

VHTR Construction Ripple Effect Analysis Using Inter-Industry Tables

Tae-Hoon Lee[†] · Ki-Young Lee

VHTR Technology Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute

산업연관분석을 통한 초고온가스로 건설 파급효과 분석

이태훈[†] · 이기영

한국원자력연구원 VHTR기술개발부

The VHTR (Very High Temperature gas-cooled nuclear Reactor) has been considered as a major heat source and the most safe generation IV type reactor for mass hydrogen production to prepare for the hydrogen economy era. The VHTR satisfies goals for the GIF (Generation IV International Forum) policy such as sustainability, economics, reliability and proliferation resistance and physical protection, and safety. As a part of a VHTR economic analysis, we have studied the VHTR construction cost and operation and maintenance cost. However, it is somewhat difficult to expect the ripple effect on the whole industry due to the lack of information about Inter-industries relationship. In many case, the ripple effect are based on experts' knowledge or uncertain qualitative assumptions. As a result, we propose quantitative analysis techniques for ripple effects such as the production inducement effect, added value inducement effect, and employment inducement effect for VHTR 600MWt×4 modules construction and operation ripple effect based on NOAK (Nth Of A Kind). Because inducement effect values have been published annually, we predict inducement effect's relation function and estimated values including production inducement effect value, added value inducement effect value, and employment inducement effect value using time series and estimated values are verified with published inducement effects' value. This paper presents a new method for the ripple effect and preliminary ripple effect consequence using a time series analysis and inter-industry table. This ripple effect analysis techniques can be applied to effect expectation analysis as well as other type reactor's ripple effect analysis including VHTR for process heat.

Keywords : Nuclear Hydrogen, Very High Temperature Gas-Cooled Nuclear Reactor (VHTR), Ripple Effect Analysis, Time Series, Inter-industry Table

1. 서론

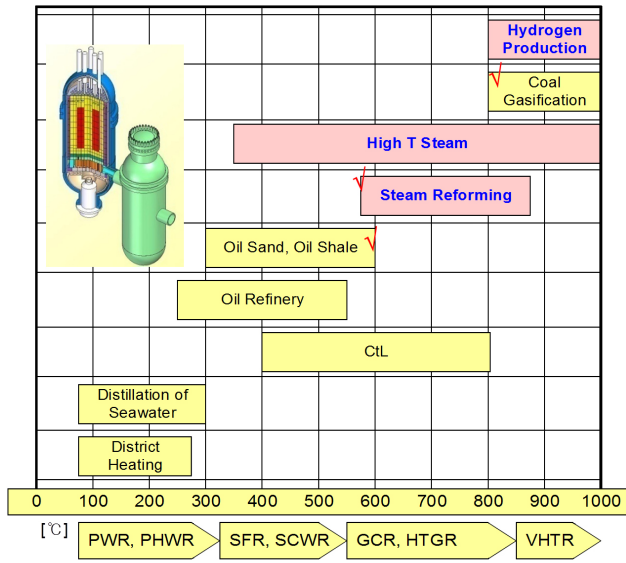
최근 온실가스 규제 강화 및 화석연료 고갈, 개발도상국의 에너지 수요 증가로 인해 에너지 자원의 가격 변동이 커지고 있으며, 국내외에서 친환경적인 에너지의 필요성이 어느 때보다 강조되고 있다. 이에 미래 수소 경제

시대를 이끌 핵심 요소인 청정 수소를 안전하고 경제적인 방법으로 대량생산 할 수 있는 초고온가스로를 이용한 수소생산기술이 주목을 받고 있다.

초고온가스로(VHTR)는 세라믹 입자 핵연료를 사용하고 흑연을 감속재, 헬륨을 냉각재로 사용하는 제 4세대 원자로중 하나이다. 700도 이상의 열을 안전하게 발생시켜 높은 효율의 전력생산, 공정열 및 SI 열화학 공정을 이용한 수소생산에 이르기까지 <Figure 1>과 같은 다양한 분야에서 활용이 가능하다.

