지중송전관로 유동화 뒷채움재의 시공성 평가

Evaluation of Construction Applicability for Slurry Backfill Materials of Underground Power Cable

김대홍[1], Dae-Hong Kim, 조화경[2], Hwa-Kyung Cho, 오기대[3], Gi-Dae Oh, 이대수[4], Dae-Soo Lee

[1] 한전 전력연구원 선임연구원, Korea Electric Power Research Institute / KEPCO (dhkim@kepco.co.kr)
[2] 한전 전력연구원 일반연구원, Korea Electric Power Research Institute / KEPCO
[3] 한전 전력연구원 일반연구원, Korea Electric Power Research Institute / KEPCO
[4] 한전 전력연구원 책임연구원, Korea Electric Power Research Institute / KEPCO

SYNOPSIS : Flow-able backfill is known as soil-cement slurry, void fill, and controlled low-strength material (CLSM). The benefits of CLSM include reduced equipment costs, faster construction, re-excavation in the future, and the ability to place material in confined spaces such as narrow parts nearly impossible for compaction or perimeter of underground power cables. A review of some recent full-scale tests carried out by KEPRI on slurry backfill materials for application in underground power cable was presented. Based on this research, applicability was assessed and compare to results of laboratory tests for improved slurry materials with optimal mixture contents.

Key words : Slurry backfill material, Construction applicability, Underground power cable, Thermal resistivity, Full scale test, Buoyant force

1. 서 론

도심지에서 흔히 지중송전을 위해 건설되는 전력관로는 굴착시 현장잔토를 폐기하고 강모래를 이용해 되메움을 실시하고 있다. 그러나 굴착잔토의 폐기와 모래의 채취는 심각한 환경문제를 야기하며, 공사비 증가 등의 문제가 발생하고 있다. 일반적으로 지중관로는 장소가 협소하기 때문에 다짐이 어려울 뿐만 아니라 강우에 의한 모래 뒷채움재가 유로역할을 하여 함몰의 우려가 있다. 또한 지중송전관로의 경우 송전에 따른 열이 발생하며, 원활한 송전을 위해서는 주변 뒷채움재가 발생한 열을 신속히 발산시켜야 하나, 선행연구결과 (김대홍 등, 2002)에 의하면 모래의 열적특성은 뒷채움재로써 적당하지 않은 것으로 알려져 있다. 이에 따라 현장의 굴착잔토를 이용한 유동화 뒷채움재를 개발하여 활용하면 굴착토를 재활용하고 다짐이 필요없으며, 강우시 안정성 향상을 꾀할 수 있다. 또한 개발된 뒷채움재의 열저항 특성을 평가하여 모래보다 열전도도가 우수할 경우 송전용량을 증대시킬 수 있어 경제적으로도 유리하다. 이에 따라 굴착잔토 및 개발된 고화재를 이용하여 소요의 조기강도 및 장기강도특성을 만족하고 유동성 및 열특성이 우수한 배합비를 선정한바 있다 (천선호 등, 2005).

본 연구에서는 개발된 최적배합비를 갖는 유동화 뒷채움재에 대해 현장실험을 실시하여 시간에 따른 부력을 측정하고 배치플랜트의 타설능력을 평가하였다. 이를 통해 매설관의 변형특성 및 이음부 유입여부, 간격재의 적정성, 도통성 등을 평가하고 현장배합과 실험실 배합과의 물성도 비교하였다. 이를 통해 개발된 유동화 뒷채움재의 시공성을 확인하고 타설에 따른 개선사항을 도출하였다.

