

자동차 프레스 금형을 위한 3차원 윤곽가공의 문제점

이상현* · 정연찬** · 주상윤***

Issues on the Machining of 3D-Profile for Automotive Press Dies

S.H. Lee, Y.C. Chung, and S.Y. Ju

Abstract

Profile machining using cutter diameter compensation is widely used in die and mould manufacturing. Especially automotive die makers try to use 3D-profile machining for trimming or flange dies. But the technological requirements and implementation issues haven't been defined. In this paper we summarized the requirements and issues of 3D-profile machining. Approximation of input profiles into sequences of line and helical arc is the first major issue. The second major issue is removing cutter interference from the approximated curves holding z-values when the maximum cutter diameter is given. Keeping constant machining width, local machining, path linking problems and several detail technological requirements are also discussed.

Key Words : 3D-Profile Machining, Cutter Diameter Compensation, Helical Arc, Press Die

1. 서론

제품의 형상이 복잡 다양해짐에 따라 NC가공은 점점 더 복잡해지고, 자동화에 대한 요구가 증대하고 있다. 공구경 보정을 사용하는 윤곽가공의 경우에도 자동차 프레스 금형을 중심으로 기존의 2차원 가공에서 3차원 윤곽가공으로 전이되는 추세이다.

윤곽가공에 관한 기존의 연구는 대부분 2차원 윤곽가공[1~4]에 집중되어 있으며 주상윤[5] 등이 3차원 윤곽가공에 관한 연구를 처음으로 제시한 바 있다. 주상윤[5] 등은 기존의 직선 보간이 지니고 있는 여러 문제점들을 근원적으로 해결했으며, 공구간섭이 없는 가공테

이터를 얻을 수 있는 기본적인 방법을 제시하였다. 그러나 최근 자동차 프레스 금형 생산 현장에서 3차원 윤곽가공을 활발히 적용하면서 다양한 요구 조건이 새롭게 제기되고 있다.

윤곽가공에서의 절삭조건 결정에 관한 연구는 Geoffrey[6]와 최병규[7], 고기훈[8] 등에 의해 제시되었지만 2차원 윤곽가공에 국한되었다.

본 논문은 자동차 프레스 금형을 위한 3차원 윤곽가공의 논점들과 생산 현장에서 제기되는 다양한 요구 사항 정리하고자 한다. 이를 통해 3차원 윤곽 가공에 관한 연구의 활성화를 도모하고자 한다.

* (주) 큐빅테크 큐빅기술연구소

** (주) 큐빅테크 큐빅기술연구소

*** 울산대학교 공과대학 산업정보경영학부

2. 3차원 윤곽가공

2.1 3차원 윤곽가공의 필요성

윤곽가공은 공구의 측면으로 가공하기 때문에 공구의 직경이 최종 가공면의 정밀도에 직접적인 영향을 미친다. 자동차 금형에서 윤곽 가공면(Fig.3 참조)은 대부분 조립될 부위이기 때문에 일반적인 형상부(Fig.3. 참조)보다 높은 정밀도가 요구 된다. 그런데 일반적으로 자동차 금형 제작에서는 CAM 시스템을 이용해서 NC 데이터(NC 기계를 제어하는 명령어 혹은 가공 경로)를 생성하는 작업과 실제 NC 가공 작업은 시간과 공간적으로 분리되어 있는 작업이다. 따라서 NC 데이터를 생성할 때 NC 가공에 사용될 공구의 정확한 직경을 미리 알기가 힘들다. 또, NC 가공에 사용되는 공구는 수시로 파손되거나 재연마 하게 되므로 NC 데이터를 생성할 때 고려했던 공구 사양이 존재하지 않는 경우가 많다.

이러한 이유 때문에 대부분의 NC 컨트롤러는 작업자들이 공구의 규격에 제약을 받지 않도록 공구경 보정(cutter diameter compensation) 기능을 제공하고 있다 [5]. 공구경 보정 기능은 NC 컨트롤러가 직접 NC 데이터의 경로를 주어진 거리만큼 오프셋(offset)해서 실제 공구의 이동 경로를 계산한다(Fig.1 참조). 윤곽가공을 위해서 CAM 작업자는 피삭재의 윤곽 곡선을 그대로 NC 데이터로 생성하고, NC 가공 작업자가 지정하는 공구의 직경에 따라 NC 컨트롤러가 실 가공 경로를 계산하게 된다.

