

## 연구로 회전시료조사대 해체를 위한 수중원격 자동절단 방법 개발

### The Development of Underwater Remote Cutting Method for the Disassembling of Rotary Specimen Rack in KRR-1&2

이동규, 이기용\*, 정경환, 이근우, 오원진

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

\*한국생산기술연구원 광주지역본부, 광주광역시 북구 오룡동 1

#### 요 약

연구로 1, 2호기에서 사용되었던 회전시료조사대는 스테인레스 스틸 부품들의 고방사화로 인해 해체폐기물 분류기준에 의하면 중준위급 방사성폐기물로 평가되었으나, 이 부품들을 분리할 경우 회전시료조사대는 저준위방사성폐기물로 처리될 수 있다. 회전시료조사대의 스테인레스 스틸 부품 분리는 작업자의 안전을 위하여 차폐가 가능한 수중에서 수행되어야 하므로, 본 연구에서는 이에 필요한 수중원격 자동절단 방법을 제시하였다. CAM 모델링을 이용하여 공구경로에 따라 NC 코드를 생성하였으며, 안정적 절단을 위하여 절삭력을 일정하게 제어할 수 있도록 기존의 절삭력 모델링을 개선하였다. 모의 회전시료조사대를 대상으로 자동절단 시험을 수행한 결과 회전시료조사대를 수중에서 안전하게 해체할 수 있음이 입증되었다.

#### Summary

The Rotary Specimen Racks (RSRs) were highly activated and then classified intermediate level radioactive waste for the decommissioning of KRR-1&2. The RSR can be treated as low level radioactive waste after removing stainless steel parts. To reduce the volume of intermediate level radioactive waste, underwater cutting is required to separate stainless steel parts from RSR because of high radioactivity. In this study, the automatic remote cutting method was developed to disassemble RSR under water. For automatic remote cutting processes, a CAM (Computer Aided Manufacturing) system is employed. A computer inputs NC (Numerical Control) codes to the controller, which are based on CAM model, and the controller instructs the equipment to process according to NC codes automatically. And the cutting force model was improved to cut RSR stably. The automatic cutting was conducted using imitation of RSR and then it was resulted that the developed automatic cutting method can be safely disassemble stainless steel parts of RSR under water.

## 1. 서론

연구로 1, 2호기(TRIGA Mark II & III) 해체 과정에서 회전시료조사대(RSR, Rotary Specimen Rack)는 알루미늄 본체에 스테인레스강으로 만들어진 부품들이 내장되어 있으며, 잔류방사능이 중준위급 이상으로 평가되어 회전시료조사대 자체를 그대로 처리할 경우 중준위급의 방사성폐기물이 다량 발생함으로써 이의 관리를 위한 차폐용기 개발, 제작비용 및 처분비용 등이 매우 높을 수 밖에 없다.[1] 따라서 회전시료조사대로부터 스테인레스강 부품만을 분리하여 중준위급 방사성폐기물의 양을 최소화할 필요가 있다. 그러나 RSR의 방사능이 높아 작업자의 피폭위험성이 매우 크기 때문에 차폐가 가능한 수중작업이 필요하다.

회전시료조사대의 해체는 연구로 1호기 실험수조(수중 약 4 m) 내에서 절단작업을 수행하므로 육안으로 절단과정을 관찰하기 어려우며 수동으로 운전할 경우 절삭이송 속도의 불안정성으로 인해 공구의 파손과 진동을 유발할 우려가 있고 절삭 정밀도가 저하된다. 본 해체작업을 위한 수중원격제어방법으로 CAM(Computer Aided Manufacturing) 모델링으로부터 NC(Numerical Control)코드를 생성하는 CAM 시스템을 사용하였다.

CAM 시스템은 다축 가공용 머시닝 센터나 터닝센터 등에 널리 이용되고 있는 시스템으로 피삭재를 한번 클램프 혹은 Chucking한 후 동일한 가공기로 최종 다듬질 가공까지 실시함으로써 공정 집약을 실현하고자 도입한 시스템이다. CAM 시스템의 도입으로 제어 기술의 고도화와 더불어 고속, 고정밀도화가 진행되고 있어 복잡한 형상을 고능률로 가공할 수 있게 되었다.

CAM 시스템에 있어 가장 중요한 부분 기능 중의 하나는 충돌 회피 기능이다. 일반적으로 피삭물 형상과 공구를 포함한 공작기계를 솔리드로 표현하고 3차원 솔리드 시스템의 기본 기능인 간섭 체크 기능을 이용하면 충돌 체크가 가능해진다. 본 연구에서는 CAM 소프트웨어에서 모델링된 회전시료조사대의 공구 경로를 설정하고 체크하여 공구와 피삭재 사이의 충돌 없이 안정적인 절삭이 가능하도록 하였다.

