

한국형 상·하향식 온실가스 통합감축 시스템 개발

2014. 4. 16.

한국환경정책·평가연구원

목 차

1. 연구과제 개요
2. 연구개발의 필요성 및 동향
3. 연구개발의 목표
4. 추진전략·체계·연구수행 내용
5. 연구개발 결과 활용방안 및 기대효과
6. 1차년도 연구개발 수행내용 및 결과

1. 연구과제 개요

- 1) 과제 개요
- 2) 과제책임자
- 3) 참여연구진
- 4) 소요 예산

1-1) 과제 개요

과제명

한국형 상·하향식 온실가스 통합 감축 시스템 개발

연구기간

2014.04.01 ~ 2021.03.31 (7년)

과제책임자

김용건 한국 환경정책·평가연구원 선임연구위원

참여연구원

총 22명 (책임급 6명, 선임급 4명, 원급 12명)

소요 예산

1차년도: 7.4억 원, 2차년도 이후: 10.5억 원

1-2) 과제책임자

- 과제책임자(김용건)는 과거 10년 이상 온실가스 감축정책 분야 책임자(KEI 기후경제연구실장 등)로 상·하향식 모형을 활용한 기후변화 연구에 축적된 경험과 전문성 보유
 - 과거 10년간 모형을 활용한 다양한 정책연구 수행
 - “환경경제모형개발”연구 (2008 ~11년)를 통해 상·하향식 통합모형을 개발
 - “저탄소 사회로의 이행을 위한 소비행태 조사 및 분석모형개발 운용” 연구 (2011~13)를 통해 상·하향식 모형을 심화하고 국제 환경경제 DB를 구축
 - 국가 온실가스 감축목표 설정, 배출권 거래제 기본계획 수립 과정에서 감축모형(KEI-Linkages)을 활용한 파급 효과 분석 결과를 기초자료로 제공하여 정책수립 시 반영
 - 예) 2015년 시행 배출권 거래제의 경제적 파급효과 분석 결과를 제공하여 ‘온실가스 배출권 거래제 기본계획’(기획재정부, 2014년)에 반영
 - 전 세계 주요 모델링 팀 30여 개가 참여하는 아시아지역 모델링포럼(Asian Modeling Exercise: AME)에 Steering Committee 위원으로 참여하여 국제 공동연구를 주도 하는 등 국제 연구협력활동 수행
 - OECD 환경국 감축모형팀 컨설턴트(2006~2008), 기후변화 국제협상 정부대표단(1997~2013)
 - 미국 스탠포드 대학교에서 운영하고 있는 에너지모델링포럼(EMF)에 참여
- 국내외 학술지 기고 등 학술 활동 축적
 - Lim, Jong-Soo and Yong-Gun Kim (2012), “Combining Carbon Tax and R&D Subsidy for Climate Change Mitigation”, *Energy Economics*, 34(53). pp s496-s502
 - 김용건, “한중일 탄소시장 연계의 파급효과 분석”, 자원환경경제연구, 제 21권 제 4호. pp 809-850, 2012
 - 임종수, 김용건, “우리나라의 조세중립적 탄소세 도입의 이중배당 효과”, 자원환경경제연구, 제19권 제1호, pp 45-80, 2010.
 - 환경경제학회, 기후변화학회 등 관련 학회 다수의 이사로 활동
 - Energy Economics, Energy Policy 등 관련 국제학술지 심사위원 활동

1-3) 참여연구진

- 연구진은 책임급 6명, 선임급 4명, 원급 12명 총 22명으로 구성
 - 과제책임자 (김용건 KEI 선임연구위원) 및 선임급 1명 (강성원 KEI 연구위원)은 참여율 80% 유지 및 원급 인력 1명은 100% 참여 유지.

선임급 이상 연구원

소속기관	직급	성명	최종학위	담당분야	참여율(%)
한국환경정책·평가연구원	책임급	김용건	한국과학기술원 산업경영학 박사	하향식모형 개발 및 상하향통합모형 구축	80
	선임급	강성원	Rutgers University 경제학 박사	하향모형 총괄	80
	책임급	공성용	한국과학기술원 화학공학 박사	산업부문 상향식 모형	60
	선임급	이창훈	BREMEN University 경제학 박사	상하향 통합모듈	60
	책임급	장기복	한국과학기술원 경영과학 박사	정책 시나리오	30
	선임급	구윤모	서울대학교 기술경영학 박사	전망모형 사례 연구	60
서울대학교	책임급	권오상	University of Maryland 농업/자원경제학 박사	하향모형 개선 및 농업부문 모형 개발	20
광운대학교	책임급	임종수	University of Rochester 경제학 박사	하향식 모형 개발	50
한양대학교	책임급	김동우	한국과학기술원 경영과학 박사	상하향 모형 연계	10
	선임급	김인숙	한국과학기술원 산업공학 박사	상하향 모형 연계	25

1-4) 소요 예산

- 소요예산은 연간 7.4~10.5억 원, 7년 70.4억 원 배정
 - 하향식 모형 구축 작업 및 상향식 모형 구축을 수행하게 되는 2-7차년도에는 1차년도 보다 많은 10.5억 원 씩 배정.

연도별 소요 예산 (추정)

(단위, 천 원)

		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	6차년도	7차년도	계
직접비	인건비	414,120	518,610	518,610	518,610	518,610	518,610	518,610	3,525,780
	기타	250,958	428,232	428,232	428,232	428,232	428,232	428,232	2,820,350
간접비		74,922	103,158	103,158	103,158	103,158	103,158	103,158	693,870
총계		740,000	1,050,000	1,050,000	1,050,000	1,050,000	1,050,000	1,050,000	7,040,000

1-4) 소요예산 : 2차년도

비목	세목 및 사용 용도		금액 (천 원)	구성비
직접비	인건비	미지급	75,600	-
		지급	518,610	49.39%
	연구장비, 재료비	기기·장비, 연구시설 설치·구입·임차비 등	5,970	0.57%
	연구활동비	국외출장여비	71,079	6.77%
		인쇄, 복사, 공공요금	27,625	2.63%
		전문가활용, 회의장사용료	137,239	13.07%
		세부과제관리비	4,500	0.43%
	연구과제추진비	국내출장여비, 시내교통비	26,077	2.48%
		사무용품, 연구환경유지비등	8,400	0.80%
		회의비	24,000	2.29%
		해당과제와 관련된 식대	4,500	0.43%
	연구수당		118,842	11.32%
	소계		946,842	90.18%
간접비	간접비	연구개발능률성과급	7,064	0.67%
		기관공동지원비	94,894	9.04%
		사업단 또는 연구단운영비	1,200	0.11%
	소계		103,158	9.82%
	연구사업비총액		1,050,000	100%

1-5) 집행금액: 1차년도

(단위, 천 원)

비목	세목 및 사용 용도		계획서 상의 당초 예산	비목 변경 후 예산	사용금액	잔액
직접 비	인건비	미지급	42,300	42,300	42,300	-
		지급	414,120	414,120	414,120	-
	연구활동비	국외출장여비	22,061	29,593	29,455	138
		인쇄, 복사, 공공요금	27,625	9,825	1,543	8,282
		전문가활용, 회의장사용료	94,150	92,150	56,583	35,567
		세부과제관리비	4,500	4,500	1,745	2,755
	연구과제추진비	국내출장여비, 시내교통비	11,438	22,438	18,140	4,298
		사무용품, 연구환경유지비등	8,400	8,900	2,581	6,381
		회의비	12,000	14,268	9,471	4,797
		해당과제와 관련된 식대	4,500	3,000	492	2,508
	연구수당		66,284	66,284	66,284	-
	소계		665,078	665,078	642,714	64,726
간접 비	간접비	연구개발능률성과급	7,064	7,064	7,064	-
		기관공동지원비	66,658	66,658	66,658	-
		사업단 또는 연구단운영비	1,200	1,200	1,200	-
	소계		74,922	74,922	74,922	-
연구사업비총액			740,000	740,000	717,636	64,726

2. 연구개발의 필요성 및 동향

- 1) 연구개발의 필요성
- 2) 해외연구 동향
- 3) 국내연구 동향
- 4) 연구개발대상 기술의 차별성

2-1) 연구개발의 필요성: 통합모형

- 다양한 온실가스 감축정책이 시행되고 있으나, 정책의 성과 및 파급효과에 대한 정량적 상시 분석 시스템의 미비로 효율적인 정책의 설계 및 평가가 어려운 상황
 - 목표 지향의 기후정책 추진을 위해서는 중장기 환경경제의 거시적 전망 및 배출량 발생 예측, 배출 감축 잠재력 및 감축활동 실효성, 정책 추진에 따른 경제사회적 파급효과 등에 대한 계량적, 과학적 분석역량 확보가 중요
 - 경제사회적 현상과 기후 문제를 통합적으로 분석하기 위해서는 시장균형에 토대를 두는 경제모형과 오염원 활동 및 기술적 대안에 따른 행태변화를 반영하는 에너지환경모형을 연계·분석하는 방식의 환경경제모형 개발 필요
- 온실가스 감축 시스템 분석에는 상향식 모형과 하향식 모형이 활용되고 있으나, 각각 장·단점을 보유하여 두 모형 간 통합적 모형 개발이 요구됨
 - 온실가스 감축 분석에 주로 이용되는 연산일반균형모형(CGE)은 감축기술의 정보를 정확히 반영하지 못하는 반면, 상향식 모형은 경제적 균형 영향 분석이 어려운 단점을 지님
 - 분야별 차별화 접근, 통합적 접근 등이 연구되고 있으나 한국적 상황에 맞는 모형에 대한 논의는 확립되지 않음
 - 분야별 차별화: 전환부분은 상향식 모형 이용+다른 분야는 하향식 모형 이용
 - 상향식 기반 통합적 접근: 상향식 모형에 하향식 모형의 주요 변수를 포함
 - 하향식 기반 통합적 접근: 하향식 모형의 산업 생산을 기술 단위로 분할/소지역단위 상향식 모형과 하향식 모형을 연성결합

2-1) 연구배경 및 필요성: 하향식 모형

- 한국형 상·하향식 통합 온실가스 감축시스템에 포함하려면 기존의 하향식모형 구성요소들을 최신 이론을 반영하여 심화하고 배출량 분석 범위를 확대하여 모형의 현실 정합성을 강화할 필요
 - 생산요소의 투입 및 축적, 소득에 따른 수요 변화 등 배출량에 영향이 큰 요인들에 대한 모형화가 현실과 괴리
 - 생산요소: 지적자본(연구개발), 자본의 축적 및 고착, 자본의 산업별 구분, 노동의 기술수준별 분할 등의 현상을 모형화하는 방법론이 정립되지 못함
 - 수요: 수요의 소득탄력성을 변화시키는 방법(ELES, AIDADS)에 대한 학문적 합의가 정착되지 않음
 - 산업공정 온실가스 배출량 및 폐기물 등 비산업 부문 온실가스 배출량 분석기능이 부족하여 한국형 통합 온실가스 감축시스템에 포괄하기에는 한계 존재
 - 전환 및 산업부문의 에너지 사용에서 발생하는 배출량 분석은 많이 진척되어 있으나 그 외 배출량에 대한 분석은 초기 단계

2-2) 해외연구동향 : 통합모형

- **감축기술 조합 구성요인 및 파급효과 분석을 위해서 상·하향식 모형 통합의 필요성은 높은 상황**
 - 하향식모형은 감축기술 정보를 정확히 반영하지 못하여 세부적인 기술선택 분석이 어려우며, 상향식 모형은 기술선택의 경제적 파급효과 분석에 한계
- **기존의 상향식 기반 통합모형은 에너지 수요 분석에 경제상황을 반영할 수는 있으나 감축정책이 기술 선택에 미치는 영향 분석 및 기술선택의 경제적 파급효과 분석에 한계 존재**
 - 상·하향식 모형을 연성결합(soft-link)하거나 하향식 모형을 단순화시켜 상향식 모형에 포괄
 - 기술 선택이 상향식 모형의 기술적 비용최소화에 의해 결정되어 기술선택 유인 분석에 한계
 - 산업 구분이 제한되어 기술 선택의 결과가 산업산출 및 중장기적 산업구조에 미치는 영향 분석에 한계
- **기존의 하향식 기반 통합모형은 기술선택과 산업산출의 유기적 결합을 강화하는 추세**
 - Wing (2006)은 기술(상향식)과 산업(하향식)의 1대 1 대응 방법론을 개발
 - Boehringer and Rutherford(2009)는 상·하향식 모형이 각기 고유의 구조를 유지하면서 두 모형 간 정보를 환류하는 모듈을 활용하여 일관된 해를 도출하는 decomposition 방법론을 제시
 - Rausch and Mower (2014)는 Boehringer and Rutherford(2009)의 방법론을 이용하여 하향식 모형인 USREP 모형과 상향식 모형인 ReEDS 모형을 연계한 통합모형을 구축하고 미국 전력시장을 분석
- **기존 상·하향식 통합 모형 연구는 전환부문에 국한되어 산업 공정상 온실가스 배출산업 및 비산업부문 감축정책 연구에 한계**
 - 제철, 시멘트, 화학, 전자 등 공정상 온실가스 배출산업의 기술선택 효과 분석에 한계
 - 자동차, 건물, 가전제품 등 소비 과정에서 온실가스를 배출하는 제품에 적용되는 기술선택 효과 분석도 제한적

2-2) 해외연구동향 : 하향식모형

- 해외 하향식 모형 연구는 모형의 현실정합성 강화 및 온실가스 배출량 분석 대상 확대 연구가 활발
 - 생산 영역에서는 경쟁의 양태와 생산요소 투입 및 축적 과정, 소비영역에서는 소득이 소비에 미치는 영향에 대한 현실정합성을 강화하는 연구가 활발
 - 온실가스 배출량 분석기능이 산업 중심에서 비산업부문으로 확대
- 생산 /소비 모형화에서 분석편의를 위한 단순한 방식을 현실정합적인 복잡한 방식으로 대체하는 경향
 - [생산]생산요소 투입 및 축적과정의 현실정합성을 강화하기 위해 연구개발의 내생화, 자본축적과정의 구체화, 노동투입의 기술수준별 분화 등이 진행
 - (연구개발의 내생화) Wing (2003). "Induced Technical Change and the Cost of Climate Control", MITJPSPGC, report no. 102
 - 자본 Vintage를 활용한 자본축적의 구체화 (KEI-Linkages), 노동투입의 구분(GTAP)은 주요모형에 반영
 - [소비] 다양한 소득계층이 도입되고, 소비의 소득탄력성 결정과정이 내생화
 - (소득계층) Rausch, S et al. (2010), "Distributional Implications of Alternatives U.S. Greenhouse Gas Control Measures", MITJPSPGC, report no. 185
 - (소비함수) 소비의 소득 탄력성 조정이 가능한 수요함수가 도입 (AIDADS, ELES; KEI-Linkages)
- 산업공정 및 교통/건물 등 비산업부문 배출량 분석 기능을 강화
 - MIT-JPSPGC(Joint Program on the Science and Policy of Global Change)는 EPPA 모형을 승용차 선택 및 운행에 따른 온실가스 배출량 분석이 가능하도록 확대하는 작업을 꾸준히 시행

2-3) 국내연구동향 : 통합모형

- 상·하향식 모형을 개별적으로 활용한 온실가스 감축정책 연구는 활발하게 수행
 - 하향식 모형은 감축정책의 경제적 파급효과 분석, 상향식 모형은 기술조건을 고려한 감축잠재력 분석에 활용
 - 상향식 모형: LEAP 모형 기반의 ROK 모형, MARKAL 모형, MESSAGE 모형 등을 주로 활용
 - 하향식 모형: 다양한 모형이 혼재하며, 필요한 모형을 직접 개발하는 창의적인 연구도 진행
 - 하향식 모형(기존 모형 변형): 김용건(KEI-linkages), 권오상·이한빈(PEP모형, 2012, 2013), 임재규(GTEM-Korea)
 - 직접 개발한 모형을 사용하는 경우: 강성원(2012, 2013), 조경엽 외(2006)
- 한국환경정책·평가연구원은 ROK2009_KEI를 개발하여 상·하향식 모형 통합 기반을 구축하고 부문별 상·하향식 모형 통합을 위한 기초작업을 진행
 - “환경경제모형개발” 연구(2008 ~11)에서 ROK 2009을 개발하고 KEI-Linkages 모형을 지속적으로 개선
 - “저탄소 사회로의 이행을 위한 소비행태 조사 및 분석 모형 개발·운용” 연구(2011~13)에서 소비행태를 감축기술단 위로 세분한 실태조사를 통해 상·하향식 통합모형 구축의 기초자료 확보
- 상향식 모형 기반 통합모형을 활용한 정책연구도 꾸준히 진행
 - KAIST 엄지용교수는 GCAM 모형의 건물부문 분석기능 확장에 기여 (“Modeling the Effect of Climate Change on U.S. State-Level Buildings Energy Demands in an Integrated Assessment Framework,” *Applied Energy*, 113, 1077-1088, 2014)
 - 경성대학교 김후곤 교수, 세종대학교 조철홍 박사는 MESSAGE 기반 모형을 온실가스 정책연구에 활용
 - 김후곤(2011). “MESSAGE 모형을 이용한 가정·상업 및 수송부문 온실가스 감축 잠재량 분석”. 원자력연구원
 - 조철홍 박사(세종대학교)는 MESSAGE-MACRO 모형 이용 Global 온실가스 배출 시나리오 분석 경험

2-3) 국내연구동향 : 하향식 모형

- 한국환경정책·평가연구원은 하향식 모형 개발, 심화, 적용 부문에서 다양한 연구를 수행
 - “환경경제모형 개발” 연구(2008~11년, 연구책임자 김용건)를 통해 상·하향식 통합모형을 개발
 - “저탄소 사회로의 이행을 위한 소비행태 조사 및 분석 모형 개발·운용” 연구(2011~13년)를 통해 전력, 수송부문 상·하향식 모형을 심화하고 국제 환경경제 DB를 구축
 - 환경정책의 재정적 파급효과 및 소득계층별 파급효과 분석 기능을 갖춘 1국 모형을 구축
 - 강성원(2012,2013)은 재정적, 소득계층별 파급효과 분석이 가능한 1국 단위 하향식 모형을 구축
- 권오상(서울대학교)은 하향식 모형을 활용하여 기후변화의 농업부문 영향 관련 연구를 다수 수행
 - 권오상·노재선·서영(2012), 권오상·이한빈(2012)은 기후변화로 인한 농업부문 생산성 하락 효과 및 파급효과를 분석하였고, Cho and Kwon(2014)은 농업부문 온실가스 감축비용을 추산
- 임종수(광운대학교)는 하향식 모형의 기술변화 및 수요함수의 현실정합성을 제고하는 연구를 수행
 - 임종수(2011a, 2011b)는 내생적 기술변화 분석방법 및 효용함수 개선방법을 연구

2-4) 연구대상기술의 차별성 (기술적)

