

압력용기의 설계기준 및 손상 평가

오환섭⁺, 정효진*, 박상필⁺⁺, 손두익⁺⁺

Evaluation of failure and Design criteria for the pressrue vessel

· Hwansup Oh⁺ · Hyojin Jung · Sangpil Pak⁺⁺ · Duik Son⁺⁺

Abstrack

The damage of the pressure courage by degradation can become the reason of unexpected break down or failure accident and it is very important because safety accident, the production loss, environmental pollution, social problems are occur. Consequently The result to investigat of failure accident for domestic pressure vessel, the factor of degradation is SCC, Sorrosion, Cavity, Crack

Key Words : 경년열화, Corrosion, SCC, Cavity, Crack

1. 서론

우리가 일반적으로 사용하고 있는 기기 혹은 구조물 등은 여러 인자에 의한 노화로 수명이 점차 단축된다. 그러나 기계 구조물 등의 강도수명을 지배하는 인자는 매우 다양하고, 특히 재료의 사용조건, 사용이력, 사용시간 등과 더불어 재료의 강도 특성이 변화하는 현상. 즉 열화의 영향도 중요한 요인 중 하나라고 생각된다.

재료의 경년열화는 기계나 구조물의 사용온도, 분위기, 그리고 사용시간 등에 따라 그 형태나 정도를 달리하며 수명상의 문제를 발생시킨다. 이에 따라 안전사고의 발생 가능성을 방지하기 위해 검사, 보수, 교환, 사용정지등으로 이어지며 안정성 및 신뢰성에 대한 정확한 평가가 요구 되어 진다.

본 논문에서는 이상의 문제를 고려하여 현재 국내의 설계기준 및 검사기준을 바탕으로 경년열화에 대한 압력용기의 파손사례를 분석 및 평가하고 새로운 기준을 제안하고자 한다.

2. 경년열화와 파손메카니즘

2.1 열화

열화(劣化 : degradation)는 장기 사용에 따라 내부 구조의 변화로 전기화학적 성질, 기계적 성질 및 전기, 자기적 성질이 변하는 현상을 가리키지만 최근에는 사용 환경에 따라 기계적 성질(인장강도, 피로강도, 크리프강도 및 파괴인성)이 저하하여 손상이 발생하는 것을 의미하기도 한다.

열화에 의한 파손은 기계구조물의 수명예측 또는 건전성 평가를 위해서는 매우 중요한 현상으로 생각된다. 현재 재료강도학적 검토대상이 되는 열화의 종류는 편의상 크게 3가지로 나눌 수 있다.

①재료열화 ②부식에 의한 열화 ③파괴 손상의 도중단계 등으로 나눌 수 있으며, 재질 열화는 내부까지의 재료의 변화를 동반하는 현상이며 부식열화는 주로 외부 표면 등과 같은 경계면 현상이다.

* 정효진, 경희대학교, 기계공학과(rey77@khu.ac.kr)
주소: 경기도 용인시 기흥읍 서천리 경희대학교 테크노공학대학
+ 경희대학교 대학원 기계공학과
++ 경희대학교 대학원 기계공학과
++ 한국산업안전관리공단

2.2 파손 메커니즘

2.2.1 연 화

1) 가열연화

압력용기의 경년열화는 사용 환경에 따라 다르고 가열에 의한 재료의 연화는 일반적으로 구조용 강에서의 (i)전위 조직의 회복 (ii)탄화물의 석출 (iii)금속조직의 조대화 등으로 나타난다.

- 연화거동을 나타내는 연화표시법

연화 거동은 온도와 시간의 함수이고 다음과 같은 Larson-Miller Parameter(LMP)로 나타낼 수 있다.

$$L.M.P=T(20+\log t)$$

T는 Tempering 온도(K), t는 Tempering시간(h)이다. 재료의 연화 영향 Parameter(FS)는 소재의 종류에 따라 다르다.

$$FS=ST(Mn+Ni+C)/\{(Cr+V)+C+150(Mo+C)\}$$

여기서 ST는 인장강도(ksi), Mn, Ni, Cr, Mo, V, C는 원소 함유량(wt%)이다.

