

# 확률 · 통계적 리스크분석을 활용한 인적재난 위험평가 기법 제안

## Probabilistic Risk Evaluation Method for Human-induced Disaster by Risk Curve Analysis

박소순\*

Park, So-Soon

### Abstract

Recently, damage scale of human-induced disaster is sharply increased but its occurrences and damages are so uncertain that it is hard to construct a reasonable response & mitigation plan for infrastructures. Therefore, the needs for an advanced risk management technique based on a probabilistic and stochastic risk evaluation theory is increased. In this study, these evaluation methods were investigated and an advanced disaster risk evaluation method, which is based on the probabilistic or stochastic risk assessment theory and also is a quantitative evaluation technique, was suggested. With this method, the safety changes as the result of fire damage management for recent 40 years was analyzed. And the result was compared with that of Japan. Through the consilience of the traditional risk assessment method and this method, a stochastic estimation technique for the uncertainty of future disaster's damage could support a cost-effective information for a reasonable decision making on disaster mitigation.

**Key words** : Risk-based Disaster Management, Risk Curve, Disaster Damage Index, Quantitative Evaluation Function for Disaster Risk, Probabilistic Analysis

### 요 지

최근 인적재난 발생의 불확실성에 대한 유연한 대처를 위해 확률 · 통계적 재난위험성 평가 및 위험관리 기술에 대한 필요성이 고조되고 있어 관련기술을 인적재난에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 재난위험성 평가 기법의 실효성, 경제성 및 지속가능한 시스템 구현을 위한 선제조건을 검토하였다. 이로부터 재난의 피해규모·발생확률 분포함수의 이론적 검토를 통해 확률 · 통계적인 재난위험 지표를 도출하고 재난안전(위험)도 평가에 활용함으로써 보다 간편한 정량적 재난위험도 평가기법을 개발하였기에 이를 소개한다. 또한 이를 활용하여 우리나라와 일본의 확률 · 통계적인 화재 안전유지 성능을 비교 · 분석하고 그 결과를 안전지수로 제시하였다. 향후 기존의 재난위험 평가기술과 융화 · 발전시켜 국내실정에 맞는 미래 재난 추정 및 예측 모델의 최적화 방안을 마련함으로써 지속적인 위험도 분석결과에 기반을 둔 합리적인 통합재난관리 방안 마련이 가능 할 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 위험도 기반 재난관리, 리스크 곡선, 재난위험 지표, 정량적 재난위험 평가함수, 확률 · 통계적 분석

### 1. 서 론

잠재위험의 사전 파악 및 재난유형별, 지역별, 시설별 재난 위험도 분석 정보는 예산낭비를 방지하고 효율적인 재난예방을 위해 중요한 의사결정 정보로 활용된다. 이에 소방방재청에서 자연재난에 대한 지역별 안전도를 평가하여 예방정책 수립을 위한 주요 의사결정 정보로써 활용함으로써 합리적인 위험도 기반 자연재난 관리정책을 진행하고 있다. 그러나 근래는 기능집약형, 대규모 복합단지형 개발이 가속화 되고 있어 초고층 복합 건축물이나 석유화학 콤플렉스, 댐 등과 같은 주요 사회시설의 화재나 폭발, 원자력 발전 시설에 대한

테러 가능성 증가 등 대형 인적재난의 발생 가능성이 증가하고 있고 북한의 핵무기 개발 진행도 긴장감 고조에 한 몫을 하고 있다. 이에 상대적으로 관리가 미흡한 인적재난 분야의 대형재난 예방 정책시행을 위한 체계적 기반과 대책 마련이 시급한 것으로 판단된다.

이와 관련하여 현재 소방방재청 및 지역자치단체에서 자연재난을 대상으로 시행중인 재난안전도 평가식(소방방재청, 2005)의 각 매개변수 도출에 있어서 인적재난이나 사회재난 등의 이종 재난유형에도 통합 적용 가능하도록 평가 기법을 개선하고 더불어 경제성과 지속성 및 효율성을 확보 할 수 있는 방안 마련의 가능성을 검토할 필요가 있다. 이를 위해

\*정회원 · 소방방재청 국립방재교육연구원 방재연구소 연구관 (E-mail: sspark@nema.go.kr)

위험도 기반 재난관리에 있어 재난위험 평가기법의 필요조건으로써 이론적 근거 및 타당성, 평가결과의 신뢰성, 방재정책으로의 활용성 및 지속 가능성이 중요한 것으로 판단된다.

이러한 검토를 바탕으로 본 연구는 대형재난 발생의 불확실성에 대한 유연한 대처가 가능한 확률·통계적 재난위험 분석관련 연구 동향(S. Hanayasu & K. Sekine, 2003 등)을 참조하여 인적재난분야의 재난위험 지수 및 재난위험도 거동을 정량적으로 평가·예측하기 위한 재난위험 분석기법 개발에 관한 연구를 수행하였다. 또한 제안한 평가기법에 대한 이론적 근거, 평가결과의 신뢰성, 방재정책으로의 활용성을 검토하였다. 이로부터 도출된 간편한 재난위험 지표를 재난안전도(위험) 평가식의 매개변수로서 활용하여 보다 경제적이고 간편한 재난위험도의 정량적 평가기법을 개발하였기에 소개하고자 한다. 또한 개발된 기법에 의한 재난위험 도출결과를 활용하여 현재 소방방재청과 지자체단체별로 시행중인 기존의 자연재난 위험평가 기술과의 융화·발전 방안을 검토하였다.

## 2. 리스크 곡선과 확률·통계적 재난위험도 평가

본 연구에서 리스크 곡선을 활용하여 확률·통계적인 재난위험 지표를 도출, 불확실성을 지닌 재난피해 발생 위험을 정량적으로 분석하는 기법을 소개하였다. 연구 진행을 위해 재난유형별 재난리스크 곡선을 작성하고 관찰주기별로 재난위험도 평가 및 재난위험 발생특성을 분석하는 과정을 통해 본 기법을 검토하였다. 이로부터 정량적 재난위험지표를 지역구 단위로 도출하는 방안과 간편한 정량적 지역재난위험도 평가식을 제안하였다. 또한 인적재난 중 화재, 폭발, 붕괴, 해난사고 및 산불을 대상으로 제안된 기법을 활용하여 우리나라 인적재난 위험도를 정량적으로 평가하고 그 결과 분석을 통해 정도를 검토하였다. 제안된 재난위험의 정량적 지표와 평가식으로 전국의 재난위험에 대한 정량적 평가가 가능하며 이종 재난 간이나 이종 피해유형 간에도 정량적인 비교가 가능함을 확인하였다. 향후 동일 기법을 적용한 고도화 과정을 통해 지역별/시설별 재난위험도 평가가 가능할 것으로 판단된다.

### 2.1 확률·통계적 평가기법

재난의 발생은 항상 그 발생의 잠재적 위험요인의 작용여부에 따라 변동하는 불확실성을 가지고 있다. 따라서 재난위험도는 항상 확률(probability)과 피해규모(Magnitude of consequence)가 주요 인자가 되며 그 외의 모집단 특성을 반영하는 인자들로 모집단의 크기, 구성요소의 밀도, 모니터링 면적 및 기간 등을 포함한 함수로 표현 가능하다.

재난의 확률론적 발생특성 연구는 1975년 WASH-1400 보고서 중, Reactor Safety Study, Unite State Nuclear Regulatory commission이 발표한 “An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants”에서 원자력 발전시설의 안전성을 확률로 평가하여 발표하면서 시설의 안전성을 확률론적으로 평가하기 시작하였다. 이 연구의 결과가 원전의 안전성을 평가하는데 적합하다는 평가

를 받아, 이후 원전의 확률론적 안전성 평가(PSA, Probabilistic Safety Assessment)를 본격적으로 수행하였으며 지금은 원전의 안전성 평가에 필수적인 방법으로 사용되고 있다. PSA에 관련된 연구에서 점차적으로 통계학과 연계한 재난의 발생확률과 피해규모 및 재발빈도를 분석하기 위한 기법이 개발되었고, 노동부 산업안전공단의 IRMS를 인적재난 및 산업시설에 적용 가능한 종합안전성 평가시스템의 예로 들 수 있다. 또한 최근에는 산업재해 및 몇몇 재난·사고로 문제가 되는 산업안전성 향상을 위해 확률·통계론적인 재난위험성평가 모델에 대한 연구결과(S. Hanayasu and K. Sekine., 2003)가 발표되었다. 본 연구에서는 S.Hanayasu 및 K. Sekine의 확률·통계론적인 재난위험 분석이론을 국내의 인적재난에 적용할 수 있도록 개선하고 이론의 재정립을 통해 정량적 지역재난위험도 평가기법을 개발하고자 하였다. 따라서 확률·통계적인 재난위험도 평가 모델로서 프랙탈이론과 하인리히 법칙을 배경으로 하는 리스크 곡선을 활용한 재난 발생 특성 분석 이론의 재정립 및 국내 적용성 검토를 통해 도출한 새로운 정량적 재난위험 평가기법을 소개하였다. 또한 사회위험, 자연재해에 확대 적용을 위한 기초를 마련 및 기법의 고도화를 통해 신뢰성을 향상시켜 향후 위험도 분석 기반 재난위험 관리 체계 구축에 기여할 수 할 수 있기를 기대한다.

### 2.2 초과누적확률분포와 리스크 곡선

#### 2.2.1 리스크와 초과누적확률 시나리오 리스트

카플란(Kaplan) 과 개릭(Garrick)은 리스크  $R(x)$ 는 어떤 구조물, 지역사회, 또는 산업구조 내에서 재해를 초래하는 사고에 이르기까지의 일련의 사상계열을 사고 시나리오라고 하였다. 일정한 관찰기간  $T(i)$ 동안에 발생한 사고를 이산 확률적인 시계열 데이터로 생각하여 그림 1과 같이 도식화 한 것을 리스크맵(Risk Map)이라 한다. 리스크맵은  $T(i)$ 를 재난 관찰기간으로 두고, 사고 시나리오  $S(i)$  및 피해척도  $x(i)$ 의 3개를 요소로 하는 집합으로 표현 가능하다. 이 리스크 맵의 세가지 구성요소를 하나의 세트로 하여 피해규모에 대하여 표 1과 같이 순차 정렬한 리스트를 시나리오 리스트라 한다. 이 자체가 그 대상 시스템 내의 관찰기간  $T(i)$ 동안의 확률론적 리스크로 정의되며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 각 피해규모별 초과누적확률을 산출하면 표 1의 초과누적확률 시나리오 리스트가 된다.

$$Risk = \langle S(i), p(i), x(i) \rangle, i = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$x(1) < x(2) < \dots < x(i) < \dots < x(N)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

$S(i)$  : 시나리오,  $p(i)$  : 시나리오의 발생확률  
 $x(i)$  : 피해규모(피해척도)

(1)

#### 2.2.2 확률·통계 분석을 위한 재난리스크 곡선

$T(i)$ 동안에 발생한 피해규모  $h$ 이상의 사고에 대한 초과누적 확률로부터 문턱값(Threshold) 피해규모-초과누적확률  $x(i)$ ,  $p(i)$ 의 재난리스크 곡선 함수를 얻을 수 있다.

