대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 55, No. 2, pp. 93-102, April 2018
eISSN:2287-7355, https://doi.org/10.3744/SNAK.2018.55.2.93

부식을 고려한 해저 파이프라인의 확률론적 중량물 낙하 충돌 위험도 해석

안쿠시 쿠마[1] · 서정관[2,†]
부산대학교 조선해양공학과[1]
부산대학교 선박해양플랜트기술연구원[2,†]

Probabilistic Risk Analysis of Dropped Objects for Corroded Subsea Pipelines

Ankush Kumar[1] · Jung Kwan Seo[2,†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University[1]
The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University[2]

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 reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Quantitative Risk Assessment (QRA) has been used in shipping and offshore industries for many years, supporting the decision-making process to guarantee safe running at different stages of design, fabrication and throughout service life. The assessments of a risk perspective are informed by the frequency of events (probability) and the associated consequences. As the number of offshore platforms increases, so does the length of subsea pipelines, thus there is a need to extend this approach and enable the subsea industry to place more emphasis on uncertainties. On-board operations can lead to objects being dropped on subsea pipelines, which can cause leaks and other pipeline damage. This study explains how to conduct hit frequency analyses of subsea pipelines, using historical data, and how to obtain a finite number of scenarios for the consequences analysis. An example study using probabilistic methods is used.

Keywords : Risk analysis(위험도 해석), Frequency analysis(빈도 해석), Dropped objects(중량물 낙하), Corroded subsea pipeline(부식된 파이프라인), Probabilistic approach(확률론적 접근법)

1. 서 론

파이프라인(pipeline)은 가연성 혹은 위험 물질과 같은 다양한 종류의 액체 및 가스를 한 곳에서 다른 곳으로 대규모로 수송 할 수 있는 실용적이며 효율적인 수단으로 다양한 산업현장에서 활용되어지고 있다. 그 중 자원개발용 해양플랜트설비에서 원유와 천연가스 운송을 위하여 해저면에 설치된 파이프라인은 대표적인 해양구조물이며 운영 시 구조적 안전성 평가를 수반하여야 한다.

전 세계적으로 설치된 파이프라인의 40%가 프로젝트 수명에 도달하고 있고, 이에 관련한 잔존 수명 연장과 향상을 위한 기술 개발이 꾸준히 요구되고 있는 실정이다. 특히, 운용중에 발생하는 중량물 낙하 등 다양한 위험요인을 반영하는 위험도 기반 설계 및 유지 보수 기술이 지속적으로 개발되고 있다 (Azevedo, 2007; Vinnem, 2013; Bai & Bai, 2005).

일반적으로 위험도 평가는 대상설비(시스템)의 복잡성과 심각성에 따른 방법(정량적, 정성적 및 준 정량적)으로 구분될 수 있고, 해양플랜트설비 전 생애주기에 대한 설계, 평가, 유지/보수 및 해체분야에 까지 다양한 접근법으로 활용 되고 있다. 그러나 천연 가스 및 원유 파이프라인에 지속적인 사고가 발생하고 있고 (Brito & Almeida, 2009), 설계단계부터 위험도 기반 예측기술 및 방지 기술 개발이 요구되고 있다. 이와 연관된 기술 개발이 진행되고 있지만 (Milazzo & Aven, 2012; Ma et al., 2013; Niedzwecki & Bai, 2014; Seo et al., 2015; Bai & Bai, 2014), 운용 중 혹은 노후화된 파이프라인을 대상으로 중량물 낙하 빈도 및 피해 예측기술은 상대적으로 부족한 현실이다 (DNV, 2010; Han & Weng, 2011; Woo et al., 2017).

Received : 3 August 2017 | Revised : 22 September 2017 | Accepted : 10 November 2017
† Corresponding author : Jung Kwan Seo, seojk@pusan.ac.kr

해양자원개발 측면에서 해저 파이프라인은 설치 수심이 깊어짐에 따라 수명연장에 관련한 기술이 요구되고 있고, 파이프라인의 노후화에 따른 강도 감소, 고수심에 따른 파이프라인 스팬(span) 증가 및 낙하물의 충돌 확률이 높아짐에 따라 결과적으로 붕괴(파손) 위험도이 증가 될 수 있다.

특히, 부식(corrosion)은 해양구조물에서 매우 복잡한 발생 메커니즘으로 알려져 있으며, 해저 파이프라인의 붕괴사고의 주요인이 부식으로 인해 발생한다고 보고되고 있다 (Teixeira et al., 2008; Shanbi & Zhaoxiong, 2015).

시간이 경과함에 따라 파이프라인은 운영 및 환경적인 영향으로 부식과 침식(erosion)현상이 발생되고, 파이프 내부의 오일과 가스의 유체의 흐름과 패턴이 변화되고 두께 감소로 인한 강도저하로 붕괴현상이 발생할 수 있다 (Teixeira et al., 2008; Koornneef et al., 2010; Ilman, 2014).

이러한 이유에 기존의 위험도 및 신뢰성 평가 연구는 파이프라인의 부식 현상과 부식에 인한 강도 특성을 고려한 연구가 활발히 진행되었지만 (Aynbinder, 1997; Crawley et al., 2003; Mohd et al., 2014a; 2014b; Cui et al., 2015; Lee et al., 2017), 부식을 고려한 중량물 낙하에 대한 연구는 미미한 실정이다. 노후화된 해저파이프라인에 대한 위험도 기반의 관리와 제어를 위해서는 반드시 검토되어져할 사항이다.

따라서 본 연구에서는 부식된 해저 파이프라인을 대상으로 중량물 낙하에 대한 위험도 해석절차를 소개하고 적용성을 검토하였다. 제안된 절차에 따라 확률론적 접근법을 이용하여 부식된 해저 파이프라인에 떨어진 물체의 충돌빈도와 에너지를 산정하고, 이를 통해서 위험도 평가에 활용될 수 있는 최종적인 확률초과곡선으로 표현하였다.

