破損원인의 조사방법 및 사례

화학공정장치 및 압력용기등에서 폭발이나 파손에의한 사고가 증가하고 있다. 이러한 사고시 우리는 발화원, 발화지점, 연소상황, 이상반응온도 (압력), 안전장치, 운전미숙등 화재, 폭발의 물리, 화학적 메카니즘에 의해서만 그 원인을 규명하여 왔다.

그러나 파손된 금속의 破面을 관찰함으로서 파손원인을 조사하는 우리에게는 생소한 방법이 있다.

여기에서는 최근에 개최된 "금속破面과 조직관찰에 의한 파손원인의 조사방법"에 관한 세미나 내용을 요약 소개한다.

1. 파손의 정의

물체가 두쪽 이상으로 갈라지는 현상을 failure 또는 fracture라고 하는데 일반적으로 failure는 일상적인 용어로, fracture는 공학적, 학문적 용어로 사용되고 있다. 우리 말로는 파손 또는 파괴라고 하여 동일한 의미로 사용한다.

또한 破斷(rupture)이라는 용어가 사용되고 있는데 이것은 금속재료가 파손될 때 최종적으로 파손되는 斷面 즉 shear lip (이후에 설명함) 해당부분을 말한다. 따라서 破斷이라는 용어는 파손과는 구분되고 있다.

오늘날 파손원인을 조사하는 기술은 많은 발전을 가져왔으며 破面조사를 통해 파손의 원인을 조사하는 것을 fractography라 하고 있다.

2. 파손의 원인

파손의 원인으로는 설계불량, 사용재료의 결함, 제작상의 결함, 운전불량이 있다.

설계시에는 그 장치나 구조물의 사용온도, 사용압력, 사용응력, 사용환경등을 고려하여 전체적인 구조를 설계하고 특히 취약부분에 해당하는 부품결합부, 용접부등은 안전성을 충분히 고려하여 합리적으로 설계하도록 해야한다. 압력용기나 고압배관을 설계할 때 채택하고 있는 안전율은 국가에 따라 차이가 있으나 鋼板의 경우 보통 引張強度의 2~4배, 降伏強度의 1.5~3배 정도를 취하고 있다.

사용재료는 설계과정에서 지정이 되는데 사용온도, 사용환경, 부식성, 마모성을 충분히 고려하여 사용목적에 적합한 재료가 선정되도록 하여야 한다. 서로 다른 금속을 용접할 때 또는 鑄造, 壓延, 鍛造등의 가공과정에서 형성된 氣泡, 가스, 非金屬介在物, 熱處理불량등이 파손의 원인이 된다.

제조과정중에서도 균열의 원인이 생기는 경우가 많다. 거치른 가공으로 인한 결함, 부적합한 열처리와 세척, 鋼管의 지나친 bending으로 인한 결함등은 모두 파손을 일으키는 원인이 될 수 있다.

특히 제작과정에서 발생하는 문제들은 용접과 관련된 것일 때가 많다. 용접시에 형성된 각종 균열, 接合잘못으로 인한 殘留應力, 용접설계의 불량, 熔加材의 불충분한 침투등이 모두 파손의 원인이 된다.

운전불량으로 인한 파손사고는 허용온도 이상의 과열, 허용응력 이상의 과도한 부하, 압력초과, 水質이나 雰圍氣의 관리불량, 지나친 진동, 충격, 熱疲勞등에 의해서 발생한다.

3. 파손원인의 조사방법

파손의 원인을 조사할 때는 위에서 설명한 4가지의 파손원인 중에서 가능한 요인이 무엇인가를 규명하지 않으면 안된다.

다행히 대부분의 파손원인은 금속의 파손단면(破面)을 자세히 관찰하여 파손의 起點을 찾아냄으로서 밝힐 수 있다.

파손의 기점을 찾으면 우선 이 부분의 금속표면에 대한 이상유무를 조사하고 그 다음에 破面의 파손형태를 관찰한다.

이러한 조사는 제일먼저 육안으로 실시하고 그 다음에 저배율현미경으로 검사한다. 이와같은 육안조사와 macro조사를 통하여 충격에 의한 급격한 파손인지, 부식균열인지 또는 장기간에 걸쳐 발생한 疲勞破損인지 대략적인 원인을 추정하게 된다. 파손은 응력이 집중된 부분에서 발생하는 경우가 많다. 파손기점 부근의 금속표면상태를 조사함으로서 腐蝕孔이나 가공불량으로 인한 이상유무를 발견할 수 있다. 腐蝕孔에 의한 파손인 경우는 일반적으로 疲勞破損을 일으킨다.

