

지반함몰 긴급복구용 수용성 폴리머 파우치의 기계적 물성강화

Mechanical Property Enhancement of Water Soluble Polymer Pouch for Ground Reinforcement

정동호¹, 정다솜¹, 유승경², 김주현³, 한중근^{4*}

Dongho Jung¹, Dasom Chung¹, Seung-Kyong You², Joo-Hyun Kim³, Jung-Geun Han^{4*}

¹Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chung-ang Univ., 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

²Member, Professor, School of Engineering & Information Science, Civil Engineering, Myongji College, 134, Gajwa-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 03656, Republic of Korea

³Non Member, Porfessor, School of Chemical Engineering & Materials Science, Chung-ang Univ., 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

⁴Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

ABSTRACT

We developed a polymer pouch using PVP that is water soluble in the precedent study. Yet melt viscosity was so low that it was not possible to produce hemispheric type which is essential for mass production, therefore we used another material to make the polymer pouch. It enabled to figure out a water-soluble transition and mechanic physical property of PEG that is newly chosen, and to blend the PEG with LLDPE and TALC followed by result. So, we could implement an evaluating property on blended proportion. It is important to find out a proper blending ratio throughout an experiment since its property is different or varied followed by each proportion as a water soluble character is conflict to a solid character. With the blending technique we were able to produce the polymer pouch enhanced for a tensile force and an impact intensity maintaining a water soluble character. We could identify a ground solidity effect of the polymer pouch as a result of a direct shear test using the product developed.

요 지

선행 연구에서 PVP를 이용하여 수용성 폴리머 파우치를 개발하였다. 그러나 개발된 재료의 용융점이 매우 낮아 재료의 성형 시 문제점이 많아 대량생산 시 필요한 성형, 제작이 불가능하였기에 성형성이 우수한 새로운 재료 조합을 이용하여 폴리머 파우치를 개발하였다. 새롭게 선정된 PEG의 수용성 변화 및 지반공동 내 보강 시 파우치의 기계적 물성을 만족해야한다. 따라서 PEG와 LLDPE, TALC 블렌딩 비율에 따른 특성평가를 실시하였는데 각 원료의 비율에 따라 발생하는 성질이 다르기 때문에 실험을 통해 적정 비율을 찾는 것이 중요하기 때문이다. 이러한 블렌딩을 통해 수용성 특성은 유지하며 인장 및 충격 강도가 증진된 폴리머 파우치를 개발하였다. 최종 개발된 제품을 이용하여 직접전단 실험을 실시한 결과, 폴리머 파우치의 지반강도 효과를 확인할 수 있었다.

Keywords : Polymer, Pouch, PEG, LLDPE, Talc, Ground reinforcement, Shear Strength

Received 18 Dec. 2017, Revised 26 Dec. 2017, Accepted 27 Dec. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-2-813-5345; Fax: +82-2-813-4160

E-mail address: jghan@cau.ac.kr (J. G. Han)

1. 서 론

최근 국내·외적으로 빈번하게 발생되고 있는 지반함몰의 신속하고 정확한 복구를 위해 각종 폴리머 파우치를 이

용한 지반복구 연구가 시작되고 있다(Jung et al., 2017; Yu et al., 2017; Hong et al., 2017; Lee et al., 2017). 이는 지반함몰 발생 시 국민들이 느끼는 심리적인 불안감이 크며 이로 인해 발생하는 피해사례도 점차 증가하고 있는 추세이기 때문이다. 특히 도심지에서 발생하는 지반함몰은 복구과정이 복잡하다. 이는 도심지에서 주로 이루어지는 특성상 신속한 복구가 필수적이며, 최소한의 통제만으로 안전하고 완전하게 복구 해야만 하기 때문이다. 따라서 기존 복구방법을 적용할 경우 도심지의 도로통제로 인한 경제적 손실 뿐 아니라 수많은 불편함이 야기될 수 있으며, 시공자에 따른 복구 성공여부도 각각 다르기 때문에 지반함몰 발생메커니즘에 따른 신속하고 안전하게 체계화된 복구방안을 개발할 필요가 있다(Kim et al., 2017). 이에 본 연구에서는 지반함몰 복구 시 비개착식 긴급복구 기술로서, 지반 내 지하수와 반응할 수 있는 빈배합된 혼합재가 포함된 수용성 파우치를 개발하였다. 이미 수용성 폴리머 재료로 PVP를 이용하여 파우치를 제작하였으나(Jung et al., 2017), 개발된 재료는 친환경적이며 열가소성물질이기에 대량생산이 가능하여 지반복구에 적용 시 개발된 무기질계 혼합재에 따른 신속한 복구가 가능하다는 이점이 있다.

그러나 PVP를 이용한 수용성 폴리머의 경우 용융상의 문제로 인해 성형상 문제뿐만 아니라 대량생산을 위한 규격화된 반구형 생산이 어려운 단점이 있다(Jung et al., 2017). 이에 본 연구에서는 기존 재료의 이점을 가지면서 대량생산이 가능하도록 새로운 재료를 이용한 폴리머 파우치를 개발하였고, 개발된 재료의 수용해성 특성과 강도 특성을 확인해보았으며 전단실험을 통해 토목재료로 활용 시 지반보강효과를 확인해 보았다.

