

RecurDyn/ProcessNet을 이용한 커팅헤드 어태치먼트의 픽 배열 설계 자동화[§]

강지현* · 장진석** · 이재욱** · 강 훈** · 김건우** · 유완석^{†*}

* 부산대학교 기계공학부, ** 한국생산기술연구원

Automation for Pick Arrangement Design of a Cutting Head Attachment Using RecurDyn/ProcessNet

Ji-Heon Kang^{*}, Jin-Seok Jang^{**}, Jae-Wook Lee^{**}, Hoon Kang^{**}, Kun-Woo Kim^{**}
and Wan-Suk Yoo^{†*}

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** Daegyeong Regional Division, Korea Institute of Industrial Technology

(Received February 25, 2016 ; Revised April 18, 2016 ; Accepted May 12, 2016)

Key Words: Cutting Head Attachment(커팅헤드 어태치먼트), Pick Arrangement(픽 배열), Multibody Dynamics (다물체동역학), RecurDyn/ProcessNet(리커다인/프로세스넷), Automation Design(자동화 설계)

초록: 커팅헤드 어태치먼트는 굴삭기에 부착되어 사용되며 절삭 도구인 픽커터가 커팅헤드에 배열되어 암석이나 낙후된 건물을 파쇄 또는 절삭하는 작업에 사용된다. 암석을 절삭할 때 픽 커터의 배열은 절삭 성능과 연관성이 있는 요소이다. 본 연구는 픽 배열 설계 자동화를 수행하여 설계 소요 시간 및 검증 시간을 단축시켰으며, 배열에 따른 시스템의 거동을 예측하는데 활용하였다. 픽 배열 설계 자동화 방법은 RecurDyn/ProcessNet을 통해 수행하였으며, 설계 자동화 프로그램은 Drum set, Pick load 그리고 Pick arrangement의 세 부분으로 나누어 진행하였다. 이를 통해 커팅헤드 어태치먼트의 설계 비용 절감과 다양한 메커니즘 별 전용 어태치먼트의 설계에 활용할 수 있다.

Abstract: A cutting head is an attachment on the front of an excavator that cuts or grinds rocks. Cutting tools, called pick cutters, are arranged on the surface of the cutting head. The exact arrangement and configuration of pick cutters is one of the most important factors in determining grinding efficiency. This study focuses on the problem of automation for pick arrangement design, in order to make the design process more efficient and convenient. Design automation was carried out using RecurDyn/ProcessNet, and it was composed of three parts: 'Drum set', 'Pick load', and 'Pick arrangement' sections. The presented method helps to decrease costs attributed to designing cutting heads and can be used to generate a wide range of attachment mechanisms.

1. 서 론

1.1 연구배경

낙후된 건축물의 재건이나 굴착 및 개착 공사를

진행할 때는 유압 브레이커가 많이 사용되는데, 도심지에서 작업 시 소음 발생의 문제로 인해 많은 민원이 제기되고 있다. 세계적으로 건설기계 저소음, 저진동화 규제가 강화됨에 따라 Fig. 1과 같은 커팅헤드 어태치먼트(cutting head attachment)가 유압 브레이커 대체용으로 사용되고 있다. 기존 유압 브레이커 대비 커팅헤드는 붐(boom)의 각도에 따라 다양하게 활용이 가능하고, 작업속도가 빠르며 파쇄된 암석을 골재로 사용할 수 있다는

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, wsoo@pusan.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

장점을 가지고 있다.

현재 커팅헤드에 부착된 절삭 도구인 픽(pick)은 Point attack type이 많이 사용되고 있으며,⁽¹⁾ 선형 절삭 시험으로 절삭 성능 및 작용력을 분석하고,^(2,3) 픽에 작용하는 절삭력(cutting force)를 이론적으로 유도하는 등 절삭을 직접적으로 수행하는 픽과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 픽 자체의 성능에 국한되지 않은 연구로는 Hekimoglu⁽⁴⁾이 수행한 픽 배열 설계 시 배열 간격에 대한 영향과 배열 패턴 분석, Ergin에 의한 설계변수에 따른 시스템의 안정성 평가⁽⁵⁾를 수행한 연구가 있으며, 작업 시 발생하는 변동 하중과 설계변수와의 관계에 관한 연구를 통해 굴삭 작업의 효율성과 안정성을 향상시키는 설계가 Chang-long⁽⁶⁾에 의해 제시된 바 있다.

이들 연구는 지하 작업용 로드헤더 모델에 국한되어 있으며 최근 도시재생과 극한환경에서의 작업을 위한 경량화 및 소형화가 진행되며 메커니즘이 변형되어 가고 있다. 이 경우 암반파쇄 과정에서 발생하는 작용력이 시스템에 미치는 영향이 로드헤더보다 상대적으로 크게 작용하게 된다. 따라서, 굴삭기 시스템 및 절삭 자세별로 커팅헤드 어태치먼트의 픽 배열에 따른 영향을 분석하여 설계할 필요가 있다.

