

Mn 강재 고압용기의 파단 원인 분석

백남익, 이세종*
 선문대학교 재료금속공학부
 *경성대학교 재료공학과

Failure Analysis of Mn-Steel High Pressure Gas Cylinder

Nam-ik Baik, Se-Jong Lee*
 Dept. of Materials Sci. & Engr., Sunmoon University, Chungnam, Asan-Shi, Korea
 *Dept. of Materials Sci. & Engr., Kyungshung University, Pusan, Korea

ABSTRACT

This paper presents an investigation why Mn-steel high pressure gas cylinders have been failed in service. The fractured cylinders have been collected to identify the reason of the failure using various methods. The undamaged, new cylinder has also been tested for the base data. We examined the chemical compositions and fracture facets as well as the mechanical properties of the vessels.

The microstructural observations of the fractured regions of the cylinder did not indicate the noticeable defects which might cause the failure. The experiments of cylinders on the compositional and mechanical tests showed that the cylinder was in good shape according the standards of gas pressure vessel. The morphological analysis of the fracture surfaces concluded that the origin of the failure was the local weak segments induced by the external impact to the cylinder, which result in a sudden, fast fracture.

제 1 장 서 론

고압가스 용기는 대부분의 제조업체, 건설업체, 연구소, 병원 또는 학교 등 사용되지 않는 곳이 없을 정도로 널리 공급되고 있고, 산업이 발달함에 따라 그 수요도 점점 증가하고 있다. 이에 따라 사용용기가 다양해지고 사용하는 가스의 종류도 늘어나며, 위험한 가스의 사용도 그만큼 증가하고 있는 현실이다. 또 가스의 용기는 안전도 측면과 경제성을 고려하여 모두 금속으로 제조되며 상당한 두께를 가지고 있다. 범용 고압가스 용기는 장시간 사용이 가능하도록 100 ~ 130kg/cm² 정도의 압력으로 충전되며 용기 무게는 47 ~ 48kg 정도가 된다.

고압가스 용기는 제조시 정해진 전수시험을 통해 안전검사를 거친 후 공급되고 있으며, 정기적인 품질검사를 실시하여 재사용이 허가되고 있다. 그러나 사용기간이 장시간 경과한 용기나 가혹한 환경에서 거칠게 다루어진 용기는 국부적인 미세균열이나 부식 등에 의해 급작스러운 파괴가 일어날 수 있다.

본 연구는 어떠한 외부충격에 의해 가스가 충전되어 있는 고압가스 실린더 파손사고에 대한 원인을 조사한 것으로, 주로 용기재료에 대한 특성평가를 실시하여 얻은 실험결과를 토대로 파괴 원인에 대하여 검토하였으며, 추정되는 파손 원인을 규명하는데 목적이 있다.

제 2 장 이 론

2.1 고압가스 용기의 제조

용기용 소재는 강관의 형태로 일본으로부터 수입되며 강종은 Mn강 2종이다. 이 소재용 강관을 먼저 일정한 크기로 절단한 후 강관의 한쪽 끝을 고주파 가열로로 가열하여 일정한 온도에 도달하면 고온에서 spinning 방법으로 끝부분을 봉합한 후 열간 프레스를 이용하여 용기 밑부분을 성형한다. 이 작업이 끝난 다음 다시 반대쪽 부분을 가열하여 용기의 상부를 성형 열처리한다. 열처리 과정은 자동로에서 퀴칭-템퍼링처리를 한다. 퀴칭 조건은 850°C이며 템퍼링은 600°C에서 실시한다.

이 작업이 끝나면 용기상부의 가스연결부를 가공하여 만들고 가스 연결용 밸브를 설치하고 도장을 실시하여 용기의 제작이 완료된다. 모든 용기는 출고전에 반드시 수압시험을 실시하여 적합하여야 출하된다. 완성된 용기중 일부를 임의 추출하여 bursting 시험을 실시한다.