2. 시험방법

2.1 시험목표

현장타설 뒷채움재의 물성에 관한 시험목표치는 표 1과 같다. 즉 타설 4시간 경과후 차량이 통행할 수 있는 조기강도를 발현하여야 하며, 추후 유지보수를 위해 재굴착이 가능하도록 장기강도를 제한하였다. 또한 무다짐으로 시공하기 위해 흐름값을 185~205mm 범위로 설정하였으며, 재료분리 방지를 위해 블리딩율을 1%로 제한하였다. 지중송전관로의 특징중 하나인 열저항성은 85cm-℃/w 이하로 설정하여 송전에 의한 열확산율을 증가시키고 원활한 송전이 가능하도록 하여 송전효율을 높이고자 하였다.

표 1. 시험항목 및 목표치

시험항목	적용기준
블리딩률	1% 이하
흐름도	JHS A 313기준 195 ±10mm, ASTM D 6133기준 200mm 이상
일축압축강도	목표 1시간강도 : 0.4kgf/cm^2 이상, 목표 4시간강도 : 1.5kgf/cm^2 이상, 목표 28일 강도 : 8.0kgf/cm^2 이하
열저항성	85cm-℃/w 이하

개발된 현장거치식 배치플랜트의 타설성능은 시간당 10㎥로 설정하였으며, 시간에 따른 부력을 측정하여 매설관의 변형특성과 간격재의 적정성을 평가하였다. 또한 이음부의 수밀성 및 케이블 포설시 도통성 등을 평가하여 시공성을 확인하였다.

2.2 시험 및 평가방법

지중송전관로용 관재는 일반적으로 합성수지 파형관과 합성수지관(PVC)이 사용되고 있으나, 지중전선로용 관재는 합성수지 파형관을 일반적으로 사용하고 있다. 특히, 합성수지 파형관은 지하매설물로 인하여 굴곡개소가 많은 지역, 연약지반 등으로 부등침하의 우려가 있는 지역 등에 사용한다. 합성수지관(PVC관)은 교량 등 특수개소, 지하공간이 협소하여 파형관으로 시공이 어려운 개소 등에 적용하고 있다.

본 실험에 사용한 지중송전관은 내경 200mm PE 파형관을 사용하였으며, 그 제원은 표 2와 같다.

표 2. PE 파형관 규격 (KS C 8455)

항 목	규 격
외 경 (mm)	260
내 경 (mm)	200
최소두께 (mm)	4.0 이상
인장응력 (kgf/㎠)	225 이상
압축하중 (kgf)	312 이상

시험을 위하여 1시간 강도인 0.4kgf/㎠을 측정하기에 적합한 일축압축강도시험기를 설계 제작하였으며 최대압축하중은 200kgf이고 재하속도는 분당 0~5mm이다. 또한 도심지의 통행과 신속한 조립 및 운송이 가능한 배치플랜틀를 제작하여 성능을 검증하였으며, 이와는 별도로 실제 공사현장에서 간편하게 사용할 수 있도록 배합통을 추가적으로 제작하여 적용성을 파악하였다. (그림 1 참조). 모형실험에서는 되메움재 타설속도에 따른 부력측정과 기타 시공성 평가시험을 수행할 수 있는 실험장치를 다음 표 3 및 그림 2와 같이 제작하였다.