표 1에서 피해규모가 이산적인 값을 가지므로 그림 2와 같

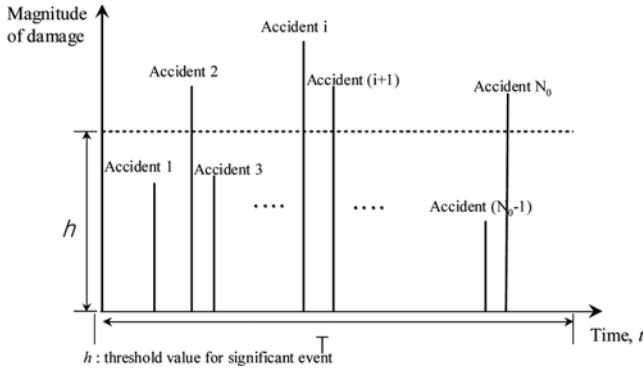


그림 1. 관찰기간 동안 발생한 재난 총수  $N_0$ 건에 대한 재난 시계열 리스크맵 개념도.

표 1. 초과누적확률 시나리오 리스트

실제사고 시나리오	피해규모 (최도)	확률 $P(i), F(i)$	초과누적확률 $P_{excd}(i), F_{excd}(i)$
$S_1$	$X_1$	$P_1$	$P_{upper1} = P_1$
$S_2$	$X_2$	$P_2$	$P_{excd2} = P_2 + P_{excd1}$
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
$S_{M-1}$	$X_{M-1}$	$P_{M-1}$	$P_{excdM-1} = P_{excdM-2} + P_{M-1}$
$S_M$	$X_M$	$P_M$	$P_{excdM} = P_{M-1} + P_{excdM}$

은 이산적인 계단형 재난리스크 분포가 되며 식 (2)와 같이 표현된다. 여기서 피해규모 확률변수  $X(i)$ 가 연속치를 가진다고 가정하면, 연속적인 재난 리스크 함수식으로 나타낼 수 있으며 이를 재난리스크 곡선 또는 재난피해규모 특성곡선이 라 한다.

즉, 관찰기간  $\pi(i)$  동안에 총  $N_0$ 건의 사고가 발생하였을 때 피해규모 확률변수  $X$ 가  $h$ 를 초과하는 사고 시나리오의 초과누적확률분포함수  $P_{excd}(h)$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 구체적인 일정 기간 내에 발생한 동종의 재난이나 사고 데이터 균을 이용하여 재난통계분석에 활용할 경우, 일정기간내의 총 사고건수( $N_0$ )가 고정되므로  $P_{excd}(h)$ 는 피해규모  $h$ 를 초과하는 사고의 「초과누적 빈도(또는 도수)」  $F_{excd}(h)$  (exceedance frequency, event/year)로 취급할 수 있으며 본질적으로 등가로 볼 수 있다.

$$F_{excd}(h) = CDF[X \geq h] = \int_h^{\infty} C(x) dx \propto h^{-D_s} \quad (2)$$

$$P_{excd}(h) = Pr[X \geq h] = \frac{F_{excd}(h)}{N_0} \propto \frac{h^{-D_s}}{N_0}, D_s > 1 \quad (3)$$

초과누적확률 분포 함수 즉, 재난리스크 곡선 상에서 직선성을 가지는 꼬리부의 기울기가  $D_s$ 일 때 재난리스크의 초과누적확률분포함수  $P_{excd}(h)$  (또는  $F_{excd}(h)$ )는  $D_s$ 차원의 자기상사성 프랙탈 분포에 의존하는 패레토(Pareto)형 분포이며, 역べき계형(거듭제곱형)함수만이 패레토 분포를 만족하는 것으로 알려져 있다(Takayasu, 1989). 따라서 식 (3)에서 재난에 의

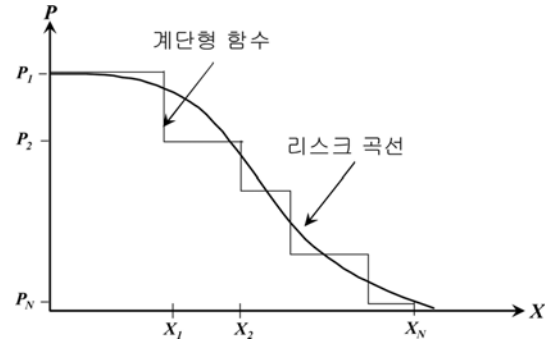


그림 2. 계단형 재난 발생함수와 재난 리스크 곡선.

$R\{(r_1, x_1), (r_2, x_2), \dots, (r_n, x_n)\}$ : 재해발생위치  
 $h(h_1, h_2, h_3, \dots, h_n)$ : 사고건수 카운팅 기준 피해규모 (문턱값)  
 $X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ : 실제 발생 피해규모

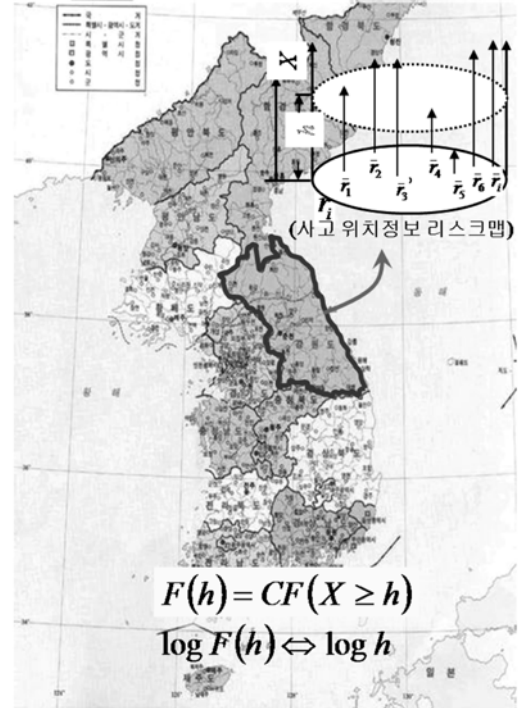


그림 3. 관찰기간 동안의 강원도 지역재난 리스크맵 개념도.

한 피해규모와 초과누적확률분포와의 상관관계를 프랙탈 차원( $D_s$ )이라는 정량적인 지표로 평가할 수 있음을 알 수 있고 이때  $D_s$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_s = \frac{\log F(x)}{\log(x)} \quad (4)$$

그림 3은 그림 1의 리스크맵을 지역개념으로 적용한 지역 재난 리스크맵이다. 이는 모니터링 기간 중의 일정 지역 내에서만 발생한 사고·재난에 대해 정리한 것이다. 이 지역재난 리스크맵을 활용하여 초과누적확률 시나리오 리스트를 작성하면 지역재난 시나리오 리스트가 된다. 이 지역재난 시나리오 리스트를 활용하여 동일한 과정으로 지역재난리스크 곡선을 작성하고 식 (4)에 의해 프랙탈 차원  $D_s$ 를 도출하면 해당 지역에 대한 피해규모와 초과누적빈도와의 상관관계를 정량적으로 분석할 수 있고 이를 재난위험 지표로써 지역재난위험도 산출에 활용할 수 있다.

## 2.4 재난리스크 곡선의 정규화

식 (3)의 초과누적확률분포함수  $P_{excd}(h)$ 에서 위치 매개변수  $r(>0)$ 를 도입하면 식 (5)와 같은 일반화 리스크 곡선식을 얻는다. 여기서 재난사상수  $N_0$ 는 동일하므로  $r(>0)$ 를 도입하기 전의 리스크맵인 그림 1과 같은 형태로 나타낼 수 있고 이를 리스크 곡선으로 작성하면 일반화 리스크 곡선(Modified risk curve)이 된다. 이로부터 중·소형 피해규모의 재난에 대해서도 직선성을 가지는 역べき계형의 초과누적빈도로 표현 가능하며 그 관계를 식 (6)에 나타내었다. 통계학적으로는べき계형 분포에서 위치매개변수  $r$ 는 패레토(Pareto,べき계)형 분포함수의 위치매개변수로서 의미를 가지지만 확률변수  $h$ 에 위치계수  $r$ 를 도입하고,  $X=h/r$ [무차원]로 하여 새로운 확률변수  $X$ 를 도입하면  $X$ 는 정규화 된 무차원량으로 정의가 가능하다. 이때  $X$ 에 관한 초과누적확률분포함수  $R_N(h)$ 를 정규화 리스크 곡선(Normalized risk curve)이라 하고 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 그림 4에 정규화 리스크 곡선의 개념도를 나타내었다.

$$F_{excd}(h) \propto (h + \gamma)^{-D'}, (D' = D_s - 1, D_s > 1) \quad (5)$$

$$F'_{excd}(h) = N_0 \cdot \left[ \frac{(h+r)}{r} \right]^{-D'} \\ = N_0 \cdot (X'+1)^{-D'}, (X' = h/r) \quad (6)$$

$$R_N(X') = Pr[X \geq X'] \\ = F'_{excd}(h) / N_0 = (X'+1)^{-D'} \quad (7)$$

식 (3) ~ 식 (7)에서 프랙탈 특성을 개관적으로 프랙탈 차원이라는 정량적 지표를 도입함에 있어 피해규모와 초과누적빈도(초과누적확률)의 양쪽에 log를 취하고 있다. 따라서 리스크 곡선의  $x$ 축(피해척도, 피해규모) 및  $y$ 축(초과누적확률)의 양축에 양대수(log-log)를 취하기로 한다.

