선형절삭시험에 의한 슬림 코니컬커터의 절삭성능 평가(II): Skew Angle 변화에 의한 결과

최순욱¹ · 장수호^{2*} · 이규필³ · 박영택³

¹정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 전임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 수석연구원

Performance estimation of conical picks with slim design by the linear cutting test (II): depending on skew angle variation

Soon-Wook Choi¹, Soo-Ho Chang^{2*}, Gyu-Phil Lee³, Young-Taek Park³

¹Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Specialist

²Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

³Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Researcher

ABSTRACT: In this study, the cutter acting forces were measured by 3-directional load cell at two different skew angles and various S/d ratios during a series of linear cutting tests using a slim conical pick. The analysis for cutting performance were carried out after calculating average values of the measured results. The increase of penetration depth results in the decrease of specific energy. And the variations of the cutter acting forces depending on penetration depth in the case of 6 degree skew angle were smaller than in the case of 0 degree skew angle. From this results, 6 degree skew angle is more effective than 0 degree skew angle in designing optimal specifications of cutting head. In addition, F_c/F_n under the setting of 6 degree skew angle was smaller than under the setting of 0 degree skew angle. However, it should be considered that the increase of cutter acting force in the cutting direction accompanied the increase of driving force in the case of the setting for 6 degree skew angle.

Keywords: Roadheader, Pick cutter, Linear cutting test, Mortar specimen, Cutter acting force, Skew angle

초 록: 본 연구에서는 받음각이 45°인 경우에 대해 사각이 0°와 6°이고 S/d비가 1.3~12사이인 시험조건에 대해 슬림 코니컬커터를 사용하여 선형절삭시험동안 발생하는 커터작용력을 측정하였다. 각 시험조건에서 커터작용력인 연직력, 절삭력, 구동력을 측정하였고 그 측정결과와 평균값을 사용하여 분석을 실시하였다. 커터관입깊이가 깊어질수록 비에너지가 감소하였고 커터관입깊이에 따른 커터작용력의 변화는 사각이 6°인 경우가 작게 나타났다. 이와 같은 결과로부터 사각이 6°인 경우가 0°인 경우에 비해 장비설계측면에서 효과적인 것으로 판단된다. 또한 F_c/F_n 은 사각이 6°일 때가 0°인 경우에 비해 작게 나타났다. 그러나 사각이 있을 경우 구동력의 증가가 나타날 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

주요어: 로드헤더, 픽커터, 선형절삭시험, 모르타르시험체, 커터작용력, 사각

1. 서 론

로드헤더(roadheader)는 단면 형상에 크게 제약을

받지 않기 때문에 자유단면 굴착기 또는 부분단면 굴착기(partial-face machine)로 불린다. 이 장비는 터널의 지보재가 설치된 상황에서 터널을 연결하는 피난연락경 등을 시공할 때 사용하는 발파, 유압브레이커(hydraulic breaker), 스플리터(splitter)를 대체할 수 있다. 또한 유압브레이커 대비 작업속도가 빠른 것으로 알려져 있다(Bilgin et al., 1997). 로드헤더는 압축

*Corresponding author: Soo-Ho Chang

E-mail: sooho@kict.re.kr

Received November 13, 2014; Revised November 20, 2014;

Accepted November 24, 2014

강도가 최대 170 MPa인 경암 굴착도 가능한 것으로 보고되고 있으나, 픽커터의 절삭성능과 내마모성의 한계로 인해 압축강도가 100 MPa이하인 연암 또는 보통암에서 효과적인 것으로 알려져 있다(Rostami et al., 1994; Tunnel Business Magazine, 2011).