2. 폴리머 파우치 재료특성

2.1 재료 선정

기존 연구에 사용된 폴리머는 Low Density Polyethylene(이하 LDPE, Sigma Aldrich, Korea, Mw=35000)와 Polyvinylpyrrolidone(이하 PVP, Daejung Chemical, Korea, Mw=120000)을 블렌딩 하여 사용하였다. 하지만 PVP의 용융점이 매우 낮아 원하던 반구 형태의 성형이 불가능하였으며, Hot-Pressed 방식의 판 형식으로밖에 성형이 불가능하였음을 확인하였다. 판 형식의 형태는 조립에 의한 대량

생산이 어려우며, 보관에도 문제점이 많아 새로운 재료를 선정하였다. 이에 기존 문헌조사를 통해서 용융상태에서도 뛰어난 유동성을 가진 고분자인 Polyethylene glycol(이하 PEG, Daejung Chemicals, Korea)을 선정하였다(Jiang et al., 2016; Saba et al., 2015; Savagatrup et al., 2014). PEG는 녹는점이 매우 낮은 고분자 재료로 저온에서 가공이 수월하며, 액상상태에서 유동성이 매우 뛰어나기 때문에 기존 연구에서 문제가 되었던 가공성을 해결 할 수 있는 것으로 판단하였다. 이에 PEG를 최종적으로 수용성 폴리머 파우치 소재로 재선정하였다.

2.2 분자량에 따른 재료특성

PEG의 분자량(Molecular Weight)은 200g/mol에서 10×10^7 g/mol으로 매우 광범위하며, 분자량에 따른 그 물리적 특성이 다르다. 분자량이 증가하게 될 경우, 녹는점 및 기계적 물성이 좋아지지만 그와 반대로 수용성, 용융상태에서의 점도가 높아지게 되어 수용성 파우치의 원료로 적합하지 않게 된다. 이에 폴리머 파우치에 가장 적합한 분자량을 찾기 위하여 간단한 sampling을 통하여 각각 용해도를 측정하였다. 각각의 폴리머는 모두 우수한 용융상의 점도를 가지고 있어, 반구 형태의 폴리머 파우치를 제작할 수 있었으며, 모든 PEG는 3시간 내로 완전 용해되는 것을 알 수 있었다(Fig. 1).

Fig. 2에서 보는바와 같이 PEG의 분자량이 증가할수록 완전용해에 걸리는 시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 실험에 사용된 모든 PEG는 유동이 없는 3차 증류수에서 모두 3시간 내에 완전 용해되었으며, 이러한 용해 속도는 일반적으로 지반공극에서 보강재가 강도발현을 위해서 필요한 시간이 4시간 내외인 것에 비해 빠른 속도이다(Han et al., 2011). 또한 분자량이 높을수록 강도가 높게 나타나는 데 실험에 사용된 PEG 중 분자량 20,000의 경우가 용해속도 4시간과 유사하며, 이는 지반 내 보강속도를 고려할 경우 적절한 시간으로 고려되므로 폴리머 파우치의 소재로 최종 선정하였다.

2.3 폴리머 파우치의 기계적 강도 확보를 위한 블렌딩 특성

기존 연구에서 문제가 되었던 용융상태에서의 가공성은 PEG로 재료를 변경함에 따라 반구 형태의 폴리머 파우

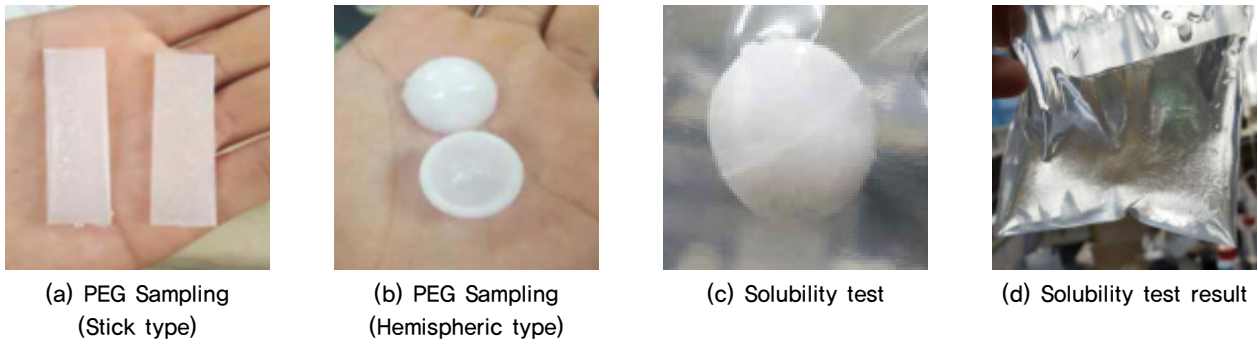


Fig. 1. Solubility test of PEG sampling

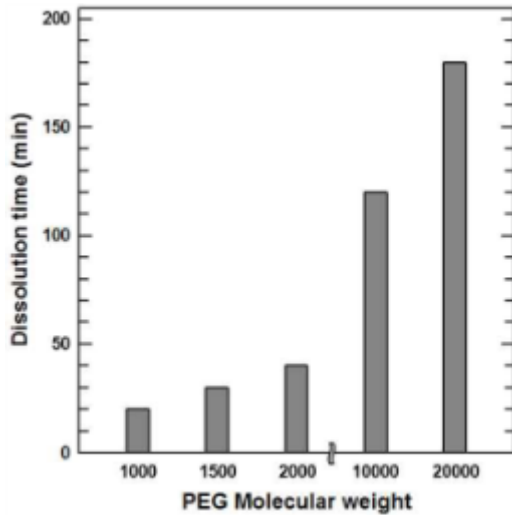


Fig. 2. Solubility test result based on molecular weight

치 제작이 가능하였지만, 인장강도 및 충격강도가 매우 낮아 블렌딩을 통한 기계적 강도를 향상해야 할 필요성이 있다. 이러한 폴리머의 물성 조절을 위해 수용성 폴리머인 PEG와 다른 폴리머를 블렌딩하게 되면, 폴리머 복합체의 기계적 물성을 강화시킬 것으로 예상되어 블렌딩에 사용될 폴리머 후보군을 문헌조사 하였다. PEG 20,000의 녹는점은 약 65°C로, 다른 폴리머에 비해 매우 낮은 것을 알 수 있었다(Araujo et al., 2013; Qureshi et al., 1990). 블렌

