

토양-러그 상호작용의 특성 해석†

Analysis of Soil-Lug Interaction Characteristics

조 성 찬*¹ 岸本 正*² 이 규 승*³ 大友功一*² 이 용 국*³ 최 중 섭*⁴

정회원

정회원

정회원

정회원

S. C. Cho

T. Kishimoto

K. S. Lee

K. Ohtomo

Y. K. Lee

J. S. Choe

SUMMARY

Interactions between wheel lug surfaces and soil were analyzed through wheel lug motion. In this paper, lug surfaces such as trailing and leading lug sides and a lug face were analyzed and reported. The interactions between the surfaces and soil were expressed as the horizontal and vertical directions of resultant forces acting on the surfaces. There analysis indicated qualitatively that (1) the trailing lug side is mainly related to produce motion resistance and reaction to dynamic load, (2) the lug face is related to produce not only the motion resistance, the reaction to the dynamic load but also the traction and (3) the leading lug side is mainly related to produce the traction and the reaction to the dynamic load. Experiments were conducted to prove the results of the motion analysis. Normal and tangential forces acting on the surfaces were measured, and the traction, the motion resistance and the reaction to the dynamic load were calculated with wheel rotational and lug design angles. The experiments proved that the results of wheel motion analyses above mentioned as (1), (2) and (3) obtained from the analysis were correct.

주요용어(Key Words) : 농용 차륜(Agricultural wheel), 러그(Lug), 견인력(Traction), 구름저항(Motion resistance), 접지하중반력(Reaction to dynamic load)

1. 서 론

러그를 부착한 공기타이어는 농용 포장 등과 같은 로외작업에서 견인력 증가를 위하여 폭넓게 보급되어 사용되고 있다. 토양-러그 상호작용에 관한 연구는 대부분 후방러그면(그림 1의 CD면, ASAE에서는 leading lug side)의 작용특성에 대한 해석이 이루어져 왔다. 그 중에서 田中(1986)는 차륜상의 1점의 운동을 해석하고 러그면의 이동방향

을 그 면에 수직인 압축성분과 평행한 전단성분으로 나누어 해석하였다. Gee-Clough(1976)는 차륜회전에 의한 러그의 운동을 러그에 수직 및 평행 방향으로 나누어 해석하였다. 그러나 차륜의 러그를 차륜중심선에서 2차원적으로 표현한 러그의 경우 러그를 구성하는 후방러그면, 러그외주면(BC면, lug face) 및 전방러그면(AB면, trailing lug side)의 3개의 면(그림 1)에서 토양에 미치는 작용특성이 다르게 나타난다고 볼 수 있다. 따라서 러그전체

† 본 연구는 日本帶廣畜産大學과 국제공동연구로 수행되었음.

*1 충북대학교 *2 日本帶廣畜産大學 *3 성균관대학교 *4 상주대학교

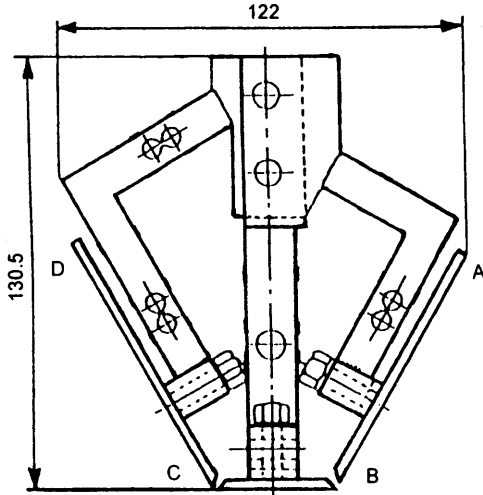


Fig. 1 Schematic diagram of experimental lug with transducers.