1.2 연구목적

커팅헤드 어태치먼트 픽 배열 설계는 Fig. 2와 같이 Fig. 2(b)의 드럼(drum)위에 Fig. 2(c)의 픽 커터와 Fig. 2(d)의 픽 홀더(holder)가 결합되어 Fig. 2(a)와 같이 배열된다. 이와 같은 픽 배열 설계 시 다양한 설계변수에 의해 굴삭 성능이 변화하기 때문에 설계자가 설계를 평가하고 적용하는게 어렵다. 이 경우 CAE(Computer Aided Engineering)를 활용하여 성능을 예측하게 되면 시간과 비용을 절약할 수 있는데, 이를 위해 설계 자동화 프로그램 구축이 필요하다. 픽의 배열 설계 프로세스를 통합하여 자동화 프로그래밍을 수행하기 위해 RecurDyn의 ProcessNet⁽⁷⁾을 활용하였다.

RecurDyn의 ProcessNet은 C#을 이용한 Macro 기능을 담당하는 툴킷(toolkit)으로, 다양한 응용코드를 제작할 수 있게 해준다. ProcessNet의 기능을 이용하면 픽 배열과 관련된 일련의 과정이 하나의 인자조합으로 자동화 설계가 이루어지게 되므로, 굴삭기 모델에 커팅헤드 어태치먼트를 부착하는 다양한 설계 조합을 도출하는데 용이하다.



Fig. 1 Cutting head attachment

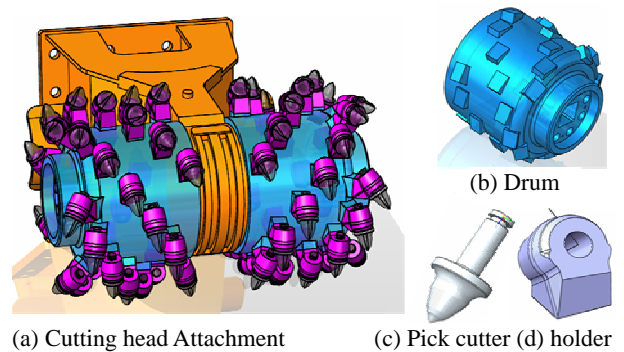


Fig. 2 Parts of cutting head attachment

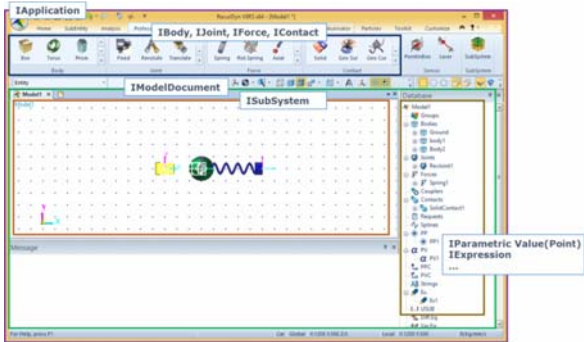
따라서 본 연구의 목적은 커팅헤드 어태치먼트의 드럼 형상 모델링과 각각의 픽들을 드럼에 배열하는 설계과정을 설계변수 변화에 따라 자동적으로 수행할 수 있도록 하여 설계자의 편의를 돕고, ProcessNet을 통해 개발한 자동화 설계 프로그램으로 최적 설계를 수행할 수 있는 설계 자동화 기술을 개발하는 것이다.

2. 설계 자동화

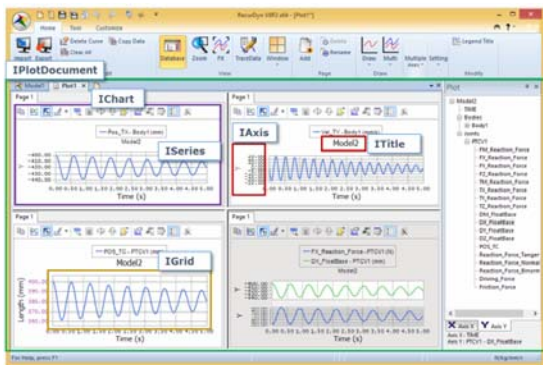
2.1 RecurDyn/ProcessNet

RecurDyn/ProcessNet은 RecurDyn을 사용하는 사용자들에게 모델링 과정을 자동화 시켜주고 그 기능을 확장시키기 위해 만들어진 도구이다. RecurDyn/ProcessNet은 VSTA(Visual Studio Tools for Applications)에 통합되며 Microsoft의 .NET framework를 기반으로 라이브러리를 사용할 수 있다. 또한, RecurDyn/ProcessNet은 C#과 Visual Basic.Net으로 사용 가능하지만 대부분의 예제 코드가 C#으로 만들어져 있어 C#이 사용하기에 더 용이하다.

RecurDyn/ProcessNet에는 많은 인터페이스가 있



(a) Interface 1



(b) Interface 2

Fig. 3 RecurDyn/ProcessNet Interface

는데, Fig. 3은 RecurDyn/ProcessNet의 주요 인터페이스에 대한 그림이다. Fig. 3(a)와 같이 IApplication은 전체 RecurDyn 기능을 나타낸다. IModelDocument는 하나의 Model document를 나타내며, ISubsystem은 Model document안의 Main을 나타낸다. 그 외에도 Fig. 3(b)와 같이 IPlotDocument나 IChart를 통해 해석과정에서 검토하고자 하는 그래프의 변수설정이나 비교하고자 하는 그래프의 설정을 RecurDyn / ProcessNet에서 결정하여 해석결과를 확인할 수 있다. 이는 실제 RecurDyn 상에서 작업하는 모델링 과정을 자동화 하기 위함으로 ISubsystem modeldocument 등의 클래스에서 메서드(method)를 사용할 수 있다. 이와 같은 기능을 숙지하고 각 설계 과정에 맞는 인터페이스 안에서 그 기능을 활용하게 되면, C#을 통해 다양한 설계 알고리즘의 자동화를 이뤄낼 수 있다.

