

인발시험에 의한 저회에 보강된 폐어망의 인발특성 연구

Pullout Characteristics of Waste Fishing Net Reinforced Bottom Ash using Pullout Test

권순장¹, 김운태^{2*}

Soon-Jang Kwon¹, Yun-Tae Kim^{2*}

¹Member, Graduate Student, Dept. of Ocean Engineering., Pukyong National Univ., 45, Yongso-Ro, Nam-gu, Busan, 608-737, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Ocean Engineering., Pukyong National Univ., 45, Yongso-Ro, Nam-gu, Busan, 608-737, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, pullout tests were carried out to evaluate pullout characteristics of waste fishing net (WFN), which added into bottom ash for recycling both bottom ash and WFN. Three different mesh size of WFN (WFN20:20 mm × 20 mm, WFN30:30 mm × 30 mm, WFN40:40 mm × 40 mm) and geogrid were added as a reinforcement. Pullout characteristics of waste fishing net were compared with those of the geogrid. Pullout test results showed that pullout strength and stiffness of WFN20 are a little less than those of geogrid. However, the pullout friction angle of WFN20 is similar to that of geogrid due to bearing resistance induced from transverse rib because thickness of WFN20 is greater than geogrid. Pullout test results also indicated that distribution of residual strain along reinforcement after test depends on overburden stress. Residual strain at the tip of reinforcement increased with an increase in overburden stress due to concentration of pullout force on the tip of reinforcement.

요 지

본 연구에서는 산업폐기물인 저회와 폐어망을 각각 뒤채움 재료와 보강재로 재활용하기 위하여 저회와 폐어망 사이의 인발특성을 분석하였다. 이를 위해 저회로 구성된 지반에 망목크기가 다른 3종류의 폐어망(WFN20 : 20mm×20mm, WFN30 : 30mm×30mm, WFN40 : 40mm×40mm)과 지오그리드를 보강재로 사용하여 인발시험을 수행하였다. 인발시험 수행 결과, 지오그리드와 동일한 망목크기를 갖는 WFN20의 인발마찰각은 지오그리드와 유사하게 나타났다. 이것은 WFN20의 인장강도와 강성은 지오그리드 보다 작으나, WFN20의 두께가 지오그리드 보다 커서 횡리브에 의한 지지력이 발현되었기 때문이다. 보강재의 잔류변형률 분포는 연직응력에 의존한다. 연직응력이 증가함에 따라 보강재 선단에 인발력이 크게 집중되어 변형이 크게 나타난다.

Keywords : Recycling, Waste fishing net, Bottom ash, Geogrid, Pullout test, Pullout strength

1. 서 론

산업폐기물 중 폐어망(waste fishing net, WFN)은 주로 폴리에틸렌(polyethylene), 폴리에스테르(polyester) 또는

나일론(nylon)과 같은 석유화학물질로 난분해성이다. 이러한 폐어망은 분해되지 않고 원형 그대로 해저 바닥에 장기간에 퇴적된다. 이렇게 해양에 퇴적된 폐어망은 어류, 이동성 저서생물의 서식처 및 어장을 황폐화시키고, 해양 식·생물의 서식과 산란을 방해하는 원인이 된다. 또한 선박의 취수구를 막거나 프로펠러에 감기는 문제를 발생시켜 크고 작은 해난 사고를 유발한다. 1993년 292명의 귀중한 생명을 잃었던 서해훼리호 침몰사고도 폐어망 로프가

Received 16 Sep. 2013, Revised 12 Dec. 2013, Accepted 16 Dec. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-51-629-6587 ; Fax: +82-51-629-6590

E-mail address: yuntkim@pknu.ac.kr (Y.T. Kim)

사고선박의 프로펠러에 감겨서 발생된 것이다. 우리나라에서 폐어망과 같은 해양 쓰레기를 처리하기 위하여 2006년에서 2010년까지 총 1,502억원의 예산을 투입, 364,022톤을 수거 및 처리하였다(Chae, 2012). 이러한 노력에도 불구하고 아직 많은 양의 폐어망이 육상에 매립되거나 방치되고 있으며 마땅한 대책방법은 없는 실정이다. 또한 경제성장에 따라 해상 뿐만 아니라 육상의 화력발전소에서는 산업부산물인 석탄회가 발생한다. 석탄회는 비회(fly ash)와 저회(bottom ash, BA)로 구성되어 있다. 비회는 시멘트 원료나 콘크리트 혼화재 등으로 많은 양이 재활용되나, 전체 석탄회량의 약 15%에서 20%를 차지하는 저회는 일부분만 대체 잔골재 등으로 재활용되고 대부분 단순 매립 및 투기되는 실정이다. 현재 이를 처리하기 위한 매립지나 Ash pond 등이 포화상태에 이르러 새로운 매립지나 처리시설 확충이 필요하다. 앞으로 에너지의 수요는 더욱 증가하고 석탄은 국내 유일의 화석연료로서 석탄회 발생량은 계속 늘어날 전망이다. 저회의 재활용 기술이 필요한 실정이다. 따라서 폐어망 및 저회와 같은 산업폐기물을 지반공학적인 재료로 재활용할 경우 건설 재료비 절감으로 인한 수백억원 이상의 국가 예산을 절약하는 효과를 기대할 수 있다. 또한 매립공간 및 부지확보 문제 해결 등과 같은 환경적·사회적 측면에서 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 이와 같이 산업폐기물 재활용에 대한 중요성은 날이 부각되고 있으며 폐어망 및 저회를 각각 보강재 및 구조물 뒤채움 재료로서 활용하기 위한 연구가 필요하다. 특히 폐어망이 보강재로 사용될 경우 뒤채움 재료와 보강재 사이의 마찰특성에 대한 규명이 더욱 필요하다.