2.2 고압가스 용기의 파손현상

현재까지 알려지고 있는 고압가스 용기 파손의 종류는 파열, detonation, 연소 등으로 분류되고 있으며¹⁾ 고압가스 용기 폭발의 특징으로는 발화 온도가 저하되고 발화시간이 단축되며 압력이 높아 가스량도 많고 에너지 함량도 많으므로 폭발 효과가 크다.

2.3 산소 고압가스 용기의 파손 원인

일반적으로 고압의 산소 분위기에서는 공기 중에서도 달리 물질의 발화점이 상당히 낮아지며 일단 발화가 발생되면 격렬하게 연소된다고 한다. 고압의 산소용기의 파손사고 원인을 기술하면 다음과 같다.²⁾

첫 번째, 산소와 가연성 가스의 혼합에 의한 돌발적 반응이다. 이 경우에는 대부분 용기전체가 파손되며 인성이 좋은 재료는 연성파괴가 발생되어 용기가 찢어진 형태로 파손되며 인성이 좋지 않은 재료는 취성파괴가 되어 용기가 수많은 파

편으로 비산된다.

두 번째는 윤활유, 기름, 금속분말 등의 가연성 물질의 연소에 의하여 용기의 국부적인 용융에 의한 파손(폭발)이다.

일반적으로 고압의 산소 분위기에서는 폭발의 발화가 용이하며 발화가 되면 소량의 물질이라도 매우 격렬히 연소하며 금속을 녹일 수 있다고 한다. 이 경우에 필수적인 것은 비록 발화점이 낮아 지더라도 발화점까지 온도를 올릴 수 있는 열의 공급원이 있어야 하며, 또한 연소 가능한 물질이 그 부근에 존재하여야 한다는 것이다. 고압의 산소 용기에서의 열원은 외부에서 열이 가해지는 경우를 제외하면 용기내부의 금속분말, 또는 철산화물이 마찰력을 유발한다고 한다.

세 번째는 부식 분위기에 의한 국부 부식공 생성, 응력부식균열, 부식피로에 의한 균열생성에 의한 파손을 들 수 있다. 모든 파단면 표면에는 부식생성물이 존재한다. 그리고 응력부식이나 부식피로가 발생하는 경우에는 파면근처에 대부분 이차 균열이 존재하는 것이 특징이다.

마지막으로 외부충격에 의해 응력 집중부 또는 미세 균열부에서의 파손을 고려할 수 있다. 재료의 인성이 불량하거나 인성이 우수한 재료라 하더라도 충격적인 응력을 받게 되면 취성파괴가 일어난다. 만일 고압의 가스용기에서 가스가 누설되기 시작하면 저압의 대기 중으로 고압의 가스가 매우 빠른 속도로 분출되며 이 때 매우 강한 충격파가 동반한다고 한다. 이러한 충격파에 의하여 취성파괴가 발생할 수 있다고 한다.

제 3 장 실험방법

3.1 고압가스 용기 파손 경위

두 차례의 가스용기 파손사고를 조사하였는데, 첫 번째 경우는 가스취급업자가 최종 사용자에게 판매 전달하는 과정 중에 발생했으며, 두 번째는 가스충전소에서 가스 판매업자에게 공급하는 과정에서 발생하였다. 이들 가스용기 파손사고는 모두 고압가스를 다루는 과정에서 일어난 것이다. 용기제조업체는 모 중소기업이었고 용기 제조일

자는 재사용 허가 검사기간이 경과하지 않은 상태의 대체로 양호한 상태의 용기였다.

그압용기의 충전가스는 산소로서 가스충진소에서 산소를 취입한 후 전혀 사용하지 않고 하루를 경과하지 않은 용기로서, 운반과정에서 자동차에서 용기를 옮기는 과정에서 땅에 닿는 충격에 의해 발생했다. 용기의 파손위치는 두 경우 모두 용기의 아랫부분 구석부위로서 그림 1과 같았다.