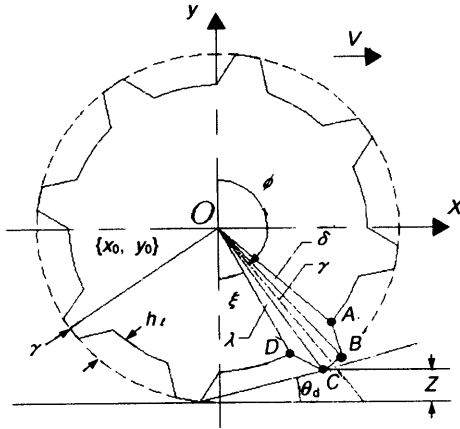


Fig. 2 Design factors for a lugged wheel.

의 작용을 파악하기 위해서는 각 면을 종합적으로 해석할 필요가 있다고 판단된다. 그래서 본 연구에서는 후방러그면뿐만 아니라 러그외주면과 전방러그면도 포함하여 다음과 같이 분석하였다.

1) 자체 제작한 러그 3면용 트랜스듀서를 이용하여 각 면에 작용하는 접선력 F' 및 수직력 F'' 를 측정한다.

2) 진행저하율을 고려한 궤적방정식을 이용하여

러그 각 면의 기울기 변화를 구한다.

3) 앞에서 구한 힘과 기울기의 변화를 이용하여 러그 각 면에 작용하는 힘의 수평성분 및 수직성분을 구한다.

2. 러그의 3면과 토양의 상호작용

본 논문에서는 러그를 구성하는 4점(그림 1의 A, B, C, D)의 궤적방정식을 이용하여 러그에 평행 및 수직으로 작용하는 힘의 합력방향을 고려하고, 이에 따라 러그 각 면의 외력 발생과 진행저하율을 포함한 러그의 운동상태를 나타내는 식을 세웠다. 차륜에서 러그의 형태를 결정하기 위한 요소는 그림 1과 같다.

그림 2의 운동해석에 대한 러그상 각 점의 궤적방정식은 다음과 같다.(坂井, 1988)

$$A: x_A = x_o - (r - h_l) \sin(\phi - \theta_2 - \delta) \quad (1)$$

$$y_A = y_o - (r - h_l) \cos(\phi - \theta_2 - \delta) \quad (2)$$

$$B: x_B = x_o - r \sin(\phi - \theta_2) \quad (3)$$

$$y_B = y_o - r \cos(\phi - \theta_2) \quad (4)$$

$$C: x_C = x_o - r \sin(\phi - \theta_1) \quad (5)$$

$$y_C = y_o - r \cos(\phi - \theta_1) \quad (6)$$

$$D: x_D = x_o - (r - h_l) \sin(\phi - \theta_1 + \lambda) \quad (7)$$

$$y_D = y_o - (r - h_l) \cos(\phi - \theta_1 + \lambda) \quad (8)$$

여기서,

x_o, y_o : 차축 중심점의 좌표

r : 러그 바깥 원의 반경

h_l : 러그의 높이

ϕ : 차륜회전각

δ : AB면의 중심각($\angle AOB$)

γ : BC면의 중심각($\angle BOC$)

λ : CD면의 중심각($\angle COD$)

ξ : DE면의 중심각($\angle DOE$)

θ_1 : 러그면상의 C점이 지면에 접촉한 시점부터 차륜축의 수직아래에 도달할 때까지 차륜

의 회전각,

$$\theta_1 = \frac{\theta_p - \gamma}{2} + \theta_d$$

θ_2 : C점이 지면에 접촉한 시점부터 러그면 상의 B점이 차륜축의 수직아래에 도달할 때까지 차륜의 회전각,

$$\theta_2 = \frac{\theta_p + \gamma}{2} + \theta_d$$

θ_d : 그림 2에 나타낸 바와 같이 최대 침하 z가 발생할 때 기본상태에서 차륜의 기울기,

$$\theta_d = \sin^{-1} \left[\frac{\xi}{2r \sin \left((\theta_p - \lambda) / 2 \right)} \right]$$

θ_p : 러그외주면상의 러그 한 피치가 차륜축의 중심과 이루는 각,

$$\theta_p = \frac{2\pi}{N} = \delta + \gamma + \lambda + \xi$$

여기서,

N: 차륜 러그의 수

가. 전방러그면(AB면)

그림 3은 AB면에 작용하는 외력들을 보여주고 있다.