흙-보강재 사이의 마찰특성에 대한 선행 연구를 살펴보면, Ochiai et al.(1996)는 지오그리드에 대한 실내 인발시험을 수행하여 보강토 구조물 설계 및 해석에 필요한 마찰 특성 중 인발저항력에 대한 평가 방법을 제안하였다. Cho and Kim(1996)은 화강풍화토와 지오그리드를 대상으로 인발시험을 수행하여 인발속도, 토조 전면벽의 위치, 지오그리드 시료의 폭 및 지오그리드 수동 저항 부재의 유·무 등이 화강풍화토-지오그리드 사이의 마찰특성에 미치는 영향을 평가하였다. Sugimoto et al.(2001)는 인발 시 지오그리드 선단 지반상태가 강성 또는 연성일 때의 인발거동 차이를 분석하였으며, Alagiyawanna et al.(2001)는 지오그리드의 경사 및 위사 부재 길이 변화에 따른 인발저항력 차이를 평가하였다. 또한 직접전단시험과 인발시험 등을 수행하여 흙-보강재 사이의 거동 및 마찰특성을 규명하였

다(Hsieh and Hsieh, 2003; Moraci and Recalcati, 2006; Liu et al., 2009; Moraci and Cardile, 2009; Sieira et al., 2009; Abdelouhab et al., 2010; Anubhav and Basudhar, 2010; Adbi and Arjomand, 2011; Tuna and Altun, 2012). 대부분의 선행연구에서 사용된 지반보강재는 지오그리드, 지오텍스타일 등과 같은 토목섬유이며, 폐어망과 같은 산업폐기물을 지반보강재로 활용하기 위한 연구는 매우 부족한 실정이다.

저회를 지반공학적인 재료로 재활용하기 위한 선행 연구를 살펴보면, Kuk et al.(2009)은 공학적 성질이 모래와 유사한 저회를 선정하여 모래 대체 재료로서 쇄석과 저회 혼합재료에 관한 압축특성 규명하고자 연구하였다. Chun et al.(1992)는 비회와 저회를 적정비율로 혼합한 석탄회를 도로 성토 및 노상재로서 도로 축조에 사용하기 위하여 다짐할 경우 강도 및 내구성에 대한 영향을 검토하였다. 또한 석탄회를 구조물 뒤채움재로서 활용하기 위하여 석탄회 혼합비율(저회와 비회의 혼합비율)에 따른 모형토조시험을 수행하여 상재하중에 따른 수평토압 결과로부터 뒤채움재로서의 활용에 적합한 혼합비율을 검토하는 연구(Chun and Yeoh, 2000) 등이 있으나, 저회만을 사용하여 뒤채움 재료로서 활용하고자 하는 연구는 많이 부족한 실정이며 저회의 활용성에 대한 평가는 아직 제한적인 상황이다. 지중구조물 뒤채움 재료의 국내외 기준 검토 시 대부분 최대건조밀도는 95%이상이고, 내부마찰각은 최소 25°이상을 제시한다. 선행 연구결과 본 연구에 사용된 저회는 양호한 입도분포를 가지며 내부마찰각은 약 36°(Kwon and Kim, 2013)로서 뒤채움 재료로서 적합할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 폐어망 및 저회를 각각 지반보강재 및 뒤채움 재료로 재활용하기 위해 저회 지반에 포설된 폐어망에 대하여 인발시험을 수행하였다. 사용된 폐어망은 3종류의 망목크기(mesh size)를 가진다. 다양한 연직응력에 따른 인발시험을 수행하여 망목크기에 따른 폐어망의 인발특성을 평가하였으며, 보강토 구조물의 보강재로서 활발히 사용되고 있는 지오그리드의 인발특성과 비교·분석하였다.

2. 보강토 구조물의 흙-보강재 마찰특성

보강토 구조물은 성토 중 소정의 인장강도를 갖는 보강재를 포설하여 흙과 보강재 사이의 마찰특성으로 전단강

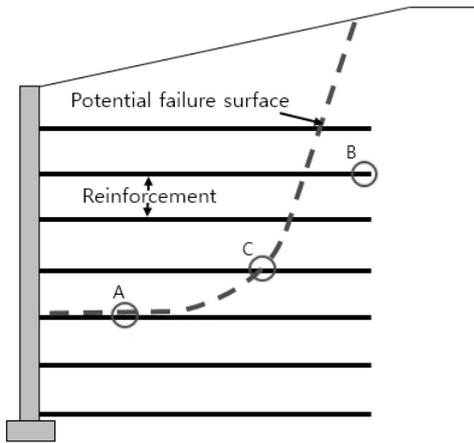


Fig. 1. Friction behavior mechanism in failure surface of geosynthetics-reinforced structures

도 증진 효과를 얻을 수 있게 설계된 구조물이다. 압축에는 강하나 인장에 취약한 흙에 인장강도를 갖는 재료를 포설함으로써 강도를 증진시키는 것이다. 보강에 주로 사용되는 보강재는 시트(sheet)형 보강재, 띠(strip)형 보강재, 그리드(grid)형 보강재 등으로 구분된다. 이러한 보강재 중 그리드 형태의 고강도 토목섬유인 지오그리드 활용이 두드러진다.

Fig. 1은 보강토 구조물의 활동면에 따른 마찰형태이다. 활동면에 따라 크게 3종류의 마찰특성을 나타낸다. A 부분의 마찰특성은 흙과 보강재 경계면에서 유발되는 마찰 특성으로 흙-보강재 경계면 전단시험의 마찰방식과 유사하다. B 부분은 인발특성으로 인발시험을 통해 마찰특성을 구할 수 있다. C 부분의 마찰특성은 파괴면에 대해 경사진 보강재에 대한 전단시험의 마찰방식과 유사하다. 이와 같은 마찰특성에 대한 평가는 보강토 구조물의 합리적인 설계 및 해석을 위해 선행되어야 한다.

