

<기술해설>

熱交換器의 損傷傾向

이재익* · 성봉훈**

*한국비료 공업주식회사

**울산 공과대학교

Failure of Heat Exchanger

J. Y. Lee* and B. H. Sung**

*Korea Fertilizer Industry Ltd.

**Ulsan Institute of Technology

I. 서 언

석유화학공업 및 각종 화학장치공업 등 모든 장치공업에 있어서는 열효율적인 관점에서 여러가지 형식의 많은 열교환기류 기기장치 설비를 사용하고 있는 실정이다. 열 경제적인 면에서 볼 때 없어서는 안 될 중요한 장치 설비의 하나라 할 수 있다.

일반적으로 열교환기는 서로 다른 두 종류의 유체(fluid)를 취급함으로써 피가열체(被加熱體)와 피냉각체(被冷却體)가 서로 증발(蒸發) 또는 응축(凝縮) 등의 狀態變化를 일으키는 경우가 많은 동시에 또한 서로 다른 부식성 물질을 함유하고 있는 경우가 허다하므로 <표 1>에서 보는 바와 같이 각종 여러가지 기기장치 설비중에서 다른 종류의 기기장치 설비에 비해 손상(損傷) 경향이 극심한 실정이라 하겠다.

<표 1> 기기 장치별 손상사례 (총 295件)

장치 설비별	비율 %
가열로 관계장치	16.6
탑·조 관계장치	16.6
열교환기 관계장치	34.2
배관 관계	24.4
회전기류 관계	3.1
기 타	5.1

특히 열교환기를 구성하고 있는 部分中에서도 전열관(傳熱管: Tube)측에서 비교적 극심한 손상(損傷) 현상이 많이 일어나고 있는 실정이다. 열교환기류의 기기장치 설비를 설계 및 제작할 경우 구성재료의 선택 즉 재질선택에 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서 본문에서는 과거 外國에서 일어났던 각종 화학장치 공업에서의 기기장치설비 손상사례를 소개하고 이에 적절한 대책에 대하여 간단히 서술코자 한다.

II. 열교환기류의 損傷傾向

모든장치 설비중에서 1/3이상의 손상현상이 일어나고 있는 열교환기류의 기기장치 설비는 일반적으로 서로 다른 유체를 사용하여 증발 및 응축 등의 狀態變化를 일으키는 경우가 많으므로 각종 기기장치 설비중에서 가장 극심한 손상 현상이 일어나고 있다는 것은 누구나 다 알고 있는 사실이며 이러한 현상은 운전온도, 압력, 유체의 조성, 유속 등등과 같은 가혹한 제반 환경에 起因된 것이다 할 수 있다. 일반적으로 열교환기류 기기장치 설비에 있어서의 손상형태는 여러가지 형태로 일어남으로써 손상되고 있으나 이러한 原因과 現象에 대하여는 일반적으로 설명한다는 것은 매우 어렵다. 外國에서의 손상사례와 손상부위 등을 고찰함으로써 열교환기류 기기장치설비의 손상경향과 손상형태 및 손상부위를 판단할 따름이다.

1967년 4월부터 1976년 3월까지 10년간에 걸쳐 外國에서 발생한 열교환기류 기기장치설비에 있어서의 손상부위는 <표 2>에서 보는바와 같이 전체의 3/4인

**울산대학교 대학원생

〈표 2〉 손상부위와 비율 (총 101건)

손상부위	손상비율
Tube	73.2 %
Cover Head Floating	10.9 %
Shell 및 Shell Cover	5.9 %
Tube-Sheet	2.0 %
Channel	2.0 %
Baffle Plate	2.0 %
기 타	4.0 %
계	100 %

〈표 3〉 열교환기에 있어서의 손상 종류와 발생비율 (총 101건)

손상종류	손상비율
全面腐蝕 (潰蝕包含)	14.9 %
局部腐蝕 (孔蝕選擇腐蝕)	24.7 %
應力腐蝕균열 및 腐蝕疲勞균열	50.5
1) Austenitic Stainless Steel	(18.8)
2) 炭素鋼, 低合金鋼 Ferrite Stainless steel	(18.8)
3) 銅合金	(12.9)
熔接 결함	3.0
其他 (脆性等等)	6.9

