

수소생산 경로의 평가: 피드백 효과 모델

김 성호^{1)*}, 김 태운²⁾

A feedback effect assessment of the routes to hydrogen

Seong Ho Kim*, Taewoon Kim, Kilyoo Kim

Key words : hydrogen production(수소 생산원), feedback model(되먹임 모델), MCDM(다중기준 의사결정), ANP(해석적 망형 과정), interdependency(상호의존성)

Abstract

현재의 화석연료-기반 사회에서는 지구 온난화와 고유가 추세가 야기하는 경제적 피해, 에너지 안보 우려, 세계 평화 위협 등에 자주 노출되고 있는 실정이다. 세계 각국은 이러한 화석연료 에너지원을 대체하는 환경-청정하고 기술-신뢰할 수 있으며 경제-감당할 수 있는 에너지 공급원인 수소를 기반으로 하는 미래의 수소-기반 사회로의 진입에 노력하고 있다. 특히, 청정한 에너지 운반체인 수소의 생산 기술 상업화가 더욱 더 절실히 요구되고 있다. 이 예비 연구에서는 이산화탄소 포획/저장 기술과 결합된 다양한 수소 생산 기술의 정량적인 예비 비교 평가가 수행되었다. 예비적인 비교 평가 기준으로 1) 이산화탄소 배출량; 2) 에너지 이용률; 3) 토지 점유율; 4) 수소 생산 비용 등이 고려되었다. 이러한 기준에 따라 수소 생산 기술 가운데 네 가지 예비 기술 대안인 1) 원자력; 2) LNG; 3) 석탄; 4) 태양광 등이 비교되었다. 대안 기술의 비교 평가 체제로 계층 망형 구조-기반 되먹임 모델이 개발되었다. 이러한 수소 생산 기술의 우선순위 선정 결과는 개별 대안 기술의 상대적인 장단점 및 기술적인 갭을 정량적으로 인식하는 데에 활용될 수 있다. 그러므로 이 예비 연구는 수소 생산 기술 연구자나 수소 경제 기획자한테 뿐만 아니라 이산화탄소 포획/저장 기술 개발자한테 도움이 되리라 본다.

1. 서론

환경-청정하고 경제적인 에너지 운반체인 수소에 바탕을 둔 수소 경제의 실현이 현재의 지구 온난화 문제 및 에너지 불안정을 해결하는 기술적 대안이라고 여겨서 여러 선진국은 연구개발에 꾸준한 투자를 하고 있다. 수소 경제에서는 대규모의 경제적인 수소 생산 기술이 요구된다. 이러한 수소 생산 기술은 여러 문헌에서 검토되고 있다¹⁾⁻⁶⁾. 교토의정서 의무국에서는 수소 생산만을 위한 개별 기술이외에도 교토의정서에 따른 이산화탄소 감축 의무 목표치를 달성하기 위하여 탄소 포획 기술과 융합된 수소 생산 통합기술도 연구 개발되고 있다. 이렇게 제안되고 있는 다양한 수소 생산 기술은 경제적, 기술적, 환경적인 차원의 장단점을 보이고 있으므로, 최적화된 수소 생산 기술의 선정 문제는 다중기준 의사결정(Multicriteria Decision-making; MCDM) 문제로

다뤄질 수 있다. 여기서는 수소 생산 기술의 기존 연구가 검토되고, 예비 정량화 작업으로 간략한 되먹임 모델-기반 생산 기술의 선정 평가 기술이 제시되며, 사례 연구로 4 가지 기준에 따른 4 가지 수소 생산 경로가 정량화된다.

2. 수소 생산 기술

여기서는 기존 연구의 현황이 검토되고, 현 연구의 특성이 서술된다.

