

실시간 프로젝트 위험관리를 위한 베이지안 네트워크 모형의 개발

김지영¹ · 안선웅^{2*}

¹한양대학교 정보경영공학과/²한양대학교 산업경영공학과

Developing a Bayesian Network Model for Real-time Project Risk Management

Jeeyoung Kim¹ · Suneung Ahn²

¹Department of Information & Management Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

²Department of Industrial & Management Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

Most companies have been increasing temporary work projects to maximize the usage of their resources. They also have been developing the effective techniques for analyzing and managing the state of the projects. In order to monitor the state of a project in real-time and predict the project's future state more accurately, this paper suggests the Bayesian Network (BN) as a tool for discovering the causes of project risk and presenting the failure probability of the project. The proposed BN modeling method with consideration of the Earned Value Management (EVM) method shows how to induce the predictive and conditional probability of the risk occurrence in the future. The advantages of the suggested model are (1) that the cause of a project risk can be easily figured out via the BN, (2) that the future value of the project can be sufficiently increased by updating relevant components of the project, and (3) that more credible prediction can be made in the similar and future situation by using the data obtained in current analysis. A numerical example is also given.

Key words: Project Risk Management, Earned Value Management, Bayesian Network

1. 서론

1.1 연구배경과 목적

현대의 경영환경에서는 새로운 패러다임과 새로운 기술이 빠르게 변화하면서 예상치 못한 일들이 자주 발생한다. 따라서 이윤 창출을 증대하고, 기업 경쟁력을 향상시키기 위해서는 비즈니스 프로세스의 수행과 관리에 있어서 신속한 대처와 정확한 예측이 필요하다. 이는 시간적 지연을 제거하여 보다

정확한 정보를 활용함으로써 가능해진다. 기업에는 다양한 인적자원 및 물질적자원이 산재되어 있고, 빠르게 변화하는 추세 때문에 동일 업무를 지속적으로 할 필요가 없어지는 경우가 많다. 그래서 기업들은 자원 활용의 극대화를 위해 일시적인 단위 업무인 프로젝트를 활성화하여 한정된 자원이 최대 효율을 낼 수 있도록 노력한다. 이러한 이유로 기업 운영의 중심으로 자리 잡아가는 다양한 프로젝트를 실시간으로 관리하여 성공 가능성을 높이는 것이 기업 경쟁력을 높이는 것이라고 할 수 있다.

* 연락저자 : 안선웅 교수, 426-791 경기도 안산시 사3동 1271번지 한양대학교 산업경영공학과,

Tel : 031-400-5267, Fax : 031-409-2423, E-mail : sunahn@hanyang.ac.kr

투고일(2010년 12월 07일), 심사일(1차 : 2011년 05월 02일), 게재확정일(2011년 05월 06일)

프로젝트 성공 가능성을 높이기 위해서 성패에 가장 큰 영향을 미치는 요인인 일정과 비용을 중심으로 초깃값을 산정하고, 프로젝트 상황을 분석하고 관리하는 기법들이 연구되었다. 프로젝트가 완료될 수 있는 시간을 계산하고 계획대로 진행되지 않을 경우, 중점적으로 관리할 프로세스를 알아내는 방법인 프로그램 평가검토기법(Program Evaluation and Review Technique), 비용 및 일정을 획득한 가치에 대한 차이 또는 비율로 계산하여 현재까지 성과를 파악하고 앞으로의 상태를 예측하는 획득가치관리(Earned Value Management, EVM)와 같은 기법들이 연구되고 개발되고 있다. 이와 같이 프로젝트 일정 및 비용을 통제하고 그 성과 측정을 통해 위험을 알리는 방법들이 활발히 연구되는 가장 큰 이유는 적은 자원을 투입하여 실시간으로 현재 상태 모니터링하고 앞으로의 상태를 정확히 예측하고, 대응해야만 프로젝트의 실패를 막을 수 있기 때문이다. 그러나 프로젝트 위험에 대한 연구의 대부분은 물 기반 방식으로 일정 사건이 발생하면 경고하는 방식을 사용하기 때문에 문제가 발생한 후에 대처하게 되거나 문제 발생 전이라 해도 갑작스러운 경고를 받게 된다(Albaghddadi *et al.*, 2006). 또 소개된 프로젝트 관리 기법들도 확정적인 방법을 쓰거나 업무담당자의 주관적 의견만 반영하거나 현재까지 추이가 지속될 것이라는 가정으로 향후 위험정도를 예측한다(Fleming and Koppelman, 1996). 이는 위험정도를 예측하는 방법이 될 수 있으나 변화를 고려하지 않기 때문에 예측 정확도를 높이기 어렵다.

이에 본 연구에서는 실시간으로 프로젝트의 실패 위험성과 그 위험의 원인을 파악할 수 있는 확률적 예측 도구로 베이시안 네트워크(Bayesian Network) 모형을 제시한다. EVM 지표를 활용하고, 단위업무별 담당자(전문가)의 의견을 반영하는 확률모형인 베이시안 네트워크 모형을 개발하여 앞으로의 프로젝트 상태에 대한 예측 정확도를 높이고자 한다.

