

# 말뚝 기초 (I)

박 용 원\*

## 1. 말뚝 기초 概要

### 1.1 말뚝

기초공학에서 말뚝은 단면 크기에 비하여 길이가 매우 긴 기둥 모양을 한 기초구조물을 말한다. 말뚝은 그 전부 또는 일부가 땅속에 박혀서 상부구조물의 하중이나 주변지반의 토압을 지지력이 더 큰 지반에 전달 분산하는 기능을 가지고 있다. 말뚝은 피어와 케이슨과 마찬가지로 깊은 기초이지만 이들보다 보편화되고 역사 깊은 기초 형태로서 말뚝은 인류가 발명한 가장 오래되고 효과적인 기초일 것이다. 유럽에서는 로마제국 시대에 건설된 교량의 기초에 나무 말뚝이 사용되었으며 중세의 수도원과 교회 건축에 말뚝 기초가 사용되기도 하였다. 동양에서는 漢 시대에 나무 말뚝을 이용하여 교량을 건설하였다. 이와 같이 목재는 양의 동서를 막론하고 좋은 말뚝 기초 재료였으며 19세기 말에서 20세기 초에 이르러 콘크리트 말뚝이 사용되기까지 유일한 말뚝 재료이기도 하였다. 콘크리트 말뚝의 출현으로 목재 말뚝은 대부분 콘크리트 말뚝으로 대체되었지만 목재자원이 풍부한 지역에서는 아직도 많이 사용되고 있다. 2차 세계대전 후에 각국이 급속한 산업 발전을 이룩함에 따라 철강공업이 발달하게 되고 콘크리트 말뚝으로는 관입이 어려운 깊은 굳은 지반에 말뚝을 관입해야 할 필요성이 커지면서 강 말뚝의 사용 사례가 급증하게 되었다. 그러나 아직도 말뚝기초의 대부분은 콘크리트 기초로 이루어지고 있으며 기성 말뚝으로

시공하기 어려운 곳은 현장 말뚝이 시공되고 있는데 굴착장비와 기술의 개발에 힘입어 현장 말뚝도 그 시공 사례가 빠르게 증가하는 추세에 있다.

근래에 구조물이 중량화 대형화 될 뿐만 아니라 악조건 지반에 구조물을 시공하는 사례가 늘어나면서 경제적이고 효과적인 기초로서 말뚝의 중요성과 이용 빈도가 커졌고 아울러 말뚝에 관련된 기술의 발전과 장비 개발이 매우 활발하다. 다만 아쉬운 점은 우리나라에서 이러한 신공법과 신장비의 개발이 외국에 비하여 매우 저조하고 사용되는 말뚝의 종류도 단조로울 뿐만 아니라 자체적인 신기술 개발을 위한 연구투자가 거의 이루어지지 않고 전적으로 외국 기술과 장비 도입에 의존하고 있다는 것이다.

### 1.2 말뚝의 종류

말뚝은 그 구성 재료와 형태, 기능 그리고 제작법 및 시공법이 다른 다양한 종류가 사용되고 있다.

재료 : 나무 말뚝, 콘크리트 말뚝, 강 말뚝

모양 : 횡단면

원형(充實圓, 속빈圓, 管形)

각형(삼각형, 사각형, 육각형, 팔각형)

: 充實形, 속빈형

특수형(H형, 레일형, 상자형)

종단면

矩形(straight), 梯形(tapered),

多段 梯形(step tapered)

\*정회원, 명지대학교 공과대학 토목공학과 교수

하중 전달 : 마찰 말뚝, 선단 지지 말뚝  
 시공 목적 : 압축 말뚝, 인장 말뚝, 횡지지 말뚝, 다짐 말뚝  
 시공 각도 : 연직 말뚝, 경사 말뚝, 組合 말뚝, 재킷 말뚝(jacket pile)  
 제작 시기 : 既成 말뚝(precast pile), 현장 말뚝(cast-in-situ pile)

시공 방법 :

• 기성 말뚝에 대하여 :

- 打入 말뚝(driven pile)
- 壓入 말뚝(jacked-in pile)
- 振動 말뚝(vibrated pile)
- 射水 말뚝(jetted pile)
- 先掘鑿 말뚝(predrilled pile)
- 속파기 말뚝(drilled-in tubular pile)
- 螺絲 말뚝(screwed pile)

