

FMEA에서 계층적 시간 지연 모형에 근거한 위험평가

장현애 * · 이민구 ** · 홍성훈 *** · 권혁무 ****†

* 부산품질혁신센터

** 충남대학교 정보통계학과

*** 전북대학교 산업정보시스템공학과

**** 부경대학교 시스템경영공학부

Risk Evaluation Based on the Hierarchical Time Delay Model in FMEA

Hyeon Ae Jang * · Lee, Min Koo ** · Hong, Sung Hoon *** · Kwon, Hyuck Moo ****†

* Busan Innovation Center for Quality

** Department of Information and Statistics, Chungnam National University

*** Department of Industrial and Information Systems Engineering, Chonbuk National University

**** Division of Systems Management and Engineering, Pukyong National University

ABSTRACT

Purpose: This paper suggests a hierarchical time delay model to evaluate failure risks in FMEA(failure modes and effects analysis). In place of the conventional RPN(risk priority number), a more reasonable and objective risk metric is proposed under hierarchical failure cause structure considering time delay between a failure mode and its causes.

Methods: The structure of failure modes and their corresponding causes are analyzed together with the time gaps between occurrences of causes and failures. Assuming the severity of a failure depends on the length of the delayed time for corrective action, a severity model is developed. Using the expected severity, a risk priority metric is defined.

Results: For linear and quadratic types of severity, nice forms of expected severity are derived and a meaningful metric for risk evaluation is defined.

Conclusion: The suggested REM(risk evaluation metric) provides a more reasonable and objective risk measure than the conventional RPN for FMEA.

Key Words: FMEA, RPN, Severity, REM

● Received 18 March 2016, 1st revised 22 April 2016, accepted 2 May 2016

† Corresponding Author(iehmkwon@pknu.ac.kr)

© 2016, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and re-production in any medium, provided the original work is properly cited.

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음

1. 서론

FMEA는 1960년대 초 항공우주산업분야에서 처음 도입된 이래 시스템의 초기 설계결함으로 인한 위험을 평가하는 기법으로 산업현장에서 널리 사용되는 도구이다. 제조분야로부터 시작된 FMEA의 적용은 서비스 산업의 발전과 더불어 서비스 프로세스 분야에도 널리 적용되고 있다. Onodera(1997)는 100여 개에 이르는 FMEA 응용사례를 조사한 결과 현대 산업 프로세스의 거의 모든 단계에서 FMEA가 적용되고 있음을 확인하였다. FMEA에 관련된 최근 연구 몇 편만 살펴보다라도 제조산업 분야의 Kwon et al.(2011), Kwon et al.(2013), Baek et al.(2014)과 서비스 분야의 Agung and Kwon(2012), Kim et al.(2014)이 있어 FMEA가 제조분야를 포함하는 전 산업분야에서 고르게 활용되는 기법임을 알 수 있다.

그러나 FMEA의 현장 적용에 있어서 첫째, 고장과 원인에 대한 RPN(risk priority number)은 발생도, 검출도, 심각도를 결정하는 과정이 다분히 주관적이기 때문에 객관적인 지표가 되기에는 미흡하다는 점, 둘째, 값이 다른 발생도, 검출도, 심각도의 여러 가지 조합이 똑같은 RPN 값을 산출할 수 있는데 실제로 위험의 내용이나 정도가 완전히 다를 수도 있어 위험 측도로서의 한계가 있다는 점, 셋째, 발생도, 검출도, 심각도의 최고 점수가 똑같이 10점으로서 위험에 기여하는 정도가 동일하다는 전제하에 RPN이 산출되기 때문에 비현실적이라는 점, 넷째, 고장원인-고장-영향의 발생에 있어서 시간적인 간격이 있는 경우가 많음에도 이를 고려하지 않고 있다는 점, 다섯째, 근본원인에 이르기까지 고장원인들 간에 가능한 계층적인 관계를 고려하지 않고 있다는 점 등의 여러 가지 문제점들이 Liu et al.(2013)과 Kwon et al.(2013)을 비롯한 여러 연구들에서 지적되고 있다.

그동안 많은 학자들이 RPN에 의한 위험평가 방식을 개선하고자 연구를 해왔지만 위험평가 과정에서 시간의 영향을 고려한 연구는 그리 많지 않다. Rhee and Ishii(2003)은 특정 시스템의 전체 수명기간 동안 발생하는 비용을 감소시킬 수 있는 설계방식을 선택하기 위해 수명주기비용 기반 FMEA를 소개하였다. Kwon et al.(2011)은 시간에 의존하는 기대손실모형을 토대로 한 위험평가방안을 제안하였다. Kwon et al.(2013)은 임무기간 중 고장으로 임무 수행에 실패한 시간의 길이를 고려한 기대손실모형을 개발하였다. 계층적 고장구조와 관련된 연구로는 Wada(2000)가 고장원인과 영향들간에 계층구조를 하고 있는 FMFEA(failure mode factors and effects analysis)를 도입하였다. Yu et al.(2011)은 FTA(fault tree analysis)의 기본사상과 FMEA의 부품을 연결한 통합 시나리오를 제안하였다.

발생시간을 고려할 때 일반적으로 고장은 적어도 하나 이상의 관련된 원인이 먼저 생긴 후에 발생하게 될 것이다. 한편, 취급하는 품목에 따라서 시스템이나 부품 고장이 유해물질이나 방사능 누출 등의 문제를 유발할 수도 있다. 이와 같은 경우, 고장으로 인한 영향의 심각도는 검출시간에 따라 다르게 된다. 고장원인이 발생했다라도 실제 고장이 발생하기 전에 문제를 제거하고 수정했다면 그로 인한 손실은 문제 제거 및 수정비용으로 미미한 정도에 그칠 것이며, 만약 실제 고장이 발생할 때까지 원인을 검출하여 수정하지 못했다면 그 영향은 훨씬 더 심각하게 될 것이다. 본 연구에서는 이와 같은 상황 하에서 적용이 가능한 2단 계층구조를 하고 있는 고장원인들과 발생 및 검출시간을 함께 고려한 위험평가 모형을 제안한다.

