

기술상호효과분석의 입력변수 추정 난이도 경감을 위한 입력변수 설정모형의 설계

전정철^{1*} · 권철신²

¹국가과학기술연구회, ²성균관대학교 시스템경영공학과

Designing an Input Parameters Setting Model for Reducing the Difficulty of Input Parameters Estimations in Cross Impact Analysis

Jungchul Jun¹ · Cheolshin Kwon²

¹National Research Council of Science & Technology

²Sungkyunkwan University, Department of Systems Management Engineering

■ Abstract ■

As the technology convergence paradigm emerges, the need for "CIA techniques" to analyze the mutual effects of technology is increasing. However, since the CIA input parameter estimation is difficult, the present study suggests a "CIA input parameter setting model" to alleviate the difficulty of CIA input parameter estimation. This paper is focused on the difference of measurement difficulty by each scale which expert's estimation behavior was defined as measurement activity quantifying the judgment of future technology. Therefore, this model is designed to estimate the input variable as a sequence or isometric scale that is relatively easy to measure, and then converts it into a probability value. The input parameter setting model of the CIA technique consists of three sub-models: 'probability value derivation model', 'influence estimation model', and 'impact value calculation model', in order to develop a series of models the Thurstone V model, Regression Analysis, etc has been used.

Keywords : Cross Impact Analysis, Cross Impact Matrix, Scaling Theory, Scale Transformation

1. 서 론

R&D 활동을 계획하고 수행하는 것은 미래기술에 대한 예측에서부터 시작하며, 기술예측은 기술발전의 특성에 대한 이해의 바탕 위에서 이루어지게 된다. 특히, 새로운 가치 창출을 위한 패러다임으로 기술융합(Technology Convergence) 및 개방형혁신(Open Innovation)[13]의 중요성이 커지고 있으며, 정부는 이를 촉진하고 활성화하고자 융합연구 예산 확대와 개방형 혁신 생태계 조성 등을 적극적으로 추진하고 있다[5, 6].

이와 같은 현상은 기술간 상호영향의 실체를 나타내며, 기술예측에서 상호영향에 대한 고려의 필요성을 근본적으로 환기시키고 있다.

기술 간의 상호영향을 고려하는 기술예측 이론인 Cross Impact Matrix(CIM)법은 델파이기법의 한계를 보완하기 위해 1960년대에 제시되었다. 델파이법은 다수의 전문가들이 참여하는 기술예측을 위한 대표적인 기법이지만 예측요인에 대한 상호영향을 고려하지 않는다는 문제점이 있고, 이에 Gordon과 Hayward[18]는 보완책으로 「CIM」 기법을 제시하였다. 이 기법은 상호영향성을 갖는 미래의 사건(event)에 대해 발생/비발생을 확률을 통해 접근하여 예측하는 수단으로 Cross Impact Analysis(CIA)라는 이름으로 발전되어 왔다[1, 10, 11].

CIM법 이후 상호영향분석기법의 예측논리를 보완하여 예측의 정밀성 높이는 연구가 지속되었는데, Eymard[16]는 시간의 경과에 따른 확률의 가변적 성격을 고려하여 마코프체인을 활용한 동태적 상호영향 모형을 제안한 바 있었으며, Novaky[21]는 특정항목의 연쇄효과, 예측치 간의 모순 등을 파악하고 제거할 수 있는 상호영향분석 모형을 제안하였다. 이와 같은 연구들은 이론적으로 예측의 정밀성을 제고하였으나 이론의 활용 측면에서는 부정적 요소가 오히려 늘어난 측면이 있다.

실제 CIA 기법이 현장에 활용되는 경우는 드물었는데 사람이 처리해야하는 입력변수추정의 어려움 때문이다. 두 가지 측면의 어려움을 생각해볼 수

있는데, 첫 번째는 예측을 위한 입력자료의 양이 지나치게 과다하다는 점이며, 두 번째는 각 입력자료의 도출과정이 어렵다는 점이다.

CIA법에서 입력변수인 「초기확률표」와 「상호영향 매트릭스」는 전문가가 직관적으로 추정하도록 설계하고 있으며, 상호영향 고려 대상기술이 증가할수록 입력변수인 초기확률과 조건부 확률의 추정수요는 기하급수적으로 증가하게 된다. 특정 상황을 가정한 조건부 확률을 직관적으로 추정해야 한다는 점과 더불어 추정대상의 수가 기하급수적으로 증가할 수밖에 없는 모형의 구조적 특징 때문에 CIA 모델의 입력변수 산출은 전문가에게 큰 부담이 되어왔다.

CIA 기법은 이와 같은 문제를 안고 있으면서도 타 기법과의 접목을 통해 예측의 정확성을 제고하고 적용성을 높여나가기려는 연구들이 계속되었다.

권철신, 홍석기[2]는 CIA 기법을 DEA 분석에 접목하여 개량모형을 제안하였고, 권철신, 조근태[3]는 계층분석에 상호영향분석을 접목하여 계층분석의 정확도를 높이고자 하였다. 특히, 구조분석(structure analysis)에 접목한 연구들이 다수 이루어 졌는데 Duval[14]은 상호영향매트릭스를 구조적으로 분석하고 그것을 다이어그램 연관도로 도식화하는 것을 제안한바 있으며, Godet[17]은 미래의 핵심변수를 예측하기 위한 구조분석에 CIA 기법을 접목한 모형을 제안한 바 있다.

타 기법과 「CIA 기법」을 결합하는 최근의 시도는 Banuls and Turoff[12]의 연구로, 델파이와 「CIA 기법」을 시나리오 기법에 접목한 단계모형을 제시하였다. 이 연구에서는 「CIA 기법」의 과다한 입력데이터 문제를 해결하기 위해 전체 시나리오 구조 내에서 상호영향을 고려해야 할 필요가 있는 부분을 설정하고, 해당 서브시나리오 관련 전문가를 별도로 배정하여 개별 전문가에게 할당되는 입력변수의 량을 분산시키도록 하였다. 이 연구는 상호영향 분석과 시나리오 기법을 연계하여 활용절차를 체계화함으로써 전문가 개인의 입력변수 추정량을 줄이고, 기법의 적용성을 높이고 있다는 점에서 의미를 가지고 있으나, 입력변수 추정 애로사항 중 하나인 개별

전문가가 추정해야 하는 추정 난이도를 낮추지 못하는 한계를 갖고 있다.