2.2 굴삭기 모델

커팅헤드 어태치먼트 픽 배열설계 자동화에는 Fig. 4와 같은 굴삭기의 다물체 동역학 모델이 사용되었다. 픽 배열 설계의 최종적인 목표는 배열 방법에 따른 작업성능 변화를 파악하고 최적의 설계를 도출해내는 것으로 커팅헤드 어태치먼트 모

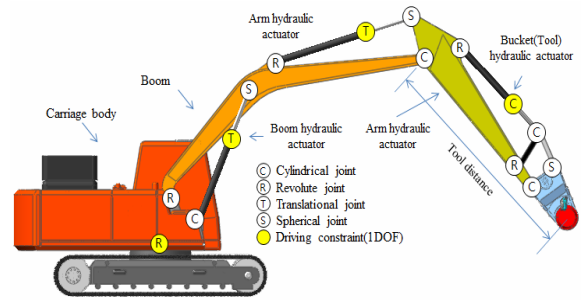


Fig. 4 Topology map of the excavator MBD model

델이 실제 굴삭기에 장착되었을 때의 궤적이나 전체 시스템에 주는 하중 등의 영향을 분석하기 위해서는 이와 같은 굴삭기 모델이 필요하다.

굴삭기 모델은 캐리지(carriage), 붐(boom), 암(arm) 그리고 붐, 암, 어태치먼트를 움직이기 위한 실린더(cylinder)와 실린더 튜브(cylinder tube) 등 총 12개의 물체로 구성되어 있다. 물체 사이의 구속 조건은 Fig. 4와 같이 회전, 병진, 구면, 및 원통조인트와 구동을 위한 구동구속조건 등을 이용하였다. 전체 시스템의 자유도는 굴삭기가 회전하는 자유도, 붐, 암, 어태치먼트에 장착된 액추에이터(actuator)의 자유도, 그리고 어태치먼트가 구동되는 자유도가 있으며 총 5자유도 시스템으로 모든 자유도에 구동 구속을 부여하여 0자유도 시스템으로 구성하였다.

커팅헤드 어태치먼트를 굴삭기 모델에 부착하여 사용할 경우 붐과 암 액추에이터의 병진 조건을 달리할 수 있으며, 배열 설계 자동화를 통해 도출된 최적의 설계인자를 적용한 어태치먼트 성능을 확인할 수 있다.

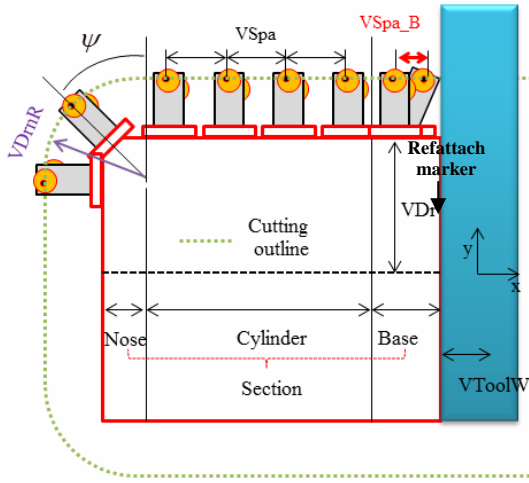
성능 확인은 액추에이터에 작용하는 반력, 그리고 어태치먼트의 드럼에 작용하는 반모멘트를 구하여 동하중응답을 측정하는 방법으로 설계 인자의 타당성을 검증할 수 있다.

2.3 순서도

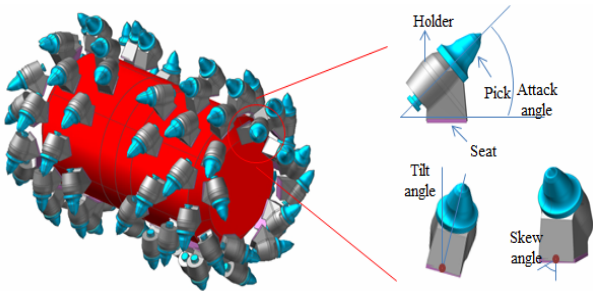
2.3.1설계변수

ProcessNet으로 픽 배열 설계를 자동화하기 위해 순서도로 배열설계과정을 구상하는 것이 필요하다. 배열설계과정은 커팅헤드 어태치먼트의 드럼을 구성하도록 하는 ‘Drum set’과 픽을 배열하기 전 준비 과정인 ‘Pick load’, 그리고 최종적으로 픽을 배열하는 ‘Pick arrangement’의 세가지 과정으로 구성되어있다.

