

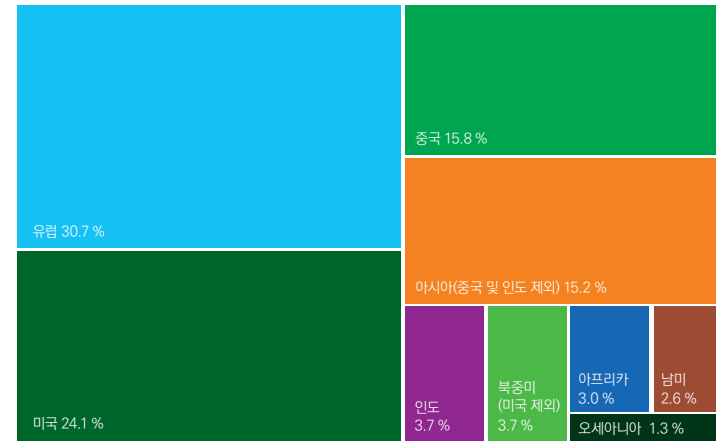
산업 구조가 결정하는 탄소 감축의 난이도, 카야 항등식으로 본 NDC 비교

국가 온실가스 감축목표(NDC)는 단순히 각국이 선언한 숫자의 크기만으로 비교할 수 없다. 탄소 배출량은 인구, 경제 규모(GDP), 에너지 효율(에너지집약도), 그리고 전력의 청정도(탄소집약도)라는 네 가지 요인이 복합적으로 작용한 결과이기 때문이다. 이를 설명하는 '카야 항등식(Kaya Identity)'을 통해 들여다보면, 한국이 짊어진 감축 의무의 무게가 단순한 수치 이상의 구조적 제약에서 기인함을 알 수 있다.

한국은 제조업 비중이 높고 에너지 다소비 업종이 경제를 지탱하는 구조다. 이로 인해 경제활동 1단위를 생산하는 데 필요한 에너지를 뜻하는 '에너지집약도'가 주요 산업국 대비 높게 나타난다. 이는 에너지를 낭비해서가 아니라, 철강이나 반도체처럼 공정상 에너지 투입이 고정적인 산업 비중이 크기 때문이다. 한국과 유사한 산업구조를 가진 국가 중 집약도가 이 정도로 높은 사례는 드물어, 단순한 효율 개선만으로는 감축 부담을 줄이는 데 한계가 있다.

반면, 에너지 1단위를 사용할 때 배출되는 이산화탄소의 양인 '탄소집약도' 측면에서 한국은 상당히 양호한 성적을 보인다. 산업 현장의 연료 효율이 높고 도시·수송 구조가 밀집되어 있어, 주요 산업국가 중에서도 탄소집약도는 낮은 편에 속한다. 결국 한국의 높은 NDC 목표는 비효율적인 에너지 사용 때문이 아니라, 제조업 중심의 무거운 산업 구조(높은 에너지집약도)를 안고도 선진국 수준의 탄소 효율(낮은 탄소집약도)을 달성해야 하는 '이중고'를 반영한 결과로 해석해야 한다.

1750년 이후 지역별 누적 탄소배출량 Global Carbon Budget (2025)



1750년 이후 누적 탄소배출량의 지역별 비중은 선진국 그룹이 역사적 배출 책임의 대부분을 차지하고 있음을 보여준다. 이 자료는 국제 기후 협약에서 핵심적인 분담 원칙을 정립하는 배경이 되었다. 파리협약은 모든 국가의 NDC(국가 온실가스 감축 목표) 제출을 의무화하여 보편적인 참여를 유도하는 동시에, 개발도상국에는 재정 지원과 각자의 역량을 고려한 목표 수립을 허용함으로써 책임의 무게를 분산하고 전 세계적인 행동을 촉진하는 유연한 메커니즘을 구축했다.

