

## 철도분야 매입말뚝 설계기준 및 적용 현황

### Design criteria and Case History of Korean Railway for Auger-drilled Piling

이수형<sup>1)</sup>, Su-Hyung Lee, 최정환<sup>2)</sup>, Jeong-Hwan Choi, 황선근<sup>3)</sup>, Seon-Keun Hwang, 엄기영<sup>3)</sup>, Ki-Young Eum

<sup>1)</sup> 한국철도기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

<sup>2)</sup> 한국철도시설공단 부장, General Manager, Korea Rail Network Authority

<sup>3)</sup> 한국철도기술연구원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Railroad Research Institute

**개요(SYNOPSIS) :** Active application of auger-drilled piling is expected in Korea considering its advantage in noise and vibration problems against driven piling and its cost-effectiveness in comparison to the cast in-situ piling. The current design practice being used in Korea is adopted from the Japanese one, however the equipment and construction procedure is modified for the geotechnical conditions and construction circumstances in Korea. Therefore there is an urgent need for the establishment of the rational design criteria for the auger-drilled piling in Korea. As the preliminary work for the establishment, this paper presents the current practice in Korean railway constructions. Design criteria of Korea Railway Network Authority are introduced and its characteristics and the problems are described. Application cases of auger-drilled pile to railway construction are introduced as well.

**Key words :** auger-drilled piling, design criteria, railway, application cases

## 1. 서론

지반굴착 후 기성말뚝을 삽입하고 압입 또는 경타하는 매입말뚝 공법은 항타공법에 비하여 진동 및 소음이 작고, 현장타설말뚝 공법에 비하여 경제성이 뛰어나므로 향후 그 적용이 증대될 것으로 기대된다. 그러나 기본적인 이론이 일본에서 도입된 반면에 국내에서 사용하고 있는 장비와 시공절차는 국내 시공 및 지반 여건에 따라 변형되어 적용되고 있다. 따라서 일본에서 적용하고 있는 설계방법을 그대로 적용하는 것은 불합리하며 국내 여건에 적합한 합리적이고 경제적인 설계방법의 정립이 필요하다.

이러한 개선 작업을 위한 선행 작업으로써 본 논문에서는 국내 철도분야의 매입말뚝공법 사용 현황에 대하여 기술한다. 매입말뚝공법의 설계에 관련된 한국철도시설공단의 설계기준과 적용사례를 제시하고 그 특성과 문제점을 분석한다.

## 2. 한국철도시설공단의 매입말뚝 관련 설계기준

### 2.1 철도 설계기준 현황 및 개정 계획

한국철도시설공단에서는 철도건설공사의 대형화·환경친화적인 건설 추세 등 발전하는 건설기술을 능동적으로 수용하고 이원화 되어있는 일반철도와 고속철도의 건설기준을 일원화하여 불분명한 철도건설기준의 상·하위 기준체계를 정비하기 위하여 철도 건설 관련 기준을 2008년~2009년도에 걸쳐 정비할 계획이다. 이는 미래철도 기술발전에 쉽게 적용할 수 있는 유연성을 확보하고 철도계획에서부터 설계,

시공단계까지의 전과정을 체계적이고 일관되게 정리하여 철도건설기준의 표준화를 유도하기 위함이다. 표 1은 철도건설과 관련된 현행기준과 제·개정 기준안을 나타낸 것으로, 이 정비 계획에서는 지금까지 일반철도와 고속철도의 건설기준으로 이원화 되었던 기준을 일원화하고 불분명한 철도건설기준의 상·하위 기준체계를 상위기술수준으로 설계기준, 시공기준(전문시방서), 하위기술기준으로 설계지침, 설계편람으로 정비하는 것을 골자로 하고 있다. 여기서 분류하는 체계별 건설기준의 정의는 아래와 같다.