픽 배열 방법은 Fig. 5(a)에 나타난 것과 같이 베이스(base), 실린더(cylinder), 노즈(nose) 세 구간으



(a) Pick arrangement method



(b) Angles of the pick cutter

Fig. 5 Design variables of pick arrangement

로 나누어 설계한다. 픽의 배열은 기본적으로 절삭면(cutting outline)을 기준으로 배열되며 초기 픽의 높이와 드럼의 반경 값이 반영된다. VSpa는 픽과 픽의 절삭 간격(cutting space), VSpa_B는 베이스 구간에 있는 픽의 절삭 간격을 의미한다. VToolW는 드럼이 장착되는 Tool의 중심부의 폭을 의미한다. VDr은 드럼의 반경, VDrR은 노즈구간의 곡률 반경, VNang 은 노즈구간 픽의 각도, VNAPN은 노즈구간의 각 열당 픽의 개수를 나타낸다.

베이스구간은 Tool(드럼과 굴삭기가 연결되는 부분의 파트)의 드럼이 어태치먼트 Body와 연결되는 부분으로 픽이 배열될 수 없으므로 Fig. 5(b)에 나타난 Tilt 와 Skew angle을 주어 작용면을 확장한다. 실린더 구간은 어태치먼트 특성상 실제 절삭이 가장 많이 일어나는 방향으로 배열되는 것이 적절하다.

노즈 구간은 굴삭기의 운동에 의해 절삭 이후 작업 면을 이탈할 경우 암석 사이에 끼이는 현상을 없애기 위해 존재하며, Tilt angle은 최대 90도까지 적용된다. VNCol, VNAPB는 드럼을 기준으로 회전시켜 배열할 때 열의 수와 베이스 픽의 수를

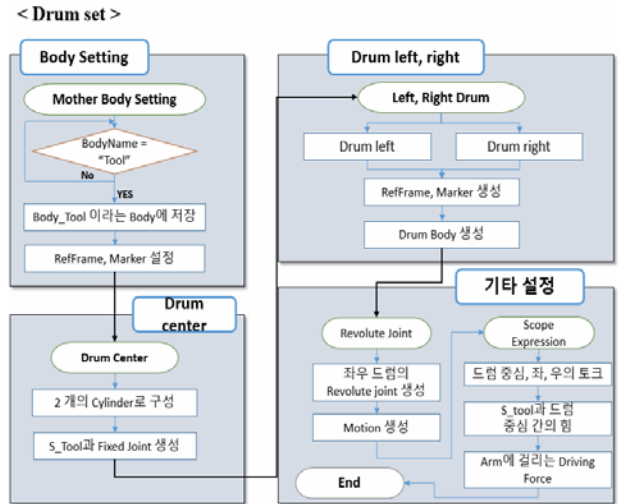


Fig. 6 Drum set flow chart

의미하며, VTang은 드럼 축에 의한 회전각을 나타낸다.

Tool의 Reference frame은 Fig. 5(a)에 나타난 RefAttach marker로, 굴삭기 모델의 매개변수 값(parametric value)을 가져오는 과정을 통해 가져온 값이며 커팅헤드가 부착되는 부분의 좌표다. 이후 드럼의 생성과 픽 배열 시 기준이 되는 좌표로 사용된다.

2.3.2 Drum set

Fig. 6은 드럼 설정에 관련된 순서도인데, 먼저 드럼을 구성하기 위해 RecurDyn 내에서 설정되어 있는 모델의 매개변수 값을 가져온다. 가져오는 값은 드럼을 구성하기 위해 필요한 설계변수의 값을 매개변수 값과 동일한 이름의 변수에 할당하여 저장한다. 커팅헤드 어태치먼트는 굴삭기와 연결되어 있는 부분인 Tool Body에 부착되어 절삭 작업을 수행하게 된다. Body_Tool이라는 변수를 형성하여 Tool이라 명명된 Body를 저장하고, Tool 형성 기준이 되는 Reference frame과 Marker를 설정하여 Tool 모델링 과정을 완성한다.

중심 드럼(Drum center)은 픽이 배열되는 좌우 드럼을 연결해 주는 Body 요소로 2개의 실린더로 구성되며 앞서 설정한 Tool과 고정형 조인트(fixed joint)의 관계로 구속된다. 드럼 중심이 형성되면 앞서 가져온 드럼과 관계된 매개변수 값을 바탕으로 좌우 드럼의 Reference frame과 Marker, 그리고 Euler angle을 설정하여 전체 드럼 Body를 설정했다. 형성된 좌우 드럼을 드럼 중심과 회전조인트로 구속시키고 변수 DrumRPM과 관계된 Expression을 통해 Motion을 입력하여 픽 배열 후 드럼이 설정

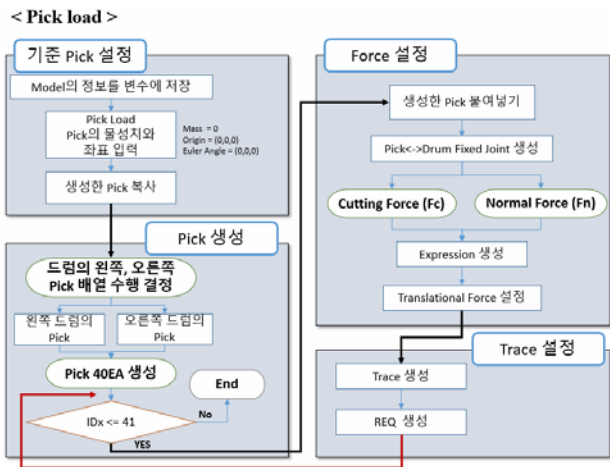


Fig. 7 Pick load flow chart

한 RPM에 따라 구동되도록 설정했다. 마지막으로 드럼 구동 시 드럼 중심과 좌우 드럼에 가해지는 Torque, Tool과 드럼 중심 간의 힘, 압에 걸리는 Driving force를 Scope Expression을 통해 입력하여 커팅헤드 어태치먼트가 구동될 때의 응답을 Scope를 통해 확인할 수 있도록 했다.

