

가스용기의 사용 경과에 따른 기계적 물성 변화 연구
이승현, 강승규, 이승림, 권부길, 조영도, 이경식, 김성희, 김지윤, 이승계*
한국가스안전공사, *연세대학교

**A Study on the mechanical property degradation of gas cylinders according
to life cycle**

**SeungHyun Lee, SeungKyu Kang, SeungRim Lee, BooKil Kwon, YoungDo Jo, KyengSik
Lee, SeongHee Kil, JeeYoon Kim, SeungJae Lee***
Korea Gas Safety Corporation, *YeonSei University

1. 서론

우리나라는 1959년부터 일본에서 충전된 용기에 가스를 소규모로 수입하여 연료로 사용한 것을 시작으로, 1964년 대한석유공사의 정유공장 가동으로 생산된 가스를 이용하여 본격적으로 연료로 사용하기 시작하였다. 그 후 경제성장과 더불어 70년대 말부터 수요가 급속히 증가하여 현재에 이르고 있다.

일반 가정용/업소용 취사 및 난방용으로 사용되는 LPG는 대부분 용기에 충전하여 운반·저장되고 있다. LPG 충전에 따라 내압을 받게 되는 용기는 고압가스안전관리법령에 따라 그 제조기준이 정해져 있고 국내에는 약 1,500만개 가량의 LPG 용기가 유통되고 있는 것으로 보고되고 있으며 그 중 상당 수량은 제조된 경과 년수가 10년 이상인 것으로 추정된다. LPG는 그 특성상 상온에서 고압이 되므로 이를 저장하는 용기는 이러한 내압을 충분히 견딜 수 있는 기계적 물성을 갖고 있어야 하며, 이에 대한 최소한의 기준 또한 고압가스안전관리법령 등에 규정되어 있다. 가스용기는 용기의 반복 이충전에 따라 지속적인 반복하중에 노출되어 있고, 그 사용환경 또한 다양하여 사용 경과 년수의 변화에 따라 그 기계적 물성이 변화가 예상된다. 동 연구에서는 일정 사용연수가 경과된 LPG 용기를 사용환경에 따라 해안지역 및 내륙지역으로 구분하여 채취하고 이에 대한 기계적 물성치를 측정하고 고압가스안전관리법령에 규정하고 있는 최소 값과 비교하여 경과연수별 기계적 물성값의 변화를 연구하였다.

2. 본론

가. 가스용기 제조 현황

국내의 가스용기중 그 사용량이 가장 많은 LPG 용기의 제조현황을 살펴보면, 2000년에는 약 115만개의 용기가 생산되었으나 이후 5년간 계속 감소하여 2005년에는 약 35만개로 2000년에 비해 생산량이 30%로 줄어들었다.[Fig 1 참조] 일본의 경우는 2000년에서부터 2005년까지 약 200만개의 신규용기 생산이 꾸준히 이루어지고 있다. 국내의 경우 도시가스의 보급 확대에 의한 LPG 사용감소, 재개발 지역에서 유입된 중고용기의 유통에 의한 영향과 더불어 노후용기의 지속적인 사용으로 인한 신규용기의 원활한 유입이 이루어지고 있지 않기 때문으로 파악된다. 국내 유통 중인 LPG 용기는 이전의 제조량과 폐기율을 고려할 때 대략 1,500만개로 추정되고 있는데, 이 가운데 15년 이상 된 용기는 60~70%를 차지하고 있는 것으로 파악되고 있다. 현재와 같이 신규용기의 유입이 원활히 이루어지지 않고, 감소하는 추세라면 국내 유통용기의 노후화는 가속될 수밖에 없는 상황이다.