• 현장 말뚝에 대하여 :

타입형 : 케이싱을 이용하는 공법 - 無殼 말뚝, 有殼 말뚝

착공형

기계 굴착

- 베노토(Benoto) 말뚝
- 오거 드릴(auger drill) 말뚝
- 逆循環(reverse circulation) 말뚝

인력 굴착

- 시카고(Chicago) 공법
- 가우(Gow) 공법

排土量 :

• 排土(displacement) 말뚝 - 속파기와 선굴착 말뚝을 제외한 모든 기성 말뚝, 타입형 현장 말뚝

• 無排土(non-displacement) 말뚝 - 착공 말뚝, 선굴착 말뚝, 속파기 말뚝

複合 말뚝 :

위에 열거한 분류 항목에서 서로 다른 항목에 해당하는 말뚝이 한구멍에 시공된 말뚝

예 : 목재 말뚝+기성 콘크리트 말뚝

H형 강말뚝+기성 콘크리트 말뚝

강관 말뚝 타설+선단부 굴착후 현장 콘

크리트 타설

### 1.3 말뚝의 기능과 특징

말뚝의 중요한 기능에는 아래와 같은 것들이 있다.

- 1) 상부 구조물의 하중을 지반 깊이 전달하는 기능
- 2) 구조물의 하중을 浸蝕이나 洗掘로부터 안전하도록 지반 깊이 전달하는 기능
- 3) 토압, 수압, 波壓, 氷壓, 선박 충격력 등 수평력 지지 기능
- 4) 揚壓力 등의 引拔力 저항 기능
- 5) 지반 다짐 기능(다짐 말뚝)
- 6) 굴착면 보호 기능

말뚝은 그림 1.1에 보인 것과 같이 여러가지 목적으로 사용되고 있으며 다른 형태의 기초와 다른 많은 특징을 가지고 있다.

- 1) 말뚝은 미리 제작하여 사용할 수 있는 기초 형태이다.
- 2) 말뚝은 거동이 복잡한 지반에 불완전하게 측면 구속된 비강성(非剛性) 구조물이다.
- 3) 말뚝은 細長比가 커서 座屈을 일으킬 수 있는 기초이다.
- 4) 말뚝은 시공법에 따라 지지력이 크게 달라진다.
- 5) 말뚝은 성질이 다른 여러 지층에 걸쳐 시공되는 사례가 많다.
- 6) 설계시에 고려해야할 응력 종류가 많다.

즉,

압축 응력 : 축 하중, 타격에 의한 충격 하중

인장 응력 : 인발 하중, 지반 융기나 말뚝 타격시의 말뚝 튀어오름 등으로 생기는 인장력

휨 응력 : 운반, 취급, 수평 하중, 편심 재하, 말뚝 경사, 말뚝 휨, 지반 이동 등으로 생기는 휨 응력

- 7) 말뚝 재료의 腐蝕에 대한 대비가 필요하다.

