

## 방식사의 지하 전력시설용 되메움재 활용에 관한 연구

### A Study on the Utilization of Waste Foundry Sand as Backfill Material for Underground Electric Utility Systems

이 대수<sup>1)</sup>, Dae-Soo Lee, 홍 성연<sup>2)</sup>, Sung-Yun Hong, 김 경열<sup>3)</sup>, Kyoung-Yul Kim

<sup>1)</sup>한전 전력연구원 책임 연구원, P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

<sup>2)</sup>한전 전력연구원 연구원, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

<sup>3)</sup>한전 전력연구원 선임보조연구원, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

**SYNOPSIS** : In this paper, the utilization of waste foundry sand produced in the molding process is studied as a backfill material for underground electric utility systems such as concrete box structures and pipe lines for power supply. The physical, chemical and thermal properties for waste foundry sand are investigated for mechanical stability, environmental hazard and power transmission capacity. Also its properties are compared with the natural river sand. The test results show that waste foundry sand can be utilized for underground concrete box structures as a backfill material; however, it can not be applied to underground pipe lines due to high thermal resistivity or low power transmission capacity.

**Key words** : waste foundry sand, thermal resistivity, backfill material

## 1. 서론

시대의 변화와 사회적 욕구에 의해 산업의 형태는 나날이 발전을 거듭해 왔으며, 그에 따른 산업부산물도 또한 다양해지고 있는 실정이다. 최근에는 이러한 산업부산물의 양이 방대해지고 커짐에 따라 사회적으로 자원 재활용 측면에서 경제적인 처리방안을 모색하는 연구가 다양하게 수행되어지고 있는 실정이다. 이러한 산업부산물중의 한가지인 주물공정에서 사용되고 남은 폐주물사를 규산소다와 액상의 마그네슘을 합성시켜 가공처리 하여 만든 방식사에 대한 연구는 극히 미미한 실정이며, 사용되어지고 있는 분야 또한 거의 전무한 상태이다. 현재까지 수행된 방식사에 대한 연구로는“폐주물사를 이용한 방식재 제조기술 개발(박종원, 1998)”이 대부분을 차지하고 있으며, 주로 방식사의 물리적 특성(전단강도, 함수비, CBR, 밀도, 다짐도 등)과 화학적 특성(방식효과 등)에 대한 내용들을 주로 다루고 있을 뿐, 지하 전력시설물과 밀접한 관계가 있는 재료의 열저항 특성에 대해서는 연구된 바가 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 산업부산물의 일종인 방식사를 지하 전력설비중 전력구 및 전력선 보호관로 공사의 되메움재로 사용성을 확인하기 위하여 재료의 물리적, 화학적 특성실험을 실시하였다. 또한 방식사가 전력선의 허용전류에 어느 정도 영향을 미치는지를 확인하기 위하여 재료의 열저항을 특성실험을 병행 실시하였으며, 이를 바탕으로 현재 되메움재로 사용되고 있는 강모래의 재료특성과 비교 분석하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

실험에 사용된 방식사는 주물공정에서 이용된 폐주물사를 가공처리한 후, 폐주물사의 표면에 규산소다

와 액상의 마그네슘을 합성시켜 생산된 방식사를 이용하였고, 강모래는 충남 공주시 금강변에서 채취한 재료를 사용하였다. 방식사의 역학적 안정성을 검토하기 위하여, 입도분석실험, 실내다짐실험(A다짐), 비중실험, CBR시험, 직접전단실험을 실시하였다. 또, 화학적 특성실험인 폐기물 용출실험 및 PH시험을 실시하여 방식사의 유해물질 함유 가능성을 분석하였다. 또한, 전기적 사용 특성인 허용전류량을 산정하기 위해 열저항 실험을 실시하였고, 현장 실무자의 다짐 시방다짐을 마련하기 위해 현장 시험다짐을 실시하여 그 결과 값을 강모래의 다짐특성과 비교하였다.