한편 제어 기술이 진전됨에 따라 공작기계의 위치결정 정밀도 혹은 가공 속도가 한층 향상되고 있는 실정이다. 이송 구동계에 리니어 모터를 적용하는 일이 일반화되었고 또 수십만 번을 회전하는 고속 주축이 개발되어 고속 영역에서의 가공이 점차 촉진되고 있다. 가공이 고속화되면 생성된 NC 정보도 단시간에 처리할 수 있는 CAM 시스템의 고속화가 요구된다. 또한 공작기계의 고정밀도화도 현저하여 종전에 고려되지 않았던 오차를 보정할 필요가 생기는데 주로 가공 시뮬레이션에 기초하여 오차량을 동정하여 NC 정보를 보정하는 기능이 요구된다.

본 연구에서는 회전시료조사대의 절단시 발생하는 절삭력을 항상 일정하게 유지하면서 절단함으로써 안정적이고 공구 파손을 최소화할 수 있는 수중원격 자동절단 방법을 개발하였다. 회전시료조사대의 CAM 모델링으로부터 1차적으로 생성된 NC 코드를 절삭력 모델링을 통해 시뮬레이션된 절삭력이 일정하게 유지되도록 수정하여 분해장비의 컨트롤러로 전송하는 방법을 사용하였다.

## 2. 절삭력 일정제어를 위한 절삭력 모델링

절삭력 모델이란 실제 절삭을 수행하지 않고 절삭 조건, 공구 형상 정보 등을 프로그램상에 입력함으로써 절삭력을 시뮬레이션 할 수 있는 모델로써 인터넷의 발전 및 급속한 확산에 힘입어 가상현실기법이 점차 구체화되면서 각광받고 있는 시뮬레이션 모델 중의 하나이다.

일반적으로 절삭력 모델은 sin함수를 이용한 일반 칩두께 모델로부터 순간 칩두께를 계산하여 비절삭저항을 곱하여 날당 절삭력을 계산하게 되고 공구 깊이 방향의 매 슬라이스 마다 계산된 절삭력을 합산해 줌으로써 전체 절삭력을 구하게 된다. 본 연구에서는 회전시료조사대의 수중절단 특성에 맞게 기존의 절삭력 모델을 그림 1과 같이 수정 및 개선하였다.

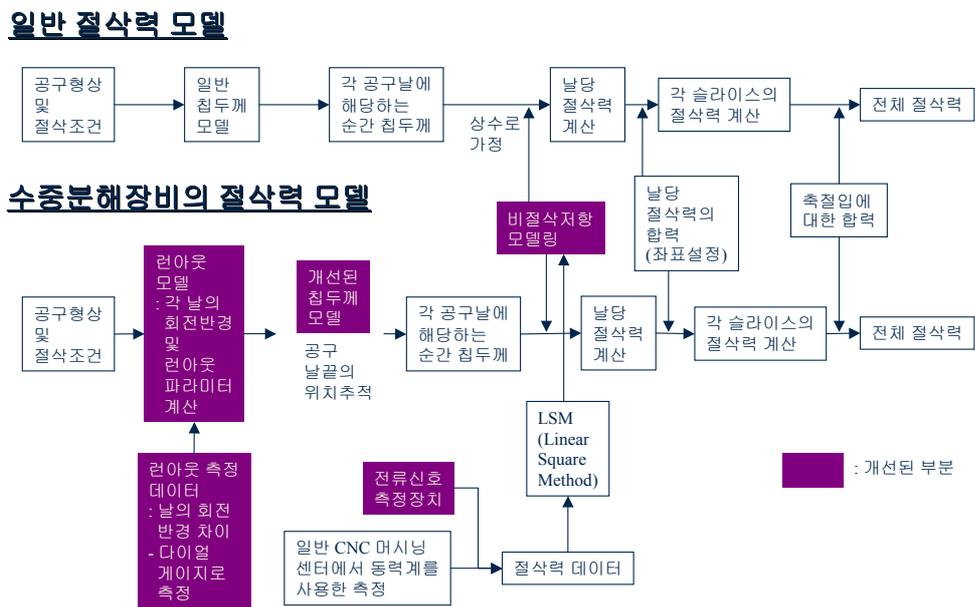


그림 1. 회전시료조사대 수중절단을 위한 절삭력 모델의 구성

### 2.1 런아웃 모델의 개선

절삭 모델의 전개에 있어 가장 중요한 부분 중의 하나가 공구 설치시 발생하는 런아웃 모델이며 런아웃 값에 따라 시뮬레이션되는 절삭력이나 표면 형상이 상당한 차이를 보이게 된다. 런아웃은 공구 홀더의 회전 중심과 장착되는 공구 중심이 달라짐으로 인해 발생한다. 두 중심이 다르기 때문에 각 날의 회전 반경이 원래의 공구 반경과는 달리 각 날마다 달라진다. 실제 측정된 절삭력을 관찰하면 각 날에 따른 절삭력 파형이 서로 다른 것을 볼 수 있는데 이는 런아웃에 의한 영향이 지배적이다.[2]