그림에서 AB면의 접선력 F'_{ab} , 수직력 F''_{ab} 를 이용하여 구한 합력 F_{ab} 의 수평성분 F^H_{ab} 와 수직성분 F^V_{ab} 는 다음과 같이 표시된다.

$$F^H_{ab} = F_{ab} \cos(\alpha_{ab} + \theta_{ab}) \quad (9)$$

$$F^V_{ab} = F_{ab} \sin(\alpha_{ab} + \theta_{ab}) \quad (10)$$

여기서, AB면에 작용하는 합력의 방향각 α_{ab} 는 F'_{ab} 와 F''_{ab} 가 이루는 각으로 러그면을 기준으로 반시계방향을 양의 방향으로 취하며, 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha_{ab} = \tan^{-1} \left(\frac{F''_{ab}}{F'_{ab}} \right)$$

차륜회전에 따른 기울기의 변화를 나타내는 각 θ_{ab} 는 수평진행방향(+x)과 러그면 AB가 이루는 각으로 반시계방향을 양의 방향으로 취하며 제도

방정식 (1)~(4)를 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_{ab} = \tan^{-1} \left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right)$$

$$= \tan^{-1} \left[\frac{\left\{ 1 - \frac{h_l}{r} \right\} \cos(\phi - \theta_2 - \delta) - \cos(\phi - \theta_2)}{\left\{ 1 - \frac{h_l}{r} \right\} \sin(\phi - \theta_2 - \delta) - \sin(\phi - \theta_2)} \right]$$

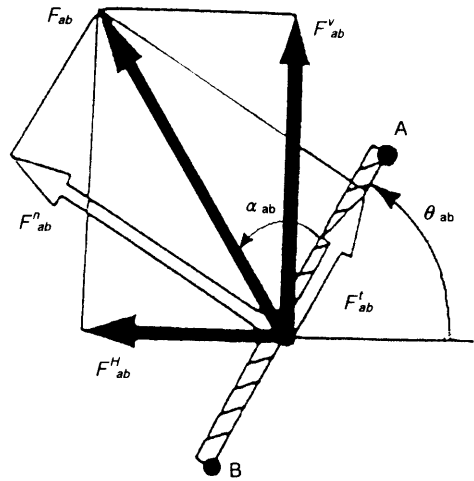


Fig. 3 Forces system on AB surface.

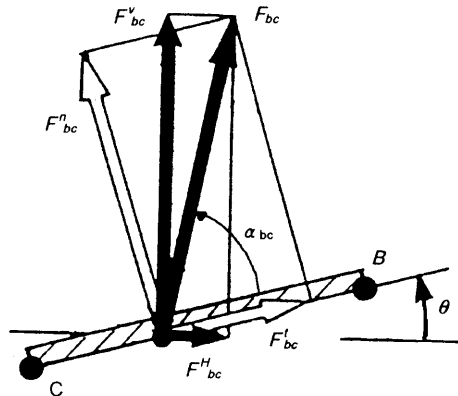


Fig. 4 Forces system on BC surface.

AB면은 차륜회전에 따라 B점이 지표면에 도달한 후 순차적으로 작용하기 때문에 면에 작용하는 힘 F_{ab} 도 차륜회전에 따라서 변한다. 본 연구에서는 견인성능의 향상 및 안정을 위한 타이어 러그의 형상을 구하기 위하여 힘의 크기뿐만 아니라 면에 작용하는 외력의 작용방향에 대해서도 검토하려고 한다.

나. 러그외주면(BC면)

그림 4에 BC면에 작용하는 외력들을 보여주고 있다.