1.2 프로젝트 위험관리에 관한 기존연구

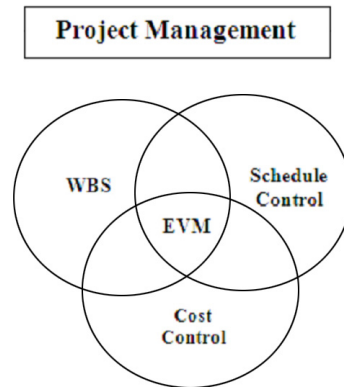
프로젝트 관리는 가치공학(Value Engineering)에 대한 관심으로 시작되어 범위, 일정, 비용, 품질, 자원 등 다양한 분야에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 미국 프로젝트관리 연구소(Project Management Institute)의 PMBOK(Project Management Body of Knowledge)에 기술된 위험에 대한 대응에 관한 내용과 건설협회(Construction Industry Institute)에서 연구된 IPRA(International Project Risk Assessment) 매뉴얼 등에서 위험인자의 분석과 대응에 관한 전반적인 내용을 찾아볼 수 있다. PMBOK는 포괄적 위험관리 프로세스에 관하여 “프로젝트 위험관리 목표는 긍정적인 위험의 발생가능성 및 영향성을 증대시키고, 부정적인 위험의 발생 가능성 및 영향성은 감소시키는 것이다”라고 기술하고 있으며, 위험관리를 통해 프로젝트 진행을 저해하는 위험이 프로젝트에 부정적 영향만을 미치는 것이 아니라 기회로 작용될 수 있다고 언급했다(PMI 2004). 프로젝트 관리에 대한 연구 방법 또한 다양하게 연구되어 왔다. 실시간 워크플로우

모니터링을 통해 처리되는 비즈니스 프로세스의 데이터 흐름과 다양한 이벤트의 변화를 곧바로 감지하여 반영될 수 있도록 설계하여 관리자가 그룹의 움직임을 알 수 있도록 하고, 일반 업무 수행자에게도 적용되어 현재 자신이 속한 그룹의 업무현황과 자신의 업무 파악에도 도움을 주는 연구도 수행되었다(Frank and Dieter, 1996). Khodakarami와 Fenton은 프로젝트의 일정관리에 주요경로법(Critical Path Method, CPM)과 베이시안 네트워크를 적용하여 프로젝트 일정관리에서의 불확실성을 통제하기 위한 연구를 진행하였다(Khodakarami *et al.*, 2007).

2. 프로세스의 위험측정을 위한 지표 및 방법론

2.1 EVM을 이용한 프로세스 평가지표

비즈니스 프로세스의 수행결과를 평가하는 주요 항목에서 비용과 일정은 가장 주요한 부분을 차지한다. 이 때문에 많은 연구에서 비용과 일정을 연계하여 관리하는 연구들이 진행되어 왔으며, 초기에 프로젝트 관리 분야에서 파생되어 획득가치관리(Earned Value Management, EVM)라는 일정-비용 통합관리의 개념이 생겨났다. EVM은 <Figure 1>과 같이 표현할 수 있다(Fleming and Koppelman, 1996).



※ WBS(Work Breakdown Structure)

Figure 1. Outlined Diagram of EVM

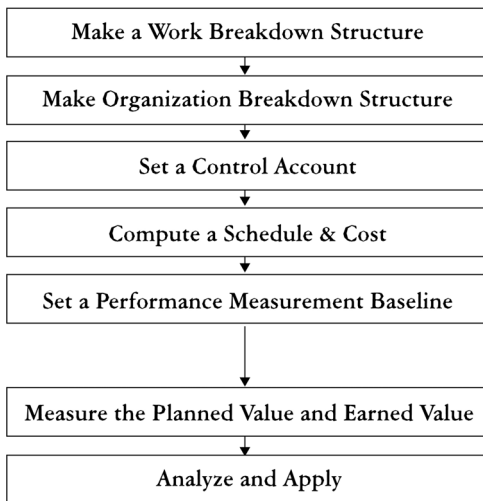
EVM에서는 비용과 일정 계획 대비 실적을 가치라는 통합된 기준으로 관리하여 이를 통해 현재 문제 파악하고 대응방안을 수립 할 수 있다(Fleming and Koppelman, 1996). 이를 토대로 적절한 계획 수정이 가능하게 되고, 모든 사업에 가장 주요한 요소인 비용관점에서 계획과 실적의 차이를 정확하게 측정하고 분석할 수 있도록 객관적 기준을 제공한다. 또한 비즈니스 프로세스가 마무리 단계에 도달할 때까지 소요될 비용과 기간에 대해 주기적으로 사전 분석 및 예측이 가능하며, 일정지연 및 비용초과 등 위험요인을 사전에 파악하며 문제해결의 실마리를 제공하는 유효한 기법이라 할 수 있다.

Table 1. Key Indicators and Description of EVM Method

Indicator Name	Acronym	Description
Budget at Completion	BAC	The total planned value at the end of the project
Planned Value	PV	Almost always an allocation of the total project budget
Earned Value	EV	Accumulated according to the earning rule
Actual Cost	AC	Actually spent cost from the beginning project until now
Cost Variance	CV	EV-AC, greater than 0 is good (under budget)
Schedule Variance	SV	EV-PV, greater than 0 is good (ahead of schedule)
Cost Performance Index	CPI	EV/AC, greater than 1 is good (under budget)
Schedule Performance Index	SPI	EV/PV, greater than 1 is good (ahead of schedule)
Estimate to Complete	ETC	Estimate to complete the project
Estimate at Completion	EAC	Total cost of the project at completion(AC+ETC)

EVM 기법 적용 단계는 <Figure 2>와 같다. EVM 기법을 적용하기 위해서는 먼저 프로젝트 범위와 이를 구성하는 모든 작업을 명확하게 정의하여 단위업무기술서(Work Breakdown Structure)를 작성하고, 이를 토대로 정의된 작업을 수행할 단위업무조직도(Organization Breakdown Structure)를 작성하여 두 가지 체계를 연계하여 운영한다(Fleming and Koppelman, 1996).