딩 소재로 사용하는 폴리머와의 녹는점 차이가 커지게 되면, 상대적으로 높은 온도에서 블렌딩을 하게 되는데, 이때 사용되는 각각의 폴리머의 녹는점이 크게 차이 날 경우, 공정온도에 필요한 온도가 높아짐으로 인해 폴리머 사슬구조의 변형(Crosslinking)을 야기할 수 있다. 이러한 폴리머 사슬구조의 변형은 열가소성 수지를 열경화성 수지로 변화시킬 뿐만 아니라 고유의 수용해성 특성을 잃어버릴 수 있다. 그렇기 때문에 폴리머 블렌딩에 사용될 폴리머는 PEG와 근접한 녹는점을 가지고 있어야 한다(Croce et al., 2001; Zhang et al., 2002). 이러한 조건을 충족시키는 폴리머를 찾기 위해 문헌조사를 통하여 실제 공업에 많이 사용되는 폴리머의 녹는점과 충격 강도를 조사하였으며, 폴리머 블렌딩 방법으로는 사출기(Mini molder)를 사용하여 폴리머를 용융시킨 후, 용융된 폴리머를 회전을 통하여 혼합시키는 방법을 사용한다. 이들 중에 LDPE(Low Density Polyethylene)가 가장 낮은 온도인 110°C에서 용융이 되어 PEG와의 블렌딩에 가장 적합한 폴리머로 선정하였다. 또한 후보군 중에서 LDPE는 충격강도가 가장 우수한 물질로 알려져 있다. 그러므로 LDPE를 충격강도가 매우 낮은 PEG와 블렌딩하여 PEG의 약한 기계적 물성을 보완 할 수 있게 된다(Raj et al., 1990).

Table 1. Property of Polymers (Qureshi et al., 1990; Raj et al., 1990)

Polymer	Melting Point (°C)	Impact Strength (J/m)
LDPE	110	700
HDPE	141	130
PP	172	80
PS	241	28
PET	275	70
Nylon 6	223	25
Nylon 6,6	280	110

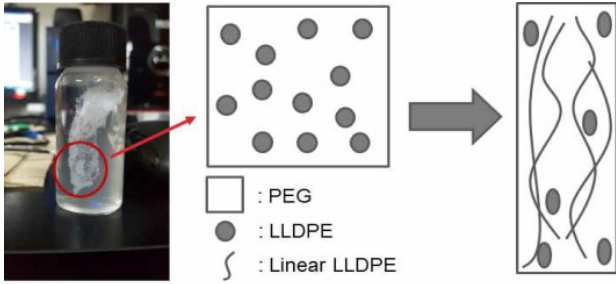


Fig. 3. Typescope of complex sampling

3. 폴리머 블렌딩의 수용해성 특성

3.1 폴리머 블렌딩을 통한 샘플 제작 및 수용해성 특성

폴리머 블렌딩 시 혼합하는 폴리머의 종류 및 비율에 따라 다양한 물성을 띄게 된다. 그렇기에 선정된 수용성 폴리머 PEG와 LDPE를 다양한 비율로 블렌딩하여 수용성 및 기계적 물성변화 확인을 위한 시편을 제작하였다. 본 실험에서 PEG&LDPE 복합체는 각각 10:0, 9:1, 8:2의 질량 비율로 제작하였다. 하지만 LDPE는 용융 점도가 낮은 액상 PEG에서 분산이 제대로 일어나지 않고 뭉치는 현상을 일으키며 8:2의 비율에서도 복합체의 수용해성이 사라지는 것으로 확인되었다.

이처럼 PEG&LDPE 복합체가 수용해성을 잃게 되는 원인은 LDPE가 고르게 분산되지 않고 뭉치게 되어, PEG의 용해를 저하시켜, 수용해 특성이 사라진 것으로 예상된다. 이러한 현상을 막기 위하여, 폴리머 블렌딩의 재료를 LDPE와 화학적 구조식은 같지만 LDPE에 비해 가는 사슬구조를 지닌 LLDPE로 변경하였다(Fig. 4).

Fig. 5와 같이 재선정된 LLDPE를 블렌딩한 복합체는 9:1 그리고 8:2의 비율에서도 수용해성을 잃지 않는 것을 확인하였으며, 수용해성 테스트는 유동이 없는 3차 증류수를 통하여 실험하였다.

용해도 실험 결과, 일반적으로 PEG와 LDPE를 블렌딩할 때 나타나는 현상인 뭉침 현상이 현저하게 감소하여 녹은 후에도 뭉쳐있지 않고 증류수 위에 떠있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 PEG가 원활하게 용해될 수 있어 수용해성 또한 일정 부분 유지되어 두 비율의 복합체 모두 4시간 내에 완전 용해되는 것을 확인하였다.

