

펌프 양정과 배관경 관계는?

정진문 / 두산건설(주) 광주정보통신센터 현장 차장

펌프는 외부로부터 동력을 공급받아 저수위 또는 저압력 상태에 있는 액체를 고수위 또는 고압력이 있는 곳에 보내는 기계이다.

보통 펌프는 표준형에서 선정되므로 배관계의 설계치에 요구되는 수량이나 양정에 완전하게 일치되는 성능을 갖는 펌프는 거의 없으며, 가령 있다 하더라도 설계양정과 실제 배관의 저항과는 다소 차이가 있게 된다.

그러므로 배관계에 흐르는 실제유량은 설계치대로 흐르지 않는다.

실제 펌프유량은 펌프 성능곡선과 배관계 저항곡선(시스템 곡선)과의 교점으로 표시된다.

그러면 펌프의 성능(양정)과 배관계의 저항치(배관계 마찰저항)와 어떤 상관관계가 있는지 이해하는데 <도면 1>의 아파트 하자사례를 통하여 살펴 봄으로써 조금은 도움이 되리라 믿는다.

이 아파트는 동절기시 난방이 전반적으로 원활하지 못하여 많은 민원이 제기되고 있었으며 특히 저층부가 심한 편이었고 관말측 세대는 더욱 심하게 난방이 되지 않고 있는 실정이었다.

<도면 1>에서 난방의 설계도면을 검토한 결과

① 옥탑층 점선부분에서 리턴배관의 입상관을 공통으로 연결

리턴 입상관을 공통으로 연결할 경우 옥탑층에서 공통으로 연결된 배관을 통하여 난방수가 리턴측으로 흐르지 않고 역으로 흐르는(RELIFE 현상)이 발생할 수 있으며 이를 해결하기 위하여 각 입상관마다 별도의 AAV를 설치하였다.

② 난방배관방식이 전체가 REVERSE RETURN배관으로 되어 있지 않음

난방 입상배관은 REVERSE RETURN이 되지 않아 유량분배가 균등하게 이루어 질 수 없어 각 리턴 입상배관에 유량조절밸브를 설치하여 각 입상배관에 필요한 유량이 흐르도록 조치하였다.

그러나 이러한 조치에도 불구하고 여전히 난방은 기계실에서 제일 가까운 상층부에서부터 난방이 잘되고 기계실과 먼 하층부 세대는 여전히 난방이 불량한 것으로 측정되었다. 따라서 다른 설계상의 문제점이 있는 것으로 판정되어 설계부하에서부터 배관의 설계 및 공사사항의 모든 과정을 재검토하게 되었다.

재검토한 결과 설계부하 계산서상의 각 세대 부하계산은 적정하였다. 그러므로 아파트에 공급되는 공급열량(난방유량) 및 보일러의 용량은 아무 이상이 없는 것으로 판정되었다. 다음

펌프 양정과 배관경 관계는?

에는 펌프양정에 문제가 없는지 검토하였다. 이를 검토하기 위하여 기계실에서 펌프의 작동을 확인한 결과 펌프의 토출측과 흡입측의 차압이 펌프의 양정보다 많은 차이가 있음을 알게 되었다. 이로 인해 펌프양정에 문제가 발생된 것으로 판단되어 각 배관 사이즈에 대한 검토를 실시하게 되었다.

각 입상관의 유량을 선정하여 배관 사이즈를 검토한 결과 배관 사이즈가 전체적으로 작게 선정되었음을 알게 되었고 이는 각 구간의 배관 마찰저항을 증가시켜 최종적으로 펌프양정을 부족하게 하므로써 아파트 전체 세대에 난방수 유량이 적게 공급되므로써 난방이 원활하게 되지 않