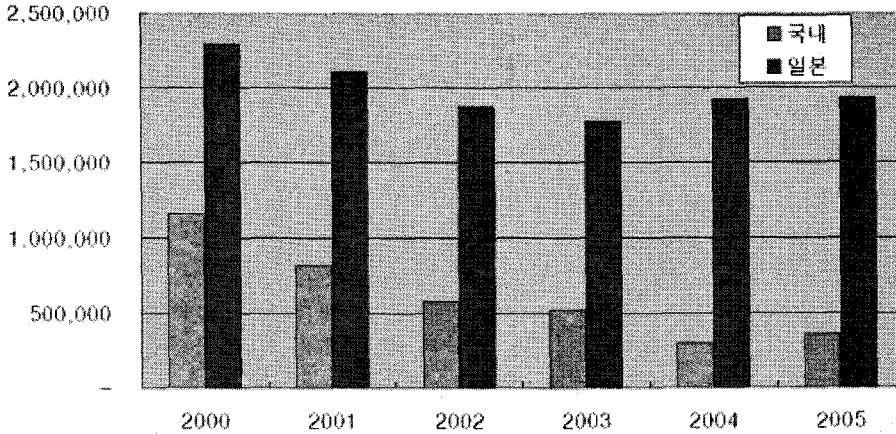


Fig 1 Status of cylinder(LPG) Production in Korea and Japan

나. 얇은 벽의 압력용기의 내압

그림 2와 같은 Gas cylinder의 원통형 벽에 작용하는 응력 σ_x , σ_y 를 구해본다. 원주방향의 응력 σ_y 는 $\sigma_y = \frac{pr}{t} = \frac{pd}{2t}$, 축방향의 인장응력 σ_x 를 구하기 위하여 x 축에 대한 수직형단면에 작용하는 내압의 압력과 벽관 내의 저항력이 평형을 이루어야 되므로 $\sigma_x \pi dt = \frac{\pi d^2}{4} p$, $\sigma_x = \frac{pd}{4t}$ 를 얻게 된다. 따라서 앞의 식을 비교하면 원주방향의 인장응력 σ_y 와 축방향의 인장응력 σ_x 은 $\sigma_y = 2\sigma_x$ 의 관계가 성립함을 알 수 있다.

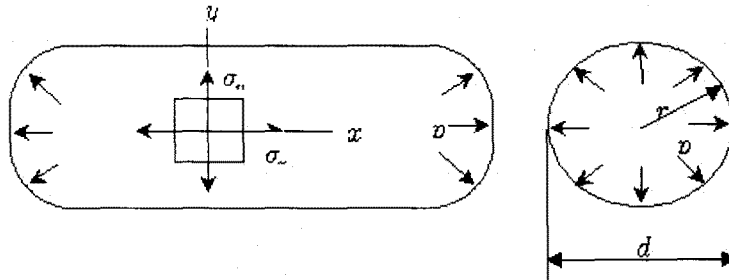


Fig. 2. Stresses on a thin cylindrical pressure vessel

다. 가스용기의 사양

LPG용기의 설계 및 제조는 "한국산업규격(KS) 및 고압가스안전관리법령"에 따르며 여기에는 용기 제작 시 필요한 재료의 종류, 두께의 설계, 모재부 및 용접부의 기계적 성질, 모양 및 치수(그림 3) 등이 고시되어 있다. 이 외에도 결모양 및 도장, 넥(neck), 스커트(skirt), 프로텍터(protector) 등의 규격이 마련되어 있지만 본 장에서는 연구과 관련이 있는 규격인 재료의 종류, 두께 설계, 용접부의 기계적 성질에 대해 다루도록 한다.

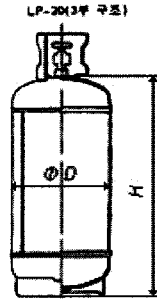


Fig 3 Shape of LPG gas cylinder(LP-20)

Table 2 Signs for steel sheets, plates and strip for gas cylinders

| 종류의 기호 | 적용 두께(mm) | 구 기호(참고) |
|--------|---------------|----------|
| SG 255 | 2.3 이상 6.0 이하 | SG 26 |
| SG 295 | 2.3 이상 6.0 이하 | SG 30 |
| SG 325 | 2.3 이상 6.0 이하 | SG 33 |
| SG 265 | 2.3 이상 6.0 이하 | SG 37 |

Table 3 Chemical compositions for steel sheets, plates and strip for gas cylinders
단위 : %

| 종류의 기호 | C | Si | Mn | P | S |
|--------|---------|---------|---------|----------|----------|
| SG 255 | 0.20 이하 | - | 0.30 이상 | 0.040 이하 | 0.040 이하 |
| SG 295 | 0.20 이하 | 0.35 이하 | 1.00 이하 | 0.040 이하 | 0.040 이하 |
| SG 325 | 0.20 이하 | 0.55 이하 | 1.50 이하 | 0.040 이하 | 0.040 이하 |
| SG 265 | 0.20 이하 | 0.55 이하 | 1.50 이하 | 0.040 이하 | 0.040 이하 |

용접부의 항복점 및 인장강도는 이음 인장 시험을 하여, 재료의 종류별로 표 3에 나타난 항복점 및 인장강도 이상이어야 한다. 또한 용접부의 연신율은 이음 인장 시험 결과에 따라 다음 표 4의 규격에 적합하여야 한다.

Table 4 Mechanical properties for steel sheets, plates and strip for gas cylinders

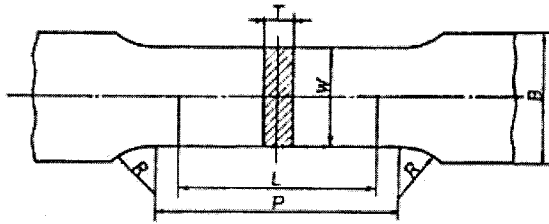
| 종류의 기호 | 항복점(N/mm ²) | 인장강도(N/mm ²) | 연신율(%) |
|--------|-------------------------|--------------------------|--------|
| | {kgf/mm ² } | {kgf/mm ² } | |
| SG 255 | 255 이상 | 400 이상 | 28 이상 |
| SG 295 | 295 이상 | 440 이상 | 26 이상 |
| SG 325 | 325 이상 | 490 이상 | 22 이상 |
| SG 265 | 265 이상 | 540 이상 | 20 이상 |

라. 용기 시료 수집 및 시험방법

용기의 사용경과에 따른 기계적 성능을 비교하기 하는데 있어, 제조년도, 제조사, 용기의 사용지역 등에 의해 영향을 받을 수 있음을 감안하여 기계시험 대상 용기들을 수집하는데 있어 이러한 특성을 고려하였다. 이번 시험에서는 국내에서 유통된 총 15개의 용기를 수집하여 시험하였으며, 국내 용기에 대해서는 사용 지역을 내륙과 해안을 배분하여 고르게 용기를 수집하였다. 수집 용기 중 15년 이상 된 국내 용기는 국내유통수량을 고려하여 상대적으로 많이 수집하였다.