(1) 설계기준

국가기준으로서 각 시설물별 또는 작업조건에 대해 품질, 강도, 안전, 성능 등 설계조건에 한계(최저한계)를 규정한 기준

(2) 설계지침

기준과 편람의 중간적 성격을 띠고 있으며, 분야별 설계방법에 대한 상세한 기술적 기준을 각 요소별로 정의한 기준

(3) 설계편람

기준이나 지침에 기술하기 곤란한 사항 등을 실무에 쉽게 활용하도록 상세하게 만든 도서

(4) 표준시방서

국가기준으로서 시설물의 안전 및 공사시행의 적정성과 품질확보 등을 위하여 시설물별로 정한 표준적인 시공기준

(5) 전문시방서

공사시방서 작성을 위한 가이드로서 모든 공종을 대상으로 하여 발주처가 작성한 종합적인 시공기준

(6) 공사시방서

표준시방서와 전문시방서를 기본으로 공사의 특수성·지역여건·공사방법 등을 고려하여 기본설계 및 실시설계 도면에 구체적으로 표시할 수 없는 내용과 공사수행을 위한 시공방법, 자재의 성능·규격 및 공법, 품질시험 및 검사, 안전관리계획 등에 관한 사항을 기술한 시공기준

이와 같은 기준체계 하에 각각 철도설계기준, 철도공사전문시방서, 철도설계편람은 통합 개정하고, 철도설계지침은 새롭게 제정할 계획에 있다.

표 1. 한국철도시설공단의 현행 설계기준 및 제·개정 기준안

구분	현행 기준		제·개정 기준안
	일반 철도	고속 철도	통 합
설계기준	· 철도설계기준 - 노반편 2004.12. · 철도설계기준 - 철도교편 2004.12.	· 고속철도 설계기준 - 노반편 20005.9.	· 철도설계기준 - 노반편
시공기준	· 철도공사 전문시방서 - 토목편 2004.12.	· 고속철도공사 전문시방서 - 노반편 20006.4	· 철도공사전문시방서 - 노반편
하위기술 기준	· 철도 설계편람 - 토목편 2004.12.	- -	· 철도설계지침 - 노반편 · 철도설계편람 - 노반편

## 2.2 매입말뚝 관련 설계기준

### 2.2.1 매입말뚝의 정의 및 시공방법에 따른 분류

철도 분야의 이전 설계기준에는 매입말뚝 설계에 관련된 구체적인 항목이 포함되어있지 않으며, 2008년도에 제정된 호남고속철도 설계지침에 매입말뚝공법에 관련된 규정이 도입되었다. 이 설계지침에서는 매입말뚝 공법을 “지반조건 또는 환경조건 등 여러 가지 원인에 의하여 타입시공이 어려울 때 적용하는 타입보조공법”이라고 규정하고 다음의 세 종류의 구체적인 공법을 제시하였다.

- 1) SIP공법 : 오거 스크류 장비를 사용하여 지지층까지 선굴착한 후 시멘트 페이스트 등 주면고결액을 주입, 말뚝을 자중에 의해 관입 및 햄머에 의해 최종 경타 처리하는 공법
- 2) SDA공법 : 오거 스크류로 천공한 후 압축공기에 의해 배토를 하고 1차 시멘트밀크 주입 후 오거 스크류 인발, 말뚝회전 압입 후 2차 시멘트밀크 주입과 케이싱 스크류를 인발하는 공법
- 3) PRD공법 : 상호 역회전하는 내측 샤프트(shaft)와 외측 케이싱(casing)구조를 이용하여 케이싱 내부를 공기 진동으로 천공 후 말뚝매설, 저압 공기 진동으로 강관 내부를 배토하는 공법

### 2.2.3 매입말뚝의 지지력 산정

#### (1) 안전계수의 산정

외말뚝의 허용연직지지력은 극한연직지지력을 소정의 안전율로 나누어 구할 수 있다. 고속철도 설계지침에서 안전율은 일반적으로 3.0을 사용하며, 극한연직지지력을 구하는 방법에 따라 적절한 값을 사용하여야 한다. 외말뚝의 허용연직지지력을 구하는 다른 방법으로 극한선단지지력 및 극한주면마찰력에 각각 안전계수를 곱한 값을 더하여 구하는 방법을 제시하고 있는데, 표 2는 말뚝종류에 따른 안전계수로 타입말뚝 및 현장타설말뚝에 대한 값은 규정되어 있으나 매입말뚝에 대한 값은 규정되어 있지 않아 새롭게 규정할 필요가 있는 것으로 조사되었다.

