

해상 강관말뚝 활용을 위한 방식기법 선정 및 경제성 검토

Economical assessment and selection of corrosion protections for marine steel piles

이주형¹⁾, Juhyung Lee, 이종구²⁾, Jongku Lee, 박재현³⁾, Jaehyun Park, 광기석⁴⁾, Kiseok Kwak, 정문경⁴⁾, Moonkyung Chung

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology
- 2) RIST 강구조연구소 토목구조연구실 책임연구원, Senior Research Engineer, Civil Engineering Research Division, Steel structure Research Laboratory, RIST
- 3) 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology
- 4) 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Introduced was a new anti-corrosive method with improved ease of construction, economy, and durability that could be applicable for steel-composite drilled shaft. The feasibility and economy of sea-water-resistant steel was evaluated under the assumption that it was to substitute carbon steel for steel casing of drilled shaft foundation as a load carrying structural member not just as a sacrifice casing, and that anti-corrosive protection measures as required by the domestic standards was applied. Sea-water-resistant steel was found to cost 30% to 55% more, depending on pile diameter and the type of applied anti-corrosive measures, than carbon steel for the service life time of 70 years: 50% to 90% more for 100 years of service life.

Keywords : anti-corrosive, drilled shafts, steel casing, polyethylene lining, polyurethane lining, metal coating

1. 서론

강관말뚝은 수평하중에 대한 저항력이 뛰어나며 용접에 의하여 쉽게 연결할 수 있기 때문에 항만 구조물 및 교량 기초로 꾸준히 사용하고 있다. 강관말뚝을 해양환경에서 사용할 경우에는 부식에 취약하기 때문에 적절한 방식처리가 필수적이다. 현재 여러 가지 다양한 방식처리 기법들이 있으며 각기 장·단점이 있다. 특히, 대구경 현장타설말뚝에서 희생강관을 구조용 부재로 활용하는 강관합성 말뚝을 위해서는 방식 성능뿐만 아니라 경제성도 중요한 요소이다. 즉, 방식처리 비용이 희생강관을 구조부재로 활용함으로써 얻어지는 경제적인 이익을 넘어서는 안된다.

해상 교량기초로 사용되는 현장타설말뚝 공사에서 희생강관은 그림 1에 나타낸 바와 같이 현장으로 운반, 항타시공, 용접을 통한 길이방향 이음, 강관 내부굴착의 순서로 시공하는데 강관은 연암 상단부까지 근입시키고 연암에서 일정 깊이까지 굴착하여 슬라임을 제거한 후 내부에 콘크리트를 타설하여 기초를 완성한다. 대부분의 경우, 지층은 변동이 심하기 때문에 설계도면상의 근입깊이와 실제 근입깊이는 차이를 보이며 설계도면 보다 실제 강관이 더 길어질 수 있고 짧아질 수도 있다. 따라서, 근입깊이 예측

의 어려움과 운반 및 항타 시공 중 발생할 수 있는 손상 가능성도 포함하여 요구 성능을 도출하였다. 희생강관에 대한 방식기법 요구성능은 그림 2에 나타내었다.

본 연구의 목적은 대구경 현장타설말뚝에서 희생강관을 내해수강으로 대체하고 이에 대한 방식처리를 통하여 강관을 구조재로 활용하기 위한 타당성을 검토하기 위한 것으로써 요구되는 기준 및 성능을 바탕으로 국내외에서 적용하는 방식기법들 중 적용 가능한 기법들을 선정한다. 또한 강관말뚝의 소재로 해수환경에서 내식성이 우수한 내해수강을 적용하는 것을 전제로 방식설계를 통하여 선정된 방식기법들 중 어떤 방식기법이 장기적으로 가장 경제적인지 검토한다.



