J Rec Const Resources 3(1)72-83(2015)
http://dx.doi.org/10.14190/JRCR.2015.3.1.072

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

지중 송전관로 되메움용 순환골재의 현장실증시험을 통한 적용성 평가

Assessment on Applicability of Recycled Aggregates for Backfill Materials of Underground Transmission Lines Based on Field Demonstration Tests

강성철[1] · 이강렬[2] · 안태봉[3]*
Sung-Chur Kang[1] · Kang-Ryel Lee[2] · Tae-Bong Ahn[3]*

(Received March 13, 2015 / Revised March 26, 2015 / Accepted March 26, 2015)

Underground transmission lines always generate heat and transmit heat through surrounding backfill materials. Therefore, in the design of power lines it becomes a very crucial factor to transfer heat effectively into the neighbouring soils. In this study, in order to enhance field applicability of recycled aggregates for backfill material of transmission lines, quality criteria and construction criteria were proposed, and thermal stability of power lines through field demonstration tests were analyzed. In the field tests, two types of recycled aggregates and sand which is currently used for backfilling were compared in terms of thermal behaviour. Test results showed that recycled aggregates represented similar trends with sand in temperature and moisture content corresponding to time lapse and distance from the heat source. Consequently, recycled aggregates can be utilized for backfill materials of underground transmission lines as a substitute material of sands.

키워드 : 송전관로, 순환골재, 열 안정성, 되메움재, 실증시험

Keywords : Transmission lines, Recycled aggregates, Thermal stability, Backfill, Demonstration test

1. 서 론

우리나라는 경제성장과 함께 전력 사용량이 꾸준히 증가하고 있다. 도심지 내에서 전력을 수송하는 방법 중의 하나는 지중에 전선을 묻고, 이를 통하여 전류를 보내는 방식이 많이 사용된다. 증가하는 수요에 맞추어, 전력을 보다 많이 수송하기 위해서는, 기존의 지중 송전관로를 이용하여 더 많은 전력을 공급하거나, 새로운 송전관로를 건설하여야 한다. 도심지 내 지중 송전관로의 추가 건설은 건설부지 확보와 건설비용 등 많은 제약이 따르므로, 가능하면 기존 관로의 전력공급 능력을 극대화시키는 방안을 모색하여야 한다. 지중 송전선은 관로 및 전력구의 형태로 지중에 설치되며, 전기저항에 의한 발열현상이 늘 있으며, 그 주변의 되메움재를 통하여 열을 방출하게 된다. 송전관로의 전력량을 증가시키면, 관로내 열이 증가되기 때문에 열폭주(thermal runaway) 현상에 의한 전선 파괴가 발생하기도 한다. 따라서, 송전관로의 설계에는 발생하는 열을 효과적으로 외부에 방출하여, 열적 안정성을 확보하는 것이 매우 중요한 요소가 된다. 즉, 송전가능량 혹은 허용전류량을 결정하는 중요 요소 중의 하나가, 관로 주변을 되메움한 재료의 열방산 능력이며, 이를 물리적으로 표현한 것이 열저항(thermal resistance)이라는 값이다. 열저항은 열전도율(thermal conductivity)의 역수이며, 열저항이 클수록 열의 흐름을 방해하는 성질이 많다는 의미이다.

즉, PE 파형관내에 전선이 설치되는 현재의 송전관로 형식에서는, 되메움재로 사용되는 재료가 낮은 열저항을 유지하여, 송전관로에서 발생하는 열을 효과적으로 방출해야 한다. 한국전력공사의 〈지중송전 설계 기준(DS-6210)〉에 따르면 송전선로 되메움 토양

* Corresponding author E-mail: tbahn@wsu.ac.kr

[1]유진지오(주) 대표이사 (Yujin Geo Co., LTD, Dae-jeon, 300-200, Korea)
[2]한전 전력연구원 연구원 (Researcher, Korea Electric Power Research Institute, Dae-jeon, 300-200, Korea)
[3]우송대학교 글로벌철도융합학과 교수 (Professor, Dept. of International Railroad Integrated system, Woosong Univ, Dae-jeon, 300-200, Korea)

Copyright ⓒ 2015 by Korean Recycled Construction Resources Institute
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

의 열저항은 100℃·cm/W 이하로 정하고 있다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 되메움 재료는 강모래이며, 지반조성에 따라 60~150℃·cm/W의 열저항 값을 나타낸다. 도심지 도로 밑에 주로 설치되는 송전관로에서, 강모래는 다짐성이나 지지력 확보 측면에서 유리하나, 공급물량이 제한적이며 상대적으로 고가이다. 이에 환경보전 및 자원 재활용에 대한 사회적 관심이 증가하면서, 송전관로 되메움재인 일반 강모래의 대체골재로 방식사, 쇄석, 석분과 같은 재료에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다(Oh et al. 2008; Kim et al. 2001; Kim et al. 2011). 그러나, 선행 연구의 대부분은 실내시험을 위주로 하여, 여러 시료의 열저항값을 비교하는 것에 그치고 있다. 불균질한 주변 지반조건과 강우에 의한 현장여건 변동 등, 현장에서의 실규모 시험은 상대적으로 시간과 노력이 많이 들고, 일관적인 시험결과를 얻기가 어려워 시도된 사례가 극히 드물다.

순환골재의 경우, 2000년대 초반부터 정부의 건설폐기물 사용 장려에 따라 그 사용이 본격화되기 시작하였다. 순환골재란 건설폐기물(폐콘크리트, 폐아스콘 등)을 물리적 또는 화학적 처리과정을 통해 적정 품질기준에 적합하도록 재생된 골재를 말하며, 국토교통부는 2005년 “공공공사에 있어서 순환골재의 의무사용”을 명시하여, 대상공사 및 사용비율을 규정한 바 있다. 그러나 순환골재가 대량으로 재활용되기 위해서는 더 많은 사용처를 발굴하고, 사용목적에 부합하는 기준을 수립하는 것이 선행되어야 한다.

전력산업에 있어서도 그 활용을 위하여, 송전관로 되메움재로 적용하기 위한 연구를 수행한 바 있다(KEPCO 2011). 순환골재는 대량 생산이 가능하고 저렴한 비용과 모래와 유사한 열저항값 때문에, 대체 재료로서의 경쟁력은 갖추고 있다고 판단된다. 그러나 순환골재를 송전관로 되메움재로 확대 적용하기 위해서는 현장조건을 고려한 순환골재의 품질기준 및 시공기준 수립, 현장 실증시험을 통한 열안정성 평가 등의 체계적 분석이 필요하다.

본 연구에서는 순환골재의 현장 적용성을 향상시키기 위하여 실증시험을 수행하였다. 이를 위하여, 비교적 균등한 품질을 보이는 폐콘크리트 순환골재를 대상으로 품질 및 시공 기준을 제안하였다. 품질기준은 현재 전국의 여러 곳에서 만들어지고 있는 순환골재의 송전관로용 되메움재의 생산기준으로 사용될 수 있으며, 시공 기준은 현장에서 사용시 기준치 이내의 열저항값을 확보할 수 있는 다짐도 관리 기준으로 사용될 수 있을 것이다. 또한, 현장시험을 위하여, 제안된 품질기준과 시공기준에 따라 시료를 선정하여 실증시험장을 조성하였다. 현장 실증시험에서는 순환골재의 열적 특성에 대한 선행 실내시험(Wi et al. 2010; 2011) 결과를 분석하여, 열저항값이 우수한 순환골재 2종류를 시료로 사용하였고, 일반 강모래를 순환골재의 비교 시료로 사용하였다. 이 시험에서는 시간경과에 따른 온도와 함수비의 변화를 열원(송전관로)과의 이격거리에 따라 분석하여, 순환골재와 강모래의 열적 안정성을 비교 평가하였다. 이를 통하여, 일반 모래와 순환골재의 열적 거동이 유사하게 평가된다면, 순환골재의 현장 활용성이 더욱 향상되리라 기대한다.

