

# 초정밀 가공의 산업적 응용

이 글에서는 연삭시스템의 산업적 특성과 기술적 특성을 알아보고, 국내의 발전전망과 함께 향후에 연구되어야 하는 기술에 대해 기술하였다. 연삭시스템은 생산시스템에서 중요한 부분을 차지하고 있으며, 그 중요성이 날로 높아지고 있으며, 우리 산업에 대한 비중도 높아지고 있다.

이 석 우 한국생산기술연구원, 책임연구원

e-mail : swlee@kitech.re.kr

## 연삭시스템의 산업 및 기술 동향

기계를 만드는 기계로 일컫는 공작기계(Machine Tool)는 제품생산을 뒷받침하는 중요한 설비의 하나로, 특히 연삭시스템은 제품 표면의 마무리 공정에 사용되어 제품의 최종품질을 결정하는 핵심공정이다. 이러한 연삭시스템은 과거의 평면, 원통, 내·외경, 기어·나사 가공 등을 위한 범용 연삭기에서 전용 연삭시스템으로 변화하고 있으며, 전용 연삭시스템의 다양화에 맞추어 다품종 소량생산과 신뢰성 높은 제품을 생산하기 위한 고능률화되어 가고 있다.

연삭시스템 기술은 범용 연삭시스템에서 발전된 형태로 공정을 복합화하고, 고정밀화, 자동화, 고속화, 고효율, 고신뢰성과 같은 특징을 가지고 있다.(그림 1)

이러한 기술의 발달 속도는 생산시스템의 발달과 함께 가속화되어 가고 있으며, 향후에는 초정밀 가공 분야의 많은 부분을 담당할 것으로 예측된다.

이번 내용을 통해서는 연삭시스템의 산업적 특성과 기술적 특성을 알아보고, 국내의 발전전망과 함께 향후에 연구되어야 하는 부분까지 제시하고자 한다.

## 연삭시스템의 산업적 동향

연삭 가공을 위한 연삭 가공기는 그 동안 많은 부분을 수입에 의존하여 왔는데 특히, 최근 국내 산업을 주도하고 있는 전자·통신 등에 사용되는 정밀 부품 제작용 연삭가공기는 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 국내의 연삭기 제조업체들은 일반 범용 연삭분야