BC면의 접선력 F'_{bc} , 수직력 F''_{bc} 에서 구한 합력 F_{bc} 의 수평성분 F^H_{bc} 와 수직성분 F^V_{bc} 는 다음과 같이 나타난다.

$$F^H_{bc} = F_{bc} \cos(\alpha_{bc} + \theta_{bc}) \quad (11)$$

$$F^V_{bc} = F_{bc} \sin(\alpha_{bc} + \theta_{bc}) \quad (12)$$

여기서, BC면에 작용하는 합력의 방향각 α_{bc} 는 F'_{bc} 와 F''_{bc} 가 이루는 각으로 러그면을 기준으로 반시계방향을 양의 방향으로 취하며 다음과 같이 나타난다.

$$\alpha_{bc} = \tan^{-1} \left(\frac{F''_{bc}}{F'_{bc}} \right)$$

차륜회전에 따른 기울기의 변화를 나타내는 각 θ_{bc} 는 수평진행방향(+x)과 러그면 BC가 이루는 각으로 반시계방향을 양의 방향으로 취하며 궤도 방정식 (3)~(6)을 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \theta_{bc} &= \tan^{-1} \left(\frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} \right) \\ &= \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(\phi - \theta_2) - \cos(\phi - \theta_1)}{\sin(\phi - \theta_2) - \sin(\phi - \theta_1)} \right\} \end{aligned}$$

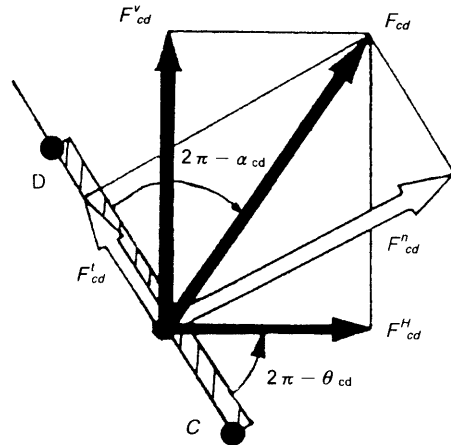


Fig. 5 Forces system on CD surface.

다. 후방러그면(CD면)

그림 5에 CD면에 작용하는 외력들을 보여주고 있다.

차륜의 러그와 토양이 접촉하는 1주기중의 차륜회전각이 $0 \leq \phi \leq \theta_1$ 의 범위에서는 CD면의 운동은 하방향으로 변화한다. CD면의 접선력 F'_{cd} , 수직력 F''_{cd} 에서 구한 합력 F_{cd} 의 수평성분 F^H_{cd} 와 수직성분 F^V_{cd} 는 다음과 같이 된다.

$$F^H_{cd} = -F_{cd} \cos(\alpha_{cd} + \theta_{cd}) \quad (13)$$

$$F^V_{cd} = F_{cd} \sin(\alpha_{cd} + \theta_{cd}) \quad (14)$$

여기서, CD면에 작용하는 합력의 방향각 α_{cd} 는 F'_{cd} 와 F''_{cd} 가 이루는 각으로 러그면을 기준으로 반시계방향을 양의 방향으로 취한다.

$$\alpha_{cd} = \tan^{-1} \left(\frac{F''_{cd}}{F'_{cd}} \right)$$

차륜회전에 따른 기울기의 변화를 나타내는 각 θ_{cd} 는 수평진행방향(+x)과 러그면 CD가 이루는 각으로 반시계방향을 양의 방향으로 취하며, 궤도

방정식 (5)~(8)을 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \theta_{cd} &= \tan^{-1} \left(\frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} \right) \\ &= \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(\phi - \theta_1) - \cos(\phi - \theta_1 + \lambda)}{\sin(\phi - \theta_1) - \sin(\phi - \theta_1 + \lambda)} \right\} \end{aligned}$$

또한 차륜의 리그와 토양이 접촉하는 1주기중의 차륜회전각이 $\theta_1 \leq \phi \leq \theta_p$ 의 범위에서는 CD면의 운동은 상방향으로 변화한다. 따라서 CD면에 작용하는 F_{cd} 의 수평성분 F_{cd}^H 와 수직성분 F_{cd}^V 는 다음과 같이 된다.

$$F_{cd}^H = F_{cd} \cos(\alpha_{cd} + \theta_{cd}) \quad (15)$$

$$F_{cd}^V = F_{cd} \sin(\alpha_{cd} + \theta_{cd}) \quad (16)$$

Fig. 6 Soil bin with a lugged wheel experimental devices.