(a) 희생강관의 운반



(b) 희생강관의 항타



(c) 강관의 용접연결



(d) 내부굴착

그림 1. 대구경 현장타설말뚝에서 희생강관의 시공절차

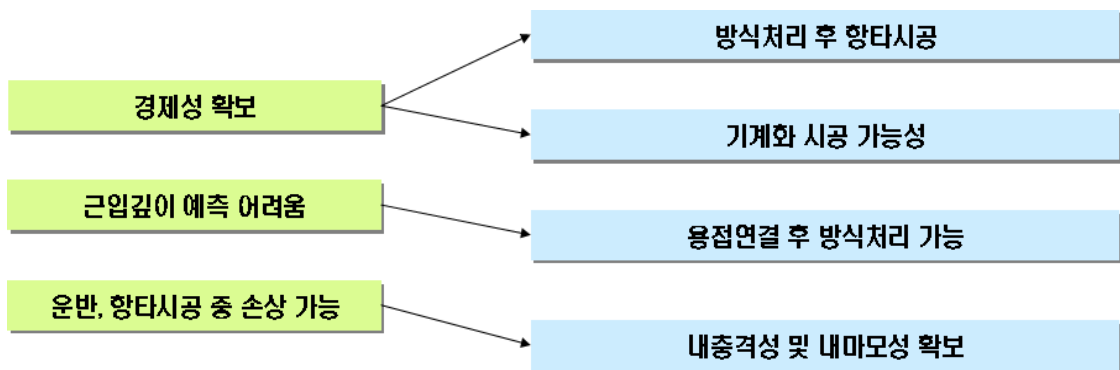


그림 2. 희생강관에 대한 방식기법 요구성능 선정

2. 방식기법 선정

방식처리의 경제성을 확보하기 위해서는 최대한 인건비가 많이 소요되는 수중에서의 시공은 피해야 하므로 방식처리를 한 후에 항타 시공을 하는 것이 유리하다. 또한, 해상 교량에서는 대량의 대구경 강

관을 방식처리해야 하므로 설비가 완비된 공장에서 실시하거나 현장의 작업장에 자동화 설비를 설치하여 대량으로 방식시공하는 것이 경제적으로 유리하다. 또한, 근입깊이 예측이 어려우므로 경우에 따라 방식처리된 강관을 용접하여 연결하여야 하는데 용접부에서는 고열로 인하여 방식층이 손상되므로 이에 대한 처리가 용이하여야 한다. 항타 시공 전에 충분한 여유를 두고 방식처리를 하여 근입깊이 예측의 어려움을 대비하는 것도 필요하다. 운반 및 항타 시공 중에는 방식처리 표면에 손상이 발생할 수 있으므로 충분한 내충격성과 내마모성도 확보하여야 한다. 그 밖에 해상 교량기초이므로 장기적인 내구성도 중요하므로 요구성능에 포함시켜서 적용 가능한 방식기법들을 그림 3와 같이 1차적으로 선정하였다.



그림 3. 방식기법의 선정

선정된 방식기법들의 특징들을 표 1에서 비교하였는데 세라믹 코팅은 장기적인 내구성에 대한 검증이 미비하여 검토 대상에서 제외하고 일본에서 사용하는 티탄 클래드강은 가격이 너무 비싸므로 희생강관을 대체하여 적용하기에는 무리가 있다고 판단하여 제외하였다.

표 1. 선정된 방식기법들의 특징

방식기법		내구연한	경제성*	내충격성 및 내마모성	제한 사항
후막 라이닝	폴리에틸렌	40년 (2.5mm)	50 천원/m ²	△	직경 1,650mm까지 생산 가능
	폴리우레탄	40년 (2.5mm)	80 천원/m ²	○	
세라믹 코팅		20~30년	80~130 천원/m ²	○	엄격한 표면처리 필요
용사코팅		20~40년	108 천원/m ²	○	엄격한 표면처리 필요
티탄라이닝		50년 이상	280~350 천원/m ²	◎	현재 국내 생산 업체 없음

