

‘탈리도마이드 사건’은 약물 독성 시험에서 중요한 전환점이 된 사건이다. 1950년대 독일의 제약 회사 그뤼넨탈에서 개발한 탈리도마이드($C_{13}H_{10}N_2O_4$)는 당시 많은 동물 실험의 성공을 바탕으로 수면 진정제로 판매되었다. 그 후 임산부의 입덧을 완화한다는 추가 연구 결과가 발표되어 많은 임산부가 약을 복용했지만, 그 부작용으로 1만 명에 가까운 기형아를 출산하게 되면서 판매가 금지되었다. 탈리도마이드가 부작용을 일으키게 된 원인은 탈리도마이드가 거울상 이성질체의 속성을 갖고 있었기 때문이다. 이 사건 이후 과학자들은 의약품과 같은 화합물의 부작용을 줄이기 위해 거울상 이성질체에 대해 지속적인 연구를 해 오고 있다.

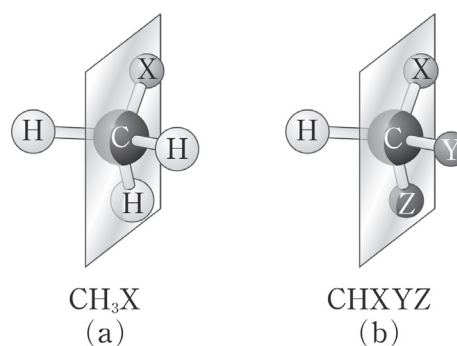


거울상 이성질체를 이해하기 위해서는 거울상과 이성질체에 대해 알아야 한다. 거울상이란 <그림 1>의 거울에 비친 물체의 상(像)과 같이 좌우가 바뀌어 있는 상태를 말한다. 왼손을 거울에 비추면 거울에는 오른손 모양의 상이 비친다. 물체나 분자는 자신의 거울상과 포개지는 것과 그렇지 않은 것으로 구분된다. 위에서 예로 든 손은 자신의 거울상과 포개지지 않지만, 완전한 둥근 공이나 정육면체와 같은 경우에는 자신의 거울상과 포개진다. 이때 전자를 카이랄성(손대칭성)이라 부르고, 후자를 비카이랄성이라 부른다.

이성질체는 분자식은 같지만 분자 내에 있는 구성 원자들의 결합 방식이나 공간 배열이 동일하지 않은 화합물을 말한다. 분자식이 같은 화합물이더라도 어떤 방식으로 배열되느냐에 따라 그 성질은 달라질 수 있다. 이성질체는 크게 구조 이성질체와 입체 이성질체로 나뉘는데, 그 중 구조 이성질체는 분자식은 동일하지만 분자를 구성하는 원자들의 결합 방식이 다른 화합물을 말한다. 반면 입체 이성질체는 분자식과 분자를 구성하는 원자들의 결합 방식은 동일하지만, 3차원에서 공간 배열이 다른 이성질체를 말한다. 앞에서 설명한 카이랄성에 해당하는 화합

물은 거울상 이성질체로, 입체 이성질체에 해당한다고 할 수 있다.

그렇다면 물체나 분자가 카이랄성인지 비카이랄성인지 어떻게 구분할 수 있을까? 그것은 물체나 분자가 대칭면을 갖는지의 여부를 통해 확인할 수 있다. 대칭면이란 물체를 반으로 나누어 한쪽 반이 다른 반쪽과 정확하게 대칭이 되도록 가로지르는 가상의 평면을 말한다. 대칭면이 존재하면 그 물체는 자신의 거울상과 완전히 포개지므로 비카이랄성이고, 반대로 대칭면이 존재하지 않으면 카이랄성이다. 예를 들어 정육면체는 가로면, 세로면 등의 대칭면을 갖고 있으므로 비카이랄성이다. 어떤 화합물의 구성 분자가 카이랄성인지 여부를 알기 위해 탄소를 중심으로 정사면체형 구조를 갖고 있는 CH_3X 와 $CHXYZ$ 형태의 분자를 가정해 보자.



(그림 2)

CH_3X 는 <그림 2>의 (a)와 같이 대칭면을 만들면 대칭면 밖의 두 H가 서로 포개질 수 있으므로 비카이랄성이지만, 그림 (b)의 $CHXYZ$ 는 탄소를 중심으로 네 개의 서로 다른 원자들이 결합해 있어 서로 포개질 수 있는 대칭면이 존재하지 않으므로 카이랄성이다. 이렇게 서로 다른 원자들의 중심에 있는 탄소를 카이랄성 중심이라 부른다.

우리가 일상생활에서 접하는 대부분의 의약품에는 카이랄성 분자들이 섞여 있고, 대개의 경우 쌍을 이루는 거울상 이성질체 중 한쪽만이 원하는 약 효과를 나타낸다. 즉 다른 거울상 이성질체는 효과가 전혀 없거나, 약한 효과를 낼 뿐이다. 어떤 의약품의 경우에는 다른 한쪽의 거울상 이성질체가 심각한 부작용이나 독성을 내기도 한다. 앞에서 언급한 ‘탈리도마이드’의 경우가 그에 해당한다.

카이랄성 물질이 인체에 수용되는 생물학적 원리는 손과 장갑의 관계와 비슷하다. 즉 손에 해당하는 카이랄성 분자는 장갑에 해당하는 특정 카이랄성 수용체와만 결합하

는 특이성이 있다. 예를 들어 우리가 먹는 천연 식품은 대개 한쪽 거울상 형태의 분자로 되어 있다. 그리고 그러한 식품을 소화하는 효소도 카이랄성을 지녀 천연 식품의 대부분을 이루는 한쪽 거울상 형태와만 선택적으로 반응하게 된다. 따라서 천연 식품에서는 찾아볼 수 없는 다른 쪽 거울상만을 가진 분자로 이루어진 인공 식품만을 섭취한다면 우리는 영양 부족을 겪게 될 것이다.

거울상 이성질체는 대개 일부 성질만 서로 다를 뿐 녹는 점, 끓는점, 용해도 등의 물리적 성질들은 모두 똑같기 때문에 일반적인 분자 분리 방법으로는 이 둘을 분리하기

쉽지 않다. 그래서 특히 의약품 분야에서는 거울상 이성질체의 부작용을 줄이기 위해 둘을 분리하는 다양한 촉매 개발이 이루어져 왔다. 그 노력의 결과로 2001년 놀스 등의 과학자들이 전이 금속을 이용하여 둘을 분리하는 광학 활성 촉매를 개발했고, 그 공로로 노벨 화학상을 받았다. 현재에도 새롭게 만들어지는 의약품과 치료제의 효능을 높이기 위해 한쪽 거울상 이성질체만을 분리할 수 있는 다양한 광학 활성 촉매 개발이 지속해서 이루어지고 있다.