2) Creep 연화

Creep에 따른 재료 변화는 단순한 장시간 가열 및 재료 변화에 일정응력이 가해진 형태라고 볼 수 있다.

가. Creep 연화거동

일반적인 장시간 가열에 따른 재료 연화는 응력이 가해질 경우 재료의 연화 속도가 빨라 질 수 있다.

나. 연화 예측 또는 손상과의 관계

응력에 의하여 연화가 촉진되기 때문에 Creep에 따른 변화는 온도, 시간, 응력 Parameter G'을 이용하여 정리한다.

$$G'=\log T+\log (20+\log t)+0.00217(\sigma-11)$$

여기서 T는 온도(K), t는 시간, σ 는 응력(kgf/mm²)이다.

3) 반복 변형 열화

일반적으로 고온 저주기 피로 및 열피로 과정에서도 변형(응력)의 반복 과정을 받게 된다. 일정변형 진폭의 반복을 받는 경우에 상당하는 응력이 계속 증가되는 경우를 변형 연화 현상이라 한다.

2.2.2 취화

1) Tempering취성

Temper 취성은 담금질한 합금강을 약 375~575℃의 온도 영역에서 고온Tempering 또는 이 온도구역을 서냉한 경우에 발생하는 Notch인성 저하 현상이다.

2) 탄화물 유기 취화

최근 사용재의 경년열화 조사 결과 2-1/ 4Cr-1Mo강 및 Cr-Mo-M강은 Cleavage 파괴 형태의 비가역적인 천이 온도의 상승을 일으키고 있다.

3) 열 시효 취화

철, 비철에 관계없이 많은 합금에서 과포화고용체를 그의 곡용곡선보다도 낮은 온도에서 유지시키면 시간과 함께 포화고용체와 제2상으로 분해 되는 반응이 일어난다.

취화의 대표적인 예로서는 (i) Fe-Cr계 이원합금의 475 ° C 취화, (ii) 2상 스테인리스 주강의 열시효취화,(iii)시그마상 취화 등이 있다.

2.2.3 피로

1) 고주기 피로

재료의 반복하중을 가하면 소위 전위의 이동에 의한 슬립 변형이 일어난다. 저응력 진폭의 반복에 의한 고주기 피로의 경우에는 결정입계 부분 또는 결정입계 내의 어느 특정영역, 즉 입내의 최대전단 응력면에 가까운 슬립면에서 슬립집중 현상이 일어난다.

2) 고온 피로

고온피로는 앞서 기술한 상온에서의 고주기 피로현상과 같이 기본적으로 응력 집중영역에서의 미소 균열의 발생과 초기정상, 거시적인 균열성장 및 불안정한 급속 파손 등의 3가지 과정으로 일어난다.

3) 부식피로

부식피로는 부식이라고 하는 화학적 과정과 응력이 반복

부하된다고 하는 역학적 과정이 증첩되어 일어나는 현상을 말한다.

2.3 파손 사례의 분석 및 평가

2.3.1 파손사례

표 1은 압력용기의 파손사례유형 중에서 각 용도별 사용환경범위를 재질, 사용온도, 사용압력 등으로 정리한 것이다.

표 1 파손사례유형별 사용환경(8)

구 분	설계조건	파손원인
Reactor	재 질: AISI304 사용온도: 70°C 사용압력: -1~1Kgf/cm ²	입계부식
Suction pipe	재 질: ASTM A53 Gr.B 사용온도: 43.8°C 사용압력: 29.5Kgf/cm ²	SCC
Super heater	재 질: Din 17175, 13CrMo44 사용온도: 450°C 사용압력: 64Kgf/cm ²	Over heating Thermal Oxidation
보일러 Wall Tube	재 질: SA-178A 사용온도: 393°C 사용압력: 660psi 사용기간: 약15년	Corrosion
반응기 Top header	재 질: A240, Type 316Ti 사용온도: 160°C 사용압력: 15Kgf/cm ²	미세균열
압력용기	재 질: · ASTM A516 Gr.70 · ASTM A515 Gr. 70 · SA240-TP316Ti+SA312 사용온도: -160~250°C 사용압력: 10~15Kgf/cm ²	SCC 고온결합, 크레이터균열
Ball Tank	재 질: SPV 50Q, ASTM A516 Gr.70 사용온도: -10~50°C 사용압력: 15kg/cm ² , 20kg/cm ²	Bulging
정류탑	재 질: SUS304(cladding) 사용온도: -10~50°C 사용압력: 5kgf/cm ²	SCC
Converter	재 질: ASTM A516 Gr.70 사용온도: 60°C 사용압력: 30.5kgf/cm ²	미세조직 열화정도
Reactor shell	재 질: ASTM A516 Gr.70 사용온도: 200°C 사용압력: 250kgf/cm ²	순수부식