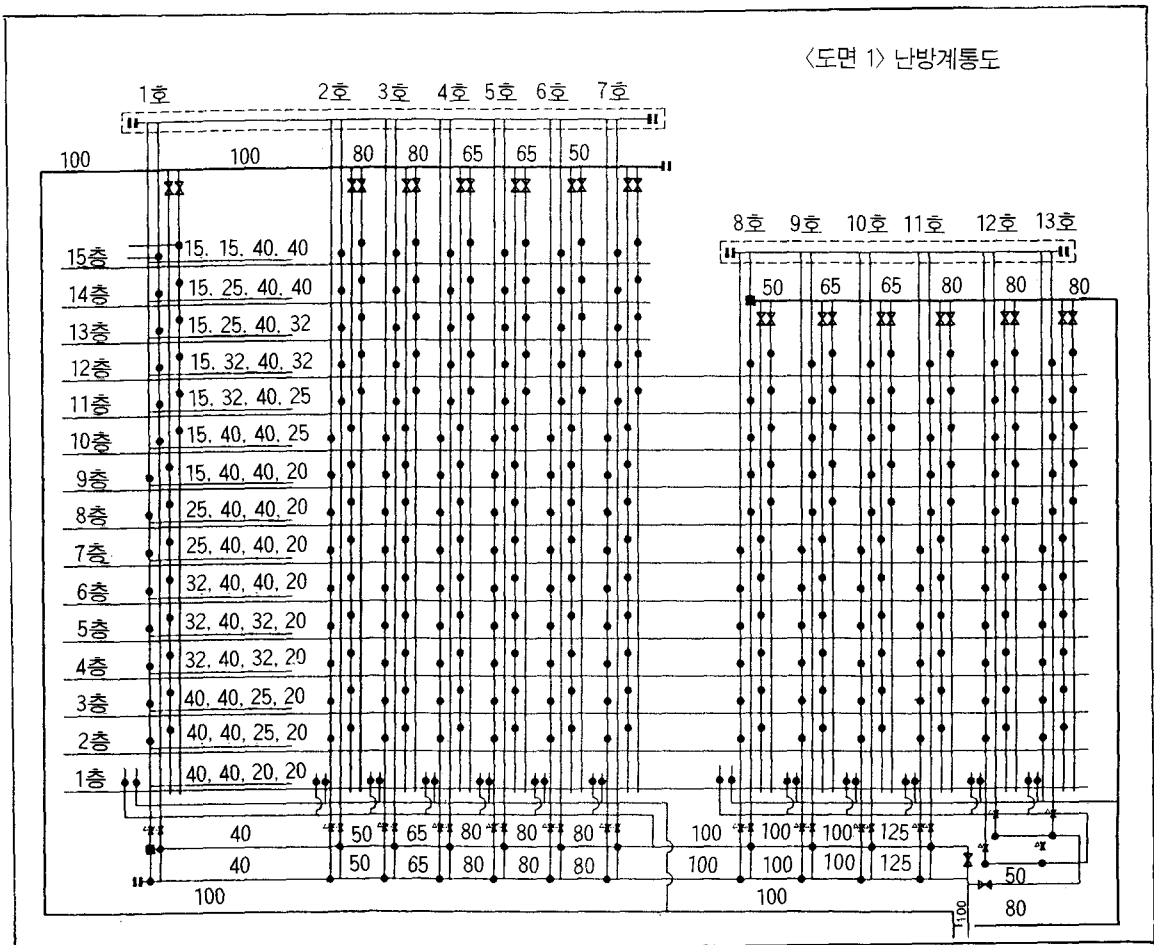
는 현상으로 최종 결론을 내리고 이에 대한 자세한 검토를 실시하였다.

각 배관 구간마다 배관계 마찰저항을 구하여 보면 <표 1>과 같다.

<표 1>에서 배관계 총마찰 저항은 29.103m이며 안전률 10%를 감안하면 $20.103 \times 1.1 = 32.013m$
 ∴ 펌프양정을 32m로 선정(당초 펌프양정은 22m)되었다.

당초의 펌프양정이 22m였으므로 재선정된 펌프양정과 는 무려 10m의 차이가 나므로 당초 펌프로서는 난방수량을 공급할 수가 없다.

<그림 1>(PERFORMANCE CURVE)을 보면 당초 설치된 펌프는 A점에서 운전되도록 선정되



펌프 양정과 배관경 관계는 ?