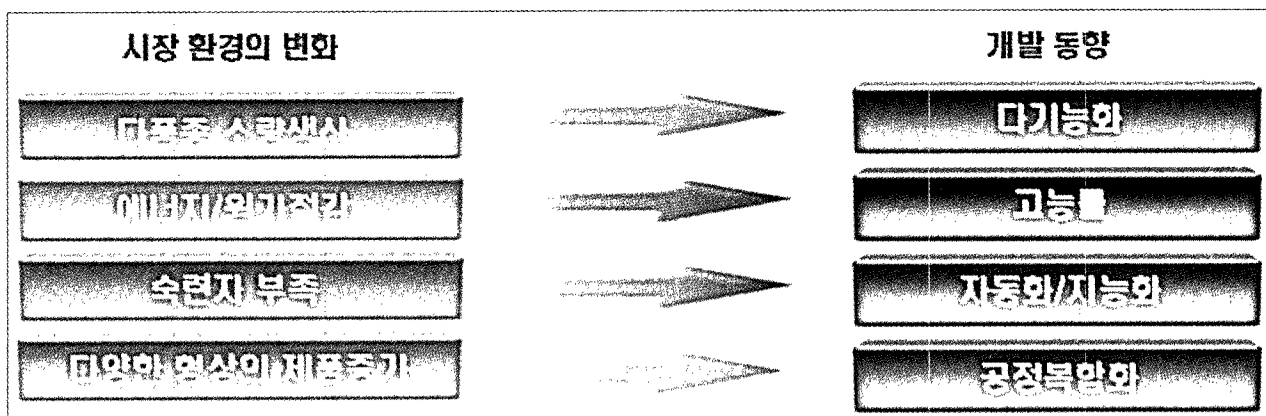


그림 1 연삭시스템의 시장환경 및 개발 동향

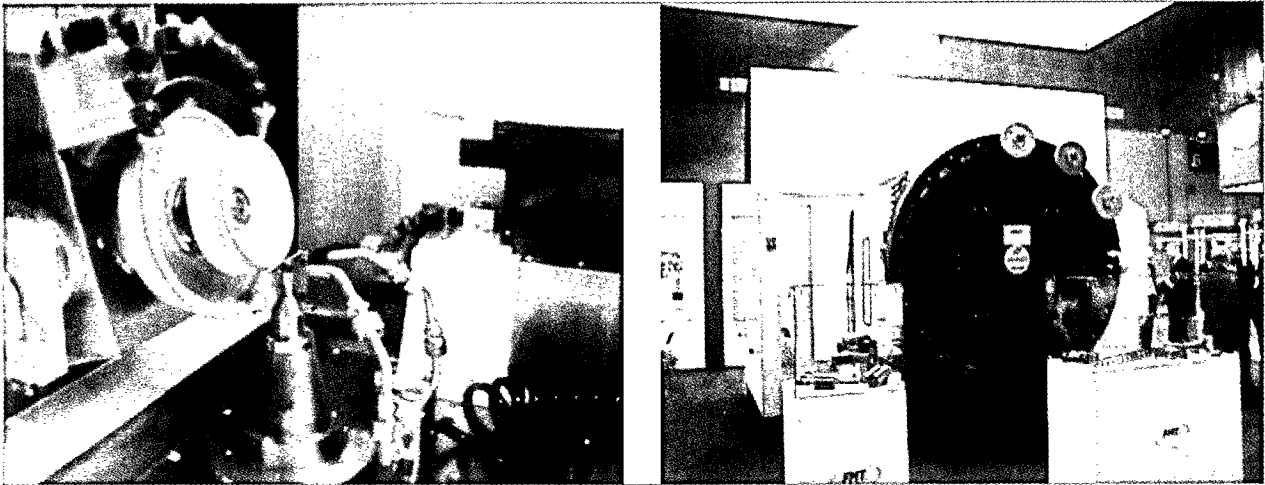


그림 2 2009년 EMO에 출품된 연삭시스템과 ATC(FAVRETTO, MECCANODARA CIMAT그룹)

에서는 많은 기술발전을 하였으나, 영세하고 기술력 또한 부족한 실정이라 고능력, 복합 연삭 시스템 등의 개발이 이루어지지 못하고 있는 것이 현재의 우리의 모습이다.

세계적으로 전체 Metalcutting을 하는 공작기계 중 9.5%가 연삭시스템으로 구분되고 있다. 전 세계의 시장 규모는 2010년에 10조에 이를 것으로 전망되며, 국내 시장은 2010년에 4,000억 이상일 것으로 추정되고 있다. 연삭기의 국내 주요 수요처로는 자동차산업이 65%, 금형·가전 부분이 15%, 반도체·IT 관련이 10% 베어링 등 기타 부분이 10% 정도의 수요 비율을 차지하는 것으로 알려져 있다. 해외로 수출하는 연삭기는 대부분 범용연삭기, 일반 CNC 연삭기로서 선진국에서는 현재 거의 생산하지 않는 장비이며, 그나마 중국, 대만 등의 업체에 가격경쟁력을 잃어 수출이 쉽지 않은 상황이다.

연삭시스템의 선두주자라고 할 수 있는 일본과 유럽의 기술은 연삭시스템의 복합화, 다기능화, In-Processing Monitoring 등에 강점을 가진 장비개발을 주로 진행하고 있다. 연삭속도의 고속화가 진행되어 250m/s까지의 연삭시스템도 소개가 되고 있다. 특히 공구연삭기 같은 경우 ATC를 사용하여, 공구연마가 가능하도록 함으로써 복합화 되어 있는 것을 한 번에 보여주었다. 다기능화라 하면, 기존 선삭 및 드릴과 같은 작업을 하나의 공작기계에서 할 수 있는 형태로 운영이 되는 것을 볼 수 있다. In-Processing Monitoring의

경우, 다른 공작기계의 경우 공구의 위치를 초기에 Setting하는 정도에 지나지 않은 것이 일반적이다. 그러나 연삭공정의 특성상 최종 공정으로 공작물의 가공 정도를 In-Processing Monitoring을 통하여 운영하도록 되어 있다. 연삭시스템에서 연삭숫돌의 Balances를 위해서 기본적으로 ACT를 사용하지 않는 형태로 운영이 되어 왔다. 그러나 Checking 정밀도의 향상과 시스템의 강성향상으로 인하여, 복합화되어 있는 연삭시스템의 경우, ACT를 도입하게 된 것이 많았다. ATC에는 기본적으로 내경, 외경, 앵글러 연삭이 가능한 툴을 보유하고 있으며, 측정기와 드릴을 장착할 수 있도록 되어 있는 것도 포함되어 있다. 일본의 경우 초정밀 연삭분야에 강점을 보인 반면 유럽에서는 복합화, 다기능화, 지능화에 대한 개발이 주로 진행되고 있다.(그림 2)

### 연삭공정의 연구 동향

연삭공정은 그 기원을 인류가 최초로 도구를 만들던 시대로 거슬러 올라가서 생각해야 할 정도로 오래된 공정이며, 산업시대를 거치면서 최근까지도 많은 연구들이 진행되어 왔기 때문에 대부분의 문제들이 해결되었다고 생각된다. 그러나 불균일하게 분포된 수많은 지립들이 동시에 가공을 수행하는 특성으로 인하여, 현재까지도 연삭가공에 대한 이해도는 상당히 낮다고 할 수 있다. 과거의 연구자들이 언급한 바와 같이 연삭공정은 순간적으로 변하기 쉬운 공정이며, 연삭공정과 관

련된 연구 결과들이 작업 현장의 요구를 만족시키지 못하고 있는 것이 현실이다. 그런 이유로 현재까지도 많은 연구자들에 의해서 연삭공정에 대한 많은 분야의 연구가 수행되고 있으며, 최근의 계측 및 컴퓨터 기술 발전에 의해서 과거보다 많은 자료들을 짧은 시간에 처리할 수 있고, 과거에 보지 못했던 부분들을 볼 수 있게 되면서 연삭공정에 대한 이해도가 조금씩 높아지고 있는 것도 사실이다. 연삭공정의 연구 분야는 연삭숫돌의 제작 분야, 연삭메커니즘, 연삭열의 발생 및 피삭재의 열적 손상, 연삭숫돌의 마모 및 드레싱 등 너무나 다양하게 존재하고 있으며, 이 글에서는 그 중에서도 최근 들어 많은 관심을 받고 있는 취성재료의 연삭공정관련 분야, 연삭공정에 대한 모델링 및 시뮬레이션 분야 및 친환경 가공을 위한 연삭공정의 MQL 적용에 대한 최근의 동향을 소개하고자 한다.

우선 취성재료의 고품위 가공기술 관련 분야를 살펴보면, 최근 우주항공분야 및 군수산업 등에서 다양한 광학유리, 단결정실리콘 및 세라믹 베어링 등의 요구가 높아짐에 따라서, 취성재료의 고품위 가공의 필요성이 증가되고 있으며, 관련한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 특히, LED 및 태양광 시장의 급속한 확대는 그 소재인 사파이어기판 및 폴리실리콘기판에 대한 폭발적인 수요를 이끌어내고 있으며 생산성 및 품질 향상을 위한 산업계의 노력이 다각도로 펼쳐지고 있다. 과거, 취성재료를 이용한 고품위 가공을 위해서는 호닝(honing), 래핑(lapping) 및 연마(polishing) 등의 공정이 사용되어 왔으나, 최근 들어 초정밀 연삭기술의 발전에 따라 단일/다단 연삭공정을 이용한 가공이 현장에서 활용되고 있다. 취성재료의 연삭가공에서 소재가

제거되는 모드(mode)에 따라서 표면 품질이 달라지며, 최근의 연구들은 소재의 취성이 무척 높더라도, 최적의 공정조건하에서는 연성모드로 가공이 일어나게 되어 결과적으로 피삭재의 표면 품질이 높아진다는 것이 보고되고 있으며, 이론적인 해석 및 실험 연구가 병행되어 진행 중에 있다. 많은 연구결과들 중에서 중국의 Harbin Institute of Technology의 Mingjun Chen 등은 취성재료의 연삭가공 시의 연삭모드의 전환시점(연성모드-취성모드)을 선정하고 표면 품질에 영향을 주는 주요 요인을 결정하기 위하여 이론적으로 동적 연삭을 연구하였으며 실험을 통하여 다이아몬드 연삭숫돌의 지립 크기 평균이 10 $\mu$ m 이하인 경우에는, 광학유리의 연삭가공은 연성모드로 이루어지며, 크랙은 발생하지 않는다는 것을 증명하였다.(그림 3)

다음으로 살펴볼 분야는 연삭공정의 모델링 및 시뮬레이션 분야이다. 이 분야는 연삭공정에 대한 이해도 향상을 통한 공정 최적화를 위해서 과거로부터 많은 연구자들에 의해서 연구되어 왔던 분야이다. 1980년대까지는 다중 선형 회귀(multiple linear regression)에 기반을 둔 물리학적 분석모델 및 경험적 모델이 적용되었으나, 최근의 기술적 발전을 토대로 컴퓨터를 이용한 다양한 새로운 모델 및 시뮬레이션 분야가 나타나고 있다. 대표적으로 FEA(Finite Element Analysis), 기하학적 운동 모델(geometrical kinematic model), 분자 동역학(Molecular dynamics) 등이 있으며 지면 관계상 간략하게 설명하도록 하겠다. 연삭공정을 FEA 모델을 통하여 이해하고자 하는 연구들은 최근에도 활발하게 이루어지고 있으며, Hoffmeister이 3차원 FEA 소재 모델을 적용하여

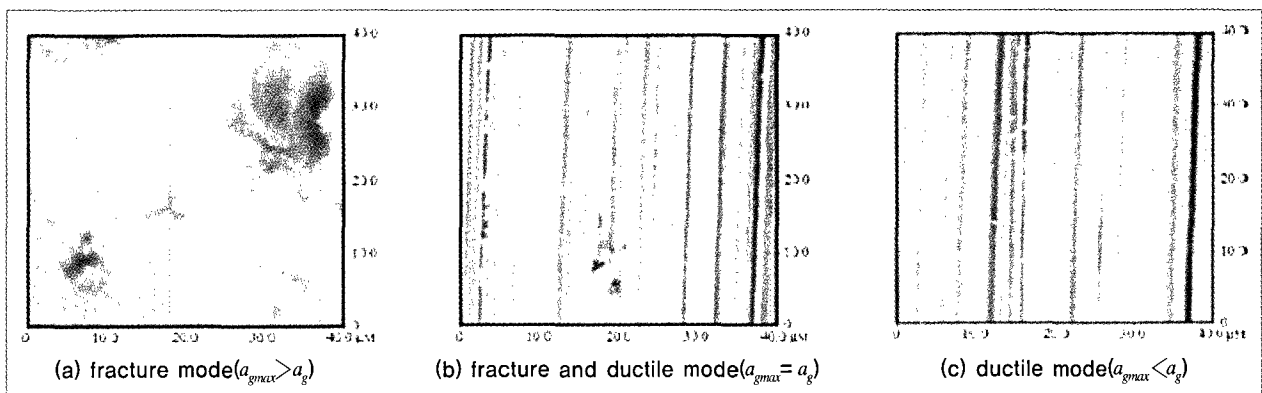


그림 3 광학유리(K9)의 세 가지 연삭가공모드

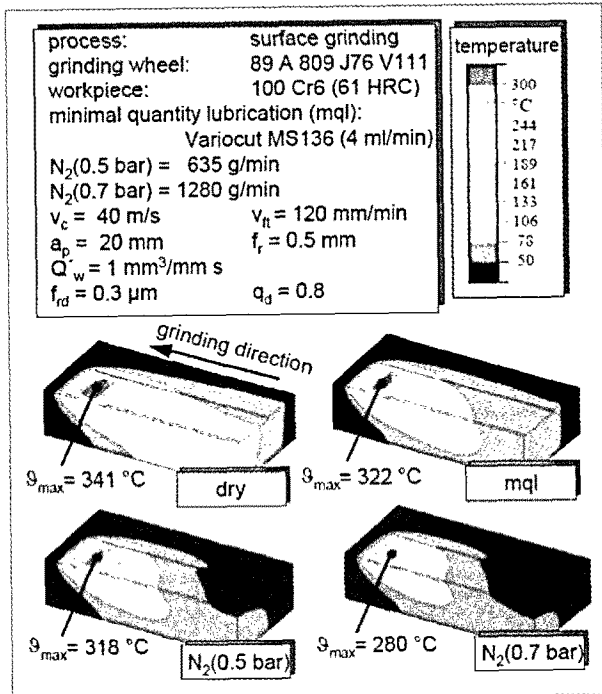


그림 4 냉각 및 윤활 조건에 따른 온도 분포

연삭공정 중의 온도분포를 시뮬레이션한 바 있다. 이러한 시뮬레이션 방법은 형상가공을 위한 연삭가공으로도 확대되었으며, 시뮬레이션을 통하여 연삭가공중의 온도 분포가 시각화될 뿐 아니라, 다양한 가공조건에 따른 영향을 사전에 예측함으로써 가장 알맞은 가공조건을 선정할 수 있는 단계까지 개발되어 있다. FEA를 통한 연삭공정 시뮬레이션의 한 분야로서 한 개의 지립이 피삭재를 긁어내는 과정을 모델링하여 실제 연삭가공을 좀더 자세히 모델링하고자 하는 연구도 진행되어 있으며,

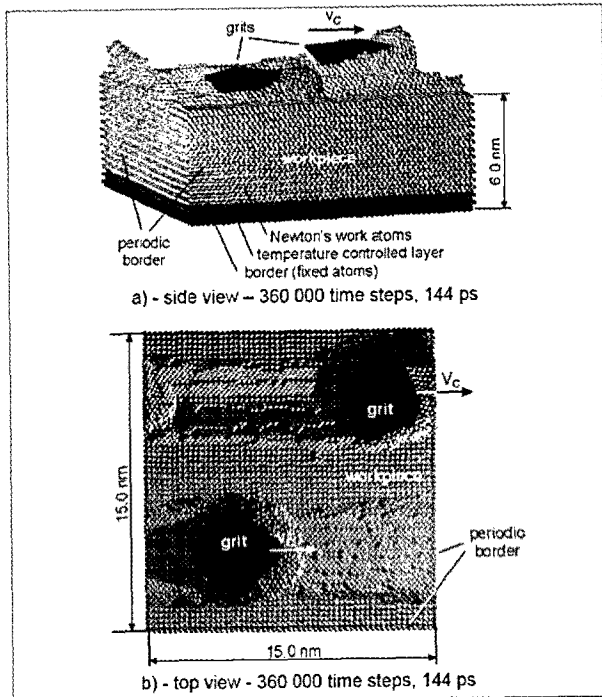


그림 5 2개 지립의 소재제거 현상

실제 실험을 통하여 모델의 정확성이 입증된 바 있다. 분자동역학 시뮬레이션이란 개개 원자를 이용한 시뮬레이션 방법으로서 원자수준의 소재거동을 이해하기 위해서 시도되고 있다. 1980년대 말에 들어 분자동역학을 이용한 연삭가공에 대한 연구가 해외에서는 활발히 진행되고 있으며, 과거에 비해 급격히 발달한 컴퓨터 관련 기술로 2D 모델뿐 아니라 3D 모델까지도 시뮬레이션하고 있으며, 이를 통하여 힘, 온도, 응력 분포 외에 피삭재의 표면 형상, 변형 메커니즘 및 표면 품질까지도 직