런아웃은 공구 설치시마다 달라지므로 공구 교환시마다 측정할 필요가 있지만 현재까지 정립된 측정방법이 없는 상태이며, 일부 연구에서는 런아웃과 절삭력과의 상관관계를 통해 런아웃을 추정하고자 시도한바 있다.[3,4] 그러나 이러한 연구들은 먼저 절삭력의 측정이 필요하므로 런아웃 측정을 위한 방법으로 경비면이나 시간면에서 부적절하고 측

정된 절삭력에는 런아웃에 의한 영향 뿐만 아니라 공구의 마멸, 진동 등의 다른 여러 가지 요소의 영향이 포함되어 있으므로 계산된 런아웃 값에 대한 신뢰도가 부족하게 된다.

따라서 본 연구에서는 다이얼 게이지를 사용하여 간편하게 런아웃을 측정할 수 있는 방법을 개발하였다. 다이얼 게이지를 통해 측정되는 값은 각 날이 가지는 회전반경의 차이이며 측정값을 사용하여 런아웃 파라미터인 오프셋 값과 위상각을 계산하기 위해 런아웃 모델링을 하였다.

다이얼 게이지를 사용하여 회전반경의 차이를 측정하기 위해서는 그림 2와 같이 각도계를 설치하여 다이얼 게이지의 축침을 미소한 각도로 회전시켜가며 차이를 측정하고 그 차이가 최소가 될 때 다이얼 게이지의 축침이 회전중심을 향하게 되고 이 때의 측정값이 회전반경의 차이가 된다.

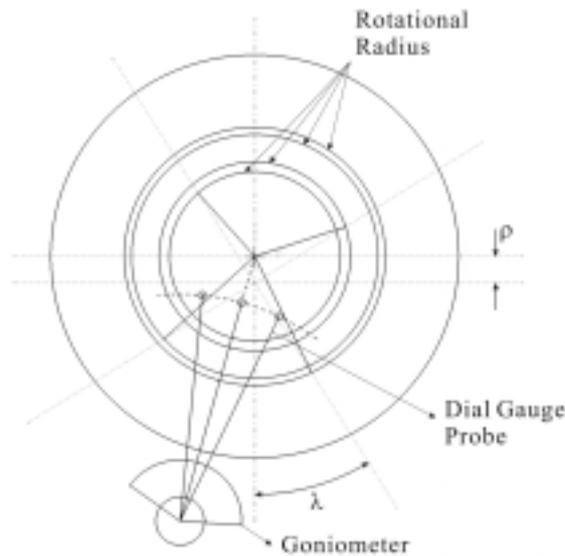
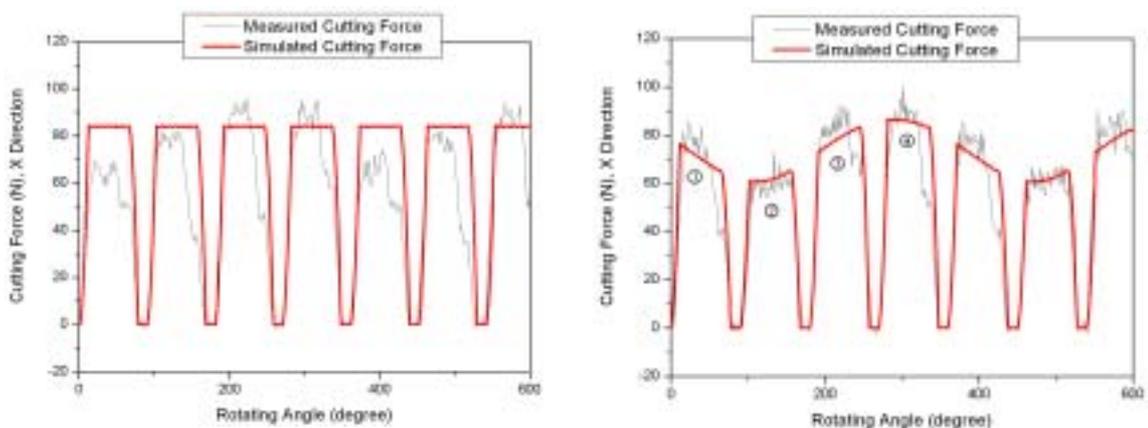


그림 2. 다이얼 게이지를 이용한 회전반경 차이의 측정 방법

런아웃 측정 방법을 검증하기 위해 계산된 런아웃 파라미터를 사용하여 시뮬레이션한 절삭력과 실험을 통해 측정한 절삭력을 비교한 결과를 그림 3에 나타내었다.