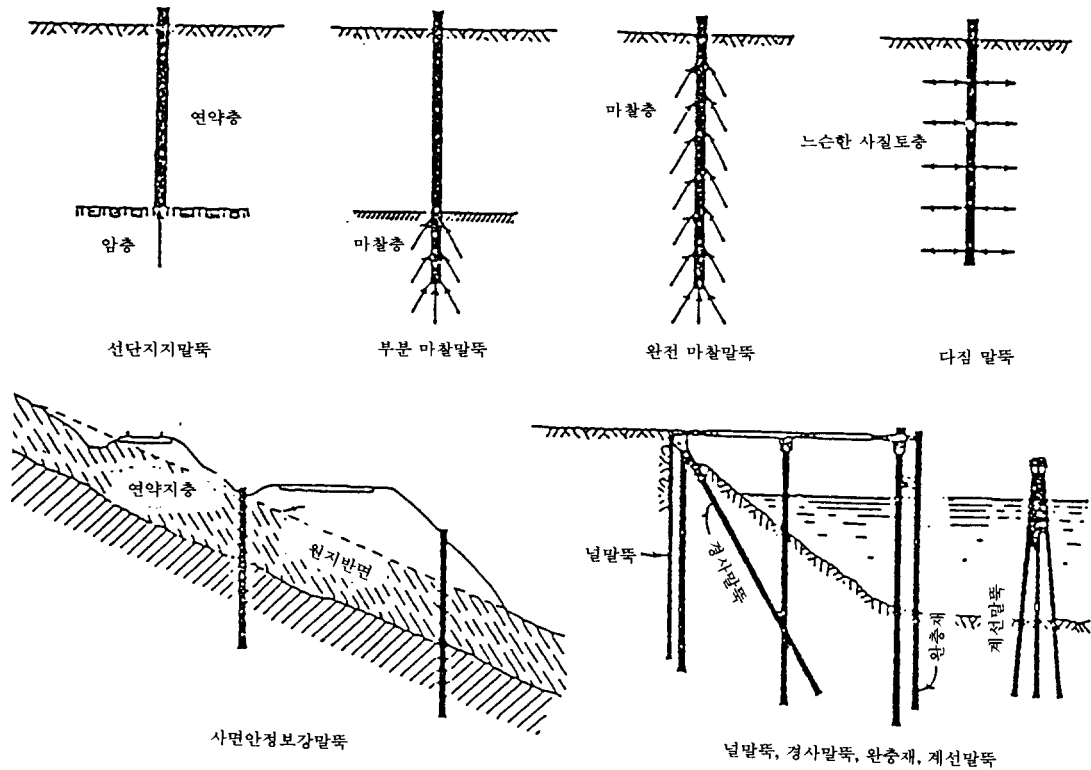


그림 1.1 말뚝의 쓰임새

이와 같이 말뚝은 완전한 강성기초도 완전한 연성기초도 아닌 불완전 강성기초이기 때문에 하중을 받고 있는 말뚝의 거동을 해석, 예측하기가 매우 어렵고, 그점이 말뚝 기초의 지지력과 침하 그리고 수평 변위량 결정의 신뢰도가 높지 못한 원인이다.

#### 1.4 말뚝 기초의 문제점

일반적으로 말뚝 기초에서 말뚝의 파손이나 기초 파괴의 원인에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 지반 조건에 대한 정보 부족
- 2) 토질 분류 잘못과 같은 조사 결과의 誤解析
- 3) 杭打公式 사용 잘못 : 점성토 지반이나 重量長大 말뚝에 대한 항타 공식 사용이나 적정 규모에 미달인 해머를 사용할 경우

항타공식의 신뢰도가 특히 낮으며, 일반적인 경우에도 재하 시험을 병행하지 않은 항타공식 사용은 위험하다.

- 4) 재하시험 해석 잘못 : 短期 載荷로 長期 지지력 결정, 실제와 다른 지층에서 시험, 의 말뚝에 대한 시험 결과를 무리 말뚝에 검토 없이 적용
- 5) 부 마찰력 예측 잘못
- 6) 예측 못한 수평하중 발생
- 7) 인접 지반 굴착 또는 성토로 생기는 지반 이동
- 8) 진동에 의한 연직 또는 수평 변위 발생
- 9) 말뚝 過打撃
- 10) 현장 말뚝 시공중의 공벽 붕괴 또는 콘크리트 타설 잘못으로 발생하는 말뚝 굽김

- 11) 인접 말뚝 시공으로 솟은 말뚝을 재타격하지 않고 기초 시공
- 12) 부적당한 철근 배근에 의한 콘크리트 말뚝의 인장균열 발생
- 13) 취급 부주의에 의해 파손된 말뚝 사용
- 14) 경사 시공, 偏心 시공에 따르는 휨 응력 발생
- 15) 콘크리트 품질 미달
- 16) 지하수위 강하에 따르는 말뚝머리 腐蝕
- 17) 지반 浸蝕, 지반 굴착 등으로 말뚝 횡구속력 감소