열교환기 shell	재 질: SA 240 Type 304 사용온도: 34(In) ~ 124(Out)°C 사용압력: 4.2kgf/cm ²	SCC
bonded component	재 질: uranium, SUS, silver	SCC
Dished ends	재 질: SUS316, 316L 사용온도: 500°C 사용압력: 500h/Na	SCC
Steam Generato vessel	재 질: A302, Gr, B 응력제거작업 : 인치당 540/3hr	Low Cycle Corrosion Fatigue

2.3.2 압력용기손상 분석 결과

1) 사용환경에 의한 손상분석 및 평가

압력용기의 손상은 유기 또는 무기화합물과 접촉하는 모든 부위에서 발생할 수 있다. 손상형태는 전기화학적, 화학적, 기계적 또는 이 세 가지가 복합적으로 발생될 수 있으며, 온도, 응력, 피로 그리고 고속 또는 불규칙한 유체의 흐름에 의하여 가속화될 수 있다. Fig 1은 이러한 관점에서 위 표 1의 파손사고를 온도와 압력의 관점에서 분석한 결과이다.

파손양상은 U자의 cup 모양인 것이 특징이다. 작용압력이 3MPa이하 40~300°C의 범위에서 가장 많은 약 71% 손상사고가 발생함을 알 수 있다. 압력이 낮은 3MPa이하인 경우의 파손은 40~300°C의 온도 범위에서 주로 파손사고가 생기고 부식 또는 응력부식이 주요원인이고, 40°C 이하나 300°C 이상의 영역에서 파손은 피로 또는 열피로와 creep이 주원인일 것으로 생각되며 압력용기 검사시 이점을 주의 할 필요가 있다.

따라서 Fig 1에서 보이는 바와 같이 비교적 저온, 저압의 사용조건에서도 파손되는 사례가 많으며 파손기구별 온도 및 압력조건을 살펴보았다. 부식은 다양한 온도 및 압력에서 고르게 나타나며 저온, 저압에서 SCC와 cavity 등이 피로하중에 대한 응력집중원으로 작용하여 균열을 진전시키므로 파손을 야기하는 것으로 보인다. 따라서 압력용기의 모든 사용환경 및 조건에 따라 부식에 의한 감속 두께를 지속적으로 점검하고 중·저온 및 저압의 사용조건에서는 용접부 등의 미세 균열 및 조직 변화 등을 관찰을 통하여 경년열화에 의한 압력용기의 파손 및 수명을 예측할 수 있을 것으로 보인다.

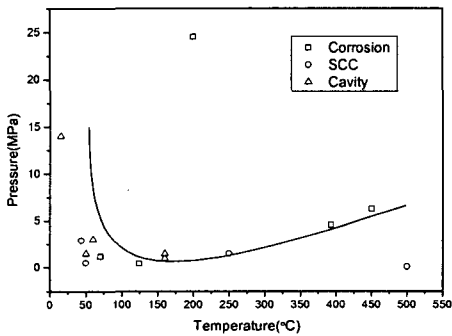
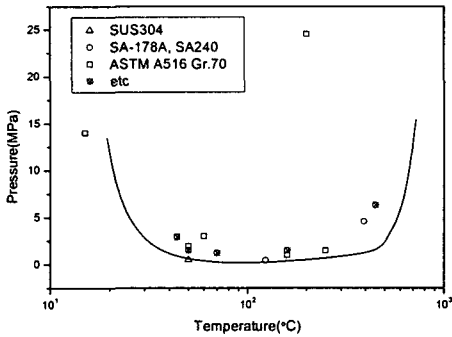


Fig 1 The case of failure

2) 강제용기의 손상거동

Fig 2는 압력용기용 강재가 압력과 온도에 따라서 손상되는 유형을 표시한것이다. 손상원인은 40°C이하에서는 균열, 40°C~300°C 범위에서는 Crack, Cavity, SCC였으며 300°C 이상에서는 부식이 주요 손상요인이 됨을 알 수 있다. 또 스테인레스강의 경우는 Fig 3에서 알 수 있듯이 주로 응력부식 균열 (SCC)이 주요 손상 원인이 됨을 알 수 있다.