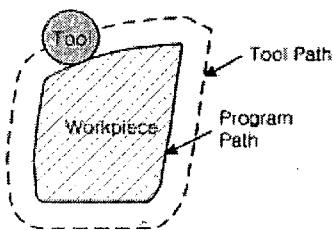


Fig.1 Profile Machining

그런데 NC 컨트롤러의 오프셋 기능은 이동할 모든 경로를 고려해서 한꺼번에 계산하는 것이 아니다. NC 컨트롤러는 이동해야 할 위치를 몇 개만 미리 읽어서 간이적으로 오프셋을 계산하기 때문에 Fig.2와 같이 오프셋 된 경로가 꼬이게 된다[4]. 이러한 꼬임은 NC 기계의 알람(alarm) 혹은 과삭, 공구 충돌 등의 결과를 초래하게 된다. 결국 자동차 금형과 같은 복잡한 형상의 윤곽 가공에 공구경 보정 기능을 활용하기 위해서는 윤곽 곡선 정보를 그대로 NC 데이터로 출력하는 것이 아니라

CAM 시스템에서 별도의 처리가 필요하다. 윤곽 가공을 지원하는 CAM 시스템에서는 일반적으로 사용할 공구의 최대 직경을 고려해서 윤곽 곡선의 오목한 부위를 미리 라운딩(rounding) 한 후에 NC 데이터를 생성한다.

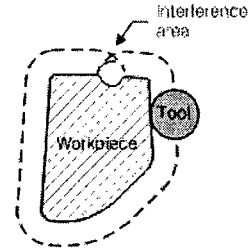


Fig.2 Limitations of Controller Offset

현재 많은 CAM 시스템에서 공구경 보정을 이용하는 윤곽 가공 데이터 생성 기능을 제공하고 있다. 그러나 대부분 2차원 윤곽 가공 기능만 지원하고 있으며, 2차원 조차도 컨트롤러에 따른 기계의 알람, 과삭, 충돌 등의 문제가 완벽히 해결되지 않은 상태이다.

자동차 프레스 금형 생산 현장에서 윤곽가공은 일반적인 트리밍 금형(trimming die, 철판을 자르는 금형)이나 플랜지 금형(flange die, 철판을 굽히는 금형)의 가공뿐만 아니라 비 원형 형상의 구멍가공 등 다양한 분야에서 필요로 하고 있다. 실제 많은 금형 생산 현장에서는 2차원 윤곽 가공 데이터를 이용하여 작업자가 수작업으로 z값을 조정하며 3차원 윤곽가공을 수행하거나 공구경 보정 기능이 없는 일반가공 방식으로 3차원 윤곽가공을 수행하고 있다. 공구경 보정 기능을 이용한 3차원 윤곽가공의 필요성은 산업 현장에서 추구하고 있는 자동화, 무인화 가공의 요구와 부합된다 할 수 있다. Fig.3은 자동차 프레스 금형의 실제 윤곽가공 결과이다.



Fig.3 Profile and Surfaces of Door-Outer

2.2 윤곽가공 데이터 생성의 일반적인 방법

Fig.4는 3차원 윤곽 곡선으로부터 윤곽가공을 위한 NC 데이터를 얻기까지의 일반적인 과정을 흐름도로 나타내고 있다

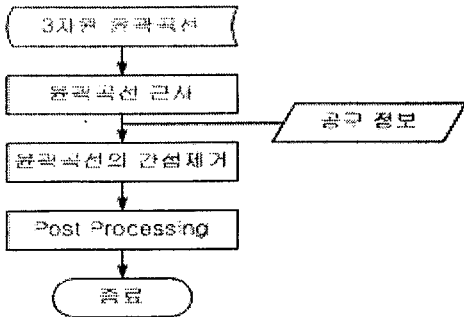


Fig.4 Overall Procedure of NC-data Generation

2.2.1 윤곽곡선의 근사

일반적으로 NC 컨트롤러는 공구경 보정에 사용되는 기본 가공 경로로 직선과 헬리컬 원호(시작과 끝점의 Z 값은 다르나 XY값은 수평면에 정의되는 원호)만을 지원한다. 따라서, 모든 입력 곡선을 직선과 헬리컬 원호의 연속으로 근사해야 한다.

