



# 코팅드 볼, 평 엔드밀 개발



**서 천 석**

□한국야금(주)  
생산기술부 차장  
□csseo@korloy.com

**관심분야**  
■초경 공구설계 및 고속가공기술



**김 경 배**

□한국야금(주)  
생산기술연구소 소장  
□kbkim@korloy.com

**관심분야**  
■초경 합금 재료 및 PVD 코팅



**유 중 학**

□한국기술교육대학교  
기계공학과 교수  
□jhyoo@kut.ac.kr

**관심분야**  
■금형 고속 가공 기술 및  
친환경 절삭 가공



**고 성 림**

□건국대학교  
기계설계학과 교수  
□sko@kkucc.konkuk.ac.kr

**관심분야**  
■버 제어 기술 및 엔드밀 형상 설계

## 1. 서 론

### 1.1 연구 개발의 필요성

#### 1.1.1 고속 가공이란

소위 HSM(High Speed Machining)이라 일컬어지는 고속 가공 공정은 다른 일반적인 가공보다 각 요소들에 대하여 조건을 일치시키는 것이 중요하다. 이러한 측면에서 고속 절삭은 공구의 내마모성 및 정밀도에 특별한 주의가 필요하며, 설비의 스핀들은 충분한 토크와 회전수를 얻을 수 있어야 한다. 뿐만 아니라 최대 20 ~ 60m/min 이상 요구되는 이송속도는 특별히 설계된 설비와 정밀한 컨트롤러에 의해서만 제어가 가능하며, 절삭할 소재나 공구 그리고 가공조건 역시 정확하게 조합되어야 한다. 모든 요소가 정확히 일치되어 작용했을 때 고속 가공의 효율성

을 충분히 발휘하여 불필요한 시간과 비용을 절감할 수 있게 된다.

이러한 고속 가공을 위한 이론적 배경은 1924년 Salomon 박사는 고속가공 시 절삭속도의 증가에 따

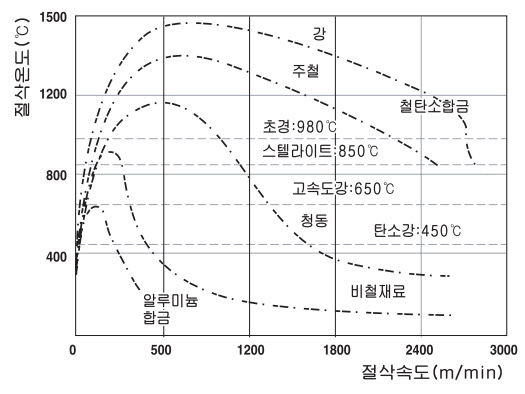


그림 1. Salomon's hypothesis



라 최고의 절삭온도에 도달하는 임계절삭속도가 있으며, 절삭속도를 계속 증가하면 온도는 감소하는 경향을 나타낸 이론을 제안하였다. 즉 임계온도에 도달하는 절삭속도가 존재한다는 것이다. 이 이론이 제안된 이후에 대부분의 논문에서 절삭속도의 증가에 따라 온도가 감소하지 않는다는 것으로 결론을 내렸는데, 그 중에 하나인 McGee는 절삭온도는 절삭속도의 증가에 따라 최고온도에 도달하게 되는데 이 최고온도는 재료의 녹는점과 거의 일치한다고 제안하였다. 즉, 고속가공에서 온도의 감소는 일어나지 않는다는 것이다. McGee는 알루미늄 합금의 녹는점(약 660℃)은 초경합금이나 세라믹 공구가 그 경도를 상실하기 시작하여 공구의 마모가 급속히 진행되는 온도보다 낮기 때문에 가공 최고 온도가 존재하지 않는다고 설명하였다. 이와 같이 고속가공에 관련된 이론은 아직도 명확히 규명되어있지 않으나 중요한 것은 이러한 이론을 근거로 하여 수많은 고속 가공이 실험되어졌고 이를 뒷받침하려는 장비의 출현과 공구의 출현을 유도하였다는 것이다.

### 1.1.2 고속 절삭의 특징

일반적인 가공과 비교해서 고속 가공은 칩의 생성과 배출 과정의 차이로 특징지어질 수 있는데 칩 발생은 상당부분 소재에 의존하므로 다음에 기술된 것들은 소재의 구성 비율에 따라 차이를 두어야한다. 예로써 유동형 칩을 형성하는 연성재료 즉 강, 알루미늄, 그리고 구리와 같은 대부분의 재료가 해당될 수 있는데 이에 대하여 금속 조직학적인 관점으로 봤을 때 연성재료는 칩 배출로 인한 소성변형이 발생되며 전단면에서 연속적인 칩을 발생시키므로 소위 유동형 칩이라는 형태의 것이 나타나게 된다.

이러한 일련의 과정은 그림 2와 같이 전단면에서 소성변형과 연속적인 소재의 전단, 표면에서 칩이 배출됨에 따른 상대적 운동에 의한 마찰, 가공된 소재 표면과 공구 여유면의 상대 운동에 따른 마찰의 순서로 나타나게 된다.

각각의 과정에 대하여 살펴보면 첫째 소성변형과 전단은 가공물의 소성변형에 대한 저항은 이미 알 수 있는 요소이고 이는 변형률은 물론이고 소재에 따라

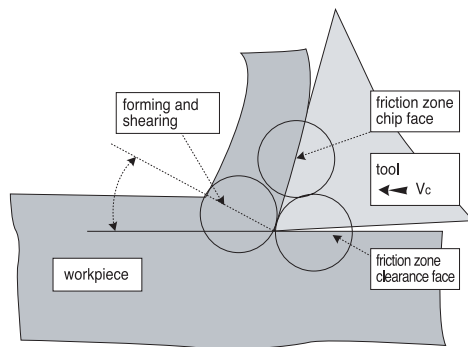


그림 2. 절삭 메커니즘 모식도

다르나 분명한 것은 변형저항은 온도가 증가함에 따라 감소한다는 것이다. 둘째로 일반적인 표면마찰은 서로 상대적인 운동을 하는 두 물체 사이의 저항은 Coulomb의 법칙( $F = \mu \times F_n$ )에 의해 기술되며 마찰계수  $\mu$ 는 상수로 작용한다. 그러나 고속가공에서는 이러한 가정은 사용될 수 없다. 왜냐하면 마찰계수  $\mu$ 는 상수가 아니며 마찰계수  $\mu$ 는 절삭속도의 증가에 따라 감소되고 심한 경우 가공된 피삭재가 용해점에 도달함으로써 칩의 바닥면에 액상층이 형성되기 때문이다. 이러한 표면 마찰의 감소로 칩의 곡률이 증가되는 동안 칩의 압력과 절삭력은 감소된다. 즉 칩의 전단각 감소와 변형을 감소로 이어지게 되는 것이다. 이러한 상태에서 피삭재의 전면은 가공중 전단과 변형 지역이 되며 가공속도의 증가로 인한 경사면 마찰로 발생하는 피삭재의 열발생은 5%정도 줄어든다.

