

## Public Evacuation Time Estimates within EPZ of Ulchin Site.

### 울진원전 방사선비상계획구역 내의 주민 소개시간 예측

Yang-Geun Chung, Gab-Bock Lee, Sun-Young Bang, Sung-Min Kim and Eun-Mi Lee

Korea Electric Power Research Institute, 103-16 Munji-dong, Yuseong-gu, Daejeon

[vgchung@kepri.re.kr](mailto:vgchung@kepri.re.kr)

정양근, 이갑복, 방선영, 김성민, 이은미

한국전력공사 전력연구원, 대전시 유성구 문지동 103-16

(Received July 25, 2005 / Approved September 29, 2005)

#### Abstract

The strong protection method of radiation emergency preparedness is the evacuation when a great deal of radionuclide material is released to environment. Required factors for evacuation time estimate of Ulchin nuclear power plant site were investigated. The traffic capacity and the traffic volume by season were investigated for the traffic analysis and simulation within EPZ of Ulchin site. As a result, the background traffic volume by season were established. The NETSIM code was applied to simulate for 12 scenarios in the event of normal traffic/summer peak traffic/winter peak traffic, daytime/night, and normal weather/adverse weather conditions. The results showed that the evacuation time required for total vehicles to move out from EPZ took generally 210 ~ 315 minutes. The evacuation time took longer about 45 minutes at night than in the daytime, and 45 minutes in adverse weather than normal condition.

---

**Key Words** : Public Evacuation, Nuclear Emergency, Emergency Preparedness, Traffic Analysis, NETSIM

#### 요 약

원자력발전소 사고시 방사성물질이 발전소의 지역으로 유출될 경우 주민을 안전하게 보호하기 위한 조치의 일환으로 주민소개가 고려된다. 소개시간 산정에 필요한 인자를 도출하고, 각각의 인자에 대해 원전 주변의 현장자료를 토대로 부지주변의 교통환경 여건을 반영하여 울진원전의 방사선비상계획구역 내의 주민전체를 소개시키는데 소요되는 시간을 예측하였다. 평상교통, 여름철 첨두교통, 그리고 겨울철 첨두교통에 대해 각각 주간 및 야간, 평상기상 및 악기상의 경

우로 나누어 12가지의 주민소개 시나리오를 설정하였다. 비상계획구역 경계 남단과 북단에서 모든 소개차량(인구)이 비상계획구역을 벗어나는 데 걸리는 시간은 전체적으로는 210 ~ 315분 정도로 예측되었다. 소개시간은 밤이 낮보다 약 45분 정도 더 소요되는 것으로 예측되었다.

**중심단어** : 주민소개, 방사선 비상, 비상대책, 교통분석, NETSIM

## I. 서 론

원자력발전소 사고시 방사성물질이 발전소의 지역으로 유출되어, 주민이 일정기준 이상의 방사선 피폭이 예상될 경우, 주민을 안전하게 보호하기 위한 조치의 일환으로 주민소개가 하나의 방법으로 고려된다. 주민소개는 방사능 구름이 해당지역에 도달되기 전 또는 후에 피해를 최소화하기 위해 가능한 한 신속히 수행되어야 하므로, 주민소개에 소요되는 예상시간을 보다 정확하고 신속하게 예측하는 것은 적절한 주민보호조치의 결정을 위해 필요한 매우 중요한 요소이다.

미국의 TMI 원전사고나 소련의 체르노빌 원전사고 이후로 미국, 일본 등 선진국에서는 비상대응기술의 하나로 주민소개시간 산정에 대한 연구를 지속적으로 수행하여 왔다. 우리나라도 각 원전 사업소에서 1983년, "민방위기본법 기본계획 : 방사능 재난대책 계획"이 수립된 이후 지난 20 여년 동안 방사선비상계획을 수립하고, 주기적으로 자체 및 합동훈련을 실시하여 초기 비상대응조치에 상당한 능력을 확보하여 왔다. 그러나 보다 실효적인 주민보호조치를 위해 정밀한 교통흐름 분석을 수행하여 주민소개시간을 예측하는 기술을 향상시킬 필요성이 증대되고 있다.

미국 NRC에서는 NUREG-0654-FEAM-Rev.1 App.4(이하 NUREG-0654)를 통해 원자력발전소 사고시 주민소개시간 평가를 비상계획의 기반기술로서 요건화하였으며[1], 국내에서도 과학기술부에서 원자력사업자가 비상계획구역 내의 상주 거주 주민과 일시 거주 주민에 대한 적절한 보호조치(대피 및 소개 등)에 소요되는 시간을 산정토록 요구하고 있다.

미국에서도 1979년 이전에는 주민소개를 위한 교통분석 기술개발은 거의 이루어지지 않았다. 그러나

Three Mile Island 원전사고 이후에 주민소개에 대한 체계적인 연구의 필요성이 증대되었다. 1970년대 말에 미국 NRC의 후원으로 Urbanik 등에 의해 주민소개시간 예측기술에 대해 종합적인 검토가 이루어졌다[2]. 그 이후에 다소 활발한 연구가 진행되었다. Stephen W. Tweedie 등이 Sheffi, Mahmassani, and Powell이 1981년에 개발한 NETVACI 모델과 N.P. Moeller, T. Urbanick, and A.E. Derosiers가 1982년 개발한 CLEAR 모델을 이용하여 Black Fox Station(BFS)의 비상시 주민소개시간을 계산하였다[3]. M. Pidd 등은 비상소개 시뮬레이션 모델을 개발하면서 지리정보시스템(GIS)을 모델에 접목하였으며[4], Oak Ridge National Lab.(ORNL)에서 OREMS를 개발하여 다양한 이벤트나 시나리오에 적용하였다[5]. 최근에는 Thomas Urbanik II이 원자력발전소의 비상소개시간 산정 절차를 체계적으로 정리하였으며, 특히 통행발생시간(Trip Generation Time)을 여러 행동단계로 구분하여 산출하는 방식을 제시하였다[6].

미국에서 원자력 분야의 소개시간 산정을 위해 사용해진 전산코드는 MASSVAC, NETVACI, DYMOD, I-DYNEV 등이 있으나 이중 대표적인 컴퓨터 코드는 1980년대에 개발된 I-DYNEV이다[7]. I-DYNEV 코드는 교통흐름이 개별적인 차량으로 표시되어 교차로나 혼잡 도로에서의 교통현상을 파악하기는 용이하나 교통량 투입시 교통상황이 일정하다고 가정하기 때문에 출·퇴근시의 러시아워처럼 교통상황이 시간에 따라 달라지는 상황을 현실적으로 반영하기가 곤란하다.