2. 실내실험을 통한 순환골재의 특성(선행 연구결과)

일반적으로 흙의 열저항을 결정하는 요소에는 흙의 구성성분, 입자크기, 입도분포 등이 있으나, 그 중 함수비, 입도분포, 단위중

Table 1. Test results of basic properties (Wi et al. 2011)

Test type	River sand	Gyeongin A	Gyeongin B	Gyeongin C	Honam A	Honam B	Honam C
Passing percentage of 5 mm sieve	98.19	93.64	99.89	89.19	99.33	97.73	94.58
Passing percentage of 0.08 mm sieve	3.26	1.38	1.86	5.15	3.68	4.28	3.08
Coefficient of uniformity (Cu)	10.17	5.90	5.05	10.17	5.67	5.60	8.79
Coefficient of curvature (Cc)	0.99	1.22	0.91	0.99	1.60	1.25	1.34
Unified soil classification system	SP	SP	SP	SP-SM	SP	SP	SW
Contents of quartz (%)	62.3	50.6	50	43.9	56.4	51	36.9
Test type	Chungchong A	Chungchong B	Yeongnam A	Yeongnam B	Yeongnam C	Yeongnam D	Yeongnam E
Passing percentage of 5 mm sieve	99.95	63.57	88.63	79.70	79.21	100.00	95.05
Passing percentage of 0.08 mm sieve	4.93	3.12	4.87	4.70	3.75	3.72	1.95
Coefficient of uniformity (Cu)	5.25	21.16	9.98	12.86	8.77	7.47	8.00
Coefficient of curvature (Cc)	1.87	0.63	1.06	1.03	1.97	1.21	0.86
Unified soil classification system	SP	SP	SW	SW	SW	SW	SP
Contents of quartz (%)	46.5	54.2	40	32.5	32.5	47.3	36.9

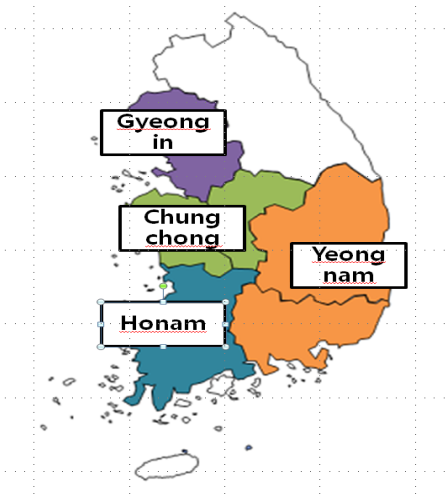


Fig. 1. Sampling area for recycled aggregates (Wi et al. 2011)

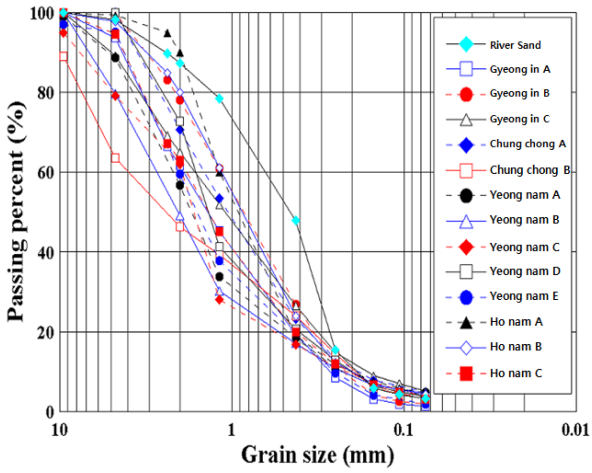


Fig. 2. Particle size distribution curve of samples

량이 결정적인 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다(Fukagawa et al. 1974). 국내 순환골재의 열특성을 분석하기 위하여 선행연구(Wi et al. 2010; 2011)에서는 지역적 분포를 고려하여, 전국에서 생산되고 있는 13종류의 순환골재(Fig. 1)를 대상으로 기본물성 실험 및 열저항값 측정 실험을 수행하였다. Table 1은 순환골재의 기본물성 실험결과를 나타내고 있으며, Fig. 2는 시료별 입도분석 결과를 나타내고 있다. 실험결과 순환골재는 SW~SP의 토질분류를 보이고, 균등계수는 5~21의 범위를 보이며, 곡률계수는 1~2의 범위를 나타내고, 모래와 커다란 차이를 보이고 있지 않다. 열특성을 분석한 결과로는, 순환골재는 입도분포 및 구성성분(석영 함량)과 열저항과의 관계는 뚜렷한 상관관계를 나타내고 있지 않음을 규명하였다. 그 이유로는 순환골재를 구성하는 광물의 종류 및 성분과 입도분포가 유사하여 열저항 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다. 아울러 순환골재의 열저항 변화에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 함수비와 단위중량임을 규명하였는데, 이는 모래나 일반 토사에서도 적용되는 보편적인 이론이다. 즉, 열저항값은 함수비가 작을수록, 단위중량이 작을수록 커지는 경향을 보인다. 결론적으로, 함수비와 단위중량을 적정수준으로 유지한다면 순환골재도 모래와 같은 열저항값(60~150℃·cm/W)을 확보할 수 있음을 보여주어, 되메움 대체재료로서의 적합성을 보여주었다.

3. 송전관로 되메움용 순환골재의 품질 및 시공기준 수립

3.1 품질기준

전국의 여러 곳에서 만들어지고 있는 순환골재를 송전관로 되메움재로 사용하기 위해서는 가급적 균등한 품질이 유지되는 수준

Table 2. Quality standards of recycled aggregates for backfill material of the underground power transmission line

Type	Test method	Road-subbase (Ministry of Land Transport and Maritime Affairs)	Recycled aggregates of underground power transmission line
Plasticity index	KS F 2303	10 or under	Non-Plastic
Modified CBR (%)	KS F 2320	10 more than	equal
Passing percentage of 5mm sieve	KS F 2502	25~100	equal
Passing percentage of 0.08mm sieve	KS F 2301 KS F 2309	0~25	0~10
Contents of organic matter	KS F 2576	1.0 or under	equal
Maximum size of coarse ggregate (mm)	-	-	10mm or under
Coefficient of uniformity (Cu)	-	-	5 more than
Coefficient of curvature (Cc)	-	-	3 or under

에서 대량생산이 가능해야 할 것이다. MLTM(2009)에서는 도로포장 되메우기용 순환골재의 물리적 특성을 제시한 바 있으며, 송전관로도 대부분 도로하에 건설되는 점을 감안한다면, 이 기준과 유사한 범위내에서 송전관로용 되메움재의 품질기준을 도출해낼 수 있을 것이다. 다만, 송전관로의 특성상 무엇보다도 열저항값이 주요한 설계인자이므로, 전절에서 소개한 선행 연구 결과의 열특성치 확보 가능성을 고려하여 품질기준을 Table 2에 제시하였다.