2. 계층적 시간지연 모형

2.1 고장원인 발생 및 검출 시간간격

2단 계층구조에서는 먼저 준고장(sub-failure: 직접적인 하위고장원인)의 발생이 선행되어야 고장이 발생할 수 있으며 준고장은 보다 근본적인 원인(root cause)이 선행되어야 발생할 수 있다. 예를 들어, 펌프시스템 고장의 약 40%를 점하는 샤프트 씸(mechanical shaft seal) 고장의 한 유형인 샤프트 씸 손상에 의한 펌핑 매체가 누출되는 한 과정을 살펴보자.(Grundfos Management A/S, 2009) 고장원인 중의 하나로서 부적절한 윤활유 사용이나 원활하지 못한 윤활유 공급(근본 원인)이 지속되면 이로 인해 발생하는 마찰열에 의한 고온과 냉각에 의한 저온의 주기적인 스트레스가 계속 가해짐으로써 씸 표면에 미세한 균열(준 고장)이 생기게 된다. 아무런 조치 없이 이와 같은 상태가 유지되면 지속적인 스트레스로 균열이 점차 성장하여 마침내 샤프트 씸이 손상(최종 고장)되게 된다. 펌프가 온전한 기능을 못하는 상태에서 계속 사용하면 펌핑 매체의 누출로 시간이 경과할수록 심각한 결과를 초래하게 된다. 이와 같은 고장의 발생과정은 근본원인의 발생과 그에 따른 준고장 및 실제고장 발생까지의 경과시간으로 묘사할 수 있다. 근본원인은 준고장이나 실제 고장이 발생하기 전에 검출되어 고쳐질 수도 있고, 준고장은 발생했으나 실제고장은 발생하기 전에 검출되거나 혹은 실제 고장이 발생한 후에 검출될 수도 있다. Figure 1은 이와 같은 상황을 경우별로 나누어 도시한 것이다. 그림에서 Case A는 근본원인이 준고장 발생 전에 검출된 경우, Case B는 준고장은 발생했으나 실제 고장이 발생하기 전에 검출된 경우, Case C는 실제 고장이 발생한 후에 검출된 경우를 각각 나타내고 있다.

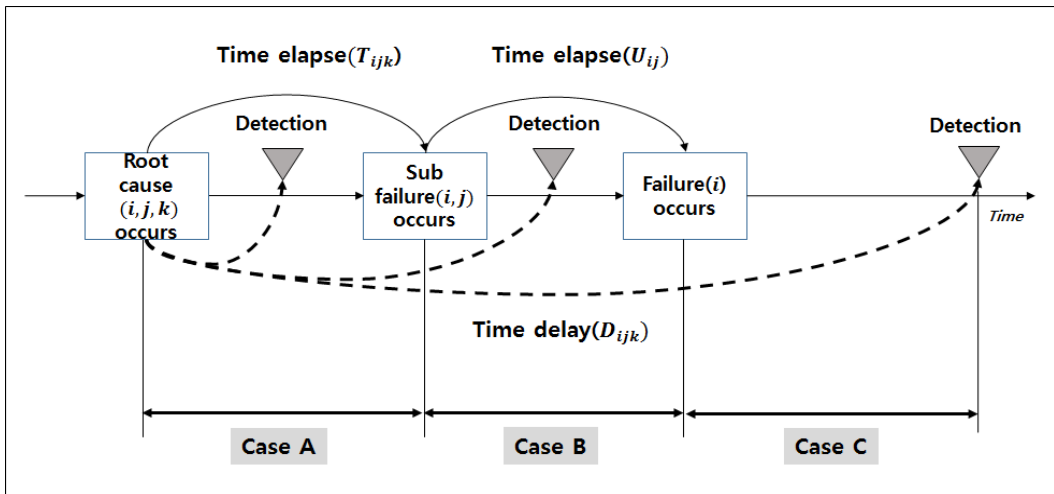


Figure 1. Time delayed detection of hierarchical failure cause

2.2 가정 및 기호 표기

고장원인들이 계층적 인과구조를 하고 있다면 어떤 고장이든 반드시 근본원인과 준고장이 먼저 발생해야만 발생할 수 있을 것이다. 또한 일반적으로 고장이든 원인이든 발생과 검출 사이에는 극히 짧은 순간이든 상당히 긴 간격이든 지연시간이 있게 될 것이다. 만약 근본 고장원인이 준고장이 발생하기 전에 검출되었다면 오직 문제의 근본원인 제거 및 수정에 요구되는 비용만 지출하게 될 것이다. 그러나 준고장이거나 실제고장이 발생한 후에는 문제의 근본원인을 제거하는 비용뿐만 아니라 고장에 따른 영향을 처리하는데 소요되는 비용을 감당해야 하므로 훨씬 더 심각한 손실을 초래하게 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 상황을 단순화하여 모형화하기 위해 다음 사항을 가정한다.

- i) 어떤 고장이든 그에 관계된 준고장 혹은 근본원인이 먼저 발생해야만 발생할 수 있다.
- ii) 고장영향의 심각도는 고장 혹은 원인의 발생과 검출 사이의 시간간격의 길이에 의존한다.
- iii) 근본원인의 발생은 동질적 포아송 과정을 따른다.
- iv) 발생시간과 검출시간은 지수분포를 따른다.
- v) 문제원인을 제거하고 조치하는 시간은 무시할 수 있다.

본 논문에서 사용되는 기호들은 다음과 같다.

τ_{ijk} : 고장 i 및 준고장 j 에 관련된 근본원인 k 의 발생률, 단 $i = 1, 2, \dots, l$,
 $j = 1, 2, \dots, m_i, k = 1, 2, \dots, n_{ij}$.