(a) 런아웃을 고려하지 않은 경우

(b) 런아웃을 고려한 경우

그림 3. 절삭력 측정값과 시뮬레이션값의 비교

## 2.2 칩두께 모델의 개선

일반적으로 절삭력을 시뮬레이션하는 방법은 칩두께를 계산하여 비절삭저항을 곱하는 방법이다. 여기서 비절삭저항은 공구와 가공대상의 재질, 절삭속도, 이송속도 등 가공조건에 의존하는 함수로서 많은 실험에 의해 데이터가 확보되어 있는 실정이다. 반면 칩두께를 계산하는 방법은 아래식과 같이 sin함수로 간단히 계산하는 방법을 주로 사용하고 있다.[5] 이 방법은 반경방향 절삭깊이가 작아 공구회전각이 작을 경우 큰 문제가 없지만, 슬롯가공과 같이 절삭되는 부분에서 공구회전각이 180°이상 변화하는 가공에서는 그림 4와 같은 문제점이 나타난다

$$t_c = f_t \sin \theta$$

여기서,  $t_c$  : 칩두께  
 $f_t$  : 날당 이송량  
 $\theta$  : 공구회전각

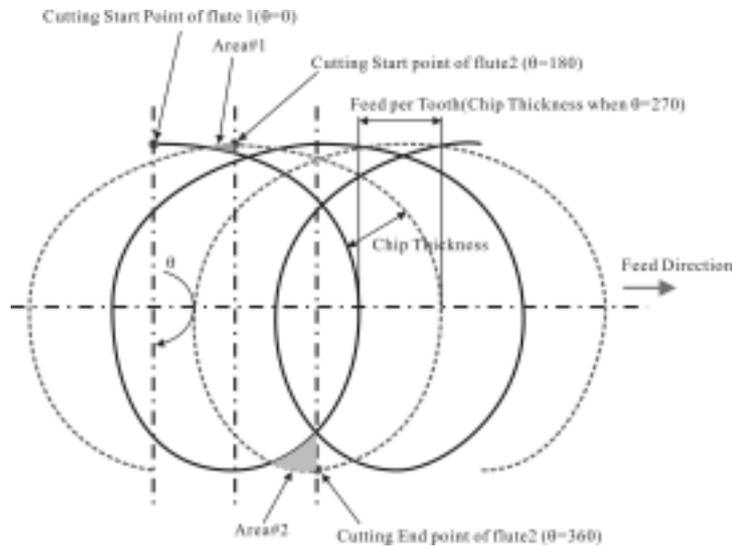


그림 4. 2날 엔드밀의 공구경로와 sin함수 계산에 의한 오차

Fig. 3.1.63에서 실선을 1번날의 위치, 점선을 2번날의 위치라고 하면, 칩두께는 실선과 점선 사이의 차가 된다. 식(1)에 의하면  $\theta=180^\circ$ 에서 칩두께는 0이 되지만 실제로는 Fig. 3.1.63과 같이 0이 아니며 Area #1에 의한 부분이 오차로 발생한다. 또한  $\theta=360^\circ$ 에서 sin함수식은 칩두께를 0으로 계산하지만 실제로는 0이 아니며 Area #2와 같은 오차가 발생하게 된다. Fig. 3.1.63의 경우는 날당 이송량이 매우 크다고 가정하였을 경우이며 실제 절삭시 날당 이송량이 작을 경우는 Area #1영역은 거의 무시할 정도로 작을 것이므로 반경방향 절삭깊이가 작을 경우에는 sin함수식을 적용해도 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 그림 4에서 확인할 수 있듯이 Area #2부분의 오차는 Area #1부분에 의한 오차보다 매우 크므로 슬롯 가공에 sin함수에 의한 칩두께 계산식을 적용하는 것은 바람직하지 못하다는 것을 알 수 있다. 이러한 오차를 제거하기 위해서 그림 5와 같이 칩두께 모델을 개선하였다