표 2. 연직지지력에 대한 안전계수

말뚝종류	하중상태	극한선단지지력 안전계수 $a_p$	극한주면마찰력 안전계수 $a_f$
타입말뚝	상시	0.3	0.3
	일시	0.4	0.4
현장타설말뚝	상시	0.3	0.6
	일시	0.3	0.8

#### (2) 정역학적 지지력 공식을 이용한 매입말뚝의 연직지지력 산정

호남고속철도 설계지침에는 매입말뚝의 경우 다음의 표 4와 같이 표준관입시험의  $N$ 치를 이용하여 연직지지력을 산정하는 것으로 규정하고 있다. 이는 일본 건설성의 기준을 그대로 적용한 것으로, 시공법 등이 앞의 2.2.1에서 제시한 국내에서 실제로 많이 시공되는 매입말뚝 시공방법과 불일치 한다는 문제점을 갖고 있다.

표 3. 각종 매입말뚝의 지지력 공식 (호남고속철도 설계지침, 2008)

시공법	선단지지력 산정식	말뚝 선단부의 조건	주면마찰력의 산정식
타격공법	$Q_p = 300\bar{N}A_p$	$\bar{N}$ 은 선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$Q_f = (2\bar{N}_s L_s + \frac{1}{2}\bar{q}_u L_c)U, \bar{N} \leq 50$ $\bar{q}_u \leq 200(\bar{q}_u = 12.5N)$
시멘트 페이스트 주입공법	$Q_p = 200\bar{N}A_p$	$\bar{N}$ 은 선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 50$	$Q_f = (2\bar{N}_s L_s + \frac{1}{2}\bar{q}_u L_c)U, \bar{N} \leq 25$ $\bar{q}_u \leq 100(\bar{q}_u = 12.5N)$
선굴착 고결공법	$Q_p = 250\bar{N}A_p$	$\bar{N}$ 은 선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$Q_f = (2\bar{N}_s L_s + \frac{1}{2}\bar{q}_u L_c)U, \bar{N} \leq 25$ $\bar{q}_u \leq 100(\bar{q}_u = 12.5N)$
선굴착 최종 타격공법	$Q_p = 300\bar{N}A_p$	$\bar{N}$ 은 1D~4D 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$Q_f = (2\bar{N}_s L_s + \frac{1}{2}\bar{q}_u L_c)U, \bar{N} \leq 25$ $\bar{q}_u \leq 100(\bar{q}_u = 12.5N)$
선굴착 최종 경타공법	$Q_p = 250\bar{N}A_p$	$\bar{N}$ 은 1D~4D 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$Q_f = (9L_s + 240L_c)U$
선굴착 확대 고결공법	$Q_p = 250\bar{N}A_p$	$\bar{N}$ 은 1D~4D 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$Q_f = (2\bar{N}_s L_s + \frac{1}{2}\bar{q}_u L_c)U, \bar{N} \leq 25$ $\bar{q}_u \leq 100(\bar{q}_u = 12.5N)$ 주면고결액을 사용 않을 때 $15LU$
속파기 확대 고결공법	$Q_p = 250\bar{N}A_p$	$\bar{N}$ 은 1D~4D 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$Q_f = 15LU$
회전 고결공법	$Q_p = 250\bar{N}A_p$	$\bar{N}$ 은 1D~4D 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$Q_f = (2\bar{N}_s L_s + \frac{1}{2}\bar{q}_u L_c)U, \bar{N} \leq 25$ $\bar{q}_u \leq 100(\bar{q}_u = 12.5N)$ 주면고결액을 사용 않을 때 $15LU$

여기서,  $R_U = Q_p + Q_f$

$R_U$  : 극한지지력(kN)

$A_p$  : 말뚝 선단면적

$U$  : 주면길이(m)

$f_i$  : 말뚝의 주면 마찰력(kN/m<sup>2</sup>)

