	690-800	400	600	800

2.5.3 WHESSOE

WHESSOE사의 경우 내조바닥과 2차바닥이 동일한 온도에 있다. 그러므로 정상운영중에 2차바닥의 수축하중이 코너프로텍션 코너부 넉클에 가해지게 된다. 그리고 일본 엔지니어링사와는 달리 코너프로텍션의 벽체 두께를 하부는 15t, 상부는9t의 판재를 사용하였으며 코너부의 원형넉클은 5t의 165R로 설계하였으며 탑링은 9t로 설계하였다.

WHESSOE사사의 주요 설계개념은 열수축에 수축한 코너프로텍션 벽체가 중대누출시 LNG의 하중에 의해 원상복귀하여 폼그라스와 접촉하도록 설계하고 있다[5].

Table 6에 각 하중조건에서의 유한요소 해석결과를 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 WHESSOE사의 설계의 경우 운전중이나 부분유출시에 허용응력에 비해 상당히 낮은 응력상태를 보여주고 있다 이는 Fig.5에서 보는 바와 같이 원주와 2차바닥의 수축양이 같아 TKK경우와 같이 바닥이 들리는 현상이 심하지 않고 또한 2차바닥의 수축하중을 원형넉클이 효과적으로 흡수하고 있기 때문이다. 또한 운전중이나 부분유출시의 P_m값은 σ=PR/2t(P=액압, R=반경, t=두께)에 의해 결정되는데 WHESSOE의 경우 두꺼운 판재를 사용하여 P_m값이 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

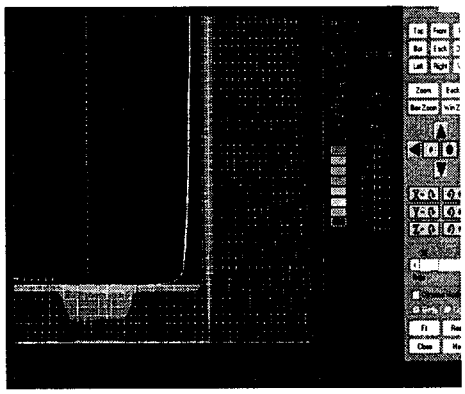


Fig 5. Deformation behavior of WHESSOE corner protection at minor leak..

Table 6. Analysis results of WHESSOE protection.

position	stress(MPa)								
	operation			minor			major		
	primary		total	primary		total	primary		total
	Pm	PL+Pb		Pm	PL+Pb		Pm	PL+Pb	
knuckle	15	128	max 410	19	167	max 239	80	505	max 536
lower liner	38	73		139	143		370	476	
upper liner	8	8		156	158		380	419	
top ring	3	9		24	136		72	597	
allowable stress	230	345	690	230-400	345-600	690-800	400	600	800

하지만 중대유출 조건에서는 1차하중의 P_L+P_b 응력이 거의 허용응력 600MPa에 가까운 597MPa임을 알 수 있다. 그러므로 중대유출조건에서는 165R의 넉클이 2차바닥의 수축하중을 흡수하는 능력이 부족한 것으로 생각된다.

WHESSOE사 설계의 경우 추가적인 실험에 의한 안전성 증명과정이 필요없이 단순히 허용응력을 최대값까지 증가시킴으로서 유한요소해석만에 의한 설계가 가능한 것으로 판단된다.

그러나 TKK나 KAWASAKI 설계에 비해 두꺼운 판재를 사용하므로 재료비 및 용접비 증가에 의해 경제성이 떨어지는 것이 약점이다.

3. 결 론

유한요소해석을 이용하여 TKK, KAWA-SAKI, WHESSOE사의 코너프로텍션을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) TKK사의 코너프로텍션의 경우 ASME Section Ⅷ Div. 2, Appendix 4의 실험에 의한 안전성평가에 기초하여 설계된 것으로 판단된다. 하지만 유한요소해석에 의한 설계요건에는 부적합한 응력상태를 나타내었다.

2) KAWASAKI사 코너프로텍션에서 도입한 ㄴ형의 두꺼운 넉클은 응력을 감소시키는 효과는 있었으나 ASME Section Ⅷ Div. 2 , Appendix 4의 유한요소해석에 의한 설계요건을 만족시키지 못하였다.

3) WHESSOE사 코너프로텍션의 경우 두꺼운 벽체와 원형 넉클을 사용하여 ASME Section Ⅷ Div. 2, Appendix 4의 유한요소해석에 의한 설계요건에 따라 설계가 가능하였다. 하지만 원형넉클과 두꺼운 벽체두께 사용 등으로 인해 경제성이 떨어지는 바 최적화설계를 통해 경제성을 제고할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] 한국가스기술공업," Spillage analysis", 통영 #6,7 탱크 설계문서 Document No. TLT- 1-C-2CAL-014, 2001

[2] 김형식, 홍성호, 서홍석, 양영철, "ASME section Ⅷ div. 2에 따른 LNG저장탱크 코너프로텍션의 설계개념 고찰" 한국가스학회지, vol.5, No.3, september, 2001

[3] NOELL WHESSOE(England company) ,"Static and thermal calculation for collection channel", Document No. 62-D03-ME-017, 2000

[4] Toyo Kanetsu K. K., Enginneering Dept. "Report for experiments of bottom liner plate", May, 1990

[5] Kvaerner metals(England company), " Thermal/stress analysis of bottm corner protection of Karsto ethan storage tank", Document No. E060-AD-M-CA-0345, 1998