이 기준이 도로 보조기층용과 다른 점은, 우선 소성지수의 경우 폐콘크리트 순환골재는 소성지수가 나타나는 경우가 드물어서 NP로 하였고, 0.08mm 체 통과율의 경우 송전관로용 순환골재는 Table 1에서와 같이 비교적 굵은 골재가 많아 기준을 0~10%로 감소시켰다. 최대골재치수는 기준을 신설하였는데, 송전관로로 사용되는 PE 파형관 주변을 진동 다짐기로 다질 경우, 골재치수가 너무 크면 다짐시 충격에 의하여 파형관이 찢어지는 경우가 발생하므로 최대 10mm로 제한하였다. 균등계수와 곡률계수 조항도 신설하였는데, Table 1에서와 같이 국내에서 생산되는 순환골재는 대체로 이 범위 안에서 생산되기 때문에, 특별한 어려움 없이 골재를 확보할 수 있으리라 판단되며, 입도분포가 이 범위를 벗어난다면, 열특성이 변할 가능성이 있기 때문이다.

3.2 시공기준

순환골재는 송전관로의 되메움 재료로 사용되기 때문에 적절한 다짐도 관리 기준이 필요하다. 전술한 바와 같이 함수비와 건조밀도는 되메움 재료의 열저항값을 결정하는 중요한 인자이기 때문에 더욱 각별한 관리가 필요한 실정이다. 통상적으로 송전관로의 되메움 시공시 되메움 재료의 상대 다짐도(relative compaction)는 보통 95% 이상을 적용하고 있으며, 다짐장비로는 진동 다짐기(vibratory plate compactor)가 일반적으로 사용된다. 따라서 95% 상대 다짐도를 달성하기 위하여, 다짐횟수 및 함수비 범위를 결정하기 위하여 야외에서 시험시공을 실시하였다.

3.2.1 시험시공 방법

되메움 재료는 순환골재중 영남A(경산)와 영남E(칠곡) 시료를 사용하였으며, 포설두께는 40cm로 하였다. 진동 다짐기(중량 0.9kN)로 왕복 2회, 3회, 4회, 5회 다짐을 실시한 후, 다짐횟수에 따라 들밀도시험을 수행하여 다짐도를 측정하였다.

3.2.2 시험시공 결과

다짐시험 결과는 Table 3과 같으며, 상대 다짐도의 경우, 영남A 시료의 왕복 3회를 제외하고 모두 95% 이상의 기준치 달성을 확인하였다. 한편 영남E 시료의 왕복 3회 다짐 시 다짐도는 100%를 초과하였으며, 영남A 시료의 왕복 3회 다짐 시 90%미만의 다짐도(%)가 구해졌는데, 이는 다짐도 측정 시 시험오차이거나 작업자의 숙련도 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 다짐횟수에 따른 함수비는 6.7~9.0%의 범위로 측정되었다.

Table 3. Results of compaction test

Samples	Number of compaction (back and forth)	Water content (%)	Degree of compaction (%)
Yeongnam E	2	7.75	95.12
	3	6.66	104.51
	4	8.51	94.14
	5	9.04	96.24
Yeongnam A	2	6.43	95.74
	3	7.46	89.19
	4	8.67	95.41
	5	7.40	94.63

이를 종합하자면, 상대 다짐도 기준 95%(건설기준)를 만족하기 위해서는 왕복 3회 이상 다짐이 필요하며, 함수비는 여유치를 감안하여 9% 이상으로 유지시킨다면, 선행연구 결과(Wi et al. 2011)에서와 같이, 목표 열저항값을 만족시키리라 판단된다.

3.2.3 순환골재 시공기준

순환골재로 되메움시 현장함수비는 9%이상이 유지되도록 충분히 살수하고, 목표다짐도는 95%로 하며, 진동 다짐기(중량 0.9kN 이상)로 왕복 3회 이상 다진다.

4. 현장 실증시험을 통한 순환골재의 열특성 평가

제안된 송전관로용 순환골재의 품질 및 시공기준에 따라 실규모 시험장을 조성하고, 장기 열특성 평가를 수행하는 것이 순환골재의 활용성을 증대시키는 마지막 연구단계일 것이다. 실제 현장에서는 기상특성, 지반변화 등에 따라 함수비, 단위중량, 열저항 등이 변화한다. 그러나, 열저항값은 현장의 임의 장소에서 아무때나 계측하는 것이 불가능하기 때문에, 본 시험에서는 주로 온도의 경시변화를 모래와 비교 평가하는 것이 현실적인 대안이 될 수 밖에 없다. 아울러, 송전관로에서 상시 발생하는 열을 모사하여, 일정한 함수비로 조성된 지반이 발생된 열로 인해 급격한 수분이

동이 발생하지 않는지 관찰하는 것도 주요 관심 사항이 된다.

이를 위하여 순환골재의 열적 특성에 대한 선행 실내시험(Wi et al. 2010; 2011) 결과를 분석하여, 열저항값이 우수한 순환골재 2종류를 시료로 사용하였고, 일반 강모래를 순환골재의 비교 시료로 사용하였다. 시공기준에 따라 시험장을 조성 후, 시간경과에 따른 온도와 함수비의 변화를 열원(송전관로)과의 이격거리에 따라 분석하여, 순환골재와 강모래의 열적 안정성을 비교 평가하였다. 이를 통하여, 일반 모래와 순환골재의 열적 거동이 유사하게 평가된다면, 순환골재의 현장 활용성이 더욱 향상되리라 기대한다.

4.1 현장 실증시험 계획

현장 실증시험은 충남 금산군 제원면에 위치한 부지에서 수행하였다. Fig. 3의 실험계획도와 같이 전장 6m의 트렌치를 굴착 후,

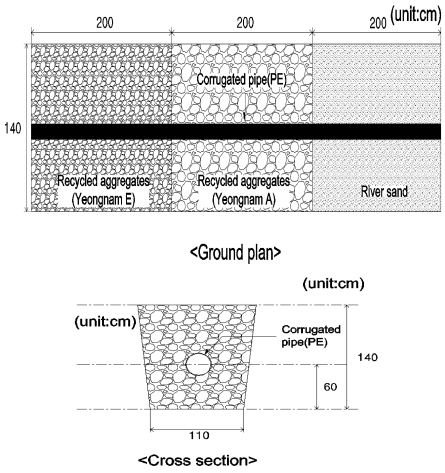


Fig. 3. The plan of field demonstration test

(a) Trench construction (b) Circulation-water pipe (c) Corrugated pipe (PE)

Fig. 4. Underground Power Transmission Line used in the field demonstration test

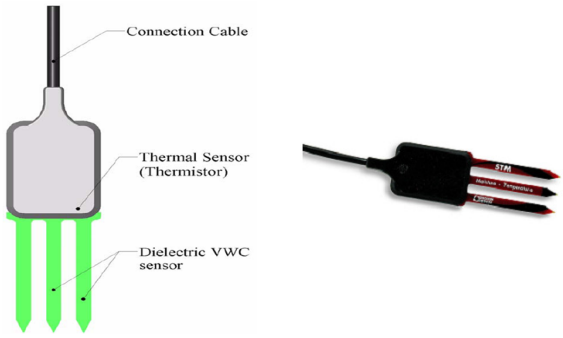


Fig. 5. Temperature-Moisture sensor (5TM)

Table 4. Specifications of 5TM

Contents	Specifications	
	Temperature	Water contents
Measuring range	-40~50℃	Permittivity (εa) 1 (air)~80 (water)
Degree of precision	±1℃	±15% (40~80 VWC)

2m 간격으로 되메움재를 포설하였으며, 설치된 트렌치의 단면은 하단폭 110cm, 깊이 140cm이다. 현장 실증시험에 사용된 순환골재는 선행연구를 통하여 열특성이 우수한 순환골재 2종(영남A 경산, 영남E 칠곡)을 사용하였으며, 비교시료는 일반 강모래를 활용하였다.