또한 전문가 추정난이도 경감과 관련하여 발생 확률을 주관적 척도의 관점에서 7점 척도 또는 13점 척도와 같이 등간척도로 설정하고 단순 매칭하여 간편화 할 수 있으나, 이 경우 기술의 상호영향 효과라는 세밀한 확률변화에 활용하기에 지나치게 직관적이고, 전문가가 추정한 등간척도를 발생확률이라는 비율척도 변환하는 과정에 대한 설계가 부족하여 추정의 정확성이 떨어진다는 한계가 있다. 또한 상호영향의 방향과 크기를 정성척도로 추정하여 활용하는 연구[26]도 있으나 연구모형의 구조적 설계에 의존성이 커 범용성이 떨어지고 상호영향에 대한 정량적 분석이 어렵다는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 일정규모 이상의 집단적 기술예측에 있어 여러 전문가들이 CIA 기법의 입력변수를 산출하는 과정에서 다수의 견해를 체계적으로 수렴하고 추정의 정확성을 높이면서도 난이도를 경감시킬 수 있는 방법을 모형화 하였다.

2. 연구모형의 설계

본 연구는 전문가의 추정행위를 미래기술에 대한 판단결과를 수량화하는 측정행위로 규정하고, 척도별 측정 난이도의 차이에 착안점을 두었다.

주요용어의 개념을 정리하면 아래와 같다.

- (1) 상호영향 : 상호영향에서 영향은 특정 기술 간에 존재하는 작용을 의미한다.
- (2) 영향순위 : 영향순위는 상호영향을 주고받는 대상 간에 상호영향 정도의 순서를 의미하면 서열척도로 나타낸다.
- (3) 영향도 : 영향도는 상호영향을 주고받는 대상 간에 실제적 영향의 결과로 발생하는 발생확률변화의 크기를 의미하며 등간척도로 나타낸다.
- (4) 영향치 : 상호영향의 결과로 발생하는 초기확률과 조건부 확률 간 확률치 차이로 비율척도로 나타낸다.
- (5) 초기확률 : 기술간 상호영향이 작용하기 이전 해

당기술의 발생확률을 의미한다.

- (6) 조건부 확률 : 기술간 상호영향이 작용하여 변경된 발생확률로, 초기발생확률에 영향치가 반영된 확률치이다.
- (7) 추정 : 본 연구에서 추정은 전문가의 미래기술에 대한 판단의 결과를 수량화하는 측정과정으로 규정한다.

입력변수 추정부담을 경감시키기 위해 서열척도 또는 등간척도를 이용한 추정구조를 설계하고 이 추정치를 CIA의 입력변수로 활용할 수 있는 비율척도인 확률치로 변환하는 체계적 처리구조를 설계하는 것이 연구의 핵심이다.

척도는 일반적으로 명목척도, 서열척도, 등간척도, 비율척도로 구분되며 정보량이 많을수록 측정시 정보 요구량이 많고, 정보 요구량이 많을수록 측정을 위한 노력이 증가하고 편이는 감소하게 된다. 척도의 정보량은 명목척도가 가장 적으며 서열척도, 등간척도, 비율척도 순으로 많아지게 된다[8].

추정난이도 경감을 위해 도입하고 있는 두 개의 척도를 비교할 때, '등간척도'와 비교해 상대적으로 '서열척도'가 난이도의 경감효과가 크지만 측정항목 수가 많아지면 순위부여가 어렵고 결과의 정확성이 낮아진다. 반면 '등간척도'는 측정항목 수의 증가에 따른 측정 난이도는 변화는 없으나 등간수준의 세밀한 측정이 어려운 대상의 경우에는 측정의 신뢰도가 낮아지게 된다.

서열/등간척도의 측정특성을 모형에 체계적으로 반영하기 위해 본 「CIA 기법의 입력변수 설정모형(CIA-Input Data Setting Model, 이하 CIA-IDSM)」은 서열·등간척도로 영향도를 우선 추정하고, 영향도의 척도변환을 통해 비율척도인 확률치로 변환하는 알고리즘에 대해 구조화한다. 이 프로세스의 체계적 모형화를 위해 「CIA-IDSM」은 「확률치 도출모형」과 「영향도 추정모형」, 「영향치 산출모형」 3개의 하위모형으로 모듈화 하였다.

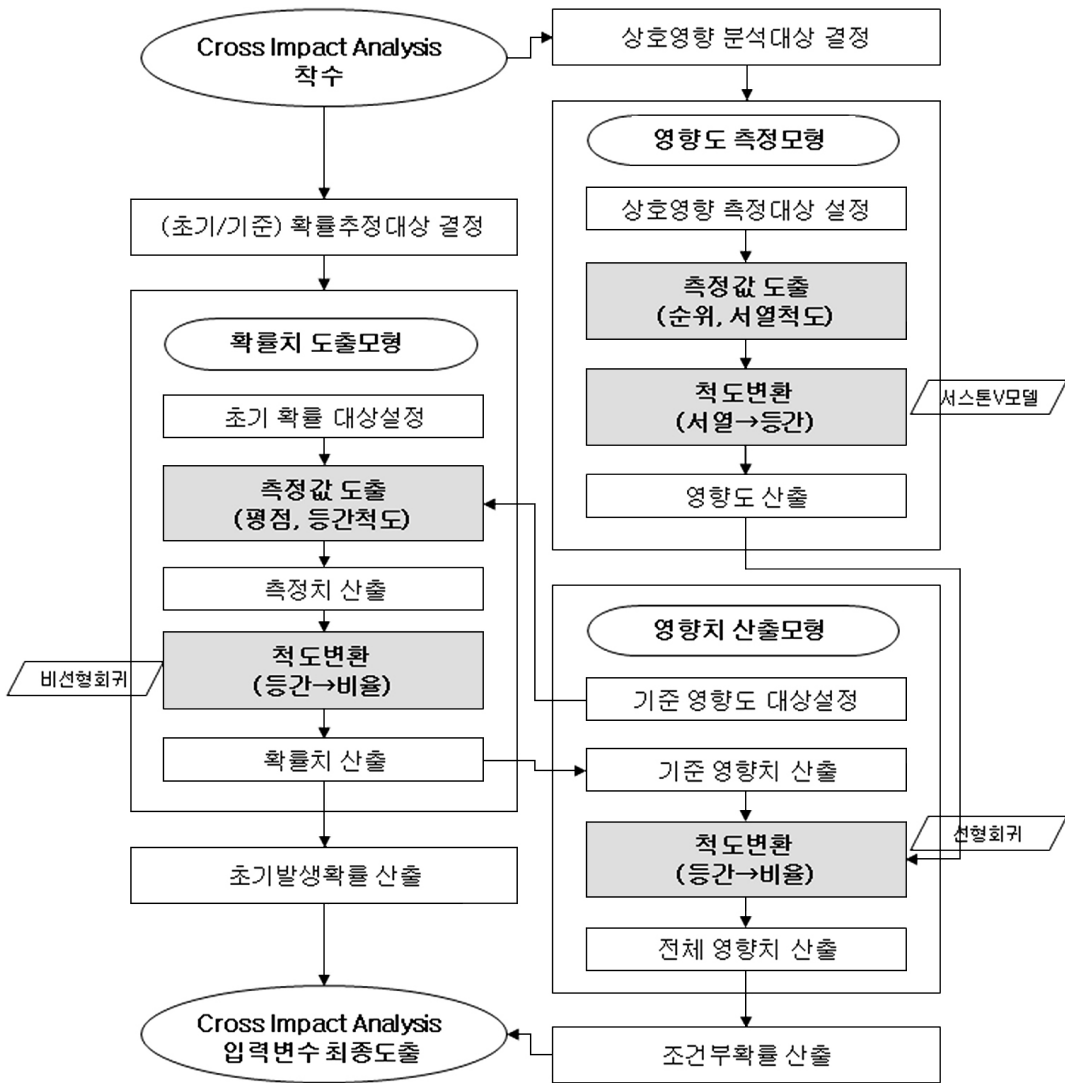
「확률치 도출모형」은 초기확률 또는 기준확률을 우선 등간척도로 추정한 후 회귀모형을 통해 확률치를