Planning Area



Action Area

Figure 2. Application Steps of EVM Method

<Table 1>에 나타난 지표는 크게 초기산정지표, 측정지표, 분석지표, 예측지표로 구분된다. 프로젝트 시작단계에서 책정되는 총실행예산(BAC)과 계획가치(PV)는 프로젝트 중간에 변경되지 않으므로 초기산정지표에 해당된다. 또 획득가치(EV), 실제비용(AC)은 프로젝트를 진행하면서 관리자가 필요하다고 생각되는 시점에 작업량 및 지출비용을 측정해야하므로 측정지표에 해당한다. 확정지표와 측정지표를 사용하여 계산되는 원가차이(CV), 일정차이(SV), 비용성과지수(CPI), 일정성과지수(SPI)는 분석지표에 해당하고, 측정시점 이후, 잔여분에 대한 추정 값이 포함되는 잔여분추정치(ETC), 완료시점추정치(EAC)는 예측지표이다.

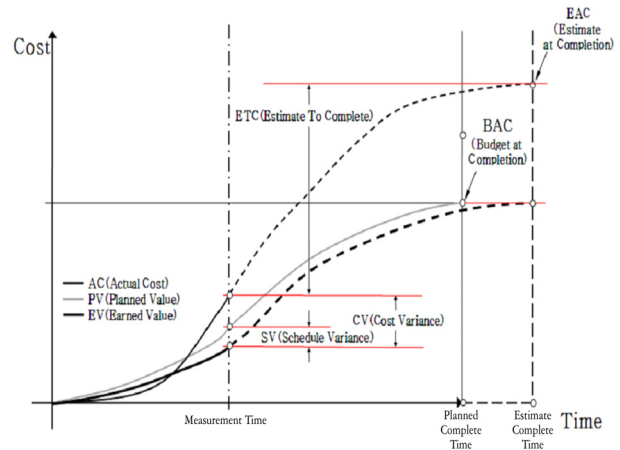


Figure 3. Examples for EVM Graph

원가차이(CV)와 일정차이(SV) 두 값을 효율 척도로 변환하여 프로젝트의 원가 및 일정 성과를 나타낼 수 있다. 이들 지표 사이의 관계 그래프는 <Figure 3>과 같다.

위의 두 지표는 계획가치(PV), 획득가치(EV), 실제원가(AC)의 차이를 통해 현재 프로젝트 성과를 판단하고, 비용성과지수(CPI)와 일정성과지수(SPI)는 그 비율을 통해 성과를 판단한다. 이는 다른 시점이나 타 프로젝트와의 상대적 크기비교가 가능하도록 하고, 성과가 향상되거나 저하되고 있는지 여부를 파악할 수 있다. 잔여기간 동안 발생할 가치에 대한 추정 값은 위의 두 성과지수를 이용하여 잔여분 추정치(ETC)와 완료시점 추정치(EAC)로 나타낸다.

Table 2. Types of ETC Estimation

Type of ETC Estimation		Calculation Methods
Based on Irregular Variance	Using new estimate	Set a New Planned Value
	Using remaining budget	$BAC - EA$
Based on Regular Variance	Using CPI(Cost Performance Index)	$\frac{BAC - EA}{CPI}$
	Using SPI(Schedule Performance Index)	$\frac{BAC - EA}{SPI}$

<Table 2>는 잔여분추정치를 예측하는 방법에 대한 설명이다. EVM에서는 이러한 예측값을 계획과 현황의 차이분석과 시간대비 프로젝트의 성과향상 또는 저하 여부를 판별하는데 사용한다. 그리고 일정시점에서 각 지표를 측정하여 허용 가능한 범위를 벗어날 경우 관리자에게 경고하여, 프로젝트 전반에 걸쳐 계획을 변경하거나 갱신하게 한다. 이는 프로젝트의 성과와 효율을 높이는 측면에서 매우 유용한 자료이다. 그러나 잔여분 추정치(ETC)의 추정과정에서 이후 기간에 확률적 변동을 고려하지 않고, 각 단위업무 별 영향요소에 대한 처리부서의 판단 또는 지금까지의 성과지수 중 선택하여 적용하거나 변동이 없을 것이라고 가정하기 때문에 예측 오차의 크게 한다. 이에 단위별 처리부서의 의견과 지금까지의 성과지수를 고려하여 현시점에서 확률적 예측이 가능한 모형을 제시하고자 다음 절에서는 베이지안 네트워크(Bayesian Network)에 대해 설명한다.

2.2 베이지안 네트워크

베이지안 네트워크(Bayesian Network)는 방향성 비순환 그래프(Directed Acyclic Graph)로 여러 가지 변수들의 조건부 확률을 노드(node)와 호(arc)를 이용하여 <Figure 4>와 같이 그래픽 기반 모형으로 표현하는 확률적 모델이다. 이 때, 노드는 각 확률 변수를 나타내며, 호는 노드 간의 의존성을 나타낸다. 베이지안 네트워크에서 의존성은 화살이 원인에서 결과로 나타나는 우연적 관계를 말한다. 이렇게 표현된 네트워크의 각 노드는 베이스 추론을 기반으로 각 변수의 의존 관계를 통해 조건부 확률표(Conditional Probability Table)를 갖는다. Pearl의 연구에 따르면 베이지안 네트워크는 부분적인 증거만으로도 다른 노드에 대한 추론이 가능하기 때문에 불확실한 지식을 추론하는데 사용할 수 있다(Pearl, 2000).