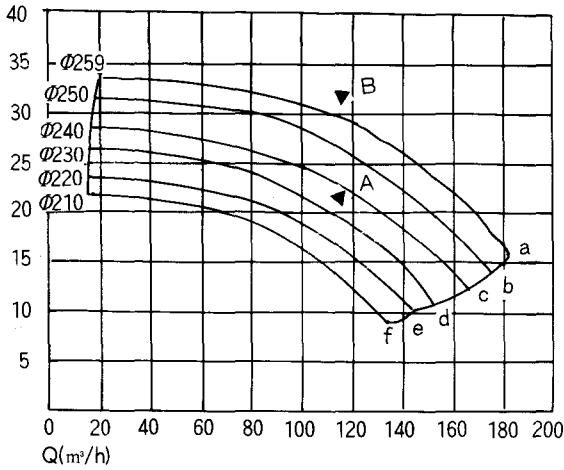
어 있으나 금번에 검토하여 재선정된 펌프 양정은 B점(32m)이므로 당초 설치된 펌프는 <그림 1>의 PERFORMANCE CURVE를 벗어났기 때문에 당 현장에는 부적합한 펌프이며 이 때문에 당초 펌프는 설계상의 난방유량을 공급할 수 없게 되어 있었다.

또한 기계실에서 가까운 상층부 세대부터 난방이 되는 이유는 자동유량밸브를 설치하였다 하나 난방공급방식이 하향식이며 공급되는 난방유량이 부족하므로 자연히 기계실에서 가까운 상층부 아파트 세대에서부터 난방유량이 순환되었고 또 배관내에 유량이 부족하므로써 입상배

<표 1> 각 배관계 마찰저항

마찰계수(mmAq)는 수온 80℃ 기준임

관 경 (mm)	유 량 (LPM)	PIPE 길 이(M)	부속관장			상당장 (M)	마찰저항 (mmAq)	총마찰손 실(mmAq)
			EL	TEE	기타			
125	2,000	33.7	6	0	3	69.5	45	3,127.5
125	1,273	26.2	3	1	4	58.2	18	1,047.6
100	1,010	143.4	20	1	0	228.6	52	11,887.2
100	849	2.0	1	1	0	7.4	27	199.8
100	788	9.0	0	1	0	10.2	23	234.6
100	727	13.0	4	1	0	31.0	20	620.0
100	660	9.0	0	1	0	10.2	17	173.4
100	580	19.0	5	1	0	41.6	14	582.4
80	490	9.0	0	1	0	9.9	39	386.6
80	410	16.0	4	1	0	28.9	29	838.1
80	330	9.0	0	1	1	10.3	19	195.7
65	250	9.0	0	1	1	10.1	24	242.4
50	170	13.0	2	2	1	18.6	42	781.2
40	90	7.1	2	2	0	11.0	46	506.0
40	90	9.0	2	1	0	9.5	46	437.0
40	90	2.6	0	1	0	3.1	46	142.6
40	80	2.6	0	1	0	3.1	38	117.8
40	68	2.6	0	1	0	3.1	35	108.5
40	58	2.6	0	1	1	3.2	20	64.0
32	48	2.6	0	1	1	3.1	32	99.2
32	37	2.6	0	1	0	3.0	19	57.0
25	26	2.6	0	3	1	5.8	34	197.2
25	14	2.6	0	3	1	5.8	10	58.0
소 계		348.2						22,103.3
열교환기						3.0	1	3.0
분배기						1.0	1	1.0
조절밸브						2.0	1	2.0
합계								29.103

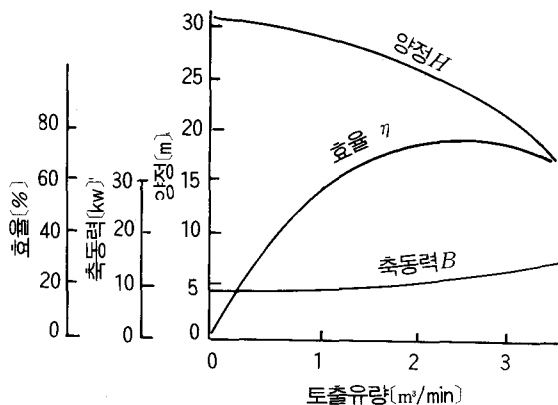


〈그림 1〉 펌프 성능 곡선도

관에 부력현상이 일어날 수 있어 하층부는 더욱 난방이 되지 않은 것으로 판정되었다.

