

세계 도시별 방사능 위험 순위: 핵폭발 시뮬레이션 결과 도시별 순위 분석

Hongmo Park, K-Gamma

Nuclear Weapon Explosion & Radiation Dose Simulation

핵무기 폭발로 인한 방사선 피폭 시뮬레이션 웹사이트: 64개국 221개 도시에서 핵무기가 사용될 경우 방사능 오염 지역과 그에 따른 해당 주민들이 받게 되는 방사선 피폭을 시뮬레이션.



세계 도시별 방사능 위험 순위:

핵폭발 시뮬레이션 결과 도시별 순위 분석

I. 요약: 주요 결과 및 방사능 관련 필수 사항

본 연구에서 제시된 추정치는 광범위한 대기 및 방사선 모델링을 통해 도출되었으며, 표준화된 핵폭발 시나리오에 따라 전 세계 221 개 도시의 잠재적 방사선 피폭에 대한 시간 간격 순위를 제시. 이 분석은 방사선 위험에 있어 심각한 시간적, 공간적 이분법을 확인시켜 주며, 비상 계획 패러다임의 근본적인 전환을 요구.

1.1. 시뮬레이션 개요

이 순위는 2024 년 12 월부터 2025 년 5 월까지 진행된 6 회의 개별 시뮬레이션을 평균하는 철저한 기술적 방법을 통해 도출되었음. 각 시뮬레이션마다 64 개국 221 개 도시에서 20 킬로톤의 플루토늄 폭발을 시뮬레이션. 밀리시버트(mSv)로 표시되는 최대 유효 방사선량은 폭발 후 지속되는 3 시간 간격으로 최대 24 시간 동안 계산. 방사성 물질의 대기 이동(방사능구름)은 NOAA 대기자원연구소(ARL)의 HYSPLIT 모델을 기반으로 하며, 전 세계 GFS 0.25 도 기상 데이터를 통합하여 희석 및 침적 계수를 예측

1.2. 주요 위험 이분법

시뮬레이션 데이터의 핵심 관찰 결과는 경과 시간에 따른 방사능 위험의 이분법, 즉 국부 위험(0~3 시간)과 분산 방사능구름 위험(3 시간 이상). 폭발 직후 단계(0~3 시간) 동안 최대 유효 선량은 물리적으로 대상 도시와 그 주변 환경에 국한됨. 그러나 이 초기 기간이 지나면 최대 유효 선량은 방사능구름이 확산되어 잠재적으로 1,000km 이상 떨어진 곳까지 도달. 이러한 결과는 재난 대응 활동이 폭발 현장에 정적으로 집중하는 것이 아니라 대기 궤적을 동적으로 추적해야 함을 시사.

1.3. 지속적 위험 핵심

특정 지리적 지역은 모든 측정 시간 간격에서 일관되고 높은 순위의 위험을 보이며, 이는 낙진 잔류 또는 지속적인 저 분산 경로를 촉진하는 기상 및 지형적 요인으로 인한 지속적인 취약성을 나타냄. 무자파라바드(파키스탄, 0-3 시간 1 위, 21-24 시간 3 위), 카불(아프가니스탄, 0-3 시간 4 위, 21-24 시간 2 위), 예레반(아르메니아, 0-3 시간 6 위, 21-24 시간 5 위), 테헤란(이란, 0-3 시간 5 위, 21-24 시간 9 위)을 포함한 중앙아시아 및 서아시아 대도시권은 위험 스펙트럼의 극단에 위치. 카자흐스탄의 알마티는 가장 높은 장기 위험 순위(21-24 시간 1 위)를 차지.

II. 방법론적 프레임워크: 유효선량 시뮬레이션의 특성 분석

K-Gamma 시뮬레이션은 확립된 국제 방사선 기준을 준수하며, 상세한 물리학 및 침단 대기 모델링을 기반으로 추정치를 제공.

2.1. 소스 항: 20 킬로톤 플루토늄 폭발 특성 분석

시뮬레이션은 매우 구체적이고 표준화된 소스 항, 즉 20 킬로톤 플루토늄 무기 폭발을 사용. 이 폭발력은 현대 중 폭발 핵탄두의 전형적인 파괴력과 확산력을 모델링하기 때문에 매우 중요.

