

# 내압을 받는 압력용기의 응력에 관한 실험적/해석적 검토

대우중공업(주) 옥포조선소 박지선\* 한명수 한종만

## 1. 서론

철강재료 구조물의 경우 제작과정 전반에 걸친 성형가공 및 조립과정에서 재료내에는 잔류응력이 발생한다. 특히 용접조립시에 용접부 근방에서는 재료의 항복강도 수준의 상당히 큰 용접 잔류응력이 발생하게 된다. 이때, 용접구조물의 실 사용하중에 의한 응력과 잔류응력이 중첩하여 재료의 항복강도를 초과하면 해석에 의해서는 탄성거동하는 구조물도 실제로 소성이 발생할 수 있고 이러한 소성변형은 구조물이 받는 실 사용하중 이력에 따라 구조물에 손상을 입히게 된다. 구조물의 사용시에 소성변형에 의한 손상을 방지하기 위해서는 사용하중에 의한 응력과 구조체내의 잔류응력과의 합이 재료의 항복강도보다 항상 작아서 구조물이 사용하중에도 탄성 거동하는 Shakedown이 유지되어야 한다. 결국 잔류응력은 구조물이 Shakedown하기에 충분할 정도로 적절한 처리를 통해 구조물의 사용이전에 완화되어야 한다. 한편 액화화물 산적은반선의 화물격납용기의 설계 및 제작에 관한 IMO Gas Code<sup>1)</sup> (IGC)의 규정에서는 압력용기식(Tank Type C) 화물격납용기는 잔류응력완화 처리를 행하도록 하고 있다. 본 연구는 압력용기에서 구조적으로 취약한 불연속부에서의 응력을 해석적으로 검토하고 이를 응력완화처리(MSR) 과정에서 예측된 응력과 비교, 검토 한 것이다.

## 2. 시험용기

시험대상용기는 당사에서 건조한 유조선의 주기 시동을 위한 압력 저장용 Air reservoir vessel 이다. 설계압력(Design pressure)이 33 kg/cm<sup>2</sup>, 이다.

## 3. 시험용기의 구조해석

1차응력 및 전체 구조적 불연속부에서의 응력 해석을 위해 3차원 Solid 요소(C3D8)를 사용하여 모델링하였고, Manhole 근방의 국부응력 해석을 위해 Submodel을 이용하였다. 해석은 ABAQUS/Standard Ver.5.4를 이용하였다.

구조해석 결과 설계압력 하중하에서 내면 및 외면에서의 상당응력은 Manhole 근방에서의 국부 응력 분포를 제외하면 Shell에서의 1차응력 및 Shell-Head 결합부에서의 불연속부 응력분포가 비교적 양호하게 평가되며, 아울러 Shell-Head결합부 내면 및 외면에서의 원주방향과 길이방향 주응력(Head부에서는 Meridional 방향 주응력)분포 등의 결과를 볼때 Torispherical head 에서의 이론해에 의한 응력분포 경향과<sup>2)</sup> 거의 일치하고 있으며 결합 부재간의 형상차로 인한 불연속 효과를 잘 나타내고 있다.

## 4. 시험용기에 대한 MSR 적용시험

Strain gage를 7지점에 부착하였으며 No.1은 1차 일반 막응력 측정, No.2~3은 불연속부에서의 국부응력 측정, No.4~No.7은 불연속부에서의 Shakedown 판정 및 국부응력 측정을 위하여 부착하였다(Fig.3). 1차 가압시의 최고압력은 시험용기의 수압시험 압력(설계압력의 1.5배)에 해당하는 50 kg/cm<sup>2</sup> 으로 2차 가압시의 최고압력은 설계압력의 1.1배(IGC 요구사항)에 해당하는 37

kg/cm<sup>2</sup> 으로 각각 설정하였다. 각 가압 Cycle에서 압력은 최고압력까지 균일하게 10등분하여 순차적으로 가했으며 각 등분압력 단계에서 일시적으로 압력을 유지하여 Strain gage로부터의 Data를 취득하였다. 1차 가압시에는 최고압력 도달시 압력을 2시간 동안 유지하여 수압시험을 병행하였으며 2차 가압시에는 최고압력도달시 Data의 취득후 유지시간없이 바로 감압을 행하였다.

Fig.1은 1차 및 2차 압력 Cycle에 의한 shell to head 연결부에서의 변형률과 압력과의 관계를 나타낸 것이다. 1차 압력 Cycle에서 압력과 변형률과의 관계는 비선형적이며 1차 압력 Cycle 종료후 잔류 변형률이 발생하였다. 2차 압력 Cycle에서의 부하 압력과 변형률과의 관계는 최고압력(37 kg/cm<sup>2</sup>)까지 선형적이었으며 2차 압력 Cycle종료후의 잔류변형률의 값은 1차 압력 Cycle 종료후의 그것과 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 2차 압력 Cycle에 의해서는 추가적인 소성 변형률이 발생하지 않았다는 것을 의미하며 이것으로부터 시험용기의 용접부는 MSR 시험압력에 의해 Shakedown이 달성되었다고 판정할 수 있었다. Fig.2는 1차 압력 Cycle 및 2차 압력 Cycle에 대한 일반 막용력 계측부에서의 상당용력을 부하압력에 대하여 나타낸 것이다. 2차 압력 Cycle에서의 상당용력값은 Shakedown이 달성된 후의 거동이므로 압력에 대하여 선형적인 관계를 나타내고 그 값도 IGC의 제한치에 비해 상당히 낮은 값이다.