- 상향식 방식과 하향식 방식의 장점을 통합한 상·하향식 통합 온실가스 감축 모형을 구축하여 모형의 정책적용에 대한 실효성제고
 - 그동안 국내외적으로 추진된 상향식 모형과 하향식 모형의 연계 가능성에 관한 기초 연구를 바탕으로 한국의 기술적 현실성을 고려한 모형을 개발함
 - 상향식 모형의 감축기술 선택과 하향식 모형의 산업별 생산량 선택 간의 유기적인 통합을 도모
 - 주요 감축대상 관련 기술적 현황을 감안한 감축잠재량 추정(상향식 모듈)
 - 감축기술 선택이 거시경제 및 산업구조에 미치는 파급효과를 분석(하향식 모듈)
- 상향식 모듈과 결합이 용이하며 현실정합성이 높은 하향식 모듈을 개발
 - 배출량 감축기술 선택의 폭을 확대하여 상향식 모듈과 일관성 확보
 - 감축기술에 따라 생산량 및 배출량을 할당하는 부문별 알고리듬을 구축하여 상향식 모듈의 기술선택과 하향식 모형의 산업 선택간의 정합성 확보
 - 현실정합성 강화: 생산요소의 모형화 및 수요의 변화와 관련된 다양한 접근법 중 한국형 통합모형에 적합한 방법론을 선정하여 모형에 반영
 - 온실가스 배출량 분석 범위를 산업, 비산업 전 부문으로 확대
 - 산업공정/수송/건물(가정, 상업, 공공)/폐기물/농업/토지이용 배출량 변화 분석 기능을 강화하여 국가 온실가스 인벤토리 전 부문 배출량 및 감축정책을 모형에 내생화

2-4) 연구대상기술의 차별성 (제안기관)

- 한국환경정책·평가연구원은 한국형 상·하향식 온실가스 통합감축모형 구축에 필요한 기반기술을 보유
 - “환경경제모형 개발” 연구(2008~11년, 연구책임자 김용건)를 통해 상·하향식 통합모형을 개발
 - LEAP 등 상향식 모형, 연산가능일반균형모형(CGE) 등 하향식 모형 분석 및 상·하향 통합모형 개발·운용
 - 국제적으로 인정받은 한국형 하향식 모형인 KEI-Linkages 모형을 기 보유
 - “환경경제모형 개발” 연구, “저탄소 사회로의 이행을 위한 소비행태 조사 및 분석 모형 개발·운용”(2011~13년) 연구를 수행하여 기 보유한 모형을 선진적인 연구성과를 수용하여 지속적으로 심화·확장한 경험 존재
 - 전력, 수송 부문의 상향식 모형과 하향식 모형을 개발·운용
 - 가정부문 에너지 소비실태 및 자동차 운행실태 조사, 가전기기별 실시간 모니터링 DB 구축
 - 전세계 국가별·업종별 경제·환경 DB 구축(6개 온실가스 종별) 및 소비행태에 따른 온실가스 유발효과 분석
 - 독자적인 1국 하향식 모형을 구축하고, 발전방식을 세분하여 상향식 모형과의 연계성을 강화하였으며, 소비자를 소득수준에 따라 구분하여 감축정책의 계층별 파급효과 분석 기능을 부가(강성원, 2012,2013)
- 지속적으로 주요 국가정책 기초자료를 제공하고 해외 모델링 연구 Community에 참여하여 국내외적 공신력을 확보
 - 국가 온실가스 중기(2020년) 감축목표의 경제적 파급효과를 분석하고 그 결과를 정책수립 기초자료로 제공
 - 배출권 거래제의 경제적 파급효과를 분석하고 그 결과를 ‘온실가스 배출권 거래제 기본계획’(기획재정부, 2014년)에 반영
 - 전 세계 주요 모델링 팀 30여 개가 참여하는 아시아지역 모델링포럼(Asian Modeling Exercise: AME)에 Steering Committee 위원으로 참여하여 국제 공동연구 주도(2010. 9. 13~15)
 - IPCC 제5차 평가보고서(WG-III: Mitigation) 주저자 활동, OECD 환경국 환경경제모형 개발 참여 및 OECD Environment Outlook 공동 집필 등 온실가스 정책 관련 국제기구 활동에 적극적으로 참여

2-4) 연구대상기술의 차별성 (제안기관)

- 본 연구에 참여하는 서울대학교 권오상 교수는 하향식 모형 PEP 및 GTAP을 직접 운용한 경험 및 농업부문 상향식 모형 운용 경험을 축적
 - PEP, GTAP 모형 및 계량경제학 기법을 활용한 농업 및 기후변화 관련 연구를 다수 수행 진행
 - Cho and Kwon(2014), 서영·권오상(2013), 권오상·노재선·서영(2012), 권오상·이한빈(2012)
 - 권오상·정재호·김용건(2012): 이산-연속 선택모형을 적용하여 감축정책이 차종 및 운행거리 선택에 미치는 영향을 분석
 - 상향식 모형 및 PMP 기법을 활용한 농업부문 연구에 다수 실적 보유
- 본 연구에 참여하는 한양대학교 김동우 교수는 대규모 수리 계획 모형의 분산/분할 해법에 관한 풍부한 연구 경험을 축적
 - 수리 계획 모형을 응용한 다양한 연구실적 축적
 - SCI급 국제저널의 편집위원 및 다양한 국제 컨퍼런스의 기술프로그램 위원으로 활동
- 주관연구기관은 세부과제 연구책임자인 KAIST 엄지용 교수와 다양한 연구활동 영역에서 긴밀하게 협조하여 통합모형 구축한 인적자원 네트워크를 유지
 - KAIST 엄지용 교수는 PNNL 재직 시 한국환경정책·평가연구원과 공동으로 GCAM Community meeting 참여하여 GCAM 모형 연구 경험 축적 (2012.10)

3. 연구개발의 목표

- 1) 연구개발의 최종목표
- 2) 연도별 연구개발 목표 및 내용
- 3) 연도별 연구개발 추진일정
- 4) 연도별 연구성과 창출계획
- 5) 평가의 착안점 및 기준

3-1) 연구개발의 최종목표

- 본 연구의 최종목표는 온실가스 감축기술 현황을 반영하는 상향식모형 및 감축정책의 산업·거시경제 파급효과를 분석하는 하향식모형을 통합하는 통합감축 시스템 구축
 - 상향식 모형과 하향식 모형을 통합한 통합감축 시스템 구축을 목표로 하며, 기존의 상향식 모형 및 하향식 모형을 통합을 목적으로 수정·보완
- [통합] 본 연구는 동일 명 연구단과제의 총괄과제로 여타 세부과제에서 구축한 부문별 모듈 및 DB를 통합하여 통합모형 및 통합 DB를 구축
 - 상·하향식 모듈 결합 방식 관련 최신 이론을 점검하고 기존 상·하향식 통합모형의 모듈 결합 방식을 점검하여 모듈 결합 방식을 개발
 - 전 부문 상향식 모듈 DB, 하향식 모듈 DB를 통합한 통합 DB를 구축하여 통합모형 운용에 연계
- [상향식 모듈]본 연구에서는 하향식 모듈과 농업, 산업(공정포함), 토지이용 부문의 상향식 모듈을 구축하고 각 모듈의 입력자료로 활용되는 DB를 구축
- [하향식모듈] 온실가스 인벤토리 전 부문이 포괄되도록 분석대상을 확대하고 한국적 현실을 반영할 수 있도록 분석기능을 심화한 하향식 모형을 구축하여 통합감축 시스템의 하향식 모듈로 제공
 - 한국적 현실을 반영할 수 있도록 하향식 모형의 구성요소를 심화
 - 생산요소 및 수요의 모형화 방법론 점검 및 선정
 - 상대적으로 부족한 산업공정 및 비산업부문 온실가스 배출량 분석기능을 강화하여 분석대상을 확대
 - 모형 결과에 영향이 큰 탄력성 모수의 한국적 현실을 반영한 추정치 획득
 - 주요 탄력성 모수를 통계적 방법을 통해 추출하고 한국적 현실을 반영하는 자료를 사용하여 이들을 추정

3-2) 연도별 연구목표 및 내용

- 최종목표인 통합모형은 설계-구축-검증의 3단계를 거쳐 완성
 - 설계: 이론적인 성과와 기존 모형을 점검하여 통합모형 구축 로드맵을 완성하고 각 모듈 구축 (1~3년차)
 - 구축: 1단계에서 구축한 모듈을 결합한 통합감축시스템 베타 Version 및 완성 Version을 구축 (4~5년차)
 - 완성: 통합모형의 분석기능을 확장하고 모형의 신뢰성 및 정책적 활용도를 점검(6~7년 차)
 - 신뢰성: 모형 해의 기술적인 안정성, 실측치와의 일관성, 기존 통합모형 분석결과와의 일관성
 - 활용도: 관련 정책 수립에 필요한 결과 산출 가능성
- 상향식 모듈 구축은 농업(2~3년 차), 산업 (3~4년 차), 산업공정(4~5년 차), 토지이용(5~6년 차) 부문을 순차적으로 구축하여 통합모형에 반영
- 하향식 모듈 구축은 기존모형 비교분석을 1년차에 시행하고, 그 결과를 반영하여 모형의 세밀화 및 탄력성 추정을 2~6년 차에 걸쳐서 병행
 - 2년 차에 표준모형을 구축하고 3년 차부터 표준모형의 심화 및 부문별 세밀화를 진행
 - 모형의 심화: 생산요소 및 소비 부문의 현실 정합성 제고
 - 모형의 확대: 국가 온실가스 인벤토리 전 부문을 포괄하도록 분석대상을 확대
 - 탄력성 추정: 방법론 확정(1~2년 차) - 추정 (2~5년 차) 2단계 작업 추진
- 단계별 산출물을 시범분석에 활용하여 작업의 성과를 점검
 - 중간산출물: 2년 차에 구축한 하향식 표준모듈, 4년 차에 구축한 통합모형 베타 버전을 활용하여 시범분석 실시
 - 최종산출물: 5년 차에 완성한 통합모형을 활용하여 시범분석 실시

3-2) 연도별 연구목표 및 내용

연도별 연구내용: 1-3차년도 [1단계]

	연구목표	연구내용
1 차 년 도	[통합 시스템 설계]	통합방식 관련 국내외 선행연구 분석 및 통합모형 설계
	[하향식 모듈]	국내외 하향식 모형 선행연구 정리/기존 하향식 모형 시범분석(KELinkages, PEP, GTAP, 강성원(2013))
	[탄력성 추정]	탄력성 모수 계량경제학적 추정 선행연구 분석/ 민감도 분석(몬테 카를로 모의실험)
2 차 년 도	[통합 모형]	상하향식 모듈 연계방식 설계/ 전망모형 시례 분석
	[상향식 모듈]	농업부문 상향식 모듈 개발(beta version)
	[하향식 모듈]	표준하향식 모듈 개발
	[탄력성 추정]	탄력성 추정 방법론 확정/ 생산요소(노동, 자본)간 대체탄력성 및 생산요소-에너지 간대체탄력성 추정
3 차 년 도	[통합 모형]	전력 및 농업부문 상·하향식 모듈 연계 시범 분석/ 전망모형 사례분석(계속)
	[상향식 모듈]	산업부문 상향식 모듈 개발(beta version) 농업부문 상향식 모듈 완성
	[하향식 모듈]	전환산업/농업부문 세밀화 자본빈티지 및 내생적 투자모형구축
	[탄력성 추정]	생산요소(노동, 자본)간 대체탄력성 및 생산요소-에너지 간대체탄력성 추정

3-2) 연도별 연구목표 및 내용

연도별 연구내용: 4-5차년도 [2단계]

	연구목표	연구내용
4 차 년 도	[통합 모형]	전력 및 농업부문 상하향식 모듈 연계 보완 수송부문 상하향식 모듈 연계 시범분석 부문별 상향식 모형과 하향식 모형의 디중 연계 방법론 개발
	[상향식 모듈]	산업부문 상향식 모듈 완성 산업공정부문 상향식 모듈 (beta version)
	[하향식 모듈]	수송부문 세밀화 소비구조 심화 불완전경쟁 version 구축
	[탄력성 추정]	아밍턴 탄력성, 수출 내수 대체 탄력성, 수요 탄력성 추정
5 차 년 도	[통합 모형]	수송 부문 상하향식 모듈 연계 보완 건물, 산업부문 상하향식 모듈 연계 시범분석
	[상향식 모듈]	산업공정부문 상향식 모듈 완성 토지이용 부문 상향식 모듈 (beta version)
	[하향식 모듈]	건물부문 세밀화 Forward-looking 모형 확장 타당성 검토
	[탄력성 추정]	아밍턴 탄력성, 수출 내수 대체 탄력성, 수요 탄력성 추정 (계속)

3-2) 연도별 연구목표 및 내용

연도별 연구내용: 6-7차년도 [3단계]

	연구목표	연구내용
6 년 차	[통합 시스템 완성]	통합모형 구축 완료 (Global/National) 통합모형 활용 시범분석 Global모형과 기후모형 연계
	[하향식 결과조정]	통합모형에 적합하게 하향식 모듈을 조정
	[탄력성 결과조정]	통합시스템 정합성 제고를 위해 탄력성 추정결과 조정
7 년 차	[통합 시스템 신뢰성· 활용도 점검]	신뢰성점검: 여타모형과 비교/backcasting/민감도 분석 활용도점검: 감축잠재량 추정, 배출권 할당등 정책 고안에 반영 온실가스 감축 및 기후변화 영향 통합분석(IAM)
	[하향식 결과조정]	통합모형에 적합하게 하향식 모듈을 조정
	[탄력성 결과조정]	통합시스템 정합성 제고를 위해 탄력성 추정결과 조정

3-3) 연도별 연구개발 추진일정

연도별 연구내용: 1-3차년도 [1단계]

구분	연구개발의 내용	추진 일정											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1차 년도	통합 방식 관련 국내외 선행연구 분석												
	국내외 하향식모형 선행연구 정리 및 기존모형 분석												
	기존 하향식 모형 시범분석(KEI-Linkages, PEP, GTAP, 강성원(2013))												
	탄력성 모수 계량경제학적 추정 선행연구 분석												
	모형민감도 분석(몬테 카를로 모의실험): 탄력성 추정 대상 선정												
2차 년도	상·하향식 모듈연계방식 설계												
	전망모형 사례 분석: 전망방식 및 전망관련 Data 수집방안검토												
	표준 하향식 모듈 개발												
	상향식 모듈 개발: 농업부문 베타version												
	탄력성 추정 방법론 확정												
	탄력성 추정: 생산요소(노동, 자본 등)간 및 에너지원간 탄력성												
3차 년도	전력 및 농업 부문 상·하향식 모듈연계 시범 분석												
	전망모형 사례 분석(계속)												
	하향식 모듈 전환(신재생에너지포함)/산업(공정포함)/농업부문 세밀화												
	신재생에너지 관련 투입산출 구조 입력 자료 구축												
	하향식 모듈 자본 빅데이터 및 내생적 투자 모형 구축												
	농업부문 상향식 모듈 완성												
	산업부문 상향식 모듈 베타version												
	탄력성 추정: 생산요소(노동, 자본 등)간 및 에너지원간 탄력성												

3-3) 연도별 연구개발 추진일정

연도별 연구내용: 4-5차년도 [2 단계]

구분	연구개발의 내용	추진 일정											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4차 년도	전력 및 농업 부문상 · 하향식 모듈연계 보완												
	수송 부문 상 · 하향식 모듈연계 시범 분석												
	상 하향식 모듈을 사용한 전망기능 제고방안 수립												
	부문별 상향식 모형과 하향식 모형의 다중연계 방법론 개발												
	하향식 모듈 수송부문 세밀화												
	하향식 모듈 소비 구조 정밀화												
	하향식 모듈 불완전 경쟁 version 구축												
	산업부문 상향식 모듈 완성												
	산업공정부문 상향식 모듈 베타version												
5차 년도	탄력성 추정: 아밍턴 탄력성, 수출–내수 대체탄력성, 수요탄력성												
	수송 부문 상 · 하향식 모듈연계 보완												
	건물, 산업 부문상 · 하향식 모듈연계 시범분석												
	부문별 상향식 모형과 하향식 모형의 다중연계 알고리듬 개발												
	Global 하향식 모듈 베타version												
	하향식 모듈 Forward-looking 모형으로 확장 타당성 검토												
	하향식 모듈 건물부문 모형 세밀화												
	산업공정부문 상향식 모듈 완성												
	토지이용부문 상향식 모듈 베타version												
	탄력성 추정: 아밍턴 탄력성, 수출–내수 대체탄력성, 수요탄력성(계속)												

3-3) 연도별 연구개발 추진일정

연도별 연구내용: 6-7차년도 [3 단계]

구분	연구개발의 내용	추진 일정											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6차 년도	건물, 산업 부문 상 · 하향식 모듈연계 보완												
	폐기물, 토지이용 부문 상 · 하향식 모듈연계 시범 분석												
	부문별 상향식 모듈과 하향식 모듈의 다중연계 알고리듬의 안정성 검증												
	하향식 모듈폐기물, 토지이용 부문 모형 세밀화												
	Global 하향식 모듈 완성												
	국제 교역 구조에 대한 복수 모형 활용 방안 설계												
	토지이용부문 상향식 모듈 완성												
	통합시스템 정합성 제고를 위해 탄력성 추정 결과 조정												
7차 년도	활용도점검: 감축잠재량 추정, 배출권 할당 등 정책 고안에 반영												
	폐기물, 토지이용 부문 상 · 하향식 모듈연계 보완												
	민감성/강건성 분석을 통한 탄력성 추정 결과 점검 및 필요 시 재추정												

3-4) 연도별 연구성과 창출계획

구분	계	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	6차년도	7차년도
고용창출 성과 (명)	17	0	2	3	3	3	3	3
학술지 게재 - SCI(E) (건)	16	0	1	3	3	3	3	3
학술지 게재 - 일반 (건)	16	0	1	3	3	3	3	3
국내외 학술회의 발표 (건)	30	0	3	5	5	5	5	7
인력교류 성과 - 해외파견 (명)	0	0	0	0	0	0	0	0
국제협력 기반 - MOU 체결 (건)	2	0	0	1	1	0	0	0
국제학술회의 개최 (건)	6	0	1	1	1	1	1	1
인력지원 - 학사 (명)	6	0	1	1	1	1	1	1
인력지원 - 석사 (명)	16	0	3	3	3	3	2	2
인력지원 - 박사 (명)	10	0	2	2	2	2	1	1
인력지원 - 기타 (명)	0	0	0	0	0	0	0	0
장단기연수지원 - 단기 (명)	20	2	2	4	3	3	3	3
기타 공공성과 (건)	5	0	0	1	0	1	0	3
보도실적 (건)	16	0	1	3	3	3	3	3

3-5) 평가의 착안점 및 기준

- [최종목표] 통합모형 및 상·하향식 모듈은 기술적 완성도, 신뢰성, 정책적 활용도 기준 평가
 - 기술적 완성도: 시범분석의 성공 여부 및 민감도 분석을 통한 시범분석 결과의 안정성 여부가 기준
 - 모형의 신뢰성은 분석결과의 안정성, 기존 모형 분석 결과와의 일관성이 기준
 - 분석결과의 안정성은 민감도 분석으로 점검
 - 정책적 활용도: 통합모형이 온실가스 감축정책 수립에 필요한 정책자료를 산출할 수 있는지 여부가 기준
 - 중장기 온실가스 배출량 추정, 감축잠재량 분석 등 국가 온실가스 감축정책에 필요한 결과 도출
- 탄력성 추정작업은 기술적 완성도 및 추정치의 현실정합성 기준 평가
 - 기술적 완성도: 추정 방식이 해를 실제로 도출했고, 그 결과가 강건성(robust)을 만족하는지 여부가 기준
 - 현실정합성: 관련 자료 실측치와 추정치간에 일관된 관계가 유지되는지 여부가 기준

