

방사선 비상계획을 위한 월성원전 주변 주민 소개시간 예측 연구

이갑복, 방선영, 정양근

한국전력공사 전력연구원 방사선안전그룹

2007년 4월 3일 접수 / 2007년 5월 29일 채택

원자력발전소 사고 시 방사성물질이 발전소의 지역으로 유출이 되거나 예상될 때 주민을 안전하게 보호하기 위한 조치의 일환으로 주민소개가 고려된다. 소개시간 산정에 필요한 인자를 도출하고, 각각의 인자에 대해 원전 주변의 현장자료를 토대로 부지주변의 교통환경 여건을 반영하여 월성원전의 방사선 비상계획구역 내의 주민전체를 소개시키는데 소요되는 시간을 예측하였다. 월성원전 방사선비상계획구역 내 주요 간선도로와 교차로에서 교통량을 조사하였고, 소개시작시간 분포를 추정하기 위해 상주거주자와 일시거주자를 대상으로 사회행동특성에 대한 설문조사를 실시하였다. 평시와 관광객이 많이 유입되어 차량정체가 예상되는 여름철을 대상으로 주간 및 야간, 평상기상 및 악기상의 경우로 나누어 주민소개시간을 예측하였다. 주민 소개시간 예측을 위한 교통분석은 TSIS 패키지 프로그램이 이용되었다. 비상계획구역 경계 남단과 북단에서 모든 소개차량(인구)이 비상계획구역을 벗어나는 데 걸리는 시간은 전체적으로는 118~150분 정도로 예측되었다. 여름 침투교통량 유입시, 소개시간은 낮이 밤보다 최대 17분 정도 더 소요되는 것으로 예측되었다.

중심어 : 주민소개, 방사선 비상, 비상대책, 교통분석, TSIS

1. 서론

원자력발전소 방사선 비상시 주민이 일정기준 이상의 방사선 피폭이 예상될 될 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.

미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission ; NRC)에서는 NUREG-0654- FEAM-Rev.1 App.4(이하 NUREG-0654)를 통해 주민소개시간 평가를 방사선비상계획의 기반기술로서 요건화 하였으며[1], 국내에서도 정부에서 원자력사업자가 비상계획구역 내의 상주 거주 주민과 일시 거주 주민에 대한 적절한 보호조치(대피 및 소개 등)에 소요되는 시간을 산정토록 요구하고 있다[2].

미국에서도 1979년 이전에는 주민소개를 위한 교통분석 기술개발은 거의 이루어지지 않았다. 그러나 Three Mile Island 원전사고 이후에 주민소개에 대한 체계적인 연구의 필

요성이 증대되었다. 1970년대 말에 미국 NRC의 후원으로 Urbanik 등에 의해 주민소개시간 예측기술에 대해 종합적인 검토가 이루어졌다[3]. 그 이후에 다소 활발한 연구가 진행되었다. Stephen W. Tweedie 등이 NETVACI 모델(Sheffi 등이 1981년에 개발)과 CLEAR 모델(N.P. Moeller 등이 1982년 개발)을 이용하여 Black Fox Station (BFS)의 비상시 주민소개시간을 계산하였다[4]. M. Pidd 등은 비상소개 시물레이션 모델을 개발하면서 지리정보시스템(GIS)을 모델에 접목하였으며[5], Oak Ridge National Lab. (ORNL)에서 OREMS를 개발하여 다양한 이벤트나 시나리오에 적용하였다[6]. 최근에는 Thomas Urbanik II이 원자력발전소의 비상소개시간 산정 절차를 체계적으로 정리하였으며, 특히 소개준비시간-또는 통행발생시간(Trip Generation Time ; TGT)이라고도 함을 여러 행동단계로 구분하여 산출하는 방식을 제시하였다[7].

미국에서 원자력 분야의 소개시간 산정을 위해 사용해온 전산코드는 MASSVAC, NETVACI, DYMODO, I-DYNEV 등이 있으나 이중 대표적인 전산코드는 1980년대에 개발된 I-DYNEV이다[8]. 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[9]. CORSIM 코드에

책임저자 : 이갑복, gblce@kepri.re.kr, 한국전력공사
대전광역시 유성구 문지동 103-16번지 한국전력공사 전력연구원 방사선안전그룹

서는 교차로에서의 병목현상으로 인한 지체시간 및 비상계획구역을 벗어나는 시간대별 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 주민행동특성에 대한 설문조사와 교통흐름 분석을 수행하여 주민소개시간을 예측한 사례가 있다[10]. 그러나 이 연구는 제한된 범위의 교통환경 분석을 수행하여 소개시간을 산정한 한계가 있으며, 설문조사 결과를 토대로 제시한 소개준비시간 분포가 다소 폭넓게 나타나고 있어 소개시간이 다소 크게 예측될 소지를 내포하고 있다. 이는 극단적인 응답자료를 적절히 배제하지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

최근에 정양근 등이 울진원전을 대상으로 교통량 현장조사를 수행하고, 이를 토대로 교통흐름을 분석하여 주민소개시간을 산정하는 연구를 수행하였다[11]. 이 연구에서는 이전의 연구에서는 다소 미흡하였던 교통환경 조사결과를 반영하였으나, 주민행동특성에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 않고 기존의 연구와 미국 NUREG-0654를 참조하여 임의로 소개준비시간 분포를 설정하였다.

본 연구에서는 월성원전을 대상으로 소개시간 산정에 필요한 인자를 도출하고, 각각의 인자에 대해 원전 주변의 현장자료 조사를 수행하였다. 월성원전은 부지로부터 반경 8km 이내의 지역을 비상계획구역으로 설정하고 있다. 객관적인 소개시작시간 분포를 설정하기 위해 원전주변의 상주거주자 및 일시거주자를 대상으로 소개대상 주민의 사회행동특성에 대한 설문조사를 실시하였다. 또한 주민소개 경보가 발령되기 전의 교통량(배경교통량)을 산정하기 위해 방사선비상계획구역내의 주요 교차로와 간선도로 구간에서 평상 및 침두 교통현황을 조사하였다. 이와 같이 부지주변의 환경여건을 반영하여 월성원전 방사선비상계획구역 내의 주민전체를 소개시키는데 소요되는 시간을 예측하였다. 교통흐름은 TSIS 패키지 프로그램에 있는 NETSIM 코드를 이용하여 분석하였다.