픽커터는 래디얼타입(radial picks or drag bits)과 포인트어택타입(conical picks or point attack picks)으로 구분할 수 있다. 래디얼타입은 로드헤드의 사용 초기에 연암을 대상으로 주로 적용하였으나, 내구수명이 짧은 문제로 현재는 대부분 포인트어택타입(이후 코니컬커터로 명명)이 사용되고 있다. 코니컬커터의 구성을 살펴보면, 암반과 접촉하여 큰 응력을 받는 텅스텐 카바이드 삽입재(insert)와 카바이드 삽입재가 삽입되는 두부(head), 두부와 연결되어 홀더(holder)에 삽입되는 샤프트(shaft)가 있다. 텅스텐 카바이드 삽입재는 매우 높은 수준의 내마모성 재료이고 커팅헤드의 회전으로 인해 발생하는 암반과의 충격에 견딜 수 있을 만큼 인성이 커야 한다. 두부와 샤프트는 열처리된 강재로 제작되며, 텅스텐 카바이드 삽입재가 암반을 절삭하는 동안 이를 지지하고 하부의 홀더를 보호하는 역할을 한다.

선형절삭시험(linear cutting test)과 회전절삭시험(rotary cutting test)은 암석파쇄(rock fragmentation) 연구에서 상사에 의한 크기효과를 보정할 수 없고 수치해석적 연구로도 모사가 어렵기 때문에 기계굴착 작업의 설계에서 필수적인 사항이다(Rostami, 2013). 일반적으로 선형절삭시험은 커터간격, 커터관입깊이와 같은 조건의 변화에 따라 커터작용력과 비에너지 등의 변화를 알아보기 위해 사용되며, 회전절삭시험은 커터관입깊이, 절삭속도에 따른 커팅헤드의 거동 파악을 주목적으로 한다.

선형절삭시험에서 픽커터는 일정한 깊이(cutting depth)만큼 암반 내로 관입되어 절삭하며, 이때 픽커터 선단에는 연직력(normal force), 절삭력(cutting force), 암반과의 마찰에 의한 구동력(side force)이 발생하게 된다. 이와 같은 커터 작용력은 커팅헤드의

소요 추력, 토크 및 동력을 산출하는데 반드시 필요하다(Balci et al., 2004; Copur et al., 2011).

본 연구에서는 코니컬커터의 샤프트의 모멘트(moment)를 최소화 시키는 각도인 받음각(attack angle)을 고정시킨 상태에서 비틀림 힘(torsional force)을 발생시켜 코니컬커터가 홀더 내에서 회전하도록 하여 커터수명을 연장시키는 사각(skew angle)과 커터간격 및 커터관입깊이를 변화시키면서 커터작용력의 변화를 살펴보는 연구를 진행하였다.

2. 시험장비 구성

2.1 선형절삭시험장비와 코니컬커터

선형절삭시험장비는 로드헤드 커팅헤드에 사용되는 실제 픽커터를 장착할 수 있으며 커팅헤드가 회전하면서 암석을 굴착할 때 발생하는 커터작용력과 커터관입깊이의 정도를 모사할 수 있기 때문에 커팅헤드의 성능예측에 직접 활용할 수 있다. 특히 시험결과에 대한 크기 효과를 배제할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Nilsen and Ozdemir, 1993). 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 한국건설기술연구원에서 보유한 선형절삭 시험장비에 코니컬커터를 설치하여 선형절삭시험을 수행하였다. 이 장비는 커터의 간격조절(X축 방향)과 커터의 관입깊이 조절(Z축 방향) 그리고 절삭방향(Y축방향)으로 시험체를 이동시키는 액추에이터로 구성되어 있다.

픽커터의 선형절삭시험을 수행하기 위해 래디얼타입(radial picks or drag bits)과 포인트어택타입(conical picks or point attack picks) 중에서 포인트어택타입인 코니컬커터를 사용하였다. 코니컬커터는 래디얼타입에 비해 커터의 사용주기 전체에서 커터작용력이 작게 나타나며, 사용하는 동안 커터의 회전이 발생하면서 마모량이 상대적으로 줄어드는 효과(sharpening)가 나타나며, 특히 강도가 높은 암석을 절삭할 때 래디얼타입에 비해 우수한 것으로 알려져 있다

Fig. 1. Linear cutting machine (LCM)

(Fowell and OCHEL, 1984; Goktan and Gunes, 2005; Hurt and Evans, 1981; Kim et al., 2012).

