

드릴가공 최적화에 대한 연구 (2): 구멍가공시 최적의 드릴가공 순서 결정

유희진

동아대학교 산업공학과

A Study on the Optimization of Drilling Operations (II): Optimum Drilling Sequence Selection for Producing a Hole

Hoi Jin Rou

In this paper, the optimum drilling operation sequence which results into the minimum overall machining time required to produce a (multi-diameter) hole is identified. The operation sequence is defined as the set of ordered operations used for producing a (multi-diameter) hole. The overall machining time is derived by summing the minimum machining times of each operation assigned to a sequence. The operations represent the drilling actions of certain sizes to produce the related holes. The minimum machining time of each operation is obtained by solving the optimization problem. Finally, this paper will identify the effects of machining constraints on the overall machining times and their relationships to sequence selection.

1. 서론

본 연구의 목적은 작업재료에 구멍을 제작하는 데 대한 총 기계가공시간을 최소화시키는 드릴가공 순서를 정하는 것이다. 구멍을 만드는 방법은 주형을 포함하여, 펀칭(punching), 절삭(cutting), ECM, EDM, laser, 초음파 기계가공(supersonic machining) 등 매우 다양하다. 얇은 금속판에 구멍을 제작하는 데 있어서 펀칭의 폭넓은 사용을 제외하면, 드릴가공이 구멍제작 과정에서 가장 일반적으로 사용되는 방법이다. 더구나 한 분석(Tonshoff et al., 1994)에 의하면 machining center에서 총 가공시간 중 30%~50%를 드릴가공 작업이 차지하는 것을 보여준다. 따라서, 드릴가공은 자동화된 생산 시스템에서 작업시간을 최소화하기 위한 중요한 과정이다.

드릴가공에 있어서 가장 중요한 것 중의 하나는 다단계 지름을 갖는 구멍들을 효과적으로 제작하는 것이다. 다단계 지름을 갖는 구멍들의 가공시 step 드릴과 subland 드릴과 같이 특수한 모양의 다수의 지름을 갖는 드릴을 사용하는 것은 아마도 경제적이지 못할 것이다. 그 드릴들은 또한 너무 일찍 마모되거나, 깨지는 경향이 있다. 더구나 공구 holder의 용량이 사용공구 수를 제한하거나 특정 공구가 이용 불가능한 경우도 있다. 더욱 일반적으로, 하나의 지름을 갖는 드릴들을 순차적으로 사용하여 다단계 지름을 갖는 구멍을 제작할 수 있다. 더구나

다수의 다단계 지름을 갖는 구멍들을 제작할 때 각 구멍에 할당된 드릴가공 작업들의 순서를 전체적으로 최적화하여, 단일 지름을 갖는 다수 드릴들의 사용으로부터 이익을 극대화시킬 수 있다. 다단계 지름을 갖는 구멍의 드릴가공시 이러한 순서의 최적화 결정이 본 논문의 중점이다. 다단계 구멍제작시 드릴가공 순서는 종종 다음과 같은 기계가공 방식에 근거를 두곤 한다(Wysk, et al., 1978). "다단계 구멍을 가장 작은 지름으로부터 큰 지름으로 순차적으로 가공을 한다." 반면, Wysk(1978)는 가장 작은 지름을 우선 기준으로 한 순서보다 가장 큰 지름을 우선 기준으로 한 작업순서가 총 기계가공시간이 더 짧은 결과를 보여주었다. 이 결론은 세 개의 지름을 갖는 다단계 구멍을 제작하는데 있어서 두 가지 순서의 총 기계가공시간을 비교하여 얻어진 것이다. 그러나, Wysk의 접근방법은 다음과 같이 단순화된 가정을 필요로 한다.

1. 동력의 한계값이 주어지지 않는다.
2. 토크와 추력에 대한 식에 있어서 pilot hole의 효과를 고려하지 않는다.

Pilot hole은 바깥쪽의 구멍을 제작하기 위한 안내역할을 하는 안쪽구멍을 의미한다. Wysk는 드릴링시 속도나 이송비율을 핸드북에서 구했다. 주목할 점은 핸드북에서 권장된 드릴의 절삭속도나 이송비율이 종종 사용기계의 낮은 성능에 기인

한 추력이나 동력의 한계에 의해 제약은 받는다는 것이다. 이 경우 주어진 환경하에서 드릴의 최적한 절삭가공 변수들을 결정하는 것은 사용기계의 효율을 최대화시키기 위해 매우 중요하다. 구멍가공시 드릴가공의 순서결정에 있어서 동력, 추력과 같은 구속조건의 영향을 연구하기 위해서 순서를 구성하는 각각의 드릴가공 작업에 대해 가공시간을 최소화시키는 최적화 문제가 수학적으로 공식화된다. 또한 기하학적 프로그래밍 (geometric programming)이 문제를 해결하는 데 사용된다. 순서를 구성하는 드릴작업들의 최소 기계가공 시간들의 합은 그 순서에 대한 총 기계가공시간을 의미한다. 주목할 점은 최대 허용 추력 (thrust)이나 동력 (power)은 사용기계의 구조적 강도나 모터의 용량에 따라 정해지며 제작회사나 기계의 용량에 따라 변한다는 것이다. 가령 일반적인 동력의 범위는 1hp 에서 50hp 이며 추력의 범위는 4500N에서 135000N이다(SME, 1983). 따라서 본 논문은 추력이나 동력의 다양한 한계값들에 대하여 다단계 지름을 갖는 구멍이 제작되는 동안 사용된 후보 순서들의 총 기계가공시간 (overall machining time)을 비교하여 상관관계를 규명하고자 한다.

