

## 선반용 STEP-NC 패러다임 및 델타볼륨 분해 알고리즘 Turning STEP-NC paradigm and delta volume decomposition

이병언, 정대혁, 서석환

포항공과대학교 산업공학과 국가지정 STEP-NC 연구실

### Abstract

ISO 14649 is a new interface (or language) standard for the CAD-CAM-CNC chain, currently under establishment by ISO TC184 SC1 and SC4. Upon completion, it will replace ISO 6983, so called M & G codes used for CNC since 1950's. As the new language is being established, a new CNC controller called STEP-CNC (STEP-compliant CNC), capable of carrying out various intelligent tasks using the new language as an input, receives worldwide attention. In this paper, we present a distributed architecture for STEP-NC system based on the generic paradigm of STEP-NC. The STEP-NC system is consisted of 3 sub-systems: 1) CGS (Code Generation System), 2) CES (Code Edit System), and 3) ACS (Autonomous Control System). Also presented in this paper is algorithm for delta volume decomposition, a crucial algorithm for developing CGS. First method is based on the cutting tool and the second method is based on the turning features commonly used in the shop floor. An illustrative example is given to compare the two methods, and to illustrate usage scenario of the delta volume in the turning STEP-NC system under development.

### Keyword

STEP-NC, ISO14649, Delta volume decomposition, e-manufacturing, CAD-CAM-CNC chain

### 1. 서론

NC technology와 Internet을 비롯한 information technology의 발전은 지난 20세기 후반 부터 생산 환경의 급격한 변화를 가져왔다. 고속가공, 고정밀 가공, 다축 가공 등의 NC 분야에서의 기술 발전은 manufacturing 분야의 생산성 향상과 품질을 향상시켰으며, information technology의 발전은 CAD-CAM-CNC를 연결하여 설계와 생산의 통합이 가능한 e-manufacturing이라는 새로운 개념의 생산 환경을 가져왔다. 이 e-manufacturing 환경에서는 CAD-CAM-CNC chain에서 각 시스템에서 만

들어지는 정보가 구김 없이 서로 호환되는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해 CAD 분야에서는 STEP (ISO 10303: Standard for the Exchange of the Product data)이 새로운 국제 표준으로 등장해 상위 시스템간의 정보의 교환을 가능하게 하였고, CNC 분야에서는 STEP-NC(ISO 14649)가 새로이 제정되어 기존의 G-code를 대체하려 하고 있다. 이처럼 internet을 바탕으로 STEP과 STEP-NC에 기반하여 CAD-CAM-CNC에 이르기까지 끊임없는 data flow를 구축하고, 이에 담겨진 다양한 정보를 이용해 CNC가 지적 자율적 제어를 수행할 수 있는 생산 환경을 STEP-NC paradigm이라고 한다.

STEP-NC[1]는 ISO TC184/SC1/WG7이 주도하여 새로이 제정되고 있는 CNC interface 언어이다. 기존의 G-code가 단순한 축의 움직임만을 지령하고 있는 반면 STEP-NC는 가공하고자 하는 파트의 형상 정보, 공정 계획 정보, 공구 정보 등 다양한 정보를 가지고 있다. 또한 G-code는 CNC 메이커마다 그 체계가 다르기 때문에 hardware dependent한 반면, STEP-NC는 어느 CNC에서도 공통적으로 사용할 수 있는 hardware independent neutral data이다. 그리고 CNC는 이 STEP-NC에 포함된 다양한 정보를 이용해 다양한 지적, 자율적 기능을 수행할 수 있다.

현재 STEP-NC는 밀링 가공에 관해서는 2003년 4월, 국제 표준으로 인증되었으며, 선반과 EDM 가공에 대해서는 현재 DIS (Draft for International Standard) version에 있는 상황으로 이들도 조만간 국제 표준으로 승인될 것이다. 이에 따라 향후 5년 이내 STEP-NC는 G-code를 대체하는 새로운 CNC interface 언어로써 자리매김 할 것이다. 그러므로 지금은 STEP-NC를 어떻게 CNC에 적용하여 구현할 것인가에 대한 연구가 전 세계적으로 시작되고 있다. 밀링 공정에 관해서는 2000년 유럽에서 세계 최초로 ISO 14649를 입력으로 받아들이는 CNC 시제품이 개발되어 Charleston에서의 ISO TC184 SC4 회의에서 발표되었으며[2], 미국에서는 Super Model이라 불리는 project가 시작되어 2000년 11월 시제품 개발에 성공하여 2001년 San Francisco SC4 회의[3]에서 발표되었다. 한국은 2001년 5월, 본 국가지정 연구실 팀에서 STEP-NC 시제품을 개발하였으며, 2001년 5월 한독 STEP-NC 워크샵, 6월 San Francisco ISO TC184 SC4 회의 [4] 등에서 성공리에 발표 및 시연되었다. 그러나 이 모든 시스템

은 밀링을 대상으로 한 것으로서 선반공정에 관해서는 데이터 모델의 정립 단계 (DIS) [12]이며, 선반용 STEP-NC 시스템 개발은 시작 단계이다.

본 논문에서는 선반용 STEP-NC 시스템 개발을 위해 2장에서 새로이 STEP-NC 시스템 구조를 설계하고 이를 세부 시스템 별로 설명하였으며, 3장에서는 선반 공정의 기본 입력이 되는 델타 볼륨 분해에 대해 다루었으며, 4장에서는 델타 볼륨 분해 결과가 STEP-NC에서 어떻게 사용되는지에 대한 사용 예를 설명하고 5장에서 결론 및 향후 연구 내용에 대해서 설명하였다.