2. 위험도 평가 절차

위험도 평가 절차는 대상 설비 혹은 시스템의 특성에 맞게 다양한 방법으로 적용되고 있다. 국제표준에서는 위험도를 '사건의 확률과 그 결과의 결합'이라고 정의하고 있고, 한편 ISO 13702 (ISO, 2015)에서는 "위험한 특정 사건이 발생할 확률과 사건 결과의 심각도를 경합한 용어"라고 정의하고 있다. 일반적으로 식 (1)로 표현할 수 있고, 위험도(R)는 사고확률(P_i)과 사고의 피해규모(C_i)의 곱으로 정의된다.

$$R = \sum (P_i \times C_i) \tag{1}$$

본 연구에서는 Formal Safety Assessment(FSA)의 기반으로 3단계(위험요소파악, 위험도 평가, 대책수립)에 관련한 절차를 부식된 해저 파이프라인의 확률론적 중량물 낙하 위험도 평가 Fig. 1과 같이 제안하였다. 특히, 기존의 부식을 고려한 충돌해석법은 낙하시나리오(낙하물의 형상)에 충돌체의 부식을 별도로 고려하여 수행하지만, 본 연구에서는 낙하물과 충돌체의 부식을 전체 낙하시나리오에 함께 산정하는 기법으로 불확실성을 최소로 하는 장점이 있다. 다음은 제안된 절차에 대해서 간략하게 설명하고자한다.

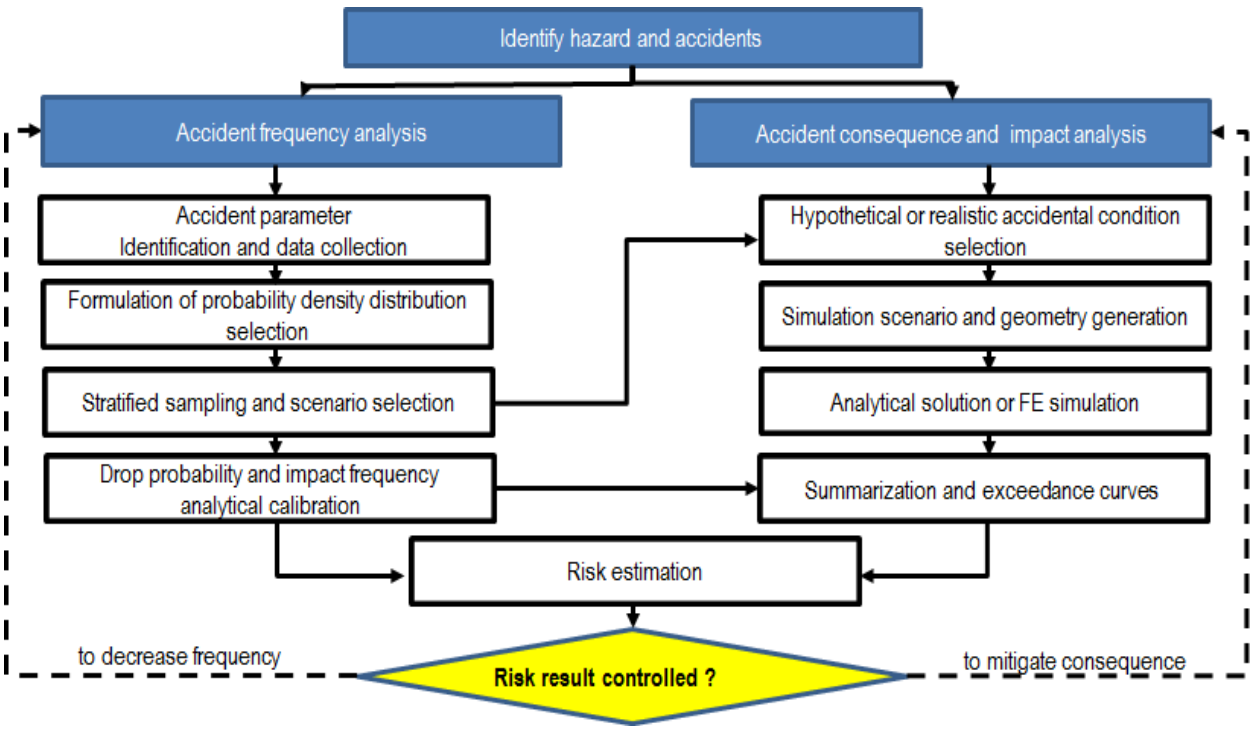


Fig. 1 Proposed dropped objects risk assessment flow chart

2.1 위험요소 파악

해저 파이프라인 시스템의 위험도를 파악하기 위해서는 우선 위험요소를 식별해야 한다. 따라서 해저 파이프라인 현장의 매설된 위치, 깊이, 온도, 내부 압력 및 파이프 내부의 흐름 등 다양한 정보가 수집되어야할 것이다. 또한, 낙하물체의 모양, 직경 두께 및 파이프의 재료특성 등의 정보도 필요하게 된다.

노후화된 파이프라인에서는 부식의 크기, 범위, 특성 등 다양한 부식모델링 관련 자료가 요구되고, 기존의 수집 혹은 계측된 부식 데이터 분석을 통하여 정량화 및 수치화 작업이 수행되게 된다.

2.2 확률론적 위험도 평가 (Risk Assessment)

파이프라인의 중량물 낙하의 위험도는 식 (1)에서 언급했듯이 충돌 확률과 충돌로 인한 피해규모(오일 누출에 관련한 비용, 기기손상에 관련한 비용 등)의 곱으로 표현된다.

그러나 일반적으로 중량물 낙하의 관련한 위험도 해석은 DNV-RP-F107에서와 같이 충돌 빈도와 충돌에너지 혹은 흡수에너지에 대한 확률누적곡선(accumulated frequency curve)으로 설계 및 제어방안에 활용되어지고 있다 (DNV, 2010). 확률누적곡선은 피해규모(오일누출, 운용정지) 계산시 파이프라인의 충돌에너지를 강도와 직접적인 연관성이 있는 것으로 평가 하고 있기 때문이다.

본 연구에는 먼저 대상 설비 및 파이프라인 시스템에 발생 가능한 모든 중량물 낙하사고의 시나리오를 선정한다. 시나리오는 충돌체인 파이프라인의 부식 및 낙하물 형상에 관련한 매개변수(variable)를 선정하고 선정된 매개변수에 대해서 각각 독립적인 확률밀도함수(Probabilistic Density Function, PDF)를 계산한다. 확률밀도함수를 이용하여 발생 가능한 모든 시나리오에서 샘플링(sampling)기법을 이용하여 대표성 있는 최적의 시나리오 산정하고, 산정된 시나리오를 이용하여 빈도 및 충돌에너지를 계산하게 된다.