코니컬커터는 일반적으로 굴착대상암반의 강도가 높을수록 텅스텐카바이드로 만들어진 커터 팁(tungsten carbide tip)과 커터 팁이 삽입되는 두부(head) 그리고 홀더(holder)에 삽입되는 샤프트(shaft)의 직경이 두꺼

Fig. 2. Conical pick used in this tests

Table 1. Dimensions of the conical pick

Model	Cutter tip Diameter (mm)	Cutter tip angle (°)	Shank Diameter (mm)	Length (mm)
U73	9	70	25	129

워진다. 본 연구에서는 연암(low strength) 또는 보통 암(medium strength)을 대상으로 하는 Fig. 2와 같은 슬림(slim)한 형상을 가진 코니컬커터를 사용하였고, 형상에 대한 제원은 Table 1과 같다.

픽커터는 디스크커터와 달리 Fig. 3과 같이 암석의 절삭면과 픽커터의 축사이에 일정한 각도를 가진다. Fig. 3a는 절삭방향(Front view)에서 보았을 경우 암석면에 직각인 축과 코니컬커터의 중심축이 이루는 각도인 사각(Skew angle, θ)을 나타내며, Fig. 3b는 절삭방향의 직각방향(Side view)에서 보았을 경우 암석면과 코니컬커터의 중심축이 이루는 각도인 받음각(attack angle, ϕ)을 보여준다.

사각은 커터에 의해 암석이 절삭될 때 커터의 회전을 발생시키기 위해 사용되며, 일반적으로 $6 \sim 7^\circ$ 로 설정된다(Rostami, 2013). 커터의 회전은 커터 팁의 균일한 마모를 발생시켜 커터 팁의 형상을 유지시키고 이에 따라 커터의 사용주기 전반에 걸쳐 일정한 성능을 유지시켜주는 역할을 함으로써 수명향상에 도움을 준다(Hurt and Evans, 1981; Kim et al., 2012).

Fig. 3. Cutting geometry of conical picks

받음각은 암석면과 커터의 축이 이루는 각도에 의해 암석 절삭동안 커터의 샤프트(shaft)에 모멘트(moment)를 발생시킨다. 따라서 모멘트를 최소화시키는 각도로 설정하여야 하며, 일반적으로 경암 조건에서는 55° , 연암 조건에서는 $40 \sim 45^\circ$ 보다 더 큰 것으로 알려져 있다(Rostami, 2013).

본 연구에서는 연암과 보통암 조건을 상정하여 받음각을 45° 로 설정하고 사각은 6° 로 설정하여 선형절삭실험을 수행하였다.

선형절삭실험에서 받음각을 모사하기 위하여 Fig. 4b와 같이 코니컬커터를 홀더에 삽입·고정시킨 후 선형절삭시험장비와 커터를 연결하는 철판과 홀더를 용접하면서 받음각을 조정하였다. Fig. 4a는 받음각이 조정된 홀더와 그 상부에 사각을 조절할 수 있도록 제작된 각도조절장치, 그리고 그 위에 커터에 작용하는 3방향의 커터작용력인 연직력(normal force), 절삭력(cutting force and drag force), 구동력(driving force)을 측정하기 위한 3방향 로드셀을 보여준다. Fig. 4c는 받음각과 사각이 모사된 코니컬커터와 홀더가 선형절삭시험장비에 설치된 모습이다.