T_{ijk} : 고장 i 에 대한 준고장 j 의 발생과 근본원인 k 의 발생 사이의 시간간격

λ_{ijk} : 고장 i 의 근본원인 k 가 발생한 이후 준고장 j 의 발생률

U_{ij} : 고장 i 의 발생과 준고장 j 의 발생 사이의 시간간격

α_{ij} : 준고장 j 가 발생한 이후 고장 i 의 발생률

D_{ijk} : 고장 i 및 그에 대한 준고장 j 의 근본원인 k 를 검출하는데 걸리는 시간

μ_{ijk} : 고장 i 및 그에 대한 준고장 j 의 근본원인 k 의 검출률

a_{ijk} : 고장 i 및 그에 대한 준고장 j 의 근본원인 k 를 조치하는 데 관련된 심각도의 상수 부분

b_{ij} : 고장 i 에 대한 준고장 j 에 관련된 심각도 계수

c_i : 고장 i 의 발생 이후 경과시간에 관련된 심각도 계수

S_{ijk} : 고장 i 및 준고장 j 의 근본원인 k 에 관련된 심각도 측도

2.3 위험평가요소의 정량화

2.3.1 발생도

각 고장의 발생은 고장원인의 발생으로부터 고장이 발생할 때까지의 시간으로 정량화될 수 있다. 즉, 어떤 고장이든 고장원인의 발생도가 크다고 함은 고장발생시간의 길이가 짧다는 것이며 발생도가 작다고 하는 것은 반대로 고장 발생시간이 길다는 것을 의미한다. 여기서는 각 고장에 대해 그 고장을 유발하는 고장원인과 준고장이 있는 경우를 가정하고 있으므로 모든 고장의 발생은 고장원인의 발생과 준고장의 발생 이후에 일어난다. 따라서 계층적 시간지연 모형에서는 고장원인 발생시점으로부터 준고장 발생 시점까지와 준고장 발생 시점으로부터 실제고장 발생시점까지

의 두 가지 유형의 시간지연이 있다.

T_{ijk} 는 근본원인 k 의 발생 시점으로부터 그에 관계된 준고장 j 의 발생 시점까지 경과된 시간으로서 준고장 j 는 궁극적으로 고장 i 로 귀결되게 된다. 현실 상황에서 T_{ijk} 는 고장의 근본원인이 발생했다는 전제 하의 조건부 확률변수이므로 고장률이 시간경과에 따라 증가한다고 가정하는 것이 자연스러울 것이다. 그러나 이론 전개 편의 상 먼저 단순한 모형부터 시작하는 것이 좋을 것이므로 여기서는 고장률이 일정하여 T_{ijk} 가 지수분포를 따른다고 가정하고 있다. 가정에 의해 T_{ijk} 가 고장률 λ_{ijk} 인 지수분포를 따른다면 그 확률밀도함수는

$$f_{T_{ijk}}(t) = \lambda_{ijk} e^{-\lambda_{ijk}t}, \quad t > 0 \quad (1)$$

이다. 또, U_{ij} 는 준고장 j 의 발생시점으로부터 실제 고장 i 의 발생시점까지 경과한 시간으로서 사실은 준고장 발생을 전제로 한 조건부 확률변수라 할 수 있다. 여기서는 U_{ij} 도 모형을 단순화하기 위한 목적으로 지수분포를 따른다고 가정하고 있다. 가정에 의해 고장률 α_{ij} 인 지수분포를 따른다면 그 확률밀도함수는

$$f_{U_{ij}}(u) = \alpha_{ij} e^{-\alpha_{ij}u}, \quad u > 0 \quad (2)$$

이 된다.

2.3.2 검출도

고장원인에 대한 검출도는 그 원인이 발생한 시점으로부터 탐지되는 시점까지의 경과시간으로 정량화할 수 있다. D_{ijk} 는 고장 i 및 그에 대한 준고장 j 의 근본원인 k 를 검출하는데 걸리는 시간으로서 만약 일정 시간간격마다 주기적으로 시스템 운용 상태를 점검한다면 D_{ijk} 는 이산형 확률변수가 될 것이다. 그러나 여기서는 모형의 단순화를 위해 단위시간당 점검비율은 일정하게 유지하되 점검 시간간격은 랜덤한 것으로 가정하였다. 또한 점검하면 반드시 원인을 검출할 수 있다고 가정하여 점검률과 검출률이 같게 되는 것으로 간주하여 D_{ijk} 는 지수분포를 따른다고 가정하였다. 따라서 검출시간 D_{ijk} 의 확률밀도함수는

$$f_{D_{ijk}}(d) = \mu_{ijk} e^{-\mu_{ijk}d}, \quad d > 0 \quad (3)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 μ_{ijk} 는 검출률을 나타내는 상수이다.

2.3.3 심각도

심각도는 고장원인이 탐지되는 시점에 따라 i) 준고장이 발생하기 전에 탐지되는 경우, ii) 준고장은 발생했으나 실제 고장은 발생하기 전에 탐지되는 경우, iii) 실제 고장이 발생한 후에 탐지되는 경우로 나누어 정량화할 수 있다. 일반적으로 고장발생 전에 근본원인을 찾아 제거하고 조치를 취할 경우에는 원인제거 및 수정에 소요되는 경비 이외에 원인발생시점부터 원인탐지시점까지의 경과시간에 따른 추가 비용은 없을 것이다. 따라서 경우 i)에서 고장 i

및 그에 대한 준고장 j 의 근본원인 k 를 조치하는 데 관련된 심각도는 상수값 a_{ijk} 로 나타낼 수 있다. 다음으로 준고장이 발생한 후에 고장원인을 탐지하는 경우 ii)에서는 근본원인을 제거하고 조치하는데 소요되는 비용에 관련된 a_{ijk} 이외에 준고장 j 의 발생 후 원인을 탐지할 때까지 경과시간 $(D_{ijk} - T_{ijk})$ 에 따라 심각도가 증가하는 부분이 추가될 것이다. 같은 이유로 실제고장이 발생한 후에 고장원인을 찾아내어 조치하는 경우는 실제고장 발생 후 원인 탐지 및 조치시간까지의 경과시간 $(D_{ijk} - T_{ijk} - U_{ij})$ 에 따라 심각도가 증가되는 부분이 다시 추가될 것이다.