또 하나의 일반적인 코드가 FHWA(Federal Highway Administration)에서 개발한 CORSIM이다[8]. CORSIM 코드에서는 교차로에서의 병목현상으

로 인한 지체시간 및 비상계획구역을 벗어나는 시간 대별 차량수를 계산하여 전체적인 소개시간을 산정하게 된다. 이러한 출력결과를 얻기 위해 도로의 기하학적 구조(차로, 교차로 등), 도로상태, 지역·시간별 소개차량 분포 등이 필요하다. CORSIM에서는 교통흐름 모형으로 미시적 교통통제시스템인 NETSIM 코드를 채택하고 있다. NETSIM 코드는 도시내의 교통을 정밀하게 모사하는 것이 특징으로 차량추종이론에 의해 각각 차량의 이동상황을 매초 간격으로 계산하여 도로 네트워크상의 교통흐름을 분석하는 모델이다.

일본의 대표적인 주민소개 평가 컴퓨터 코드는 JNCDI(Japan Nuclear Cycle Development Institute)에서 개발한 “소개계획검토시뮬레이터”가 있으나, 소개 계산 모듈은 NETSIM 코드를 채용하고 있다.

국내에서는 전인영·이재기가 울진원전을 대상으로 한 소개시간 예측에서 주민행동특성에 대한 설문 조사와 교통흐름 분석을 수행하여 주민소개시간을 예측한 사례가 있다[9]. 그러나 이 연구는 제한된 범위의 교통환경 분석을 수행하여 소개시간을 산정한 한계가 있다.

최근에 과학기술부에서 울진원전을 대상으로 교통량 현장조사를 수행하고, 이를 토대로 교통흐름을 분석하여 주민소개시간을 산정하는 연구를 수행하였다[10]. 본 논문은 상기의 연구에서 수행한 결과를 토대로 작성되었는데, 소개시간 산정에 필요한 인자를 도출하고 각각의 인자에 대해 원전 주변의 현장자료를 토대로 부지주변의 환경여건을 반영하여 울진원전의 방사선비상계획구역 내의 주민전체를 소개시키는 데 소요되는 시간을 예측하였다. 교통흐름은 미국 FHWA와 일본 JNCDI에서 채택하고 있는 NETSIM 코드를 이용하여 분석하였다.

## II. 주민소개시간 산정방법 및 입력자료

### 가. 교통흐름 분석도구

일반적으로 도시·도로설계, 시설물의 교통영향평가가 교통흐름을 분석하는 도구로 미국 플로리다 대학에서 개발한 TSIS(Traffic Software Integrated

System) 컴퓨터 프로그램 패키지를 많이 사용한다. TSIS는 교통관련 분석프로그램의 통합 개념으로 개발된 것으로, 사용자 인터페이스, 파일 인터페이스, 교통최적화 및 시뮬레이션 도구가 포함되어 있다.

TSIS은 미국 도로교통국(FHWA)의 미시적인 교통시뮬레이션 모형인 CORSIM이 그 핵심을 이루고 있다. CORSIM은 고속도로나 고속화도로에 적용되는 FREESIM 모형과 간선가로망의 시뮬레이션에 널리 이용되고 있는 NETSIM 모형이 통합된 모형이다. CORSIM은 도시내 가로망상에서 경험하게 되는 대부분의 교통상황을 상당히 섬세한 수준까지 재현해 준다. 즉 신호제어 측면에서는 정주기, multi-dial 및 감응제어까지, 그리고 교통운영적인 측면으로는 버스운영, 장애물, 주차, spillback, 좌회전 pocket 넘침 등을 모의실험할 수 있다.

분석되는 효과적도로는 속도, 교통량, 밀도, 지체, spillback, 대기행렬, 회전교통량 등 다양한 결과를 제공해줄 뿐만 아니라 사용자가 정의한 시간간격(time interval)에 대한 가로망 전체, 링크그룹 혹은 가로망내의 단일 링크에 대한 연료소모 및 공기오염도까지 예측해 준다. 또한 사용자 측면에서 사용자 지정인자(user defined factor)들을 많이 제공함으로써 상황에 따라 모형을 조정(calibration)하기에 용이하게 설계되어 있다.

울진원전 주변지역은 국도 7호선을 중심으로 한 간선도로망으로 이루어져 있으므로 CORSIM 모형안의 NETSIM 코드를 이용하여 교통흐름을 분석하였다. NETSIM 코드의 주요 입력자료는 도로의 기하구조(차로수, 회전 포켓, 감지기의 위치 등), 링크의 형태(간선가로망이나 고속화도로), 교통량, 교차로 회전 교통량, 교통 통제 형태 등으로 구성된다[8].

### 나. 교통량 조사 및 교통환경 분석

NETSIM을 이용하여 울진원전 주변지역의 교통흐름을 분석하기 위해 제반 교통현황여건 및 계절별·요일별 교통량 조사를 실시하였다. 2003년 8월, 2003년 11월 그리고 2004년 2월 3차에 걸친 현장조사를 실시하였으며, 그 결과를 이용하여 배경교통량 설정을 위한 교통 서비스수준을 분석하였다. 교통량은 4

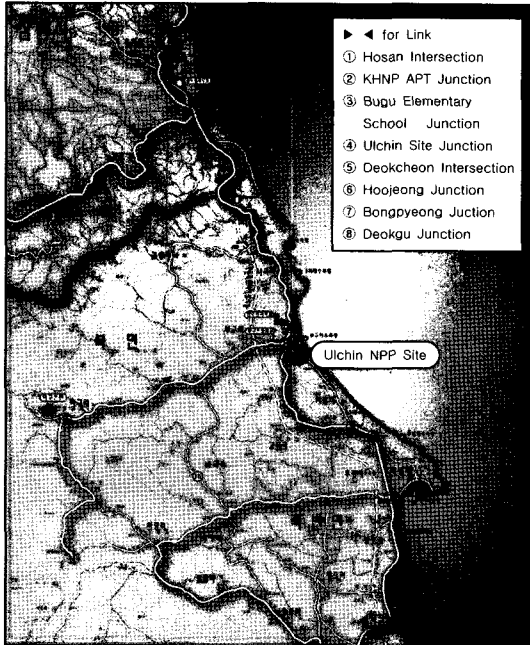


Fig. 1 Map of Investigation Area for Traffic Volume and Transportation Environment.

개 지점의 가로구간과 10개 지점의 교차로에서 평일과 공휴일로 구분하여 07시부터 19시까지 약 12시간 동안 조사원을 통해 조사하였다(〈그림 1〉 참조).

주민소개시간 산정을 위해 교통흐름을 시뮬레이션할 때 입력되는 도로자유속도를 결정하기 위해 가로구간 및 교차로에서의 서비스수준을 분석하였다. 울진원전 방사선비상계획구역 내의 주요 소개 도로의 가로는 2차로도로이며 도로유형은 설계속도 80km/h 미만의 연속 교통류 도로(유형 II)에 해당되어, 건설교통부의 도로용량편람[11]에서 제시한 '2차로도로 구간의 서비스수준 분석방법'을 이용하였다.