Received 3 September 2015; Finally Revised 19 October 2015;
Accepted 17 November 2015

[†] Corresponding Author : leeth@kaeri.re.kr



<Figure 1> VHTR Application Area

초고온가스로를 연구하는 과정에서 초고온가스로를 이용하여 수소 생산시에 경제적 분석에 대한 평가가 수행되었고, 초고온가스로를 이용하여 산업 공정열을 공급할 때의 경제성분석이 진행되고 있다. 이때 경제성 분석은 미국 NGNP, 남아공 PBMR, 미 GT-MHR, 에너지경제연구원의 원자력을 이용한 수소 제조 비용 추정 보고서 등 국내외 신뢰성 있는 자료를 바탕으로 국내 상황을 반영하였으며, 주로 초고온가스로의 건설을 통한 손익과 수소생산 비용 산정을 중심으로 이루어졌다. 경제적 평가에 대한 연구는 다수 이루어졌으나, 해당 건설 및 프로젝트의 경제적 우위에 대한 평가가 주를 이루었으며, 건설 및 프로젝트 완료 후 산업진반에 대한 영향평가는 부족하다[1, 3, 5, 7, 8]. 하지만 정책 입안자들이 궁금해 하는 사항중의 하나는 원자로를 건설할 경우 산업 진반에 경제적으로 어느 정도의 과급 효과를 가져 올 수 있을까 하는 문제이다. 이 경우 시장수요 접근법, 연평균 성장률 접근법을 적용한 사례가 있으나, 시장이 형성되지 않은 사회 공공시설

에 적용은 어렵다[4].

이에 600MWth×4 module, NOAK(Nth Of A Kind) 기준으로 초고온 가스로 건설시 과급 효과 분석을 시계열을 연계한 산업연관표 분석을 적용하여 과급 효과 분석을 수행하였다. 본 논문에서는 산업연관표를 활용한 분석 방법을 제시하고 향후 산업 연관 지수를 예측 결과와 초고온가스로의 건설과 운영에 따른 생산유발, 부가가치유발 및 취업유발에 대한 예비 결과를 제시하고자 한다.

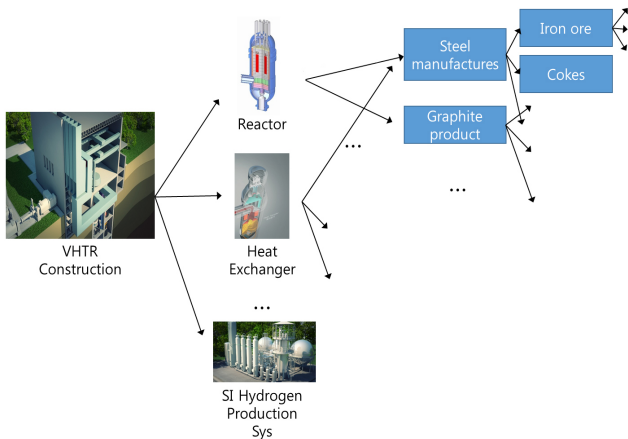
2. 과급효과 분석

2.1 산업연관표

한 국가 경제에서 각 산업들은 생산활동을 위해 상호간에 재화와 서비스를 구입·판매하는 과정을 통해 직접 또는 간접적으로 서로 관계를 맺게 된다. 산업연관표는 보통 1년을 단위로 일정기간 동안의 산업간 거래관계를 일정한 원칙에 따라 행렬형식으로 기록한 통계표이다. 이러한 산업연관표를 이용하여 산업간 상호의존관계를 수량적으로 분석하는 것을 산업연관분석(inter-industry analysis) 또는 투입산출분석(input-output analysis)이라 한다[16]. 예를 들어 원자로를 건설하기 위해서는 증기발생기, 중간열교환기를 포함하여 작은 나사에 이르기 까지 수많은 부품이 필요하고 그 증기발생기, 열교환기, 나사 등의 생산에는 다시 철강, 고무, 세라믹 등의 원재료가 투입되어야 한다. 산업상호간의 관계는 그물과 같이 서로 유기적으로 얽혀 있다. 그물의 어느 한쪽을 잡아당기면 그물의 울 하나하나를 통해 그 힘이 전체에 미쳐 순간적으로 출렁이게 된다. 경제활동도 이와 마찬가지로 여서 어느 한 산업에서 생긴 변화는 크든 작든 여러 다른 산업에 그 영향을 미친다. 이와 같이 원자로 건설에 따른 산업간의 과급과정을 도식화하면 <Figure 2>와 같이 단계적 구조를 가진다.