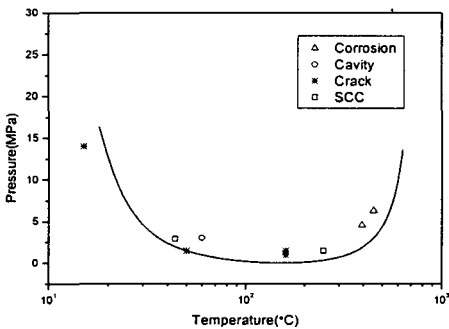


Fig 2 압력용기용 강재의 손상거동

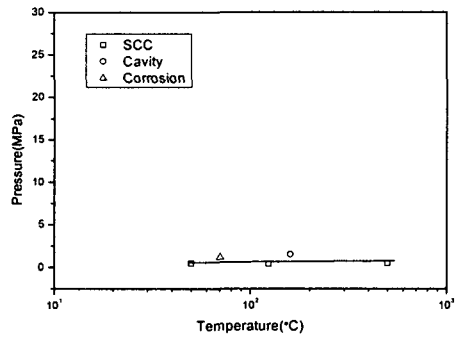


Fig 3 Stainless강의 손상거동

2.4 압력용기의 설계기준

2.4.1 국내외 압력용기의 설계 표준화 현황

1) 미국

미국의 압력용기 설계기준은 ASME (America Society of Mechanical Engineering) code(9)(10)에서 세부기준을 규정하고 있으며, 관련법령에서 동 규격을 인용하고 있다.

2) 영국

영국의 설계기준인 BS(British Standard) code에서 세부기준을 규정하고 있으며 관련법령에서 동 규격을 인용하고 있다.

3) 일본

일본은 압력용기 기준을 고압가스 보안법, 노동안전위생법 등에서 규정하고 있었으나 현재는 개별법으로 분산된 압력용기 및 보일러 기준을 JIS B 8265로 통합하였고 관련법령은 이를 인용하고 있다.

4) 한국

국내에서 제정된 검사기준들도 KS와 ASME를 근간으로 하고 있다. 고압가스안전관리법과 에너지이용합리화법은 일본의 JIS B8265의 규정을 기준으로 하고 있고 산업안전관리법과 소방법은 ASME Code(9)(10)를 기준으로 하고 있다.

5) 현행 압력용기 제도의 문제점

현행 국내 압력용기 기준은 여러 법령에서 각각 규정하고 있고 기준의 통일성이 결여되고 기술기준 변경이 용이하지 않아 국제 기준과의 호환성이 떨어진다.

압력용기 기술기준을 변경하고자 하는 경우에는 관계법령을 개정 하여야하므로 절차가 까다롭고 시간적 손실이 발생한다 .

선진 외국의 경우에는 압력용기 기준을 국가규격으로 정하고, 각 안전법령에서 이를 인용하는 체제를 채택하고 있다.

국내의 압력용기 관련 설계기준도 KS 기준으로 통합하고 각 관련 법령에서 이를 인용하는 체제가 바람직하다.

현행 기준에서는 제품중심의 검사방식을 채택하고 있어 검사시간 및 비용이 과다하게 소요되는 문제점이 있다.

2.4.2 검사기준 현황

국내 압력용기에 대한 검사기준은 용도에 따라 고압가스 안전 관리법, 에너지이용합리화법, 산업안전보건법 등에서 개별적으로 규정하고 있으며 표 2는 관련법에 의한 압력용기의 설계기준을 표시한 것이다. 표 2에서 통합고시전에는 MKS, SI, FPS단위를 함께 사용하였으나 통합고시후 SI단위를 기본으로 하였다.

