

지반 특성을 고려한 도저의 최적 그라우저 형상비 평가

Evaluation of the Optimal Grouser Shape Ratio of Dozer Considering the Ground Conditions

백 성 하¹ Baek, Sung-Ha 곽 태 영² Kwak, Tae-Young
최 창 호³ Choi, Changho 이 승 환⁴ Lee, Seong-Hwan

Abstract

A dozer is a construction machinery used to move soil mass along large open tracts of land. Soil thrust generated on the soil-track interface determines the performance of the dozer; to improve the tractive performance of the dozer, the outer surface of the continuous-track is designed to protrude with grousers. In this study, we calculated soil thrust of the dozer equipped with grousers with various shape ratios, and evaluated the optimal grouser shape ratio considering ground conditions. Grouser generated additional soil thrust on the side of the continuous-track (e.g., side soil thrust) and converted the shearing surface (e.g., from soil-track interface to soil-soil interface), increasing the soil thrust of dozer by about 1.3 to 1.6 times. The effect of grouser's shape ratio on the soil thrust of dozer differed with the relative density of the ground. As the shape ratios of grouser increased, soil thrust of dozer decreased at the relative density of 40% and increased at the relative density of 80%. Based on these results, it can be concluded that the shape ratio of grouser severely affects the dozer's performance; thus, careful consideration of the optimal shape ratio of grouser is of great importance in the mechanical design, evaluation, and optimization of the undercarriage of dozers.

요 지

도저는 토공사 현장에서 부지를 평탄화하거나 토사를 모으기 위해 사용되는 장비이다. 도저의 성능은 지반-궤도 접지면에서 발휘되는 지반추력에 의해 결정되는데, 주어진 조건에서 최대한의 지반추력을 발휘시키기 위해서 무한궤도 표면에 그라우저를 부착하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 다양한 형상비를 가지는 그라우저가 부착된 도저의 지반추력을 산정하고, 이를 바탕으로 지반 특성을 고려한 최적 그라우저 형상비를 평가했다. 그라우저는 궤도 측면에서 추가적인 지반추력(측면지반추력)을 발휘시키고 지반-궤도 사이의 전단을 지반-지반 사이의 전단으로 전환시켜, 도저의 지반추력을 약 1.3~1.6배 증가시켰다. 그라우저 형상비가 지반추력에 미치는 영향은 도저가 구동하는 지반의 다짐도에 따라 다르게 나타났다. 느슨한 지반에서는 형상비가 작은 그라우저가, 조밀한 지반에서는 형상비가 큰 그라우저가 도저의 지반추력을 가장 크게 증가시킬 수 있는 최적의 형상으로 평가되었다. 무한궤도에 지반의 다짐도를 고려한 최적 그라우저를 부착한다면 도저의 작업 성능을 보다 크게 강화할 수 있을 것이며, 이를 통해 장비의 효율적 활용 및 토공사 생산성 향상이 가능할 것으로 기대된다.

1 정희원, 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

2 정희원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

3 정희원, 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

4 정희원, 한국건설기술연구원 국가건설기술센터 박사후연구원 (Member, Post Doc. Researcher, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech, Tel: +82-31-995-0967, seunghwanlee@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

도저(dozer)는 토공사 현장에서 부지를 평탄화하거나 작업에 필요한 토사를 모으기 위해 사용되는 장비이다(Fig. 1). 도저는 지반 위를 구동하며 장비의 진행 방향 앞쪽에 부착된 블레이드(blade)를 통해 토사를 밀어내며 작업을 수행한다. 도저의 성능은 토사를 밀어내는 능력을 의미하며, 이는 도저에서 발휘되는 구동력(traction force)에 따라 결정된다(Wong, 1989). 따라서 바퀴에 비해 구동의 자율성은 떨어지지만, 접지면적이 넓어 지반에 가하는 접지압이 낮고 큰 구동력을 확보할 수 있는 무한궤도(continuous-track)가 도저의 구동 장치로서 널리 적용되고 있다(Yong et al., 1984).

포장된 도로는 노면의 강도가 충분하므로 엔진에서 발생된 추진력(즉, 엔진추력)이 모두 유용한 구동성능으로 활용될 수 있지만, 도저가 작업하는 비포장 지반에서의 구동성능은 지반의 전단현상에 의해 제한된다. 도저의 엔진추력이 무한궤도를 회전시키면 지반-궤도 접지면(soil-track interface)에서 지반의 전단변위(shear displacement)와 이에 따른 전단력(shear force)이 발생되는데, 지형역학(terremechanics)에서는 이를 각각 슬립변위(slip displacement)와 지반추력(soil thrust)라고 명명한다(Bekker, 1956). 도저의 구동력은 엔진추력과 지반추력 중 작은값으로 결정되며, 일반적으로 엔진추력이 지반추력에 비해 매우 크므로 지반추력이 도저의 구동력이 된다. 따라서 도저의 효율적 활용을 위해서는 주어

진 조건에서 최대한의 지반추력을 발휘시키는 것이 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이, 지반추력은 지반-궤도 접지면에서 발생하는 전단력이므로 지반의 전단강도(shear strength) 및 전단면적(shearing area)에 영향을 받는다. 도저 작업 시 지반의 전단강도를 변화시키는 것은 매우 어렵기 때문에, 큰 지반추력을 발휘시키기 위해서는 무한궤도 표면에 그라우저(grouser)를 부착함으로써 보다 넓은 전단면적을 확보하는 것이 일반적이다(Fig. 2).

많은 연구자들(Grecenko, 2007a; Baek, 2018; Baek et al., 2018; Shin et al., 2018; Shin et al., 2020)은 그라우저가 지반추력에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하여, 그라우저가 무한궤도의 양 측면에서 추가적인 전단력을 발휘시켜 지반추력을 증가시키는 효과가 있음을 밝혔다. 이들 연구에 따르면 그라우저에 의한 지반추력의 증가효과는 그라우저의 간격과 높이의 비로 표현되는 형상비(=간격/높이)에 따라 달라졌다. 예를 들어 그라우저의 간격이 동일하고 높이가 높아지면(즉, 형상비가 감소하면) 무한궤도 양 측면에서 발휘되는 전단력의 크기가 커지지만, 전단영역중첩(overlapping shear zone)과 같은 인접 그라우저 간 간섭효과(interference effect)도 함께 커져 지반추력 증가 효과가 상당부분 상쇄된다. 그라우저 형상비에 따른 측면 전단력 증감 및 인접 그라우저 간 간섭효과는 장비 및 지반 특성에 따라 다르게 나타나므로(Shin et al., 2018; Shin et al., 2020), 대상 장비 및 지반 특성을 고려해 지



Fig. 1. Photographs of a dozer manufactured by Caterpillar Inc.