<Table 1> VHTR Plant 4SI(2,400 MWth) Annual Investment Plan

Items	Design(Million Won)				Construction(Million Won)			Total	
	1	2	3	4	5	6	7		
Share Ratio(%)	1.5	4.0	4.0	2.0	18.0	24.0	24.0	100.0	
Constant Expense	Business Expense	49,667	132,445	132,445	66,222	811,224	1,059,558	1,059,558	3,311,120
	Construction Interest	-	-	-	-	5,960	43,707	133,107	182,774
	Total	49,667	132,445	132,445	66,222	817,184	1,103,265	1,192,665	3,493,894
Current Expense	Business Expense	61,084	162,890	162,890	81,445	997,702	1,303,120	1,303,120	4,072,251
	Construction Interest	-	-	-	-	7,330	53,754	163,705	224,788
	Total	61,084	162,890	162,890	81,445	1,005,032	1,356,874	1,466,825	4,297,039



<Figure 2> Production Relation Process

산업연관분석은 각 산업부문의 원재료 투입구성비를 나타내는 투입계수의 산출로부터 시작된다. 생산유발계수는 최종수요에 의한 각 부문의 직·간접 생산 파급효과를 나타내는 것으로 산업연관분석에서 중심적 역할을 한다. 산업연관표를 이용한 분석은 산업연관분석의 변수인 투입계수가 고정적이라는 것을 기준으로 하여 다음과 같은 네 가지 가정을 기초로 한다. 첫째, 결합생산이 존재하지 않는다는 가정으로 한 산업은 한 상품만 생산, 즉 각 상품과 각 산업부문은 1대 1의 대응관계에 있다. 둘째, 대체생산방법이 존재하지 않는다는 가정으로 각 상품에 대하여 하나의 생산방법만 존재한다. 셋째, 규모의 경제가 존재하지 않는다는 가정으로서 각 부문이 사용한 투입량은 그 부문의 생산수준에 비례한다. 즉 각 투입물의 증가율만큼 생산수준이 높아진다. 넷째, 외부경제가 존재하지 않는다는 가정으로서 각 부문이 개별적으로 행한 생산활동 결과의 총계는 각 부문이 동시에 행한 결과와 같다. 이러한 가정에 따라 산업연관분석은 행과 열을 동일한 기준으로 파악할 수 있는 대칭적 투입산출표를 이용하여 이루어진다. 보다 상세한 투입계수의 산출 방법, 유발계수의 도출 과정은 산업연관분석해설에서 확인이 가능하다.

2.2 파급 효과 입력 기초 자료

본 파급효과분석에 사용한 주요 자료는 년도별 산업연관계수 자료와 초고온가스로 건설비용, 연간 투입 자본으로 나눌 수 있다. 연간 투입 자본은 ‘초고온가스로 경제성 분석 및 실증사업계획조사’ 결과를 기준으로 건설공사비 및 연간 운영비로 나눌 수 있으며, 이는 (600MWh×4기) 고온가스로 NOAK를 기준으로 한다. 계산에 사용한 건설공사비 연도별 투자계획과 연간 운영비를 요약하면 각각 <Table 1>과 <Table 2>와 같다[6].

본 초고온가스로 경제성분석 및 실증사업계획조사는 2016년부터 7년간 초고온가스로를 건설하는 것으로 가정하고 있으며, 매년 운영비는 인력 운용비와 재료비를 모두 포함한 금액으로 매년 3% 증가하는 것으로 가정하였다. 본 논문에서는 산출된 투자계획 및 매년 운영비 결과를 활용하며, 연도별 건설공사비 산출 과정은 본 논문의 영역을 넘으므로 생략하도록 한다.

<Table 2> VHTR Plant 4SI Annual O&M Cost

Account description		Annual O&M Cost (Million Won)	
Direct cost	1. Labor cost	16,985	
	2. Maintenance cost	2,548	
	3. Chemical process maintenance	27,530	
	4. Supplement cost	Helium	6,435
		Iodine	1,312
		Control rod	6,823
		Etc(Radiation)	551
5. Radioactive waste management cost	1,790		
6. (Nuclear fuel+Moderator)Disposal cost	17,800		
7. Technical support cost	1,837		
Total direct cost		83,610	
Indirect cost	8. Indirect labor cost	3,397	
	9. Partial operating cost	14,666	
	10. Licensing cost	3,608	
	11. Insurance cost	3,319	
	12. Alternative electricity insurance cost	-	
Total indirect cost		24,990	
Total direct and indirect cost		108,600	
13. Moderator(Graphite) cost		2,799	
14. Nuclear fuel cost		101,113	
15. Distilled water cost		1,429	
16. Electricity cost		167,793	
17. Decommission cost		10,021	
Total operation cost		391,734	
18. Depreciation		55,185	
Total		446,940	