자유곡선을 포함하는 윤곽 곡선의 근사에 관한 연구는 2차원 윤곽곡선에 관한 내용으로만 이루어졌으며 3차원 윤곽곡선의 근사에 관한 내용은 주상윤[5] 등의 연구가 유일하다[1~5]. 주상윤 등은 Fig.5에 도시된 바와 같이 입력곡선을 샘플링한 후, xy-허용오차(xy tol)와 z-허용오차(z tol) 내에서 샘플링된 점들을 가까이 지나는 직선과 헬리컬 곡선에 의하여 근사하였다.

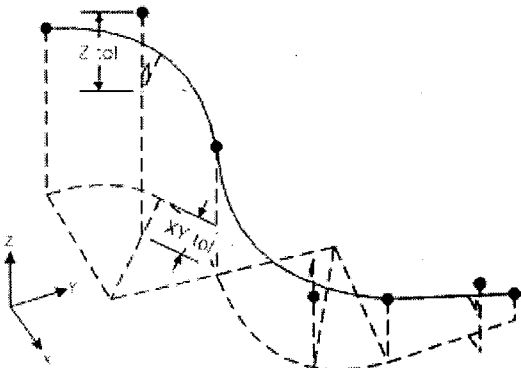
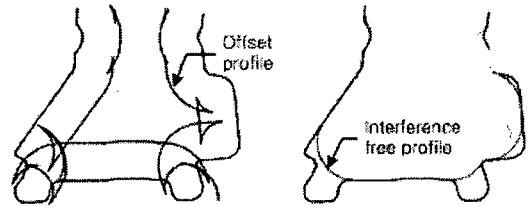


Fig.5 Approximation of Profile Curve

2.2.2 윤곽 곡선의 간섭제거

Fig.2에 도시하였듯이 NC 컨트롤러가 지원하는 공구경보정 기능의 한계 때문에 근사된 윤곽곡선을 공구경보정기능을 이용하여 가공하기 위해서는 윤곽 곡선의 간섭 구간을 제거하여야 한다. 대부분의 NC 기계에서 프로그램의 이동 방향과 공구경 보정된 결과로 생기는 이동 방향이 90에서 270의 범위에서 달라져 버렸을 때 간섭으로 간주한다[9].

Fig.6(a)에 도시한 바와 같이 근사된 윤곽곡선을 사용할 공구의 최대 반경으로 오프셋(outward offset)하여 공구의 간섭이 일어나는 곡선 구간을 제거하고, 반대 방향으로 다시 한번 오프셋(inward offset)함으로 Fig.6(b)와 같은 부드럽게 연결된 윤곽 곡선을 구한다.



(a) Outward Offset (b) Inward Offset
Fig.6 Removing Interference

사용할 공구의 최대 크기를 가정하고 간섭 영역을 제거하기 때문에 간섭이 제거된 윤곽 곡선으로 가공을 하면 아무리 작은 공구를 사용하더라도 오목한 부위에서는 가공이 덜된 영역이 생기게 된다. 이들 영역들은 사용할 공구의 최대 크기를 줄여서 별도로 데이터를 생성하는 것이 필요하게 된다.

2.3 추가 연구의 필요성

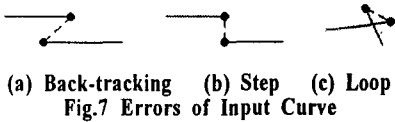
이제까지 윤곽가공에 관한 연구는 윤곽곡선의 근사와 간섭제거에 관한 내용으로만 이루어졌으며 변화하는 금형 개발 환경에서 요구되는 윤곽가공의 다양한 요구 사항들에 관한 연구는 발견하지 못하였다. 따라서 실제 현장에서 발생하는 다양한 요구 조건들을 정리하여 3차원 윤곽가공에 관한 연구의 활성화를 도모하고자 한다.

3. 윤곽가공의 기술적인 문제점

3.1 입력곡선의 편집 및 근사

허용오차를 만족하면서 입력곡선을 가능한 적은 개수의 직선과 헬리컬 원호로 근사하는 것이 필요하다. 이

때, 입력곡선의 무결성을 확인하는 것이 필요한데 일반적으로 CAD 시스템에서 모델링 된 곡선들은 파일 변환 과정, 사용자 실수 등의 다양한 원인으로 인해 Fig.7과 같이 역행과 꼬임이 존재할 수 있기 때문이다. 꼬임 등의 오류 정도가 허용 오차보다 큰 경우에는 곧 바로 그 잘못을 사용자에게 알려줘서 사용자가 직접 편집할 수 있게 해야 한다. 역행과 꼬임 등의 오류가 허용 오차보다 작은 경우에는 입력 곡선을 적절히 자동으로 수정해서 근사해야 한다.