3. 재료 및 방법

가. 측정대차

측정대차는 그림 6에 나타낸 것과 같이 실험용 차륜을 장착한 프레임과 대차가 지지대에 의해 연결된 구조로 제작하였다.

프레임 위에 0.75kW의 무단변속기가 부착된 전동기를 장착하고, 폴리 및 V벨트를 거쳐서 실험용 차륜을 구동하는 구조로 제작하였다. 또한 차륜의 회전각을 측정하기 위하여 차축의 플랜지부에 광센서를 이용한 펄스발생장치를 제작 부착하였다.

지지대는 차륜주행시에도 연결부의 횡방향의 움직임 및 뒤틀림이 발생하지 않도록 암(arm)사이를 보강하였으며, 프레임은 충분한 정밀도로 수직방향으로 부가하중에 따라 자유로이 운동할 수 있도록 하였다.

차체는 3.7kW의 전동기에 의한 원치구동에 따라 와이어로서 견인한다. 또한 변속기에 의해 다단계의 주행속도가 얻어지기 때문에 구동차륜의 실험에서는 진행저하율 설정을 위하여 제동용으로 사용한다.

나. 실험용 리그 및 리그 3면용 트랜스듀서

Fig. 7 Experimental lug with transducers.

실험용 리그형상은 그림 7에 나타난 리그3면용 트랜스듀서의 외형과 같다. 전후방리그면의 부착각을 같게 하여, 전후대칭으로 구성하였다. 이 장치는 스트레인 게이지에 의해 리그면에 수직 및

평행으로 작용하는 2분력을 각 면에서 독립하여 측정할 수 있다. 스트레인 게이지는 4게이지법에 따른 풀브릿지회로로 구성하였다. 실험을 할 때는 실험용 러그를 전용차축에 넣어서 차륜본체에 장착하는 구조로 제작하였다. 본 실험에서 차륜에 장착한 러그는 8개이다.

다. 러그에 작용하는 외력의 측정

실험은 프레임상의 전동기에 의해 차륜의 회전 속도를 일정하게 하고 원치에 의해 구동된 차체의 속도를 바꿔서 진행저하율을 제어하였다. 차륜의 성능을 파악하는 것이 목적이 아니기 때문에 진행저하율은 농용 차량이 일반적으로 운용되고 있는 포장에서 타이어의 최대 추진력이 슬립 15~20% 범위에서 나타나므로(정 등, 1992) 본 연구에서는 18.5%의 경우를 택하였다.

외력의 측정은 실내 인공 토양조에서 수행하였으며 토양조의 토양은 점토 31.0%, 실트 12.0%, 모래 57.0%인 사실식토이다. 토양가공은 로터리 경운에 의한 쇄토후 균평기로 정지하고 로울러로 진압하였다. 하중은 1.25kN의 정하중(dead load)으로 실험중에 일정하게 유지하였다. 토양함수율은 실험기간 동안 약 25% 전후로 유지하였다.

트랜스듀서 및 차륜회전펄스장치에서의 출력은 데이터레코더에 수록하였다. 실험종료 후에 A/D컨버터에 의해 아날로그 데이터를 디지털화 하였고, 차륜 1회전의 디지털 데이터를 이용하여 차륜회전에 따른 러그 3면에 작용하는 힘의 수평성분과 수직성분을 마이크로컴퓨터로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 8~10은 진행저하율이 18.5%에서의 측정 결과를 보여주고 있다. 그림에서 x축은 차륜회전 각으로 차축을 중심으로 위를 0°, 아래를 180°로 나타낸 것이다. y축은 외력을 나타내는 것으로 진행방향과 상방향이 양의 값으로 나타낸 것이다.