산업연관표의 투입 산출표의 각 계정은 총 30개 항목으로 구분되어 있는데 이중 본 논문에서 활용한 계정은 16번 ‘전력, 가스 및 증기’ 계정으로 이중 한국은행에서 발표하는 여러 산업연관지표 중 연도별 생산유발계수표, 부가가치유발계수표, 취업유발계수표의 행렬합 값을 적용하여 ‘전력, 가스 및 증기’가 타 산업에 미치는 영향

전체를 고려하였다. 통상 Y년도 산업연관표는 3년 뒤인 Y+3년도에 제작 발표되는데, 한국은행에서 산업연관표를 2004년도 분은 발표가 되지 않았으므로, 2005년부터 가장 최근의 자료인 2012년까지의 자료를 활용하였다. 매년 발행되는 한국은행의 산업연관표[9-16]중 2005년도부터 2012년까지의 생산유발계수, 취업유발계수 및 부가가치유발계수의 행렬합을 편집 요약하면 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Annual Inducement Coefficient(Electricity, Gas and Steam Area)

Year	Production inducement coefficient	Employment inducement coefficient	Add value inducement coefficient
2005	1.783	11	0.654
2006	1.791	11	0.64
2007	1.801	10	0.625
2008	1.836	9	0.5
2009	1.84	9	0.553
2010	1.874	10	0.64
2011	1.882	10	0.609
2012	1.848	10	0.608

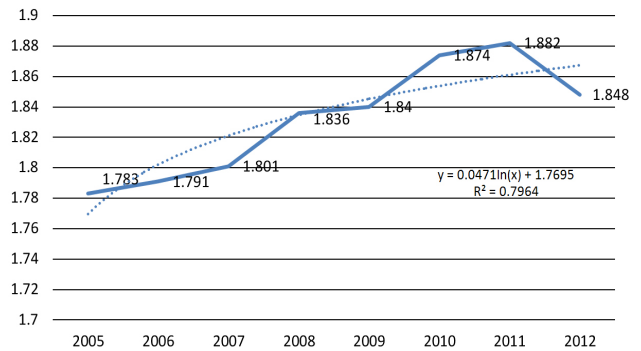
2.3 파급 효과 분석 과정

한국은행에서 제시하는 생산유발계수, 취업유발계수 및 부가가치유발계수는 과거 시점을 기준으로 하므로 미래의 유발계수의 수치를 현시점에서 파악하는 것이 파급효과 분석을 위해 필요하다. 이에 향후 유발계수의 예측값은 시계열 분석 방법에 따라서 과거 자료를 바탕으로 추정할 수 있도록 하였다. 시계열 함수는 적용 함수에 따라서 상이하나, 본 분석에서는 추정된 시계열 함수 중 함수가 얼마나 기존 자료를 설명할 수 있는지를 나타내는 R²가 가장 큰 경우를 채택하였다. 이에 따라서 <Table 3>의 기존 유발계수 자료를 바탕으로 시계열분석을 수행한 결과 생산유발계수 함수 추정값은 $y = 0.0471\ln(x) + 1.7695$ 이며 이때 $R^2 = 0.7964$ 이다. 생산유발계수의 분산분석은 <Table 4>와 같으며, 시계열 분석 함수는 <Figure 3>과 같다.

<Table 4> Production Inducement ANOVA Table

	df	SS	MS	F	P
Reg	1	0.00706	0.00706	67.9738	0.00017
Error	6	0.000623	0.000104		
Total	7	0.007683			