파단부의 표면을 조사하기 위하여 프라즈마 절단기틀 사용하여 파단면 주위를 절단하여 분리시켰고, 나머지 부위의 시편에 대해서는 여러 가지 기계적 시험을 행하고 미세조직을 관찰했다. 산화막층이 형성된 일부 부위에 대하여 주사전자현미경으로 관찰하고 EDS분석을 실시하였다.

B 시료와 새 용기 재료에 대해 용기 중간부위를 채취하여 이 용기 재료에 대한 미세조직을 관찰하였다.

3.4 기계적 시험

A 용기 사고에 관련해서 입수된 시료는 파단면 부위를 포함한 파단면 일부로서, 시료의 양이 적어 인장 및 충격시험을 할 수 없었으나 B 용기 재료에 대해서는 인장 및 충격시험을 실시하여 새 용기 재료와 비교 검토하였다.

파손이 일어난 용기와 같은 재료로서 제조한 용기에 대해 수압시험 및 bursting시험을 실시하였다.

Fig. 1 Macrograph of the fractured gas cylinder (specimen B)

3.2 고압가스 용기 파손현상

두 건의 파손사례에서 관찰된 가스용기의 파손된 위치 및 파손형태는 용기의 측면 하단부와 저면에 걸쳐 가로세로 약 $5 \times 10\text{cm}$ 정도의 크기였으며, 파단 부위의 형태가 소성변형의 흔적이 보이지 않고 순간적인 충격에 의해 뜯겨 나간 것 같은 양상을 보이며, 남아 있는 파단면은 높은 열을 받아 용융된 것 같은 모양을 나타내고 있다.

또 용기내부에 기름 등의 오염된 부분이나 금속분말 등은 발견되지 않았으며, 그을음 등의 연소흔적도 발견되지 않았고 안전판도 파열되지 않았다. 그리고 파손된 부위 부근의 용기 외부는 심한 소성변형이 일어나지 않았다. 파손 사고의 원인 규명에 중요한 역할을 할 수 있는 파손 파편은 수거되지 않았다.

3.3 미세조직 관찰 및 EDS 분석

제 4 장 실험결과

4.1 파단면 단면 조사관찰

(1) A 용기 재료

용기 파손 사고에 의해 생성된 파괴면을 자세히 살펴보면 위치에 따라 여러 가지 모양을 띄고 있었다. 공통된 모양은 그림 2와 같이 파면이 모두 열을 받아 녹은 형상을 띄고 있으며 대부분은 산화막층을 이루고 있었다. 그림 3은 산화피막이 형성된 것을 보여주는 주사전자현미경 조직사진이고 그림 4는 주사전자현미경의 EDS 분석 결과물 나타낸 것으로 Al, Cu, Si 등이 다량으로 검출되었다는 것을 알 수 있었다.

또한 용기 파손시 발생된 열에 의해 녹아 비산되어 용기 내면에 붙어 있는 찌꺼기를 관찰하고 이를 주사전자현미경으로 촬영하고(그림 5) EDS 분석을 실시하였는데, 이것은 철산화물로 추정되었다.

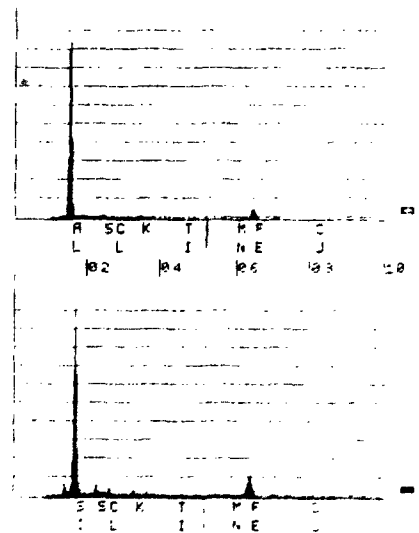
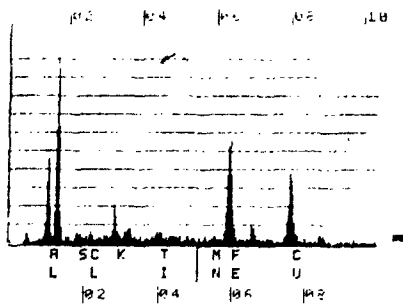