— 보기 —

이부프로펜, 페니실라민, 티모롤

‘이부프로펜’은 소염 진통제로, 거울상 이성질체이다. 한쪽 거울상은 체내에서 활성화되는 약물이지만 다른 한쪽은 체내에서 불활성화된다. 그러나 이 둘을 분리하는 이점이 확실하지 않고 분리하는 어려움과 높은 비용으로 인해 두 거울상을 절반씩 포함한 라세미 혼합물의 형태로 판매되고 있다.

‘페니실라민’은 거울상 이성질체로 한쪽 거울상은 만성 관절염을 치료하는 데 사용되고, 다른 한쪽은 독성이 강해 발열, 백혈구 감소 등 부작용을 유발할 수 있다.

‘티모롤’은 거울상 이성질체로 한쪽 거울상은 협심증과 고혈압을 치료하고, 다른 한쪽은 녹내장 치료에 유용하다. 두 가지 거울상은 서로 다르지만 모두 유익한 결과를 나타낸다.

주제

정리

카이랄성과 거울상 이성질체

우리 주변에 있는 의약품에 대해 설명하고 있다. 특히, 사회적으로 큰 논란이 됐었던 ‘탈리도마이드’에 대해 소개하며 거울상 이성질체에 대해 소개하고 있다. 이성질체의 정의는 어렵지만, 지문에 잘 제시되어 있으므로, 정의를 따라가며 잘 확인하면 어렵지 않게 읽을 수 있을 것이다. 이성질체와 관련된 소재는 다양하지만, 가장 대표적인 문제였던 ‘탈리도마이드’를 다루었기 때문에 연계할 수 있는 포인트는 ‘광학 활성 촉매’를 제외하고 비교적 적다고 생각한다. 광학 활성 촉매는 문제-해결-원리-업적까지 모두 제시되어 있다는 점에서 매우 매력적인 소재라고 생각한다.

지문정리

- ▶ 주 제: 거울상 이성질체와 광학 활성 촉매 개발
- ▶ 1문단: 탈리도마이드 사건의 의미
- ▶ 2문단: 거울상과 카이랄성의 개념
- ▶ 3문단: 이성질체의 개념과 종류
- ▶ 4문단: 카이랄성과 비카이랄성 구분 방법
- ▶ 5문단: 카이랄성과 비카이랄성 구분 방법
- ▶ 6문단: 의약품과 카이랄성의 관련성
- ▶ 7문단: 우리 몸과 카이랄성의 관련성
- ▶ 8문단: 거울상 이성질체 분리를 위한 광학 활성 촉매 개발

해제

이 글은 의약품과 화합물의 부작용에 관련된 카이랄성과 거울상 이성질체의 성질에 대해 설명하고 있다. 물체나 분자가 거울에 비쳐 좌우가 바뀐 대상인 자신의 거울상과 포개지지 않을 때 이를 카이랄성이라 부르고, 포개질 수 있을 때 이를 비카이랄성이라 부른다. 거울상 이성질체는 이성질체의 한 종류로 분자식과 분자들의 결합 방식이 동일하지만 3차원적 공간 배열이 다른 이성질체를 말한다. 거울상 이성질체는 대개 한쪽 거울상만 효과를 나타내는데, 간혹 한쪽 거울상이 부정적 효과를 나타내는 경우가 있다. 그래서 이 둘을 분리하기 위해 다양한 광학 활성 촉매 개발이 지속해서 이루어지고 있다.

수완에서는 이것을 물었다

우측 도형의 카이랄성을 판단하기

- 물컵에 아무 표시도 되어 있지 않다면 물컵은 비카이랄성이다.
- 물컵 겉면 한 곳에 ‘LOVE’라는 글자를 적으면 물컵은 카이랄성이 된다.



〈보기〉를 보고 반응하기

- 이부프로펜의 거울상 이성질체는 녹는점, 끓는점, 용해도 등의 물리적 성질이 같아 분리하는 것이 쉽지 않겠군.
- 페니실라민은 광학 활성 촉매를 개발하여 독성이 있는 거울상 이성질체를 분리하여 제거하면 약의 부작용을 줄일 수 있겠군.
- 티모롤을 통해 의약품 중에는 탈리도마이드와 달리 거울상 이성질체가 각기 다른 유용한 약효를 지니는 경우도 있음을 알 수 있겠군.
- 이부프로펜, 페니실라민, 티모롤은 모두 거울상 이성질체이므로 각각 자신의 거울상과 포개지지 않는 특성을 보이겠군.

아래 문장에 대한 이유를 제시하기

“천연 식품에서는 찾아볼 수 없는 다른 쪽 거울상만을 가진 분자로 이루어진 인공 식품만을 섭취한다면 우리는 영양 부족을 겪게 될 것이다.”

- 천연 식품에서는 찾아볼 수 없는 다른 쪽 거울상만을 가진 분자는 그것과 결합하는 소화 효소가 존재하지 않기 때문이다.

토픽 한줄정리

- ▶ 탈리도마이드: 수면 진정제이자, 입덧 방지제였지만, 거울상 이성질체로 인해 큰 사고를 만든 약물
- ▶ 이성질체: 분자식은 같지만 분자 내에 있는 구성 원자들의 결합 방식이나 공간 배열이 동일하지 않은 화합물
- ▶ 구조 이성질체: 분자식은 동일하지만, 분자를 구성하는 원자들의 결합 방식이 다른 화합물
- ▶ 입체 이성질체: 분자식과 분자를 구성하는 원자들의 결합 방식이 동일하지만, 공간 배열이 동일하지 않은 화합물
- ▶ 기하 이성질체: 입체 이성질체의 한 종류로, 결합 방향이 동일하지 않은 화합물
- ▶ 광학 이성질체: 입체 이성질체의 한 종류로, 3차원 결합 순서가 동일하지 않은 화합물

추가 읽기

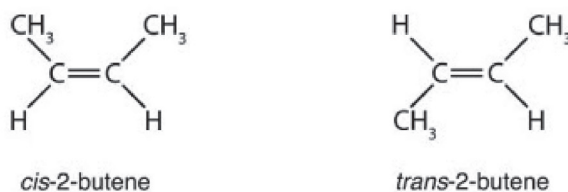
화학식과 원자

일반적인 물질은 분자의 형태로 되어 있다. 즉, 우리가 숨 쉬는 공기, 물 모두 분자이다. 그 분자를 구성하는 것이 원자이다. 예를 들어, 물 분자는 수소 원자 2개와 산소 원자 1개로 이루어져 있다.

이성질체

이성질체에는 구조 이성질체와 입체 이성질체가 있다. 모든 이성질체는 분자식이 동일하다는 것을 전제로 갖고 있다. 구조 이성질체는 분자의 특정 원자에 결합된 다른 원자의 종류가 다른 것이다. 즉, 분자의 '구조'가 다르다.