Fig. 6은 복합체의 단면을 FE-SEM(주사 전자 현미경)을 통하여 관찰한 사진이다. LLDPE가 PEG 내부에서 가늘고 길게 선처럼 성형되어, 주변의 PEG를 단단하게 잡아

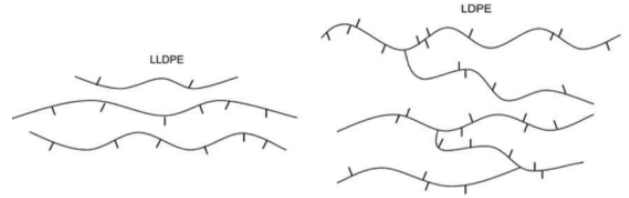
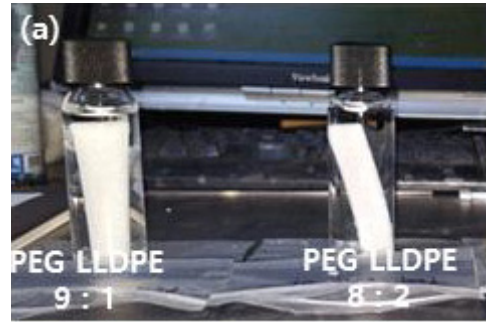
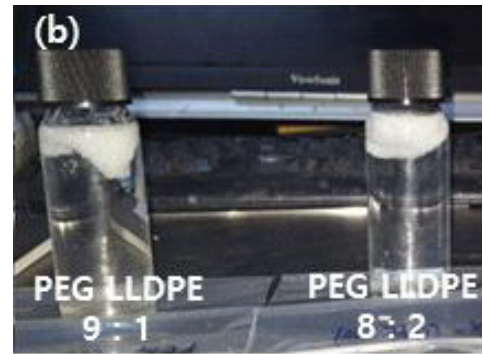


Fig. 4. Structural differences between LLDPE and LDPE



(a) Start



(b) After 4 hours

Fig. 5. Solubility test of complex sampling

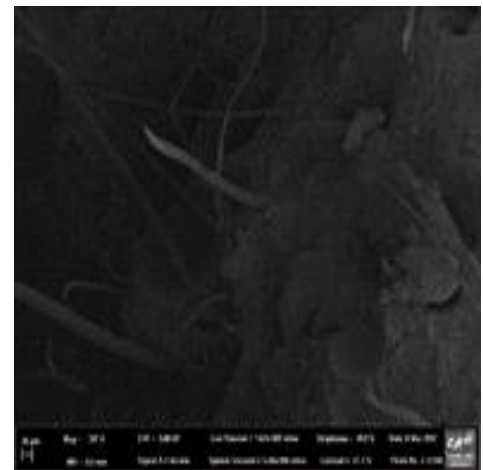


Fig. 6. Cross-Section of PEG & LLDPE Composites Using FE-SEM

주는 역할을 하므로, 기계적 강도가 증가할 것으로 예상된다. 하지만 이러한 LLDPE가 PEG를 고정시키는 역할로 인하여, 기존의 PEG 20,000에 비해 완전 용해되는데 걸리

는 시간이 1시간 증가한 것을 보아 복합체의 수용해도가 소폭 감소한 것으로 보인다.

3.2 PEG 복합체에 세라믹 필러를 첨가한 수용해성 특성

폴리머 블렌딩을 통하여 PEG&LLDPE 복합체를 생성한 결과, 소폭의 수용해성을 잃은 것으로 확인 되었다. 일반적인 지반공극에서 보강재가 강도발현을 위해 필요한 시간이 4시간 내외인 것을 보면 매우 적합한 용해시간이지만, 지하수가 균일하게 흐르지 않는 지하 공간에서는 보다 빠른 용해 속도가 필요하다. 따라서 PEG&LLDPE 복합체의 수용성을 일정부분 회복시켜, 지하지반에서도 원활하게 폴리머 파우치가 용해될 수 있도록 폴리머 복합체의 물성 조절이 필요하다.

이러한 폴리머 복합체의 물성 조절을 위해 PEG 복합체에 세라믹 필러를 첨가하여, 폴리머의 기계적 물성 강화 및 용해속도를 증가시키는 것이 가능할 것으로 예상되어 복합체에 첨가할 세라믹 필러를 조사하였다(Raghavan et al., 2008; Chan et al., 2011; Dileep Kumar et al., 2008; Lee et al., 2008). 사용된 세라믹은 수분을 흡수하는 성질과 기계적 강도를 증가시켜주는 필러로 알려진 BN(Boron nitride), Talc(Hydrated magnesium silicate), AlN(Aluminum nitride), 그리고 Al₂O₃(Aluminum oxide)로 총 4가지의 복

합체를 제작하여, 반구형 파우치 제작여부를 확인하였다.

Fig. 7과 같이 4가지의 세라믹 필러 모두 PEG에 첨가되어도 가공성을 잃지 않고 반구 형태의 폴리머 파우치가 제작 가능한 것을 확인하였다. 이 중에서도, 수분을 흡수하는 성질이 우수하고, 가격이 저렴하며, 용해 후 지반에 잔존하여도 환경문제를 일으키지 않는 Talc를 복합체에 첨가할 세라믹 필러로 선정하였다.

선정된 Talc는 질량 비율 9:1, 8:2의 두 가지 복합체를 제조하여 수용해성 테스트를 진행하였다. 수용해성 테스트는 앞서 진행되었던 실험과 동일한 조건으로 진행되었으며, Talc가 첨가된 PEG&Talc 복합체는 2시간 만에 완전 용해되는 것을 알 수 있었다. 이는 PEG 20,000 보다도 우수한 수용해성을 보여주는데, 이러한 원인으로서는 필러로 포함된 Talc가 수분을 흡수하여 더욱 빠르게 PEG의 용해가 일어난 것과, 복합체가 녹는 과정에서 Talc가 빠져나가 공극이 생기면서 공극사이로 물 입자들이 침투하여 PEG와 물이 닿는 표면적이 증가하게 된 점이 있다. 이에 따라, Talc를 첨가하지 않은 PEG보다 빠르게 용해가 일어난 것으로 분석된다.