방사능 모델링에는 227 개의 핵분열 생성물과 19 개의 방사화 생성물을 포함하는 246 개의 핵종을 포함. 227 개 핵분열성 핵종의 방사능 시간적 추이는 복잡한 붕괴 사슬에 대한 정립된 베이트먼 방정식을 사용하여 계산되며, 처음 240 분 동안은 1 분 간격으로, 이후 최대 24 시간까지는 1 시간 간격으로 방사능 결과를 제공. 이처럼 정밀한 시간적 분해능은 초기 단계의 피폭 위험에 크게 기여하는 휘발성이 높고 수명이 짧은 동위원소의 위험을 정확하게 특성화 하는 데 필수적.

2.2. 대기 이동 및 낙진 물리 모델링(HYSPLIT)

방사능구름의 확산 및 침강은 미국 국립해양대기청(NOAA) 대기자원연구소(ARL)의 HYSPLIT 모델을 사용하여 시뮬레이션. 이 플랫폼은 대기 중 방사능 희석 계수(입방 미터당 질량)와 지표면의 침적 계수(제곱 미터당 질량)를 계산하는 데 사용. GFS 0.25 도 지구 기상 데이터를 기반으로 하는 HYSPLIT 모델을 선택하면 장거리 이동을 좌우하는 복잡한 바람 패턴과 기상 시스템을 포착하여 대기 역학을 종합적으로 평가할 수 있음. 이 시뮬레이션은 정확한 입력 매개변수를 사용하여 방사능 방출 기하 구조를 정의. 방출 시간 5 분간 지표면(AGL 0m)에서 최대 AGL 8,000m 까지의 상당한 수직 범위를 설정. 이 상당한 수직 높이는 이 모델이 폭발 시 발생하는 거대하고 부력이 있는 구름의 특성을 시뮬레이션하고 있음을 확인시켜 줌. 이 구름은 상당한 양의 지상 물질을 동반하여 상당한 낙진을 생성. 도출된 유효 방사선량은 밀리시버트(mSv) 단위로 제공되며, 오염된 공기 흡입, 방사성 구름 침강, 그리고 방사성 낙진의 지표 침적으로 인한 외부 피폭 등 다양한 노출 경로를 포함하여 3 시간 간격으로 평가. 중요한 것은 방사선 피폭 선량은 IAEA-TECDOC-1162 에서 제시한 선량 환산 인자를 사용하여 평가.

2.3. 순위 척도 설명: 국지적 위험 vs. 원거리 위험

순위 시스템은 기상 패턴의 변화를 반영하도록 설계되었음. 각 도시의 최종 순위는 2024 년 12 월부터 2025 년 5 월까지의 6 번의 시뮬레이션에서 얻은 각 최대 유효 선량 값을 평균한 결과.

순위 결과를 해석하는 핵심은 최대 위험 위치의 시간적 변화를 이해하는 데 있음. 0~3 시간 동안 최대 유효 선량은 대부분 1 차 낙진으로 인해 폭발 위치 근처에서 발생하므로 **0~3 시간의 랭킹 순위는 해당 도시의 위험 순위를 나타냄**. 그러나 초기 3 시간이 지나면 방사능구름은 기상 조건에 따라 핵폭발 원점에서 점점 멀어져서 18~24 시간대에서는 최대 유효 선량이 1000

킬로미터 이상 떨어진 지역에 나타날 수 있음. 그러므로 3 시간 이후 순위는 핵폭발 도시 자체의 위험 순위가 아니라 시간대별 최대 유효 선량 평균값의 순위여서 지역을 특정할 수 없음. 따라서 시간이 지남에 따라 폭발 도시에서 점점 멀어지는 지역에서의 해당 시간대별 위험 순위로 인식해야 함. 이는 초기 순위와 몇시간 후 순위가 급격히 변동하는 이유를 설명.

위험의 이러한 시간적, 공간적 분리는 비상 대비가 정적인 위험 지도를 넘어서야 함을 시사. 동적으로 변화하는 최대 선량 환경은 지속적인 기상 예보와 방사능구름 추적이 필요. 표 1 은 시뮬레이션의 기본 기술 매개변수를 종합적으로 보여줌.