2.3.3 Pick Load

Fig. 7의 'Pick load' 과정도 'Drum set' 과정과 같이 RecurDyn 내에서 설정되어 있는 모델의 매개 변수 값을 가져온다. 각각의 과정들은 RecurDyn /ProcessNet에서 작성 시 Public void의 형태로 독립적으로 작성되기 때문에 각각의 과정마다 모델의 변수를 불러오는 과정이 필요하다.

다음으로는 픽을 Load하는 과정으로, 픽의 형상을 미리 설계된 파일로부터 RecurDyn으로 Import한다. 여기서 Import 되는 파일은 "Pick.x_t"이라는 파일로 커팅헤드 어태치먼트 설계에 사용되는 픽의 지오메트리(Geometry) 정보를 담고있는 Parasolid 형식의 파일이다. 형상 파일을 직접 입력하여 다루는 이유는 픽 배열 시 배열 형태와 간섭 등을 파악하기 위함이다.

Load 된 픽은 나중에 생성될 픽들의 기준이 되는 픽으로, 우선적으로 Fig. 6과 같이 질량을 0, Origin 좌표를 {0,0,0}, Euler angle은 (0, 0, 0)으로 설정한다. 여기서 질량을 0로 설정하는 이유는 픽을 드럼 위에 배치할 때는 설정한 설계변수에 따라 배열되는 픽의 개수가 달라지게 되는데 이 때 초기에 배열한 픽의 개수보다 배열되는 픽의 개수가 적어지게 된다. 그러면 배열되지 않는 픽이 생기게 되어 전체 시스템에 영향을 주게 되므로 'Pick load' 과정에서 질량을 0으로 설정하고 'Pick arrangement' 과정에서 배열되는 픽에 한하여 선택적으로 질량을 부여한다. 매번 형상을 입력하여 재

생성하는 과정은 모델링 시간을 상당히 차지하므로 위와 같은 과정을 통해 시간을 단축할 수 있다.

이렇게 픽이 생성되면 생성된 픽은 Load Pick이라는 변수 이름으로 저장되며 이 Body는 복사된다. 좌우 드럼에 픽이 배분되는 것은 반복(For) 구문을 통해서 이루어지며 복사된 픽은 다시 반복 구문을 통해 RecurDyn/ProcessNet상에서 좌우 드럼에 각각 40개의 픽을 배열하는데 사용된다. 40개를 선정한 이유는 일반적으로 커팅헤드에 사용되는 픽 수가 50~70개 사이이기 때문이며 배열에 따라 그 수가 달라질 수 있다. 따라서 한 쪽 드럼에 배열되는 픽의 수를 40개로 미리 선정하고 선택적으로 사용되도록 하였다. 추후 값만 변경한다면 확장하여 사용 가능하다.

반복 구문 안에서 하나의 픽은 픽의 Seat 부분 (픽이 드럼과 접합되는 받침 부분)의 Center marker와 픽의 끝부분에 해당하는 Pick end marker를 생성한다. 또한 Center marker와 Pick end marker를 생성하는 과정에서 만들었던 Reference frame을 기준으로 드럼과 픽 간에 고정형 조인트를 생성한다. 그리고 커팅헤드 어태치먼트가 구동되어 절삭을 수행할 때 작용하는 절삭력과 수직력(Normal force)를 적용한다. 이 때, 적용되는 절삭력과 수직력은 Expression을 통해 커팅헤드가 절삭을 수행하고 있는 픽에 대해서만 적용되도록 설정하였다.

앞서 설명한 질량을 선택적으로 부가하기 위해 질량을 0으로 설정하는 이유와 마찬가지로, 픽에 작용하는 절삭력과 수직력 또한 ForceActive 설정을 해제시켜 'Pick load' 과정에서 생성된 픽들에 가해지는 힘을 비활성화한다. 이 때의 절삭력과 수직력은 이론식으로부터 유도된 힘을 적용하거나 선형절삭시험을 이용한 작용력을 픽의 간격과 절삭 깊이에 대한 힘^(2,3)을 데이터로 적용할 수 있으며 다양한 작업환경 조건에 따라 픽에 가해지는 작용력 변경이 용이하도록 하였다. 따라서 실제 어태치먼트가 구동될 때의 절삭 성능 분석이 가능하다.