Fig. 4. Conical pick and block installed in LCM

3. 시험체 제작 및 시험방법

3.1 시험체 제작

본 연구에서는 선형절삭시험을 위해 가로 1,300 mm, 세로 1,150 mm, 높이 40 mm인 모르타르시험체를 제작하였다. 선형절삭시험을 위한 시험체는 특수한 경우를 제외하면 무결암을 대상으로 한다(Choi et al., 2013, 2014). 본 연구에서 대상으로 하는 암석은 연암 또는 보통암 조건이기 때문에 선형절삭시험을 수행할 만한 무결암을 구하는 것이 매우 어렵다. 따라서 압축

Fig. 5. Mortar specimen installed in LCM

강도를 조절할 수 있고 요구되는 시험체 크기로 제작하기 위하여 무수축모르타르를 이용하여 시험체를 제작하였다. 시험체는 Fig. 5와 같이 선형절삭시험장비의 시험체 설치박스에 넣고 시험체와 설치박스 사이에 모르타르를 채워 넣어 구속하였다. 시험체의 일축압축강도를 측정한 결과는 66 MPa이며, 배합조건은 Table 2와 같다.

3.2 시험조건 및 방법

픽커터의 선형절삭시험에서의 시험변수는 커터의 종류, 커터관입깊이(depth of cut, d), 커터간격(cutter spacing, S), 받음각(ϕ), 사각(skew angle)이 있다. 본 연구에서는 받음각이 고정된 상태에서 커터관입깊이, 커터간격, 사각의 변화에 따른 커터작용력을 측정하였다. 시험조건은 다음의 Table 3, Table 4와 같다. 사각이 0°인 경우에는 다양한 S/d 비에 따른 결과를 살펴보고자 하였고, 사각이 6°인 경우에는 커터간격이 12, 27 mm인 경우에 대해 사각에 따른 차이를 알아보고자 하였다.

선형절삭시험은 모르타르시험체가 구속되어 있는 시험체 설치박스를 선형절삭시험장비에 설치한 다음,

Table 2. Composition of non-shrinkage mortar

	Cement	Sand	Dispersing agent	Expansion agent	Strength agent	Accelerator	+ α
Content (%)	41	42.95	1.0	5.0	5.0	0.05	5.0

Table 3. Test matrix for linear cutting tests (Skew angle 0°)

Depth of cut (d , mm)	3			6			9		
Spacing (S , mm)	9	12	27	9	12	72	12	27	72
S/d	3	4	9	1.5	2	12	1.3	3	8

Table 4. Test matrix for linear cutting tests(Skew angle 6°)

Depth of cut (d , mm)	3		6		9	
Spacing (S , mm)	12	27	12		12	27
S/d	4	9	2		1.3	3

받음각이 조정되어 있는 코니컬커터와 3축 로드셀을 시험체 상부에 설치한다. 이후 커터의 간격을 조절하는 X축방향의 액추에이터를 이용하여 절삭간격을 조절하고 Z축방향의 액추에이터를 사용하여 코니컬커터의 관입깊이를 조절한다. 사전에 결정된 관입깊이와 절삭간격의 조절이 완료되면 절삭방향인 Y축방향으로 시험체의 절삭이 이루어지며, 이때 커터 상부에 설치되어 있는 3분력 로드셀로 코니컬커터에 작용하는 연직력, 절삭력, 구동력을 0.01초 간격으로 측정하였다.

TBM의 디스크커터에 대한 선형절삭시험과 마찬가지로 굴착작업에 의해 손상을 받은 막장면과 유사한 조건을 모사하기 위하여 사전절삭(preconditioning)을 실시한 후 본 절삭시험을 수행하였다(Chang et al.,

2012). 절삭작업은 모든 조건에서 7개 라인 절삭을 기본으로 수행하였다. 그러나 절삭깊이가 깊어짐에 따라 코니컬커터의 커터 팁 외의 부분이 시험체에 접촉되기 때문에 깊이에 따라 절삭선의 개수는 달리 하였다. 최외측 절삭선은 인접한 커터 절삭에 의한 상호작용의 영향이 작기 때문에 중앙부의 3~5번 절삭선의 결과를 이용하였다(Choi et al., 2013).

