

## 고무막체파라핏의 성능검토를 위한 수치해석과 수리모형실험 Numerical Analysis and Hydraulic Experiments on Rubber Membrane Parapets

김선신<sup>1</sup>, 전인식<sup>2</sup>, 홍승익<sup>3</sup>, 김차훈<sup>4</sup>  
Sun Sin Kim<sup>1</sup>, In Sik Chun<sup>2</sup>, Seung Ik Hong<sup>3</sup> and Cha Hoon Kim<sup>4</sup>

### 1. 서 론

고무막체파라핏은 Fig. 1에서 보이는 것처럼 공기주입으로 팽창하는 막체와 이를 보호하기 위한 격납함 및 덮개로 이루어져 있다. 평상 시에는 막체를 격납함속에 수납시켜 낮은 마루높이를 조성함으로써 항의 조망성을 확보하며 황천 시에는 막체를 팽창시켜 월파를 저지하는 일종의 동적 가변형 구조물이다. 막체의 팽창 및 격납은 순수 공기의 입·출입만으로 제어할 수 있어 별도 인력이 필요치 않으며 공기펌프 및 제어 장치를 막체로부터 멀리 이격, 설치하여 원격으로 가동할 수 있다.

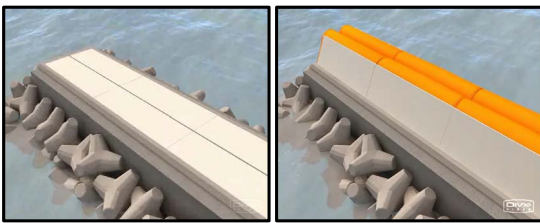


Fig. 1. Operation of rubber membrane parapet

막체파라핏의 성능은 공기제어에 따른 팽창 및 격납의 순조로운 작동 여부, 그리고 황천 시 월파의 충돌에 대한 막체의 안정성에 의존한다. 본 연구에서는 이와 같은 성능을 확인하기 위하여 수치해석과 수리모형실험을 각각 수행하였다. 먼저, 수치해석에 대해서는 막체구조물과 같은 대 변위

가 발생하는 구조물에 적용성이 탁월하며 구조체의 충돌 시 거동해석에 많이 사용되어온 LS-DYNA (2006)를 사용하였다. 본 소프트웨어는 비선형 유한요소법에 기초를 두고 있으며 내부압력의 변화에 따른 막체의 변위를 해석하기 위한 Airbag 프로그램을 제공하고 있다.

수리모형실험은 원격 공기제어를 통한 무인 가동의 가능성, 막체개폐 시 오작동 여부, 그리고 월파의 저지성능 등을 확인하기 위하여 수행하였다. 한국해양연구원의 이차원 및 삼차원 수조들을 이용하여 모형실험을 수행하였다.

### 2. 막체파라핏 모형의 설정

막체파라핏의 전개 및 격납의 용이성, 월파 저지성능 그리고 외관 등을 고려하여 형상을 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 총 5 가지 형태로 설정하였다. 이중에서 Frog형, Pillow형 그리고 Double Pillow 형은 단일 덮개를 사용하는 반면, Sprout형과 Twin 형은 이중 덮개를 사용하며 격납고 중앙에 덮개 지지턱을 두어 격납 시 덮개에 가해지는 상재하중을 지지할 수 있도록 하였다. 특히, Twin 형은 막체를 이중으로 설치하여 월파의 내습 시 막체상호간의 충돌에 의하여 에너지를 흡수할 수 있다. Pillow 형과 Double pillow 형에서는 팽창 시 또는 파의 충돌 시 덮개의 급회전을 방지하기 위한 소정 폭의 strip이 설치되어 있다.