약 75% 정도가 Tube(전열관)에서 발생되었으며, 다음이 Floating Cover Head 部로서 10% 정도로서 대부분이 Tube 측에서 손상되고 있다는 사실은 주목할만한 사실이다. 한편 열교환기에 있어서 손상종류와 손상비율을 고찰하면 〈표 3〉에서 보듯바와 같이 습성(wet corrosion)의 부식손상이 전체의 약 90% 이상을 차지하고 있으며 그중에서도 응력부식균열(stress corrosion cracking)이 약 50%로 전체의 절반인 1/2를 차지하고 있고 부식손상이외의 형태로서는 용접결함이 주체로 되어있다.

이와같이 열교환기의 부식손상은 일반적으로 process 유체가 同一種類인 경우의 열교환기 손상이 가장적고 海水, 工業用水를 使用하는 cooler(冷却器) 또는 condenser(凝縮器)의 경우에 비교적 손상경향이 심하다.

이러한 경우는 공업용수 및 海水中에 함유된 염화물(chloride)에 의한 응력 부식균열(stress corrosion cracking) 형태가 많고 응축기(condenser)의 경우에는 Process 유체중에 함유된 수증기가 水分으로 응축될 때 유체중에 함유된 부식매체 즉 염화물, 탄산가스,

유화수소등에 의한 露點부식이 일어나고 있으며, 주로 304 및 316과 같은 Austenitic Stainless Steel 系에서 많이 일어나고 있다. 특히 부식손상의 특징으로서는 H₂S 를 함유한 습성유체를 취급하는 열교환기의 Shell 하부측 (SB 42, SM41 등)에 수소유기균열(水素誘起균열: Hydrogen Inductive Cracking)이 발생되고있다.

앞에서 말한바와 같이 열교환기에 있어서 가장 손상비율이 극심한 전열관(Tube)에서의 合金別 損傷事例는 〈표 4, 5〉에서 보는 바와 같이 Austenitic stainless steel, 탄소강, 銅合金등이 거의 동일한 비율을 이루고 있으나 實裝置의 使用材質은 대부분이 炭素鋼으로 되었으므로 使用頻度面에서 볼때 Austenitic Stainless steel 의 손상발생 비율이 현저히 높고 탄소강의 손상발생 비율이 적다고 할수있다. 이러한 손상현상은 어떠한 금속이든지 주로 응력부식균열(Stress corrosion cracking)에 기인되는 것이 많다.

〈표 4〉 열교환기 Tube 의 合金別 손상비율

합금종류	비율(%)
Austenitic Stainless Steel (304, 316, Incolloy 800)	28.4
炭素鋼	29.7
銅合金 (B, TF, monel)	27.0
Cr—Mo 鋼	10.8
Ferrite-Stainless Steel (410)	4.1
계	100

〈표 5〉 열교환기에 있어서 各 合金別 S. C. C의 種類

합금	S. C. C 種類	손상비율	鋼種%
Austenitic Stainless steel	鹽化物에 起因	77.9	42.9
	硫化物에 起因	5.6	
	高溫高壓水(CO ₂ 含有)에 起因	16.5	
炭素鋼·低合金鋼	硫化物에 起因	64.3	33.3
Ferrite stainless Steel	알카리 脆化	35.7	
銅合金	NH ₃ 또는 硫化物에 起因	100%	23.3

일반적으로 열교환기류 기기장치 설비에 있어서 손상경향을 종합검토하면 다음과 같은 특징이 있음을 알수 있다.

- 첫째 : Tube 가 손상경향이 심하다.
 둘째 : 손상형태는 주로 응력부식 균열이다.
 셋째 : Tube 손상은 Cooler, Condenser 의 경우에 많다.
 넷째 : Tube 손상은 Tube-Sheet 부근의 열응력 또는 露點되기 쉬운 부위에서 많이 발생한다.