송전관로는 Fig. 4와 같이 실제 현장에서와 동일하게 PE 파형관(직경 23cm)을 설치하였으며, 실제 운영중인 송전관로 표면에서 발생하는 약 40℃의 열을 모사하기 위하여, 관로 내부로 순환수 파이프를 연결하였다. 순환수는 항온수조에 연결하여 60℃를 유지하였으며, 이로 인해 PE 파형관의 표면 온도는 평균 약 40℃를 나타내게 된다.

온도와 함수비를 측정하기 위하여는 Decagon devices사에서 제조한 5TM(Fig. 5)을 사용하였으며, 이 센서는 온도와 수분을 동시에 측정이 가능하며 대표적인 규격은 Table 4와 같다. 센서의 계측위치는 Fig. 6과 같이 PE 파형관에서 10cm의 이격거리를 두며 총 5개(수평방향 4곳, 직각방향 1곳)를 설치하여 시간에 따른 온도 분포와 함수비 분포를 연속적으로 측정하였다. 아울러 조성된 지반의 최초 함수비는 3%, 5%, 10%의 세 종류로 설정하여, 서로 다른 함수비 조건하에서의 열특성 변화를 분석하였다.

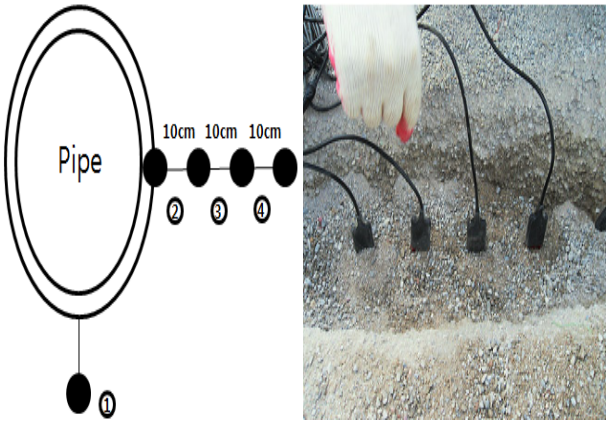


Fig. 6. Temperature-Moisture sensor measurement location and installed appearance

Fig. 7. Compaction with vibrating compactor

Fig. 8. Corrugated pipe(PE) and temperature-moisture sensor installation

되메움 재료는 굴착된 트렌치를 3층으로 나누어 포설하고, Fig. 7과 같이 각 층마다 제안된 다짐도 관리 기준에 따라 진동 다짐기(중량 0.9kN)를 사용하여 3회 다짐을 수행하였다. 송전관로인 PE 파형관과 온도-수분 측정센서는 Fig. 8과 같이 중간층에 포설하였다.

4.2 현장 실증시험 결과 및 분석

4.2.1 현장 조건

현장 실증시험의 수행 일정은 Table 5와 같으며, 4~7일 동안 총 3회의 시험을 반복하여, 기상변화에 따른 현장조건을 반영하였다. 시험장의 최초 함수비는 3%, 5%, 10%를 유지하여 순환골재와 강모래를 다져 초기조건을 조성한 후, 시간에 따른 온도 및 함수비 변화를 측정하려 계획하였으나, 산발적인 강우로 인하여 트렌치 내 초기 함수비 조건이 바뀌어 실제 목표 함수비를 Table 5와 같이 수정하여 시험을 수행하였다. 또한 들밀도 시험을 통하여, 다짐후 밀도를 산정한 결과 순환골재는 1.566~1.785g/cm^3, 모래는 1.619~1.684g/cm^{3}의 범위를 보이고 있다.

참고로 시험중의 기상자료는 온도와 함수비 변화에 영향을 미치므로, Table 6~8에 시험기간중의 온도와 강수량을 기록하였다. 그러나 시험장 조성후 각 시험기간의 전후로도 강우가 발생하여, 시험장의 함수비와 온도변화에 영향을 미쳤을 가능성이 많으므로, 기상자료를 절대적인 참고자료로 쓰기에는 어려움이 많은 실정이다.

Table 5. Outline of test plan

Contents	Target water content (%)		Schedule
	initial	revised	
1st test	3	5	4.25~4.29 (5 days)
2nd test	5	10	5.2~5.5 (4 days)
3rd test	10	3	5.6~5.12 (7 days)

Table 6. Meteorological data of 1st test

Contents	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days
The mean temperature (℃)	12.5	12.7	11.6	10.2	13.5
The highest temperature (℃)	18.0	20.2	17.6	16.3	21.8
The lowest temperature (℃)	5.8	8.5	6.3	4.7	0.7
The amount of rainfall (mm)	-	8.0	0.1	-	-

Table 7. Meteorological data of 2nd test

Contents	1 day	2 days	3 days	4 days
The mean temperature (℃)	15.1	15.3	14.9	15.8
The highest temperature (℃)	23.2	21.9	23.5	25.2
The lowest temperature (℃)	6.8	9.6	4.6	6.5
The amount of rainfall (mm)	-	-	-	-

Table 8. Meteorological data of 3rd test

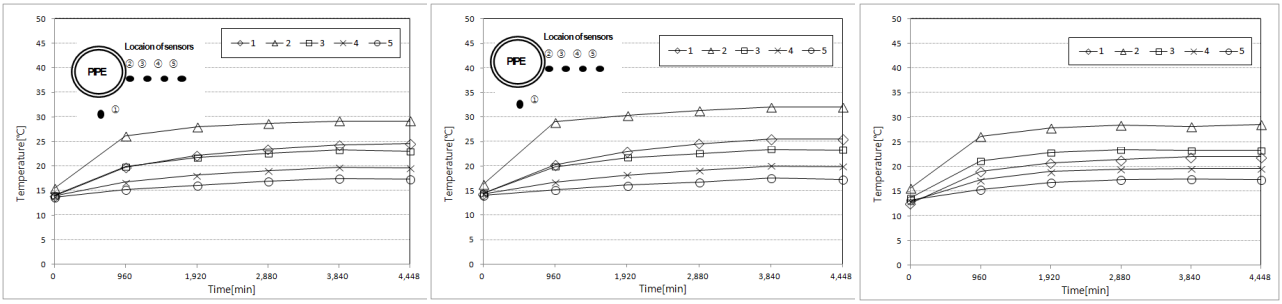
Contents	1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days
The mean temperature (℃)	15.3	17.9	19.5	22	20	15.2	14.4
The highest temperature (℃)	21.4	23.8	26.9	27.7	24.6	17.8	18.1
The lowest temperature (℃)	7.0	14.0	13.6	12.1	15.4	14.2	9.7
The amount of rainfall (mm)	-	0.1	-	3.0	71.5	32.5	4.5

4.2.2 시간경과에 따른 온도 및 함수비 측정결과

1차 시험(목표 함수비 5%)의 경우를 살펴보면, Fig. 9에서와 같이 최초 온도는 13~15℃에서 출발하여 초기에 급격히 증가하다가, 열을 가한지 16시간 정도가 지나면 15~30℃의 범위에서 일정하게 수렴하는 경향을 보이며, 이는 모래와 순환골재에서 동일하게 나타난다. 센서의 위치별로 보면 송전관로에 접하는 2번 센서가 가장 높은 온도를 보여 주는 것은 당연한 현상이며, 송전관로에서 멀어질수록 온도가 낮아진다. 아울러 수직과 수평방향에서 동일 거리(10cm)로 이격되어 설치된 1번과 3번 센서의 온도 변화는 유사하게 변화하고 있어, 송전관로 근접지역에서의 열방산은 비교적 균질하게 이루어지고 있음을 시사한다. 2차 시험(목표 함수비 5%)의 경우를 살펴보면, 1차 시험과 유사한 경향을 보인다.