전술한 재난 리스크 및 정규화 재난 리스크를 국내 재난위험 정보를 활용하여 작성한 사례를 그림 5 및 그림 6에 제시하였다. 본고에서는 자연재해를 대상으로 하지 않으나 자연재해에 대한 본 기법의 도입 가능성을 타진하고 개략적인 이해를 위해 자연재해도 같이 표기하였다. 그림 5는 과거 우리나라에서 발생한 재난유형별 리스크 곡선으로 화재, 폭발, 산불 등 '96년~'05년 10년간의 인적재난에 대해  $X$ 축의 피해규모를 백만원 단위로, 태풍, 호우는 '03년~'07년의 5년간의 태풍, 호우에 대해 축의 피해규모를 1억원 단위로, 산불은 피해면적 [ha] 단위로 정리한 리스크 맵으로부터 작성되었다. 재난피해 리스크 곡선에서 대규모 피해규모를 가지는 재난집단의 특성을 나타내는 꼬리부의 직선성을 확인할 수 있다. 단, 정량적 비교를 위해서는 동일 기간, 동일 스케일 단위로 리스크 곡선이 작성되어야 하나 자연재해의 경우 인적재난에 비해 모니터링 기간이 짧고 표기상의 편의를 위해 피해규모가 100배 스케일로 작성되었으므로 그림 5의 그래프에서 도출한 지표로 인적재난과 바로 정량적인 비교를 할 수는 없다. 그러나 피해규모가 인적재난에 비해 100배 큰 스케일 단위임에도 불구하고 동일 발생확률에 대한 피해규모가 인적재난의 피해규모를 훨씬 상회하고 있음을 간단히 알 수 있다.

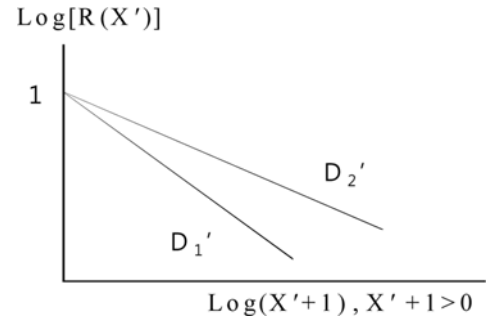


그림 4. 정규화 리스크 곡선 개념도.

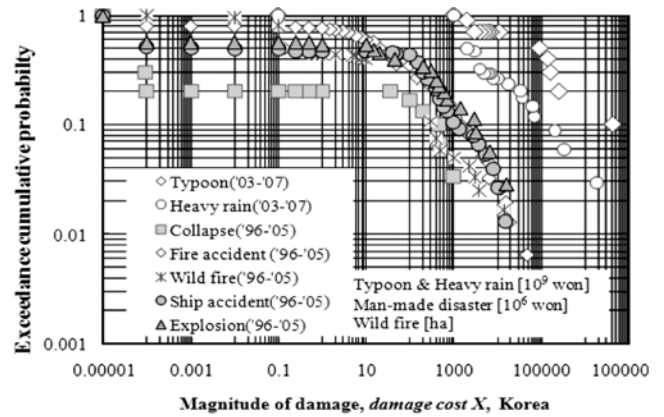


그림 5. 우리나라 재난리스크 곡선.

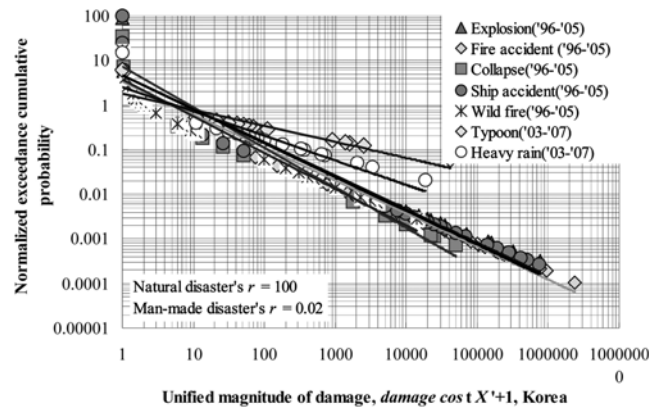


그림 6. 우리나라 정규화 재난리스크 곡선.

또한 그림 6은 그림 5로부터 정규화 재난 리스크 곡선을 작성한 결과이며 확률분포가 확산하는  $X'=0$  근방을 제외한 모든 부분에서 피해규모에 상관없이 직선으로 표현 가능함을 확인할 수 있다. 또한 리스크 곡선의 정규화를 통해 피해규모가 무차원이 되므로 동일기간, 동일 스케일 눈금단위의 피해규모로 작성된 리스크 곡선에 위치매개변수  $r$ 를 도입하여 정규화하면 재난유형별, 피해유형별 정규화 리스크 곡선을 통해 재난유형 및 피해유형에 무관한 정량적 비교·분석이 가능할 것으로 판단된다.

## 3. 재난위험 지표와 재난위험도 평가식 개발

### 3.1 기존 재난위험 평가 기법의 고찰

재난위험(Risk)에 대해 다양한 정의가 있으나 간단히 정리하면 관찰지역내의 재난피해 발생확률과 결과로 파생되는 손

실의 결합으로 정의할 수 있다. 이를 Ansell과 Wharton(1992)은 위험도를 다음의 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$\text{위험도 (Risk)} = \text{발생가능성(Likelihood)} \times \text{결과(Consequence)} \quad (8)$$

손실의 결과로는 인체나 생명의 손실, 재산피해나 시설물 붕괴와 같은 경제적 피해, 환경오염, 산림소실과 같은 환경피해 등의 여러 가지 형태로 나타난다. 따라서 재난위험의 발생특성은 결국 발생빈도, 발생지역의 면적 및 인구수, 재난확대 속도 및 지속시간, 2차적인 영향의 유·무, 경보에 의한 긴급대응 가능성 등에 크게 영향을 받는다. 결국 관찰지역내의 재난위험도는 재난위험요인의 밀집도(density), 이에 대한 노출정도(발생확률, Probability), 노출될 경우 재난피해의 심도(취약성, Vulnerability) 및 결과적으로 발생한 최종 재난피해규모에 비례하며, 평상시 재난대비 및 경보에 의한 긴급대응과 같은 효율적 재난관리 즉, 재난피해저감능력에 반비례하는 것으로 볼 수 있다. 이로부터 Benouar와 Mimi(2001)는 위험도를 식 (9)와 같이 정의하였고 a'Albe는 식 (10)과 같이 정의하였다. 식 9에 의한 재난위험도 산출기법은 하나의 시설 또는 작업 공정상의 한정된 구역을 대상으로 한 재난위험도 분석에 적합하다. 즉 해당 시설에 대한 재난위험 요인별 전문적인 지식과 다년간에 걸쳐 발생한 사고의 상세 사고이력 정보 분석을 바탕으로 이루어지므로 상세 사고원인분석 등 위험요인별 사고발생에 미치는 확률분석에 적합하다. 따라서 주요 사고원인 도출, 재발방지 대책 마련 및 확률분석, 재난위험요인으로부터 사고에 이르기까지의 최악의 시나리오 도출 등에 효율적으로 활용 할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 재난유형별로 대상으로 하는 건축, 교량, 댐 등 각 시설에 대해 재난피해규모 추정모형 및 재난취약도 함수의 개별적 개발이 필요하며 산출된 Hazard는 재난유형별/시설별로 위험의 상태를 재난유형별 고유 특성치에 대한 발생확률로 재난위험도에 반영하게 되므로 재난유형별로 개별적인 고유 단위를 가진 물리적 특성치로 결과가 표현된다.

$$\text{위험도(Risk)} = \frac{\text{재난위험(Hazard)} \times \text{재난취약도(Vulnerability)}}{\text{재난관리(Disaster Management)}} \quad (9)$$

a'Albe(1979)는 재난위험을 지역전체의 개념으로 확대하여 지역안전도(위험도)를 식 (12)와 같이 정의하였다.

$$\text{지역안전도(위험도)} = \frac{\text{재난위험(Probability)} \times \text{재난피해규모(Estimated Damage)}}{\text{재난피해저감능력(Disaster Management Ability)}} \quad (10)$$

a'Albe의 재난위험은 모니터링 지역별로 산출하게 되며, 지역의 재난발생 확률을 재난발생 요인별(태풍, 지진, 핵발전소 사고 등)의 특성과 재난발생지역 특성(지형, 기온, 하천형태, 기후 등)을 반영한 확률모형을 통해 산정된다. 따라서 이를 적용하기 위해서는 상당한 분량의 재난당시 현장 정보와 과

거 유사사례 이력정보가 필요하다. 여기서 재난피해규모는 지역의 재난노출도(Exposure)로 표현하기도 하며, 과거 재난발생시 피해규모나 향후 재난발생으로 예상되는 지역의 피해규모를 의미하며 경제적 가치(Economic Value)로도 환산이 가능하다. 또한 재난피해저감 능력은 재난에 대한 지역 방재시설·인력·자원확보계획 등 대처능력을 종합적으로 판단하는 것으로 시설적인 측면을 주로 하나 비시설적인 계획·행동의 포함도 가능하며 소방방재청에서는 자연재난을 대상으로 지자체의 1년간의 재난관리 활동 결과를 재난피해저감능력으로 반영하고 있다.

식 (10)에 의한 지역안전도 평가에 있어서 재난유형별로 발생확률을 예측하기란 매우 어려운 반면 과거 재난피해규모나 재난피해저감능력은 상대적으로 파악하기 쉬우므로 재난피해규모와 재난피해저감능력을 통합하여 지역 재난취약도(Vulnerability)로 부분적으로 평가하기도 한다.