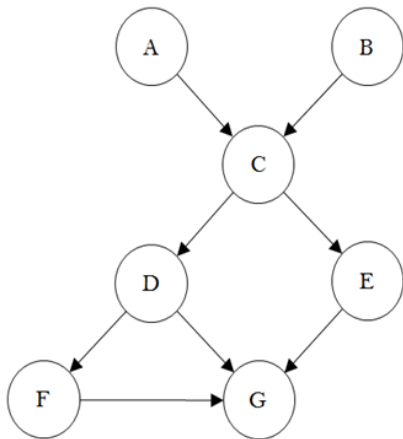


Figure 4. Example of a Bayesian Network

베이지안 네트워크 추론을 위해 사용되는 기본 수식은 아래 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$P(Y|X) = \frac{P(X|Y)P(Y)}{P(X)} \quad (1)$$

$$P(Y|X, Z) = \frac{P(X|Y, Z)P(Y|Z)}{P(X|Z)} \quad (2)$$

가지고 있는 데이터를 위의 식을 적용하여 조건부 확률표를 구한다. <Figure 4>의 예에서 노드 A와 B는 영향을 주는 노드가 없으므로 부모 노드라고 부르며 조건부 확률을 갖지 않는다. 이 외에 노드들은 조건부 확률표를 가지며, 각각의 노드의 확률변수를 x 라 하고, 부모 노드의 상태를 π 라 하면 각 노드의 조건부 확률표의 값은 다음의 식 (3)을 통해 얻는다.

$$P(x) = \sum_i P(x | \pi_i) P(\pi_i) \quad (3)$$

여기에서 i 는 부모노드의 상태 수를 나타낸다. 변수의 개수가 증가할 경우에는 위와 같은 식으로 각 노드의 확률값을 구하기 어렵다. 이런 경우 모든 노드의 결합 확률 분포를 사용하는 연쇄법칙(Chain Rule)을 이용한다. 연쇄법칙을 일반화하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_i P(x_i | Parents(x_i)) \quad (4)$$

여기에서 n 은 전체 노드의 수를 의미한다. <Figure 4>의 베이지안 네트워크는 식 (5)와 같이 결합 확률과 연쇄법칙을 사용하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P(U) &= P(A, B, C, D, E, F, G) \\ &= P(A)P(B)P(C|A, B)P(D|C) \\ &\quad P(E|C)P(F|D)P(G|D, E, F) \end{aligned} \quad (5)$$

연쇄법칙을 이용하여 얻은 결합 확률과 데이터를 수집하여 얻은 조건부 확률을 통해 사후확률(Posterior Probability)을 추론할 수 있다.

대다수의 프로젝트는 일시적인 업무라는 특성 때문에 같은 유형의 데이터가 적고, 진행 중 문제의 발생이 다양한 요소에서 기인할 수 있다는 점 등이 차후 예측을 어렵게 하는 요인으로 꼽힌다. 베이지안 네트워크의 장점은 이런 어려움을 축소시켜 프로젝트의 위험을 효과적으로 예측하고 관리하는데 유용한 도구가 된다. 이에 다음 장에서는 EVM 지표를 이용한 프로젝트 위험관리를 위한 베이지안 네트워크 모형 개발에 대하여 설명한다.

3. 실시간 위험관리를 위한 베이지안 네트워크 모형

본 장에서는 획득가치관리(EVM)의 지표를 이용하여 프로젝트 실시간 위험관리를 위한 베이지안 네트워크 모형을 다룬다. 베이지안 네트워크 모형을 개발하고 사용하는 과정은 <Figure

5>와 같다. 제 3.1절에서는 프로젝트 영향 요인 분석 및 자료 수집에 관하여 설명한다. 제 3.2절에서는 인과관계를 고려한 베이지안 네트워크 모형의 도식화와 그에 따른 조건부 확률표의 산출 방법을 설명하여 제안 모형을 제시한다. 제 3.3절에서는 ROC 곡선(Receiving Operation Curve)을 이용한 제안모형의 평가방법에 대해 설명한다.

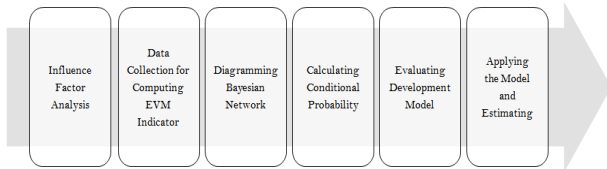


Figure 5. Development Process of Bayesian Network for Project Risk Management

3.1 프로젝트 영향 요인 분석 및 자료수집

프로젝트 성공을 판단할 수 있는 요소로 일정, 비용, 품질을 꼽는다. 이 같은 이유로 이들 요소의 효율적 관리가 프로젝트 성공의 관건이 된다. 그 중에서도 일정과 비용은 핵심 요소라 할 수 있다. 이를 효율적으로 운영해야만 자원이 효과적으로 배분되어 고객이 요구하는 품질을 달성할 수 있기 때문이다. 또한 다른 관리 요소들의 성과도 결국 일정의 지연이나 비용의 초과 등으로 나타나기 때문에 모든 영향 요인을 시간과 비용으로 표현할 수 있다. 그러므로 본 장에서 제시할 베이지안 네트워크의 각 노드 확률변수로 제 2장에서 설명한 일정과 비용의 통합 관리기법인 EVM 기법의 지표를 사용한다.

3.2 베이지안 네트워크 도식화 및 조건부확률표 계산

본 논문의 베이지안 네트워크는 다음과 같이 가정한다.