만약, Figure 2와 같이 심각도가 준고장 혹은 실제고장의 발생시점으로부터 탐지시간까지의 경과시간에 선형으로 비례하여 증가 한다면 심각도는 식 (4)와 같이 모형화할 수 있다.

$$S_{ijk} = \begin{cases} a_{ijk}, & 0 < D_{ijk} \leq T_{ijk} \\ a_{ijk} + b_{ij}(D_{ijk} - T_{ijk}), & T_{ijk} < D_{ijk} \leq T_{ijk} + U_{ij} \\ a_{ijk} + b_{ij}U_{ij} + c_i(D_{ijk} - T_{ijk} - U_{ij}), & T_{ijk} + U_{ij} < D_{ijk} \end{cases} \quad (4)$$

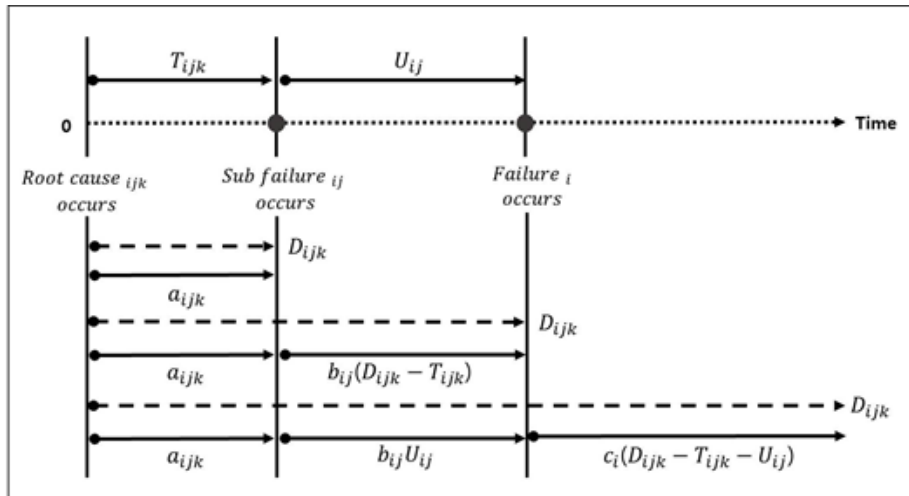


Figure 3. The linear model for hierarchical time delay

또, Figure 3과 같이 심각도가 준고장 혹은 실제고장의 발생시점으로부터 탐지시간까지의 경과시간의 제곱에 비례하여 증가 한다면 심각도는 식 (5)와 같이 모형화할 수 있을 것이다.

$$S_{ijk} = \begin{cases} a_{ijk}, & 0 < D_{ijk} \leq T_{ijk} \\ a_{ijk} + b_{ij}(D_{ijk} - T_{ijk})^2, & T_{ijk} < D_{ijk} \leq T_{ijk} + U_{ij} \\ a_{ijk} + b_{ij}U_{ij}^2 + c_i(D_{ijk} - T_{ijk} - U_{ij})^2, & T_{ijk} + U_{ij} < D_{ijk} \end{cases} \quad (5)$$

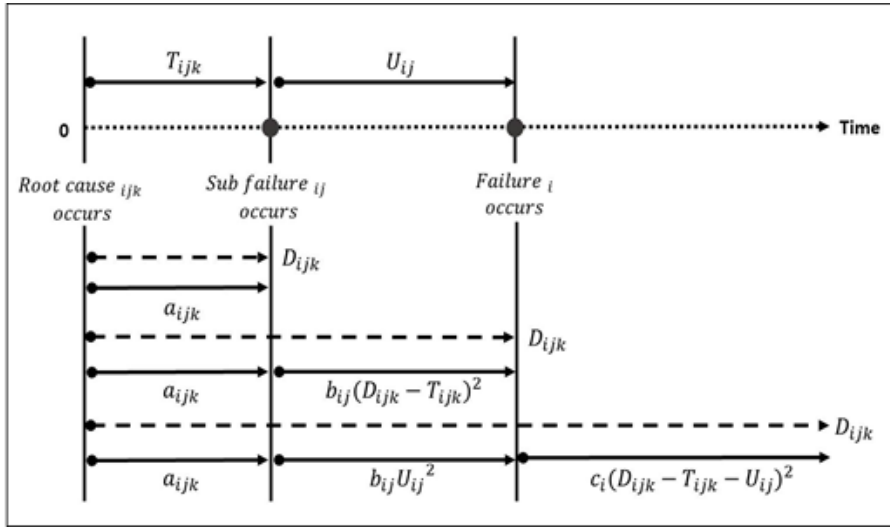


Figure 4. The quadratic model for hierarchical time delay

2.4 REM(Risk Evaluation Metric)

고장 발생시간과 고장원인 탐지 및 조치시간의 분포를 토대로 심각도의 기댓값을 모형별로 구할 수 있다. 기댓값을 구하기 위해 먼저 T_{ijk} , U_{ij} 및 D_{ijk} 의 결합확률분포를 구해야 한다. 그런데 고장원인 발생에 대한 점검은 고장 발생 여부와 무관하게 이루어지므로 D_{ijk} 는 T_{ijk} 나 U_{ij} 와는 독립적이라 할 수 있다. 그런데 2.3.1절에서 기술한바와 같이 U_{ij} 는 실제로는 준고장이 발생했다는 조건부 확률변수이므로 식 (1)과 (2)의 확률밀도함수를 곱하면 T_{ijk} 와 U_{ij} 의 결합확률밀도함수가 될 것이다. 따라서 결국 T_{ijk} , U_{ij} 및 D_{ijk} 의 결합확률밀도함수는 식 (1), (2) 및 (3)의 확률밀도함수를 곱하여 얻어진다.