일반적인 가공과 비교해 본다면 고속 가공 메커니즘의 경우가 전체적으로 칩제거가 용이해짐을 이용하므로 가공표면의 열발생 빈도를 낮출 수 있게 되는 것이다. 한편 여유면 마모는 고속 가공시 공구에 발생하는 지배적 마모현상이다. 이것은 이송속도에 따라 크게 변한다. 이송속도에 대한 마모의 변화는 일반적 가공은 물론이고 고속 가공 공구에도 적용할 수 있다. 공구의 수명은 절삭과정 중 여러 가지 중요 변수에 따라 증가되는 이송속도에 의해 감소된다. 이송속도에 따라 소재의 변형저항이 증감하므로 각각에 인가되는 역학적 하중은 레이디얼 피드를 낮춤으로



가능하고 통상적으로 경제적인 공구 수명을 고려 할 때 공구 지름의 5 ~ 10%를 초과하면 안된다.

이러한 고속 가공 기술들을 응용하게되면 절삭저항은 약 30%이상 감소가 가능하고, 이송속도는 5 ~ 10배 정도를 향상시킬 수 있으며 피삭재로의 열전달을 억제한 상태로 작업하므로 정밀도 향상이 가능하며 전체적인 칩제거율을 40%이상 늘릴 수 있게 된다. 다시 말하면 피삭재의 가공 정밀도를 비약적으로 향상시킬 수 있으며 가공능률 역시 현저히 높아지므로 생산성이 향상될 수 있다.

### 1.1.3 고속 가공용 엔드밀의 기술적 의의

종래의 절삭 가공 기술은 그림 3에서 보는 바와 같이 공구에 사용되는 소재에 대한 개발이 이루어지지 않아 고 절입, 저 이송속도를 유지한 채 가공을 함으로써 생산성이 현저히 떨어 질 수밖에 없었다.

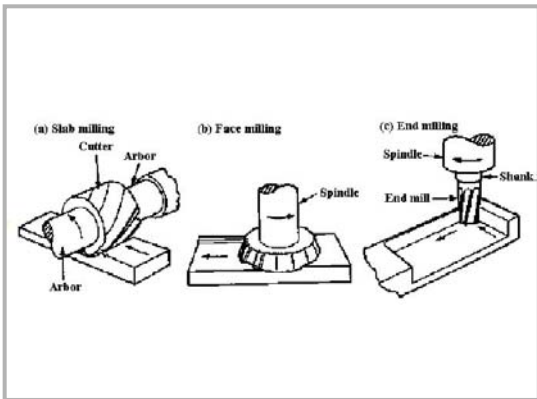


그림 3. 고절입, 저이송 가공 실예

그러나 최근의 엔드밀은 공구의 재질뿐만 아니라 코팅에서도 비약적인 발전을 가져와 머시닝센터나 밀링 머신에서 중심적인 공구가 되었으며 보링머신, 플라노밀러 등의 대형 설비에도 필수불가결함은 물론이고 최근의 경향은 고속 가공 기술의 확대와 더불어 회전 장치를 갖춘 NC선반인 터닝센터나 선반에 까지 적용이 확대되고 있다.

특히 향후 적극적인 적용이 예상되는 엔드밀을 이용한 고속 가공의 장점으로는 고속절삭의 특성인 절삭시의 낮은 전단력에 의한 빠른 이송속도의 구현이

가능하고, 이에 따른 절삭능력을 활용하여 높은 표면 정밀도에 의한 부수적인 공정 감축이 가능하며, 절삭 시 생성된 절삭열이 고속으로 칩과 같이 방출되어 냉각효과를 얻으므로 가공물의 변형 방지가 가능한 이점 등이 있다.

이와 같이 엔드밀은 다양한 가공 영역에 사용되고 있고 또한 고속가공에 적극적인 채용이 시도되고 있으나 한편으로는 구조적으로 세장비가 큰 공구이기 때문에 여러 가지 문제점들을 근본적으로 안고 있다.

고속 가공에 적용 할 수 있는 엔드밀의 품질은 크게 나누어 가공 정밀도 부분과 공구의 수명으로 크게 구별할 수 있는데, 엔드밀의 경우는 세장형 공구로서 일반적인 절삭상태에서 나타나는 단순 마모나 치핑과 달리 공구의 외경이 작은 관계로 현재의 4,000rpm이하의 설비에서는 저속 영역에서의 사용으로 인한 진동, 휨, 칩 포켓의 한정성 등으로 쉽게 공구가 손상된다. 이러한 문제로 이제까지는 내마모성이나 가공정밀도가 낮은 HSS 엔드밀이 주류를 이룰 수밖에 없었으나 고속 가공에 있어서는 HSS 엔드밀의 내마모성으로는 한계가 있으며 초경 엔드밀의 경우도 낮은 항절력이라는 재료적인 특성과 형상적인 제약으로 인해 한정적인 영역에만 적용해 왔었다.

또한 고속, 고이송 영역이라 할 수는 없지만 고경도 재료에서의 절삭속도는 고속 밀링 가공의 절삭조건 대비 현저히 가공 속도가 떨어진다. 더욱이 HRC 45를 초과하는 피삭재의 경우는 일반 엔드밀로 가공이 불가하여 열처리 이전과 이후로 나누어 가공을 해야 하며 사상가공후의 면조도가 Ra 0.8 정도인 고속 밀링 가공 대비 면조도도 열악하여 추가로 후 공정인 수사상을 실시하여야 하므로 생산성이 급격히 떨어짐을 확인할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서는 고속 고이송 가공에 적용될 엔드밀은 형상적인 측면에서 높은 안정성을 확보함과 동시에 원활한 절삭 칩 배출 공간이 필요하며 인선의 강도를 높일 수 있는 설계 방안이 강구되어야 하고, 재질적으로는 고허절력의 초미립 재종과 TiAlN계의 박막을 적용하여 고속에서의 강성 향상과 고온에서의 안정성을 높인 형태로 개발되



어야 한다. 또한 가공시의 안정성을 유지하기 위해서는 엔드밀의 정밀도 역시 확보 되어야한다. 뿐만 아니라 최적의 공구 사용기술이 동시에 개발되어야만 높은 생산성 향상을 기대 할 수 있다.