여기서 Peril, Risk 및 Hazard를 간단히 정리하면 Peril은 사고·재난 그 자체를 말하며, Risk는 이런 사고·재난 또는 재난에 의한 피해(Loss)와 그 피해의 발생가능성(발생확률), Hazard는 사고·재난 또는 피해 발생을 촉진시키는 요인이나 요인들의 조건·상태(위험의 상태)라고 볼 수 있다. 통상 Hazard는 재난위험 요인별 사고(failure)에 대한 발생확률로 위험의 상태를 나타내게 된다. 결국, 지역의 Hazard는 그 지역의 재난위험 상태 즉 재난위험요인별 사고확률의 대표값으로 재난위험의 상태를 나타내므로, a'Albe의 지역재난위험 평가식과 일맥상통하는 것으로 판단된다. 그러나 식(9)의 Hazard 개념의 위험도 산출식은 협소구역 또는 단일 시설내의 운영상의 위험을 상세히 검토하는 기법에 기초하므로 각 시설에 대한 위험도를 지역구 전체의 위험도로 산출할 수 있도록 막대한 분량의 사고 D/B 표준화 처리 및 유지·관리방안이 필요하며 지역 내 시설 연계 지역재난 위험도로 산출하는 방안도 필요하다. 따라서 실제 적용에 있어서는 전문가의 지식 정도, 해당시설에 대한 사고이력 정보의 정확도와 정보량 및 재난위험 산출시의 적용기법에 따라 결과가 상이할 수도 있다. 또한 이들 식을 통한 재난위험도 산출은 해당 시설 유형별, 재난유형별로 개별적인 재난위험추정 모델이 별도로 필요하며 각각의 물리적 특성치로 재난위험도가 도출되므로 통합적 재난관리 차원에서 재난유형별 비교시 난해한 부분이 있다. 더욱이 상당한 분량의 과거사고 이력정보 및 해당분야의 평가기법에 대한 전문적인 지식이 필요하다. 따라서 이를 국가적 차원의 재난위험 기반 재난관리에 적용하기 위해서는 지역별로 막대한 시간과 예산, 재난유형별/시설별 전문가 및 행정인력 등이 필요하게 되므로 효율적인 적용이 어려운 것으로 판단하였다.

그러나 이를 통한 잠재위험의 사전파악 및 재난유형별/지역별/시설별 재난위험도 분포의 파악은 재난관리에 있어서 예산 낭비를 방지하고 효율적인 재난예방을 위한 가장 중요한 의사결정 정보이므로 소방방재청의 주요업무로써 반드시 수행할 필요가 있다. 여기서 재난위험도를 평가함에 있어 여러 가지 기법이 활용될 수 있겠으나 국가적 차원의 광범위한 지역구를 대상으로 적용 가능한 지역재난위험도 평가기법은 다

음의 기본 충족조건을 만족시킬 필요가 있는 것으로 사료된다.

- 전국 또는 지역구를 대상으로 하므로 지구단위 재난위험도 산출 및 정보제공의 편의성을 갖출 수 있고, 평가 및 결과 활용이 간편하여 재난관리 의사결정 시스템 운영에 활용 가능 할 것

- 해당 전문분야에 비전문가인 의사결정자라도 정확한 의사결정이 가능하도록 직접적인 재난피해 위험 정보를 제공할 수 있을 것

- 시행에 소요되는 예산, 인력 및 시간적 측면에서 지속성 및 경제성을 갖추고, 전국 각 지역에 대한 적용이 실현 가능 할 것

- 평가자의 전문적 지식 정도 및 의견에 따라 결과가 좌우되지 않으며 객관적일 것

- 다양한 재난유형별 피해특성을 상호 비교할 수 있도록 정량적이고 통합적인 지표 형태로 제공 가능할 것

- 대규모 재난의 불확실성에 대한 유연한 대처가 가능하도록 확률·통계적인 위험도 분석이 가능할 것

또한 미래재난 위험에 대한 예방대책 마련을 위해 재난피해 확대 예측에의 활용성이 있으면 더욱 이상적인 재난관리의 도구로써 활용 할 수 있을 것이다.

위의 검토사항을 바탕으로 현재 소방방재청에서 지역별 안전도 평가기법을 고찰하면 재난피해 저감능력산출 기법에 있어서 소요되는 예산 및 시간적 측면, 광범위한 지역에서의 적용, 객관성 확보에 다소 개선의 여지가 있는 것으로 판단된다. 이에 리스크 곡선으로부터 도출한 확률·통계적인 재난위험 지표로부터 간편하게 수행 가능한 재난안전도(위험) 평가 기법을 개발하여 소개하고 이들 재난위험 지표의 의미를 해설하였다.

### 3.1 재난위험 모니터링용 지표 도출 및 해설

아래에 우리나라 실제 재난피해·발생확률 리스크 곡선으로부터 도출한 확률·통계적인 재난위험 지표를 제안하였다. 본 기법을 소방방재청의 NDMS와 연계하여 전국에 대해 적용할 경우, 보다 간편하게 재난위험 모니터링의 지속적 수행이 가능하며 경제적이고 효율적인 시·군·구 단위의 재난위험 정보 제공 및 통합적 재난관리를 위한 의사결정 지원시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 3.1.1 프랙탈 차원 안전지수와 위험증감강도 지수

식 (4)의  $D$ 로부터  $D^{-1}$ 은 식 (11)과 같이 주어지며 그 의미를 검토하면 다음과 같다.

$$D^{-1} = -\frac{\log x}{\log F(x)} \quad \text{또는} \quad D^{-1} = -\frac{\log x}{\log F(x/x_M)} \quad (11)$$

재난안전지수( $D$ )를 관계식으로부터 살펴보면, 해당 시스템(지역사회, 또는 산업단지, 관찰지역, 시설 등)내에서의 단위 규모의 피해 증감에 대한 발생건수 증감 비율, 즉 재난피해 증가에 대한 확률·통계적인 저항지수의 의미로 해석되며

“fail-safe 기구의 기능도” 즉, 초기적인 사고나 시스템의 기능고장이 발생하더라도 소규모 피해범위 또는 안전하게 진압 되도록 유지되는 지역(시스템) 전체 차원의 기능을 말하며, 해당 지역(시스템)의 확률·통계적 재난안전지수로 활용 가능하다. 또 그 역수인  $|D|^{-1}$ 는 단위 재난 발생건수 증감에 대한 피해규모의 증감 비율, 즉 재난피해 증가에 대한 확률·통계적인 위험감도지수의 의미로 해석되며, 해당 시스템내의 통계적인 재난위험증감강도 지수로써 활용 가능하다.

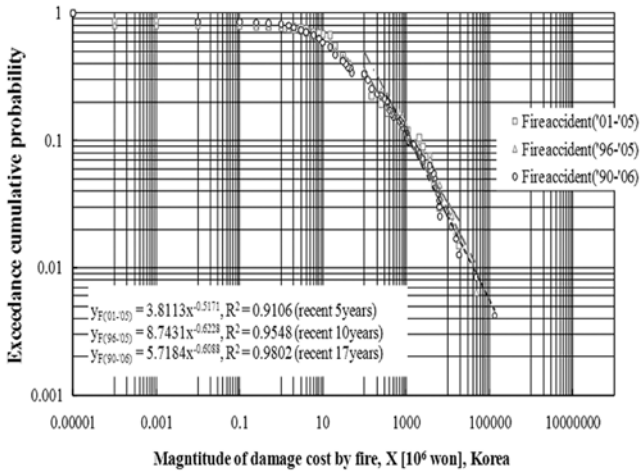
따라서  $|D|$  및  $|D|^{-1}$ 는 해당 시스템 내에서 재난유형별/시설별/지역별/피해유형별로 다른 프랙탈 차원을 가지는 특성치이므로 관찰대상의 안전(위험) 특성을 잘 반영하는 지표임을 알 수 있다. 즉,  $|D|$ 가 클수록 해당 시스템의 재난피해 확대 및 발생 건수 증가에 대한 저항성이 크며 안전한 상태임을 의미한다. 또한  $|D| \rightarrow 0$  일수록 대규모 재난영역에서의 재난의 발생 증가 및 피해 확대에 대해 취약한 상태로, fail-safe 기구가 제대로 기능하지 않고 있음을 의미한다.

지표에 대한 고찰결과를 바탕으로 안전지수  $|D|$ 를 소방방재청 시행 지역안전도 평가(소방방재청, 2005)에 활용하는 기본 식으로 식 (9)의 “재난관리도(Disaster Management)” 또는 식 (10)의 “재난피해저감능력(방재역량)”을 반영하는 통계적 대표치로써 활용 가능한 것으로 판단하였다.

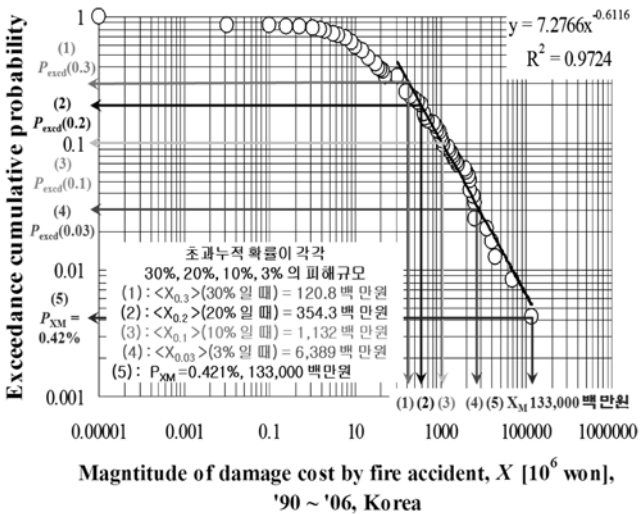
그림 7은 재난위험 모니터링용 지표 산출을 위한 리스크 곡선 비교 및 지표 산출 개념도로 우리나라의 최근 17년간(90년~06년)의 화재피해액 리스크 곡선을 활용하였다. 그림 7에서 피해규모 지수  $\langle X_k \rangle$  및 최대피해규모 지수  $\langle X_{Mk} \rangle$ 의 도출방법을 도시하였다. 재난리스크 곡선과 정규화 재난리스크 곡선상의 역べき계형 분포함수 성립영역의 함수식  $y = Ax^{-Ds}$  및  $y_n = X^{-D}$ 에서 실제 재난 리스크 곡선상에서  $P_{excl}(\langle X_k \rangle)$  (이하  $\langle P_{Xk} \rangle$ ,  $\langle \rangle$ 표기는 통계적인 대표값)는 상위초과누적확률이  $k \times 100\%$ 임을 뜻하며, 그 때의 피해규모를  $X(k \times 100\%)$  (이하  $\langle X_k \rangle$ )라 한다.

또한 해당 재난유형에 대한 최대 피해규모는  $X_M$ , 그 때의 상위초과누적확률을  $P_{excl}(X_M)$  (이하  $\langle P_{XM} \rangle$ )으로 한다.