[주] * 2006년 기준

3. 방식설계

3.1 방식설계 단면

선정된 방식기법을 대상으로 직경 1.0~4.0m의 대구경 현장타설말뚝에 대하여 방식설계를 실시한 후 방식처리 비용을 비교하여 경제성을 분석하였다. 대상 말뚝의 해수조건, 지반조건, 그리고 강관말뚝의 길이는 그림 4에 나타내었다. 적용한 강관은 일반적인 구조용 강재인 SS400으로 제작한 것으로 가정하였으며, 강관의 총 길이는 41.0m이다. 방식설계에서 항만 및 어항 설계기준(2005)에 따라 평균 수위면(DL 17.0m) 이하에 대해서는 전기방식공법인 희생양극방식을 강관말뚝 상부에서 삭망 평균간조위(DL 14.0m) 하부 1.0m에 대해서는 도복장 방식을 적용하는 것으로 하였다.

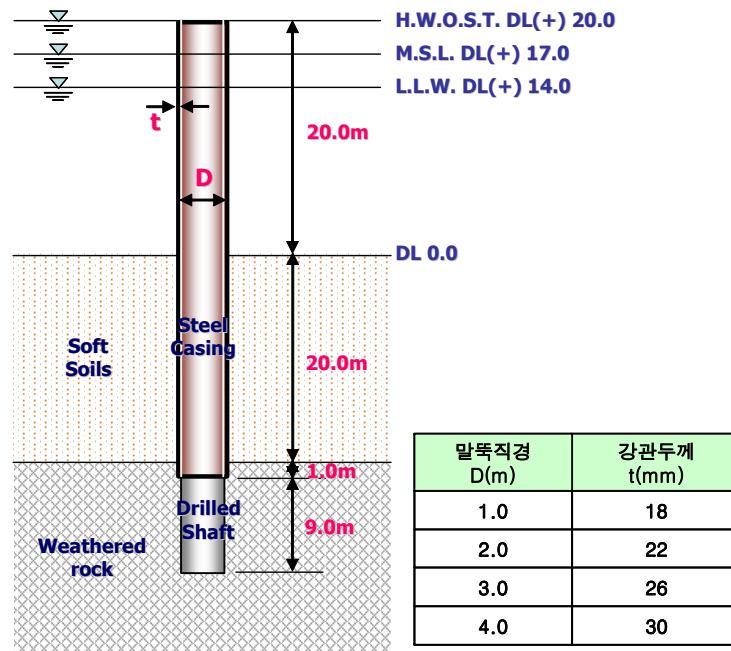


그림 4. 방식설계 적용 단면

3.2 내해수강 대체 효과

희생강관으로 사용하는 SS400과 내해수강인 A690의 기계적인 성질은 표 2에 나타나 있다. 표 2를 통하여 알 수 있듯이 A690은 SS400 보다 항복응력이 40% 가량 크기 때문에 SS400을 A690으로 대체할 경우 두께 절감이 가능하다. 표 3은 말뚝 직경별로 SS400 강관과 동등 이상의 압축강도와 휨강도를 확보하기 위하여 필요한 A690 강관의 두께를 선정된 결과를 나타내고 있다. 표 3을 통하여 알 수 있듯이 SS400 강관과 구조적으로 동등한 성능을 확보하는 A690의 경우 말뚝의 직경별로 5~7mm의 강관두께 절감이 가능하다.

표 2. SS400과 A690의 기계적인 성질

강종	항복응력(MPa)	인장강도(MPa)
SS400	245	400
A690	345	485

표 3. SS400 강관과 동등한 성능의 A690 강관의 두께 산정

직경 (mm)	두께 (mm)	단면적 (cm ²)	단면계수 (cm ³)	허용압축응력 (kg/cm ²)	압축강도 (tonf)	휨강도 (tonf·m)	소재
1,000	18	555	13,387	1,400	777	187	SS400
	13	403	9,817	2,000	806	196	A690
2,000	22	1,367	66,859	1,400	1,914	936	SS400
	16	997	49,069	2,000	1,995	981	A690
3,000	26	2,429	179,046	1,400	3,401	2,507	SS400
	19	1,779	131,767	2,000	3,559	2,635	A690
4,000	30	3,742	368,572	1,400	5,238	5,160	SS400
	23	2,874	284,069	2,000	5,747	5,681	A690