#### 1.1.4 고속, 고이송용 설비 동향

일본의 경우 금형의 고속, 고효율 가공을 위하여 8 ~ 9년 전부터 5면가공기 또는 금형 가공용 머시닝센터 등에 적극적으로 채용되기 시작하였으며 지금은 금형가공시 필수적으로 사용되고 있는 상태이며 회전수 영역으로 본다면 회전수 30,000rpm 정도, 이송은 최대 30,000mm/min 정도가 일반화 되어가고 있고 42,000rpm급 장비의 급격한 보급은 물론 최대 8만rpm 정도도 특수하게 제작되어 사용되어지고 있다.

한국의 경우는 특히 금형 가공업계에서 고속, 고이송 가공을 통한 생산성 향상을 위해 부단히 노력해 온 결과 최근 전시회의 경우 대다수의 설비 제조업체에서 스핀들 속도 2만rpm, 이송속도 최대 30,000mm/min 정도의 것들을 출시하고 있으며 40,000 ~ 60,000rpm급 스핀들에 대한 연구개발 역시 활발히 이루어지고 있다. 회전수 영역별로는 금형 제조업체의 경우 30,000 ~ 42,000rpm급의 외산 고속장비들이 적극 도입되어 사용하고 있는 것으로 파악되고 있다.

#### 1.1.5 고속 가공을 위한 엔드밀의 요소 기술

고속 고이송 영역에서 고정밀도 가공이나 난삭재 가공을 위해서는 아래와 같은 요소 기술들이 개발되어야 함을 알 수 있다.

- 상온에서의 경도뿐 아니라 고속 고이송 가공시 문제되는 고온경도를 만족시키고 인성 및 내충격 열충격과 내산화성 내용착성을 만족해야하며 세장비가 큰 공구의 경우 변형에 의한 가공 정밀도 예방 저하를 위한 재종 및 박막 개발이 필수적이다.

- 고속가공의 최대 장점은 추가적인 후 공정 없이 소정의 정밀도 및 가공시간의 단축을 들 수 있는데

이는 공구의 정밀도 유지와 고속가공시 동특성에 의한 공구의 손상에 대비키 위한 방안 마련을 위해서는 연삭기술 및 정밀도 향상방안이 강구되어야한다.

- 공구의 설계적인 측면에서 원활한 칩 배출, 절삭저항 감소, 진동발생 방지, 실험적인 검증을 통한 DB의 구축과 이를 토대로 하는 공구 전문 설계 및 형상개발이 이루어져야 한다.

이러한 일련의 작업은 실험적인 검증 과정과 이론적인 측면에서 동특성 분석 등 전문적인 기법에 의해 가능하며 그 외 부가적으로 환경 친화적인 요소를 고려한 조건의 정립이나 진동 및 정밀도 유지, 공구 수명의 향상을 위해 고속절삭 영역에서 사용 가능한 클램핑 시스템의 개발도 필요하다.

## 2. 본 론

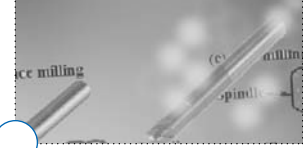
### 2.1 기술개발의 목적 및 중요성

근래에 적극 채용하고 있는 고속 가공의 장점으로는 고속절삭의 특성인 절삭시의 낮은 전단력에 의한 빠른 이송속도의 구현이 가능하고, 이에 따라 높은 절삭능력을 활용한 표면 정밀도의 구현으로 부수적인 공정 감축이 가능하며, 절삭시 생성된 절삭열이 고속으로 칩과 같이 방출되어 냉각효과를 얻으므로 가공물의 변형 방지가 가능한 이점 등이 있다.

따라서 고품질의 엔드밀은 고속 가공화가 진행됨과 더불어 더욱 부각되고 있으며 점차 고경도화 되어가는 피삭재에 대응할 수 있는 엔드밀의 재질 및 박막 개발의 필연성과 엔드밀의 형상적 한계의 극복이라는 과제를 동시에 갖고 있다.

고속 가공에 적용 할 수 있는 엔드밀의 품질은 크게 나누어 재질적 측면과 가공 정밀도로 크게 구별할 수 있는데, 특히 고속, 고이송 영역에서의 열적안정성과 내마모성을 갖기 위해서는 재질적으로는 고풍절력의 초미립 재종과 TiAlN계의 박막을 적용하여 고속에서의 강성 향상과 고온에서의 안정성을 높인 형태로 개발되어야하며, 형상적으로는 인선의 강도를 높일 수 있는 설계 방안이 강구되어야 하고 가공시의 안정성을 유지하기 위한 정밀도 역시 확보 되어





야한다. 이러한 차원에서 1단계에서는 아래와 같은 요소 기술 개발이 수행되어졌다.

- 고속 고이송 가공에 적합한 조정 재종 및 PVD 박막 개발.
- 가공 정밀도 향상 및 공구 손상에 대비키 위한 연삭기술 및 정밀도 향상.
- 공구의 절삭 Test 및 특성 분석 등을 통한 DB의 구축과 이를 토대로 하는 공구 설계 및 형상 개발용 S/W의 개발 및 환경친화적인 요소를 고려한 무윤활 절삭 조건의 실험.

그러나 이러한 일련의 개발 출력물들은 앞으로 더욱 고속화, 고지능화 되어가는 현실을 감안 할 때 한 단계 높은 수준의 기술을 구현해 줄 것이 요구되어지고 있다. 따라서 신규 개발되는 고속엔드밀은 고속, 고이송용 동작기계를 보유하고 이를 활용하는 업체인 주로 자동차 부품류를 생산하는 업체와 금형 생산업체가 주요 수요처라고 볼 수 있으며 근래에는 고속 밀링 가공의 위력이 확인되어 더욱 급속히 확산되고 있어 그 시장 잠재력은 더욱 커지고 있으므로 한 단계 향상된 품질의 엔드밀 개발이 필요한 시점이라고 판단되어진다.

