

베이지안 네트워크를 이용한 아차사고 평가 모델 개발 및 주요 원인 도출

하선영¹ · 이미정² · 백종배^{3†}

Development of Near miss Assessment Model Using Bayesian Network and Derivation of Major Causes

Seon Yeong Ha¹ · Mi Jeong Lee² · Jong-Bae Baek^{3†}

†Corresponding Author

Jong Bae Baek

Tel : +82-43-841-5337

E-mail : jbbae@ut.ac.kr

Received : May 26, 2023

Revised : July 26, 2023

Accepted : August 21, 2023

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : The relationship between near misses and major accidents can be confirmed using the ratios proposed by Heinrich and Bird. Systematic reviews of previous national and international studies did not reveal the assessment process used in near-miss management systems. In this study, a model was developed for assessing near misses and major factors were derived through case application. By reviewing national and international literature, 14 factors were selected for each dimension of the P2T (people, procedure, technology) model. To identify the causal relationship between accidents and these factors, a near-miss assessment model was developed using a Bayesian network. In addition, a sensitivity analysis was conducted to derive the major factors. To verify the validity of the model, near-miss data obtained from the ethylene production process were applied. As a result, “PE2 (education),” “PR1 (procedure),” and “TE1 (equipment and facility not installed)” were derived as the major factors causing near misses in this process. If actual workplace data are applied to the near-miss assessment model developed in this study, results that are unique to the workplace can be confirmed. In addition, scientific safety management is possible only when priority is given through sensitivity analysis.

Key Words : near miss, assessment, bayesian network, sensitivity analysis

1. 서론

유해 화학물질을 취급하는 공정에서는 물질의 누출로 화재·폭발과 같은 대형사고가 발생할 수 있다. 이러한 대형사고의 효과적인 예방을 위하여는 아차사고와 연계성을 분석하여 해결책을 찾는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다¹⁻⁷⁾. 아차사고(Near miss)란 상해나 재산 손실을 초래할 수 있었지만 그렇지 않거나 계획되지 않은 사건을 말한다¹⁾. OSHA(Occupational Safety and Health Administration)에서는 아차사고를 종종 ‘Close calls’라고 부른다²⁾. H. W. Heinrich와 Frank E. Bird, Jr.의 재해발생 비율에 의하면 아차사고는 재해와 연계된다³⁾. 그러므로 수차례의 아차사고는 관리를 통해 재해를 예방할 수 있다. 그러나 구체적인 아차사고 관리 방법을 제시한 연구

는 부족하였다^{4,24)}. 이로 인해 현장에서는 아차사고의 관리 필요성을 인지하고 있으나, 어려움이 해결되지 않고 있는 실정이다. 실제 안전관리자가 겪고 있는 구체적인 어려움을 파악하기 위해 인터뷰를 진행하였다. 그 결과, 아차사고 데이터 활용 중 의사결정을 위한 우선순위 부여를 가장 어려워하고 있었다.

또한 아차사고 관련 선행연구를 분석해보면 국내 연구는 하인리히 이론을 입증하거나, 아차사고 보고의 필요성에 대하여 집중되어 있다. 그러나 아차사고 데이터를 활용한 연구는 부족하였다.

국외 연구에서는 아차사고 관리 시스템(NMS, Near miss Management System) 단계를 제시하거나, NMS의 평가단계를 딥러닝과 클러스터 등의 방법을 사용하여 우선순위를 부여하는 연구는 확인하였다^{5,23)}. 그러나,

¹한국교통대학교 안전공학과 석사과정 (Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation)

²한국교통대학교 안전공학과 박사과정 (Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation)

³한국교통대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation)

사고의 인과관계를 파악할 수 있는 베이지안 네트워크를 이용한 연구는 확인할 수 없었다.

따라서 이 연구에서는 베이지안 네트워크를 이용하여 아차사고의 모델을 개발하고 주요 원인을 도출하고자 한다. 이를 위한 세부 연구 목표는 다음과 같다.

- P2T 차원별 요인 선정 및 정의 구체화
- 베이지안 네트워크를 이용한 아차사고 평가 모델 개발
- 민감도 분석을 사용한 주요 아차사고 원인 도출

2. 선행연구

국내 아차사고 관련 연구는 1999년부터 시작하였다⁶⁾. 대부분의 연구는 설문조사를 통한 아차사고 발굴의

중요성을 강조하거나 하인리히와 버드의 이론을 입증하는 내용이었다^{7,8,9)}. 또한, 4M 기법을 적용한 연구도 있었다¹⁸⁾.