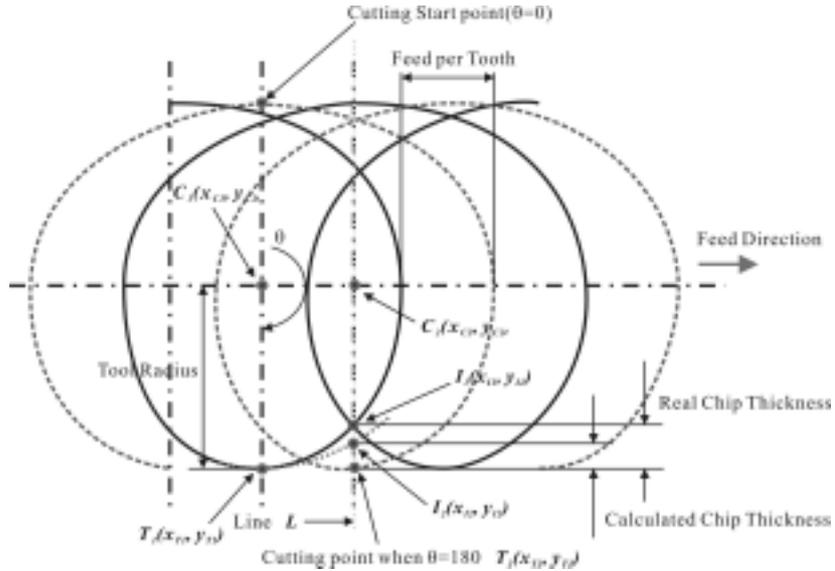


그림 5. 개선된 칩두께 모델의 적용

개선된 칩두께 모델은 sin함수 계산식을 전혀 사용하지 않으며 이산화 모델에서 실제 생성되는 칩두께를 가장 근사하게 계산해 낼 수 있는 방법을 사용하였다. 그림 5는 sin함수 계산식을 사용할 경우 오차 발생 부분이 가장 큰 부분에 대해 개선된 칩두께 모델을 적용한 경우이다. 실제  $\theta=180^\circ$ 에서 발생하는 칩두께는 아래식과 같다

$$t_c = |T_2(x_{T2}, y_{T2}) - I_1(x_{I1}, y_{I1})| = \sqrt{(x_{T2} - x_{I1})^2 + (y_{T2} - y_{I1})^2}$$

그러나 절삭력 모델에서 이산화된 공구 날끝 위치로부터  $I_1$ 을 정확히 계산하기는 어렵다. 따라서 본 모델에서는 현재 공구 날끝의 위치인  $T_2$ 와 날당 위상차인  $180^\circ$ 만큼 앞선 공구 날끝 위치인  $T_1$ 을 구한 후 이 때의 공구 중심인  $C_1$ 을 중심으로  $T_1$ 이 반경이 되는 원의 식을 아래식과 같이 계산한다.

$$(x - x_{C1}) + (y - y_{C1}) = R^2$$

여기서, R : 공구반경

또한, 현재 날끝 위치인  $T_2$ 에 해당하는 공구 중심  $C_2$ 를 구한 후  $C_2$ 와  $T_2$ 가 이루는 직선 식을 아래식과 같이 계산한다.

$$y - y_{C2} = \frac{y_{I2} - y_{C2}}{x_{I2} - x_{C2}}(x - x_{C2})$$

위의 2개의 식으로부터 교점을 구하면 그림 5의  $I_2(x_{I2}, y_{I2})$ 와 같다. 본 모델에서 계산된 칩두께는 아래식과 같이  $I_2$ 와  $T_2$ 의 차이이다.

$$t_c = |T_2(x_{T2}, y_{T2}) - I_2(x_{I2}, y_{I2})| = \sqrt{(x_{T2} - x_{I2})^2 + (y_{T2} - y_{I2})^2}$$

윗 식에서 계산된 칩두께는 그림 5에서 확인할 수 있듯이 오차가 존재한다. 그러나 그림 5는 모델 설명을 위해 가공이 이루어 질 수 없는 큰 이송량을 가지는 경우이고 실제 가공시에 적용되는 이송량에 대해서는 오차 부분이 무시할만한 수준이 될 것이다. 즉,

이송량이 작아질수록 오차는 0에 가깝게 된다. 개선된 칩두께 모델의 특징은 미소 시점에서의 공구 날끝 경로가 원이라고 가정하였으므로 이송량이 작아질수록 가정은 더 잘 성립된다.

제시된 칩두께 모델의 효용성을 검증하기 위해 실험을 통해 측정된 절삭력과 sin함수에 의한 칩두께 모델 및 개선된 칩두께 모델로부터 시뮬레이션된 절삭력을 비교한 결과를 그림 6에 나타내었다. 여기서 절삭력 모델은 Tlusty 등이 제시한 비교적 일반적인 절삭력 모델을 사용하였다.