표 1: 핵폭발 시뮬레이션 매개변수 및 선량 측정 요약

매개변수	사양	유의성
무기 위력/유형	20 킬로 톤 플루토늄 무기	광역 오염 잠재력의 기준을 설정.
시뮬레이션 도시	64 개국 221 도시	글로벌 비교 위험 평가의 기초를 제공
시간 간격	8 개 주기 (0~3 시간~21~24 시간)	단기 수명 핵종 위험 대 장거리 수송 추적에 필수적.
선량 측정 단위	밀리시버트 (mSv)	IAEA 표준에 따른 유효 선량의 표준 척도.
대기 이동 모델	NOAA ARL HYSPLIT	대기 희석 계수 및 지표 침적 계수
순위 척도	최대 유효 선량의 평균 (6 회 시뮬레이션)	기상 변동성을 고려한 최대 위험 지역 식별

III. 극심한 순위 변동성 및 시간적 변화 분석

즉각적인(0~3 시간) 단계와 지연된(21~24 시간) 단계 사이의 도시 순위 변동성은 지구 대기 취약성에 대한 중요한 통찰력을 제공. 절대 순위 차이가 큰 지역은 신속한 방사능구름 제거로 이득을 보거나 대기 이동이 지연되어 예상치 못한 오염을 겪는 지역.

표 2: 주요 상승 순위 변화(21-24 시간 순위 0-3 시간 순위)

도시	나라	0-3h 순위	21h-24h 순위	순위 변화
샌프란시스코	미국	205	20	+185
부에노스아이레스	아르헨티나	170	16	+154
나고야	일본	151	23	+128
자카르타	자카르타	132	7	+125
볼고그라드	러시아	152	48	+104
신의주	북한	109	8	+101
로마	이탈리아	82	4	+78

캘거리	캐나다	126	45	+81
타이중	대만	84	11	+73

표 3: 주요 하강 순위 변동(빠른 제거)

도시	나라	0-3h 순위	21h-24h 순위	순위 변화
프라하	체코	10	160	-150
리버풀	영국	147	215	-68
함부르크	독일	129	200	-71
오키나와시	일본	145	205	-60
노보시비르스크	러시아	142	201	-59

IV. 상위 50 개 도시 순위

표 4: 20 킬로톤 핵폭발 시뮬레이션 결과: 특정 시간 간격 방사선 피폭 상위 50 개 도시 순위

Country	City	0-3h 순위	3-6h 순위	6-9h 순위	9-12h 순위	12-15h 순위	15-18h 순위	18-21h 순위	21-24h 순위
아프가니스탄	Kabul	4	3	19	71	45	11	2	2
아르메니아	Yerevan	6	8	14	9	9	6	6	5
아르헨티나	Buenos Aires	170	50	77	84	165	46	21	16
오스트리아	Vienna	57	54	59	69	49	36	61	53
아제르바이잔	Baku	72	48	23	54	94	145	102	60
방글라데시	Chittagong	107	30	92	144	150	101	71	74
브라질	Rio de Janeiro	48	25	17	15	18	31	67	66
브라질	São Paulo	130	17	1	1	19	38	105	79
불가리아	Sofia	54	39	5	8	70	10	10	15
캐나다	Calgary	126	95	27	19	17	28	30	45
칠레	Santiago	27	21	6	2	4	24	68	63
중국	Beijing	93	65	65	73	55	50	44	49
중국	Chengdu	22	40	39	46	50	30	12	12
중국	Chongqing	18	20	24	22	15	20	26	25
중국	Dongguan	101	89	88	91	72	45	48	64
중국	Shenzhen	41	59	51	49	46	55	38	55
중국	Shenyang	160	152	73	62	65	47	37	70
중국	Wuhan	97	116	154	96	79	62	47	37
중국	Xi'an	50	91	63	52	16	4	3	6