그러므로 식 (4)의 선형모형이 적합할 경우 심각도의 기댓값을 구하면

$$\begin{aligned}
 E[S_{ijk}] &= a_{ijk} + b_{ij} \left(\int_0^\infty \int_0^u \int_0^\delta (\delta - t) f_{T_{ijk}}(t) f_{D_{ijk}}(\delta) f_{U_{ij}}(u) dt d\delta du + \right. \\
 &\quad \left. \int_0^\infty \int_u^\infty \int_0^\delta (d - t) f_{T_{ijk}}(t) f_{D_{ijk}}(\delta) f_{U_{ij}}(u) dt d\delta du + \right. \\
 &\quad \left. \int_0^\infty \int_u^\infty \int_0^{\delta-u} u f_{T_{ijk}}(t) f_{D_{ijk}}(\delta) f_{U_{ij}}(u) dt d\delta du \right) \\
 &\quad + c_i \int_0^\infty \int_u^\infty \int_0^{\delta-u} (\delta - t - u) f_{T_{ijk}}(t) f_{D_{ijk}}(\delta) f_{U_{ij}}(u) dt d\delta du \\
 &= a_{ijk} + b_{ij} \left\{ \frac{\lambda_{ijk}}{(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} \right\} + c_i \left\{ \frac{\lambda_{ijk} \alpha_{ij}}{\mu_{ijk}(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} \right\} \tag{6}
 \end{aligned}$$

과 같으며 자세한 유도과정은 부록으로 돌린다. 같은 방법으로 식(5)의 제곱모형이 적합할 경우 심각도의 기댓값을

					$RC_{11n_{11}}$	$a_{11n_{11}}$	$\lambda_{11n_{11}}$	$\tau_{11n_{11}}$	$\mu_{11n_{11}}$	$REM_{11n_{11}}$
					RC_{121}	a_{121}	λ_{121}	τ_{121}	μ_{121}	REM_{121}
	\vdots		SF_{12}	b_{12}	α_{12}	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
					$RC_{12n_{12}}$	$a_{12n_{12}}$	$\lambda_{12n_{12}}$	$\tau_{12n_{12}}$	$\mu_{12n_{12}}$	$REM_{12n_{12}}$
			\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

Table 1의 서식을 작성하는 방법은 기존의 FMEA 서식 작성에 준하여 작성하되 다음 사항을 고려한다. 먼저 고장 모드는 전통적인 방식에 따라 칸을 구분하여 FM_1, FM_2, \dots 과 같이 기입하고 고장영향은 FE_{11}, FE_{12}, \dots 등 여러 항목이 있어도 기입하는 칸을 구분하지 않고 같은 칸에 열거한다. 고장영향의 심각도를 반영하는 상수 c_i 는 고장 영향 중 가장 심각한 영향을 반영할 수 있도록 정하여 기입한다. 실제 고장을 유발하는 직접적인 원인 즉, 준고장이 SF_{11}, SF_{12}, \dots 등으로 여러 개 있을 경우 칸을 구분하여 각각 기입한다. 준고장에 대응되는 심각도와 발생도 계수는 각각 해당 열에 b_{11}, b_{12}, \dots 및 $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots$ 와 같이 기입한다.

고장과 준고장의 근본원인이 $RC_{111}, \dots, RC_{11n_{11}}, RC_{121}, \dots, RC_{12n_{12}}, \dots$ 등과 같이 여러 개 있을 경우에는 칸을 구분하여 각각 기입한다. 심각도 계수 및 발생도 계수도 $a_{111}, \dots, a_{11n_{11}}, a_{121}, \dots, a_{12n_{12}}, \dots$ 및 $\lambda_{111}, \dots, \lambda_{11n_{11}}, \lambda_{121}, \dots, \lambda_{12n_{12}}, \dots$ 등과 같이 칸을 구분하여 기입한다. 근본원인의 발생률도 $\tau_{111}, \dots, \tau_{11n_{11}}, \tau_{121}, \dots, \tau_{12n_{12}}, \dots$ 등과 같이 기입한다. 여기서 λ 는 근본원인이 발생했을 때 그로 인해 준고장이 발생하게 될 비율에 관련된 모수이고 τ 는 근본원인 자체의 발생빈도를 반영하는 모수임에 주의할 필요가 있다. 또한, 근본원인에 대한 검출률을 $\mu_{111}, \dots, \mu_{11n_{11}}, \mu_{121}, \dots, \mu_{12n_{12}}, \dots$ 와 같이 기입한다.

마지막으로 모형에 따라 식 (6) 혹은 (7)을 선택하여 $E[S_{ijk}]$ 값을 계산하고 식 (8)을 이용하여 REM_{ijk} 값을 구한다.

3.2 분포 모수와 심각도 계수의 추정

실제 FMEA 서식을 완성하기 위해서는 T_{ijk}, U_{ij} 및 D_{ijk} 의 구체적인 분포를 결정하는 모수 값에 대한 추정이 필요하다. 이에 대해서는 수명자료분석이나 가속수명시험 분야의 이론과 방법론을 응용할 수 있을 것이다. 전통적 FMEA의 발생도와 검출도의 수치 부여에도 추정 확률 값의 범위별로 기준을 제시하고 있다. 이것은 전통적인 방법에서도 어느 정도 발생이나 검출에 관련된 사전 정보가 있음을 전제로 한다는 것을 뜻한다. 이와 같이 사전지식이 있을 경우에는 베이지안 추정법 등 통계적 방법을 응용할 수도 있다.

다음으로 심각도 계수 a_{ijk}, b_{ij}, c_i 의 추정은 비교적 쉽게 정할 수 있다. 먼저 a_{ijk} 는 준고장 j 를 거쳐 궁극적으로 고장 i 에 이르게 되는 근본원인 k 를 제거 조치하는 데 들어가는 비용이다. 예를 들어 2.1절의 샤프트 쉘의 경우라면 현재 사용 중인 부적합한 윤활유를 정품으로 교체하는데 드는 경비 정도가 되겠다. 다음으로 b_{ij} 는 준고장 이후 시간경과에 따른 비용발생의 증분을 결정하는 계수이다. 이것은 준고장 발생 초기 및 상당시간 경과 후의 두 시점에서의 조치 비용 정보만 있으면 결정가능하다. 예로서, 샤프트 쉘의 경우 표면에 발생한 초기의 미세한 균열의 조치와

상당히 진행된 균열의 조치 비용을 알면 비용계수 b_{ij} 를 정할 수 있을 것이다. 마지막으로 c_i 는 실제 고장발생 후 시간경과에 따른 피해나 손실의 규모를 정하는 계수이다. 예로서, 샤프트 쉘의 경우 파손으로 펌핑 매체가 누출되고 있을 경우 누출되는 속도 및 양은 시간 경과에 따라 증가할 것이며 매체의 종류에 따라 피해 규모가 달라질 것이다. 예상되는 피해 및 손실 규모에 대한 정보를 토대로 c_i 값을 정할 수 있을 것이다.