2차로도로는 중앙선을 기준으로 각 방향별로 한 차로씩 차량이 운행되는 도로를 말한다. 그러므로 2차로도로에서는 고속 차량이 저속 차량에 의해 통행이 지연되는 경우, 대향 차로를 이용할 수 있는 시간과 대향 차량과의 간격이 확보되어야만 추월을 할 수 있으므로, 단순히 옆 차로를 이용해서 추월할 수 있는 다차로 도로보다 교통량 처리 능력이 상당히 떨어진다.

서비스수준을 판별하는 기준을 효과적도라 하며, 2차로도로를 운행하는 운전자에게 제공할 수 있는

서비스수준을 나타내는 지표로 총지체율을 사용한 다. 2차로도로에서는 차량들이 도로를 운행하는 동안 저속 차량으로 인하여 차량군이 형성되며, 차량군 내의 차량들은 운행이 자유롭지 못하여 지체하게 된다. 총지체율이란 일정구간을 주행하는 차량군 내에서 차량이 평균적으로 지체하는 비율을 말한다. 다시 말해서 총지체율이란 운전자가 희망하는 속도에 대한 지체정도를 표현하는 척도이다. 교통량이 적을 때에는 차량들은 거의 지체되지 않으며, 평균 차량간격도 커지므로 추월 가능성이 높아진다. 교통량이 적은 조건에서 총지체율은 낮지만, 용량에 가까워질수록 추월기회가 줄어들어 거의 모든 차량들이 차량군을 형성하게 되고 총지체율은 높아진다. 총지체율은 다음과 같이 구해진다.

$$TDR = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{TT_{ai} - TT_d}{TT_{ai}} \right)}{n}$$

여기서, TDR = 총지체율(%)

$TT_{ai}$  = 실제 통행시간

$TT_d$  = 희망 통행시간

$n$  = 교통량(대)

희망통행시간은 분석 대상구간을 희망통행속도로 주행한 시간을 말하며, 희망통행속도란 자유교통류 상태에서 주행하는 차량들의 85백분위 속도를 의미한다. 도로를 운행하는 차량의 운행상태를 나타내는 서비스수준은 총지체율에 따라 A ~ F까지 모두 여섯 단계로 구분된다[11].

본 연구에서 수행한 계절별 침투교통 시간대의 가로구간 2차로도로의 서비스수준 분석결과는 〈표 1〉과 같다. 대부분의 가로구간이 서비스수준 A ~ C로 총지체율이 30% 이내인 양호한 소통상태를 보이는 것으로 판정되었다. 원덕읍 ↔ 부구리 구간은 경사가 있는 구릉지 및 산지부의 특성을 가지고 있고 오르막 차로의 설치구간이 짧아 중차량 등에 의한 속도지체가 나타나는 것으로 분석되었다.

교차로에서의 교통 서비스수준은 신호등이 있는 교차로와 신호등이 없는 교차로로 구분하여 분석하였다. 10개 지점의 교차로 중 호산교차로만 신호교차

Table 1. Analysis Results of Traffic Service Level for Road within EPZ of Ulchin Site.

Road		Traffic Volume (vehicle/hour)	TDR(%)	Service Level	
Normal	National Highway 7	Wondeokup ↔ Buguri	420	13.39	B
		Buguri ↔ Bongpyeongri	983	24.05	C
	Local Road 917	Buguri ↔ Deokguri	468	10.76	B
Summer sunday	National Highway 7	Wondeokup ↔ Buguri	511	17.71	B
		Buguri ↔ Bongpyeongri	739	18.59	B
	Local Road 917	Buguri ↔ Deokguri	391	8.99	A
Fall Saturday	National Highway 7	Wondeokup ↔ Buguri	774	25.87	C
		Buguri ↔ Bongpyeongri	1083	26.5	C
	Local Road 917	Buguri ↔ Deokguri	517	11.89	B
Winter Sunday	National Highway 7	Wondeokup ↔ Buguri	367	11.12	B
		Buguri ↔ Bongpyeongri	711	15.4	B
		Buguri ↔ Deokguri	349	8.51	A

로이고, 나머지 지점은 비신호교차로이다. 신호교차로의 각 차로군의 차량당 제어지체가 결정되면, 각 차로군별 서비스수준을 결정하고, 각 접근로의 제어지체를 교통량으로 가중평균하여 교차로의 평균제어지체를 구하고 최종 교차로 서비스수준을 결정한다 [11]. 비신호교차로는 무통제 교차로, 양방향정지 교차로, 전방향정지 교차로, 로터리식 교차로 등의 유형으로 나누어 서비스수준 분석하는데, 본 연구에서는 양방향정지 교차로와 무통제 교차로 분석방법을 적용하였다[12].

교차로의 서비스수준 분석결과(〈표 2〉 참조), 평일의 경우 울진원자력발전소 직원들의 퇴근시간대가 첨두시간대인 관계로 원자력발전소 앞 삼거리에 많은 상충교통류가 발생되었으며, 또한 비신호교차로로 운영되어 첨두시 상충교통류에 따른 제어지체가 더욱 많아지는 것으로 분석되었다. 또한 여름철 일요일의 첨두시간대에는 국도 7호선과 덕구온천 방면의 접근로인 지방도 917호선이 만나는 지점인 부구초교 앞 삼거리에서 많은 지체가 발생하는 것으로 분석되었다. 그 밖의 교차로는 서비스수준 A ~ C로 양호한 것으로 분석되었다.

가로 및 교차로 서비스수준 분석결과 대부분 양호한 등급으로 나타나 주민소개시간 산정시 자유도로 속도를 2차로 구간의 교통 제한속도와 비슷한

30mile/hour로 설정하였다.

첨두시를 기준으로 계절별 차종별 구성비는 계절별로 거의 유사한 양상을 보이고 있는데, 승용차가 약 70%, 화물차가 약 20% 그리고 기타 차종이 약 10% 정도를 보이고 있다. 또한 교통흐름 분석시 교차로에서 각 방향별 차량회전량도 매우 중요한 요소의 하나이다. 즉, 직진, 우회전, 좌회전 차량의 비율에 따라 교통흐름이 다르게 나타난다. 교차로별로 교차로 진입 방향에 따른 차량회전량을 조사하였다. 울진원전 인근의 부구삼거리에서의 차량회전 패턴은 7번 국도를 중심으로 차량이 이동하는 하는 것을 보여주고 있다. 즉, 남·북쪽으로부터 교차로에 진입한 차량은 대부분 7번 국도를 타고 직진하고, 덕구온천 방향에서 교차로로 진입하는 차량은 삼척 방향으로 좌회전하는 차량이 가장 많은 것으로 조사되었다.