2.3.4 Pick Arrangement

Fig. 8은 픽 배열과 관련된 순서도를 나타낸 것이다. 픽의 개수를 결정하고 TestBody라는 변수를 생성하여 For구문 안에서 초기 기준이 되는 픽을 'Pick load' 과정의 초기 픽 설정과 같이 정의한다. 픽 배열은 배열구간에 따라 설계변수인 배열각, 배열의 간격 등이 달라지므로 설계변수인 베이스, 실린더 그리고 노즈구간의 픽의 개수에 따라 구간별로 픽의 정의가 달라지게 된다. 베이스 구간에

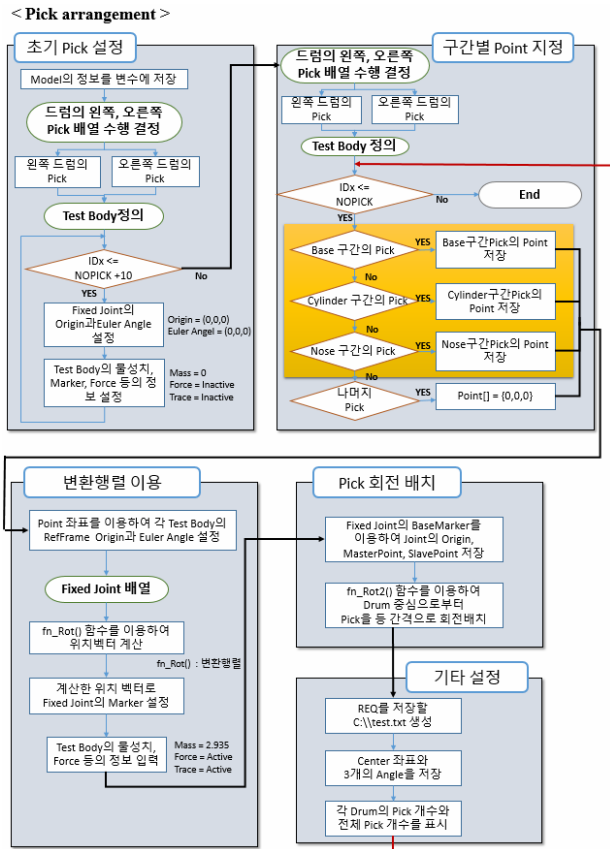


Fig. 8 Flow chart for pick arrangement

서는 베이스 간격을 바탕으로 배열하며 노즈 구간은 변수 VDrumR을 기준으로 절삭면의 간격이 일정하도록 등 간격으로 배열한다.

기본값으로 설정된 TestBody는 픽 배열이 이루어지게 되는 각각의 픽에 대한 정의가 반복 구문 안에서 이루어지게 된다. TestBody에 대한 반복 구문은 초기에 설계변수로 인해 결정된 픽의 개수만큼 반복이 끝나게 되면 전체 픽 배열이 자동으로 끝나게 된다. 반복 구문 안에서 이루지는 하나의 픽에 대한 정의를 순차적으로 아래에 나타내었다.

(1) IF구문을 통해 픽이 베이스, 실린더, 노즈 구간 중 어느 구간의 픽인지 판단한다. 판단된 IF구문 안에서 각각의 구간에 맞게 픽 배열 기준이 되는 Reference frame의 Origin 좌표가 필요하므로, 좌표가 저장될 Point라는 변수를 생성한다. 또한 각 구간 별로 Tilt angle, Skew angle, Attack angle에 맞게 Reference frame이 회전 설정되도록 RotTilt, RotSkew, RotAttack의 변수 안에 회전되는 각도값을 저장한다.

(2) 구간 별 Point와 회전각도가 설정되면 Point 좌표값을 이용하여 픽 Body의 정보가 저장된 TestBody의 Reference frame, Origin 그리고 Euler

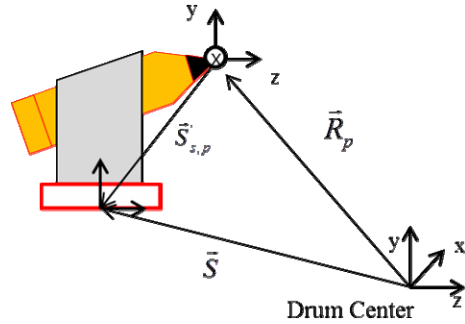


Fig. 9 Position vectors of the pick

Angle을 그에 맞게 설정한다.

(3) Fig. 9와 같이 드럼 센터를 기준으로 픽의 끝점 Point에서 위치벡터를 구한다.⁽⁸⁾ 픽의 Attack, Skew, Tilt angle인 ϕ, θ, ψ 를 이용하여 변환 행렬을 구하기 위해 변환 행렬을 구하는 함수 fn_Rot{}를 작성한다.

함수 fn_Rot{}는 좌표변환 행렬에 대한 ZYX변환을 수행하는 함수이며, 코드는 식 (1)을 기반으로 작성하였다. 식 (1)를 계산하여 식 (2)를 대입하게 되면 픽의 Seat부의 위치 벡터가 구해진다.

$$A_{xyz} = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{S} = \vec{R}_p + A_{xyz} \times \vec{S}_{s,p} \quad (2)$$

(4) 'Pick load' 과정에서 생성한 픽과 드럼 간의 고정형 조인트의 Base marker와 Action marker를 위치벡터를 이용해 드럼 위로 재설정한다. 드럼 위로 등 간격으로 배치되게 하기 위해 함수 fn_Rot2{}을 작성한다. 이 함수는 하나의 축에 대한 회전을 수행하는 기능을 한다. Fn_Rot2{}를 통해 픽의 Seat부분 위치를 드럼의 회전 방향으로 설계점을 VTang을 이용하여 등 간격 배치한다.