산출한다. 이때, 회귀분석은 두 변수 사이의 선형결합관계를 밝혀 결과적으로 두 변수 간의 척도변환을 유인하는 역할을 한다. 「확률치 도출모형」에서 산출된 기준영향치가 조건부 확률 추정치의 입력변수가 된다.

「영향도 추정모형」은 서열적으로 추정된 상호영향의 크기를 서스톤V모델을 통해 등간척도로 변환하는 모형으로 발생확률의 변화량을 수리적으로 산출하는 모형이다. 여기서 산출한 '영향도'는 「영향치 산출모형」의 입력변수가 된다.

「영향치 산출모형」에서는 등간척도인 '영향도'를 선형회귀분석으로 척도변환하여 비율척도인 '영향치'를 산출한다. 이 모형의 척도변환은 「확률치 도출모형」에서와 같이 회귀분석을 실시하지만 예측의 정확성을 높이기 위해 입력변수의 특성을 고려하여 추정하는 회귀곡선의 형태를 다르게 설계한다. '영향치'는 상호영향으로 발생하는 확률치의 변화량으로, 초기확률에 가감하여 조건부 확률을 산출한다.

「CIA-IDSM」 전체 구조는 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 「CIA-IDSM」의 구조모형

〈표 1〉 척도변환기법별 특성정리

구 분	서열 → 등간	등간 → 비율	
		선형회귀	비선형회귀
척도변환 기법	서스톤V	선형회귀	비선형회귀
입력변수 추정	서열척도 추정	미추정(영향도 도입)	등간척도 추정
산출값	영향도	영향치	초기확률 기준확률
관련 CIA 입력변수	조건부 확률	조건부 확률	초기확률 조건부 확률
하위모형명	「영향도 추정모형」	「영향치 산출모형」	「확률치 도출모형」

향후 전개의 이해를 돕기 위해 하위모형 및 특성을 테이블로 정리하면 <표 1>과 같다.

3. 입력변수의 추정

3.1 상호영향 분석추정의 설정

「CIA-IDSM」의 추정변수는 초기발생도와 기준 영향도, 상호영향도 3개 변수이며 초기발생도와 기준영향도는 등간척도로, 상호영향도는 서열척도로 추정한다. 이때 서열척도를 통한 추정시에는 결과의 신뢰성을 높이기 위해 추정대상의 수에 대한 고려를 바탕으로 추정대상의 설정이 필요한데, 우선순위를 검토할 대상의 수가 늘어날수록 순위부여의 정확성이 떨어지기 때문이다. 이에, 서열척도 추정 시 적정규모를 설정하는 기준을 검토할 필요가 있다.

순위를 산출하기 위한 사과의 과정이 순위부여 대상 간의 상호 비교를 바탕으로 한다는 점을 고려할 때, 복수개의 비교 대상에 순위부여를 위해서는 상호비교의 결과를 동시에 고려할 수 있는 단기적 기억력의 문제와 밀접한 관계를 가진다. 사람의 단기 기억과 관련하여 Thompson[23]과 Stephenson[22]은 Q-소트 기법에서 강제적 분류를 시킬 경우, 그 측정문항의 카드들을 대체로 9개나 11개의 무더기나 유목으로 벌여놓게 함을 제시한 바 있으며, Ebbinghaus[15]를 비롯한 Miller[20], Baddeley[9]의 연구에서 기억에 관한 연구에서 그는 단기 기억에서 거의 모든 성인은 7 ± 2 의 용량을 갖는다는 연구 결과를 발표한 바가 있다. Q-소트 기법의 실험결과와 더불어 단기 기억이 7 ± 2 개로 동시에 9개를 비교 판단하는 것이 가능하다면 $a < b, b < c$ 이면 $a < c$

라는 논리적 결정이 가능하므로 일반적인 성인은 9~11개의 순위부여가 가능하다.

연구모형에서 서열척도로 추정하는 측정항목의 비교대상 개수는 9~11보다 약간 많은 12개 이하인 경우로 설정하는데, 추정자가 전문가라는 점과 동시에 상호영향을 고려해야하는 기술의 수가 4개인 경우 상호영향의 순위를 도출할 개체가 12개 발생됨을 고려하였다.

이에 따라 상호영향도 추정시에는 순위부여대상 12개를 기준으로 추정대상의 설정을 달리하는 체계를 설계하였다.

- 1) 순위부여대상이 12개 이하의 경우, 전체에 순위부여가며 별도의 추정대상 설정과정을 두지 않는다.
- 2) 순위부여대상이 12개를 초과하는 경우, 상호영향 검토대상을 그룹화하여 추정한다. 이때 각 그룹의 규모는 순위부 가능하여 대상이 12개 이하가 되도록 하고, 각 측정그룹 간에는 적어도 1개 이상의 동일한 비교대상을 포함하도록 그룹을 설정하여 추후 각 그룹간의 측정결과를 동기화하도록 한다.

3.2 추정치의 산출

3.2.1 서열척도 측정

상호영향도를 추정하기 위한 서열척도 측정은 서스톤척도법[25]을 바탕으로 한다. 서스톤척도법은 각 측정대상의 쌍대비교를 통하여 그 쌍 내에서 어떤 대상이 더 높은 속성수준을 지니는지를 응답자들이 판단하도록 요구하는 방식이다[7]. 쌍대비교의 경우 대상의 종류가 많을 때는 응답자에게 많은 수의 쌍

을 모두 응답하라고 요구하기가 어려우며, 그 대상들을 일렬로 정렬해 줄 것을 요구하는 것이 합리적이다[24]. 이와 같은 이유로 본 연구모형에서는 서열척도 추정을 상호영향비교대상 간의 순위매김을 통해 추정한다.