3.3 수정된 FMEA 작성 예

수정된 FMEA 서식을 작성하는 방법을 예를 통해 살펴보기로 하자. Table 2의 예는 Wada(2000)의 FMFEA에서 원인분석 부분을 발췌하여 제안된 방법에 적용하기 위해 원래의 예를 목적에 맞게 다소 수정 정리한 것이다. 예로서 ‘Defective brush/cummutator contact’는 원 출처에서는 고장원인으로 나와 있으나 몇 단계에 걸쳐 다시 여러 하위 수준의 원인으로 전개되므로 여기서는 고장모드로 취급하였다. 또한, 심각도가 제공모형에 적합한 것으로 간주하여 FMEA 서식을 완성하였다.

Table 2. The modified FMEA sheet for illustration

Failure Mode	Failure Effect		Sub-failure			Root Cause			Occurrence (τ_{ijk})	Detection (μ_{ijk})	REM (REM_{ijk})	
	FE	c_i	SF	b_{ij}	α_{ij}	RC	a_{ijk}	λ_{ijk}				
Defective brush/cummutator contact	Heater not cooling	7	Commutator clogging	3	0.0001	Slit too shallow	1	0.0001	0.001	0.001	566.5	
						Slit too narrow	1	0.0005	0.0005	0.001	1038.6	
						Brush material	1	0.001	0.0005	0.009	3.7	
			Brush wear	3	0.0005	Commutator surface too rough	1	0.0001	0.001	0.001	0.005	4.9
						Brush attached backwards	1	0.001	0.0005	0.008	5.3	
						Holder pressure too great	1	0.002	0.0001	0.001	488.9	
						Brush sintering	1	0.001	0.0001	0.007	1.6	

이 예의 경우 REM 값으로 판단해볼 때, 세 가지 근본 원인에 대해 조치를 취할 필요가 있음을 알 수 있다. 즉, ‘Slit too shallow’, ‘Slit too narrow’, ‘Holder pressure too great’의 세 가지 근본 원인에 대해서는 시급히 개선 조치를 할 필요가 있고 나머지 요인들은 별다른 조치가 필요하지 않은 것으로 판단된다. 굳이 우선순위를 매긴다면 ‘Brush attached backwards’가 네 번째로 중요한 원인이 되겠지만 REM 값으로 보아서는 무시할 수 있겠다.

3.4 REM과 RPN의 비교

REM은 심각도의 기댓값에 고장원인의 발생률을 곱해서 구해지는 값으로서 실질적인 위험의 크기를 반영한다고 할 수 있다. 반면 RPN은 고장형상의 심각도와 고장원인의 발생도와 검출도의 개략적인 추정치를 토대로 각각에 배정된 1과 10 사이의 수치를 곱해서 얻어진 값이다. 따라서 RPN은 상대적인 비교에는 사용될 수 있으나 그 자체가 절대적인 의미를 갖는 것은 아니다. 즉, REM 값이 560이면 단위에 따라 다르겠지만 금전적 손실이 실제 그 정도로 발생한다고 생각할 수 있겠으나 RPN이 560이라면 그 수치에 대한 실질적인 의미를 부여하기 어렵다. 다만, 두 고장원인의 RPN 값이 각각 560, 400이라면 전자가 먼저 조치를 취해야 할 가능성이 크다는 정도의 의미를 갖는 정도에 불과하며 그것도 확실한 것은 아니다. 만약 전자는 심각도 7, 발생도 8, 검출도 10으로 RPN이 560이고 후자는 심각도 10, 발생도 8, 검출도 5로서 RPN이 400이라면 후자를 우선적으로 조치해야 한다는 것이 전통적인 FMEA 매뉴얼에 나오는 권장사항이다. (Ford Design Institute, 2004.) 즉, RPN은 그 하나의 값으로는 거의 유용한 정보를 제공하지 못하며 개략적인 위험우선순위 정보를 줄 수 있는 측도로 생각할 수 있다.

REM 값을 기준으로 고장원인을 비교할 때 조치를 취해야 할 원인과 그렇지 않은 원인들을 객관적으로 분류할 수 있을 뿐만 아니라 REM값 자체가 명확한 판단기준이 될 수 있다. 예를 들어 Table 2에서 고장원인 'Brush attached backwards'의 경우 순위 상으로는 네 번째이다. 그러나 REM 값으로 보아 첫 번째부터 세 번째까지의 값이 각각 1038.6, 566.5 및 488.9임과 비교하여 네 번째 REM 값은 5.3으로서 거의 1/100 수준에 불과하여 무시해도 좋을 정도로서 조치를 취하지 않아도 그다지 문제가 되지 않을 것임을 알 수 있다. 또한, REM은 사실상 고장원인에 따른 손실액의 기댓값을 반영하고 있기 때문에 순위가 첫 번째라 하더라도 REM 값으로 미루어 무시할 수 있다면 조치를 취하지 않아도 된다는 판단을 쉽게 할 수 있다. 그러나 RPN의 경우 절대적인 심각도를 반영하는 것이 아니기 때문에 이와 같은 판단을 쉽게 할 수 없을 경우가 많다. 도출과정을 검토해보면 RPN 완전히 상대적인 측도도 절대적인 측도도 아니다. 반면에 REM은 고장원인에 의해 유발되는 손실의 기댓값에 고장원인의 발생률을 곱한 것으로 당해 고장원인의 절대적인 위험수준을 나타낸다고 볼 수 있다.