#### 다. 주민소개 시나리오 설정

주민 소개시간 산정을 위한 소개대상 지역 그룹을 다음과 같이 설정하였다.

- I 그룹 : 원전 반경 2km 내 주민
- II 그룹 : 원전 반경 2 ~ 5km 내 주민
- III 그룹 : 원전 반경 5 ~ 8km 내 주민
- IV 그룹 : 비상계획구역 내 관광지의 일시 거주자 교통흐름 분석을 위한 도로망을 링크와 노드를

**Table 2. Analysis Results of Traffic Service Level for Intersection within EPZ of Ulchin Site.**

Item	Name of Intersection	Traffic Volume (vehicle/hour)	Average Controlled Delay (second/vehicle)	Level of Service
Normal Weekday (17~18hour)	① Hosan Intersection	594	27.9	B
	② KHNP APT Junction	1,061	9.8	A
	③ Bugu Elementary School Junction	1,686	22.2	C
	④ Uchin Site Junction	1,074	53.1	F
	⑤ Deokcheon Intersection	1,132	17.4	C
	⑥ Hoojeong Junction	1,166	16.2	C
	⑦ Bongpyeong Junction	1,212	20.7	C
	⑧ Deokgu Junction	259	8.5	A
Summer Sunday (16~17hour)	① Hosan Intersection	913	28.2	B
	② KHNP APT Junction	1,440	13.3	B
	③ Bugu Elementary School Junction	1,466	35.2	E
	④ Uchin Site Junction	1,155	12.5	B
	⑤ Deokcheon Intersection	1,199	16.3	C
	⑥ Hoojeong Junction	1,157	18.7	C
	⑦ Bongpyeong Junction	1,223	22.8	C
	⑧ Deokgu Junction	308	9.0	A
Fall Saturday (16~17hour)	① Hosan Intersection	616	26.1	B
	② KHNP APT Junction	778	9.1	A
	③ Bugu Elementary School Junction	1,152	13.5	B
	④ Uchin Site Junction	797	10.1	B
	⑤ Deokcheon Intersection	813	11.6	B
	⑥ Hoojeong Junction	641	10.7	B
	⑦ Bongpyeong Junction	788	12.1	B
	⑧ Deokgu Junction	174	8.4	A
Winter Sunday (17~18hour)	① Hosan Intersection	454	26.1	B
	② KHNP APT Junction	754	9.98	A
	③ Bugu Elementary School Junction	907	11.4	B
	④ Uchin Site Junction	712	9.5	A
	⑤ Deokcheon Intersection	844	38.8	C
	⑥ Hoojeong Junction	378	9.1	A
	⑦ Bongpyeong Junction	449	9.9	A
	⑧ Deokgu Junction	155	8.3	A

이용하여 네트워크를 구성하였다. 노드(Node)는 도로망의 주요 교차로, 도로지형이 변하는 지점, 차량 출입지점 등을 나타내며, 링크(Link)는 차량이 이동하는 도로의 일방향 구간, 즉, 노드와 노드사이를 말한다.

소개차량들의 소개경로도 중요한 요소이다. 원전 기준 북쪽은 삼척방향, 남쪽은 울진 방향으로 소개하는 것을 원칙으로 하며, 집결지에서 가까운 도로를 통해 7번국도로 유입되는 것으로 가정하였다. 차량이 통제되는 시점부터 소개차량은 교차로에서의 주

어진 차량회전율에 의해 지정된 소개경로를 따라 이동된다. 교차로에서의 차량 통행방법은 우선통행순위를 직진, 좌회전, 우회전 순으로 정했으며 우선순위 차량이 포화일 경우에 차순위 차량은 정체를 하는 것으로 가정하였다. 이는 직진차량의 정체는 바로 원전 부근에서 차량의 정체를 유발하기 때문에 이를 방지하기 위함이다. 덕구온천 방향에서 유입되는 차량은 삼척방향과 울진방향으로 적절히 분배하였다. 덕구온천에서 울진 방향으로 소개되는 차량은 7번 국도에 진입할 때 차량통행우선순위가 가장 낮은 우회전을 하게 되므로 과도한 정체가 유발될 수 있다. 따라서 차량정체를 완화하기 위해 사전에 교차로별로 차량 회전율을 최적화하였다.

통행발생시간은 비상계획구역 내 거주하고 있는 인원들이 방사전비상 사고를 통보받는데 소요되는 시간과 개인 및 가족단위 구성원이 소개준비를 마치고 도로에 차량을 유입하기까지 걸리는 시간 등으로 구성된다.

통행발생시간 분포는 언제(주간/야간, 평일/휴일 등) 사고가 발생되어 통보되느냐에 따라 다르다. 야간이나 공휴일의 경우에는 가족구성원이 대부분 같이 있기 때문에 소개준비시간은 작게 소요될 수 있는 반면, 취침 등과 같은 사유로 준비 시간이 지연되는 경우도 발생한다. 평일 낮에 사고가 발생할 경우에는 영구거주자라 할지라도 가족구성원의 분산이 대

우 심하므로 소개 대상주민의 성향에 따라 준비 시간이 매우 다르게 나타난다. 울진원전 주변 주민을 대상으로 한 기존의 설문조사에서 차량을 보유하고 있는 가구의 경우 대피를 위해 대중교통을 이용하겠다는 가구가 전체의 1%에 불과했다는 조사결과[9]와 같이 주민의 성향이 가급적 가족구성원이 함께 이동하고자하는 경향이 강할 경우에는 소개준비시간이 장시간 소요될 것으로 판단된다.

현재 통보행위나 소개준비 행위에 걸리는 통행 발생시간을 산출하는 방법으로는 경험적으로 알려지거나 관측된 확률분포를 이용하여 전문가들의 기술적 판단에 따라 평균과 최대 시간을 적절히 가정하여 산출하는 방법과 비상계획구역에 거주하는 주민들로부터 직접 조사하는 방법이 이용될 수 있다.

미국원전의 사례를 몇 가지 살펴보면, Davis Besse Nuclear Power Station의 경우 사고발생 전부터 소개를 위해 집에서 나서기까지의 단계를 설정한 다음 각각의 단계마다 이루어질 행위들에 소요되는 시간을 해당지역 주민들에게 직접 전화조사를 실시하여 작성하였으며[13], Nine Mile Point and James A. FitzPatrick 발전소는 임의의 확률분포함수를 이용하여 최대, 최소값을 적절히 가정하여 적용하였다 [14]. 본 연구에서는 미국 원전의 사례와 울진 비상계획서, 선행 연구결과 및 미국 NUREG-0654의 예제를 참조하여 <표 3>과 같이 통행발생시간을 설정

Table 3. Trip Generation Time Distribution for Public Evacuation Time Estimation within EPZ of Ulchin Site(unit : minute)

Item	This Study		Reference[9]	NUREG-0654
Evacuation Inform Time	Group 1	No delay	No delay	- 0 ~ 45
	Group 2	30 ~ 60	30 ~ 70	
	Group 3	30 ~ 60	30 ~ 70	
	Group 4	30 ~ 60	30 ~ 70	
Evacuation Preparation Time	Group 1	- daytime:15~180 - night:15~180	- daytime:20~240 - night:20~180	- return home of worker: 30~120 - preparation · vehicle owner: 45~180 · public transportation · students etc.
	Group 2	- daytime:45~180 - night:45~180	- daytime:90~270 - night:60~180	
	Group 3	- daytime:45~180 - night:45~180	- daytime:90~270 - night:60~180	
	Group 4	- daytime:30~135 - night:30~35	- daytime:60~135 - night:60~135	

하였다.