국외 아차사고 관련 연구는 주로 아차사고 관리 시스템에 대한 내용이었다. NMS란 아차사고를 수집, 분석, 모든 이해관계자에 대한 지식전달까지 여러 프로세스로 구성된 것을 말한다¹⁰⁾. NMS는 다양한 산업분야에서 개발 및 구현되고, 2010년을 전후로 유럽에서 트렌드 주제였음을 확인하였다. 최근에는 미국, 중국 등을 중심으로 연구가 활발하며, 전 세계적으로 관심이 높아지고 있었다. 그러나, Table 1과 같이 가시적인 모델을 제시(Model Development)하거나 베이지안 네트워크를 사용하여 요인별 우선순위를 부여(Prioritization)하여 주요 원인을 도출한 연구는 없었다.

Table 1. Comparison of domestic and international near-miss related research

Author (year)	Necessity of Near-miss	Technique application	Suggest a method	Model development	prioritization
Jong Bac Back (1999)			○		
Simon Jones (1999)	○				
Hyung Joon Yoon (2000)	○		○		
S. Cavalieri (2006)	○				
Seong Hwa Seo (2012)	○	○			
Paul Kleindorfer (2012)	○				
M.G. Gnoni (2012)	○		○		
Sean J. Dee (2013)	○				
Tae kyung Lim (2014)	○		○		
Jung Hoon Lee (2016)	○				
Kwang Nam Min (2016)	○				
Maria Grazia Gnoni (2017)	○				
Chul Ho Lee (2018)	○				
Fanghao Chen (2020)	○		○		
M.G. Gnoni (2020)			○		
Seok Ki Lee (2021)	○				
Amartuvshin Dagvasumberel (2021)	○		○		○
Dong Yeol Kim (2022)	○				

3. 연구방법

아차사고 주요 원인분류를 위해 P2T Model을 기법으로 선정하였다. 이 기법은 절차적인 원인까지 내포하고 있어 아차사고의 인적원인을 파악할 수 있다. 그리고 사고에는 발생 매커니즘이 존재하므로 인과관계를 가시적으로 나타낼 수 있는 베이지안 네트워크를 이용하여 모델을 개발하였다²⁵⁾. Agena Risk 10.0 프로그램을 사용하였으며²⁶⁾, 민감도 분석을 통해 차원별 아차사고에 영향을 많이 미치는 주요 원인을 도출하였다.

3.1 P2T Model을 활용한 요인 선정

아차사고의 주요원인은 불안정한 행동에 기인하며, 불안정한 행동이 안전분위기에 영향을 받는다⁸⁾. 안전분위기에 주로 사용되는 P2T 모델은 근본적인 원인을 세 가지 차원인 사람(People, PE), 절차(Procedure, PR), 기술(Technology, TE)로 나누어 분석한다. 이를 ‘P2T’라고 부른다^{10,11)}. 아차사고 또한 불안정한 행동 및

Table 2. Examples of the structure formula

People(PE)	Procedure(PR)	Technology(TE)
	[PR1] Procedure,	
	[PR2] Safety Management System	[TE1] Equipment and facilities not installed
	[PR3] No Safety Marking Regulations	[TE2] Device malfunction
[PE1] Behavior	[PR4] Insufficient Regulations for Dangerous substances Management	[TE3] Insufficient Maintenance of equipment and facilities
[PE2] Training,		
[PE3] Responsibility	[PR5] Emergency Situation Regulation Insufficient	[TE4] Safety Technology Equipment
[PE4] Management		
[PE5] Cooperating		

Table 3. Specific definition of people(PE)

Factor	Defination
[PE1] Behavior	Negligence in work performance and non-compliance with procedures while performing work unsafe working posture other unsafe behavior
[PE2] Training	Other hazards such as structures and unconfirmed
[PE3] Responsibility	Reckless or unnecessary acts and behavior Inappropriate use of clothing and protective equipment
[PE4] Management	Inappropriate use/management of facilities/machines/substances Improper Handling of Hazardous and Hazardous Materials
[PE5] Cooperating	Cleaning and repair of machines and vehicles in operation

Table 4. Specific definition of procedure(PR)