3.3 3중 복합체 수용해성 특성

실험과정을 통해 PEG의 블렌딩 폴리머의 재료로는 LLDPE, 세라믹 필러 첨가제로는 Talc가 최종적으로 선정되었다.



Fig. 7. BN, Talc, AlN, Al₂O₃ Polymer-Pouch sampling

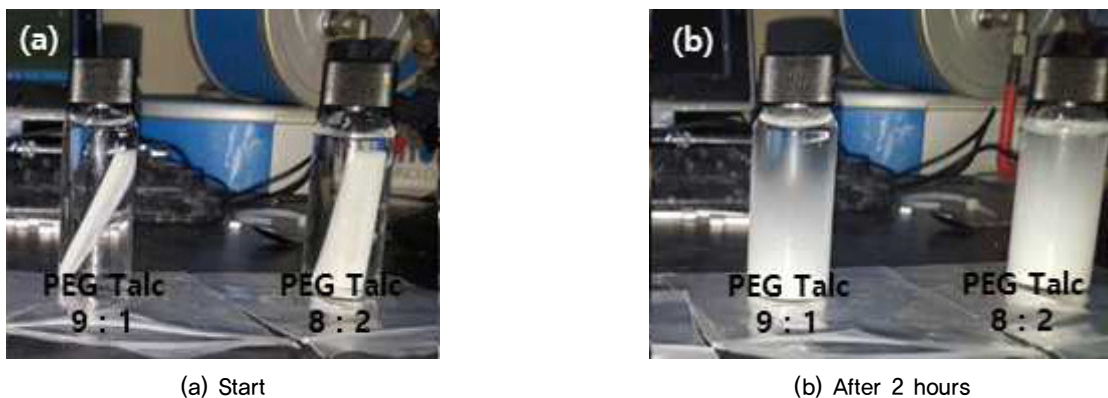
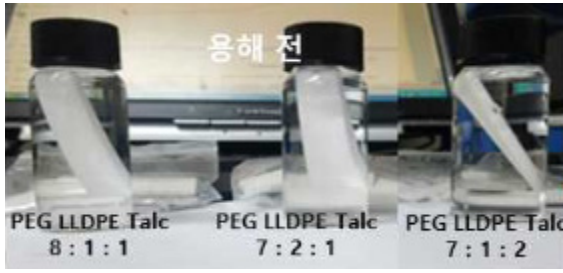
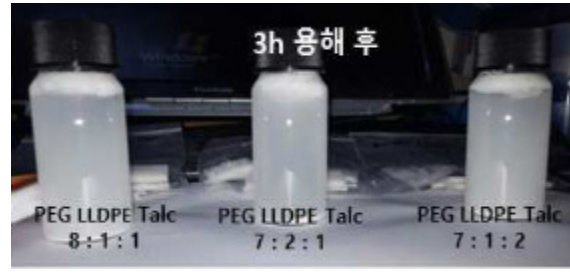


Fig. 8. Solubility test of complex sampling (PEG&Talc)



(a) Start



(b) After 3 hours

Fig. 9. Solubility test of complex sampling

PEG&LLDPE 블렌딩을 통하여 충격강도 및 인장강도의 성능 향상이 예상되며, 세라믹 필러인 Talc의 첨가를 통하여 수용해성의 향상을 유도하였다. 이 3가지의 폴리머 파우치 재료를 3중 복합하여 성형의 가공 여부 및 수용해성 테스트를 진행하였다. 복합체를 제조함에 있어 PEG의 비율이 감소할수록 수용해성이 감소하며 액상점도가 높아지게 되어 가공이 원활하게 진행되지 않을 수 있다. 또한 LLDPE와 Talc의 증가량에 따라 토질에 잔존물이 증가하기 때문에 3중 복합체의 배합 비율은 8:1:1, 7:2:1, 7:1:2의 3가지 비율로 고정하여 실험을 진행하였다. 실험결과, 3가지의 비율 반구 형태의 폴리머파우치 제작이 가능한 우수한 가공성을 보여주는 것을 확인할 수 있었으며, 최종적으로 생성한 3중 복합체의 수용해성 테스트에서도 세 가지 복합체 모두 3시간 내로 완전 용해되는 것을 확인하였다. 최종적으로 세 가지 비율의 복합체 모두 가공성 및 수용해성은 우수한 것으로 확인되었다.

3.4 3중 복합체의 강도 특성

3.4.1 인장강도 특성

각각 비율이 다른 세 가지의 3중 복합체의 인장강도를 테스트한 결과, 상대적으로 LLDPE의 함량이 가장 높은 7:2:1이 가장 우수한 인장강도를 가지는 것으로 나타났다 (KS M ISO 527-1). 그 다음으로는 7:1:2, PEG 대비 LLDPE의 비율이 가장 낮은 8:1:1 샘플의 인장강도가 가장 낮게 측정되었다(Fig. 10). 이는 인장강도가 우수한 LLDPE의 질량비가 증가함으로 인해 Fig. 6과 같이 PEG 내부에서 linear 하게 분산된 LLDPE가 PEG를 고정시키는 역할을 하게 되어 LLDPE의 함량이 증가 할수록 복합체의 인장강도가 증가하는 것으로 예상된다. Fig. 10에서 보는바와 같이 인장강도가 가장 높게 측정된 7:2:1 샘플의 인장강도는 1.89MPa로 이는 폴리머 파우치로서 충분한 수치이다. 지