1 건국대학교 토목공학과 박사과정  
2 건국대학교 토목공학과 교수  
3 ㈜건화 항만부 차장  
4 동일고무벨트(주) 토목자재사업팀 대리

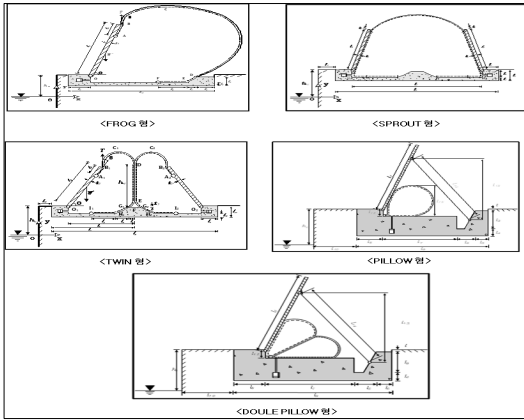


Fig. 2. 고무막체 파라핏의 5가지 형상.

### 3. 수치해석의 검증

고무막체파라핏의 수치해석에 앞서 이론적 해석이 가능한 두가지 구조물 형태를 설정하고 각 경우에서 이론식과 LS-DYNA의 해석결과들을 상호 비교하였다.

첫 번째는 실린더형 압력용기를 이용하여 반경 및 벽두께를 고정하고 내압을 변화시켜가며 원주 응력 (hoop stress)과 축방향응력 (longitudinal stress)을 이론식의 결과와 비교하였다. 계산조건은 Table 1에 제시하였다. LS-DYNA는 초기상태에서 내부압력을 점진적으로 증가시켜 평형상태를 이루었을 때 원주응력과 축방향응력을 산출하였고 결과를 이론식 결과와 함께 Table 2에 제시하였다. 전반적으로 이론식 결과와 LS-DYNA의 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 단, 이론식은 구조물의 밀도와 압력에 의한 반지름의 증가를 고려하지 않기 때문에 LS-DYNA의 결과와 약간의 차이를 보이고 있다. 더욱이, 이론식은 무한길이의 실린더를 대상으로 한 반면, LS-DYNA 해석은 유한길이에 대하여 수행한 것이다.

Table 1. 압력용기 계산조건

구분	반지름 $r$ (m)	두께 $t$ (m)	막체밀도 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	압력 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )
case-1	2.0	0.005	100	1,000
case-2				5,000
case-3				10,000
case-4				50,000
case-5				100,000

Table 2. 압력용기 해석결과

구분		이론식 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )	LS-DYNA ( $\text{N}/\text{m}^2$ )
case-1	원주 응력	400,000	398,670
	축방향 응력	200,000	166,228
case-2	원주 응력	2,000,000	2,003,490
	축방향 응력	1,000,000	833,229
case-3	원주 응력	4,000,000	4,034,780
	축방향 응력	2,000,000	1,674,530
case-4	원주 응력	20,000,000	21,410,700
	축방향 응력	10,000,000	8,714,940
case-5	원주 응력	40,000,000	46,330,000
	축방향 응력	20,000,000	18,443,300

두 번째는 sprout형 고무막체파라핏 (Fig. 2)의 내부압력 변화에 따른 막체의 상승높이 및 막체의 장력에 대하여 이론식의 결과와 비교 하였다. 계산조건은 Table 3에, 해석결과는 Table 4에 각각 제시하였다.

Table 3. Sprout형 파라핏 계산조건

구분	막체 길이	뚜껑 무게	힌지 사이거리	내부압력
재원	3.2 m	60.0 kgf	2.0 m	500 pa

Table 4. Sprout형 파라핏 해석결과

구분	이론식	LS-DYNA
막체 상승높이(m)	2.78	2.73
막체에 작용하는 장력(N/m)	618	650

막체의 상승 높이 및 막체에 작용하는 장력을 비교해본 결과 평형상태에 도달하였을때 막체의 상승높이는 이론식이 0.05m 크게 나왔으며 막체에 작용하는 장력은 LS-DYNA값이 32N/m가 크게 나타났다. LS-DYNA의 경우 막체 상승높이(Fig. 3) 및 막체에 작용하는 장력(Fig. 4)을 최대값으로 선택하지 않은 것은 이들 최대값들이 LS-DYNA의 해석시간을 짧게 함으로써 야기된 일종의 스파이크성 값들이기 때문이다. 이들 값들은 내부압력의 증가속도가 비교적 느린 실제현상에서는 나타

나지 않는다. 이론식과 LS-DYNA의 결과값이 약간의 차이를 보이는 것은 이론식에서는 막체길이, 뚜껑무게, 힌지 사이거리 및 내부압력만을 고려하지만 LS-DYNA의 경우 막체의 밀도, 막체의 늘어남 등이 추가적으로 고려되기 때문인 것으로 판단되며 이를 감안하면 전반적으로 이론식과 LS-DYNA의 결과가 비교적 잘 맞는다고 할 수 있다.