## 2.2 연구개발 목표 및 범위

박막 경도, 내산화성 향상 방안 연구 및 흔들림 정밀도를 유지하는 정밀 연삭 기술 확보를 2단계 1차년도 연구개발의 목표로 설정하고 이러한 목표를 실현하기 위하여 다층 박막의 조성 변경을 통한 박막 경도 및 내산화성 개선에 대한 연구, 흔들림 정밀도 향상을 위한 클램핑 치공구의 정밀도 개선 및 엔드밀 외경 연삭시 원통도 향상을 위한 연구를 하도록 계획하였으며, 주변 기술 확보로서 1단계 개발 완료된 소재의 물리적 특성치를 안정적으로 획득하기 위한 양산 수율개선을 통한 소재 품질을 확보하고, 고속 절삭에서 높은 내산화 특성을 확보하기 위하여 타사품과 개발 재종을 이용하여 내산화 Test를 실시하며, 다양한 피삭재와 규격별로 시제품과 선진제품과의

성능 평가를 실시함과 동시에 진동 및 동특성 평가를 통하여 품질과 평가기술 확립 및 피삭재와의 진동 연관도 분석을 연구하고, 고속가공용 공구의 개발 동향 분석 및 이론적 배경 연구는 물론 고속 가공 엔드밀의 개발을 위한 전용 엔드밀 설계 프로그램의 성능향상을 위해 GUI 개발, Data base 구조 향상, 형상 예측용 알고리즘 개선을 통한 고속용 공구 설계용 프로그램의 성능 향상을 연구개발의 범위로 설정하였다.

## 2.3 기술 개발 구조

기술 개발 구조는 그림 4와 같이 한국야금에서는 소재 및 박막을 개발과 엔드밀 가공 기술을 연구하고 시제품을 제작한 뒤 위탁처인 한국기술교육대학교 건국대학교에서 실험에 의하여 도출된 자료를 워드 백 받아 제품의 설계에 반영하여 개선해 나가는 한편 실험에 의해 발생된 Data는 취합 정리하여 DB를 구축함과 동시에 엔드밀 설계 Software의 개발에 활용하였다. 또한 설계 Software에 대한 검증 작업과 엔드밀 제조 공정의 신뢰성 향상을 위한 요소 기술을 지속적으로 개선 연구하는 System을 구축 운영하였다.

## 2.4 기술 개발 결과

### 2.4.1 다층 박막 성능 개선 연구 결과

Al 함유량 증가에 따른 박막 특성 변화 추이에 관한 실험을 실시한 결과 초기 이온 세정 공정이 동일할 시에는 박막의 조성이 변하여도 밀착도에 큰 영향을 미치지 않음이 확인되었으며 스퍼터 파워에 따라 Al의 함유량 증가는 특별한 경향성이 없음을 확인하였다.

분석 결과를 기준으로 Al의 함유량이 그림 5에서와 같이 59.4at% 이상에서는 내산화성 및 박막의 경도가 저하되는 것을 확인하였고 이를 통하여 TiAlN과 TiAlCrN 다층 박막에서 Al의 적정 함유량은 45at% - 60at%로 판단되며 55at% - 60at%가 가장 우수한 결과를 나타내었다. 이때의 내산화 Test를 실시한 결과를 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다.



그림 4. 코팅드 볼, 평 엔드밀의 개발 System

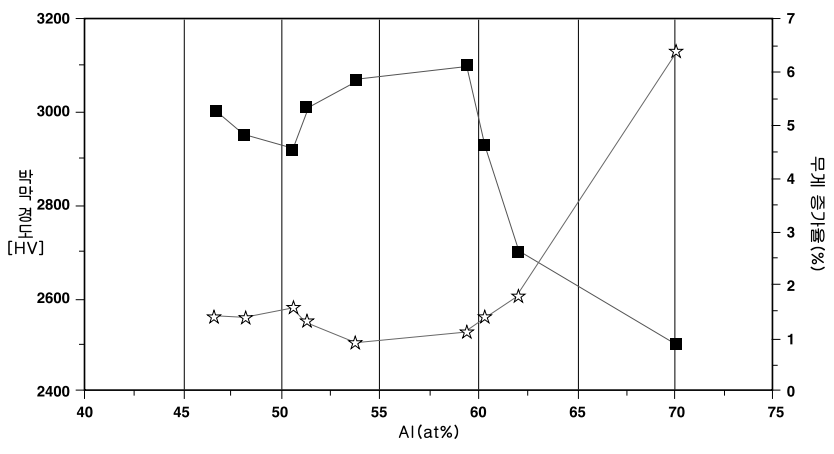


그림 5. Al 함량에 따른 경도 및 내산화 특성

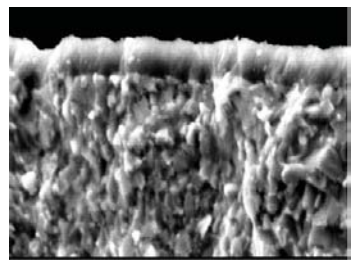


그림 6. 실험 Al 59.4%이상 시료

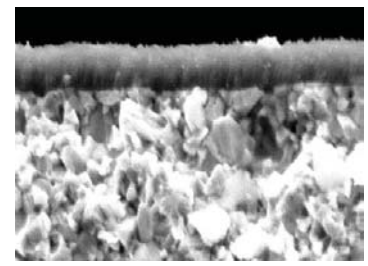


그림 7. 최적 조건하에서 코팅된 시료



### 2.4.2 소재 양산 품질 확보 실험 결과

Pilot Test에서 개발 목표인 HRA 92.7, TRS280Kg/mm<sup>2</sup>이상의 특성을 나타낸 조성을 이용하여 향후 양산화 체제에서 안정적인 합금을 제작하기 위하여 합금내 Carbon의 량을 조절하여 실시한 결과 물성치(HRA, TRS)를 저하시키지 않고 최대한의 내마모성 및 인성을 나타낼 수 있는 Carbon의 함량은 본 조성에서 그림 8과 같이 합금탄소 C영역 ~ H 영역의 범위에서 Carbon을 관리할 경우 물성치 저하가 없는 품질의 합금을 얻을 수 있으리라는 결론을 도출하였다.