### 3. 물리적 실험 및 분석

#### 3.1 입도분석실험

노건조시킨 방식사를 입도분석한 결과, 입경가적곡선은 경사가 급한 형태를 나타내고 있고(그림 3.1), 균등계수( $c_u$ )와 곡률계수( $c_c$ )는 각각 2.4와 1.2로 계산되었다. 이 값은 방식사의 입도분포가 균등한 입자로 구성되어 있으며, 흙의 분류상 입도분포가 불량한 모래(SP)의 성질을 갖고 있음을 보여주는 것이다(표 3.1). 한편, 강모래의 균등계수( $c_u$ )와 곡률계수( $c_c$ )는 각각 6.8과 1.2로 입도분포가 좋은 모래(SW)의 성질을 갖는 것으로 나타났다

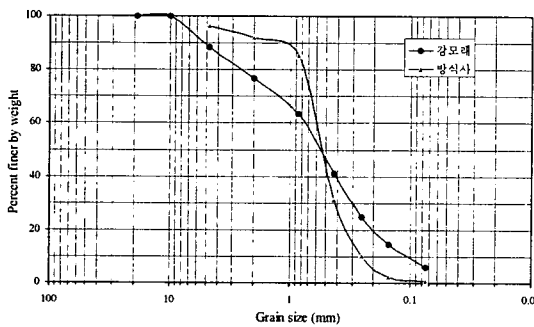


그림 3.1 방식사 및 강모래 입경가적곡선

표 3.1 방식사 및 강모래 입도분석 결과

구 분	방식사	강모래
$D_{10}$ (mm)	0.25	0.11
$D_{30}$ (mm)	0.43	0.32
$D_{60}$ (mm)	0.60	0.75
$C_U$	2.4	6.8
$C_C$	1.2	1.2
분 류	SP	SW

#### 3.2 실내 다짐실험

다짐방법은 반복법/건조법에 의한 “A” 다짐방법을 실시하였다. 시험결과, 방식사의 최대건조밀도는 1.649g/cm<sup>3</sup>이고, 강모래의 최대건조밀도는 1.620g/cm<sup>3</sup>로 나타났으며 이때의 최적함수비는 17.4%와 18.6%이다(표 3.2). 따라서 강모래와 방식사는 실내다짐실험 결과 최대건조밀도와 함수비가 유사한 결과를 보여주며, 다짐곡선의 형태는 방식사의 경우 전형적인 모래의 다짐곡선 형태를 나타내고 있다.

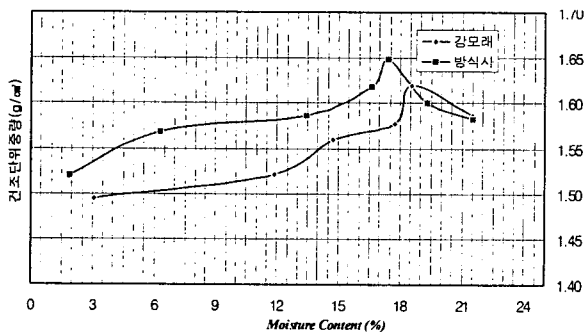


그림 3.2 방식사 및 강모래 다짐곡선

표 3.2 실내다짐 결과

구 분	최대건조밀도 $\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	최적함수비 OMC (%)
방식사	1.649	17.4
강모래	1.620	18.6

### 3.3 CBR실험 및 직접전단실험

#### 3.3.1 CBR실험

도로공사 표준시방서(건교부)에 따르면, 성토재의 지내력특성은 수정 CBR값을 이용하여 분석하도록 규정하고 있으며, 하부노상에 대한 CBR값의 기준은 5%이상으로 규정하고 있다. 실험결과, 방식사의 수정 CBR값은 18.7%, 강모래의 값은 17.9%로 모두 기준치(5%이상)를 만족하는 것으로 나타났으며, 방식사의 CBR특성은 강모래와 유사한 성질을 갖는 것으로 나타난다(그림 3.3).