이상과 같이 말뚝 기초는 조사, 설계 및 시공 과정을 통하여 瑕疵 발생 요인이 매우 많다. 특히 우리나라 건설 현장에서 흔히 볼 수 있는 현상으로서 지반 조사의 精度가 부족하여 말뚝 지지층을 정확히 예측하지 못하기 때문에 필요 없이 긴 말뚝을 사용하게 되어 말뚝 머리 절단량이 늘어나거나 말뚝 길이가 짧아서 설계에 없는 말뚝 이음을 하도록 하는 것, 지반 조사 자료의 부족으로 안전을 위하여 과도한 말뚝 수를 사용하는 것, 말뚝의 운반 및 취급을 규정대로 하지 않고 부주의하게 다루어 말뚝을 손상 시키는 것, 말뚝 품질에 대한 사전 검사 소홀, 말뚝 타격시 말뚝 머리와 해머 보호를 위한 완충재(cushion)와 캡을 사용하지 않는 것, 시공 위치와 연직성의 정확도가 높지 않은 것, 杭打 관리 소홀로 過打擊과 인접 말뚝의 솟음이 많이 발생하는 것, 재하 시험의 활용도가 극히 낮은 것 등이 있다. 말뚝 기초는 다른 어느 기초 공법 보다도 정밀 조사와 시공이 요구되는 기초 공법이므로 이상과 같은 사항은 하루 속히 개선되어야 할 것이다. 앞으로 무공해 공법과 현장 말뚝 공법의 시공 빈도가 높아지게 되는데 이러한 공법에서는 품질의 사후 확인이 불가능 하므로 시공의 정확도가 보장 되지 않으면 안된다.

### 1.5 말뚝 관련 규정

우리나라 공업 규격인 KS에는 기성 콘크리트 말뚝과 강 말뚝에 관한 것이 있으며 나무

말뚝과 현장 타설 말뚝에 관한 것은 아직 제정된 것이 없고 말뚝 재하 시험에 관한 규정도 아직 제정 되지 않았다. 나무 말뚝은 우리나라에서 거의 사용되지 않고 있으므로 규정의 필요성이 적다고 할 수 있으나 말뚝 재하 시험에 관한 규정은 어서 빨리 제정이 되어야 할 것이다. 현장 타설 콘크리트 말뚝에 대해서는 그 시공법에 따라 건설부 제정 “콘크리트 표준 시방서”의 철근과 콘크리트 관련 규정을 적용하여야 한다. 또한, 건설부 제정 “구조물 기초 설계 기준, 제4장 말뚝 기초”는 말뚝 기초 전반에 관한 지침으로 이용되고 있다. 참고로 KS 규정 중에 말뚝 관련 규정을 열거하면 아래와 같다.

- KS F 4021-91 철근 콘크리트 널 말뚝
- KS F 4201-88 프리스트레스트 콘크리트 널 말뚝
- KS F 4206-85 가압 콘크리트 널 말뚝
- KS F 4301-90 원심력 철근 콘크리트 말뚝
- KS F 4303-90 프리텐손 방식 원심력 PC 말뚝
- KS F 4306-88 프리텐손 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝
- KS F 4307-90 프리텐손 방식 진동 PC 말뚝
- KS F 4602-82 강관 말뚝
- KS F 4603-91 H형 강 말뚝

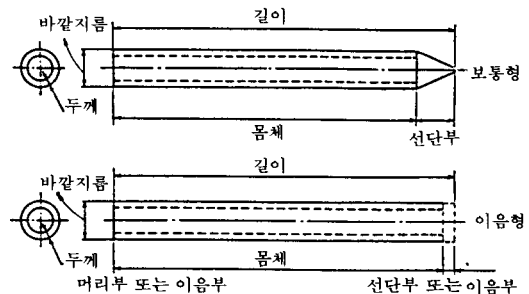


그림 1.2 원심력 말뚝의 모양

- 주(1) 선단부에는 폐쇄형, 개방형 등이 있다. 선단부는 말뚝길이에 포함된다.
  - 주(2) 이음부 또는 머리부는 말뚝의 길이에 포함된다.
- 비고 상부 PC 말뚝 또는 중간부 PC 말뚝에 선단부를 부착하여 하부 PC 말뚝으로 해도 좋다.