應力集中部分의 破面이나 그 부근의 금속표면상태에 이상이 없을 때는 광학현미경이나 전자현미경을 이용하여 組織試驗과 硬度試驗을 해보아야 한다.

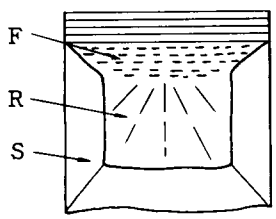
파손의 위치가 응력이 집중된 부분이 아니라 하더라도 破面부근의 표면상태는 반드시 조사하도록 해야 한다. 이렇게 함으로서 壓延傷處, 腐蝕孔, 熔接缺陷, 熱龜裂등이 파손의 원인인지를 알 수 있게된다.

금속표면이 破面에 이상이 없을 때의 파손원인으로는 국부적인 脫炭, 非金屬介在物, 過熱組織등이 있다.

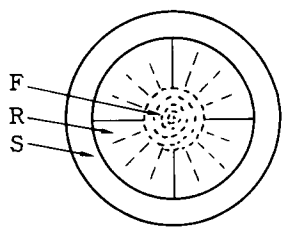
4. 破面의 특성

파손의 起點이 되는 부분은 섬유상 (fibrous)으로 나타나 있는데 이 부위에서 균열이 시작되어 이것이 어느 일정한 크기로 확대된 후에 균열이 급속히 전파하게 된다. 이와 같이 균열이 급속히 확대된 부분을 radial이라 부른다. 이 radial 부분이 일정 크기가 되면 최종적으로 shear lip를 형성하면서 破斷된다. 이와 같은 fibrous, radial, shear lip를 破面의 3요소라고 부른다. 파손이 급속히 일어날수록 온도가 낮을수록 radial부분이 넓어지고 fibrous부분과 shear lip부분이 감소한다.

破面에는 여러가지의 종류가 있으나 여기에서는 중요한 몇가지 Pattern만을 예로서 소개한다.



〈충격파면〉



〈인장파면〉

가. 脆性破面과 延性破面

취성파면은 結晶構造上의 劈開面(쪼개져 갈라진 面)을 따라 파손되는 것으로 파손된 面은 광택이 있고 덩어리 모양으로 나타난다.

연성파면은 剪斷(잘라 끊어짐) 형태의 파손에서 나타난다. 섬유상이고 비단결처럼 부드럽게 보이며 광택은 회색을 띄게 된다.

나. Creep 파손

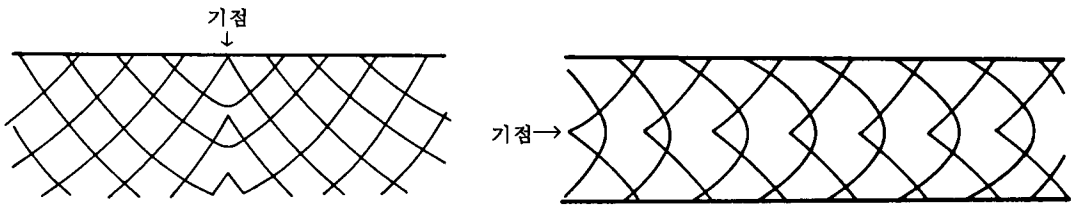
높은 온도에서 應力을 가했을 경우, 장시간 후에는 引張應力보다 상당히 낮은 응력하에서도 재료가 급격히 파손되는 것을 Creep 파손이라 한다. 破面은 거칠고 結晶的이다. 또한 취성적인 파손이기 때문에 균열된 부분의 재질이 변화되어 있다.

다. 疲勞破損

피로파손은 비교적 장시간에 걸쳐 서서히 진행되는 파손이다. 햄머에서 처럼 引張應力이 반복해서 작용하는 경우, 재료의 결함이 있는 부분을 기점으로 하여 균열이 원반형으로 확대되어 최종적으로 shear lip를 형성하면서 파손된다.

라. Herringbon 또는 Chevron

파손이 충격적으로 급속히 일어났을 때 나타나는 破面으로 그림에서 처럼 청어뼈모양을 나타난다. (a)는 보일러 강판의 충격파면인데 破面이 광택을 띄며 放射狀이다. 이 무늬의 시발점 즉 파손의 기점은 용이하게 식별할 수 있다. 또 그림(b)는 산소용기의 破面을 나타낸 것이다.