입체 이성질체는 구조가 같지만 분자가 다른 것이다. 입체 이성질체는 크게 두 가지가 있다. 기하 이성질체와 광학 이성질체가 있다. 우선, 광학 이성질체는 수능완성 지문을 참고하도록 하자. 아래 그림에서 'cis'로 시작하는 물질과 'trans'를 시작하는 물질이 그 예시이다. 가운데에 있는 '='는 이중결합으로, 회전이 불가능하기 때문에 두 물질은 서로 같은 물질이 아니다. 실제로, 두 물체는 끓는점 등 여러 성질이 다르다.



광학 활성 촉매

본문에 제시된 바와 같이 거울상 이성질체는 여러 문제를 만듦에도 불구하고 분리하기 상당히 어려운 성질을 갖고 있다. 그렇게 개발된 것이 광학 활성 촉매이다. 광학 이성질체와 그 문제가 제시된 반면, 그 해결책인 광학 활성 촉매가 수능완성의 본문에는 매우 짧게 제시되어 있기 때문에 추가 자료에서 이를 심층적으로 다룰 것이다.

연계 토픽

- ▶ 본 지문, 더 나아가서, 수능완성 전체에서 가장 매력적인 소재 중 하나라고 생각한다. 최근 평가원 지문의 흐름인 '난해한 정보 흐름'에도 부합하며, 상당히 고난도의 원리를 설명해야 하기 때문에 문과/이과 사이의 차이도 적을 것이다. 그 뿐만 아니라 연계되었으며, 노벨상을 받았다는 점에서 역사적으로 의미 있는 성과라고 볼 수 있다. 본문의 <그림1>과 비슷하게 제시하면 적용 문제도 가능할 것이다. 따라서, 이에 대해서 이후 추가자료에서 자세하게 다룰 것이다.
- ▶ 특히, 수능완성에서의 <보기>를 본다면, 특정 물질의 광학 이성질체 중에는 좋은 효과를 보이는 물질도 많은데, 이런 물질을 생산할 수 있도록 한다는 점에서 그 중요성이 강조된다.
- ▶ 물론, 이런 유기화합물을 표시하는 여러 투영도에 대해 설명한 후, 이를 적용하는 문제도 매력적인 소재 중 하나이다. 이런 문제가 나오면 3D 구조를 생각해서 접근하도록 하자.

추가 자료 1 - 놀스 교수 노벨상 추천사

전하, 그리고 신사 숙녀 여러분.

과학은 흥미진진합니다. 여기 이 단상 옆에, 그리고 뒤에 계신 모든 분들과 함께 적어도 저는 그렇게 생각합니다. 인간으로서 우리는 호기심을 가지고 있습니다. 과학의 도움으로 우리는 호기심을 풀고 경이로움을 발견할 수 있습니다. 과학은 정말 흥미진진합니다. 그러나 과학을 전공하지 않은 사람에게 무엇인가를 설명할 때면 이런 말을 듣습니다. 그것이 흥미로울지는 모르지만 어디에 씁니까? 올해 노벨 화학상의 경우에는 이런 문제가 없습니다. 이 질문에 답하기가 매우 쉽기 때문입니다. 오늘날 많은 약물들이 금년 수상자가 발견한 지식에 바탕을 두고 있습니다. 즉 분자의 거울상 이미지에 근거하고 있습니다.

올해 노벨 화학상은 서로 거울상인 두 가지 형태로 존재하는 분자들에 관한 것입니다. 이런 분자들을 키랄이라고 하며, 손을 의미하는 그리스어 키랄cheir에서 유래하였습니다. 우리의 두 손은 생명과 관련된 대부분의 분자들처럼 키랄입니다. 즉 오른손은 왼손의 거울상입니다. 우리 몸의 세포에서는 거울상 형태 중 오로지 한 가지만 관찰됩니다. 효소, 항체, 호르몬, 그리고 DNA 등이 그 예에 해당됩니다.

따라서 세포기작에서 중요한 역할을 하는 다른 수용체와 마찬가지로 우리 몸의 세포에 있는 효소는 키랄입니다. 이것은 효소가 거울상 형태 중의 하나에 선택적으로 결합한다는 것을 의미합니다. 키랄분자의 두 가지 형태는 종종 세포에 전혀 다른 효과를 줍니다. 예를 들면 우리 코에 있는 수용체는 거울상 대칭성에 민감합니다. 리모넨 물질의 한 가지 형태는 레몬 냄새가 나는 반면 그 거울상 물질은 오렌지 냄새가 납니다. 대부분의 약물들은 키랄분자로 구성되어 있고, 종종 거울상 형태 중에서 한 가지 형태만 효험이 있습니다. 다른 형태는 유해할 수도 있습니다. 예를 들면 탈리도미드(thalidomide)라는 약이 이 경우에 해당되는데, 이 약은 1960년대에 임산부에게 처방되었습니다. 한 가지 거울상 형태는 메스꺼움을 없애 주는 데 반해 다른 한 가지는 너무 늦게 발견되었는데 치명적인 해(기형아 출산)를 줄 수 있었습니다.

그래서 가능한 한 순수하게 각각의 거울상 형태를 생산하는 것은 매우 중요합니다. 실험실에서 화합물을 합성할 때 같은 양의 두 가지 거울상 형태가 만들어지는 것이 일반적입니다. 올해 노벨 화학상 수상자는 한 가지 형태만 합성할 수 있는 키랄 촉매를 개발했습니다. 촉매란 그 자체는 소비되지 않고 반응을 빠르게 진행시키는 물질입니다.

1968년 윌리엄 놀스는 최초로 키랄 촉매에 의한 수소화 반응이 가능하다는 것을 보였습니다. 그것은 즉각 많은 연구자들을 독려한 시기적절한 발견이었습니다. 놀스는 즉시 그 자신 및 다른 사람들의 기초 연구 결과를 활용해서 의약 엘—도파(L-DOPA)의 대량생산 방법을 개발했습니다. 엘—도파는 파킨슨병의 치료제입니다. 이 병으로 심한 고통을 겪던 제 부친을 포함해서 수백만 명의 환자들이 이 약으로 고통을 덜었습니다.

이 연구를 더욱 발전시켜서 오늘날의 더 선택적이고 일반적인 키랄 수소화 촉매를 개발한 사람이 노요리 료지 교수입니다. 그의 촉매분자 한 개는 수백만 개의 생성물 분자를 만들어 낼 수 있습니다. 노요리 교수의 방법은 실질적으로 매우 중요한데, 특히 여러 항생제의 대량 생산에서 그러합니다. 중요하지만 불행하게도 매우 뉴스가 될 만한 활용 예입니다.

배리 샤플리스 교수는 다른 형태의 반응인 산화반응의 키랄 촉매를 개발해 왔습니다. 그의 키랄 촉매에 의한 에폭시화 반응과

이수산화 반응은 복잡한 분자를 설계할 수 있는 새로운 가능성을 열었습니다. 이러한 반응들은 특히 산업체에서, 예를 들면 가장 심각한 두 가지 질병, 궤양과 고혈압 약의 생산에 널리 사용되어 왔습니다.