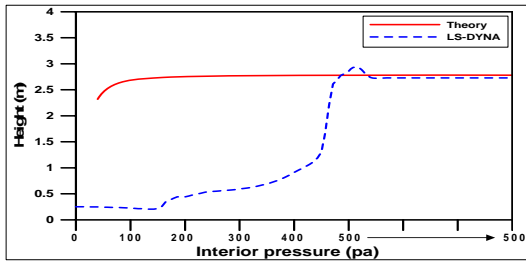


Fig. 3. 막체 상승높이.

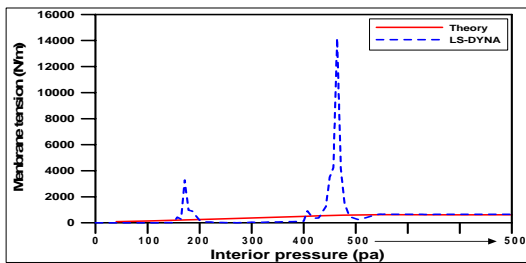


Fig. 4. 막체에 작용하는 장력.

#### 4. 고무막체 파라핏 작동의 수치해석

고무막체파라핏의 순수 공기제어에 의한 무인가동 가능성을 확인하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 대표적으로 이중베개식 (Double pillow type)의 전개 및 격납과정을 Fig. 5에 제시하였다.

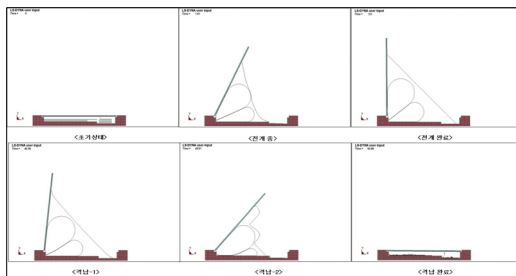


Fig. 5. 전개 및 격납과정.

Fig. 2에 제시된 모든 막체형상의 팽창 및 격납

과정이 순조로히 작동됨을 확인하였다. 본 계산에서는 총 계산시간을 줄이기 위하여 막체 내압의 크기를 급속히 조절하였다. 그러나, 공기제어가 완만하게 진행되는 (20 - 30 분 정도) 실제의 경우에서도 막체의 거동이 유사하게 나타날 것으로 판단되며, 수치해석결과에서 팽창과정 중 덮개 strip에 발생하는 과도 인장응력은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

#### 5. 막체 안정성 수치해석

월파의 충돌 시 막체의 안정성을 확인하기 위하여 실험역 구조물을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 구조물은 월파가 자주 발생하는 여수 오동도 방파제에 대하여 적용하였다. 설계과를 근거로 하여 월파량 산정 후 필요한 마루높이를 결정하고 기존 방파제에 고무막체 파라핏을 설치하여 이 마루높이가 충족되게 단면을 설정한 다음 예상 월파에 대하여 구조역학적 검토를 수행하였다. 파압 적용은 Goda (1985)의 쇄파압식에 초과블록 피복에 의한 파압 저감율을 반영한 값을 적용하였으며 Fig. 6과 Table 5에 제시하였다.

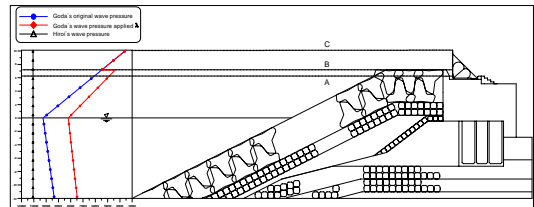


Fig. 6. 파압도.

