

KOSHA GUIDE

M - 105 - 2012

## 배관응력 해석에 관한 기술지침

2012. 6.

한국산업안전보건공단

## 안전보건기술지침의 개요

- 작성자 : 한국산업안전보건공단 임 대 식
- 개정자 : 안전연구실
- 제 · 개정경과
  - 1996년 10월 기계안전분야 제정위원회 심의
  - 1996년 11월 총괄제정위원회 심의
  - 2001년 10월 기계안전분야 제정위원회 심의
  - 2001년 11월 총괄제정위원회 심의
  - 2007년 10월 기계안전분야 제정위원회 심의
  - 2007년 11월 총괄제정위원회 심의
  - 2012년 4월 기계안전분야 제정위원회 심의(개정)
- 관련규격 및 자료
  - ASME/ANSI B31.3 : 석유화학공장 배관설계 지침
- 관련 법규 · 규칙 · 고시 등
  - 산업안전보건 기준에 관한 규칙 제2편 제2장 제4절 제256조(부식방지) 및 산업안전보건기준에 관한 규칙 별표 7
- 기술지침의 적용 및 문의

이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈페이지 안전보건기술지침 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2012년 6 월 20 일

제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

## 배관응력 해석에 관한 기술지침

### 1. 목 적

이 지침은 산업안전보건기준에 관한 규칙(이하 “안전보건규칙”이라 한다) 별표 7의 규정에 의한 화학설비 배관에 있어서 배관계의 내압, 열응력, 자중, 바람, 지진 등에 의한 재해를 방지하기 위하여 배관응력 해석에 필요한 지침을 정하는데 그 목적이 있다.

### 2. 적용범위

이 지침은 안전보건규칙 별표 7의 화학설비의 부속설비 중 배관계의 안전성을 확보하기 위하여 배관응력 해석에 적용한다. 다만, 배관 등의 재질이 비금속인 경우에는 이 지침을 적용하지 아니한다.

### 3. 용어의 정의

(1) 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

(가) “1차 응력”이라 함은 유체 내부압력, 배관 자체의 무게 등의 내력 및 바람, 눈 등의 외력에 의하여 발생하는 응력을 말한다.

(나) “2차 응력”이라 함은 배관계 내부에 흐르는 유체의 온도에 의한 열팽창 응력을 말한다.

(다) “허용응력”이라 함은 사용온도에서의 재질의 허용되는 응력을 말한다.

(라) “허용응력 범위”라 함은 배관계의 정상운전 및 운전정지 등 반복적인 운전상태에 의한 응력이완 현상에 의해 발생하는 응력범위를 말한다.

(마) “배관지지대”라 함은 배관을 지지하는 철구조물을 말한다.

(바) “배관지지물”이라 함은 배관계의 안전성을 유지시켜 주기 위하여 배관계에서 발생하는 배관의 자중, 배관계의 열팽창에 의한 변형, 유체의 진동, 기계진동, 지진 및 기타 외부 충격 등으로부터 배관계를 지지 및 보호하기 위하여 설치하는 장치를 말한다.

(2) 그 밖에 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 이 지침에 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙, 안전보건규칙 및 고용노동부 고시에서 정하는 바에 의한다.

#### 4. 배관 응력해석의 주목적

- (1) 배관의 내압, 열팽창, 자중, 바람, 지진 등의 하중에 대한 배관계의 안전성을 검토한다.
- (2) 배관과 연결되는 기기상의 노즐에 대한 안전성을 검토한다.
- (3) 배관설치와 관련 있는 배관지지대 및 배관지지물의 설계에 필요한 자료를 제공한다.

#### 5. 배관응력 해석시 고려되어야 할 하중

##### (1) 배관자중

배관자체의 무게, 밸브류 등 부속설비 및 보온재 무게를 포함한 하중

##### (2) 유체 내부압력

배관내부에 흐르는 유체의 압력

##### (3) 열팽창에 의한 하중

배관내부에 흐르는 유체의 온도로 발생하는 배관의 팽창 또는 수축에 의한

하중

(4) 바람

배관계의 휨을 유발시키는 풍하중

(5) 지진

지진에 의한 배관계의 흔들림 하중

(6) 진동

펌프, 압축기 등의 회전기기 등에 의한 배관계의 진동 하중

(7) 기타

수격현상 및 공동현상 등 유체의 일시적인 압력상승

## 6. 배관 응력 해석시 필요한 자료

(1) 공정흐름도

온도, 압력, 유량 등을 참조하여 응력해석 업무의 계획을 수립한다.