인장시험 시편은 LPG용기의 벽면으로부터 채취하였고, 표점거리가 50mm인 판상시편(KS B0801 5호 시험편)을 제작하여 상온(21±2℃) 인장하였다. 이 때 인장속도(crosshead speed)는 5mm/min 이었으며, 항복강도는 0.2% offset을 이용하여 구하였다. 인장시험에 사용한 장비는 INSTRON社의 UTM(model 1127)을 이용하였으며, 그림 4에 본 연구에서 사용한 인장시험편의 형상과 크기를 나

타내었다.



W : Width 25 (unit : mm)
 L : Gauge length 50
 P : Length of reduced section 60
 R : Radius of fillet ≥ 15
 T : Thickness 3.2

Fig. 4. Schematic illustration of the shape and dimensions of tensile test specimen

마. 시험결과 및 고찰

제원에 따라 LPG용기의 몸통부(벽관부)에 작용하는 x 축, y 축 방향의 응력을 계산한 결과, 이론적으로 각각 44.1Mpa, 88.2Mpa의 값을 얻을 수 있었다.

이 값들은 SG295 소재의 탄성한도 내에 해당하며 특히 x 축 방향의 응력은, 길이방향으로 채취하여 인장시험 한 시편의 항복강도의 평균값(324Mpa)과 비교하면 약 13.6%에 해당하는 값이다.

LPG 용기에 충전된 Gas가 줄어들어 따라 내부 압력이 감소하며, 충전된 Gas가 모두 소진되면 내부압력이 0에 이르렀다가 다시 충전되는 상태로 반복 내부 하중이 발생하며, x 축, y 축 방향으로 발생하는 응력의 크기로 판단할 때 피로시험에 있어서의 반복응력(repeated stress)과 유사한 역할을 한다고도 볼 수 있다

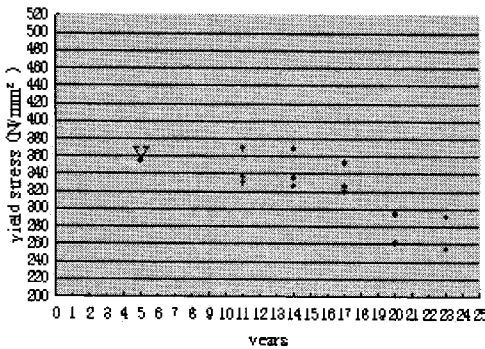


Fig. 5. Yield stresses with years

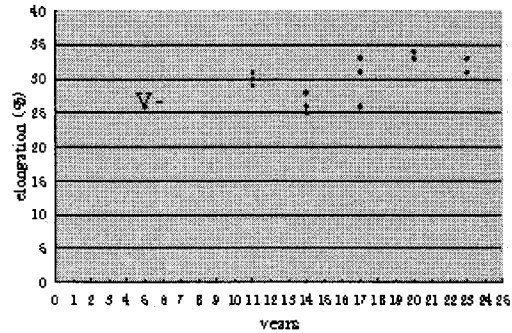


Fig. 6. Elongation with years

항복강도에 대해서는 총 15개의 시편 중 3개의 시편이 KS규격에 미달하는 결과를 나타내었다. 용기번호는 V-20-1, V-23-1, V-23-2로써 모두 제조 경과연수가 20년 이상 된 용기들이다. 그림 5에 x 축을 용기의 제조 경과연수(years)로, y 축을 항복강도(N/mm^2)로 하여 제조경과 5년인 미사용 용기 V-0 및 나머지 용기의 시험결과를 표시하였다. 이를 통하여 LPG용기의 사용 연수가 늘어날수록 모재부의 항복강도가 점점 낮아지는 경향이 있음이 확인되었다. 그림 6의 사용연수에 따른 연신율 분포에서도 마찬가지로 유사한 경향을 확인할 수 있고, 특히 항복강도보다는 최대 인장강도와 더욱 흡사한 분포를 보여주고 있다.

3. 결론

SG295(KS D3533) 재질의 반복 내압을 받는 LPG용 가스용기에서 시험편을 채취하여 인장시험 실시한 결과 가스용기의 모재부 길이방향에서 사용연수가 늘어남에 따라 항복강도, 최대 인장강도, 연신율의 기계적 특성이 저하되며, 특히 사용기간이 20년 이상 된 용기에서 두드러지게 나타난다.