

건설분야의 신뢰성 및 리스크

김동현 교수
군산대학교

1

발표내용

1장_신뢰성과 리스크란?

2장_왜 필요한가?

3장_신뢰성해석 이론

4장_리스크평가 방법

5장_적용사례

6장_한계 및 전망

2

신뢰성과 리스크란 ?

◎ 신뢰성(Reliability)

- Uncertainty variables(random ~, stochastic ~)
- Distribution function(normal, lognormal, extreme)
- Return period(earthquake, storm, wave)
- Failure mode(yielding, cracking, deformation, etc.)
- Limit state of an element or a system
- Probability of failure

Reliability Based Design:

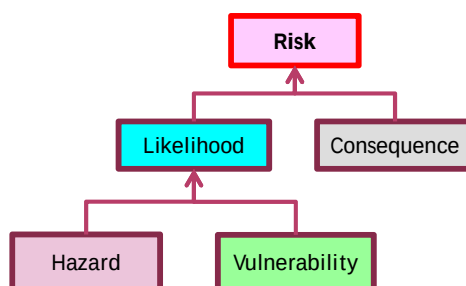
A design approach to achieve certain level of reliability
in the presence of stochastic variability of design parameters

◎ 리스크란?

- Undesirable consequences
 - The number of people harmed
 - Financial loss in bank ...
- Risk concept can be understood from the following questions
 - What can go wrong? **Accident scenario**
 - How likely is it? **Probability of the scenario**
 - What are the consequences? **Consequence**

◎ 리스크(Risk)

- Hazard(natural, artificial)
- Vulnerability(fragility level)
- Likelihood
- Consequence(Impact)



Probabilistic Risk Assessment:

Logical analysis method identifying and assessing a risk in a system for the purpose of cost-effectively improving the safety and performance.

◎ Reliability vs. Risk

	Reliability	Risk
Background	Uncertainties	Uncertainties
Analysis mtd.	Quantitative	Quantitative/ Qualitative
Tool	Level I, II, III	Hazard/Fragility curve
Target	Uncertain system	System in risky condition
Output	Failure probability Reliability index	Risk Risk level
Application	Reliability based design Failure cost	Risk based inspection, decision, management

7

◎ History of RISK Assessment

◎ NASA

- Aerospace eng. early 1960s.(FTA)
- Challenger mishap in 1986.(FMEA proposed)

◎ Industries

- Chemical(1990s), Offshore platform(1990s)

◎ Bridge engineering

- Bridge management and inspection
- Frangopol(2001), Agrawal(2009), NYDOT etc
- London(2011): Risk based inspection of infra
- Fukui pref.(2007): Risk based bridge inspection

8

왜 필요한가?

◎ 설계 단계의 필요성

- 발생가능한 고장(failure)에 대한 인식(identification)
- 불확실성의 특성 파악
- 최소의 비용으로
- 최고의 안전 유지
- 최고의 성능 유도

◎ 유지관리 단계의 필요성

- 불확실성 고려한 유지관리 비용 최적화
- 리스크기반 점검의 합리성
- 확률론적 열화모델을 이용한 보수 시기
- 리스크 기반 점검, 보수, 보강 의사결정
- 최소비용 투입, 최적 성능

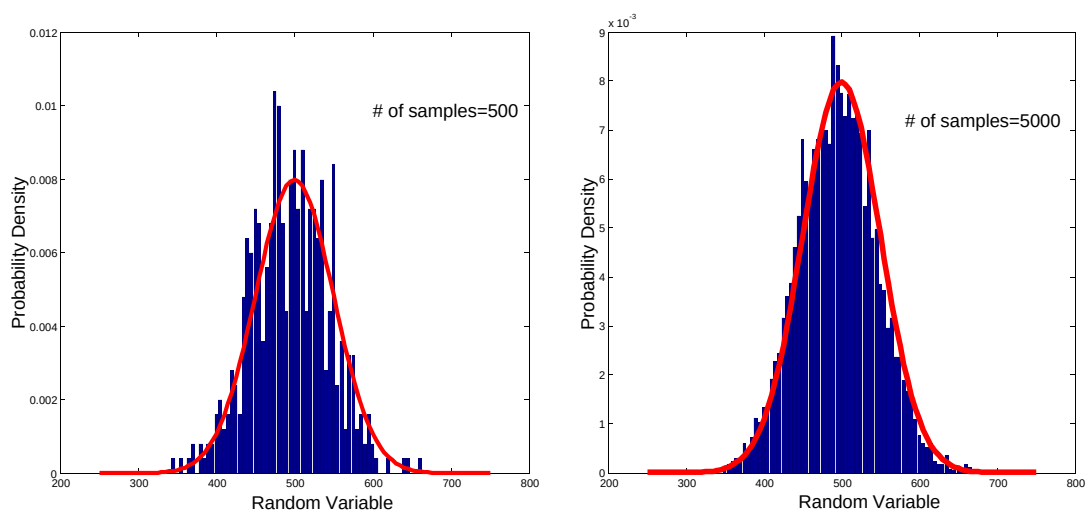
◎ 건설산업의 적용분야

- 신뢰성기반 설계(RBD, LSD)
- 리스크기반 의사결정
 - 점검주기, 점검 우선순위
 - 보수시기, 보수 우선순위
 - 보강공법, 보강 우선순위
 - 자산관리