가. 전방러그면(AB면)

그림 8은 전방러그면에서의 측정결과를 보여 주

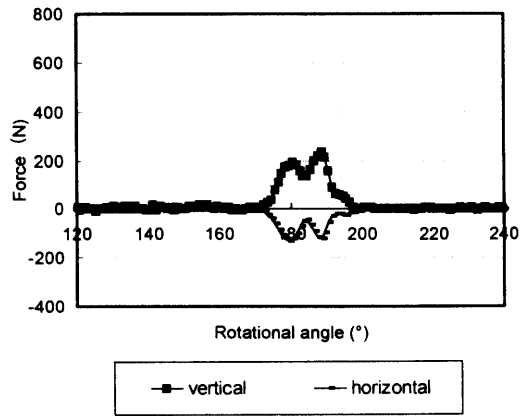


Fig. 8 Variation of external forces with rotational angle on AB surface.

고 있다. 수평성분 F_{ab}^H 는 음의 값으로 진행방향의 반대방향(-x)으로 나타나므로 구름저항이 발생하고 있음을 알 수 있다. 수직성분 F_{ab}^V 는 양의 값으로 +y 방향으로 나타나 접지하중반력이 발생되고 있음을 알 수 있다. 이것은 전방러그면이 토양에 작용하는 것과 동시에 구름저항과 접지하중반력이 작용하고 있음을 나타낸다. AB면의 전반적인 힘의 작용특성은 다른 러그면에 비하여 작게 나타나는 데 이는 미끄럼발생에 의해 BC면(러그 외주면)이 통과한 부분을 통과하고 전방의 토양에 그다지 접촉하지 않으면서 침하하기 때문이라고 판단된다(岸本, 1990, 1991).

나. 러그외주면(BC면)

그림 9는 러그 외주면에서의 측정결과를 나타낸다. 수평성분 F_{bc}^H 는 작용초기에 음의 값으로 진행방향의 반대방향(-x)으로 작용하는 것은 구름저항의 발생을 나타내고 있지만 차륜이 회전함에 따라 외주면의 각도가 변화하기 때문에 양의 값인 +x의 방향으로 변화하여 추진력이 발생한다.

수직성분 F_{bc}^V 는 양의 값인 +y방향으로 나타나므로 접지하중반력을 발생시킨다. 따라서 BC면은 구름저항, 부력 뿐만아니라 추진력의 발생과도 관계가 있음을 알 수 있다. 구름저항에서 추진력발생으로의 변환에 대하여 러그의 형상, 차륜하중

및 진행저항을 중 가장 영향을 크게 미치는 요인이 구명되어야 할 과제이다.

다. 후방러그면(CD면)

그림 10은 후방러그면에서의 측정결과를 나타낸다.

수평성분 F_{cd}^H 는 진행방향인 +x방향으로 나타나 추진력의 발생을 보여주고 있다. 수직성분 F_{cd}^V 는 작용이 시작된 직후에는 양의 값인 +y 방향으로

나타나 접지하중반력이 발생되고 있지만 CD면과 토양사이의 마찰력 혹은 부착력이 큰 경우에는 -y 방향으로 나타날 수도 있다.

위와 같이 CD면은 추진력 및 부력(차륜이 토양의 지지력을 확보하는 능력, flotation)의 발생과 관계가 있다고 판단된다. 또 작용후반에 수직성분이 아래쪽(-y)으로 향하게 되지만 이것은 CD면의 설계조건에 따라 이 면이 침하가 심한 상태에서 상방향(+y)으로 이동할 때에 토양을 들어 올려 토양이 CD면에 작용하는 접선력이 C→D의 방향에서 D→C의 방향으로 변하는 것이라고 판단된다(岸本, 1990, 1991).

이상의 결과에서 러그는 차륜회전과 동시에 C 점에서부터 토양과 상호작용하기 때문에 BC면과 CD면 중에서 어느 한 면만을 분석할 경우, 러그와 토양간의 전반적인 상호작용을 해석할 수 없으므로 러그 설계에 있어서는 BC, CD면과 함께 AB면도 포함하여 종합적으로 분석할 필요가 있다.