## 2. Distributed system architecture for STEP-NC

앞서 언급했듯이 STEP-NC paradigm에서는 internet을 바탕으로 CAD-CAM-CNC 시스템이 연계되어 STEP과 STEP-NC라는 hardware independent한 data를 이용해 정보를 교환한다. 그러므로 STEP-NC paradigm에서는 시스템들이 위치적으로 구축받을 필요가 없이 분산 환경에서도 설계와 생산의 통합이 가능하다. 그렇기 때문에 STEP-NC data는 특정 hardware에 제한되는 data가 아닌 모든 일반적인 CNC에서 사용 가능한 data이어야 한다. 그러나 생산 현장에는 2축, 3축, 다축, two turret-two spindle machine 등 다양한 CNC 기계가 존재하기 때문에 중립 data인 STEP-NC를 받아들여 각 hardware에 맞게 이 data를 편집해 줄 (customize) 필요가 있다. 또한 풍부한 STEP-NC의 데이터를 활용하기 위해 CNC는 다양한 지적, 자율적 제어 기능을 갖춰야 STEP-NC의 장점을 극대화할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 STEP-NC의 paradigm을 고려하여 중립 data인 STEP-NC 파트 프로그램을 생성하는 Code Generation System(이하 CGS), 그리고 이를 입력으로 받아 각 machine의 사양에 맞게 편집하고 수정하는 Code Edit System(이하 CES), 그리고 최종적으로 이 파트 프로그램을 집행하여 지적 자율적 제어를 수행하며 이상상황 발생

시에 대처하는 Autonomous Control System(이하 ACS)로 구성되는 STEP-NC system의 구조를 설계하였다. 설계된 시스템은 아래의 [그림 1]과 같다.

### 2.1 CGS (Code Generation System)

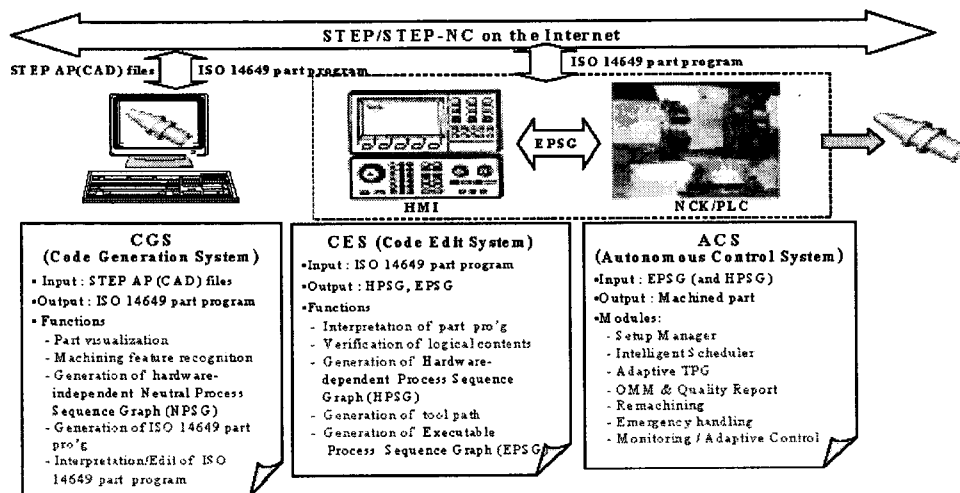
CGS 시스템은 CAD system으로부터 생성된 CAD file을 입력으로 받아 다양한 기능을 수행하여 hardware independent한 STEP-NC 파트 프로그램을 생성한다. CGS는 입력된 형상 정보로부터 가공을 위한 델타 볼륨을 분해 (Delta Volume Decomposition)하고, 분해한 델타 볼륨을 STEP-NC에서 정의하는 가공 특징형상 (manufacturing feature)으로 변환하는 기능을 수행한다. 또한 각 가공 특징형상을 가공하기 위한 공정 계획을 생성하며 하드웨어에 구속받지 않는 중립 형태의 Neutral Process Sequence Graph (이하 NPSG)를 생성하며 최종적인 STEP-NC 파트 프로그램을 생성한다.

### 2.2 CES (Code Edit System)

CES 시스템은 기계 정보 및 가공 현장 정보를 포함하고 있지 않은 ISO 14649 파트 프로그램에 대해 가공에 사용될 기계 및 공구 등을 할당하는 기능을 수행하여 기계에 맞는 공정 계획 정보, 즉 Hardware dependent Process Sequence Graph (이하 HPSG)를 생성한다. 한편 HPSG는 순차적인 공정 순서가 아니라 비선형 공정 계획까지도 포함하기 때문에 비선형 공정 계획의 여러 가능한 경로들을 비교 분석하여 ACS를 통해 실시간으로 수행되는 실행 가능한 공정 계획 정보, 즉 Executable Process Sequence Graph (이하 EPSG)를 생성하고 공구 경로를 생성한다.

### 2.3 ACS (Autonomous Control System)

ACS는 실제 CNC상에서 이루어지는 기능으로 ISO 14649에서 생성한 다양한 정보를 바탕으로 지적이고 자율적인 제어를 수행한다. 특히 ACS는



[그림 1] Distributed system architecture for STEP-NC system

cycle start 버튼을 누르는 순간부터 CES를 통해 만들어진 순차적인 공정 계획 정보를 실행한다. 그리고 가공 전 공구 set-up, workpiece set-up 및 좌표계 설정 등과 같은 set-up manager 기능도 수행한다. 또한 공구 파손 등과 같은 이상 상황이 대처할 경우 이를 분석하여 상황에 맞는 대안 공정 계획을 생성하기도 한다.