2.1 기존 연구 현황

Midilli *et al.* (2004)^{1), 2)}에서는 청정 에너지 매개체인 수소의 에너지 부문에서의 역할 및 전략 등이 논의되고 있다. 전편에서는 수소 에너지

1)-2)한국원자력연구소

(* Corresponding Author: shokim@kaeri.re.kr)

지의 기술 및 시스템, 다른 에너지와의 비교 등이 서술되고 있다. 특히, 지속가능 에너지 시스템의 실현에서 수소의 중요성이 강조되고 있다¹⁾. 후편에서는 지구상에 한정된 화석 연료가 세계 평화 및 세계 불안에 미치는 영향이 논의되고 있다. 비화석 연료-유래 수소 생산의 비용이 증가한다면 세계 에너지 갈등의 가능성이 감소할 것이라는 견해를 밝히고 있다²⁾. 여기서 우리는 수소 에너지의 파급 효과를 파악하여, 국내적으로는 국가 에너지 공급 안정성의 성취, 국외적으로는 세계적인 불안 감소에 기여할 수 있는 우리나라 수소 경제의 조기 실현 등을 유도하는 데에 도움을 얻을 수 있다.

Kothari *et al.* (2004)³⁾에서는 다양한 수소 생산 방법 및 각 수소 생산 기술에 필요한 자원 및 에너지원 등이 논의되고 있다. 이러한 수소 생산 공정에서는 기존 산업계 공정 및 신규 공정 모두가 포함되고 있으며, 비기술적인 측면도 부분적으로 서술되고 있다. 더불어 비화석 연료를 이용한 수소 생산도 비교되고 있다. 이러한 리뷰 작업에 인용된 방대한 참고문헌은 수소 생산 방법에 대한 충분한 정보를 제공하고 있다. 앞으로 도래할 수소 경제 시대 진입에 필수적인 수소 생산 부문 기술이 잘 정리되어 있으므로 수소 생산 기술의 대안을 파악하는 데 활용될 수 있다.

Ewan and Allen (2005)⁴⁾에서는 수소 생산 기술은 14 가지 대안이 고려되었다. 비교 기준은 (1) 이산화탄소 배출량; (2) 에너지 이용률; (3) 토지 점유율; (4) 수소 생산 비용 등의 4 가지가 선정되었다. 이러한 의사결정 요소들이 성능계수(FOM; Figures-of-Merit) 기법으로 비교되어 최적 수소 생산 경로가 파악된다.

Damen *et al.* (2006)⁵⁾에서는 상업규모의 단기 시점(현재-2010년)내 운용 가능하거나 장기 시점(2011-2030년)내에 시장 진입이 예상되는 이산화탄소 포획/저장 기술과 융합된 전기 생산 기술 및 수소 생산 기술의 기술-경제적인 비교 평가가 소개되고 있다. 고려된 비교 평가 기준은 전환 효율, 에너지 생산 비용, 이산화탄소 절감 비용 등이다. 이러한 비교를 통해 기술 대안 가운데 잠재성 있는 기술 옵션이 파악될 수 있으며, 취약점 및 기술적인 갭을 인식하는 연구 개발의 우선순위 선정에 활용될 수 있다.

Riis *et al.* (2006)⁶⁾에서는 IEA의 연구 개발 협력 프로그램인 수소 이행 협약(HIA)이 주관한 수소 생산/저장 연구 개발 활동에서 우선순위 및 필요성이 보고되고 있다. 두 부분 가운데 첫 부분에서는 수소 생산 기술이 소개되었다. 수소 생산 기술별로 R&D 활동의 필요 분야가 지적되며, 권고사항이 제시되고 있다. 마지막 부분에서는 수

소 저장 대안이 소개되었다. 수소 저장 기술별로 기술적 사안 및 장단점 등이 논의되며, 기술적 갭을 파악하여 권고사항이 제시되고 있다. 특히, IEA 회원국 간의 수소 생산 기술 및 저장 기술의 연구 개발 문제점 및 향후 활동에 대한 권고사항은 우리에게도 매우 유익하다고 볼 수 있다.