최종목표 평가 착안점 및 기준

	목적	세부 내용	평가의 착안점 및 기준
최종 목표	통합 시스템	통합모형 구축	시범분석 결과 획득 여부 신뢰성: 기존 모형과 비교/민감도 분석 활용성: 정책자료 생성여부
	상·하향식 모듈	한국형 상·하향식 모형의 상향식 모듈 (농업, 산업, 토지이용) 하향식 모듈 구축	시범분석 결과 획득 여부 신뢰성: 기존 모형과 비교/민감도 분석 활용성: 정책자료 생성 여부

3-5) 평가의 착안점 및 기준

연도별 평가 착안점 및 기준: 1-3차년도 [1단계]

	목적	세부 내용	평가의 착안점 및 기준
1 차 년 도	통합시스템 설계	통합 방식 관련 국내외 선행연구 분석 및 통합모형 설계	한국형 통합평가시스템 구축 로드맵 반영 여부
	하향식 모듈	기존 하향식 모형 비교 및 장단점 파악	하향식 모듈 설계 여부
	탄력성 추정	대표적 하향식 모형 탄력성 모수 비교분석 및 산출 근거 파악 추정 자료 수집 장기 계획 수립	탄력성 산출 근거 자료수집 장기계획 반영 여부 장기계획의 충실통
2 차 년 도	통합 시스템 설계	상·하향식 모듈 연계방식 설계	파일럿테스트 성공여부
		전망모형 사례 분석 : 전망 방식/ 전망 Data 수집 방안 검토	기초자료 [※] /전망방안점검실적 및 시사점 도출여부
	하향식 모듈	표준 하향식 모듈 개발	표준하향식모듈 시범분석 성공여부
	상향식 모듈	상향식모듈개발: 농업부문 베타 version	모형의 해도출 여부 및 해의 안정성
	탄력성 추정	다양한 생산함수 nesting 구조를 포괄할 수 있는 추정방식 고안 탄력성 추정: 생산요소(노동, 자본 등) 간 및 에너지원 간 탄력성	모수 추정방안의 신뢰성: 대표적 기준 연구의 반영 모수 추정방안의 포괄성: 다양한 nesting 구조 포괄 가능성
3 차 년 도	통합 시스템 설계	상·하향식 모듈 연계 시범 분석: 전력 및 농업 부문	통합모형 해의 안정적 도출
	하향식 모듈	하향식 모듈 전환/산업/농업 부문 세밀화	하향식 모듈 시범분석 성공요부
	상향식 모듈	농업부문 상향식 모듈 완성 산업부문 상향식 모듈 베타 version	농업: 해의 강건성 및 현실성 산업: 모형 해의 안정적 도출
	탄력성 추정	생산요소(노동, 자본 등) 간 및 에너지원 간 탄력성	탄력성 추정치의 현실성

3-5) 평가의 착안점 및 기준

연도별 평가 착안점 및 기준: 4-5차년도 [2단계]

	목적	세부 내용	평가의 착안점 및 기준
4 차 년 도	통합 시스템 구축	전력 및 농업 부문 상·하향식 모듈 연계 보완 수송 부문 상·하향식 모듈 연계 시범 분석 다중 연계 방법론 개발	농업/전력: 통합모형 해의 강건성 및 현실성 수송: 통합모형 해의 안정적 도출 다중 연계 방법론 수식 도출
	상향식 모듈	산업부문 상향식 모듈 완성 산업공정부문 상향식 모듈 베타 version	산업: 해의 강건성 및 현실성 산업공정: 모형 해의 안정적 도출
	하향식 모듈	수송부문 세밀화 불완전 경쟁 모형 구축	수송: 시범분석 결과 획득 여부 불완전 경쟁: 시범분석 결과 획득 여부
	탄력성 추정	아밍턴 탄력성, 내수-수출 전환탄력성, 최종소비 대체탄력성 추정	추정치의 현실성
5 차 년 도	통합 시스템 구축	수송 부문 상·하향식 모듈 연계 보완 건물 및 산업부문 상·하향식 모듈 연계 시범 분석 다중 연계 알고리듬 개발	수송: 통합모형 해의 강건성 및 현실성 건물 및 산업: 통합모형 해의 안정적 도출 다중 연계 방법론 GAMS code 반영 및 시범분석 성공여부
	상향식 모듈	산업공정부문 상향식 모듈 완성 토지이용부문 상향식 모듈 베타 version	산업공정: 해의 강건성 및 현실성 토지이용: 모형 해의 안정적 도출
	하향식 모듈	건물부문 세밀화 Global 하향식 모듈 베타 version	건물: 시범분석 결과 획득 여부 Global 모형: 시범분석 결과 획득 여부
	탄력성 추정	아밍턴 탄력성, 내수-수출 전환탄력성, 최종소비 대체탄력성 추정	추정치의 현실성

3-5) 평가의 착안점 및 기준

연도별 평가 착안점 및 기준: 6-7차년도 [3단계]

	목적	세부 내용	평가의 착안점 및 기준
6 차 년 도	통합 시스템 완성	건물 및 산업 부문 상·하향식 모듈 연계 보완 폐기물 및 토지이용 부문 상·하향식 모듈 연계 시범 분석	건물 및 산업부문: 통합모형 해의 강건성/현실성 폐기물 및 토지이용: 통합모형 해의 안정적 도출
	하향식 모듈	폐기물, 토지이용 부문 모형 세밀화	시범분석 결과 획득 여부
	상향식 모듈	토지이용 부문 상향식 모듈 완성	해의 강건성 및 현실성
	탄력성 추정	통합시스템 정합성 제고를 위해 탄력성 추정결과 조정	시범분석 결과 획득 여부 통합 모형의 안정성 및 신뢰성
7 차 년 도	통합 시스템 점검	폐기물 및 토지이용 부문 상·하향식 모듈 연계 보완	통합모형 해의 강건성 및 현실성
		활용도점검: 감축잠재량 추정, 배출권 할당 등 정책 고안 반영	통합모형의 활용성: 주요 정책변수 산출 여부 통합모형의 편이성: 주요 수요자층 편이성 평가
		민감성/강건성 분석을 통한 탄력성 추정 결과 점검 및 필요 시 재추정	통합 모형의 신뢰성: 기존 모형과 비교 및 민감도 분석 통합 모형의 안정성: 해의 강건성

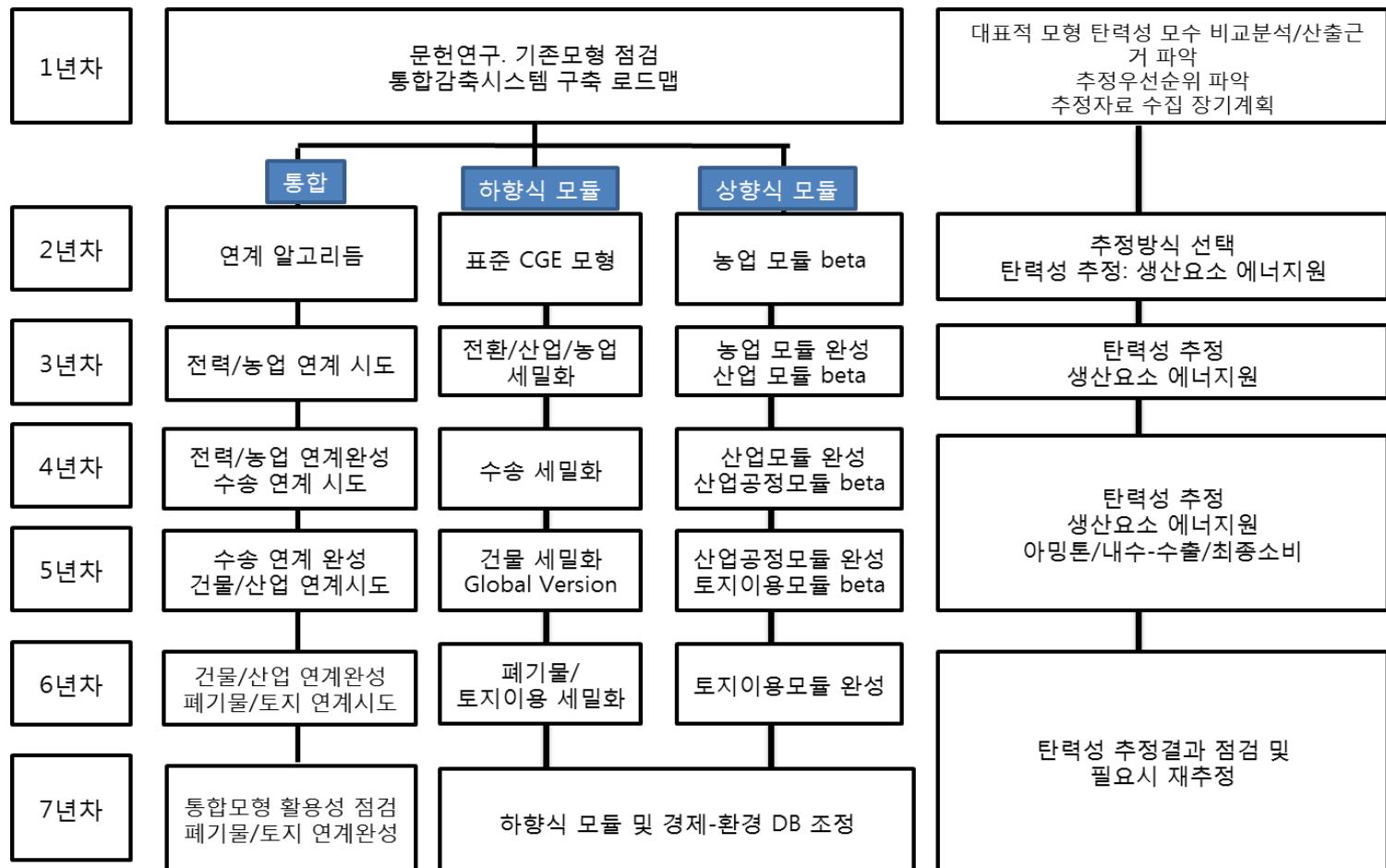
4. 추진전략·체계·연구수행방법

- 1) 연구개발의 추진전략
- 2) 연차별 추진체계
- 3) 연차별 연구수행 방법

4-1) 연구개발의 추진전략

- 국내외 감축모형 관련 정보 탐색 및 문헌조사
- 하향식 모듈 및 상향식 모듈의 개별적인 장점을 모두 활용하면서 두 모듈을 연계할 수 있는 연계모듈을 개발
 - 하향식 모듈의 경제적 파급효과 분석기능과 상향식 모듈의 기술조합 선택 기능을 충분히 활용하면서 두 모듈 간 분석 결과의 일관성을 확보
 - 산업단위 분석인 하향식 모듈과 기술단위 분석인 상향식 모듈간의 해상도 격차를 극복 방안을 모색
- 통합을 전제로 통합에 필요한 요건을 초기 설계에 반영한 하향식 모듈 및 일부 상향식 모듈을 구축
 - 두 모듈의 비교우위를 감안하여 각 모듈의 분석범위를 설정하고, 각 모듈에서 연계모듈 운용에 필요한 정보를 생성하는 기능을 강화
 - 하향식 모듈 및 농업, 산업, 산업공정, 토지이용 부문 상향식 모듈을 구축
- 공개된 자료 수집 및 설문조사를 통해서 통합모듈 운용과 연계된 통합 DB를 구축
 - 본 연구에서 구축하는 하향식 모듈 및 농업, 산업, 산업공정, 토지이용 부문 상향식 모듈 입력 DB를 구축
 - 전 부문 상향식 모듈 DB 및 하향식 모듈 DB를 통합한 통합 DB를 구축하여 통합모형 운용에 연계
- 전문가·실무자 자문회의를 통해 의견을 수렴하고, 매년 성과보고회 및 국제학술대회를 개최하여 연구 결과를 홍보하며, 연구결과에 기반한 논문을 국내외 학술지에 발표하여 공신력을 확보

4-2) 연차별 추진체계



4-3) 연차별 연구수행 방법: 1차년도

- 연구목표 : 한국형 온실가스 통합감축시스템 및 한국형 하향식 모형을 설계
 - 모형 내 주요 탄력성 추정 사전 작업 시행
- [통합] 상·하향식 모형의 통합방식 관련 국내외 선행연구를 분석하고 장단점을 비교하여 한국형 통합감축 시스템을 설계
 - 점검 대상: MESSAGE-MACRO(상향식 모형 중심 통합모형), AIM, WITCH, RICE,PAGE
- [하향식] 국내외 대표적 하향식 모형을 비교분석하고 장단점을 파악하여 하향식 모듈 설계에 반영
 - 주요 국제기구 및 연구기관에서 사용하는 16개 일반균형 모형 비교 분석을 통해 하향식 모듈 설계 방식 도출
- [탄력성 추정] 모형 불안정성의 원인이 되는 탄력성 모수를 민감도 분석을 통해 파악하고 이들을 추정하는 계량경제학적 추정 관련 선행연구를 분석
 - 몬테 카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)을 이용하여 모형의 결과에 영향이 큰 탄력성 모수를 선정
 - 문헌연구를 통해 추정방법을 결정하고, 추정에 필요한 자료를 목록화하여 이에 적합한 DB를 구축

4-3) 연차별 연구수행 방법: 2차년도

- **연구목표** : 통합감축 시스템 모듈 내부 구성 및 모듈 간 연계방식을 설계하고 표준 하향식 모듈을 구축
 - 농업부문 상향식 모듈 베타 version을 구축
 - 탄력성 추정 대상을 확정하고 생산요소 및 에너지원 관련 탄력성을 추정
- **[통합]** 한국형 온실가스 통합감축 시스템의 구성요소(모듈) 및 구성요소 간 연계방식 설계 및 파일럿 테스트
 - 연계방식을 적용한 toy 모형을 구축하여 연계방식이 해를 도출하는지 여부를 pilot test
 - BAU 전망 방식 및 전망관련 Data 수집 방안을 검토
- **[하향식 모듈]** 표준적 생산함수 및 산업구분을 적용한 하향식 모듈을 구축하여 시범분석을 실시
 - [모형 설계] 모형을 구성하는 연립방정식을 도출하여 GAMS code로 전환하고, 투입-산출 및 온실가스 배출량을 기록하는 에너지-경제-환경 연계 사회회계행렬(SAM) 작성
- **[상향식 모듈]** 농업부문 상향식 모듈 베타 version 구축
 - PMP 방법론을 적용하여 상향식 모듈 고유의 corner solution 문제 해소
- **[탄력성 추정]** 추정 방법론을 확정하고 생산요소 및 에너지 투입 관련 탄력성을 추정
 - [방법론] 다양한 생산함수 nesting 구조를 포괄할 수 있는 추정방식을 고안하여 하향식 모듈 설계의 유연성 제고
 - [추정] 노동-자본 간 대체탄력성, 생산요소-에너지 간 대체탄력성 추정

4-3) 연차별 연구수행 방법: 3차년도

- 연구목표 : 농업/전력부문 상·하향식 모듈을 연계하고 산업부문 상향식 모듈 구축하며 하향식 모듈 전환/산업/농업부문을 세밀화
- [통합] 농업부문 상향식 모듈, 전력부문 상향식 모듈, 표준 하향식 모듈을 연계모듈을 이용하여 연계한 모형을 구축하고 시범분석
 - 2차년도 구축 표준 상향식 모듈, 농업부문 상향식 모듈 베타 version, 전력부문 상향식 모듈 베타 version 연계
- [상향식 모듈] 농업부문 상향식 모듈 베타 version을 보완하고 산업부문 상향식 모듈 베타 version 구축
 - 산업부문: 산업부문에서 화석연료 사용에 의해 발생하는 배출량 분석
- [하향식 모듈] 전환, 산업, 농업부문 세밀화 및 자본축적 부문 정밀화
 - 전력부문에서 신재생에너지를 독립하고, 농업부문을 경작방식 격차 및 축산업 규모를 반영할 수 있도록 세밀화
 - 자본 Vintage를 도입하고 Tobin q 이론을 반영한 투자수요함수 도출
 - 전환, 산업, 농업부문에서 발생하는 온실가스 전 부문을 포괄하는 하향식 모듈 input data 생성
- [탄력성 추정] 2차년도에 시작한 생산요소(노동, 자본)간 대체탄력성 및 생산요소-에너지원간 대체탄력성 추정 작업을 완료

4-3) 연차별 연구수행 방법: 4차년도

- 연구목표 : 상·하향식 통합감축시스템 베타 version 및 산업공정부문 상향식 모듈을 구축하고 하향식 모듈 수송부문을 세밀화
- [통합] 전력, 농업, 수송부문 분석기능을 갖는 통합감축시스템 베타 version을 구축하고 부문별 상향식 모듈과 하향식 모듈의 다중 연계 방법론 개발
 - 3차년도에 구축한 하향식 모듈, 농업 및 전력부문 상향식 모듈 완성판, 수송부문 상향식 모듈 베타 version 연계
 - 각 부문별로 별도의 모형이 구축된 상향식 모듈들을 하향식 모듈과 동시에 연계하는 방법론을 수식으로 표현
- [상향식 모듈] 산업부문 베타 version을 보완하고 산업공정부문 베타 version 구축
 - 산업공정부문: 산업부문에서 화석연료 사용에 의해 발생하는 배출량 이외의 배출량을 포괄
- [하향식 모듈] 수송부문 세밀화 및 불완전경쟁분석 version 구축
 - 교통-통신 복합재를 도입하여 수송부문 배출량 분석기능을 세밀화
 - 불완전 경쟁 분석이 가능한 정태 일반균형 모형 구축
- [탄력성 추정] 수입품수요와 국산품수요 간의 대체탄력성이 아밍턴 탄력성, 내수생산과 수출생산간의 전환탄력성, 그리고 민간의 최종소비의 탄력성을 추정

4-3) 연차별 연구수행 방법: 5차년도

- 연구목표 : 통합감축시스템을 완성하고 토지이용부문 상향식 모듈을 구축하며 하향식 모듈 건물부문을 세밀화
- [통합] 건물 및 산업부문 분석기능을 부가하여 통합감축시스템을 완성하고, 다중연계 알고리듬을 개발
 - 1~4차년도에 구축한 전력, 농업, 수송 상향식 모듈 완성판과 건물, 산업 상향식 모듈 베타 version을 4차년도에 확대한 하향식 모듈과 연계하여 통합감축시스템을 완성
 - 부문별 상향식 모형과 하향식 모형의 다중 연계 수식을 GAMS code로 구체화하여 모형에 반영
- [상향식 모듈] 산업공정부문 상향식 모듈 베타 version을 보완하고 토지이용 부문 상향식 모듈 베타 version 구축
- [하향식 모듈] 건물부문을 세밀화하고 Global 모형 베타 version 구축하며, 기대모형(forward-looking) 확장 방안의 타당성을 검토
 - 건물부문 배출량 분석 기능을 세밀화하고 가계소비에 주거 복합재를 도입
 - 4차년도까지 구축한 하향식 모듈의 구성원리를 고용하는 Global 모형 베타 version을 구축
 - 4차년도까지 구축한 축차모형과 방정식 체계를 공유하는 기대모형의 프로토타입을 구축하고, 두 모형을 비교분석
- [탄력성 추정] 4차년도에 시작한 수입품수요와 국산품수요 간의 대체탄력성이 아밍턴 탄력성, 내수생산과 수출생산간의 전환탄력성, 그리고 민간의 최종소비의 탄력성을 추정을 완료