REM의 경우 관련 비용 계수나 분포모수 값을 과거 데이터를 토대로 통계적인 이론을 적용하여 추정하여 사용함으로써 객관적인 결론을 도출할 수 있다. 그러나 RPN의 구성요소인 심각도, 발생도, 검출도는 과거 경험을 토대로 모두 1점과 10점 사이의 점수 중 적절한 값을 부여하도록 하고 있다. 따라서 계산된 RPN 값은 실질적인 위험의 정도를 그대로 반영한다고 보기 어렵다. 뿐만 아니라 특정 고장원인에 대해 심각도, 발생도, 검출도 점수를 정할 때 FMEA를 어느 팀이 실시하는가에 따라 달라질 수 있다. 이와 같이 주관적인 판단의 영향으로 인해 FMEA는 똑같은 문제를 다른 팀이 분석할 경우 완전히 다른 결론이 도출될 수도 있다.

4. 결 론

고장원인들이 계층구조로 연결되어 있고 고장의 발생과정이 근본원인 발생으로부터 준고장 발생이 유발되고 최종적으로 실제 고장에 이르게 되는 형태일 경우에 대해 적용할 수 있는 FMEA 모형을 제시하였다. 순차적으로 일어나는 고장원인, 준고장, 실제 고장의 발생 시점에는 시간적인 지연이 있으며, 고장원인의 심각도는 고장원인을 탐지하는데 걸리는 검출시간과 준고장 및 실제 고장의 발생시간의 길이에 의존한다는 가정 하에 고장원인별로 위험도를 평가할 수 있는 수학적 모형을 도출하였다.

모형으로부터 도출되는 새로운 위험평가척도인 REM은 고장원인 및 고장 발생에 수반되는 비용 및 손실의 통계적인 기댓값을 토대로 구해진다. 따라서 REM은 고장원인에 따른 실질적인 위험의 크기를 정량적으로 표현한 값으로 볼 수 있다. 이것은 고장원인에 대한 조치 여부 및 우선순위를 정하기 위한 상대적 비교 척도로서의 성격을 지닌

RPN보다 유용한 정보를 제공할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, RPN 값은 FMEA 팀의 주관적인 판단에 영향을 많이 받지만 REM 값은 객관적인 데이터를 토대로 한 추정과 수학적 계산을 통해 계산되므로 보다 객관적인 판단기준을 제공할 수 있다. 다만, 추정에 필요한 정보가 충분하지 않을 경우에는 적용에 한계가 있겠으나 전통적인 FMEA를 수행하기 위해 필요한 정도의 정보를 토대로 REM 값을 대략적으로 구할 수도 있다. 한편, 고장이 발생하는 과정을 고려하여 지연시간을 모형에 포함시킴으로써 REM에는 보다 현실적인 위험 정보가 내포되어 있다고 할 수 있다. 산업현장에서는 문제의 근본원인을 추적하기 위해 5 Why기법을 많이 활용하는데 이는 근본원인에 이르기까지 계층구조가 있을 수 있기 때문이다. 제안된 모형에서는 고장원인에 계층구조가 있을 수 있다는 사실을 일부 반영함으로써 산업현장의 현실을 좀 더 잘 반영할 수 있도록 하였다.

제안된 모형에서는 지연시간의 분포를 지수분포로 가정하였고 원인구조도 두 계층인 경우만 취급하여 산업현장의 실제 상황을 제한적으로만 반영하고 있다. 그러나 (준)고장 및 검출에 대한 지수분포 가정은 현실을 반영하기에는 무리가 있다. 따라서 산업현장의 활용도를 높이기 위해서는 고장률 혹은 검출률이 증가하는 형태의 보다 현실적인 가정을 기반으로 한 후속연구가 있어야 할 것이다. 또한 둘 이상의 원인이 결합하여 고장을 일으키는 현상도 실제 상황에서는 많이 있을 수 있으므로 향후 이에 대한 연구도 기대된다. 그밖에 하나의 원인이 여러 고장을 유발하는 공통고장원인 등의 문제도 향후 연구과제에 포함될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Agung, S., and Kwon, H. M. 2012. "Corrective Action Strategy based on SWOT Analysis in Service FMEA." *Journal of Korean Society of Quality Management* 40(1):25-38.
- Baek, M. S., Jang, H. A., and Kwon, H. M. 2014. "A Modified Metric of FMEA for Risk Evaluation Based on ASIL of Safety System." *Journal of Korean Society of Quality Management* 42(4):543-562.
- Ford Design Institute 2004. FMEA HANDBOOK VERSION 4.1.
- Grundfos Management A/S. 2009. Mechanical shaft seals for pumps. <http://machining.grundfos.com/technical-library>
- Kim, H. J., An, Q. R., and Kim, S. W. 2014. "FMEA Measures for Service Failure Management." *Journal of Korean Society of Quality Management* 42(1):43-62.
- Kwon, H. M., Hong, S. H., Lee, M. K., and Sutrisno, A. 2011. "Risk Evaluation Based on the Time Dependence Expected Loss Model in FMEA." *Journal of the Korean Society of Safety* 26:104-110.
- Kwon, H. M., Hong, S. H., and Lee, M. K. 2013. "An expected loss model for FMEA under periodic monitoring of failure causes." *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers* 39:143-148.
- Kumru, M., and Kumru, P. Y. 2013. "Fuzzy FMEA application to improve purchasing process in a public hospital." *Applied Soft Computing* 13:721-733.
- Liu, H., Liu, L., and Liu, N. 2013. "Risk Evaluation Approaches in Failure Mode and Effects Analysis: A literature review." *Expert Systems with Applications* 40:828-838.
- Onodera, K. 1997. "Effective techniques of FMEA at each life-cycle stage." *Proceeding of Annual Reliability and Maintainability Symposium*: 50-56.
- Rhee, S. J., and Ishii, K. 2003. "Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability." *Advanced Engineering Informatics* 17:179-188.
- Yu, S. Yang, Q., Liu, J., and Pan, M. 2011. "A Comparison of FMEA, AFMEA and FTA." *Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS) 9th International Conference*: 954-960.