- KS F 4604-87 열간 압연 강 널 말뚝
- KS F 7001-88 원심력 콘크리트 말뚝의 시공 표준

위의 여러 규정의 내용 중에서 말뚝 기초 계획에 필요한 중요 사항을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 원심력 철근 콘크리트(RC) 말뚝
  - 종류 : 1종-축 하중 지지용  
2종-축하중+수평 하중 지지용  
(기준 휨 모멘트에 따라 A,B, C로 분류)
  - 모양 : 속빈 원통-그림 1.2 참조
  - 치수 : (바깥지름mm : 최대길이m)  
1종-(200:4), (250:7), (300:12), (350:14), (400:15), (450:15), (500:15), (600:11)  
2종-(300:12), (350, 400:14), (450, 500:15), (600:11)
  - 철근 : KS D 3504 철근 콘크리트용 봉강  
KS D 3510 경강선  
KS D 3527 철근 콘크리트용 재생 봉강  
KS D 3552 철선
  - 콘크리트 : 28일 압축 강도 400kg/cm<sup>2</sup> 이상
  - 양 생  
증기 양생-형틀 속 양생, 최고 온도 65℃, 3일 이상 양생  
수증 양생-탈형 후 6일 이상 양생
- 2) 프리텐손 방식 원심력 PC 말뚝
  - 종류 : A,B,C종-기준 균열 휨 모멘트에 따라 구분  
유효 프리스트레스는 각각 약 40, 80, 100kg/cm<sup>2</sup>
  - 모양 : 속빈 원통(선단 개방형, 폐쇄형), 그림 1.2 참조
  - 치수 : (바깥지름 mm : 최대길이 m)  
(300:13), (350, 400, 450, 500, 600:15), (700:13), (800, 1000:10),

(1200:8)

PC 강재 : KS D 3505(PC 봉강)에 규정한 이형 봉  
KS D 7002(PC 강선 및 PC 강연선)

철근 : RC 말뚝과 같음

콘크리트 : 28일 압축 강도 500kg/cm<sup>2</sup> 이상

- 3) 원심력 고강도 콘크리트(PHC) 말뚝
  - 종류 : A,B,C종-기준 균열 휨 모멘트에 따라 구분  
유효 프리스트레스는 각각 40, 80, 100kg/cm<sup>2</sup>
  - 모양 : 그림 1.2 중에서 平先端 모양(선단 개방형, 폐쇄형)
  - 치수 : (바깥지름 mm : 최대길이 m)  
(300:A-13, B, C-15), (350, 400, 450, 500, 600, 700, 800:15), (900:14), (1000:12)

PC 강재 : KS D 3505(PC 봉강)에 규정한 이형 봉

KS D 7002(PC 강선 및 PC 강연선)에 규정한 PC 강선

철근 : PC 말뚝과 같음

콘크리트 : 양생완료시의 압축 강도가 800kg/cm<sup>2</sup> 이상

- 4) 프리텐손 방식 진동 PC 말뚝
  - 종류 : A,B,C종-기준 균열 휨 모멘트에 따라 구분  
유효 프리스트레스는 각각 25, 50, 80kg/cm<sup>2</sup>
  - 모양 : 그림 1.3 참조
  - 치수 : (바깥지름 mm : 최대길이 m)  
(300, 350, 400, 450, 500, 600, 900, 1200, 1370:7-15) 각형 말뚝은 지름 대신 최소 단면 폭으로 나타냄.
  - PC 강재와 철근 : PC 말뚝과 동일
  - 콘크리트 : 28일 압축 강도가 350kg/cm<sup>2</sup> 이상