- (1) 프로젝트 영향요인은 네트워크의 최상위에 위치하는 부모노드로 하고, 이에 대한 상태는 구간으로 나누고, 이산(discrete) 확률변수로 정의한다.
- (2) 프로젝트 특성에 따라 달라지는 중점 영향요인을 본 모형에서는 물질자원, 인적자원, 기술수준으로 한다.
- (3) 프로젝트 관리자가 지정한 시점에서 측정지표인 획득가치(EV)와 실제비용(AC)이 측정가능하다.
- (4) 비용차이(CV)와 일정차이(SV) 노드는 허용오차 초과여부를 구간으로 설정하고, 이산(discrete) 확률변수로 정의한다.
- (5) 성과지수 및 위험 상태를 구간으로 정의하고, 이산(discrete) 확률변수로 정의한다.

베이지안 네트워크를 도식화하기 위해서는 먼저 각 노드의 인과관계를 파악해야 한다. 부모노드인 물질자원, 인적자원, 기술수준의 변화는 각각 계획된 일정과 비용에 영향을 줄 수 있다. 이 때문에 비용차이(CV)와 일정차이(SV)에 호(arc)를 연결한다. 이 차이는 곧 성과지표인 비용성과지표(CPI)와 일정성과

지표(SPI)에 영향을 미친다. 또한 두 지표는 초기 일정 및 예산 대비 현재 획득가치(EV)를 기초로 생성되었으므로 현재 프로젝트 전반에 걸친 위험을 표현한다. 영향요인 및 지표를 각각 하나의 노드로 표현하고, 원인관계를 호로 연결하면 <Figure 6>과 같다.

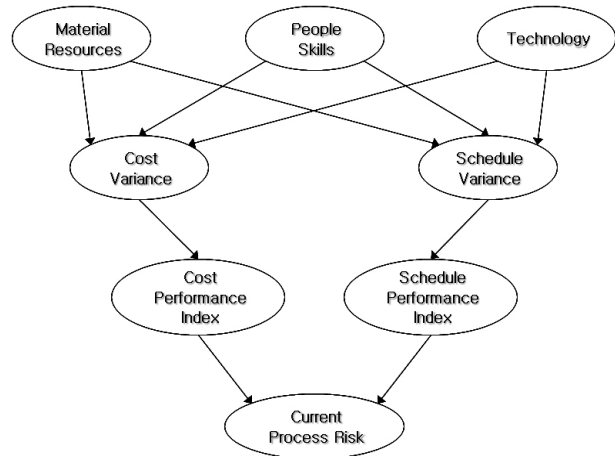


Figure 6. Bayesian Network Model for Project Risk Management

Table 3. Example of Conditional Data about Causal Relationship

		CV			Sum
		Negative	in tolerance	Positive	
CPI	0-0.5	6	0	0	6
	0.5-1	3	7	1	11
	1-1.5	1	5	5	11
	1.5-2	0	0	4	4
Sum		10	12	10	32

주) 김선규, 김재규(2000) EVMS 최종공사비 예측 모델 최적성과지수에 대한 고찰.

박은진, 김수영, 황효수(2002) EVMS에서 최종예상공사비(ETC) 평가방법에 관한 검증.

<Figure 6>의 각 노드는 확률표를 갖는다. 이 때 최상위에 위치한 부모노드는 일반 확률표를 갖게 된다. 이외의 다른 노드는 연결된 노드를 조건으로 하는 조건부 확률표를 가진다. <Table 3>은 원인관계에 있는 비용차이와 비용성과 지수에 대한 자료의 예이다. <Table 3>에서 비용차이가 ‘positive’일 때, 비용성과지수가 ‘1-1.5’에 있을 확률은 아래 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$P(CPI = 1 - 1.5 | CV = positive) \tag{6}$$

$$= \frac{P(CPI = 1 - 1.5, CV = positive)}{\sum_{i=0-0.5, 0.5-1, 1-1.5, 1.5-2} P(CV = positive | CPI = i)}$$

각 노드별 자료를 수집하여 베이즈 정리(Bayes Rule) 및 연쇄법칙을 이용하여 조건부 확률표를 구한다. Figure 6의 네트워크

전체 결합 확률(Joint Probability)은 연쇄 법칙을 사용하여 식 (7) 과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(N) &= P(M, P, T, CV, SV, CPI, SPI, Risk) \\
 &= P(M)P(P)P(T)P(CV|M, P, T) \\
 &\quad \cdot P(SV|M, P, T)P(CPI|CV) \\
 &\quad \cdot P(SPI|SV)P(Risk|CPI, SPI)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

식(7)에서 N은 제시한 베이지안 네트워크이며, 식에 포함된 확률변수는 각 노드의 약자이다. 이때, 각 노드의 조건부 확률표는 사전확률이다. 예측시점에서의 사전확률과 우도확률(Likelihood) 과의 곱을 통해 사후확률을 추론한다.

3.3 모형의 예측력 검증

모형의 구축 후에는 얼마나 효율적이고 안정적인 결과를 제공할 것인가를 평가 할 필요가 있다. 모형평가란 예측을 위해 만든 모형이 임의모형(Random Model)보다 우수한 예측력을 보유하고 있는지 비교 분석하는 과정이라 말할 수 있다. 본 연구에서는 ROC 곡선(Receiving Operation Curve)을 구하여 모형을 평가하고자 한다. 평가하려는 모형의 예측정확도가 높으려면 T-POSITIVE(True Positive Rate)가 높고, F-POSITIVE(False Positive Rate)가 낮아서 정상상태를 위험상태로 판단하거나 위험상태를 정상상태로 판단하는 두 가지 오류가 모두 작아야 한다. T-POSITIVE와 F-POSITIVE을 기초로 ROC 곡선을 그리면 아래 <Figure 7>과 같다. <Figure 7>에서 기울기가 45도인 점선은 정보가 전혀 없는 상태에서의 모형을 나타낸다. 모형의 예측정확도가 높을수록 왼쪽 위로 많이 휘어진 그래프 모양을 갖게 된다.