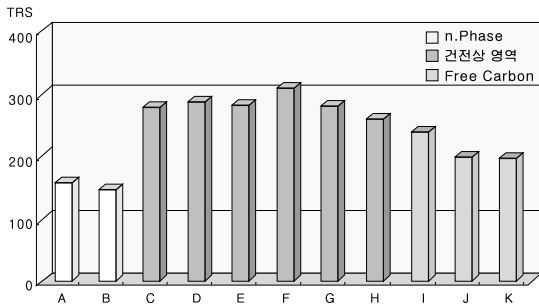


그림 8. 카본 함량에 따른 TRS 변화 추이

### 2.4.3 연삭기술 향상 연구 결과

고속 가공용 엔드밀의 정밀한 제작을 위한 연구로서 엔드밀 자체의 외경 정밀도향상 및 흔들림 정밀도 향상을 위하여 제작 환경을 개선하고 각종 치공규류의 안정화를 위한 연구 및 측정 기술 등에 관한 연구

를 실시하였으며 그 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 연삭 설비를 개조하여 Neck 작업 전용기를 제작하여 Neck부의 가공 정밀도 향상 및 고속 회전시의 균형을 향상 시킴.

- 센터리스 외경연삭 Set up Test를 통해 Blade의 높이 설정을 표준화하였고 가공시 간섭 발생의 우려가 되는 Blade를 개선 함으로써 작업성이 개선되었고 Control 휠의 최적 경사 각도에 대한 검증을 실시하였다.

- 엔드밀의 떨림 정밀도 향상을 위하여 Clamping 방법에 대한 연구를 통하여 최적의 클램핑 기구를 설정하였으며 Clamping 길이별 적용 콜렛의 종류를 세분화하였다.

- 엔드밀의 연삭시 연삭 Error를 최소화하기 위하여 CNC 가공 설비에 대한 Reference 설정 및 정도 향상을 위한 Overhaul 실시 및 진행 중에 있으며 특히 휠 측정 시스템의 보안을 통하여 연삭 Point의 정밀도를 개선하였다.

- 일반적으로 유온의 슬로프와 정밀도는 그림 9에서와 같은 특성을 나타냄을 연구를 통하여 확인하였으며 그 결과 유온 안정 구간에서 외경 편차가 9 $\mu$ m 이내로 안정적이었으며, 흔들림 정밀도의 6 $\mu$ m이내가 Lot 수량 중 77%가 만족하는 결과를 도출하였다.

또한 엔드밀의 강성은 엔드밀 단면의 형상뿐 아니라 휠 스윙 형상에 따라 많은 강성 차이를 나타내게 된다. 이렇게 다양한 형상을 갖는 엔드밀의 강성은

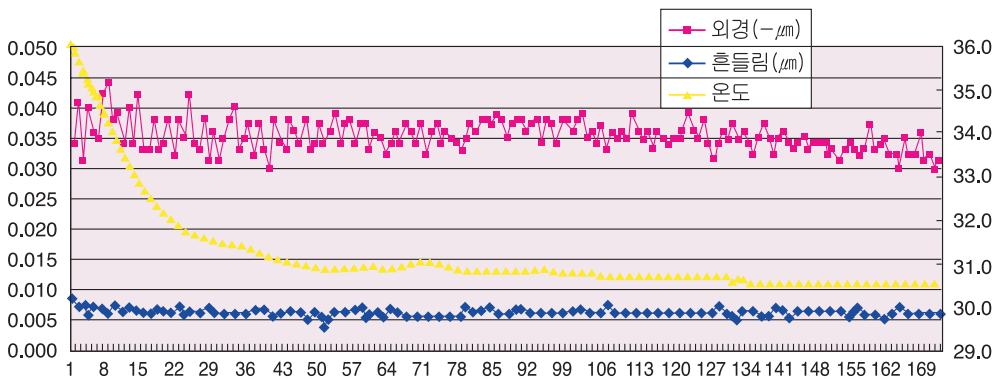


그림 9. 유온에 따른 외경정밀도 및 떨림정밀도 변화 추이



절삭 수명에 중요한 Factor중 하나이나 정량화되지 못하여 별도의 엔드밀 전용 강성 측정 Unit를 제작하였으며, 이를 통해 축직각 단면의 형상에 따른 엔드밀 강성의 변화를 실험적으로 측정 가능하게 되었다.

2.4.4 시제품에 대한 절삭 Test 및 진동 관련 연구 결과 고속 가공용 엔드밀의 경우는 특히 경사각 및 여유각에 따른 영향이 지배적이라는 사실은 많은 실험과 연구에 의해 밝혀진 바 있다. 그러나 다양한 피삭재와 가공조건하에서 형상적인 요소가 가미된 경우에는 정량화 시키고 수명의 예측을 하기에는 아직 무리가 있어 다양한 시제품을 제작하여 직접 절삭 Test를 실시하였고 그에 따른 절삭저항, 가공정밀도, 진동 및 소음 특성 등을 연구한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 경사각과 여유각의 변화에 의한 시제품에 대하여 절삭실험을 통해 절삭력, 가공 정밀도, 표면조도, 공구수명의 값을 비교 분석하여 고속 가공용 평엔드밀의 최적 경사각 및 여유각을 구하였으며 다음의 표 1 및 표 2에 그 결과를 나타내었다.

절삭 실험에 의해 얻어진 절삭 성능 Data를 바탕으로 DB를 구축하고자 특히 절삭력, 공구마모, 가공면

거칠기, 진동가속도, 고유 진동수 등에 대한 그래프, 사진, 데이터가 입력될 수 있도록 계속 자료를 축적 중에 있다. 그밖에 엔드밀의 진동관련 특성 검토를 위하여 유한요소해석법을 이용하여 해석한 결과 시제품에서 고속 가공시 나타나는 진동 모드가 절삭시 문제를 야기하지 않음을 이미 확인하였고, 현장에서 활용 가능한 해석 방법의 도출을 위하여 단순보의 엄밀해를 이용하여 간단하게 구한 고유진동수가 유한요소법의 해석 결과치와 차이점을 분석해 본 결과 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있었고, 따라서 공구의 경계조건을 고정조건으로 볼 수 있다면, 단순보의 엄밀해도 공구의 고유진동수를 계산하는 경우에 이용할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 2.4.5. 엔드밀 최적형상 설계 개발

현재 실험에 의하여 얻어진 값은 DB에 축적하고 있으며 이렇게 구축한 DB를 기본으로 최적 조건을 계산 가능하게 되었으며 지속적으로 DB 확보되는 엔드밀 관련 Data를 이용하여 고속 가공용 엔드밀의 설계를 위한 소프트웨어 개발에 활용되도록 하였다.