〈보일러 강판의 충격파면〉　　〈폭발한 산소 봄베의 파면〉

마. River Pattern

脆性破面을 나타내는 전형적인 모양이다. 취성파괴된 劈開破面을 현미경으로 관찰하면 강줄기가 흘러가는 것과 같은 破面을 볼 수 있다.

바. 應力腐蝕균열

應力과 腐蝕雰圍氣가 동시에 작용하여 균열이 발생하는 경우로서 균열이 가지를 치면서 전파하는 것이 특징이다.

5. 조사 사례

가. 요소합성탑의 폭발

(1)사고 개요

이 합성탑을 내경 1.2m, 벽두께 5.5cm 높이 10m의 크기로 사용압력은 200kg/cm이었다. 사고당시 반응탑은 정상 가동중이었는데 갑자기 폭음을 내며 폭발, 파손되었다. 인명피해는 없었으나 사고지점에서 50m이상 떨어진 공장건물의 유리창이 파손될 정도로 폭발위력은 대단하였다.

(2) 사고 조사

사고조사단이 형성되어 공정, 기계, 재질등에 대한 사고원인조사가 실시되었다.

파손의 起點은 합성탑 하단에서 높이 5.4m되는 부분이었는데 이 지점에서 상하로 각 1.5m 정도 세로로 파손이 진행되다가 아래쪽에서는 나선형으로 회전하면서 파손되고 윗쪽에서는 분출된 기체에 의하여 약

2m되는 상부가 떨어져 나간 상태였다.

파손기점 부분의 내부를 관찰해 본 결과 나무껍질처럼 거칠었고 연마해보니 심한부식이 일어나 있었다.

또한 파손기점에는 툭 튀어나온 자국이 있었다. 이것은 10년전 이 합성탑을 설치할 때 외기의 온도로부터 탑을 보호하기 위하여 설치한 보온재를 부착하기 위한 지지대의 용접자국이었다.

이것이 파손을 야기시킨 근본원인이었다. 파손된 탑과 파손되지 않은 탑의 용접부분을 비교 조사해본 결과 두개의 합성탑 모두가 용접부분에서 균열이 나가있는 것이 발견되었다.

용접부분의 조직검사에 의해서 국부적인 조직변화가 일어나고 있다는 것을 알 수 있었다. 즉 원재질과 비교하여 심하게 浸炭되어 있었다. 또한 이 부분의 측면조직을 관찰하여 이 침탄층 바로 아래가 국부적으로 脫炭되어 있음을 발견하였다.

이와같은 조사 관찰을 바탕으로 사고의 원인을 다음과 같이 결론지었다.

"용접에 의하여 국부적으로 다른 재질이 형성되었고 또한 용접 Crack이 생기게 되었다. 장시간 사용함에 따라 이 Crack이 서서히 성장하여 파손을 일으킬 한계상황에 도달하였고 한편으로는 반응탑 내부의 부식이 이러한 Crack의 확대를 촉진시켜 어느 순간 급격한 폭발사고를 일으켰다"

나. 보일러관의 파손

(1) 사고 개요

어느 호텔에 설치되었던 보일러 관에서 파손사고가 발생하였다. 설치가동한 후 1년반만에 상부와 중앙의 Steam line이 파손되어 증기가 새어나온 것이다.

이 보일러의 최대증기압은 7kg/㎠, 사용증기압 3kg/㎠이었으며 가열방법은 1~1.5시간 가열후 2~3시간 중지하는 반복식 가열로 하루 평균 8시간 정도 가동(여름철 제외)하고 있는 상태였다.

(2) 사고 조사

이 보일러에 사용되고 있는 물을 분석하여 보일러 급수표준과 비교하여 보았더니 경도, SiO_2 및 산소의 함량이 모두 규격범위를 초과하고 있었다.

상부 Steam line은 관내부가 전반적으로 손상되고 있었는데 특히 아래쪽으로 꾸부러지는 T자형 부분에서 더욱 심했다. 이와 같은 현상은 부식성분을 함유한 뜨거운 수증기가 금속표면을 부식시키고 특히 꾸부러진 부분의 피막을 훑어내는 현상으로 해석되었다.