$N$  : 선단지반의 N치

$\bar{N}$  : 선단에서 아래 1D(D: 말뚝직경) 및 위로 4D의 N치의 평균치

$\bar{N}_s$  : 사질토 N치의 평균치

$L_s$  : 사질토층의 두께(m)

$\bar{N}_c$  : 점성토 N치의 평균치

$L_c$  : 점성토층의 두께(m)

(3) 재하시험을 통한 극한연직지지력의 산정

재하시험과 관련하여 고속철도 설계 지침에는 “외말뚝의 극한연직지지력을 구하는 방법에는 정역학적 방법, 시험결과 이용법, 항타공식 이용법, 재하시험에 의한 방법 등이 있으나, 시험시공 또는 실제 시공시에 반드시 말뚝재하시험을 실시하여 설계지지력을 확인하여야 한다.”라고 규정되어 있다. 매입말뚝의 말뚝 재하시험에 대한 특별한 규정은 제시되어 있지 않으며, 모든 종류의 말뚝에 대하여 아래와 같은 재하시험 회수가 규정되어 있다.

- 압축정재하시험은 지반조건에 큰 변화가 없는 경우 말뚝 250개당 1회 또는 구조물별로 1회의 조건에 맞도록 실시한다.
- 동재하시험은 지반조건에 큰 변화가 없는 경우 표 4의 빈도에 따라 말뚝시공시에 실시한다.

표 4. 말뚝시공시의 동재하시험(End of Initial Driving 방식) 빈도

구분	시험빈도
구조물별 말뚝 수 1~80본 까지	2
구조물별 말뚝 수 1~160본 까지	3
구조물별 말뚝 수 160본 이상	4

**2.2.2 말뚝별 작용 하중 결정을 위한 지반반력계수**

무리말뚝에서 각 말뚝에 작용하는 하중을 구하기 위해서는 각 말뚝의 수직, 수평방향의 강성을 구해야 한다. 이를 위해서는 말뚝을 지지하는 지반의 지반반력계수를 산정하여야 하며, 호남고속철도 설계지침에서는 변형계수를 이용하는 방법을 제시하고 있다. 지반반력계수는 지반의 변형계수를 이용하여 식 (1)과 같이 구한다.

$$k = (\alpha E_0 D^{-3/4}) \delta \tag{1}$$

여기서,  $k$  : 말뚝선단의 지반반력계수 또는 전단지반반력계수 (kN/m<sup>3</sup>)

$E_0$  : 지반의 변형계수 (kN/m<sup>2</sup>)

$\alpha$  :  $E_0$ 의 산정방법 및 하중조건에 따른 보정계수

$D$  : 말뚝선단 직경 (m)

$N$  : 말뚝선단 지반의  $N$  값

$\delta$  : 타입, 현장타설, 선단폐색, 선단개방, 연직방향, 수평방향 등 말뚝종류 및 방향에 따른 계수

이 때 말뚝의 설치방법에 따라  $\delta$ 값을 결정하게 되는데 타입말뚝과 현장타설 말뚝에 대한 값은 표 4와 같이 주어져 있으나, 매입말뚝에 대한 값은 제시되어 있지 않으며, 향후 이에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

표 5. 말뚝종류 및 방향에 따른 δ값

말뚝종류 및 방향		δ
방향	종류 및 선단조건	
연직방향 지반반력계수 (말뚝 선단)	선단폐색 타입말뚝	1.0
	선단개방 타입말뚝	0.2(1/D)
	현장타설말뚝	0.2
연직방향 선단지반반력계수 (말뚝 주변)	선단폐색, 개방 타입말뚝 사질토	0.05
	선단폐색, 개방 타입말뚝 점성토	0.1
	현장타설말뚝	0.03
수평방향 지반반력계수 수평방향 선단지반반력계수 (말뚝선단)	선단폐색 타입말뚝	0.2
	선단개방 타입말뚝	1/3
	현장타설말뚝	0.2(1/D)/3
		0.2