2. 주민소개시간 산정방법 및 입력자

2.1 교통흐름 분석도구

일반적으로 도시·도로설계, 시설물의 교통영향평가 시 교통흐름을 분석하는 도구로 미국 Florida 대학에서 개발한 TSIS (Traffic Software Integrated System) 컴퓨터 프로그램 패키지를 많이 사용한다. TSIS는 교통관련 분석프로그램의 통

합 개념으로 개발된 것으로, 사용자 인터페이스, 파일 인터페이스, 교통최적화 및 시뮬레이션 도구가 포함되어 있다.

TSIS는 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 상세한 수준까지 재현해 준다. 또한 사용자 측면에서 사용자 지정인자(user defined factor)들을 많이 제공함으로써 상황에 따라 모형을 조정(calibration)하기에 용이하게 설계되어 있다.

월성원전 주변지역은 남북축을 연결하고 있는 국도 31호선을 중심으로 한 간선도로망으로 이루어져 있으므로 CORSIM 모형안의 NETSIM 코드를 이용하여 교통흐름을 분석하였다. NETSIM 코드의 주요 입력자료는 도로의 기하구조(차로 수, 교차로 구성, 감지기의 위치 등), 링크의 형태(간선 가로망이나 고속화도로), 교통량, 교차로 회전 교통량, 교통통제 형태, 도로의 노면 특성 등으로 구성된다.

2.2 교통량 조사 및 교통환경 분석

월성원전 주변지역의 교통흐름을 분석하기 위해 제반 교통현황 및 계절별·요일별 교통량 조사를 실시하였다. 교통량은 2004년 7월, 2004년 11월 그리고 2005년 1월, 3차에 걸쳐 금요일부터 일요일까지 각각 3일간씩 4개 지점의 가로구간과 10개 지점의 교차로에서 07부터 19시까지 약 12시간 동안 현장 조사하였다(Fig. 1).

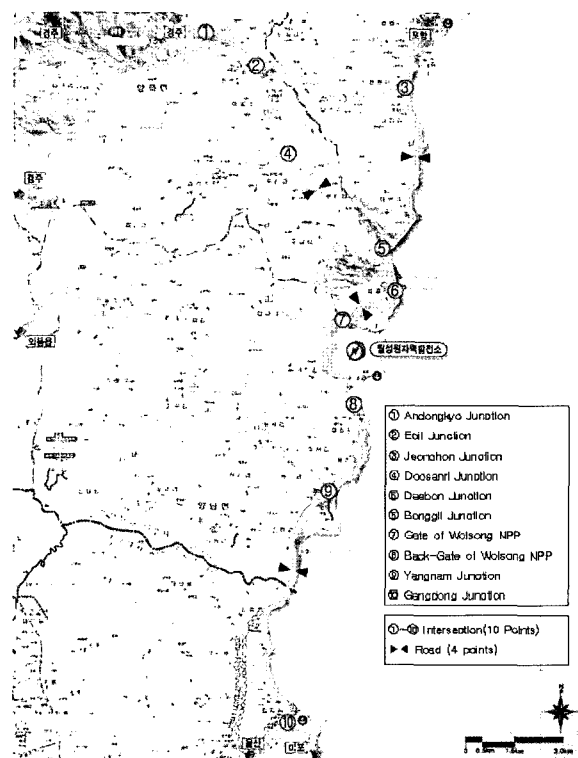


Fig. 1. Field survey area for traffic volume and transportation environment.

Table 1. Field survey results of traffic volumes by seasonal and time (unit : vehicle/hour)

Time	National Road 31 (Daebon Section)				National Road 31 (Yangnam Section)			
	Normal	Peak(Saturday)			Normal	Peak(Saturday)		
		Summer	Fall	Winter		Summer	Fall	Winter
07:00~08:00	73	283	239	143	139	406	370	176
08:00~09:00	73	293	224	125	129	423	327	174
09:00~10:00	131	496	374	227	225	651	563	297
10:00~11:00	189	698	566	329	366	974	907	431
11:00~12:00	177	633	519	307	304	846	771	403
12:00~13:00	217	859	677	389	379	1,015	964	486
13:00~14:00	262	994	841	517	459	1,263	1,040	606
14:00~15:00	243	945	841	451	475	1,368	1,067	588
15:00~16:00	296	1,164	914	543	497	1,432	1,238	654
16:00~17:00	282	1,051	846	397	496	1,293	1,308	813
17:00~18:00	279	941	688	641	546	1,332	1,524	656
18:00~19:00	296	877	706	379	554	1,172	980	623
Total	2,518	9,234	7,435	4,448	4,569	12,175	11,059	5,907

Table 2. Analysis results of traffic service level for road within EPZ of wolsong site.

Section		Traffic Volume (vehicle/hour)	Level of Service		
Normal (Weekday)	National Road 31	Daebon section	341	A	
		Bonggil section	494	A	
		Yangnam section	660	B	
	Local Road 929	Yongdang section	266	A	
Peak (Saturday)	Summer	National Road 31	Daebon section	1,346	C
			Bonggil section	1,424	C
			Yangnam section	1,638	C
	Local Road 929	Yongdang section	914	B	
	Fall	National Road 31	Daebon section	1,046	B
			Bonggil section	1,362	C
			Yangnam section	1,401	C
	Local Road 929	Yongdang section	875	B	
	Winter	National Road 31	Daebon section	649	B
Bonggil section			773	B	
Yangnam section			773	B	
Local Road 929		Yongdang section	398	A	

월성원전 주변 가로상의 계절별·요일별 교통량을 분석한 결과, 각 계절별로 토요일의 교통량이 가장 많은 것으로 나타났다. 개별 도로별로 약간의 차이가 있으나 첨두시간대는 첨두요일(토요일)은 15~16시로 분석되었으며, 평일(금요일)의 경우 첨두시간대는 17~18시로 분석되었다(Table. 1). 차종구성비는 평일의 경우에는 승용차가 약 70%, 버스 및 화

물차량 등 기타차량이 30%를 차지하였고, 첨두일은 계절에 따라 약간의 차이는 있으나 승용차가 약 90%를 차지하고 있다. 이는 주말에 관광을 목적으로 이 지역에 유입되는 차량 중 자가운전 승용차가 많음을 시사한다.