Factor	Defination
[PR1] Procedure	Inadequate work process/procedure
[PR2] Safety management system	Inadequate assembly/disassembly work procedures
[PR3] No safety marking regulations	Hazards in the Workplace
[PR4] Insufficient regulations for dangerous substances management	Hazards in storage and handling of hazardous and hazardous substances
[PR5] Emergency situation regulation insufficient	Repair and inspection during operation

Table 5. Specific definition of Technology(TE)

Factor	Defination
[TE1] Equipment and facilities not installed	Poor and dangerous places such as work aisles Poor location such as other work aisles
[TE2] Device malfunction	Inadequate protective measures Protective equipment wearing condition and poor performance
[TE3] Insufficient maintenance of equipment and facilities	Defects in objects and installations themselves
[TE4] Safety technology equipment	Inadequate environmental conditions Other unique hazards at work Hazards in handling objects, machines, instruments, etc.

상태로 정의하기 보다 더 근본적으로 접근할 필요가 있다. 즉 ‘왜 불안정한 행동을 하는지?’, ‘왜 불안정한 상태가 되었는지?’에 대한 근본원인 분석이 필요하다.

따라서 이 연구에서는 아차사고 원인 도출을 위해 P2T Model로 접근하였다. P2T 차원별 구성요소를 발굴하기 위해 국외연구를 분석하였다. 또한, 요소에 대한 정의를 구체화하기 위하여 산업재해원인조사보고서를 참고하였다²¹⁾. 선행연구를 통해 발굴된 차원별 구

성요소는 총 14개로 Table 2와 같으며, 각 구성요소에 대한 정의는 Table 3, 4, 5와 같다.

3.2 베이저안 네트워크를 사용한 모델 개발

영국 학자 Thomas Bayes가 제안한 통계적 추론 방법인 Bayes' Theorem은 확률 추정을 통해 증거 정보를 정량적으로 나타낼 수 있다. 일반적으로 불확실성 하에서 의사결정 문제를 수학적으로 다룰 때 많이 이용한다. 즉, 기존의 데이터 정보뿐만 아니라 의사결정자의 경험과 판단 등의 정보를 결합하여 비정상적인 상황의 발생을 분석하는 모델이다¹⁷⁾.

베이저안 네트워크는 Bayes' Theorem을 바탕으로 노드(node)와 호(arc)를 통해 표현할 수 있다²⁸⁾. 각 노드는 일부 변수를 나타내고, 두 노드 사이의 호는 해당 변수 간의 일종의 영향력(또는 인과 관계) 관계를 나타낸다.

노드의 관계는 OR, AND Gate를 사용하여 연결하였다. OR gate는 두 개의 부울변수(Boolean Variable) A와 B에 대해 A OR B 표현식으로 나타낸다. A와 B 중 하나가 참이면 참으로 정의되고 그렇지 않으면 거짓으로 정의된다. 즉, 적어도 하나는 참이라는 것을 의미한다. 예를들면, People(Unique identifier: M0)은 내부구성요소인 Behavior(Unique identifier: M1), Training(Unique identifier: M2), Responsibility(Unique identifier: M3), Management(Unique identifier: M4), Cooperating(Unique identifier: M5)를 OR gate를 사용하여 if(M1="True" || M2="True" || M3="True" || M4="True" || M5="True", "True", "False")와 같이 표현하였다.

AND gate는 두 개의 부울 변수 A와 B에 대해 A AND B 표현식으로 나타낸다. A와 B가 모두 참이면 참으로 정의되고, 그렇지 않으면 거짓으로 정의한다.

예를들면, PE,PR(M18)은 Peopl(Unique identifier: M0), (Procedure(Unique identifier: M6)를 AND gate를 사용하여 if(M0="True" && M6="True", "True", "False")와 같이 표현하였다.

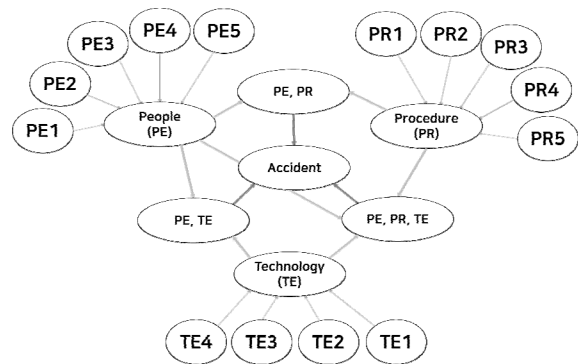


Fig. 1. Near miss assessment model.