모형의 예측력 정확도 수준의 정량적 비교는 ROC 곡선 아래의 면적(Area Under ROC; AUROC)을 이용한다. <Figure 7>에서 빗금 친 부분이 AUROC이다. 이 크기는 0.5와 1사이의 값을 갖는 데 면적의 크기가 0.5보다 클수록 설정된 모형의 예측력 정확도는 증가한다고 할 수 있다. 반면 크기가 0.5라면 설정된 모형은 반응변수에 대한 판별력이 없다는 의미로 해석한다.

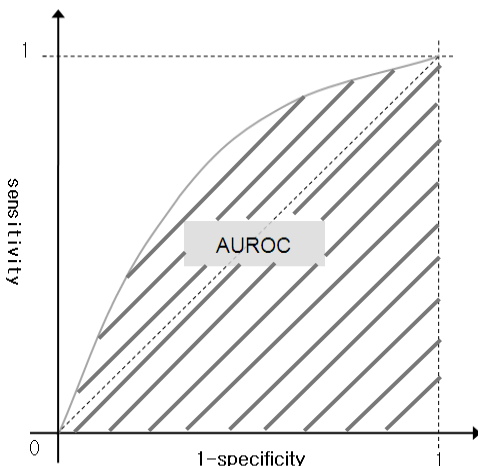


Figure 7. Example of ROC Curve

4. 실험

4.1 수치예제

본 연구의 수치예제 자료는 총 11건의 아파트 건축에 관한 수치자료이며, 측정시점 별로 총 44건의 자료로 이루어져 있다 (이성범, 2002). 각 자료는 전체 프로젝트를 기준으로 30%, 50%, 80%, 100% 시점에서 측정된 자료이다. 이 자료를 통해 모형을 개발하고, ROC 곡선을 통해 제안모형과 기존 EVM의 잔여분추정치(ETC) 추정법과의 예측력을 비교한다.

베이지안 네트워크 모형은 제 3장에서 제시한 모형을 Hugin 7.0 Lite 소프트웨어를 사용하여 구현하였다. 각 조건부 확률표는 위에서 부록의 자료를 바탕으로 구간을 설정하고, 전체 자료에 대한 각 구간에 해당하는 자료의 비율로 계산하였다. 이때 프로젝트 영향요소 및 일정, 비용차이의 구간 판단은 각 비용을 해당하는 요소에 분류하고, 오차범위(예비비 한도 내)를 감안하여 계획예산보다 초과소요 될 경우 ‘높음’, 오차범위 안에 있을 경우 ‘보통’, 그보다 낮을 경우 ‘낮음’으로 분류하였다. 이를 통해 구한 조건부 확률표 중 일정차이와 비용차이는 <Table 4>, <Table 5>와 같다.

소프트웨어를 통해 제안한 모형의 조건부 확률표를 적용하고, 노드와 호를 연결하여 베이지안 네트워크 모형은 <Figure 8>과 같이 구현하였다.

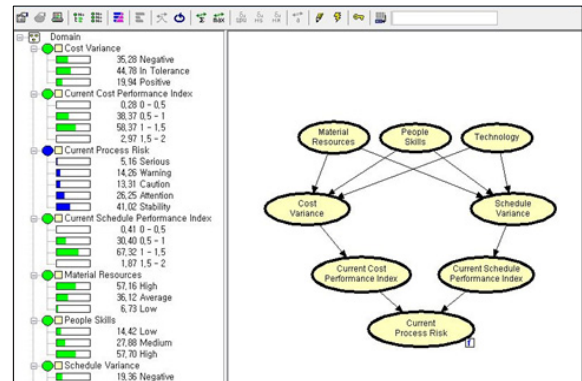


Figure 8. Bayesian Network Model using Software

4.2 결과분석

총 11개의 자료 중 8개의 자료는 베이지안 네트워크 모형을 개발하는 데 사용하였으며, 나머지 3개는 예측정도를 비교하기 위해 사용하였다. 본 모형과 EVM 기법의 비교를 위해서는 같은 지표를 사용해야 한다. 사례 1, 2, 3의 완료시점과 비교를 위해 30% 시점에 프로젝트 완료시점의 예측한 비용차이 값은 <Table 6>과 같다.

EVM 기법을 이용한 예측은 세 개의 사례 중 두 개가 허용오차를 벗어난 것을 알 수 있고, <Table 6>에서 제안모형의 예측은 허용오차 이내이거나 이하일 확률이 세 경우 모두 0.8이상

Table 4. Conditional Probability Table of SV then Known the Influence Factor

Technology		Insufficient									Sufficient								
		L			M			H			L			M			H		
People Skills		H	M	L	H	M	L	H	M	L	H	M	L	H	M	L	H	M	L
SV	Upper Tolerance	0.81	0.53	0.38	0.02	0.92	0.72	0.06	0.07	0.25	0.03	0.33	0.55	0.46	0.03	0.94	0.27	0.38	0.43
	In Tolerance	0.18	0.46	0.50	0.94	0.03	0.16	0.04	0.02	0.13	0.95	0.25	0.36	0.52	0.03	0.03	0.27	0.38	0.13
	Lower Tolerance	0.01	0.01	0.13	0.04	0.05	0.12	0.90	0.92	0.63	0.02	0.42	0.09	0.01	0.94	0.03	0.45	0.25	0.43