Kerisel(1972)은 그리드형 보강재의 경우 표면 마찰력과 수동저항 부재에 의한 수동저항력에 따라 마찰특성이 변화하기 때문에 인발시험을 통한 마찰특성 평가가 바람직하다고 제안하였다. 이러한 개념을 바탕으로 지오그리드와 유사한 그리드 형식의 폐어망을 보강재로 재활용하기 위하여 마찰특성에 대한 평가가 필요하다. 폐어망과 지오그리드와의 마찰특성 비교·분석을 통해 폐어망이 보강재로서 적극적으로 재활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 인발저항력 평가방법

폐어망에 대한 인발저항력을 평가하기 위하여 폐어망

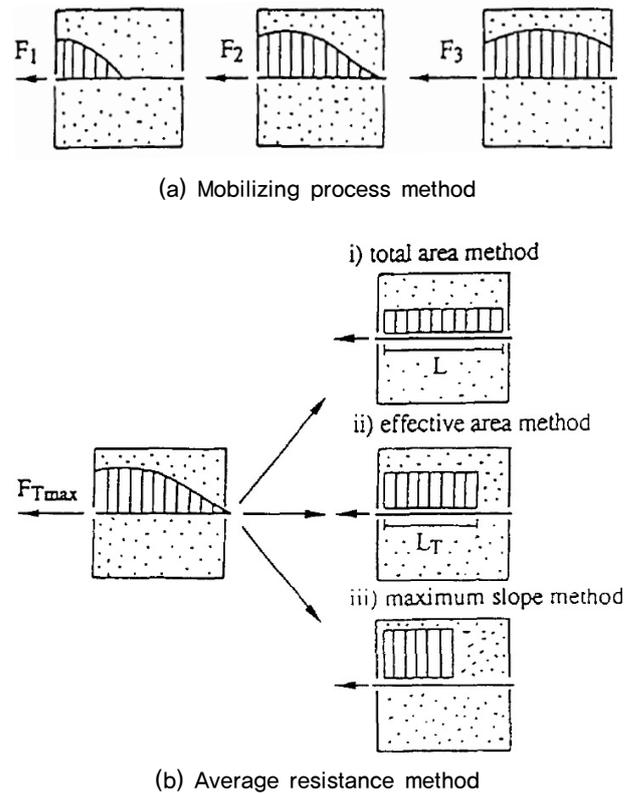


Fig. 2. Evaluation methods of pull-out resistance(Ochiai et al., 1996)

과 유사한 그리드 형태의 토목섬유 지오그리드에 대한 인발저항력 평가방법을 사용하였다. 지오그리드 인발저항력 평가방법에는 대표적으로 Ochiai et al.(1996)이 제안한 인발저항력 발휘과정 산정법(mobilizing process method)과 평균 인발저항력 산정법(average resistance method)이 있다.

인발저항력 발휘과정 산정법은 Fig. 2(a)와 같이 임의의 인발력 작용 시 인발되는 과정에서 나타나는 인발저항력 변화를 고려하는 방법으로 토목섬유 보강토 구조물의 변형해석에 주로 사용된다. Fig. 2(b)의 평균 인발저항력 산정법은 최대인발력 하에서 인발저항력 분포를 산정하여 그 평균값을 인발저항력으로 결정하는 방법으로 보강토 옹벽 설계 시 주로 쓰이는 한계평형해석에 사용된다. 평균 인발저항력 산정법은 평균값 결정 방식에 따라 3가지 방법인 전체면적법, 유효면적법, 최대경사법으로 구분된다. 전체면적법은 인발시험 시 토조 내에 포설된 토목섬유 전체 면적에 인발력이 작용하는 것으로 가정한다. 유효면적법은 인발로 인하여 실제 변형이 발생한 부분에서만 인발력이 작용한다고 가정하여 인발저항력을 평가하며, 최대경사법은 인장력 분포곡선의 최대접선기울기를 인발저항력으로 가정한다. 평균값 결정 방식 중 최대경사법으로 구

한 인발저항력은 전체면적법과 유효면적법으로 구한 인발저항력 보다 과대평가되는 단점이 있다. 그리고 유효면적법의 경우 인발력이 작용하는 유효길이 산정이 어렵고 유효길이에 따라 인발저항력이 큰 차이를 보이는 등 적용에 어려움을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 간편히 인발저항력을 평가할 수 있는 전체면적법을 사용하였다.

4. 실험재료 및 실험방법

4.1 실험재료

4.1.1 저회

본 연구에서는 저회의 재활용성을 높이고자 보강토 구조물의 뒤채움재로 많이 사용되고 있는 화강풍화토 대신 저회로 지반을 조성하였다. 저회는 삼천포 화력발전소에서 채취하였으며 No.4체를 통과시켜 자갈크기의 입자를 배제하였다. Table 1은 비중시험, 입도분포시험, 표준다짐시험 및 X-선 분석을 통해 구한 저회의 물리적 특성을 나타내고 있다. 저회의 비중은 2.0이며 균등계수 11.25, 곡률계수 1.14로 비교적 양호한 입도분포를 가진 모래와 유사한 특성을 나타내었다. 또한 XRF(X-ray Fluorescence)와 XRD(X-ray Diffractogram)를 통하여 저회의 화학적 성분

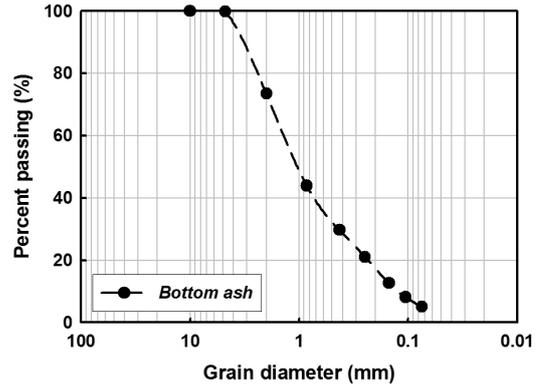


Fig. 3. Particle-size distribution curves of bottom ash

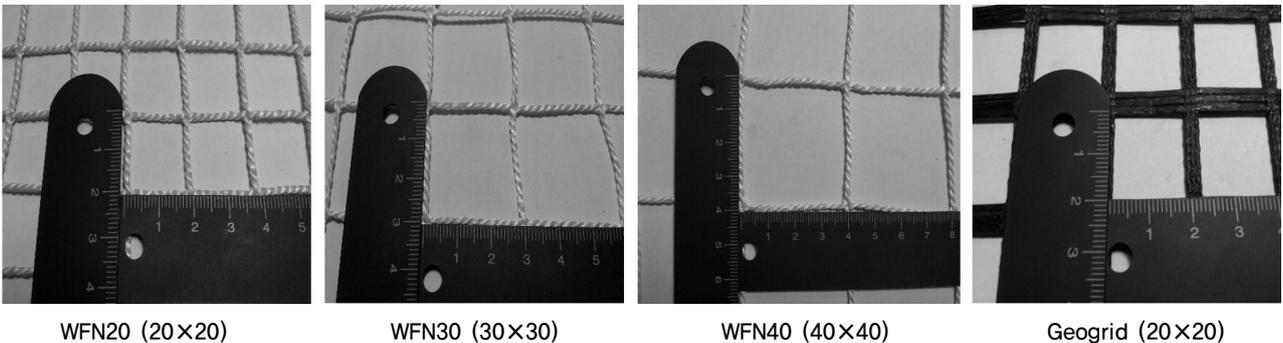
및 주요결정상을 분석하였다. XRF 분석 결과로부터 구한 저회의 화학적 성분은 실리카(SiO_2)와 알루미나(Al_2O_3) 성분을 많이 함유하고 있다. Fig. 3은 저회의 입도분포곡선을 나타낸다. 입도분포곡선을 통해 구한 유효입경(D_{10})은 0.12mm이다(Kim and Kang, 2008).