2. 구멍제작에 대한 경험적 드릴가공 방법

기본적인 기계가공 방법에 대해서는, 참고문헌들마다 차이가 있다. 예를 들면, Repp(1982)은 구멍의 지름이 일정한 크기(즉, 12.5mm) 보다 크다면 큰 구멍을 드릴가공하기 전에 pilot hole을 드릴 가공할길 권장한다. 반면에 Lynch(1993)는 비록 구멍의 지름이 12.5mm보다 크더라도 pilot hole의 드릴가공을 권장하지 않는다. 일반적으로 pilot hole은 직경 12.5mm이하의 구멍으로 직경 12.5mm 이상의 구멍을 뚫기 위해 사용되는 안내역할을 하는 안쪽구멍이다. 또한 다단계 구멍가공시 앞서 가공된 구멍이 현재 가공될 구멍의 안쪽에 존재하면 직경의 크기에 관계없이 pilot hole과 같은 역할을 한다. 드릴가공이 가능한 지름에 대한 깊이의 비(세장비)도 참고문헌들에 따라 3과 8사이의 범위에서 폭넓게 변화한다(Tonshoff et al., 1994; Wysk et al., 1978; Bralla, 1986; SME, 1983). 다단계 지름을 갖는 구멍제작의 경우에 있어서도 기계가공 방법은 여러 가지가 있다. 작은 지름부터 큰 지름으로 순서를 정하거나, 큰 지름부터 작은 지름으로 정하는 순서, 또는 지름들의 임의의 조합 등이 있을 수 있다. 가령 'n' 개의 지름을 갖는 구멍에 대해 가능한 드릴가공 순서의 수는 기계가공시 제약의 가능성을 제외하면 'n!' 이다. 예를 들어 3개의 서로 다른 지름으로 구성된 다단계 지름을 갖는 구멍이 <그림 1>에 보여진다. 각 지름에 대한 구멍을 지름이 증가하는 순서대로 각각 H₁, H₂ 그리고 H₃로 표시한다. 실제 기계가공상 제약조건을 무시한다면, 다단계 지름을 갖는 구멍을 구성하는 세 구멍들은 6가지의 서로 다른 후보 순서로 결합될 수 있다. 순서를 구성하는 각 구멍에 대하여, 적당한 드릴가공

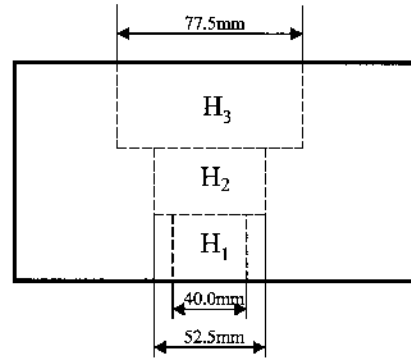


그림 1. 다단계 지름을 갖는 구멍의 예.