특히, 부식은 계측자료 및 통계적 자료를 이용하여 부식특성에 관련한 형상 변수를 각각 독립 확률누적함수로 계산 할 수 있다. 이는 다양한 부식현상이 파이프라인의 기하학적인 형상변화로 인한 강도저하의 주원인이므로 모든 부식특성을 발생 가능한 확률모델로 표현이 가능하기 때문이다.

선정된 시나리오는 다음과 같이 크게 4단계로 최종적인 충돌 초과곡선의 형태로 표현된다. 1) 선정된 시나리오에 대한 충돌에너지에 대한 각각 시나리오별 충돌에 대한 빈도수 (frequency)를 계산, 2) 1단계에서 만들어진 계산결과에 따라 충돌에너지가 큰 순으로 재배치하여 시나리오 구성하여 누적 타격빈도수 (accumulative hit frequency) 계산, 3) 2단계에서 만들어진 표를 가지고, 충돌에너지와 관련한 초과빈도(exceedance frequency)를 계산, 4) 확률초과곡선(exceedance curve)을 사용하여 타격초과빈도(exceedance hit frequency)를 허용할 수 있는 수준 (e.g., 10-4/y)에서의 충돌에너지에 관한 사고하중을 산정할 수 있다.

방법론적인 측면에서 DNV-RP-F107 (DNV, 2010)의 방법에서는 매설된 파이프라인의 반경에 따라 조건부로 충돌될 예상 시나리오를 순차적으로 검토 하지만, 본 연구에서는 충돌발생 가능성을 낙하물과 부식이 고려된 충돌체의 형상 및 특성을 매개변수로 하여 그 조합에 따라 시나리오를 선정하는 방법으로 사고의 발생 가중치를 균일하게 평가하므로 불확실성의 최소로 하는 장점이 있다.

2.3 대책수립 (Decision-Making)

DNV-RP-F107 (DNV, 2010)과 같은 확률초과곡선은 충돌사고설계하중(impact design accidental load) 및 사고평가하중(impact accidental assessment load)의 형태로 위험도 기준과 비교하여 제어기법을 도출할 수 있다. 위험도 평가는 허용기준 등은 충돌에너지 혹은 덴트 반경(dented diameter)의 형태로 최종적으로 제어 및 관련 후속 방안에 활용 될 수 있다.

대상 설비 및 시스템에서 위험도는 합리적으로 실행할 수 있는 범위에서 낮게 유지되어야 한다(As Low as Reasonably and Practicable, ALRAP). 즉, 저비용의 위험도 감소 방법을 고려하더라도 허용가능한 수준의 대책 등이 결정되어야 한다. 일반적으로는 사고 빈도의 감소 대책은 피해규모의 완화 조치 이전에 우선 적으로 검토가 되어져야한다. 또한, 추가적으로 다양한 비용-효과 분석 등을 수행하여 효율적이고 경제적인 제어 방안을 수립할 수 있다.

3. 심해저 파이브라인 적용

3.1 대상 해양플랫폼 및 파이프라인 시스템

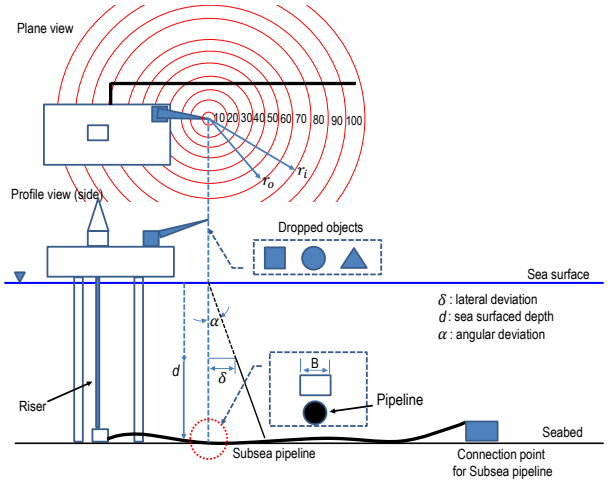


Fig. 2 Subsea pipeline and considered scenario

대상 해저 파이프라인은 Fig. 2와 같이 수심(d) 150 m의 설치

되어 운영 중인 해양공정설비를 대상으로 수행하였다. 상부구조물에서 다양한 형태의 중량물이 낙하 사고 중 대표적인 크레인 관련한 기계적 고장 및 작업자의 실수 등 사고에 대하여 통계적인 데이터베이스를 통해 검토하였다 (OGP, 2010).

낙하물의 범위은 크레인 암(arm)의 길이 반경 이내의 상부구조물 충돌과 해저파이프라인과의 충돌로 구분 할 수 있다. 그러나 본 연구에는 낙하물의 상부구조물과의 충돌은 Fig. 2와 같이 제외하고 바다에 떨어지는 사고에 대해서만 적용하였다.

일반적으로 해양설비에서는 크레인이 두 개 이상으로 운영을 하고 있다. 따라서 특정 반경 영역에서 물체가 바다로 떨어질 확률이 그에 따라 증가 할 수 있고, 파이프라인은 파이프의 재료 특성 및 부식 수준에 따라 피해규모에 영향을 받을 수 있다. 그러나 본 연구에서는 적용성 측면에서 한 개의 크레인에 대해서 검토하였다.

Table 1 Pipeline material properties

Pipeline material grade	API 5L X52
Outer diameter (D)	0.40 m
Wall thickness (d)	0.0127 m
Material density (ρ)	7850 kgm^{-3}
Young's modulus (E)	2.10×10^{11} Pa
Yield strength (σ_Y)	3.66×10^{8} Pa
Poisson's ratio (v)	0.33
Design pressure (P_d)	1.02×10^{7} Pa
Test pressure (P_t)	1.5×10^{7} Pa
Operating pressure (P_{op})	1.17×10^{6} Pa (Flow), 1.609×10^{6} Pa (Hydrostatic)
Operating temperature (T_{op})	422 K

대상 해저파이프라인의 재료적 특성은 Table 1과 같다 (Ilman, 2014; Niedzwecki & Bai, 2014). 또한 낙하물이 해양 표면에서 해저면의 충돌시 유체역학적인 환경을 고려한 종단속도(terminal velocity), 항력(drag Force)등이 검토되어져야 한다 (Table 3 참조).