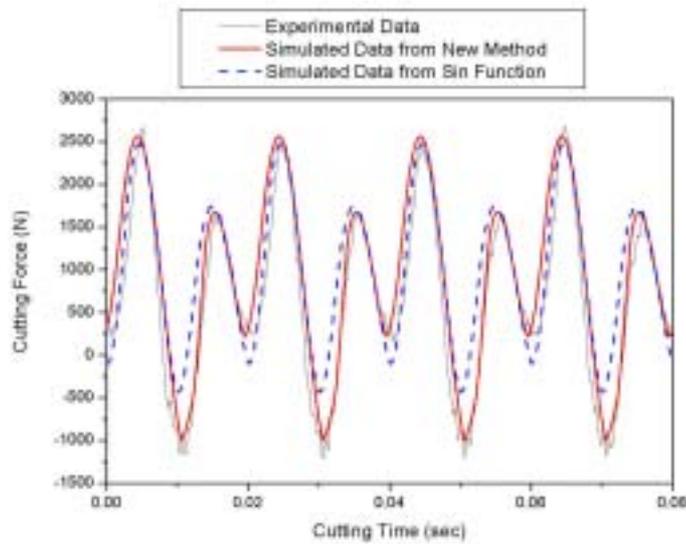


그림 6. 개선된 칩두께 모델과 sin 함수에 의한 칩두께 모델 절삭력 비교

이상과 같은 실험을 통해 엔드밀 슬롯 가공시 새로운 방식의 칩두께 계산법이 sin함수를 통한 칩두께 계산법에 비해 훨씬 효과적으로 절삭력 파형을 예측함을 알 수 있었다. 따라서 슬롯 가공의 경우와 같이 절삭 시작위치와 끝위치에서 기하학적 칩두께를 sin함수 계산식으로 정확하게 예측할 수 없는 경우 본 연구에서 제안한 새로운 방식의 칩두께 계산법을 사용하면 보다 정확한 절삭력 예측이 가능하며 공구에 작용하는 총절삭력의 정확한 예측에도 큰 도움이 될 것으로 사료된다

### 3. CAM 모델링을 이용한 NC 코드 생성

NC 코드는 일종의 프로그램 언어로써 해체장비의 컨트롤러를 제어할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 회전속도, 이송속도, 공구 경로 등의 정보를 포함하고 있다. NC 코드를 생성하는 과정은 작업자가 절단대상의 형상 정보를 측정하여 수동으로 생성하는 방법과 CAM 프로그램을 통해 자동으로 생성하는 방법이 있는데, 회전시료조사대의 경우 절단 공정이 많으므로 CAM 프로그램을 통해 자동으로 NC 코드를 생성하기로 한다. 컴퓨터를 사용하여 자동으로 NC 코드를 생성하기 위해서는 회전시료조사대의 CAM 모델이 필요하다. CAM 모델은 CAD 모델에 공구 형상, 공작물 정보 등이 포함된 것을 의미한다. 이와 같이 생성된 NC 코드는 컨트롤러로 전송되어 입력되고 실제 원격절단을 하기 전 해체장비의 이송 중 충돌을 방지하기 위해 공구 경로를 검증하는 작업을 거친다. 최종적으로

로 검증된 NC 코드는 해체장비에 전송되어 자동으로 절단작업을 수행하게 된다. 그림 7에 수중원격제어를 위한 CAM 시스템을 나타내었다.

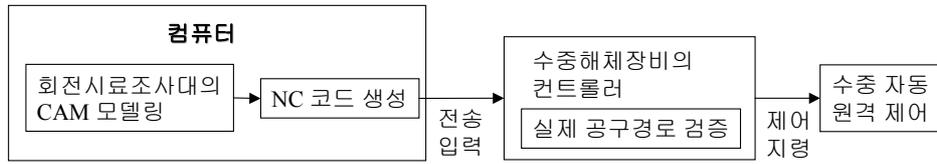


그림 7. 수중원격절단 방법

CAM 모델은 회전시료조사대의 각 부분을 Part 모델링한 후(그림 8) Assembly하였다. NC 코드를 생성하기 위해 공구 경로를 Point-to-Point 방식으로 지정하여 시뮬레이션한 후 수중분해장비의 컨트롤러인 FANUC 컨트롤러에 적합한 NC 코드를 생성하였다. 그림 8은 합쳐진 CAM 모델로부터 NC 코드를 생성하는 과정을 보여주고 있다.