또한 각 교차점에서의 직진, 좌·우회전 방향별 교통량인 교통회전량을 조사하였다. 월성원전 북쪽 최인근 마을인

Table 3. Analysis results of traffic service level for intersection within EPZ of wolsong site.

		Peak Time Zone	Intersection Name	Traffic Volume (vehicle/hour)	Level of Service
Normal (Weekday)		17~18	Yangnam Junction	621	C
			Andongkyo Junction	664	A
			Doosanri Junction	291	A
			Bonggilri Junction	406	A
			Back-gate of Wolsong NPP	335	A
			Gate of Wolsong NPP	302	A
			Eoil Junction	628	B
			Jeonchon Junction	540	B
			Daebon Junction	426	B
			Gangdong Junction	982	C
Peak (Saturday)	Summer	15~16	Yangnam Junction	1,372	C
			Andongkyo Junction	1,982	D
			Doosanri Junction	810	A
			Bonggilri Junction	1,601	C
			Back-gate of Wolsong NPP	788	A
			Gate of Wolsong NPP	880	A
			Eoil Junction	1,885	E
			Jeonchon Junction	2,096	F
			Daebon Junction	1,590	E
	Gangdong Junction	2,316	F		
	Fall	15~16	Yangnam Junction	1,328	C
			Andongkyo Junction	1,796	C
			Doosanri Junction	864	A
			Bonggilri Junction	1,178	B
			Back-gate of Wolsong NPP	970	A
			Gate of Wolsong NPP	1,031	A
			Eoil Junction	1,702	E
			Jeonchon Junction	1,744	E
Daebon Junction			1,288	D	
Gangdong Junction	1,715	E			
Winter	15~16	Yangnam Junction	1,044	C	
		Andongkyo Junction	887	B	
		Doosanri Junction	385	A	
		Bonggilri Junction	628	A	
		Back-gate of Wolsong NPP	512	A	
		Gate of Wolsong NPP	493	B	
		Eoil Junction	798	C	
		Jeonchon Junction	1,096	C	
		Daebon Junction	662	B	
Gangdong Junction	952	C			

봉길리 주민의 주요 소개경로에 있는 대본삼거리에서의 교통회전량을 보면 봉길리 방향에서 진입하는 차량은 대부분 양북면 소재지 방향으로 좌회전하고, 감포 방향의 직진차량은 상대적으로 작았다. 원전 남쪽 최인근 마을인 나아리 주민의 주요 소개경로에 있는 양남사거리에서의 교통회전량은 31번 국도를 이용하여 울산방향으로 진행하는 직진차량이

대부분을 차지하고 지방도 704호 도로를 이용하는 차량은 매우 작았다.

도로상에서 차량이 운전자의 자유 의지로 움직일 수 있는 도로자유속도(free velocity on road)를 결정하기 위해 가로구간 및 교차로에서의 서비스수준을 분석하였다. 월성원전 방사선비상계획구역 내의 주요 소개 도로의 가로는 대부분

분 2차로도로이며 도로유형은 설계속도 80km/h 미만의 연속 교통류 도로(유형 II)에 해당되어, 건설교통부의 도로용량편람[12]에서 제시한 '2차로도로 구간의 서비스수준 분석방법'을 이용하였다. 도로를 운행하는 차량의 지체 여부를 나타내는 서비스수준은 총지체율에 따라 A-F까지 모두 여섯 단계로 구분된다. 서비스수준은 도로 또는 교차로의 형태에 따라 구분하는 기준이 약간 상이하나 A는 매우 양호, F는 교통지체가 매우 심한 상태를 나타낸다.

본 연구에서 수행한 계절별 침투교통 시간대의 가로구간 2차로도로의 서비스수준 분석결과는 (Table. 2)와 같다. 대부분의 가로구간이 서비스수준 A-C로 총지체율이 30% 이내인 양호한 소통상태를 보이는 것으로 판정되었다.

교차로에서의 교통 서비스수준은 신호교차로, 비신호교차로를 구분하였고, 비신호교차로는 다시 양방향정지 교차로와 무통제 교차로로 구분하여 분석하였다. 교차로의 서비스수준 분석결과, 신호교차로인 양남삼거리의 서비스수준은 C로 양호한 편이었고, 양방향정지교차로인 안동교삼거리, 두산리삼거리, 봉길해수욕장앞, 원전후문 및 정문앞 교차로도 대체로 서비스수준이 양호한 상태를 보였다(Table. 3). 그러나 여름철 및 가을철 휴일에는 교통체계상 위계가 비슷한 도로들의 접속지점인 어일삼거리, 전촌삼거리, 대본삼거리, 강동삼거리에서는 서비스수준 D-F로 다소 교통체증을 유발하는 것으로 분석되었다. 이는 관광객의 일시적인 유입에 따른 것으로 판단된다.

가로 및 교차로 서비스수준 분석결과 대부분 양호한 등급으로 나타나 주민소개시간 산정시 자유도로속도를 해당도로의 교통 제한속도로 설정하였다. 그러나 서비스수준이 D-F를 보인 교차로 부근의 가로에서는 교통지체를 고려하여 해당도로의 교통제한속도 보다 30% 낮게 설정하였다.

2.3 소개준비시간 설정

주민소개를 위한 교통량이 새롭게 발생하는 소개준비시간은 비상계획구역 내 거주하고 있는 주민들이 방사선 비상을 통보받는데 소요되는 시간과 개인 또는 가족단위 구성원이 소개준비를 마치고 도로에 차량을 유입하기까지 걸리는 시간 등으로 구성된다.

현재 통보행위나 소개준비 행위시에 걸리는 소개준비시간을 산출하는 방법으로는 경험적으로 알려지거나 관측된 확률분포를 이용하여 전문가들의 기술적 판단에 따라 평균과 최대 시간을 적절히 가정하여 산출하는 방법과 비상계획구역에 거주하는 주민들로부터 직접 설문조사하는 방법이 이용될 수 있다[13, 14].