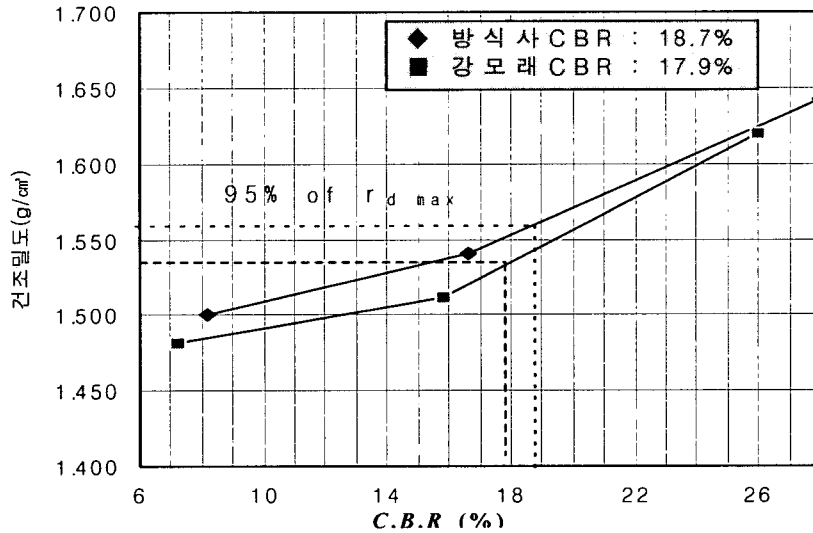


그림 3.3 방식사 및 강모래 CBR실험

#### 3.3.1 직접전단실험

직접전단실험은 상하로 분리된 전단상자 속에 시료를 넣고 수직하중을 가한 상태로 수평력을 가하여 전단상자 상하단부의 분리면에 따라 강제로 파괴를 일으켜서 지반의 강도정수를 결정하는 실험이다.

방식사와 강모래의 실험결과, 표. 3.3에서 처럼 내부마찰각( $\phi$ ) 및 점착력(C)은 방식사와 강모래에서 비슷하게 산출되었다(표 3.3).

표 3.3 전단강도 실험 결과

구 분	방식사	강모래
점착력 C(kg/cm <sup>2</sup> )	0.02	0.01
내부마찰각 $\phi$ (°)	46.6	41.1

## 4. 화학 실험 및 분석

### 4.1 폐기물 용출실험

폐기물 용출실험은 지정 폐기물에 대한 유해 판단기준과 처리기준을 평가하는데 이용되는 실험이다. 특히, 방식사 중에 함유되어 있는 유해물질은 우수와 기타 침투수에 의해 지반 및 지하수를 오염시킬 수 있어 이에 대한 분석이 필요하다. 분석에 사용된 실험 방법은 시료를 수평왕복 진탕기에 넣고 6시간

동안 진동을 주어 중금속의 농도를 분석하는 고액분리분석법을 이용하였다. 분석 결과, 방식사에서 납(Pb), 구리(Cu), 기름성분, 등만이 기준치 이하로 검출되었을 뿐, 그 이외의 항목에서는 유해성분이 전혀 검출되지 않아 환경적 유해성이 적은 것으로 분석되었다(표 4.1).

표 4.1 폐기물 용출시험 판정기준 및 결과 (단위 : mg/l)

시험항목	결과치	유해 판정기준 (이내)	판정
Pb	0.06	3	적합
Cu	0.13	3	
Hg	불검출	0.005	
As	불검출	1.5	
CN	불검출	0.3	
Cr <sup>6+</sup>	불검출	1.5	
Cd	불검출	1	
유기인	불검출	1	
TCE	불검출	0.3	
PCE	불검출	0.1	
기름성분	0.02 %	5%	

## 4.2 PH 실험

PH실험은 지하매설물의 부식성과 토양이 식생공에 미치는 정도를 알아보기 위한 실험으로 증류수와 입경 10mm미만의 방식사를 2~3배율로 섞어 유리막대를 사용하여 약 30분 정도 저어 방치한 후 PH농도를 측정하는 실험이다. PH값이 4보다 작은 산성토양이나 지하수속에 있는 금속은 자연 부식될 위험성이 있으나, PH값이 4보다 클 경우에는 금속 표면이 수산화철( $Fe(OH)_2$ )의 포화용액 피막으로 싸여 있기 때문에 부식의 정도가 적으며, 특히 PH농도가 10~11정도에서는 안정한 부동태 피막이 형성되어 금속의 부식은 무시할 수 있는 정도로 작은 것으로 알려져 있다. 실험결과, 방식사에서 측정된 PH의 값은 10.6으로 부식에 대해 안전한 것으로 측정되었다.