2.2 현 연구의 특성

예비적인 연구 단계로서 여기서 연구의 주요 목적은 (1) 정량화 골격의 기초를 개발하며; (2) 상호의존성을 고려한 모델의 기반을 마련하려는 것이다. 이러한 목적으로 상호의존성 정도가 가장 간단한 되먹임 모델이 구축되었다.

최적 수소 생산을 위한 에너지원 결정이 비교 목표로 선택되었다. 예비 기술 대안으로는 (1) 원자력; (2) LNG(즉, 증기 메탄 개질 + 탄소포획; SMR + C); (3) 석탄; (4) 태양광 등이 선정되었다. 예비 평가 기준으로는 (1) 이산화탄소 발생량; (2) 에너지 생산 한계; (3) 토지 점유; (4) 수소 생산 비용 등이 고려되었다. 정량화 단계에서는 Ewan and Allen (2005)⁴⁾에서 사용된 생산 경로별 평가치가 사용되었으며, 평가 기준의 가중치는 평가자의 주관적 견해가 쌍대 비교 기법⁷⁾을 통한 설문 조사에 의해 추출되었다. 더욱이 대안 특성이 평가 기준에 미치는 영향의 정도를 나타내는 되먹임 효과의 가중치는 설문 조사를 통해 얻어진 평가자의 주관적 증거에 바탕을 두고 있다. 되먹임 효과에 따른 상호의존성이 반영된 이러한 가중치 및 평가치는 상위행렬 기법^{8), 9)}에 의해 얻어진 정상상태 해인 수렴값으로 표시된다. 이러한 수렴값이 바로 대안들의 전체 점수 및 평가 기준의 가중치 등으로 사용된다.

3. 수소 생산원의 정량적 비교

계층 망형(hierarchical network 또는 hiernet) 구조로 된 되먹임 모델의 모델링 절차는 다음과 같이 5 단계로 구분될 수 있다: (1) 다중 의사결정 문제의 구조화 단계; (2) 전문가 견해 추출 단계; (3) 초기 상위행렬의 구성 단계; (4) 극한 상위행렬 구성 단계; (5) 결과의 해석 단계.

3.1 문제의 구조화 단계

설문조사 단계에서 조사의 단순화를 고려하여 4개의 대안이 선정되었다. Fig. 1에 되먹임 모델의 계층 망형 구조가 제시되었다.

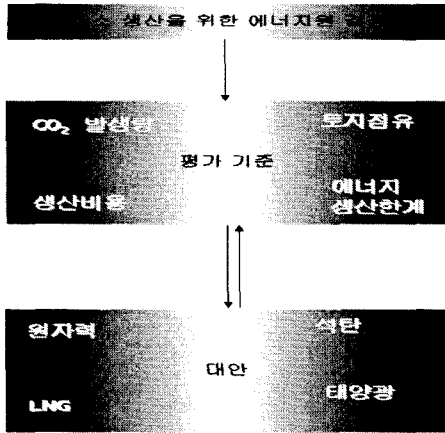


Fig. 1 A Hiernet Structure for a Feedback Model

3.2 주관적 견해 추출 단계

평가자의 주관적 견해는 비율척도인 9점 척도를 사용하는 상대 비교 기법을 통한 설문 조사에 의해 추출되었다. 사용된 설문 조사 유형은 두 가지로 구분된다: (1) 평가 기준 중요도 설문; (2) 영향도 설문. 구체적으로 사용된 설문의 예가 Fig. 2에 주어졌다. 이렇게 추출된 척도값은 상대 비교 행렬에 사용되며, 일관성 점검에 적용된 일관성 비율로는 0.1이 사용되었다. 즉, 이 비율이 0.1 보다 작으면 피설문자는 일관성을 가지고 응답하였다고 보고 포함시키며, 아닌 경우에는 이 피설문자에게 재응답을 받거나 이 피설문자는 제외시키게 된다.

A-1. 수소 생산을 에너지원을 비교하는 경우에, 기준 A와 기준 B 중 어느 평가 기준이 덜 중요하십니까?