4. 시험결과

모르타르시험체에 대한 선형절삭시험을 수행한 결과로 얻어진 코니컬커터의 절삭거리에 따른 커터작용력의 변화는 Fig. 6과 같다. 커터작용력은 절삭이 진행

Fig. 6. An example of conical pick acting forces obtained from a linear cutting test(Attack angle 45° , Skew angle 6°)

됨에 따라 크게 요동치며 변화하기 때문에 결과분석을 위해 Gertsch et al. (2007)이 보고한 바와 같이 각 시험조건에서의 평균값을 산정하였다. 그 결과, 커터작용력의 크기는 연직력(Fig. 6a), 절삭력(Fig. 6b), 구동력(Fig. 6c) 순으로 나타났다.

4.1 최적 절삭조건

비에너지는 물질의 단위중량당 내부 에너지를 뜻하며, 본 연구에서와 같이 최소의 에너지로 최대의 절삭효과를 얻을 수 있는 절삭조건을 찾을 때 사용할 수 있다. 선형절삭시험에서 비에너지는 식 (1)과 같이 회전력(rolling force) 또는 절삭력(cutting force)에 절삭거리를 곱한 값을 절삭부피(절삭깊이×절삭간격×절삭거리)로 나누어 계산할 수 있다. 이 방법은 절삭간격 사이에서의 상호작용이 잘 이루어지는 경우에는 선형절삭시험 후 절삭부피를 측정하는 작업 없이 비에너지를 계산할 수 있어 효과적이지만, 커터간격이 넓어서 절삭간격 사이에서의 상호작용이 나타나지 않거나 부족할 경우 비에너지를 과소평가할 수 있다. 본 연구에서는 서로 다른 절삭조건에 대한 최소의 에너지를 찾기 위해서 S/d비(커터관입깊이에 대한 커터간격의 비)와 비에너지(specific energy, SE)의 관계

를 이용하였다.

Fig. 7은 사각이 0°와 6°일 때 S/d비에 따른 비에너지의 변화를 도시한 것이다. S/d비에 따른 비에너지는 사각이 6°인 경우가 0°인 경우에 비해 낮게 나타났다. 사각이 6°로 같은 경우에서는 커터간격이 27 mm인 경우의 비에너지가 커터간격이 12 mm인 경우보다 더 작게 나타났다. Fig. 7에서 가장 낮은 비에너지는 사각이 6°이고 S/d비가 3(커터간격이 27 mm)인 경우이지만, 커터간격이 27 mm인 경우의 선형절삭시험 후 표면에서 절삭간격사이의 상호작용이 부족하게 나타난 점을 고려할 때, 비에너지를 과소평가할 수 있기 때문에 이 결과만을 가지고 최적의 절삭조건을 판단하는 것은 어려웠다. 사각과 커터간격에 상관없이 실험결과 전체에서 S/d비가 작아질수록 비에너지는 작아지는 경향을 보였다.

Fig. 8은 사각이 0°와 6°일 때 커터관입깊이에 따른 비에너지의 변화를 도시한 것이다. 커터관입깊이에 따른 비에너지는 사각이 6°인 경우가 0°인 경우에 비해 낮게 나타났으며, 커터관입깊이가 증가함에 따라 비에너지는 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 사각이 0°와 6°이고 커터간격이 12 mm인 경우에서 커터관입깊이가 6 mm를 넘어서면 비에너지가 일정해지는 경향이 나타났다.

Fig. 7. Variation in specific energy at different S/d ratios

Fig. 8. Variation in specific energy at different penetration depths

Fig. 9. Variation in mean normal force at different S/d ratios

Fig. 11. Variation in mean driving force at different S/d ratios

Fig. 10. Variation in mean cutting force at different S/d ratios

Fig. 9와 Fig. 10, Fig. 11은 각각 사각이 0°와 6°일 때 S/d비에 따른 연직력과 절삭력의 변화를 도시한 것이다. 평균 연직력과 평균 구동력은 사각이 0°와 6°인 경우에서 유사한 값을 나타냈으며, 커터간격에 따라 서로 유사한 결과를 보였다. 평균 연직력은 S/d비가 3(커터간격이 9 mm)인 경우가 가장 낮았고 사각이 6°이고 커터간격이 27 mm인 경우에서의 변화가 가장 작았다. 평균 절삭력은 사각이 6°인 경우에 비해 낮았으며, 사각이 6°이고 커터간격이 12 mm인 경우에서 가장 낮았고, 사각이 6°이고 커터간격이 27 mm인 경우에서의 변화가 가장 작았다. S/d비의 변화에 따른 평균 커터작용력이 변화가 작으면 같은