비상계획구역으로의 차량유입 통제 및 교차로에서의 교통회전을 변경은 통제요원이 비상계획구역 내의 주요 교차로와 남·북단에 배치되고 교통통제가 적절히 이루어지는 시점을 고려하여, 그룹 1 지역은 소개결정 후 45분부터, 기타지역은 소개결정 후 1시간부터 이루어지는 것으로 가정하였다. 또한 일단 비상계획구역 내로 진입한 차량은 교통혼잡을 피하기 위해 U-turn하지 않는 것으로 가정하였다. 이는 울진원전 주변의 주요 도로망인 7번 국도와 지방도로가 대부분 왕복 2차로로, 차량의 U-turn을 위한 공간이 협소하여 일시에 여러 차량이 U-turn을 시도할 경우, 통제 불능의 차량 정체현상을 유발할 수 있기 때문이다.

울진원전 주변지역의 계절별·요일별 교통량 조사 결과를 토대로 교통량이 비슷한 봄·가을철의 정상교통과 해수욕장을 이용하려는 관광객들과 온천을 이용하려는 관광객들로 인해 일시체류자의 유입이 급증하는 여름철과 겨울철 침투교통의 경우를 대상으로 미국 NUREG-0654에서 제시하는 조건을 고려하여 <표 4>와 같이 시나리오를 설정하였다.

내부 배경교통 유입율은 비상계획구역 내에서 정상시 도로에 유입되는 시간당 차량수로 도로네트워크상의 각 노드에서 동일하게 유입된다고 가정하였다. 내부 배경교통 유입율은 야간에는 주간 50%로 설정하였고, 관광철 등에는 약간 증가하는 것으로 가정하였다.

강우, 강설, 도로표면의 결빙, 안개 등 기상상황의

악화는 소개 차량의 속도에 매우 큰 영향을 줄 수 있다[15~18]. 연구결과를 보면, 강우와 약한 강설현상이 있을 경우 주행속도를 10% 정도 감소시키며, 도로의 교통용량을 10 ~ 20% 감소시키는 것으로 나타난다. 강한 강설현상은 약 30% 정도의 교통용량 감소를 가져온다. 그러나 이러한 연구결과들은 고속도로, 평지 등과 같이 도로상태가 다소 양호한 상태에서 이루어진 것으로 울진원전과 같이 구릉지를 포함하는 왕복 2차선 도로에 직접 적용하는 것은 다소 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 보수적 관점에서 악기상에 대한 도로 자유속도를 도로교통법시행규칙상의 차량속도 규정에 의거 평상시 속도의 50%로 설정하였다.

**라. 소개 대상 차량수 및 도로유입량**

소개는 EPZ내 전체주민을 대상으로 하였다. 원전별 방사능 비상계획서에는 풍하방향별로 일정 지역의 주민을 소개하는 것으로 설정되어 있는 경우도 있으나, 본 연구에서는 다소 보수적인 결과를 가져올 가능성이 있으나 풍하방향과 다른 방향 주민들의 사회심리적인 영향 등을 고려하여 전체 주민을 대상으로 하였다. 소개차량수는 다음과 같이 산정하였다. 총인구를 총차량으로 나누어 5이하일 경우 총차량을 소개차량으로 산정하며, 5를 초과할 경우 부족한 차량수 만큼 소개 시작 1시간부터 대중교통차량을 추가 투입하는 것으로 가정하였다. 또한 거주인에 대한 소개차량은 주/야간 동일하며, 일시 거주자(관광객)에 대한 소개차량 및 배경교통량은 야간에는 주간

**Table 4. Scenarios for Public Evacuation Time Estimation within EPZ of Ulchin Site.**

Item	normal traffic				summer peak traffic				winter peak traffic				
	daytime		night		daytime		night		daytime		night		
	normal weather ①	adverse weather ②	normal weather ③	adverse weather ④	normal weather ⑤	adverse weather ⑥	normal weather ⑦	adverse weather ⑧	normal weather ⑨	adverse weather ⑩	normal weather ⑪	adverse weather ⑫	
free velocity on road(mile/hour)	30	15	25	12	30	15	25	12	30	15	25	12	
internal background traffic(vehicle/hour)	60	60	30	30	80	80	40	40	80	80	40	40	
entering traffic volume at boundary (vehicle/hour)	north end	385	385	193	193	450	450	225	225	688	688	344	344
	south end	531	531	266	266	650	650	325	325	202	202	101	101



절반으로 가정하였다.

소개차량 도로유입량은 통행발생시간을 5등분하여 총 누적소개차량을 S자 curve 형태의 확률분포곡선을 이용하여 배분하였으며, 동일 등분내에서는 균등하게 유입되는 것으로 가정하였다. 소개차량 도로유입량은 <표 5> ~ <표 6>과 같다. <표 5>의 상주 거주인의 소개 대상차량 산정을 위한 집결지는 2004년 3월 현재 울진원전 방사선 비상계획서를 참조하였다. <표 6>의 일시 거주인의 소개 대상차량을 위한 집결지는 해수욕장, 관광지 등 사람이 많이 모이는 곳을 선정하였다.

평상적인 관광객 유입의 경우에는 차량유입 통계 자료를 구할 수 없어 소개 대상차량은 대상인원수를 1대당 차량탑승인원을 4명으로 가정하여 산정하였고, 여름철 최대 관광객 유입의 경우에는 해당 군청의 관광객수 및 관광객 차량 현황에 대한 통계자료를 이용하여 구하였으나 1대당 차량 탑승인원이 5를 초과하는 지점은 소개 대상차량을 1대당 차량 탑승인원을 5명으로 가정하여 재산정하였다. 겨울철 최대 관광객은 평상적 관광객 자료를 이용하였으나, 덕구온천과 원자력전시관 및 발전소 직원의 유입대수는 여름철 최대 관광객 유입시의 자료를 이용하였다.