이처럼 재난피해 리스크 곡선으로부터 재난피해액 규모와 그때의 발생확률, 최대피해액 규모 등 재난위험도 정보를 제공할 수 있고, 산출된 재난위험도로 부터 안전관리 달성 목표 및 주의단계, 경보단계 등의 재난안전관리를 위한 확률·통계적 기준정보로써 재난안전관리 정책 의사결정자에게 유효한 정보를 전달할 수 있다. 예를 들어 그림 7(a)에 리스크 곡선의 모니터링 기간별 피해규모 발생 변화를 살펴보기 위해 최근 17년(90~05), 최근 10년(96~05) 및 최근 5년(01~05) 간의 화재피해액 리스크 곡선을 작성하였다. 화재사고 피해정보는 문헌기록 화재피해사례(재난연감, 2006. 화재통감, 2006, 전국화재발생현황분석, 2007. 소방행정통계자료, 2007)를 활용하였다. 그림 7(a)에서 화재피해액 리스크 곡선의 형태는 모니터링 기간의 변화에 상관없이 유사한 형태를 유지함을 알 수 있다. 그러나 모니터링 기간이 길어질수록 리스크 곡선의 피해액 규모 범위와 꼬리부의 기울기가 커짐을 알 수 있다. 모니터링 기간이 길수록 발생하는 피해액의 규모가 통계적으로 증가하는 현상은 쉽게 짐작할 수 있다.



(a) 최근 17년, 10년 및 5년간 화재피해액 리스크 곡선



(b) 재난위험 모니터링 지표 산출 개념도

그림 7. 재난위험 모니터링 지표 산출을 위한 리스크 곡선 비교 및 지표 산출 개념도.

그러나 꼬리부의 기울기 즉,  $|D|$ 의 변화는 관찰기간 동안의 관찰 집단의 화재피해에 대한 지역전체의 고유특성인 안전지수의 변화를 나타내는 것이다. 즉, 그림 7(a)로부터 대규모 화재피해액 영역의 확률·통계적 발생빈도는 최근 17년간이 가장 낮고, 다음이 최근 10년간으로 최근 5년간의 동일 피해액 규모가 다른 모니터링 기간 대비 현저히 증가하였음을 알 수 있다. 이는 최근 17년, 최근 10년 및 최근 5년 간의  $|D|$ 의 값이 0.6088 → 0.6228 → 0.5171로 변화하여 왔으며,  $|D|$ 값이 화재안전지수를 반영하는 좋은 지표임을 확인할 수 있다.

즉, (지역)화재위험상태의 변화가 최근 5년간에 들어 대규모 화재 한 건, 즉 단위 확률(빈도) 증가에 따른 피해액 증가 및 그 변화에 대한 증감정도가 심화되었음을 의미한다. 이는 기존의 화재안전관리체계에서 작동하던 fail-safe 기구의 기능이 최근 재난발생경향 변화에 따라 제대로 작동하지 못하므로 사고피해의 확대를 초래하고 이에 따라 식 (10)의 a'Albe식으로부터 대규모 재난위험이 증가하였음을 의미한다. 동일한 방법으로 1년 간격의 화재피해액 리스크 곡선을 작성 하면, 1년 간격으로 화재위험도 분석이 가능하다.

이와 같은 분석결과를 바탕으로 현재이후 발생하고 있는 화재피해액에 대해 리스크곡선을 활용하여 그 위험도를 산출할 때는 가장 높은 위험도로 산정할 수 있고 최근의 화재위험 상태를 잘 반영하는 최근 5년간의 리스크 곡선을 활용하여 분석함이 옳은 것으로 판단된다. 그러나 화재안전관리를 위하여 안전 달성 목표를 설정하고자 할 경우에는 합리적으로 안전하게 유지하여야 할 기준을 설정하는 개념(As low as reasonably achievable, ALARA)이 되므로 안전적 분석의 차원에서 가장 낮은  $|D|$ 값을 가지는 최근 5년과 가장 높은  $|D|$ 값을 가지는 최근 10년의 중간, 즉 최근 17년간의 화재피해액 리스크 곡선을 활용하는 것이 옳은 것으로 판단된다. 즉, 재난위험 안전달성 목표는 재난리스크 곡선에서 대규모 피해영역의 재난위험 상위초과누적확률 3%, 10%, 20% 등 안전요구도에 따라 설정할 수 있고 이는 해당지역의 위험도 수용기준과 일맥상통하는 개념이 된다. 본고에서는 최근 17년간의 리스크 곡선을 활용한 안전달성 목표 설정을 사례로 들었는데, 이는 90년 이전의 경우 산업화의 급속한 진행으로 그 안전상태 또한 급속히 변화하던 상황이었으며 현재의 화재안전 상태를 판단하는 정보로는 그 유의성이 낮은 것으로 판단하여 최근 17년간의 리스크 곡선을 활용하여 임의 선정하였다. 아래에 그림 7(b)를 활용하여 화재안전관리를 위한 화재 안전 달성 목표 설정 및 의사결정을 위한 화재위험 산출 지표 설정 방법을 상세히 서술하였다.

최근 17년간의 화재피해액 리스크 곡선을 활용한 화재위험 실제 분석 결과를 살펴보면 30%(77.1건, 건당 120.8백만원 수준), 20%(51.4건, 건당 354.3백만원 수준), 10%(25.7건, 건당 1,132백만원 수준) 및 3%(7.7건, 건당 6,389백만원 수준)으로 나타났다. 또한 최대규모 화재피해는 전체 257건 중 0.42%(1.1건, 건당 133,000백만원 수준)의 피해가 발생한 것으로 나타났다. 그림 7은 우리나라 전체에 대한 최근 17년간의 화재리스크 곡선이지만 지역화재 또는 지역내 시설별 화재에 대한 사례정보 D/B를 활용하면 지역/시설별 화재 리스크곡선이 되므로 지역별/시설별 화재 위험도 산출 및 안전달성 목표 설정을 동일한 프로세스로 적용할 수 있다.

즉, 그림 7에서는 화재피해 정보 D/B의 한계 상 전국의 화재를 대상으로 하고 있으나 가령, 그림 3의 A지방의 특정 관리대상 건축물, 다중이용시설, 국가기반시설 등을 대상으로 5년간 모니터링을 통해 그림 7(b)와 같은 분석결과가 나왔다면 A지방의 해당 시설 또는 건축물에 대한 화재피해 발생 특성 구조는 프랙탈 차원  $|D_s| = 0.6116$ 이므로, 자기상사성 특성에 따라 A지방의 해당 시설에 대해 현재까지의 재난발생 빈도와 피해규모와의 상관관계에 적용할 수 있음을 의미한다(국립방재연구소, 2008).

따라서 해당지역에 대한 재난의 피해규모-발생확률간의 상관특성을 분석 할 수 있다. 예를 들면 화재피해규모가 전체의 20%수준인 건당 피해액 355 백만원에 대해 검토하면 그림 7(b)의 꼬리부의 누적확률분포함수  $y = 7.2766x^{-0.6116}$ 로부터 20%(약 51.4건/257건)의 발생확률을 가지며 실제 발생확률 모니터링 건수와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 또한 20% 피해규모의 100배인 35,500 백만원인 화재피해가 발생할 확

률은 약 1.200%(3.84건/257건)의 발생확률을 가지며, 최대피해규모의 화재피해가 발생할 확률은  $y = 7.2766x^{-0.6116}$ 의 화재 재난리스크 곡선상의 추정으로는 약 0.535%(1.37건/257건)로 추정되나 실제 최대피해규모 발생확률은 0.42%(1.03건/257건)로 최대화재피해의 경우 실제 발생확률보다 다소 과대평가되었으나 안전적인 추정의 맥락에서 문제는 없는 것으로 판단된다.<sup>1)</sup>

이와 같은 분석 결과로부터 가령 최근 17년간의 문헌기록 화재사고는 총 257건으로 화재 피해규모 상위 10% 이하로 설정하고, 10% 초과를 경보발령 기준으로, 20%를 경계주의 보 기준으로 설정하였다면 피해가 약 355 백만원/건인 화재가 전체화재 중 20%에 달하거나 1,132 백만원/건 화재가 10%에 달하고 있는 상황이라면 최대규모의 피해를 일으킨 화재사고도 발생할 가능성이 반드시 있으므로 시급히 현재의 화재안전대책을 강화시켜야 함을 의미한다.

단, 위의 분석 결과는 화재사고 피해정보문헌 기록에서 취합한 것으로 화재피해사례(재난연감, 2006. 화재통감, 2006, 전국화재발생현황분석, 2007. 소방행정 통계자료, 2007)에 기록된 문헌사례만을 활용한 분석이므로 기록에 누락된 사례도 있을 수도 있어 실제와 다소 다를 수 있다. 정확하고 유의성 높은 이상적인 분석결과를 위해서는 모든 화재사례를 취합·활용하는 것이 당연하겠으나 현실적인 한계 및 그 실효성, 리스크 곡선을 활용한 위험도 분석에 있어서 소규모 피해 화재가 끼치는 미미한 영향을 고려하면 투자한 노력대비 효과가 현저히 떨어지므로 소규모 화재에 대한 부분은 무시 가능한 것으로 판단하였다. 또한 위험도에 영향을 끼치는 일정규모 이상의 피해가 발생한 화재사례는 대부분 문헌에 기록·보존되므로 이를 활용한 화재위험도 분석은 유의성을 가지는 것으로 판단하였다.

### 3.1.2 정규화 피해규모 지수

재난관리에 있어서 재난위험요소 제거 등의 예방정책 시행 시 편익대비 최대효과를 얻을 수 있고 필수 안전확보를 위한 기준, 즉 안전달성목표 설정이 필요하다. 즉, 일정규모 이상의 피해를 동반하는 재난위험 요소 및 위험의 정도를 판별하고, 달성하고자 하는 안전수준에 따라 위험요소 제거 등의 예방강도를 조절함으로써 합리적인 재난관리가 가능하다. 따라서 예방정책의 결정에 있어서 안전 달성 목표치의 설정과 현재의 재난위험도 평가가 중요하다. 여기서 재난위험도의 평가에 있어 재난으로 인한 피해규모는 중요한 인자이며 효율적이고 지속 가능한 분석을 위해 간편한 도출방법이 필요하다. 따라서 본 연구를 통해 간편하고 경제적으로 도출 가능한 정량적 피해규모지수를 제안한다.