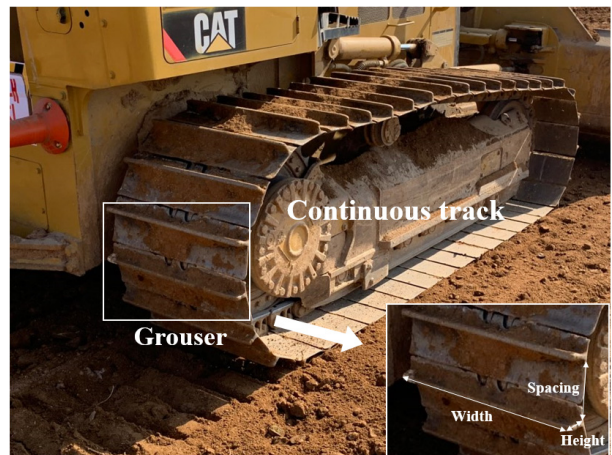


Fig. 2. Photographs of a continuous track protruded with a number of grousers

반추력을 평가하고 최적의 그라우저 형상비를 도출하는 것은 장비의 효율적 활용을 위해 매우 중요하다. 이러한 관점에서 일부 연구자들(Patel et al., 2004; Wong and Huang, 2006; Baek and Chung, 2018)이 지반-궤도 상호작용 이론(soil-track interaction theory)을 바탕으로 실제 장비의 지반추력을 평가한 바 있다. 그러나 150kg 이하의 소형 로버(rover) 혹은 건조한 모래 지반을 대상으로 하여 도저의 작업 조건과 큰 차이가 있거나(Patel et al., 2004), 인접 그라우저 간 간섭효과를 고려하지 못했다는 한계가 있었다(Wong and Huang, 2006; Baek and Chung, 2018).

본 연구에서는 가장 최신의 지반-궤도 상호작용 연구인 Baek et al.(2018)과 Shin et al.(2020)이 제시한 지반추력 평가모델을 적용해 토공사 현장에서 널리 적용되고 있는 상용 도저의 성능을 평가하고, 이를 바탕으로 지반 특성을 고려한 최적 그라우저 형상비를 도출했다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 지반추력 평가 모델을 바탕으로 도저의 성능을 평가하는 방법을 정리하고,

3절에서는 성능 평가 대상 도저 및 지반 특성을 기술했다. 4절에서는 Baek et al.(2018)과 Shin et al.(2020)이 제시한 지반추력 평가모델을 통해 도저의 성능을 평가했고 이를 바탕으로 지반 특성을 고려한 최적 그라우저 형상비를 도출했다. 본 연구의 결론은 5절에 서술하였다.

2. 지반추력 평가 모델을 활용한 도저 성능평가 방법

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 도저는 엔진추력을 통해 무한궤도를 회전시키고 무한궤도에 부착된 그라우저가 지반에 횡방향 전단하중을 가하며 구동한다. 지반에 가해진 횡방향 전단하중에 의해 인접한 그라우저 사이에서 지반블록(soil block)이 형성되고, 각각의 지반블록은 전단파괴면(shear failure line)을 따라 독립적으로 전단된다(Grecenko, 2007a). 각각의 지반블록에서 발현된 전단력(즉, 지반추력)을 모두 더하면 도저의 구동력을 산정할 수 있다(Grecenko, 2007b).

Fig. 4에 나타낸바와 같이 지반블록은 그라우저의 너

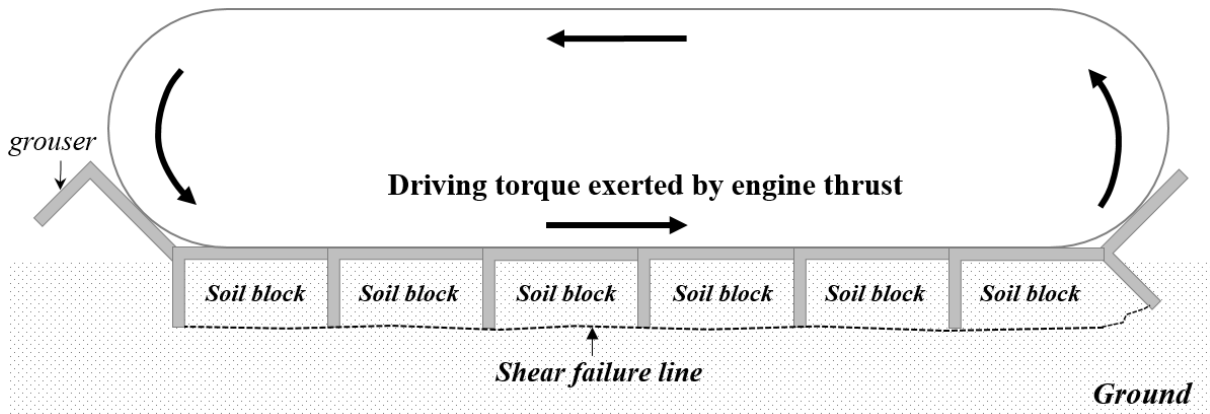


Fig. 3. Cross-sectional view of soil failure of continuous-track protruded with grousers

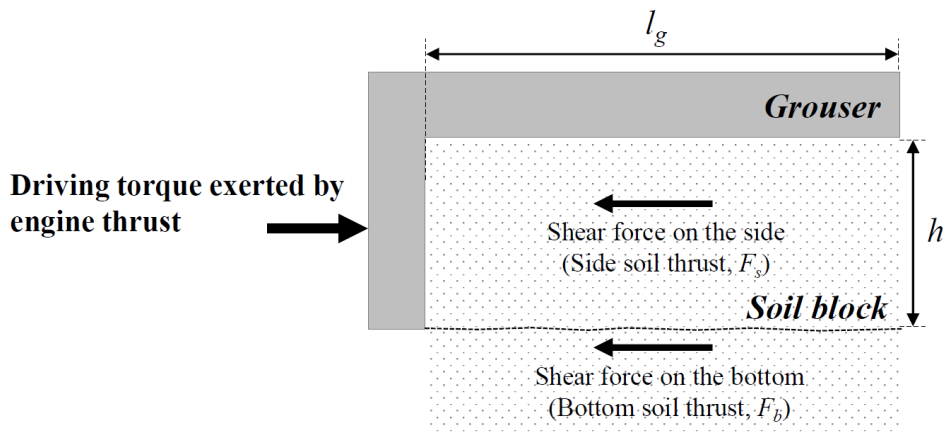


Fig. 4. Cross-sectional view of soil failure and associated shear forces for a single grouser

Table 1. Existing shear strength model for the bottom and side of the soil block formed by grouser

