

열전달장치(Heat Transfer System)의 안전

1. 개요

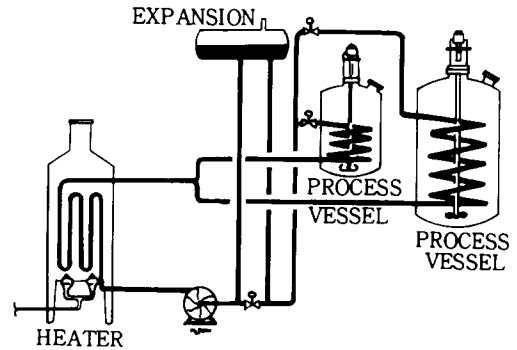
열매체(heat transfer fluid)라는 말은 열에너지를 한 장소에서 다른 장소로 일정한 속도로 전달시키는 데에 사용되는 액체 또는 증기 매체를 총칭하고 있다. 사실상, 모든 생산 공정은 한 형태에서 다른 형태의 열 교환이 이루어지고 있으며, 열매체는 화학, 페인트, 섬유, 플라스틱, 식품, 석유 및 제지 공업에 널리 이용되고 있다. 열매체는 냉·난방 설비, 열교환기, 종이 건조용 heat roller, 플라스틱 카렌더 등의 많은 공정에 사용된다.

2. 열매체의 종류

지금까지 사용되고 있는 열매체의 약 95% 정도는 스팀이나 물이다. 사용 온도가 물의 빙점 이상이고 177℃이하인 경우에는 통상적으로 이 물질을 사용한다. 반면에 사용 온도가 177℃ 이상이거나 빙점 이하인 경우에는 다른 유체를 사용하는 것이 좋다. 물의 빙점 이하에서는 할로겐 탄화수소, 암모니아와 같은 냉동제, 에틸렌 글리콜과 물의 용액 또는 공기가 열매체로 가장 보편적으로 사용되고 있다.

사용 온도가 177℃ 이상이 되면 물의 증기압이 급속히 증가하여 고가의 고압 공정장치가 필요하게 된다. 그러므로 고온에서도 실용적이고 저렴하게 열을 얻을 수 있는 방법은 고비점의 유체를 사용하는 것이다. 인화점이 높고 열에 안정하며 부식성이 없는 유체가 사용되도록 해야 한다. 일반적으로 사용되고 있는 고비점 액체에는 열매체유, molten salt 또는 특별 공인된 열매체 등으로 분류할 수 있다.

열전달 장치에는 액체상과 기체상의 두가지 형태가

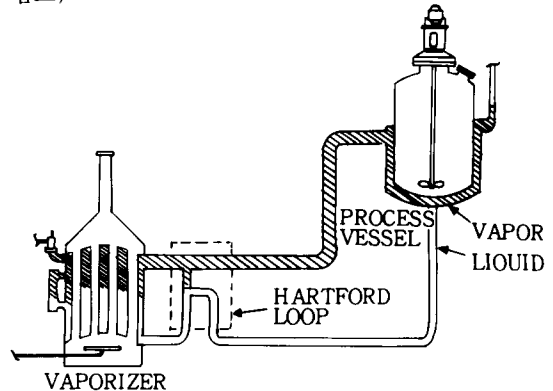


강제순환식 액상 열전달 장치

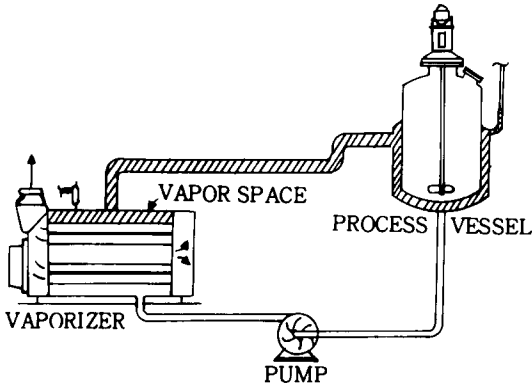
있다. 액체상의 장치에서는 (좌측 그림 참조) 순환율이 클지라도 열전달이 이루어짐에 따라 유체의 온도가 변화하므로 결과적으로 균일한 온도를 얻을 수 없게 된다.