이상 설명한 STEP-NC 시스템의 정의 및 기능은 밀링, 선반을 포함한 모든 manufacturing process에 적용이 될 수 있다. 이 중 CGS에서의 델타 볼륨 분해와 가공 특징 형상 인식은 일반적으로는 가공 특징 형상 인식 과정으로 생각할 수 있다. 그러나 선반 공정에서는 다양한 델타 볼륨 분해 방법이 존재하기 때문에 델타 볼륨 분해의 결과는 CGS에서의 특징 형상 인식 뿐만 아니라 CES, ACS에서의 공구 경로 생성과 가공의 효율성에까지 영향을 미치게 된다. 그러므로 3장에서는 선반 공정에서 효율적인 델타 볼륨 분해 알고리즘을 고안하였다.

### 3. Delta volume decomposition algorithms for Turning STEP-NC

선반 가공에서의 델타 볼륨 분해는 곧 선반 가공에서 특징형상 인식과도 그 맥락을 같이 한다. 앞서 설명한 CGS에서 델타 볼륨은 ISO 14649에서 정의하고 있는 특징형상을 인식하는 기본 정보가 되기 때문에 델타 볼륨을 분해하는 것은 곧 선반 가공 특징형상을 인식하는 것과 동일한 것이라 할 수 있다. 선반가공 특징형상 인식과 관련하여 기존의 연구를 살펴보면 아래와 같다.

Kyprianou는 가공 특징형상 인식에 edge의 convexity에 기반한 형상 문법을 이용하였고 이를 GT 개념을 이용해 형상을 분류하였다[5]. Jakubowski와 Li는 구멍 패턴 인식 방법을 이용하여 선반 가공특징형상을 인식하였다[6][7]. Sahay 등은 profile의 convexity 정보를 이용하여 제거 볼륨을 구하는 쉽고도 효율적인 알고리즘을 제안하였다[8]. Zang, Wright와 Davies는 EXCAP라는 가공 특징형상을 인식하고 공정 계획을 생성하는 규칙 기반 시스템을 개발하였다[9]. EXCAP은 논문을 통해 발표된 선반 가공 지원 시스템 중 가장 포괄적이고 실제적인 시스템으로 보인다.

그러나 앞서 설명한 방법들의 인식 결과는 공구에 많이 의존하며 한번에 많은 볼륨을 제거하는 선반 가공의 특징을 반영하지 못한 채, 동시에 가공될 수 있는 가공특징형상 들을 분리하여 인식하는 단점을 가지고 있다. 특히 STEP-NC는 가공 특징형상이 하나의 기본 가공 단위이기 때문에 비효율적인 델타 볼륨 분해는 곧 비효율적인 공구 경로 생성으로 이어지게 된다. 그러므로 CGS에서 델타 볼륨 분해 시 CES, ACS로 이어지는 STEP-NC 시스템의 가공 상황을 고려해 합리적인 가공이 이루어 질 수 있도록 델타 볼륨 분해가 디자인 되어야 한다. 또한 기존의 연구에서 간과한 것은 선반 가공 자체의 특징이다. 밀링 가공과는 달리 선반 가공에서는 공구와 공구의 접근 방향, 즉 가상 인선의 위치에 의해서 가공할 수 있는 영역이 달라질 수 있다는 것이다.

본 논문에서는 이러한 선반 가공의 특징을 고려해, 먼저 공구가 주어졌을 경우, 공구의 정보를 이용해 델타 볼륨을 분해하는 방법론을 연구하였고,

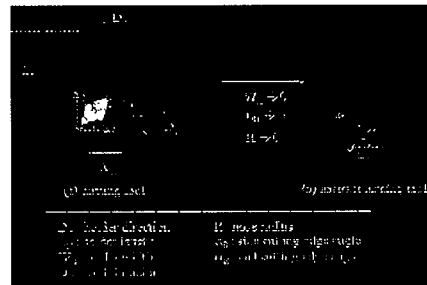
또 다른 방법으로써 현장에서 많이 사용되는 선반 가공의 delta volume의 type을 정의하고 최종 형상의 기하 정보에 근거하여 이들을 인식하는 두 가지 방법론에 대한 연구를 수행하였다.

### 3.1 Tool-based delta volume decomposition

앞서 설명하였듯이 같은 공구라 하더라도, 가상 인선의 위치에 의해서 주어진 델타 볼륨을 가공 가능하지 여부가 결정된다. 그러므로 본 논문에서는 델타 볼륨을 분해하는 과정에서 공구의 형상 및 접근 방향을 반영하였고, 이를 위해 추상화 공구라는 개념을 새로이 도입하였다. 그리고 델타 볼륨을 정의하기 위해 monotone chain을 도입하였고, 또한 선반 공구의 절삭 가능 영역(FMR: Feasible Machining Range)을 정의하였으며, 특징점을 이용해 미절삭 영역을 구하였다 [11].

#### 3.1.1 추상화 공구(abstract tool)와 절삭가능영역

선반 가공에서는 가공 형상에 따라 (i) 절삭 공구의 종류, (ii) 인서트의 가공 방향, 끝 가상 인선의 위치와 (iii) 홀더의 방향이 달라진다. 이 중 선반 절삭 공구에서 가공에서 필요한 정보만을 표시하면 [그림 2]와 같다. [그림 2-(a)]에서  $W_H$ ,  $0$ ,  $L_H$ ,  $R$ ,  $0$  으로 보내면, 반 무한 직선과 방향성을 가진 한 직선으로 공구를 표현할 수 있으며([그림 2-(b)]), 이를 추상화 공구라고 한다.