기존의 접근 방법은 입력 곡선을 점열화하고, 점열곡선을 직선과 헬리컬 원호로 근사하는 방법이었다. 그러나 초기 입력 곡선이 NURBS 등의 매개변수식인 경우가 많고 여러 개의 곡선으로 구성되어 있기 때문에 곡선의 초기 특성과 특징점을 활용해서 근사하는 것도 좋은 방법으로 사료된다. 또, 점열의 헬리컬 원호 근사 방법을 개선하는 것도 좋은 연구로 생각된다.

3.2 사용공구 결정

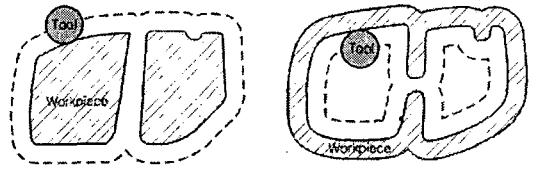
윤곽가공을 수행할 때 사용할 공구의 크기에 따라 가공경로와 가공횟수가 결정되므로 사용공구를 어떻게 선정하느냐 하는 것은 작업시간과 가공정밀도에 큰 영향을 미친다. 또한 사용공구의 선정은 공구의 마모 및 파손을 비롯한 절삭조건의 결정에도 큰 영향을 미친다. 동일한 작업물을 가공하는 경우 직경이 큰 공구를 사용하면 공구 간섭 영역이 증가하여 잔삭량이 증가하는 반면에 공구에 걸리는 부하가 작아져 가공시간이 감소하고 공구의 수명과 제품의 품질은 높아지게 된다. 직경이 작은 공구를 사용하는 경우 공구간섭영역이 감소감소하여 잔삭량이 감소하는 반면에 공구에 걸리는 부하가 커져 공구 파손의 우려가 커지고 공구의 이송속도가 느려져 가공에 소요되는 시간이 증가하게 된다. 따라서 주어진 윤곽을 효율적으로 가공하기 위해서는 공구에 걸리는 부하를 일정하게 유지할 수 있도록 적절한 공구를 선정해야 한다.

국내 대다수의 업체에서는 3차원 윤곽가공을 위해 대략 4개 내외의 공구를 사용하고 있다. 반면 일본에서는 10개 정도의 공구를 사용하고 있다. 일반적으로 작은 공구 하나로 한번에 천천히 가공하기 보다는 여러 개의 공구로 빠르게 가공하는 것이 고속가공이 일반화된 현재의 대체적인 추세이다.

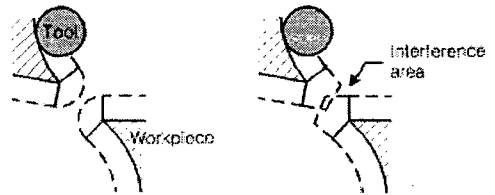
따라서 공구 사용 개수와 부하량을 기준으로 최적의 공구를 선정해야 한다.

3.3 윤곽 곡선의 간섭 제거

NC 컨트롤러의 간이적 오프셋 기능으로도 간섭이 생기지 않도록 윤곽 곡선의 간섭을 미리 제거하는 것이 필요하다. Fig.2와 같은 기본적인 형상의 간섭은 대개 NC 컨트롤러가 경고 메시지를 출력하고 가공을 멈추지만 Fig.8과 같은 경우는 충돌과 같은 치명적인 결과를 초래할 수 있다. Fig.8의 (a)는 서로 분리된 두개의 윤곽 곡선이 간섭을 일으키는 경우인데, 간섭이 제거되면 하나의 윤곽 곡선으로 생성되어야 한다. (b)의 경우는 입력이 하나의 곡선이었지만 간섭이 제거되면 두개의 곡선으로 생성되어야 한다.