상호영향분석의 대상이 되는 각각의 n 개의 기술을 A_i 라 하고, A_j 가 발생했을 때 A_i 의 성공확률 변화에 미치는 nP_2 개의 영향의 크기를 한 전문가가 순서에 따라 나열한 최초 상호영향순위 추정값을 $eaO_{i/j}$ 라고 하면, 아래의 <표 2>로 정리된다. 이때 $eaO_{i/j}$ 는 $1 \leq eaO_{i/j} \leq nP_2 \leq 12$, $eaO_{i/j} \in N$ 의 순위가 된다.

<표 2> 상호영향 추정매트릭스

구 분	A_1	A_2	A_3	...	A_n
A_1		$eaO_{2/1}$	$eaO_{3/1}$	...	$eaO_{n/1}$
A_2	$eaO_{1/2}$			...	$eaO_{n/2}$
A_3	$eaO_{1/3}$	$eaO_{2/3}$		...	$eaO_{n/3}$
.
.
.
A_n	$eaO_{1/n}$	$eaO_{2/n}$		...	$eaO_{n/n}$

이 매트릭스는 상호영향 순위부여의 개수가 12개 이하라는 기준에 맞추어 그룹별로 산출된다. 이때 상호영향 순위부여의 개수 12개의 의미는 상호 비교해야하는 조합의 개수가 12개 이하를 뜻하는 것으로, 조합의 개수는 n 개의 대상 중 2개를 뽑아내는 순열로 볼 수 있다. 즉, nP_2 가 n 개의 상호영향 고려대상이 있을 때 상호 비교해야 하는 조합의 수가 되고, $nP_2 \leq 12$ 이므로 $n!/(n-2)! \leq 12$ 에 의해 $Max\ n=4$ 가 된다.

3.2.2 등간척도 측정

초기발생도와 기준영향도를 추정하기 위한 등간척도 측정은 Stevens가 제시한 척도법을 이용한다. 이때, 추정자가 전문가임을 고려하여 다소 척도점수가 많은 13점 척도로 추정한다. metric 자료를 이

용한 대부분의 통계적 분석기법은 측정값의 분산을 기본으로 이루어지는 것이므로, 척도점의 수가 많을수록 측정값의 분산도가 커지며, 분산도의 차이가 크게 나야만 분석결과가 명확해지기 때문이다[8]. 등간척도의 경우에는 Stevens이 지적한 바와 같이 등간 수치의 기준설정이 필요하며, 본 모형에서는 0~12의 척도점 중에서 가장 작은값 0을 성공확률 0%로, 가장 큰 값 12를 성공확률 100%로 설정한다.

추정 대상을 A_i 라 하고, A_i 의 초기발생도를 등간척도로 추정한 값을 eaI_i 로 표기하면, 초기발생도의 등간척도 추정값은 아래 <표 3>과 같이 정리할 수 있다.

<표 3> 초기발생도 추정매트릭스

구 분	A_1	A_2	A_3	...	A_n
초기발생도 추정치	eaI_1	eaI_2	eaI_3	...	eaI_n

4. 상호영향도의 산출

4.1 척도변환

서열척도를 통해 추정한 상호영향순위($eaO_{i/j}$)를 이용하여 상호영향도를 산출하기 위해서는 척도변환이 필요하다. 척도변환은 서스톤V모형을 활용하는데, 이 모델은 쌍대비교법과 같은 차이발생법에 의해 수집된 서열척도를 등간척도로 바꾸어 주는 모델로, 추정대상에 대한 쌍대비교를 통하여 평가한 집단의 비율의 차이로부터 등간척도를 찾아내는 방식을 취한다. 영향치 $\Delta(a_{1/2})$ 와 $\Delta(a_{2/1})$ 그리고 $\Delta(a_{3/1})$ 를 추정할 때, 다수의 전문가 중 $\Delta(a_{1/2})$ 를 $\Delta(a_{2/1})$ 보다 더 크다고 생각하는 전문가가 전체의 85%이고, $\Delta(a_{2/1})$ 를 $\Delta(a_{3/1})$ 보다 크다고 생각하는 전문가가 35%라면 $\Delta(a_{1/2})$ 과 $\Delta(a_{2/1})$ 의 차이가 $\Delta(a_{2/1})$ 와 $\Delta(a_{3/1})$ 의 차이보다 더 크다는 것을 알 수 있다[8].

『CIA-IDSMS』에 서스톤V모델의 적용방식을 간략히 정리하면 아래와 같다.

- ① 전문가 집단은 상호영향정도 $\Delta(a_{i/j})$ 와 $\Delta(a_{k/j})$ 의 비교에서 전문가에 따라 평가에 차이를 보인다.

- ② 각 영향정도가 주어지면 전문가별 영향정도에 대한 평가 결과가 분포를 이루게 되고 각 영향 정도평가의 분산은 동일하며 영향정도평가 간의 상관관계는 일정하다고 가정한다.
- ③ 척도값은 각 영향정도의 모든 Z값을 더하여 그 평균을 구하여 얻어진다.
- ④ 등간척도로 변환된 영향정도 값은 그 영향정도 값들 중 일정한 하나의 값을 기준으로 정할 수 있고 그것에 맞추어 등간수치를 재조정할 수 있다.

4.2 영향도의 재조정

상호영향순위를 등간척도로 전환한 후 각 수치를 조정하여 표준화한다. 서열척도로 추정된 상호영향 그룹 간에 수치 동기화와, 추후 확률치로 변환을 위한 모형을 표준화하기 위해서이다. 먼저, 상호영향 비교대상의 수가 12개 이상의 경우 각 측정 그룹별로 도출한 등간척도 데이터 중 상호 공통되는 인자를 기준으로 등간척도 값을 일치시킨다. 예를 들어, I 그룹에서 {a, b, c, d}의 순위를 산출하고, II 그룹에서 {c, e, f, g} 순위를 산출하여 등간척도로 척도변환을 하였다고 하면, 두 그룹 모두 c를 공통으로 포함하고 있으므로 c를 기준으로 두 그룹의 기준점을 일치시킨다.

즉, I 그룹이 {a(1.1), b(0.3), c(0.7), d(0.9)}, II 그룹이 {c(1.0), e(0.5), f(1.3), g(0.2)}라면, II 그룹을 I 그룹에 맞추어 일치시킬 경우에 II 그룹의 모든 값에 -0.3을 해준다. 그 경우 양 그룹을 통합한 전체 값은 {a(1.1), b(0.3), c(0.7), d(0.9), e(0.2), f(1.0), g(-0.1)}이 된다.