(2) 공정배관 · 계장도

배관크기 및 보온재 두께 등을 파악한 후 해석하려고 하는 배관의 기능을 검토하여 밸브, 플랜지 및 스트레이너 등의 부속설비를 파악한다.

(3) 배관자재 사양서

배관크기별 재질, 보온재의 재질 및 밸브, 플랜지 및 스트레이너 등의 재질

을 파악한다.

#### (4) 설비 배치도

해석하려고 하는 배관과 연결되는 설비에 대한 위치를 검토한다. 특히 설비의 노즐 크기 및 위치를 확인한다.

#### (5) 철구조물 도면

배관의 구속력을 기초에 전달하는 철구조물의 위치, 높이, 방향 및 부재의 크기를 확인한다.

#### (6) 배관도

모든 배관들에 대한 종합적인 정보가 있는 도면으로서 배관의 위치, 높이 및 방향, 인접배관에 대한 간격 및 각 설비와의 이격거리를 알 수 있어야 한다.

#### (7) 3차원 배관도

개별 배관에 대한 형상을 3차원으로 나타낸 도면으로서 배관 지지점을 포함하여야 하며 전산 입력용으로 활용한다.

## 7. 배관응력 해석 절차

### 7.1 배관응력 해석 흐름도

배관응력 해석 흐름도는 <별표 1>과 같다.

### 7.2 해석 절차

배관응력 해석 절차는 아래와 같다

- (1) 배관 사양서와 배관 목록표를 검토하여 응력 해석 대상 배관을 선정한다.
- (2) 배관도를 검토하며 10.(4)항에 의한 간편한 검증방법을 통해 응력 해석이 필요한 배관을 최종 확정한다.
- (3) 응력 해석에 고려해야 할 하중을 결정하며, 응력 해석 대상 배관에 대한 배관설계 조건을 기록한다.(〈별표 2〉 배관설계 조건표 참조)
- (4) 응력 해석 대상 배관에 대한 응력 해석용 3차원 도면을 작성하며, 이 때 주위 설비위치 및 철구조물 도면을 참조하여 배관 지지점을 선정한다.
- (5) 배관 지지점 선정방법은 KOSHA Code M-20-2002 “배관지지물 설치 및 유지에 관한 기술지침”에 따른다.
- (6) 컴퓨터 프로그램을 사용하여 응력 해석을 수행한다.
- (7) 해석결과, 최대 응력발생 위치와 하중 그리고 노즐 및 배관지지물에 부과되는 하중을 검토한다. 검토시 최대응력이 허용응력 및 허용응력 범위를 초과할 때는 상기 (4)항, (5)항 및 (6)항을 반복 수행한다.
- (8) 반복 수행 결과, 배관계에서 발생하는 응력이 허용응력 범위내에 존재하며, 배관과 연결된 설비의 노즐에 작용하는 하중조건을 확인, 안전성 검토가 완료되면 컴퓨터 프로그램을 사용한 응력 해석을 끝낸다.
- (9) 배관응력 해석 결과에 따라 배관지지물 하중 집계표를 작성하여 배관지지물의 선정 및 구매, 설계업무에 참조한다.(〈별표 3〉 배관지지물 하중집계표 참조)
- (10) 배관응력 해석 결과에 따라 노즐 하중집계표를 작성하여 노즐의 안전성 여부를 재확인한다.(〈별표 4〉 노즐 하중집계표 참조)
- (11) 응력 해석이 완료되면 8항의 검토를 최종적으로 실시하며, 검토 완료 후 관련업무 즉 배관도의 작성, 지지물 설계 업무를 시작한다.

(12) 9.1항의 내용을 포함한 응력 해석 보고서를 작성하여 검토 자료로 보관한다.