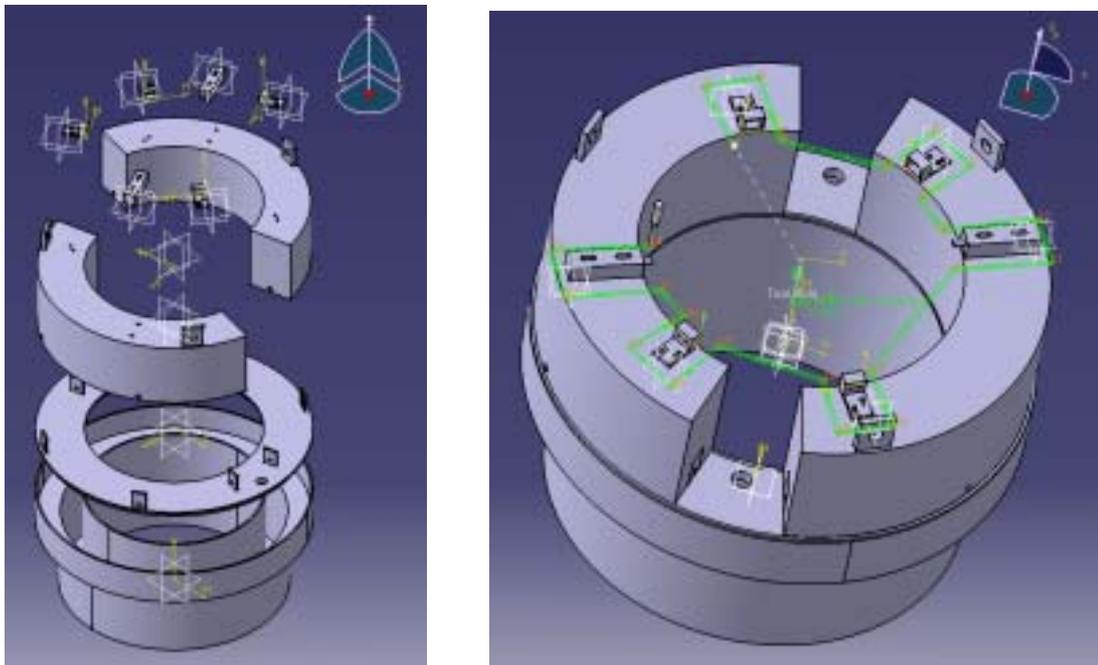


그림 8. CAM 모델(부분별) 및 NC 코드 생성 과정

CAM 모델로부터 생성된 NC 코드는 컨트롤러의 Single Block 모드로 검증 작업을 거치면서 수정하였다. 생성된 NC 코드의 한 예로써 부력탱크의 스테인리스 스틸 볼트 분해 코드와 코드에 대한 설명은 다음과 같다.

```
%
OPART TO BE MACHINED
N10 (=====)
N20 (===  cPost Standard PP for FANUC          ===)
```

```

N30 (=====)
N40 G90 G17 G40
N50 G40 G0 X0. Y0. Z102. M08      ---   가공 좌표 원점 지령
N110 G0 G90 S700 M03              ---   주축회전
N120 F300.                          ---   급속이송 지령
N130 G01 X-172.267 Y205.807 Z109.109
N140 X-233.898 Y318.428 F20        ---   절삭이송 지령, 분해 시작
N150 X-154.317 Y360.256
N160 X-98.315 Y242.596
.
.
.
N350 X-414.007 Y-131.52
N360 X-244.587 Y-61.343           ---   분해 끝
N370 M05                            ---   주축 정지
N380 M30                            ---   프로그램 정지
%
```

생성된 NC 코드에 따라 절삭력 모델링으로부터 절삭력을 시뮬레이션하여 절삭력이 일정하게 유지되도록 NC 코드를 수정하였다. 롱엔드밀로 절단 작업시 절단 깊이를 실제 회전시료조사대의 두께인 6.4mm보다 큰 10mm로 지령하였으며 이는 회전시료조사대의 설치시 설계 및 제작상의 공차와 편심 등을 고려하여 여유를 준 것이다. 이에 따라 회전시료조사대는 그림 9와 같이 절단 깊이가 10mm가 되는 부분이 존재하므로 이 때는 6.4mm의 절단 깊이를 가질 때에 비해 큰 절삭력이 발생하게 된다.(그림 10)