신뢰성해석 이론

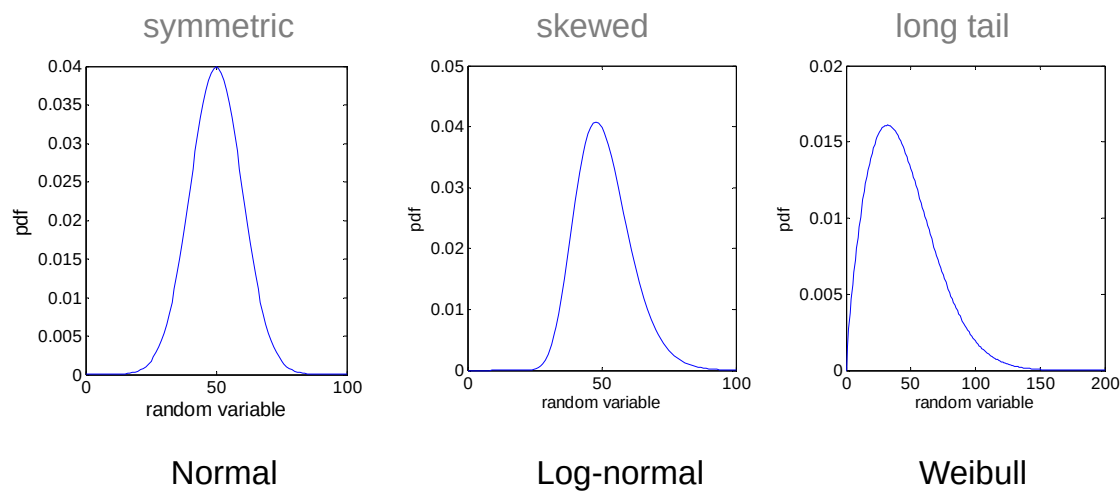
◎ 확률변수

$$(\mu_X = 500, \sigma_X = 50)$$



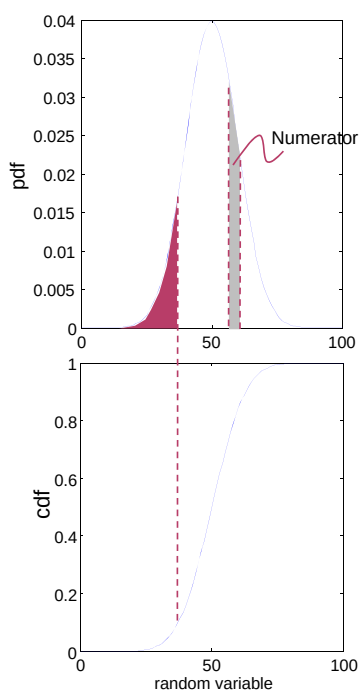
분포함수의 신뢰성->충분한 기간의 자료확보

◎ 확률분포 종류



15

◎ 확률밀도(PDF)와 누적분포(CDF)



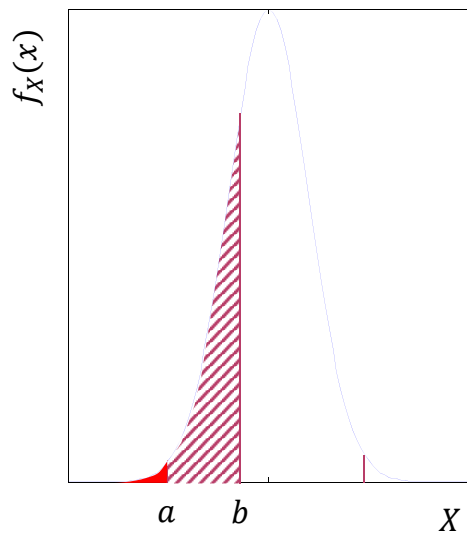
$$PDF = f_X(x) = \frac{prob[x < X < x + dx]}{dx}$$

$$CDF = F_X(x) = prob[0 < X < x]$$

$$= \int_{-\infty}^x f_X(x) dx$$

16

◎ PDF와 확률

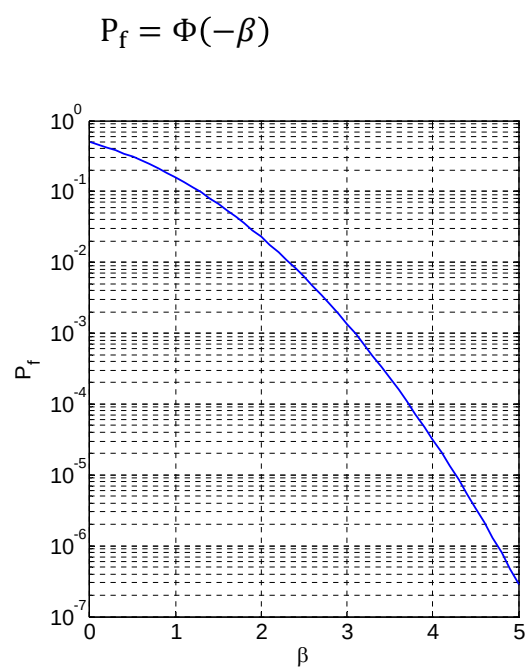
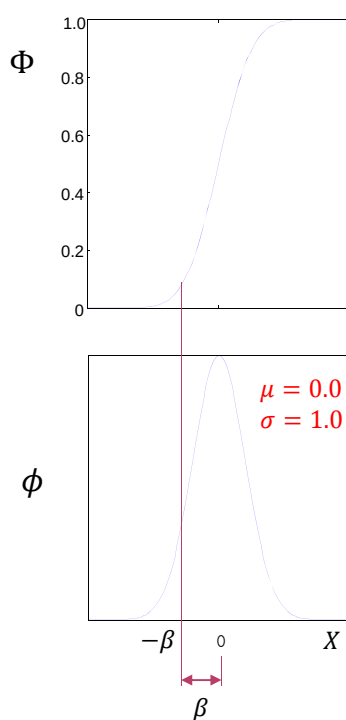


$$\text{prob}[a \leq X \leq b] = \int_a^b f_X(x) dx$$

$$\text{prob}[X \leq a] = \int_{-\infty}^a f_X(x) dx = P_f$$

If a is allowable limit

◎ 표준확률밀도함수

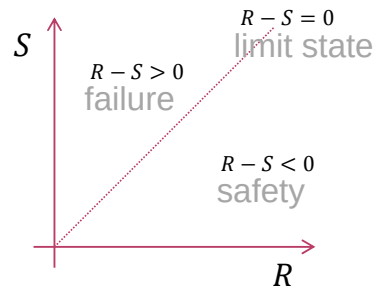


◎ 한계상태함수(limit state func.)