절삭간격에서 절삭깊이를 달리 해도 커터작용력의 변화가 작기 때문에 커팅헤드에 유사한 작용력이 전달되므로 설계 시 추력과 동력범위의 선정에 더 효과적이다.

$$\text{Specific energy} = \frac{\text{cutting force} \cdot \text{cutting distance}}{\text{cutting volume}}$$

$$= \frac{\text{cutting force}}{\text{penetration} \cdot \text{cutter spacing}} \quad (1)$$

4.2 커터간격의 영향

코니컬커터의 절삭간격에 따른 커터작용력의 변화를 파악하기 위해 Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14와 같이 사각이 0°와 6°일 때 커터간격에 따른 평균 연직력, 평균 절삭력, 평균 구동력의 변화를 도시하였다. Fig. 9, Fig. 10에서와 같이 사각과 커터간격에 따라 평균 연직력의 크기는 유사하였으나, 평균 절삭력은 사각이 6°인 경우가 작게 나타났다. 커터간격이 증가함에 따라 커터가 절삭해야 할 암석의 부피가 커지기 때문에 코니컬커터의 평균 연직력과 평균 절삭력은 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 평균 구동력은 커터간격의 증가에 따라 변화가 작게 나타났다.

Fig. 12. Variation in mean normal force at different cutter spacings

Fig. 13. Variation in mean cutting force at different cutter spacings

Fig. 14. Variations in mean driving force at different cutter spacings

4.3 커터관입깊이의 영향

Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17은 사각과 절삭깊이에 따른 평균 연직력, 평균 절삭력, 평균 구동력의 변화를 도시한 것이다. 평균 연직력의 결과는 사각의 변화에 따른 차이가 크지 않았지만 평균 절삭력의 결과에서는 사각이 6°인 경우가 0°인 경우에 비해 작용력이 낮게 나타났다. 사각이 0°인 경우에는 커터관입깊이가 증가함에 따라 평균 커터작용력이 증가하는 경향을 보였으나, 사각이 6°인 경우는 커터관입깊이에 따라 사각이 0°인 경우에 비해 상대적으로 일정한 결과를 보였다.

Fig. 15. Variation in mean normal force at different penetration depths

Fig. 16. Variation in mean cutting force at different penetration depths

Fig. 17. Variation in mean driving force at different penetration depths

Fig. 18. Variation in mean cutting force to mean normal force ratios at different penetration depths

Fig. 19. Variation in mean driving force to mean normal force ratios at different penetration depths

Fig. 20. Variation in mean driving force to mean cutting force ratios at different penetration depths

평균 연직력에 대한 평균 절삭력의 비(F_d/F_n)는 암석의 종류와 조직구성, 커터의 형상, 반음각, 커터관입깊이에 따라 변하며, 그 범위가 0.5~1.0이라고 하였다 (Asbury et al., 2002). Fig. 18, Fig. 19, Fig. 20은 사각과 절삭깊이에 따른 평균 연직력에 대한 평균 절삭력의 비와 평균 연직력에 대한 평균 구동력의 비(F_d/F_n), 평균 절삭력에 대한 평균 구동력의 비(F_d/F_c)의 변화를 도시한 것이다. F_d/F_n 는 사각이 6°일 때 0.44~0.55의 범위에서 나타났고 사각이 0°일 때 0.66~0.82의 범위에서 나타났다. 로드헤드 커팅헤드 설계에서 토크와 동력의 설계는 절삭력과 F_d/F_n 을 사용

한다. 위 결과와 같이 사각이 6°일 경우 F_d/F_n 이 상대적으로 낮아지지만 사각이 있을 경우에는 구동력이 Fig. 17과 같이 절삭깊이가 깊어질수록 커지기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. F_d/F_n 과 F_d/F_c 는 관입깊이가 깊어질수록 급격히 늘어나는 경향을 타내었다.