3.3 내구연한 산정

내해수강과 선정된 도복장 방식기법에 대하여 표 4와 같이 내구연한을 산정하였다. 내구연한은 70년과 100년을 기준으로 하였으며, 도복장 방식기법에 의한 내구연한을 40년으로 보고 추가적인 30년과 60년에 대한 내구연한을 내해수강의 부식두께를 공제하는 것으로 가정하였다. 항만 및 어항설계 기준(2005)에 따르면 SS400과 같이 일반 강재를 적용하는 경우에는 비말대에서 부식두께의 공제를 적용하지 않지만 내해수강을 적용함에 따라 국부부식이 발생하지 않으며 부식속도도 일반 강재에 비하여 50% 이상 저하되기 때문에 부식두께를 공제하는 것으로써 추가적인 내구연한을 확보하는 것으로 산정하였다. 내해수강 부식두께 공제를 통한 내구연한 산정근거는 아래와 같다.

- 내구연한 30년 : 0.3mm/년(일반 강재 부식속도) × 0.5 (내해수강 적용) × 30년 = 4.5mm
→ 부식공제 두께 5.0mm 적용
- 내구연한 60년 : 0.3mm/년(일반 강재 부식속도) × 0.5 (내해수강 적용) × 60년 = 9.0mm
→ 부식공제 두께 10.0mm 적용

표 4. 선정된 방식기법의 내구연한 산정

방식기법	내구연한 산정			내구연한 근거
	내해수강 부식두께 공제	도복장 방법	합 계	
내해수강 + 폴리에틸렌	5mm : 30년	폴리에틸렌(2.5mm): 40년	70년	일본 해양구조물의 방식지침·동해설 (1990)
	10mm : 60년	폴리에틸렌(2.5mm): 40년	100년	
내해수강 + 폴리우레탄	5mm : 30년	폴리우레탄(2.5mm): 40년	70년	
	10mm : 60년	폴리우레탄(2.5mm): 40년	100년	
내해수강 + 용사코팅	5mm : 30년	Al 용사코팅(0.38mm): 40년	70년	TRB(2004)
	10mm : 60년	Al 용사코팅(0.38mm): 40년	100년	

3.4 강관 재료비 산정

표 5는 말뚝 직경별 SS400 강관과 A690 강관의 재료비를 비교한 결과이다. SS400 강관의 경우 설계 시 통상적으로 부식 공제두께 2mm를 고려하므로 표 3에서 산정한 강관두께에 부식 공제두께 2mm를 더하여 재료비를 산정하였으며, A690 강관의 경우 내구연한에 따라 산정된 부식 공제두께를 더하여 재료비를 산정하였다. 표 5를 통하여 SS400을 고강도 소재인 A690으로 대체할 경우 강관의 두께절감이 가능하여 내구연한이 70년인 경우는 강관의 재료비가 오히려 감소하였으며, 내구연한 100년을 기준으로 할 경우에도 재료비가 10~20% 정도 증가함을 알 수 있다.

표 5. SS400 강관과 A690 강관의 재료비 비교

직경 (mm)	두께 (mm)	단위무게 (kg/m)	파일 하나의 중량 (톤)	적용단가* (천원/톤)	말뚝본당 재료비 (천원)	소재	비고
1,000	20	483	19.8	840	19,975	SS400	부식공제두께 2.0mm 적용
	18	436	17.9	910	19,516	A690	내구연한 70년, 부식공제두께 5.0mm 적용
	23	554	22.7	910	24,810	A690	내구연한 100년, 부식공제두께 10.0mm 적용
2,000	24	1169	47.9	840	48,332	SS400	부식공제두께 2.0mm 적용
	21	1025	42.0	910	45,884	A690	내구연한 70년, 부식공제두께 5.0mm 적용
	26	1266	51.9	910	56,666	A690	내구연한 100년, 부식공제두께 10.0mm 적용
3,000	28	2052	84.1	840	84,809	SS400	부식공제두께 2.0mm 적용
	24	1761	72.2	910	78,858	A690	내구연한 70년, 부식공제두께 5.0mm 적용
	29	2125	87.1	910	95,126	A690	내구연한 100년, 부식공제두께 10.0mm 적용
4,000	32	3131	128.4	840	129,407	SS400	부식공제두께 2.0mm 적용
	28	2743	112.4	910	122,791	A690	내구연한 70년, 부식공제두께 5.0mm 적용
	33	3228	132.4	910	144,536	A690	내구연한 100년, 부식공제두께 10.0mm 적용