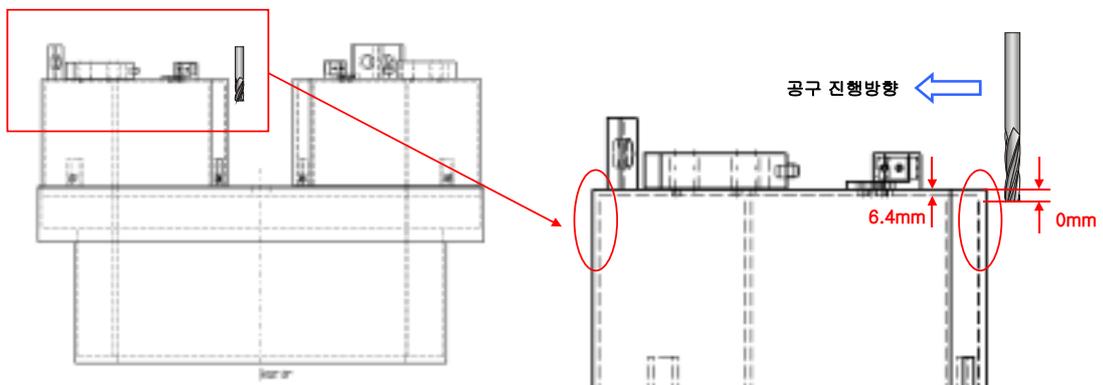


그림 9. 회전시료조사대의 절단 깊이가 달라지는 부분

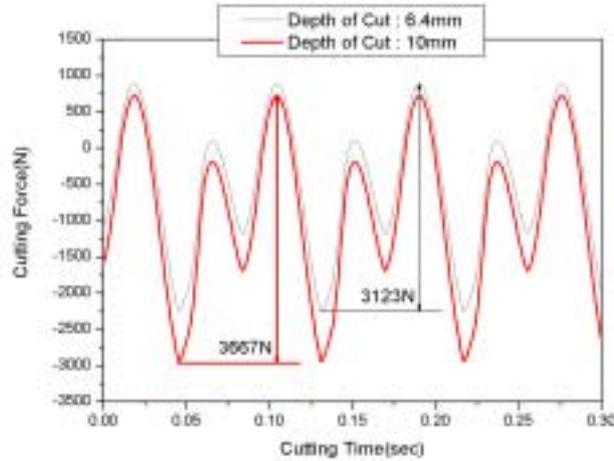


그림 10. 절단 깊이에 따른 절삭력 차이

절단 깊이에 따라 약 500 N 이상의 절삭력 차이가 발생하며 이를 일정하게 제어하기 위해서는 절단 깊이가 10 mm일 때 절삭속도(주축회전속도)를 높이거나 이송속도를 줄여야 한다. 절삭속도를 높이는 방법은 진동을 유발할 우려가 있으므로 본 제어기술에서는 이송속도를 조절하였다. 1차 NC 코드상의 이송속도인 20 mm/min을 10 mm/min으로 감소시켜 절단 깊이 10 mm를 절단할 경우 절삭력 크기는 약 3,100 N으로 6.4 mm의 절단 깊이를 절단할 경우와 거의 차이를 보이지 않는다. 따라서 절단 깊이가 달라짐에 따라 NC 코드를 수정하여 이송속도를 조절하여 줌으로써 절삭력 일정제어를 성공적으로 수행하였다.

#### 4. 원격 자동절단 시험

연구로 회전시료조사대와 동일한 재질(Al 6061T6)로 제작된 모의 회전시료조사대를 대상으로 개발된 자동절단 방법에 따라 원격 자동절단 시험을 실시하였다. 시험은 회전시료조사대 부력탱크의 상부에 스테인리스 스틸 볼트로 고정되어 있는 6개 부품을 대상으로 수행하였다. 시험결과 설정된 공구경로를 벗어나지 않으면서 안정적으로 자동절단이 이루어짐을 확인하였다.



그림 8. NC 코드를 이용한 자동절단 시험

## 5. 결론

연구로에서 사용되었던 회전시료조사대를 수중에서 원격으로 자동절단 할 수 있는 방법을 개발하였다. 회전시료조사대를 수중에서 원격으로 자동절단하기 위해 CAM(Computer Aided Manufacturing) 모델링을 수행하고 운전제어코드인 NC(Numerical Control) 코드를 생성하였다. 또한 절삭력 모델링을 통해 절삭력이 일정하게 유지되도록 NC 코드를 수정함으로써 안정적인 절삭이 가능하게 하였다. 모의 회전시료조사대를 대상으로 수행된 자동절단 시험 결과 선정된 공구 경로를 따라 안정적으로 절삭됨을 확인하였다. 이와 같은 결과로부터 개발된 수중원격 자동절단 방법은 연구로 회전시료조사대를 수중에서 안전하게 해체할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중·장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) 이동규 외, "연구로 1, 2호기 해체에 따른 방사성 고체폐기물 관리방안 연구", 2000 춘계학술발표회, 한국원자력학회, 2000
- (2) 이영문 외, "Effect of Cutter Runout on End Milling Process", 한국정밀공학회지, 제19권 제8호, p. 63~70, 2002
- (3) Wang J. J., "Identification of Cutter Offset in End Milling without a Prior Knowledge of Cutting coefficients", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, p. 687~697, 2003
- (4) Keith A. Hekman, "In-process Monitoring of End Milling Cutter Runout", Mechatronics, Vol. 7, No. 1, p. 1~10, 1997
- (5) Zhang Lei, Zheng Li, "Prediction of Cutting Forces in Milling of Circular Corner Profiles", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, p. 225~235, 2004