원인이 발견되었으므로 재선정된 펌프의 사양과 동일한 32m 양정의 펌프를 재발주하여 설치한 후 동절기에 다시 난방을 가동하여 확인한 결과 모든 세대에 난방이 원활히 됨을 확인할 수 있었다.

위의 하자사례는 앞에서 언급하였듯이 설계에서부터 문제가 있었으나 공사시에도 이를 발견



〈그림 2〉 펌프의 특성 곡선

하지 못하고 아파트가 준공된 후 동절기에 난방을 가동하면서 민원이 제기된 것이었다. 설계시 또는 공사중에 세밀한 관경에 대한 검토만 수행하였더라면 이러한 하자사례는 발생되지 않았을 것이다.

그러면 여기에서 펌프의 특성곡선을 이해하므로써 펌프의 성능과 배관계 저항이 어떤 상관관계가 있는지를 알아보자.

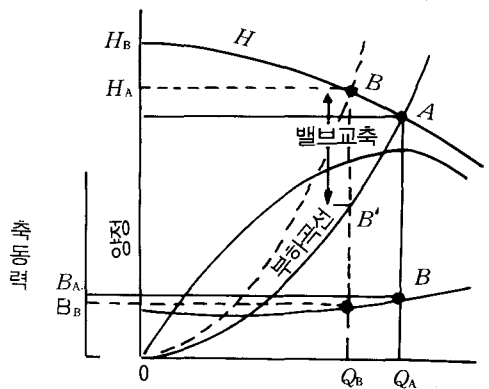
일정 회전수로 회전하고 있는 펌프는 밸브의 개폐에 의한 배관계의 저항이 변하며 동시에 전압정, 토출수량, 전동기 축동력, 펌프효율이 변화한다.

이와 같이 일정 회전수의 펌프성능은 수평축에 토출수량, 수직축에 양정, 효율, 축동력으로 표시한 선도를 펌프의 특성곡선이라 한다.

〈그림 2〉는 펌프 특성곡선의 예이다.

〈그림 3〉은 펌프의 특성곡선에서 배관계의 유량-저항곡선(부하곡선)을 나타낸 것으로 양정곡선과 부하곡선의 교점 A에서 펌프가 운전되며 이점을 설계 사양전으로 하며 이때의 축동력은 B_a , 효율은 η_a 가 된다.

부하가 감소하여 유량이 Q_a 에서 Q_b 로 줄었을 때 배관계의 부하곡선은 점선과 같이 되어 양정



〈그림 3〉 펌프의 특성곡선과 배관계의 부하곡선

곡선과 부하곡선의 교점 B로 운전되어야 한다. 이와같이 배관계의 설비내용이 변경이 없으면 실선의 부하곡선상의 점 B'가 본래의 유량-저항 관계를 나타내고 있는 것으로 B-B'의 양정을 처리하기 위하여서는 밸브를 교축시켜야 한다. 이때 그림과 같이 펌프의 토출유량을 감소하고 펌프양정은 높게 되며 축동력은 적어지고 효율은 저하된다.

이와같이 펌프양정과 배관계 저항곡선(마찰저항)은 밀접한 관계를 가지고 있으므로 설계시나 현장에서도 이에 대한 지식 및 사전검토가 필요하다.

우리는 간혹 경제성을 감안하여 배관경을 작게 선정하는 경우가 있다.

그러나 배관경이 너무 작게 설치될 경우 난방 설비에서는 난방이 되지 않거나 배관내 유속이 너무 빨라서 소음이 발생하여 민원이 일어날 수 있으며, 배관계의 유속이 빠른 경우 침식에도 영향을 줄 수 있다.

이와같이 관경을 결정할 때는 과대한 유속에 의하여 발생하는 소음, 진동과 침식등과 같은 마모의 발생 또는 지나치게 펌프양정을 높게 하여 펌프동력 등에 장애가 발생되지 않도록 관내 유속과 단위마찰손실을 허용범위 내에 적절한 값이 되도록 선정하여야 한다.