수상자들의 발견이 산업에 미치는 역할에 특별히 초점을 맞추어 말씀드렸으나 이들의 발견은 또한 학문적으로 극히 중요한 도구가 됩니다. 이 분야의 연구는, 화학뿐만 아니라 재료과학, 생물, 그리고 의학의 빠른 발전에 기여하고 있습니다.

알프레드 노벨 박사는 유언에서 이 상이 '인류에게 지대한 공헌을 한' 사람에게 수여되어야 한다고 명시하여 과학의 유익한 면을 강조했습니다. 따라서 올해 노벨 화학상은 과학이 무엇에 유익한가에 대해 쉽게 답을 해줄 뿐만 아니라 알프레드 노벨박사의 정신에 온전히 부합되는 상이기도 합니다.

놀스 박사님, 노요리 박사님, 그리고 샤플리스 박사님, 저는 이 자리에서 박사님들이 이룩한 발견과 그로 인한 과학의 진보를 간단히 설명했습니다. 교수님들의 업적이 인류에 미친 유익한 결과는 이미 풍성합니다. 그리고 키랄 촉매 분야에서 후학들의 연구로 크게 확산될 것을 확신합니다. 스웨덴 왕립과학원의 진심 어린 축하를 전해드립니다. 앞으로 나와 주십시오. 이제 전하께서 노벨상을 수여하시겠습니다.

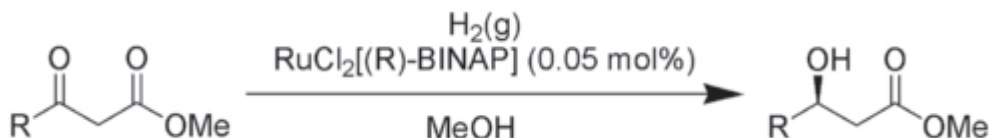
2001년 노벨 화학상 추천사 중

추가 자료 2 - 키랄 촉매에 의한 수소화 반응과 산화 반응의 요약

카이랄(키랄과 혼용) 물질과 관련되어 수상을 받은 세 학자의 업적에 대해서 요약할 것이다.

첫 번째 수상자, 노요리 료지

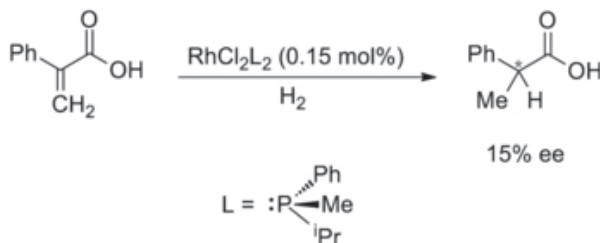
키랄 촉매에 의한 수소화 반응은 노요리 비대칭 수소화 반응이라고도 한다. 노요리는 위 반응을 개발하였으며, 해당 반응에도 사용되는 물질인 BINAP을 개발하기도 하였다. 아래 반응이 노요리 비대칭 수소화 반응이다. 하나의 선이 하나의 결합이며, 꺾인 부분은 탄소 원자이다. 우측 생성물에서 원으로 표시된 탄소를 보면 키랄 탄소라는 것을 확인할 수 있다. 탄소는 총 4개의 결합을 하는데, R, OH, 다른 탄소 하나에 대한 결합이 표시되어 있다. 이때, 수소 하나는 생략되어 있는 것이다. 반응물에는 키랄 탄소가 없었지만, 생성물에는 단 한 가지 키랄 탄소만 생성되는 것을 확인하자. OH라고 쓰여 있는 작용기(하이드록시기 작용기, 알코올)가 진한 세로 모양으로 표시된 것은 해당 부분이 종이면 위로 나와 있다는 것이다. 생략되어 있는 탄소의 네 번째 결합인 수소는 종이면 아래로 들어가 있는 형태이다. 하나의 탄소에 결합된 네 개의 부분이 모두 다르므로 키랄 탄소인 것이다. 한 종류의 키랄 탄소만 형성되는 것이 그의 업적이다. 아래 반응에 명시되어 있는 BINAP은 이후 수많은 키랄 생성물을 선택적으로 만드는 데에 활용되었다.



두 번째 수상자, 윌리엄 스탠디시 놀스

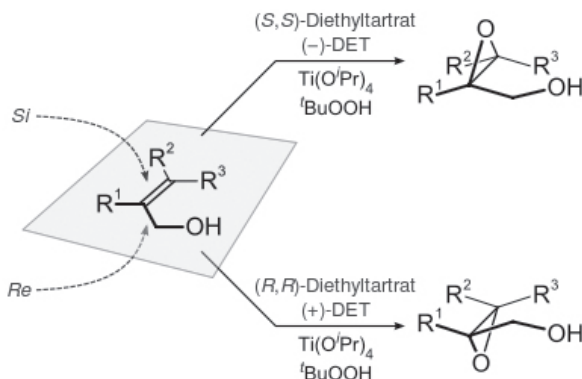
본문에 제시된 '놀스 등의 과학자'의 그 놀스이다. 놀스의 제일 큰 업적은 바로 L-Dopa의 대량생성 방법이다. L-Dopa는 파킨슨병의 치료제로, 수백만 명의 환자들에게서 파킨슨병의 고통을 많이 덜어주었다. 특히, 놀스의 반응을 응용하여 노요리가 위의 반응을 만들었다는 점을 보면 해당 분야를 선구적으로 개척했다는 점 역시 놀스의 업적 중 하나이다.

아래 반응은 놀스 교수의 반응 중 하나이다. 우측에 작은 점으로 표시된 탄소가 키랄 탄소라는 것을 확인하자.



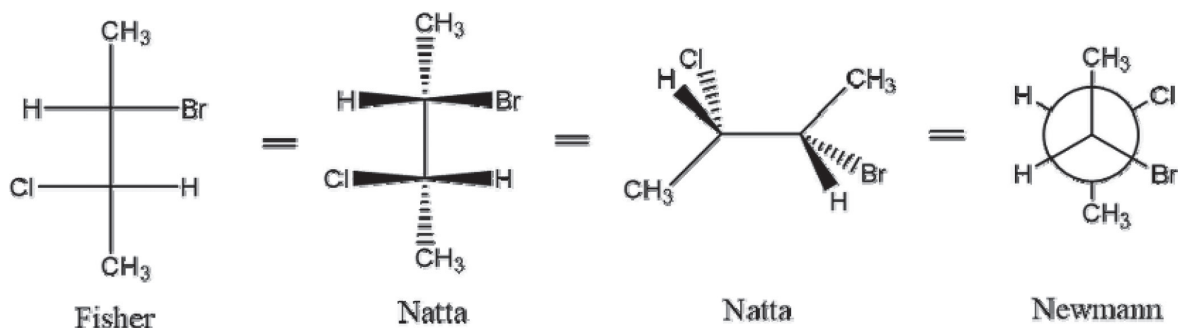
세 번째 수상자, 칼 배리 샤프리스

샤프리스 에폭시화로 유명한 반응을 만든 학자이다. 샤프리스 반응은 반응기(분자의 일부)의 반응 세기 차이를 이용하여 반응의 물리적 방향을 조정한 것이다. 아래 반응을 보면, Si와 Re의 방향 차이를 확인할 수 있다. 이후, 탄소-탄소-산소 고리를 풀어내는 방향에 따라 키랄 탄소가 형성되는 것이다.