(a) Merging (b) Splitting
Fig.8 Removing Interference



(a) Arc Offset (b) Mitered Offset
Fig.9 Types of Offset

윤곽 곡선의 간섭을 제거할 때 오프셋 방식에 따라 간섭 구간이 달라질 수 있다. Fig.9의 (a)와 같이 원호 오프셋(arc offset) 방식으로 간섭을 확인하면 간섭이 없는 것으로 판단할 수 있지만 (b)와 같이 각 오프셋(mitered offset) 방식을 적용하면 간섭이 발생한다. 현장에서 사용하는 NC 기계는 각 오프셋 방식의 공구경보정이 일반적이다.

윤곽 곡선의 간섭 제거는 평면 곡선의 오프셋 기능을 활용해서 구현할 수 있다. 그러나 간섭 제거된 윤곽 곡선이 원래의 Z값을 유지하고 있어야 하기 때문에 구현상의 어려움이 존재한다.

또, 통상 큰 공구로 윤곽 전체를 가공하고 미삭 영역

을 별도의 작은 공구로 부분 가공하기 때문에 미삭 영역을 찾아내는 방법과 미삭 영역의 간섭 제거 방안 등이 과제로 남는다. 특히 미삭 영역의 가공은 전체 가공과 얼마나 중첩을 시킬 것인지 공구의 진입과 퇴각을 어떻게 고려할 것인지에 따라 윤곽 곡선의 간섭 제거 방법이 달라질 수 있다.

3.4 가공 특성에 맞는 가공 경로 생성

3.4.1 일정 가공폭 유지

자동차 외관 제작에 사용하는 프레스 금형의 경우 일반적으로 주물소재를 NC가공해서 제작함으로 실제 가공 부위(철판과 닿는 부위)만 가공하면 되었다. 최근의 금형 가공에서는 금형의 강도를 높이기 위해 가공 부위에 강재(steel)를 삽입하여 가공함으로 기존의 윤곽가공뿐만 아니라 윤곽여유가공이 필요하게 되었다. 이러한 윤곽여유가공(relief 가공)은 윤곽 부위 전체에 강재(steel)를 삽입함으로 생긴 문제로서 Fig.10과 같이 윤곽의 가공폭을 일정하게 유지하는 것이 중요한 과제이다. 현재의 방법은 단순히 최소 가공폭을 확보하는 방법으로 윤곽 곡선을 일정한 높이 만큼 Z방향으로 단순 이동하는 방법이 많이 쓰여지고 있다. 그러나 이 방법은 경사진 형상에서는 최소 가공폭 확보를 보장할 수 없다.

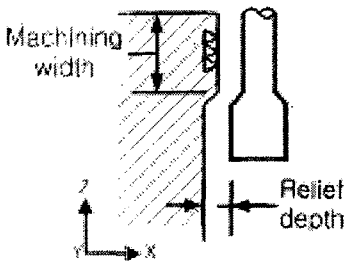


Fig.10 Relief Machining



Fig.11 Example of Relief Machining

일정하게 유지해야 하는 가공폭(machining width)은 대개 10mm 내외인데 사용하는 공구의 직경과 가공 깊이 등을 고려해야만 일정한 가공폭을 유지하는 윤곽 곡선을 생성할 수 있다. Fig.11은 실제 윤곽 여유 가공의 모습이다.

3.4.2 공구부하를 고려한 부분 가공

Fig.12에 도시한 바와 같이 부분 가공에서는 가공 형상 및 사용공구에 따라 가공량이 달라지기 때문에 공구에 걸리는 부하를 고려해서 가공 데이터를 생성해야 한다. 가장 간단한 방법은 Fig.13의 (a)와 같이 간섭이 제거된 최종 윤곽을 오프셋해서 가공 경로를 생성할 수 있다. 그런데 이 방법은 형상의 굴곡이 심한 경우에 최초의 가공 경로가 긴 홈을 가공(slotting)하게 되므로 초기 가공 부하가 커진다. (b)와 같이 정삭 윤곽을 오프셋하는 방식을 취할 수 있다. 이 방법은 가공 흔적을 없애기 위해 최종 윤곽을 따라가는 경로를 추가로 생성할 필요가 생긴다.

잔삭 가공은 분리된 가공 경로가 많기 때문에 공구의 진입과 퇴각 경로를 최적할 필요가 있으며, 특히 진입 및 퇴각 경로의 충돌 방지를 고려해야 한다.