필자가 아파트 설계관련 업무를 하면서 경험한 펌프의 양정은 15층 아파트를 기준으로 할 때 약 20m 이내가 되도록 관경을 선정하고, 관내 유

<표 2> 배관내 권장유속

NO	사용개소	권장유속(m/sec)
1	펌프 토출측	2.4-3.6m/sec
2	펌프 흡입측	1.2-2.1m/sec
3	HEADER	0.9(공급관 1.5-3)
4	수직배관	0.9-3.0m/sec
5	일반장치	1.5-3.0m/sec
6	냉각수배관	0.9-2.4m/sec

속은 1.5m/s가 넘지 않아야 소음등의 문제가 없을 것으로 판단되었다.

그러면 여기서 배관내 권장유속을 알아보면 <표 2>와 같다.

이를 다시 권장 마찰손실수두로 알아보면 <표 3>과 같다.

<표 3> 권장 마찰손실수두

NO	사용개소	손실수두(mmAS)
1	급수관	40mmAq
2	난방 세대코일	5mmAq
3	난방 세대메인관	10mmAq
4	기타 난방관	20mmAq
5	급탕관	20mmAq
6	급탕 보충수관	10mmAq

관경에 대한 권장유속을 알아보면 <표 4>와 같다.

<표 4> 관경에 대한 권장유속

NO	사용개소	권장유속(m/sec)
1	Φ 25이상	0.5-1.0m/sec
2	Φ 50-Φ 100	1.0-2.0m/sec
3	Φ 125이상	2.0-3.6m/sec

위의 권장유속을 명심하여 공사에 도움이 되었으면 하는 바램이다. 필자는 난방계통의 입상관에서 부력현상이 발생하는데 배관내 압력이 낮은 경우(펌프양정이 부족한 경우) 이 부력현상은 더욱 심하게 발생하여 저층부 난방은 고층부에 비해 상대적으로 약할 것으로 생각된다. 또한 펌프위치 선정(배관내 압력분포)에서 언급하였듯이 플래시 현상이나 부력현상을 방지하기 위하여는 배관내에 포화압력 이상의 압력을 유지시켜야 하므로 앞으로 펌프양정이나 배관경을 선정할 때 참고가 되었으면 하는 바램이다. 이와 함께 필자는 부력현상도 문헌에 의하면 배관내