[주] * 2006년 기준

3.5 전기방식 비용 산출

평균수위면 이하에서는 방식을 위하여 희생양극을 설치한다. 필요한 희생양극의 수량은 방식이 필요한 강관의 면적에 비례하여 결정되는데 정확한 수량을 산출하기 위하여 국내에서 전기방식 실적이 많은 업체에서 견적을 받아서 수량과 비용을 산출하였다. 적용한 희생양극은 내구연한이 20년인 제품이므로 70년과 100년의 내구연한을 확보하기 위해서는 사용 중에 각각 3회와 4회의 교체가 필요하며 나머지 내구연한에 대해서는 부식 공제두께를 적용하는 것으로 한다. 항만 및 어항설계 기준(2005)에 따르면 일반 강재의 경우에도 국부적인 부식이 발생하지 않는 해중부에서는 부식두께의 공제가 가능하다. 본 방식설계 단면(그림 4)에 대하여 말뚝 직경별로 소요되는 희생양극의 개수와 소요 비용은 표 6, 표 7과 같다.

표 6. 전기방식에 필요한 희생양극의 수량 및 비용 산출 (내구연한 70년)

직경 (mm)	전기방식 적용길이 (m)	전기방식 면적 (m ²)	희생양극 소요개수(20년용)		단가(천원)		설치비 (천원)	총 비용 (천원)	비고
			B4	B5	B4	B5			
1,000	17.0	53.4	2	0	650	500	120	6,160	3회 교체
2,000	17.0	106.8	4	1	650	500	120	14,800	3회 교체
3,000	17.0	160.2	7	1	650	500	120	24,040	3회 교체
4,000	17.0	213.6	9	1	650	500	120	30,200	3회 교체

표 7. 전기방식에 필요한 희생양극의 수량 및 비용 산출 (내구연한 100년)

직경 (mm)	전기방식 적용길이 (m)	전기방식 면적 (m ²)	희생양극 소요개수(20년용)		단가(천원)		설치비 (천원)	총 비용 (천원)	비고
			B4	B5	B4	B5			
1,000	17.0	53.4	2	0	650	500	120	7,700	4회 교체
2,000	17.0	106.8	4	1	650	500	120	18,500	4회 교체
3,000	17.0	160.2	7	1	650	500	120	30,050	4회 교체
4,000	17.0	213.6	9	1	650	500	120	37,750	4회 교체

3.6 도복장방식 비용 산출

도복장방식은 삭망간조위 하부 1.0m 이상에 대해서만 적용하므로 전체 강관의 길이 41m 중 15m에 대하여 방식처리를 하는 것으로 하였다. 표 1의 방식기법별 단가를 바탕으로 도복장방식 비용을 산출한 결과는 표 8과 같다.

표 8. 도복장방식 비용

말뚝직경 (mm)	도복장방식	길 이 (m)	면 적 (m ²)	단 가 (천원)	비 용 (천원)
1,000	폴리에틸렌(2.5mm)	15	47.12	50	2,356
	폴리우레탄(2.5mm)	15	47.12	80	3,770
	용사코팅	15	47.12	108	5,089
2,000	폴리에틸렌(2.5mm)	-	-	-	-
	폴리우레탄(2.5mm)	15	94.25	80	7,540
	용사코팅	15	94.25	108	10,179
3,000	폴리에틸렌(2.5mm)	-	-	-	-
	폴리우레탄(2.5mm)	15	141.37	80	11,310
	용사코팅	15	141.37	108	15,268
4,000	폴리에틸렌(2.5mm)	-	-	-	-
	폴리우레탄(2.5mm)	15	188.50	80	15,080
	용사코팅	15	188.50	108	20,358