4.1.2 보강재

폐어망의 망목크기(mesh size) 차이에 따른 마찰특성을 평가하고, 토목섬유 중 보강토 구조물에 활발히 사용되고 있는 지오그리드와 폐어망의 마찰특성을 비교하기 위하여 Pic. 1과 같은 3종류의 망목크기를 가지는 폐어망(waste

Table 1. Physical properties of bottom ash

Specific gravity	Gs	2.0
Sieve analysis	D10 (mm)	0.12
	D30 (mm)	0.43
	D60 (mm)	1.35
	Uniformity coefficient (C_u)	11.25
	Coefficient of gradation (C_g)	1.14
Compaction test	Optimum moisture content (w_{opt})	15.3%
	Maximum dry unit weight (r_{dmax})	10.5kN/m ³
	Main constituent (content)	SiO_2 (52.7%), Al_2O_3 (19.3%)
X-ray analysis (XRF, XRD)	Main crystallographic	Quartz, Mullite



Pic. 1. Waste fishing net and geogrid (unit : mm)

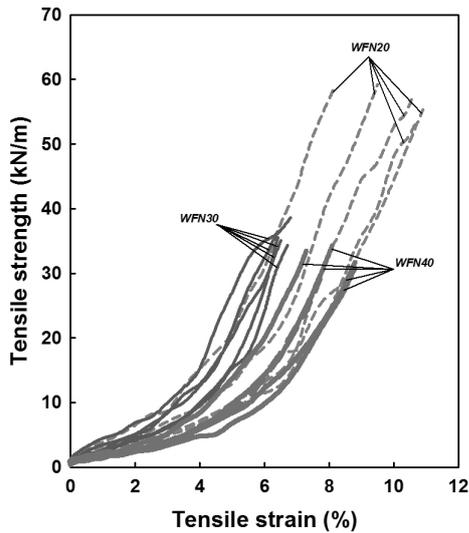


Fig. 4. Tensile strength of waste fishing net

fishing net : WFN)과 지오그리드(geogrid)를 사용하였다. 3종류의 망목크기는 각각 20mm×20mm, 30mm×30mm, 40mm×40mm이며 재질은 폴리에스테르(polyester : PET)로 동일하다. 지오그리드는 S사의 제품으로서 폴리에스테르를 이용하여 그리드 형태로 배열하고 고분자 수지로 코팅하여 제조되었으며, 망목크기는 20mm×20mm이다. 광폭인장시험으로 구한 폐어망의 인장강도 특성은 Fig. 4와 같다. 섬유감별시험 및 광폭인장시험은 (구)한국원사직물시험연구원(FITI)에서 수행하였다. 한 폐어망 당 5번의 광폭인장시험을 수행하였다. Table 2는 섬유감별시험 및 광폭인장시험을 통해 구한 폐어망 및 지오그리드의 물리적

특성을 나타내고 있다. 폐어망과 지오그리드의 두께는 각각 2mm, 1mm로서 폐어망이 지오그리드보다 2배 두껍다. WFN20, WFN30, WFN40의 최대인장강도 평균값은 각각 56.8kN/m, 35.9kN/m, 31.9kN/m로서 망목크기가 커짐에 따라 최대인장강도의 평균값은 감소한다. 지오그리드의 최대 인장강도는 69.2kN/m로서 지오그리드가 폐어망보다 높은 인장강도를 가진다.

4.2 인발시험

다양한 망목크기를 가지는 폐어망에 대한 인발특성을 파악하기 위해 인발시험을 수행하였다. 폐어망의 인발특성을 비교·분석하기 위해 지오그리드에 대한 인발시험도 동시에 수행하였다. 실험에 사용된 인발시험기는 토조, 인발장치, 보강재 체결부위, 연직응력 재하장치 등으로 구성되었다. 토조 내부 규격은 길이 60cm, 폭 40cm, 높이 30cm이며 토조 중앙에 폐어망 및 지오그리드를 포설하기 위한 높이 1cm, 폭 40cm의 틈이 있다. Table 3은 폐어망 및 지오그리드의 인발시험조건이다. 토조 내부 지반은 저회로 구성되었으며 소형다짐기를 사용하여 지중구조물 뒤 채움 기준(KEC, 2000)에 맞게 상대밀도 95%로 설정하였다. 폐어망 및 지오그리드의 길이는 50cm, 폭은 30cm로 토조 내부 측면벽과 저회의 마찰효과를 최소화하기 위하여 보강재/토조의 폭 비율이 약 80% 이하가 되도록 하였다(Cho and Kim, 1996). 토조 상부에 설치된 에어백(air

Table 2. Physical properties of reinforcement

Reinforcement	WFN20	WFN30	WFN40	Geogrid
Type	PET			PET+PVC Coating
Thick	2mm			1mm
Mesh size	20mm X 20mm	30mm X 30mm	40mm X 40mm	20mm X 20mm
Peak tensile strength (kN/m)	Minimum ~ Maximum (Average)			69.2
	53.5 ~ 59.2 (56.8)	34.3 ~ 38.3 (35.9)	29.1 ~ 34.3 (31.9)	
Tensile strength at 5% strain (kN/m)	8.7 ~ 20.9 (12.4)	15.3 ~ 27.1 (19.9)	6.8 ~ 13.7 (9.5)	31.5
Tensile strain at failure (%)	9.5 ~ 10.9 (10.0)	6.4 ~ 6.8 (6.6)	7.3 ~ 8.8 (8.1)	10.1