**Table 5. Vehicles to be Evacuated for Settled Population within EPZ of Ulchin Site(unit: person, vehicle)**

Assembly Place	Group	Population to be Evacuated	Total Vehicles to be Evacuated	Traffic Volumes to be Evacuated by Time Step(minute)													
				15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180		
Wolcheon 1ri Hall	Ⅲ	45	17	0	0	1	1	1	2	3	3	2	2	1	1		
Wolcheon 3ri Hall	Ⅲ	98	31	0	0	2	2	2	3	6	6	3	3	2	2		
Wolcheon 2ri Hall	Ⅲ	36	13	0	0	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1		
Keumseongri Hall	Ⅲ	140	30	0	0	2	2	2	3	6	6	3	2	2	2		
Sinseon Gas Station	Ⅱ	480	113	0	0	6	6	11	12	23	22	11	11	6	5		
KHNP Employee's APT	Ⅱ	2,318	721	0	0	36	37	72	73	144	144	72	71	37	35		
Bugu El. Sch.	Ⅰ	2,117	554	26	29	55	85	109	85	57	40	28	23	11	6		
Bugu Middle Sch.	Ⅱ	1,488	336	0	0	17	17	34	34	67	67	34	33	17	16		
Joojin Elem. Sch.	Ⅱ	293	53	0	0	3	3	5	5	11	11	5	4	3	3		
Deokgu 1ri Hall	Ⅲ	173	32	0	0	2	2	3	3	6	6	3	3	2	2		
Deokgu 2ri Hall	Ⅲ	41	10	0	0	0	1	1	1	2	2	1	1	1	0		
Sinhwari Hall	Ⅰ	234	51	1	3	5	8	10	8	5	4	3	2	1	1		
Dami Corporation	Ⅱ	75	17	0	0	1	1	2	2	3	3	2	2	1	0		
Deokcheon Junction	Ⅱ	283	57	0	0	3	3	6	6	11	11	6	5	3	3		
Jukbyeon High Sch.	Ⅱ	6,702	1,636	0	0	81	83	163	166	326	327	165	162	84	79		
Hwasung El. Sch.	Ⅱ	1,240	243	0	0	12	12	24	25	48	49	25	24	12	12		
Sogok El. Sch.	Ⅲ	560	97	0	0	5	6	9	10	18	18	10	10	6	5		
Samdang El. Sch.	Ⅲ	113	24	0	0	1	1	2	2	5	5	2	2	1	1		
Bongpyeon 1ri Hall	Ⅲ	246	49	0	0	3	3	4	5	9	9	5	5	3	3		
Myeongdo 2ri Hall	Ⅲ	104	20	0	0	1	1	2	2	4	4	2	2	1	1		
Jeongrim 1ri Hall	Ⅲ	34	8	0	0	0	0	1	1	2	2	1	1	0	0		

**Table 6. Vehicles to be Evacuated for Temporary Population within EPZ of Ulchin Site(unit: person, vehicle)**

Item	Place	Population to be Evacuated	Total Vehicles to be Evacuated	Traffic Volumes to be Evacuated by Time Step(minute)								
				15	30	45	60	75	90	105	120	135
Normal	Nagok Beach	350	88		4	9	9	22	22	9	9	4
	Hoojeong Beach	400	100		5	10	10	25	25	10	10	5
	Bongpyeong Beach	1,300	325		16	33	81	81	33	32	33	16
	Deokgu Spa	1,350	338		17	34	34	84	84	34	34	17
	Ulchin Site	300	75		3	8	8	18	19	8	8	3
	Hosan Beach	550	138		7	14	14	34	34	14	14	7
	Wolcheon Beach	250	63		4	6	6	16	16	6	6	3
Summer Peak	Nagok Beach	1,350	270		13	27	27	68	68	27	27	13
	Hoojeong Beach	3,500	700		35	70	70	175	175	70	70	35
	Bongpyeong Beach	10,700	2,140		107	214	214	535	535	214	214	107
	Deokgu Spa	10,700	2,410		121	241	241	602	602	241	241	121
	Ulchin Site	2,400	540		27	54	54	135	135	54	54	27
	Hosan Beach	1,000	350		17	35	35	88	88	35	35	17
	Wolcheon Beach	150	45		3	4	5	11	11	5	4	2
Winter Peak	Nagok Beach	350	88		4	9	9	22	22	9	9	4
	Hoojeong Beach	400	100		5	10	10	25	25	10	10	5
	Bongpyeong Beach	1,300	325		16	33	81	81	33	32	33	16
	Deokgu Spa	10,700	2,410		121	241	241	602	602	241	241	121
	Ulchin Site	2,400	540		27	54	54	135	135	54	54	27
	Hosan Beach	550	138		7	14	14	34	34	14	14	7
	Wolcheon Beach	250	63		4	6	6	16	16	6	6	3

**III. 주민소개시간 예측결과**

평상교통/여름철 침두교통/겨울철 침두교통, 주/야간, 평기상/악기상 등 모두 12가지 경우를 가정한 시나리오에 대해 NETSIM 코드로 모의한 결과를 <그림 2>에 제시하였다. <그림 2>는 7번 국도의 EPZ 경계 남단과 북단에서 모든 소개차량(인구)이 비상계획구역을 벗어나는 데 걸리는 시간을 나타낸 것이다. 비상계획구역 내 전 주민을 소개하는데 걸리는 시간은 전체적으로는 210 ~ 315분 정도로, 마지막 소개 대상차량이 도로로 유입된 후 약 15 ~ 120분 정도 소요된다. 소개시간은 밤이 낮보다 약 45분 정도 더 소요되는 것으로 예측되었다. 야간에는 내부 배경교통량 및 도로 유입차량이 주간에 비해 상대적으로 작

음에도 불구하고 소개시간이 더 크게 나타나는 것은 도로자유속도가 작아 중간에 비해 상대적으로 지체가 크게 나타났기 때문이다. 기상상태가 좋지 않을 경우도 최대 45분 정도가 더 소요되는 것으로 모의되었다.

<그림 3>은 소개 대상차량의 90%가 비상계획구역을 벗어나는데 걸리는 소개시간을 나타낸 것이다. 평상교통의 경우, 소개 대상차량의 90%가 소개된 후 나머지 차량들이 소개되는데 약 1시간이 더 소요되는 반면, 여름철/겨울철 침두교통의 경우에는 약 1시간 15 ~ 1시간 45분 정도가 소요되는 것으로 나타났다. 이는 평상교통의 경우는 전 시간대에 걸쳐 골고루 소개가 이루어지는 반면, 침두교통의 경우는 차량들의 정체가 급격히 발생하였다가 차량의 도로 유입

이 종료된 이후에 정체가 해소되면서 소개가 이루어지는 양상을 나타내기 때문이다.