추가자료 3 - 유기화학의 여러 투영도

유기화학은 분자의 3D 구조를 다룬다. 본문에서 키랄 탄소의 구조를 보면 입체 구조가 중요함을 알 수 있다. 하지만, 대부분의 연구는 2D인 종이 위에서 이루어진다. 따라서, 유기화학의 여러 물질을 명확하게 표현하기 위해서 여러 투영도를 개발했다. 대표적으로 뉴먼 투영도, 피셔 투영도, 그리고 하위스 투영도가 있다. 물론, 그 전에 가장 먼저 접할 수 있는 뼈기 구조식도 있다.



0. 뼈기 구조식

위의 노요리 반응을 소개하며 짧게 소개하였다. 위의 네 도형 중 가운데 두 도형을 보자. 단순한 직선은 종이에 놓인 직선이고, 진한 삼각형은 종이면 위로 올라온 직선이며, 점선은 종이면 아래로 놓인 직선이다. 즉, 세 번째 그림에서 위에서 보는 사람의 입장에서 H는 Cl과 Br보다 가깝게 보이는 것이다.

1. 뉴먼 투영도

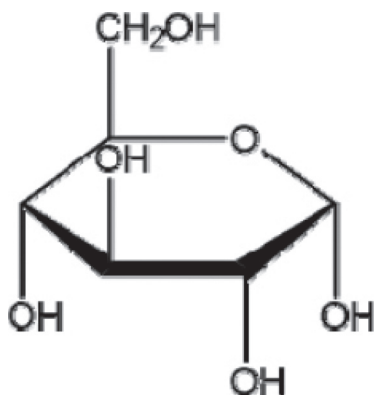
위의 네 그림 중 네 번째 그림이다. 하나의 탄소-탄소 축을 설정한 후, 그 축의 방향에서 물질을 본 것이다. 보는 사람의 입장에서 더 가까운 것은 원 위의 선으로, 더 먼 물질은 원 아래의 선으로 표현하는 것이다. 즉, 네 번째 물질은 세 번째 물질의 오른쪽에서 바라본 형태이다.

2. 피셔 투영도

피셔 투영도는 첫 번째 그림으로, 두 번째 형태를 선으로 표현한 것이다. 번거롭게 진한 삼각형과 점선으로 그리는 것을 피한 것이다. 가로축은 종이면 위로(진한삼각형) 세로축은 종이면 아래로(점선)으로 약속한 것이다.

3. 하위스 투영도

고리형 화합물을 그릴 때 이용된다. 화학보다는 생물에 보다 많이 사용된다. 아래 그림은 하위스 투영식의 예시이다.



주제

정리

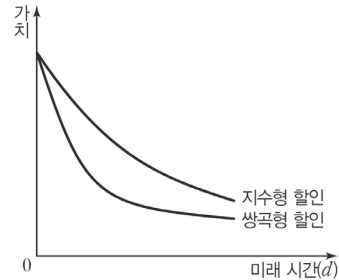
구매 결정 시점과 손익 시점이 시간적으로 떨어져 있을 때의 의사 결정을 ‘다른 시점 간의 선택’이라고 한다. 일반적으로 거의 모든 경제 활동의 의사 결정은 다른 시점 간의 선택이라 할 수 있다. 그렇다면 다른 시점 간의 선택에서 이익에 대한 가치 평가는 어떻게 이루어질까?

현재 100원을 갖고 있다고 가정해 보자. 이 돈이 1년 후에 얼마 정도의 가치를 갖는지 계산하기 위해서는 이자율(연이율)을 고려해야 한다. 현재 갖고 있는 화폐의 1년 후의 가치를 식으로 나타내면 $(1 + \text{이자율}) \times \text{화폐의 명목 가치}$ 가 된다. 여기서 명목 가치란 화폐의 액면에 적힌 금액을 의미한다. 예를 들어 이자율이 연 5%라면 현재 100원이 갖는 1년 후 가치는 $(1 + 0.05) \times 100\text{원} = 105\text{원}$ 이 된다. 이를 역으로 적용하면 1년 후 100원의 현재 가치는 $\frac{100\text{원}}{(1 + 0.05)}$ 인 95원 정도가 된다. 이 경우 1년 후 100원의 현재 가치는 100원보다 적은 금액으로 할인되어 나타나기 때문에 위의 식에서 이자율은 곧 할인율이라고 할 수 있다. 이처럼 경제학에서는 현재로부터 떨어져 있는 미래 시점의 편익이나 비용의 가치를 할인이라는 개념을 통해 현재 시점의 가치로 환산한다. 이를 식으로 나타내면 ‘현재 가치 = $\frac{\text{미래의 명목 가치}}{(1 + \text{할인율})}$ ’가 되는데, 이때 $\frac{1}{(1 + \text{할인율})}$ 을 할인 인자라고 한다. 할인율이 작을수록 할인 인자는 커지므로 1년 후 100원의 현재 가치는 커진다.

어빙 피셔와 같은 고전학과 경제학자들은 할인율이 복잡한 심리적 작용에 의해 결정되기 때문에 할인율 결정에 대해 신중한 태도를 취했지만, 신고전학과 경제학의 태두인 폴 새뮤얼슨은 할인율이 일정하다고 가정하고, ‘현재 가치 = $\frac{\text{미래의 명목 가치}}{(1 + \text{할인율})^d}$ ’라는 식을 제시했다. 여기서 d 는 미래 시간으로, 예컨대 ‘ $d = 1$ ’일 경우 이는 1년 후 재화가 갖는 현재 가치를 의미한다. 이는 미래의 명목 가치를 현재 가치로 환산하는 공식으로, 현재 가치가 지수 함수로 나타나기 때문에 ‘지수형 할인’이라고 한다.

지수형 할인에 대해 최초로 의문을 품은 사람은 스트로츠로, 그는 할인율이 시간의 경과에 따라 변할 수 있기 때문에 현재 가치를 지수 함수로 나타낼 수 없다고 반박했다. 이러한 스트로츠의 주장에 대해 행동주의 경제학자인 세일러는 실험을 통해 시간의 경과에 따라 할인율이 감소한다는 것을 증명했다. 이와 같은 할인의 방법을 간단하게 식으로 나타내면 ‘현재 가치 = $\frac{\text{미래의 명목 가치}}{1 + d}$ ’ 때문에 ‘쌍곡형 할인’이라고 한다. 예컨대 위의 식의 ‘미

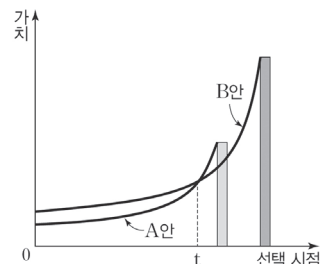
래의 명목 가치’에 100원을 대입하면, 1년 후 100원의 현재 가치는 50원, 2년 후 100원의 현재 가치는 약 33원, 3년 후 100원의 현재 가치는 25원과 같이, 시간이 미래로 갈수록 현재 가치가 감소하는 비율이 점점 줄어든다.