Table 5. Conditional Probability Table of CV then Known the Influence Factor

Technology		Insufficient									Sufficient								
		L			M			H			L			M			H		
People Skills		H	M	L	H	M	L	H	M	L	H	M	L	H	M	L	H	M	L
CV	Upper Tolerance	0.71	0.01	0.33	0.04	0.47	0.30	0.03	0.03	0.43	0.02	0.04	0.19	0.04	0.02	0.07	0.50	0.14	0.33
	In Tolerance	0.12	0.98	0.44	0.86	0.01	0.50	0.05	0.02	0.43	0.94	0.94	0.69	0.95	0.50	0.00	0.33	0.43	0.33
	Lower Tolerance	0.18	0.02	0.22	0.09	0.52	0.20	0.92	0.95	0.14	0.05	0.02	0.13	0.01	0.48	0.93	0.17	0.43	0.33

Table 6. Comparison of CVs of EVM method and Suggested Model at Completion

Sample	EVM Method		Suggested Model	
	Prediction Error	Tolerance		
1	5,184	±10,664	Prob. of Upper tolerance	0.032
			Prob. of In tolerance	0.726
			Prob. of Lower tolerance	0.242
2	-1,874	±11,768	Prob. of Upper tolerance	0.248
			Prob. of In tolerance	0.690
			Prob. of Lower tolerance	0.062
3	-17,407	±10,333	Prob. of Upper tolerance	0.148
			Prob. of In tolerance	0.711
			Prob. of Lower tolerance	0.141

인 것을 알 수 있다. 그러나 구간에 대한 확률과 금액에 대한 예측값을 비교하는 것은 정확하지 못한 판단이 될 수 있으므로 ROC 곡선을 통해 모형에 대한 예측력 검정을 수행하였다.

<Figure 9>는 EVM 기법에서의 잔여분추정치(ETC) 추정법 세 가지에 대한 ROC 곡선을 점선으로 표시했다. 그리고 제안 모형의 ROC 곡선을 실선으로 표시하였다. 회색 실선은 전혀 정보가 없을 경우의 모형을 나타내는 기준선이다.

ROC 곡선은 기술기가 45도인 직선에서 멀어질수록 예측 정확도가 높다는 것을 제 3장에서 설명하였다. <Figure 9>에서도 제안모형의 ROC 곡선이 왼쪽 위로 더 올라간 것을 알 수 있으나 정량적 비교 분석을 위해 AUROC(Area Under ROC)를 이용한다. <Figure 10>은 F-POSITIVE를 기준으로 AUROC의 누적값을 그래프로 나타낸 것이다.

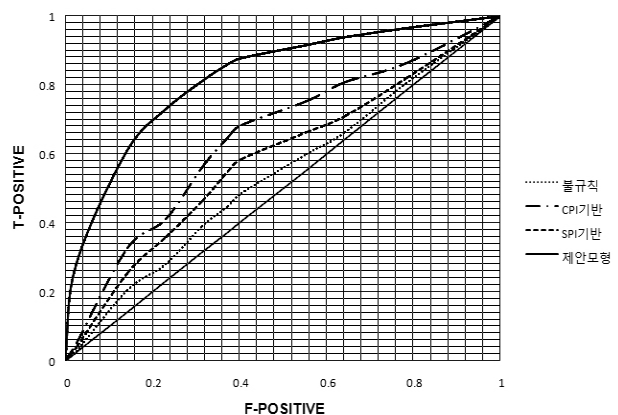


Figure 9. ROC Curve of EVM Method and Suggested Model

Table 7. T-POSITIVE and Cumulative AUROC based on F-POSITIVE

F-POSITIVE	T-POSITIVE				AUROC(Area Under ROC)			
	Based on Irregular	Based on Regular CPI	Based on Regular SPI	suggested model	Based on Irregular	Based on Regular CPI	Based on Regular SPI	suggested model
0.0248	0.0277	0.0526	0.0402	0.2837	0.0003	0.0007	0.0005	0.0035
0.1429	0.2064	0.3263	0.2544	0.6104	0.0142	0.0230	0.0179	0.0563
0.2314	0.2805	0.4099	0.3579	0.7295	0.0357	0.0556	0.0450	0.1156
0.3143	0.3905	0.5616	0.4623	0.8125	0.0635	0.0959	0.0790	0.1795
0.3743	0.4492	0.6495	0.5493	0.8593	0.0887	0.1322	0.1093	0.2297
0.4043	0.4857	0.6847	0.5852	0.8776	0.1027	0.1522	0.1263	0.2557
0.5543	0.6009	0.7547	0.6628	0.9165	0.1842	0.2602	0.2200	0.3903
0.6438	0.6633	0.8098	0.7104	0.9376	0.2408	0.3302	0.2814	0.4732
0.7857	0.8068	0.8647	0.8208	0.9646	0.3452	0.4490	0.3901	0.6082
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.5387	0.6488	0.5852	0.8087

<Figure 10>과 <Figure 7>을 보면 비용성과지표(CPI)를 기반으로 하는 예측방법이 AUROC의 값 약 0.64로 EVM 기법에서 사용하는 세 가지 예측기준 중에서 높은 값을 보였으며, 제안모형의 AUROC 값은 약 0.81로 기존 EVM 기법에 비해 프로젝트 위험을 나타내는 지표로 사용가능한 잔여분에 대한 예측력이 높다는 결과를 나타낸다.