본 연구에서는 고리, 월성, 울진원전의 방사선비상계획구역내에 거주하는 상주거주자와 일시적으로 체류하는 일시거주자를 대상으로 소개준비시간에 영향을 주는 인자들에 대해 고찰하고 이를 설문을 통해 조사하였다. 상세한 조사방법은 (Table. 4)에 제시하였다. 소개준비는 (Table. 5)와 같이 단계별 상황으로 구분하였다. 소개준비시간의 추정치는 이들 각각의 상황에 따르는 소요시간의 확률적 합으로 추정하는 것이 가능하다[14]. 각각의 상황은 시간 순서에 따라 서로 독립적이다. 소개통보 접수 후 일터를 떠나는 1단계부터 직장으로부터 집으로 이동하는 2단계를 거쳐 최종적으로 집으로

Table 4. Field questionnaire survey to estimate TGT (Trip Generation Time) for resident and transient within EPZ of nuclear power plant sites.

	Resident	Transient
Population	Habitual residents within EPZ of Ulchin, Wolsong, and Kori nuclear power plant sites.	Temporary residents within EPZ of Ulchin, Wolsong, and Kori nuclear power plant sites.
Sampling Method	Regional Quota Sampling	Regional Quota Sampling
Sample Size	1,500 persons	450 persons
Sampling error	± 2.49 (95% confidence interval)	± 2.36 (95% confidence interval)
Survey Method	Telephone Interview	Face to Face Interview
Survey Tool	Structured Questionnaire	Structured Questionnaire
Survey Period	2006. 1. 23 ~ 2006. 1. 25	2006. 9. 15 ~ 2006. 9. 23

Table 5. Stage for traffic generation time

Stage	Description of Stage
1	Preparation to Leave Working Place after Warning Receipt
2	Movement from Working Place to Home
3	Preparation to Leave Home

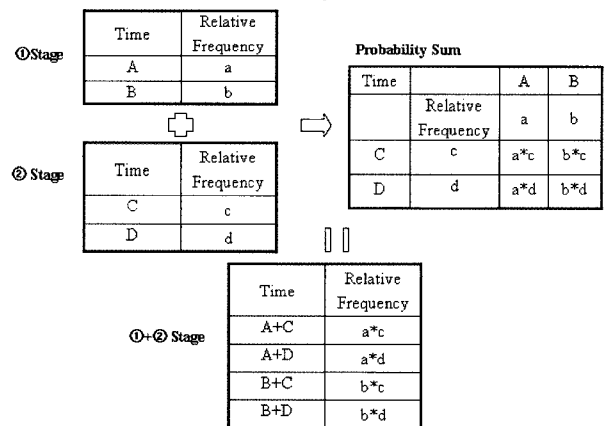


Fig. 2. Conceptual diagram of methodology for TGT(Trip Generation Time) estimates from field survey results.

부터 출발하는 3단계까지의 상황은 순차적으로 순서의 변동 없이 발생한다. 또한 발생시나리오에 따라 활동이 생략될 수 있다. 각각의 활동이 진행될 때 마다 필요한 시간들이 평가될 때 소개준비시간 산정이 가능하게 된다. 즉, 집에서 거주하면서 소개통보를 수령하는 경우에는 직장에서의 소개준비 및

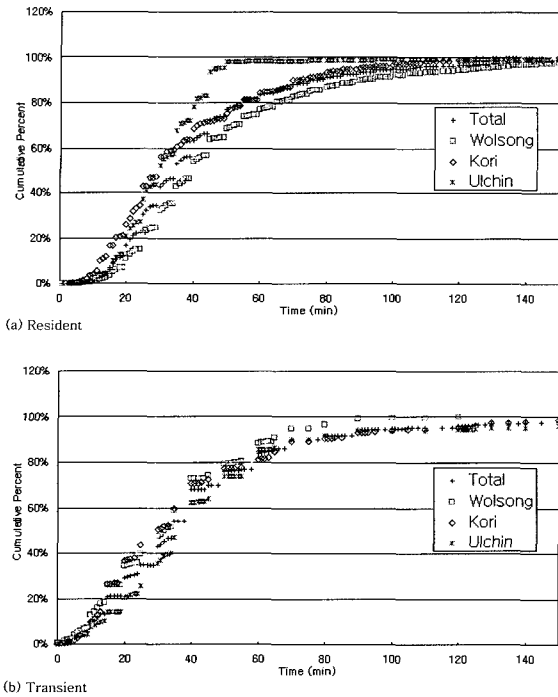


Fig. 3. Cumulative distributions of TGT (Trip Generation Time)

집으로의 이동단계는 생략될 것이고, 반면 직장에서 바로 소개에 응하겠다고 응답한 개인은 2, 3 단계가 생략될 것이다. 따라서 (Fig. 2)와 같이 각 단계에서 소요되는 시간을 구한 후 대수적이 아닌 확률적인 합산과정을 거쳐 모든 단계를 통합한 소개준비시간을 구하였다[7]. 여기서 집이 아닌 다른 곳에서 소개를 통보받은 경우, 그 지점을 직장으로 통칭하였다.

조사 결과를 토대로 소개준비시간을 산정하여 (Fig. 3)에 제시하였다. 상주거주자의 경우 소개준비시간은 95% 신뢰수준에서 전체원전 100분, 월성 124분, 고리 85분, 울진 47분이었으며, 일시거주자의 경우 전체 95분, 고리 120분, 월성 70분, 울진 125분으로 나타났다. 참고로 NUREG-0654에 예시되어 있는 소개준비시간은 45~180분으로 예시되어 있다. 본 연구에서는 개별원전 간의 설문응답 차이가 부지특성을 반영한다는 객관적 근거가 불명확한 상황에서 원전별로 부지 특이적 자료를 적용하는 것은 다소 무리라 판단하여 전체원전에 대한 소개준비시간을 적용하였다.