3.2 낙하물 및 부식된 파이프라인

3.2.1 낙하물

낙하물체의 형태는 파이프에 전달되는 에너지산정에 매우 중요한 역할을 한다. 기존의 해양플랜트 중량물 낙하 사고의 통계적인 사고 조사에 따라 세 가지 대표 형상을 선택하였다.

검토된 직육면체(box), 구형(sphere) 그리고 프리즘(prism)에 대해서 종속 형상 변수인 지름(V1), 너비(V2), 길이(V3), 높이(V4), 변의 길이(V5) 등 총 5개의 독립적인 확률누적함수로 고려했다 (Table 3참조). 이러한 이유는 세가지 형태의 낙하물 형상을 매개변수로 하면 발생 가능한 낙하물의 모든 형상을 구현할 수 있기 때문이다.

또한, 낙하물의 중량(V9)은 충돌 에너지의 계산에서 매우 중요한 요소이고, 해저면에 설치한 파이프라인의 충돌에너지 산정에 필요한 종단속도는 물체의 중량에 따라 달라진다. 따라서 통계적으로 처리한 사고조사 결과를 바탕으로 한 모든 낙하물의 중량을 변수로 하면 확률 함수로 정의하였다.

관련된 유체역학적인 종단 속도, 항력, 충돌각 등은 상수로 중량에 대한 종속적인 변수이므로 확정적인 값으로 처리 하였다.

3.2.2 부식된 파이프라인

해양구조물에서 경도 및 합금강과 부식에 관련한 연구는 지속적으로 진행되고 있고, 다양한 해양구조물에 대한 부식모델이 제안되고 있다 (Teixeira et al., 2008; Aynbinder, 1997).

해저 파이프라인의 대한 부식에는 크게 Table 2와 같이 크게 7 가지 유형(PETRONAS, 2011)으로 구분할 수 있다. 또한 실제 운용 중인 파이프라인을 피깅계측장비를 이용하여 확보된 부식 데이터를 이용하여 관로 내부 깊이, 너비, 길이로 단순화하여 관련 강도 해석에 적용을 하였다 (Haril et al., 2014; Cui et al., 2015).

따라서 본 연구에서는 파이프라인의 Fig. 3와 같이 길이(L, V7), 부식 폭(W, V8) 및 파이프라인 두께(t, V6)의 세 가지 매개변수로 결정될 수 있는 단순화 된 부식 모델로 가정하였다.

파이프라인에서 직사각형 모양의 내부 피막을 일정두께로 제거하면, 이것은 모든 방향에서 최대 부식량을 포함하고 있는 보수적인 부식모델로써, 향후 이와 유사연구에 활용이 가능 하다.

Table 2 Classification of corrosion in gas pipelines

Class	Definition	Reference point/size for the POD (L×W)
General	$W\geq3t$, $L\geq3t$	4t × 4t
Pitting	$1t\leq W<6t$, $1t\leq L<6t$, $0.5<L/W<2$ not $W\geq3t$, $L\geq3t$	2t × 2t
Axial grooving	$1t<W<3t$, $L/W\geq2$	4t × 2t
Circumferential grooving	$L/W\leq0.5$, $1t\leq L<3t$	2t × 4t
Pinhole	$0<W<1t$, $0<L<1t$	0.5t×0.5t
Axial slotting	$0<W<1t$, $L\geq1t$	2t × 0.5t
Circumferential slotting	$W\geq1t$, $0<L<1t$	0.5t × 2t

Note: W = corrosion width, L = corrosion length, t = pipeline wall thickness, POD = probability of detection.

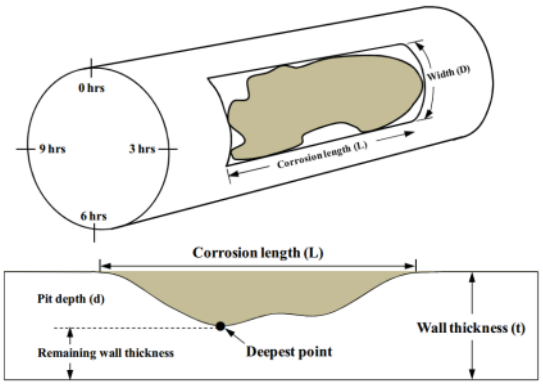


Fig. 3 The different idealized parameters of pipeline corrosion characteristics.

3.3 확률밀도함수 및 적합도

Table 3는 본 연구에서 선정된 10가지 (V1~V10)의 매개변수 (variable parameter)이다. 5개의 확정적인 값(deterministic value) 및 대상 시스템의 선정에 따라 정의되는 5개의 상수 (constant)로 구분 할 수 있다.

일반적으로 확정론적인 방법은 발생 가능한 모든 시나리오에서 가장 심각성이 높은 변수로 구성된 시나리오를 선정하고, 선정된 사고 시나리오에 대한 결과를 바탕으로 설계 및 제어 방안을 검토하지만, 이는 불확실성을 포함하고 있다.

따라서 발생가능한 모든 사고에 대한 변수를 추출하고 추출된 변수의 확률함수를 정의하고 정의된 독립적인 확률함수를 이용하여 전체 발생 가능한 시나리오 중 대표성을 가질 수 있는 샘플링 기법을 사용하여 최종 중량물 낙하사고 시나리오를 결정하게 된다.

먼저 선정된 10가지의 매개 변수를 통계적인 혹은 계측된 데이터를 통하여 확률함수를 계산한다. 일반적으로 사용 가능한 분포 함수를 모두 고려하여 분포함수의 적합성을 판단되어져야 한다. 즉, 각 변수의 특정 통계 데이터에 대한 최적의 데이터 특성을 갖는 특정 분포를 선택함으로써 최종 매개변수의 대표 확률누적함수로 적합성 및 대표성을 확보 할 수 있기 때문이다.