다음으로 최소값을 0에 맞추어 등간수치를 다시 재조정한다. 예시의 경우에는 모든 값에 +0.1을 해주면 최소값 g(-0.1)이 g(0)이 되어 재조정 된다.

이와 같은 과정을 통해 서열척도로 측정된 다수의 그룹을 척도변환한 후 하나의 그룹으로 단일화하고 최소값을 0로 재조정하여 등간척도 수준의 상호영향도를 최종 산출한다. 상호영향도를 $ta_{i/j}$ 로 표

기하면 상호영향도 값은 <표 4>와 같이 표기할 수 있다.

<표 4> 상호영향도 산출 매트릭스

구 분	A_1	A_2	A_3	...	A_n
A_1		$ta_{2/1}$	$ta_{3/1}$	...	$ta_{n/1}$
A_2	$ta_{1/2}$			...	$ta_{n/2}$
A_3	$ta_{1/3}$	$ta_{2/3}$		...	$ta_{n/3}$
·	·	·		...	·
·	·	·		...	·
·	·	·		...	·
A_n	$ta_{1/n}$	$ta_{2/n}$		...	$ta_{n/n}$

5. 확률치의 산출

5.1 측정척도와 회귀구조의 검토

『회귀분석』은 독립변수와 종속변수 사이의 최적 함수관계를 밝히는 통계적 기법으로 본 연구에서는 독립변수를 등간척도로 종속변수를 비율척도로 설정함으로써 척도간의 함수관계를 도출하고, 이를 통해 등간척도에서 비율척도로 척도변환을 수행한다.

연구모형상 회귀분석의 입력변수를 2가지 방식으로 추정하는데 초기발생도의 경우 직접적으로 등간척도 추정을 하고 상호영향도의 경우 서열척도로 추정 후 척도변환을 통해 등간척도화 하고 있다.

이때, 추정의 정확성을 높이기 위해 ‘척도말단 위 축현상’을 고려하고 입력변수의 최초 추정척도에 따라 회귀식의 구조를 다르게 설정토록 한다.

회귀분석을 통해 비율척도로 척도변환을 하려면 이론상 입력변수가 완전한 등간격이 되어야 하나, 사람이 등간척도로 추정된 값을 완전한 등간수준의 수치라고 보기는 어렵기 때문이다.

등간척도로 측정할 때 각 간격이 등간이라는 점을 추정자에게 명시하지만 추정자가 그것을 명료하게 등간으로 구분해서 측정하는 데는 한계가 있다. 특히 척도의 양극으로 갈수록 등간격의 왜곡현상은 심해지며 Thurstone[25]을 비롯해 Guilford[19] 등

연구자가 양 극단의 등간격 왜곡현상을 문제점으로 지적했다. 이 현상을 연구자들은 ‘척도말단 위축현상’이라고 칭하면서 등간척도의 양끝 척도단위 간격이 축소되는 현상이라고 규정하고 있다[4]. 결국, 사람의 인지 상 한계와 심리적 요인으로 등간척도 법으로 추정한 결과는 아이러니하게도 완전한 등간척도라고 할 수 없다.

등간척도로 측정된 결과가 완전한 등간척도가 아닌 이상 ‘등간척도 추정치’와 ‘비율척도 확률치’의 관계를 단순히 선형관계로 설명하는 것은 무리가 있으며, 회귀식의 형태는 완만한 비선형형태로 보는 것이 합리적이다.

다음으로 서열척도로 측정하여 서스톤V모형을 통해 등간척도로 척도변환한 경우는 추정자가 간격이 아닌 순위로 최초 추정함으로써, 측정상 간격의 크기에 대한 인식의 왜곡이 일어나지 않으며, 스톤V모델로 변환된 등간척도 값은 온전한 등간격 수치가 된다. 이에 최초 서열척도로 추정하여 척도변환한 상호영향도는 상호영향치와 선형관계가 성립하고, 회귀식의 형태를 선형함수식으로 설정할 수 있다.

서열척도와 등간척도로 각기 추정된 독립변수에 대해 종속변수와 의 함수관계를 표기하면 [그림 2]와 같다.

이에 따라, 본 연구에서 서열척도로 측정된 독립변수의 회귀구조는 단순회귀분석을 통한 선형회귀 분석을, 등간척도로 측정된 독립변수의 회귀구조는 다중회귀분석을 활용한 비선형회귀분석을 한다.

5.2 비선형회귀구조를 통한 초기확률치 산출

5.2.1 회귀구조의 검토

등간척도로 추정된 ‘추정치’를 ‘확률치’로 변환 시에는 비선형회귀구조를 적용한다.

다중회귀(multiple regression)의 일반적인 형태를 정리하면 다음과 같다.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \epsilon_i \quad (1)$$

<k는 전체 독립변수의 개수>

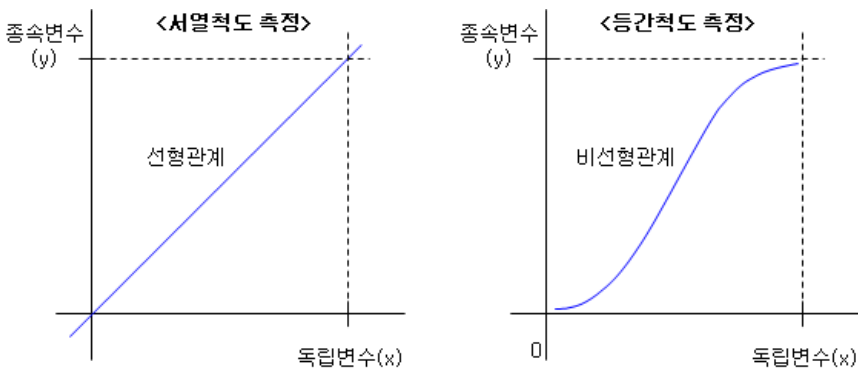
위 다중회귀모형의 추정은 잔차의 제곱합을 최소화시키는 방식으로 통계프로그램을 통해 분석이 가능하다.

하나의 독립변수를 가지지만 회귀선이 곡선형태를 취하는 경우 그 회귀식은 2차 이상의 다항식을 뜻하며, 이 회귀식을 단순화 하여 표현하면 식 (2)와 같다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 + \epsilon \quad (2)$$

위 식 (2)에서 독립변수 X와 X², X³을 각각 별도의 독립변수로 간주하면 독립변수가 3개인 다중회귀식이 되며, 다중회귀분석기법을 통해 비선형회귀식을 추정한다. 초기확률을 도출하기 위해 다중회귀분석의 독립변수는 ‘초기발생도(eaI_i)’, 종속변수는 ‘초기확률치(a_i)’라고 규정하면 함수식은 아래와 같다.