Table 3. Pullout test terms of reinforcement

Reinforcement	Soil	Relative density (Dr, %)	Length of reinforcement (cm)	Width of reinforcement (cm)	Normal pressure (kPa)
WFN20	Bottom ash	95	50	30	30, 60, 90
WFN30					
WFN40					
Geogrid					

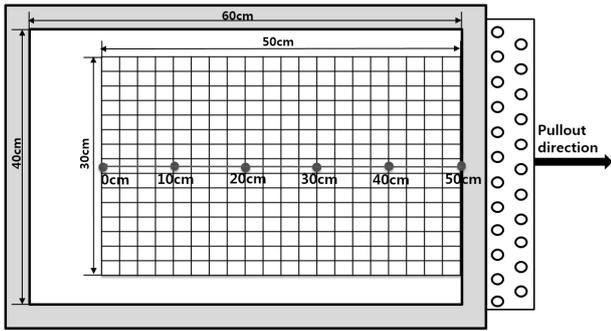


Fig. 5. Conceptual diagram for reinforcement residual strain measurement

bag)에 공기압을 주어 토조 내에 균등한 연직응력을 줄 수 있다. 본 실험에 적용된 연직응력은 각각 30kPa, 60kPa, 90kPa이다.

Fig. 5는 보강재 잔류변형률을 측정하기 위한 개념도이다. 인발시험에 사용된 보강재의 잔류변형률을 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 인발방향 기준으로 보강재 끝부분부터 10cm 간격으로 6개의 지점을 표시한 후 각 지점 간격

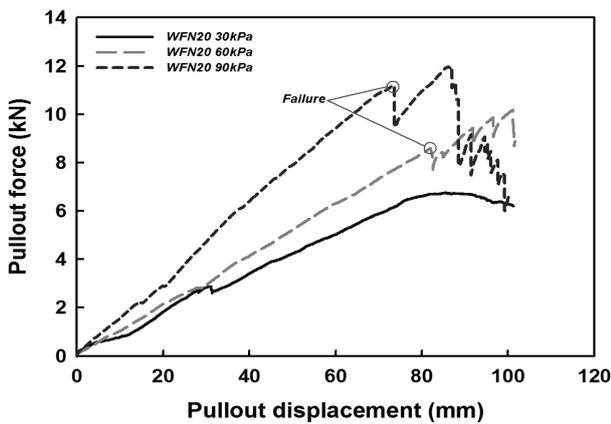
을 측정하였다. 그리고 인발시험 수행 후 동일한 방법으로 각 지점 간격을 다시 측정하였다. 각 지점 사이의 측정된 길이로부터 식 (1)을 이용하여 잔류변형률을 산정하였다.

$$\frac{\text{실험 후 지점 간의 길이 (cm)} - \text{실험 전 지점 간의 길이 (cm)}}{\text{실험 전 지점 간의 길이 (cm)}} \times 100\% = \text{보강재 잔류변형률 (\%)} \quad (1)$$

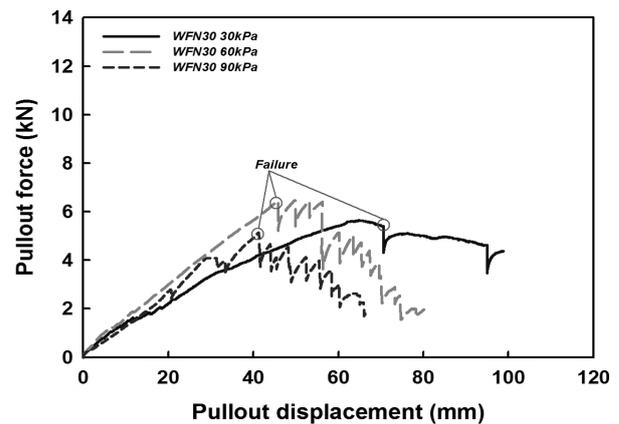
5. 실험결과 및 분석

5.1 인발력-인발변위 관계

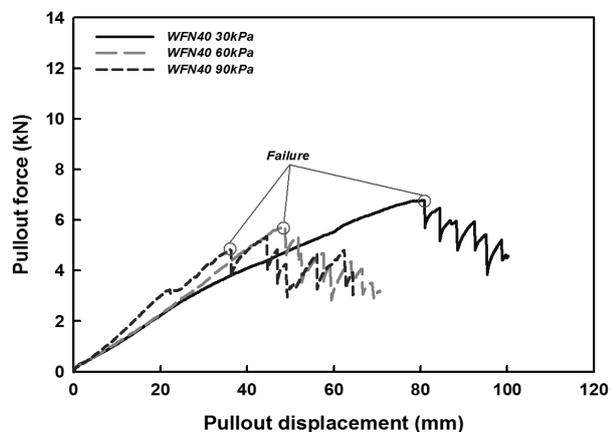
Fig. 6은 각 연직응력에 따른 폐어망 및 지오그리드의 인발력-인발변위 관계를 나타낸다. WFN20과 지오그리드는 연직응력이 증가함에 따라 최대인발력도 증가한다. 또한 보강재가 파단 없이 인발되거나 인발력이 충분히 발현된 후 파단되는 경향을 나타낸다. 그러나 폐어망 WFN30과 WFN40은 Pic. 2와 같이 큰 연직응력 하에서 인발 시 인발