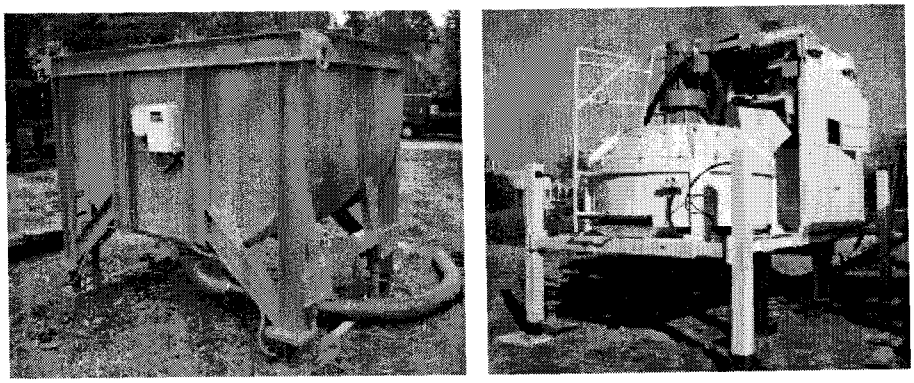

그림 1. 배합통 및 현장거치식 배치플랜트

표 3. 시험체 제원 및 요약표

종 류	목 적	제원(cm) 및 장치	실험결과
A 형	-관로부력측정 -충전성 평가	-144(b)× 142(h)× 150(l) -부력측정장치(로드셀) -중량계량장치(로드셀) -투명판 부착	-되메움제 타설에 따른 관로 부력 실측 -충전성 확인
B 형	-스페이서 개발 -누수확인 -관로변형확인 -배치플랜트작업성 평가	-92(b)× 142(h)× 300(l) -부력측정장치(로드셀) -투명판 부착	-스페이서 초과부력 유무 -이음부 누수현상 확인 -관로 변형 및 도통성 확인 -충전성 확인

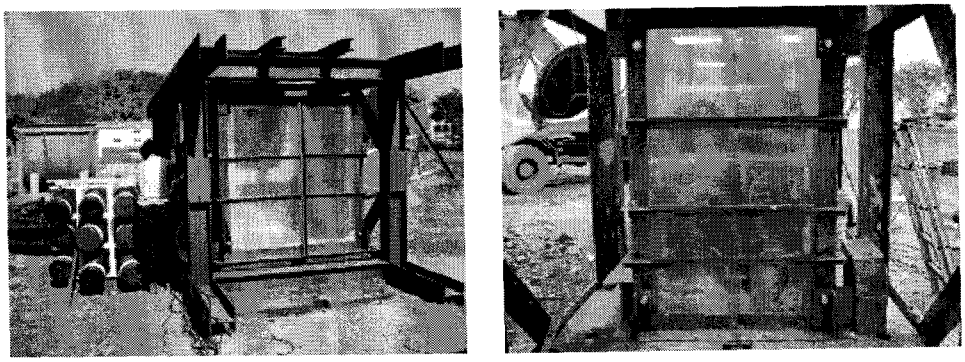

그림 2. 모형 A 및 B

한편, 관로를 설치할 때 관로 간의 적정 간격 및 정위치를 유지하기 위한 간격재(Spacer)가 필요하며, 또한 유동성이 매우 큰 액상의 되메움재를 채울 때 되메움 재료보다 가벼운 관로는 부력에 의한 부유현상으로 이탈현상이 발생하게 되므로, 이를 방지하기 위한 대책이 요구된다. 따라서 관로 설치시의 적정 간격유지(정위치)를 위한 간격재와 부력에 의한 떠오름을 방지할 수 있는 콘크리트 블록(Block) 설치를 고려하였다 (그림 3 참조).

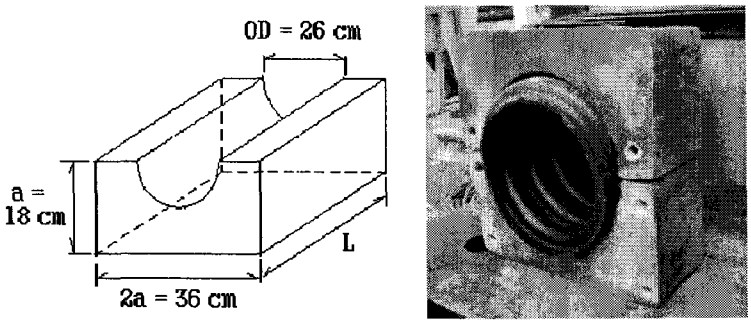

그림 3. 간격재(Spacer) 제작 (관로1열용)

실험은 2차에 걸쳐 수행하였으며 그 단계는 아래 표 4와 같다. 뒷채움재의 배합은 전력연구원 내 현장 시료를 채취하여 실내실험을 통하여 시방배합비를 표 5와 같이 선정하였다. 현장에서는 제시된 배합표를 기준으로 현장함수비를 측정하여 물과 흙의 무게를 조정하여 배합하였다.