4-3) 연차별 연구수행 방법: 6차년도

- 연구목표 : 통합감축시스템을 확장하고, 하향식 모듈 폐기물 및 토지이용 부문 세밀화
- [통합] 통합감축시스템 분석기능을 폐기물 및 토지이용 부문으로 확대
 - 5차년도에 실시한 전력, 농업, 수송, 건물, 산업부문 연계를 보완하고, 폐기물 및 토지이용부문 상향식 모듈 베타 version을 5차년도에 확대한 하향식 모듈과 연계
 - 전환, 농업, 수송, 건물, 산업, 산업공정 상향식 모듈(완성판)을 5차년도에 확대한 하향식 모듈과 연계
 - 상향식 폐기물 모듈(beta version)과 상향식 토지이용 모듈(beta version)을 5차년도에 확대한 하향식 모듈과 연계
- [상향식 모듈] 토지이용부문 상향식 모듈 베타 version을 보완하여 완성
- [하향식 모듈] 폐기물 및 토지이용 부문을 세밀화하고 Global 모형을 완성
 - 폐기물을 활용한 재생에너지 공급을 모형화하기 위해 ‘폐기물 재처리’ 산업을 신설하고 이 산업은 폐기물을 원료로 재생에너지 생산에 필요한 원료를 생산하여 재생에너지 부문에 공급한다고 가정
 - 지목통계를 이용하여 토지를 산업별 생산요소로 할당하고 산업별 토지수요량에 따라 지목이 변경되도록 하향식 모형에 반영
 - 국내 산출의 수출 및 내수 분할, 국제운송서비스 활용, 대외부문 청산 방식 등 다양한 국제교역구조 반영 방식을 활용할 수 있는 방안을 고민
- [탄력성 추정] 통합모형의 안정성에 대한 영향을 고려하여 5차년도까지 추정한 탄력성 추정치를 점검하고 필요 시 재추정

4- 3) 연차별 연구수행 방법: 7차년도

- **연구목표** : 통합감축시스템의 신뢰성 및 활용도를 점검
 - 통합감축시스템을 주요 국가정책 설계에 활용하여 정책 실수요자들의 요구(needs)를 만족하는지 여부를 점검하고 모형을 개선
- **[통합모형 보완]** 6차년도에 시도한 폐기물 부문 및 토지이용 부문 연계를 보완
 - 폐기물 및 토지이용 상향식 모듈 완성판과 6차년도에 확대한 하향식 모듈을 연계
- **[신뢰성 점검]** 여타 모형과 비교 및 민감도 분석을 활용
 - 기존 통합모형 활용 결과를 문헌연구를 통해 정리하고 이를 통합모형 결과와 비교
 - 모형의 초기치 및 모형에 외삽되는 미래에 대한 가정을 미세하게 변화시킨 상태에서 모형의 해를 도출하여 모형의 해가 안정성이 있는지 여부를 점검
- **[활용도 점검]** 중장기 감축잠재량 추정 및 배출권 할당 등 주요 국가 정책 입안에 활용하여 모형의 결과가 정책입안자들이 원하는 정보를 전달하는지 여부를 점검

5. 연구개발 결과 활용방안 및 기대효과

- 1) 연구개발 결과 활용방안
- 2) 연구개발 기대효과

5-1) 연구개발 결과 활용방안

- 주기적인 중장기 온실가스 감축목표 설정 및 조정에 활용
 - 중장기 온실가스 감축 잠재력 분석 및 감축목표 설정·이행에 따른 경제 환경적 파급효과를 과학적으로 평가하여 합리적 목표 수립과 효율적 정책 설계에 기여
- 온실가스 배출권 거래제 및 목표관리제 등 주요 온실가스 감축정책 설계에 활용
 - 감축정책의 합리적 설계로 효율적 온실가스 감축목표 달성을 기여
 - 2015년 실시 배출권 거래제의 성공적 시행이 가능하도록 배출권 할당계획 수립, 감축잠재량 분석 등에 과학적 근거자료 제공
 - 할당 및 경매 수입 활용방안 등에 대한 정교한 분석을 통해 경제성장, 온실가스 감축, 고용창출을 유발하는 최적의 배출권 거래제 설계에 필요한 과학적 연구결과 제공
 - 글로벌 CGE 모형 분석을 통해 온실가스 감축의무 국제협상 전략 분석 및 글로벌 탄소시장 분석에 활용
- 궁극적으로 국제적 수준의 통합영향평가모형 (IAM: Integrated Assessment Model) 개발에 기여
 - 온실가스 감축 및 관리의 기후변화 완화효과와 다양한 적응정책을 통한 기후변화 영향 완화 효과를 통합적으로 분석할 수 있는 IAM 모형의 개발을 추진
 - 기후변화 완화에 따른 지구온난화 예방 및 경제적 파급효과 분석기능 포괄
 - 상·하향식 온실가스 감축 통합모형을 토대로 기후모형 및 영향분석 모형과 결합시켜 IAM을 개발
 - “기후변화에 따른 농업생산성 변화의 경제적 파급효과에 대한 일반균형모형 분석”(김용건·홍종호, 2013) 등을 통해 통합영향평가의 시범적 분석 결과를 제시
 - KEI 국가기후변화적응센터와 협력하여 상·하향식 온실가스 감축 통합모형과 기후변화 영향평가 및 적응정책 분석모형을 통합한 한국형 IAM 모형 개발을 추진

5-2) 연구개발 기대효과

- 온실가스 감축정책 분석모형 분야의 국제적 연구를 선도
 - 세계 최고 수준의 온실가스 감축분석 모형에 뒤지 않는 국제적 수준의 상·하향식 통합모형을 구축
 - SSCI 국제학술지 “Energy Economics”의 2012년 특별호에 게재된 ‘Asia Modeling Exercise’에 한국환경정책·평가연구원에서 개발한 KEI-Linkages 모형이 20여 개의 세계적 모형(GCAM, MESSAGE, AIM, EPPA, TIMES 등 포함)과 함께 국제공동연구에 참여
 - IPCC 제6차 평가보고서 집필진에 본 연구단에 참여하는 온실가스 감축모형 전문가가 5인 이상 참여하고, 연구단 생산 논문이 다수 인용될 수 있도록 우수한 연구성과를 축적
 - IPCC 제5차 평가보고서 감축 부문에는 한국 저자가 4명(모델링 전문가 3인 포함) 참여하였으며, 그 중 3인이 본 연구단에 참여함
 - 개발된 모형을 다수의 개도국에 전파함으로써 개도국의 저탄소 녹색경제 정착에 기여
 - KEI 글로벌 전략센터의 개도국 지원 사업과 연계하여 동남아 지역을 비롯한 주요 관련 개도국의 발전전략 컨설팅 시 온실가스 인벤토리 구축, CDM 등 온실가스 감축 국제협력사업, 탄소세 등 온실가스 감축정책에 대한 중장기 전략수립을 지원
- 범 지구적 온실가스 협상 진전에 기여
 - 중장기 감축목표의 합리적 설계를 통해 Post-2020 국제 온실가스 감축의무 협상의 성공적 타결에 기여하고, 국제 탄소시장 등 범 지구적 저탄소 경제발전을 위한 이론적 기초와 분석적 연구결과 생산
 - 상·하향식 감축분석 통합모형의 1국 version과 Global version 을 동시개발하여 국가별 감축정책의 상호 연관효과 분석에 적용함으로써 우리나라의 감축의무 국제협상 대응전략 수립에 기여
 - Global version을 활용하여 글로벌 온실가스 감축정책 추진체계의 발전방향을 제시

6. 연구개발 수행내용 및 결과

- 1) 통합모형 구축 로드맵
- 2) 하향식 모형 비교분석
- 3) 탄력성 추정

6. 연구개발 수행내용 및 결과

1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석

나. 상하향 통합모형 개발 전략

다. 상하향 연계 방법론

라. 상하향 통합모형 개발 로드맵

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석

■ 통합관련 선행연구 분석

- 연성 결합(soft link) 접근 방식을 활용한 기존 모형 분석 진행
 - 독립적으로 개발된 상향 및 하향 모형에 대한 단순 연계 방식: MARKAL-EPPA (Schafer and Jacoby, 2005) 등
 - 연성 결합을 활용한 상하향 통합 모형: Boeringer and Rutherford (2009), Rausch and Mowers (2014), Lanz and Rausch (2011), TIMES-MACRO (2013), 황원식 (2013) 등
- 경성 결합(hard link) 접근 방식을 활용한 기존 모형 분석 진행
 - 축약 모형(reduced form)을 활용한 통합: WITCH (Bosetti 외, 2006), MARKAL-Macro (Strachan and Kannan, 2008), Kiuila and Rutheford (2013), 오인하(2012), KEI (2010) 등
 - 대규모 상하향 모형의 경성 결합: Boeringer and Rutherford (2008), Fujimori 외(2014)
- 상·하향 모형간 회계방식 일관성 확보를 위한 방법론 분석 진행: Sue Wing (2006), Boeringer and Rutherford (2009)

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

■ 연성결합 사례

- Schafer and Jacoby (2005, Energy Economics)
 - MIT EPPA 모형과 MARKAL 수송부문 모형 연계

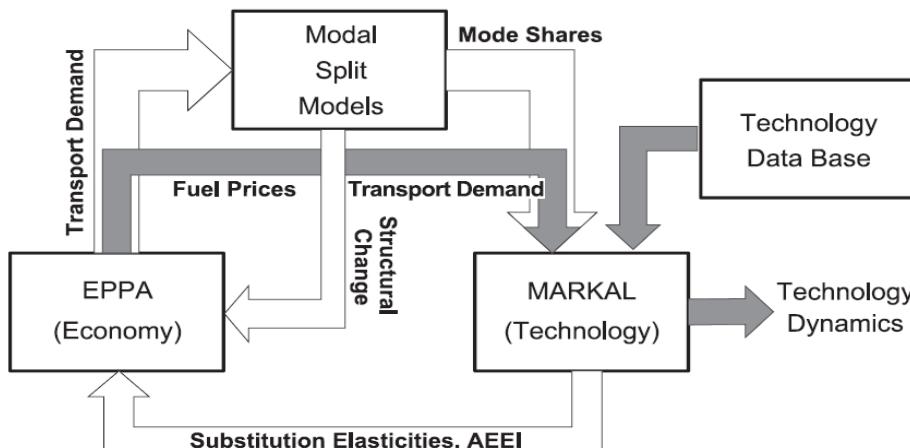


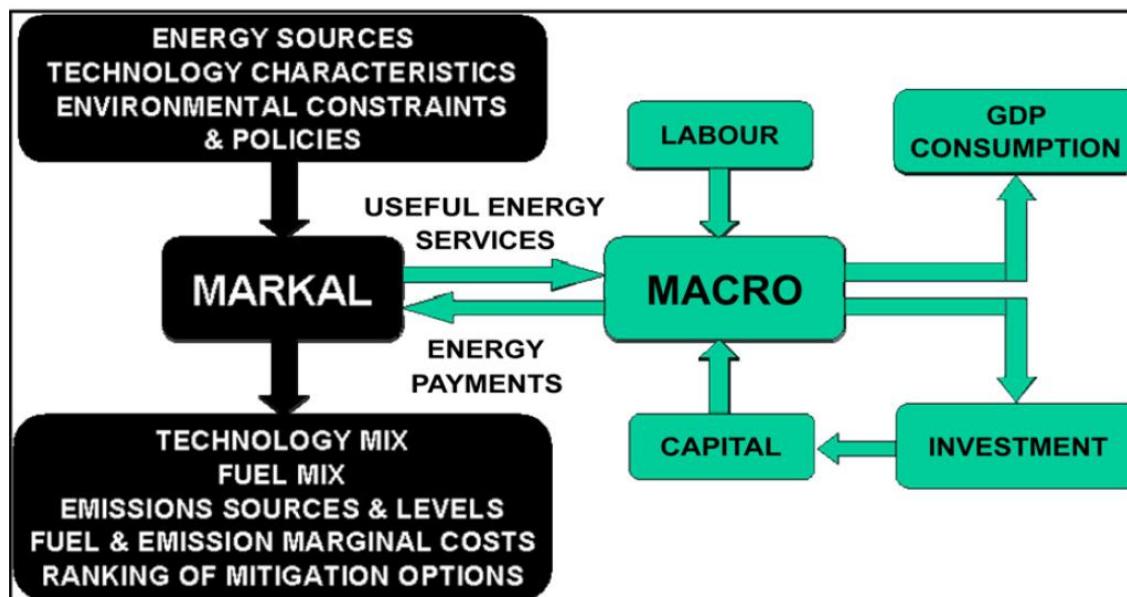
Fig. 1. Linked model systems, consisting of the Emission Prediction and Policy Analysis (EPPA) model, the modal split models of passenger and freight transport, and the systems-engineering MARKAL model. Empty arrows reflect data flows in the calibration stage, while dark arrows represent data flows in the simulation stage.

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

■ 연성결합 사례

- Strachan and Kannan (2008, Energy Economics)
 - Hybrid MARKAL-Macro (M-M) model: 상향식 최적화 모형의 기술적/부문별 상세구조를 포함하면서, 내생적인 총에너지 수요와 GDP 영향을 분석할 수 있는 단일부문 신고전파 성장모형

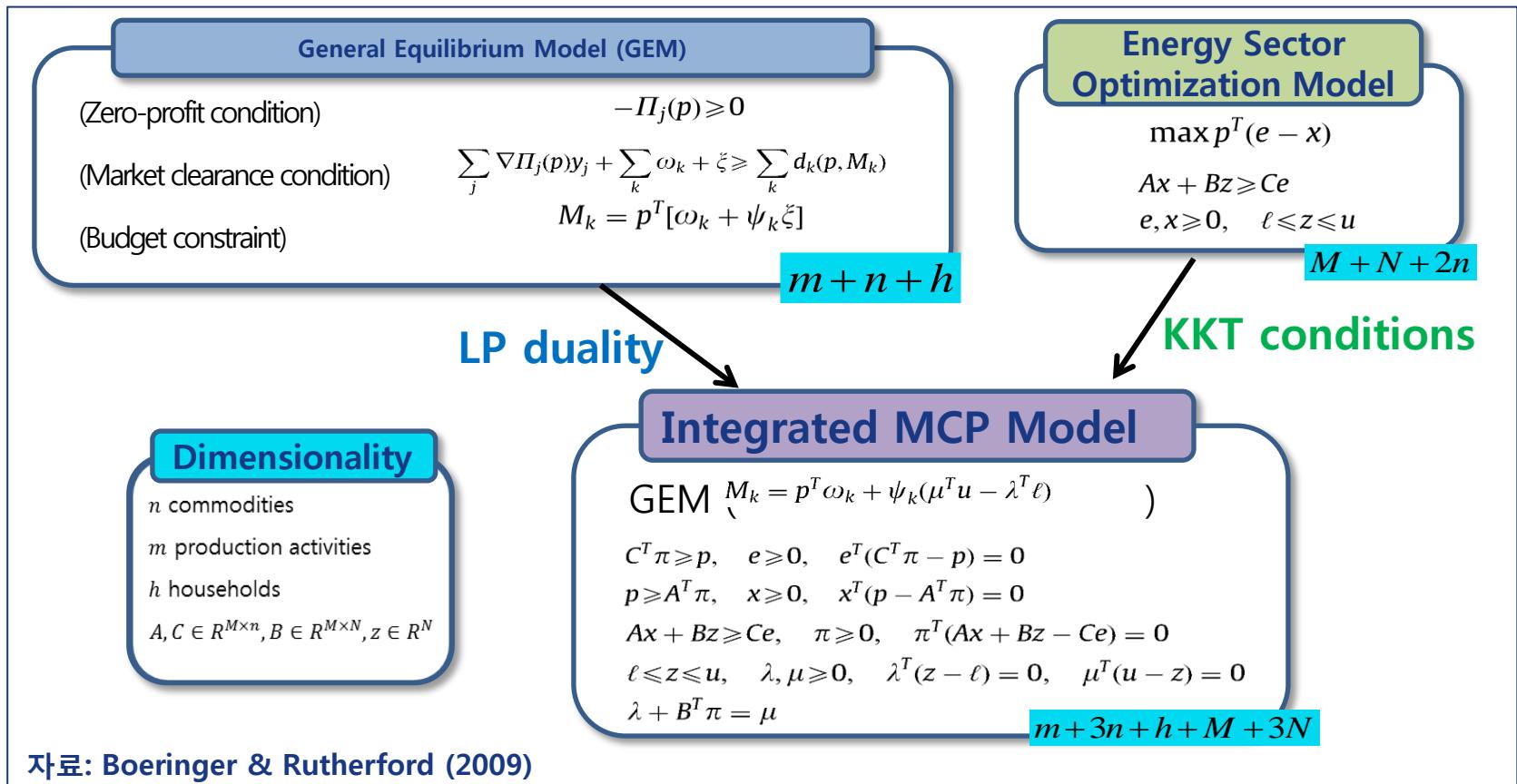


6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

- 연성결합 사례

- 연계형 통합모형과 MCP 통합 모형



자료: Boeringer & Rutherford (2009)

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

■ 상하향 연계 알고리듬

- 에너지 재화에 대한 수정된 시장 청산 조건

$$\tilde{S}_i = E_i^x + E_i^y + E_i^c$$

- 비 에너지 재화에 대한 수정된 시장 청산 조건

$$x = \tilde{x}_E + c \frac{\partial \Pi_c}{\partial p_x}, \quad y = \tilde{y}_E + c \frac{\partial \Pi_c}{\partial p_y}$$

- 수정된 소득 균형

$$M = r_x \tilde{K}_x + r_y \tilde{K}_y + w \tilde{L} + \sum_i p_i^E \tilde{S}_i - p_x \tilde{x}_E - p_y \tilde{y}_E$$

- 이차함수 목적식을 가지는 수정된 상향식 문제

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_i \tilde{p}_i^E \left(1 + \frac{2\tilde{S}_i - S_i}{2\varepsilon_i \tilde{S}_i} \right) - \tilde{p}_x x_E - \tilde{p}_y y_E \\ \text{s.t.} \quad & \end{aligned}$$

$$S_i = \sum_t z_{it} - \sum_{i't} b_{ii't} z_{i't}$$

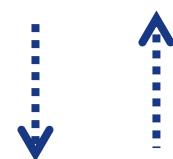
$$x_E = \sum_{it} a_{it}^x z_{it}$$

$$y_E = \sum_{it} a_{it}^y z_{it}$$

$$0 \leq z_{it} \leq \bar{z}_{it}$$

**Modified
top-down model**

(초기) 수요량, 가격 결정



공급량 결정

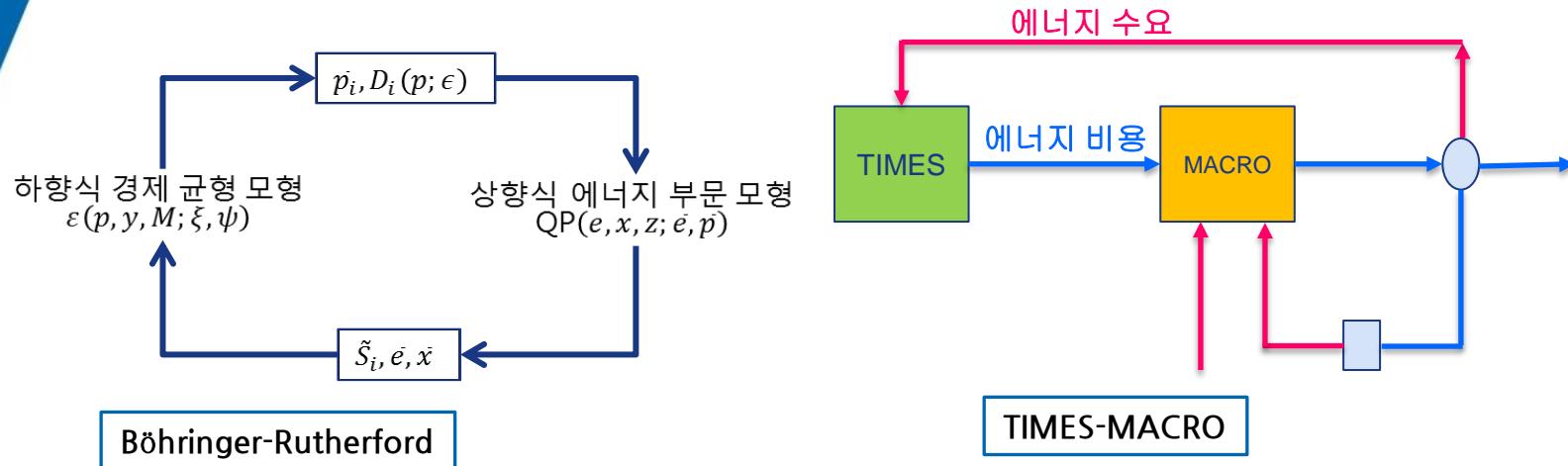
**Quadratic
bottom-up problem**



6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

- 상호 작용 유형



Decomposition?