이들 정규화 피해규모 지수는 모니터링 하고자 하는 재난의 피해규모별로 재난위험도를 간편하게 산출 가능하므로 효율적인 재난위험 상태평가에 편리하다. 즉, 달성하고자 하는 안전 목표에 따라 재난피해 발생확률의 상위 한계값을 설정

하고 그때의 피해규모에 대한 통계적 대표치인 정규화 피해규모 지수를 도출함으로써 식 (10)에 의해 현 상태의 재난위험도를 간편하게 산출할 수 있다. 본 연구를 통해 도출한 재난위험 지표는 다음과 같다.

- 안전지수  $|D|$  및 재난위험증감강도지수  $|D|^{-1}$
- 재난위험 모니터링용 지표로서 최대피해규모  $\langle X_M \rangle$ , 상위 초과누적확률 3%, 10%, 20%, 30%일 때의 피해규모  $\langle X_{0.03} \rangle$ ,  $\langle X_{0.1} \rangle$ ,  $\langle X_{0.2} \rangle$ ,  $\langle X_{0.3} \rangle$
- 재난위험 모니터링용 정규화 지표로서 정규화 피해규모  $\langle X_{NM} \rangle$ , 최대피해규모  $\langle X_{NM} \rangle$

이들 지수는 해당 재난의 리스크 곡선 및 정규화 리스크 곡선으로부터 도출 가능하며 피해규모별 발생확률 또는 발생확률별 피해규모, 즉 피해규모지수에 대한 확률·통계적 대표치임을 확인하였다.(소방방재청 국립방재연구소, 2008) 따라서 소방방재청 시행 지역안전도 평가식에 활용되는 기본식으로서 식 (9)와 식 (10)의 “재난위험(발생확률) 및 재난피해규모(예상규모)”를 반영하는 통계적 대표치로써 활용 가능할 것으로 판단된다.

### 3.2 정량적 재난위험도 평가

재난위험도 평가 함수는 다음의 식 (12)와 같은 상관함수로 표현 가능하다. 여기서 주요인자인 피해규모, 발생확률 및 재난피해 저감능력 ( $|D|$ 에 상응)을 기본식 (10)에 대입하면, 재난위험도 함수는 식 (13) 및 식 (14)로부터 재난요인별/시설별/지역별로 산출할 수 있다. 본고에서는 피해액, 사망자, 사상자와 같은 직접피해규모에 대한 확률로 산출한 재난리스크 곡선 분석으로부터 각 재난위험지수를 도출하였다. 재난유형에 따른 상세원인 분석 시에는 보다 상세한 재난정보 D/B를 구축하고, 원인별 피해규모 및 발생확률을 동일 식에 적용하여 식 (9)의 Hazard 개념에 바탕을 둔 재난위험도 분석이 가능하다. 지역별/시설별 재난사례에 대해 원인별 발생확률을 활용할 경우, 재난위험 모니터링용 지표 도출 및 해설에서 전술한 바와 같이 식 (9) ~ 식 (12)가 상호호환성을 가지고 적용할 수 있게 되며 재난리스크 곡선을 작성하여 동일한 프로세스에 의해 식 (13) 및 식 (14)로부터 재난위험도 및 최대재난위험도의 산출이 가능하다. (S.S.Park, 2006 & S.S.Park, 2007)

$$Disaster\ Risk = Funtion[A, |D|^{-1}, x(i), x_N, p(x_i), p(x_N)] \\ \times \sum_{i=1}^N Funtion[Density\ of\ each\ risk\ factors, Dimension\ of\ Area] \\ \times \sum_{i=1}^N Funtion[Investment\ rate\ for\ safety] \quad (12)$$

$$재난위험도 = \frac{\langle P_k \rangle \times \langle X_k \rangle}{|D_R|} \quad (13)$$

$$최대재난\ (위험도) = \frac{\langle P_M \rangle \times \langle X_M \rangle}{|D_R|} \quad (14)$$

전국에서 발생한 재난을 모니터링 할 경우 전국의 해당재

<sup>1)</sup>본 분석에 사용된 재난사례 정보는 소방방재청의 재난연감, 화재통계연감, 재난수습사례집 및 화재통계 연보 등 문헌에 기재된 사례만으로 분석되었음.



난에 대한 해당기간의 위험도가 산출되며, 어떤 일정 지역에서 발생한 재난을 모니터링 한 경우는 지역재난 위험도가 도출된다. 또한 식 (13) 및 식 (14)의 경우 현재까지 발생한 재난현황으로부터 재난위험 상태를 정량적으로 평가하는 식이 된다. 식 (13) 및 식 (14)는 식 (12)에서 재난위험도의  $[A, |D|^{-1}, x(i), x_N, p(x_i), p(x_N)]$  만 반영된 것으로  $\sum_{i=1}^N Funtion [Investment rate for safety]$  및  $\sum_{i=1}^N Funtion [Density of each risk factors, Dimension of Area]$ 는 다른 지역 간 비교시 지역 재난위험도 산출에 별도로 반영되어야 한다. 또한 모니터링 기간에 대하여 빈도 산출시의 리스크 곡선의 기초가 되는 초과누적확률 시나리오 리스트 작성과정에서 모니터링 기간 및 피해규모 산출 단위, 확률산출을 위한 히스토그램 분석시의 계급구간이 일정하게 작성되어야 한다.

여기서  $|D|$  및  $|D|^{-1}$ 를 지역단위에서 고찰하면, 해당지역내의 사고 1건당 재난피해가 증감하는 시스템 내의 고유 재난피해 확대 민감도를 나타내는 지표이므로 사고 1건당 재난피해가 증감하는 정도는 스케일링 법칙으로부터 그 사회의 잠재위험 건수(또는 밀도)에 따라 다르며 이런 잠재위험요소로는 관찰 면적, 인구밀도, 관찰대상시설 밀도 등, 모집단의 고유특성을 들 수 있다. 또한 잠재적인 재난위험 저감 요소로는 해당지역의 안전에 대한 투자율을 들 수 있다. 따라서 이와 같은 방법으로 안전지수  $|D|$ 를 활용한 식 (13)과 지역의 잠재위험 요소 및 잠재위험저감요소를 반영하여 간편하게 지역재난위험도를 평가할 수 있을 것으로 기대된다.(국립방재연구소, 2008)

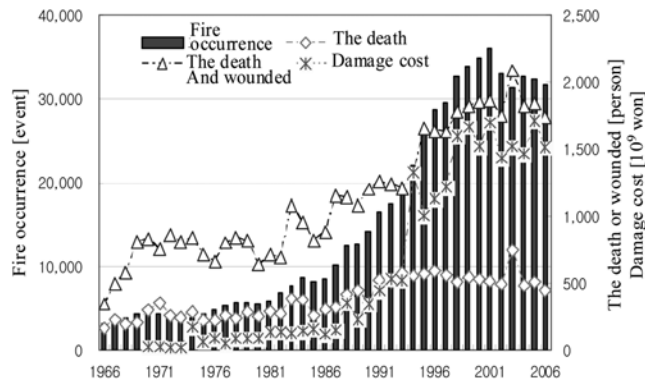


그림 8. 최근 40년간 화재발생 및 피해현황.

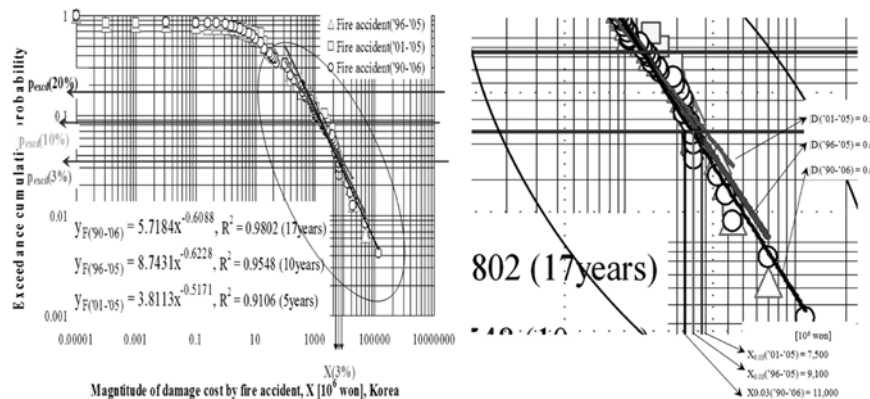


그림 9. 관찰주기에 따른 화재피해 위험지수 산출.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 한국과 일본의 화재 리스크 곡선 분석

앞에서 소개한 안전지수  $|D|$ 가 그 시스템 또는 지역사회 전체의 안전도를 전체적으로 반영하는 확률·통계적 대표치의 의미를 가짐을 설명하였다. 이를 근거로 일본과 한국의 재난 안전지수  $|D|$ 의 변화 거동 분석을 통해 국가 재난안전도의 변화 추세를 검토하고 그림 9에 리스크 곡선을 활용한 안전지수  $|D|$ 의 도출 결과를 제시하였다. 또한 관찰주기를 17년간, 10년간, 5년간 전국의 화재사고를 대상으로 하여 해당기간의 재난위험에 대한 안전지수 및 재난위험도를 식(13)에 따라 도출하고 그 결과를 식 (15)에 나타내었다. 앞에서 최근 17년간, 최근 10년간 및 최근 5년간 화재안전지수 분석에서 최근 10년간이 가장 높고 최근 5년간이 가장 낮은 것으로 나타났다. 그러나 식 (13)에 의해 상위초과누적확률 10% 화재위험도(동일 계급구간, 백만원 단위 히스토그램에 기초)는 각각 1062.843, 1447.201 및 2900.793으로 최근 17년간이 가장 낮고 최근 5년간의 화재위험도가 가장 높은 것으로 나타났다.

이는 최근 5년간 대규모 재난의 발생증가를 의미하며, 그림 8에 최근 40년간의 우리나라 화재발생 및 피해현황으로부터 최근 10년간의 화재피해액이 급속히 증가하였음을 알 수 있고, 최근 10년 및 5년의 화재피해액 위험도가 높아진 원인으로 판단된다.

다음으로 일본과 우리나라 화재 안전도 변화 경향 비교를 위해 양국의 최근 13년간의 화재사고 피해액·발생확률 재난정보를 바탕으로 재난리스크 곡선을 작성하였다. 이로부터 정규화 리스크 곡선을 도출하고 결과를 그림 10 및 그림 11에 각각 나타내었다.