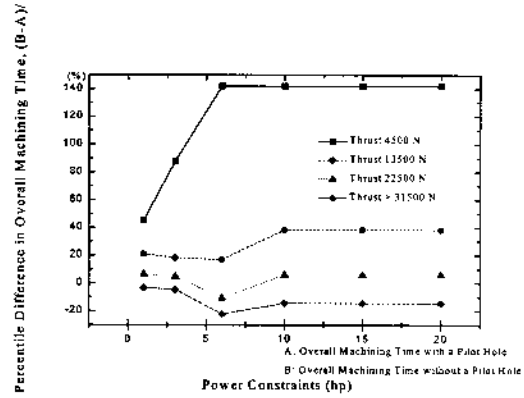
작업이 구멍을 제작하기 위하여 선정된다. 예를 들면, 두 개의 순서들에서는 H₁이 가공되는 첫 번째 구멍이다. 따라서, H₁의 제작을 위해 적당한 드릴가공 작업이 선정된다. 이 경우에는 이전에 뚫어진 구멍은 없다. 만약 pilot hole의 드릴가공을 고려하지 않는다면, 37.5mm 드릴(H₁의 지름보다 약간 작은)이 그 구멍을 제작하기 위해 사용될 수 있다 (주목할 점은 드릴가공이 드릴의 지름이 가리키는 것보다 실제로 더 큰 구멍을 제작하는 경향이 있으므로 구멍의 크기보다 약간 작은 드릴 크기가 선택되었다.). 현재의 구멍가공 순서가 'H₁ - H₂ - H₃' 라면, 구멍 H₁의 드릴가공 작업은 구멍 H₂와 H₃를 제작하기 위하여 50mm와 75mm의 직경을 갖는 다른 2개의 드릴가공 작업들에 의해 뒤어진다. 이 경우 앞서 가공된 구멍이 H₂와 H₃의 안쪽에 존재하는 pilot hole과 같은 역할을 한다. 이와 대조적으로 만약, pilot hole의 드릴가공이 요구된다면 12.5mm 드릴이 구멍 H₁에 대한 pilot hole을 제작하기 위해 선택될 것이다. 그 후에 37.5mm 드릴이 구멍 H₁을 제작하기 위해 사용된다. 주목할 점은 H₁에 대하여 제작된 구멍은 H₂와 H₃에 대한 pilot hole로서도 사용된다는 점이다. 따라서 구멍 H₂와 H₃를 제작하기 위해 추가적인 pilot hole 가공없이 50mm와 75mm 직경의 두 가지 드릴가공 작업이 행해진다. 만약 다단계 지름을 갖는 구멍들이 여러 개 존재하고 각 구멍마다 여러 드릴 작업들이 행해진다면 구멍을 가공하는 데 필요한 총 작업시간은 '드릴 가공시간', '공구 교환시간', '공구 교환대에서의 교환시간' 들로 구성된다. 이 경우 'm'개의 구멍들이 존재하고 'n'개의 작업들이 각 구멍들마다 할당된다면 조합에 의한 전체작업들의 후보 순서들의 수는 (m · n)! 이다. 따라서 경우의 수의 폭중에 따른 문제를 피하기 위한 한 가지 방법으로서 각 구멍에 대해서 드릴링 순서가 정해진다면 남은 문제는 드릴작업 위치들이 방문지에 해당되는 선행 구속하의 외판원 문제 (precedence constrained TSP)가 된다. 그러므로 본 연구는 각 구멍에 대하여 드릴가공시간을 최소화하는 드릴링 순서를 정함으로써 여러 구멍에 대한 전체작업들의 순서를 최적화하는 데 이용될 수 있다. 모든 드릴가공 작업들이 끝나고, 남아 있는 부분은 reaming, boring, counter boring, counter sinking 등과 같은 2차적 작업들에 의해

제거된다. 이러한 2차적 작업들은 구멍의 크기, 표면 마무리, 허용오차와 같은 설계 요구조건에 따라 결정된다. 따라서 단계 지름을 갖는 구멍의 제작과정에 있어서 가장 중요한 문제는 최적한 드릴가공 작업순서의 결정이며 이것이 본 논문의 주제이기도 하다.

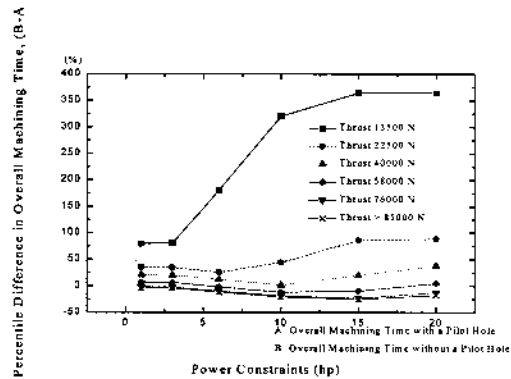
3. 구멍가공에 대한 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 구멍가공시 서로 다른 작업순서들 사이의 총 기계가공시간들이 최적화 문제로부터 구한 최소 기계가공 시간을 이용하여 다양한 추력과 동력의 한계값들에 대해 비교된다. 본 연구에서는 Part 1에서 유도한 최적화 문제와 동일한 작업 조건이 사용되었다. 고속도강 공구와 190 bhn의 회주철을 작업 재료로 사용하고 드릴지름에 대한 치끝에서 길이의 비 (t/D)를 표준드릴로 생각하여 0.18로 하였다. 또한 pilot hole의 효과를 반영하는 공구수명 방정식(Kaczmarek, 1976)이 사용되었다.

바닥이 공중에 열려 있는 구멍을 제작하기 위해 요구되는 총 기계가공시간에 대한 pilot hole의 영향을 확인하기 위해서 구멍의 지름이 27.5mm이고 깊이가 50mm인 예제를 선택하였다. Case A는 25mm의 구멍을 드릴가공하기 전에 12.5mm의 pilot hole을 드릴가공하며, 반면 Case B는 pilot hole의 드릴가공 없이 25mm의 구멍을 드릴가공하는 것을 나타낸다. 따라서 Case A에 대한 총 기계가공시간은 12.5mm의 pilot hole을 드릴가공하고, 25mm의 드릴로 그 구멍을 넓히는 동안의 최소 기계가공 시간들의 합으로 나타난다. 이 경우, 드릴교환에 따른 공구교환 시간이나 이동시간은 드릴가공시간만을 비교하기 위하여 고려하지 않았다. 반면에, Case B에 대한 총 기계가공시간은 25mm의 드릴로 하나의 드릴가공 작업을 하는 동안의 최소 기계가공 시간으로 나타난다. 두 경우 사이의 총 기계가공시간들은 다양한 동력과 추력의 한계값에 대하여 비교된다. <그림 2> (a)의 결과는 두 경우에 대한 총 기계가공시간의 차이를 백분율로 보여준다. 추력 한계가 낮을 때 Case B에 대한 총 기계가공시간은 Case A보다 142%나 더 길게 나타났다. 그러나 추력의 한계값이 증가함에 따라 Case B에 대한 총 기계가공시간은 Case A보다 더 급격하게 감소한다. 예를 들면, 추력 한계가 22500N일 때 Case B에 대한 총 기계가공시간은 Case A보다 10% 짧거나, 5% 더 긴 사이의 범위를 갖는다. 추력의 한계값이 31500N보다 클 때, Case B의 총 기계가공시간은 Case A에 비해 22%나 더 짧은 결과를 나타낸다. 따라서 두 경우의 총 기계가공 시간들은 추력 그리고 동력과 같은 기계가공 구속조건에 의존하는 것이 위의 결과들로부터 명확히 보여진다. 주목할 점은 각각의 추력한계에 있어서 두 경우 사이의 총 기계가공 시간의 차이가 어떤 동력 한계값 이상에서는 일정하게 유지된다는 것이다. 왜냐하면 각 경우의 절삭속도가 동력이 어떤 값 이상일 때는 일정하게 유지되고, 동일한 추력 한계하에서 이송비율이 추력에 의해 정해진다 면 그에 상응하는 기계가공시