주) 1/D : 환산근입비

### 3. 철도분야 매입말뚝 적용 사례

#### 3.1 호남고속철도 기본설계

표 6은 호남고속철도 광주-오송 구간의 공구별 교량기초에 대한 말뚝공법 적용현황을 나타낸 것이다. 총 5개 공구에 대하여 매입말뚝공법을 52,850본, 682,766m 적용하는 것으로 선정되어, 항타말뚝(22,905본, 339,488m)이나 현장타설말뚝(282본, 10,346본) 공법에 비해 월등히 많이 채택되고 있는 것으로 나타났다. 매입말뚝 공법으로는 SDA공법과 SIP공법이 병행되어 적용되고 있으며, 모두 강관말뚝을 사용하는 것으로 설계되었다. 지지력 산정식으로는 최종타격이 없는 경우에 대한 선단지지력 산정 공식이 일률적으로 채택된 것으로 조사되었다.

표 6. 호남고속철도 광주-오송 구간 교량기초 말뚝공법 기본설계 현황

구 분		수 량		적용 매입말뚝 공법	지지력산정식
		본	m		
1공구	매 입	3,548	33,949	SDA	$250N \cdot A_p + U \cdot f \cdot L$
	항 타	4,963	61,271		
	현장타설	45	798		
2공구	매 입	15,514	190,102	SIP	$250N \cdot A_p + U \cdot f \cdot L$
	항 타	10,408	182,333		
	현장타설	237	9,548		
3공구	매 입	16,608	273,402	SIP, SDA	$250N \cdot A_p + U \cdot f \cdot L$
	항 타	4,654	60,661		
4공구	매 입	10,405	98,272	SDA	$250N \cdot A_p + U \cdot f \cdot L$
	항 타	2,644	33,483		
5공구	매 입	6,775	87,041	SIP, SDA , (+ T4)	$250N \cdot A_p + U \cdot f \cdot L$
	항 타	236	1,740		
합 계	매 입	52,850	682,766		
	항 타	22,905	339,488		
	현장타설	282	10,346		

### 3.2 호남고속철도 제0-0공구 교량기초 설계

#### 3.2.1 교량기초 말뚝공법 형식

표 6은 호남고속철도 제0-0공구 입찰에 참여한 5개 업체의 교량기초로 선정된 말뚝기초 공법을 정리하여 나타낸 것이다. 1개 업체를 제외한 4개 업체에서 소음, 진동 등으로 인한 환경적인 문제가 발생하는 구간에 대해서 매입말뚝공법을 기초공법으로 선정하고 있는 것으로 조사되었다. 매입말뚝 적용시에는 수평 작용하중이 큰 경우에는 강관말뚝, 작은 경우에는 PHC 말뚝을 적용되었다. 매입말뚝 공법으로는 모두 SDA공법을 채택하고 있는 것이 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 반면 현장타설말뚝은 장경간 교각의 하부기초로 작용하중이 비교적 큰 경우에만 채택되고 있는 것으로 조사되었다.

업체 구분	A사	B사	C사	D사	E사
적용 말뚝기초 공법	현장타설말뚝	현장타설말뚝 매입말뚝(SDA)	현장타설말뚝, 매입말뚝(SDA)	현장타설말뚝 항타말뚝 매입말뚝(SDA)	항타말뚝 매입말뚝(SDA)

#### 3.2.2 매입말뚝 지지력 산정 방법

표 8은 호남고속철도 0-0공구 설계에 적용된 매입말뚝에 대한 지지력 산정식 적용 예이다. 적용된 지지력 산정식은 업체별로 차이를 나타내고 있다. 네 개의 입찰 참여 업체 중 세 개의 업체가 호남고속철도 설계지침을 따르고 있으며, 두개의 업체는 가장 보수적인 지지력 산정식인 시멘트페이스트 공법에 대한 산정식을 따르고 있고, 한개의 업체는 선굴착 최종타격공법에 대한 산정식을 따르고 있다. 다른 하나의 업체는 매입말뚝에 대하여 도로교설계기준을 따라 설계한 것으로 조사되었다.