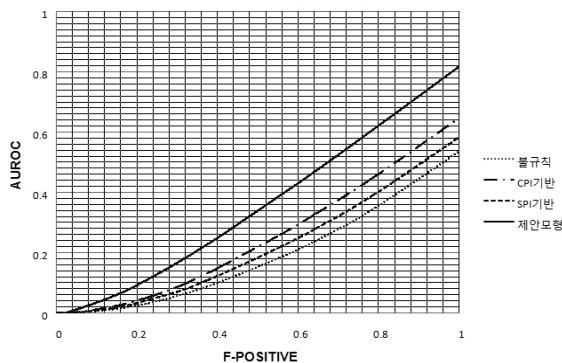


Figure 10. AUROC of EVM Method and Suggested Model

5. 결론

본 연구에서는 베이지안 네트워크를 이용하여 프로젝트의 위험을 실시간으로 예측 가능하게 하는 모형을 제안하였다. 제안한 모형의 기본 지표는 프로젝트에서 비용과 일정을 통합 관리하는 EVM의 지표를 사용하였으며, 이를 베이지안 네트워크 모형으로 개발하였다.

프로젝트 30% 시점에서의 완료시점 비용차이에 대한 예측값과 ROC 곡선을 통한 예측력 정확도를 비교하였다. 제안모형은 현재까지 성과지표만을 사용하는 기존 방법과는 달리 비슷한 프로젝트의 같은 시점에서의 성과지표의 예측정도를 확률

로 사용하기 때문에 실제와 더 가까운 결과 값을 예측할 수 있다는 결론을 도출하였다.

제안한 모형의 장점은 인과관계 표현이 가능한 베이지안 네트워크를 이용하기 때문에 위험 발생이 관측될 때 그 원인 파악이 용이하고, 프로젝트 전반에 걸친 자료의 갱신을 하지 않아도 일부 변경된 자료만으로 충분히 예측값을 갱신할 수 있다. 이는 프로젝트의 상태를 파악하는 데 드는 비용을 줄이고 시간을 단축시켜 문제 상황에 대한 빠른 대처와 효율적인 자원의 활용을 가능하게 한다. 또한 시간이 지남에 따라 얻어지는 자료를 통해 지속적으로 확률값을 갱신하여 더 나은 예측력을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 베이지안 네트워크의 변수로 사용한 영향요인과 성과지표의 상태를 구간으로 정의하여 확률값을 계산하였다. 그러나 이는 상태 확률값에 대한 민감도를 떨어뜨려 예측 정확도에 영향을 미칠 수 있다. 이에 지표와 영향요인, 프로젝트의 위험을 연속확률 변수인 모형으로 발전시키는 연구가 필요하다.

참고문헌

Ahn, H., Kim, K., and Han, I. (2005), Consolidated project management with time, cost, quality consideration : A case of web-site construction process, *The e-Business Studies*, 6(2),193-212.

Albaghdadi, M., Briley, B., and Evens, M. (2006), Event Storm Detection and Identification in Communication Systems, *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 602-613.

Barry, W. B. (1991), Software Risk Management : Principles and Practices, *IEEE Software*, 8, 32-41.

Fleming, Q. W. and Koppelman, J. M. (1996), Earned Value Project Management, Project Management Institute, Newtown Square, USA.

Frank, L. and R. Dieter (2000), Production Workflow Concepts and Techniques, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Gamez-Jose, A., Moral, S., and Salmeron A. (2004), Advances in Bayesian Networks, Springer, New York, USA.

- Grigori, D., Casati, F., Castellanos, M., Dayal, U., Sayal, M., and M. C. Shan (2004), Business Process Intelligence, *Computers in Industry*, 53, 321-343.
- Jensen-Finn, V., An Introduction to Bayesian Networks, UCL Press, London, UK, 1996.
- Jensen-Finn, V. (2001), Bayesian Networks and Decision Graphs, Springer, New York, USA.
- John, W. and Edward Gibson, G. (2003), International Project Risk Assessment : Methods, Procedures and Critical Factors., *Construction Industry Institute (CII)*, Australia.
- Jung, Y. and Lee, Y. (1999), Understanding of the Concept and utilization method of EVMS, *Construction Economy Research Institute of Korea Working Paper*, 16, 1-41.
- Kang, B., Cho, N., Kim, H., and Kang, S. (2008), Real-time Risk Measurement of Business Process Using Decision Tree, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 31(4), 49-58.
- Khodakarami, V., Fenton, N., and M. Neil (2007), Project Scheduling : Improved Approach to Incorporate Uncertainty Using Bayesian Networks, *Project Management Journal*, 38(1), 1-30.
- Mary, S. (2000), Risk Factors in Enterprise Wide Information Management Systems Projects, the 2000 ACM SIGCPR Conference on Computer Personnel Research, 180-187.
- Lee, S. (2002), A Study On the Predicting Method of the EAC according to the Performance Index of Construction Projects, *Journal of The Korea Institute of Building Construction*, 2(4), 105-112.
- McFarlan, F. W. (1981), Portfolio Approach to Information Systems, *Harvard Business Review*, 142-150.
- Mittal, A. and Kassim, A. (2007), Bayesian Network Technologies : Applications and Graphical Models, IGI Publishing, Pennsylvania, USA.
- OMB (1997), Principles of Budgeting for Capital Asset Acquisitions, Office of Management and Budget (OMB), US Government Printing Office, Washington, USA.
- Pearl, J. (2000), Causality : Models, Reasoning and Inference, Cambridge University Press, New York, USA.
- PMI (2004), A Guide to the Project Management Body of Knowledge : PMBOK Guide, 3rd, Project Management Institute (PMI), USA.



김지영

2010년 한양대학교 정보경영공학과 석사
 현재 : 경기도시공사
 관심분야 : 확률모형, 신뢰성 공학, 프로젝트 관리



안선웅

1995년 University of California at Berkeley
 산업공학 박사
 현재 : 한양대학교 산업경영공학과, 교수
 관심분야 : 베이지안 추론, 신뢰성 공학, 정보 공학