$$g(X) = R - S$$

= Resistance - Load

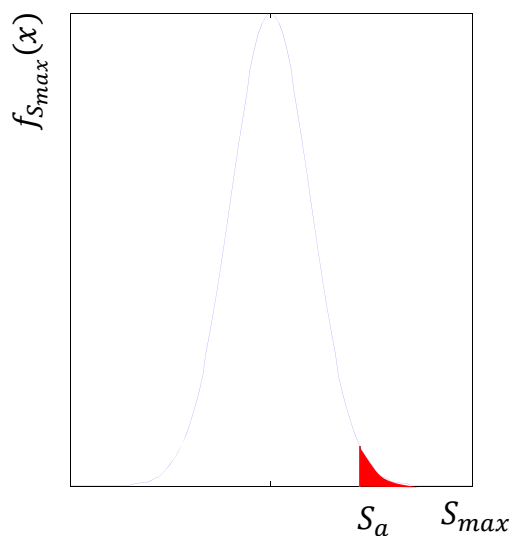
= Allowance - Response



$$P_f = \int_{g(X) < 0} f_X(x) dx$$

- differentiate failure and safety state
- used to calculate failure probability
- low order function is preferable for easy calculation

◎ 1변수 문제의 파괴확률

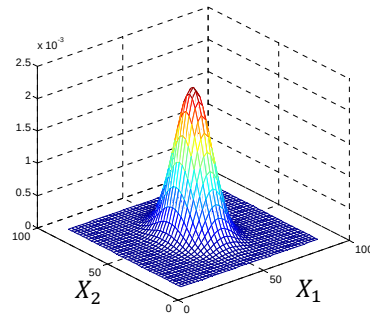
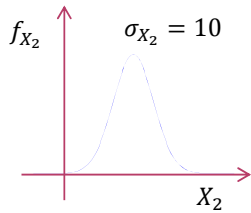
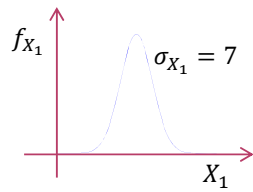


$$g(x) = S_a - S_{max}(x)$$

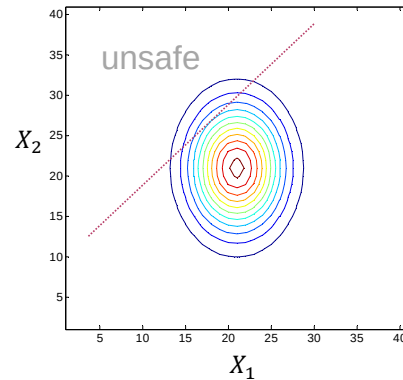
$$P_f = \text{prob}[S_{max} > S_a]$$

$$= \int_{S_a}^{\infty} f_{S_{max}}(x) dx$$

◎ 2변수 선형문제의 파괴확률(1/3)



결함확률밀도
(Joint PDF)

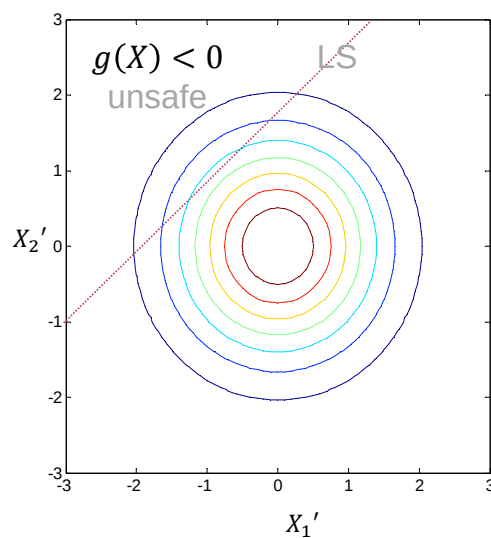
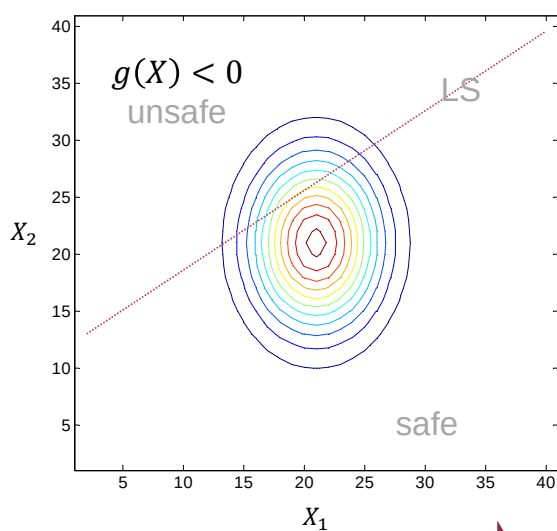


JPDF등고선도

$$P_f = \int_V f_{X_1 X_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2$$

$(g < 0)$

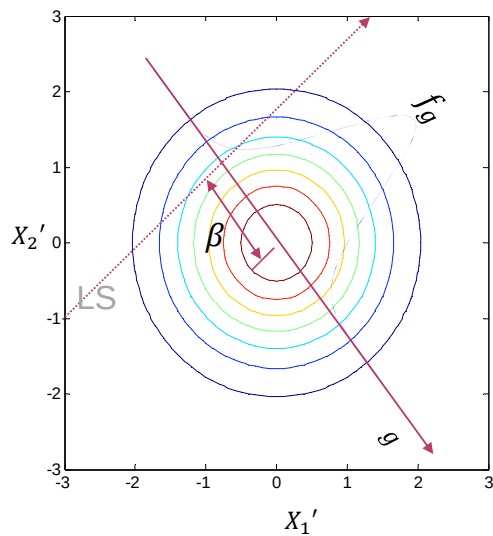
◎ 2변수 선형문제의 파괴확률(2/3)



$$X'_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}$$

P_f : 원점~LS 거리의 함수

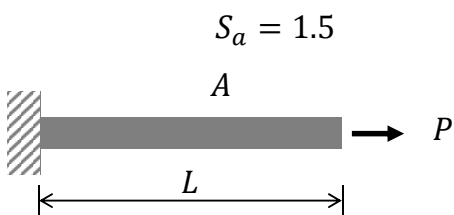
◎ 2변수 선형문제의 파괴확률(3/3)



$$P_f = \int_{g < 0} f_g dg = \Phi(-\beta)$$

23

◎ 예제 1(1/3)