〈그림 1〉

〈그림 1〉은 지수형 할인과 쌍곡형 할인에서 d 가 증가함에 따라 현재 가치가 감소하는 것을 보여주는 그래프이다. 여기서 x 축은 미래 시간(d)을, y 축은 할인된 현재 가치를 나타낸다. 그런데 지수형 할인은 d 의 값이 1, 2, 3, ..., n 으로 증가할 때 현재 가치가 일정한 비율로 감소하는 반면, 쌍곡형 할인은 초기에는 급격하게 가치가 감소하다가 시간이 흐르면서 가치가 감소하는 비율이 줄어든다. 이는 할인율이 일정한 지수형 할인과 달리 쌍곡형 할인에서는 가까운 미래에는 할인율이 크고 먼 미래로 갈수록 점점 할인율이 작아지는 것을 나타내는 것이다.

이와 같은 지수형 할인과 쌍곡형 할인에서의 할인을 차이로 인해 다른 시점 간의 선택에서도 차이가 발생한다. 만일 가까운 미래에 작은 이익을 주는 A안과 먼 미래에 큰 이익을 주는 B안 중에서 하나의 안을 선택하는 상황을 가정해 보자. A안과 B안에 적용된 할인율이 같고 현재 B안의 할인된 가치가 A안보다 크다면, 시간이 지나더라도 B안의 현재 가치가 A안보다 크기 때문에 선택 시점과 상관없이 B안을 선택하게 된다. 하지만 쌍곡형 할인에서는 선택 시점과 이익을 얻는 시점과의 시간적 거리에 따라 할인율이 달라지기 때문에 어느 시점에서 선택하느냐에 따라 선택이 달라지기도 한다.



〈그림 2〉

〈그림 2〉는 쌍곡형 할인에서 다른 시점 간의 할인을 보여주는 그래프이다. x 축은 선택 시점, y 축은 각 시점에서 할인

된 현재 가치, 그리고 막대는 A, B안이 현실화되어 이익을 얻는 시점과 그때의 가치를 의미한다. 그래프를 보면 시간이 경과하여 A, B안이 현실화되는 시점에 가까워질수록 가치가 증가하는 양상을 보인다. 그런데 초기에는 가치가 완만하게 증가하다가 막대에 가까워질수록 가치가 증가하는 폭이 커지는데, 이는 <그림 1>의 초기의 높은 할인율 때문에 나타나는 현상이다. 즉 <그림 1>에서의 초기의 높은 할인율로 인해 이익이 조금만 미래로 연기되어도 현재 가치가 크게 하락하므로, 반대로 이익을 얻는 시점에 임박할수록 <그림 2>와 같이 할인된 현재 가치가 급격하게 회복되는 것이다. 그로 인해 처음에는 A안의 현재 가치가 B안보다 작지만, 시간이 경과하여 t 시점을 지나 A안이 현실화되는 시점에 가까워질수록 A안의 가치가 급격하게 상승하여 B안의 현재 가치보다 커지면서 선호가 역전되는 현상이 나타나는데, 이를 '시간적 비정합성'이라고 한다. 예컨대 A안을 늦잠의 가치라고 하고 B안을 아침 운동의 가치라고 한다면, 시간적으로 멀리 떨어져 있을 때는 늦잠보다 아침 운동의 가치가 더 크게 느껴지지만, 막상 아침이 돼서 알람이 울리면 늦잠의 가치가 아침 운동의 가치보다 크게 느껴져서 운동을 포기하고 늦잠을 자는 것이 바로 시간적 비정합성에 해당한다. 이는 미래의 큰 이익보다 눈앞의 작은 이익을 선호하는 현상에 의한 것이다.

시간적 비정합성을 세일리는 '사람들은 내일의 사과 둘보다 오늘의 사과 하나를 선택하지만, 1년 후의 사과 하나보다는 1년 1일 후의 사과 둘을 선택한다.'라는 인상적인 표현으로 설명했다. 그리고 일반적으로 쌍곡형 할인은 시간이 경과하여 어떠한 선택이 현실화되는 시점이 가까워짐에 따라, 이익에 대한 평가는 초기에 완만하게 상승하다 나중에 급격하게 상승하는 반면, 손실에 대한 평가

는 시간이 경과하여 현실화되는 시점이 가까워지더라도 완만하게 상승하는 경향이 있다고 보았다.

이러한 경제학적 설명과 다른 측면에서 심리학자인 트롭과 리버먼은 인간의 심리에 바탕을 둔 '시간 해석 이론'을 통해 시간적 비정합성을 설명했다. 이 이론에 따르면, 사람이 어떤 대상의 가치를 평가할 때 동일한 대상이라도 시간적으로 대상이 멀리 있는 경우와 가까이 있는 경우에 대상을 다르게 해석하게 된다. 시간적으로 멀리 떨어져 있는 대상에 대해서는 대상의 본질적이면서도 추상적인 면을 중심으로 고차원적 수준에서 해석하는 반면, 시간적으로 가까이 있는 대상에 대해서는 세부적이면서도 구체적인 면에 주목하여 저차원적 수준에서 해석하게 된다. 예를 들어 1년 후에 스페인으로 여행을 간다고 할 때, 사람들은 스페인의 주요 관광지나 역사나 문화 등에 관심을 갖지만, 정작 일주일 후로 여행 날짜가 닥쳐오면 여행에 필요한 물건이나 로밍 방법, 환율 등과 같은 구체적인 정보에 관심을 갖는다.

시간 해석 이론을 적용하여 쌍곡형 할인에서 나타나는 시간적 비정합성을 설명하면 다음과 같다. 미래의 이익에 대한 평가에서 명목 가치의 크기와 같은 이익의 크기는 고차원적 성질에 해당하고, d의 값과 같은 시간의 연기는 저차원적 성질에 해당한다. 따라서 가까운 미래의 이익을 평가할 경우 이익의 크기보다 시간의 연기가 중시되기 때문에 시간이 조금만 미래로 연기되어도 할인이 크게 된다. 반대로 먼 미래에 관해서는 고차원적으로 해석하기 때문에 이익의 크기가 시간의 연기보다 중시된다. 이처럼 현재로부터 시간적으로 멀고 가까움에 따라 대상에 대한 해석이 달라지면서 쌍곡형 할인에서 나타나는 시간적 비정합성이 발생하는 것이다.

실험 참가자들에게 다음과 같은 가정의 상황을 제시했다. “○○개월 후에 100만 원을 받는 상황을 가정해 보자. 그런데 만일 지금 당장 돈을 받기를 원한다면 100만 원보다 훨씬 적은 금액을 받아야 한다. 만일 당신이 ○○개월을 기다리지 않고 지금 당장 돈을 받는다면 최소 얼마의 금액이면 만족하겠는가?”