Table 3 Selective parameters

Variable	Deterministic	Constant
Size • Diameter (V1) • Box length (V3) • Box breadth (V2) • Height (V4) • Triangular prism length (V5)	• Drag surface • Drag force • Terminal velocity • Hit angle • Energy	• Sea surface height • Pipeline material properties • Pipeline shape and diameter • Hydrostatic pressure • Internal pressure
Corrosion parameters • Pit depth (V6) • Pit length (V7) • Pit breadth (V8)		
• Weight(V9)		
• Object shape (V10)		

이를 위해 Kolmogorov-Smirnov 테스트(K-S 테스트) 및 Anderson Darling 테스트와 같은 다양한 분포 적합도(Goodness of Fit, GF) 테스트 기법을 활용할 수 있다 (Ross, 2009).

본 연구에서는 적합도 또는 임의 확률 변수에 가장 적합하게 사용되는 K-S 테스트를 사용하였다. 이것은 샘플을 기준 확률분포와 비교하는 데 사용할 수 있는 연속적인 1 차원 확률 분포의 비모수 테스트이고, K-S 통계량은 표본의 경험적 분포 함수와 참조 분포의 누적 분포 함수 간 또는 두 표본의 경험적 분포 함수 간 거리를 정량화 하는 내용으로 KS 검정 통계량 Dn은 관측치 x에 대한 경험적 누적 분포 함수(CDF) $F_n(x)$와 후보 분포 F(x)의 CDF 사이의 가장 큰 절대 값이 1 보다 작아야 하는 방법으로 식 (2)와 같이 표현된다.

Table 4 The D_n values for all variables for the K-S test for best fit (highlighted values are the best fit for each variable)

PDF	Sphere dia.	Box(B)	Box(L)	Object height	Prism	Pit depth	Pit length	Pit breadth	Weight	Shape
Exponential	0.20965	0.20978	0.28736	0.34685	0.21181	0.14355	0.2185	0.18235	0.25317	0.42983
Normal	0.172	0.16976	0.27147	0.22752	0.17866	0.11619	0.10627	0.14287	0.125	0.25046
Weibull	0.14073	0.13781	0.21652	0.18598	0.14112	0.08235	0.10993	0.11823	0.1433	0.24734
Lognormal	0.20758	0.20526	0.2235	0.1972	0.20691	0.10323	0.17742	0.15487	0.1785	0.3279
Log-Logistic	0.34497	0.34322	0.37773	0.2456	0.34354	0.22392	0.27225	0.25986	0.21725	0.47572
Gamma	0.14732	0.14269	0.21722	0.18752	0.14929	0.11057	0.12757	0.15096	0.16547	0.26533
Logistic	0.18081	0.17679	0.29074	0.24003	0.17978	0.13693	0.1288	0.16415	0.14665	0.26659

$$D_n = |F_n(x) - F(x)| \quad (2)$$

모든 변수에 대한 D_n 값의 최소값을 Table 4에 표현하였고. 최적의 적합도 높은 확률분포함수를 선택할 수 있다. 또한 선정된 각 확률 누적분도에 따른 대표적인 매개변수의 PDF (Probability Density Function)를 Fig. 4에 도시하였다.

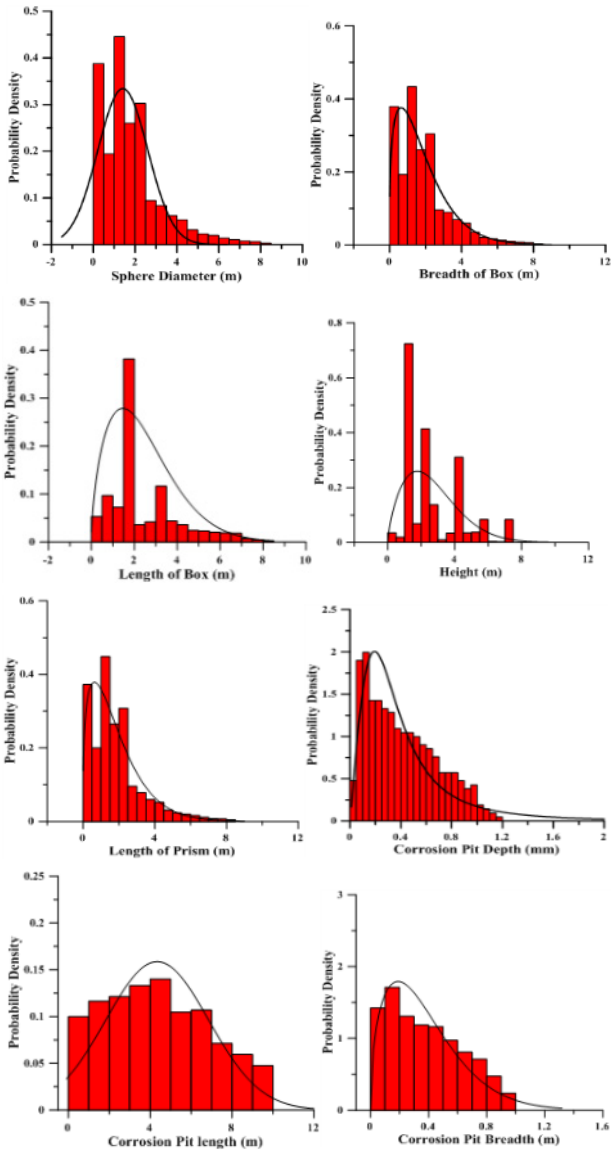


Fig. 4 The PDF for random variables

3.4 시나리오 선택

선정된 총 10개의 매개변수로 구성된 사고 시나리오를 구현하기 위해서 널리 알려진 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin Hypercube Sampling, LHS) 기법을 사용하였다 (Ye, 1998). LHS는 복잡한 시스템에서 대규모의 샘플을 선정하여 불확실성을 제할 때 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다. 이러한 적용 방법의 효율성 때문에 다양한 매개변수를 갖는 해양플랜트에서의 폭발과 화재와 같은 사고 시나리오에 선정에도 활용되고 있다 (Seo et al., 2017).

본 연구에서 LHS을 통하여 정립된 사고 시나리오를 Appendix에 실었다. 낙하물을 세가지의 형태로 구분하여 최종적으로 육면체 및 프리즘의 경우는 종속된 독립변수에 따라서 각각 20개, 9개와 10개의 시나리오를 추출하였다.