2.4 주민소개 시나리오 설정

주민소개시간이 가장 많이 소요될 것으로 예상되는 여름철과 평일을 대상으로 소개 시나리오를 설정하였다. 교통량, 시간대, 기상조건 등에 따른 소개시간을 이해하기 위해 관광객의 유입으로 교통이 혼잡한 여름철 첨두교통 상황과 평일 상황에 대해 낮과 밤, 평상기상과 악기상 등 8개의 경우에 대해 소개시간을 예측하였다. 또한 비상계획구역 외곽도로의 교통통제 전, 후의 소개시간평가를 위해 여름철두시 낮, 평상기상시의 비상계획구역 외곽도로를 통제하지 않는 시나리오를 추가로 설정하여 비교 분석하였다.

본 연구에서 설정된 시나리오는 다음과 같다.

- ① 평시/주간/평기상(N/D/N)
- ② 평시/주간/악기상(N/D/A)
- ③ 평시/야간/평기상(N/N/N)
- ④ 평시/야간/악기상(N/N/A)
- ⑤ 여름피크/주간/평기상(S/D/N)
- ⑥ 여름피크/주간/악기상(S/D/A)
- ⑦ 여름피크/야간/평기상(S/N/N)
- ⑧ 여름피크/야간/악기상(S/N/A)

2.5 소개 대상 차량수 및 기타 입력자료 설정

소개는 비상계획구역 내 전체주민을 대상으로 하였다. 소개차량수는 다음과 같이 산정하였다. 집결지별로 차량 1대당 4인을 기준으로 소개차량 수를 산정하였다. 또한 거주인에 대한 소개차량은 주·야간 동일하며, 야간의 일시거주자(관광객) 수는 설문조사 시 4시간 이상 체류할 것이라고 응답한 사람의 비율을 고려하여 주간의 약 20%로 가정하였다. 일시거주자의 소개대상 차량은 설문조사 응답에서 소개에 응할 수 있는 차량을 소유하고 있다고 응답한 비율을 반영하여 계산하였다. 즉, 총 대상인구수의 70%는 차량 1대당 4인씩, 차량을 소유하지 않은 일시거주자에 대해서는 버스 1대당 40명씩을 소개한다고 가정하였다.

소개차량 도로유입량은 소개준비시간 분포의 구간별 빈도수를 이용하여 산정하였다. 집결지별 소개차량 도로유입량은 (Table. 6)~(Table. 7)과 같다. (Table. 7)의 일시거주자의 소개 대상차량을 위한 집결지는 해수욕장, 관광지 등 사람이 많이 모이는 곳을 선정하였다.

비상계획구역으로의 차량유입, 외곽도로 차량통제 및 교차로에서의 교통회전을 변경은 통제요원이 비상계획구역 내의 주요 교차로와 남·북단에 배치되고 교통통제가 적절히 이루어지는 시점을 고려하여, 소개결정 후 30분부터 이루어지는 것으로 가정하였다. 소개경로는 원전의 방사선비상계획서를 기준으로 삼았다. 차량이 통제되는 시점부터 소개차량은 교차로에서의 주어진 차량회전에 의해 지정된 소개경로를 따라 이동된다. 무신호교차로에서의 차량 통행방법은 우선통행순위를 직진, 좌회전, 우회전 순으로 정했으며 우선순위 차량이 포화일 경우에 차순위 차량은 정체를 하는 것으로 가정하였다. 이는 우선순위 차량의 정체가 원전 부근의 차량정체를 유발하는 파급효과가 더 크기 때문이다.

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. 또한 도로교통법시행규칙상의 차량속도 규정에도 강우 또는 약한 강설시 평상시 속도의 20%로 감속운전이 명시되어 있다. 따라서 본 연구에서는 악기상시 도로 자유속도를 평상시에 비해 20% 감속되는 것으로 가정하였다.

(Table. 8)에 시나리오별로 자유도로속도 및 교통통제 이전에 외부로부터의 비상계획구역내로 유입되는 차량을 고려하기 위한 배경교통 유입량을 제시하였다. 낮의 배경교통유입량은 첨두시간대의 교통량을 기준으로 삼았고, 야간의 배

Table 6. Vehicles to be evacuated for residents within EPZ of wolsong site (unit: person, vehicle)

Place	Total Persons	Total Vehicles	Traffic Volumes to be Evacuated by Time Step(minute)								
			15	30	45	60	75	90	100	105	115
Nasan Elementary School	3,632	908	70	339	285	106	61	33	13	-	-
Yangnam ES.	1,582	396	0	31	148	124	46	27	-	15	6
Sooryum 2ri Village Hall	535	134	0	10	50	42	16	9	-	5	2
Shinseori Village Hall	778	195	0	15	73	61	23	13	-	7	3
Sanggye Elementary School	332	83	0	9	31	26	10	6	-	3	1
Hwanseo 2ri Village Hall	204	51	0	4	19	16	6	3	-	2	1
Gigoori Village Hall	105	27	0	2	10	8	3	2	-	1	0
Seokchonri Village Hall	143	36	0	3	13	11	4	2	-	1	1
Seokup Elementary School	115	29	0	2	11	9	3	2	-	1	0
Sangrari Village Hall	50	13	0	1	5	4	2	1	-	0	0
Bonggil 1ri Village Hall	517	130	10	48	41	15	9	5	2	-	-
Googil 1ri Village Hall	100	25	0	2	9	8	3	2	-	1	0
Yongdang Elementary School	86	22	0	2	8	7	3	1	-	1	0
Daebon Elementary School	264	66	0	5	25	21	8	4	-	2	1
Doosanri Village Hall	38	10	0	1	4	3	1	1	-	0	0
Hyodingri Village Hall	233	59	0	5	22	19	7	4	-	2	1
Songjeon Elementary School	274	69	0	5	26	22	8	5	-	3	1
Najeong 1ri Village Hall	145	37	0	3	14	12	4	2	-	1	1
Jeonchon Elementary School	189	48	0	4	18	15	6	3	-	2	1
Yangbook Elementary School	234	59	0	5	22	19	7	4	-	2	1
Total	9,556	2,397	80	496	834	548	230	129	15	49	20

Table 7. Vehicles to be evacuated for transient in summer daytime within EPZ of wolsong Site (unit: person, vehicle)

	Place	Total Persons	Total Vehi cles	Traffic Volumes to be Evacuated by Time Step(minute)								
				15	30	45	60	75	90	95	105	110
Norma	Gwanseong Beach	2163	393	0	84	87	108	72	24	-	17	1
	Bonggil Beach	1065	195	0	42	43	54	36	12	-	8	-
	Wolsong Site	1482	471	105	109	135	70	30	21	1	-	-
Peak	Gwanseong Beach	6489	1180	0	253	263	325	214	72	-	52	2
	Bonggil Beach	3285	597	0	128	133	165	108	36	-	26	1
	Wolsong Site	1682	478	106	111	137	71	30	22	1	-	-

Table 8. Scenarios for public evacuation time estimation within EPZ of wolsong site.