- 파괴모드

$$S_a < P/A$$

- 한계상태함수(LSF)

$$g_1(X) = S_a - P/A$$

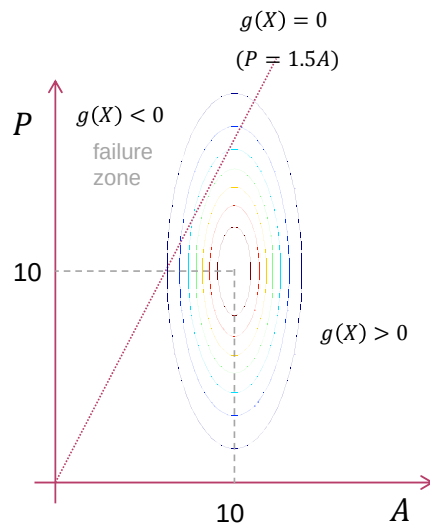
$$g_2(X) = AS_a - P$$

- 확률변수 및 분포

	μ	σ	type
P	10	2.0	normal
A	10	1.0	normal

24

◎ 예제 1(2/3)



$$P_f = \int_{g < 0} f_{PA}(p, a) dp da$$

“Difficult to get P_f ”

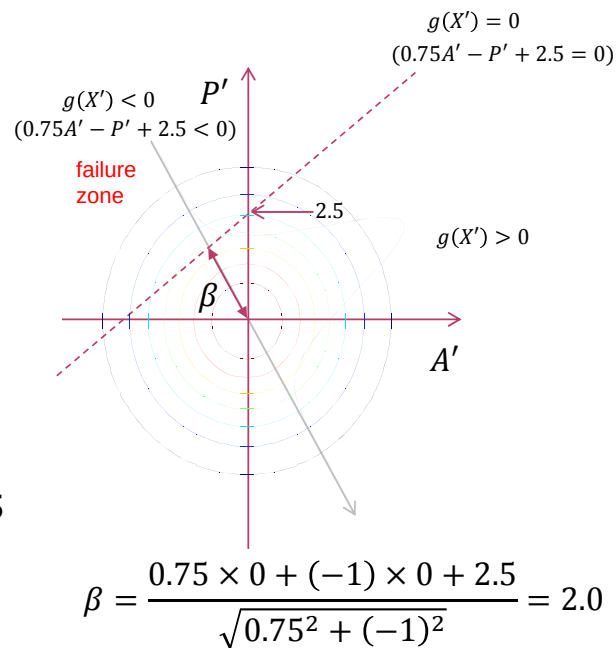
25

◎ 예제 1(3/3)

$$\left\{ \begin{array}{l} P' = \frac{P - \mu_P}{\sigma_P} \\ A' = \frac{A - \mu_A}{\sigma_A} \end{array} \right.$$

$$P = 1.5A$$

$$\Rightarrow P' = 0.75A' + 2.5$$



$$\beta = \frac{0.75 \times 0 + (-1) \times 0 + 2.5}{\sqrt{0.75^2 + (-1)^2}} = 2.0$$

$$P_f = \Phi(-2.0) = 0.0228$$

26

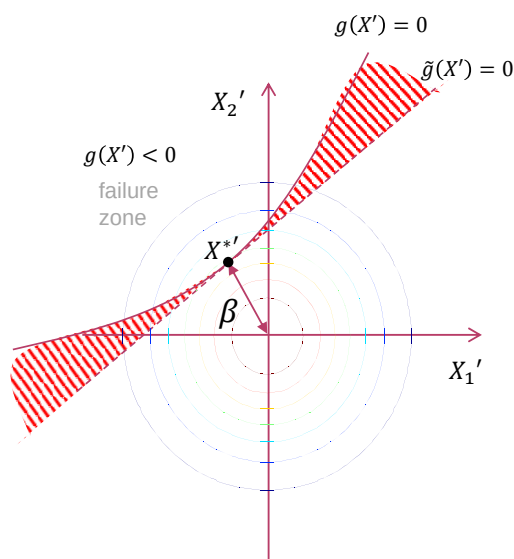
◎ 비선형문제의 파괴확률

- LSF 근사함수(1차, 2차 ~) Level II(FOSM, FORM)
- LSF 이용 시뮬레이션: Level III(MCS, IS, LHS)

Level II vs Level III

구 분	Level II	Level III	
정확도	보통	높음	
효율성	높음	낮음	
적용성			

◎ FORM(First Order Reliability Method)

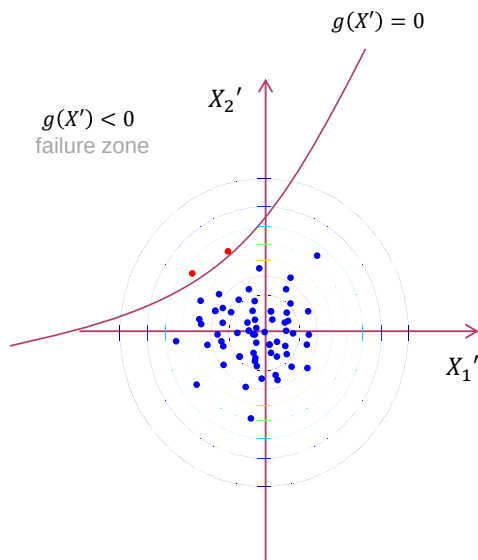


$\tilde{g}(X')$ is
a first order approx. of $g(X')$
at $X^{*'}$



Error inevitable
but negligible

Simulation (1/3)



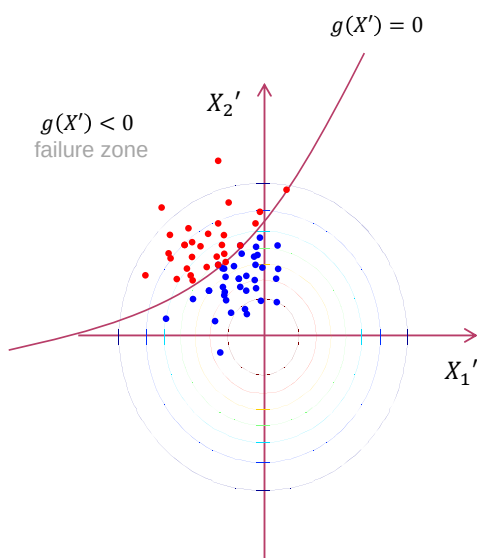
- MCS

- Random sampling of N sets
- Sampling around means
- N_f failure sets
- Required set $N_{min} = \frac{1}{P_f}$

$$P_f = \frac{N_f}{N}$$

29

Simulation (2/3)