## 8. 배관응력 평가기준

- (1) 배관계의 1차 응력에 대한 평가는 각 배관 재료의 허용응력과 비교하여 판정한다.
- (2) 압력과 배관자중 등의 지속하중에 의한 배관계의 1차 응력은 다음 식을 만족하여야 한다.

$$SL = \frac{PDo}{4tm} + \frac{1000(0.75i)Ma}{Z} < 1.0Sh \cdots \cdots (1)$$

여기서 SL : 배관계의 1차응력(kPa)  
P : 배관계 내부의 유체압력(kPa)  
Do : 배관의 외경(mm)  
tm : 공칭 배관두께에서 부식여유를 제외한 배관 두께(mm)  
Z : 배관 단면계수(mm<sup>3</sup>)  
i : 배관 응력 집중 계수  
Ma : 지속하중에 의한 모멘트(N-mm)  
Sh : 배관재료 및 유체 온도에 따른 허용응력(kPa)

- (3) 지진 등 임시 하중을 고려한 배관계의 1차 응력은 다음 식을 만족하여야 한다.

$$SL = \frac{PDo}{4tm} + \frac{1000(0.75i)MA}{Z} + \frac{1000(0.75i)Mb}{Z} < K Sh \cdots \cdots (2)$$

여기서 Mb : 임시하중에 의한 모멘트(N-mm)  
K : 1.2

- (4) 열팽창에 의한 배관계의 2차응력은 다음 식을 만족하여야 한다.



$$SE = \sqrt{Sb^2 + 4St^2} < Sa \cdot \dots \cdot \quad (3)$$

여기서  $SE$  : 배관계의 2차응력(kPa)

$Sb$  : 배관 열팽창에 의한 굽힘응력(kPa)

 $St$  : 배관 열팽창에 의한 비틀림응력(kPa)

*Sa* : 배관계 운전조건에 있어서의 허용응력 범위(kPa)

- (5) 배관계의 2차응력에 대한 평가는 허용응력 범위와 비교하여 판정한다. 허용응력 범위 산출은 아래와 같이 계산한다.

$$S_a = f[1.25(S_c + S_h) - SL] \cdot \dots \cdot (4)$$

여기서

Sa : 허용응력 범위(kPa)

Sc : 운전사이클 내에서의 배관재질의 최소온도에서의 허용응력(kPa)

Sh : 운전사이클 내에서의 배관재질의 최대온도에서의 허용응력(kPa)

SL : 배관계의 1차응력(kPa)

f : 운전사이클수에 의해 결정되는 응력 보정 계수

| 운전 사이클수             | 응력보정계수(f) |
|---------------------|-----------|
| 7,000회 미만           | 1.0       |
| 7,000이상 14,000미만    | 0.9       |
| 14,000이상 22,000미만   | 0.8       |
| 22,000이상 45,000미만   | 0.7       |
| 45,000이상 100,000미만  | 0.6       |
| 100,000이상 200,000미만 | 0.5       |
| 200,000이상 700,000미만 | 0.4       |

## 9. 배관응력 해석의 평가

## 9.1 배관응력 해석 보고서

배관응력 해석 수행 후 모든 자료 및 결과는 문서화하여 검토자료로 보관해야 한다. 이 보고서에는 최소한 다음 사항이 포함되어야 한다.

- (1) 해석적용 코드, 전산프로그램
- (2) 배관응력 해석용 3차원 배관도
- (3) 배관응력 해석에 참고된 자료 및 도면
  - (가) 공정흐름도
  - (나) 공정배관·계장도
  - (다) 배관자재 사양서
  - (라) 설비 배치도
  - (마) 철구조물 도면
  - (바) 배관도
- (4) 설비의 열팽창 변위 계산근거 및 변위량
- (5) 배관설계 조건표(<별표 2> 배관설계 조건표 참조)
- (6) 설비의 노즐하중 집계표 및 검토서(<별표 4> 노즐하중 집계표 참조)
- (7) 고정점을 포함한 배관지지물에 대한 하중, 모멘트 및 변위량 집계표  
(<별표 3> 배관지지물 하중집계표 참조)
- (8) 전산계산 결과물

## 9.2 배관응력 해석 후 검토되어야 할 사항

- (1) 최고 응력이 허용응력 범위내에 존재하는가?
- (2) 설비노즐이 배관계에서 작용하는 하중 및 모멘트에 대하여 안전한가?
- (3) 배관계의 고정점에 과대한 하중이 발생되지는 않는가?

- (4) 배관계의 열팽창 변위 값이 커서 인접 배관과 간섭이 발생하지 않는가?
- (5) 열팽창 변위로 인하여 배수점보다 더 낮은점이 존재하지 않는가?
- (6) 스프링 타입 지지물은 적절한 장소에 설치하였으며, 선정은 적절히 되었는가?
- (7) 배관 처짐량이 2.54 mm 이내에 드는가?