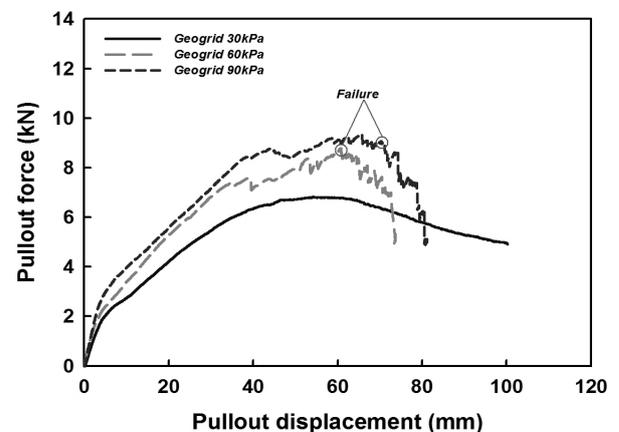
(a) WFN20



(b) WFN30

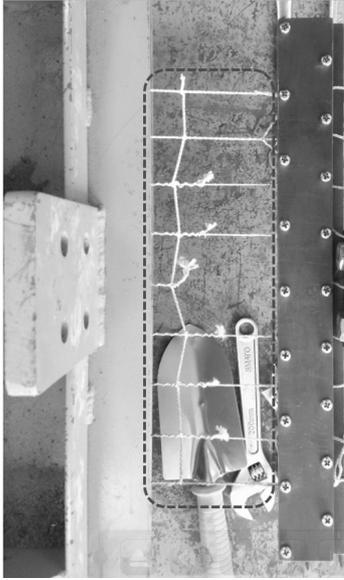


(c) WFN40



(d) Geogrid

Fig. 6. Pullout force versus pullout displacement curves for waste fishing net and geogrid by normal pressure



Pic. 2. Failure of Waste fishing net connection in pullout test

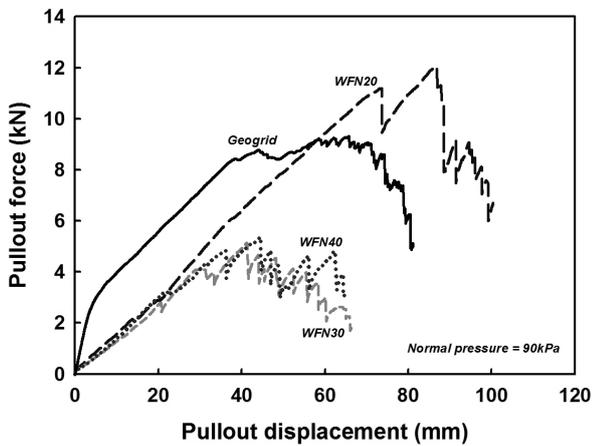


Fig. 7. Pullout force versus pullout displacement curves for waste fishing net and geogrid

력이 충분히 발현되기 전에 체결부위에서 파단이 발생하였다. 이는 WFN30과 WFN40의 인장강도가 WFN20과 지오그리드에 비해 상대적으로 낮고, 체결부근의 각 페어망에서 응력 집중이 발생하였기 때문에 인발초기에 파단이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 연직응력 90kPa 하에서 페어망 및 지오그리드의 인발력-인발변위 관계를 나타낸다. 인발 초기에 지오그리드는 페어망 보다 큰 인발력을 가지며, 최대인발력 발현 시점의 인발변위도 페어망 보다 작다. 이것은 지오그리드의 강성도 및 인장강도가 페어망보다 크기 때문이다.

5.2 보강재 잔류변형률 분포

Fig. 8은 인발시험 끝난 후에 구한 보강재의 잔류변형률

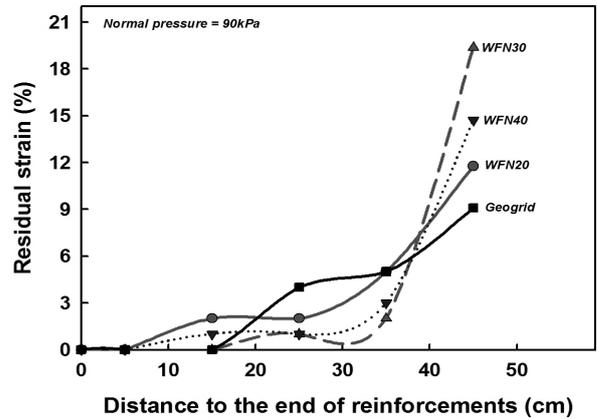
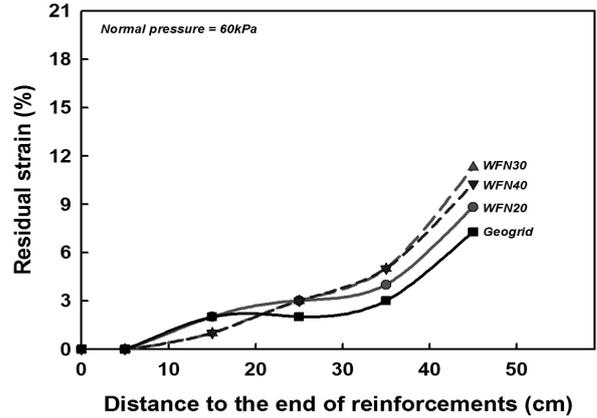
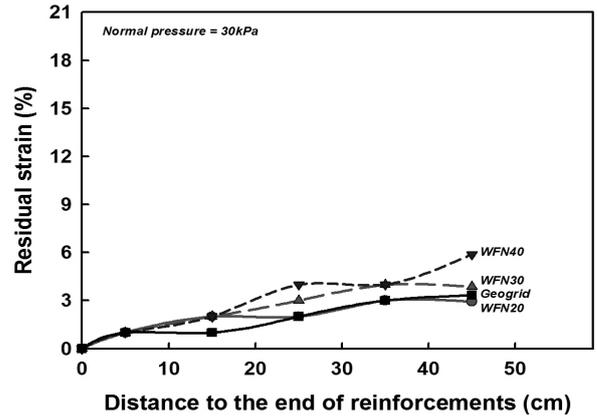


Fig. 8. Residual strain distribution of waste fishing net and geogrid

분포를 나타낸 것이다. 보강재 선단 부근의 잔류변형률을 살펴보면 지오그리드는 페어망 보다 낮은 잔류변형률을 나타낸다. 이것은 상대적으로 페어망 보다 지오그리드의 강성도 및 인장강도가 크기 때문에 인발 시 지오그리드의 변형이 페어망 보다 작게 발생된 것으로 판단된다. 페어망 중에서 가장 큰 인장강도를 갖는 WFN20의 잔류변형률이 WFN30과 WFN40의 잔류변형률 보다 작게 나타났다. 연직응력 30kPa 일 때 잔류변형률은 보강재 끝단으로부터 거리가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 그러나 연직