Table 5. 파라핏에 작용하는 파압(N/m<sup>2</sup>)

구분	Goda's original wave pressure	Goda's wave pressure with $\lambda$	Hiroi's wave pressure
A	61,538.26	49,230.61	110,708.30
B	54,841.45	54,841.45~ 44,017.96	110,708.30
C	34,932.02	34,932.02	110,708.30

고무막체 파라핏 구조물 제원과 고무막체 및 스트립 제원은 Table 6과 Table 7에 나타내었다.

Table 6. 구조물 제원

전체 길이	두께길이	막체길이
5.0m	4.0m	상부막체: 5.7m 하부막체: 4.7m
스트립 길이	격납 깊이	내부압력
5.5m	0.5m	320,000pa

Table 7. 고무막체 및 스트립 제원

포 종류	인장강도	포 층수
ND-220	220 kgf/cm	4
포 전체 두께 (0.0012 m×4)	막체 전체 두께 (포+고무고팅)	허용인장강도
0.0048 m	0.012 m	776,160 N/m

구조적 안정성 검토 결과, 상부막체, 하부막체 및 스트립에서 모두 최대 인장력이 허용인장강도 보다 작게 나타났으며 구조적으로 안전한 것으로 판단된다. 결과는 Table 8과 Fig. 7 ~ Fig. 8에 제시하였다.

Table 8. 구조적 안정성 평가

구분	최대응력 (N/m <sup>2</sup> )	최대 인장력 (N/m)	허용인장강도 (N/m)
상부막체	21,934,500	263,214	776,160
하부막체	15,338,900	184,067	776,160
스트립	83,470,000	200,328	776,160

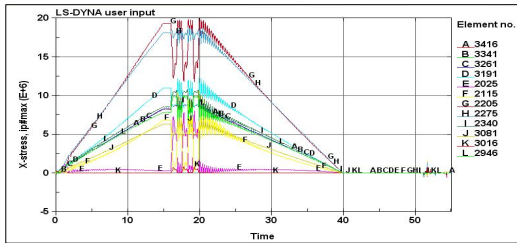


Fig. 7. 막체에 작용하는 응력.

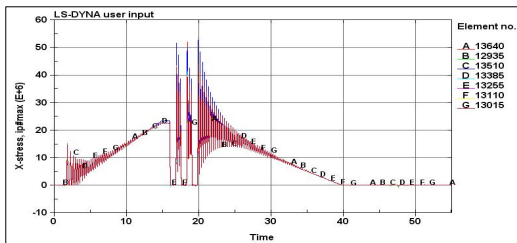


Fig. 8. 스트립에 작용하는 응력.

## 6. 수리모형실험

파라핏 모형은 약 1/20 스케일로 (주)동일고무벨트에서 제작하였으며 이차원 및 삼차원 모형실험을 각각 수행하였다. Fig. 9는 이차원 실험 시 막체팽창에 따른 월파저지 장면이다. 이 때 막체의 내압은 4 kpa로 유지하였다. 막체의 격납 시 그리고 팽창 시 월파량을 측정하여 Fig. 10에 비교하였다. 월파저지 성능이 매우 우수하게 나타남을 볼 수 있다.



Fig. 9. 수리모형실험.

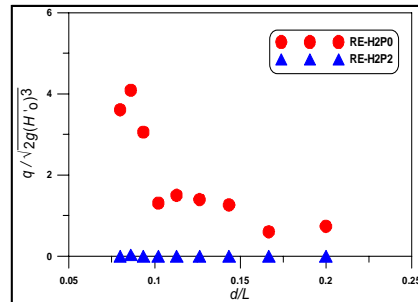


Fig. 10. 월파량 비교.

## 감사의 글

본 연구는 2008년도 항만리모델링 기반구축 연구사업과 관련하여 이루어진 것임.

## 참고문헌

- Goda, Y., 1985. Random seas and design of maritime structures, University of Tokyo Press.
- LS-DYNA, 2006. Theory Manual, LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION.