



# 모터스포츠의 공학적 접근

## Motorsports and Engineering Aspects



장 성 국 / 한라대학교 교수  
Sungkuk Jang / Hallym University

### 1. 서론

지금까지 3회에 걸쳐 모터스포츠에 대한 기본적인 사항을 알아보았다. 이제는 경기장에 가거나 TV에서 경기를 시청할 때 주위에 있는 관전자들에게 모터스포츠에 대한 기본적인 것들은 전문가답게 설명해줄 수 있을 것이다. 이번 글에서부터는 모터스포츠를 공학적인 관점에서 접근을 해 본다. 자동차공학회의 모든 회원들은 아마도 공학도일 것이며 그래서 모터스포츠(자동차경주)도 스포츠의 관점보다는 공학적인 관점에서 분석해



〈그림 1〉 카트(KART)

나가고자할 것이다. 이에 이번 글에서는 자동차경주의 기본이 되는 카트(KART:그림 1)를 공학적으로 접근하여 본다.

### 2. 카트의 구조

새시와 스티어링의 세팅에 관한 질문에 대한 가장 일반적인 답변은 기존 세팅에서 일부의 세팅을 변화시켜 접지력의 증가나 감소를 발생시키는 것이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 변화에 내재되어있는 물리적인 법칙을 설명하는 경우는 거의 없다. 그러므로 본 글에서는 카트를 운전할 때 영향을 주는 물리적 힘을 알아보고 그 힘이 스티어링에 의하여 어떻게 발생하는지와 여러 가지 요인들을 변화시켰을 때 경기장에서는 어떤 효과가 나타나는지 알아본다.

카트는 비교적 간단한 장치인 것처럼 보이지만 일반 차량보다 설명하기 더 어려운 주제가 될 수도 있다. 카트와 일반 차량은 많은 부품과 기본적인 원리를 공유

하지만 설계와 세팅을 다르게 할 수밖에 없게 만드는 두 가지 큰 차이점이 있다. 즉 카트에는 차동장치가 없으며 현가장치도 존재하지 않는다는 것이다.

이런 특성 때문에 카트 주행시에 발생하는 물리적인 힘을 상세히 이해하게 되면 카트의 세팅에 많은 도움이 될 것이다. 즉 한가지 요인을 변화시키게 되면 그에 수반되는 변화가 어떤 것일지를 예측할 수 있게되는 것이다.

### 3. Steering Geometry

조향 휠을 돌리게 되면 전륜에는 움직임과 변위가 발생하게 되며 이것을 Steering Geometry라고 정의할 수 있다. 이 움직임은 매우 복잡하며 여러 가지 세팅 방법과 관계가 있다. 하지만 어떠한 경우에도 공통적인 필수 사항이 하나가 있으며 이 때문에 복잡한 Geometry가 필요하게 되는 것이다. 즉, 회전(Cornering)을 할 때에는 반드시 카트의 내륜이 들려야 한다.

그래야만 카트가 차동장치 없이도 코너를 돌 수 있도록 해준다. 차동장치가 없기 때문에 카트가 나가려는 고유의 방향 즉 전진하려는 특성을 바꾸기가 매우 어렵다. 카트의 뒤 차축은 일체형이므로 내륜과 외륜의 회전수는 동일하며 결국 회전 시에 내륜과 외륜이 같은 거리를 주행하려고 하기 때문에 회전이 용이하지 않은 것이다. 이를 극복하기 위해서는 결국 내륜이 미끄러지는(Skid) 방법밖에는 없다. 일반 차량에서는 차동장치 덕택에 이와 같은 현상이 발생하지 않는 것이다.

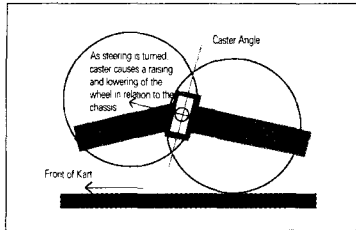
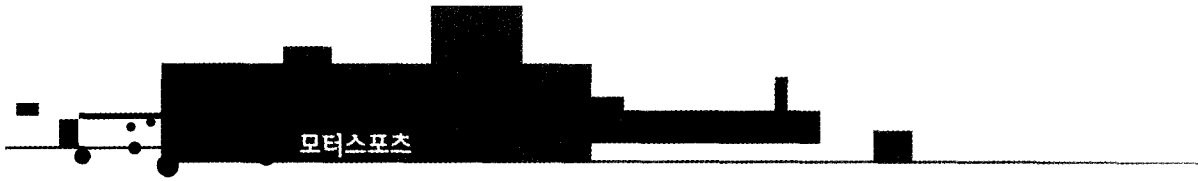
선회할 때 발생하는 미끄러짐 현상 때문에 카트를 회전하기가 매우 어렵다. 회전하기 위하여 타이어의 한쪽 접지력을 극복하여야 하지만 카트 경기에서는 접지력이 매우 높은 타이어를 사용하므로 많은 동력을 선회 시에 소비할 수밖에 없는 것이다. 이 때문에 회전

시에 카트의 내륜을 들어올린다. 이 경우 카트는 4륜 자동차가 아니라 3륜 자동차가 되는 것이다. 그러므로 회전 시에 후륜 내측이 들리도록 Steering Geometry를 구성한다. 그리하여 후륜의 두 바퀴가 지면에 접촉하여 주행할 때 보다 더욱 빠른 속도로 회전이 가능하며 후륜 내측 바퀴가 공중에 떠 있으므로 더 이상 회전 시에 그 바퀴의 접지력을 극복하려는 노력이 필요 없게 되는 것이다.

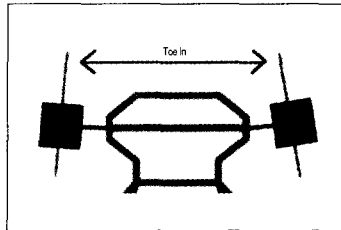
만약에 엔진 출력에 여유가 있다면 약간의 미끄러짐은 가능할 수도 있다. 엔진 출력이 작은 카트는 후륜 내측 휠이 완전히 들리도록 Steering Geometry를 구성하지만 엔진 출력에 여유가 있는 카트는 코너에서도 미끄러짐으로 인한 손실을 극복하며 회전이 가능하다는 것을 의미한다. 그러나 어떠한 경우에도 미끄러짐 현상은 코너에서 언더스티어를 발생시키는 원인이 된다. 그렇기 때문에 비록 엔진 출력에 여유가 있더라도 최적의 핸들링을 유지하기 위해서는 후륜 내측이 들리도록 해야 하는 것이다.

지금부터 어떻게 해서 Front Geometry가 후륜을 들어올리는지를 알아보기 전에 필요한 몇 가지 용어를 나열한다.

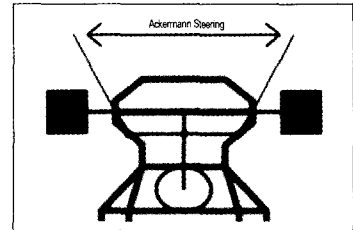
- 캠버(Camber) : 타이어와 지면과의 접지 면적을 결정하는 중요한 세팅 요인
- 캐스터(Caster) : 코너에서 바퀴를 들리게 하는 중요한 요소
- 토우 인/아웃(Toe In/Out) : 0 일 경우 바퀴가 평행하다는 것을 의미하며 타이로드의 길이를 변화시킴으로써 조정
- Scrub Radius : 캐스터와 함께 코너에서 바퀴를 들리게 하는 중요한 요소이며 Stub Axle에 스페이서를 사용하여 조정
- 킹핀 경사각 : 조향 시 캐스터에 의한 캠버 변화량을 결정하며 일반적으로 조정이 불가능



〈그림 2〉 캐스터



〈그림 3〉 토우



〈그림 4〉 Ackermann Steering

- Ackermann Steering : 회전 시 외륜보다 내륜의 회전각이 더 크도록 하며 카트에서는 바퀴를 들어 올리는 작용을 극대화할 수 있는 장치

Front Geometry가 후륜 내측 휠에 어떻게 영향을 주는지 설명하기 위해서 카트의 새시는 어떠한 방향으로도 굽힘이 일어나지 않는 강체라고 가정한다. 카트의 새시는 실제로 강체는 아니며 여러 방향으로 굽힘 및 비틀림이 발생할 수 있다. 그러나 이 글에서는 강체로 가정하여 문제를 단순화시켜 접근한다.

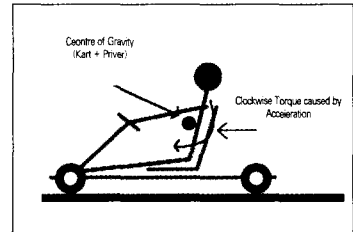
회전을 할 때 Steering Geometry (주로 캐스터 값과 Scrub Radius)는 새시를 기준으로 내륜이 아래쪽으로 외륜은 위쪽으로 움직이게 한다. 이 현상이 발생하면 새시가 강체라고 가정하였기 때문에 전륜 내측 휠과 후륜 외측 휠을 연결하는 선을 중심으로 카트가 회전하는데 이것이 후륜 내측 휠이 들리게 하는 요인이 된다.

코너를 돌 때 Front Geometry가 어떻게 내륜을 들리게 하는지를 설명하였다. 지금부터는 코너에서 회전을 시작할 때 카트에 나타나는 몇 가지 다른 힘들을 설명하고자 한다.

#### 4. 운전 중 발생하는 '힘'

##### 1) 가속/감속

이것은 가장 느끼기 용이한 힘으로 타이어가 지면에



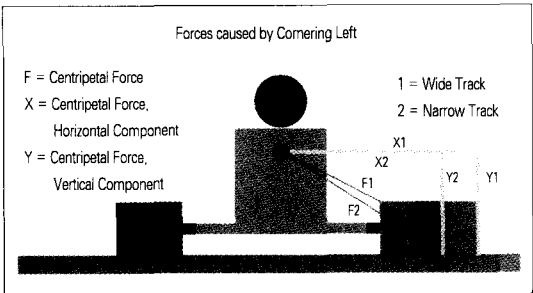
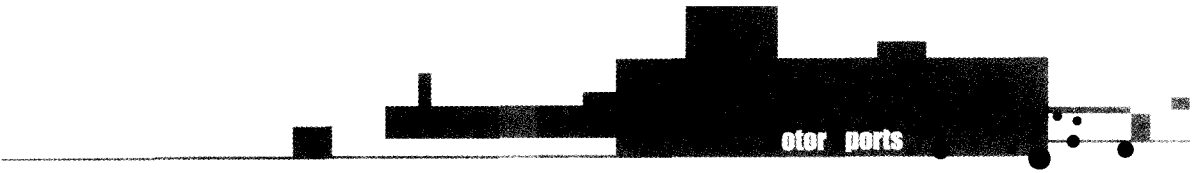
〈그림 5〉 가속 시 발생하는 회전 토크

전방이나 후방으로 힘을 작용시켜 제동이나 가속이라는 결과로 나타나는 것이다. 이 힘은 지면과 같은 높이에서 발생하며 카트의 관성 중심(Center of Inertia)보다 아래 부분에 위치한다. 이 때문에 이 힘은 카트에 회전 모멘트(토크)가 발생되게 한다.

이 토크는 카트가 가속하는 동안에 카트의 뒤쪽으로 무게이동(Weight Transfer)을 하게 하고 감속 시에는 카트의 앞쪽으로 무게이동을 하게 한다. 실제로 어떠한 질량의 이동도 일어나지 않지만 이 토크는 카트의 적절한 부분이 변형 되도록 하는 효력을 가진다. 만약에 가속도와 후륜에서 관성 중심까지의 거리를 안다면 무게이동의 양을 계산할 수 있다. 하지만 이 내용은 이 글에서 다루지 않는다. 〈그림 5〉는 가속시에 발생하는 회전 토크를 보여준다.

##### 2) 회전

회전시 운전자는 마치 자신이 카트로부터 바깥쪽으로 떠밀리는 듯한 느낌을 받는다. 실제로는 몸을 일직



<그림 6> 구심력

선상으로 회복하고자 노력하고 있는 것이다. 카트와 드라이버에게 각가속도가 작용하도록 타이어에서는 접지력을 분배하여 카트가 회전하도록 한다. 바로 이 각가속도를 드라이버가 느끼는 것이다. 카트가 회전하도록 지면으로부터 카트에 작용하는 힘을 구심력이라고 부르며 항상 회전축의 중심 방향으로 향한다.

<그림 6>에서처럼 구심력은 수직, 수평 두가지 성분으로 나눌 수 있다. 수평 성분은 위에서 설명하였다.

수직 성분은 전진방향으로 가속 시 선회력을 발생시키는 것과 같은 성분이다. 구심력은 카트에 작용하기 때문에 가속도를 발생시키며 이 가속도는 지면에서 작용하여 카트에 회전 토크를 발생시키는데 이 토크는 카트의 횡방향으로 작용하게되어 카트의 바깥쪽으로 무게이동이 생기는 효과가 나타나게 된다(그림에서 수직 성분 Y). 이 무게이동은 또한 내륜이 들리는 데 일조한다. 그리고 무게이동이 일어난 양만큼 내측 바퀴의 무게를 줄여준다. 일단 회전을 시작하면 무게이동은 내륜을 들어올리는데 Steering Geometry보다 더 큰 역할을 한다.

후륜 사이의 거리(윤거: Wheel Tread, Wheel Track)는 구심력의 수평, 수직 성분의 크기를 결정하는데 영향을 미친다. 그림에서 F1은 윤거가 넓은 경우의 구심력을 나타내고 F2는 윤거가 좁은 경우의 구심력을 나타낸 것이다. 당연히 X1은 X2 보다 크며 이것은 윤거의 폭이 증가함에 따라 구심력의 수평성분이

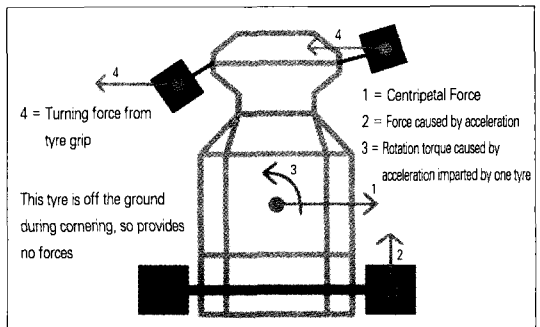
더욱 커진다는 것을 의미한다.

이것은 윤거가 넓을수록 후륜 외측으로 무게이동이 덜 일어나고 측력으로 작용하는 힘은 커지는 것을 의미한다. 윤거가 좁은 경우에는 무게이동이 증가하고 측력으로 작용하는 힘이 작아진다. 그래서 윤거가 좁은 경우는 넓은 경우보다 회전할 때 타이어의 접지력을 초과하는 측력이 발생할 가능성이 작다. 결과적으로 접지력이 높은 타이어를 사용하면 윤거를 더욱 넓게 할 수 있다.

마지막으로 고려해야할 힘은 회전하는 동안 가속할 경우 발생하는 회전 토크이다 <그림 7>. 일반적으로 카트가 회전하면서 제동을 하면 엄청난 언더스티어를 발생시킨다. 반면에 가속을 하게되면 회전이 용이하게 된다. 이것은 언뜻 보기에는 위에서 설명한 내용과는 상반되는 것처럼 보인다.

왜냐하면 보통 가속할 때 뒤쪽으로 무게이동이 생기게 되어 후륜 내측 휠이 다시 지면과 접하게 카트가 놀리게 될 것이라는 직관 때문이다. 그러나 무게이동은 카트의 수직 축을 중심으로 회전하려는 회전 토크의 영향으로 작아지는 것이다.

휠이 카트의 관성 중심에서 멀면 멀수록 회전 모멘트는 더욱 커지고 카트는 지면과 타이어 사이의 접지력을 극복하고 회전을 할 수 있게 되는 것이다. 그러므로 항상 가속 시에는 오버스티어가 되거나 감속시에는 언더스티어가 되는 것이다.



<그림 7> 회전토크와 수직축

## 5. 핸들링 문제 - 증상과 대책

1) 초기에는 언더스티어 그 다음에 갑자기 전륜에 접지력이 발생하여 회전이 이루어지면서 오버스티어 현상이 발생함

이러한 경우는 일반적으로 후륜 내측 휠이 충분히 들리지 않아 초기에 언더스티어 현상을 초래하는 것이다. 카트가 회전을 시작하면서 구심력에 의해 발생하는 회전 토크가 새시에 작용하여 무게 이동에 의하여 후륜 내측의 휠이 들리게 되는 것이다. 이 시점이 되면 불행하게도 회전을 하기 위하여 스티어링을 과다하게 회전한 상태일 것이며, 그리하여 일단 후륜 내측이 들리면 전륜은 너무나도 많이 회전되어 있는 상태이기 때문에 과도한 오버스티어 현상이 발생하게 되는 것이다. 이러한 현상이 후륜의 접지력이 작아 발생한다고 오인하는 경우가 많다. 그러나 사실은 그 정반대이며 그 이유는 후륜 내측의 접지력이 너무 높아서 발생하는 것이다. Steering Geometry를 통하여 이러한 문제를 해결할 수 있다. 이미 전술한 바와 같이 캐스터를 증가시키면 전륜 내측이 더욱 아래로 내려가게 된다.

이것은 후륜 내측 휠을 더욱 상승시키는 효과를 가져온다. Stub 액슬에서 전륜을 외측으로 넓히거나 Scrub Radius를 키우면 더욱 효과가 크게 나타난다.

Ackermann 각을 크게 하면 전륜 내측이 외측보다 더 많이 회전하게 되어 내측 휠이 더욱 아래로 내려가는 효과를 가져와 후륜 내측을 더욱 상승시킬 수 있는 것이다.

### 2) 오버스티어

이것은 회전을 시작하자마자 카트가 급속히 방향을 바꾸는 것으로 카트의 후미가 방향을 잃고 스핀을 하거나 미끄러지게 되는 현상을 말한다. 이것은 후륜의 접지력이 작아서 발생하는 것이다. 즉 회전을 시작하게 되는 시점에 내륜이 들리게 되지만 후륜 외측이 이때 발생하는 선회력(Cornering Force)을 감당하지 못

하고 방향을 잃게 되는 것이다. 아마도 코너에 너무 빠르게 진입하여서 선회력이 타이어의 접지력보다 크거나 타이어가 충분한 접지력을 발생하지 못하고 있다는 것을 말한다.

내측 휠이 너무 많이 들려진다면 타이어가 트랙 상에서 너무 큰 각도로 돌아가 있는 경우이며 접지력에 문제가 발생할 수 있다. 카트 타이어는 특성상 접근각이 큰 경우에 적절히 대응하지 못하므로 접지력이 작아지는 경향이 있다. 왜냐하면 카트 타이어는 일반 경이용 차량 타이어보다 변형이 작게 일어나기 때문이다. 캐스터를 줄이면 초기 상승 값을 줄일 수 있으나 초기 회전에 좋지 않은 결과를 초래할 수 있다. 회전시에 구심력의 효과가 캐스터 세팅의 효과를 상쇄하게 되며 Steering Geometry에 의한 영향보다 더욱 심각한 문제가 새시에 발생할 수 있는 가능성이 있다. 새시가 과도하게 휘어지게 되고 이 때문에 카트의 후미가 트랙으로부터 과도하게 상승 이탈하게 되는 것이다.

이 경우에는 후륜 허브를 외측으로 이동하면 문제를 개선할 수 있다. 왜냐하면 폭이 커지면 원심력에 의하여 발생하는 카트 후미의 상승을 어떠한 코너에서도 줄일 수 있게 되기 때문이다.

제동시나 가속시에 카트의 후미가 이탈한다면 아마도 카트의 후미 윤거가 너무 넓어 속도의 변화가 발생할 때 회전 토크 값이 커지게 되어 후미가 이를 극복하지 못하고 있다는 것을 의미하는 것이다. 또 다른 이유는 타이어 압력이 잘못 조정되어있을 수 있다. 그리하여 적정 온도로 상승되지 못하여 필요한 접지력을 발생하지 못하고 있는 것이다. 타이어 압력 세팅은 매우 복잡한 사항으로 여기서는 더 이상 다루지 않는다.

그러므로 가장 좋은 방법은 여러 압력 값을 시험하여 그 중에 최상의 연습 기록을 내는 압력 값을 사용하도록 한다.

### 3) 우천시 경우

우천시는 상황이 더욱 복잡하다. 최종 목적은 동일

하지만 여러가지 요인이 다르게 작용하므로 몇 가지 변경이 필요하다. 우천시에는 매우 천천히 회전하여야 하며 가속을 신속히 할 수 없다. 또한 제동을 강하게 할 수 없다. 이 모든 것은 활용 가능한 접지력이 작기 때문이다.

저속으로 회전하게 되면 구심력이 작아지게 되며 후륜 내측 휠이 적절히 상승하지 못할 수도 있다. 전륜을 바깥쪽으로 이동시켜 폭을 넓히게 되면 캐스터에 의한 비틀림이 커지게 되어 초기 회전에 바람직한 결과를 가져올 수 있다. 건조시보다는 우천시에 Front Geometry 효과가 더욱 크게 나타난다. 건조시는 구심력에 의한 효과가 압도적이기 때문이다. 여전히 엔진 출력은 동일하므로 접지력이 낮은 상태에서는 엔진 출력의 변화에 의한 회전 토크가 접지력의 수준을 용이하게 초과하기 때문에 돌발적인 스핀을 할 수 있다. 후륜을 안쪽으로 이동시키면 이와같은 토크 효과를 감소할 수 있으며 후미의 접지력을 잃지 않으면서도 더욱 높은 출력을 활용할 수 있다. 후륜을 안쪽으로 이동하면 접지력이 높아진다고 하는 경우도 있으나 엄격히 말하면 사실은 아니다. 왜냐하면 접지력의 수준은 항상 일정하며 엔진 출력을 보다 더 효과적으로 새시에 적용하여 스핀을 발생하는 회전 토크보다는 전진 방향의 가속 효과를 더욱 두드러지게 하기 때문이다.

## 6. 요약

이제 카트 정렬과 휠 셋업에 필요한 최적의 변수들을 알아보았다. 실제 세팅은 위에서 언급한 내용 이외에도 많은 것들을 고려하여야 한다. 타이어 접지력의 세팅은 경기장, 날씨, 제품의 불 균일성 등을 고려하여야 한다. 즉, 어떤 경기장은 코너의 반경이 다른 경기장 보다 크며 어떤 경기장은 코너가 매우 많기도 하여 세팅을 상황에 맞게 하여야 하는 것이다. 각각의 변수를 세팅할 경우는 중간 값을 취하는 것이 바람직하며 이 중간 값을 각각의 경기장의 특성에 맞추어 변화시키면 되는 것이다. 예를 들면, 접지력이 작게 발생하는

경기장 (혹은 매우 추운 날씨) 에서는 캐스터를 크게 하여 초기 회전 발생이 용이하게 할 수도 있다. 또한 토우인 값을 크게 하여 타이어가 마찰을 더욱 많이 발생하여 타이어의 온도가 급격히 상승하여 원하는 접지력의 수준에 용이하게 도달할 수 있게 하는 것이다. 그러나 이러한 세팅은 다른 핸들링 문제를 야기할 수 있다는 것을 이해하여야 하며 이러한 문제를 해결하는 또 다른 노력이 필요하게 되는 것이다.

가장 중요한 것은 후륜 내측으로부터는 조종 성능을 향상시키는데 필요한 접지력을 거의 기대하지 못한다는 것이며 마찰이 적게 발생하여 손쉽게 동력 손실을 초래하고 있다는 것이다. 그러므로 회전을 할 경우에도 속도를 낮추어서는 안되며 이렇게 하여야 핸들링이 매우 용이하게 되는 것이다. 그러나 위의 설명에서도 보았듯이 일부 세팅을 변경하면 여러 곳에 그 효과가 나타난다. 예를 들어 후륜의 간격을 변화시키면 카트에서 무게이동 뿐만 아니라 회전 시에 가속이나 감속에 의한 회전 토크의 효과도 달라지게 된다. 특정한 세팅의 변화가 어떻게 작용할 것이라는 확신을 가지고 있다고 할지라도 세팅에서 가장 중요한 것은 주행 기록이다. 여기서 설명되어진 많은 내용이 주행 기록을 향상시키기를 바라는 바이다.

## 7. 맺음말

지금까지 카트에 대한 공학적 접근 방법을 소개하였다. 본 글에서는 상세한 내용을 소개하지는 못하였지만 가까운 시일 내에 카트 새시 프레임 설계시에 고려하여야 하는 내용 등을 정리한 글을 선보일 예정이다.

특히 자동차 경주의 기본이 되는 카트에 대한 공학적 접근은 이제 시작에 불과하며 많은 공학도들이 최고의 공학 기술을 가지고 있다는 F1 자동차에 대한 내용을 이해하고 분석할 수 있는 때가 얼른 다가왔으면 하는 바람이다.

(장성국 편집위원 : skjang@hit.halla.ac.kr)