Between LP (TIMES, MARKAL, TIAM) and NLP MACRO.

두 방법 간의 차이점:

- 패널티 함수의 위치: 상향식 vs 하향식
- 에너지 서비스의 총 수요 (가격) 결정 방법: 한계생산율 vs 수요곡선

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

■ TIMES-LP

비탄력 수요(외생)

$$\text{Min } c \cdot X$$

$$\text{s.t. } \sum_k CAP_{k,i}(t) \geq DM_i(t)$$

$$\text{and } B \cdot X \geq b$$

cf. Böhringer-Rutherford

$$\frac{e - \bar{e}}{\bar{e}} = E - \bar{p}$$

- 수요곡선
- 이윤 최대화
- 단계적 선형화 수행

탄력 수요(변수)

$$DM_i(p) = K_i \bullet p_i^{E_i}$$

$$\text{Max } \sum_i \sum_t \left(p_i^0(t) \cdot [DM_i^0(t)]^{-1/E_i} \bullet \int_a^{DM_i(t)} q^{1/E_i} \cdot dq \right) - c \cdot X$$

$$\text{s.t. } \sum_k CAP_{k,i}(t) - DM_i(t) \geq 0 \quad i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T$$

$$\text{and } B \cdot X \geq b$$

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

- 기준 모형 사례: TIMES-MACRO 표준 모형

목적 함수 : 효용 최대화

$$\text{Max } U = \sum_{t=1}^{T-1} dfact_t \cdot \ln(C_t) + \frac{dfact_{T-1} \cdot (dfactcurr_{T-1})^{\frac{d_{T-1}+d_T}{2}}}{1 - (dfactcurr_T)^{\frac{d_{T-1}+d_T}{2}}} \cdot \ln(C_T) \quad (1)$$

Usage of the annual output

$$Y_t = C_t + INV_t + EC_t \quad (2)$$

CES production function

$$Y_t = \left(akl \cdot K_t^{kpvs \cdot \rho} \cdot l_t^{(1-kpvs)\rho} + \sum_k b_k \cdot DEM_{t,k}^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (3)$$

Capital dynamics equation

$$K_{t+1} = tsrv_t \cdot K_t + \frac{1}{2} (d_t \cdot tsrv_t \cdot INV_t + d_{t+1} \cdot INV_{t+1}) \quad (4)$$

Terminal condition
for investment in last period

$$K_T \cdot (growv_T + depr) \leq INV_T \quad (5)$$

Demand decoupling equation

$$DET_{t,k} = aeeifac_{t,k} \cdot DEM_{t,k} \quad (6)$$

Annual cost of energy

$$EC_t = AESC_t + [\text{optional quadratic penalty function}] \quad (7)$$

$$aeeifac_{t,k} = \prod_{\tau=1}^t (1 - ddf_{\tau,k})^{\frac{d_\tau+d_{\tau+1}}{2}} \quad (8)$$

Labour growth

$$l_1 = 1 \quad \text{and} \quad l_{t+1} = l_t \cdot (1 + growv_t)^{\frac{d_t+d_{t+1}}{2}} \quad (9)$$

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

■ TIMES-MACRO 연결

- 에너지 수요 (TIMES \leftarrow MACRO)

$$\text{에너지 수요 in TIMES} \rightarrow DEM_T_{t,dm} = aeeifac_{t,dm} \cdot DEM_M_{t,dm} \rightarrow \text{MACRO 에너지 수요}$$

- 에너지 비용 (TIMES \rightarrow MACRO)

연간 비할인 에너지 시스템 비용 (TIMES)

Cost for the production factor energy in the MACRO model

$$COST_T_t + \frac{1}{2} qfac \sum_p \frac{cstinv_{t,p}}{expf_t \cdot capfy_p} \cdot XCAP_{t,p}^2 = EC_t$$

The amount of capacity exceeding a predefined expansion level

$$CAP_{t+1,p} \leq (1 + expf_t) \cdot CAP_{t,p} + XCAP_{t+1,p}$$

Tolerable expansion between two periods

Total installed capacity of technology p in period t

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

- Standard TIMES-MACRO vs TIMES-MSA

Standard TIMES-MACRO

$$\text{Max } U = \sum_{t=1}^{T-1} dfact_t \cdot \ln(C_t) + \frac{dfact_{T-1} \cdot (dfactcurr_{T-1})^{\frac{d_{T-1}+d_T}{2}}}{1 - (dfactcurr_T)^{\frac{d_{T-1}+d_T}{2}}} \ln(C_T) \quad (1)$$

$$Y_t = C_t + INV_t + EC_t \quad (2)$$

$$Y_t = \left(akl \cdot K_t^{kpvs, \rho} \cdot l_t^{(1-kpvs)\rho} + \sum_k b_k \cdot DEM_{t,k}^{\rho} \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (3)$$

$$K_{t+1} = tsrv_t \cdot K_t + \frac{1}{2}(d_t \cdot tsrv_t \cdot INV_t + d_{t+1} \cdot INV_{t+1}) \quad (4)$$

$$K_T \cdot (growv_T + depr) \leq INV_T \quad (5)$$

$$DET_{t,k} = aeeifac_{t,k} \cdot DEM_{t,k} \quad (6)$$

$$EC_t = AESC_t + [\text{optional quadratic penalty function}] \quad (7)$$

$$aeeifac_{t,k} = \prod_{\tau=1}^t (1 - ddf_{\tau,k})^{\frac{d_\tau+d_{t+1}}{2}} \quad (8)$$

$$l_1 = 1 \quad \text{and} \quad l_{t+1} = l_t \cdot (1 + growv_t)^{\frac{d_t+d_{t+1}}{2}} \quad (9)$$

TIMES-MSA

$$\text{Max } U = \sum_{t=1}^T \sum_r mwt_r \cdot pwt_t \cdot dfact_{r,t} \cdot \ln(C_{r,t}) \quad (10)$$

$$Y_{r,t} = C_{r,t} + INV_{r,t} + EC_{r,t} + NTX(nmr)_r \quad (11)$$

$$Y_{r,t} = \left(akl_r \cdot K_{r,t}^{kpvs, \rho_r} \cdot l_{r,t}^{(1-kpvs)\rho_r} + \sum_k b_{r,k} \cdot DEM_{r,t,k}^{\rho_r} \right)^{\frac{1}{\rho_r}} \quad (12)$$

$$K_{r,t+1} = tsrv_{r,t} \cdot K_{r,t} + \frac{1}{2}(d_r \cdot tsrv_{r,t} \cdot INV_{r,t} + d_{t+1} \cdot INV_{r,t+1}) \quad (13)$$

$$K_{r,T} \cdot (growv_{r,T} + depr_r) \leq INV_{r,T} \quad (14)$$

$$DET_{r,t,k} = aeeifac_{r,t,k} \cdot DEM_{r,t,k} \quad (15)$$

$$EC_{r,t} = qa_{r,t} + \sum_k qb_{r,t,k} \cdot (DET_{r,t,k})^2 + amp_{r,t} \quad (16)$$

$$\sum_r NTX(trd)_{r,t} = 0 \quad \forall \{t, trd\} \quad (17)$$

$$aeeifac_{r,t,k} = \prod_{\tau=1}^t (1 - ddf_{r,\tau,k})^{\frac{d_\tau+d_{t+1}}{2}} \quad (18)$$

$$l_{r,1} = 1 \quad \text{and} \quad l_{r,t+1} = l_{r,t} \cdot (1 + growv_{r,t})^{\frac{d_t+d_{t+1}}{2}} \quad (19)$$

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

■ MESSAGE-MACRO 연결 모형

- Messner and Schrattenholzer (2000)
 - 선형계획법에 기반한 에너지 시스템 모형인 MESSAGE 모형과 비선형 거시경제모형인 MACRO를 연계
 - 거시경제적 생산 활동, 에너지 수요와 공급, 온실가스 배출간의 상호작용을 분석
 - MESSAGE에서 계산된 에너지 공급 비용이 MACRO의 생산 요소들(자본, 노동, 에너지 등)의 최적 조합에 미치는 영향 (MESSAGE → MACRO)과 가격탄력성에 의한 에너지 수요변화 (MACRO → MESSAGE) 사이의 상호작용을 통해 전체적인 균형을 계산
 - IIASA(오스트리아)의 ECS(Environmentally Compatible energy Strategies) 프로그램에서 개발된 에너지-기후변화 시나리오 분석을 위한 통합평가시스템의 일부

■ 기존 모형 사례: 연성 결합(연계형 통합)

- Rausch and Mowers (2014)
 - 대형 상향식 모형(ReEDS)과 대형 하향식 모형(USREP)을 연계
 - Recursive CGE 와 recursive LP optimization 모형 연계
 - MIT USREP (US Regional Energy Policy)
 - 3국 12지역 10부문 9가계 모형: GTAP, IMPLAN, NBER TAXSIM, EIA Energy Balance
 - 4개 유형의 생산 구조, 10개 capital vintage, malleable & non-malleable capital
 - NREL ReEDS (Regional Energy Deployment System)
 - 전원계획 및 송배전 비용 최소화
 - » 2006~2050년간 발전소 건설(수명기간: 20년), 운영, 송배전 비용 최소화 (2년단위 순차 최적화)
 - » 제약 조건: 전력 수요 및 예비율, 지역별 자원 제약, 송배전 네트워크 용량 제약
 - » 4계절, 4개 시간대 및 여름철 첨두 수요 구분 (17개 시간대)
 - Non-dispatchable variable resource renewable energy (VRRE)
 - » 356개 지역별 신재생에너지 보급잠재력 및 공급 불활실성 고려 (분산-공분산 분석)
 - » Reserve sharing groups of 21 Reginal Transmission Organization (RTO)

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

■ 기존 모형 사례: 연성 결합(연계형 통합)

- Rausch and Mowers (2014)
 - 입력자료 일관성 확보: 기준년도의 자본, 노동, 연료의 가격 및 지역별 전력수요를 고정한 후, ReEDS를 이용해 요소투입량과 전력 공급량 도출
 - 모형의 도매전력가와 실제 소매전력가의 차이로 USREP 각 지역의 전력 가격 markup 분포 추정
 - ReEDS가 도출한 요소투입과 전력공급량을 고정시킨 후 최소자승법을 통해 새로운 SAM 추정
 - Decomposition Algorithm
 - ReEDS 모형이 마지막으로 도출한 전력 공급량 및 각종 요소투입량을 USREP 모형에 투입:
→ USREP 모형은 지역별로 calibration된 전력 수요함수와 연료, 자본, 노동, 원료 가격 도출
 - 이 TD 균형해를 다시 ReEDS 모형에 적용하여 수정된 전력부문 BU 균형해 도출
 - ReEDS 모형의 목적함수를 기준의 선형에서 TD 모형의 가격탄력성이 반영된 이차함수로 전환
 - 분석 결과
 - 재생에너지 보급 기준 정책은 탄소세에 비해 경제적 효율성과 분배적 형평성을 크게 떨어뜨림
 - 에너지 효율 기준 정책은 탄소세에 비해 세수 재활용을 통한 분배 개선 잠재력 상실

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ① 연성결합 사례

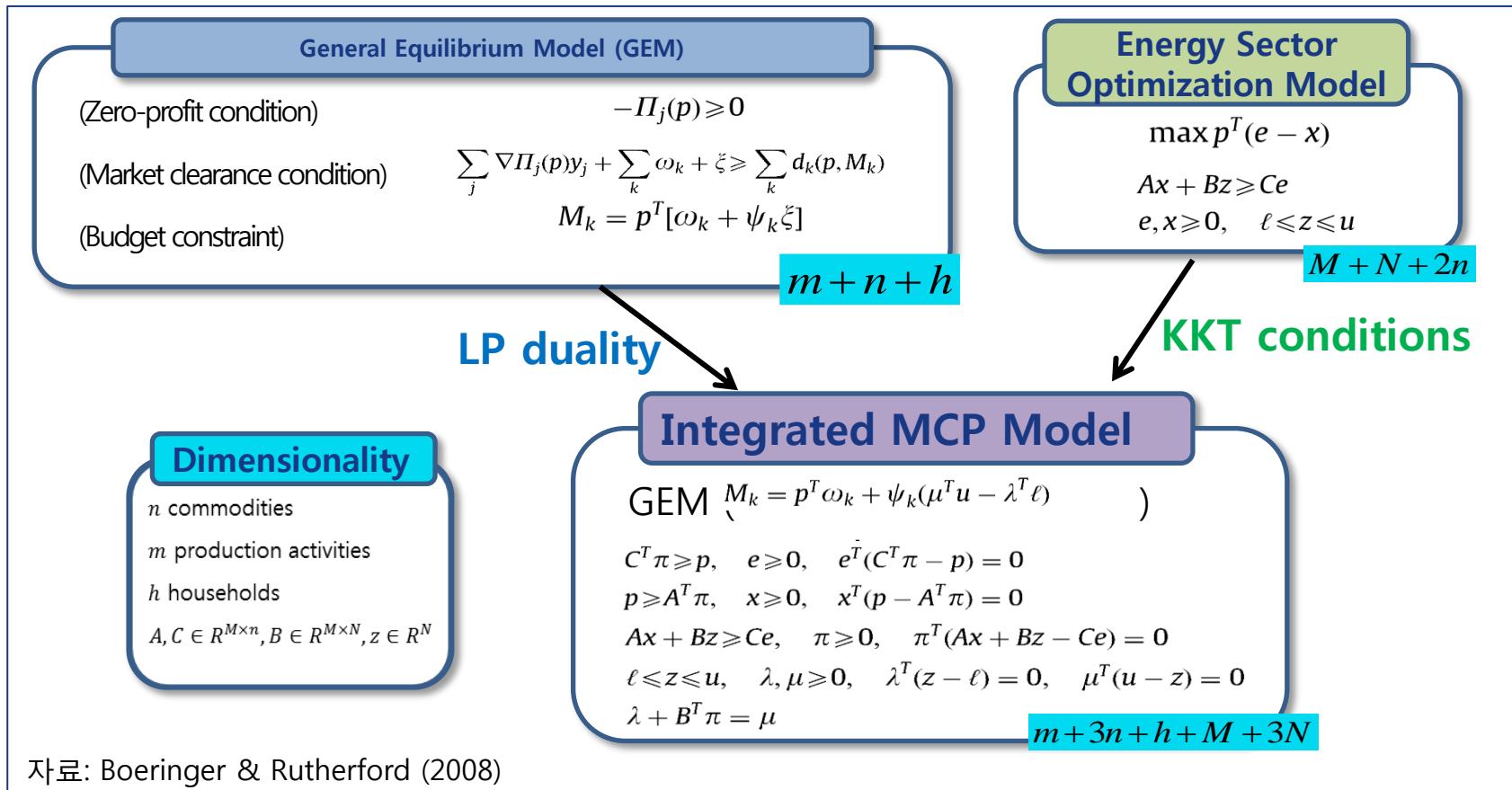
■ 농업 및 토지부문 상하향식 통합모형

- 농업부문의 상하향식 통합모형 사례
 - 불완전형태의 통합모형
 - 상향식 모형의 내생변수 값을 하향식 모형에 내려 보내는 일방향의 상호작용 모형
 - ESIM과 LEITAP의 통합(Banse and Grethe, 2008)
 - 전 세계 농업의 부분균형 모형인 ESIM과 글로벌 CGE 모형인 LEITAP을 축차적 반복계산을 통해 통합
 - CAPRI와 GTAP의 통합(Jansson et al., 2009)
 - 상향식 모형인 CAPRI와 하향식 모형인 GTAP 을 축차적 반복계산을 통해 통합
 - 미국 낙농부문모형과 GTAP-in-GAMS의 통합(Grant et al., 2006)
 - 낙농부문 상향식 모형 구축 후에 GTAP과 통합

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ② 경성결합 사례

- 통합 MCP



자료: Boeranger & Rutherford (2008)

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ② 경성결합 사례

■ 축약모형 방식

- Bosetti 외 (2006, The Energy Journal)
 - WITCH (World Induced Technical Change Hybrid Model): Ramsey-type neoclassical optimal growth hybrid model
 - 상향식 모형의 에너지 투입 상세구조가 반영된 하향식 신고전파 최적성장모형
 - 에너지 기술에 대한 상세 특성을 반영하고, 내생적인 기술진보를 허용하며, 게임이론적 틀 하에서 최적의 기후완화전략을 분석
 - 각 지역은 자본, R&D, 에너지 기술 등에 대한 투자와 화석연료 소비에 대해 지역 단위 후생을 최대화하도록 최적경로를 선택
 - 지역간 동태적 게임(open-loop Nash game)
 - 기후피해는 통합 기후 모듈로부터의 피드백을 통해 사회 후생에 반영됨.
 - 에너지 기술 정보가 매우 단순화되어 있으며, 기술변화에 대한 모형화에 있어 경험근거가 부족함
- Hyman 외 (2002)
 - 네스팅 구조의 최상위에 배출량과 산출물의 CES 복합재를 생성하고, 상향식 모형에서 도출된 한계감축비용의 가격탄력성(탄소가격 변화에 따른 배출량 변화)을 CES 함수의 대체탄력성으로 구현
 - 한국환경정책평가연구원(김용건 외, 2011)에서 국내 NCO2를 대상으로 적용
» NCO2 비규제시 GDP 하락 영향이 두배 가까이 증가
- Kiuila and Rutherford (2013a, b)
 - 전통적 연속곡선 방식과 계단형 곡선 방식을 통한 CGE 방법론을 제시하고 비교평가
 - 전통적 방식: 상향식 모형의 (체증형) 한계감축비용을 일부 생산요소가 고정된 CES 함수를 통해 DRS 기술로 표현 (OLS를 통한 비선형 최적화로 CES 모수 추정)
» 오상봉/Bohringer/오인하(2012)에서 국내 전력 산업을 대상으로 적용
 - 계단형 곡선을 레온티에프 생산함수에 대한 상보성 조건으로 구현
 - 기존 연구와 달리 두 가지 방법론 간 분석결과 차이는 크지 않음.