‘○○개월’을 3개월, 6개월, 9개월, 12개월의 순서로 바꾸어 가며 물어본 결과 돈을 받는 시기가 늦춰질수록 지금 당장 받기를 원하는 금액은 작아지고, 그 금액이 변화하는 폭은 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

주제

정리

다른 시점 간의 선택에 대한 이론

본 글은 미래 시점의 가치를 판단하는 것으로 시작하고 있다. 이에 대한 여러 학자의 견해를 제시한 후, 그래프의 모형을 기준으로 지수형 할인과 쌍곡형 할인에 대해서 제시하고 있다. 특히, 이러한 경제학에 대한 현상을 제시한 후, 심리학적으로 접근하여 여러 가지 이론을 소개하는 것으로 마무리하고 있다. 지문이 매우 길며, 소개된 소재도 매우 다양하다. 쉽지 않은 지문이며, 제시된 소재는 수능특강/수능완성의 다른 소재들과 연결 지을 수 있기 때문에 주의 깊게 봐두면 좋을 것이다.

‘할인율’의 개념은 2007년 대수능에서 출제되었기 때문에 비교적 출제 확률이 낮다고 볼 수 있지만, 시간적 비정합성을 이용해 경제학 현상을 해석하는 내용은 심리학과 경제학을 동시에 물어볼 수 있으므로, 다소 중요하다고 생각한다. 반면, 비교적 쉽게 엮이지 않는 인문과 사회의 사이에 있는 분야인 만큼, 출제될 확률이 낮다고 볼 수 있다. 하지만, 출제된다면 난이도가 매우 높을 수 있기 때문에 잘 봐두는 것이 중요하다.

시간 해석 이론 자체는 매우 매력적인 소재이므로, 해당 이론을 다른 현상에 적용하는 유형도 충분히 출제될 수 있다고 생각한다.

지문정리

- ▶ 주 제: 지수형 할인과 쌍곡형 할인의 특징 및 시간적 비정합성에 대한 설명
- ▶ 1문단: 다른 시점 간의 선택과 이익에 대한 가치 평가
- ▶ 2문단: 할인율과 할인 인자의 개념
- ▶ 3문단: 지수형 할인의 공식 및 특징
- ▶ 4문단: 쌍곡형 할인의 공식 및 특징
- ▶ 5문단: 지수형 할인과 쌍곡형 할인에서의 할인율의 차이
- ▶ 6문단: 지수형 할인과 쌍곡형 할인에서 다른 시점 간의 선택문제
- ▶ 7문단: 쌍곡형 할인에서의 선택과 시간적 비정합성
- ▶ 8문단: 쌍곡형 할인에서의 이익과 손실에 대한 평가
- ▶ 9문단: 심리학에서의 시간 해석 이론의 특징
- ▶ 10문단: 시간 해석 이론을 통한 시간적 비정합성 이해

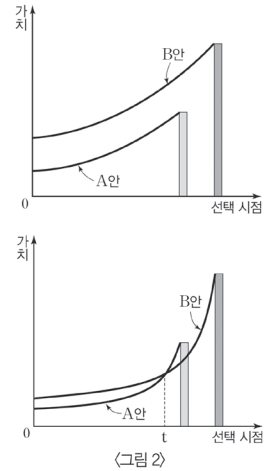
해제

이 글은 다른 시점 간의 선택에서 나타나는 현상을 경제학과 심리학적 측면에서 설명하고 있다. 경제학에서는 지수형 할인과 쌍곡형 할인을 통해 미래의 명목 가치가 현재의 시점에서 어떻게 할인되어 나타나는지 설명하고 있다. 할인율이 일정한 지수형 할인과 달리 쌍곡형 할인에서는 시간이 갈수록 할인율이 줄어들기 때문에 선호가 역전되는 시간적 비정합성이 발생하는데, 이와 같은 현상을 지수형 할인에서는 설명할 수 없다는 한계가 있다. 한편 심리학에서는 ‘시간 해석 이론’을 통해 시간적 비정합성을 설명하는데, 이는 시간적으로 가까이 있는 대상은 저차원적으로 해석하는 반면, 시간적으로 멀리 있는 대상은 고차원적으로 해석한다는 이론이다. 이에 따르면 시간적으로 멀리 있는 대상은 이익의 크기가 중요하고, 시간적으로 가까이 있는 대상은 시간의 연기가 중요하기 때문에 가까운 미래의 이익을 평가할 경우, 시간이 조금만 연기되어도 할인율이 커지게 된다.

수완에서는 이것을 물었다

우측 그래프와 본문의 <그림2>를 확인한 후, 아래 보기를 읽은 후 이해하기. <그림2>는 우측 하단에 첨부
다음은 지수형 할인에서 가까운 미래에 작은 이익을 주는 A안과 먼 미래에 큰 이익을 주는
B안이 현실화되어 돈을 받는 시점에 가까워짐에 따라 가치가 변하는 값을 그래프로 나타낸
것이다. (단, 막대는 A, B안이 현실화되어 이익을 얻는 시점에서의 현재 가치임.)

- 시간이 변화하더라도 A안과 B안의 할인율이 변하지 않는다고 전제하고 있다.
- <보기>는 <그림2>와 달리 A안이 현실화되는 시점이 가까워지더라도 A안을 선택하는 시간적 비경합
성이 발생하지 않는다.
- <그림2>는 <보기>와 달리 미래의 큰 이익보다 눈앞의 작은 이익을 선호하는 인간의 심리 현상과 관
련이 있다.
- <그림2>와 <보기> 모두 A안과 B안이 현실화되는 시점에 가까워짐에 따라 현재 가치가 증가하는 양
상을 나타내고 있다.



시간 해석 이론을 바탕으로, 아래 문장의 근거를 추론하기

사람들은 내일의 사과 둘보다 오늘의 사과 하나를 선택하지만, 1년 후의 사과 하나보다는 1년 1일 후의 사과 둘을 선택
한다.

- 가까운 미래에 관해서는 이익의 크기보다 시간의 연기를, 먼 미래에 관해서는 시간의 연기보다 이익의 크기를 더 중시하기 때문이겠군.

쌍곡형 할인과 시간 해석 이론을 바탕으로 아래 예시에 적용하기

결혼을 앞둔 사람들이 흔히 겪는 심리적 불안 현상으로 '매리지 블루'가 있다. 이는 결혼식까지 시간이 많이 남아 있을 때
는 아름다운 결혼 생활을 꿈꾸면서 결혼에 대한 기대감으로 설레다가 막상 결혼식 날씨가 코앞으로 다가오면 결혼식을 치
르는 과정에 대한 부담감이 기대감보다 더 커져 우울증을 느끼는 현상이다. 그런데 결혼과 관련한 이러한 심리 현상은 시
간 해석 이론으로는 설명이 가능하지만, 쌍곡형 할인으로는 설명이 불가능하다는 점에서 두 이론의 차이점이 있다.