Fig. 4 EDS analysis at the surface of A specimen

Fig. 5 Micrograph of the scattered melt at the inner part (specimen A)

(2) B 용기 재료

손상된 가스용기를 회수하여 파손되지 않은 부위에 대해 용기의 직경을 측정한 결과, 파단 부위 근처에서의 직경의 변화는 없었다.

파단면 형태는 A 용기시료와 유사하게 취성파괴된 후, 파단면 edge는 날카로운 면을 지니고 있고 파단면은 열을 받아 국부적으로 용융되어 매끄러운 표면상태를 나타냈다. 특히 용기 저변부보다 두께가 얇게 제조된 용기 측면부에서 이러한 현상이 두드러졌다. 그림 6은 파단면 표면에 대한 macro사진을 나타낸 것인데, 표면에 얇게 산화층을 이루고 있는 것을 알 수 있었다.

4.2 용기 소재에 대한 조사결과

(1) 용기 재료의 화학성분조사

파손이 일어난 두 가지 시료와 새 용기 시료에 대하여 화학성분분석을 실시하여 다음 표 1과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 6 Micrograph of the fractured at the thinner position (specimen B)

Table 1. Chemical compositions of pressure gas cylinder materials fractured and a new cylinder material(wt%)

composition specimen	C	Mn	Si	P	S
new material	0.37	1.61	0.18	0.009	0.005
A specimen	0.40	1.67	0.087	0.013	0.01
B specimen	0.39	1.58	0.16	0.017	0.013
KS standard (Mn steel)	0.35 ~ 0.41	1.35 ~ 1.65	0.15 ~ 0.35	below 0.03	below 0.03

표 1에서 보듯이 각 시료의 화학 조성은 KS규격¹⁾범위 내에 속하며, A 시료의 경우 Si 함량이 약간 미달되고 있으나 기계적 특성에 영향을 미치는 정도는 아닌 것으로 사료되었다.

℃에서는 ISO가 규정한 충격치 값에 근사한 값을 유지하고 있었다. 그러나 사용하지 않은 새 용기의 충격치는 이보다 훨씬 상회한 값을 나타냈다.

(2) 파손 시료에 대한 금속조직

그림 7에서 보면 B 시료의 조직은 새 용기 재료에 비해 큰 조직의 차이는 없다고 보이나 대체적으로 비금속 개재물이 일부 부분적으로 존재하였으며 그 개재물의 크기는 전반적으로 작았다. 그리고 조사한 재료 내부조직은 다량의 비금속개재물이 편중되거나 심각한 조직결함이 존재하지 않았다.

(3) 기계적 특성시험

시험편은 용기의 측면에서 취하였으며 인장 및 경도시험 결과를 표 2에 나타내었다. A 시료에 대해서는 경도치를 환산하여 인장강도 값을 표시하였다.

표 2에서 보면 B 시험편은 새 용기 재료에 비해 강도가 14 - 36 % 정도 낮게 나타났으나 연신률은 유사하였으며, KS 규격¹⁾에는 거의 만족되었다.

그리고 표 3은 사용하지 않은 새 용기 및 B 용기 시료에 대한 충격치를 나타내었다.

KS와 ISO⁵⁾에서 규정한 충격치 값과 시험편들의 충격치 값을 상호 비교해 보면 파손이 일어난 용기 재료의 경우, 상온에서는 KS 규정치를 - 20

Fig. 7 Micrographs of gas cylinder materials : (a) B specimen and (b) new gas cylinder.