References	Shear strength on the bottom	Shear strength on the side
Bekker (1956)	$c + \sigma_v' \tan \phi$	$c + 0.64 \frac{h}{w} \sigma_v' \tan \phi \cot^{-1} \frac{h}{w}$
Grecenko (2007a)		c
Baek et al. (2018)		$c + \sigma_v' \tan^2(45^\circ + \phi/2) \tan 0.45\phi$

비(w), 간격(l_g), 높이(h)를 각각 가로, 세로, 높이로 하는 직사각형 모양이며, 지반블록의 저면 및 측면을 따라 전단력(각각 저면지반추력 및 측면지반추력)이 발현된다. Bekker(1956)가 탄성이론을 바탕으로 지반추력 산정식을 처음 제시한 이래로, 여러 연구자들(Grecenko, 2007a; Baek, 2018; Baek et al., 2018)이 지반-그라우저 모사실험으로부터 확인된 지반블록 형상을 바탕으로 하나의 그라우저에서 발현되는 지반추력(F_x)을 저면지반추력(F_b)과 측면지반추력(F_s)의 합으로 나타냈다(Eq. (1))

$$F_x = F_b + F_s = wl_g \tau_b + 2hl_g \tau_s \quad (1)$$

여기서, τ_b 와 τ_s 는 각각 지반블록의 저면 및 측면에서 발현되는 전단강도를 의미한다. Table 1에 나타낸바와 같이 지반블록을 따라 발현되는 전단강도를 산정하는 방법은 대상 지반의 특성 및 해석 시 가정조건에 따라 연구자 마다 차이가 있었다. 본 연구에서는 Lee(1993)와 Lee et al.(2020)에 의해 국내에 가장 널리 분포하고 있다고 알려진 화강 풍화토(weathered granite soil)를 대상으로 제안되었으며 가장 최신의 이론인 Baek et al. (2018)의 연구를 통해 지반추력을 산정했다. Baek et al.(2018)이 화강 풍화토를 대상으로 수행한 18회의 지반-그라우저 모사실험에 따르면 하나의 그라우저에서 발현되는 지반추력은 관입전단파괴이론(punching shear failure theory)을 바탕으로 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다. Baek et al.(2018)에 따르면 Eq. (2)를 통해 산정된 지반추력은 실측값과 평균 1.6%의 오차만을 보여, 각각 14.4%, 56.1%의 평균 오차를 보인 Bekker(1956), Grecenko (2007a)에 비해 화강 풍화토 지반에서 지반추력을 비교적 정확히 예측할 수 있었다.

$$F_x = F_b + F_s = wl_g (c + \sigma_v' \tan \phi) + 2hl_g (c + \sigma_v' \tan^2(45^\circ + \phi/2) \tan 0.45\phi) \quad (2)$$

여기서, c 와 ϕ 는 지반의 점착력 및 마찰각을 의미하

고, σ_v' 은 지반블록 저면의 유효연직응력으로 도저의 중량(W)과 지반의 유효단위중량(γ')에 따라 결정된다. 도저의 전체 지반추력은 각각의 그라우저에서 발현되는 지반추력을 모두 합하여 구할 수 있다(Grecenko, 2007b). Shin et al.(2020)에 따르면 인접한 그라우저 간 간섭효과가 발생하므로 전체 지반추력 산정 시 이를 반드시 고려해야 한다. Fig. 5와 같이 각각의 그라우저는 서로 연결되어 있어 전단영역(shear zone)이 중첩되며, 가장 선단(지반-궤도 접촉면의 가장 앞쪽)에 위치한 그라우저를 제외하면 지반추력의 크기가 감소한다. Shin et al.(2020)은 다중 그라우저(multiple grouser) 모사실험을 통해 무리말뚝(group pile)의 지지력 감소계수인 p 승수(p -multiplier)와 유사하게 지반추력 감소계수(soil thrust multiplier, f_{st})를 Table 2와 같이 제안하였고, Eq. (3)을 활용해 전체 지반추력을 산정하도록 했다.

$$F_t = 2(F_{x1} + \sum_{i=2}^n f_{st} F_{xi}) \quad (3)$$

여기서, F_t 와 F_{xi} 는 각각 전체 지반추력과 지반-궤도 접촉면의 앞쪽에서부터 i 번째 위치한 그라우저에서 발현된 지반추력을 의미하고, n 은 하나의 무한궤도에서 지반에 접하고 있는 단일 그라우저의 총 개수로 지반-궤도 접지 길이(L)를 그라우저 간격(l_g)으로 나누어 구한다.

도저의 성능을 나타내는 전체 지반추력은 Eqs. (2)와

Table 2. Soil thrust multiplier (f_{st}) for a continuous-track protruded with grousers (Shin et al., 2020)

Relative density, D_r (%)	Shape ratio ($=l/h$)	Soil thrust multiplier, f_{st}
40	2.0	0.78
	3.5	0.85
	5.0	0.92
80	2.0	0.63
	3.5	0.77
	5.0	0.86

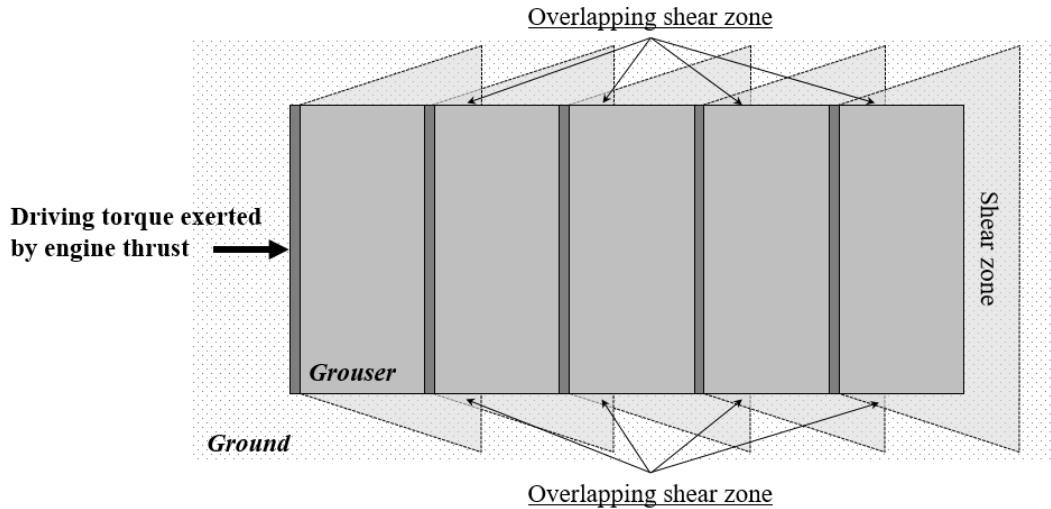


Fig. 5. Schematic diagram of overlapping shear zones between adjoining single grousers (top-view)