- MCS

$$P_f = \int_{g < 0} f_X(x) dx \cong \sum_{\substack{k=1 \\ g < 0}}^N f_X(x_k) \Delta x_k$$

$$= \left(1 \cdot \frac{1}{N} + 0 \cdot \frac{1}{N} + 0 \cdot \frac{1}{N} + 0 \cdot \frac{1}{N} + \dots \right)$$

- Importance Sampling

$$P_f = \int_{g < 0} \frac{f_X(x)}{p_X(x)} p_X(x) dx = \int_{g < 0} W(x) p_X(x) dx$$

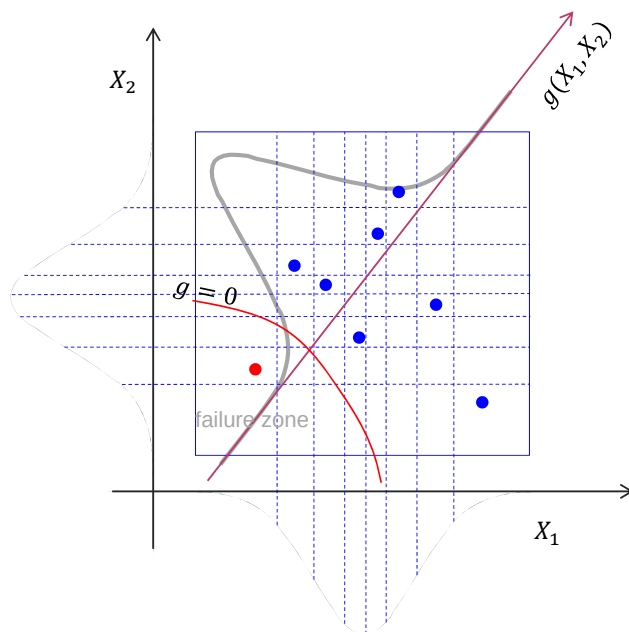
$$= \sum_{\substack{k=1 \\ g < 0}}^N W(x_k) p_X(x_k) \Delta x_k$$

$$= \left(1 \cdot W(x_1) \frac{1}{N} + 1 \cdot W(x_2) \frac{1}{N} + 0 \cdot \frac{1}{N} + \dots \right)$$

30

◎ Simulation (3/3)

- Latin Hypercube Sampling



31

◎ 신뢰도 수준은?

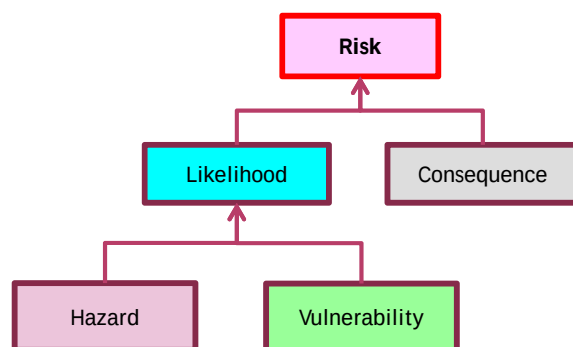
산업군	리스크	신뢰도지수
모든 산업	7.0e-5	3.81
탄광인부	2.4e-4	3.49
소방관	4.0e-4	3.35
경찰	3.2e-4	3.41
미국대통령	1.9e-2	2.07
교량	2.33e-4~3.17e-5	3.5~4.0
항만구조물	2.28e-2~2.33e-4	2.0~3.5

(NASA, 2002)