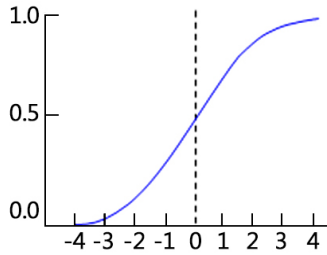
$$a_i = \beta_0 + \beta_1 (eaI_i) + \beta_2 (eaI_i)^2 + \beta_3 (eaI_i)^3 + \epsilon \quad (3)$$



[그림 2] 추정 척도별 회귀식 형태

5.2.2 표준정규분포 누적확률분포함수의 검토

비선형의 다중회귀식을 추정하기 위해서는 다수의 독립변수와 종속변수 값이 필요하다. 과거의 데이터에 의해 회귀식을 추정할 수 있다면 문제가 없지만, 실제 회귀식의 종속변수 값을 도출하여 확률치를 얻고자 하는 모형에서 회귀식 추정을 위한 다수의 확률치가 이미 존재한다고 가정하는 것은 현실성이 떨어진다. 따라서 회귀식의 형태가 ‘척도말단 위축현상’에 의하여 선형에 가까운 S커브를 형태가 될 것이라는 이해를 바탕으로 표준정규분포의 누적확률분포함수를 척도변환 회귀식으로 도입한다. 표준정규분포의 누적확률분포함수는 통계적 표준으로 본 연구와 같이 과거데이터를 통한 추정이 어려운 상황에서 기본 모델에 적용하기에 적합한 함수형태라 할 수 있다.



[그림 3] 누적확률분포함수

확률밀도함수 :

$$\phi(x) = 1/\sqrt{2\pi} e^{-1/2x^2}, -\infty < x < \infty \quad (4)$$

누적확률분포함수 :

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t)dt, 0 < \Phi(\infty) = 1, \Phi(0) = 0.5 \quad (5)$$

척도변환에 누적확률분포함수를 회귀식으로 도입하게 되면 초기확률값인 종속변수를 구할 때 일반화 된 표준정규분포 누적확률테이블의 활용이 가능하다.

초기발생도는 eaI_i , Rating 수는 13, 전문가의 수는 n , 산술평균을 m 이라 하면 아래와 같이 표기할 수 있다.

$$0 \leq eaI_i \leq 12, eaI_i \in N$$

$$AVR(eaI_i) = \sum_{k=1}^n eaI_{ik}/n = m, 0 \leq m \leq 12 \quad (6)$$

표준정규분포의 누적확률분포함수는 독립변수 X 가 $-3.9 \leq X \leq 3.9$ 이므로 등간척도로 추정한 결과의 산술평균값을 아래와 같이 재조정하도록 한다.

$$m' = 7.8/13 \times m - 3.9, -3.9 \leq m' \leq 3.9 \quad (7)$$

5.2.3 선형회귀구조를 통한 영향치 산출

1) 회귀구조의 검토

서열척도로 추정하고 서스톤V모델로 척도변환한 상호영향도(taI_{ij})를 상호영향치($\Delta(a_{ij})$)로 변환 시에는 선형회귀분석을 한다.

종속변수를 y , 독립변수를 x 라고 두면 선형회귀 모형의 일반형은 다음과 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \quad (8)$$

여기서,

y_i = i 번째 측정된 y 의 값

β_0, β_1 = 모집단의 회귀계수

x_i = i 번째 측정된 x 의 값

ϵ_i = i 번째 측정된 오차항으로 확률분포는 $N(0, \sigma^2)$

이며 다른 오차항과는 상관관계가 없다.

선형회귀식의 일반형에 본 연구의 변수를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta(a_{ij})_n = \beta_0 + \beta_1 (taI_{ij})_n + \epsilon_n \quad (9)$$

$n = 1, 2$ (기준 영향치 1, 2)

회귀선의 추정방법에는 최소제곱법과 최우추정법이 있으며, SPSS, SAS와 같은 통계패키지를 이용하여 분석할 수 있다.

2) 기준 독립/종속 변수의 도출

선형회귀분석을 통해 회귀식을 도출하기 위해서는 적어도 2개의 독립변수와 종속변수의 쌍이 필요

하다. 2쌍의 기준점을 산출하기 위해 상호영향도 ($taI_{i/j}$) 중에서 2개 $taI_{k/l}$, $taI_{m/n}$ 를 설정한다. 각 상호영향도에 대한 기준영향치를 도출하는데, 이때 2개의 기준영향치 $a_{k/l}$, $a_{m/n}$ 은 위의 등간척도 추정과정을 따라 산출하도록 한다. 회귀분석의 기준 독립변수와 종속변수는 아래와 같다.

〈표 5〉 회귀식의 독립변수와 종속변수

구 분	독립변수	종속변수
기준점 1	$taI_{k/l}$	$\Delta(a_{k/l}) = a_{k/l} - a_k$
기준점 2	$taI_{m/n}$	$\Delta(a_{m/n}) = a_{m/n} - a_m$

두 쌍의 기준점을 바탕으로 선형회귀식을 산출하면, 회귀식에 의해 각 영향도에 대응하는 영향치를 산출할 수 있다. 초기확률에 영향치 즉, 조건부 확률변화치를 가감하여 CIA의 입력변수인 조건부 확률치가 산출된다.

$$a_{i/j} = a_i + \Delta(a_{i/j}) \quad (10)$$

〈표 6〉 주요변수의 산출

구 분	표기	척도	입력자료	산출방식	기법	비고
대 상	A_i	-	-	조건		
초기발생도	eaI_i	등간	전문가	추정	평점법	최초 입력
초기확률치	a_i	비율	eaI_i	척도변환 (등간 → 비율)	비선형회귀 (확률누적함수)	최종 산출
상호영향순위	$eaO_{i/j}$	서열	전문가	추정	서스톤척도법	최초 입력
상호영향도	$taI_{i/j}$	등간	$eaO_{i/j}$	척도변환 (서열 → 등간)	서스톤V모델	
상호영향치	$\Delta(a_{i/j})$	비율	$taI_{i/j}$, $a_{k/l}$	척도변환 (등간 → 비율)	선형회귀	
조건부 확률치	$a_{i/j}$	비율	a_i , $\Delta(a_{i/j})$	가감		최종 산출

〈표 7〉 초기발생도 추정치(예시)

대상기술	A_1	A_2	A_3	대상기술	A_1	A_2	A_3
전문가 1	4	7	7	전문가 7	5	6	7
전문가 2	7	7	6	전문가 8	6	8	6
전문가 3	5	6	7	전문가 9	7	6	7
전문가 4	5	5	7	전문가 10	5	7	6
전문가 5	6	8	7	전문가 11	6	9	6
전문가 6	5	9	5	전문가 12	6	8	7

지금까지 각 변수의 추정, 척도변환 및 산출과정을 정리하면 아래 <표 6>과 같다.