중앙의 Steam line 균열은 상부의 것과는 다른 양상으로 나타났다. 관내부의 Crack을 관찰한 결과 이것은 Steam line이 腐蝕雰圍氣속에 노출될 때 주기적 가열로 인하여 주기적인 열응력이 Steam line에 작용하여 일어난 것으로 결론지었다. 특히 이 Steam line은 양쪽 끝이 고정되어 있어 열팽창시에 작용하는 응력을 피할 수 없도록 설계되어 있었다.

참고로 보일러용 강관에서 발생하는 손상사고를 분류하면 〈표1〉과 같다.

〈표1〉 보일러용 강관의 손상사고 분류표

구 분	분 류	세 부 항 목
가스측에 기인하는 사고 (사용연료와 관련)	균 열	피로균열, 부식피로균열
	부 식	고온부식 저온부식
	마 모	Ash Cutting, Drain Cutting, Steam Cutting
	Clinker 낙하	
	張 出	
水측에 기인하는 사고	Scale이나 이물질에 의한과열	Scale과도 부착 Scale부상, 剝利 Scale 축적

(관내부 물과 증기 관련)	부 식	貫流抵抗증대 대기에 의한부식, 기동시의 산소부식, 알카리부식 해수漏入부식 Hydrogen Damage, 응력부식
재료 또는 제작에 기인하는 사고	균 열 Creep 破斷	소재균열, 용접부 균열 재료강도부족에 의한 Creep 破斷 재질熱化에 의한 Creep 破斷

○ 피로균열 : 부식분위기에 의한 부식피로의 형태로 나타남

○ 부식피로균열 : 반복응력과 부식분위기가 반복적으로 작용하여 발생

○ 고온부식 : 고온의 연소가스에 의해서 부식되는 현상

○ 저온부식 : 연료중의 유황분이 연소되어 가스로 변하였다가 저온부분에서 응축되면서 부식을 증가시키는 현상

○ Ash Cutting : 연소가스중에 포함되어 있는 Fly ash에 의한 마모

○ Drain Cutting : Drain 또는 증발관의 사고로 분출되는 액체에 의해 강관이 마모되는 현상

○ Steam Cutting : 증발관의 누출 또는 破斷사고에 의해 분출되는 증기가 주변의 강관을 마모시키는 현상

○ Clinker 낙하 : 연료가스중의 회분이 용융상태에서 상승하다 로벽등에 부착, Clinker를 생성함으로서 발생되는 사고

○ 張出 : 보일러 증발관의 길이가 열을 받아 늘어 나면 일어나는 현상

○ Scale과다부착 : 급수과정에서 보일러에 들어가게되는 Fe, Cu, Zn, Ni, Al, Ca, Mg, SiO_2, 유지성분에 의하여 증발관 내부에서 형성된 Scale에 기인한 현상

○ Scale 上 : Scale과 관사이의 열팽창계수가 다르므로 발생하는 현상

○ 刻狸 Scale축적 : 酸化 Scale의 剝利와 이의 축적으로 증기흐름에 장애를 가져와 관을 과열시켜 일어나는 사고

○ 貫流抵抗增大 : 증발관의 경우 Orifice에 Scale이 끼거나 이물질에 의해 관류저항이 증대되는 현상

○ 대기에 의한 부식 : 관내면의 수분이 공기중의 산소와 접촉하여 강관내벽을 부식시키는 현상

○ 기동시의 산소부식 : 보일러의 기동정지시 용존상소 혼입으로 발생

○ 알카리부식 : 보일러水와 관내벽과의 온도차이가 큰 곳에서 급격한 비등이 일어나 보일러水중에 존재하는 遊離된 알카리가 농축되어 일어나는 부식현상

○ 해수漏入부식 : 해수가 보일러관에 유입되면 Scale 생성을 촉진

○ Hydrogen Damage : 鋼이 수소를 흡수하여 微少균열이 생기고 재료가 영구적으로 취약해지는 현상

○ 응력부식 : 응력과 부식분위기가 함께 작용하여 발생하는 균열

○ 素材균열 : 강관素材에 非金屬介在物이 다량 존재하여 용접 가공시 이 부분에 응력집중이 생겨 발생하는 균열

○ 용접부균열 : 용접부의 예열온도가 적정하지 않거나 습기가 있는 환경에서 용접시 발생

○ Creep 破斷 : 보일러강관을 高溫高壓하에서 사용함으로 발생