(a) $\Phi 25$ mm 구멍.



(b) $\Phi 50$ mm 구멍.

그림 2. 총 기계가공시간의 비교.

간 또한 일정하게 유지되기 때문이다.

또 다른 예제로 12.5mm의 pilot hole의 드릴가공을 이용한 구멍뚫기(즉, Case A)와 pilot hole을 이용하지 않는 구멍뚫기(즉, Case B)에 사용되는 지름 52.5mm와 깊이가 50mm의 구멍이 있다. <그림 2> (b)의 결과는 추력 한계가 13500N일 때, Case B에 대한 총 기계가공시간은 Case A에 대한 총 기계가공시간보다 80%에서 360% 더 긴 사이의 범위에 있게 된다. 그러나, 추력 한계가 증가함에 따라 두 경우 사이의 총 기계가공시간은 반대로 변한다. 예를 들면, 추력 한계가 58000N 일 때, Case B에 대한 총 기계가공시간은 Case A보다 11% 짧거나, 7% 더 긴 사이의 범위에 있게 된다. 추력 한계가 76000N에 도달할 때 Case B에 대한 총 기계가공시간은 동력의 한계값에 무관하게 Case A보다 더 짧은 상태로 유지된다. 추력의 한계값이 85000N 이상이 되었을 때 Case B의 총 기계가공시간은 Case A에 비해서 4%에서 25% 더 짧은 사이의 범위에 있게 된다. 주목할 점은 이전의 25mm 구멍 드릴가공 예제에 비해서 구멍이 더 큰 경우 Case A보다 Case B의 총 기계가공시간이 더 짧아지기 위해서 추력의

한계값이 더 커야 한다는 점이다. 위의 분석으로부터, 다음의 결론을 이끌어 낼 수 있다. 추력의 한계값이 구멍의 크기에 비해 작을 때, Case B의 총 기계가공시간은 동력의 한계값에 무관하게 Case A보다 더 길게 나타난다. 그러나, 더 높은 동력의 한계값에서 Case A보다 Case B의 총 기계가공시간이 더 짧아지는 중간단계를 거쳐, 추력 한계가 증가함에 따라 Case B는 동력의 한계값에 무관하게 Case A보다 더 짧은 총 기계가공시간을 나타낸다.

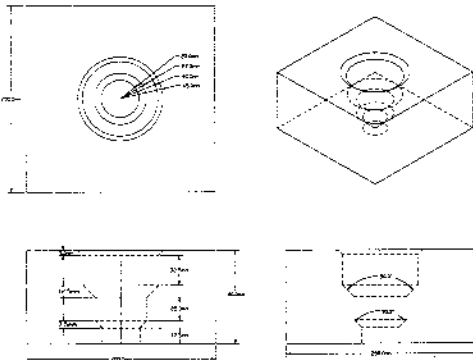


그림 3. 다단계 지름을 갖는 구멍의 제도.

마지막 예제로 <그림 3>와 같은 다단계 지름을 갖는 구멍을 고려한다. 이 예제에서 드릴가공 작업은 지름에 대한 깊이의 비(세장비)가 8까지 허용된다고 가정한다. 다단계 구멍의 각 지름에 대해 적당한 절삭공구를 선택하였다. 이 예제에서 pilot hole의 드릴가공 없이 75mm, 50mm 그리고 37.5mm의 지름을 갖는 드릴들로 행하여지는 드릴가공 작업순서들이 임의로 나열된다(Pilot hole의 드릴가공은 후에 고려하게 될 것이다). 후보 순서들의 총 기계가공시간들은 순서결정에 대한 경계조건의 영향을 나타내기 위해 다양한 동력과 추력의 한계값에 대하여 비교된다. 이 예제에서 6가지의 후보 작업순서들은 아래와 같다.