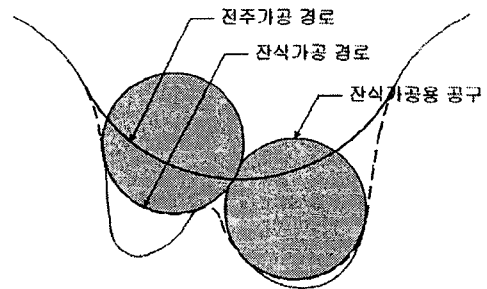


Fig.12 Residual Material for Clean-up



(a) (b)
Fig.13 Types of Clean-up

3.4.3 이송거리 최소화

윤곽 가공을 위한 공구들이 결정되면 가공경로 및 가공횟수가 결정된다. 윤곽 전체를 가공하는 경우는 윤곽 곡선을 그대로 따라가면서 가공하기 때문에 가공 순서만

적절하게 지정해 주면 공구의 이동경로가 많지 않다. 하지만 일반적인 자동차 프레스 금형의 경우 하나의 금형을 가공할 때 3~7회 정도의 잔삭가공을 수행하므로 잔삭가공에서의 공구 이동 경로를 최적화하는 것은 상당히 중요하다.

특히 자동차 프레스 금형의 경우 주변 구조물과의 충돌을 고려해서 공구 이동 경로를 계획해야 한다. 또, 기계 작업자가 항상 예상할 수 있는 경로를 생성하는 것이 작업자의 불안감을 덜 수 있다.

3.5 기계 특성에 맞는 가공 데이터 생성

구형 기계들의 경우 공구경 보정 기능을 사용할 때 컨트롤러 알람이 발생할 가능성이 높으므로 짧은 경로를 지양하고, 상대적으로 오프셋 오류 발생 가능성이 적은 반경차 보정 방식을 지원한다면 효율적으로 대처할 수 있다.

3.5.1 다양한 기계의 지원

현장에서 사용되고 있는 기계 중에는 컨트롤러의 버전에 따라 원호 보간 기능, 원호 보간에서 원호의 반지름 지정 방식, 공구경 보정 시작 코드는 반드시 직선 구간이어야 한다는 등의 다양한 요구 조건들이 있다. 이런 다양한 컨트롤러의 옵션에 적절히 대처해야 한다. 따라서 기계와 컨트롤러의 3차원 공구경 보정 특성과 한계를 분석하고 그 결과에 따른 대응 방안을 모색할 필요가 있다.

3.5.2 컨트롤러 알람 방지

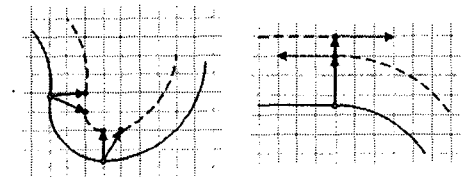
공구경 보정을 사용하는 경우 컨트롤러 알람의 발생 가능성을 배제할 수 없다. 컨트롤러 알람의 발생 원인은 반올림 오차 등 다양한데 주로는 컨트롤러 내부에서 구현된 오프셋 알고리즘의 불완전성 때문에 발생하는 것이다. 발생 가능한 컨트롤러 알람의 원인은 다음과 같다.

첫째, Fig.14의 경우 컨트롤러에 입력된 윤곽 곡선은 접선 연속을 만족하지만 각각의 도형 요소(직선 혹은 원호)를 오프셋 했을 때 인접한 도형 요소의 시작과 끝점이 일치하지 않는 경우이다. 이때, 실수 연산의 오류 등으로 인해 인접한 도형 요소와 교점을 구하지 못하는 경우가 발생한다. 일반적으로 컨트롤러에서 인접한 도형 요소와 교점 계산을 무시하는 범위는 0.001mm이다 [10, 11].

두 번째는 Fig.15와 같은 헬리컬 원호 구간에서 발생하는 알람으로 원호구간에서 z값이 급격하게 이동하기 때

문에 발생한다. 이것은 3차원 공구경 보정 가공이 갖고 있는 원천적인 한계라고 볼 수 있다. Fig.15에서 보듯이 NC 데이터의 원호 반경이 공구 반경과 유사할 때 보정하기 전의 x, y 이동 값은 충분히 크지만 보정(공구경 만큼 오프셋)을 한 후의 실제 공구 경로로는 x, y 이동 값이 0에 가까워지기 때문이다.