(3)을 통해 산정할 수 있다. Eq. (2)는 $W, w, l_g, h, c, \phi, \gamma'$ 의 함수이고, Eq. (3)은 L, l_g, h , 지반의 상대밀도 (D_r)의 함수이다. 즉, 도저 및 그라우저의 물리적 특성 (W, L, w, l_g, h) 및 지반 특성(c, ϕ, γ', D_r)으로부터 도저 성능을 정량적으로 산정할 수 있으며, 각 특성이 성능에 미치는 영향을 평가함으로써 주어진 지반 조건에서 최적의 성능을 발휘할 수 있는 도저 및 그라우저 특성을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 도저 성능평가 조건

3.1 지반 특성

본 연구에서는 Baek et al.(2018)과 Shin et al.(2020)이 지반추력 평가 모델 개발에 활용한 관악산 풍화토 (Gwanak weathered soil)를 대상으로 도저 성능평가를 수행했다. 관악산 풍화토의 기본 물성값은 Table 3과 같다. 관악산 풍화토는 국내에 널리 분포하고 있는 화강

풍화토로(Lee, 1993; Lee et al., 2020), 200번체 통과백분율이 31.9%이고 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)에 의해 실트질 모래(SM)로 분류된다.

도로포장 하부구조 시공지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017)에 따르면, 토공사 시 지반 재료의 함수비는 최적 함수비의 $\pm 2\%$ 로 유지하도록 한다. 본 연구에서는 최적 함수비 조건(12.7%)에서 상대밀도 40% 및 80%로 조성된 관악산 풍화토를 대상으로 도저 성능평가를 수행했으며, 이는 각각 느슨한 지반 및 조밀한 지반을 나타냈다(Das, 1983). 앞서 언급한 바와 같이, 지반추력 평가 모델을 통해 도저의 성능을 평가하기 위해 필요한 지반 특성은 상대밀도, 전단강도 정수, 건조단위중량 이다. 최대 및 최소 건조밀도로부터 산정된 상대밀도 40% 및 80% 지반의 건조단위중량과 직접전단시험을 통해 평가된 전단강도정수는 Table 4와 같다.

3.2 도저 및 그라우저 제원

본 연구에서는 Caterpillar Inc.에서 제작되어 토공사 현장에 널리 적용되고 있는 상용 도저 3종을 대상으로

Table 3. Index properties of Gwanak weathered soil (Shin et al., 2020)

USCS classification	SM
Mean grain size, D_{50} (mm)	0.32
Coefficient of uniformity, C_u	29.4
Specific Gravity, G_s	2.59
Percent finer than #200 sieve (%)	31.9
Maximum dry density, $\gamma_{d(max)}$ (t/m^3)	1.86
Minimum dry density, $\gamma_{d(min)}$ (t/m^3)	1.24
Optimum moisture content, w_{opt} (%)	12.7

Table 4. Soil parameters for the assessment of soil thrust of dozers

Description (Das, 1983)	Loose state	Dense state
Relative density, D_r (%)	40	80
Dry density, γ_d (t/m^3)	1.43	1.70
Cohesion, c (kPa)	6.1	11.1
Internal friction angle, ϕ (°)	30.7	38.3

성능평가를 수행했다. Caterpillar Inc.에서 제작되고 있는 상용 도저의 중량은 약 5,000kg 부터 110,000kg 까지 다양하며, 일반적으로 중량이 클수록 도저의 크기가 크고 기계적 성능이 우수하다. Table 5에 나타난 바와 같이, 중량을 기준으로 D5N, D8R, D10R 모델을 선정해 도저의 중량 및 크기에 따른 차이를 고려할 수 있도록 했다.

또한 국내외 대표적인 그라우저 제작사인 현대제철, Berco S.p.A., ArcelorMittal의 상용 그라우저 간격(약 200~300mm), 높이(약 25~95mm), 형상비(약 2.3~9.0)를 고려해, 간격(l_g)이 200mm로 동일하고 25, 40, 57, 100mm의 서로 다른 네 높이(h)를 가져 각각의 형상비($=l_g/h$)가 8.0, 5.0, 3.5, 2.0인 그라우저를 평가 대상으로 결정했다. 서로 다른 네 종의 그라우저가 Table 5에 나타난 도저의 무한궤도에 부착되어 있을 때의 지반추력을 평

가했는데, 그라우저의 종류에 따른 중량 차이는 도저의 총 중량에 비해서 미미하다고 판단해 고려하지 않았다.

4. 도저 성능평가 결과

4.1 지반추력

본 연구에서는 Baek et al.(2018)과 Shin et al.(2020)이 제시한 지반추력 평가모델을 적용해 도저의 지반추력을 산정했다. Table 4와 Table 5에 제시된 지반 및 장비 조건을 Eqs. (2)와 (3)에 대입해 그라우저가 부착된 도저의 지반추력을 산정했고, 그라우저 효과 분석을 위해 그라우저가 부착되지 않은 경우($h=0$)의 지반추력도 함께 산정했다. Baek and Chung(2018)이 언급한 바와 같이 그라우저가 부착된 경우 지반추력은 지반블록

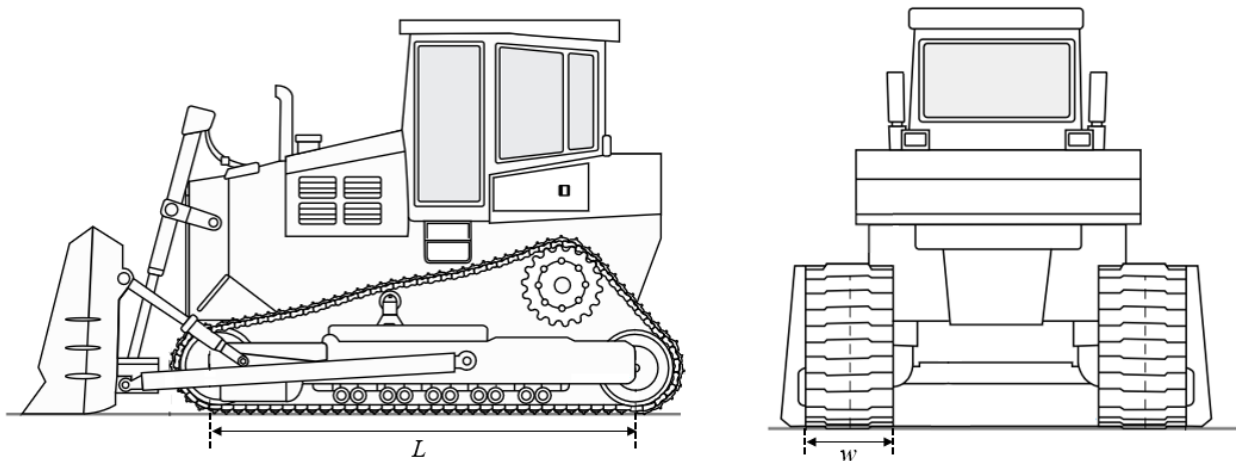
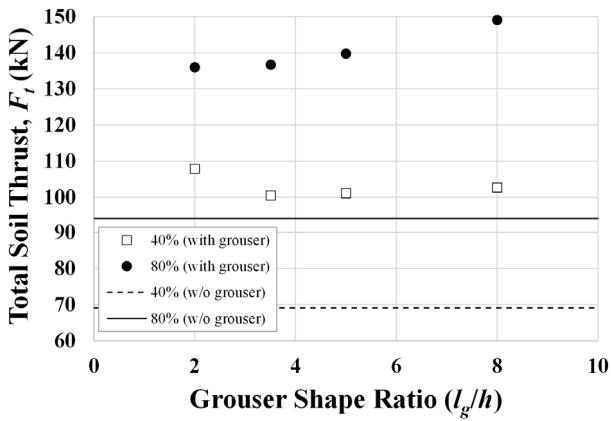