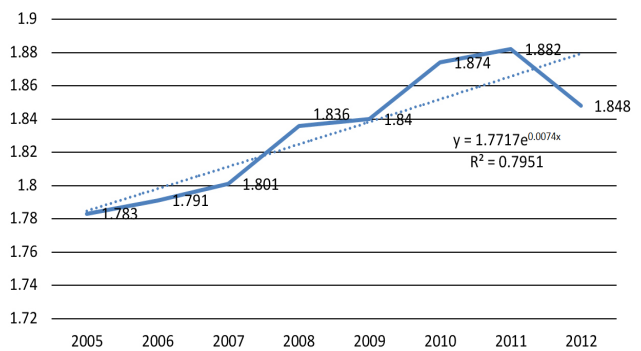
Production Inducement Coefficient



<Figure 3> Production Inducement Time Series Function

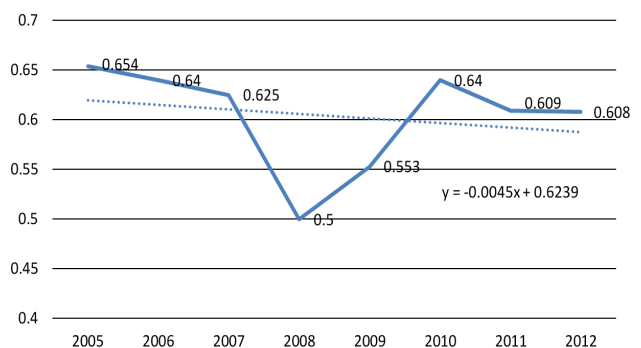
같은 방법을 적용하면 취업유발계수 및 부가가치유발계수의 시계열 함수는 각각 $y = 10.625\exp(-0.014x)$ 와 $y = -0.00415x + 0.6239$ 로 나타난다. 이를 도식한 결과는 각각 <Figure 4>, <Figure 5>와 같다.

Production Inducement Coefficient



<Figure 4> Employment Inducement Time Series Function

Add value Inducement Coefficient



<Figure 5> Add Value Inducement Time Series Function

도출한 시계열 함수를 이용하여 산업연관표가 발표가 되지 않은 2013년부터 2037년까지의 산업연관계수 유발계수를 예측하면 <Table 5>와 같이 정리할 수 있다.

<Table 5> Industrial Relation Coefficient Expectation Value

Year	Expectation value		
	Production inducement coefficient	Employment inducement coefficient (Men/KMW)	Add value inducement coefficient
2013	1.8730	9.3569	0.5834
2014	1.8780	9.2140	0.5789
2015	1.8824	9.0711	0.5744
2016	1.8865	8.9282	0.5699
2017	1.8903	8.7853	0.5654
2018	1.8938	8.6424	0.5609
2019	1.8970	8.4995	0.5564
2020	1.9001	8.3566	0.5519
2021	1.9029	8.2137	0.5474
2022	1.9056	8.0708	0.5429
2023	1.9082	7.9279	0.5384
2024	1.9106	7.7850	0.5339
2025	1.9129	7.6421	0.5294
2026	1.9151	7.4992	0.5249
2027	1.9172	7.3563	0.5204
2028	1.9192	7.2134	0.5159
2029	1.9211	7.0705	0.5114
2030	1.9230	6.9276	0.5069
2031	1.9247	6.7847	0.5024
2032	1.9264	6.6418	0.4979
2033	1.9281	6.4989	0.4934
2034	1.9297	6.3560	0.4889
2035	1.9312	6.2131	0.4844
2036	1.9327	6.0702	0.4799
2037	1.9342	5.9273	0.4754

도출한 산업연관계수 유발계수 예측치는 2013년도부터 2037년까지 유발계수를 계산하였으나, 이중 예상 산출 효과에 사용한 유발계수는 건설이 시작하는 것으로 가정 한 2016년 이후 건설기간 7년(2016년~2022)과 건설이후 15년간(2023년~2037년)을 적용하여 총 22년을 적용하였다. 통상 경제성 분석시에는 원전의 예상수명인 60년을 적용 하지만, 파급효과분석은 KISTEP 보고서의 권고사항을 준 용하여 15년간을 계상하였다. 이에 각 년도별 원자로 건 설비용과 연간 운영비를 적용한 예상 산출효과는 <Table 5>와 같다. 취업 유발효과는 건설기간중 약 3만 5천명, 건 설 후엔 약 4만 6천명으로 총 8만 1천명의 취업 유발효과 가 있는 것으로 집계되었으며, 생산유발효과는 건설기간 중 약 8.2조, 건설이후 12.9조로 총 21.1조로 집계되었다. 부가가치 유발효과는 건설기간중 약 2.4조, 건설이후 약 3.4조로 총 5.7조의 유발효과가 있는 것으로 파악된다.