[그림 2] 추상화 공구

선반 가공에서는 절삭 공구의 절삭 가능 방향에 따라 좌승수(left hand), 우승수(right hand), 중립(neutral)으로 나누어진다. 절삭 가능 방향은 인서트 홀더에 부착됨으로써 인서트의 종류와 홀더의 방향에 따라 절삭 공구의 절삭할 수 있는 영역이 정해지는데, 이를 절삭 가능 영역(FMR: Feasible Machining Range)라 정의한다. 절삭 가능 영역은 인서트의 side cutting edge angle와 end cutting edge angle으로 표현된다. 위의 [그림 2]와 같이 수직선을 기준으로 시계 방향으로 양의 방향으로 하는 side cutting edge angle을  $c_s$ , 수평선을 기준으로 반시계 방향으로 양의 방향으로 하는 end cutting edge angle을  $c_e$  라 하면, 절삭 가능 영역은  $[90 - c_s, 180 + c_e]$ 이다.

#### 3.1.2 Monotone chain

한편, Chain이란 점( $u_i, \dots, u_p$ ) 과 에지( $(u_i, u_{i+1}) : i = 1, \dots, p-1$ )로 된 평면상에서 연결된 선분

들의 집합을 말한다. 이 때, monotone chain은 다음과 같이 정의된다.

**Monotone chain:** Chain  $C = (u_1, \dots, u_p)$ 와 어떤 직선  $L$ 에 수직인 임의의 직선  $L_0$ 이 한 점에서만 만나면,  $C$ 는 직선  $L$ 에 monotone하다[10].

Monotone chain과 앞서 설명한 추상화 공구와 절삭 가능 영역 개념을 이용하여 선반 가공에서 사용되는 공구를 추상화 공구로 일반화 하고, 형상의 profile을 하나의 chain으로 가정하고 monotone chain이 성립된다면 그 profile(chain)에 대해 절삭 가능 영역 개념을 이용하여, 선반 공구(추상화 공구)로 가공할 수 있는지의 여부를 판단할 수 있다.

### 3.1.3 Delta volume decomposition

선반 가공에서 델타 볼륨 분해는 절삭 공구의 종류에 따라 달라진다. 곧, 델타 볼륨 분해는 선택한 절삭 공구로 가공할 수 있는 영역을 나누는 것이다. 본 논문에서는 어떤 델타 볼륨을 1 개의 절삭 공구로 완전히 가공할 수 있으면 이것을 **기본 델타 볼륨(simple delta volume)**이라 정의한다. 본 논문에서는 기본 델타 볼륨을 바탕으로 3가지 type에 대한 델타 볼륨을 정의하고 분해를 수행하였다.

#### 3.1.3.1 Primary delta volume decomposition

최종 가공 형상과 소재의 형상이 [그림 3-(a)]와 같을 때, 가공해야 할 델타 볼륨은 [그림 3-(c)]와 같다. 이를 [그림 3-(b)]의 절삭 공구를 이용하여 가공하면, [그림 3-(d)]의 A1에 해당하는 델타 볼륨만 가공 가능하고, A2에 해당하는 델타 볼륨은 가공할 수 없다. 이때 A1은 주어진 절삭 공구로 가공 가능한 최대의 델타 볼륨이다. 이와 같이 임의의 델타 볼륨에서 주어진 절삭 공구로 가공 가능한 최대의 볼륨을 **최대 기본 델타 볼륨(maximal simple delta volume)**이라 하고, 델타 볼륨의 profile이 monotone chain일 때, 선택한 절삭 공구로 가공 가능한 최대 기본 델타 볼륨을 **주 델타 볼륨(primary delta volume)**이라 한다.



[그림 3] 델타 볼륨 분해 예

#### 3.1.3.2 Un-cut volume decomposition

위의 [그림 3-(d)]의 A2와 같이, 델타 볼륨의 profile이 monotone chain일 때, 델타 볼륨에서 해당 최대 기본 델타 볼륨을 뺀 나머지 델타 볼륨을 **미절삭 델타 볼륨(un-cut delta volume)**이라고 한다. 특징점에서의 미절삭 델타 볼륨은 다음과 같이 인식된다. 특징점을  $P_0$ 라 하고,  $P_0$ 에서 end edge direction 방향으로 쏜 ray가

profile과 만나는 점을  $P_i$ 라 하면,  $P_i$ 가 segment  $(P_u, P_{u+1})$  위에 있을 때, 연속하는 일련의 segments  $(P_0, P_1), (P_1, P_2), \dots, (P_u, P_{i+1}), (P_i, P_0)$  을 윤곽으로 하는 볼륨이 미절삭 델타 볼륨이 된다.

#### 3.1.3.3 Inherent delta volume decomposition

선반 가공 형상 중 cut-in이나 groove는 형상에 따라 제한된 공구를 사용하여 가공해야 한다. 따라서 이러한 형상의 가공은 다른 부분의 가공과는 별도로, 다른 부분의 가공을 마친 후에 공구를 바꾸어서 가공하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 이러한 가공형상에 해당하는 델타 볼륨을 **고유 델타 볼륨(inherent delta volume)** 이라고 정의한다.

고유 델타 볼륨은 다음의 조건중 하나를 만족하면, 해당 segment들은 고유 델타 볼륨의 profile이 된다. 첫째, segment가 원호이고, 시작점과 끝점 사이의 거리가  $D$ 보다 작다. 둘째, sub-chain  $C = (V_i, \dots, V_{i+n})$ ,  $n > 1$ 에서,  $V_i, V_{i+n}$ 은 볼록점,  $V_i, i < j < i + n$  는 모두 오목점이고,  $|V_i - V_{i+n}| < D$  이다.

#### 3.1.4 Complete procedure

이상에서 델타 볼륨의 종류와 각각의 인식 방법을 기술하였다. 형상이 주어졌을 때, 델타 볼륨을 주 델타 볼륨, 미절삭 델타볼륨, 고유 델타 볼륨으로 분해하는 알고리즘은 다음과 같다.