얻어진 Data를 기반으로 개발된 엔드밀 최적형상 설계 S/W는 마이크로 소프트의 Visual Basic 6.0을

표 1. 공구형상에 따른 D10.0mm 평 엔드밀의 성능 시험 결과

× ; 불량, △ ; 미흡, ○ ; 양호, ◎ ; 양호

구분	피삭재	-n2 c2	-n2 c1	-n1 c2	-n1 c1	-n2 c2	-n1 c2	-n3 c2	-n2 c3	-n2 c2
절삭력	SKD 11	△	×	△	×	△	△	△	○	◎
	SCM 440	×	△	△	△	△	○	○	◎	○
가공정밀도	SKD 11	○	△	○	○	○	△	○	△	◎
마모	SKD 11(고속)	○	△	◎	×	◎	△	○	×	◎

표 2. 공구형상에 따른 D3.0mm 평엔드밀의 성능 시험 결과

× ; 불량, △ ; 미흡, ○ ; 양호, ◎ ; 양호

구분	피삭재	-n1 c2	-n3 c2	-n1 c1	-n3 c1	-n3 c3	-n2 c3	-n3 c2	-n3 c2(a)
절삭력	SKD 11	◎	○	×	△	△	◎	○	○
	SCM 440	△	○	○		○	×	△	○
가공정밀도	SKD 11	○	○	×	×	○	○	△	△
	SCM 440	△	○	△		○	△	×	△
마모	SKD 11(고속)	◎	×	◎	△	○	△	○	×
	SKD 11(MCT)	△	×	○	×	×	◎	○	△





이용하여 Coding후 Compile 하였으며 프로그램 결과값인 최적화된 엔드밀의 형상 값들은 그동안 실험을 통하여 얻은 각 공구의 최적화 된 결과들을 DB화하였고 원하는 공구의 형상의 값을 얻기 위해 DB안에서 추출한 각 기준값들을 선형 보간(Linear Interpolation)을 이용하여 구하였으며 데이터베이스의 구성은 비주얼 베이직 6.0의 DB 구성요소중 하나인 ADO (ActiveX Data Object)를 사용하였다.

엔드밀의 형상 설계를 위한 단계별 입, 출력 요소로서는 1단계에서는 공구직경, 피삭재, 절삭속도를 입력하여 공구형상 계산과 절삭속도에 따른 가공 여부를 결정하기 위한 범위를 정한다. 2단계에서는 1단계에서 입력받은 Data를 이용하여 범위를 결정한 후 공구형상 계산과 절삭속도에 따른 가공여부를 결정하기 위한 Reference Data를 DB에서 추출하며 3단계에서는 추출한 Reference Data를 기준으로 한 알고리즘(선형보간 : Linear Interpolation)을 이용하여 공구형상과 절삭속도에 따른 가공여부를 계산한다.

프로그램을 실행 시키면 원하는 공구의 최적값을 얻을 수 있도록 피삭재, 공구직경, 절삭속도를 입력할 수 있는 창을 DB에 연결시켜 Reference Data를 추출하여 최적값을 계산할수 있도록 Coding을 하였다.

그림 11의 DB 창을 보면 알 수 있듯이 DB안에서 Record의 추가, 수정, 삭제 등 모든 Data를 원하는 대로 Control할 수 있다. 엔드밀 형상설계 및 절삭조

건 정보 즉 엔드밀 설계 및 절삭조건 정보는 DB에서 추출한 값을 선형보간 (Linear Interpolation)하여 최적화 시킨 값을 생성할 수 있도록 구성하였으며 알고리즘에 의해 계산된 최적화된 공구의 형태, 추천 절삭조건과 공구의 전체 형상을 볼 수 있다.

Cutting Force 등을 포함한 Display에서는 그림 12에서와 같이 절삭조건에 대한 절삭력DB와 함께 각 절삭구간에 대한 절삭력(Fx, Fy, Fz, Ft)과 절삭력 그래프 및 그 구간의 절삭력에 해당하는 마모사진을 볼 수 있다. 특히 공구마모는 공구의 마모에 따라 A, B, C 형으로 나누어 각 구간에 해당되는 마모 사진을 결과창에 출력되도록 하였다.

현재는 형상설계 프로그램과는 따로 떨어져서 독립적으로 실행되고 있지만 차후 절삭력을 비롯하여 표면조도, 공구수명 등을 모두 포함한 통합된 DB를 구축하여 엔드밀의 형상설계에 필요한 모든 정보를 알고리즘에 의해 계산되어 Display 될 수 있도록 개발할 예정이다.

Software의 성능 검증을 위하여 DB에 없는 직경을 입력했을 때 즉 알고리즘에 의한 최적형상 계산을 하는 경우 원하는 공구직경에 대한 정보가 DB에서 추출한 Reference Data를 기준으로 하여 알고리즘에 의해 계산되어 결과창에 출력된 것을 확인할 수 있었으며 절삭속도 변화에 따른 출력 Data 역시 DB에 없는 절삭 속도를 입력 했을 때 원하는 절삭속도에 대한 정보가 DB에서 추출한 Reference Data를 기준으로 하여 알고리즘에 의해 계산되어 그림 13과



그림 10. Data 입력 Form

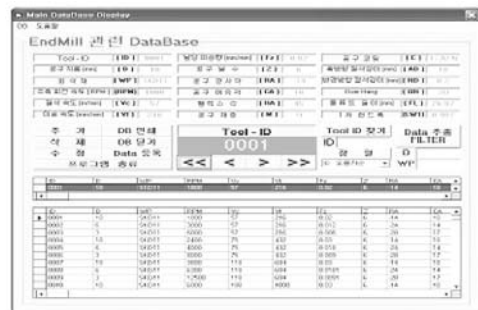


그림 11. 엔드밀 DataBase Form



같이 결과창에 출력된 것을 확인할 수 있도록 하였다.