증기상의 장치에서는 온도 조절이 가능한 포화증기 온도 하에서 열전달이 이루어진다.

이 두 장치를 결합해서 사용할 수 있다. (아래 그림 참조)



자연순환식 수직형 증발기의 증기상 열전달장치
응축액 환류에 중력이용



자연순환식 수평형 증발기의 증기상 열전달장치.
응축액 환류에 펌프이용

가. 열매유(Heat Transfer Oil)

열매유는 약 315℃ 이상 온도에서 사용할 수 있도록 특별히 정제된 석유계 oil이다. oil은 고온에서 열분해하여 가벼운 탄화수소와 중합체를 발생시킨다. 석유계 oil 역시 200℃ 이상 온도에서 공기와 접촉하면 산화반응을 일으킨다. 제조자의 사용지침에 따라 사용하면 열매유는 수명이 길고 양질의 열전달 효과를 기대할 수 있다.

를 기대할 수 있다.

나. Molten Salt

이 물질은 일반적으로 열흡수제 또는 냉동제로 사용되며 화학물질 제조시 발생하는 발열반응을 조절해 준다. 비교적 저융점의 나트륨과 칼륨 혼합물이 가장 많이 사용되고 있다. 주의해야 할 사항은 염의 온도를 융점 이상으로 유지해서 장치 내에서 염이 응고되는 것을 방지하여야 한다. 또한, 혼합물이 천천히 응해될 수 있도록 가동시에 열량을 조절해야 한다. molten salt는 대부분 강산화제이므로 사용장소에 유의해야 한다.

다. 합성유체 (Synthetic Fluid)

특별 공인된 여러가지 형태의 합성유체가 열매체로 널리 이용되고 있다. 합성유체는 열분해와 산화반응을 일으키지만, 안전성, 비부식성, 비독성 및 열적 안정성이 우수하다. 합성물질이 연료 히터의 화실(fire box)로 누출되면 화재위험이 발생한다. 대표적인 열매체의 물리적 성질은 다음 표와 같다.

대표적인 열매체의 물리적 성질

화 합 물	응고점		비 점		인화점		연소점	
	(°F)	(°C)	(°F)	(°C)	(°F)C.O.C.	(°C)	(°F)C.O.C.	(°C)
1,2,4-trichlorobenzene	63	17	417	213	210	99	*	*
tetrachlorobenzene (isomer mixture)	170	77	480	249	None	-	*	*
diphenyl ether-diphenyl eutectic	54	12	495	257	255	124	275	135
biphenyl phenyl ether (isomer mixture)	99	37	680	360	370	188	410	210
o-biphenyl phenyl ether	122	50	670	354	370	188	410	210
di- and triaryl ethers	< 0	-17	572	300	305	152	315	157
dimeethyl-diphenyl ether (isomer mixture)	-40**	-40	554	290	-	-	-	-
tetramethyl diphenyl ether (isomer mixture)	-	-	590	310	-	-	-	-
di-sec-butyl diphenyl ether (isomer mixture)	-	-	705	374	380	193	400	204
dicyclohexyldiphenyl ether (isomer mixture)	-	-	785	418	-	-	-	-
dodecyldiphenyl ether (isomer mixture)	45**	7	> 800	> 427	410	210	440	227
ethyldiphenyl (isomer mixture)	< -60**	< -51**	536	280	-	-	-	-
partially hydrogenated terphenyl	-15**	-26**	690	266	335	168	375	191
aliphatic oil	15	-9	720-950	382-510	425	218	475	246
alkylaromatic oil	20	-6	~650	342	350	177	390	199