## 5. 열저항 실험 및 분석

### 5.1 열저항 실험

토양의 열저항을 측정하는 방법에는 탐침법, 가열구(加熱球) 매설법, 모의 케이블 매설법 등이 있고, 본 실험에 사용된 방법은 탐침법이 적용되었다. 실험에 사용된 열저항시험기는 열원과 열전대를 조합한 선형 열원모델인 원통형 탐침시험기(Cylindrical Probe)이다(그림 5.1).

토양의 열저항율이란 한번의 길이가 1m인 정육면체 내부를 통해 1W의 열이 흐르면 정육면체 전체에 1℃의 온도상승을 일으키는 토양의 특성을 나타내는 것으로, 토양이 케이블에서 발생시킨 열을 얼마나 쉽게 Heat Sink로 전달할 수 있는 가를 의미한다.

토양의 열저항율에 가장 큰 영향을 미치는 요소로는 토사의 구성성분, 다짐도, 함수비 등이고, 그 외로는 케이블의 매설깊이, 토양의 온도, 케이블 표면의 온도 등이 열저항율에 영향을 미치는 인자이다.

본 연구에서는 되메움재의 역학적 특성과 관련이 깊은 다짐도, 함수비 등만을 고려하였으며, 방식사를 현재 전력구 및 지중 전력선 보호관로 되메움재로 사용중인 강모래와 열저항율 특성을 비교 분석하기 위하여 열저항율 실험을 시행하였다. 일반적으로 다짐도 및 함수비가 증가할수록 토양의 열저항율은 감소한다고 알려져 있다. 또한, 토양의 열저항율이 높을수록 전력선을 통과할 수 있는 허용전류량이 감소하므로 열저항율이 낮은 되메움재가 지중전력 설비용으로 선호된다.

그림 5.2에서 보는 바와 같이 함수비 10%의 예를 보면, 두 재료 모두 다짐도가 증가할수록 열저항율이 감소하고 있으며, 방식사의 경우 다짐도가 증가할수록 열저항율이 서서히 감소하다가 다짐도 89% 이상에서 급격히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한, 강모래에서도 다짐도 증가에 따라 방식사와 비슷

하게 열저항율이 감소한다. 따라서 다짐이 잘된 되메움재의 열저항율은 작아지며, 강모래의 경우가 방식사보다 다짐효과에 따른 열저항율이 작아서 허용전류 측면에서 유리함을 알 수 있다.

함수비의 영향을 살펴보면 그림 5.3에서 보는 바와 같이 함수비 0~5%의 범위에서는 열저항율이 급격히 감소하며, 그 변동폭은 방식사가 크다. 강모래의 경우 함수비 5%이상에서 열저항율의 변동폭이 감소하기 시작하여 함수비 6%이상의 범위에서는 안정화되는 경향을 보여 주고 있다. 그러나 방식사는 열저항율이 함수비 증가에 따라 서서히 감소하다가 함수비 12%에 이르러 강모래와 비슷한 값을 보이는 것으로 나타났다. 한편, 두재료 모두 함수비 12%이상에서는 열저항율의 변동이 거의 없고, 포화도 70%이상 되어 실험이 불가능하여 본 연구에서는 함수비 12%까지를 비교대상으로 하였다.