III. 열교환기의 劣化損傷原因

일반적으로 열교환기의 열화 및 손상원인을 크게 분류하면 부식현상으로 기인되는 경우와 기계적인 인자에 기인되는 경우 및 고온으로 인하여 기인되는 경우로 분류할 수 있다.

본문에서는 개개의 인자에 대한 설명은 생략하기로 하고 발생 원인과 현상만을 요약토록 하겠다.

1. 부식현상으로 기인되는 경우

일반적으로 부식현상은 유체와 접촉하고 있는 금속 면에서 일어나고 있는 현상의 원인으로서는

- 첫째 : 원료자체의 부식성에 기인되는 경우.
 둘째 : 처리과정에서 사용되는 화학약품에 기인되는 경우.

셋째 : 냉각, 가열원인 열매체 등에 기인되는 경우.
 등으로 크게 나눌 수 있으나 부식속도와 부식형태는 구성재료의 耐蝕特性, 부식성물질의 성질, 농도, 유속 및 응력 등 가속인자에 의해 좌우된다.

2. 기계적인 인자로 기인되는 현상과 원인

원인으로는

- 1) 清掃에 의한 손상
- 2) 충격에 의한 손상
- 3) 진동에 의한 손상
- 4) 過負荷 운전으로 인한 손상
- 5) 용접불량으로 인한 손상등이 있으며

제반 기계적인 因子로 인하여

- 1) Crack
- 2) 변형
- 3) 擴판부위의 이완현상 등의 현상이 誘發된다.

3. 고온으로 기인된 경우

- 1) 결정입자 성장
- 2) 硬化
- 3) 鋭敏化
- 4) δ 相 析出
- 5) 硫化
- 6) 酸化
- 7) 水素侵蝕
- 8) 窒化
- 9) 浸炭

이와같은 현상은 고온으로 인한 금속변형 또는 고온에서 유체가스와 반응함으로써 야기된다고 할 수 있다.

IV. 腐蝕環境

각종 설비장치에서의 유체는 장치 설계시에 일반적으로 유체의 조성과 운전조건이 판단되기 때문에 모든 조건에 대응하여 설계시에 판단된 제반조건은 어디까지나 예상된 값에 불과하기 때문에 실제적으로 정확한 부식율이나 감모율(減耗率)을 측정할 수 없으므로 수개월 또는 수년간 일정기간 동안 운전하면서 부식율과 감모율을 측정함으로써 부식손상 정도를 파악하는 방법 이외의 최적방법은 없다고 할 수 있다.

일반적으로 실제운전 조건과 설계조건이 서로다른점은 유속, 온도 및 유체의 조성등으로서 정확한 부식관경등을 파악하여 적절한 방지대책을 수립 시행하기 위해서는 실제로 장치를 운전하면서 장치의 여러부분에서의 실제운전등 제반조건과 시료분석 등을 종합검토하지 않으면 안된다.

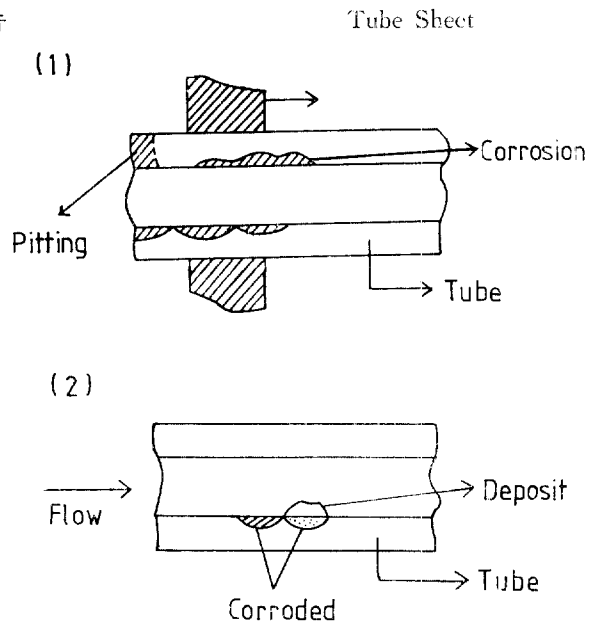


Fig. 1 Failure of tubes in heat exchanger

1. 유속

장치설비내에서의 각부분을 통과하는 유체의 線速度

는 부식등에 큰 영향을 미치는 인자로서 균일하게 유체가 흐르는 것이 가장 좋으나 유체와 장치설비 내벽과의 사이에 당연히 마찰이 존재하기 때문에 어떠한 부분에서도 균일한 흐름이 형성될수 없다.