- 순서 A : 37.5mm - 50mm - 75mm
- 순서 A' : 37.5mm - 75mm - 50mm
- 순서 B : 75mm - 50mm - 37.5mm
- 순서 B' : 75mm - 37.5mm - 50mm
- 순서 C : 50mm - 37.5mm - 75mm
- 순서 C' : 50mm - 75mm - 37.5mm

예를 들어, 만약 순서 A가 다단계 지름을 갖는 구멍제작을 위해 선택된다면, 그에 상응하는 기계가공 부분은 <그림 4>에 보인 첫 번째 순서와 같이 37.5mm, 50mm 그리고 75mm 직경의 드릴로 행하여진 세 가지의 작업들에 의해 연속적으로 제거된다. 만약 순서 B가 선택된다면, <그림 4>에 보인 세 번째

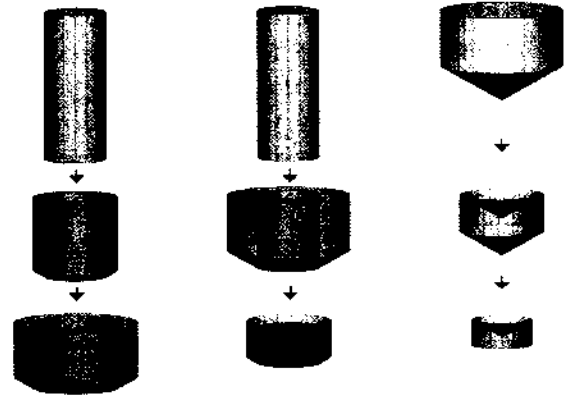
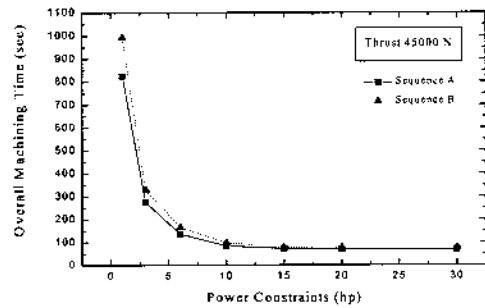
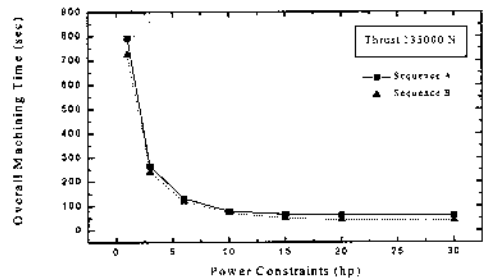


그림 4. 구멍 제작을 위한 드릴가공 순서의 예.

순서와 같이 75mm, 50mm 그리고 37.5mm 직경의 드릴가공 작업이 구멍의 제작에 연속적으로 행해진다. <그림 4>의 두 번째 순서는 순서 A'의 가공과정을 보여준다. 각 순서를 구성하는 작업들에 대하여 최소 기계가공 시간은 수학적 모델을 근거로 기하학적 프로그래밍을 이용하여 계산된다. 각 순서의 총 기계가공시간은 순서를 구성하는 작업들의 최소 기계가공시간들의 합으로 나타난다. 후보 순서들의 총 기계가공시간들은 다양한 동력과 추력 한계값들에 대해 비교된다. 그 결과는



(a) 추력 45000N.



(b) 추력 135000N.

그림 5. 동력의 한계값들에 대한 총 기계가공시간의 변화.

동력이나 추력의 한계값이 커짐에 따라 총 기계가공시간이 어떤 한계값에 수렴하는 것을 보여준다. 예를 들어, <그림 5> (a) 와 (b)에 보인 각각의 추력 한계에서 동력의 한계값이 낮을 때, 총 기계가공시간은 급격히 감소한다. 그러나 동력의 한계값이 증가함에 따라 총 기계가공시간은 천천히 감소하여, 마침내 어떤 값에 수렴한다. 또한 <그림 6> 에서와 같이 다른 모든 조건들을 같게 유지시켜줄 때 각 동력 한계하에서 추력에 대해서도 같은 진술이 적용된다. 그러나, 그것은 추력의 한계값의 증가가 동력의 한계값의 증가만큼 총 기계가공시간을 줄이지 못한다는 것을 보여준다.

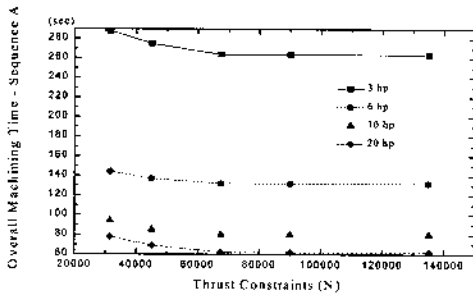
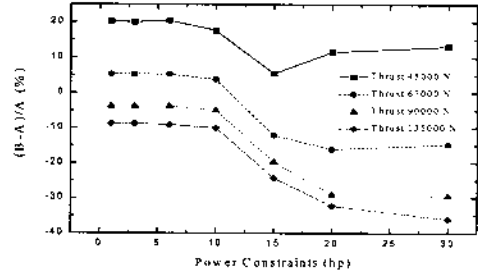


그림 6. 추력의 한계값들에 대한 총 기계가공시간의 변화.