되메움재가 허용전류 측면에서 유리한 특성을 갖기 위해서는 장기적인 열적 안정성이 확보되어야 하며, 이를 위해서는 되메움재의 열저항율 변동폭이 작아야 유리하다. 즉, 방식사와 강모래가 어느 정도 열적 안정성을 갖기 위해서는 약 6%이상의 함수비 유지가 필요함을 알 수 있다. 또, 방식사의 건조(함수비 0%)시 열저항율(359.70°C-cm/W)이 습윤(함수비 12%)시의 열저항율(59.00°C-cm/W)보다 약 6배 큰 값을 보이고 있어, 강모래에 비해 열저항율의 변동폭이 크므로, 방식사가 허용전류 측면에서는 불리하다고 판단된다.

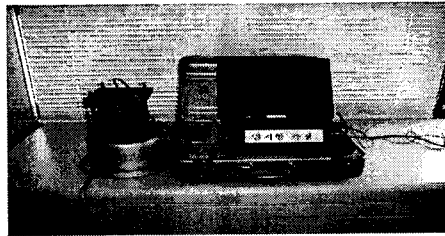


그림 5.1 토양 열저항 시험기

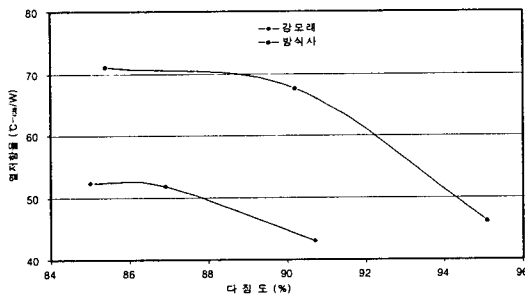


그림 5.2 다짐도 변화에 따른 열저항율 변화  
(함수비 10% 일때)

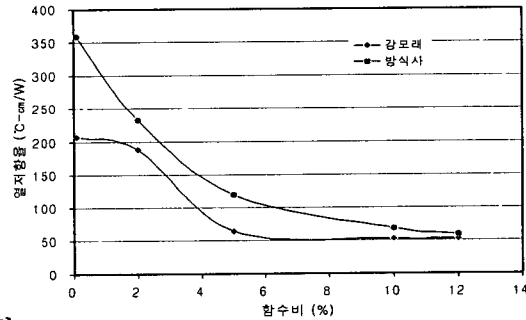


그림 5.3 함수비와 열저항율 관계

## 5.2 허용전류 특성

전선의 단면적에 대응하여 안전하게 흘릴 수 있는 전류의 한도를 허용전류라고 한다. 허용전류 계산은 식 (1)의 IEC(International Electrotechnical Commission) 287규격을 따르며, 본 검토에서 사용된 해석조건은 정상상태의 관로포설(1공1조)조건으로 케이블에서 상시 허용전류를 산정하였다.

허용전류 계산결과에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 외부 열저항( $T_4$ )으로써, 케이블 표면에서부터 관로의 외부 열저항을 고려하여 산정한다. 방식사와 강모래의 허용전류를 비교하기 위하여 식(1)에서 모든 조건은 표 5과 같이 동일하게 사용하고 관로 주변의 되메움재에 대한 토양의 열저항( $\rho_T$ )만 실험값을 이용하여 외부열저항( $T_4$ )과 허용전류( $I$ )를 계산하였다. 계산결과, 방식사와 강모래 모두 함수비가 증가할수록 허용전류가 증가하였고 토양의 열저항율이 증가할수록 허용전류가 감소하는 경향을 보이고 있다(표 5.1 와 그림 5.4, 5.5). 또한, 방식사는 강모래에 비해 함수비 0~12% 범위내에서 허용전류가 3~