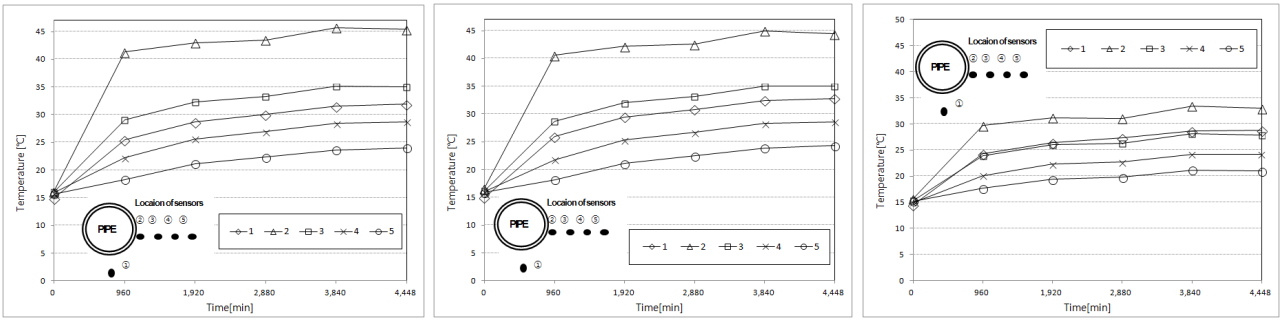
Fig. 10에서와 같이 최초 온도는 약 15℃에서 출발하여 초기에 급격히 증가하다가, 열을 가한지 16시간 정도가 지나면 20~40℃의 범위에서 일정하게 수렴하는 경향을 보인다. 센서의 위치별로 보면 송전관로에 접하는 2번 센서가 순환골재에서 다른 시험과는 다르게 약 40℃의 가장 높은 온도를 보여 주며, 모래보다도 10℃ 이상 높아지는 것이 특이한 현상이다. 아울러 수직과 수평방향에서 동일 거리(10cm)로 이격되어 설치된 1번과 3번 센서의 온도 변화는 1차 시험의 경우와 같이 유사한 범위에서 변화하고 있다.

3차 시험(목표 함수비 5%)의 경우를 살펴보면, 특히 1차 시험과 유사하게 변화한다. Fig. 11에서와 같이 최초 온도는 약 15℃에서 출발하여 초기에 급격히 증가하다가, 열을 가한지 16시간 정도가 지나면 20~35℃의 범위에서 일정하게 수렴하는 경향을 보인다.



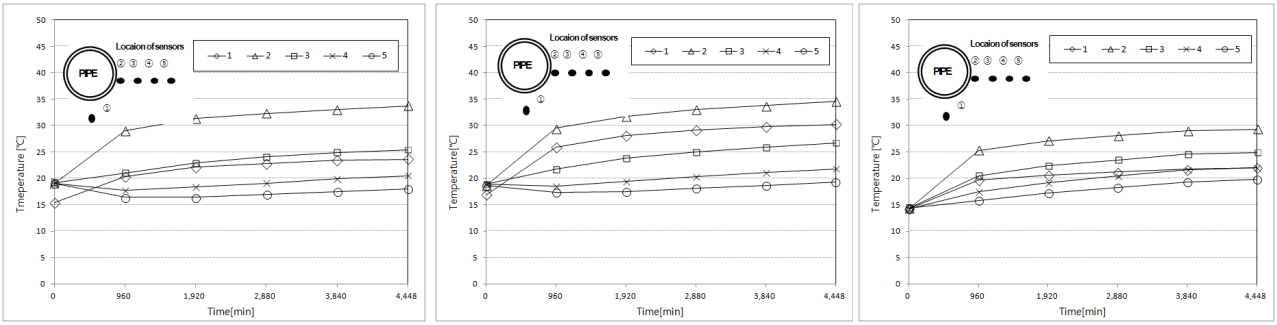
(a) Recycled aggregate (Yeongnam E Chilgok) (b) Recycled aggregate (Yeongnam A Gyeongsan) (c) River Sand

Fig. 9. Test results of temperature with time (1st test)



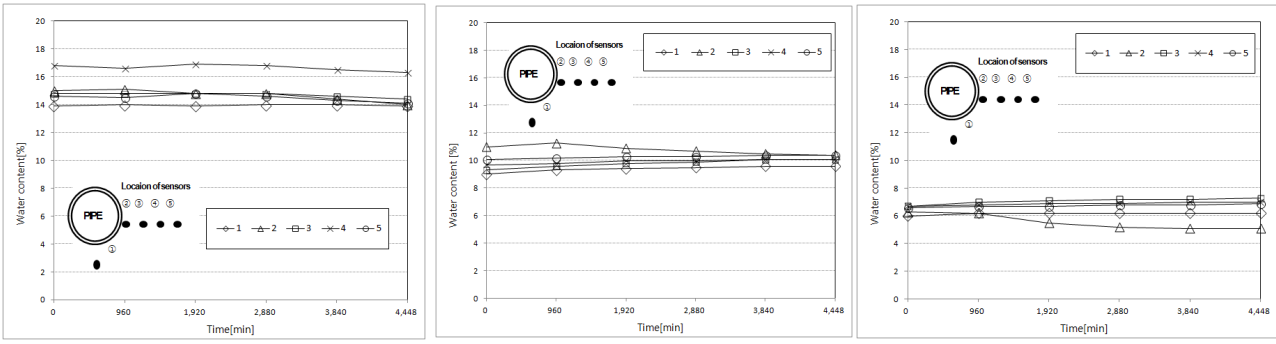
(a) Recycled aggregate (Yeongnam E Chilgok) (b) Recycled aggregate (Yeongnam A Gyeongsan) (c) River Sand

Fig. 10. Test results of temperature with time (2nd test)



(a) Recycled aggregate (Yeongnam E Chilgok) (b) Recycled aggregate (Yeongnam A Gyeongsan) (c) River Sand

Fig. 11. Test results of temperature with time (3rd test)



(a) Recycled aggregate (Yeongnam E Chilgok) (b) Recycled aggregate (Yeongnam A Gyeongsan) (c) River Sand

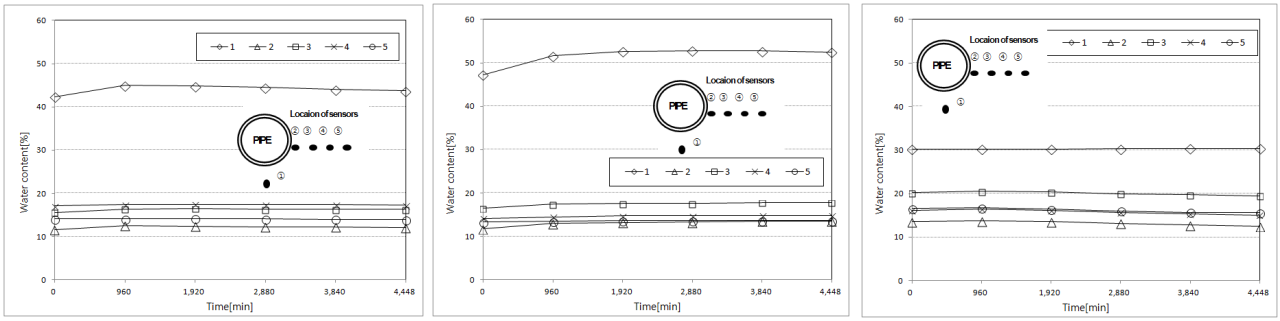
Fig. 12. Test results of water content with time (1st test)