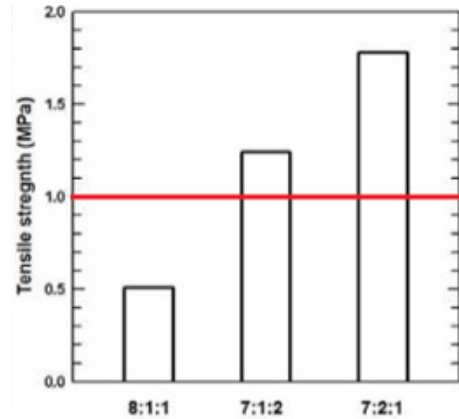


Fig. 10. Tensile strength of polymers by ratio

반공극을 복구하는데 사용되는 폴리머 파우치는 혼화제가 경화하는 시간동안 지반의 압력으로부터 이를 지켜주어야 한다. 지반공극에서 폴리머 파우치에 가해지는 압력은 대략 1MPa로 이를 계산하는 식은 아래와 같다.

$$\tau_{\max} = \frac{\delta}{2} = \frac{pr}{4t} \quad (1)$$

식 (1)은 셸 구조물(shell structure)이 바깥 표면에서 받는 응력을 나타내는 식으로 지반 내부에서 폴리머 파우치가 견뎌내야 하는 인장강도를 미리 알아 볼 수 있다. 위의 식에서 τ_{\max} 는 인장강도, 그리고 δ 는 폴리머 파우치가 지반으로부터 받는 압력을 의미한다. 본 연구에서는 지반으로부터 받는 입력인 δ 는 $2g/cm^3$ 로 설정하였으며 이를 위의 식에 대입하면 폴리머 파우치가 지반압력을 버텨내기 위해 필요한 인장강도는 1MPa로 계산이 된다. 일반적으로 긴급복구 후 재굴착이 용이해야하며 이러한 목적과 부합되는 0.7~1.0MPa를 고려하여 책정된 목표강도와도 부합하는 수치이다. 이 수치보다 높은 인장강도를 가진 3중 복합체는 7:1:2 샘플이 가진 1.24MPa, 그리고 7:2:1 비율



Fig. 11. Sampling by mixing ratio

이 가치는 1.89MPa로 두 개의 샘플 모두 지반에서 가해지는 압력을 견뎌내어, 향후 수용성 폴리머 파우치로 사용이 가능한 비율로 선정할 수 있다.

3.4.2 충격 강도 특성

개발된 파우치를 실제 현장에서 주입할 때 각 폴리머 파우치는 주입기를 통해 공동의 곳곳으로 보내지며 파우치는 공동 주변지반과 충돌이 발생하게 된다. 폴리머 파우치는 충돌이 일어난 후 그 형상을 유지해야 목표 충전율에 도달할 수 있으며, 지하공동 내부에서 폴리머 파우치의 특성을 유지할 수 있다. 최적의 배합비를 선정하기 위하여, Charpy 충격강도 시험(KS M ISO 179-1:2012)을 실시하였으며 실험을 통하여 시험편의 충격에 대한 에너지 차이를 비교평가하고 에너지량을 kJ/m^2 으로 산출하여 그 비교 결과를 연고자 하였다. 실험을 위해 시험편은 폴리머 재료의 배합비를 달리하였으며, 길이 $80 \pm 2\text{mm}$, 너비 $10 \pm 0.2\text{mm}$, 두께 $4 \pm 0.2\text{mm}$ 로 제작하였다(Fig. 11).

샤르피(Charpy) 충격강도는 갑작스런 충격을 받은 재료가 파단에 저항하는 성질이나 인성을 측정하는 시험으로 시험편의 양단을 지지하고 시험편의 중간부분을 해머로 충격하여 반으로 파단되도록 하는 3점 굽힘시험으로 구성되어 있다.

Case 1은 $1.19 \sim 1.46\text{kJ/m}^2$ 의 값을 보이고 있으며 평균값은 1.307kJ/m^2 으로 측정되었다. Case 2는 $0.9 \sim 1.3\text{kJ/m}^2$ 의 값을 보였으며 평균값은 1.090kJ/m^2 으로 측정되었다. Case 3은 $0.99 \sim 1.4\text{kJ/m}^2$ 의 값을 보이고 있으며 평균값은 1.209kJ/m^2 으로 측정되었다.

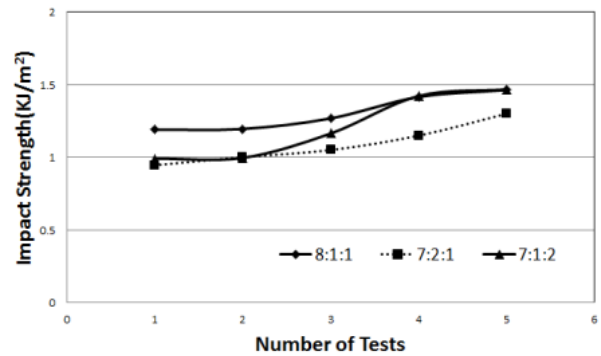


Fig. 12. Result of impact strength test

배합비에 따른 충격강도 값은 큰 차이가 없었다. 그러므로 지반공동 내 주입되는 폴리머 반구재료의 배합비는 Fig. 10과 같이 인장강도 시험 값이 큰 7:2:1의 배합비가 최종적인 배합비로 적절한 것으로 판단되어진다.

4. 최종 복합체를 이용한 지반내 적용성 평가

4.1 개요

개발된 파우치의 토목재료로서의 강도특성 및 활용도를 확인하기 위해 무기질계 혼화재를 이용하여 구형 폴리머 파우치를 제작하여 직접전단시험을 실시하였다. 이때 전단면의 폴리머파우치 경화 시 보강 지반의 전단응력 및 수직변형률의 변화를 확인하였으며, 이를 통해 수용성 폴리머파우치의 지반재료로서의 강도특성을 확인하였다.