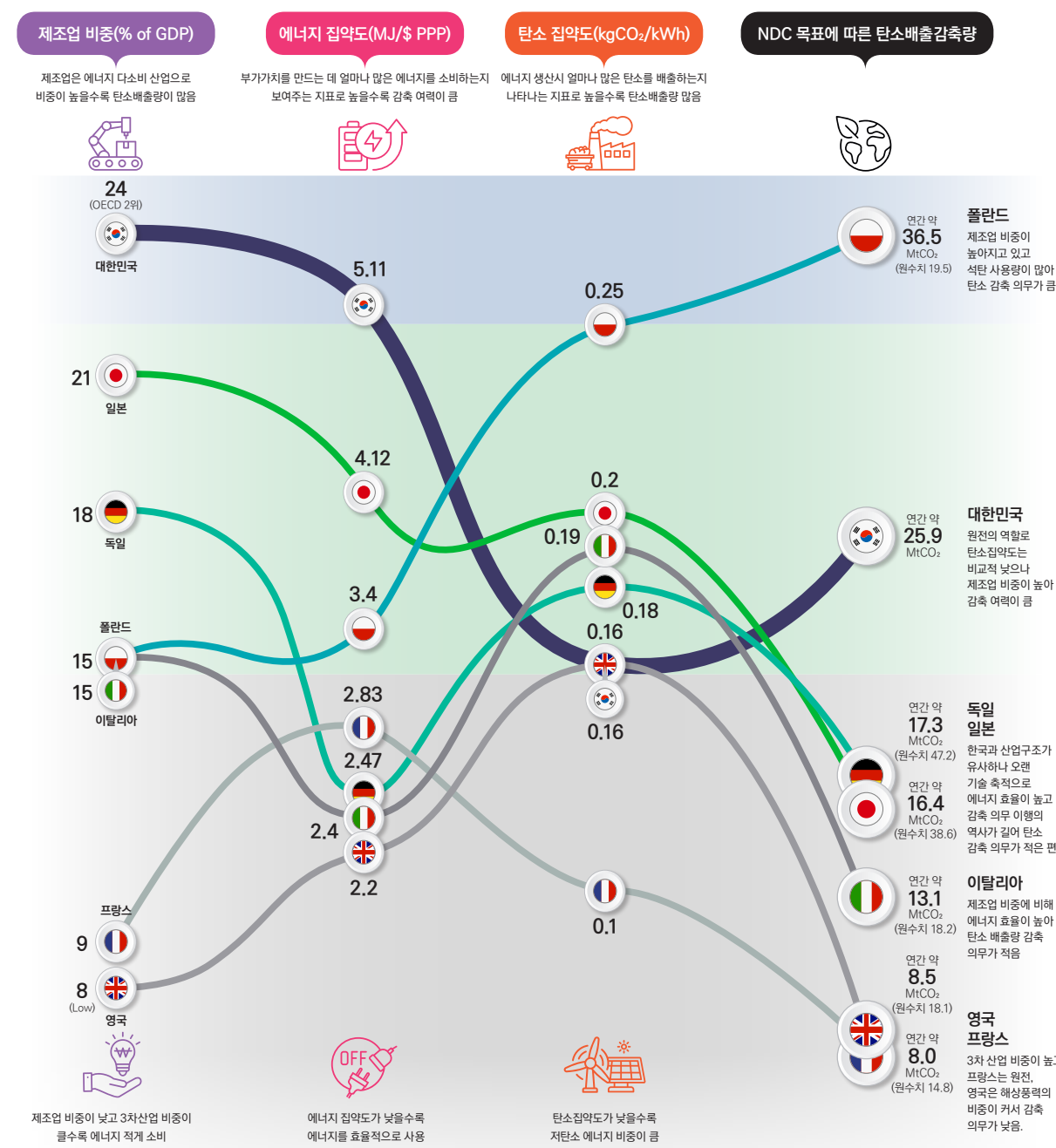
심층 해설: 국가별 구조적 제약과 감축 노력 비교

- 제조업 국가 3파전: 한국 vs 일본 vs 독일 세 나라는 모두 제조업이 경제의 핵심이라는 공통점을 갖지만, 감축 경로의 제약 조건은 서로 다르다.**
 - 한국:** 제조업 비중이 가장 높고 에너지 집약도가 큰 구조라 감축 여력이 매우 제한적이다. 따라서 같은 양을 감축하더라도 경제 규모 대비 짊어지게 되는 실질적 부담은 가장 크게 나타난다.
 - 일본:** 제조업 중심 경제지만 정밀공정 위주의 산업구조와 높은 자동화율, 그리고 오랫동안 축적된 에너지 효율 개선 노하우 덕분에 부가가치 생산에 따른 에너지 투입 증가폭이 상대적으로 작다.
 - 독일:** 산업 전반의 효율화와 더불어 재생에너지 중심의 전원 구성 전환이 빠르게 진행되면서, 제조업 국가임에도 불구하고 감축 경로가 비교적 안정적으로 설계되어 있다.
- 감축 부담의 상대성: 한국 vs 프랑스 vs 이탈리아 동일한 감축 목표라 할지라도 국가의 경제 구조에 따라 체감되는 충격은 다르다.**
 - 한국:** 제조업 비중과 에너지 집약도가 모두 높아, 감축 목표 달성을 위해 경제 전반이 감내해야 할 비용과 충격이 가장 크다.
 - 프랑스:** 제조업 비중이 낮고, 원전을 중심으로 전력 및 난방 부문의 탈탄소가 이미 상당히 진행되어 있다. 감축해야 할 압력이 여러 부문으로 분산되어 부담이 덜하다.
 - 이탈리아:** 제조업 비중은 프랑스나 영국에 비해 높은 편이지만 에너지 집약도가 낮아 동일한 감축량이 경제에 미치는 충격이 상대적으로 완화된다.

NDC 산출 근거와 주요국 비교

한국의 높은 NDC 목표는 OECD 최상위권인 제조업 비중(27.6%)이라는 환경에 따른 결과다. 원전과 기술 혁신 덕분에 전력 생산의 탄소 효율(집약도)만큼은 이미 독일이나 일본보다 앞선 수준을 달성했다. 즉, 비효율적이어서 목표가 높은 것이 아니라 가장 산업 구조상 짐이 무겁기에 부담한 의무도 큰 것이라고 봐야 한다.