콜롬비아	Bogotá	20	7	8	7	20	32	24	40
콩고	Kinshasa	11	42	69	28	111	123	84	51
체코	Prague	10	56	52	115	107	157	172	160
영국	Sheffield	49	16	18	55	172	163	176	171
영국	Birmingham	99	96	60	42	120	105	128	115
영국	Leeds	64	33	54	95	139	148	144	125
프랑스	Marseille	25	31	35	100	119	158	145	138
프랑스	Nice	30	83	42	65	60	132	97	43
조지아	Tbilisi	12	19	74	13	57	52	46	21
독일	Munich	46	58	47	31	138	22	22	35
헝가리	Budapest	26	27	33	34	56	43	40	33
인도	Jaipur	43	43	140	169	151	85	54	57
인도	Indore	154	47	187	202	187	143	115	147
인도	Patna	56	38	115	158	160	128	110	88
인도	Pimpri-Chinchwad	15	28	138	200	185	96	62	73
인도	Pune	24	46	193	203	183	125	113	84
인도	Surat	175	64	102	159	113	67	53	59
인도	Thane	86	52	49	83	93	82	81	87
인도네시아	Jakarta	132	76	75	109	98	93	60	7
이란	Isfahan	14	26	40	85	166	87	57	36
이란	Mashhad	9	13	22	67	58	29	16	13
이란	Tehran	5	9	85	41	25	25	17	9
이라크	Baghdad	111	53	32	79	128	135	168	166
이스라엘	Haifa	166	145	162	152	186	136	35	71
이스라엘	Jerusalem	2	1	2	26	96	109	45	31
이탈리아	Milan	87	62	29	32	27	44	70	42
이탈리아	Rome	82	119	64	66	68	34	131	4
일본	Nagoya	151	156	135	119	34	19	18	23
일본	Osaka	47	138	116	75	110	121	111	140
요르단	Amman	23	15	9	72	158	134	36	39
카자흐스탄	Almaty	19	10	25	14	8	2	1	1
케냐	Nairobi	42	12	124	201	196	169	124	131
라오스	Vientiane	55	77	146	145	73	57	33	32
몽골	Ulaanbaatar	39	60	76	63	37	26	23	30
미얀마	Yangon	90	61	57	43	39	58	43	58

나이지리아	Lagos	186	121	111	68	29	49	96	121
북한	Chongjin	40	105	50	92	67	130	75	68
북한	Hamhung	13	36	36	23	13	13	13	46
북한	Hungnam	28	74	108	107	112	92	72	95
북한	Kaechon	33	125	86	58	28	18	14	19
북한	Sariwon-si	70	106	91	56	14	12	20	34
북한	Sinŭiju	109	98	38	16	12	8	5	8
북한	Sunchon	35	57	48	48	21	21	9	18
북한	Wonsan	37	114	191	124	84	51	25	28
노르웨이	Oslo	51	72	46	21	30	42	41	27
파키스탄	Battagram	3	6	26	89	35	15	8	10
파키스탄	Faisalabad	92	29	61	140	97	84	99	97
파키스탄	Karachi	138	22	31	27	2	17	34	65
파키스탄	Multan	79	41	94	103	59	65	80	82
파키스탄	Muzaffarabad	1	2	16	37	22	5	4	3
파키스탄	Peshawar	17	18	21	39	33	16	11	14
파키스탄	Quetta	16	14	104	187	162	75	49	24
파키스탄	Rawalpindi	21	44	45	81	63	27	19	22
페루	Lima	167	122	72	38	43	80	90	93
폴란드	Krakow	113	73	43	112	135	154	133	137
러시아	Samara	29	67	30	29	53	72	77	96
러시아	Volgograd	152	150	67	12	24	33	52	48
세르비아	Belgrade	103	68	34	33	75	94	79	77
루마니아	Bucharest	128	66	79	57	42	48	73	122
러시아	Krasnoyarsk	32	79	80	77	69	104	95	81
대한민국	Daejeon	65	143	53	47	38	64	55	69
대한민국	Incheon	131	126	56	44	31	39	28	26
대한민국	Seongnam-si	59	84	82	36	36	63	42	38
스페인	Barcelona	44	34	117	93	78	53	69	41
스페인	Madrid	61	37	15	11	26	37	27	56
시리아	Aleppo	38	11	11	53	47	40	29	17
시리아	Damascus	8	4	3	17	40	122	108	61
대만	Taichung	84	85	90	30	7	1	7	11
대만	Tainan	36	70	107	128	83	56	58	72
대만	Taipei	96	174	190	132	89	61	39	47