Table 2. Mechanical properties of two fractured specimens and a new gas cylinder material

Mechanical property Specimen	Yield strength (kg/mm ²)	UTS (kg/mm ²)	Elongation (%)	Yield ratio	Micro-hardness (Hv)
A specimen	-	(72)	-	-	210 - 225
B specimen	60.9	82.9	19.2	0.73	220 - 245
new material	82.9	94.6	19.2	0.88	260 - 290
KS standard	above 60	above 75	above 18		212 - 285

Table 3. Absorbed energies of a gas cylinder specimen(B) and a new material

Specimen	Absorbed Energies	
	Room Temp.	- 20 °C
B specimen	(65, 65, 60) ave. 63.3	(30.3, 35) ave. 32.6
New specimen	(99.5, 99.75, 99.75) ave. 99.7	(75, 80) ave. 77.5
Standard Spec.	ave. above 69 52 each(KS)	ave. 33 26 each(ISO)

(4) 수압 및 Bursting 시험

수압시험결과 가압시 용기의 부피는 174 cc 증가되었으며 항구증가량은 2 cc 이었으며, 항구증가율은 1.1 % 이었다. bursting시험은 489 기압에서 용기가 터졌으며, bursting이 일어난 후의 형태는 fishtail 형태였다. 위와 같은 시험결과는 수압시험은 우수한 상태이고 bursting 시험결과도 우수하다. 파단 형태는 약간 옆방향으로 벌어졌다. 전체적으로 바서 대체로 양호한 결과로 판단되었다.

4.3 파단 부위 열영향부에 대한 시험조사

(1) 파단이 일어난 부위의 조직관찰

A 시료의 경우 파단면 표면의 녹은 정도가 B 시료의 경우보다 더 심하였다. 그림 8은 시료의 파단면 표면을 위치별로 채취하여 열영향부를 관찰한 사진이다. 용기의 두께와 파단면 표면의 요철정도, 용기의 위치에 따라 측정된 열영향부의 깊이가 차이가 나고 있음을 알 수 있었다.

그림 9는 B 시료의 파단면 단면에 대한 조직 사진을 나타낸 것으로 A 시료와 유사하게 열영향부의 깊이가 시편 위치에 따라 상이하게 나타났다. 그림 8과 그림 9의 조직으로부터 측정된 파단면 단면에서의 열영향부 위치별로 A, B, C 등 알파벳으로 구분하여 열영향부의 깊이를 다음 표 4와 표 5에 나타냈다.

Fig. 8 Micrographs of cross section of fractured surface (specimen B)

위의 표를 보면 같은 위치에서의 열영향부에서도 어느정도 범위를 가지고 있음을 알 수 있으며, 대체적인 경향은 사진에서 보듯이 용기 중간부위보다 용기의 내측이, 내측보다는 용기의 외측부위에서 열영향부의 폭이 넓었다. 그리고 국부적인 소성변형을 받은 흔적은 보이지 않았으며, 비금속 개재물이 비정상적으로 심하게 존재하는 부위도 관찰되지 않았다.

(2) 파단면 부위에 있어서의 경도변화

그림 8은 A 시료의 파단면 부위별 단면사진을 나타낸 것으로 각 부위에 대해 열영향부와 그 인접 부근의 조직을 나타내고 있는데, 이들 부위에

Fig. 8 Micrographs of cross section of fractured surface (specimen A)

Table 4. Depth of heat affected zone in A specimen

position	A	B	C	D	E	F	G
depth(mm)	0.7	1.2 1.8	0.3 0.5	1.0 1.2	0.6 1.2	0.4 0.7	0.6 1.2

Table 5. Depth of heat affected zone in B specimen

position	A	B	C	D
depth(mm)	0.4 - 1.0	0.2 - 0.5	0.8 - 1.2	0.2 - 0.6

대해 Microvickers 경도계를 이용하여 열영향부와 이에 인접한 모재의 경도를 측정하였다. 표 6은 시료 A에 대한 경도값을 나타낸 것이다.