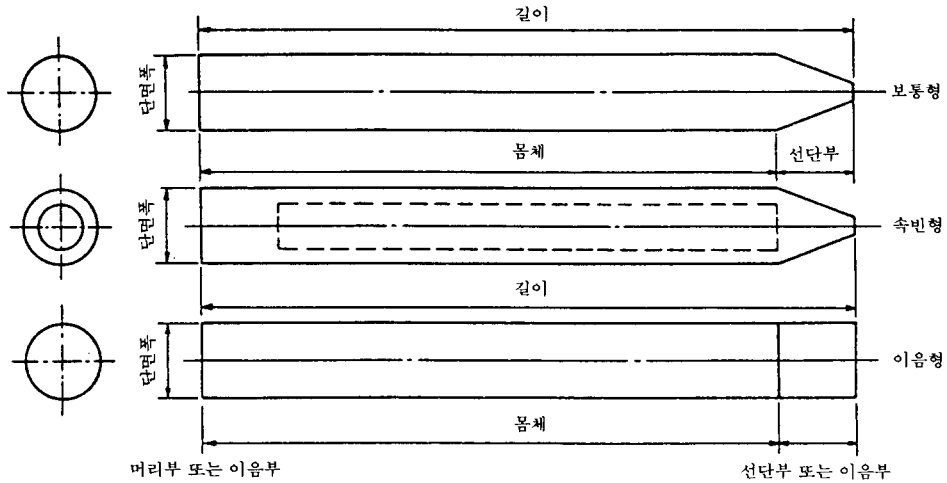
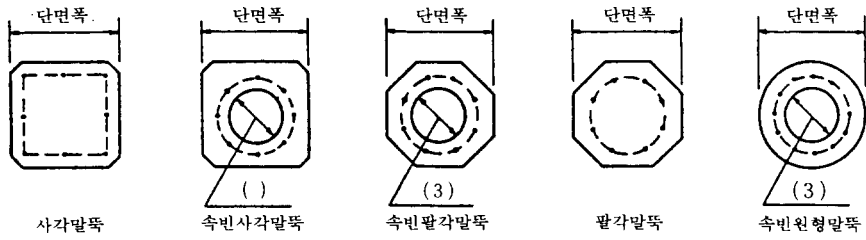


그림 1.3 진동 PC 말뚝

주(1) 선단부는 말뚝길이에 포함된다. (2) 이음부 또는 머리부는 말뚝 길이에 포함된다. (3) 안지름

5) 강관 말뚝

말뚝의 구성 :

말뚝 이음부의 모양 : 그림 1.5 참조

單管의 치수 :

(바깥지름 mm : 두께 mm)

(400:9-12), (500:9-14), (600, 700 :9-16), (406.4:9-12), (508:9-14), (609.6, 711.2, 812.8:9-16), (914.4, 1016:12-19)

단관의 길이는 6m 이상 1m씩 길어지는게 원칙으로 되어 있다.

강관의 재료 :

KS D 3500(열간 압연 강관 및 강대의 모양, 치수 및 그 허용차)

KS D 3566(일반 구조용 탄소 강관)에 규정한 2종(SPS 41) 또는 4종(SPS 50)

6) H형강 말뚝

종류 및 기호 : SHK 400, SHK 400M, SHK 490M

기계적 성질 : 표 1.1 참조

모양 및 치수 : 표 1.1 참조

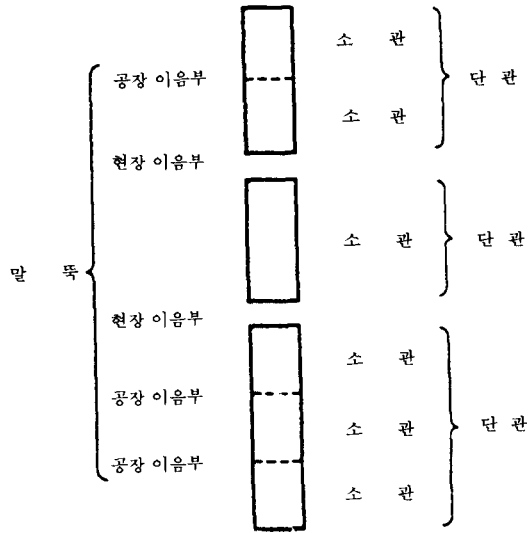
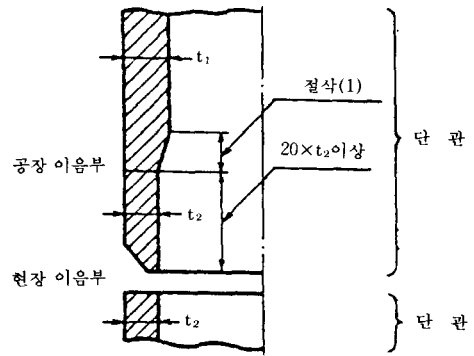
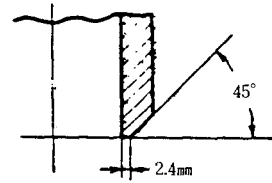