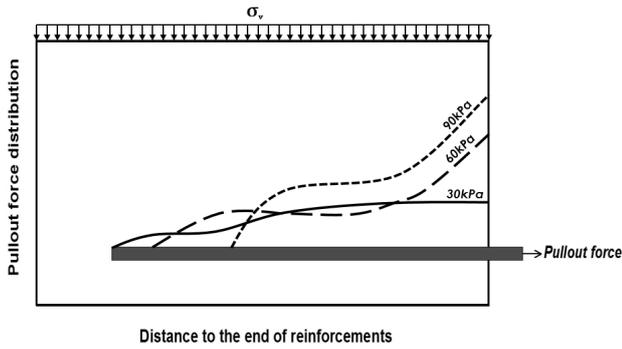


Fig. 9. Distributions of pullout force by normal pressure

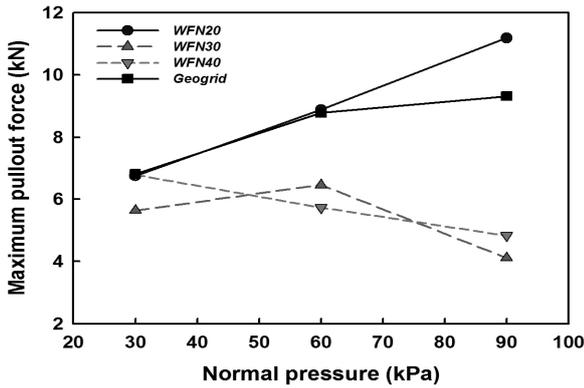


Fig. 10. Relationship of maximum pullout force and normal pressure

응력이 90kPa일 때는 보강재 선단 부근에서 잔류변형률이 크게 증가하였다. 즉 보강재 잔류변형률 분포는 연직응력의 크기에 따라 크게 차이나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 연직응력이 증가함에 따라 보강재 선단에 인발력이 크게 집중되어 변형이 크게 나타나며, 보강재 끝단까지 인발력이 전달되지 않기 때문이다. 이와 같은 결과로부터 보강재에 발현된 인발력도 낮은 연직응력 하에서는 Fig. 9와 같이 보강재 끝단에서 선단까지 선형적으로 증가하나, 연직응력이 증가함에 따라 선단 부근에 집중됨을 알 수 있다.

5.3 인발저항강도

Fig. 10은 연직응력에 따른 보강재의 최대인발력을 나

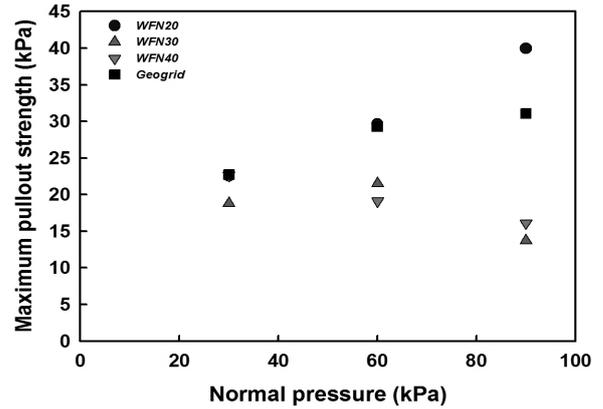


Fig. 11. Relationship of maximum pullout strength and normal pressure

타낸다. 최대인발력은 Fig. 6에서 최대인발력 값 또는 파단 시점의 인발력 값이다. WFN20과 지오그리드는 연직응력이 증가함에 따라 최대인발력이 증가됨을 알 수 있다. WFN30과 WFN40은 인발시험 시 큰 연직응력 하에서 파단이 발생하여 최대인발력이 낮게 나타났다. 만약 파단이 발생하지 않는다면 WFN30과 WFN40 또한 연직응력이 증가함에 따라 최대인발력도 증가되는 경향을 나타낼 것으로 사료된다. Fig. 11은 연직응력과 최대인발강도의 관계를 나타낸다. 최대인발강도는 전체면적법을 적용하여 얻은 인발강도로서 식 (2)로부터 계산되었다.

$$\tau = \frac{F_{Tmax}}{2A} \quad (2)$$

여기서, τ : 인발저항강도 (kPa)

F_{Tmax} : 보강재의 최대인발력 (kN)

A : 보강재의 면적 (m^2)

인발강도정수는 입도가 양호한 입상토의 인발점착력(c)은 0이며 인발마찰각(δ)만 존재한다는 인발정수 결정법 (Ju et al., 2010)을 바탕으로 산정하여 Table 4에 정리하였다. 3종류의 폐어망 및 지오그리드의 인발마찰각을 비교

Table 4. Pullout friction angle (δ)

Normal pressure (kPa)	WFN20	WFN30	WFN40	Geogrid
	pullout friction angle δ (°)			
30	36.91	32.07	37.03	37.15
60	26.28	19.88 and over (F)	17.66 and over (F)	26.00
90	23.95	10.77 and over (F)	11.25 and over (F)	19.05

(F = Failure, 높은 연직응력 하에서 보강재 파단 발생)

해 보면 폐어망 WFN20과 지오그리드의 인발마찰각은 거의 비슷하다. WFN20의 강성도와 인장강도는 지오그리드보다 작으나, WFN20의 두께가 지오그리드보다 크기 때문에 횡리브에 의한 지지력이 발현된 것으로 사료된다. 이러한 결과는 폐어망 WFN20도 보강토 구조물의 보강재로서 재활용될 수 있다는 가능성을 의미하나, 추가적인 역학적 특성 시험(크리프 시험 등) 및 내구성 시험이 수행되어야 하며, 추후 현장 검증이 필요하다.