4. 방식기법의 경제성 분석

최종적으로 회생강관의 재료비와 내해수강에 방식처리를 한 경우의 재료비를 비교하여 방식기법의 경제성을 분석하였다. 각 방식설계에 따른 강관 재료비 및 방식처리 비용을 내구연한 70년과 100년으로 구분하여 각각 표 9와 표 10에 정리하였다. 표에서 알 수 있듯이 말뚝직경 및 방식기법에 따라 약간씩 다르지만 전반적으로 내해수강을 적용하고 방식처리를 실시한 경우의 방식처리 비용은 회생강관의 재료비에 비하여 내구연한 70년인 경우 약 30~55%, 내구연한 100년인 경우 약 50~90% 가량 증가하는 것으로 나타났다. 또한 모든 내구연한에서 말뚝의 직경이 증가함에 따라 회생강관의 재료비 대비 방식비용의 비율이 감소하는 것으로 나타나 대구경 현장타설말뚝일수록 방식기법 적용시 더 경제적인 것을 알 수 있다.

말뚝의 경제성 측면에서 살펴보면 방식처리에 따른 비용증가에 반하여, 내해수강에 방식처리를 하여 이를 구조재로 활용할 경우 대략 직경 2,000mm 이상의 강관을 사용한다고 하면 최소 1,000톤 이상의 하중을 지지할 수 있다. 이는 직경 2,000mm인 현장타설말뚝이 약 5,000톤 가량의 하중을 지지할 수 있다고 봤을 때 약 20%에 해당하는 하중으로써, 이를 활용하면 철근이나 콘크리트 양의 절감이 가능하거나 말뚝의 개수의 감소가 가능할 것으로 판단된다. 물론, 강관을 구조재로 활용하기 위해서는 콘크리트와 구조적인 합성거동이 이루어지도록 추가적인 고려가 필요할 것이다.

그리고 본 방식설계 방법들 중 폴리에틸렌 피복강관의 경우에는 국내 생산 최대 직경이 1,650mm 밖에 안 되고 운반이나 항타 시공 중에 코팅층에 손상이 발생할 수 있다는 단점이 있고, 용사코팅 방식은 가격은 약간 고가이나 손상에 대한 저항성이 매우 우수하므로 이를 감안하여 현장여건에 적절한 방식기법을 선정하여야 한다. 향후 용사코팅 방식은 기계화 및 자동화 시공 등을 통하여 경제성이 향상될 수 있으므로 이에 대한 기술개발이 필요하다.

표 9. 총 방식비용 비교 (내구연한 70년)

(단위 : 천원)

말뚝직경 (mm)	회생강관 (SS400) 재료비	A690강관 + 방식처리					비용증가율 (%)
		도복장방식	강관 재료비	전기방식	도복장방식	총비용	
1,000	19,975	폴리에틸렌(2.5mm)	19,516	6,160	2,356	28,032	40
	19,975	폴리우레탄(2.5mm)	19,516	6,160	3,770	29,446	47
	19,975	용사코팅	19,516	6,160	5,089	30,765	54
2,000	48,332	폴리에틸렌(2.5mm)	45,884	-	-	-	-
	48,332	폴리우레탄(2.5mm)	45,884	14,800	7,540	68,224	41
	48,332	용사코팅	45,884	14,800	10,179	70,863	47
3,000	84,809	폴리에틸렌(2.5mm)	78,858	-	-	-	-
	84,809	폴리우레탄(2.5mm)	78,858	24,040	11,310	114,207	35
	84,809	용사코팅	78,858	24,040	15,268	118,166	39
4,000	129,407	폴리에틸렌(2.5mm)	122,791	-	-	-	-
	129,407	폴리우레탄(2.5mm)	122,791	30,200	15,080	168,071	30
	129,407	용사코팅	122,791	30,200	20,358	173,349	34

표 10. 총 방식비용 비교 (내구연한 100년)