또한 주민소개시간이 가장 작게 나타나는 시나리오(겨울철 침두교통/낮/평상기상: 사례 ⑨)와 소개시

간이 가장 크게 나타난 시나리오(여름철 침두교통/밤/악기상: 사례 ⑧)에 대하여 주요 교차로에서의 차량 1대당 평균지연시간 분포를 <그림 4>와 <그림 5>에 제시하였다. 여름철 야간/침두교통/악기상(사례

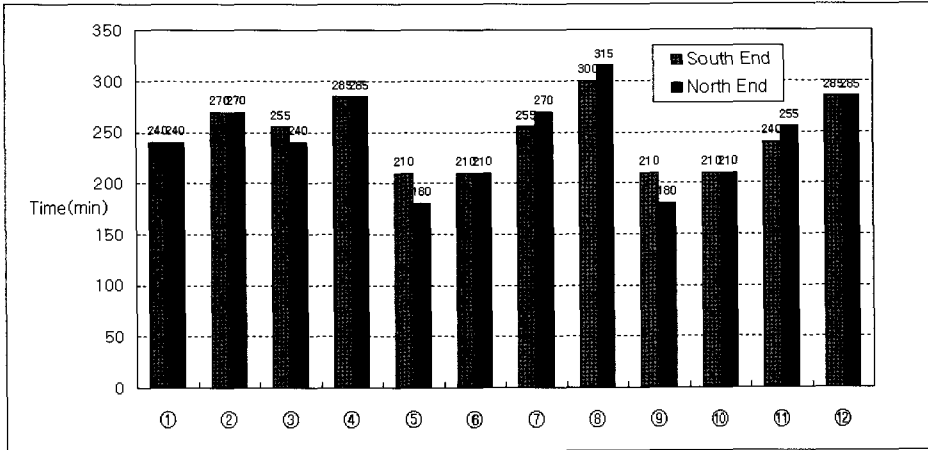


Figure 2. Results of Evacuation Time Estimation for Total Vehicles within EPZ of Ulchin Site.

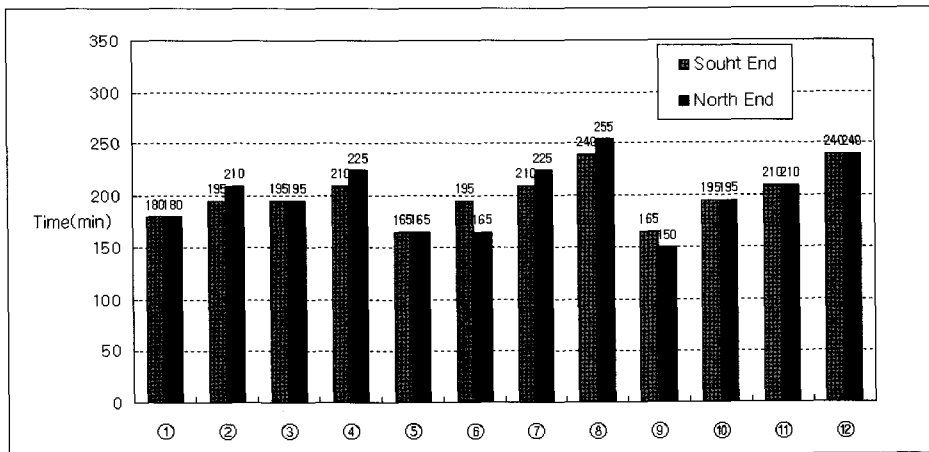


Figure 3. Results of Evacuation Time Estimation for 90% Vehicles within EPZ of Ulchin Site.

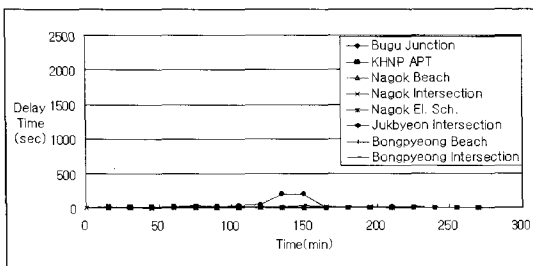


Figure 4. Average Delay Time in Intersection with bottleneck within the EPZ for Case of Winter/Peak Traffic/Daytime/Normal Weather Condition.

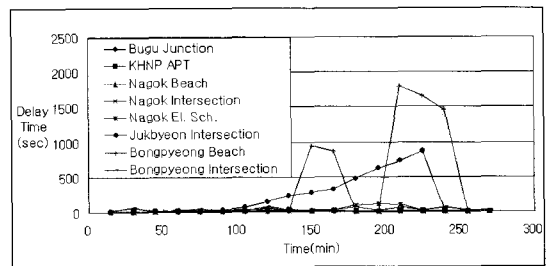


Figure 5. Average Delay Time in Intersection with bottleneck within the EPZ for Case of Summer/Peak Traffic/Night/Adverse Weather Condition.

⑧)의 경우, 원전 남쪽에 위치한 봉평해수욕장 부근 교차로와 죽변읍 부근 교차로가 일시적인 차량지체가 일어날 수 있는 병목지점으로 나타났다.

죽변읍 부근 교차로는 죽변읍으로 부터 7번 국도로 소개차량이 집중되기 시작하는 100분 이후부터 차량이 정체되기 시작한다. 차량정체는 소개대상 차량 유입이 종료되는 180분 이후 약 45분 정도 더 지속되다가 급격히 해소되는 양상을 보이고 있다. 봉평해수욕장 부근 교차로에서는 약 150분 전후, 그리고 220분 전후로 일시적인 차량정체가 발생하다가 바로 해소되는 양상을 보이고 있다. 이는 죽변읍에서 유입되는 차량의 영향으로 판단된다. 즉, 봉평해수욕장 부근 교차로에서는 죽변읍에서 7번국도로 유입된 직진차량으로 인해 통행우선순위가 낮은 봉평해수욕장에서 7번 국도로 유입되는 좌회전 차량이 정체되기 때문이다. 이러한 정체현상은 죽변읍에서 유입된 직진차량이 통과한 후 바로 해소된다.

교차로에서의 차량 정체는 원자력발전소 남쪽이 북쪽보다 더 크게 나타나고 있으나 전체적인 소개시간은 북쪽이 더 크게 나타났다. 남쪽에서의 차량정체는 원전으로부터 다소 먼 거리에 있는 교차로에서 일어나고, 차량 유입이 종료된 후 정체현상도 단시간 내에 해소된다. 이는 남쪽 교차로에서는 차량정체가 직진차량에 의해 유발되는 것이 아니고 상대적으로 차량수가 적고 통행 우선순위가 낮은 좌회전 또는 우회전 차량에 의 발생하기 때문이다. 따라서 교차로에서의 일부 차량에 의한 일시적인 정체현상이 유발되지만 가로에서의 7번 국도를 통과하는 직진차량의 차량속도는 북쪽에 비해 원활한 흐름을 보이고 있다. 그러나 북쪽에서는 소개 대상차량이 상대적으로 많고 가로구간(링크)에서의 차량속도가 작아 소개시간이 남단에 비해 더 많이 소요되는 것으로 예측되었다.