표 2 압력용기의 설계기준.

	법규명	설계기준	비 고
고압 가스 안전 관리 통합 고시 전	고압가스 안전 관리법	$t = \frac{P \times D}{200 \times \sigma_a \times n - 1.2P} + a$	가스안전 공사
	에너지 이용 합리화법	$t = \frac{P \times D}{200 \times \sigma_a \times n - 1.2P} + a$	에너지 관리공단
	산업안전 보건법	$t = \frac{P \times R}{\sigma_a \times n - 0.6P} + a$	산업안전 관리공단 ASME(KS) CODE계산
	소방법	$t = \frac{P \times R}{\sigma_a \times n - 0.6P} + a$	각시도 소방본부 ASME(KS) CODE계산
통합 고시 후		$t = \frac{P \times D}{2\sigma_a \times n - 1.2P}$	SI단위 사용

t:판의 계산 두께(mm)

P:설계압력(kgf/cm²){MPa}

R, D:원통형 동체의 부식후의 안지름(mm)

σa:재료의 허용인장응력(kgf/mm²){N/mm²}

n:길이 이음의 용접이음 효율

a:부식여유(mm)

3. 결론

본 논문에서는 압력용기의 안전성 및 신뢰성에 대한 정확한 평가를 목적으로 우리나라의 압력용기설계기준 및 검사기준을 바탕으로 경년열화에 의한 압력용기의 파손사례를 분석하고 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 국내의 압력용기 설계기준은 현재 고압가스안전관리법은 JSME기준, 산업안전보건법은 ASME Code를 기준으로 하고 있어 압력용기의 다양한 사용사례에 설계기준은 대응하지 못하고 있는 실정이다. 하지만 2005년에 ASME Code기준으로 통합하고, SI단위를 기본으로 하는 ISO표준(안)이 추진중에 있다. 따라서 신규정에 의한 압력용기 설계방법과 검사기준의 제정이 시급히 필요하다.

(2) 국내의 압력용기 파손사례는 문헌적 자료의 제약은 있으나 주로 15MPa이하 500℃이하의 범위에서 파손사고가 보고되고 있다. 이중 압력이 비교적 낮은 5MPa의 사고가 대부분이다.

(3) 재료는 압력용기 강재와 스테인레스강이 주로 사용되고 있으며 압력용기 강재로 된 용기는 부식, Cavity, 균열, SCC등이 주요 손상원인인데 비해 스테인레스강재는 SCC가 주요원인임을 알 수 있다.

(4) 압력용기의 경년열화현상을 확인하기 위해서 일정한 간격을 주기로한 체계적인 연구가 이루어져야 한다. 또한 압력용기의 다양한 사용환경에 적합한 설계기준이 필요하기 때문에 그에 맞는 연구가 이루어져야 한다. 마지막으로 국제적으로 신뢰받는 기술기준을 국가규격으로 조속히 제정해야 하겠다.

참고 문헌

- (1) Fett, T., 1987, "An Extension of the Newman-Raju Formula", International Journal of Fracture, Vol.33, pp. R47-R50
- (2) 한국가스안전공사, 2001. 6 "압력용기 기준"
- (3) 한국가스안전공사, 199. 4 "압력용기 검사 실무지침"
- (4) 한국기계연구원, 2000. 7 "압력용기의 노후도 진단 및 평가기술"
- (5) P. Paris, F. Erdogan, 1963, "Critical Analysis at crack Propagation Laws", The Journal of Basic Engineering, ASME, December, pp. 528-534
- (6) E. K. Waker, 1970. "Effects of Environment and Complex", Load History on Fatigue Life, ASTM STP 462, pp. 1-14
- (7) JWS, 1982, Fractographic Atlas of steel Welsmenets, 黒木出版社
- (8) 한국산업안전공단, 2004.11 "압력용기류의 손상특성 평가 연구"
- (9) ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII, Divison 1, 1995 Edition, "Pressure Vessel"
- (10) ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII, Divison 2, 1995 Edition, "Pressure Vessels-Alternative Rules"
- (11) 고압가스 안전관리기준 통합고시, 산업자원부 고시 제 2004-45호, 2004. 4.19