6. 수치예

본 이론모형의 수치예를 총 3개의 기술(A_1 , A_2 , A_3)에 대해 12명의 전문가가 상호영향분석을 위한 입력변수를 산출하는 사례로 정리하면 다음과 같다.

6.1 초기확률의 추정

13점 척도(0~12점)로 기술의 초기발생도 추정하여 eaI_i 산출하면 <표 7>과 같다.

위 초기발생도 추정치를 각 기술별로 산술평균하면 $A_1 = 5.58$, $A_2 = 7.17$, $A_3 = 6.50$ 가 되며, 표준정규분포 누적확률분포표 활용을 위해 식 (7)에 따라 재조정하면 $A_1 = -0.55$, $A_2 = 0.40$, $A_3 = 0.00$ 이 된다.

조정된 수치를 표준정규분포 누적확률분포표를 이용하여 확률치로 환산하면 $A_1 = 0.29$, $A_2 = 0.66$, $A_3 = 0.50$ 가 된다.

6.2 조건부 확률의 추정

본 예시의 경우 상호영향분석 실시 횟수 총 6회 ($3P_2 = 6$)로, 상호영향도 순위추정 비교대상 개체 수 12개 미만이므로 비교그룹을 단일그룹으로 구성한다.

전문가 별 상호영향도 순위($eaO_{i/j}$) 분석 후 상호영향우위 비율표를 정리하면 <표 8>과 같다.

서스톤V모델에 의해 비율치의 정규분포 표준값 (Z)으로 변환 후 조정한 수치는 <표 9>와 같다.

이렇게 조정된 수치가 곧 상호영향도 값으로 $taI_{i/2}$

는 0.64, $taI_{1/3}$ 는 0.70, $taI_{1/3}$ 는 0.34, $taI_{2/3}$ 는 0.11, $taI_{3/1}$ 는 0.00 그리고 $taI_{3/2}$ 는 0.09가 된다.

기준영향치를 $\Delta(a_{1/2})$, $\Delta(a_{3/1})$ 로 설정한다면, 초기 확률 추정과 같은 절차로 조건부 확률 추정이 가능하다. 각 기준영향치의 조건부 확률 $a_{1/2}$, $a_{3/1}$ 의 추정치가 $a_{1/2} = 0.87$, $a_{3/1} = 0.62$ 이라면 <표 10>과 같이 정리가 된다.

산출한 기준점의 독립·종속변수를 이용하여 영향치 산출을 위한 선형회귀식을 추정하면 식 (8)에 의해 $y = 0.718x + 0.12$, 식 (9)에 의해 $\Delta(a_{i/j}) = 0.718 \times taI_{i/j} + 0.12$ 이다.

<표 8> 상호영향 우위비율(예시)

구 분	$\Delta(a_{1/2})$	$\Delta(a_{1/3})$	$\Delta(a_{2/1})$	$\Delta(a_{2/3})$	$\Delta(a_{3/1})$	$\Delta(a_{3/2})$
$\Delta(a_{1/2})$	-	0.41	0.31	0.37	0.10	0.22
$\Delta(a_{1/3})$	0.59	-	0.40	0.45	0.17	0.29
$\Delta(a_{2/1})$	0.69	0.60	-	0.57	0.30	0.41
$\Delta(a_{2/3})$	0.63	0.55	0.43	-	0.76	0.62
$\Delta(a_{3/1})$	0.90	0.83	0.70	0.24	-	0.43
$\Delta(a_{3/2})$	0.78	0.71	0.59	0.38	0.57	-

ex) $\Delta(a_{1/3})$ 의 값이 $\Delta(a_{1/2})$ 보다 크다고 추정된 전문가가 41%.

<표 9> 상호영향 우위비율 조정치(예시)

구 분	$\Delta(a_{1/2})$	$\Delta(a_{1/3})$	$\Delta(a_{2/1})$	$\Delta(a_{2/3})$	$\Delta(a_{3/1})$	$\Delta(a_{3/2})$
$\Delta(a_{1/2})$	-	-0.27	-0.49	-0.35	-1.28	-0.77
$\Delta(a_{1/3})$	-1.56	-	-0.25	-0.12	-0.95	-0.55
$\Delta(a_{2/1})$	0.50	0.26	-	0.18	-0.52	-0.22
$\Delta(a_{2/3})$	0.34	0.13	-0.17	-	0.71	0.31
$\Delta(a_{3/1})$	1.29	0.96	0.53	-0.70	-	-0.17
$\Delta(a_{3/2})$	0.78	0.56	0.23	-0.30	0.18	-
합계	1.35	1.64	-0.15	-1.29	-1.86	-1.40
평균	0.27	0.33	-0.03	-0.26	-0.37	-0.28
제조정	0.64	0.70	0.34	0.11	0.00	0.09

<표 10> 기준영향치 산출(예시)

구 분	기준점 1	기준점 2	비고
조건부 확률 추정값 $a_{i/j}$	0.87	0.62	
초기확률값 a_i	0.29	0.50	
영향치 $\Delta(a_{i/j}) = |a_{i/j} - a_i|$	0.58	0.12	종속변수
영향도 산출값 $taI_{i/j}$	0.64	0.00	독립변수

〈표 11〉 조건부 영향치 산출(예시)

구 분	$a_{1/2}$	$a_{1/3}$	$a_{2/1}$	$a_{2/3}$	$a_{3/1}$	$a_{3/2}$	비 고
ta_{ij}	0.64	0.70	0.34	0.11	0.00	0.09	독립변수
$\Delta(a_{ij})$	0.58	0.62	0.36	0.20	0.12	0.18	종속변수

〈표 12〉 조건부 확률치 산출(예시)

구 분	$a_{1/2}$	$a_{1/3}$	$a_{2/1}$	$a_{2/3}$	$a_{3/1}$	$a_{3/2}$	비 고
초기확률, a_i	0.29	0.29	0.66	0.66	0.50	0.50	CIA입력변수
영향치, $\Delta(a_{ij})$	0.58	0.62	0.36	0.20	0.12	0.18	
조건부 확률, a_{ij}	0.87	0.91	1.00	0.86	0.62	0.68	CIA입력변수

산출한 회귀식을 바탕으로 영향도로부터 영향치 추정이 가능하며, 이것을 정리하면 <표 11>과 같다.

마지막으로 식 (10)에 의해 조건부 확률의 산출이 가능하며, 그 결과는 <표 12>와 같이 정리 가능하다.

7. 결 론

본 연구에서는 Gordon의 「CIM」 모형 이후에 발전해 온 「CIA」 연구들의 과중한 입력변수 추정 부담문제를 제기하고, 이를 보완할 수 있는 「CIA 기법의 입력변수 설정모형(CIA-IDSM)」을 설계하였다.