표 4. 시험단계별 구분

구분	시험일	수행내역	모형	배합장비	비 고
1차	05-11-08	유동토 부력측정	모형-A	배합통	
2차	05-11-23	부력 및 변위 응력측정	모형-B	배치플랜트	

표 5. 배합기준

구분	시험일	배합구분	시방배합(kgf/m³)			비고
			고화제	물	흙	
1차	11-8	손비빔 배합통	220.0	513.97	1,085.42	배합조정 본배합
2차	11-23	배치플랜트	210.0	531.47	1045.0	시험배합
		배치플랜트	210.0	566.41	953.12	본배합

3. 시험결과

3.1 1차 시험 (배합통을 이용한 배합)

현장함수비는 가스버너건조법과 급속함수비 측정으로 각각 15%와 10%를 얻었으며, 이 결과를 가지고 손비빔으로 흐름도 (flow)를 조정한 결과 11.0%를 선택하여 배합을 하였다. 배합통에 1배치를 2.0m³의 수량으로 먼저 흙 2410kgf, 고화재 440kgf을 투입하여 0.5m³의 버켓의 포크레인을 사용하여 약 5분간 건비빔을 한 후, 물 789kgf를 수조에서 펌프를 사용하여 투입한 후 약 15분간 배합을 하고 슬럼프치를 측정한 후에 유동토를 굴착장비 (back hoe)를 이용하여 모형내부에 투입하였다. 시험결과 배합통의 흐름도는 손비빔보다 약 10% 작게 나타났는데 그 이유는 장비의 배합효율 저하로 혼합시간이 약 20분간 소요되어 고화재에 의한 급결작용으로 유동성이 떨어진 것으로 보여 진다. 따라서 실제 현장에 적용시에는 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 한편, 유동화 뒷채움재의 타설에 따른 부력을 측정하기 위하여 모형-A에 지중전선관 양단을 밀봉한 후에 4열3단으로 직관용 간격재를 알미늄 구조용 각재(30× 60mm)에 고정하여 배열하고 모형상단과 하단부에 하중계 설치 및 타설 시 배합토가 확산되는 것을 방지하는 보호판을 설치한 후 슬러리를 투입 하였다. 실험결과는 그림 4에 나타난 바와 같다.

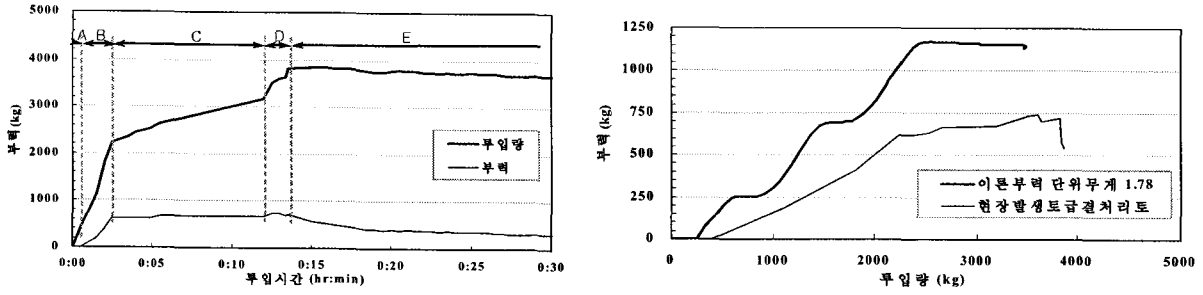

그림 4. 유동토 투입에 따른 부력변화

측정결과, 단위중량 1.78을 고려하여 계산된 이론부력과 비교하면, 63.2% (742.3kgf/㎠)의 최대부력이 나타남을 알 수 있었으며, 최종 타설 종료 후 25분경과 시 측정된 부력은 304.9kg으로 시간경과에 따라 지속적인 감소를 나타내고 있다. 이는 급결고화재 투입으로 시간에 따른 뒷채움재의 유동성이 감소하여 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 타설초기에 나타나는 부력을 정확히 평가하고 투입량 및 투입속도를 조절하여 부력에 의한 관로 간격재가 이탈되는 현상을 방지하여야 할 것이다.