세 번째는 컨트롤러 내부적인 버그 혹은 오류로 인한 알람이거나 아직까지 파악되지 않은 또 다른 문제가 원인일 수 있다. 이러한 오류는 수많은 실험을 통해서 밝혀낼 수 밖에 없다. 특히 컨트롤러 내부적인 오류로 확인된 경우에도 그 오류를 피할 수 있는 NC 데이터를 생성하는 방법을 고안할 필요가 있다. 현장에 사용되고 있는 컨트롤러를 교체하거나 보수하는 것이 거의 불가능하기 때문이다.



(a) Concave (b) Convex
Fig.14 Types of Controller Alarm

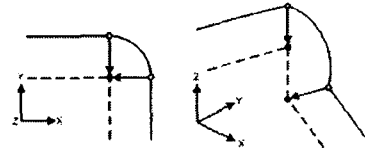


Fig.15 Alarm at Helical Arc

3.6 공구 특성과 마모 고려

가공 폭(machining width)이 넓은 경우 평엔드밀(flat endmill)은 바닥날이 없어 아래방향으로 가공하는 경우 공구 바닥이 소재와 충돌해 융착 되거나 공구가 부러질 수 있다. 따라서 평엔드밀을 사용하는 경우에는 상승(ascending)가공 구간과 하강(descending)가공 구간을 분리해서 가공해야 한다.

또, 긴 수평 구간을 가공할 때는 공구의 특정 부위에서만 마모가 일어난다. 그런데 윤곽가공은 통상 높은 정밀도가 요구되기 때문에 Z값을 변화시키는 등의 방법으로 공구의 마모를 제어할 필요가 있다.

3.7 Post-Processing

후처리 과정이란 공구경로의 기하정보를 NC파일의

형식에 맞추어 쓰는 과정으로 다양한 접근, 퇴각과 가공 형상을 고려한 경로연결(path linking) 등을 고려해야 한다. 또한 BLU 오차를 고려한 경로 생성으로 컨트롤러 알람(controller alarm) 발생 가능성을 최소화 하여야 한다.

4. 결론

자동차 프레스 금형 제작에서 공구경 보정을 사용한 3차원 윤곽 가공은 현재 일부 업체에서만 제한적으로 적용하고 있는 최신의 생산 기술이다. 본 논문은 이러한 3차원 윤곽의 기술적인 현장의 요구 사항들과 구현의 문제점들을 정리하였으며, 이에 관한 접근 방법을 일부 제시하였다. 공구경 보정 기능을 사용하는 특수 가공에 관한 기술적 요구 사항 및 문제점의 제시를 통해 관련 연구의 활성화를 꾀했다는 데 본 연구의 의의를 찾을 수 있으며, 활발한 관련 연구를 통해 생산 현장의 실제 문제가 해결되기를 기대한다.

정리된 문제들 중 일부는 이미 상용 기술화된 것도 있지만 상용기술의 특성상 구체적인 접근 방법을 밝힐 수 없음을 밝혀둔다.

참고문헌

- (1) Schonherr, J., "Smooth biarc curves," CAD, Vol.25, No.6, pp. 365-370, 1993.
- (2) Meek, D.S. and Walton D.J., "Approximation of discrete data by G1 arc spline," CAD, Vol. 24, No. 6, pp. 301-306, 1992.
- (3) Young, M.K. and Walton D.J., "Curve fitting with arc spline for NC tool path generation," CAD, Vol. 26, No. 11, pp. 845-849, 1994.
- (4) 신하용, 정희민, 박영수, "공구경보정을 이용한 2차원 자유곡선의 가공," IE Interfaces, 제8권, 제3호, pp. 133-139, 1995.
- (5) 주상윤, 남장현, "자동차 산업의 금형제작을 위한 3차원 윤곽가공," IE Interfaces, 제9권, 제2호, pp. 119-128, 1996.
- (6) Geoffrey, B., Fundamentals of Metal Machining and Machin Tools, McGraw-Hill. pp. 29-39. 1975.
- (7) 최병규 외, CAD/CAM시스템과 CNC절삭가공, 회중당, pp. 351-359, 1996.
- (8) 고기훈, 서정철, 최병규, "2차원 윤곽가공에서 이송을 자동 조정", 한국 CAD/CAM 학회, 제5권, 제2호, pp. 175-183, 2000.

- (9) OSP 7000 Programming Manual, pp. 52-82.
- (10) OSP 7000 Operation Manual, pp. 378-383.
- (11) FANUC Series 15-Model B Maintenance Manual (Vol 1/2), FANUC, pp. 100, 1993