표 6을 보면 열영향부는 모재에 비해 훨씬 높은 540 에서 560 정도의 높은 경도치를 나타냈다. 그림 9는 B시료의 파단면 부위별 단면사진을 나타내고 있으며 이들 각 위치에 따른 경도변화를 표

7에 나타냈다. 열영향부의 경도는 위치에 따라 평균 540 에서 570 정도의 경도값을 나타내고 있으며, A 시료와 유사한 값을 지니고 있었다. 기지조직의 경도는 225 에서 260 정도 범위로서, A 시료 기지의 경도 190 에서 240 정도범위에 비해 약간 높은 값을 나타냈다.

Table 6. Microhardness variations of A specimen

	A		B		C		D		E		F		G	
	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H	M	H
Micro-hardness	189	543	189	543	171	543	207	550	203	500	196	513	203	595
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	219	560	223	560	227	560	241	576	232	527	246	543	246	614

M : matrix H : heat affected zone

Table 7. Microhardness variations of B specimen

	A		B		C		D	
	M	H	M	H	M	H	M	H
Micro-hardness	223	493	232	595	241	527	241	565
	-	-	-	-	-	-	-	-
	264	527	264	614	259	543	250	590

M : matrix H : heat affected zone

제 5 장 고찰

5.1 시료의 화학조성과 경도치

표 1은 파손용기 재료와 새 용기 재료에 대해 화학성분분석을 실시하여 결과를 나타낸 것이다. 이를 비교해 보면 파손이 된 용기 시료의 화학조성은 규정치와 비교하여 적합한 조성을 하고 있음을 알 수 있었다.

표 2와 표 3은 A 시료와 B 시료의 파단면 부근에서의 경도치를 나타내고 있는데 파단면에 인접한 기지 조직에서의 경도값을 비교해 보면 B 시료의 경도가 조금 높게 나타났다.

또한 파단부에서 멀리 떨어진 부위에 대한 경도를 측정하여 파손이 되지 않은 새 용기 재료의 경도값과 비교하였는데 A 시료, B 시료, 새 용기 시료에서의 경도값의 범위는 각각 210 ~ 230, 220 ~ 245, 260 ~ 280 이었다. 이것으로 보아 새 용기 재료에 비해 사용 용기 재료가 어느정도 열화가 일어났다고 판단되었다. 표준상태의 경도치가 240 ~ 250 정도인 점을 감안하고 고압용기 재료로서 경도치는 오차 $\pm 15\%$ 인점을 고려할 때 경도값은 양호한 상태였다고 판단되었다.

5.2 파단면 부위의 단면관찰

파단면의 단면조직인 그림 8과 그림 9를 열영향부의 깊이가 위치에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 파단면 중간부위보다 내측과 외측의 열영향부가 큰 것은 당연히 열방출의 용이성 때문이며, 용기내측보다 용기외측부의 열영향부가 더 큰 것은 용기의 파열방향이 안쪽에서 바깥쪽을 향했기 때문이라고 사료되었다.

또한 열영향부의 깊이가 위치에 따라 차이가 나는 것은 용기파손이 순간적으로 동시에 발생한 것이라고 예상되기보다는 용기 파손이 약간의 시간적인 차이를 두고 일어났기 때문이라고 판단되었다.

5.3 기계적 특성조사

A 시료의 경우 용기재료의 일부를 입수하였기 때문에 경도값으로부터 환산한 인장강도가 72kg/mm²이었고, B시료의 경우 인장시험 결과를 표 6에 나타내었다. 표 6을 보면 KS 규정치보다 높은

값을 유지하고 있음을 알 수 있었다. 표 7은 B 시료와 새 용기 재료에 대해 충격시험 결과를 나타낸 것으로, KS와 ISO에서 규정한 최소 충격치 값을 대체로 만족하고 있음을 알 수 있었다. 이성과 같이 파손 용기 재료의 기계적 특성은 KS나 ISO 규정과 비교 검토하였으나, 용기에 파단을 야기시킬 수 있을 정도의 낮은 물성을 지니지 않았다고 판단되었다.