**Step1:** 셋업이나 기계 구성에 따라 profile을  $N$  개로 분할하고, 각 profile에 대해 아래의 과정을 행한다.

**Step2:** 고유 델타 볼륨을 인식한다. 인식한 고유 델타 볼륨을 저장하고, 입력 profile을 갱신한다.

**Step3:** 새로운 profile에서 가장 작은 개수의 monotone chain이 얻어지는 기준선을 구한다. 구한 기준선에 대하여 monotone chain을 구한다.

**Step4:** 여러 개의 monotone chain이 구해졌을 경우, 연속하는 monotone chain을 선분으로 연결한다. 이를 stitch operation이라 하고, 그 결과로써 maximal monotone chain이 얻어진다.

**Step5:** 공구를 선택하고, 선택한 공구에 대하여 maximal monotone chain으로부터 주 델타 볼륨을 인식한다. 생성된 주 델타 볼륨을 저장하고, 미절삭 델타 볼륨이 생성되었을 경우, Step6~7을 따른다.

**Step6:** 미절삭 델타 볼륨에 대해, 다른 절삭 공구 이용하여 Step5을 수행한다. 이때, 미절삭 델타 볼륨의 profile이 monotone chain이면 (i) 주 델타 볼륨 절삭에 사용된 공구에 비해 인서트 각도가 작은 인서트, 곧 FMR이 큰 공구를 사용하거나, (ii) 주 델타 볼륨 절삭에 사용된 공구의 역방향 공구를 사용한다. 미절삭 델타 볼륨의 profile이 수평선에 수직인 segment를 가지는 monotone chain이면 (i) grooving 인서트나 (ii) 주 델타 볼륨 절삭에 사용된 공구의 역방향 공구를 사용한다.

**Step7:** Step6에서 미절삭 델타 볼륨에 대해 또 다시 미절삭 델타 볼륨이 생성되면 기본 델타 볼륨으로 설정하고, 적합한 공구를 지정한다.

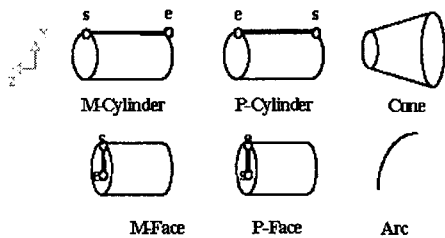
### 3.2 Feature-based delta volume decomposition

3.1절에서 설명한 delta volume 분해 방법은 공구가 먼저 주어져야만 한다는 제한점이 있다. 그러나 일반적인 공정 계획에서는 가공 영역을 먼저 결정하고 그것을 가공할 수 있는 공구를 선택하는 것이 일반적이다.

현장에서는 먼저 외경 가공을 통해 가능한 많은 볼륨을 제거하고, 단면 가공이나 grooving 가공, 내경 가공 등을 수행한다. 이러한 현장의 procedure에 근거하여 이 방법에서는 선반 가공에서의 delta volume을 크게 outer profile, inner profile, end-face, groove로 정의하고 이를 인식하는 방법을 고려하였다. 이를 위해 먼저 파트의 에지를 크게 4가지 타입으로 구분하고 이들이 어떻게 연결되는지에 따라 4가지 delta volume 중 한 가지로 인식이 된다.

#### 3.2.1 types of edge

본 논문에서는 파트 형상의 edge를 아래의 [그림 4]와 같이 4가지 형태로 정의하였다.



[그림 4] Types of edge

- Cylinder : 회전축과 평행한 edge. Cylinder의 경우 edge의 방향에 따라 Minus cylinder, Plus cylinder로 구분.
  - \* Minus cylinder (M-cylinder) : Edge의 Z값이 음의 방향으로 증가하는 것.
  - \* Plus Cylinder (P-cylinder) : Edge의 Z값이 양의 방향으로 증가하는 것.
- Face : 회전축에 수직인 edge. Edge의 X값의 변화에 따라 Minus face, Plus face로 구분.
  - \* Minus face(M-face) : Line의 X값이 음의 방향으로 증가하는 것.
  - \* Plus face(P-face) : Line의 X값이 양의 방향으로 증가하는 것.
- Cone : Cone은 위의 [그림 4]에서 알 수 있듯이, curve가 line이며 시작과 끝점의 X, Z값이 모두 다른 profile.
- Arc : curve의 type이 arc 인 것을 profile.

#### 3.2.2 Types of delta volume

본 알고리즘에서는 델타 볼륨을 아래의 [그림 5]와 같이 크게 outer profile, inter profile, groove, end face로 정의하였다.

- Outer profile: 주로 외경 가공에 의해 제거되는 볼륨으로 형상의 바깥 부분의 profile을 말한다.
- Inter profile : inter profile은 형상에서 내경 가공에 의해 제거되는 볼륨을 말한다.



[그림 5] Types of delta volume

- Groove : 형상에서 홈과 같이 수직 혹은 수평으로 들어간 부분으로써 이를 가공하기 위해 특수한 공구가 필요한 형상을 말한다.
- End face: 회전축에 수직인 face로 구성되는 volume으로 단면 가공에 의해 제거되는 볼륨을 말한다.

#### 3.2.3 기본 가정 및 정의

선반 가공은 소재를 선반 기계의 chuck에 물린다는 특징이 있기 때문에 선반 가공의 델타 볼륨을 인식하기 위해서는 형상의 어느 부분이 chuck에 물리는지를 정의하여야 한다. 본 논문에서는 항상 CAD 정보의 geometry에서 left side 부분을 chuck에 물린다고 가정하였고, 좌표계의 원점은 소재의 가장 오른쪽 부분과 회전축과의 교점을 원점으로 정의하였다.