본 연구에서 얻어진 성과를 요약하면 다음과 같다. 「CIA」의 입력치 중 기술간의 상호영향으로 인한 확률치 변화와 같은 세밀하고 추정이 어려운 변수는 서열척도로, 초기발생확률과 같이 어느 정도 직관적 추정이 가능한 변수는 등간 척도로 구분하여 추정하고, 척도변환 및 재조정을 거쳐 CIA의 입력변수인 초기 확률과 조건부 확률을 산출하는 체계적 모형을 설계하였다. 또한, 서열/등간 척도를 이용한 추정모형을 설계하여 전문가의 추정부담을 낮추고, 동시에 척도변환과 회귀분석을 접목하여 다수 전문가의 추정결과를 통계적으로 총합화하는 체계를 제시하였다. 특히, 등간척도 추정 시의 ‘척도말단위축현상’의 특성을 고려하여 회귀식의 형태를 달리 적용함으로써 입력변수 추정의 정확성을 높였다.

이와 같은 성과가 갖는 주요 의의는 「CIA」 기법

의 입력변수 추정시 전문가의 부담을 줄이는 이론적 모형의 틀을 제시하였다는 점이다. 또한, 서열·등간 척도를 이용한 전문가의 추정결과와 실제 비율척도수치의 관계를 회귀식을 통해 구조화함으로써, 향후 「CIA」 분석대상의 특성별로 회귀구조의 유형화를 가능하게 하여 분석의 편의와 정확성 제고의 여지를 마련하였다.

그러나 예측의 정확도를 높이기 위해 향후 다음과 같은 후속연구가 필요한데, 등간척도로 추정한 데이터의 비선형회귀분석의 함수형태에 대해 추후 추적연구를 통해 보다 정확도가 높은 회귀식을 규정할 필요가 있다. 또한, 경험적 현장 데이터를 바탕으로 기술의 상호영향을 유형화 하고 각 회귀구조를 분석하여 유형별로 회귀분석의 기본구조를 제시할 필요가 있다. 나아가 분석결과와 피드백 체계를 설계함으로써, 회귀구조의 지속적 유지·보수가 가능해 지면 변동추세의 파악이 가능해져 모형의 전략적 활용도를 더욱 높일 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 권철신, 강일중, “An application of a CISAT model for Determining the priority of R&D Planning System Alternatives, Korean Institute of Industrial Engineers”, IJIE 2002 Busan Conference The 7th Annual International Conference on Industrial Engineering, 2002.

- [2] 권철신, 박준호, 홍석기, “상호영향형 R&D 과제군의 평가선정을 위한 『CIDEAR』 모형의 개발”, 『한국경영과학회지』, 제29권, 제3호(2004), pp.41-61.
- [3] 권철신, 조근태, “기술우선도 결정을 위한 상호영향 계층분석모형의 개발”, 『한국경영과학회지』, 제27권, 제1호(2002), pp.1-17.
- [4] 김수영, 차재호, “Equal-Appearing Intervals Scale에서의 척도말단위축의 원인에 관한 연구”, *Korean Journal of Psychology*, Vol.26, No.1(2007), pp.23-57.
- [5] 미래창조과학부, 정부R&D 혁신방안, 2016
- [6] 미래창조과학부, 출연연구기관의 개방형 협력 생태계 조성안, 2013
- [7] 이순목, [사회과학을 위한 측정의 원리], 학지사, 2002.
- [8] 채서일, [사회과학 조사방법론], 학현사, 2002.
- [9] Baddeley, A., “The Magical Number Seven : Still Magic After All These Years?,” *Psychological Review*, Vol.101, No.2(1994), pp. 353-356.
- [10] Bañuls, V.A. and J.L. Salmeron, “A scenario-based assessment model-SBAM,” *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 74, No.6(2007), pp.750-762.
- [11] Bañuls, V.A. and J.L. Salmeron, “Benchmarking the information society in the long range,” *Futures*, Vol.39, No.1(2007), pp.83-95.
- [12] Banuls, V.A. and M. Turoff, “Scenario construction via Delphi and cross-impact analysis,” *Technological Forecasting and Social Change*, Vol.78, No.9(2011), pp.1579-1602.
- [13] Chesbrough, H.W., *Open Innovation : The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*, Harvard Business School Press, 2003.
- [14] Duval, A., E. Fontela, and A. Gabus, *Cross impact : a handbook of concepts and applications, Portraits of Complexity, Application of Systems Methodologies to Societal Problems*, Battelle-Geneva, Geneva, 1974.
- [15] Ebbinghaus, H., “Memory. A contribution to experimental psychology(H.A. Ruger, C.E. Bussenius, Trans.),” New York : Columbia University, 1913.
- [16] Eymard, J., “A Markovian Cross-Impact Model,” *Futures*, Vol.9, No.3(1977), pp.216-228.
- [17] Godet, M., *From Anticipation to Action : a Hand Book of Strategic Prospective*, UNESCO Publishing, Paris, 1994.
- [18] Gordon, T.J. and H. Hayward, “Initial Experiments with the Cross Impact Matrix Method of Forecasting,” *Futures*, Vol.1, No.2(1968), pp.100-116.
- [19] Guilford, J.P., “The computation of psychological values from judgments in absolute categories,” *Journal of Experimental Psychology*, Vol.22, No.1(1938), pp.32-42.
- [20] Miller, G.A., “The Magical Number Seven, Plus or Minus Two : Some Limits on Our Capacity for Processing Information,” *Psychological Review*, Vol.63, No.2(1956), pp. 81-97.
- [21] Novaky, E. and K. Lorant, “A Method for the Analysis of Interrelationships between Mutually Connected Events : A Cross-Impact Analysis,” *Technological Forecasting and Social Change*, Vol.12, No.2(1978), pp. 201-212.
- [22] Stephenson, W., “Correlating Persons instead of Tests,” *Character and Personality*, Vol.4, No.1(1935), pp.17-24.
- [23] Thompson, G.H., “On Complete Families of Correlation Coefficient and Their Tendency to Zero Tetrad Differences,” *British Journal*

- of Psychology*, Vol.26, No.1(1935), pp.63-92.
- [24] Thurstone, L.L., "Rank Order as a Psychological Method," *Journal of Experimental Psychology*, Vol.14, No.3(1931), pp.187-201.
- [25] Thurstone, L.L., "Theory of Attitude Measurement," *Psychological Review*, Vol.36, No.3(1929), pp.222-241.
- [26] Weimer-Jehle, W., "Cross-impact balances : a system-theoretical approach to cross impact analysis," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol.73, No.4(2006), pp. 334-336.