* None to boiling point

** Pour Point

국내에서 생산 판매되는 열매유의 종류 및 그 성상 비교

性 状	단위	이수화화		유공	
		TOTAL SERIOLA K2120	TOTAL SERIOLA KL1120	Supertherm22	Supertherm32
밀도 (Density) 15℃	kg/ L	0.870	0.883	0.837	0.844
점도 (Viscosity) 40℃ 100℃	St	50 5.4	32 5.0	21.8 4.5	34.6 6.0
응고점 (Freezing Point)	℃	-27	-45	(-15~17.5)	
인화점 (Flash Point)	℃	182	200	230	230
발화점 (Ignition Point)	℃	372	390	-	-
연소점 (Fire Point)	℃	220	233	-	-
성 분	-	디아킬벤젠계	알킬벤젠계	미네랄 오일	미네랄 오일

*COC : 인화점 시험 방법중 Cleveland Open Cup방법.

이러한 유체가 액체상태로 사용될 때는 장치를 히터라 하며, 증기화되면 증발기라 부른다. 두가지 형태의 장치가 제조되고 있다.

- 시간당 1백만 BTU(29,280KW) 이상의 열효율로 설계된 연료 히터
- 시간당 1백만 BTU 이하의 열효율로 설계된 전기 히터.

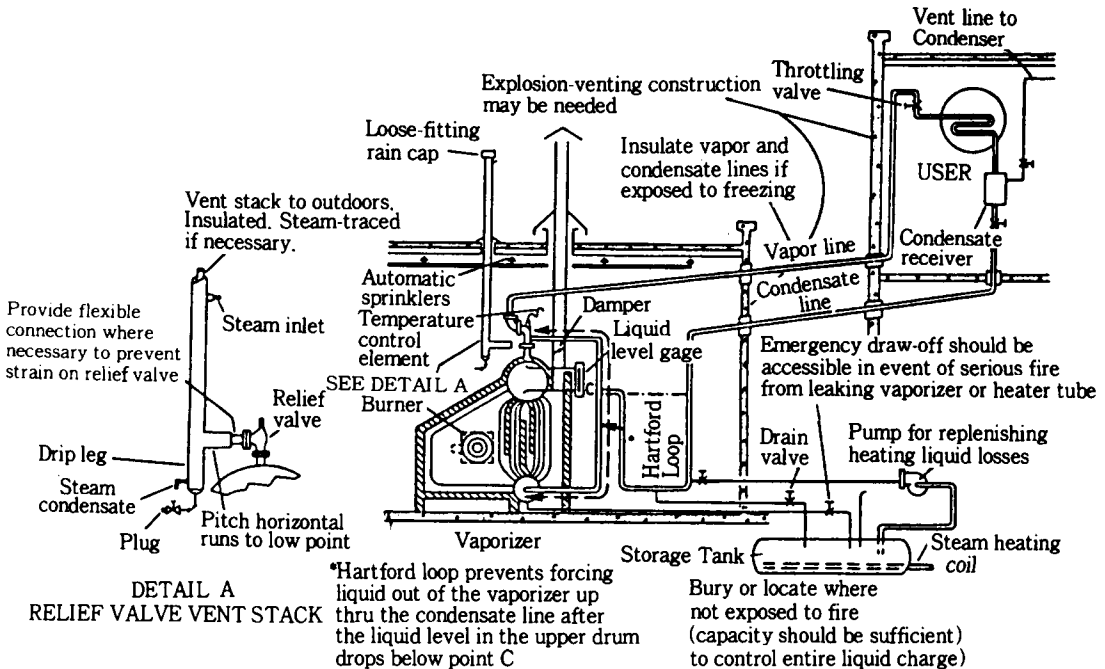
증발기와 히터의 용량은 수천에서 175백만 BTU/hr(524,694KW) 이상에 이르기까지 매우 다

양하다.

3. 유기 열매체의 위험성

유기 열매체의 기본적 위험은 밀폐식 설비 내에서 가연성 액체를 연소점(fire point) 이상으로 가열, 이송시키는데 있다.