Table 2. Mixing Table of Admixture (Yu et al., 2017)

Rapid Hardening Portland Cement	Ultra Rapid Cement	Joomunjin Sand	Al Powder	CaO	Expansive Additive	Admixture
210 g	90 g	1800 g	45 g	3 g	3 g	3 g

Table 3. Parameters of Soil (Kim et al., 2017)

	Gs	γ_{dmin} (g/cm ³)	γ_{dmax} (g/cm ³)	Direct Shear Test		USCS
				c (g/cm ²)	ϕ (°)	
Sand 90% + Clay 10%	2,625	1800g	45g	0,0006~0,0074	35,21~40,8	SP-SM



Fig. 13. Direct shear test

4.2 수용성 폴리머 파우치를 이용한 직접전단실험

구형 수용성 폴리머 파우치는 20mm 크기의 규격을 이용하여 실험을 실시하였다. 이때 개발된 무기질계 혼합재의 배합비는 Table 2와 같으며 사용된 시료는 현장조건을 고려하여 표준사와 세립분(황토)을 배합하였으며 배합비는 표준사 : 세립분의 비율을 9:1로 조성하였다. 초기함수비는 10%로 설정하였으며, 수직하중은 2kg으로 실험을 진행하였다. Table 3는 폴리머 파우치가 없는 상태에서의 시료에 대한 강도정수를 나타낸 것이다(Kim et al., 2017).

또한 폴리머의 용해시간을 고려하여 실험진행 전 4시간 수침 및 2시간 건조 후 실험을 진행하였다.

실험결과는 Fig. 14과 같다. 수용성 폴리머 파우치 시료의 계산된 c값은 0.0111g/cm²이었으며 ϕ 는 48.6°으로 기존 폴리머파우치가 내포되지 않았던 시료(Table 3)의 점착력과 내부마찰각과 비교하였을 때 소폭 상승된 것으로 확인되었다. 이를 통해 일정변위 발생 전까지는 원재료의 영

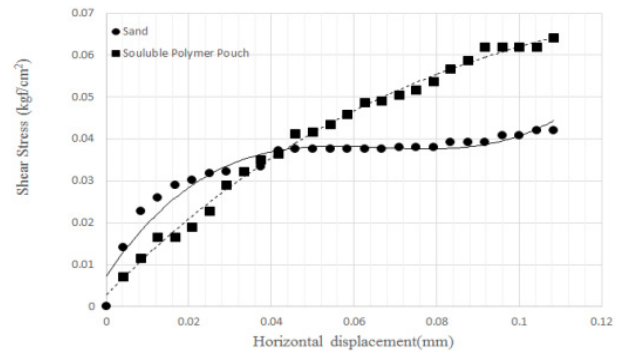


Fig. 14. Direct shear test results for water soluble polymer pouches on sand ground

향을 받지만 보강 전 재료의 보강효과는 변위가 일정크기 이상이 되는 경우 전단응력이 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 개발 전 수용성 폴리머 보강재의 보강효과는 선형적으로 증가 특성을 가지며 수침에 의해 Fig. 13과 같이 지반 내 포화된 전단면을 확인 가능하였다. 또한 보강 시 지반의 전단강도가 상승함으로써 상재하중에

의한 지반 침하나 지반공동 발생 시 공동 하부 지반에서 발생한 지반 이완영역에 지지할 수 있고 지반의 역학적 특성을 70% 이상 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 이에 추후 연구에서는 다양한 지반 내 적용을 위해 대형직접전단시험을 통해 수용성 폴리머 파우치가 지반보강에 미치는 영향을 추가적으로 알아볼 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 지하수 흐름이 있는 지반공동에 긴급된 채움을 하거나 지반함몰이 발생하기 전의 현장에서 사전 위험요소를 제거하기 위한 방법의 일환으로 수용성 폴리머 파우치를 제작하였다. 폴리머 파우치는 무기질계 혼화재를 유실없이 원하는 시간에 맞춰 반응하도록 제작되었다. 선행연구에서 제작되었던 폴리머 파우치의 경우 성형상의 문제로 지반공극 투입 시 최적의 형상이었던 구형형태로의 제작이 어려워 새로운 재료로의 개발이 필요하였다. 이에 본 연구에서는 PVP와 LDPE를 대신할 재료를 선정하였으며 선정된 재료의 블렌딩 복합체를 이용하여 폴리머 파우치로서의 특성평가를 실시하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수용성 폴리머로 새롭게 선정된 PEG는 성형성과 수용성 능력이 우수하지만 약한 강도로 인해 LLDPE와 블렌딩함으로써 본 연구에서 원하는 강도를 충족시킬 수 있었다. 또한 강도가 높아진 대신 떨어진 수용성 특성을 본 연구의 목표에 다다르기 위해 Talc를 함께 블렌딩하였으며, 연구결과 PEG&LLDPE&Talc의 3종 복합체가 연구에서 필요한 최종 복합체로 선정되었다.
- (2) 선정된 최종 복합체는 샘플링 과정을 통해 본 연구에 적합한 반구형태로 제작하였으며, 수용성 테스트 및 인장강도, 충격강도 테스트 결과, 수용성과 성형성이 우수하고 지반 내 주입시 외부의 충격에도 견딜 수 있는 충분한 강도가 확보된 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 수용성 폴리머파우치의 매립지반 내 강도증진효과를 검증하기 위해 직접전단시험 실시 결과 전단응력이 선형적으로 증가하였으며, 일정변위 이상에서는 전단응력이 기존지반에 비해 커지는 것을 확인하였다. 이는 향후 무기질계 혼화재와 수용성 폴리머 파우치의 지반 내 복합시공 주입 시 전단응력의 증가로 인한 보