센서의 위치별로 보면 송전관로에 접하는 2번 센서가 약 30~35℃의 가장 높은 온도를 보여 주고, 관로에서 멀어질수록 온도가 낮아지는 것은 모래와 동일하다. 아울러 수직과 수평방향에서 동일 거리(10cm)로 이격되어 설치된 1번과 3번 센서의 온도 변화는 1차 시험과 동일하게 인접한 범위내에서 변화한다.

Fig. 12는 동일한 조건에서의 시간에 따른 함수비 분포를 나타낸다. 시험장 조성시 5%로 함수비를 맞추었으나, 시험 전후의 강우 상태 및 시험장 여건에 따라 인근 지반에서의 수분 유입 등으로 말미암아 초기 함수비는 6~17%로 큰 편차를 보이고 있다. 그러나 시간경과에 따라 초기 함수비가 일정하게 유지되며, 이점은 송전관로의 열방산 효과에 대단히 유리한 조건이다. 즉, 관로 주변에 급격한 건조지역이 생기지 않는 것으로 보아, 순환골재와 모래는 열안정성 측면에서 유사한 거동을 보임을 알 수 있다. 센서의 위치로 보면, 어느 특정 위치에서 높은 함수비가 나타난다고는 말할 수 없게 불규칙한 양상을 보이고 있다. 이는 강우뿐만 아니라, 다짐도, 토질 특성 등에 따라 송전관로 주변의 함수비는 복합적인 영향을 받는 것으로 추정된다.

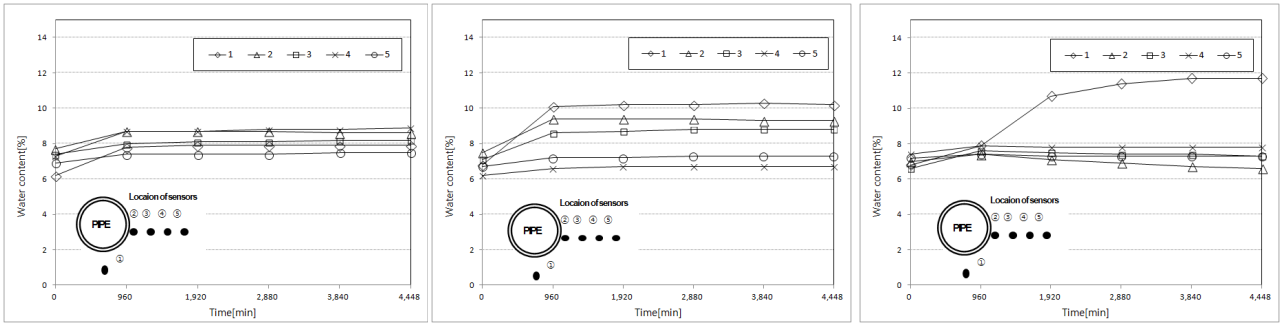
Fig. 13은 목표 함수비 10% 조건하에서 시간 경과에 따른 함수비 변화를 나타낸다. 시험장 조성시 목표 함수비를 맞추었으나, 시험 전후의 강우 상태 및 시험장 여건에 따라 인근 지반에서의 수분 유입 등으로 말미암아 초기 함수비는 10~50%로 큰 편차를 보이고 있다. 특히 파형관로의 하부에 위치한 1번 센서에서 30~50%의 높은 함수비를 보이는 것은, 파형관 하부에 과도한 지하수 유입이 발생한 것으로 추측된다. 그러나 순환골재와 모래는 동일하게 시간경과에 따라 초기 함수비가 일정하게 유지되는 것은 1차 시험과 같은 현상이다. 센서의 위치로 보면, 관로의 이격거리에 따라 일정한 함수비 변화 특성이 나타나지 않고, 1차 시험에서와 같이 불규칙한 양상을 보이고 있다.

Fig. 14는 목표 함수비 3% 조건하에서 시간 경과에 따른 함수비 변화를 나타낸다. 초기 함수비는 6~8%로 비교적 일정한 범위내에 있다. 순환골재와 모래는 1~2차 시험에서와 같이 초기함수비가 거의 일정하게 유지되는 양상을 보이나, 모래의 경우 파형관 하부의 1번 센서에서 함수비가 12% 정도로 갑자기 상승한다. 이는 시험장 내부로 외부에서의 수분 유입이 갑자기 생긴 것으로 추측된다. 센서의 위치로 보면, 관로의 이격거리에 따라 일정한 함수비 변화 특성이 나타나지 않고, 1~2차 시험에서와 같이 불규칙한 양



(a) Recycled aggregate (Yeongnam E Chilgok) (b) Recycled aggregate (Yeongnam A Gyeongsan) (c) River Sand

Fig. 13. Test results of water content with time (2nd test)



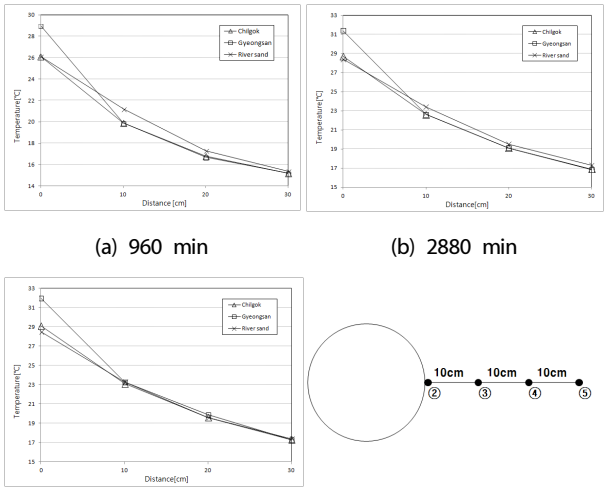
(a) Recycled aggregate (Yeongnam E Chilgok) (b) Recycled aggregate (Yeongnam A Gyeongsan) (c) River Sand

Fig. 14. Test results of water content with time (3rd test)

상을 보이고 있다.