그림 10에서 화재사고의 피해액·초과누적 발생확률간의 직선적 상관성은 패레토행(Pareto type) 함수식을 적용 가능하며 이는 화재의 경우 그림 10으로부터 10만 달러 이상, 즉 일정규모 이상의 피해액을 가지는 화재영역에 대해서만 성립하는 것으로 판단된다. 그러나 그림 11의 정규화 화재피해액 리스크 곡선으로부터 화재사고에 대한 피해액 초과누적 발생 확률은 양대수 플롯 그래프 상에서 직선적인 상관성을 가지며 피해액이 0근방을 제외한 범위에서 패레토 법칙에 따르

Risk of damage cost by fire accident :

$$\begin{aligned}
 (1) \text{ for 17years} &= \frac{11,000 (10^6 \text{ won})}{S_{korea} \times 0.6088 \times 17 \text{ years}} = \frac{1062.843}{S_{korea}} \\
 (2) \text{ for 10years} &= \frac{9,100 (10^6 \text{ won})}{S_{korea} \times 0.6288 \times 10 \text{ years}} = \frac{1447.201}{S_{korea}} \\
 (3) \text{ for 5years} &= \frac{7,500 (10^6 \text{ won})}{S_{korea} \times 0.5171 \times 5 \text{ years}} = \frac{2900.793}{S_{korea}}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

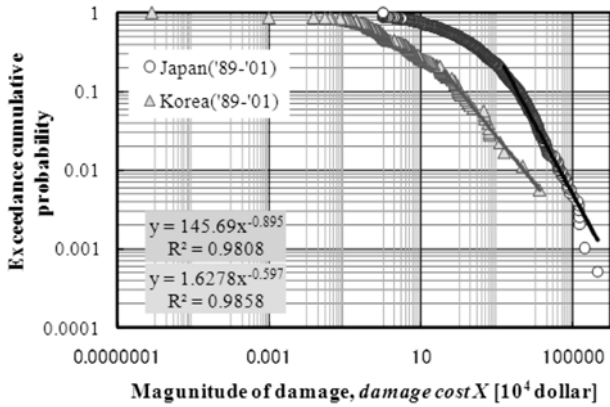


그림 10. 한국 · 일본 화재피해 리스크 곡선 비교.

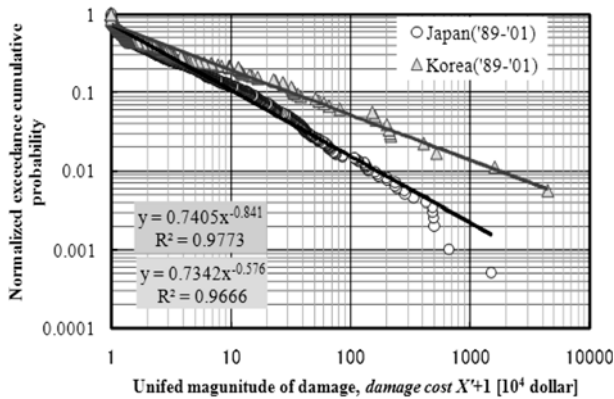


그림 11. 한국 · 일본 화재피해 정규화 리스크 곡선 비교.

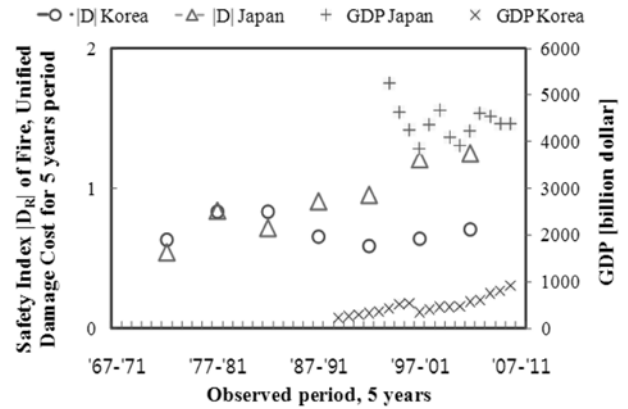


그림 12. 한국과 일본 화재안전지수  $|D_R|$  변화.

피해의 발생 특성을 나타내는 지표로 활용할 수 있다.

이를 근거로 최근 40년 동안을 5년 간격으로 분석한 화재 리스크 곡선 그림 10 및 그림 11로부터 안전지수를 산출하고 화재사고에 대한 양국의 안전도 변화 추세를 비교·분석하여 그 결과를 그림 12에 나타내었다.

일본의 경우 안전지수  $|D_R|$ 이 장기간에 걸쳐 약간의 증감을 보이며 상향 이동하고 있고 이로부터 일본의 화재사고에 대한 안전도는 점차적으로 향상되고 있음을 알 수 있다. 이는 한국에 비해 월등히 높은 GDP와 일정한 국내투자율 (GNDI ratio)유지에 따른 일본의 재난안전관리 정책 및 산업안전구조 체계가 안정적으로 자리매김하였음을 짐작할 수 있게 한다. 반면 한국의 화재안전지수는 '80년대 초반이후 급속한 산업발전을 시작하던 시기부터 하향 이동하였음을 알 수 있다. 또한 '90년대 이후부터는 GDP의 성장과 더불어 화재 안전도가 증가하고 있으나 일본에 비해 낮은 증가율을 보였다.

재난위험도는 피해액 규모와 발생확률 및 재난안전지수의 조합함수이므로 식 (13)에 따라 일본 및 한국의 재난위험도를 산출할 수 있다. 본고에서는 지면의 한계 상 상세한 설명은 생략하였다.

#### 4.3 우리나라 인적재난 위험도 변화 추세 분석

그림 5 및 그림 6의 재난리스크 곡선 및 정규화 재난리스크 곡선으로부터 최근 10년간의 우리나라 인적재난에 의한 피해규모, 재난안전지수(재난안전관리지수) 및 재난위험도를 각각 산출하였다. 이를 그림 13에 최근 10년간의 인적재난 위험분석 결과에 나타내었다.

상위 3% 피해액 범위는 폭발위험도가 가장 높고, 상위 10%는 산불, 상위 20%는 붕괴가 가장 높은 것으로 나타났다.

또한 상위 10%피해액 범위 재난위험도는 가장 낮은 붕괴 대비 산불 2.4배, 폭발 1.7배, 해난사고 1.4배, 화재 1.2배 붕괴보다 높은 것으로 나타났다. 상위 10%사망 범위는 화재 위험도가 가장 높고 열차사고, 해난사고, 붕괴 및 폭발의 순으로 나타났다. 이처럼 상위 3%, 10% 등의 일정 피해규모 범위 위험도를 분석 가능한 것으로 판단된다. 그러나 보다 높은 신뢰도 및 타당성 확보를 위해 보다 많은 해외 재난사례 D/B를 활용한 비교·분석을 통한 검증이 필요하다.

는 역べき계형 함수식으로 표현 가능함을 확인 할 수 있다.

그림 10 및 그림 11, 식 (13)으로부터 일본과 한국의 최근 13년간의 화재 피해액에 대한 재난관리 안전지수  $|D_R|$ ( $|D|$ , 1만불 단위)는 각각 0.841(0.895) 및 0.576(0.597)로 일본이 한국보다 약 1.46(1.5)배 높은 것으로 나타났으며, 양국의 최대화재위험도(동일 계급구간, 만불 단위 히스토그램에 기초는 일본이 137.41(383.40), 한국은 569.45(1719.46)로 한국이 4.14(4.48)배 높은 것으로 나타났다.

앞의 우리나라 자연재해 및 인적재난 비교, 우리나라 화재에 대한 17년간, 10년간 및 5년간 화재위험분석과 한·일 화재위험 비교·분석에서 알 수 있는 바와 같이 모니터링 기간이 다르거나 히스토그램 처리 단위가 다를 경우 각각 다른 재난위험 수치로 산출됨을 알 수 있다. 따라서 재난유형별/피해유형별 정량적 재난위험 비교·분석을 위해서는 비교하고자 하는 대상에 대해 초기에 작성되는 리스크 맵 및 히스토그램 처리시의 계급구간 및 피해규모 카운트 단위를 통일 처리하여 초과누적확률 시나리오 리스트에 반영되어야 한다. 즉, 표준화된 재난정보 처리 D/B를 활용하여야 상호간의 정량적인 비교가 가능할 것으로 판단된다.

#### 4.2 한 · 일 화재안전지수의 변화 거동 분석

앞에서 한·일 화재리스크 곡선의 꼬리부가 직선성을 가짐을 확인하였으므로 꼬리부의 기울기  $|D_R|$ 가 화재에 대한 피해규모·초과누적확률분포와의 상관성, 즉 일정규모 이상의 화재

## 5. 시사점 및 재난예방 정책의 발전 방향

### 5.1 시사점

재난유형별 리스크 곡선 분석을 통한 재난위험도 평가기법은 각 재난유형별로 피해규모 및 발생확률의 격차가 크고 각기 다른 양상을 가지는 개개의 특성을 반영하여 분석할 수 있다. 또한 정규화를 통해 이종 재난 및 이종 피해유형 간에도 정량적인 재난위험의 비교·분석이 가능한 것으로 판단된다.(박소순, 국립방재연구소, 2008)

본 연구를 통해 산출된 재난위험 정보를 근간으로 고찰하면 경제적이고 지속적인 재난위험 모니터링 및 재난예방 정책의 의사결정을 위한 재난위험정보로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

향후, 소방방재청의 NDMS(국가재난정보관리시스템)가 지역별, 시설별 사고발생현황에 대한 정보를 보다 많이 축적하고 신뢰성 높은 재난정보 D/B로 자리매김을 할 즈음에는 본 분석 기법으로 광역구 단위의 재난위험도 뿐만 아니라 시군구별, 시설별, 유형별 재난위험을 보다 정도 높게 산출 가능하므로 통합적 재난관리에 효율적인 활용이 가능한 것으로 기대된다. 이를 위해서는 NDMS에 확률·통계적 리스크 분석에 필요한 재난정보를 편리하게 추출할 수 있도록 매뉴기능을 사전에 삽입하는 등 사전조치를 하고 양질의 재난정보를 지속적으로 축적해 나갈 필요가 있다.