32

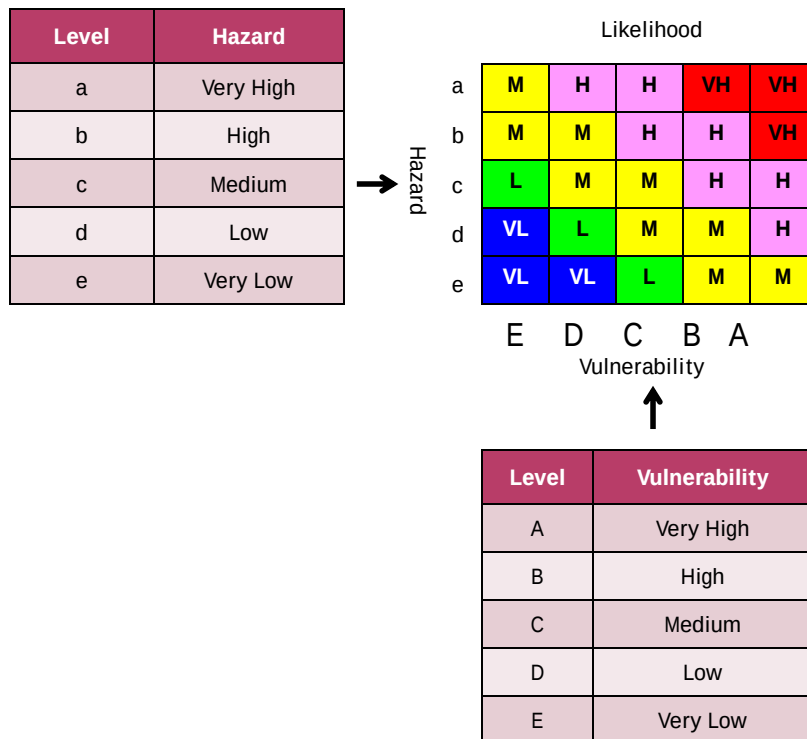
리스크평가 이론

◎ 리스크 평가 체계



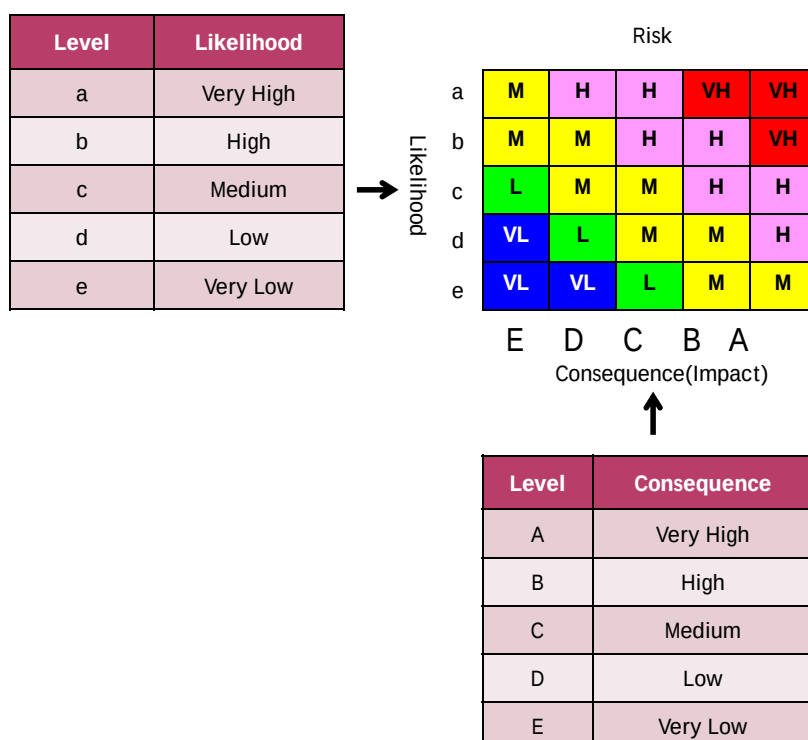
- Hazard: earthquake, typhoon, chemicals...
- Vulnerability: susceptibility to hazard
- Consequence: Impact or cost after occurrence

◎ Risk matrix(1/2)



35

◎ Risk matrix(2/2)



36

적용사례

(5.1 리스크 기반 고속도로 교량 점검주기)

◎ 리스크기반 점검주기 개선

- 현행(상태등급 기반) 점검 주기
 - 현행 3년(A등급), 2년(B, C등급), 1년(D, E등급)
 - 등급변화가 매우 느린 교량에 일률적 점검 주기 적용
 - 등급변화 위험 교량에 점검 자원 집중 필요



리스크기반 점검주기(RBI) 적용 가능성 분석

◎ 해외 교량 Hazard

뉴욕주	후쿠이현	런 던	한 국
NYSDOT Region Bridge Ownership	긴급수송로 여부 <u>도로기능(국도/지방도)</u> 교통량 <u>중차교통량</u> 우회로 여부 고립주거시설 유무	Current State <u>Structural type</u> <u>Exposure severity</u> <u>Material type</u> Inspectability	상태등급 중차교통량 제설제사용량 동결융해 강설일 해양이격거리
Element Design Type <u>Superstr. Design Type</u> <u>Superstr. Mat. Type</u> <u>Functional Class</u>	적용시방서 <u>교량하부(도로/하천)</u>	Mag. of Failure Socio-eco. Import.	
<u>AADTT</u> <u>Salt Usage</u> <u>Snow Accumulation</u> <u>Climate Groups</u> <u>Feature Under</u>	<u>해양이격거리</u> <u>동해위해도</u> 우회로 여부 산사태지역 지반조건(성토/평야)		

39

◎ 교량 Hazard (1/3)

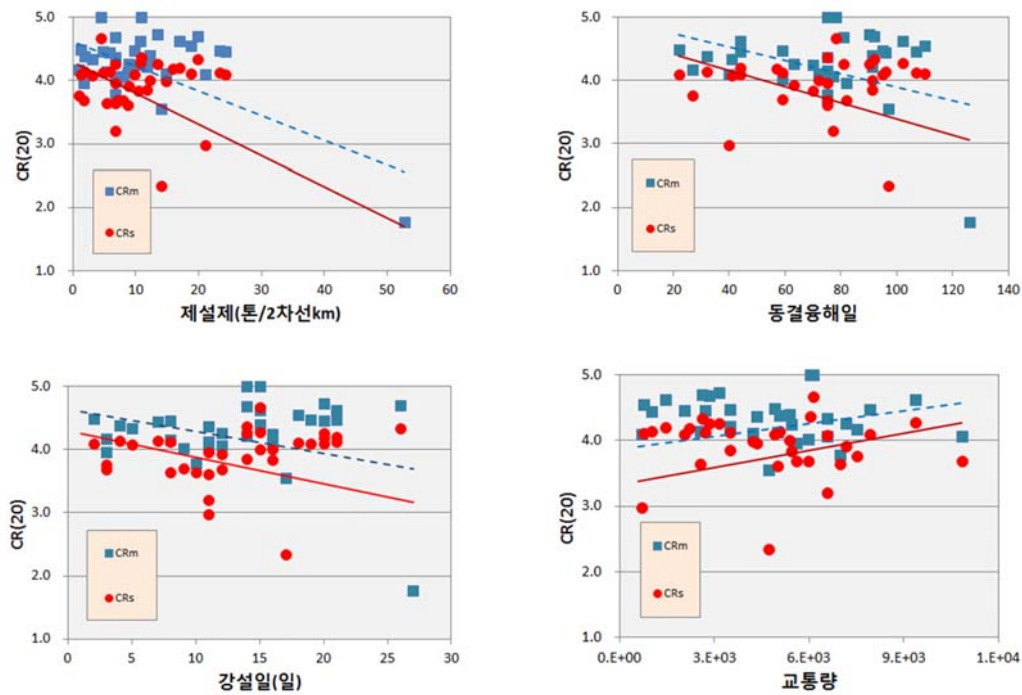
■ 상태열화 Hazard

위해인자	선정여부	사유
제설제 사용량	○	• 상태등급과 상관성 높음
동결융해회수	○	• 상태등급과 상관성 높음
동결융해일수	×	• 동결융해회수와 중복
강설량	×	• 제설제 사용량과 중복
강설일	×	• 제설제 사용량과 중복
중차교통량	○	• 장기 노후 교량의 영향 예상(해외 사례)
해양비산염분	○	• 염분의 피해 우려(해외 사례 참고)