## 10. 열응력 해석의 필요성에 대한 판단기준

- (1) 배관호칭경이 100 mm 이상으로서 설계온도가 120 ℃이상인 배관은 열응력 해석을 수행한다.
- (2) 배관호칭경이 100 mm 미만인 경우에는 설계 온도가 250 ℃이상일 경우에 열응력 해석을 수행한다.
- (3) 아래 배관에 대하여는 별도의 열응력 해석을 수행한다.
  - (가) 펌프의 인입·토출배관으로서 온도가 100 ℃이상 혹은 -20 ℃이하인 배관 호칭경이 50 mm 이상의 배관
  - (나) 발열 반응기의 인입·토출배관
- (4) 간편한 검증방법

배관 배치상 다음 조건을 만족하면 열응력 해석을 하지 않아도 된다.

$$\frac{D \times I}{(L-U)^2} \leq 208.3 \dots \dots \dots (5)$$

여기서      D : 배관의 외경(mm)  
               L : 배관의 총연장 길이(m)  
               I : 배관계에 의해 흡수될 전체 변위(mm)  
               U : 고정단 간의 거리(m)

$$I = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$X$  : X방향에서 흡수될 변위

$Y$  : Y방향에서 흡수될 변위

$Z$  : Z방향에서 흡수될 변위

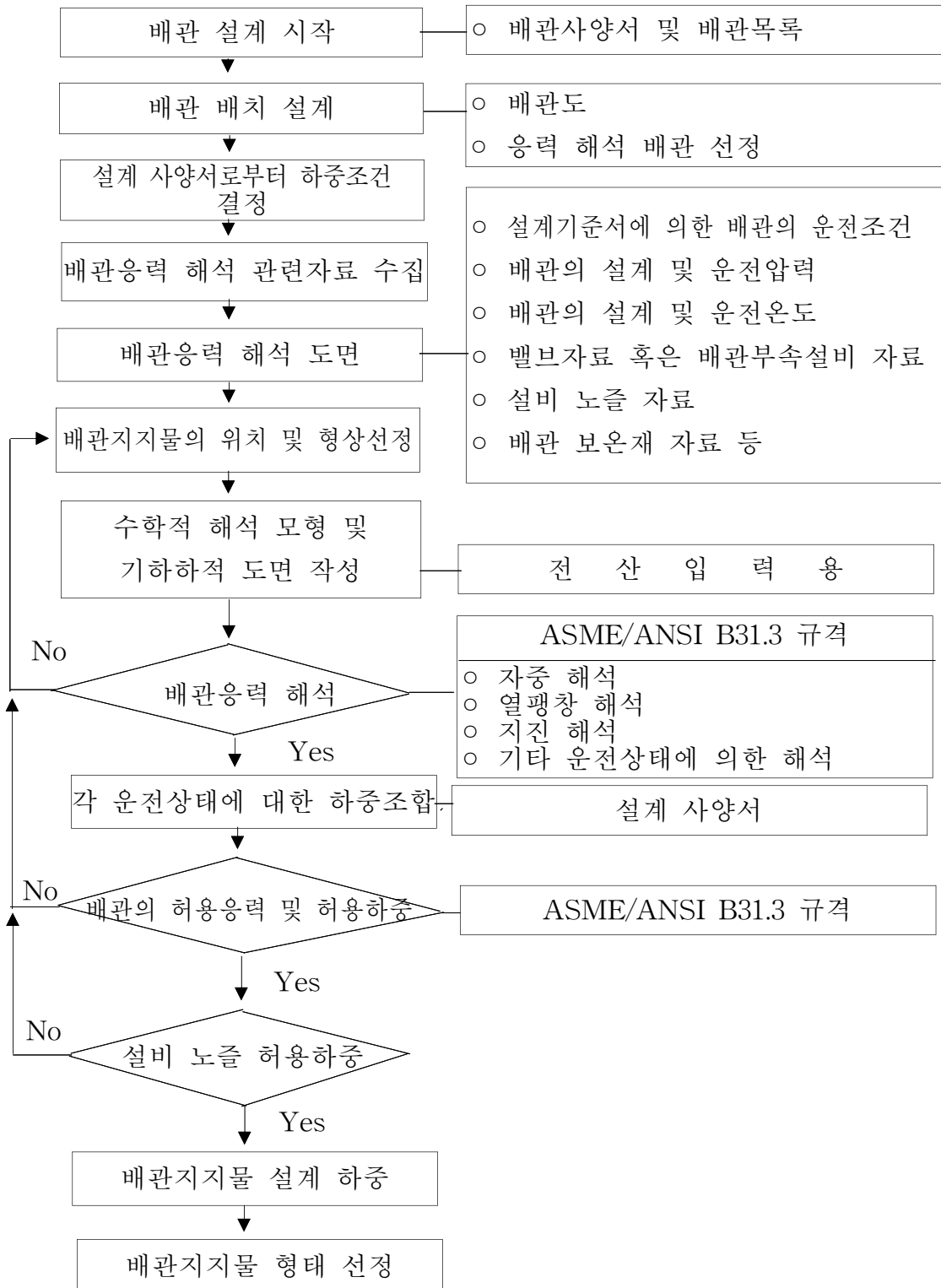
## 11. 열응력 해소 방안

배관계에서 변위량을 흡수하여 열응력을 해소하는 방안은 일반적으로 아래와 같은 방법을 활용한다.

- (1) 배관의 배열(Route)을 조정하여 배관계에 유연성(Flexibility)을 준다
- (2) 배관계에 루프(Loop)을 주거나 벤드(Bend)를 사용한다.
- (3) 장소의 제한을 받아 배관의 배열을 불가피하게 일직선으로 하는 경우는 익스펜션 조인트(Expansion joint)를 사용한다. 익스펜션 조인트를 사용할 시에는 익스펜션 조인트 주위의 배관 지지점 및 지지방법에 주의하여 익스펜션 조인트에 손상이 가지 않도록 한다

## &lt;별표 1&gt;

## 배관응력 해석 흐름도



&lt;별표 2&gt;

## 배관설계 조건표

| 배관            |    | HS-4001-250-A4-H | MS-4025-200-A4-H |
|---------------|----|------------------|------------------|
| 항목            |    |                  |                  |
| 배관호칭경(mm)     |    |                  |                  |
| 배관내경(mm)      |    |                  |                  |
| 배관두께(mm)      |    |                  |                  |
| 배관외경(mm)      |    |                  |                  |
| 배관 재질         |    |                  |                  |
| 설계압력(kPa)     |    |                  |                  |
| 설계온도(℃)       |    |                  |                  |
| 열팽창량(mm/mm℃)  |    |                  |                  |
| 프와송비          |    |                  |                  |
| 탄성계수          | Ec |                  |                  |
|               | Eh |                  |                  |
| 허용응력<br>(kPa) | Sc |                  |                  |