4.4 평균 커터작용력과 최대 커터작용력의 관계

코니컬커터의 평균 연직력과 최대 연직력, 평균 절삭력과 최대 절삭력, 평균 구동력과 최대 구동력의 관계는 각각 Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23과 같다. 평균

Fig. 21. Relationship between peak normal force and mean normal force

Fig. 23. Relationship between peak driving force and mean driving force

Fig. 22. Relationship between peak cutting force and mean cutting force

커터작용력이 증가함에 따라 최대 커터작용력이 선형적으로 비례하여 증가하는 경향을 보였으며, 회귀식은 식 (2), 식 (3), 식 (4)와 같다. 이 회귀식으로부터 최대 커터작용력은 평균 커터작용력의 약 3.6~4.6배 정도임을 알 수 있었다.

$$F_{peak} = 4.63462 F_{mean} - 4.31172 \quad (R = 0.9829, \text{ normal force}) \quad (2)$$

$$F_{peak} = 4.09571 F_{mean} - 1.29317 \quad (R = 0.9827, \text{ cutting force}) \quad (3)$$

$$F_{peak} = 3.57385 F_{mean} - 0.09653 \quad (R = 0.8435, \text{ driving force}) \quad (4)$$

여기서 F_{peak} 는 최대 커터작용력 그리고 F_{mean} 은 평균 커터작용력이다.

5. 결론

본 연구에서는 슬림 코니컬커터와 모르타르시험체를 사용하여 받음각이 45°인 경우에 대해 사각이 0°와 6°이고 S/d비가 1.3~12사이인 시험조건에 대해 선형절삭시험을 수행하였고 시험동안 발생하는 커터작용력을 측정하였다.

가장 낮은 비에너지는 사각이 6°이고 커터간격이 27 mm이며 S/d비가 3인 경우이지만, 커터간격이 27 mm인 경우의 선형절삭시험 후 표면에서 절삭간격사이의 상호작용이 부족하게 나타난 점을 고려할 때, 비에너지를 과소평가할 수 있기 때문에 이 결과만을 가지고 최적의 절삭조건을 판단하는 것은 어려웠다. S/d비와 비에너지의 관계, 관입깊이와 비에너지의 관계, S/d비 및 커터관입깊이와 커터작용력의 관계를 고려해 볼 때, 사각이 6°이고 커터간격이 12 mm이며 S/d비가 1.3인 경우도 효과적인 대안이 될 수 있을

것으로 판단된다.

모든 조건에서 S/d비가 작아질수록 즉, 비에너지는 작아지는 경향을 보였으며, 커터관입깊이가 깊어질수록 비에너지가 감소하는 경향이 나타났다. 비에너지가 감소하는 것은 절삭효율이 증대되고 절삭에 의한 먼지발생이 줄어든다는 의미로 긍정적이지만, 커터관입깊이가 증가되면 커터간격 역시 증가하게 되므로 한정된 커팅헤드 폭에서 커터간격이 증가할 경우 커터의 전체 개수가 줄어들어 절삭 시 커팅헤드의 진동을 유발할 수 있으므로 주의해야 한다.

사각이 0°인 경우와 6°인 경우를 비교해보면, 평균 연직력의 변화는 거의 나타나지 않은 반면 평균 절삭력과 평균 구동력은 6°인 경우가 작게 나타났으며 커터관입깊이가 깊어질수록 사각의 차이에 의한 커터작용력의 차이가 큰 것으로 나타났다. 또한 커터관입깊이에 따른 커터작용력의 변화는 사각이 6°인 경우가 작게 나타났다. 따라서 사각이 6°인 경우가 커팅헤드 장비사양 설계에서 더 효과적인 것으로 판단된다.