선반 가공의 형상은 그 특징상 2D profile을 회전축으로 회전 시킨 형상이므로 본 논문에서는 3D 형상으로부터 2D 프로파일을 추출하고, 이로부터 델타 볼륨을 인식한다. 이를 위해 2가지 형태의 face와 4가지 type의 point를 정의하였다.

- Left end face (이하 LEF): 최종 형상에서 Z값이 가장 작은 face.
- Right end face (이하 REF): 최종형상에서 Z값이 가장 큰 face.
- Left up point (이하 LUP): LEF에서 X값이 가장 큰 point.
- Right up point (이하 RUP) : REF에서 X값이 가장 큰 point.
- Left down point (이하 LDP): X값이 0인 point 중 Z값이 가장 작은 point.
- Right down point (이하 RDP): X값이 0인 point 중 Z값이 가장 큰 point.

#### 3.2.4 Separating element

본 논문에서 이 방법론의 기본 아이디어는 최종 형상을 감싸는 outer profile을 생성하여 한번에 많은 볼륨을 제거하고, 남은 부분을 가공함으로써 실제 현장과 유사한 delta volume을 생성하는 것이다. 앞서 edge를 4가지로 구분하였는데, outer profile은 이들 edge들을 연속해서 생성함에 의해 이루어진다. 그러나 최종 형상에 groove 등이 있을 경우 outer profile에서는 이들을 제외해 주어야 한다. 일반적인 선반 공정에서는 groove의 경우 M-face, P-cylinder와 같은 face가 있을 때 생성된다. 이처럼 outer profile의 연결을 단절 시키고, groove를 생성하게 만드는 edge를 Separating element라고 정의한다.

### 3.2.5 Outer profile의 인식

앞서 선반의 chuck이 형상의 왼쪽에 몰린다고 가정하였기 때문에 outer profile을 찾기 위한 방법은 REP로부터 시작한다. 먼저 RUP를 가지는 REF의 type을 통해 outer profile을 구성하는 element의 시작을 찾을 수 있다. 만약 RUP를 가지는 REF의 type이 face이면, RUP를 start point로 가지는 element에서 outer profile로 시작한다. 그러나 REF의 type이 cone이나 arc라면 그 REF부터 outer profile을 찾기 위한 알고리즘을 시작한다. Outer profile은 element의 type에 의해 outer profile에 포함시킬지 여부를 결정하는데, 만약 element가 M-Face나 P-Cylinder가 아니라면 그 element를 outer profile에 추가하고, M-Face나 P-Cylinder인 경우 groove 델타 볼륨 분해 알고리즘을 수행한다. 이것을 Left end face를 만날 때 까지 진행 방향의 element들에 대해 수행하여 하나의 outer profile을 생성한다.

### 3.2.6 Groove의 인식

groove는 3개의 element로서 구성이 되며 그 중 하나는 반드시 separating element이다. 즉, separating element는 groove를 인식하는데 결정적인 단서가 된다. 바깥 형상에 대해서 groove는 다음과 같이 두 가지 종류가 있다.

- Horizontal groove (H groove) : M-face + M-cylinder + P-face
- Vertical groove (V groove): M-cylinder + P-face + P-cylinder

그러므로 각각의 groove에 대해 H groove의 경우 M-face의 next element와 그 next element의 type이 M-cylinder, P-face라면 H groove가 있음을 알 수 있다. V groove의 경우 P-cylinder가 존재할 경우 P-cylinder의 previous element와 그것의 previous element type이 P-face, M-cylinder라면 groove가 존재함을 알 수 있다.

### 3.2.7 Inter profile의 인식

Inter profile의 경우 RUP의 Z 값이 RDP의 Z 값보다 클 경우 inter profile이 존재한다. 그러나 inter profile의 경우 inter profile이 존재하는지의 여부만 결정되면 나머지는 outer profile을 생성하는 것과 동일한 방법으로 인식할 수 있다. 한 가지 차이점은 outer profile의 경우 separating element가 M-face, M-cylinder인데 반해, inter profile의 경우 separating element는 M-cylinder, M-face가 된다. 그러므로 RDP를 start point로 가지는 element부터 시작하여, REF에 이르기까지 M-face, M-cylinder가 아닌 face의 경우 inter profile에 추가하고 M-face, M-cylinder가 있을 경우 inter groove detecting 알고리즘 적용한다.

### 3.2.8 End face의 인식

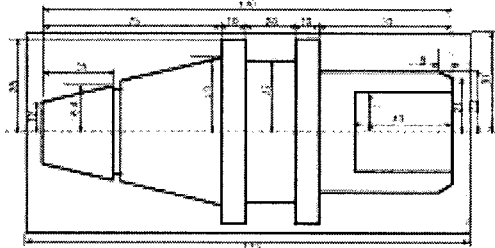
End face는 회전축에 수직인 델타 볼륨으로써 facing 가공에 의해 제거되는 델타 볼륨을 말한다. 본 논문의 이 방법론에서는 최종 형상의 왼쪽과 오른쪽의 face가 회전축에 수직인 경우만 알고리즘에

의해 end face로 정의한다. 회전축에 수직인 다른 face들은 outer profile이나 groove의 일부로써 인식되기 때문에 표면 조도와 같은 특별한 값이 주어지지 않는 한 따로 가공은 하지 않는다.

앞서 언급했듯이 LEF와 REF만 end face로 인식하므로 right(left) end face가 1개만 존재한다면, 그 right(left) end face를 end face로 인식한다. 그러나 2개 이상의 right end face가 존재할 경우, right end face 중 X값이 낮은 face element부터 시작하여 next element를 검색하여 P-cylinder가 있을 경우 groove 인식 algorithm을 적용하고 P-cylinder가 존재하지 않고 다른 right end face를 만날 경우 그 동안의 element들을 inter profile로 생성하고, right end face들을 하나의 end face로 생성한다. Inter profile이 존재할 경우 회전축과 right end face를 연결하는 element를 생성하고 merge operation을 통해 이를 right end face와 합쳐 end face로 인식한다.