6. 결론 및 고찰

본 논문에서는 산업폐기물인 저회와 폐어망을 각각 뒤채움 재료와 보강재로 재활용하기 위하여 저회 지반에 포설된 폐어망의 마찰특성을 분석하였다. 이를 위해 저회 지반에 망목크기가 각각 다른 3종류의 폐어망과 지오그리드를 보강재로 사용하여 인발시험을 수행하였다. 시험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) WFN20과 지오그리드는 보강재의 파단 없이 인발되거나 인발력이 충분히 발현된 후 파단되었다. 반면에 WFN30과 WFN40은 큰 연직응력 하에서 인발 시 인발력이 충분히 발현되기 전에 체결부위에서 파단이 발생하였다. 이것은 WFN30과 WFN40의 인장강도가 WFN20과 지오그리드보다 낮고, 체결부근의 각 폐어망에서 응력 집중이 발생하였기 때문이다.
- (2) 보강재의 잔류변형률 분포는 연직응력의 크기에 따라 크게 차이난다. 이것은 연직응력이 증가함에 따라 보강재 선단에 인발력이 집중되어 변형이 크게 나타나며, 보강재 끝단까지 인발력이 전달되지 않기 때문이다.
- (3) 지오그리드는 폐어망보다 낮은 잔류변형률을 나타낸다. 이것은 폐어망보다 지오그리드의 강성도 및 인장강도가 상대적으로 크기 때문에 인발 시 지오그리드의 변형이 작게 발생하였다.
- (4) WFN20과 지오그리드의 인발마찰각은 거의 비슷하다. 이것은 WFN20의 강성도와 인장강도는 지오그리드보다 작으나, WFN20의 두께가 지오그리드보다 크기 때문에 횡리브에 의한 지지력이 발현된 것으로 사료된다.
- (5) 본 연구 결과는 WFN20도 보강토 구조물의 보강재

로서 재활용될 수 있다는 가능성을 의미하나, 추가적인 역학적 특성 시험(크리프 시험 등) 및 내구성 시험이 수행되어야 하며, 추후 현장 검증이 필요하다.

Acknowledgement

This work was supported by the BK21+ project and National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (No. 2012-047702)

References

1. Abdelouhab, A., Dias, D. and Freitag, N. (2010), "Physical and Analytical Modelling of Geosynthetic Strip Pull-out Behaviour", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, No.1, pp.44-53.
2. Abdi, M. R. and Arjomand, M. A. (2011), "Pullout Tests Conducted on Clay Reinforced with Geogrid Encapsulated in Thin Layers of Sand", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.29, No.6, pp.588-595.
3. Alagiyawanna, A. M. N., Sogimoto, M., Sato, S. and Toyota, H. (2001), "Influence of Longitudinal and Transverse Members on Geogrid Pullout Behavior during Deformation", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.19, No.8, pp.483-507.
4. Anubhav and Basudhar, P. K. (2010), "Modeling of Soil-Woven Geotextile Interface Behavior from Direct Shear Test Result", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, No.4, pp.403-408.
5. Chae, D. R. (2012), *A Study on the Damage Reduction of Marine litter of Gyeong-nam*, Gyeong-nam Development Institute.
6. Cho, S. D. and Kim, J. M. (1996), "Evaluation of Weathered Granite Soil/Geogrid Friction Properties and Pull-out Test", *Korean Geotechnical Society* Vol.12, No.4, pp.87-99.
7. Chun, B. S., Lee, E. S. and Koh, Y. I. (1992), "The Strength and Durability of Compacted Coal Ash with Proper Mixing Ratio of Fly Ash to Bottom Ash", *Korean Society of Civil Engineers*, Vol.12, No.3, pp.207-213.
8. Chun, B. S. and Yeoh, Y. H. (2000), "A Study on the Recycling of Coal Ash as Structural Backfill Materials", *The Korean Society of Ocean Engineers*, Vol.14, No.1, pp.74-79.
9. Hsieh, C. and Hsieh, M. W. (2003), "Load Plate Rigidity and Scale Effects on the Frictional Behavior of Sand/Geomembrane Interfaces", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.21, No.1, pp.25-47.
10. Ju, J. W., Lim, W. S., Lee, G. D., Park, J. B. and Kim, J. H. (2010), "Pullout Characteristics According to the Change of Reinforcement Length in Pullout Test", *Korean Geo-*

synthetics Society Fall Conference, pp.81-93.

11. Kerisel, J. (1972), *The Language of Models in Soil Mechanics*, Cambridge University Press, pp.49.
12. Kim, Y. T. and Kang, H. S. (2008), "Mechanical Properties of Waste Tire Powder-Added Lightweight Soil", *Korean Society of Civil Engineers* Vol.28, No.4C, pp.247-253.
13. Korea Expressway Corporation (2000), *A Guide for the Backfill Materials of Embedded Structures*, Expressway Research Institute Research Report
14. Kuk, K. K., Do, J. N., Ham, T. G. and Chun, B. S. (2009), "Compressibility Characteristics of Crashed Stone and Bottom Ash Mixture by One-Dimensional Compression Test", *Korean Society of Civil Engineers Conference 2009*, pp.877-880.
15. Kwon, S. J. and Kim, Y. T. (2013), "Shear Properties of Bottom Ash-Crumb Rubber Mixture Reinforced with Waste Fishing Net Using Triaxial Test", *Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.9, pp.81-91.
16. Liu, C. N., Ho, Y. H. and Huang, J. W. (2009), "Large Scale Direct Shear Tests of Soil/PET-yarn Geogrid Interfaces", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.27, No.1, pp.19-30.
17. Moraci, N. and Cardile, G. (2009), "Influence of Cyclic Tensile Loading on Pullout Resistance of Geogrids Embedded in a Compacted Granular Soil", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.27, No.6, pp.475-487.
18. Moraci, N. and Recalcati, P. (2006), "Factors Affecting the Pullout Behaviour of Extruded Geogrids Embedded in a Compacted Granular Soil", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.24, No.4, pp.220-242.
19. Ochiai, H., Otani, J., Hayashi, S. and Hirai, T. (1996), "The Pull-Out Resistance of Geogrids in Reinforced Soil", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.14, No.1, pp.19-42.
20. Sieira, A. C. C. F., Gerscovich, D. M. S. and Sayao, A. S. F. J. (2009), "Displacement and load transfer mechanisms of geogrids under pullout condition", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.27, No.4, pp.241-253.
21. Sugimoto, M., Alagiyawanna, A. M. N. and Kadoguchid, K. (2001), "Influence of Rigid and Flexible Face on Geogrid Pullout Tests", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.19, No.5, pp.257-277.
22. Tuna, S. C. and Altun, S. (2012), "Mechanical Behaviour of Sand-Geotextile Interface", *Scientia Iranica*, Vol.19, No.4, pp.1044-1051.