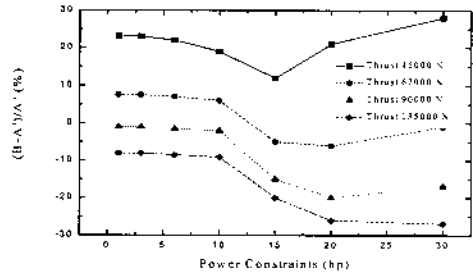
<그림 7> (a), (b), (c) 그리고 (d)에 보인 바와 같이 두 가지의 작업 순서들 사이의 총 기계가공시간이 여러 가지 동력과 추력의 한계값들에 대하여 비교된다. 예를 들면, <그림 7> (a)에서 추력의 한계값이 67000N일 때 동력의 한계값이 어떤 값 이하이면 순서 B에 대한 총 기계가공시간이 순서 A보다 더 길다. 그러나 동력의 한계값이 10hp 보다 클 때는 그 반대가 된다. 반면 추력의 한계값이 45000N인 경우에는 추력의 낮은 한계와 그에 따른 낮은 이송비율 때문에 동력의 한계값에 상관없이 순서 B의 기계가공 시간이 순서 A보다 시종 더 길게 유지된다. 바꾸어 말하면, 그것은 기계의 낮은 구조적 강도에 기인한 비능률적인 기계가공 작업으로 설명될 수 있다. 이 경우 순서 B는 순서 A에 비해 총 기계가공시간이 최고 20%나 더 길게 나타난다. 이와는 대조적으로 추력의 한계값이 67000N보다 더 클 때는 순서 B의 총 기계가공시간이 순서 A보다 시종일관 더 짧게 유지된다. 다시 말해서, 추력의 한계값이 이송비율을 증가시킬 수 있을 만큼 크기 때문에 그것은 효과적인 기계가공 작업으로 설명될 수 있다. 이 경우 순서 B의 총 기계가공시간은 순서 A보다 최고 36%나 더 짧은 결과를 가져온다. 유사한 결과가 <그림 7> (b)에도 나타난다.

<그림 7> (a), (b), (c) 그리고 (d)의 결과들은 동력의 한계값이 낮을 때 추력의 한계값이 증가함에 따라 순서 B의 총 기계가공시간이 순서 A보다 더 짧아지는 것을 보이고 있다. 대조적으로 추력 한계가 구멍의 크기에 비해 작을 때, 동력 한계값에 상관없이 순서 B는 순서 A나 A'보다 기계가공 시간이 더 길게

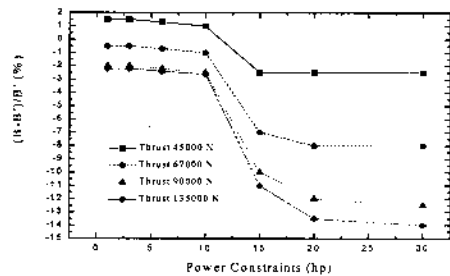
유지된다. 주목할 점은, 순서 C와 C'는 작업들이 서로 다른 배열에도 불구하고 동일한 부피를 제거하기 때문에 동일한 경계 조건에서 기계가공 시간들이 같다는 것이다. 결론적으로, 동력과 추력 모두의 한계값이 풀어야 할 구멍의 크기에 비해



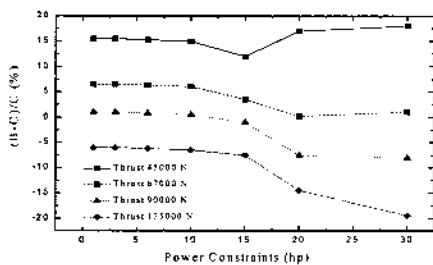
(a) A와 B간의 총 기계가공시간의 백분율 차이.



(b) A'와 B간의 총 기계가공시간의 백분율 차이.



(c) B와 B'간의 총 기계가공시간의 백분율 차이.



(d) B와 C간의 총 기계가공시간의 백분율 차이.

그림 7. 총 기계가공시간의 비교.

낮을 때 그 순서는 다음과 같이 기계가공 시간이 증가하는 순서로 배열된다.

$$A' - A - C(C) - B' - B$$

반면에 동력과 추력 모두의 한계값이 높을 때 그 순서는 다음과 같이 기계가공 시간이 증가하는 차례로 배열된다.

$$B - B' - C(C) - A' - A$$

양극단의 중간단계의 경우, 그 순서는 양극단 사이의 임의의 위치에 배열된다. 예를 들면, 동력의 한계값이 15hp일 경우 그 순서는 여러 추력의 한계값에 대해 기계가공 시간이 증가하는 차례로 다음과 같이 배열된다.

추력 45000N	A' - C(C) - A - B' - B
추력 67000N	C(C) - B - A' - B' - A
추력 90000N	B - C(C) - B' - A' - A
추력 135000N	B - C(C) - B' - A' - A

요약하면, 순서 A'는 추력 한계값이 어떤값 이하일 때 동력의 한계값에 상관없이 항상 가장 짧은 총 기계가공시간을 나타낸다. 그러나 동력의 한계값에 따라서 총 기계가공시간이 다른 것들보다 짧아지거나 길어질 수 있는 전이단계를 거쳐 추력의 한계값이 커짐에 따라 순서 B는 동력의 한계값에 상관없이 가장 짧은 총 기계가공시간을 나타낸다.