<표 5> 강관 급수배관경 선정표

유량 (LMP)	관경(mm)		PIPE 길이 (M)	부 속 관 장												상등장 합계 (M)	총 길이 (M)	마찰 손실 mmAQ/M	총마찰 손실 (mmAQ)	유속 (M/S)
	검토용	설계용		ELBOW90		TEE직류		REDUCER		GATE V.		CHECK V.		신축접수						
				EA	M/EA	EA	M/EA	EA	M/EA	EA	M/EA	EA	M/EA	EA	M/EA					
14	25	20	2.6	3	0.9	1	0.3		0	1	0.2		0	0	3.2	5.8	15.8	91	0.1	
26	25	25	2.6	3	0.9	1	0.3		0	1	0.2		0	0	3.2	5.8	49.9	287	0.7	
37	32	32	2.6		0	1	0.4		0		0		0	0	0.4	3.0	25.1	74	0.6	
48	32	32	2.6		0	1	0.4	1	0.1		0		0	0	0.5	3.1	40.7	126	0.8	
58	40	32	2.6		0	1	0.5	1	0.2		0		0	0	0.6	3.2	27.7	90	0.7	
68	40	40	2.6		0	1	0.5		0		0		0	0	0.5	3.1	37.2	113	0.8	
80	40	40	2.6		0	1	0.5		0		0		0	0	0.5	3.1	50.2	153	1.0	
90	40	40	2.6		0	1	0.5		0		0		0	0	0.5	3.1	62.5	191	1.1	
90	40	40	9.0		0	1	0.5		0		0		0	0	0.5	9.5	62.5	590	1.1	
90	40	40	7.1	2	1.5	2	0.5		0		0		0	0	3.9	11.0	62.5	687	1.1	
170	50	65	13.0	2	2.1	2	0.6	1	0.2		0		0	0	5.6	18.6	64.9	1,207	1.3	
250	65	65	9.0		0	1	0.8	1	0.3		0		0	0	1.1	10.1	37.4	375	1.1	
330	80	80	9.0		0	1	0.9	1	0.4		0		0	0	1.3	10.3	28.6	293	1.1	
410	80	80	16.0	4	3	1	0.9		0		0		0	0	12.9	28.9	42.8	1,236	1.3	
490	80	100	9.0		0	1	0.9		0		0		0	0	0.9	9.9	59.5	589	1.6	
580	100	100	19.0	5	4.2	1	1.2	1	0.4		0		0	0	22.6	41.6	22.6	943	1.1	
660	100	100	9.0		0	1	1.2		0		0		0	0	1.2	10.2	28.8	293	1.3	
727	100	100	13.0	4	4.2	1	1.2		0		0		0	0	18.0	31.0	34.4	1,067	1.4	
788	100	125	9.0		0	1	1.2		0		0		0	0	1.2	10.2	40.0	407	1.5	
849	100	125	2.0	1	4.2	1	1.2		0		0		0	0	5.4	7.4	45.9	339	1.6	
1,010	100	125	143.4	20	4.2	1	1.2		0		0		0	0	85.2	228.6	63.3	14,462	1.9	
1,273	125	125	26.2	3	5.1	1	1.5	1	0.6	1	1	1	10	1	3.6	32.0	58.2	34.7	2,017	1.6
2,000	125	200	33.7	6	5.1	-	0	1	0.6	1	1		0	1	3.6	35.8	69.5	80.0	5,561	2.5
-					0		0		0		0		0	0	0.0	-	-	-	-	-
-					0		0		0		0		0	0	0.0	-	-	-	-	-
			348.2												236.6	584.8		31,193		

에 필요 이상의 압력이 작용하면 문제가 없는 것으로 알고 있으며 이점에 대해서는 누군가 연구, 검토하여 정확한 현상이나 대안이 마련되었으면 하는 바램이다.

마지막으로 당사에서 사용중인 급수관경의 프로그램으로 난방배관을 계산하였을 때 마찰손실 수두가 어떻게 차이가 나는지 비교하여 보면 관경 선정이 어느 정도 중요하지 알 수 있을 것 같아 첨부한다. 여기에서 검토용은 실제 배관된 관경이며 설계용은 프로그램이 관경을 선정한 것임을 밝혀둔다.

검토용(당초배관경) 31.193m와 설계용 15.98

m의 차이는 15m 정도이며 이는 양정이 무려 2배 가까이 차이가 남을 알 수 있다. 이렇듯 관경 선정에 있어 신중한 검토가 필요함을 보여주고 있다. 또한 이러한 프로그램을 개발하여 설계나 공사에 사용하는 것도 좋은 방안이라 할 수 있다.

결론적으로 관경은 빠른 유속에 의한 소음과 진동 또 관내의 부식을 방지하는 범위 내에서 제한하며 배관소음에 의한 장애는 $\phi 50$ 이하는 유속을 1.2m/s 이하로 하며 그 이상의 관경은 마찰손실 40mmAq/m 이하로 유지하므로써 방지할 수 있다.

관내 소음은 일반적으로 유수중에 기포에 의

펌프 양정과 배관경 관계는 ?

〈표 6〉 강관 급수배관경 선정표(설계용)