Table 1은 압력, P=33 kg/cm<sup>2</sup>인 경우 일반 막용력부와 불연속부에서의 FE해석에 의한 주응력과 계측결과를 비교한 것이며 해석결과와 실험결과가 양호한 일치를 나타낸다.

Table 1 Comparison of principal stress between measurement and FE analysis

|             | Gage location No.1               |                                  | Gage location No.4               |                                  |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|             | $\sigma_1$ (kg/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_2$ (kg/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_1$ (kg/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_2$ (kg/mm <sup>2</sup> ) |
| Measurement | 13.31                            | 6.74                             | 11.60                            | 8.44                             |
| FE analysis | 14.20                            | 6.90                             | 12.07                            | 8.34                             |

## 5. 결 론

- 1) 시험용기에 대한 구조해석시 용기 두께방향으로 요소분할을 행하고 3차원 Solid요소를 사용하여 Shell-Head 결합부에서의 불연속 응력분포를 양호하게 평가할 수 있었다.
- 2) MSR 시행시 용기 평활면에서의 파열방지를 위한 1차 막용력 계측을 위해서는 용기의 벽두께가 비교적 얇다 하더라도 반드시 용기 내외면에서의 응력의 계측이 필요하다고 판단된다.
- 3) 시험용기의 모든 Gage 부착점에서 2차의 압력 Cycle을 부하하여 Shakedown을 확인하였다.
- 4) Gage 부착점의 결정시 구조해석결과와 더불어 부착점 근방의 용접 잔류응력 발생 양상에 관한 Data도 참고해야할 것으로 판단된다.
- 5) MSR 시험중 Strain gage에 의해 계측된 주응력은 FEM에 의한 시험용기의 Gage 부착점에서의 해석결과와 양호하게 대응하였다.

## 참고문헌

- 1) IMO, International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gas in Bulk : IGC Code, 1993 ed..
- 2) S. S. Gill, *Inter. Series of Monographs in Mechanical Engineering, Vol.3* : The Stress Analysis of Pressure Vessels and Pressure Vessel Components, Pergamon Press, 1970, p.379.
- 3) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.VIII Div.2, 1993
- 4) E. F. Rybicki, P. A. McGuire, *et al.*, The effect of pipe thickness on residual stress due to girth welds, Trans. ASME, Vol. 104, Aug., 1982, pp.204 - 209

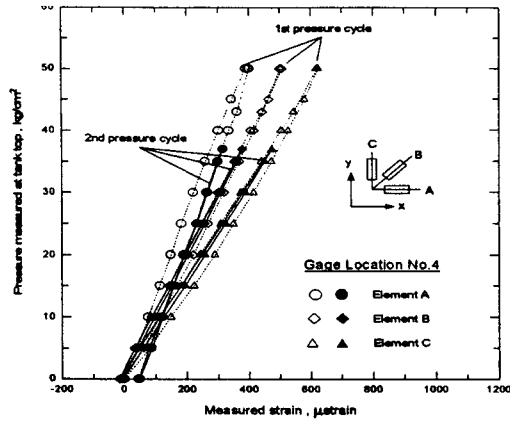


Fig.1 Shakedown at gage location No.4 of test vessel

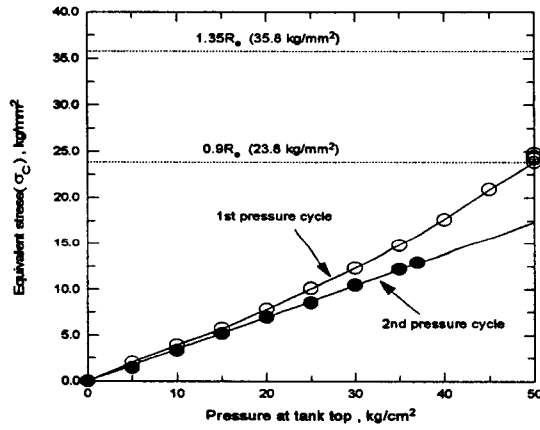
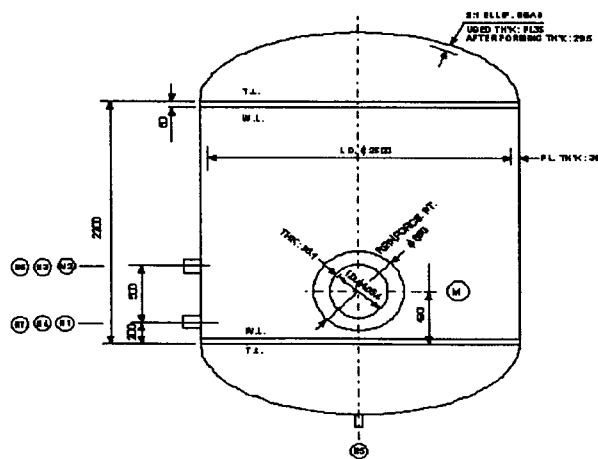


Fig.2 Equivalent stress at gage location No.1



Dimension unit: Millimeter (mm)

Fig.3 Configuration and principal dimension of test vessel