40

◎ 교량 Hazard (2/3)

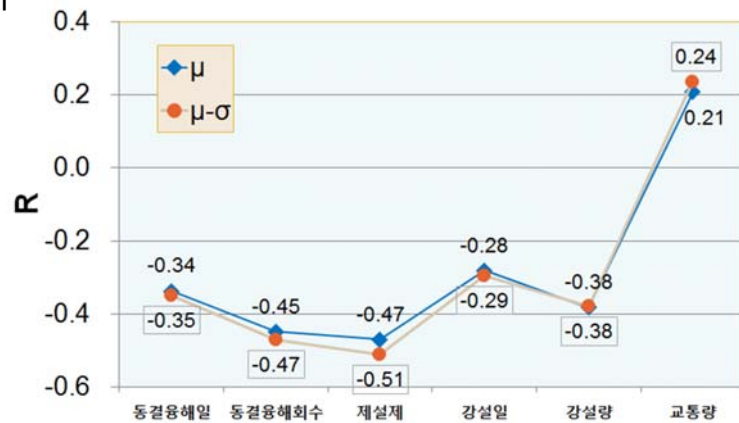
■ 20년 후 상태등급 점수와 노출량



41

◎ 교량 Hazard (3/3)

■ 상관계수



- 제설제사용량
- 동결융해회수
- 강설량
- 동결융해일
- 강설일

42

◎ Hazard score

구 분		위해인자 평가 점수(Y_i)		
		Low	Moderate	High
노출환경인자	동결응해회수(40)	10	25	40
	제설제사용량(50)	10	30	50
	중차교통량(10)	2	6	10
	해양비산염분(50)	0	30	50
합 계		22	91	150

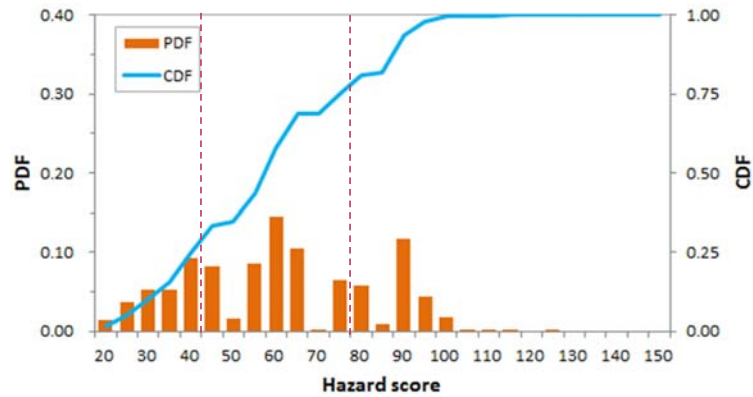
(해양비산염분 제외 시, 100점 만점)

◎ Hazard level

Hazard 구분	기 준
High	동결응해, 제설제, 교통량 중 2개 High, +나머지 1개 Moderate
Moderate	제설제 Moderate, + 동결응해, 교통량 중 하나만 Moderate 이상

	Hazard 구간별 점수		
	Low	Moderate	High
점수 구간	$\sum Y_i < 46$	$46 \leq \sum Y_i < 80$	$80 \leq \sum Y_i$

◎ Hazard 분포



구 분	Low	Moderate	High	합계
교량 개수	2,594	3,268	1,942	7,804*
점유율	33.2%	41.9%	24.9%	100%

(* 교통량 정보 확보 교량 수)

◎ Risk 행렬과 점검주기

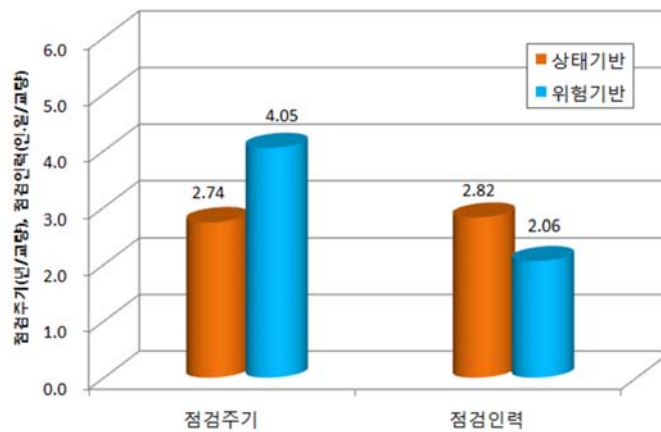
구분	Hazard		
취약도(상태등급)	Low	Moderate	High
A	6	4	3
B	4	3	2
C	2	2	2
D	1	1	1
E	1	1	1

 	Risk 1	 	Risk 4
 	Risk 2	 	Risk 5
 	Risk 3	 	현 점검주기와 동일

~+3

~+2

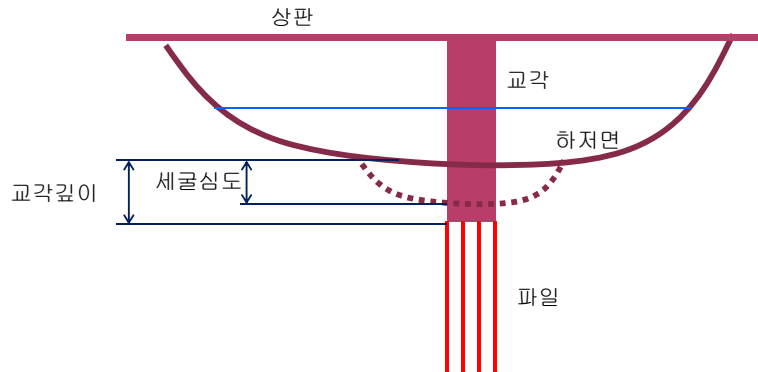
◎ 점검주기 개선효과



구분	조정 전(A)	조정 후(B)	비율(B/A)	단위
평균 점검주기	2.74	4.05	1.48	년/교량
평균 점검인력	2.82	2.06	0.73	인·일/교량·년

◎ 세굴 해석모델

■ 하천교량 단면



◎ 세굴심 예측

• CSU equation

$$y_s = 2yK_1K_2K_3K_4 \left(\frac{a}{y} \right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad \left(Fr = \frac{V_0}{\sqrt{y^*g}} \right)$$

y_s : 세굴심도 (m)