IV. 결 론

NETSIM 프로그램을 이용하여 울진원전 방사선비상계획구역에 대한 주민소개시간을 예측하였다. 본 연구에서 이용한 NETSIM 코드는 미국 플로리다대학에서 개발한 간선가로망의 교통분석 프로그램으로

방사선 비상시 주민소개시간 산정에 많이 이용되고 있다.

교통분석시 필요한 주요 입력자료인 배경교통량과 차종구성비를 계절별로 조사하였다. 울진원전 주변의 주요 간선도로의 가로구간과 교차로 지점에서의 교통 서비스수준은 A ~ C 등급으로 양호한 상태로 분석되었다. 차종구성비는 승용차가 약 70%, 기타 화물, 버스 등이 30%를 차지하고 있다.

주민소개 시나리오는 계절, 교통량, 낮/밤, 기상상태 등을 고려하여 12가지 경우로 설정하였다. 평상교통, 여름철 첨두교통, 그리고 겨울철 첨두교통에 대해 각각 주간 및 야간, 평상기상 및 악기상의 경우로 나누어 소개시간을 예측하였다.

비상계획구역 경계 남단과 북단에서 모든 소개차량(인구)이 비상계획구역을 벗어나는 데 걸리는 시간은 전체적으로는 210 ~ 315분 정도로 마지막 소개대상차량이 도로로 유입된 후 약 15분 ~ 120분 정도 더 소요되는 것으로 예측되었다. 소개시간은 밤이 낮보다 약 45분정도 더 소요되는 것으로 예측되었는데, 이는 야간에는 낮보다 차량 자유속도가 작은 것이 원인이다. 기상상태가 좋지 않을 경우도 차량의 자유속도가 작아 최대 45분 정도가 더 소요되는 것으로 모의되었다.

교차로에서의 차량지체 현상은 북쪽의 교차로에서는 크게 나타나지 않는다. 남쪽의 죽변읍 및 봉평해수욕장 부근의 교차로에서 통행우선순위가 낮은 좌회전 대기 차량에 의해 지체현상이 나타났으나 직진차량의 흐름이 원활해지면 바로 정체가 해소되는 것으로 분석되었다. 이런 결과는 교통 통제만 적절히 이루어지면 방사선 비상 사고시 교차로에서의 병목현상은 주민보호조치에 치명적인 영향을 주지는 않는다는 것을 시사한다.

주민소개시간은 통행발생시간 분포에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 통행발생시간 분포는 주민의 행동특성과 밀접한 관계를 가지는데, 이를 어떻게 정량화하는가가 중요하다. 본 연구에서는 기존의 연구결과를 참조하여 최대 180분이 소요되는 것으로 가정하였으나, 향후에는 사회심리학적 행동특성에 대한 정밀한 면접조사 등을 통해 보다 합리적인 통행발생

시간 분포를 설정할 필요가 있다.

본 논문에서는 비상계획구역 내의 전체 주민에 대한 소개시간 예측 결과를 제시하였으나, 실제 비상상황에 보다 근접하게 모의할 수 있도록 풍하방향별로 최적 소개경로를 설정하고, 통제요원에 의한 수신호 등 다양한 신호체계를 고려한 교차로 교통회전을 최적화 등에 대한 심층연구를 수행할 예정이다.

## 감사의 글

본 논문은 과학기술부 원자력 중장기사업 "방사선 비상시 주민소개시간 산정기술개발"의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Criteria for Preparation and Evaluation of Radiological Emergency Response Plans and Preparedness in Support of Nuclear Power Plants, NUREG-0654 Rev. 1 (1980).
- [2] T. Urbanik, A. Desrosier, M.K. Lindell, C.R. Schuller, Analysis of Techniques for Estimating Evacuation Times for Emergency Planning Zones, NUREG/CR-1745, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1980).
- [3] Stephen W. Tweedie, "A Methodology for Estimating Emergency Evacuation Times," The Social Science Journal, 23(2), pp. 189-204 (1986).
- [4] M. Pidd, F. N. de Silva, R. W. Eglese, "Theory and Methodology: A Simulation Model for Emergency Evacuation," European Journal of Operational Research, 90, pp. 413-419 (1996).
- [5] Ajay K. Rath, Rajendra S. Solanki, Simulation of Traffic Flow During Emergency Evacuations: A Microcomputer Based Modeling System, Oak Ridge National Laboratory (1993)
- [6] T. Urbanik II, "Evacuation Time Estimates for Nuclear Power Plants," Journal of Hazardous Materials, 75, pp. 165-180 (2000).
- [7] T. Urbanik, M. P. Moeller, K. Bames, The Sensitivity of Evacuation Time Estimates to Change in Input Parameters for the I-DYNEV Computer Code, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4874 (1988).
- [8] U.S. FHWA, CORSIM User's Manual: Version 5.1, Federal Highway Administration of U.S. Department of Transportation (2003).
- [9] 전인영, 이제기, "울진원전 방사선비상계획구역에 대한 소개 시간 예측," 대한방사선방어학회지 27(3), pp. 189-198 (2002).
- [10] 정양근, 엄희문, 이갑복, 방선영, 김성민, 이은미, 방사선 비상시 주민소개시간 산정기술 개발 과제 최종보고서, 과학기술부 (2005).
- [11] 건설교통부, 도로용량편람 (2001).
- [12] 건설교통부, 도로용량편람 (2004).
- [13] KLD Associates, Inc, "Davis Besse Nuclear Power Station Development of Evacuation Time Estimates", Rev. 5, New York (2003).
- [14] Parsons Brinckerhoff, Evacuation Travel Time Estimates Nine Mile Point and James A. FitzPatrick Emergency Planning Zone, Rev. 6, Airport Special Event Scenario Final Report Prepared for Niagara Mohawk Power Corporation (1999).
- [15] P.K. Gandhi, Effect of Adverse Weather and Visibility on Capacity of a Signalized Intersection Approach, Master of Science Thesis, Northwestern University, Evanston, IL (1972).
- [16] F.L. Hall, D. Barrow, "The effect of weather on the relationship between flow and occupancy on freeways," in: Paper Presented at the 1988 Transportation Research Board Meeting, Washington, DC (1988).
- [17] A. Ibrahim, F.L. Hall, The Effects of Adverse Weather Conditions on Speed-Flow-Occupancy

Relationships, Transportation Research Record  
1457, Washington, DC (1994).

- [18] E.R. Jones, M.E. Goolsby, Effect of Rain of  
Freeway Capacity, Research Report 24-23,  
Texas Transportation Institute, College Station,  
TX (1969).