파손 용기와 유사한 용기 재료에 대해 수압 및 bursting 시험을 실시한 결과, 항구증가율이 1.1%로서 규정에 적합하였으며 bursting된 형태도 fishtail 형을 나타냈으며, bursting 시험결과도 ISO 규정에 적합한 것으로 판단되었다.

5.4 용기 파손 원인 분석

파열된 용기를 살펴보면 용기 상부에 있는 안전 valve는 작동되지 않았고 기름 등 오염물질이 발견되지 않았으며, 파단면의 크기가 5×10cm 크기로 작은 것으로 보아, 화학반응에 의한 폭발사고는 아닌 것으로 판단되었다. 또 파단면의 형태로부터 이 용기의 파괴는 취성파괴에 의한 것이라고 사료되며, 소성변형을 받은 흔적은 찾을 수 없었다. 파단면 표면은 높은 열을 받아 열영향부가 존재하였으며 국부적으로 용융된 부위도 발견되었다.

국부적인 용융이 가능한 현상은 몇 가지로 추정할 수 있다. 첫째는 용기 내부의 파단된 부분에 가연성 물질이 존재하고 어떤 원인에 의해 발화가 되어 그 부분이 국부적으로 용융된 경우이다. 용기 내부에서 발열이 가능한 경우는 용기 내부에 존재하는 산화물 또는 금속분말 등이 충격에 의해 발열할 수 있겠다.

그리고 산소가스 용기의 경우, 산소가스 충전소에서 산소충진 중에 파손사고가 있었는데 파열에 의해 용기전체가 15 조각이나 났으며, 그 중의 한 개의 파편은 무려 112 m 까지 비산된 사례도 있었다.⁶⁾

두 번째는 만일 충격 또는 피로에 의해 용기에 균열이 생성되었다면 새로 생성된 파면은 화학적으로 reactive 하므로 고압상태의 산소와 급속히

반응할 수 있다. 따라서 이 때 방출되는 반응열 및 균열이 진전함에 따라 계속적으로 새로운 파단면이 발생되어 연속적으로 반응열을 방출함으로써 궁극적으로 파손될 수 있다.

그 외에 용기 파손원인으로 생각할 수 있는 것은 부식에 의한 공식의 생성, 응력부식균열, 부식 피로 등을 고려 할 수 있으며 공식에 의해 파열이 발생되었다면 정적인 압력에 의해 파열되므로 연성과파괴의 특징인 소성 변형이 관찰되어야 하나 파단면 단면의 조직관찰 결과, 소성변형이 발견되지 않았으며 또한 응력부식, 부식 피로의 특징인 이차 균열도 발견되지 않았다. 그리고 부식과 연관된 경우는 일반적으로 파단면 부근에 부식 생성물이 존재하나 본 파손 용기에는 관찰되지 않았다. 따라서 위의 원인에 의한 파열 가능성은 희박하다고 판단할 수 있다.

마지막으로 비금속개재물이 다량으로 존재하여 그 부분에서의 균열이 발생할 가능성도 배제할 수 없으나 비파단 부분에 대해 용기 재료 조직을 관찰하였으나 비금속개재물이 편중된 현상이 발견되지 않았다.

지금까지 용기 파손에 원인이 될 수 있는 몇 가지 요인들에 대해 살펴보았는데, 현재까지의 자료 분석 결과, 용기 파손원인으로 가능성이 높은 점에 대해 다시 검토하였다.