유량 (LMP)	관경(mm)		PIPE 길이 (M)	부 속 관 장												상등장 합계 (M)	총 길이 (M)	마찰 손실 mmAQ/M	총마찰 손실 (mmAQ)	유속 (M/S)
				ELBOW90		TEE직류		REDUCER		GATE V.		CHECK V.		신축접수						
				EA	M/EA	EA	M/EA	EA	M/EA	EA	M/EA	EA	M/EA	EA	M/EA					
14	25	20	2.6	3	0.8	1	0.2		0	1	0.2		0		0	2.6	5.2	48.9	252	0.6
26	25	25	2.6	3	0.9	1	0.3		0	1	0.2		0		0	3.2	5.8	49.9	287	0.7
37	32	32	2.6		0	1	0.4		0		0		0		0	0.4	3.0	25.1	74	0.6
48	32	32	2.6		0	1	0.4	1	0.1		0		0		0	0.5	3.1	40.7	126	0.8
58	40	32	2.6		0	1	0.5	1	0.1		0		0		0	0.5	3.1	57.8	178	0.9
68	40	40	2.6		0	1	0.5		0		0		0		0	0.5	3.1	37.2	113	0.8
80	40	40	2.6		0	1	0.5		0		0		0		0	0.5	3.1	50.2	153	1.0
90	40	40	2.6		0	1	0.5		0		0		0		0	0.5	3.1	62.5	191	1.1
90	40	40	9.0		0	1	0.5		0		0		0		0	0.5	9.5	62.5	590	1.1
90	40	40	7.1	2	1.5	2	0.5		0		0		0		0	3.9	11.0	62.5	687	1.1
170	50	65	13.0	2	2.4	2	0.8	1	0.3		0		0		0	6.6	19.6	18.3	358	0.8
250	65	65	9.0		0	1	0.8	1	0.3		0		0		0	1.1	10.1	37.4	375	1.1
330	80	80	9.0		0	1	0.9	1	0.4		0		0		0	1.3	10.3	28.6	293	1.1
410	80	80	16.0	4	3	1	0.9		0		0		0		0	12.9	28.9	42.8	1,236	1.3
490	80	100	9.0		0	1	1.2		0		0		0		0	1.2	10.2	16.6	169	0.9
580	100	100	19.0	5	4.2	1	1.2	1	0.4		0		0		0	22.6	41.6	22.6	943	1.1
660	100	100	9.0		0	1	1.2		0		0		0		0	1.2	10.2	28.8	293	1.3
727	100	100	13.0	4	4.2	1	1.2		0		0		0		0	18.0	31.0	34.4	1,067	1.4
788	100	125	9.0		0	1	1.5		0		0		0		0	1.5	10.5	14.3	150	1.0
849	100	125	2.0	1	5.1	1	1.5		0		0		0		0	6.6	8.6	16.4	141	1.1
1,010	100	125	143.4	20	5.1	1	1.5		0		0		0		0	103.5	246.9	22.6	5,576	1.3
1,273	125	125	26.2	3	5.1	1	1.5	1	0.6	1	1	1	10	1	3.6	32.0	58.2	34.7	2,017	1.6
2,000	125	200	33.7	6	6.5	-	0	1	0.9	1	1.4		0	1	6.2	47.5	81.2	8.8	716	1.0
-					0		0		0		0		0		0	0.0	-	-	-	-
-					0		0		0		0		0		0	0.0	-	-	-	-
			348.2													268.7	616.9		15,987	

하여 일어나며 배관중의 국부저항에 의한 와류 또는 급격한 압력변화 때문에 일어나는 것이므로 이들 원인을 되도록 적게 할 필요가 있다. 또한 관의 수명은 유속에 관계되고 유속이 크면 유수 중의 기포나 스케일에 의해 침식되고 장기간 동안에 관내 하부면 또는 엘보우 등에 파손을 일으키기도 한다.

그러므로 관경결정은 동력비와 경제성을 비교하여 너무 유속이 느리면 배관이 굽어져 설치비가 많이 들게 되고, 너무 빠르면 동력비와 펌프 설치비가 많아진다. 따라서 이러한 단위마찰이나 관내유속을 결정할 때는 설치비와 동력비의 경

제성과 에너지절약 등을 고려하여 결정해야 하므로 펌프양정을 어떤 범위 내에서 제한하거나 배관이 길고 연간 운전시간이 길수록 유속을 느리게(마찰손실을 적게)하고, 관경이 적은 것은 유속을 느리게, 대형관은 유속을 빠르게 선정할 필요가 있다.

다만 고온수 배관에서 관내유속이 0.5m/s 이하가 되면 관경 $\phi 150$ 이상에서는 관내에 온도가 다른 층에 생겨서 배관의 상부면과 하부면의 온도차에 의하여 굴절현상이 생기는 경우가 있으므로 평균유속을 1.5m/s 이하로 권장한다.