Item		Normal traffic				Summer peak traffic				
		Daytime		Night		Daytime		Night		
		Normal weather	Adverse weather	Normal weather	Adverse weather	Normal weather	Adverse weather	Normal weather	Adverse weather	
Level		N/D/N	N/D/A	N/N/N	N/N/A	S/D/N	S/D/A	S/N/N	S/N/A	
Free velocity on road (km/hour)		60	48	54	43	60	48	54	43	
Entering traffic volume at boundary (vehicle/hour)	North end	Nat'l Road 4	301	301	151	151	778	778	389	389
		Nat'l Road 14	31	31	16	16	149	149	75	75
		Nat'l Road 31	281	281	141	141	906	906	453	453
	South end	Nat'l Road 31	275	275	138	138	541	541	271	271

경교통유입량은 주 소개도로인 국도 31호선의 연평균 교통량 인 약 480대/시간 을 감안하여 낮에 비해 약 50% 감소한다고 가정하였다.

2.6 교통흐름 분석을 위한 도로네트워크 구성

TSIS에서 교통흐름을 분석하기 위해 가상적인 도로네트워크를 링크와 노드를 이용하여 구성하였다. 노드(node)는 도로망의 주요 교차로, 도로지형이 변하는 지점, 차량출입지점 등을 나타내며, 링크(link)는 차량이 이동하는 도로의 일방향 구간, 즉, 노드와 노드사이를 말한다. 월성원전 주변의 지형도를 이용하여 (Fig. 4)와 같이 도로네트워크를 구성하였다. 이러한 도로네트워크는 TSIS에서 교통흐름을 분석하기 위한 가상의 도로망이므로, 실제의 도로현황을 정확히 반영할 수 있는지 여부를 확인하여야 한다. 따라서 월성원전 주변도로의 현황 통행속도와 시뮬레이션 결과값을 비교하여 신뢰도를 분석하였다. 통행속도를 비교한 결과 상관계수의 값이 약 0.9 정도로 도로네트워크의 신뢰성이 높게 나타났다(Fig. 5).

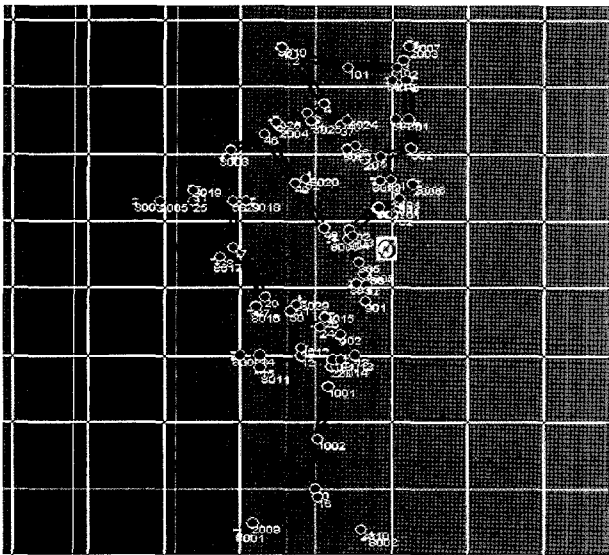


Fig. 4. Road network around Wolsong site for traffic simulation.

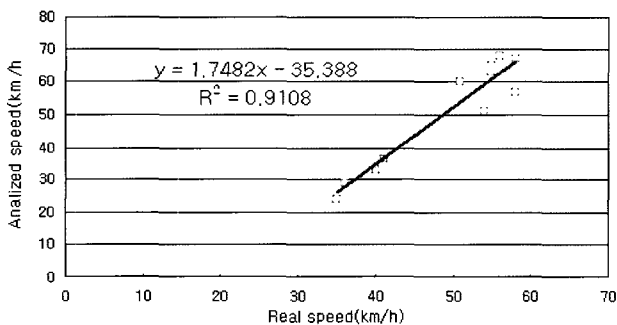


Fig. 5. Comparison the observed(real) with simulated(analyzed) speed

3. 결과 및 논의

NETSIM 코드를 이용하여 설정된 시나리오에 따른 모의 결과를 (Fig. 6)에 제시하였다. (Fig. 6)은 소개대상차량(인구)이 월성원전을 중심으로 북단에 위치한 집결지 차량은 북쪽으로, 남단에 위치한 집결지 차량은 남쪽 방향으로 비상계획 구역을 벗어나는 데 소요되는 시간을 나타낸 것이다. 비상계획 구역 내 전 주민을 소개하는데 걸리는 시간은 전체적으로는 118~150분 정도이며, 이는 평시는 118~134분, 여름철두시는 118~150분으로, 마지막 소개대상차량이 도로로 유입된 후 북단의 경우 원전으로부터 2km 이내는 차량지체 없이 16분, 2km 이상의 지역은 최대 7분, 남단의 경우 여름철두시, 2km 이내지역은 44분, 2km 이상의 지역은 최대 31분이 걸렸다. 평시, 주간 월성원전 북단의 경우 초기 차량증가로 인해, 국도 31호선과 지방도 929호선 방면의 소개도로가 국도 4호선과 만나는 전촌삼거리, 어일삼거리에서 소개경보 발령 후 약 40분 후 정체가 발생하나, 정체발생 20분가량 경과 후 정체현상이 해소되어 소통이 원활하였다. 이에 따른 소개대상 마지막 차량의 도로지체는 없었다. 남단의 경우 경보발령 후 10분 후 양남사거리의 지체, 40분 경과 후에 강동삼거리에서 정체가 발생하여 지체시간이 증가하나 110분 이내에 양남사거리와 강동삼거리의 정체가 해소됨에 따라 최종차량의 지체는 발생하지 않았다.