태국	Bangkok	100	100	160	118	61	41	32	29
튀르키예	Istanbul	76	45	20	25	77	66	51	44
베네수엘라	Caracas	7	5	4	5	10	76	142	157
베트남	Hanoi	75	146	132	122	103	54	64	50
미국	Austin	210	176	159	74	44	89	208	196
미국	Denver	144	75	28	20	32	77	160	185
미국	Los Angeles	45	24	12	4	3	3	15	52
미국	Oklahoma City	187	109	62	35	105	196	191	189
미국	Phoenix	31	51	13	10	5	9	31	94
미국	San Diego	58	32	7	3	1	7	88	109
미국	San Francisco	205	103	41	18	11	23	174	20
미국	San Jose	34	23	10	6	6	14	100	90
미국	Seattle	53	49	44	24	23	35	137	105

V. 지리적 세분화 및 지역 위험 프로파일

대륙별로 세분화된 분석은 특정 지역의 기상학적 취약성과 피폭 패턴을 보여줌.

5.1. 중앙아시아 및 남아시아: 낙진 잔류 및 초기 선량에 초점

이 지역은 초기(0-3h) 높은 순위와 지속적으로 높은 장기(21-24h) 순위를 특징으로 하는 가장 심각한 위험 프로파일을 보여줌. 파키스탄의 무자파라바드(1 위, 3 위)와 바타그람(3 위, 10 위), 그리고 아프가니스탄의 카불(4 위, 2 위)이 순위에서 가장 높은 순위를 차지.

인도에서는 이와 대조적으로 펄프리친치와드(15 위, 73 위)와 같은 도시들은 심각한 초기 지역 피폭을 경험하지만 24 시간 동안 순위가 크게 하락.

5.2. 서아시아: 근접성 및 복잡한 방사능구름 궤적

서아시아는 극심한 초기 위험과 매우 안정적인 장기 위험을 모두 나타냄. 예를 들어 예루살렘(0-3 시간 기준 2 위)은 재앙 수준의 즉각적인 위험에 직면해 있지만, 마지막 21-24 시간 위험 순위는 31 위로 떨어졌음. 이러한 급격한 개선은 테헤란(5. 9 위)과 예레반(6. 5 위)과 같은 대규모 내륙 허브에서 관찰되는 안정성과는 극명한 대조를 이룸. 이는 일부 서아시아 도시들이 지리적으로 즉각적인 초기 낙진에 노출될 수 있는 반면, 다른 도시들, 특히 이란 고원이나 코카서스 지역에 위치한 도시들은 지속적인 방사능구름 경로를 유발하는 대기 조건에 노출되어 있어 24 시간 내내 높은 위험 수준을 유지함을 시사.

5.3. 북미: 대서양 분산 및 태평양 취약성

시뮬레이션은 북미 대륙 간 심각한 방사능 격차를 보여줌. 동부 및 중부 지역(워싱턴, 뉴욕, 시카고, 토론토)은 효율적인 북대서양 분산 시스템에 의해 지속적으로 보호받고 있으며, 이로 인해 21~24 시간 지점에서 216 등급을 초과하는 등급이 발생.

그러나 서부 해안과 서부 내륙 지역은 지연된 방사능 위험에 매우 취약. 프란시스코(205, 20 순위)의 급격한 순위 변화를 보임. 마찬가지로 캐나다 캘거리(126 등급 45 등급)도 심각한 지연 위험을 나타냄. 이러한 패턴은 태평양 연안 주와 서부 캐나다에 대한 구체적이고 높은 경계 태세 프로토콜을 요구.

5.4. 유럽 지역: 분산 경로 및 집중 지역

유럽의 위험 프로파일은 효율적인 분산 경로와 위험한 집중 지역 대비로 정의되는 매우 단편화된 형태를 보임. 프라하(10, 160), 베를린(173, 204), 리버풀(147, 215)과 같은 중부 및 서부 유럽 도시들은 빠른 정화 및 분산을 보임. 이러한 빠른 완화는 이 지역들이 강력한 북부/서부 대기 흐름의 혜택을 받고 있음을 시사.