5. 결 론

효율적인 차륜의 러그를 설계하기 위한 실험으로 러그 3면용 트랜스듀서를 제작, 각 면에 작용하는 외력을 측정후 토양-러그간의 상호작용 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 전방러그면에서는 구름저항과 접지하중반력이 발생하였으며 다른 면에 비해 외력이 작게 나타났다. 이것은 전방러그면과 토양과의 접촉부분이 작아지기 때문이라고 판단된다.

2) 러그외주면에 발생하는 외력의 수평방향의 성분에서는 러그의 작용 직후에는 구름저항이 발생하지만 회전이 진행됨에 따라 추진력이 발생하게 된다. 또한 외력의 수직방향 성분은 접지하중반력을 발생시킨다.

3) 후방러그면에서는 추진력과 접지하중반력을 동시에 발생시킨다.

4) 차륜의 주행상태에 따라 러그를 구성하는 3면에서 발생하는 힘의 크기가 변화하므로 효율적

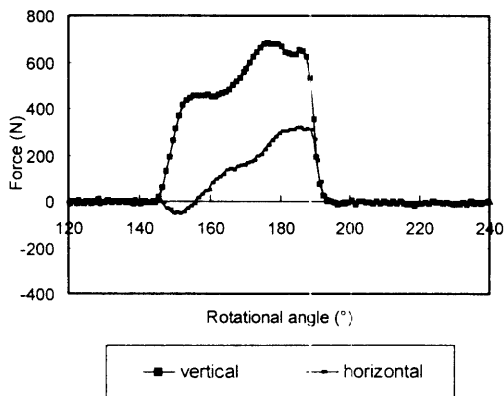


Fig. 9 Variation of external forces with rotational angle on BC surface.

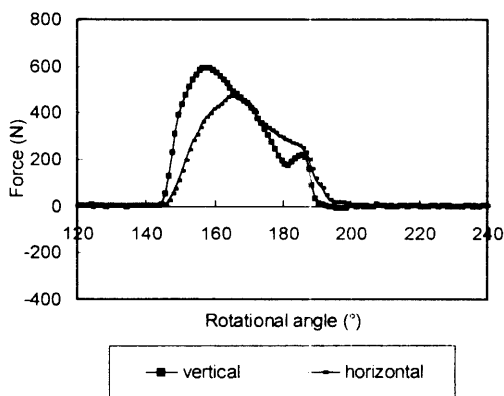


Fig. 10 Variation of external forces with rotational angle on CD surface.

인 러그의 설계를 위해서는 러그의 3면 모두를 고려하여 분석되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 정창주, 류관희, 김경옥. 1992. 농업동력학. pp. 312-324. 문운당. 서울.
2. Gee-Clough, D. and W. J. Chancellor. 1976. Pull and Lift Characteristics of Single Lugs on Rigid Wheels in Wet Rice Soils. Trans. of the ASAE 19(3):433-441, 447.
3. 田中 孝, 中嶋洋. 1986. 土-러그系の相互作用に関する基礎研究, 農機誌 48(2):225-232.
4. 王 秀崙, 田中 孝, 山崎 稔. 1989. ラグ車輪と土との相互作用に関する研究(第1報)-러그車輪の運動-. 農機誌 51(3):33-40.
5. 坂井純, 岸本正, Surin Phongsupasamit. 1988. 農用車輪の設計理論に関する研究(第1報). 農機誌 50(6):11-18.
6. 岸本正, 井上英二, 坂井純, 松尾隆明. 1990. 農用車輪の設計理論に関する研究(第2報). 農機誌 52(4):11-19.
7. 岸本正, 坂井純, 井上英二, 松尾隆明. 1991. 農用車輪の設計理論に関する研究(第4報). 農機誌 53(3):25-34.
8. 岸本正, 谷口哲司, 坂井純, 石本和重, 大友功一. 1991. 農用러그車輪用外力測定装置の開発(第2報). 帯大研報 I 17(3):279-287.