샘플링 개수가 증가함 따라 보다 많은 전체의 발생가능 시나리오를 포함될 수 있지만, 이는 시나리오의 계산 시간 등에 영향을 줄 수 있고, 그러나 본 연구에서는 선정된 시나리오 개수의 결정은 관련 유사한 연구결과의 독립변수의 수에 관련한 샘플링 개수를 기반으로 선정하였다 (Seo et al., 2017).

3.5 시나리오 해석

다음은 선정된 시나리오에 대한 해석을 수행한다. 본 연구에서는 위험도의 정의 시 활용되어지는 빈도와 피해규모 (충돌에너지)의 형태로 기존에 DNV-RP-F107의 경험식을 이용하여 해석을 수행하였다 (DNV, 2010).

3.5.1 낙하물 빈도

Fig. 2에서 낙하 중량물이 대상 해양플랫폼의 크래인 암의 반경 영역에서 심해저에 매설된 파이프라인에 충돌 할 확률을 계산한다. 먼저 물체가 특정 반경에 떨어질 확률에 관련한 변수인 수심(d), 각도 편차(α) 및 횡 편차(δ)를 사용하여 식 (3)과 (4)를 이용하여 계산된다.

$$\delta = d \bullet \tan\alpha \quad (3)$$

$$P_{Hit}(x \le r) = \int_{-r}^{r} \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{\delta})^2} dx \quad (4)$$

두 방정식은 측면 편차(lateral deviation: δ) Table 5에서 첫 번째 반경 10 m 영역 내에서 떨어질 확률을 나타낸다. 10m 이내의 지역 당 낙하 확률 $P_{Hit,10}$을 계산할 수 있다. 이러한 방법으로 순차적으로 반경을 증가하면서 충돌확률을 구할 수 있다.

또한 낙하확률이 상대 표면적(surface area: A_r)으로 나뉠 때, 물체가 특정 반경에서 해저에 충돌할 확률을 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{Hit,sl,r} = \frac{P_{Hit,r}[P(r_o - (r_i)]}{A_r} \times L_{sl}(D+B) \quad (5)$$

여기서 특정 반경에서 파이프라인의 충돌확률은 해저면의 대상 반경의 내경(r_i)와 외경(r_o)의 차이의 충돌확률로 표현 할 수 있다 (Fig. 2 참조). 이를 위해선 특정된 반경에서 파이프라인이 매설된 설치 도면 등 관련한 정보가 필요하다. 선정된 해당 지역 내 떨어지는 낙하물체의 투영된 폭(B), 파이프라인 치수(D) 및 파이프라인 길이(L_{sl})등의 정보는 Table 5에 표현하였다.

Table 5 Energy and frequency for each object

no	Box		Sphere		Prism	
	Energy (KJ)	Frequency (per year)	Energy (KJ)	Frequency (per year)	Energy (KJ)	Frequency (per year)
1	110.06	7.03E-13	656.64	7.71E-14	6.56	0.000971
2	46.89	9.19E-13	522.92	7.49E-13	2215.32	4.69E-14
3	12.83	3.58E-07	545.82	8.93E-14	271.10	0.000119
4	300.50	6.67E-13	529.74	8.02E-13	919.25	6.94E-14
5	205.25	6.54E-14	180.29	3.90E-07	15.64	0.000152
6	153.25	7.26E-14	20527.04	3.28E-14	663.70	0.000134
7	126.73	7.74E-13	327.72	1.27E-12	1969.58	6.79E-14
8	251.74	6.01E-14	1131.48	3.41E-07	467.52	1.02E-13
9	18.47	3.94E-07	281.29	4.90E-07	93.18	0.000317
10	2.03	8.18E-07			696.50	9.49E-14
11	274.97	6.14E-14			223.49	8.38E-05
12	401.18	1.40E-12			763.11	9.78E-05
13	120.32	7.56E-13			98.97	0.000143
14	336.29	8.82E-13			3657.43	4.82E-14
15	399.31	9.59E-13			42.52	0.000137
16	68.22	3.18E-07			239.75	0.000131
17	114.06	2.24E-07			20.21	0.001061
18	151.40	1.19E-06			1922.92	3.83E-14
19	310.05	6.82E-07			282.16	0.000199
20	503.62	1.88E-07			336.78	4.96E-05

$$F_{Hit,sl,r} = N_{lift} \times f_{drop} \times P_{Hit,sl,r} \quad (6)$$

최종적으로 식 (6)에 서 표현하는 것처럼 중량물의 낙하에 대한 충돌빈도($F_{Hit,sl,r}$)는 충돌확률($P_{Hit,sl,r}$), 크래인 작동 수(N_{lift}) 및 작동에 따른 낙하 빈도(f_{drop})의 곱으로 최종적으로 계산된다. 일반적으로 파이프라인의 충돌빈도의 허용기준은 7x10E-3(/y) 이하로 적용하고 있다 (Bai & Bai, 2014).

3.5.2 충돌 에너지

떨어지는 물체의 에너지를 계산하기 위해서는 유체역학적인 종단속도를 검토해야 한다. 종단속도는 항력이 가속도와 같아지는 속도이기 때문에 종단속도에 도달하면 일정한 속도가 발생 되는데, 이것을 식 (7)과 같이 표현할 수 있다. 종단속도는 낙하물체가 파이프라인으로 전달하는 에너지형태로 식 (8)과 같이 표현된다.

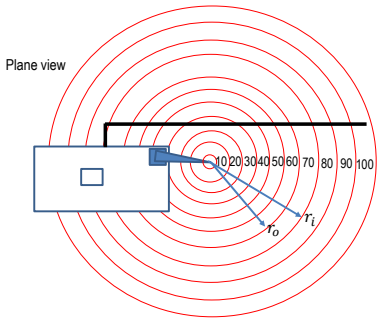
$$(m - V\rho)g = \frac{1}{2}\rho C_d A V_t^2 \quad (7)$$

$$E = \frac{1}{2}(M + M_a) V_t^2 \quad (8)$$

Table 6는 선정된 시나리오에 대한 낙하물 에너지와 충돌빈도에 대한 결과이다. Fig. 5 는 각각 충돌체의 형상에 대한 충돌빈도와 에너지를 초과곡선(exceedance curve)으로 표현하였다.