표 8. 호남고속철도 0-0공구 입찰 참여업체의 매입말뚝 지지력 산정방법

구분		매입말뚝 지지력 산정공식			
업체		B사	C사	D사	E사
주면 마찰력	사질토	$1N (\leq 50)$	도로교설계기준	$Q_f = (2\bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c) U$ $\bar{N} \leq 25$ $\bar{q}_u \leq 100 (\bar{q}_u = 12.5N)$	1N
	점성토	5c 또는 $5N (\leq 100)$			5N
선단지지력		$300N (\text{KN/m}^2)$ $q_p/N \leq 300 : l/D \leq 5$ $q_p/N = 300 : l/D > 5$			$Q_P = 200 \bar{N} A_P$

이러한 지지력 산정방법의 불일치는 SDA 매입말뚝 시공방법에 해당하는 지지력 공식이 설계지침에 명확하게 제시되지 않았기 때문에 발생하는 문제점으로 판단된다. 홍원표와 채수근(2007a)는 265개 시험말뚝에 대한 재하시험 결과를 이용하여 SDA 매입말뚝의 단위선단지지력( $q_p$ , kN/m<sup>2</sup>)이 말뚝지반의 N값과 비례관계에 있으며, 점성토지반에서는 N값의 150배가 되고, 풍화토지반에는 N값의 200배가 되며, 사질토지반과 풍화암반에서는 N값의 250배가 된다고 제안하였다. 또한 홍원표와 채수근(2007b)이 80개 말뚝에 대한 재하시험 결과를 분석한 SDA 매입말뚝의 단위주면마찰력(kN/m<sup>2</sup>)에 대한 연구결과에 의하면, 국내에서 SDA공법에 주로 적용되는 물시멘트비가 68%인 시멘트밀크를 사용하는 경우 지반 중

류에 따라 점성토지반, 사질토지반 및 풍화토지반의 단위주면마찰력이  $N$ 치의 2배로 제안되어 모든 토사층에서 동일한 주면마찰지지력 산정식을 적용할 수 있으나, 풍화암반에서는 토사층보다 다소 크게  $N$ 치의 2.5배로 제안할 수 있다고 제안하고 있다. 향후 이러한 시험 결과를 토대로 한 연구 결과가 축적되면 보다 합리적인 매입말뚝의 설계가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결 언

본 논문에서는 국내 철도 분야의 매입말뚝 설계기준과 적용현황을 기술하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 국내 철도분야의 매입말뚝 분야 설계지침은 일본 기준을 도입한 것으로써 국내에서 실제 사용되는 장비 및 시공 여건을 고려하지 못하고 있다. 향후 개편될 예정인 철도분야 설계기준에는 국내 매입말뚝의 시공 및 재하시험 자료의 축적과 관련 연구 결과를 토대로 이에 대한 보완이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.
- (2) 호남고속철도 교량기초의 말뚝공법의 선정에는 소음, 진동이 문제시 되는 구간에 대하여 대부분 매입말뚝공법의 적용을 채택하고 있으며, 매입말뚝 공법 중에는 SDA공법이 주로 선정되고 있는 것으로 조사되었다.
- (3) 매입말뚝의 지지력은 주로 표준관입시험 결과인  $N$ 치를 이용하여 산정되고 있으며, 현재까지는 국내에서 실제 적용되고 있는 매입말뚝 공법에 대한 합리적인 지지력 산정이 이루어지고 있지 못한 것으로 조사되었다. 향후 보다 합리적인 매입말뚝의 지지력 산정을 위해서는 국내 매입말뚝 시공 특성 및 지반 종류에 따른 지지력 산정식의 개발이 필요하며 지반조사 시 표준관입시험의 신뢰성 및 정밀도를 높여야 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 한국철도시설공단 (2008), **호남고속철도 설계지침**
3. 홍원표, 채수근 (2007a), “지지지반의 종류별 SDA매입말뚝의 선단지지력 산정”, 한국지반공학회논문집, 제23권 5호, pp.111-129
2. 홍원표, 채수근 (2007b), “지반종류별 SDA 매입말뚝의 마찰지지력 산정”, 대한토목학회논문집, 제27권, 제4C호, pp.279-292.