4.2.3 관 이격거리에 따른 온도 및 함수비 측정결과

송전관로의 수평방향으로 10cm 간격으로 설치된 4개의 센서(2번~4번)의 관측자료를 바탕으로, 이격거리별 온도와 함수비 변화를 살펴본다. 비교를 위하여 계측자료의 시계열 자료중 세 포인트를 임의로 선정하여, 특정시간(960분, 2880분, 4416분)에서의 관측치를 고찰하였다. 먼저 온도 변화를 살펴보면, 목표 함수비 5%, 10%, 3%에서의 열특성 변화는 Fig. 15~17과 같다. 온도구배(thermal gradient)란 열원으로부터 이격거리에 따른 온도 기울기를 의미하고, 동일한 방출열량(q)에 대해 온도구배가 작을수록(즉, 기울기가 작을수록) 되메움재의 열전도 효율이 좋은 것을 의미한다. 1차 시험(Fig. 15)과 3차 시험(Fig. 17)을 보면, 온도구배는 약 30℃에서 시작하여 송전관로에서 멀어짐에 따라 약 20℃ 정도까지 점진적으로 수렴하고 있어 열방산이 효과적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한, 일반 강모래와 순환골재 2종의 온도구배가 대단히 일치하고 있으므로, 주어진 함수비에서 순환골재가 일반 강모래와 유사한 열저항을 가지고 있음을 유추할 수 있다. 그러나 2차 시험

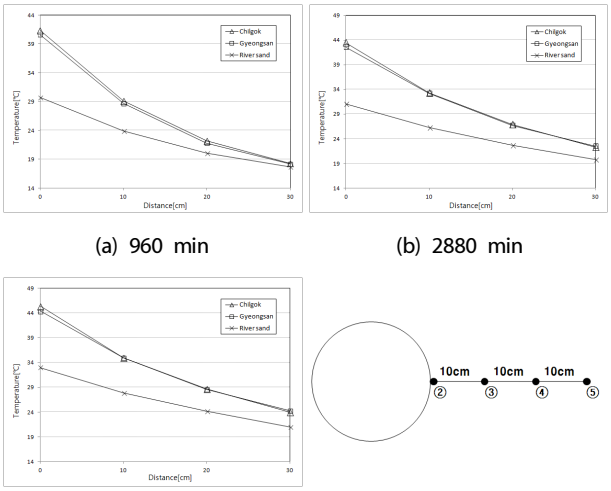


(a) 960 min (b) 2880 min

(c) 4416 min (d) Location of sensors

Fig. 15. Test results of temperature with distance (1st test)

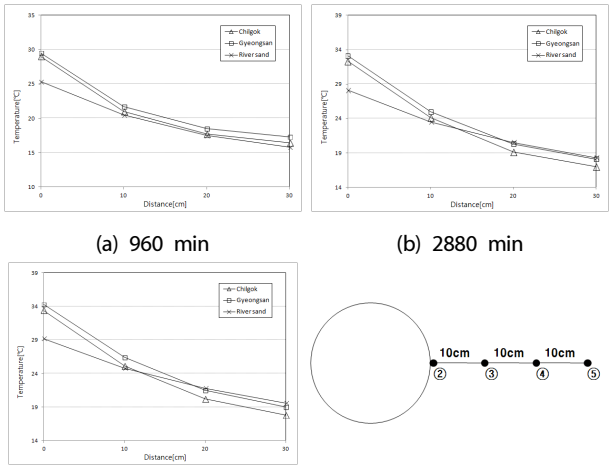
(Fig. 16)에서는 순환골재의 온도구배가 강모래보다 높은 결과를 보여주었다. 이는 1차 시험후 강우에 의하여 현장 실증시험 조건이 바뀌었기 때문으로 추정된다. 즉, 강우에 의하여 주변 지반의 지하수 상승 등의 원인으로 시험장 시료간의 함수비 불균형이 증폭되



(a) 960 min (b) 2880 min

(c) 4416 min (d) Location of sensors

Fig. 16. Test results of temperature with distance(2nd test)



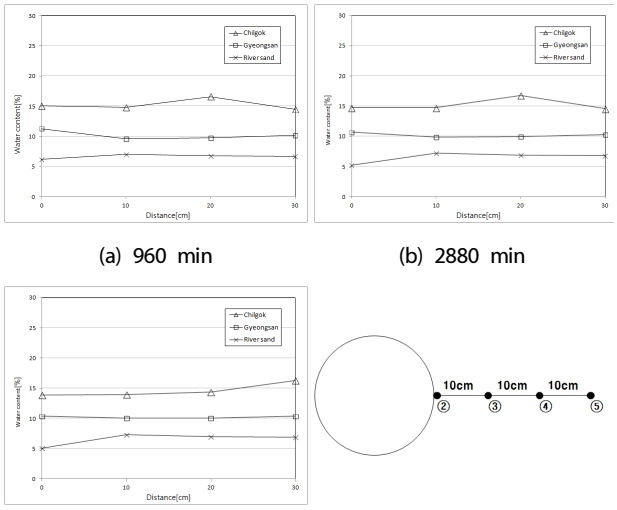
(a) 960 min (b) 2880 min

(c) 4416 min (d) Location of sensors

Fig. 17. Test results of temperature with distance(3rd test)

어, 순환골재가 강모래보다 10℃ 이상 높은 초기 온도를 보이고 있다.

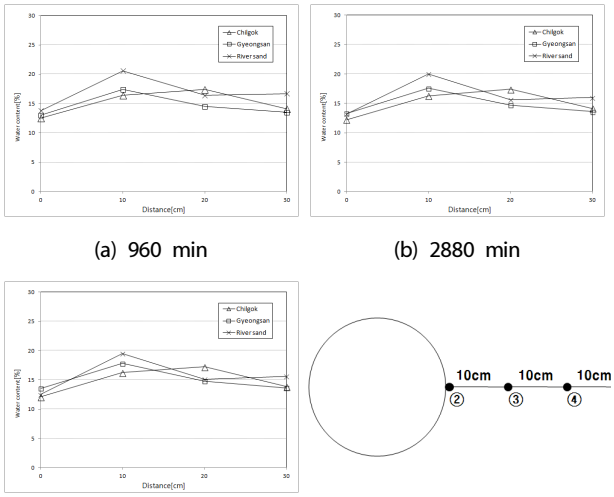
Fig. 18~20에서는 동일한 방법으로 목표 함수비별로 특정 시간(960분, 2880분, 4416분)에서 각 계측지점에서 측정된 함수비를 분석하였다. 1차 시험(Fig. 18)과 3차 시험(Fig. 20)의 경우에서는 송전관로에서 이격거리에 따라 함수비 변화는 보이지 않고, 일정한 수준을 유지하는 것을 볼 때, 순환골재는 모래와 유사한 함수비 거동을 보임을 확인할 수 있다. 2차 시험의 경우는 3번 계측지점(이격거리 10cm)에서 함수비가 최대 5% 이상 증가하는 현상을 보인다. 이는 이전의 온도 분포 분석에서와 같이, 시험전 강우에 의하여 시험부지에서 불규칙한 함수비 조건이 형성된 것으로 추정된다.



(a) 960 min (b) 2880 min

(c) 4416 min (d) Location of sensors

Fig. 18. Test results of water content with distance (1st test)



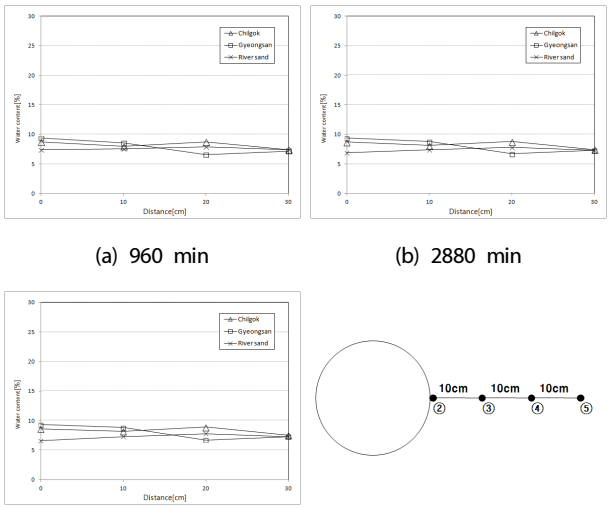
(a) 960 min (b) 2880 min

(c) 4416 min (d) Location of sensors

Fig. 19. Test results of water content with distance(2nd test)

아울러 2~3차 시험에서는 대체로 함수비가 10% 수준을 유지하고 있으나, 1번 시험의 경우는 강모래가 약 6% 함수비를 보임에 반해, 순환골재는 최대 17%까지 높은 함수비를 보이고 있는 점은 이미 논의한 바와 같다.