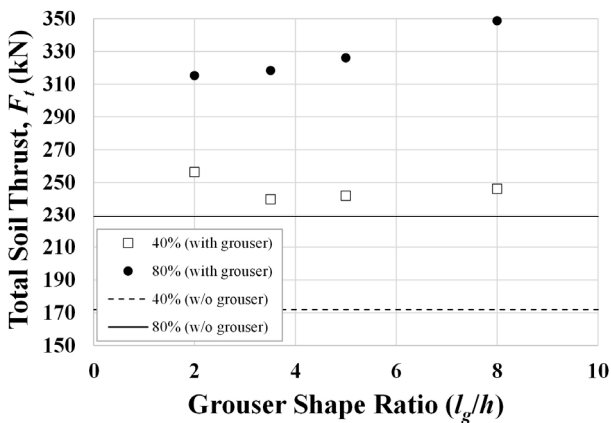
Fig. 6. Schematic diagram of a crawler dozer manufactured by Caterpillar Inc.

Table 5. Vehicle parameters for the assessment of soil thrust of dozers

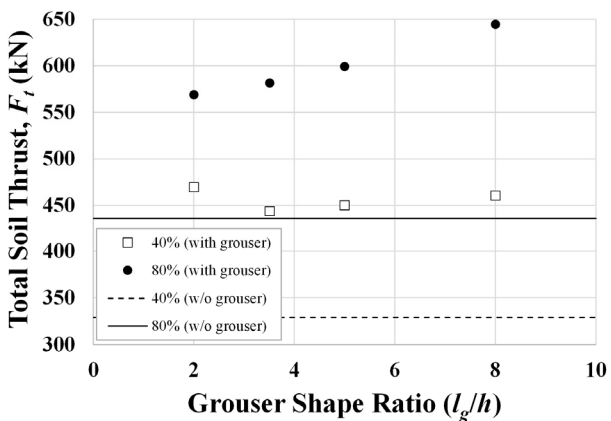
Dozer model	Weight, W (kg)	Soil-track contact length, L (m)	Track width, w (m)	Attached grouser			
				Spacing, l_g (mm)	Height, h (mm)	Shape ratio, l_g/h	$n (= L/l_g)$
D5N	12,737.8	2.4	0.56	200	25	8.0	12
					40	5.0	
					57	3.5	
					100	2.0	
D8R	33,497.8	3.2	0.56	200	25	8.0	16
					40	5.0	
					57	3.5	
					100	2.0	
D10R	65,403.5	3.8	0.61	200	25	8.0	19
					40	5.0	
					57	3.5	
					100	2.0	



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. Total soil thrust of crawler dozers according to the grouser height: (a) D5N; (b) D8R; (c) D10R

의 파괴면을 따라 점착력 및 내부 마찰각에 의해 결정되지만, 그라우저가 부착되지 않은 경우 지반추력은 지반-궤도 사이의 부착력(adhesion) 및 마찰계수(friction coefficient)에 따라 발생된다. Potyondy(1961)는 다양한 흙과 건설재료의 부착력 및 마찰계수를 실험적으로 평가한 바 있다. 본 연구에서는 대상 지반과 유사한 흙(함

수비 13%로 조성된 점착력이 있는 사질토)과 무한궤도와 유사한 재료의 강철판(rough steel) 사이의 부착력 및 마찰계수인 $0.46c$ 와 0.84ϕ 를 적용해 그라우저가 부착되지 않은 도저의 지반추력을 산정했다.

Fig. 7은 서로 다른 높이의 그라우저가 동일한 간격으로 부착된(즉, 형상비가 다른) 세 도저의 지반추력을 그라우저 형상비에 따라 나타낸 것이다. 다른 조건이 동일한 경우 지반의 상대밀도와 도저의 크기(즉, 무한궤도의 크기) 증가가 각각 지반의 전단강도 및 전단면적을 증가시켜 지반추력이 커졌다. 또한 그라우저가 부착된 도저의 지반추력이 그라우저가 부착되지 않은 도저에 비해 커지는 것으로 나타나, 그라우저에 의한 지반추력 증가 효과를 확인할 수 있었다. 이는 그라우저가 궤도 측면에서 추가적인 측면지반추력을 발현시키며, 지반-궤도 사이의 전단(부착력 및 마찰계수)을 지반-지반 사이의 전단(점착력 및 마찰각)으로 전환시키기 때문이다 (Fig. 8 참고).

Table 6은 그라우저에 의한 지반추력의 총 증가량 및 전단면 전환(지반-궤도 사이의 전단을 지반-지반 사이의 전단으로 전환)에 기인한 지반추력 증가량을 보여준다. 전단면 전환에 의한 지반추력 증가량은 측면지반추력의 영향을 배제한 상태에서($F_s = 0$) 점착력 및 마찰각을 적용해 산정된 지반추력과 부착력 및 마찰계수를 적용해 산정된 지반추력의 차이로 구했다. 그 결과, 기존 연구(Grecenko, 2007a; Baek et al., 2018)에서는 크게 주목받지 못했던 전단면 전환이 그라우저에 의한 지반추력 증가에 지배적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 지반추력의 총 증가량 중 전단면 전환에 기인한 지반추력 증가량이 차지하는 비율은 약 57.9~99.3%이며, 이는 지반추력 발현 시 전단강도 정수의 영향이 매우 크다는 사실을 함의한다. 즉, 높이가 낮은 그라우저를 부착하더라도 지반-궤도 사이의 전단을 지반-지반 사이의 전단으로 전환시킬 수 있거나, 또는 그라우저를 부착하지 않아도 지반-궤도 사이의 부착력 및 마찰계수를 증가시킬 수 있다면 상당한 수준의 지반추력 증가를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