여름철두시, 주간의 월성원전 북단의 경우 경보발령 10분 경과 후 전촌삼거리, 어일삼거리에서 정체가 발생하여 90분후에 정체가 해소되었다. 이에 따른 소개대상 마지막 차량의 도로지체는 없었다. 남단의 경우 경보발령 직후 강동삼거리 정체와 경보발령 후 10분 후 양남사거리의 정체로 인해 145분 경과시까지 정체가 지속되었다. 이는 차량들의 정체가 급격히 발생하였다가 차량의 도로 유입이 종료된 이후에 정체가 해소되면서 소개가 이루어지는 양상을 나타내기 때문이다. 이에 따라 마지막 유입차량의 도로지체시간은 최대 26분을 나타내었다. 여름철두시 차량지체시간 발생은 평시의 2~4배까지 배경교통량이 유입되는 것과 최대 10배의 일시거주자들의 차량증가 때문이나 경보발생 30분 후 비상계획구역으로 유입되는 주요도로들의 차량통제로 인해 지체시간이 장시간 지속되지 않는 현상을 보였다.

소개시간은 평시의 경우, 밤이 낮보다 3분정도 더 소요되는 것으로 예측되었으나, 여름철두시에는 밤이 낮보다 최대 17분 감소하는 것으로 예측되었다. 야간의 일시거주자들의 체류비율이 주간의 약 20%로 파악된 현장조사 결과에서 보듯, 소개대상 차량감소에 의한 소개시간 감소가 도로자유속도 감소에 따른 소개시간 증가보다 크게 나타났기 때문이다. 평기상과 악기상에 따른 소개시간은 악기상의 경우에 최대 6분 정도가 더 소요되는 것으로 모의되었다.

방사선 비상계획구역 외곽도로의 교통통제 전, 후의 소개시간평가를 위해 실시한 여름철두시 주간 평기상에 대해서 비상계획구역 외곽의 도로의 차량을 통제하지 않은 결과 (Fig. 7), 북단의 경우 통제되는 경우보다 소개시간이 3시간이상 증가하고, 남단의 경우 약 30분 증가하여 오히려 북단이 남단보다 소개시간이 큰 것으로 나타났다. 외곽도로를 통제하지 않을 경우 비상계획구역 쪽으로 이동하는 차량과 비상

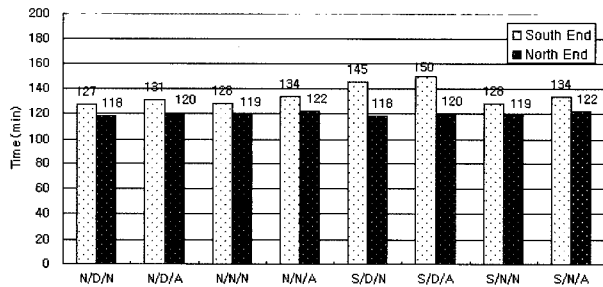


Fig. 6. Results of evacuation time estimation for total vehicles within EPZ of Wolsong site.

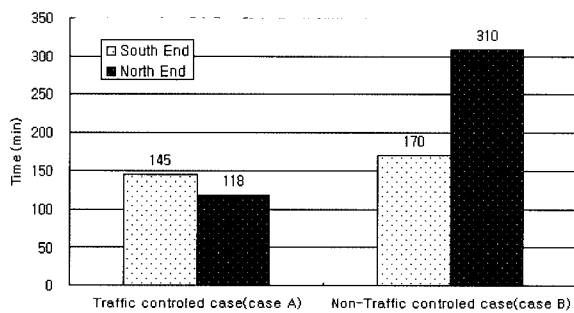


Fig. 7. Evacuation time in between traffic controlled case(case A) and non-traffic controlled case(case B) at the outer intersection of EPZ boundary

계획 구역 밖으로 이동하는 차량이 혼재하여 도로의 양방향 모두 차량이 통행되는데 반해, 차량을 통제할 경우에는 비상 계획구역 안에서 밖으로 빠져나오는 차량만 소통되기 때문에 교차로에서의 신호대기 시간을 단축시키는 효과가 있다. 남단의 소개시간에 가장 큰 영향을 주는 강동삼거리의 신호 교차로 이므로 교통 신호에 따라 소통이 비교적 원활하게 유지되어 교차로 지체시간의 증가가 적었으나, 북단의 어일삼거리와 전촌삼거리의 무신호교차로로 양방향에서 차량이 유입되면서 정체가 급격하게 증가하여 차량의 지체가 장시간 해소되지 않음을 알 수 있었다.

4. 결론

NETSIM 프로그램을 이용하여 월성원전 방사선 비상 계획구역에 대한 주민소개시간을 예측하였다. 본 연구에서 이용한 NETSIM 코드는 미국 Florida대학에서 개발한 간선가로의 교통분석 프로그램으로 방사선 비상시 주민소개시간 산정에 많이 이용되고 있다.

교통분석시 필요한 주요 입력자료인 배경교통량과 교차점의 교통회전량을 조사하였다. 월성원전 주변의 주요 간선 도로의 가로구간과 교차로 지점에서의 교통 서비스수준은 평시에는 A-C 등급으로 양호한 상태로 분석되었으나 여름철 몇몇 도로접속 지점에서는 D-F의 낮은 서비스 수준을 나타내었다.

소개대상차량의 통행발생시간 분포를 구하기 위해 필요한 소개준비시간을 산정하기 위해 고리, 월성, 울진원전의 방사선비상계획구역내에 거주하는 상주거주자와 일시적으로 체류하는 일시거주자를 대상으로 설문조사를 실시한 결과, 상주거주자의 경우 소개준비시간은 95% 신뢰수준에서 100분, 일시거주자의 경우 95분으로 NUREG-0654에 예시된 값과 유사하게 분석되었다.