## 6. 현장시험 다짐

방식사의 현장 다짐(진력구공사의 되메움재료 다짐도 기준: 85%) 특성을 파악하기 위하여 방식사와 강모래에 대해 현장에서 주로 사용하는 다짐방법(발다짐, 물다짐+발다짐, 진동plate 다짐, Tire Roller다짐)으로 시험 다짐을 실시하였으며, 다짐도 판정에는 방사능밀도측정기(Radiation Instrument)가 사용되었다. 발다짐의 경우 체중 68kg의 몸무게를 가진 사람이 ①10cm씩 총 40cm두께까지 ②20cm씩 총 40cm 두께로 발로 다졌다. 또, 발다짐의 조건과 동일하게 10cm씩 총 40cm 두께로 되메움을 실시하고, 매층마다 포화상태가 될 때까지 물을 부은 후 최대 6회까지 다짐을 실시하는 물다짐+발다짐을 실시하였다(그림 6.1). 실험 결과 두 다짐방법 모두 기준다짐도 85%를 넘지 못하였다

진동 Plate다짐에서는 총두께 30cm로 되메움을 실시하고 다짐을 실시하였다. 실험결과 모래는 1회 다짐에서 85%기준을 만족하였으며, 방식사는 4회 다짐에서 85%기준을 만족하는 것으로 나타났다. 한편, 총두께 30cm로 되메움을 실시하고 타이어 진동롤러(5ton)를 이용하여 다짐을 실시하였을 경우 모래는 1회 다짐에서 85%기준을 만족하였으며, 방식사는 2회 다짐에서 85%기준을 만족하는 것으로 나타났다(그림 6.2 및 표 6.1).

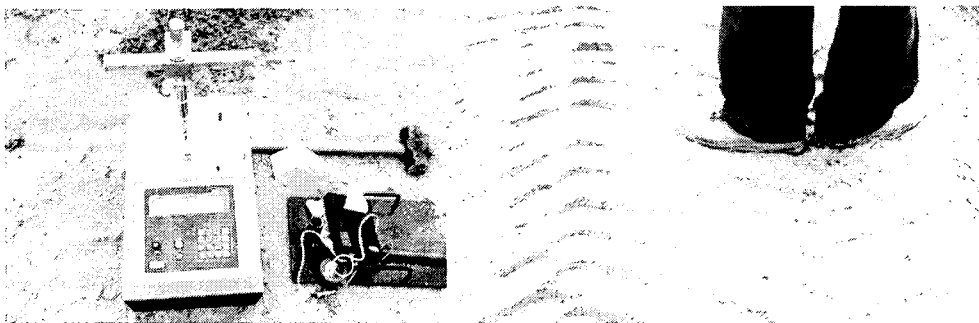


그림 6.1 방사능밀도측정기 및 발다짐 장면

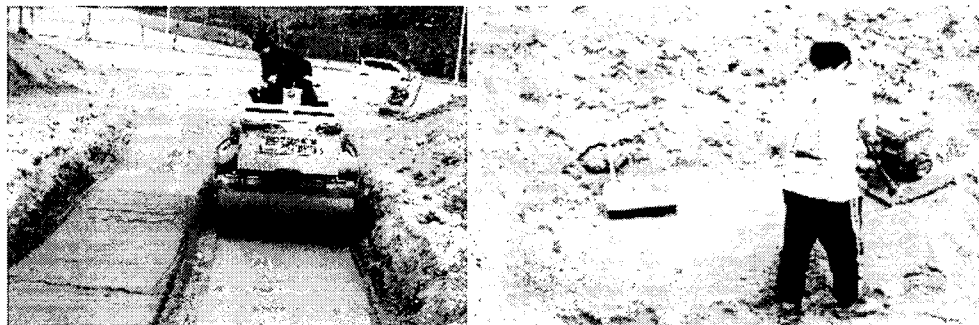


그림 6.2 Tire roller 및 진동 Plate 다짐장면

표 6.1 Tire roller 및 진동 Plate 다짐도 비교 (단위:%)

다짐횟수	Tire roller(5ton)		진동Plate(90kg)		합수비
	방식사	강모래	방식사	강모래	
1	83.51	<b>89.88</b>	80.11	<b>86.79</b>	10~12
2	<b>85.93</b>	89.44	82.29	87.71	
3	86.29	93.83	83.90	88.02	
4	-	-	<b>85.20</b>	88.78	