기준 A	기준 AB 동일하게 중요									기준 B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
CO ₂ 발생량										에너지 생산한계
CO ₂ 발생량										토지 점유
에너지 생산한계										수소 생산비용
에너지 생산한계										토지 점유
토지 점유										수소 생산비용

B-4. 핵발전의 특성이, 기준 A와 기준 B 중 어느 것에 알맞음을 더 영향을 미친다고 생각하십니까?

기준 A	기준 AB 동일하게 중요									기준 B
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
CO ₂ 발생량										에너지 생산한계
CO ₂ 발생량										토지 점유
에너지 생산한계										수소 생산비용
에너지 생산한계										토지 점유
토지 점유										수소 생산비용

Fig. 2 Examples of two types of questions for a questionnaire

Table 1에는 일관성 점검을 거친 후 작성된 상대 비교 행렬들이 제시되었다. 이러한 행렬들은 각 평가자별 상대 비교 행렬이 기하평균을 통해 평균화되어 얻어진다.

Table 2에는 각 평가 기준에 대한 대안별 평가치가 정규화되어 주어졌다.

Table 1 Averaged pairwise comparison matrices

수소생산	CO2발생량	이용한계	토지점유	생산비용
CO2발생량	1	1.5	5.91608	4.47214
에너지 이용한계	0.66667	1	1.63299	1.18922
토지점유	0.16803	0.61297	1	0.40825
생산비용	0.22361	0.84515	2.44949	1

원자력	CO2발생량	이용한계	토지점유	생산비용
CO2발생량	1	0.65465	0.33333	0.40825
에너지 이용한계	1.52753	1	1	1
토지점유	3	1	1	1
생산비용	2.44949	1	1	1

석탄	CO2발생량	이용한계	토지점유	생산비용
CO2발생량	1	7.34847	8	4.24264
에너지 이용한계	0.13608	1	1.22474	0.25
토지점유	0.125	0.81650	1	0.29570
생산비용	0.23570	4	4.24264	1

태양광	CO2발생량	이용한계	토지점유	생산비용
CO2발생량	1	0.86603	0.93541	0.28868
에너지 이용한계	1.15470	1	1.41421	0.65465
토지점유	1.06904	0.70711	1	0.61297
생산비용	3.46410	1.52753	1.63299	1

SMR+C	CO2발생량	이용한계	토지점유	생산비용
CO2발생량	1	0.70711	0.33333	0.70711
에너지 이용한계	1.41421	1	0.89443	1.29099
토지점유	3	1.11803	1	2.44949
생산비용	1.41421	0.77460	0.40825	1

Table 2 Normalized valuation for each alternative

	CO2발생량	이용한계	토지점유	생산비용
원자력	0.33642	0.27907	0.19604	0.37386
SMR+C	0.40577	0.27907	0.44708	0.30147
석탄	0.66977	0.27907	0.34700	0.29291
태양광	0.18804	0.16279	0.00988	0.03176

3.3 상위행렬 구성 단계

상대 비교 행렬에서 고유 벡터 기법으로 구해진 가중치 및 정규화 평가치 등을 각각 상위행렬의 해당 블록인 목표-평가 기준 블록, 평가기준-대안 블록, 대안-평가 기준 블록 등에 기입하면 초기 상위행렬이 작성된다. Table 3에 되먹임 모델의 초기 상위행렬이 제시되었다.