강효과를 기대할 수 있을 것으로 판단하였다.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. (Project Number: 17SCIP-B108153-03)

References

1. Kim, Y. H., Kim, J. B., Kim, D. W., and Han, J. G. (2017), "Experimental Study on Generating mechanism of The Ground Subsidence of Due to Damaged Waters supply Pipe", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.2, pp.139-148. (In Korean)
2. Lee, K. C., Kim, D. W., and Park, J. J. (2017), "Study on Management System of Ground Sinking Based on Underground Cavity Grade", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.2, pp.23-33. (In Korean)
3. Yu, N. J., Han, J. G., and Lee, K. I. (2017), "Fundamental study on the development of Filling materials for Trenchless Emergency Restoration of Ground cavity", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.2, pp.97-107. (In Korean)
4. Jung, D. H., Kim, K. H., Kim, J. H., and Han, J. G. (2017), "A Fundamental Study on the Application of Water Souuble Pouch for Ground Reinforcement", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.2, pp.121-129. (In Korean)
5. Han, Y. S., Lee, J. H., Kang, H. N., Baeg, S. I., and Chun, B. S. (2011), "Strength Development Mechanism of Inorganic Injection Material", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.12, No.10, pp.5-12. (In Korean)
6. Hong, G. G., Park, J. J., Kim, D. W., and Kim, K. S. (2017), "Development of Material Injection System for Rapid Reinforcement of Small Scale Cavity", 2017 Fall Geosynthetics Conference, October 26, 2017, pp.115-116. (In Korean)
7. KS M ISO 179-1 (2012), *Plastics -Determination of Charpy impact properties -Part 1 : Non-instrumented impact test*, Korean Standards and Certifications.
8. KS M ISO 527-1 (2012), *Plastics -Determination of tensile properties*, Korean Standards and Certifications.
9. Jiang, W., Ye, Z., Gou, S., Liu, X., Liang, L., Wang, W., and Song, Z. (2016), "Modular β -cyclodextrin and polyoxyethylene ether modified water-soluble polyacrylamide for shale hydration inhibition", *Journal of Polymers Advanced Technologies*, Vol.27, No.2, pp.213-220.
10. Saba, N., Paridah, M. T., and Jawaid, M. (2015), "Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A

- review”, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol.76, pp.87-96.
11. Savagatrup, S., Makaram, A. S., Burke, D. J., and Lipomi, D. J. (2014), “Mechanical Properties of Conjugated Polymers and Polymer-Fullerene Composites as a Function of Molecular Structure”, *Journal of Advanced Functional Materials*, Vol.24, No.8, pp.1169-1181.
 12. Araujo, T. M., Sinha-Ray, S., Pegoretti, A., & Yarin, A. L. (2013), “Electrospinning of a blend of a liquid crystalline polymer with poly(ethylene oxide): Vectran nanofiber mats and their mechanical properties”, *Journal of Materials Chemistry C*, Vol.1, pp.351-358.
 13. Qureshi, F. S., Amin, M. B., Maadhah, A. G., and Hamid, S. H. (1990), “Weather induced degradation of linear low density polyethylene (LLDPE): mechanical properties”, *Journal of Polymer Engineering*, Vol.9, No.1, pp.67-84.
 14. Croce, F., Persi, L., Scrosati, B., Serraino-Fiory, F., Plichta, E., and Hendrickson, M. A. (2001), “Role of the ceramic fillers in enhancing the transport properties of composite polymer electrolytes”, *Electrochimica Acta*, Vol.46, No.16, pp.2457-2461.
 15. Zhang, M., Li, X. H., Gong, Y. D., Zhao, N. M., and Zhang, X. F. (2002), “Properties and biocompatibility of chitosan films modified by blending with PEG”, *Biomaterials*, Vol.23, No.13, pp.2641-2648.
 16. Raj, R. G., Kokta, B. V., and Daneault, C. (1990), “A comparative study on the effect of aging on mechanical properties of LLDPE-glass fiber, mica, and wood fiber composite”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.40, No.5, pp.645-655.
 17. Raghavan, P., Zhao, X., Kim, J. K., Manuel, J., Chauhan, G. S., Ahn, J. H., and Nah, C. (2008), “Ionic conductivity and electrochemical properties of nanocomposite polymer electrolytes based on electrospun poly (vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) with nano-sized ceramic fillers”, *Electrochimica Acta*, Vol.54, No.2, pp.228-234.
 18. Chan, E. S., Wong, S. L., Lee, P. P., Lee, J. S., Ti, T. B., Zhang, Z., Poncelet, D., Ravindra, P., Phan S. H., and Yim, Z. H. (2011), “Effects of starch filler on the physical properties of lyophilized calcium-alginate beads and the viability of encapsulated cells”, *Carbohydrate Polymers*, Vol.83, No.1, pp.225-232.
 19. Dileep Kumar, C. J., Sunny, E. K., Raghu, N., Venkataramani, N., and Kulkarni, A. R. (2008), “Synthesis and Characterization of Crystallizable Anorthite-Based Glass for a Low-Temperature Cofired Ceramic Application”, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.91, No.2, pp.652-655.
 20. Lee, S. Y., Kang, I. A., Doh, G. H., Yoon, H. G., Park, B. D., and Wu, Q. (2008), “Thermal and mechanical properties of wood flour/talc-filled polylactic acid composites: Effect of filler content and coupling treatment”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol.21, pp.209-223.