(단위 : 천원)

말뚝직경 (mm)	희생강관 (SS400) 재료비	A690강관 + 방식처리					비용증가율 (%)
		도복장방식	강관 재료비	전기방식	도복장방식	총비용	
1,000	19,975	폴리에틸렌(2.5mm)	24,810	7,700	2,356	34,866	75
	19,975	폴리우레탄(2.5mm)	24,810	7,700	3,770	36,280	82
	19,975	용사코팅	24,810	7,700	5,089	37,599	88
2,000	48,332	폴리에틸렌(2.5mm)	56,666	-	-	-	-
	48,332	폴리우레탄(2.5mm)	56,666	18,500	7,540	82,705	71
	48,332	용사코팅	56,666	18,500	10,179	85,344	77
3,000	84,809	폴리에틸렌(2.5mm)	95,126	-	-	-	-
	84,809	폴리우레탄(2.5mm)	95,126	30,050	11,310	136,486	61
	84,809	용사코팅	95,126	30,050	15,268	140,444	66
4,000	129,407	폴리에틸렌(2.5mm)	144,536	-	-	-	-
	129,407	폴리우레탄(2.5mm)	144,536	37,750	15,080	197,366	53
	129,407	용사코팅	144,536	37,750	20,358	202,643	57

5. 결론

본 연구에서는 대구경 현장타설말뚝에서 희생강관을 내해수강으로 대체하고 이에 대한 방식처리를 통하여 강관을 구조재로 활용하기 위한 타당성을 검토하기 위하여 국내외에서 적용하는 방식기법들 중 적용 가능한 기법들을 선정하고, 강관말뚝의 소재로 내해수강을 적용하는 것을 전제로 방식설계를 통하여 선정된 방식기법의 경제성을 검토하여 다음과 같은 결론들을 도출하였다.

- (1) 해상의 대구경 현장타설말뚝에 사용되는 희생강관을 구조부재로 활용하기 위하여 방식기법 적용시 방식기법에 요구되는 경제성, 내구성, 내충격성, 내마모성, 내구연한, 용접부 처리 용이성, 기계화 시공 가능성 등을 바탕으로 국내외에서 적용하는 방식기법들을 특징을 분석하여 폴리에틸렌, 폴리우레탄, 용사코팅 등의 방식기법들을 선정하였다.
- (2) SS400을 사용하는 희생강관을 내해수강인 A690으로 대체하면 항복응력의 증진으로 인하여 두께 절감이 가능하며 이에 따라 20% 가량의 자재비 절감이 가능하다. 또한, 내해수강은 일반 강재 보다 비말대에서 내식성이 우수하여 통상적으로 적용하는 부식공제 두께인 2.0mm를 적용하면 비말대에서도 10년 가량의 추가적인 내구연한을 확보할 수 있다. 내해수강에 대해서는 외국의 자료만 의존하는 실정이므로 향후 국내 해수환경에서 노출실험을 통한 성능평가 및 규정 제정이 필요하다.
- (3) 선정된 방식기법을 대상으로 말뚝직경 1.0~4.0m, 강관길이 41m의 대구경 현장타설말뚝에 대하여 방식설계를 통한 경제성을 분석한 결과, 희생강관을 내해수강으로 대체하고 이에 적절한 방식처리를 하여 구조재로 활용하기 위해서는 내구연한 70년과 100년에 대해 방식처리 비용이 약 30%~90% 가량 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, 강관을 구조재로 활용하게 되면 콘크리트양의 절감이나 말뚝

개수의 절감이 가능하기 때문에 향후 포괄적으로 말뚝의 지지력과 말뚝이 지지하는 하중 등을 감안하여 보다 구체적인 경제성 분석이 필요하다.

참고문헌

1. 일본 연안항만협회 (1990), 해양구조물 방식지침, 동해설
2. 해양수산부 (2005), 항만 및 어항설계기준.
3. Transportation Research Board (2004), Thermally Spayed Metal Coatings to Protect Steel Piling, Final Report and Guide, NCHRP Report 528.