그라우저의 형상에 따른 지반추력은 도저가 구동하는 지반의 상대밀도에 따라 다르게 나타났다(Fig. 7과 Table 6 참고). 느슨한 지반($D_r = 40\%$)에서 그라우저 형상비가 증가하면 지반추력이 감소하다가 형상비 3.5 이후로 점차 증가하는 경향을 보였고, 조밀한 지반($D_r =$

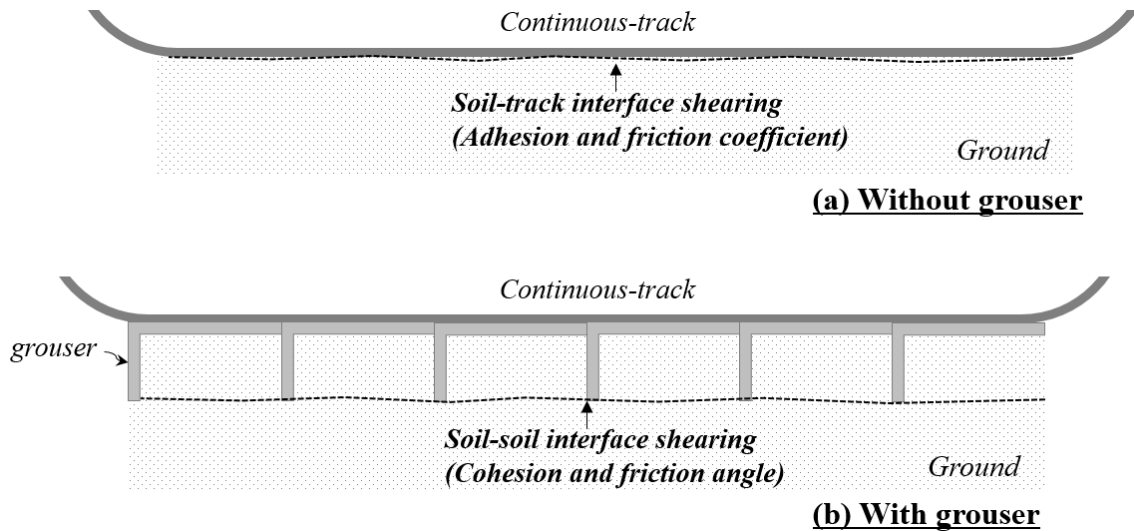


Fig. 8. Cross-sectional view of shearing interface on the bottom of the crawler dozer: (a) without grouser; (b) with grouser

Table 6. Dozer's soil thrust increment by attached grousers (the percentage of increase due to shear plane transition among total increase is given within the parentheses)

Relative density, D_r (%)	Dozer model	Total increase of soil thrust by attached grousers (kN)				Soil thrust increment due to shear plane transition (kN)
		$l_g/h = 8.0$	$l_g/h = 5.0$	$l_g/h = 3.5$	$l_g/h = 2.0$	
40	D5N	33.6 (68.2%)	32.1 (71.3%)	31.4 (72.9%)	38.8 (59.0%)	22.9
	D8R	74.3 (65.8%)	70.0 (69.9%)	67.9 (72.0%)	84.5 (57.9%)	48.9
	D10R	131.6 (66.6%)	121.2 (72.3%)	114.8 (76.3%)	140.6 (62.3%)	87.6
80	D5N	55.2 (66.3%)	45.9 (79.7%)	42.9 (85.3%)	42.1 (86.9%)	36.6
	D8R	119.7 (62.9%)	97.1 (77.5%)	89.4 (84.2%)	86.3 (87.3%)	75.3
	D10R	209.6 (63.4%)	164.1 (81.0%)	146.5 (90.7%)	133.9 (99.3%)	132.9

80%)에서는 그라우저 형상비 증가에 따라 지반추력이 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 지반추력 변화는 구동력(즉, 지반추력) 관점에서 도저의 최적 그라우저 형상을 평가할 때 핵심적인 사항으로 다음 장에서 보다 상세히 기술하였다.

4.2 최적 그라우저 형상비 평가

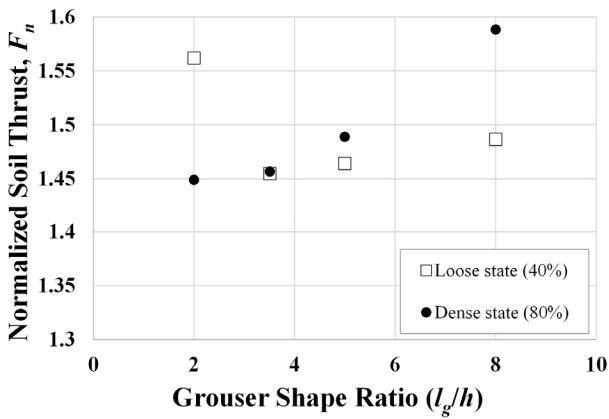
그라우저의 형상은 너비, 간격, 높이에 따라 결정된다 (Fig. 4 참고). 그라우저 효과는 형상에 따라 다르게 나타나므로, 대상 장비 및 지반조건에 따른 최적 그라우저 형상비를 평가하는 것은 장비의 작업 성능 관점에서 매우 중요하다. 본 장에서는 그라우저 형상을 나타내는 지표로 널리 사용되는 형상비를 기준으로 그라우저를 분류하고(Park, 1996; Baek and Chung, 2018; Baek et al., 2018; Shin et al., 2020), 지반추력을 최대로 발현시킬 수 있는 최적 그라우저 형상비를 평가했다.