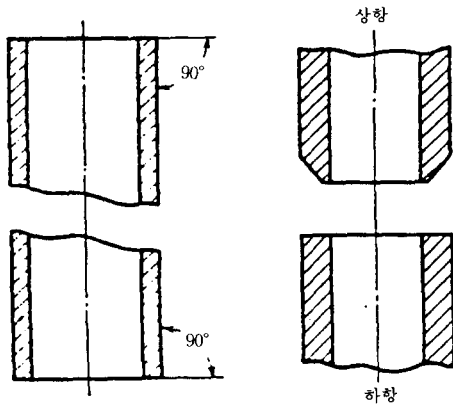
그림 1.4 말뚝의 구성 및 각 부의 호칭



주(1) 관의 내측 절삭부의 길이는  $4(t_1 - t_2)$ 보다 크게 한다. 다만,  $t_1 - t_2$ 가 2mm 이하일 때 또는 공장 이음부를 양면 용접으로 할 때와  $t_1 - t_2$ 가 3mm 이하일 때는 절삭하지 않아도 좋다.

(3) 두께가 다른 관의 이음

그림 1.5 말뚝 및 이음부의 형상

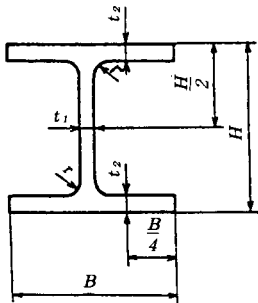


(1) 원구 및 선단부

표 1.1 H-형강 말뚝의 모양과 치수

단면 치수 mm					단면적 A cm <sup>2</sup>	단위 무게 W kg/m	참 고						표면적 m <sup>2</sup> /m
호칭 치수	H×B	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	r			단면 2차 모멘트 I cm <sup>4</sup>		단면 2차 반지름 i cm		단면 계수 Z cm <sup>3</sup>		
							I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	i <sub>x</sub>	i <sub>y</sub>	Z <sub>x</sub>	Z <sub>y</sub>	
200×200	200×204	12	12	13	71.53	56.2	4 980	1 700	8.35	4.88	498	167	1.17
250×250	244×252	11	11	16	82.06	64.4	8 790	2 940	10.3	5.98	720	233	1.45
	250×255	14	14	16	104.7	82.2	11 500	3 880	10.5	6.09	919	304	1.46
300×300	294×302	12	12	18	107.7	84.5	16 900	5 520	12.5	7.16	1 150	365	1.74
	300×300	10	15	18	119.8	94.0	20 400	6 750	13.1	7.51	1 360	450	1.75
	300×305	15	15	18	134.8	106	21 500	7 100	12.6	7.26	1 440	466	1.76
350×350	338×351	13	13	20	135.3	106	28 200	9 380	14.4	8.33	1 670	534	2.02
	344×354	16	16	20	166.6	131	35 300	11 800	14.6	8.43	2 050	669	2.04
	350×350	12	19	20	173.9	137	40 300	13 600	15.2	8.84	2 300	776	2.04
	350×357	19	19	20	198.4	156	42 800	14 400	14.7	8.53	2 450	809	2.06
400×400	388×402	15	15	22	178.5	140	49 000	16 300	16.6	9.54	2 520	809	2.32
	394×405	18	18	22	214.4	168	59 700	20 000	16.7	9.65	3 030	985	2.33
	400×400	13	21	22	218.7	172	66 600	22 400	17.5	10.1	3 330	1 120	2.34
	400×408	21	21	22	250.7	197	70 900	23 800	16.8	9.75	3 540	1 170	2.35
	414×405	18	28	22	295.4	232	92 800	31 000	17.7	10.2	4 480	1 530	2.38
	428×407	20	35	22	360.7	283	119 000	39 400	18.2	10.4	5 570	1 930	2.41
500×500	492×465	15	20	26	259.6	204	118 000	33 500	21.3	11.4	4, 800	1 440	3.44
	502×465	15	25	26	306.1	240	147 000	41 900	21.9	11.7	5 850	1 800	3.59
	502×470	20	25	26	331.2	260	152 000	43 300	21.4	11.4	6 060	1 840	3.60

비고 : 단위 무게의 계산 방법은 KS D 3502(열간 압연 형강의 모양·치수 및 무게와 그 허용차) 7.의 표 5에 따른다.



단면 2차 모멘트  $I = A i^2$

단면 2차 반지름  $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$

단면 계수  $Z = \frac{I}{e}$

여기에서 A : 단면적