아래 그림과 같은 형태의 증발기는 비교적 열 방출이 낮게 설계되었다.



중력 환류형 증발기의 설치 예

하부의 드럼은 장치 내의 불순물이나 異物質이 쌓일 수 있는 공간을 제공하여 이들 물질이 가열 표면을 오염시키는 것을 방지한다. 액표면이 튜브의 윗부분보다 아래로 떨어져 순환이 저해되지 않도록 특별히 주의한다. 직접가열식 장치에서는 히터 버너의 불꽃이 빈 튜브에 침투되어 국부적으로 과도한 온도상승이 일어나 침전물이 생기고 결국에는 튜브가 파손된다.

유기 열매체 중에는 표면장력과 점도가 아주 낮은 것이 있다. 누출방지를 위하여 설비의 조립건설에 특별한 주의가 필요하다 (ASME Boiler and Pressure Vessel Code 참조). 넓은 온도범위에서 사용되기 위해서는 파이프의 팽창이 필요하다. 통상의 안전밸브 스프링은 고온에서 작동이 불확실하다.

유기 열매체의 가격 때문에 안전밸브의 작동압력을

높게 셋팅하여 작동을 어렵게 만드는 경우가 대부분이다. 이런 상황을 고려하여 ASME규정에 의하면, reservoir는 정상작업압력보다 최소 40psi 높은 압력에 맞도록 설계되어야 한다. 안전밸브를 통한 열매체의 손실을 줄일 수 있는 또 다른 방법은 안전밸브와 증발기 사이에 과열판(rupture disk)을 설치하는 것이다.

대부분의 부식문제는 화학물질의 설비를 오염시킴으로써 발생한다. 공정측에서 발생한 누출 오염이 열전달 장치를 손상시킨다. 이 때 발생하는 손상의 정도는 오염의 크기와 형태에 달려 있다.

4. 사고 사례

열매체와 관련한 사고 사례는 아래 표와 같다.

열매체와 관련된 사고 사례

날짜	회사명	피해액(원)	사망/ 부상	사고 내용
87.3.6	고려염직	2백2십만	0/15	배관 폭발 및 화재
93.1.28	럭키MMA	-	1/0	반응기 열매 충전중 물질의 위험성 조사 미흡으로 열매분출
94.3.4	태광산업	1척4천만	0/2	열매체보일러에서 열매유 노출, 화재. 내부열원으로 폭발.
95.8.2	동양폴리에스터	8십만	0/0	중압보일러의 열매 순환펌프 메카니컬 씰파손으로 열매 누출, 발화.

5. 안전대책

149℃ 이하의 인화점을 갖는 열전달 장치가 비점 이상으로 가열되는 경우에는 증발기(또는 히터)와 사용시설을 분리된 장소 또는 구획된 실에 설치하여야 한다.

증발기와 히터가 공정건물(processing building) 내에 설치되어 있는 경우에는 다음과 같은 대책이 필요하다.

- 자동식 스프링클러 설치
- 주요 시설과 1시간 이상의 내화구조로 구획
- 배관은 견고하게 지지, 가연물과 이격 및 물리적 손상으로부터 보호
- 인접 시설을 보호하기 위하여 경사지고 배수되는 바닥 설치

열매체 및 설비의 제조 또는 공급자가 요구하는 제한 온도가 압력을 초과하여 운전되지 않도록 한다. 사고 방지를 위해서는 유지 관리가 중요하다. 열매체, 히터의 화상면적, 안전밸브 및 제어장치에 대한 정기적인 검사가 이루어져야 한다.

증발기와 히터는 출력온도와 압력에 의해서 자동 제어되도록 한다. 증기상의 설비에 있어서는, 증발기의 액면이 위험스럽게 낮거나 증기압력(또는 온도)이 과도하게 높을 때 히터는 자동적으로 차단시키고 경보를 발할 수 있는 safety limit switch를 설치한다. 액체 순환 설비에 있어서는 limit switch가 저액면 차단과 더불어 액 온도가 과도하게 높거나 순환율이 낮을 때 히터를 자동적으로 차단시킬 수 있도록 설치한다.