최적화된 엔드밀 형상설계 프로그램 개발을 통하여 고속 가공용 평엔드밀의 최적 경사각 및 여유각을 구할 수 있었으며 최적화된 엔드밀 형상설계 프로그램을 개발하는데 있어서는 직접적인 실험을 거치지 않고서도 다양한 직경의 엔드밀 최적 형상 정보를 예측이 가능하게 하기 위한 것이 그 목적이다. 그러나 현재 실험하여 얻은 값으로 구축한 DB의 양은 그리 많지 않아서 최적 조건을 다소 한정된 구간에서만 계산할 수 있지만 앞으로 다양한 피삭재와 공구를 이용하여 지금보다 더 많은 실험을 한 후 Data를 많이 추가하여 DB를 더 크게 확장시켜 구축을 하면 추후에 엔드밀 가공을 위한 상당히 많은 종류의 피삭재와 공구의 최적 조건을 계산할 수 있을 것으로 기대되므로 상당히 유용한 프로그램이 될 수 있을 것으로 확신한다.

### 2.5 기대효과

- 고속 가공용 공구 개발은 첨단 산업 및 각종 산업의 근간이 되는 기술로서 연구 개발 대신 Royalty를 주고 그 기술을 도입할 경우 기술적으로 선진국에 예측될 뿐 아니라 전반적인 산업 발전에 한계 요소로 대두될 것이다. 특히 엔드밀은 고속 가공의 주요한 부분으로 이에 대한 연구가 미진한 경우는 주축 관련 기술, 공구 모니터링 기술, 공구 Path 선정을 위한 CAD/CAM/CAE 기술 등 가공 분야의 핵심이라 할 수 있는 기술들의 발전에도 저해될 것이나 본 연구 과제를 통해 해결의 기대효과를 가지게 될 것이다.
- 고속 가공용 엔드밀에 대해 실험적인 연구와 이론적인 연구를 병행한 결과 최적의 형상을 설계할 수 있는 능력을 배양하였으며 이를 통해 공구 설계용 S/W의 개발 및 최적 절삭 D/B를 구축하였고 또한 활용 할 수 있는 계기를 마련하였다.
- 고속 가공용 엔드밀을 개발함으로써 연구되는 주

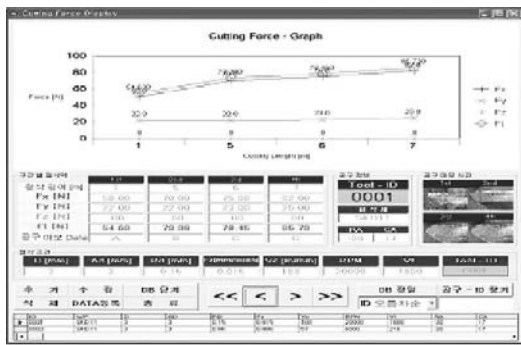


그림 12. DB의 출력 예

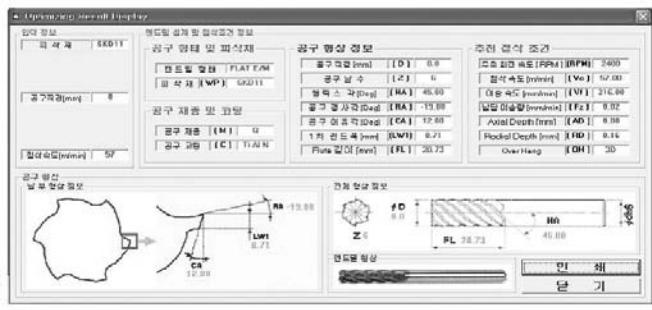


그림 13. Optimizing Result Display



변 기술을 통해 난삭재 등에 적용 가능한 차세대 엔드밀의 지속적인 개발이나 고 정밀 연삭 기술의 확보를 통한 고정도 공구 개발 등의 기술은 고 정밀 가공 기술로서 향후 전개될 초정밀 가공 기술의 교두보 역할을 다 할 것으로 판단된다.

- 본 연구를 통해 개발된 기술들 및 엔드밀 연구개발과정에서 생성된 Data들은 D/B로 구축되어 국내 절삭 가공기술의 기초 자료로서 활용되어 한층 높은 수준의 경쟁력 있는 가공 기술을 이끌어 낼 수 있을 것이다.

### 3. 결론

1차년도 개발 목표인 향상된 박막 경도, 내산화성 개선 및 제시된 정밀도인 6 $\mu$ m이하를 만족하는 정밀 연삭 기술을 확보하였으며 엔드밀의 형상적인 측면에서는 다양한 실험을 통하여 경사각 및 여유각을 최적화 하였다.

고속 엔드밀 개발을 위한 실험 결과는 특히 절삭력, 공구마모, 가공면 거칠기, 진동가속도, 고유 진동수 등에 대한 그래프, 사진, 데이터가 입력될 수 있도록 계속 자료를 축적하였으며 고속 가공용 엔드밀의 형상설계를 위한 동적 특성에 관한 연구를 실시하였고 실험된 Test 결과는 DB로서 구축하였다.

현재 구축한 DB를 기본으로 최적 조건을 다소 한정된 구간에서 계산 가능 하게 되었으며, 지속적으로 DB를 확장시켜 구축을 하면 추후에 엔드밀 가공을 위한 상당히 많은 종류의 피삭재와 공구의 최적 조건을 계산할 수 있을 것으로 기대된다.

### 4. 향후계획

차년도인 2단계 2차년도 연구 개발 결과 신뢰성 있는 엔드밀의 품질 확보를 위하여 소재 및 박막의 양산 신뢰성을 확보하고 안정된 형상 가공을 위한 공정 개발 연구를 추가하여 고품질 엔드밀을 본격적으로 양산하는 시스템을 구축하도록 할 예정이며, 다양한 엔드밀 실험을 통하여 엔드밀에 관계된 모든 실험 데이터가 들어간 데이터베이스(DB)를 구축후 프로그

램의 상황에 맞게 작동할 수 있게 개선하고 추후 다양한 실험을 통해 DB를 확장하여 좀더 효과적으로 DB추출, 형상설계, 절삭력계산, 조도계산 등을 할 수 있도록 최적화 Algorithm을 개선할 예정이다.

최종적으로는 고속 가공용 엔드밀의 모재 및 박막에 대한 특성을 개선하고 제작을 위한 공정의 최적화를 통하여 보다 고정밀, 고급화된 제품의 양산 시스템을 구축하는 한편 향후 전개될 60,000rpm급의 회전수에서 안정된 수명을 구현하도록하며 이를 위한 실험들을 토대로 DB를 계속 축적해 나갈과 더불어 고속 엔드밀 설계용 S/W를 완성해 나갈 예정이다.