반대로, 남부 및 동부 유럽은 심각한 후기 단계 취약성을 보여줌. 로마(82, 4)와 불가리아 소피아(54, 15)는 급격한 상위 순위 변동을 보임. 이는 지중해 및 발칸 지역에서 복잡한 기상 상호작용이 발생함을 시사하는데, 이 지역은 집중 지역 역할을 하며, 최대 유효 선량 방사능구름을 발생원으로부터 수백 킬로미터 떨어진 곳에 가두거나 침적 시켜 지연된 방사선 위기를 초래.

5.5. 동아시아 및 동남아시아 동향: 연안 수송 및 내륙 잔류

동아시아와 동남아시아는 이중 위험 메커니즘을 나타냄. 시안(50, 6)과 청두(22, 12)와 같은 중국 내륙 도시들은 장기적으로 높은 순위를 유지하며, 중앙아시아에서 나타나는 대륙 잔류라는 주제를 강화.

이와는 대조적으로, 연안 및 해상 허브는 대기 수송으로 인한 극심한 지연 위험을 겪음. 인도네시아 자카르타(132, 7)와 대만 타이중(84, 11)은 순위가 크게 상승하여 24 시간 이내에 상위 순위 위험에 진입. 이는 몬순 또는 열대 순환 패턴을 잠재적으로 가진 지역 기상 시스템이 이러한 주요 도시 중심지에 농축된 선량을 축적하기 전에 해양 거리를 통해 최대 방사선 위험을 수송하는 데 매우 효율적임을 시사.

VI. 결론 및 전략적 권고

6.1. 시간 및 공간적 위험 결정인자 종합

K-감마 시뮬레이션은 20 킬로톤 폭발의 방사선학적 결과를 효과적으로 모델링하며, 유효 선량이 단순히 폭발 지점으로부터의 정적인 거리가 아니라 대기 이동에 의해 압도적으로

결정되는 동적 변수임을 확인. 이 데이터는 3 시간 후 발생하는 중요한 위험 변동을 경험적으로 정량화 하여 최대 위험 구역을 1,000km 이상 이동시킴.

이 분석은 강력한 대기 분산이 부족한 대륙 내부(예: 중앙아시아 및 서아시아)에서 심각하고 장기적인 위험이 지속되며, 지속적이고 장기적인 대피가 필요함을 확인. 동시에 주요 해안선(태평양, 남대서양, 지중해) 근처에서 관찰된 변동성은 초기 폭발 이후 대기 시스템이 방사능구름을 집중시키는 특정 기상 수렴 현상의 높은 위험 가능성을 보여줌.

6.2. 시간 단계적 비상 대비를 위한 권장 사항

정량적 순위 변화와 공간 분석을 기반으로, 비상 대비 프로토콜은 시간 단계적 모델 기반 접근 방식을 채택해야 함.

1. 즉각적인 지역 대응(0~3 시간 집중):

초기 순위가 높은 도시(무자파라바드, 예루살렘, 프라하)는 즉각적인 기반 시설 강화, 신속한 대피, 그리고 국지적 낙진으로 인한 사상자 안정화를 위한 프로토콜을 우선시해야 함. 자원은 정적 위험 평가를 기반으로 사전 배치되어야 함.

2. 지역 동적 대응(3~24 시간 집중): 국방 및 보건 기관은 첨단 기상 모델링(예: HYSPLIT)을 활용하여 실시간 방사능구름 추적 기능을 구축해야 함. 전문 제염팀과 첨단 방사선 모니터링 장비를 포함한 자원은 사고 발생 후 6~12 시간 이내에 예측된 장거리 방사능 위험 지역(예: 로마, 샌프란시스코, 자카르타, 부에노스아이레스)에 동적으로 배치되어야 하며, 최대 방사능 위험 지역의 도래를 예상해야 함

3. 정책 및 국제 협력 Policy and International Coordination: 국제 재난 구호 체계(예: IAEA, WHO)는 변동성이 높은 방사능 위험 지역을 대상으로 국경 간 자원 배분에 대한 공식 프로토콜을 수립해야 함. 이러한 대규모 순위 변동은 초기 저 위험 상태와 관계없이 지연된 원거리 위험 지역에 자원을 집중해야 하는 전략적 필요성을 정량적으로 보여줍니다. 시뮬레이션 결과는 이러한 중요한 바람 방향 아래의 취약성을 전 세계적으로 파악하는 데 필요한 기술적 기반을 제공