(단, 결혼에 대한 기대감을 이익으로, 결혼에 대한 부담감을 손실로 간주한다.)

- 쌍곡형 할인에 따르면, 결혼식이 가까이 다가올수록 결혼에 대한 기대감이 급격하게 상승하기 때문에, 매리지 블루와 같은 심리적 불
안 현상을 설명할 수 없다.
- 쌍곡형 할인에 따르면, 결혼식이 가까이 다가올수록 결혼에 대한 기대감과 달리 부담감은 완만하게 상승하기 때문에 부담감이 기대
감을 역전하는 현상을 설명할 수 없다.
- 시간 해석 이론에 따르면, 결혼식이 가까이 다가올수록 결혼식을 치르는 과정에 대해 부담감이 커지는 것은 결혼의 구체적이고 세부
적인 면에 주목했기 때문이라고 설명할 수 있다.
- 시간 해석 이론에 따르면, 결혼식까지 시간이 많이 남았을 때 아름다운 결혼생활을 꿈꾸며 기대감으로 설레는 것은 결혼을 고차원적
수준에서 해석했기 때문이라고 설명할 수 있다.

토픽 한줄정리

- ▶ 이자율: 돈의 가치가 어떻게 변하는지를 표현하는 수치
- ▶ 어빙 피셔: 19세기 중반에서 20세기 초반 미국의 경제학자로, 화폐 수량설과 물가 지수론을 제시하였다.
- ▶ 로버트 스트로츠: 지수형 할인에 대해 할인율은 시간의 흐름에 따라 감소할 수 있다는 견해를 주장함
- ▶ 리처드 세일러: 20세기 중후반의 경제학자. 행동경제학의 체계화에 미친 영향으로 2017년 노벨경제학상을 수상하였다.

추가 읽기

현재 가치 계산 방법의 변화

1) 어빙 피셔(고전학과 경제학)

$$\text{현재 가치} = \frac{\text{미래의 명목 가치}}{(1 + \text{할인율})}$$

2) 폴 새뮤얼슨(신고전파 경제학)

$$\text{현재 가치} = \frac{\text{미래의 명목 가치}}{(1 + \text{할인율})^d}, \text{ 지수형 할인}$$

3) 리처드 세일러(행동주의 경제학)

$$\text{현재 가치} = \frac{\text{미래의 명목 가치}}{1 + d}, \text{ 쌍곡형 할인}$$

*d=미래시간

트롭과 리버만의 시간 해석 이론

1998년 미국 뉴욕대 야코브 트롭과 이스라엘 텔아비브대 니라 리버만은 '인성과 사회심리학 저널(Journal of Personality and Social Psychology)'에 처음으로 CLT를 발표했다. 사람은 동일한 사건에 대해서도 시간적 거리에 따라 다르게 판단하는 성향이 있다고 주장했다. 이어서 이들은 시간적 거리는 물론 공간적 거리나 사회적 거리에 의해서도 동일한 사건이 달리 해석된다는 이론을 완성했다. 2007년 '소비자 심리학 저널(Journal of Consumer Psychology)'에 발표된 CLT에 따르면 사람들은 동일한 사물에 대해 심리적으로 시간·공간·사회적 거리가 가깝다고 여기면 구체적으로 해석하는 반면에 그렇지 않다고 느끼면 추상적으로 해석하는 성향이 있다. 요컨대 시간·공간·사회적으로 '심리적 거리'가 먼 사물일수록 더욱 추상적으로 해석된다.

이인식 과학문화연구소장

추가 자료

정부나 기업이 사업에 투자할 때에는 현재에 투입될 비용과 미래에 발생할 이익을 비교하여 사업의 타당성을 진단한다. 이 경우 물가 상승, 투자 기회, 불확실성을 포함하는 할인율의 요인을 고려하여 미래의 가치를 현재의 가치로 환산한 후, 비용과 이익을 공정하게 비교해야 한다. 이러한 환산을 가능케 해 주는 개념이 할인율이다. 할인율은 이자율과 유사하지만 역으로 적용되는 개념이라고 생각하면 된다. 현재의 이자율이 연 10%라면 올해의 10억 원은 내년에는 $(1+0.1)$ 을 곱한 11억 원이 되듯이, 할인율이 연 10%라면 내년의 11억 원의 현재 가치는 $(1+0.1)$ 로 나눈 10억 원이 된다.

공공사업의 타당성을 진단할 때에는 대개 미래 세대까지 고려하는 공적 차원의 할인율을 적용하는데, 이를 사회적 할인율이라고 한다. 사회적 할인율은 사회 구성원이 느끼는 할인의 요인을 정확하게 파악하여 결정하는 것이 바람직하나, 이것은 현실적으로 매우 어렵다. 그래서 시장 이자율이나 민간 자본의 수익률을 사회적 할인율로 적용하자는 주장이 제기된다.

시장 이자율은 저축과 대출을 통한 자본의 공급과 수요에 의해 결정되는 값이다. 저축을 하는 사람들은 원금을 시장 이자율에 의해 미래에 더 큰 금액으로 볼릴 수 있고, 대출을 받는 사람들은 시장 이자율만큼 대출금에 대한 비용을 지불한다. 이때의 시장 이자율은 미래의 금액을 현재 가치로 환산할 때의 할인율로도 적용할 수 있으므로, 이를 사회적 할인율로 간주하자는 주장이 제기되는 것이다. 한편 민간 자본의 수익률을 사회적 할인율로 적용하자는 주장은, 사회 전체적인 차원에서 공공사업에 투입될 자본이 민간 부문에서 이용될 수도 있으므로, 공공사업에 대해서도 민간 부문에서만 높은 수익률을 요구해야 한다는 것이다.

그러나 시장 이자율이나 민간 자본의 수익률을 사회적 할인율로 적용하자는 주장은 수용하기 어려운 점이 있다. 우선 공공 부문의 수익률이 민간 부문만큼 높다면, 민간 투자가 가능한 부문에 굳이 정부가 투자할 필요가 있는가 하는 문제가 제기될 수 있다. 더욱 중요한 것은 시장 이자율이나 민간 자본의 수익률이, 비교적 단기적으로 실현되는 사적 이익을 추구하는 자본 시장에서 결정된다는 점이다. 반면에 사회적 할인율이 적용되는 공공사업은 일반적으로 그 이익이 장기간에 걸쳐 서서히 나타난다. 이러한 점에서 공공사업은 미래 세대를 배려하는 지속 가능한 발전의 이념을 반영한다. 만일 사회적 할인율이 시장 이자율이나 민간 자본의 수익률처럼 높게 적용된다면, 미래 세대의 이익이 저평가되는 셈이다. 그러므로 사회적 할인율은 미래 세대를 배려하는 공익적 차원에서 결정되는 것이 바람직하다.

2008 대수능