그라우저에 의한 도저 지반추력 증가 효과를 정량적

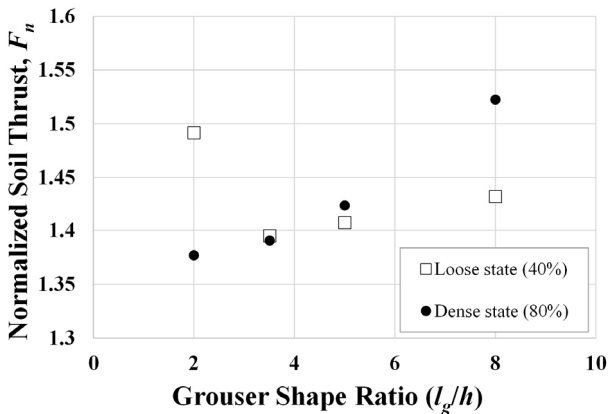
으로 평가하기 위해서, Fig. 7에 나타난 그라우저가 부착된 경우의 지반추력을 그라우저가 부착되지 않았을 때의 지반추력으로 정규화 시켰다(Eq. (4)).

$$F_n = F_t / F_{t0} \quad (4)$$

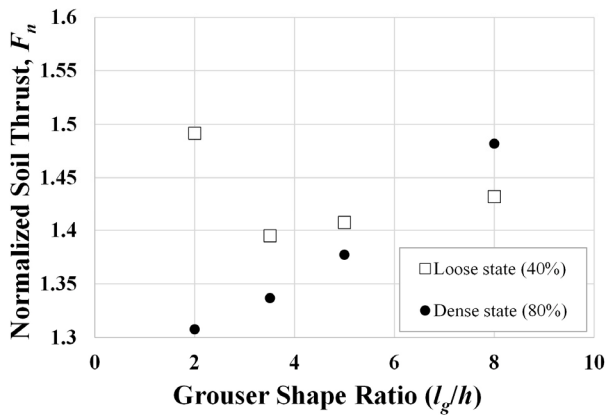
여기서, F_n 과 F_{t0} 는 각각 정규화 된 지반추력(normalized soil thrust)과 그라우저가 부착되지 않았을 때의 지반추력을 의미한다. Fig. 9는 정규화 된 지반추력을 그라우저 형상비에 따라 도시한 것이다. 그 결과, 그라우저가 부착된 도저의 지반추력은 그렇지 않은 경우보다 약 1.3~1.6배 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 그라우저에 의한 지반추력 증가는 중량 및 크기가 작은 도저에서 더 명확했다. 중량 및 크기가 작은 도저는 지반-궤도 접지면적이 작아서(Table 5 참고), 그라우저가 부착되지 않았을 때의 지반추력이 작다. 그라우저 부착 시 궤도 측면에서 추가적으로 발현되는 측면지반추력은 도저의 중량 및 크기에 관계없이 거의 유사하기 때문에, 중량



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Normalized soil thrust of crawler dozers according to the grouser shape ratio: (a) D5N; (b) D8R; (c) D10R

및 크기가 작은 도저에서 그 효과가 상대적으로 두드러지게 나타나는 것이다.

그라우저의 형상비에 따른 지반추력은 도저가 구동하는 지반의 상대밀도에 따라 다르게 나타났다. 도저의 중량 및 크기에 관계없이, 느슨한 지반($D_r = 40\%$)에서는 형상비가 2.0인 그라우저의 지반추력이, 조밀한 지반($D_r = 80\%$)에서는 형상비가 8.0인 그라우저의 지반추

력이 가장 컸다. 본 연구의 평가 대상 그라우저의 간격은 서로 동일하므로 그라우저 형상비(=간격/높이)와 높이는 반비례한다. 즉, 느슨한 지반에서는 높이가 가장 높은 그라우저(형상비 2.0)가, 조밀한 지반에서는 높이가 가장 낮은 그라우저(형상비 8.0)가 도저의 지반추력을 가장 크게 증가시킬 수 있는 최적 그라우저로 평가된 것이다.

이는 그라우저 높이가 증가하면 측면지반추력이 증가해 전체 지반추력이 커진다는 기존의 통념(Bekker, 1956; Wong, 1989; Grechenko, 2007a; Baek et al., 2018)과 배치되는 결과로, 본 연구에서 인접 그라우저 사이에서 발견되는 간섭효과를 고려한 Shin et al.(2020)의 이론을 적용했기 때문이다. 그라우저 높이가 증가하면 측면지반추력이 커지지만, 동시에 인접 그라우저 간 간섭효과도 함께 커져 지반추력 증가 효과가 상당부분 상쇄되어 나타난다. 도저의 전체 지반추력 증감은 두 가지 상반된 효과(측면지반추력 및 간섭효과 증가) 중 더 지배적으로 작용하는 영향에 의해 결정된다. 그라우저 높이가 증가할 때(형상비가 감소할 때) 지반추력이 증가하면 측면지반추력 증가가 더 지배적이고, 지반추력이 감소하면 인접 그라우저 간 간섭효과가 더 지배적인 것이다.

느슨한 지반에서는 형상비 3.5 이하 영역에서는 형상비가 증가함에 따라(그라우저 높이가 작아짐에 따라) 지반추력이 감소하다가, 형상비 3.5 이상부터는 지반추력이 증가했다. 이는 형상비 3.5를 기준으로 그 이하에서는 측면지반추력이, 그 이상에서는 간섭효과가 지배적인 영향을 보였기 때문으로 판단된다. 형상비 3.5 이하 영역에서의 지반추력 감소량이 형상비 3.5 이상 영역에서의 지반추력 증가량 보다 훨씬 크므로, 형상비 2.0인 그라우저의 지반추력이 가장 크게 나타난 것이다. 반면, 조밀한 지반에서는 느슨한 지반에 비해 인접한 그라우저 간 전단영역중첩이 매우 크게 발생해 간섭효과에 의한 지반추력 감소가 매우 크게 나타나기 때문에(Shin et al., 2020), 간섭효과가 항상 지배적인 영향을 보였다. 이에 따라 기존 연구(Baek and Chung, 2018)와는 정반대로 형상비가 증가할수록(그라우저 높이가 작아질수록) 지반추력이 커지는 경향이 나타난 것으로 판단된다.

도저의 작업 성능은 토사를 밀어내는 능력을 의미하며, 이는 도저의 구동력인 지반추력에 의해 결정된다. 국내외 대표적인 상용 그라우저의 형상비가 약 2.3~9.0임을 고려할 때, 느슨한 지반 및 조밀한 지반에서 각각