국가별 NDC는 서로 다른 조건에서 출발한다. 에너지 시스템이 얼마나 탄소를 배출하는지, 경제를 움직이는 데 어느 정도의 에너지가 필요한지, 그리고 얼마나 큰 경제 규모를 유지하는지에 따라 감축의 난도가 달라진다. 이 세 가지는 배출량을 규정하는 기본 요소로, 산업 구성과 기술 수준, 효율 개선의 여력까지 함께 반영한다. 또한 산업화 이후 누적된 배출의 차이는 국제 감축 책임 논의의 기준이 되어 왔다. 유럽과 미국의 비중이 유난히 큰 이유도 이 역사적 궤적 때문이다. 이렇게 형성된 구조 속에서 각국 NDC는 현실적으로 선택 가능한 감축 경로를 반영하며, 감축 강도의 차이는 개별 국가의 제약 조건에서 비롯된다.



핵심용어

- 카야 항등식 (Kaya Identity)**
 총 탄소 배출량을 결정하는 요인을 인구, GDP, 에너지집약도, 탄소집약도의 곱으로 분해하여 설명하는 방정식이다. 국가별 배출 구조의 차이를 분석하는 핵심 도구다.
- 에너지집약도 (Energy Intensity)**
 경제활동(GDP) 1단위를 만드는 데 에너지가 얼마나 드는지를 나타낸다. 한국처럼 공정 에너지가 많이 드는 제조업 국가일수록 수치가 높으며, 국가 전체의 에너지 효율 수준을 가능하는 척도다.
- 탄소집약도 (Carbon Intensity)**
 에너지 1단위를 쓸 때 탄소가 얼마나 나오는지 보여준다. 전력뿐만 아니라 열·연료 사용까지 포함하며, 수치가 낮을수록 에너지를 깨끗하고 효율적으로 쓴다는 의미다.
- GDP와 감축 부담**
 GDP는 국가 경제 규모를 뜻하지만, 기후 정책에서는 "경제 규모 대비 감축 부담이 적절인가"를 판단하는 기준이 된다. 경제 규모가 작거나 제조업 의존도가 높은 국가일수록 동일한 감축량에 대한 부담이 가중된다.

Source: OECD, World Bank, IEA (2024-2025 기준)