### 5. 상품화 현황

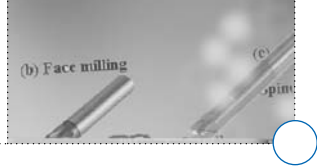
본 연구를 통하여 개발된 엔드밀은 소재의 개발에서부터 PVD박막의 개발 및 형상정밀도 측면까지 많은 비용과 오랜 시간이 투자되었다. 또한 고속가공중의 문제점을 확인하기 위하여 각 단계별로 개발된 시료군에 대해 다양한 실험을 수행하여 나타난 문제점을 제품에 피드백 하였으며 그 결과 상품화와 연계시킬 수 있었다.

#### 5.1 개발 제품의 주요 특성



그림 14. 금형 가공 사례

새로 개발된 엔드밀은 “Z-Max” 엔드밀로 명명하였으며 주요 특성으로는 고경도강 절삭시 뛰어난 내마모성을 발휘하는 개발된 모재 및 코팅 박막을 적용하였으며, 인선 강도 확보를 위한 최적의 경사각 채용과 강성을 고려한 설계를 바탕으로, 고속가공시 안정된 수명 보장과 금형의 정밀도를 고려한 고정밀 가



공을 실시하였다.

5.2 개발된 제품의 형변별 특징  
(Z-Max 엔드밀)



Z-Max 볼 엔드밀



Z-Max 평 엔드밀



Z-Max 라디우스 엔드밀

그림 15. Z-Max 엔드밀

- 볼 엔드밀의 주요 사양은 솔리드 type, 고속, 고이송 모방가공용, 2플루트, 헬리스각 30°,  $\varnothing 1.0 \sim \varnothing 16.0\text{mm}$ 의 Spec으로 생산되고 있으며 주요 특징은 인선강도, 강성 강화형, Z-Max 코팅, 경도강의 고속가공 영역에서 뛰어난 능력, 탁월한 내치평성으로 안정된 가공 가능성이 가능하다.
- 평 엔드밀은 솔리드 type, 고경도, 고이송 가공용, 4,6,8 플루트, 헬리스각 45°,  $\varnothing 3.0 \sim \varnothing 20.0\text{mm}$ 의 Spec으로 생산되고 있으며 주요 특징은 고속, 고이송 정밀 가공, 인선강도 및 강성 강화형, Z-Max 코팅을 통한 고능률 가공이 가능하다.

- 라디우스 엔드밀은 솔리드 type, 금형의 포켓 가공용, 4플루트, 헬리스각 30°,  $\varnothing 3.0 \sim \varnothing 16.0\text{mm}$ 의 사양을 갖고 있으며 인선강도, 강성 강화형, Z-Max 코팅, 생크부에 Recess부를 두어 간섭 없이 가공, 볼 엔드밀과 같은 개념으로 금형 가공이 가능함을 특징으로 한다.

참고 문헌

- [1] J. Boehner, M. Dumitrescu, M. A. Elbestawi and El-Wardany Lienjing Chen, "Effect of Carbide Tool Grades and Cutting Edge Geometry on Tool Life During High Speed Machining of Hardened Tool Steel," 2nd International Conference on High Speed Machining, (1999) 37.
- [2] R. C. Dewes and D. K. Aspinwall, "High Speed Machining of Hardened Steels using Coated Tungsten Carbide Ball Nose End Mills," 2nd International Conference on High Speed Machining, (1999) 165.
- [3] 本田 巨範 and 大河出版 編集部, "Frais 切削" Frais 加工 Manual, (1976) 47.
- [4] Yasutaka Okazaki, "Trochoid Cutting and Helical Cutting for High Speed Machining," TOOL & TECH, No,2, (1999) 17.
- [5] Seiichiro Kitaura and Taiitsu Aoki, "Dry Cutting Performance of (Al,Ti)N Coated Carbide Endmills for High Speed Machining," TOOL & TECH, No,2, (1999) 4.
- [6] 한국공구공업협동조합 발간 통계자료, (1999)
- [7] 한국야금(주), Sumitomo, Kobelco, Fraisa, Hitachi, Jabro, 제품 카타로그 및 기술자료, (1999)
- [8] Yoshimito, "In-process measurement of cutting force and its application to identification of machining status", KISTLER seminar 자료, (2000)
- [9] Pascal Collin, "고속가공기술 및 고속가공용



- 절삭공구의 설계 및 평가 요소”, 선진전문가 초청 특별세미나 자료, 한국기술교육대학교 능력개발교육원, (2000)
- [10] 한국야금(주), “공구재료”, 53. “밀링가공일반이론”, 75. 절삭공구 기술, (1987)
- [11] K. Shibuki et al., 금속표면기술 Vol.35, No.1, (1984) 77.
- [12] C.C Cheng et al., Surface Coatings Technology, 39/40 (1989) 365.
- [13] H.Hasegawa et al., J.Vac.Sci. Technol.A 18(3) 2000. 1038.
- [14] J. R. Roos et al., Thin Solid Films, 193/194 (1990) 547.
- [15] O.A.Johansen et al., Thin Solid Films, 153(1987) 75.
- [16] R.D. Arnell, Surface coatings Technology 112(1999) 170.
- [17] D.McIntyre et al., J. Appl.Phys., 67 (1990) 1542.
- [18] L.A.Donohye et al., Surface and Coating Technology, 94-95(1997) 226.
- [19] 鈴木, 超硬合衆と焼結硬質材料, 丸善株式會社, 1986
- [20] Doh-Yen, Kim, Densification Process During Liquid-phase Sintering, 大韓金屬學會, 1989
- [21] Hwan-Cheol Kim 외, One-step Synthesis of WC and Dense Wc - 10 vol % Co Hard Materials and Their Mechanical Process, journal of Korean Powder Metallurgy Institute 2003.
- [22] 서천석, 김경배, 엔드밀의 경사각에 따른 특성 연구, 공작기계학회, 추계학술대회 논문집(2000)
- [23] 유중학, 이우영, 고속 가공용 엔드밀의 동특성 분석, 한국공작기계학회 춘계 학술 대회 논문집 (2003)
- [24] 고성립, 최적형상의 엔드밀 설계를 위한 프로그램 개발, 한국공작기계학회 춘계 학술대회 논문집(2003.5), pp500-503