## 4. 두 방식의 비교 및 usage scenario

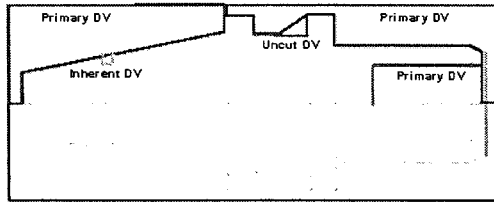
지금까지 STEP-NC 시스템의 구조와 CGS에서의 델타 볼륨 분해에 대한 두 가지 방법론에 대해서 살펴보았다. Tool에 의한 델타 볼륨 분해의 경우 tool을 정해 주어야 한다는 단점은 있지만 tool만 주어지면 델타 볼륨 분해와 그 델타 볼륨이 가공 가능한지 여부는 자동적으로 결정된다는 점에서 장점이 있다. 반면 파트의 형상에 근거해 델타 볼륨을 분해하는 경우 파트의 입력만으로 델타 볼륨 분해가 되지만, 이후 과정에서 tool이 입력될 경우 그 tool로써 해당 델타 볼륨을 가공 가능한지를 체크하는 부가적인 작업이 필요하다. 지금부터는 아래 [그림 6]과 같은 ISO 14649 Part 12 [12]에 있는 complex example을 대상으로 두 방법론을 적용하였을 경우 STEP-NC 시스템에서 최종적인 결과가 어떻게 다른지 비교해 보았다. 사용될 선반 기계는 two turret으로 가공 가능한 기계로 가정하였다.



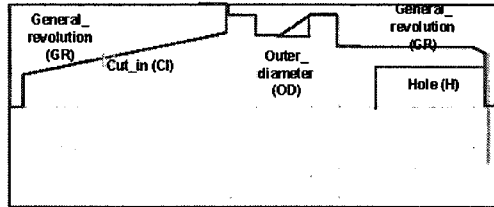
[그림 6] Complex example [12]

## 4.1 Tool-based delta volume decomposition

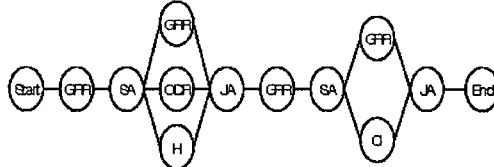
이 파트의 경우 하나의 set up에서 완전히 가공하는 것은 불가능하기 때문에 two setup에서 가공이 이루어져야 한다. 일반적으로 cone이 있는 부분은 척에 몰리기 힘들기 때문에 cone의 반대편을 먼저 가공하고 cone을 나중에 가공하게 된다. 위 예제의 경우 setup이 결정되고 난후 델타 볼륨 분해의 결과 및 CGS, CES, ACS로 생성되는 결과는 다음의 [그림 7]의 순서와 같다.



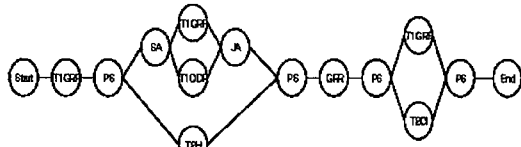
(a) Result of delta volume decomposition



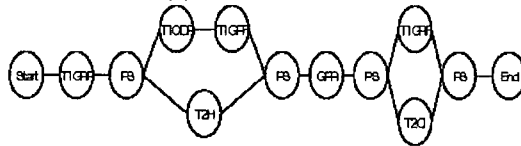
(b) Result of feature mapping



(c) Result of NPSG



(d) Result of HPSG



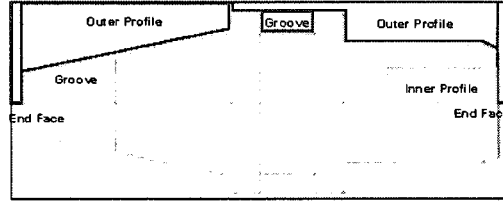
(e) Result of EPSG

[그림 7] Tool-based delta volume decomposition and its usage

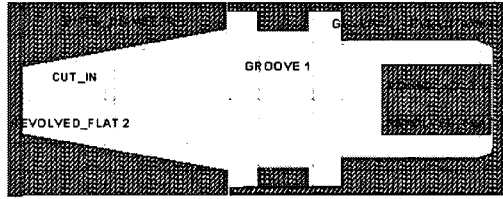
먼저 델타 볼륨 분해 결과 [그림 7-(a)]와 같이 3개의 primary delta volume과 1개의 uncut delta volume, 1개의 inherent delta volume이 구해진다. 분해된 델타 볼륨은 STEP-NC에서 정의하는 가공 특징 형상으로 [그림 7-(b)]와 같이 변환된다. 그리고 공정 계획을 거쳐 [그림 7-(c)]와 같은 NPSG가 생성된다. 여기서 SA는 split-and를 나타내는 것으로써 비선형 공정 계획을 지원하기 위한 것이다. NPSG가 입력으로 들어가 기계의 사양을 반영하면 [그림 7-(d)]와 같은 HPSG가 생성된다. 여기서 PS는 two turret을 이용한 병렬 가공(Parallel Machining)을 나타낸다. 그리고 T1, T2는 각각 turret 1, turret 2를 말한다. 이 HPSG로부터 비선형 공정 계획 요소 내부에서 정한 최적화 기준에 의해 제거되면 최종적으로 [그림 7-(e)]와 같은 EPSG가 생성된다.