F_t/F_n 는 사각이 6°일 때 0.44~0.55의 범위에서 나타났고 사각이 0°일 때 0.66~0.82의 범위에서 나타났다. 로드헤드 커팅헤드의 토크와 동력 설계는 절삭력과 F_t/F_n 를 사용하므로 사각이 6°인 경우가 더 효과적이지만, 사각이 있을 경우에는 구동력의 증가가 수반될 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “운용 중 공간확장이 가능한 지하 굴착 및 안정화 기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Asbury, B., Cigla, M., Balci, C. (2002), “Design methodology, testing and evaluation of a continuous miner cutterhead for dust reduction in underground coal mining”, 2002 SME Annual Meeting, February 25-27, Phoenix, Arizona, pp. 1-8.
2. Balci, C., Demircin, M.A., Copur, H., Tuncdemir, H. (2004), “Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance”, The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, December 2004, pp. 633-642.
3. Bilgin, N., Kuzu, C., Eskikaya, S. (1997), “Cutting performance of rock hammers and roadheaders in Istanbul Metro drivages”, Proceedings, World Tunnel Congress'97, Tunnels for People, Balkema, pp. 455-460.
4. Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Bilgin, N. (2011), “Field and laboratory studies on natural stones leading to empirical performance prediction of chain saw machines”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 48, pp. 269-282.
5. Chang, S.H., Choi, S.W., Park, Y.T., Lee, G.P., Bae, G.J. (2012), “Characterization of the deformation of a disc cutter in linear rock cutting test”, J. of Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc., Vol. 14, No. 3, pp. 197-213.
6. Choi, S.W., Chang, S.H., Park, Y.T., Lee, G.P., Bae, G.J. (2013), “A experimental study on the loads and temperature acting on the shaft of a disc cutter during linear rock cutting test”, J. of Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc., Vol. 15, No. 3, pp. 237-251.
7. Choi, S.W., Chang, S.H., Park, Y.T., Lee, G.P., Bae, G.J. (2014), “Comparative analysis of cutter acting forces and axial stresses of single and double disc cutters by linear cutting test”, J. of Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc., Vol. 16, No.

- 2, pp. 181-191.
8. Fowell, R.J., OCHEI, N.N. (1984), "A comparison of dust make and energy requirements for rock cutting tools", *International Journal of Mining Engineering*, Vol. 2, pp. 73-83.
9. Gertsch, R., Gertsch, L., Rostami, J. (2007), "Disc cutting tests in colorado red granite: implications for TBM performance prediction", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 44, pp. 238-246.
10. Goktan, R.M., Gunes, N. (2005), "A semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks", *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 105, April 2005, pp. 257-264.
11. Hurt, K.G., Evans, I. (1981), "Point attack tools: an evaluation of function and use for rock cutting", *Mining Engineer*, Vol. 140, pp. 673-675.
12. Kim, E., Rostami, J., Swope, C. (2012), "Full scale linear cutting experiment to examine conical bit rotation", *Journal of Mining Science*, Vol. 48, No. 5, pp. 882-895.
13. Nilsen, B., Ozdemir, L. (1993), "Hard rock tunnel boring prediction and field performance", *Proc. of Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, pp. 833-852.
14. Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M. (1994), "Application of heavy duty roadheaders for underground development of the yucca mountain exploratory study facility, high level radioactive waste management", *Proceedings of the 5th Annual international conference*, Vol. 2, pp. 395-402.
15. Rostami, J. (2013), "Cutterhead design procedures and performance evaluations for roadheader, final report submitted to korea institute of construction technology", August 2013, Jamal Rostami Engineering Services LLC.
16. Tunnel Business Magazine (2011), "Roadheaders in hard rock-east side access among north american projects employing roadheader technology", February 2011, pp. 20-21.