'Pick arrangement' 과정은 Pre-simulation function이 적용된다. 즉 설계변수 변경에 따라 픽이 배열되는 형상이 달라지기 때문에 해석을 시작하면 자동적으로 'Pick arrangement' 과정을 진행한 후 해석을 진행하도록 설정이 되어 있다. 그러므로 설계변수가 변화할 때마다 'Pick load' 과정에서 드럼의 중심에 위치했던 픽이 드럼의 위에 설정한 설계변수의 값에 맞게 배열되기 위해 이동시키는 과정이 필요한데, 'Pick load' 과정에서 만든 픽들을 모델의 위치를 옮기거나 회전할 수 있게 하는 Object control 기능을 이용하여 픽을 드럼 위에 배열하게

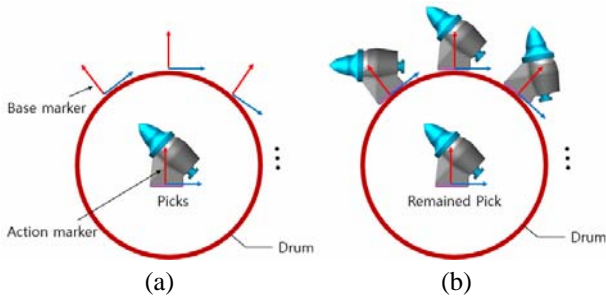


Fig. 10 Movement of picks using base marker

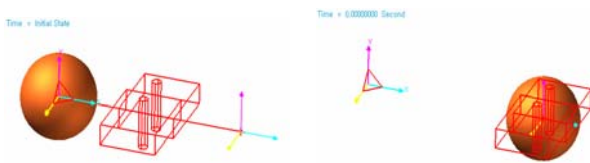


Fig. 11 Base marker setting for constraint

되면 각각의 픽이 설계된 위치로 자리를 찾아 배열되는데 많은 시간이 걸린다.

따라서 해석 시간 절감을 위해 Fig. 10(a)와 같이 드럼 위에 픽이 위치할 지점에 Marker를 생성하는 코드를 작성하고 드럼 중심에 위치한 픽의 고정형 조인트의 Base marker를 드럼 위에 미리 생성한 Marker로 지정하면, 해석이 진행되면서 드럼의 중심에 위치한 픽의 Action marker가 Base marker로 이동하여 Fig. 10(b)와 같이 드럼 위에 자동적으로 배열되게 하였다. 이는 고정형 조인트를 활용하여 초기해석시간(ex: 1e-8 sec)에서 구속식을 만족하는 위치를 계산하는 방식을 활용하였으며 원리는 Fig. 11과 같다. RecurDyn 에서 고정형 조인트의 Base marker 위치를 이동을 원하는 점으로 지정하면 초기해석시간(Fig. 11의 우측 그림의 시간인 Time=0.0 second)에 Base marker와의 구속식 만족을 위해 이동하게 된다.

2.4 수행 결과

Fig. 12에 각 과정에 대한 실행 결과를 나타내었다. Fig. 12(a)에서 드럼이 생성되고 Fig. 12(b)에서 드럼의 중심을 기준으로 배열될 픽들이 생성된다. Fig. 12(c)는 구간별 픽의 자세가 위치 벡터에 따라 제어되며 마지막으로 시뮬레이션을 실행하면 Fig. 12(d)와 같이 픽이 등 간격으로 배열된다.

Fig. 12(c)과정인 'Pick arrangement'과정에서 드럼의 상부 쪽에 1열로 픽들이 배열되어 있는 것을 확인할 수 있지만, 픽의 고정형 조인트와 관련된 Base marker들은 Fig. 12(c) 과정에서 이미 드럼 위에 회전 배치되어있다. 시뮬레이션을 시작하면 1

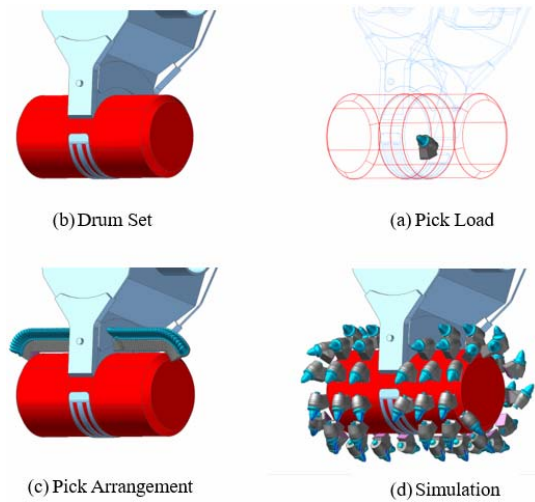


Fig. 12 Results of design automation using ProcessNet

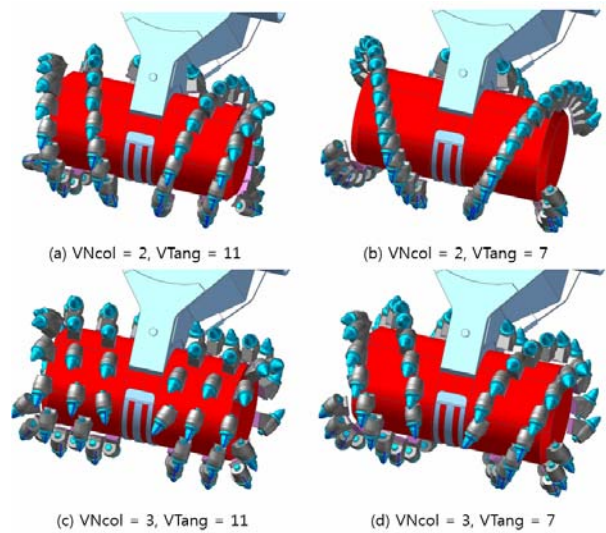


Fig. 13 Attachment models according to design variables

열로 배열된 픽의 Action marker가 드럼 위에 회전 배치된 Base marker로 이동하면서 Fig. 12(d)와 같이 픽이 배열되는 것이다.