K_1 : 교각형상에 대한 보정계수

K_2 : 흐름 입사각에 대한 보정계수

K_3 : 하상조건에 대한 보정계수

K_4 : 하상재료의 크기에 대한 보정계수

a : 교각의 폭 (m)

y : 구조물설치 직상류부 수심 (m)

Fr : 구조물설치 직상류부의 Froude 수

(한국수자원학회 (2009), “하천설계기준·해설”)

◎ 확률변수 및 분포

Variable, X_i	Mean, μ_{X_i}	Lower bound	Upper bound	COV
a (m)	11.90	6.71	17.10	0.180
V_0 (m/s)	3.05	2.74	3.35	0.040
y (m)	8.53	7.92	9.14	0.030
K_2	1.1	1.0	1.2	0.050
K_3	1.2	1.1	1.3	0.048

(Johnson and Dock, 1998)

◎ 한계상태함수

$$d_{all} = y_s * SF$$

y_s : 설계세굴심도

SF : 안전율(1.1~2.0)

$$g(X) = d_{all} - 2yK_1K_2K_3K_4 \left(\frac{a}{y} \right)^{0.65} \left(\frac{V_0}{\sqrt{y * g}} \right)^{0.43}$$

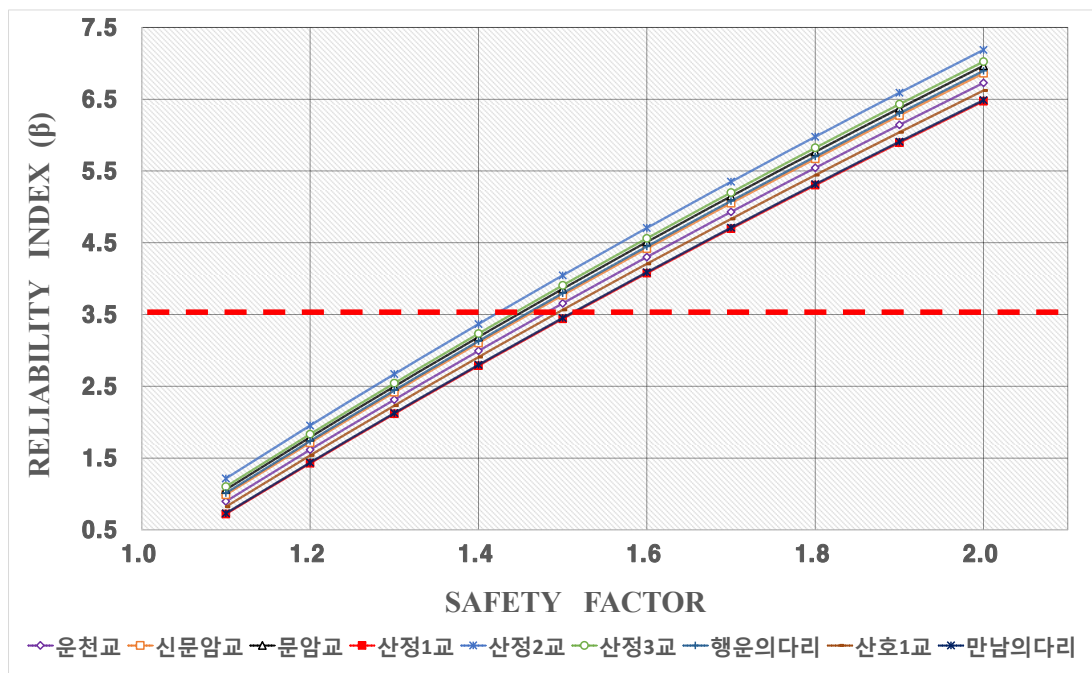
◎ 확률변수

X_i	μ_{X_i}									COV
	운천교	신문암교	문암교	산정1교	산정2교	산정3교	행운의다리	산호1교	만남의다리	
K_2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.050
K_3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.048
y (m)	2.70	3.37	3.53	3.18	3.28	3.41	4.83	4.11	2.33	0.030
a (m)	1.00	0.90	0.60	0.80	0.70	0.60	0.40	0.50	0.50	0.180
V_0 (m/s)	4.94	3.99	4.00	5.59	4.92	3.42	3.48	1.11	2.29	0.040

◎ 신뢰도지수(FORM)

SF	Reliability index (β)								
	운천교	신문암교	문암교	산정1교	산정2교	산정3교	행운의다리	산호1교	만남의다리
1.1	0.896	0.988	1.061	0.719	1.215	1.101	1.011	0.822	0.729
1.2	1.6145	1.713	1.790	1.427	1.954	1.832	1.737	1.536	1.437
1.3	2.314	2.418	2.499	2.116	2.671	2.544	2.443	2.231	2.127
1.4	2.994	3.103	3.187	2.787	3.367	3.234	3.129	2.907	2.799
1.5	3.655	3.769	3.857	3.439	4.045	3.906	3.797	3.565	3.451
1.6	4.301	4.419	4.510	4.075	4.706	4.562	4.448	4.206	4.088
1.7	4.930	5.052	5.147	4.697	5.350	5.200	5.082	4.832	4.710
1.8	5.544	5.670	5.768	5.302	5.977	5.823	5.701	5.442	5.316
1.9	6.143	6.273	6.374	5.894	6.590	6.430	6.305	6.038	5.908
2.0	6.728	6.862	6.966	6.472	7.188	7.024	6.895	6.621	6.487

◎ 신뢰도지수



◎ 리스크 및 신뢰성 한계

- 충분한 데이터 확보 관건
 - 자료관리에 대한 인식 선진화 필요
 - 유지관리 자료의 체계화(표준화) 필요
 - 교량수명대비 충분한 기간의 자료 축적 필요
 - 빅데이터 활용 방안 필요

◎ 향후 전망

- BIM과 연계한 리스크 및 신뢰성 분석
- 빅데이터 이용한 부족한 교량관리 데이터 보완
- 리스크기반 자산관리기법 개발

경청해 주셔서
감사합니다.