한편 pilot hole의 드릴가공이 고려된다면 각 작업의 순서는 12.5mm pilot hole의 드릴가공 작업부터 시작한다. 이 pilot hole은 바닥을 향해 아래로 가공된다. 그 후에 이전에 정해진 순서 A와 B의 작업 차례에 따라 남은 작업들이 수행된다.

- 순서 A: 12.5mm - 37.5mm - 50mm - 75mm
- 순서 B: 12.5mm - 75mm - 50mm - 37.5mm

<그림 8>의 결과는 두 순서 사이의 총 기계가공시간에 대한 백분율의 차이를 나타낸다. 추력한계가 4500N와 13500N일 때 순서 B의 총 기계가공시간은 순서 A의 총 기계가공시간보다 1% 짧거나, 7% 긴 사이의 범위를 갖는다. 추력한계가 22500N인 경우에 있어서 순서 B의 총 기계가공시간은 동력의 한계값이 10hp 이상일 때 순서 A보다 더 짧은 결과를 나타낸다. 추력의 한계값이 31500N보다 클 때는, 순서 B가 동력의 한계값에 상관없이 순서 A의 총 기계가공시간보다 짧게 유지된다. 주목할 점은, 추력의 한계값이 증가함에 따라 순서 B의 총 기계가공시간이 순서 A보다 더 급격하게 감소한다는 것이다. 예를 들면, 추력의 한계값이 67000N일 때 순서 B의 총 기계가공시간은 순서 A보다 8%에서 30% 더 짧은 범위를 갖는다. 위의 분석으로부터 다음 결론을 이끌어 낼 수 있다. 추력한계가 가

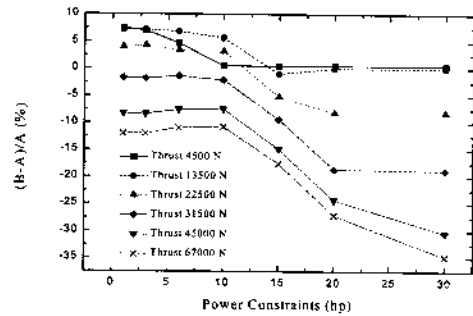
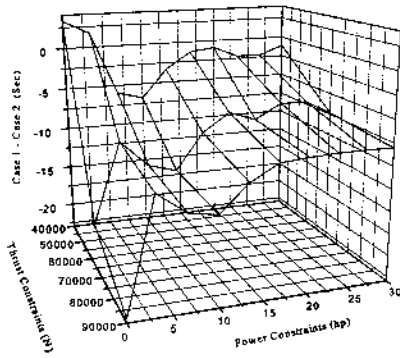


그림 8. 순서 A와 B 간의 총 기계가공시간에 대한 백분율 차이 - Pilot Hole.

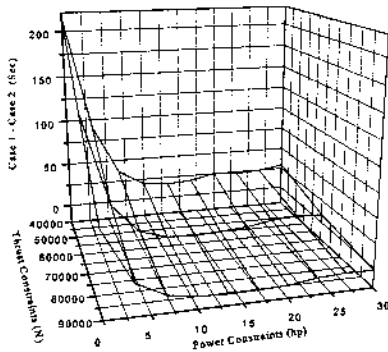
공될 구멍 크기에 비하여 작을 때 동력의 한계값에 상관없이 가장 큰 지름으로부터 작은 지름으로 정해진 작업순서는 다른 어떤 순서보다 더 긴 총 기계가공시간을 나타낸다. 그러나 추력한계가 증가하면 가장 큰 지름을 우선하는 순서는 동력의 한계값이 어떤 값 이상일 때 다른 어떤 순서보다 총 기계가공시간이 더 짧아진다. 만약, 추력의 한계값이 매우 높아지면 가장 큰 지름을 우선하는 순서는 동력의 한계값에 상관없이 가장 짧은 총 기계가공시간을 나타낸다. 주목할 점은, 이 결과가 순서의 시작에 있어서 pilot hole 존재의 유무와는 무관하다는 사실이다. 따라서, 추력과 동력의 한계값이 주어지면 총 기계가공시간을 최소화시키는 작업순서를 결정할 수 있다.