그림 5는 타설 후 1시간이 경과된 다음 거푸집을 제거하고 유동토의 충진상태를 관찰한 사진이며, 관찰결과, 관로주위 협소한 곳까지 충진이 잘 된 것을 알 수 있다.

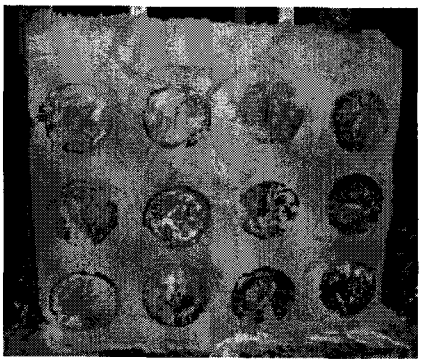

그림 5. 모형 A 거푸집 탈형 후 모습

3.2 2차 시험 (배치플랜트를 이용한 배합)

모형-B에 지중전선관 양단을 밀봉한 후에 그림 6에서 보는바와 같이 2열3단으로 콘크리트 간격재에 고정하여 배열하였으며, 상단에 하중계를 설치하고, 2단 관의 한곳에 관 주위를 따라 45도 간격으로 8군데에 응력계를 설치하였다. 또한 LVDT를 수평 및 연직방향으로 지지점에서 25cm 및 50cm 떨어진 지점에 설치하고, 1단 및 3단 중앙에 관 이음부를 설치하였다.

되메움재의 배합은 예비실험 시 배치플랜트의 시험운전과 성능평가를 통해 배합의 문제점들이 교정된 상태에서 정상적인 배합을 하였으며, 1㎥의 생산을 위해 현장배합에서 얻어진 배합비로 재료량을 계량한 후 1배치에 3분동안 배합을 하고 예비실험과 동일한 펌프카를 사용하여 타설을 하면서 계측을 실시하였다. 토사의 현장함수비는 가스버너건조법과 전자렌지건조법, 급속함수비 측정으로 각각 13.4%와 16.3%, 14.1%를 얻었으며, 이 결과를 가지고 흐름도를 조정한 결과 14.0%를 선정하여 배치플랜트를 이용하여 배합과 타설 하였다 (표 6 참조). 현장함수비에 따라 조정된 배치-1 배합의 경우 흐름도가 203mm가 되었으나 펌프카로 타설하는 중에 흐름도가 감소되어 배치-2로 수정배합하여 모형에 유동토를 타설하였다. 따라서 배치-1의 경우 흐름도만 확인하고 시간에 따른 강도측정은 하지 않았다. 한편, 흐름도값이 감소된 원인은 유동토가 펌프카의 관을 통하여 압송되는 과정에서 공기발생과 일부 불순물 함유에 의한 함수량 감소에 따른 것으로 보인다.