고압가스 분출시 발생하는 현상으로, 용기내의 고압 산소가 저압의 대기 중으로 분출되면 충격파를 동반한다고 한다. 이 충격파에 의해 취성파괴가 유발될 가능성이 높으며, 이 경우 이 압력파에 의해 두 종류의 파열이 예상된다. 첫째는 산소 누설이 생기는 결합부위를 중심으로 방사형으로 취성파괴가 발생되어 최종 큰 파열구가 형성되는 경우이다. 두 번째는 고압의 산소가 누설되는 부분에서 균열이 인접부위로 전파되다가 임계 균열이 도달되어 최종 파열구가 형성되는 경우이다. 두 경우 모두 산소가스에 의한 마찰열이 발생되었다면 전자의 경우는 취성 파면이 거의 동시에 발생되므로 고압의 산소에 노출된 시간이 거의 비슷하므로 열영향부의 깊이가 유사한 것으로 추정되며, 후자의 경우는 최초에 생성된 파면은 나중에 형성된 파면 부위보다 장시간에 걸쳐 산소

에 의한 마찰열을 받을 것이므로 열영향부의 깊이도 깊고 취성파면에 의해 형성된 날카로운 면이 대부분 녹아 무더질 것이고, 나중에 형성된 파단면은 날카로운 shear lip 이 그대로 남아 있을 것이다. 실제 관찰된 용기 파단면은 두 용기 시료가 공통되게 위치별로 열영향부의 차이가 심하여 전보다는 후자와 유사한 파단 양상을 나타내고 있었다.

제 6 장 결 론

현장에서 일어난 고압가스 용기의 파손 원인을 규명하기 위하여 파손된 용기를 수거하여, 파손용기와 사용하지 않은 새 용기와 대해 재료적인 측면에서 성분분석, 파면관찰, 기계적 시험등 제반기초적인 실험을 실시하였고 파손사태를 참조하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 파손된 산소가스 용기는 소재의 성분분석과 기계적 특성을 조사한 결과, KS 등에 규정된 재료 규격에 거의 부합되었다. 따라서 용기 소재의 불량에 의해 파손된 것은 아니라고 판단되었다.
2. 파단면 주위를 포함한 용기 재료를 관찰한 결과, 조직에는 부식 pit, 응력부식균열의 흔적 및 비정상적인 국부적인 비금속개재물의 편재 등의 결함은 관찰되지 않았다.
3. 파단부위를 포함한 가스용기의 직경에는 변화가 관찰되지 않았고, 파단면 인접부위에 국부적인 소성변형이 되지 않았으며, 안전판의 미파열 등으로 미루어 보아 내외부의 연소성 가스와의 반응에 의한 폭발은 아닌 것으로 판단되었다.
4. 파손 발단의 원인은 외부적인 영향에 의하여 국부적으로 취약한 부분이 발생된 것에 기인한 것으로 사료되었다. 파손발생시 용기의 상당부위가 순간적인 충격에 의해 비산되어 없어 졌으며, 파면의 표면이 심하게 열을 받아 녹거나, 재질변화가 발생되어 파면해석을 통해 정확한 원인분석은 어렵다고 판단되었다.

5. 용기의 파단면이 극부적으로 열을 받아 녹은 현상은, 파열순간 동반된 충격파에 의해 초기에 용기의 상당부위가 손실되었고, 차후에 용기에 생성된 균열을 통하여 고압의 산소가스가 고속으로 통과할 때 마찰열이 생성됨과 동시에 재료내의 Fe 성분과 고속으로 연속 공급되는 산소와의 발열반응동에 의해 순간적으로 파열이 일어났다고 판단되었다.

참고문헌

1. 疋田 强 : 高壓가스 Vol 5, No. 1, (1968) 368
2. 井上威 恭 : 高壓가스 Vol 8, No. 6, (1971) 384
3. KSD 3575 (1990)
4. KSB 6210 (1987)
5. ISO 4705 07-15 (1983)
6. 橋口幸雄 : 工業技術院 東京工業試驗所, Vol. 13, No. 9, (1976) 441