현장 실증시험을 종합적으로 정리해 보면, 송전관로 되메움재로 주로 사용되는 강모래와 2종의 순환골재인 영남 A(경산) 시료와 영남 E(칠곡) 시료의 온도-함수비 변화가 매우 유사함을 확인하였다. 즉, 순환골재는 시간경과에 따른 온도구배와 함수비 거동이 모래와 유사하며, 송전관로 주변 지반으로의 온도변화와 함수비 변화도 모래와 매우 일치함을 확인하였다. 따라서 순환골재를 송



(a) 960 min (b) 2880 min

(c) 4416 min (d) Location of sensors

Fig. 20. Test results of water content with distance (3rd test)

전관로의 되메움재료로 사용시 모래와 같은 열방산 효과를 기대할 수 있어, 모래의 대체재료로서 순환골재를 충분히 활용할 수 있으리라 예상된다. 단, 본 연구의 현장 실증시험은 제한된 기간 동안 수행되었으므로, 향후 장기간 모니터링을 통하여 순환골재의 적용성을 추가로 검증할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구는 송전관로 되메움재로서 순환골재의 현장 적용을 위하여 순환골재의 품질 및 시공기준을 수립하고, 그 기준을 적용하여 열적 안정성을 평가하고자 현장 실증시험을 수행하였다. 실증시험에서는 순환골재와 일반 강모래를 대조군으로 시간경과와 이격거리에 따른 온도-함수비 변화를 분석하였다. 연구 성과를 종합하면 다음과 같다.

1. MLTM(2009)의 도로포장 되메우기용 순환골재의 물리적 특성을 참고하여, 송전관로용 순환골재의 품질기준을 제시하였다. 선행 실내시험 결과를 확장하여, 되메움재의 열저항값, 순환골재의 국내 대량생산 가능성, 관로의 안정성을 고려하여 최대골재치수, 균등계수, 곡률계수 등의 항목을 신설하였다.
2. 송전선로의 열저항값을 결정하는 중요인자가 함수비와 단위중량이기 때문에 현장에서의 다짐도 관리를 위한 시공기준을 제시하였다. 현장 시험다짐을 통하여, 순환골재로 되메움시 현장 함수비는 9% 이상이 유지되도록 충분히 살수하고, 목표 다짐도는 95%로 하며, 진동 다짐기(중량 0.9kN 이상)로 왕복 3회 이상 다지는 것을 시공기준으로 제안하였다.
3. 시간경과에 따른 실증시험 결과로는, 되메움재의 온도는 모래와 순환골재에서 동일하게 초기에 급격히 증가하다가, 일정하게 수렴하는 경향을 보인다. 함수비의 경우 시간경과에 따라 초기 함수비가 일정하게 유지되며, 이점은 송전관로의 열방산 효과에 대단히 유리한 조건이다. 즉, 관로 주변에 급격한 건조지역이 생기지 않는 것으로 보아, 순환골재와 모래는 열안정성 측면에서 유사한 거동을 보임을 알 수 있다.
4. 이격거리에 따른 실증시험 결과로는, 온도구배는 약 30℃에서 시작하여 송전관로에서 멀어짐에 따라 약 20℃ 정도까지 점진적으로 수렴하고 있어 열방산이 효과적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한, 모래와 순환골재의 온도구배가 대단히 일치하고 있으므로, 주어진 함수비에서 순환골재가 일반 강모래와 유사한 열저항을 가지고 있음을 유추할 수 있다. 아울러, 송전관로에서 이격거리에 따라 함수비 변화는 보이지 않고, 일정한 수준을 유지하는 것을 볼 때, 순환골재는 모래와 유사한 함수비 거동을 보임을 확인할 수 있다.
5. 따라서 순환골재를 송전관로의 되메움 재료로 사용시 모래와 같은 열방산 효과를 기대할 수 있어, 모래의 대체재료로서 순환골재를 충분히 활용할 수 있으리라 예상된다.
6. 본 연구의 현장 실증시험은 제한된 기간 동안 수행되었으므로, 향후 장기간 모니터링을 통하여 순환골재의 적용성을 추가로 검증할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Kim, D.H., Lee, D.S., Jong, W.S., Jong, B.Y. (2001). Thermal Resistance of Soils for Underground Power Cables, Proceeding of the Korea Society of Clvil Engineers, 1-4.

Kim, Y.S., Cho, D.S., Park, Y.J. (2011). Optimization of the Backfill Materials for Underground Power Cables considering Thermal Resistivity Characteristics (I), Journal of the Korea Geosynthetics Society, **10(4)**, 113-121 [in Korean].

Kim, Y.S., Cho, D.S., Park, Y.J. (2011). Optimization of the

Backfill Materials for Underground Power Cables considering Thermal Resistivity Characteristics (II), Journal of the Korea Geosynthetics Society, **10(4)**, 123-130 [in Korean].

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009). Recycled Aggregate Quality Standard.

Oh, G.D., Kim, D.H., Kim, K.Y. (2008). Characteristics of Thermal Resistivity of Recycled Aggregate on water content, Proceeding of the Korea Society of Civil Engineers, 3883-3889.

The Establishment of Quality Standard for Recycled Aggregates Applied for Backfilling of Underground Power Lines, KEPCO (2011).

Underground transmission design standard DS-6210, KEPCO.

Wi, J.H., Hong, S.Y., Lee, D.S., Han, E.S., Choi, H.S. (2010). Laboratory Experiment to Characterize Thermal Properties of Recycled-Aggregate Backfill, Proceeding of the Korean geotechnical society, 1231-1238.

Wi, J.H., Hong, S.Y., Lee, D.S., Park, S.W., Choi, H.S (2011). Evaluation of Compaction and Thermal Characteristics of Recycled Aggregates for Backfilling Power Transmission Pipeline. Journal of the Korean geotechnical society, **27(7)**, 17-33 [in Korean].

지중 송전관로 되메움용 순환골재의 현장실증시험을 통한 적용성 평가

지중 송전선은 전기저항에 의한 발열현상이 늘 있으며, 그 주변의 되메움재를 통하여 열을 방출하게 된다. 따라서, 송전관로의 설계에는 발생하는 열을 주변 지반이 효과적으로 외부에 전달하여, 열적 안정성을 확보하는 것이 매우 중요한 설계 요소가 된다. 본 연구에서는 지중 송전관로 되메움재용 순환골재의 현장 적용성을 향상시키기 위하여, 순환골재의 품질기준 및 시공기준을 제시하고, 현장 실증시험을 통하여 송전관로의 열안정성을 분석하였다. 현장 실증시험에서는 순환골재 두 종류와 현재 되메움재로 사용하고 있는 모래의 열적 거동을 비교하였다. 시험 결과, 순환골재는 시간경과와 관로에서의 이격거리에 따라 온도와 함수비 변화가 모래와 유사하게 나타났다. 따라서 순환골재는 지중 송전관로 되메움재로서 일반 모래를 대체하여 적용 가능할 것으로 판단된다.