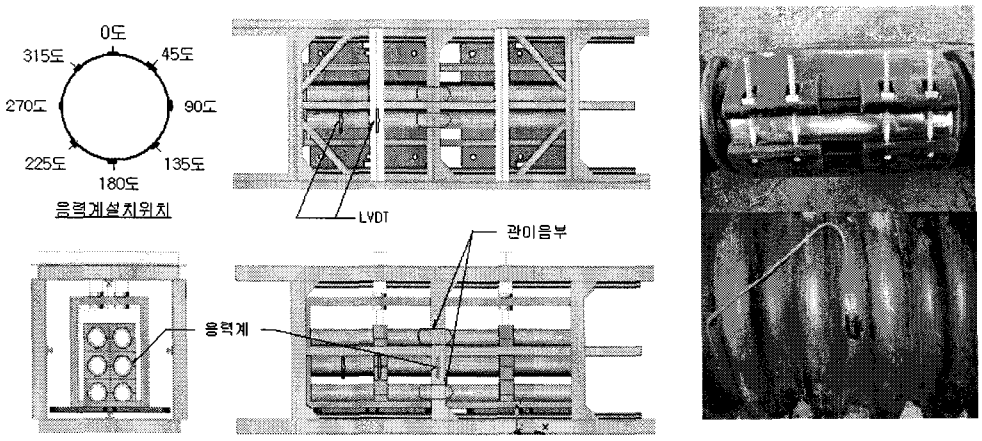

그림 6. 모형-B의 계측장치 설치 및 관 이음

한편, 믹서에서 혼합된 유동토를 일부 채취하여 시간에 따른 압축강도를 측정한 결과 1시간 강도는 1.37 kgf/㎠로 목표치에 약간 미달하였으며, 차량이 통행할 수 있는 기준치인 4시간 강도는 만족하는 것으로 나타났다. 또한 28일 강도는 목표치를 다소 크게 웃돌아 실험실 배합과의 차이를 나타냈다. 이는 실험실에서의 이상적인 조건과는 달리 현장굴착토의 특성이 다른 것과 대규모 배합에 따른 오차로 보여 지며, 추가적인 실험을 통해 추후 보정치를 제시할 예정이다.

표 6. 모형-B 배치 뒷채움재 물성시험 결과

시험일	구분	현장 함수비 (%)	시방배합(kgf/㎥)			현장배합(kgf/㎥)			흐름도	압축강도(kgf/㎠)			비고
			고화제	물	흙	고화제	물	흙	mm	1시간	4시간	28일	
11-23	배치-1	14.0	210.0	531.47	1,045.0	210.0	385.2	1,191.3	203	0.28	-	-	핸드 믹서
	배치-2		210.0	566.41	953.12	210.0	433.0	1,086.6	225	0.37	2.95	10.62	펌프
									194				믹서

모형-B에 슬러리 뒷채움재를 투입한 결과 시간에 따른 부력발생 변화는 그림 7과 같다. 그림에서 보는바와 같이 최대부력은 711kgf로 나타났으며, A구간의 경우 모형하부 및 전선관 결합체의 자중에 상응할 때 까지 부력이 발생하지 않았고, B~D구간에서는 점진적으로 부력이 증가되고 있다. 또한 E구간에서는 시간경과에 따라 유동성이 감소하면서 부력이 감소되는 것을 알 수 있다. 즉 타설시 급격한 부력의 증가와 타설후 시간에 따른 뒷채움재의 고화작용으로 부력은 점차 감소하는 경향을 보여주고 있어

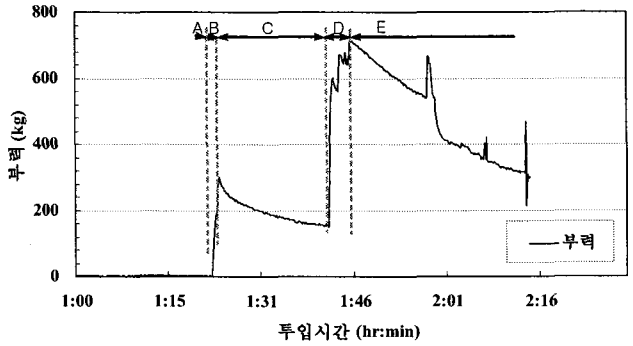

그림 7. B-type 유동토 투입에 따른 부력의 변화

단계별 증가형태를 나타내고 있다. 한편, 간격재의 부력 억제력을 파악해본 결과, 3단 동시 타설 시 간격재에 의한 부력 억제효과는 미미한 것으로 나타나 개선이 요구됨을 알 수 있었다.