Table 6 Length of pipe inside each ring

Ring	length
0-10	0
10-20	0
20-30	0
30-40	0
40-50	9
50-60	10
60-70	22
70-80	45
80-90	50
90-100	25

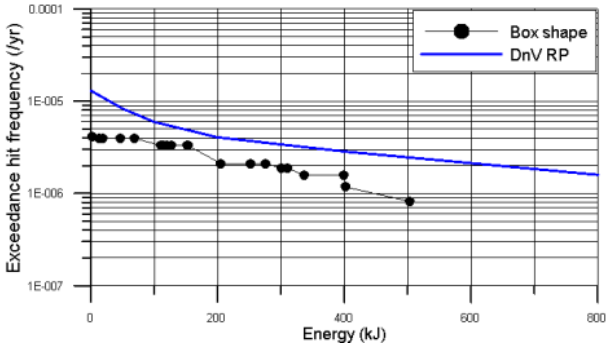


직육면체(box), 구형(sphere), 프리즘(prism)의 낙하형상별로

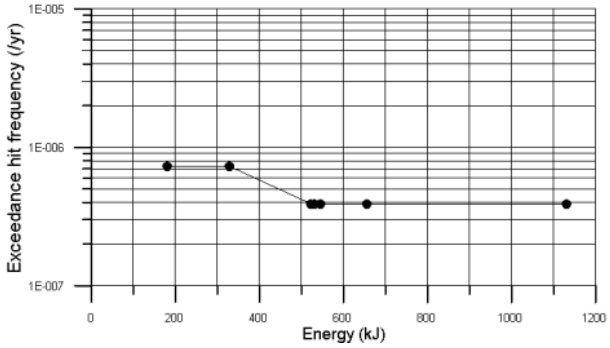
초과곡선의 경향은 프리즘형상이 구형 및 직육면체 낙하물 비해서 동일 수준의 중량에서 상대적으로 충돌빈도가 높은 결과를 보여주고 있다. 이는 대상구조물 설비 특성상 프리즘 형상에 대한 크래인 작동수(N_{lift})등이 상대적으로 높게 조사되어졌기 때문이다. 이를 충돌빈도의 허용값(7x10E-3 /y) 기준과 비교해 보면 본 연구의 대상으로 한 파이프라인 시스템은 허용치 안에 있는 것을 확인 할 수 있다.

또한 직육면체 형태의 낙하물에 대한 결과인 Fig. 5(a)과 선급(DNV-RP-F107)에서 제안하는 충돌에너지수준을 비교해 보면, 선급의 제안수준에 비해 보수적인 결과임을 확인 할 수 있다.

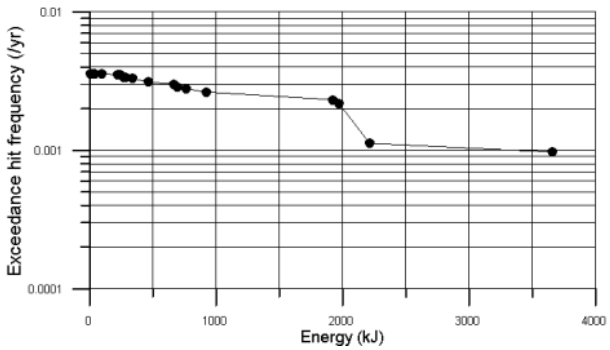
이러한 원인은 본 연구에서 적용한 확률론적인 형상에 관련 매개변수 선정기법에서 도출된 확률밀도함수를 바탕으로 시나리오 방법과 부식을 고려하지 않은 통계적인 데이터 기반의 제안식과의 상대적인 방법론 및 부식고려 차이로 설명될 수 있다.



(a) Box



(b) Sphere



(c) Prism

Fig. 5 Exceedance curves for box, sphere, prism shape

3.6 피해규모 및 결과 분석

전술한 것과 같이 위험도의 정의 측면에서 피해규모(consequence)는 환경적인 위험도(environmental risk)로 정의될 수 있다. 중량물 낙하로 인해 충돌에너지가 부식된 파이프라인의 강도를 초과하는 경우는 환경파괴로 보고 이를 보상하기 위해 소요되는 되는 비용으로 정의가 되어져야 한다.

특히, 내부 가스 혹은 오일의 방출량 및 속도는 파이프 지름, 파이프 유속 및 누출 또는 파열과 같은 붕괴모드에 연관되어져야 한다. 그러나 현재 이런 상세한 환경적인 영향을 포함한 분석은 부족한 실정이고, 일반적으로 식 (9)와 같이 충돌에너지는 파이프라인의 형상과 손상크기(덴트)등을 변수로 표현되고 이를 피해규모(Consequense of Failure, CoF)로 Table 7과 같이 형식으로 최종적으로 제안하고 있다.

$$E = 16\left(\frac{2\pi}{9}\right)^{0.5} m_p \left(\frac{D}{t}\right)^{0.5} D\left(\frac{P_{\mathrm{def}}}{D}\right)^{1.5} \quad (9)$$

여기서, m_p=0.25×σ_Y×t^2, P_{def}=Pipe deformations, t=wall thickness, σ_Y=Yield stress of pipe, D=outer diameter.

Table 7 Safety consequence failure ranking (DNV-RP-F107)

CoF	Dent diameter (%)	Impact energy (KJ)	CoF identification
A	< 5	< 5	Very low
B	5 - 10	5 - 12	Low
C	10 - 15	12 - 23	Medium
D	15 - 20	23 - 35	High
E	>20	>35	Very high

충돌에너지 측면에서는 기존의 널리 활용되어지는 이론적 및 경험적인기법을 사용하여 에너지를 산정하지만, 향후 정밀한 3차원 유한요소해석 등을 이용하면 보다 정밀한 결과를 예측할 수 있을 것이다.

또한, 정량적이고 명확한 피해규모에 대해서 비용 산정 기술 및 위험도 평가기반 유지보수 등 파이프라인 시스템의 전 생애주기에 대한 명확한 불확실성 모델링기술 등의 연구가 필요할 것이다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 부식된 해저 파이프라인에 중량물 낙하에 따른 위험도 평가의 절차를 제안하였다. 절차의 적용성을 위하여 실제 운영중인 설비를 대상으로 발생가능한 사고 시나리오를 구현하기 위해서 발생 가능한 매개변수를 확률 밀도 함수로 정의하였다.