이 연구에서는 Agena Risk 프로그램을 사용하였으며, 타 프로그램보다 복잡한 문제를 모델링하고, 의사결정방식을 개선할 수 있다는 장점이 있다²⁹⁾. 14개의 요인을 기반으로 개발한 Near miss Assessment Model은 Fig. 1과 같다.

3.3 민감도 분석을 사용한 주요 원인 도출

민감도 분석은 목표 변수가 영향을 미치는 다른 변수의 변화에 얼마나 민감한지를 결정하는 중요한 과정이다⁶⁾. 그 중 Tornado graph를 사용하여 다수의 아차사고 원인 중 어떤 원인이 사고에 민감하게 반응하는지 나타내고, 정량적으로 해석할 수 있다.

4. Model 검증을 위한 사례 적용

4.1 아차사고 원인 분류

개발한 모델을 검증하기 위해 실제 A 기업의 Ethylene 제조 공정의 아차사고 데이터를 적용하였다.

아차사고 대상공정은 석유화학산업의 기초 소재가 되는 물질을 제조하는 Ethylene 제조공정으로 선정하였다. Ethylene은 합성수지, 합성원료, 합성고무 등 다양한 물질을 만드는데 기초 원료가 된다.

아차사고 보고서의 전체 603건의 data를 3.1에서 제시한 14개의 아차사고 요인으로 분류하였다. 정보가 불충분하거나 분류가 불가능한 301건의 data를 제외한 300건만의 data를 활용하였다. 분류는 사고 1건당 불안정한 상태와 행동으로 각각 분류하였다. 사고개요를

기준으로 안전분야에서 20년의 경력을 보유한 전문가의 검토가 이루어졌으며, 결과는 Table 6과 같다.

4.2 아차사고 평가 모델 개발

아차사고 300건의 사고원인은 불안정한 행동과 상태를 각각 고려하였으므로 분석 결과 총 600개로 재분류되었다. 요인별 확률값은 PE1의 경우 전체 600건 중 93건이 해당되므로 빈도값은 0.144로 계산하였다. 계산시, 소수점 셋째 자리까지 표현하였으며, 이는 사전확률로 볼 수 있다. 모델 결과는 Fig. 2과 같다.

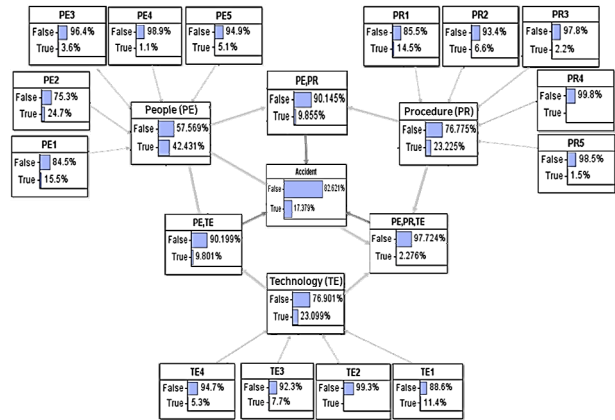


Fig. 2. Near miss assessment model of ethylene manufacturing process.

Table 6. Probability value by factor for target near miss

Dimension	Factor	Number of cases	Frequency
PE1	Behavior	93	0.144
PE2	Training	148	0.247
PE3	Responsibility	21	0.035
PE4	Management	7	0.012
PE5	Cooperating	31	0.052
PR1	Procedure	87	0.145
PR2	Safety management system	40	0.066
PR3	No safety marking regulations	13	0.022
PR4	Insufficient regulations for dangerous substances management	1	0.002
PR5	Emergency situation regulation insufficient	9	0.015
TE1	Equipment and facilities not installed	68	0.113
TE2	Device malfunction	4	0.007
TE3	Insufficient maintenance of equipment and facilities	46	0.076
TE4	Safety technology equipment	32	0.053
Total		600	1.000

4.3 아차사고 주요 원인 도출

Tornado graph를 통해 사전확률 값과 요인별 Logic gate를 통해 사고발생 확률은 17.379%임을 확인하였다. Fig. 3 그래프의 수직 막대는 사고에 대한 한계확률로써, 0.174임을 알 수 있다. 가장 민감한 변수는