6-1) 통합모형 구축 로드맵

가. 기존 통합모형 현황 분석 - ③ 회계적 일관성

■ 회계적 일관성

- Sue Wing (2008) - SAM 고정 및 기술 자료 보정
 - 하향식 모형(CGE)의 입력자료(SAM)를 고정시키고, 상향식 모형 입력자료(engineering data)와의 편차를 최소화하도록 행렬조정기법 적용
 - SAM의 기본 방정식을 제약조건으로 두고, 상향식 입력자료와 새로이 추정하는 변수값의 비율 편차(fractional deviation)의 제곱합을 최소화하는 비선형 최적화 문제의 해를 도출
» 제약식: 총산출=세부기술별 산출의 합, 세부기술별 투입의 합을 SAM과 일치, 세부기술별 투입=산출
- Rausch and Mowers (2014) - 기술 자료 고정 및 SAM 보정
 - 네스팅 구조의 최상위에 배출량과 산출물의 CES 복합재를 생성하고, 상향식 모형에서 도출된 한계감축비용의 가격탄력성(탄소가격 변화에 따른 배출량 변화)을 CES 함수의 대체탄력성으로 구현
 - 한국환경정책평가연구원(김용건 외, 2011)에서 국내 NCO2를 대상으로 적용
» NCO2 비규제시 GDP 하락 영향이 두배 가까이 증가
- Kiuila and Rutherford (2013a, b)
 - 상향 및 하향 모형의 기준연도 입력자료간 일관성 확보를 위해, 하향 모형에서 활용하는 가격 자료(자본, 노동, 업종별 제품 등)를 적용하여 상향 모형의 해를 구함
 - 상향 모형의 해에서 나타나는 투입 및 산출 자료를 하향식 모형에서 활용되는 SAM의 해당 값으로 대체(고정)하고, 최소자승최적화(least-square optimization) 기법을 통해 새로운 SAM을 도출함.

6-1) 통합모형 구축 로드맵

나. 상하향 통합모형 개발 전략

- 통합 모형 구축 전략 - 유형별 장단점

구분	연성 결합(soft link)		경성 결합(hard link)	
특징	독립 모형 단순 연계 기존의 독립적 모형을 연계하여 운영	연계형 통합 모형 반복적연산알고리듬을통한연계가가능하도록상향(CGE)및하향식(LP)모형을구축	축약모형(reducedform)방식 상향 및 하향식 모형 중 하나를 단순화된 형태로 설계하여 통합모형을구축	일체형 통합 모형 상향 및 하향식 모형을 통합된 문제(MCP 등)로 구성
사례	-MARKAL-EPPA (Schafer & Jacoby, 2005; Jacoby & Schafer, 2006) -Banse 외(2000)	-Boeringer&Rutherford(2009) -MARKAL-Macro (Strachan & Kannan, 2008) -Lanz & Rausch(2011) -Rausch & Mowers(2014) -TIMES-MACRO(2013) -ESIM-LEITAP('08), CAPRI-GTAP('10), Grant & Rutherford('06), 황원식('13)	-Hyman 외 (2002) -WITCH (Bosetti 외, 2006) -Kiuila & Rutherford (2013) -오인하 (2012) -KEI (2010)	-Boeringer & Rutherford(2008) -Fujimori 외(2014)
장점	기존 모형 활용 가능; 소요 인력 및 비용 최소화	완전한 형태의 상·하향 통합모형으로서 상향 및 하향식 모형의 장점을 모두 보유	상·하향 모형 중 하나의 장점을 그대로 유지하면서 다른 하나의 장점을 일부 활용할 수 있음.	완전한 형태의 상·하향 통합모형으로서 상향 및 하향식 모형의 장점을 모두 보유
단점	상·하향 모형간 일관성 결여	연계 알고리듬의 수렴성, 속도 등에 문제가 발생할 수 있음.	단순화된 부분이 원래의 복잡한 문제를 표현하는 데 한계가 있음.	변수의 수가 많아질 경우 해를 구하기 어려움

6-1) 통합모형 구축 로드맵

나. 상향형 통합모형 개발 전략

■ 통합 모형 구축 전략 - 기본 방향

- 상향형 통합 모형 구축방향

- 하향식 모형: 축차·동태 연산가능일반균형 (recursive dynamic CGE) 모형으로 구성하되, 최종적으로 글로벌 모형 구축
 - 분석 대상 기간, 대상 국가, 업종분류, 주요 입력변수(탄력성), 소비함수 특성, 투자의 내생성 등을 선택 가능하도록 사용자 친화형 UI 개발
- 상향식 모형: LP 기반 최적화 모형으로 구성하되, 국내 부문에 한정하여 구축 (해외 타 경제로의 확장 가능성은 유지)
 - 부문(업종)별로 독립된 모형을 구성하고, 상호 연계는 하향식을 포함하는 통합모형을 경유
 - LP형 상향식 모형의 경우 PMP 방법을 통한 calibration 방식이 가능하도록 설계
- 대규모 상향식 및 하향식 모형을 분해 기법을 통해 연계
 - 선형 수요함수 및 PMP 적용시 효율적 알고리듬 개발

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향연계 방법론 - ① PMP 기법의 활용

■ PMP(Howitt 1995; Paris & Howitt 1998)

- 일종의 캘리브레이션(calibration) 과정을 통해 모형의 해와 BAU에서의 실제 자료가 일치도록 함
 - 구석 해(corner solution), 과잉특화(over-specialization) 문제 해소
- 농업부문모형(ASM)에서 이미 적용되어오던 기법을 Howitt(1995)이 이론으로 정립하였고, 이후 미국과 유럽 농업경제학자들에 의해 비판적으로 발전되어 옴
- PMP의 두 가지 Task
 - 목적함수의 비선형화를 통해 BAU모형의 해와 실제 관측치가 일치
 - 구축된 비선형모형이 최적화모형으로서의 적합성을 지녀 시뮬레이션결과의 신뢰도가 보장
- 3단계 분석
 - 1단계: BAU모형의 해와 실제 자료를 일치시키는 제약을 가지는 모형 분석
 - 2단계: 1단계 모형의 쌍대변수를 활용해 1단계 모형의 목적함수 변형
 - 3단계: 2단계에서 변형된 목적함수를 가지고 대신 1단계에서 포함되었던 캘리브레이션 제약을 가지지 않는 모형 분석

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상하향 연계 방법론 - ① PMP 기법의 활용

■ PMP

- LP모형: 1단계

$$\max_x \{ \mathbf{p}' \mathbf{x} - \mathbf{c}' \mathbf{x} \}$$

$$\text{s.t., } \mathbf{A}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \leq \mathbf{x}_R (1 + \varepsilon)$$

\mathbf{x}_R = 실제 관측치

ε = 작은 양수 (두 제약간의 선형종속관계 방지)

- 쌍대모형

$$\min_{\mu, \lambda} \{ \mathbf{b}' \mu + \lambda' \mathbf{x}_R (1 + \varepsilon) \}$$

$$\text{s.t., } \mathbf{A}' \mu + \lambda + \mathbf{c} = \mathbf{p}$$

$$\mu \geq 0 \quad \lambda \geq 0$$

$\mathbf{A}' \mu$ = 분배가 가능하지만 양이 고정된 투입요소 사용에 따른 한계비용

$\lambda + \mathbf{c}$ = 생산량 x 에 따라 값이 달라지는 가변한계비용

2차식의 총 가변비용 가정 (다른 형태의 비용함수도 가능) :

$$C(x_R) = \int_0^{x_R} (\lambda + c)' dx = \lambda' x_R + c' x_R = x_R' D x_R / 2$$

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향연계 방법론 - ① PMP 기법의 활용

- PMP

- LP모형: 2단계

$$\lambda_{LP} + c = Dx_R$$

λ_{LP} = LP 원 모형에서 구해진 승수값

- LP모형: 3단계

$$\begin{aligned} & \max_x \{ p'x - x'Dx / 2 \} \\ & \text{s.t., } Ax \leq b \end{aligned}$$

- 행렬 D

- n X n 개의 element를 모두 식별할 수 없음

- 1) off-diagonal을 모두 0으로 가정
- 2) Generalized maximum entropy 등의 기법 이용
(Paris and Howitt 1998; Heckelei and Wolff 2003)

- 3단계 모형

- \hat{D} 는 2단계에서 식별된 행렬
- 3단계 QP모형은 1단계 LP모형의 캘리브레이션 제약을 포함하고 있어 두 모형은 동일한 BAU 자료를 복원함
- 정책효과 분석은 3단계 모형을 사용함

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향형 연계 방법론 - ① PMP 기법의 활용

■ PMP

- 1단계 모형 vs. 3단계 모형

$$\max_x \{ p'x - c'x \}$$

$$\text{s.t., } Ax \leq b \quad x \leq x_R(1 + \varepsilon)$$

$$L = (p - c)'x + \mu(b - Ax)$$

$$+ \lambda(x_R(1 + \varepsilon) - x)$$

FOC:

$$p - c - A'\mu - \lambda = 0$$

$$\mu \geq 0 \quad \lambda \geq 0$$

$$\max_x \{ p'x - x'\hat{D}x / 2 \}$$

$$\text{s.t., } Ax \leq b$$

$$L = p'x - x'\hat{D}x / 2$$

$$+ \mu(b - Ax)$$

FOC:

$$p - \hat{D}x - A'\mu = 0$$

$$\mu \geq 0$$

- $\lambda_{LP} + c = \hat{D}x_R$ 와 같이 구축되므로 두 모형은 동일 해를 가지게 됨
- 원래의 목적함수가 비선형이어도 적용 가능(Wolfe의 쌍대성정리)

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향연계 방법론 - ① PMP 기법의 활용

■ PMP - 모형의 확장 잠재력

- 공급탄력성 정보의 활용
 - 이차계획법 목적함수의 이차항 계수의 보정을 통해 공급이 가격탄력성 정보 반영 가능
- 비용함수 추정
 - 통계적 기법을 활용하여 확률변수가 포함된 이차계획법의 일계조건을 추정
 - 통상적인 회귀분석의 적용이 어렵지만 엔트로피 기법(GME) 활용 가능
- 원목적 함수가 비선형인 경우에도 적용 가능
 - 박경원 외(2015)에서 적용 가능성 검증(Wolfe(1961)의 비선형 쌍대성 정리 적용)
- 불확실성의 반영
 - Hazell & Norton(1986) 등 다양한 방법 개발/활용
- 모형이 동태화
 - 전기의 균형을 다음기의 초기값으로 순차적으로 보정함으로서 동태적 모형 구축 가능 (박경원&권오상, 2011)

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향형 연계 방법론 - ② 연계 알고리듬 분석

- 상향형 연계 알고리듬: QP의 LP화

$$\max_{\{e, x, z; \bar{e}, \bar{p}\}} f = \bar{p}^T (e - x) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{p}_i e_i}{\epsilon_i \bar{e}_i} (e_i - 2\bar{e}_i)$$

subject to $Ax + Bz \geq Ce$

$$e, x \geq 0$$

$$l \leq z \leq u,$$

$$e, x, \bar{p}^T \in \mathbb{R}^n,$$

$$z, l, u \in \mathbb{R}^N,$$

$$A, C \in \mathbb{R}^{M \times n},$$

$$B \in \mathbb{R}^{M \times N}.$$

A sufficient condition for strict convexity of f is that H should be positive definite. The convexity holds for positive semi-definite H .

QP \Rightarrow LP

$$H = \begin{bmatrix} H_e & 0_{n \times n} & 0_{n \times N} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times N} \\ 0_{N \times n} & 0_{N \times n} & 0_{N \times N} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial e_i^2} = \frac{\bar{p}_i}{\epsilon_i \bar{e}_i} (> 0).$$

$$\min \quad \sum_{i=1}^n (a_i^e + a_i^x) + \sum_{i_t=1}^N (a_{i_t}^z + a_{i_t}^\zeta + a_{i_t}^\eta) + \sum_{h=1}^M a_h^\mu$$

subject to $-\bar{p}_i + \frac{\bar{p}_i}{\epsilon_i \bar{e}_i} e_i - \frac{\bar{p}_i}{\epsilon_i} + \sum_{h=1}^M \mu_h c_{hi} - y_i^e + a_i^e = 0, i = 1, \dots, n,$

$$\bar{p}_i - \sum_{h=1}^M \mu_h a_{hi} - y_i^x + a_i^x = 0, i = 1, \dots, n,$$

$$\zeta_{i_t} - \eta_{i_t} - \sum_{h=1}^M \mu_h b_{hi_t} - y_{i_t}^z + a_{i_t}^z = 0, i_t = 1, \dots, N,$$

$$\sum_{i=1}^n c_{hi} e_i - \sum_{i=1}^n a_{hi} x_i - \sum_{i=1}^N b_{hi} z_{i_t} + v_h^\mu + a_h^\mu = 0, h = 1, \dots, M,$$

$$z_{i_t} - u_{i_t} + v_{i_t}^\zeta + a_{i_t}^\zeta = 0, i_t = 1, \dots, N,$$

$$-z_{i_t} + l_{i_t} + v_{i_t}^\eta + a_{i_t}^\eta = 0, i_t = 1, \dots, N,$$

all variables ≥ 0 and complementarity conditions.

$$e_i \frac{\partial L}{\partial e_i} = e_i \left(-\bar{p}_i + \frac{\bar{p}_i}{\epsilon_i \bar{e}_i} e_i - \frac{\bar{p}_i}{\epsilon_i} + \sum_{h=1}^M \mu_h c_{hi} \right) = 0, i = 1, \dots, n,$$

$$x_i \frac{\partial L}{\partial x_i} = x_i \left(\bar{p}_i - \sum_{h=1}^M \mu_h a_{hi} \right) = 0, i = 1, \dots, n,$$

$$z_{i_t} \frac{\partial L}{\partial z_{i_t}} = z_{i_t} \left(\zeta_{i_t} - \eta_{i_t} - \sum_{h=1}^M \mu_h b_{hi_t} \right) = 0, i_t = 1, \dots, N,$$

$$\mu_h \left(\sum_{i=1}^n c_{hi} e_i - \sum_{i=1}^n a_{hi} x_i - \sum_{i_t=1}^N b_{hi} z_{i_t} \right) = 0, h = 1, \dots, M,$$

$$\zeta_{i_t} (z_{i_t} - u_{i_t}) = 0, i_t = 1, \dots, N,$$

$$\eta_{i_t} (-z_{i_t} + l_{i_t}) = 0, i_t = 1, \dots, N,$$

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향연계 방법론 - ② 연계 알고리듬 분석

- 상향연계 알고리듬: QP의 LP화

Quadratic penalty

$$\begin{aligned} \max_{\{e, x, z; \bar{e}, \bar{p}\}} \quad f &= \bar{p}^T (e - x) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{\bar{p}_i e_i}{\epsilon_i \bar{e}_i} (e_i - 2\bar{e}_i) \\ &= \bar{p}^T (e - x) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \alpha_i (e_i - \bar{e}_i)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \alpha_i \bar{e}_i^2, \\ \text{where} \quad \alpha_i &= \frac{\bar{p}_i}{\epsilon_i \bar{e}_i} \end{aligned}$$

Linear penalty

$$\begin{aligned} \max \quad & \bar{p}^T (e - x) - \sum_{i=1}^N w_i u_i^+ - \sum_{i=1}^N v_i u_i^- \\ \text{subject to} \quad & e_i = \sum_t z_{it} - \sum_{i't} b_{ii't} z_{i't} = \bar{e}_i + u_i^+ - u_i^- \\ & x_E = \sum_{it} a_{it}^x z_{it} \\ & y_E = \sum_{it} a_{it}^y z_{it} \\ & 0 \leq z_{it} \leq \bar{z}_{it} \\ & 0 \leq u_i^+, u_i^- \end{aligned}$$

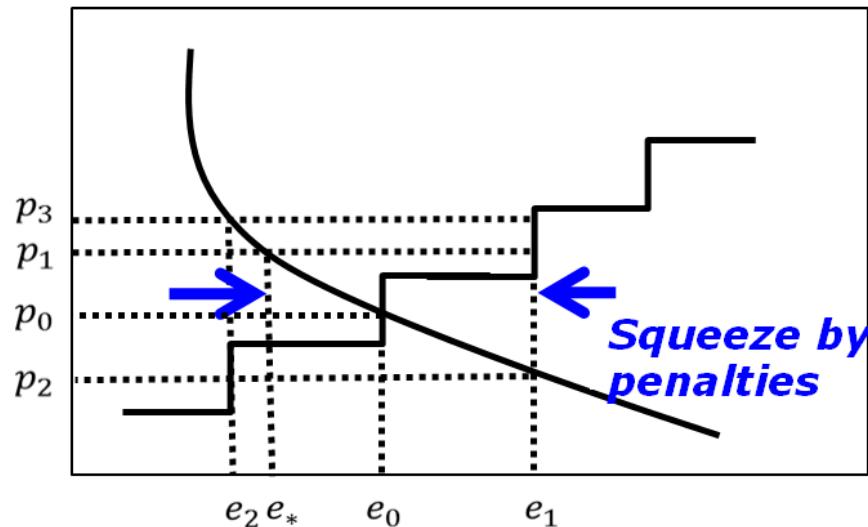
	Original LP	QP	New LP
변수 수	2n+N	6n+9N+3M	4n+N
등식 수	0	2n+3N+M	0
부등식 수	2N+M	0	2N+M
비음제약수	2n	6n+9N+3M	4n
기타		C.C	

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향식 연계 방법론 - ② 연계 알고리듬 분석

- 선형 패널티 상향식 LP 문제의 수렴성

- 하향식 모형은 매개변수 \bar{e} 에 대해 단순 감소하는 p 를 생산
- 상향식 모형은 매개변수 p 에 대해 단순 감소하는 e 를 생산
- 핑퐁현상의 가능성: 패널티 파라미터 조정 필요
- 작은 수요탄력성으로 인한 발산



6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향형 연계 방법론 - ② 연계 알고리듬 분석

■ 다양한 패널티 함수 실험(1)