<그림 9> (a)에 보인 결과는 <그림 3>에 보인 다단계 지름을 갖는 구멍을 제작하기 위해 다양한 추력과 동력의 한계값에 대하여 순서 A에 대한 다음의 두 경우 사이의 총 기계가공시간을 비교한 것이다. 첫 번째 경우 (Case 1)는 pilot hole의 드릴가공 없이 다단계 지름을 갖는 구멍 제작을 의미한다. 두 번째 경우 (Case 2)는 순서를 시작할 때 12.5mm의 pilot hole을 뚫고 이를 이용한 다단계 지름을 갖는 구멍의 제작을 의미한다. 추력한계가 45000N일 때, 동력 한계가 낮은 경우, pilot hole이 없는 순서 (Case 1)는 pilot hole이 있는 순서 (Case 2)보다 더 긴 총 기계가공시간을 나타낸다. 그러나 추력 한계가 67000N 이상일 때는 동력 한계값에 상관없이 위와 반대의 결과가 나타난다. <그림 9> (b)의 결과는 순서 B에 대한 총 기계가공시간을 나타내며 추력한계가 45000N 이하일 때 Case 1은 Case 2보다 시종일관 더 길다는 것을 보여준다. 그러나 추력의 한계값이 90000N이고, 동력의 한계값이 6hp 이상일 때 Case 1의 총 기계가공시간은 Case 2보다 더 짧아진다. 추력한계가 증가함에 따라 Case 1의 총 기계가공시간은 Case 2보다 동력의 한계값에 상관없이 더 짧아지는 결과를 보인다. 따라서 이론적으로 만약 추력한계가 제작되는 구멍의 크기에 비하여 높을 경우에는 pilot hole의 드릴가공 없이 가장 큰 지름을 우선하는 순서가 가장 짧은 총 기계가공시간을 나타낼 것이다. 그러나 실제에 있어서 최대허용 추력과 동력은 사용중인 기계 공구의 성능에



(a) 순서 A.

좌우된다.



(b) 순서 B.

그림 9. 총 기계가공시간의 차이.

따라서 총 기계가공시간을 최소화하는 가공순서는 추력과 동력의 한계값과 같은 기계가공 조건에 근거하여 결정되어야 한다. 결론적으로 다단계 구멍 드릴가공시 추력이나 동력의 한계값과 같은 작업조건을 무시한 간단한 경험규칙을 사용한 작업순서의 결정은 항상 최적의 결과를 가져다 주는 것이 아니다.

4. 결 론

본 논문의 목적은 다단계 지름을 갖는 구멍을 제작하기 위한 최적의 드릴가공 작업순서 결정에 대한 제반특성을 연구하는 것이다. 이에 따라 최적화 기준으로 최소 기계가공 시간을 이용하여 순서 결정시 구속조건을 영향을 고찰하였다. 기하학적

프로그래밍 사용은 최적화 문제를 해석하는 효과적인 방법을 제공해 주었다. 위의 분석으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 추력 그리고/또는 동력의 한계값이 낮을 때 가장 작은 지름을 우선 선택기준으로 한 순서는 가장 큰 지름을 우선 선택기준으로 한 순서에 비해 30%나 더 짧은 총 기계가공시간을 나타낸다.
2. 높은 추력 그리고/또는 동력의 한계값에서는 가장 작은 지름을 우선 선택 기준으로 한 순서의 총 기계가공시간이 가장 큰 지름 우선 선택 기준에 비해 40%나 더 길게 나타난다.
3. 추력과 동력의 한계값이 낮을 때 구멍 가공 초기 pilot hole의 드릴가공을 포함한 순서가 pilot hole의 드릴가공을 포함하지 않은 순서의 총 기계가공시간보다 더 짧은 결과를 나타낸다.
4. 높은 추력 그리고/또는 동력의 한계값에서는 구멍 가공 초기 pilot hole의 드릴가공을 포함한 순서가 pilohole의 드릴가공을 포함하지 않은 순서의 총 기계가공시간보다 더 긴 결과를 나타낸다.

이상의 결론에서는 드릴의 교환에 따른 공구 교환시간이나 이동시간을 드릴 가공시간만을 비교하기 위해 고려하지 않았다. 결론적으로 최적의 가공순서를 결정하는 데 있어 사용 기계들의 제한된 성능에 따른 동력이나 추력같은 작업조건들이 고려되어야 한다. 따라서 드릴 가공시 최적 작업순서의 결정은 “큰 지름 우선 규칙” 같은 어떤 한 가지 규칙에 의해 일률적으로 결정될 수는 없다.

참고문헌

Bralla, J. G. (1986), *Handbook of Product Design for Manufacturing*, McGraw-Hill Co.
 Kaczmarek, J. (1976), *Principles of Machining by Cutting, Abrasion and Erosion*, Peter-Peregrinus Ltd.
 Lynch, M. (1993), *Computer Numerical Control - Advanced Techniques*, McGraw-Hill Co.
 Repp, V. E. et al. (1982), *Metalwork - Technology and Practice*, 7th ed., Mcknight Co.
 SME (1983), *Machining Centers*, 1st Eds., *Society of Manufacturing Engineers*.
 SME (1983), *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, SME, 1, 4th Eds.
 Tonshoff, H. K., Spintig, W. and Konig, W. (1994), *Machining of holes developments in drilling technology, Keynote Paper, Annals of CIRP*, 43(2), 551-561.

Wysk, R. A. *et al.* (1978), An analysis of some production planning practices,
ASME Technical Paper, No. 78-WA/Prod.-13.



유희진

서울대학교 기계설계학과 학사

서울대학교 기계설계학과 석사

미국 Pennsylvania 주립대학교 산업공학과

박사

현재: 동아대학교 산업공학과 전임강사.

관심 분야: 생산 시스템 공학, CAPP, FMS,

CAD 등