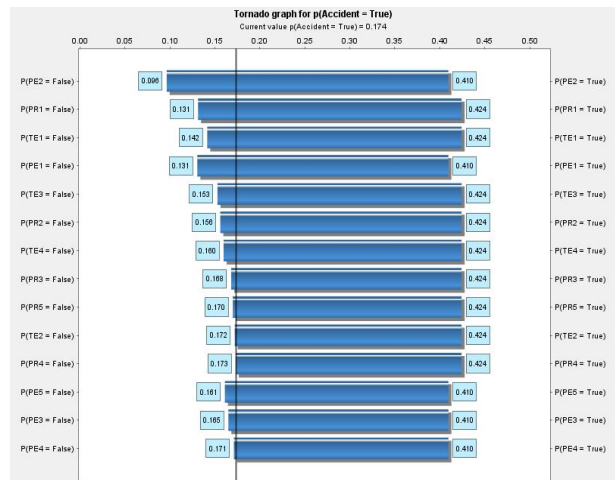


Fig. 3. Results of sensitivity analysis of ethylene manufacturing process.

최상단에 위치하며, 편차가 가장 큰 PE2(Training)로 나타났다. 한계확률은 0.174로 나타났지만, 주어진 사고 발생확률이 0.096(PE2=False)에서 0.410(PE2=True)으로 민감도의 편차를 확인할 수 있었다. 동일한 방법으로 절차적, 기술적 차원에서 해석한 민감도가 높은 요인은 PR1(Procedure), TE1(Equipment and facilities not installed)임을 확인하였다.

5. 결론

사업장에서 아차사고의 관리 필요성은 인식하고 있으나, 관리방법이나 사업장에 특화된 모델 연구는 부족하다. 실제 안전관리자들을 대상으로 인터뷰한 결과, 아차사고 관리방법에 대해 잘 모르거나, 수집한 아차사고 데이터의 활용에 어려움을 겪고 있었다.

따라서 이 연구에서는 아차사고 데이터를 활용하여 아차사고 평가 모델을 개발하고, 주요 원인을 도출하였다.

첫 번째, P2T Model 차원별 요인을 선정하고 정의를 구체화하였다. 아차사고의 원인을 분류하기 위해 국외 선행연구를 기반으로 총 14개의 요인을 도출하였다. 그러나 도출한 요인의 정의가 불분명하여 실제 데이터를 분류하기에는 어려움이 있었다. 그러므로 선행연구에서 도출한 요인과 안전보건공단 보고서(2014)를 분석하여 14개 요인에 대한 정의를 구체화하였다.

두 번째, 아차사고 평가 모델을 개발하였다. 모델은 아차사고와 요인 간의 인과관계를 파악하기 위해 베이저안 네트워크를 사용하였다. 모델 검증을 위해 에틸렌 제조공정의 아차사고 데이터를 적용하였으며, 사고 발생 확률은 17.379%임을 확인하였다.

세 번째, 민감도 분석을 통해 에틸렌 제조공정의 주요 원인을 확인하고, 우선순위를 부여하였다. 그 결과, 차원별 우선순위가 높은 요인은 ‘PE2(Training)’, ‘PR1(Procedure)’, ‘TE1(Equipment and facilities not installed)’으로 나타났다.

이 연구를 통해 사업장의 데이터를 활용하여 사업장 고유의 아차사고 모델을 개발하고 주요 사고 원인을 도출할 수 있다. 그리고, 아차사고의 주요 원인을 과학적으로 관리함으로써 효율적인 안전관리가 이루어질 수 있다.

그러나, 제시한 모델의 신뢰도 검증을 위해서는 많은 데이터가 요구된다. 만약, 타기업의 사례를 적용한다면, 해당 공정에서 발생하는 아차사고의 신뢰도를 높일 수 있다.

Acknowledgement: This work was supported by 2023 Graduate School of Chemical Safety Management Specialization funded by the Ministry of Environment.