뒷채움재의 타설에 따른 관내 변형 및 변형율을 측정한 결과는 그림 8과 9에 보여주고 있다. 변형율계를 설치한 8곳중 45도와 315도의 센서는 작동되지 않았으며, 관 중앙 상부에 설치된 변형율은 타설 충격 등으로 심하게 흔들리는 모습을 보여주었다. 또한 변형은 타설 수량증가에 따라 증대되며, 계단식 증분형태로 나타나고 있다. 변형율의 크기는 관 상부에서 가장 크고 타설에 따른 영향 또한 가장 큰 것으로 나타났다. 각도가 90도일 경우 변형율의 크기는 가장 작았으며, 시간에 따른 변화도 가장 미소하게 나타났다.

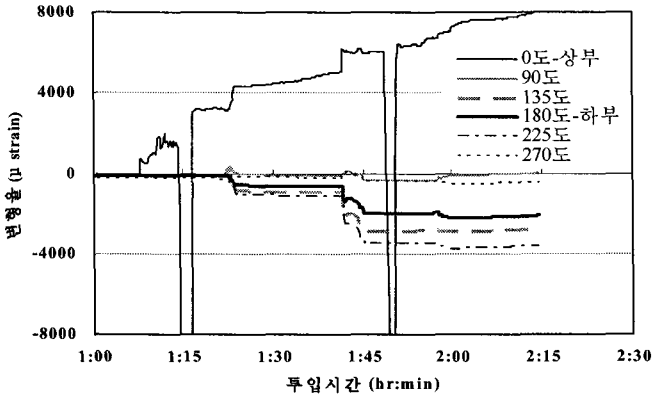

그림 8. 시간에 따른 관 중앙부 변형율의 변화

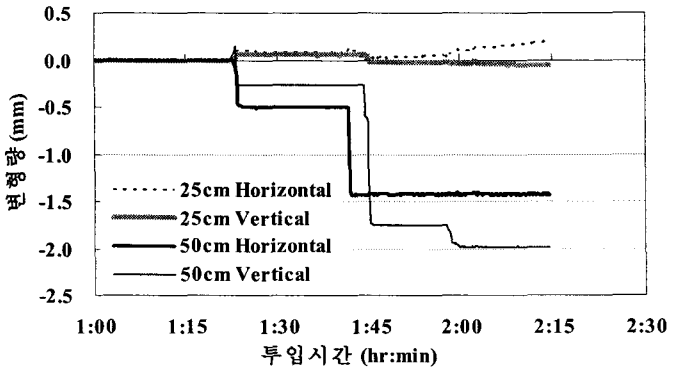

그림 9. 지지점에서 이격거리에 따른 관내부의 변위 변화

한편, 타설 시 발생하는 부력에 의한 간격재 내부의 변형은 연직방향으로는 직경의 약 1% 이내로 나타났으며, 수평방향으로는 0.7%가 발생하였다. 그 외는 모두 0.03%~0.10%로 대단히 작은 변형을 나타내었다. 즉, 간격재 중앙부분의 부력 불균형에 의한 만곡현상으로 중앙상부가 최대 0.8%의 변형이 발생하였으며, 관 하부는 최대 0.4%의 변형을 보여주었다. 이는 관 손상을 수반할 정도는 아니며, 변형에 따른 케이블의 포설에 대한 시공성이 파악이 더 중요할 것이다. 본 시험은 시험체의 크기가 작아 부력 불균형에 의한 영향이 크므로 추가 실증실험 시 간격재의 배치를 균등하게 설치하면 변형은 감소 될 것으로 판단된다.

타설 후 28일이 경과된 후 거푸집을 제거하였으나, 동결로 인해 슬러리의 제거가 용이하지 않아 그림 10에서와 같이 일부분만 제거하여 관찰하였다.