주민소개 시나리오는 계절, 낮/밤, 기상상태 등을 고려하여 8가지 경우로 설정하였다. 평상교통, 여름철 침두교통 대해 각각 주간 및 야간, 평상기상 및 악기상의 경우로 나누어 소개시간을 예측하였다. 월성원전 주변도로의 현황 통행속도와 시뮬레이션 결과값을 비교하여 신뢰도를 분석한 결과 상관계수의 값이 약 0.9 정도로 높은 도로네트워크의 신뢰성을 나타내었다.

비상계획구역 경계 남단과 북단에서 모든 소개차량(인구)이 비상계획구역을 벗어나는 데 걸리는 시간은 전체적으로는 118~150분 정도로 마지막 소개대상차량이 도로로 유입된 후 북단의 경우 원전으로부터 2km 이내는 차량지체 없이 16분, 2km 이상의 지역은 최대 7분, 남단의 경우 여름침두시, 2km 이내지역은 44분, 2km 이상의 지역은 최대 31분이 소요되는 것으로 예측되었다. 평시, 밤이 낮보다 소개시간이 약 5분정도 더 소요되는 것으로 예측되었는데, 이는 낮에 대한 야간의 작은 차량 자유속도에 기인한다. 여름침두시, 밤이 낮보다 최대 17분 감소하는 것으로 예측되었다. 야간의 일시거주자들의 차량감소에 의한 소개시간 감소가 도로자유속도 감소에 따른 소개시간 증가보다 크게 나타났기 때문이다. 기상상태가 좋지 않을 경우도 차량의 자유속도가 작아 최대 6분 정도가 더 소요되는 것으로 모의되었다.

방사선 비상계획구역 외곽도로의 교통통제 전, 후의 소개시간평가 결과 약 30분에서 3시간 이상의 소개시간 증가를 나타내었다. 통제/무통제의 소개시간의 큰 차이는 교통량 감소와 교차로 지체시간의 감소에 기인한다. 경보발령 시 비상 계획구역 비상계획구역으로의 차량유입 및 교차로 통제 시 비상계획구역 외곽도로의 교통통제를 통한 소개시간 단축의 효과가 매우 크므로, 비상계획구역 외곽지역에 대한 세부적 교통통제대책의 필요성을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발 사업 “방사선 비상시 주민소개시간 산정기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었음.

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. 과학기술부고시 제2004-11호, 원자력사업자의 방사선비상계획 수립 등에 관한 기준. 2004.
3. Urbanik T, Desrosier A, Lindell MK, Schulle CR. Analysis of techniques for estimating evacuation times for emergency planning zones. NUREG/CR-1745. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC. 1980.
4. Stephen WT. A methodology for estimating emergency

- evacuation times. *The Social Science Journal*. 1986;23(2):189-204.
5. Pidd M, de Silva FN, Eglese RW. Theory and methodology: A simulation model for emergency evacuation. *European Journal of Operational Research*. 1996;90:413-419.
 6. Rathi AK, Solanki RS. Simulation of traffic flow during emergency evacuations: A microcomputer based modeling system. Oak Ridge National Laboratory. 1993.
 7. Urbanik II T. Evacuation time estimates for nuclear power plants. *Journal of Hazardous Materials*. 2000;75:165-180.
 8. Urbanik II T, Moeller MP, Bames K. 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.
 9. Federal Highway Administration of U.S. Department of Transportation. CORSIM user's manual: version 5.1. 2003.
 10. 전인영, 이재기. 울진원전 방사선비상계획구역에 대한 소개시간 예측. *대한방사선방어학회지*. 2002;27(3):189-198.
 11. 정양근, 이갑복, 방선영, 김성민, 이은미. 울진원전 방사선 비상계획구역 내의 주민소개시간 예측. *방사성폐기물학회지*. 2005;3(4):359-372.
 12. 건설교통부. 도로용량편람. 2001.
 13. 건설교통부. 도로용량편람. 2004.
 14. KLD Associates, Inc. Davis Besse nuclear power station: Development of evacuation time estimates. rev. 5. New York; 2003.
 15. Parsons Brinckerhoff, Evacuation travel time estimates nine mile point and James A. FitzPatric emergency planning zone. rev. 6. Airport special event scenario final report. Prepared for Niagara Mohawk Power Corporation. 1999.
 16. Gandhi PK. Effect of adverse weather and visibility on capacity of a signalized intersection approach. Master of Science Thesis. Northwestern University. Evanston, IL. 1972.
 17. Hall FL, Barrow D. The effect of weather on the relationship between flow and occupancy on freeways. In: Paper of 1988 transportation research board meeting, Washington, DC. 1988.
 18. Ibrahim A, Hall FL. The effects of adverse weather conditions on speed-flow-occupancy relationships. *Transportation Research Record* 1457. Washington, DC. 1994.
 19. Jones ER, Goolsby ME. Effect of rain of freeway capacity. Research Report. Texas Transportation Institute. 1969.

A Study on the Public Evacuation Time Estimates for Radiological Emergency Plan and Preparedness of Wolsong Nuclear Power Plant Site

Gab-Bock Lee, Sun-Young Bang and Yang-Geun Chung
Radiation & Safety Group, Korea Electric Power Research Institute

Abstract - When an accident occurs at nuclear power plant and radionuclide material is released to the area around the plant, public evacuation is considered as a measure to protect the safety of the residents nearby. This study draws factors required to estimate evacuation time and make estimation of the time to evacuate all residents from the EPZ of Wolsong site in consideration of traffic condition in the neighborhood and on the basis of field data around the site for each factor. The traffic capacity and the traffic volume by season were investigated for the traffic analysis and simulation within EPZ of Wolsong site. As a result, the background traffic volume by season were established. To estimate TGT(Trip Generation Time), the questionnaire surveys were carried out for resident and transient. The TSIS code was applied to traffic analysis in the events of daytime/night and normal/adverse weather under normal day/summer peak traffic condition. The results showed that the evacuation time required for total vehicles to move out from EPZ took generally from 118 to 150 minutes. The evacuation time took longer maximum 17 minutes at night than daytime during summer peak traffic.

Keywords : Public Evacuation, Nuclear Emergency, Emergency Preparedness, Traffic Analysis, TSIS