- Böhringer와 Rutherford의 분할된 상향식 문제의 수렴이 가능한지 실험
 - 수요탄력성: ε_i

< 수요 탄력성 변화에 대한 수렴성 >

변수	통합모형	분할 모형			
		수요 탄력성			
		원래 값 (A)	A x 0.01	A x 0.1	A x 2
에너지 ele 기준량	10.40089	10.40038	10.11339	10.36680	10.40134
에너지 oil 기준량	7.00000	7	7.00506	7	7
에너지 gas 기준량	3.00000	3	3.01129	3	3
에너지 col 기준량	4.03422	4.03443	4.01333	4.03388	4.03461
재화 x 생산량	1.01442	1.01441	1.01028	1.01391	1.01440
재화 y 생산량	1.00005	1.00005	0.99858	0.99987	1.00005
수렴까지 반복횟수	-	5	29	17	15

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향형 연계 방법론 - ② 연계 알고리듬 분석

- 다양한 패널티 함수 실험(2)

- Böhringer와 Rutherford의 분할된 상향식 문제의 목적함수의 변화에 따른 수렴성

- 4차식의 패널티 함수: $f = \bar{p}^T(\epsilon - x) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \alpha_i (\epsilon_i - \bar{\epsilon}_i)^4 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{\epsilon}_i^2$

〈 다른 목적함수 식에 대한 수렴성〉

변수	통합모형	분할 모형					4차식 패널티	
		이차항 계수 변화에 대한 수렴성				4차식 패널티		
		변동		상수				
		$\alpha_i = \frac{\bar{p}_i}{\epsilon_i \bar{\epsilon}_i}$	근사값(B)	B x 10	B x 0.5			
에너지 ele 기준량	10.40089	10.40038	10.40005	10.36381	10.40058	10.34144		
에너지 oil 기준량	7.00000	7	7	7	7	7		
에너지 gas 기준량	3.00000	3	3	3	3	3.01315		
에너지 col 기준량	4.03422	4.03443	4.03452	4.03401	4.03388	3.81260		
재화 x 생산량	1.01442	1.01441	1.01440	1.01387	1.01443	1.02191		
재화 y 생산량	1.00005	1.00005	1.00005	0.99986	1.00006	1.00257		
수렴까지 반복횟수	-	5	5	17	12	50		

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상하향 연계 방법론 - ② 연계 알고리듬 분석

- LP, QP 복잡도

- LP 해법

심플렉스 방법
(simplex method)



타원법
(ellipsoid method)



내점 방법
(interior point method)

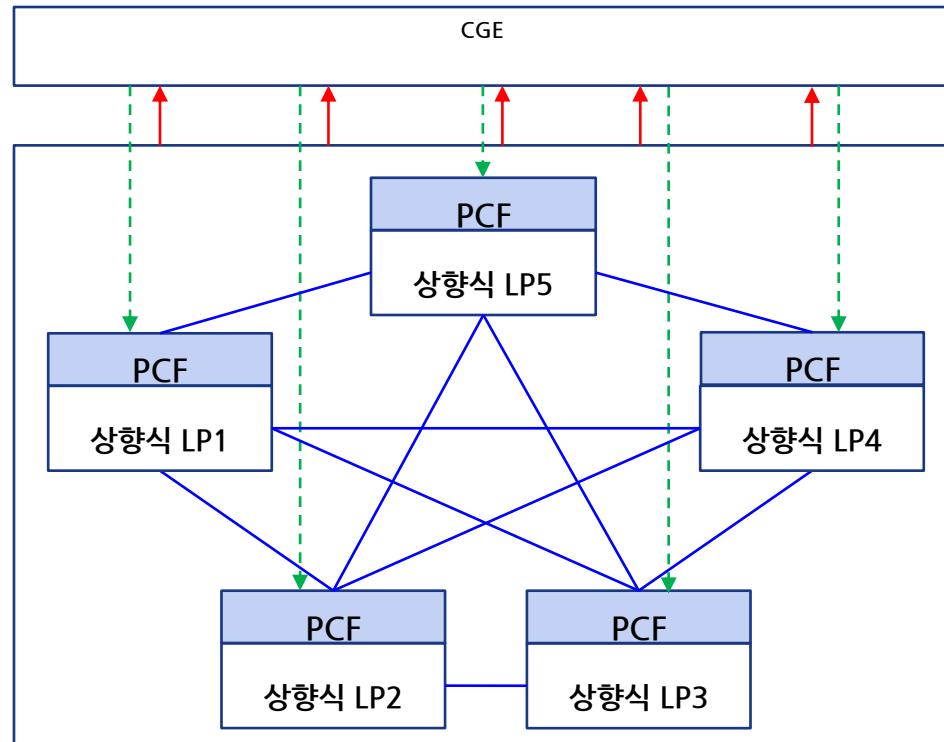
- 1947, Dantzig
 - 최악의 경우 지수 복잡도
- 1979, Khachiyan ; $O(n^4L)$
 - 이론적 다향 시간 복잡도.
 - 실제 문제에 심플렉스 방법 보다 계산 효율성이 떨어짐.
- 1984, Karmarkar ; $O(n^{3.5}L)$
 - 다향시간 복잡도.
 - 실제 문제에게 훨씬 효율적.
- 1999, Anstreicher ;
- 2001, Peng et al. ;
 - 현존하는 가장 좋은 성능의 LP 알고리듬
- CQP를 해법용 내점 방법의 발전
 - LP를 풀기 위한 다향 시간 내점 방법이 CQP(Convex Quadratic Programming) 까지 적용됨.
 - 2009년 Liu, Sun and Sampaio은 Peng et al.의 아이디어를 이용하여 CQP를 푸는 내점 방법 제안, LP와 같은 계산 복잡도를 갖는다는 것을 증명.

6-1) 통합모형 구축 로드맵

다. 상향식 연계 방법론 - ② 연계 알고리듬 분석

- 다중 산업(부문) 상향식 모형과의 통합/ 분할 해법의 개념

- ① 초기값으로부터 CGE의 균형해를 찾는다.
- ② 부문별 상향식 문제의 PCF와 수요 제약식을 갱신 한다.
- ③ 상향식 통합 문제의 균형해를 찾는다.
 - ⓐ 부문간 연결 변수를 고정시킨다.
 - ⓑ 부문별 분할 문제의 해를 구한다.
 - ⓒ 가중 PCF를 향상시키는 새로운 연결 변수를 구한 후, 이 값으로 부문간 연결 변수를 고정시킨다.
 - ⓓ 가중 PCF가 적정값에 도달하지 않았다면 Ⓛ를 반복한다.
- ④ 부문별 부분 균형 공급량과 연결 변수값을 CGE로 전달한다.
- ⑤ CGE의 일반 균형해를 얻지 못하였다면 CGE의 해를 구하고 ②를 반복한다.



PCF Proximity Control Function

— 부문간 하부 문제간 연결 변수

→ 하향식 → 상향식 가격 및 수요 정보

→ 상향식 → 하향식 부분 균형 공급량 정보

6-1) 통합모형 구축 로드맵

라. 상향식 통합모형 개발 로드맵

■ 통합 모형 로드맵: 연도별 목표



6. 연구개발 수행내용 및 결과

2) 하향식 모형 비교분석

가. 하향식 모듈 개관

나. 하향식 모듈 구축방안

다. 하향식 모듈 구축 로드맵

6-2) 하향식 모형 비교분석

가. 하향식 모듈 개관

- 목적: 한국 온실가스 감축정책 경제적 파급효과 분석 및 상향식 모듈 연계
 - 연계 시 모형의 안정성을 추구하기 위해 가능한 한 단순한 모형을 구축
- 특징: 글로벌 축차 동태 일반균형 모형
 - 로그 선형화 모형 배제: 근사치와 원 함수 간 격차로 인한 신뢰성 문제 우려
 - 기대(forward looking) 모형은 통합모형의 안정성을 고려하여 추가 검토
- 구축 방법: 대표적 일반균형모형 비교 분석→필요한 특성 취합
 - 16개 대표적 일반균형 모형을 기능별로 분해하여 비교분석→각 기능별로 한국형 통합모형에 필요한 특성을 취합
- 산업구분: 국가 온실가스 감축계획의 부문 구분 기준 32개 산업으로 분류
- 일반균형 모형 방정식 체계: 혼합상보성문제(MCP)를 구성하는 연립부등식
- 프로그램 언어: 일반균형모형 구축에 폭넓게 사용되는 GAMS 사용

6-2) 하향식 모형 비교분석

가. 하향식 모듈 개관

■ Reviewed models

범주	모형	개발/관리 기관
1국	IFPRI	World Bank
1국	IGEMS	U.S. EPA
1국	MAMS	World Bank
1국	MSG	Statistics Norway
1국	ORANI	Victoria Univ. Cops
국제	ADAGE	RTI international
국제	ENVISAGE	World Bank
국제	EPPA	MIT JPSPGC

Category	Name	Institution
국제	G-Cubed	MSG*
국제	GTAP	Purdue Univ. CGTA
국제	IPETS	U.S. NSF. NCAR
국제	LINKAGE	OECD
국제	PEP	PEP
국제	RICE	William Nordhaus
국제	SGM	PNNL
국제	WorldScan	Netherland CBP

6-2) 하향식 모형 비교분석

가. 하향식 모듈 개관

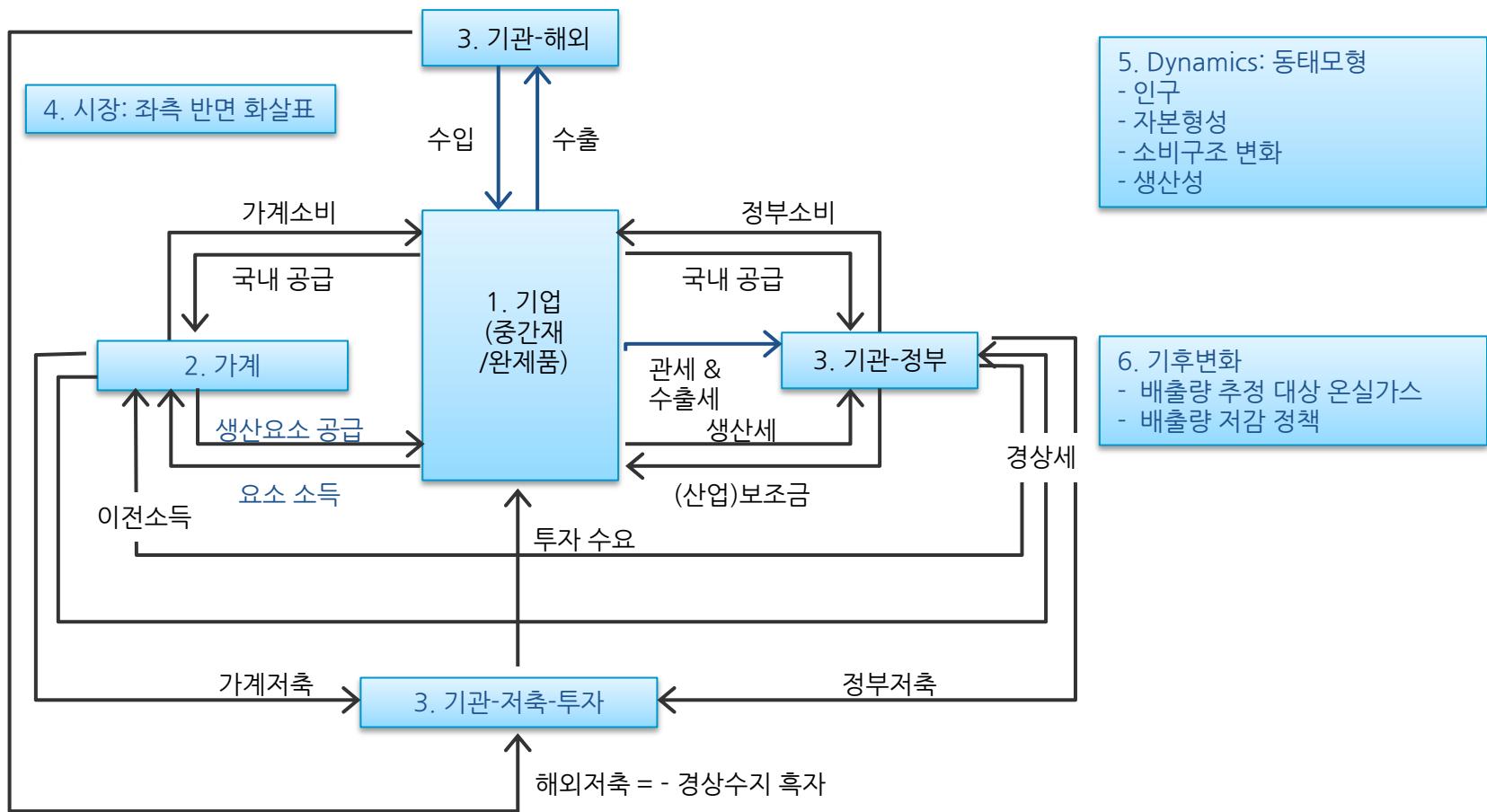
■ 산업구분

국가 온실가스 감축목표 부문		본 연구	비고	국가 온실가스 감축목표 부문		본 연구	비고
산업	전환부문	전환	전력	신설	산업	전자표시장치	전자표시장치
			도시가스	신설		반도체	반도체
			증기 및 온수	신설		자동차	자동차
	광업	정유	정유			에너지 비에너지	통합
			석탄제품	신설		조선	조선
		석탄	석탄			음식료품	음식료품
			원유	신설		기타제조업	기타제조업
			천연가스	신설		건설업	건설업
			기타광업				
		철강	철강				
	수송	시멘트	시멘트		수송	철도	
		석유화학	석유화학			도로	
		제지/목재	제지/목재			항공	
		섬유/가죽	섬유/가죽			해운	
		유리/요업	유리/요업			기타	
		비철금속	비철금속				
		기계			건물	가정	가정
						상업	상업
		전기/전자	에너지 비에너지	전기/전자		공공 기타	공공 기타
		농림어업	농림어업	농림어업			
		폐기물	폐기물	폐기물			
		자가용: 가계					

6-2) 하향식 모형 비교분석

나. 하향식 모듈 구축방안

■ 하향식 모형 구성 요소



6-2) 하향식 모형 비교분석

나. 하향식 모듈 구축방안

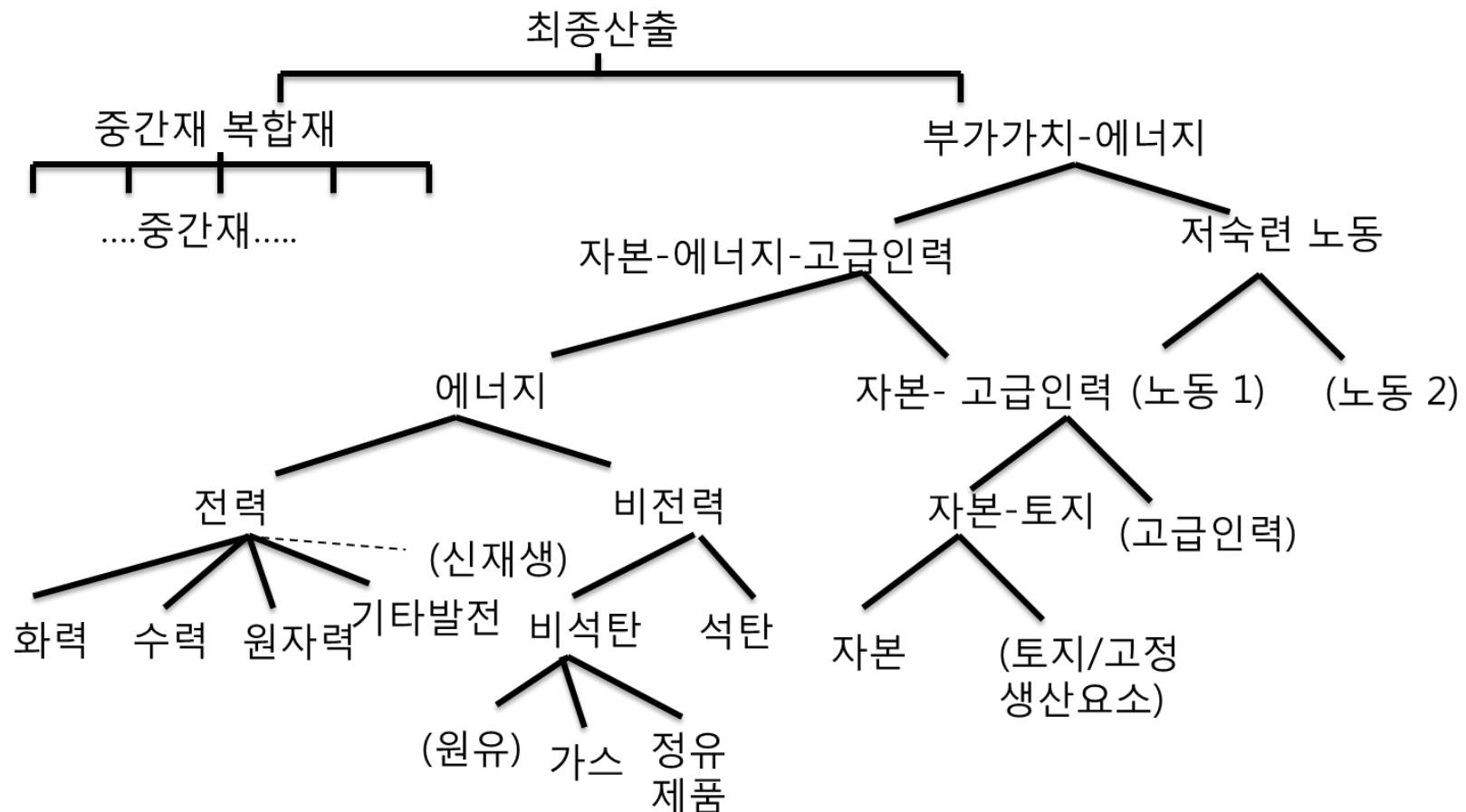
■ 하향식 모형 구축 방안 - 기업

- 모든 산업에 동일한 표준적 생산함수를 적용하여 산업분류를 유연하게 변경
- 생산함수의 Nesting structure: [(자본-에너지)-노동] 을 기본으로 에너지 복합재를 세분화
 - 에너지 복합재는 전력복합재- 비전력 복합재로 구성하고 비전력 복합재는 석탄과 비석탄 복합재로 구성하여 대체관계의 현실정합성을 강화
- 신기술의 선택은 상향식 모듈에서 선택한 결과를 수용하고, 하향식 모듈에서는 에너지 효율성 모수만을 반영
 - 신기술의 시장가격을 설정하기 어려운 하향식 모듈의 한계를 수용
 - 명시적으로 생산함수에 반영하기 어려운 기술진보를 연구개발자본(R&D Stock)'형태로 도입하는 방법에 대해 고민