정의된 총 10개의 독립변수의 확률 밀도 함수를 통하여 라틴 하이퍼큐브 샘플링 기법을 이용하여 총 49개의 시나리오를 선정하였다.

선정된 시나리오를 통하여 충돌 빈도, 충돌에너지를 경험적인 인 간이 예측식을 이용하여 확률 초과 곡선을 표현하였다. 대상 해양플랫폼의 매설된 파이프라인의 수리 및 보유 등에 활용할 수 있는 형태의 결과물의 도출하였다. 또한 제안된 절차가 적용성 및 경향성 측면에서 DNV-RP-F107과의 수준을 판단하고자 충돌 에너지수준을 상대 비교 분석을 수행하였다.

그러나 본 연구 결과는 정밀하고 정량적인 위험도 평가 및 관리 절차를 활용을 위하여 향후 제안된 관련절차 및 정확도 정밀도를 향상을 기존의 선급제안법 및 관련 기법과의 정밀한 비교 분석이 수행되어야할 것이다. 또한, 불확실성 모델링 기술 및 파열강도, 강도 예측에 관련한 심각도 효과(오일 누출, 기기손상 등) 등의 다양한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

Aynbinder, A., 1997. New method determines effect of concrete coating on pipe-collapse pressure. *Oil and Gas Journal*, 95(43), pp.57-63.

Azevedo, C.R.F., 2007. Failure analysis of a crude oil pipeline. *Engineering Failure Analysis*, 14(6), pp.978-994.

Bai, Y. & Bai, Q., 2005. *Subsea pipelines and risers*. Elsevier: MA, USA.

Bai, Y. & Bai, Q., 2014. *Subsea pipeline integrity and risk management*. Gulf Professional Publishing: MA, USA.

Brito, A.J. & Almeida, A.T., 2009. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 187-198.

Crawley, F.K., Lines, I.G. & Mather, J., 2003. Oil and gas pipeline failure modelling. *Process Safety and Environmental Protection*, 81(1), pp.3-11.

Cui, Y., Kim, D.W., Seo, J.K., Ha, Y.C., Kim, B.J. & Paik, J.K., 2015. Serviceability assessment of corroded subsea crude oil pipelines. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(2), pp.153-160.

Det Norske Veritas (DNV), 2010. *DNV-RP-F107: Risk assessment of pipeline protection*. Det Norske Veritas: oslo, Norway.

Han, Z.Y. & Weng, W.G., 2011. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of Hazardous Materials,* 189(1), pp.509-518.

Ilman, M.N., 2014. Analysis of internal corrosion in subsea oil pipeline. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 2(1), pp.1-8.

International Organization for Standardization (ISO), 2015. ISO 13702:2015: *Petroleum and natural gas industries*. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.

Koornneef, J., Spruijt, M., Molag, M., Ramírez, A., Turkenburg, W. & Faaij, A., 2010. Quantitative risk assessment of CO_2 transport by pipelines—a review of uncertainties and their impacts. *Journal of hazardous materials*, 177(1), pp.12-27.

Lee, G.H., Seo, J.K. & Paik, J.K. 2017. Condition assessment of damaged elbow in subsea pipelines. *Ships and Offshore Structures*, 12(1), pp.135-151.

Ma, L., Li, Y., Liang, L., Li, M. & Cheng, L., 2013. A novel method of quantitative risk assessment based on grid difference of pipeline sections. *Safety Science,* 59, pp. 219-226.

Milazzo, M.F. & Aven, T., 2012. An extended risk assessment approach for chemical plants applied to a related to pipe ruptures. *Reliability Engineering & System Safety,* 99, pp.183-192.

Mohd, M.H., Kim, D.K., Kim, D.W. & Paik, J.K., 2014a. A time-variant corrosion wastage model for subsea gas pipelines, *Ships and Offshore Structures*, 9(2), pp. 161-176.

Mohd, M.H., Kim, D.K., Lee, B.J., Kim, D.K., Seo, J.K. & Paik, J.K., 2014b. On the burst strength capacity of an aging subsea gas pipeline. *Journal Offshore Mechanics and Arctic Engineering,* 136(4), pp.1-7.

Niedzwecki, J.M. & Bai, Y., 2014. Modeling deepwater seabed steady-state thermal fields around buried pipeline including trenching and backfill effects. *Computers and Geotechnics,* 61, pp.221-229.

OGP, 2010. No. 432: *Risk Assessments data directory*. International Association of Oil and Gas Producers (OGP): UK.

PETRONAS. 2011. *Pipeline inspection report*. Kuala Lumpur: Petroliam Nasional Berhad (PETRONAS).

Ross, S.M., 2009. *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*. Academic Press: MA, USA.

Seo, J.K., Cui, Y., Mohd. M.H., Ha, Y.C., Kim, B.J. & Paik, JK., 2015. A risk-based inspection planning

method for corroded subsea pipelines. *Ocean Engineering*, 109(15), pp.539-552.

Seo, J.K., Lee, S.E. & Park, J.S., 2017. A method for determining fire accidental loads and its application to thermal response analysis for optimal design of offshore thin-walled structures. *Fire Safety Journal,* 92, pp.107-121.

Shanbi, P. & Zhaoxiong, Z., 2015. An experimental study on the internal corrosion of a subsea multiphase pipeline. *Petroleum*, 1(1), pp.75-81.

Teixeira, A.P., Soares, C.G., Netto, T.A. & Estefen, S.F., 2008. Reliability of pipelines with corrosion defects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(4), pp.228-237.

Vinnem, J.E., 2013. *Offshore risk assessment: principles, modelling and applications of QRA studies*. Springer Science & Business Media: The Netherlands.

Woo, S., Lee, K. & Choung, J., 2017. Design of subsea manifold protective structure against dropped object impacts. *Journal of Ocean Engineering and Technology* 31(3), pp.233-240.

Ye, K.Q., 1998. Orthogonal column Latin hypercubes and their application in computer experiments. *Journal of the American Statistical Association*, 93(444), pp. 1430-1439.

Ankush Kumar

서 정 관