### 5.2. 우리나라 재난예방 정책의 활용 방향

#### 5.2.1 안전목표 설정 및 관리지표로서의 활용

안전 달성 목표 설정은 의사결정자의 안전 달성 의지 및 사회적 안전요구도에 따라 달리할 수 있다. 그러나 그 설정은 지역사회의 재난위험 실태파악 및 해당 위험에 대한 최대 수용범위 검토를 통해 합리적으로 달성 가능한 가장 낮은 위험수준(As low as reasonably achievable)으로 유지할 수 있도록 설정되어야 하며 이에 대한 심도 있는 연구가 필요하다. 따라서 먼저 위험수준에 대한 정보로써 본고에서 소개한 재난위험 지수 및 재난위험 평가기법으로 산출한 재난위험 분석 결과를 활용하여 지역사회의 재난위험 저감 및 안전달성 목표 설정에 대한 적용성을 검토하였다.

이로부터 지역의 재난 안전관리 목표 달성 기준으로 설정되는 각각의 초과누적확률(예를 들면, 30%, 20%, 10% 및

3% 등)에 따른 피해규모는 대규모 재난발생의 불확실성을 고려 가능하며 확률·통계적 대표값으로 지역의 화재안전관리 상태 점검을 위한 간편하고 유의성 있는 지표로써 활용할 수 있음을 확인하였다.

또한 재난리스크 곡선의 꼬리부 즉, 직선부의 누적확률분포함수식과 프랙탈차원(자기상사성차원)  $D_f$ 로부터 재난유형별 피해규모·발생 확률간의 재난발생특성 분석이 가능함을 확인하였다. 이로부터 현장에서 발생한 현재의 재난피해규모가 모니터링 기간  $T$ 동안 몇 %의 위험수준에 해당하는 재난인지 간단히 추정할 수 있다. 또한 현재까지의 재난발생특성 분석 결과로부터 향후 대규모 재난 발생 특성의 개연성 파악에 대한 가능성을 확인하였다. 여기서 모니터링 기간 동안의 재난 발생 특성이 향후에도 지속성을 가진다면, 미래재난에 대해서도 그대로 확대적용 가능하나 미래재난위험요소 상태·조건 변화에 대한 추가분석이 필요하다. 따라서 별도 연구를 통한 검증이 필요하므로 본고에서는 이에 대해 논하지 않았다.

#### 5.2.2 지역재난관리 정책과의 융합·발전 방안

확률·통계적 분석을 위한 최소한의 필수 정보로는 재난유형, 발생일, 지역(동 단위까지), 시설종류, 피해규모, 사고 원인 및 간단한 사고 진행과정 요약 등을 들 수 있고, 추가 정보로는 대형 재난에 대해 발생 환경, 배경, 발생과정에서부터 종료까지의 상세 기록이 필요하다. 이는 향후 재발방지를 위한 분석 자료로 활용키 위함이다.

따라서 효율적이고 경제적인 지역재난 안전관리 정책을 마련을 위해 본 분석 기법과 소방방재청에서 시행중인 자연재난에 대한 지역안전도 평가를 통한 지역재난관리 정책과의 융합·발전 방안을 검토하였다.

본 기법은 간편하게 재난유형별 피해 발생 특징을 도출 가능하며 정량적인 재난위험도를 산출할 수 있는 방법이다. 따라서 경제성과 지속성을 갖춘 재난관리체계 구축에는 적합하나 통계적 대표치로서 현장의 실질적인 재난발생 현황을 상세하게 기록하고 보존하기에는 한계가 있다. 또한 소방방재청에서 시행중인 자연재해에 대한 지역안전도 평가기법이나 기존의 인적재난에 대한 위험성 평가 기법은 개별 재난정보를 상세한 기록으로 보존 가능하지만 막대한 예산과 시간이 필요하다. 따라서 두 평가법의 시행 빈도를 각각 조정하여 시행함으로써 간편하게 전체 재난발생 경향 특성 분석이 가능

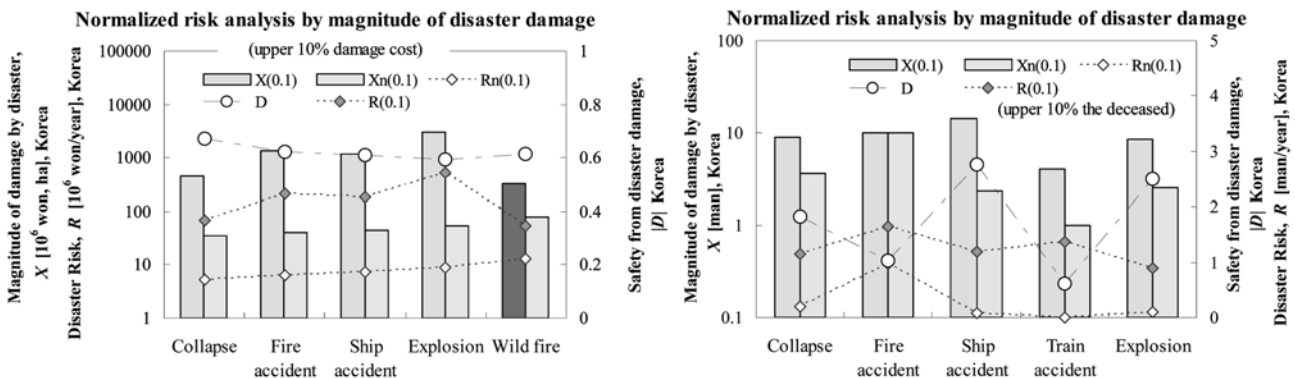


그림 13. 최근 10년 전국 재난유형별 피해액 재난위험도 분석 결과.

한 확률·통계적 재난위험 분석 기법과 정밀 기록이 가능한 기존의 재난위험 평가기법의 장점을 적절히 잘 활용할 수 있다. 또한 이를 통해 상호보완 함으로써 효율성과 경제성 및 지속성이 확보 가능한 재난관리 정책이 될 것으로 기대된다.

### 5.2.3 통합적 재난관리 기준 제시 방안

'90년 태백가뭄 피해를 일례로 들면 많은 주민과 농민들이 물부족으로 고통을 받았음에도 불구하고 재난지역 선포가 되지 않았고 국가적 차원의 지원을 받지 못했다. 이는 가뭄 피해액 산출의 어려움이나 재난지역선포기준 미달 등 여러 가지 이유를 들 수 있겠으나 근본적으로 재난지역선포기준 미달을 중요한 원인으로 들 수 있다. 즉, 재난유형별로 그 피해의 형태와 규모가 다를 수 있으나, 현재의 재난지역선포기준이 재난유형별 피해특성을 개별적으로 반영하지 못하고 태풍 및 호우 등 대규모 피해를 동반하는 재난위주로 설정되었고, 구체적인 피해규모를 제시하고 있어 가뭄피해 특성상 피해 규모가 재난선포기준 미달 및 그 판단형태에 적합하지 못함에 따라 발생한 것이다.

따라서 개별적인 재난유형별 피해특성을 잘 반영할 수 있는 유형별 재난리스크 곡선을 작성하여 누적확률분포 함수식 및 프랙탈 차원을 사전에 도출하여 두면, 확률·통계적인 재난위험의 정량화를 통해 일정 위험수준을 초과하는 재난의 누적확률에 대한 피해액 규모범위를 재난유형별로 정량적인 기준으로 제시 가능하다. 따라서 3%, 10%, 20%, 30% 등과 같은 재난위험의 확률·통계적 지표를 단계별 재난관리의 대응기준으로 활용할 경우 재난주의, 예보 및 경보, 재난지역 선포 등과 같은 즉각적 대책 시행의 필요여부를 의사결정자가 간편하게 판단할 수 있게 된다. 제시한 3%~30% 기준은 임의적인 열거이므로 재난관리 의사결정 판단 기준이 되는 합리적인 초과누적확률의 설정을 위해서는 보다 상세한 검토가 필요하다.

재난리스크 곡선의 특성상 재난유형별 피해규모-발생확률 특성을 각각 반영 가능하며 재난유형에 무관하게 적용할 수 있으므로 위험관리 수준 및 안전 달성 목표 설정에 대한 통합적이고 표준화된 재난관리기준을 확률·통계적인 정량치로 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 정부차원의 추가적 대응이 필요한 최소 피해규모 지정이 가능하므로 그 효율성

을 제고할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이를 재난관리에 활용할 경우, 현재 우리나라는 정부차원의 지원을 위한 재난지역 선포시 지자체별 행정력 및 예산, 지자체 장 및 부처 장관의 주관적 관리의사 등도 포함하여 주관적 요소도 고려하고 있으므로 이에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 소방방재청 방재·안전기술 개발사업의 지원으로 수행되었으며 관계자분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

소방방재청 (2007) 소방행정 통계자료, 통계조사 보고서.  
 소방방재청 (2007) 2007년 재해연보, 재난통계조사 보고서.  
 소방방재청 (2006) 2006년 재난연감, 재난통계조사 보고서.  
 소방방재청 (2008) 재난및안전관리기본법, 법제처 홈페이지, 법공고문.  
 소방방재청 (2005) 지역별 안전도 평가기법 개발연구 보고서, 정책반영과제 보고서.  
 박소순 (2008) 리스크 곡선을 활용한 재난발생 특성분석 방안 연구, 정책과제 보고서. 소방방재청 국립방재교육연구원 방재연구소  
 Park, S.S. Kitsukawa, S., Yuyama, S., Roh, S.K., Nam, K.W. and Sekine, K. (2007) *Corrosion Damage and Risk Assessment for Oil Tank by AE Method*, Proceeding of World Conference on Safety of Oil and Gas Industry, Kyungju, Korea, pp. 279-283  
 Park, S.S. (2006) *Development of Global Diagnosis Technique for Corrosion Damage of Bottom Plates in Oil Storage Tank by Acoustic Emission*, Ph.D. Dissertation, Yokohama National University, Yokohama, Japan  
 Hanayasu, S. and Sekine, K. (2003) *Statistical damage modeling and analysis of industrial accidents and its application to industrial safety problems*, Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, San Francisco, California, USA  
 Takayasu, H. (1989) *Fractals in the Physical Sciences*, Manchester University, New York, pp. 1-58.  
 福田隆文, 大淵泰知, 笠井尚哉, 関根和喜, 花安繁郎 (2005) *リスク曲線を用いた重大災害の発生規模予測法の提案*, 圧力技術 Vol.43, No.2 pp. 75-84.

◎ 논문접수일 : 09년 06월 15일  
 ◎ 심사의뢰일 : 09년 06월 19일  
 ◎ 심사완료일 : 09년 10월 05일