형상비가 2.3 및 9.0에 가까울수록 도저의 구동력(즉, 지반추력)을 크게 증가시킬 것으로 보인다. 무한궤도에 지반의 다짐도를 고려한 최적 그라우저를 부착한다면 도저의 작업 성능을 보다 크게 강화할 수 있을 것이며, 이를 통해 장비의 효율적 활용 및 토공사 생산성 향상이 가능할 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 가장 최신의 지반-궤도 상호작용 연구인 Baek et al.(2018)과 Shin et al.(2020)이 제시한 지반추력 평가모델을 적용해 토공사 현장에서 널리 적용되고 있는 상용 도저의 성능을 산정했다. 간격이 200mm로 동일하고 25, 40, 57, 100mm의 서로 다른 네 높이를 가져 각각의 형상비가 8.0, 5.0, 3.5, 2.0인 그라우저에 의한 지반추력 증가 효과를 각각 평가했으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 도저의 성능은 지반추력에 의해 결정되며, 이는 도저 및 그라우저의 물리적 특성과 지반 특성의 함수로 표현된다. 본 연구에서 나타난 지반-궤도 상호작용 이론 기반의 지반추력 산정 과정을 통해 도저 성능을 정량적으로 평가할 수 있으며, 주어진 지반 조건에서 최적의 성능을 발휘할 수 있는 도저 및 그라우저 특성을 도출할 수 있다.
- (2) 그라우저는 측면지반추력을 발현시키고 지반-궤도 사이의 전단을 지반-지반 사이의 전단으로 전환시켜, 도저의 지반추력을 약 1.3~1.6배 증가시켰다. 특히, 전단면 전환이 지반추력 증가에 지배적인 영향을 주는 것으로 나타나, 높이가 매우 낮은 그라우저를 부착하더라도 지반-궤도 사이의 전단을 지반-지반 사이의 전단으로 전환시킬 수 있거나, 또는 그라우저를 부착하지 않아도 지반-궤도 사이의 부착력 및 마찰계수를 증가시킬 수 있다면 상당한 수준의 지반추력 증가를 기대할 수 있을 것으로 기대된다.
- (3) 그라우저에 의한 지반추력 증가는 중량 및 크기가 작은 도저에서 더 명확했다. 중량 및 크기가 작은 도저는 지반-궤도 접지면적이 작아서 그라우저가 부착되지 않았을 때의 지반추력이 상대적으로 작다. 그라우저 부착 시 궤도 측면에서 추가적으로 발현되는 측면지반추력은 도저의 중량 및 크기에 관계

없이 거의 유사하기 때문에, 중량 및 크기가 작은 도저에서 그 효과가 상대적으로 두드러지게 나타난 것으로 판단된다.

- (4) 느슨한 지반에서는 높이가 높은 그라우저가(형상비 2.0), 조밀한 지반에서는 높이가 낮은 그라우저(형상비 8.0)가 도저의 지반추력을 가장 크게 증가시킬 수 있는 최적 그라우저로 평가되었다. 국내외 대표적인 상용 그라우저의 형상비가 약 2.3~9.0임을 고려할 때, 느슨한 지반 및 조밀한 지반에서 각각 형상비가 2.3 및 9.0에 가까울수록 도저의 구동력(즉, 지반추력)을 크게 증가시킬 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 제시된 최적 그라우저 형상비를 작업 지반 조건에 맞춰 적절히 적용한다면 도저의 효율을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 특히 실제 도저에 부착되는 국내외 대표적인 상용 그라우저의 제원을 바탕으로 연구를 수행해 최적 형상비를 제시했으므로, 그라우저 적용 시 맞춤 제작 과정을 생략할 수 있어 그 적용성이 매우 높을 것으로 기대된다. 다만, 본 연구는 기존 연구에서 제시된 지반추력 평가 모델의 신뢰성에 기반하고 있다. 도출된 최적 그라우저 형상비를 다양한 실제 상황 대해 검증하지 못했다는 한계가 있으므로, 추후 실제 도저 혹은 지반-그라우저 모사실험을 통해 본 연구결과를 보완 및 검증한다면 본 연구결과의 신뢰성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20SMIP-A157130-01).

참고문헌 (References)

1. Road Pavement Substructure Construction Guidelines (2017), Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korea).
2. Baek, S.H. (2018), "Assessment of the Soil Thrust for Off-road Tracked Vehicles based on Soil-track Interaction Theory", PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University.
3. Baek, S.H. and Chung, C.K. (2018), "Fundamental Study on the Effect of Grousers on the Soil Thrust of Off-road Tracked Vehicles", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.9, pp.33-42 (in Korean).
4. Baek, S.H., Shin, G.B., and Chung, C.K. (2018), "Assessment of the Side Thrust for Off-road Tracked Vehicles based on the Punching

- Shear Theory”, *J. of Terramechanics*. Vol.79, pp.59-68.
5. Bekker, M.G. (1956), *Theory of Land Locomotion*, University of Michigan Press.
 6. Das, B.M. (1983), *Principles of Foundation Engineering*, PWS-KENT Publishing Company, Boston, MA.
 7. Grecenko, A. (2007a), “Re-examined Principles of Thrust Generation by a Track on Soft Ground”, *J. of Terramechanics*, Vol.44, No.1, pp.123-131.
 8. Grecenko, A. (2007b), “Thrust and Slip of a Track Determined by the Compression-sliding Approach”, *J. of Terramechanics*, Vol.44, No.6, pp.451-459.
 9. Lee, S.G. (1993), “Weathering of Granite”, *J. of the Geological Society of Korea*, Vol.29, No.4, pp.396-413.
 10. Lee, S.H., Baek, S.H., Song, Y.H., and Chung, C.K. (2019), Case Study of Correlation between the SPT-N Value and PMT Results Performed on Weathered Granite Zone in Korea, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.12, pp.15-24 (in Korean).
 11. Baek, S.H., Kim, J.Y., Lee, S.H., and Chung, C.K. (2018), “Development of the Cyclic p-y Curve for a Single Pile in Sandy Soil”, *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.36, No.3, pp.351-359.
 12. Barton, Y.O. (1979), Lateral Loading of Model Piles in the Centrifuge, M.Phil. Thesis, University of Cambridge.
 13. Park, Y.H. (1996), “Interaction of Soils-tracked Vehicle”, PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University.
 14. Patel, N., Scott, G., and Ellery, A. (2004), “Application of Bekker Theory for Planetary Exploration through Wheeled, Tracked and Legged Vehicle Locomotion”, *Proceedings of Space 2004 Conference and Exhibit*, San Diego, California, U.S.A.
 15. Potyondy, J.G. (1961), “Skin Friction between Various Soils and Construction Materials”, *Geotechnique*, Vol.11, No.4, pp.339-353.
 16. Shin, G.B., Baek, S.H., and Chung, C.K. (2018), “Evaluation of the Soil Thrust Interference Effect in Track Systems from Model Track Tests”, *Proceedings of the 36th International Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering*, Japan.
 17. Shin, G.B., Baek, S.H., Park, K.H., and Chung, C.K. (2020), “Investigation of the Soil Thrust Interference Effect for Tracked Unmanned Ground Vehicles (UGVs) Using Model Track Tests”, *J. of Terramechanics*, Vol.91, pp.117-127.
 18. Wong, J.Y. (1989), *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*, Elsevier.
 19. Wong, J.Y. and Huang, W. (2006), “Wheels vs. Tracks - A Fundamental Evaluation from the Traction Perspective”, *J. of Terramechanics*, Vol.43, No.1, pp.27-42.
 20. Yong, R., Fattah, E., and Skiadas, N. (1984), *Vehicle Traction Mechanics*, Elsevier.

Received : March 11th, 2021

Revised : March 24th, 2021

Accepted : March 25th, 2021