Wada, H. 2000. "Safety analysis methods and applications at the design stage of new product development-Introducing the FMFEA and S-H Matrix Method." Special issue: safety analysis and testing standards of ESPEC Technology Report 10:1-7.

부 록

I. 식 (6)의 유도

식 (6)에서 계수 b_{ij} 에 관련된 항들의 적분결과를 정리하면

$$\begin{aligned}
 & \bullet \int_0^\infty \int_0^u \int_0^\delta (\delta-t)\lambda_{ijk}e^{-\lambda_{ijk}t} \mu_{ijk}e^{-\mu_{ijk}\delta} \alpha_{ij}e^{-\alpha_{ij}u} dt d\delta du & (a) \\
 & = -\frac{\alpha_{ij}}{(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^2} + \frac{1}{\mu_{ijk}} - \frac{\alpha_{ij}}{\mu_{ijk}(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} - \frac{1}{\lambda_{ijk}} + \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ijk}(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} \\
 & \quad + \frac{\mu_{ijk}}{\lambda_{ijk}(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})} - \frac{\mu_{ijk}\alpha_{ij}}{\lambda_{ijk}(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk} + \alpha_{ij})}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \bullet \int_0^\infty \int_u^\infty \int_{\delta-u}^\delta (\delta-t)\lambda_{ijk}e^{-\lambda_{ijk}t} \mu_{ijk}e^{-\mu_{ijk}\delta} \alpha_{ij}e^{-\alpha_{ij}u} dt d\delta du \\
 & = \frac{\mu_{ijk}\alpha_{ij}}{(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk}) + (\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^2} - \frac{\mu_{ijk} + \alpha_{ij}}{\lambda_{ijk}(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} + \frac{\mu_{ijk} + \alpha_{ij}}{\lambda_{ijk}(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk} + \alpha_{ij})} & (b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \bullet \int_0^\infty \int_u^\infty \int_0^{\delta-u} u\lambda_{ijk}e^{-\lambda_{ijk}t} \mu_{ijk}e^{-\mu_{ijk}\delta} \alpha_{ij}e^{-\alpha_{ij}u} dt d\delta du & (c) \\
 & = \frac{\alpha_{ij}}{(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^2} - \frac{\mu_{ijk}\alpha_{ij}}{(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^2}
 \end{aligned}$$

이고 계수 c_i 에 관련된 항의 적분 결과는

$$\begin{aligned} & \bullet \int_0^\infty \int_u^\infty \int_0^{\delta-u} (\delta-t-u)\lambda_{ijk}e^{-\lambda_{ijk}t}\mu_{ijk}e^{-\mu_{ijk}\delta}\alpha_{ij}e^{-\alpha_{ij}u} dt d\delta du \\ &= \frac{\lambda_{ijk}\alpha_{ij}}{\mu_{ijk}(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} \end{aligned} \tag{d}$$

이므로 (a)~(d)항을 다시 정리함으로써 식 (6)을 얻을 수 있다.

II. 식 (7)의 유도

식 (7)의 b_{ij} 에 관련된 항들의 적분 결과를 정리하면

$$\begin{aligned} & \bullet \int_0^\infty \int_0^u \int_0^\delta (\delta-t)^2\lambda_{ijk}e^{-\lambda_{ijk}t}\mu_{ijk}e^{-\mu_{ijk}\delta}\alpha_{ij}e^{-\alpha_{ij}u} dt d\delta du \\ &= -\frac{2\alpha_{ij}}{(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^3} - \frac{2\alpha_{ij}}{\mu_{ijk}(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^2} - \frac{2\alpha_{ij}}{\mu_{ijk}^2(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} + \frac{2}{\mu_{ijk}^2} + \frac{2\alpha_{ij}}{\lambda_{ijk}(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^2} \\ & - \frac{2}{\lambda_{ijk}\mu_{ijk}} + \frac{2\alpha_{ij}}{\lambda_{ijk}\mu_{ijk}(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} - \frac{2\mu_{ijk}}{\lambda_{ijk}^2(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})} - \frac{2\alpha_{ij}}{\lambda_{ijk}^2(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} + \frac{2}{\lambda_{ijk}^2} \end{aligned} \tag{e}$$

$$\begin{aligned} & \bullet \int_0^\infty \int_u^\infty \int_{\delta-u}^\delta (d-t)^2\lambda_{ijk}e^{-\lambda_{ijk}t}\mu_{ijk}e^{-\mu_{ijk}\delta}\alpha_{ij}e^{-\alpha_{ij}u} dt d\delta du \\ &= \frac{2\mu_{ijk}\alpha_{ij}}{(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^3} - \frac{2\mu_{ijk}\alpha_{ij}}{\lambda_{ijk}(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^2} + \frac{2\mu_{ijk}\alpha_{ij}}{\lambda_{ijk}^2(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})} \end{aligned} \tag{f}$$

$$\begin{aligned} & \bullet \int_0^\infty \int_u^\infty \int_0^{\delta-u} u^2\lambda_{ijk}e^{-\lambda_{ijk}t}\mu_{ijk}e^{-\mu_{ijk}\delta}\alpha_{ij}e^{-\alpha_{ij}u} dt d\delta du \\ &= \frac{2\alpha_{ij}}{(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^3} - \frac{2\mu_{ijk}\alpha_{ij}}{(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})^3} \end{aligned} \tag{g}$$

이고 계수 c_i 에 관련된 항의 적분 결과는

$$\begin{aligned}
 & \bullet \int_0^\infty \int_u^\infty \int_0^{\delta-u} (\delta-t-u)^2 \lambda_{ijk} e^{-\lambda_{ijk}t} \mu_{ijk} e^{-\mu_{ijk}\delta} \alpha_{ij} e^{-\alpha_{ij}t} dt d\delta du \\
 & = \frac{2\lambda_{ijk}\alpha_{ij}}{\mu_{ijk}^2(\mu_{ijk} + \lambda_{ijk})(\mu_{ijk} + \alpha_{ij})}
 \end{aligned} \tag{h}$$

이므로 (e)~(h)항을 다시 정리함으로써 식 (7)을 얻을 수 있다.