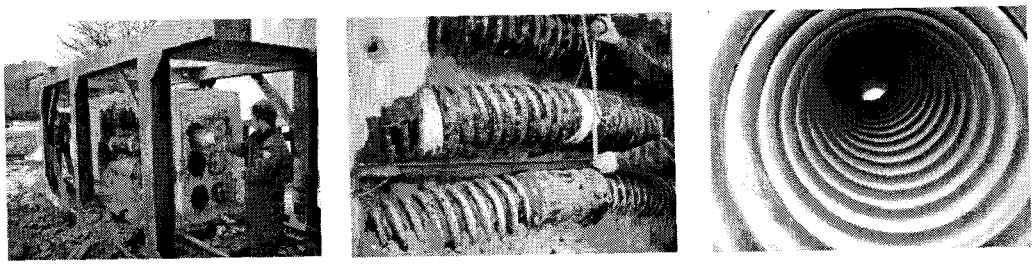

그림 10. 모형 B 관로 도통시험 및 관찰

원활한 케이블 포설여부를 확인하기 위한 직경 190mm의 도통봉 통과시험결과, 상단의 열만 통과하고 2단과 3단은 통과하지 못했으며, 특히 3단열의 처짐량이 가장 커 도통이 가장 어려운 것으로 나타났다. 이는 전체적인 부력은 유사하나 타설초기 주입에 따른 압력증가로 관이 밀려올라가고 시간에 따른 고화작용으로 변형이 크게 발생한 것이 원인인 것으로 판단되며, 실제 현장에서는 초기 타설압력조절 및 간격재 설치에 특히 유의하여야 할것으로 판단된다. 한편, 유동화 뒷채움재 타설에 따른 관주위의 채움상태는 내외부 모두 조직이 치밀하고 공극이 발견되지 않아 양호한 것으로 나타났다. 또한 이음부 누수여부를 관찰한 결과 타설에 따른 누수는 발견되지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 지중전력관로용 유동화 뒷채움재의 시공성을 평가하기 위하여 현장거치용 배치플랜트 및 배합통을 개발하고 현장실험을 통해 본장비의 타설성능을 평가하고 뒷채움재의 현장물성평가 및 관로의 시간에 따른 부력측정, 관의 변형특성 및 케이블 포설성능 등을 평가하였으며, 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 현장배합에 의한 유동화 뒷채움재의 물성평가 결과 실험실과 다소의 차이를 보였으며, 이는 현장토의 물성차이와 대규모 배합에 따른 오차로써 추후 추가실험이 필요하며, 이를 통해 보정치를 도출할 예정이다.
(2) 관로의 측정된 부력은 타설초기에는 이론부력과 유사하나 시간이 경과함에 따라 급격히 감소하여 이론부력과 많은 차이를 나타낸다. 이는 유동토의 고화작용에 의한 것이며, 실제 현장에 적용시 시공 초기에 발생하는 부력을 정확히 평가하고 투입량 및 투입속도를 조절하여 부력에 의한 간격재 및 관로가 이탈되는 현상을 방지할 필요가 있다.
(3) 유동화 뒷채움재 타설에 따른 관주위의 채움상태는 내외부 모두 조직이 치밀하고 공극이 발견되지 않아 양호한 것으로 나타났다. 또한 이음부 누수여부를 관찰한 결과 타설에 따른 누수는 발견되지 않아 본 유동화 뒷채움재의 경우 무다짐에 의한 시공이 가능한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김대홍, 이대수(2002), "지중송전관로 되메움재의 열저항 특성," **한국지반공학회논문집**, 제 18권 5호, pp.209~220.
2. 천선호, 정상섬, 이대수, 조화경 (2005), "굴착잔토를 재활용한 지중전력구조물 급결성 유동화 뒷채움재의 최적배합비," **한국지반공학회 가을학술발표회논문집**, pp.395~404.