일반적으로 유체의 유속이 빠르면 마찰을 일으키기 쉬우며 부식성 물질이 함유되어 있을 경우 부식으로 인하여 장치설비 내벽에 산화물등과 같은 부식반응물을 형성시킴으로써 장치설비를 취약시킨다. 반면 유속이 느릴 경우에는 마모, 박리현상이 적으나 균일 흐름이 저해 됨으로써 불균일한 흐름이 형성 되므로 불균일한 가열 냉각 현상이 유발되어 변질, 반응등 예기하지 않았던 사건이 발생되며, 유체중에 고형분이 존재할 경우에는 유속이 느린부위에서 퇴적하여 금속과 서로 밀착하게 됨으로써 Scale 이 형성하여 와류 또는 유속이 빠른 부분에서 마모현상을 유발시킨다. 일반적으로 배관에 있어서 유속규제치로서 아래와 같은 수치를 사용하고 있다.

(선속도)

물 : 1~5 m/sec

수증기 : 20~40 m/sec

氣液混合流體 : 10~20 m/sec

기타유체 : 1~3 m/sec

2. 온도

設計時에는 장치내의 평균온도나 入·出口온도라든가 또는 중요한 부분의 온도를 추정할 것이므로, 실제로는 각부분에서의 온도가 서로 相異한바, 운전조건의 변동에 의해서도 변한다.

일반적으로 금속의 부식진행은 분위기의 온도와 밀접한 관계를 갖고있다. 즉 온도가 상승하면 부식반응도 활발하게 일어나므로 공업적으로 다루고 있는 유체는 순수한 단일물질로 된 경우는 드물고 대부분 미량이나마 여러가지 물질을 함유하고 있다. 특히 수분을 함유 하였을 경우에는 수분을 함유한 부식성물질에 의해서 부식이 촉진되는 경우가 많으나 수분이 기화하는 온도 이상으로되면 逆으로 부식율이 감소되는 경우도 볼 수 있다.

3. 유체의 조성

부식성 물질은 가능한 저농도의 물질로서 設計時에 조사되었으나 실제적으로는 미량이나마 여러가지 종류의 부식성 물질이 존재하게 되므로 이러한 물질이 서로 반응하여 새로운 부식성 물질을 형성하게 된다는 점과 設計時에 판명되지 않는 성분이 부식에 관계하게 된다는 점이 設計時와 운전시가 다르다.

V. 부식형태

일반적으로 열교환기의 사용목적과 환경에 따라 재질을 선택 사용하고 있으므로 Tube, Tube Sheet, Channel, Cover, Shell, Baffle Plate 등에서 여러가지 형태의 부식이 발생되고있다.

1. Tube

황동계, Cupro-Ni 및 탄소강을 많이 사용하고 있으며 침식성이 강하고 고온 고압일 경우에는 Ni-Cr 강을 사용한다.

일반적으로 주요한 부식 형태로서는

- 1) 전면 균일부식
- 2) 공식, 점식
- 3) 선택부식(탈아연, 탈납켈등)
- 4) 潰蝕
- 5) 교상부식
- 6) 응력부식 균열

2. Tube Sheet 및 Baffle Plate.

대체적으로 Tube 와 동일계통의 재질을 사용하는 경우가 많으며 Tube 에서 야기되고 있는 부식형태와 동일한 형태의 부식이 야기되나 특히 유체의 유속(와류, 난류)에 의해 Seal-welding 부위에서의 부식이 심하다 (Fig. 1)

3. Shell, Cover, Channel

일반적으로 동일한 작업계통에 있어서 Drum 류에서 일어나고 있는 부식형태와 비슷하나 온도, 유속등이 서로 다르므로 부식정도는 Drum 류에 비해 심한 실정이며 주요한 부식형태로서는

- 1) 전면균일 부식
- 2) 전면凹凸부식
- 3) 교상부식
- 4) 환경차 부식
- 5) 격간부식
- 6) 응력부식균열

등과 같은 부식현상이 일어난다.