Table 3 An initial supermatrix

목표	에너지원 선정	CO ₂ 발생량	생산한계	토지점유	생산비용	원자력	LNG	석탄	태양광
에너지원 선정	0	0	0	0	0	0	0	0	0
평가 기준	CO ₂ 발생량	3.5182	0	0	0	0.1303	0.1488	0.6407	0.154
	에너지 생산한계	3.221	0	0	0	0.2642	0.2356	0.0711	3.2372
	토지점유	3.0526	0	0	0	0.3175	0.3361	0.082	3.1329
	생산비용	3.1582	0	0	0	0.2939	0.1385	0.2262	3.4259
대안	원자력	0	0.33642	0.27907	0.19604	0.37386	0	0	0
	LNG	0	0.40577	0.27907	0.44708	0.30147	0	0	0
	석탄	0	0.66977	0.27907	0.347	0.29291	0	0	0
	태양광	0	0.18804	0.16279	0.00988	0.03176	0	0	0

이러한 초기 상위행렬에서부터 상위행렬 기법의 극한 계산을 통해 정상 상태의 해인 극한 상위행렬이 구해진다. Table 4에 되먹임 모델의 정상 상태의 해가 정리되었다.

Table 4 A steady state solution

	의사결정 요소	최종 점수	우선 순위
기준 클러스터	이산화탄소 발생량	0.26544	2
	에너지 생산한계	0.21476	4
	토지점유	0.26977	1
	생산비용	0.25003	3
대안 클러스터	원자력	0.29560	2
	LNG	0.36362	1
	석탄	0.24530	3
	태양광	0.09548	4

3.4 결과의 해석 단계

설문조사에 참여한 평가자의 주관적 견해에 따르면, 기준 클러스터의 가중치에서 중요도는 먼저 토지 점유, 다음에 이산화탄소 발생량, 생산 비용, 그리고 마지막으로 에너지 생산한계의 순으로 나타났다. 이러한 경우, 각 수소 생산 경로의 종합 선호도는 LNG 에너지원이 가장 선호적이며, 원자력, 석탄, 태양광 에너지 순으로 선호됨을 알 수 있었다.

4. 결론

수소 생산 경로 가운데 생산 에너지원의 종합 선호도를 파악하기 위해 MCDM 문제의 정량화 기법의 하나로 되먹임 모델-기반 종합적 비교평가 골격이 구축되었다. 이 되먹임 모델은 의사결정 요소간의 독립성 대신에 보다 현실적인 상호작용 현상의 가장 간단한 되먹임 효과를 다룰 수 있도록 해준다. 이 예비 연구에서는 원자력, LNG, 석탄, 태양광 수소 생산 에너지원들과 이산화탄소 발생량, 에너지 생산한계, 토지 점유, 생산 비용 등의 되먹임 효과라는 상호작용 현상이 모델링되었다. 향후에는 조금 더 복잡한 상호작용 현상을 포함하도록 구축된 골격을 확장시킬 것이며, 폭넓은 대안, 세부기준들이 포함된 연구가 수행되기를 기대해 본다.

References

- [1] Midilli, A. et al., 2004, "On hydrogen and hydrogen energy strategies I: Current status and needs," Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 9 (3), pp. 255-271.
- [2] Midilli, A. et al., 2004, "On hydrogen and

- hydrogen energy strategies II: Future projections affecting global stability and unrest," Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 9 (3), pp. 273-287.
- [3] Kothari, R., Buddhi, D., and Sawhney, R.L., 2004, "Sources and technology for hydrogen production: a review," Int. J. of Global Energy Issues, Vol. 21 (1-2), pp.154-178.
- [4] Ewan, B.C.R. and Allen, R.W.K., July 2005, "A figure of merit assessment of the routes to hydrogen," Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 30 (8), pp. 809-819.
- [5] Damen, K., van Troost, M., Faaij, A., and Turkenburg, W., Jan. 2006, "A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO₂ capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 32 (2), pp. 215-246.
- [6] Riis, T. et al., Jan. 2006, "Hydrogen Production and Storage- R&D Priorities and Gaps," IEA.
- [7] Saaty, T.L. 1980, "The analytic hierarchy process," McGraw-Hill, New York.
- [8] Saaty, T.L. 1996, "Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process," First ed., RWS Publications, Pittsburgh, USA.
- [9] Promentilla, M.A.B. et al., Jan. 2006, "Evaluation of remedial countermeasures using the analytic network process," Waste Management, On-line version.