|               | Sh |                  |                  |
| 보온재를 포함한 무게   |    |                  |                  |
| 비             | 고  |                  |                  |

&lt;별표 3&gt;

## 배관지지물 하중 집계표

| 배관지지물<br>종 류 | 방 향 | 힘 또는 모멘트 |      |    | 열 팽창       |            |            | 비 고 |
|--------------|-----|----------|------|----|------------|------------|------------|-----|
|              |     | 자중       | 열 팽창 | 지진 | $\Delta X$ | $\Delta Y$ | $\Delta Z$ |     |
| 앵커           | X   |          |      |    |            |            |            |     |
|              | Y   |          |      |    |            |            |            |     |
|              | Z   |          |      |    |            |            |            |     |
|              | Mx  |          |      |    |            |            |            |     |
|              | My  |          |      |    |            |            |            |     |
|              | Mz  |          |      |    |            |            |            |     |
| 스프링 행거       | Y   |          |      |    |            |            |            |     |
| 고정지지물        | X   |          |      |    |            |            |            |     |
|              | Y   |          |      |    |            |            |            |     |

## &lt;별표 4&gt;

## 노즐하중 집계표

| 노즐<br>하중     | 하중종류  | 힘  |    |    | 모멘트 |    |    |
|--------------|-------|----|----|----|-----|----|----|
|              |       | Fx | Fy | Fz | Mx  | My | Mz |
| 보일러 과열기 출구노즐 | 열 팽 창 |    |    |    |     |    |    |
|              | 자 중   |    |    |    |     |    |    |
|              | 지 진   |    |    |    |     |    |    |
| 터어빈 입구 노즐    | 열 팽 창 |    |    |    |     |    |    |
|              | 자 중   |    |    |    |     |    |    |
|              | 지 진   |    |    |    |     |    |    |
| 보일러 공급수 펌프노즐 | 열 팽 창 |    |    |    |     |    |    |
|              | 자 중   |    |    |    |     |    |    |
|              | 지 진   |    |    |    |     |    |    |