References

- 1) EcoOnline, “Near Miss & Incident Reporting: Everything You Need to Know”, <https://www.econline.com/-incident-reporting-everything-you-need-to-know/#practical-measures-for-near-miss-reporting>
- 2) Occupational Safety and Health Administration, “Incident Investigation”, <https://www.osha.gov/incident-investigation>
- 3) H.W.Heinrich, “Industrial Accident Prevention”, Fifth Edition, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1980.
- 4) Ministry of Employment and Labor, Guidebook for building safety and health management, pp.42-43, 2022.
- 5) M.G. Gnoni et al., “Near Miss Management Systems in the Industrial Sector: A Literature Review”, Safety Science, Vol. 150, 2022.
- 6) Simon Jones et al., “The Importance of Near Miss Reporting to Further Improve Safety Performance”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 12, Issue 1, pp. 59-67, 1999.
- 7) H. J. Yoon et al., “Development of a Near Miss Management System to Prevent Industrial Accident”, Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers, Vol. 38, No. 2, pp. 166-172, 2000.
- 8) C. H. Lee, “Relationship between Company Safety Program and Safety Culture, Safety Accident(incl. near misses) : Focus on the Maintenance and Construction Work’s Safety in Natural Gas Facilities, Chung-Ang University, Master’s Thesis, 2018.
- 9) S. Cavalieri and W.M. Ghislandi, “A Conceptual Structure for the use of Near Misses Properties”, IFAC Proceedings Volumes, Vol. 39, Issue 3, pp. 81-86, 2006.
- 10) M. G. Gnoni and Gianni Lettera, “Near Miss Management Systems: A Methodological Comparison”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 25, Issue 3, pp. 609-616, 2012.
- 11) J. H. Lee, “The Effect of Finding Near Miss from the Construction Site in Accidents”, Seoul National University of Science and Technology, Master’s Thesis, 2015.
- 12) G. N. Min, “Comparison of Types of Near Miss among Construction Workers in Mid-low, High and Super High-rise Building Sites”, Korea University, Master’s

- Thesis, 2016.
- 13) S. G. Lee, “Study on the Correlation between Manufacturing Near-miss Reporting Activities and Safety Culture Recognition”, Korea National University of Transportation, Master’s Thesis, 2020.
 - 14) S. G. Lee and J. C. Park, “A Study on the Status and the Perception of Near Miss Reporting Activities in Domestic Manufacturing Industry”, Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 12, No. 2, pp. 287-294, 2021.
 - 15) D. Y. Kim and J. H. Park, “Comparison of Safety Culture Awareness between Client and Subcontractors’ Employees according to the Experience of Accidents and Near Misses”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 37, No. 2, pp. 28-34, 2022.
 - 16) M. G. Gnoni and J. H. Saleh, “Near Miss Management Systems and Observability-in-depth: Handling Safety Incidents and Accident Precursors in Light of Safety Principles”, Journal of Safety Science, Vol. 91, pp. 154-167, 2017.
 - 17) F. Chen et al., “Risk Assessment of Chemical Process Considering Dynamic Probability of Near Misses based on Bayesian Theory and Event Tree Analysis”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 68, 2020.
 - 18) S. W. Seo et al., “Effective Detection Technique of Near Miss using 4M Risk Assessment Methodology”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 27, No. 5, pp. 164-170, 2012.
 - 19) J. B. Baek, “A Study on Mechanism Analysis for Industrial Fatality Accident”, Han Yang University, Master’s Thesis, 1991.
 - 20) P. Kleindorfer et al., “Assessment of Catastrophe Risk and Potential Losses in Industry”, Computers & Chemical Engineering, Vol. 47, pp. 85-96, 2012.
 - 21) T. K. Lim et al., “A Methodology for Measuring and Assessing Construction Worker’s Near-misses”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 71-79, 2014.
 - 22) S. J. Dee et al., “Using Near Misses to Improve Risk Management Decisions”, Process Safety Progress, Vol 32, Issue 4, pp. 322-327, 2013.
 - 23) A. Dagvasumberel et al., “Railroad Near-miss Occurrence Detection and Risk Estimation System with Data from Camera Using Deep Learning”, Institute of Electrical and Electronics Engineering, pp. 83-87, 2021.
 - 24) P. Spirtes, C. Glymour and Richard Scheines, Causation, Prediction, and Search, Second Edition, Cambridge, MIT Press, pp. 11-17, 2000.
 - 25) J. G. Lee, R Program Recipes for Bayesian Statistics, pp. 11-19, 2018.
 - 26) AGENA RISK, “Bayesian Network Software for Risk Analysis and Decision Making”, <https://www.agenarisk.com/>
 - 27) Occupational Safety and Health Research Institute, Investigation of Causes of Industrial Accidents (Occupational Accidents), pp. 612-619, 2014.
 - 28) H. S. Park and W. K. Oh, “A Test for Exogeneity of Monetary Policy in Korea : An Application of DAG”, Korea Review of Applied Economics, Vol. 9, No. 3, pp. 93-118, 2007.
 - 29) Norman Fenton and Martin Neil, Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks, Second Edition, CRC Press, 2018.