[※설비]

진하중(일정 가속도 등)을 배관계에 적용해야 한다.

마) 충격하중 - 배관계의 유체 천이로 인한 충격하중을 견디도록 설계해야 한다. 예를 들면 Safety/Relief 밸브 작동시, 주증기관의 Stop 밸브 개폐시의 Steam Hammer등으로 인한 하중이다.

바) 풍하중 - 옥외에 설치되는 배관은 지역 조건에 따른 풍압력을 적용해야 한다.

2. 응력범주(stress categories)

응력범주는 하중조건(loading condition)에 의한 파손형태(failure mode)에 따라 일차응력(primary stresses), 이차응력(secondary stresses)과 절정응력(peak stresses)의 세가지로 구분될 수 있다.

가. 일차응력(primary stresses)

일차응력이란 내부와 외부로 부터 가해지는 힘과 모우멘트에 평형을 이루기 위하여 발생하는 법선응력(normal stress) 혹은 전단응력(shear stress)을 말한다.

이 응력의 특징은 비자율성(not self-limitation)이다. 즉, 부과된 하중이 계속 남아 있는 한 응력은 존재하며 변형에 의하여 응력이 소멸되지 않는다. 예로써 배관자중(dead weight)을 지지하고 있는 배관지지물(pipe support)의 간격에 따라, 배관자중과 내용물들에 의하여 굽힘응력(bending stress)과 처짐이 발생될 것이다. 배관자중과 내용물에 의하여 발생된 응력은 처짐에 의하여 소멸되는 것이 아니고 배관지지물의 간격의 변화에 의하여 감소 혹은 증가된다. 배관지지물의 간격이 어떤 허용치를 벗어나면 큰 응력이 발생되며 결국 파손(Failure)에 도달할 것이다. 또 배관 내부 압력에 의하여 배관벽에 응력이 발생되고 배관 직경이 증가될 것이다. 배관 직경의 증가가 내부압력을 감소시킬 수 없으며

내부압력이 있는 한 배관벽에는 응력이 존재할 것이다. 만일 큰 내부압력이 배관에 작용하면 큰 응력이 발생되고 배관이 파손(failure)될 것이다.

위의 예와 같이 지속적 하중(sustained loads)에 의하여 발생하는 일차응력(primary stresses)들은 한계치를 벗어나면 소성변형 및 파손이 일어난다. 일차응력한계(primary stress limit)는 이를 방지하기 위한 것이다. 원자력 코드에 의하여 일차응력은 다음의 세종류로 나누어질 수 있다.

A. 일반 일차 막응력(general primary membrane stress, P_m): 단면의 두께를 따라서 균일하게 분포되어 있는 두께를 통한 응력의 평균치이다. 예로써 내압에 의해서 배관계에 발생하는 막 응력을 들 수 있다.

B. 국부일차 막 응력(local primary membrane stress, P_L): 구조물이 불연속부(discontinuity)에서 국부적으로 발생하는 막응력을 말한다.

C. 일차 굽힘 응력(primary bending stress, P_b): 법선응력(normal stress)중 두께에 따라 변하는 응력성분을 말하며 단면의 도심으로 부터의 거리에 비례한다. 배관계에서는 자중에 의해 발생하는 굽힘응력이 대표적인 예이다.

나. 이차응력(secondary stresses)

이차응력은 구조물의 자기구속(self-constraint)에 의하여 또는 주변부분(adjacent parts)에 의한 구속에 의하여 발생하는 법선 및 전단 응력을 말한다. 이것은 외력에 대한 평형을 유지하기 위하여 발생된 응력이 아니라 주어진 변형도 형태(strain pattern)를 만족시키기 위해서 발생하는 응력으로써 자율성(self-limiting)을 가진다. 이 응력은 국부적인 항복 또는 작은 변형이 생기면 응력이 유리하게 재분배되므로 이 응력의 한번 작용으로는 파괴되지 않는다. 이 응력의 예로는 열팽창의 구속에 발생하는 응력과 전체적 구조 불연속 부위(gross structural discontinuity)에