커팅헤드 어태치먼트 픽 배열 설계에 사용되는 여러 설계 인자 중 드럼 축에 대한 회전각을 나타내는 설계변수 VTang과 드럼에 배열되는 열의 개수를 나타내는 설계변수인 VNCol의 변화에 따른 자동화 프로그램 수행 결과를 Fig. 13 나타내었다. 그 결과 Fig. 13의 (a)와 (c) 또는 (b)와 (d)를 비교하면 드럼 위에 픽이 배열되는 열의 개수에 따라 배열의 형태가 변하는 것을 알 수 있으며, Fig. 13의 (a)와(b) 또는 (c)와 (d)의 배열을 비교해보면 VTang의 변화에 따라 배열의 형태가 변하는 것을 알 수 있다. 이 때 픽 배열 시 설정한 열의 개수와 회전각에 따라 Fig. 13의 (b)처럼 픽들이 서로

간섭이 나타날 수 있다. 이러한 문제점은 회전 배치각을 나타내는 회전각을 간섭되지 않는 각도 이상의 값으로 설정하여야 한다.

3. 결 론

본 연구는 커팅헤드 어태치먼트의 픽 배열 설계에 대한 기술적인 부분과 픽 배열의 방법론을 제시하였으며 설계 인자에 대한 영향도 평가를 위해 픽의 배열 설계 자동화를 수행하였다. ProcessNet을 이용하여 변환행렬을 구하고 이를 이용하여 픽의 위치벡터를 구하여 픽 배열을 자동화하였으며, 이를 활용하여 픽 배열 설계시간을 절감하고 설계변수 변화에 따른 배열결과를 확인하였다. 연구 내용을 아래와 같다.

(1) 커팅헤드 어태치먼트의 설계 시 고려하여야 할 부분과 영역별 픽의 배열 및 설계 방법을 제시하였다.

(2) RecurDyn/ProcessNet을 통해 커팅헤드 어태치먼트에 영향을 미치는 설계인자값의 변경을 자동화하여 설계 인자 변경 시 발생하는 설계자의 오류를 줄임과 함께 설계소요시간을 절감하였다.

(3) 순서도 작성을 통해 설계 알고리즘을 정리하였으며, 픽 배열 해석 시간 단축을 위해 Marker의 구속식 만족 조건을 이용한 효율적인 모델링 기법을 제시하였다.

(4) 실제 굴삭기 MBD 모델에서 픽 배열을 할 수 있도록 진행하여 향후 연구 방향에 따라 다양한 장치에 적용이 가능하며, 실제 가상 절삭 시뮬레이션을 수행할 수 있는 커팅헤드 어태치먼트 전용 설계 기술 플랫폼을 개발하였다.

후 기

이 연구는 산업자원부와 한국생산기술연구원의

지원에 의하여 연구되었으며 지원기관에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Goktan, R. and Gunes, N., 2005, "A Semi-Empirical Approach to Cutting Force Prediction for Point-Attack Picks," *JS Afr Inst Min Metall*, Vol. 105, pp. 257~263.
- (2) Choi, S.-W., Chang, S.-H., Park, Y.-T. and Lee, G.-P., 2014, "Performance Estimation of Conical Picks with Slim Design by the Linear Cutting Test (I): Depending on Attack Angle Variation," *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 6, p. 573.
- (3) Choi, S.-W., Chang, S.-H., Park, Y.-T. and Lee, G.-P., 2014, "Performance Estimation of Conical Picks with Slim Design by the Linear Cutting Test (II): Depending on Skew Angle Variation," *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 6, p. 585.
- (4) Hekimoglu, O. Z. and Fowell, R. J., 1991, "Theoretical and Practical Aspects of Circumferential Pick Spacing on Boom Tunneling Machine Cutting Heads," *Mining Science and Technology*, 13, pp. 257~270
- (5) Ergin, H. and Acaroglu, O., 2007, "The Effect of Machine Design Parameters on the Stability of a Roadheader," *Tunneling and Underground Space Technology*, 22, pp. 80~89.
- (6) Du, C.-L., LIU S.-Y., CUI, X.-X. and LI, T.-J., 2008, "Study on Pick Arrangement of Shearer Drum Based on Load Fluctuation," *J China Univ Mining & Technol*, Vol. 18, No. 2, pp. 305~310.
- (7) FunctionBay, 2010, "RecurDyn ProcessNet Help," <http://www.functionbay.co.kr/documentation/onlinehelp/default.htm#!Documents/processnet3.htm>.
- (8) Pio, R. L., 1966, "Euler Angle Transformations," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, Vol. 11, No. 4, pp. 707~715.