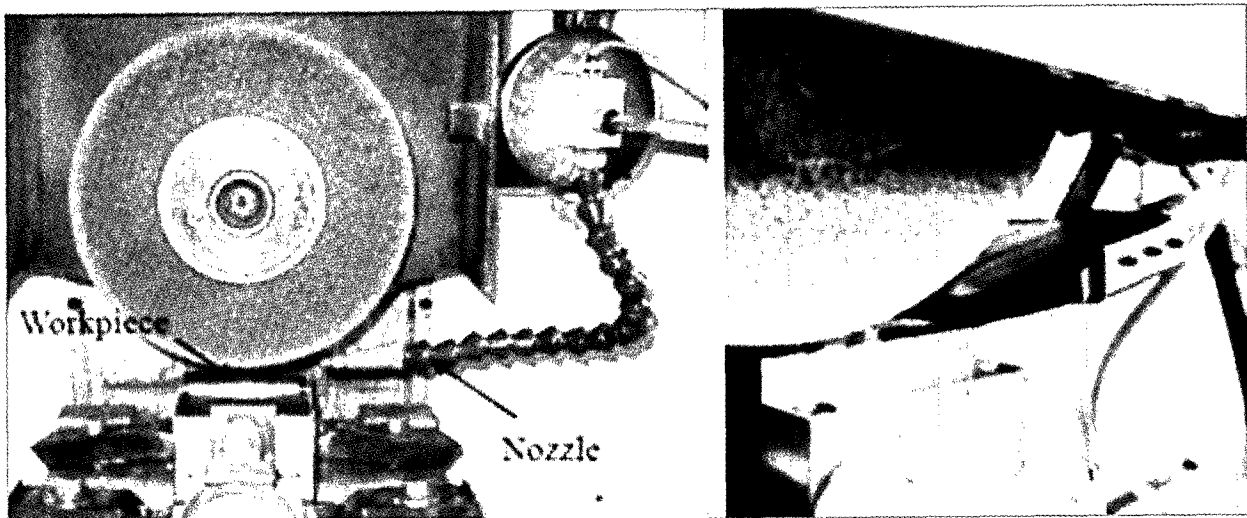


그림 6 MQL 연삭가공

접적으로 예측할 수 있다.

마지막으로 살펴보고자 하는 것은 극소량윤활(MQL: Minimum Quantity Lubrication) 방식의 연삭공정에의 적용이다. 절삭공정 중 발생하는 열을 제거하는 목적 이외에도 가공속도 및 이송속도 고속화, 표면품질 향상 및 공구수명의 연장들을 위해서 다량의 연삭유가 사용되고 있으나, 연삭유에는 방부제, 윤활제, 방청제, 부식방지제, 세정제, 극압첨가제 등 화학물질이 첨가되어 있어 작업자의 건강 및 환경에 유해한 것으로 알려져 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기계가공 중 사용되는 절삭유를 최소화하려는 연구가 과거에 연구된 바 있으며, 최근 들어 친환경 제조의 예로서 많이 소개되고 있다. 특히, 절삭가공분야(밀링, 선반, 드릴링)에서는 많은 연구가 수행되어, 드릴링 공정을 시작으로 일부 현장에 적용되고 있으며, 절삭유를 필요한 부분에 극소량만을 사용함에도 기존 공정과 유사하거나 일부 우수한 가공품질 확보 가능하다는 연구 결과가 있다.(그림 4, 5)

그러나 연삭공정 중 발생하는 급격한 온도 상승

으로 연삭에의 적용은 시도되지 않았으나, 2000년 중 후반부터 일부 논문에서 적용한 사례가 소개되고 있다. 특히, Bin Shen 등은 연삭유에 나노물질을 첨가하여 미세하게 분사하여 좋은 결과를 확보할 수 있다고 소개한 바 있다.(그림 6)

## 맺 음 말

서술한 바와 같이 연삭시스템은 생산시스템에서 중요한 부분을 차지하고 있으며, 그 중요성이 날로 높아지고 있으며, 우리 산업에 대한 비중도 높아지고 있다.

국내외의 시장 및 연구동향에 대하여 알아 본바와 같이 아직까지 국내 기술수준과 해외 선진기술과의 격차가 있는 것이 사실이다. 향후 많은 연구가 필요하며, 정책적인 지원을 통한 국내 연삭시스템관련 중소기업의 육성 정책과 함께 각 연구 분야에서도 부단한 노력이 필요하다고 하겠다.

### 기계용어해설

#### 접선계수(接線係數; Tangent Modulus)

응력-변형 선도상에서 곡선의 각 점 상에 그은 접선의 탄젠트를 취한 것으로, 탄성 한도 내에 있으면 영률과 일치.

#### 미그 용접(MIG Welding)

용접 와이어 자체가 소모전극이 되어 용착되는 방식으로, 불활성 가스 속에서 이루어지는 이너트 가스 아크 용접의 일종.

#### 마일포스트(Milepost)

선박의 해상속력 시운전에서 속력을 결정하는 기준이 되는 것으로, 일정한 간격을 두고 세워진 표주.

#### 미니멈 플로(Minimum Flow)

유체기기 또는 이것과 접속하여 운전하는 기기를 과열이나 소음, 진동 등의 문제없이 연속으로 안전하게 운전하는데 필요한 최소의 유량.

#### 최소 선회반경(最小旋回半徑; Minimum Turning Radius)

최대 스티어링각으로 자동차를 서행하여 선회시켰을 때, 가장 바깥쪽 타이어의 집지면 중심이 그리는 원형 궤적의 반경.