스팀이나 불활성 가스를 이용할 수 있는 장소

에서는 화실에 수동식 스팀(또는 불활성 가스) 소화 설비의 설치가 권장된다. 증발기에 화재가 발생하면 다음 조치를 취한다.

- 가열장치를 차단시킨다.
- 스팀(또는 불활성 가스) 소화설비를 개방하거나 또는 화실 개구부에 B급 소화기를 사용한다.
- 증발기 바닥에서 누설되지 않는 한, 화재가 진화 되고 설비가 냉각되기 전까지는 액체를 배출시키지 않는다. 그렇지 않으면 증발기 드럼과 튜브가

과열된다.

- 필요하다면 증발기내의 액체를 저장탱크로 배출시킨다. 저장탱크가 없는 경우에는 안전한 지역으로 배출한다.

유기 열매체가 파이프 절연재에 누설, 흡수되어 자연발화되는 화재 위험을 감소시키기 위하여 누설의 근원은 제거해야 한다. 耐油시멘트로 누설 위험장소의 절연재를 피복하거나 cellular glass 또는 반사 알루미늄박과 같은 비흡수성 절연재를 사용한다.

단열압축(Adiabatic Compression)

기체를 높은 압력으로 압축하면 온도가 상승한다. 그러므로 압축기 등으로 기체를 고압으로 압축하는 경우에는 斷熱狀態에서 압력이 상승한다. 또한, 압력 상승에 의한 온도 상승도 일어나므로 충분한 냉각시설이 없으면 압축기 오일 및 윤활유가 열분해되어 저온발화물을 생성한다. 따라서 발화물질이 발화하여 폭발을 일으키게 된다.

단열압축에 의한 발화현상은 디젤기관에서 착화원리로 이용하고 있다. 디젤기관에서는 압축비가 13-14로 되어 압축공정의 마지막 단계에서 압축압력이 40kg/cm²에 가까울 때까지 상승하므로 기관 내의 온도는 500℃ 전후로 상승되어 증유의 발화온도보다 훨씬 높은 온도가 된다. 따라서 기관 내에 분사된 증유 방울에 착화될 수 있다. 예로서 지금 체적 v₁의 이상기체를 v₂까지 단열압축할 때, 압축비는 v₁/v₂로 되고, 압력이 p₁→p₂, 온도는 t₁→t₂로 상승된다면,

$$p_1/p_2 = (v_1/v_2)^r$$

$$t_1/t_2 = (v_1/v_2)^{r-1}$$

여기서 r은 기체 비열의 비(c_p/c_v)이다. 공기의 경우, r=1.40이고, p₁=1기압, t₁=293K(20℃)로서 압력비를 변화할 때의 압력과 온도의 관계는 표와 같다.

이 표에서 보면, 압축비를 15 이상으로 하면, 대부분의 물질이 발화온도 이상으로 되는 것을 알 수 있다.

따라서 장치 고장과 파손 등에 의하여 급격하게 공기 및 가스를 압축하는 경우에 발화현상이 일어나, 이 때 과산화물 등 반응이 용이한 물질이 존재하면 작은 압축비에서도 분해폭발이 일어날 수 있다.

따라서 화학공장에서 화재 발생시 착화 원인이 분명하지 않은 상태에서 사고 발생시 단열압축의 원인이 되는 일이 종종 있다.

공기의 단열압축에 따른 압력 및 온도상승

v ₁ /v ₂	p ₂ (atm)	t ₁ (℃)	v ₁ /v ₂	p ₂ (atm)	t ₁ (℃)
1	1.0	20	10	25	462
2	2.6	120	15	44.2	594
3	4.7	181	20	66.0	697
5	9.5	283			