4.2 Feature-based delta volume decomposition

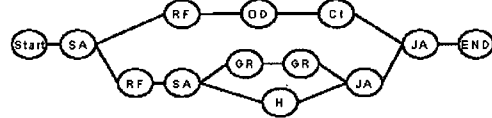
앞서와 마찬가지로 two setup에서 가공한다고 하였을 경우 델타 볼륨 분해의 결과 및 CGS, CES, ACS를 거치면서 얻어지는 결과는 아래의 [그림 8]의 순서와 같다.



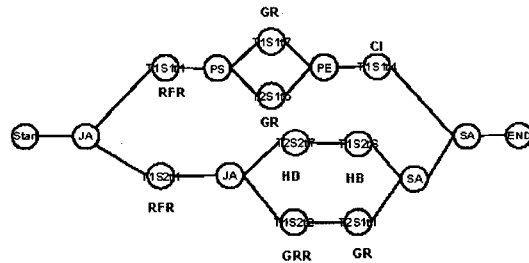
(a) Result of delta volume decomposition



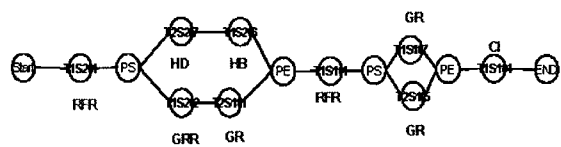
(b) Result of feature mapping



(c) Result of NPSG



(d) Result of HPSG



(e) Result of EPSG

[그림 8] Feature-based delta volume decomposition and its usage

먼저 델타 볼륨 분해 결과 [그림 8-(a)]와 같이 2개의 outer profile, 2개의 groove, 2개의 end face, 1개의 inner profile로 분해된다. 분해된 델타 볼륨은 [그림 8-(b)]와 같이 특징 형상으로 변환된다. 각각의 특징 형상에 공정 계획을 설계하고 가공 순서를 결정하면 [그림 8-(c)]와 같은 NPSG가 구해진다. 여기에 two turret의 machine 정보를 반영하면 [그림

럼 8-(d)]와 같은 HPSG가 구해지며 최종적으로 실행될 EPSG는 [그림 8-(e)]와 같다.

결국 델타 볼륨 분해의 방법 차이로 인해 같은 형상이라 할지라도 가공 하는 방법과 순서가 많이 차이가 있음을 알 수 있다. 두 방법 모두 서로 장단점이 있기 때문에 어느 방법이 낫다고는 할 수 없고, 사용자가 상황에 맞게 적합한 방법을 이용해 델타 볼륨 분해를 수행하여 가공을 할 수가 있다.

## 7. 결론

본 논문에서는 STEP-NC paradigm에 입각하여 CGS, CES, ACS의 3개 서브시스템으로 구성된 분산형 STEP-NC 시스템의 구조를 설계하였다. 델타볼륨 분해는 CGS 뿐 만 아니라 CES, ACS에 영향을 미치는 중요한 알고리즘으로서 2가지 방식: 즉 1) tool을 중심으로 한 델타 볼륨 분해방식과 2) machining feature를 중심으로 한 델타 볼륨 분해의 방법을 개발하였다. 예제형상을 통해서 두 방식의 효율성 및 차이점을 비교하였으며, 또한 이들 알고리즘의 결과가 CGS, CES, ACS를 거침으로서 생성되는 NPSG, HPSG, EPSG를 분석하였다. 본 논문을 통해 발표된 구조 및 알고리즘은 완전가공(complete machining) 및 복합가공(composite machining)을 지원하는 Type 3 (자율제어형) 선반용 STEP-NC 시스템의 모듈로서 활용될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정 연구실 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] International Standards Organization, 2003, TC184/SC1/WG7, ISO14649, Data model for computerized numerical controllers (FDIS version).
- [2] Glantschnig, F., 2000, "STEP-NC is reality," white paper presented in ISO TC184 SC4 Meeting, Charleston, USA, October 17, 2000.
- [3] Hardwick, M., "US STEP-NC implementation," white paper presented in ISO TC184 SC4 Meeting, San Francisco, USA, June 10-15, 2001.
- [4] Suh, S.H., Chung, D.H., Lee, B.E., Cho, J.H., Cheon, S.U., and Hong, H.D., 2001, "Developing an integrated STEP-compliant CNC prototype," ISO TC184 SC4 Meeting, San Francisco, USA, June 10-15, 2001, also in Journal of Manufacturing Systems, 21, 5, 2002, 350-362.
- [5] Kyprianou, L.K., (1980). "Shape classification in computer aided design", PhD thesis, Christ College, University of Cambridge, 1980.
- [6] Jakubowski, R., (1985). "Extraction of shape features for syntactic recognition of mechanical parts," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15, 642-651, 1985.
- [7] Li, R. K., (1988). "A part feature recognition system for rotational parts", *International Journal of Production Research*, 26, 1451-1475, 1988.
- [8] Sahay, A., Graves, G. R., Parks, C.M., and Mann, L. Jr., (1990). "A methodology for recognizing features in two-dimensional cylindrical part designs", *International Journal of Production Research*, 28, 1401-1416, 1990.
- [9] Zang, K.F., Wright, A.J., and Davies, B.J., (1989). "A feature recognition knowledge base for process planning of rotational mechanical components", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 4, 13-25, 1989.
- [10] Preparata, F. and Shamos, M., (1985). *Computational geometry An introduction*. New York Springer.
- [11] Cheon, S., "Delta volume decomposition and process planning for automatic turning machining," M.S. Thesis, POSTECH, 2002.
- [12] International Standards Organization, 2003, TC184/SC1/WG7, ISO14649-12 (DIS-ballot version).