6-2) 하향식 모형 비교분석

나. 하향식 모듈 구축방안

- 생산 함수의 구조



6-2) 하향식 모형 비교분석

나. 하향식 모듈 구축방안

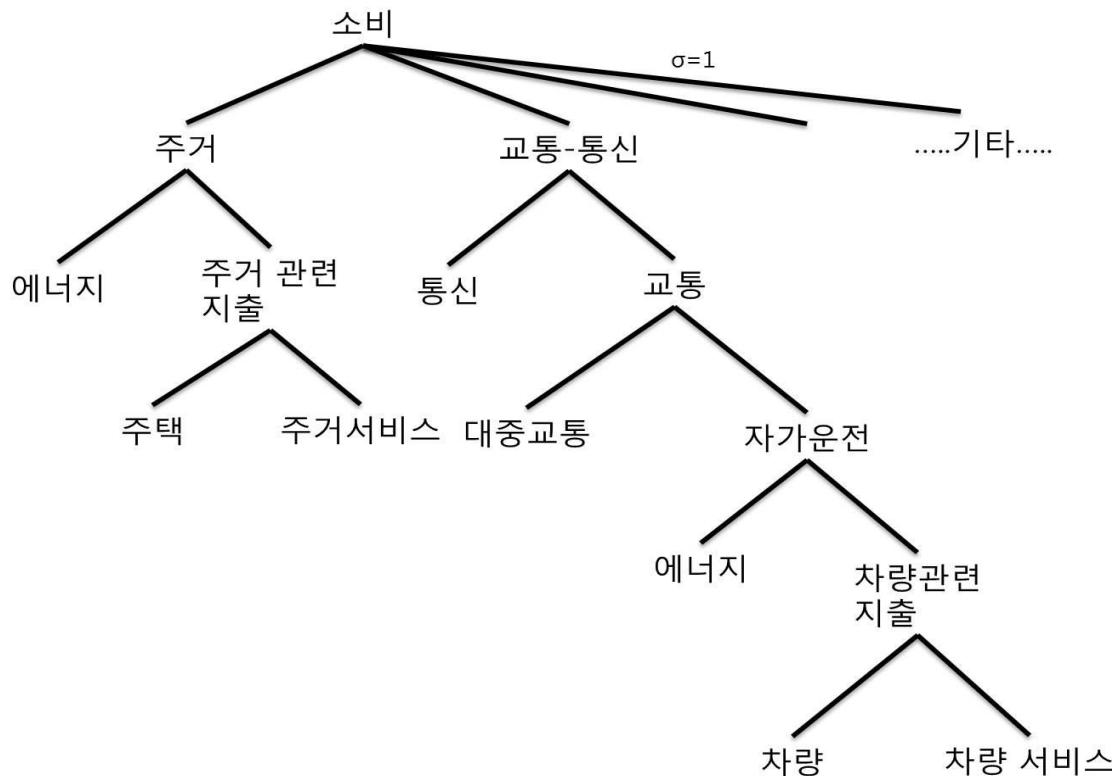
■ 하향식 모형 구축 방향 - 가계(2): 효용함수

- 효용함수: Nested CES 효용함수를 기본으로 사용
 - Stone-Geary 효용함수를 선택적으로 사용: 최저소비수준을 포함하여 소득 증가에 따른 소득탄력성의 변화를 모사(mimicking)
- 효용함수에는 주거 복합재와 교통-통신 복합재를 도입
 - 교통-통신 복합재는 수송부문의 자가운전, 주거 복합재는 건물부문 중 가정의 건물사용에 발생하는 온실가스 배출과 관련
 - 내구재의 구성을 반영할 수 있도록 내구재의 종류에 따라 교통-통신 복합재 및 주거 복합재를 분할하는 option을 부여하고 자료가 가용하면 사용
- 계층별 파급효과 분석을 위해서 복수 가계를 도입하는 옵션 부여
 - 가계의 소득, 인구 등 다양한 특성을 반영한 복수의 가계를 수식으로는 도입하고, 자료가 확보되면 가동

6-2) 하향식 모형 비교분석

나. 하향식 모듈 구축방안

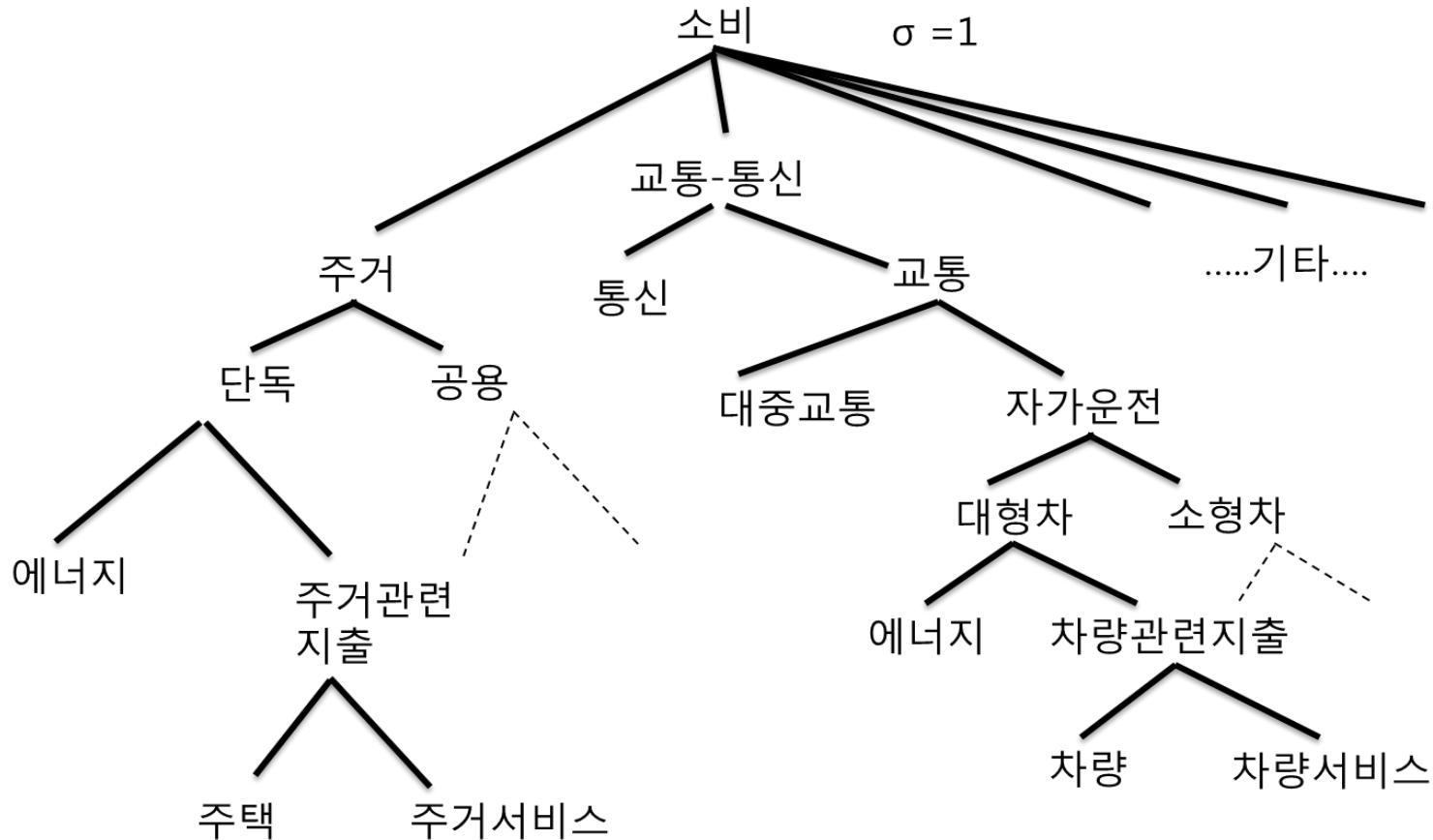
- 효용함수의 Nesting 구조 - 기본형



6-2) 하향식 모형 비교분석

나. 하향식 모듈 구축방안

- 효용함수의 Nesting 구조 - 내구재 구성 반영



6-2) 하향식 모형 비교분석

나. 하향식 모듈 구축방안

■ 하향식 모형 구축 방안: 기관- 정부, 해외, 저축-투자

- 해외: 수출용/내수용 생산을 구분하는 CET 함수를 선택적으로 사용하고 국제운송서비스 산업을 명시적으로 포함
 - CET를 사용하여 국내생산을 수출용과 내수용으로 구분하고 수출용만 국제시장에 공급하되, 국제적으로 상품의 동질성이 큰 재화에 대해서는 CET를 적용하지 않는 option 부여
 - Global 모형에는 국제운송서비스를 명시적으로 포함하여 제도만으로 설명할 수 없는 국제가격 차이를 반영
- 투자수요는 Tobin q 이론을 적용
 - Tobin q: 고정자본 대체비용이 기업 시장가치에 달하는 수준까지 산업별 투자
 - 산업별 투자수준에 따라 투자재에 대한 최종수요가 결정

■ 하향식 모형 구축 방안: 시장

- 생산물 시장: 완전경쟁을 가정하되 불완전 경쟁 분석 가능 version을 구축
 - 상향식 모듈과 연계하는 하향식 모듈은 완전경쟁 모형으로 구축하고, 1국 정태모형인 불완전경쟁 모형을 별도로 구축
- 자본시장 : Vintage는 선택적으로 사용
- 상향식 모듈과 연계하는 하향식 모듈은 자본 Vintage를 도입할 수 있는 option만 부여
- 노동시장 : 기술 수준에 따른 노동 분할 및 실업 분석 기능을 선택적으로 사용하는 option을 부여
- 토지시장: 각 산업별 토지 사용을 내생화(Endogenize)

6-2) 하향식 모형 비교분석

나. 하향식 모듈 구축방안

- **하향식 모형 구축 방향: 동태방정식(Dynamics), 기후변화**
 - 동태방정식에는 자본축적, 인구증가, 생산성의 변화, AEI의 변화를 반영
 - 자본은 국가 단위로 축적하고, 축적된 자본은 전 산업에서 사용 가능 가정
 - 저축 총량이 투자되어 총자본을 증가시키고, 증가된 총자본은 전 산업에서 사용 가능
 - 산업별로 자본을 축적하고, 개별 산업 축적 자본은 해당 산업에서만 사용하는 방식을 고민
 - 온실가스 배출량 : 국가 온실가스 인벤토리 포함 6개 온실가스 배출량 추정
 - 이산화탄소(CO_2) 메탄(CH_4) 아산화질소(N_2O), 과불화탄소(PFCs), 수소불화탄소(HFCs), 육불화황(SF_6) 배출량 추정 가능 부여
 - 배출권거래제-탄소세-배출규제를 분석할 수 있는 기능을 부여
- **단계별 목표: 주요 분석 대상 및 통합 정도 강화**
 - 하향식 모듈: 상향식 모듈과의 연계 및 감축정책의 경제적 파급효과 분석
 - 정책 파급효과 분석의 선행조건: 국가 온실가스 감축계획 전 부문 배출량 내생화
 - 주요 분석 대상 및 통합모듈과의 연계를 기준으로 연차별 목표 설정
 - 2년 차에 표준적 하향식 모듈을 구축하고 주요 분석 대상별로 해상도를 확대
 - 표준모형: 산업구분 최소화, 복합재 비도입 모형을 구축하여 통합 가능성 진단
 - 모형확장: 산업구분 확대, 복합재 도입, 통합 가능성 재진단
 - » 확장 순서: 전력, 산업, 농업 → 수송 → 건물 → 폐기물, 토지이용 순 확대
 - 5년 차에 Global 모형의 베타 Version을 구축하고 6년 차에 완성

6-2) 하향식 모형 비교분석

다. 하향식 모듈 구축 로드맵

- 하향식 모듈 구축 연차별 목표

구분	일반균형모형	통합모듈 연계	
		시범 분석	보완
2년차	표준모형 구축		
3년차	전력, 농업, 산업(공정 포함) 상세화	전력, 농업	
4년차	수송 상세화	수송	전력, 농업
5년차	Global 모형 베타/ 건물 상세화	건물, 산업	수송
6년차	Global 모형 완성/ 폐기물, 토지이용 상세화	폐기물, 토지이용	건물, 산업
7년차			폐기물, 토지이용

6. 연구개발 수행내용 및 결과

3) 탄력성 추정

- 가. 대표적 하향식모형 탄력성모수 비교분석 및 추정근거 파악
- 나. 민감도분석과 탄력성모수 개발우선순위 선정
- 다. 자료수집 장기계획 수립

6-3) 탄력성 추정

가. 대표적 하향식 모형 탄력성 모수 추정 근거 파악

- 대표적 하향식모형 (EPPA, GTAP, ENV-Linkage) 탄력성모수 추정 근거파악

- 생산함수: 에너지 재화의 대체탄력성은 Translog 함수를 이용하여 추정하고, 가격탄력성은 시계열 분석을 통해서 도출
 - EPPA, ENV-Linkage는 에너지 재화 대체탄력성을 Translog 함수를 이용해 추정
 - EPPA의 가격탄력성은 AR(1), GTAP의 에너지재화 가격탄력성은 ECM 사용
- 수요함수: 수요를 소득 및 가격의 축약형 함수로 표현한 추정식을 이용
 - EPPA: 평균 대체탄력성 및 소비비중을 소득의 함수로 표현하고 Weighted OLS 추정
 - GTAP: Florida model을 적용한 추정식을 MLE로 추정하여 소득탄력성 추정
 - Env-Linkage: 확대된 선형지출함수(ELES) 추정식을 OLS, Weighted OLS 추정하여 한계소비성향 추정
- Armington 탄력성: CES 함수를 이용하여 추정식을 도출하고 회귀분석(GTAP)

6-3) 탄력성 추정

나. 민감도분석과 탄력성 모수 개발우선순위 선정

■ 민감도분석 및 개발우선순위 파악: 결과

- 소규모 정태모형을 활용하여 민감도 분석을 수행하고 탄력성 모수의 개발 우선순위를 점검
 - 모형: 37개 산업, 7단계 nesting 생산함수를 가진 CGE 모형에 2010년 자료 적용
 - 확률분포에서 탄력성 모수값을 임의로 추출하여 모형분석결과를 얻는 과정을 1,500번 반복하고 관측값의 변화에 모수값의 변화가 주는 영향을 회귀분석 수행
 - 분석결과: 총 116개 탄력성 모수 중 37개만이 10% 유의수준에서 모형결과에 유의한 영향을 미침
 - 시사점: 모형분석결과에 유의한 영향을 미치는 일부 탄력성모수에 대해서만 통계자료 구축과 계량경제학적 추정의 엄밀한 개발과정을 우선적으로 적용

6-3) 탄력성 추정

다. 자료수집 장기계획 수집

- 자료수집 장기계획 수립(1): 추정 시 필요 자료 파악

- 주요 탄력성 추정 시 필요한 자료 목록 도출

부문	범주	탄력성 이름	추정에 필요한 자료
생산	에너지	에너지원 간 대체탄력성	산업부문의 에너지 소비 시계열 자료 (에너지원별 소비량, 단위가격)
		에너지원 간 대체탄력성	에너지, 전력, 농업, 기타 산업부문으로 부문분류 필요
		화석에너지 공급탄력성	에너지원별 세계 거래 시계열 자료 (생산량, 실질가격, 기대실질가격, 실질 GDP)
		에너지복합재- 본원적 생산요소 간 대체탄력성	산업부문별 노동투입, 자본투입, 중간재 시계열 자료
	비에너지	에너지복합재- 본원적 생산요소 -천연자원-토지 간 대체탄력성	Leontief 합수 가정으로 0의 값이 설정됨
		중간재 간 대체탄력성	
아밍تون 무역탄력성		국내재-수입재 간 대체탄력성	국가별, 재화별 구분된 수입 시계열 자료
		수입재-수입재 간 대체탄력성	
최종 수요	에너지	수치 가정, Calibration	
	비에너지	모형별로 각기 다른 효용함수 설정	GTAP모형의 경우 GTAP DB 필요

6-3) 탄력성 추정

다. 자료수집 장기계획 수집

- 자료수집 장기계획 수립(2):수집 가능 자료 파악
 - 국내외 가용한 자료 파악: (예) 에너지 관련 탄력성

탄력성 이름	필요자료
에너지원 간 대체탄력성	산업부문별 세분화된 에너지원별 시계열자료(소비량, 단위가격)
에너지복합재-본원적 생산요소간 대체탄력성	
화석에너지 공급탄력성	에너지원별 세계 시계열자료(소비량, 단위가격, 기대가격, 실질GDP)

통계명	통계 종류	수록항목	수록기간(년)	분류 및 항목 (업종, 에너지원)	단위	관련 필요 통계자료
에너지관리공단 에너지사용및온실가스 배출실태조사 (National Energy Consumption & GHG Emission Survey)	일반 조사 (표본)	○ 산업부문: 광업별/에너지원별 소비량 현황	2004~2007 (1년주기)	광업 3부문 에너지원 5종류	TOE	에너지원별 소비량 시계열자료
			2010~2011 (1년주기)	광업 4부문 에너지원 25종류		
		○ 산업부문: 업종별/에너지원별 소비량 현황	2004~2007 (1년주기)	생산부문 23부문 에너지원 5종류		
			2010~2011 (1년주기)	생산부문 42부문 에너지원 24종류		

6-3) 탄력성 추정

다. 자료수집 장기계획 수집

- 자료수집 장기계획 수립(3): 가용 자료가 미비한 경우 유형화 및 대응책 정리
 - 가용한 자료로 추정이 어려운 경우: 짧은 시계열, 조악한 분류, 자료의 미비
 - 시계열이 짧거나 자료 조사 시점이 간극이 커서 연간 탄력성 추정이 어려움
 - 부문 분류가 불충분하여 본 연구의 산업분류에 적합한 탄력성 추정이 어려움
 - 해당 자료가 존재하지 않음
 - 대응책: 보간(extrapolation), 보정(Calibration), 인용, 실사

문제유형	대상	대응책
짧은 시계열	가계최종수요에서 운송부문 수요: '통계청 가계동향조사' 2003~2004년 시계열자료	보간(Extrapolation)
조악한 분류	에너지원별 통계자료: 한국전력통계(9내지 18부문), 한국가스공사 도입판매통계(5부문) 노동투입 통계자료: 통계청 경제활동인구조사(기간에 따라 6내지 21부문 분류) 자본투입 통계자료: 한국은행 국민대차대조표(생산부문의 30개 부문분류)	상위 분류 모수 값 대체/ 상위 분류 모수 기준 보정 (Calibration)
자료 미비	자본투입 추계: 자본재 형태별 감가상각률, 폐기율, 단위가격	관련 문헌 모수 값 대체 / 관련 문헌 모수 기준 보정 (Calibration)

6-3) 탄력성 추정

다. 자료수집 장기계획 수집

■ 자료수집 장기계획 수립(4): 자료 부족 시 대응책 제시

- 보간(extrapolation), 보정(Calibration), 인용, 실사: 자료 부족 극복
 - 실사: DB 관리기관의 내부자료 파악 및 요청
 - 시계열이 충분하지 않은 경우: 보간 (extrapolation)
 - 부문 분류가 불충분: 상위분류와 동일한 모수 값을 적용하거나 보정(Calibration)
 - 상위 총합분류에 대해 추정 후 하부 부문에 대해서는 동일한 모수 추정값 가정
 - 상위 총합분류의 추정값을 목표값(target)으로 하여 하부 부문에 대해서는 보정작업 수행
 - 자료가 없는 경우: 관련 문헌 인용 및 유관 자료를 이용하여 도출
 - 해외문헌의 수치를 인용하거나 이를 목표값으로 하는 보정작업 수행
 - 관련문헌 인용 예: 자본재 형태별 감가상각률과 폐기율: 표학길(2003), 김대진(2014)

감사합니다!

(ygkim@kei.re.kr)