## 7. 결론

본 연구에서는 주물공정에서 사용되었던 폐주물사를 가공처리하여 생산된 방식사를 지하 전력구 및 전력선용 보호관로 공사의 되메움재로 적용가능한지에 대하여 강모래와 비교 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 방식사는 흙의 분류상 입도분포가 불량한 모래질(SP) 성질을 갖고 있으며, 실내다짐 결과 최대건조 밀도  $1.649\text{g/cm}^3$ , 최적함수비 17.4%으로 전형적인 모래의 다짐곡선 형태를 보이고 있다.
- 2) 수정 CBR 실험결과 방식사의 경우 18.7%, 모래는 17.9%으로 일반적인 성토재료로는 활용이 가능한 것으로 판단되며, 직접전단시험 결과, 방식사의 점착력은  $0.02\text{kg/cm}^2$ , 내부마찰각은  $46.6^\circ$  이며, 강모래의 경우 점착력은  $0.01\text{kg/cm}^2$ , 내부마찰각은  $41.1^\circ$  로 나타나 서로 비슷한 성질을 보이는 것으로 나타났다.
- 3) 방식사에 대한 폐기물용출 실험분석 결과, 납(Pb), 구리(Cu), 기름성분 등만이 기준치이하로 검출되었을 뿐, 나머지 시험항목에 대해서는 유해성분이 전혀 검출되지 않아 방식사를 되메움재로 활용함에 환경적 유해성은 적은 것으로 판단된다. 또한 방식사의 PH값은 실험결과 10.6으로 부식성에 대해서도 안전한 것으로 분석되었다.
- 4) 전력설비는 열을 발생하기 때문에 되메움재의 열방산 효과가 우수해서, 허용전류 측면에서 유리해야 한다. 이를 위해서는, 다짐도가 높아야 하며 함수비 변화에 따른 열저항율의 변동폭이 작아야 유리하다. 방식사는 건조(함수비 0%)시 열저항율( $359.70^\circ\text{C}\cdot\text{cm/W}$ )이 습윤(함수비 12%)시의 열저항율( $59.00^\circ\text{C}\cdot\text{cm/W}$ )보다 약 6배 큰 값을 보이고 있고, 강모래에 비해 열저항율의 변동폭이 커서 허용전류 측면에서는 불리하다.
- 5) 방식사를 되메움재로 사용할 경우, 다짐도 기준인 85%를 만족하는 다짐기법은 다음과 같다.
  - ① 진동 Plate(90kg) : 4회 이상 (1층 다짐두께 30cm)
  - ② 타이어롤러(5ton) : 2회 이상 (1층 다짐두께 30cm)
- 6) 이상과 같이 일련의 실험을 통한 분석 결과, 방식사는 전력구 되메움재로서 물리적 기준에 적합하며, 화학적으로 유해성이 적은 것으로 판단되나, 허용전류 측면에서는 함수비 변화에 따른 열저항율의 변동폭이 커서 강모래에 비해 불리하다. 따라서 토양의 열저항율과 무관한 콘크리트 BOX로 차폐된 전력구에서는 되메움재로 사용할 수 있는 것으로 판단되며, 전력선용 보호관로의 되메움재로 사용하기에는 부적합하고, 향후 활용성을 높이기 위해서는 열저항율에 대한 저감방안 등이 연구되어야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. 강지원(2002), “송전용량 증대를 위한 열방산회로 개선에 관한 연구”, 한전 전력연구원.
2. 김대홍, 이대수 (2001), “지중송전케이블 되메움 토사의 열저항특성”, 2001 대한토목학회 추계학술발표회 논문집.
3. 이용수(2001), “성토재료로서 인산석고의 공학적·환경적 특성”, 한국지반공학회논문집 제 17권 4호 (pp 331~339).
4. 박종원(1998), “폐주물사를 이용한 방식재 제조 기술개발”, 산업자원부 최종보고서.
5. 건설교통부(1996), 도로공사 표준시방서.
6. 今城尙久(1972), “Sandy Soil の 熱特性”, 電力中央研究所 技術第一研究所.