<Table 6> Annual Expectation Ripple Effect

Year	Ripple effect			
	Production (Million Won)	Employment (Men)	Add value (Million Won)	
During construction	2016	115,237	545	34,811
	2017	307,912	1,431	92,098
	2018	308,481	1,407	91,365
	2019	154,505	692	45,315
	2020	1,909,655	8,398	554,678
	2021	2,582,055	11,145	742,752
	2022	2,795,235	11,838	796,339
	Sub-Total	8,173,080	35,456	2,357,358
	After construction	2023	852,843	3,543
2024		853,923	3,479	238,621
2025		854,950	3,415	236,610
2026		855,929	3,351	234,598
2027		856,865	3,287	232,587
2028		857,761	3,224	230,576
2029		858,620	3,160	228,565
2030		859,446	3,096	226,553
2031		860,240	3,032	224,542
2032		861,006	2,968	222,531
2033		861,744	2,904	220,520
2034		862,458	2,840	218,508
2035		863,148	2,776	216,497
2036		863,817	2,713	214,486
2037		864,464	2,649	212,475
Sub-Total	12,887,214	46,437	3,398,301	
Total	21,060,302	81,902	5,755,670	

3. 결 론

본 논문에서는 산업연관표의 유발계수를 이용하여, 향 후 초고온가스로 원자로 건설에 따른 파급효과를 정량화 하는 방법을 제시하였다. 그 결과 초고온가스로 건설시 취업유발효과는 8만 1천여 명, 생산유발효과는 21.1조, 부가가치 유발효과는 5.7조 수준으로 예상이 된다.

- 본 논문에서는 초고온가스로를 이용하여 수소생산을 하 는 VHTR의 600MW×4기, NOAK 기준으로 파급효과 를 계산하였으나 공정열 생산을 위한 VHTR 350MW× 4기, NOAK 기준의 초고온가스로나 다른 형태의 원 자로의 파급효과를 분석하는 데에 활용이 가능할 것 이다.
- 산업연관지수는 결측치가 있는 2004년도 자료는 전후 년도인 2003년도와 2005년도 기준으로 보완 추정하고,

2004년도 이전 산업연관지수 자료를 시계열 분석에 적용시 기존 보다 설명력을 가지는 시계열 함수 도출이 가능하다.

- 본 논문에서 시계열 분석 수행시 산업연관표의 16번째 '전력, 가스 및 증기' 부분을 적용하였으나, 해당 '전력, 가스 및 증기' 계정의 세부 자료를 확보 적용할 경우 파급효과의 정확도가 향상될 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This study has been performed under mid-and-long term Nuclear R&D Project by the Ministry of Science, ICT and Future Planning, Republic of Korea.

References

- [1] Batbold, D. and Kim, J.G., Cost-Benefit Analysis of Coal-to-Liquids Plant Construction in Mongolia. *Journal of Society of Korea Industrial and System Engineering*, 2012, Vol. 35, No. 1, pp. 32-38.
- [2] Choi, E.J., Market Prediction Methodology for Preliminary Feasibility Survey Profit Estimation in R&D. Research Report 2014-035, KISTEP, 2014.
- [3] Jung, S.H., Economic Evaluation of Early Detection System for Warranty Issues. *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 2011, Vol. 40, No. 1, pp. 39-48.
- [4] Korea Energy Economic Institute, 2013 Yearbook of Energy Statistics, ISSN 1226-606X, 2014.
- [5] Lee et al., Economic Design of X bar Control Chart Using a Surrogate Variable. *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 2009, Vol. 37, No. 2, pp. 46-57.
- [6] Lee et al., The Study of Economic Analysis and Demonstration Research Plan for VHTR Business, KAERI/TR-5435/2014, Korea Atomic Energy Research Institute, 2014.
- [7] Lee, T.H. and Lee, K.Y., A Case Study on Quality Assurance Application of the Nuclear Hydrogen R&D. *Journal of Society of Korea Industrial and System Engineering*, 2010, Vol. 33, No. 4, pp. 114-121.
- [8] Song et al., An Economic Feasibility Study for Construction and Use of Korea Ocean Research Stations. *Journal of Society of Korea Industrial and System Engineering*, 2015, Vol. 38, No. 1, pp. 52-64.
- [9] The Bank of Korea, The 2005's Inter-Industry table, 2008.
- [10] The Bank of Korea, The 2006's Inter-Industry table, 2009.
- [11] The Bank of Korea, The 2007's Inter-Industry table, 2010.
- [12] The Bank of Korea, The 2008's Inter-Industry table, 2011.
- [13] The Bank of Korea, The 2009's Inter-Industry table, 2012.
- [14] The Bank of Korea, The 2010's Inter-Industry table, 2013.
- [15] The Bank of Korea, The 2011 and 2012's Inter-Industry table, 2014.
- [16] The Bank of Korea, The Inter-Industry analysis explanations, 2014.

ORCID

Tae-Hoon Lee | <http://orcid.org/0000-0003-0189-407X>
 Ki-Young Lee | <http://orcid.org/0000-0003-2770-4588>