※ 교상부식(交相腐蝕)

모든 열교환기는 사용목적에 따른 유체의 조작상태는 가열, 냉각뿐 즉 相변화를 일으키는 열교환기인 응축기(Condenser), 증발기(Vaporizer Evaporator)등에서 많이 일어나고 있는 부식형태이다.

일반적으로 금속면에 기체와 액체의 두相이 서로 교대로 반복적으로 접촉됨으로써 부식이 촉진되는 형태로 이같은 현상으로 부식이 촉진되는 효과를 교상효과(交相效果)라 한다. 예를들면 Evaporator 의 경우 Tube 면에서 기포가 발생되어 부식이 촉진되는 경우

또는 Condenser의 경우에는 응축액이 Tube 外面에 떨어짐으로써 부식이 조장되는 경우로서, Tube 外面에 (외벽) 응축액이 접촉하면 Cu 基합금, 저합금강의 경우 적은 파도 모양의 형태가 발생되며 비응축 Gas가 부유하여 Tube 면에 접촉 이탈 현상이 반복 됨으로써 부식이 발생한다.

Tube 内面에서의 경우에는 즉 Horizontal Heat, Ex, 의 Tube 내로 Steam을 유입하여 Heater로 사용하는 경우 피가열체의 입구 주변과 온도가 낮은 부분의 Tube 内에 Steam이 급격히 응축됨으로써 Tube 内 上部에 격렬한 침식작용이 유발된다. (Fig. 2)

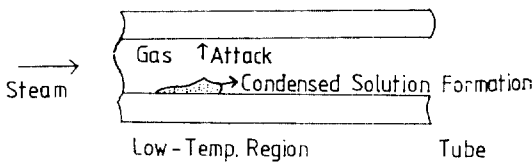


Fig. 2 Condensed solution formation in tube.

일반적으로 열교환기에 있어서 부식이 일어나기 쉬운 부분을 요약하면

1. 유체의 流路가 亂流로 되는 部位: 管板부근 및 Tube 入口부근
2. 온도가 불균일한 部分: Shell 入口, Nozzle 下測 Tube
3. 殘廢應力 및 응력집중이 큰부분: 擴管部, Floating Heat bolt

4. 유체증발 및 노점형성부분: Tube, Shell 下部.
5. Scale이 쌓이기 쉬운 部分: Scale Bundle, Baffle 部位

VI. 防蝕對策

일반적으로 열교환기의 부식손상은 손상경향에서도 말한바와 같이 응력부식균열, 국부부식 전면부식의 순으로 손상경향이 심하며 특히 Tube에서의 손상이 극심하다고 할 수 있다. 이러한 부식손상을 완전하게 방지한다는 것은 매우 어려우므로 우선 손상을 일으키는 모든 환경조건과 장치구조, 재질등을 충분히 파악하고 정기 보수시 Scale 등의 조성, 유체조정, 운전현황등을 종합검토함으로써, 조금이라도 손상경향을 감소시켜야 할 것이다.

일반적인 방지대책으로서는

- 가. 유체의 유속 조절
- 나. 부식억제제 주입
- 다. 전기방식
- 라. 비금속재료, Coating
- 마. 재질변경
- 바. 구조 및 설계변경

등의 방법이 있으나 가), 라), 마), 바), 항의 방지대책은 교과서적인 방법으로 새로운 장치를 설계제작시 적용 가능한 것으로 실제 공장방지대책으로서는 불필요한 방법이며 실제적으로 가장 적절하고 적용가능한 방지 대책은 나), 다)항의 방법으로, 이 방법을 선택 사용할 경우 어느정도 부식 손상을 방지할 수 있다.