

Comparison of Measured and Predicted ^3H Concentrations in Environmental Media around the Wolsung Site for the Validation of INDAC Code

Si Young Jang, Chang Kyu Kim, Byung Hwan Rho
Korea Institute of Nuclear Safety

주민피폭선량 평가코드(INDAC)의 검증을 위한 월성원전 주변 삼중수소 농도 실측치와 예측치의 비교 평가

장시영, 김창규, 노병환
한국원자력안전기술원

(2000년 2월 11일 접수, 2000년 6월 14일 채택)

Abstract - The predicted results of INDAC code were compared with measured ^3H concentrations in air and pine-needle around the Wolsung site. The optimal sets of input data to INDAC were in addition selected by comparing the measured values with the predicted values of INDAC based on various conditions such as the release modes of effluents into the environment, the classification of wind classes, and the consideration of terrain. The predicted ^3H concentrations in air and pine-needle were shown to have good agreement with measured values, although there are some limitations such as uncertainties in measured values, complex topology around the site, and the land-sea breeze effects. The assumption on the ^3H behavior in vegetables or plants that the ratio of ^3H concentration in plant water to ^3H concentration in atmospheric water is 1/2 was shown to be conservative in terms of the audit calculation performed by the regulator. It was also found that data sets based on mixed mode and no terrain data were not appropriate for the audit calculation ensuring the compliance with regulations. Thus, if the mixed mode is considered as the release mode of effluents into the environment, meteorological data measured at 58 m height and terrain data should be used to evaluate the atmospheric dispersion factor.

Key Words : environmental assessment, off-site dose assessment, atmospheric dispersion, tritium behaviors in environment, release characteristics of radionuclides, INDAC

요약 - 월성원전 주변에서 실측된 공기중 및 솔잎중 삼중수소 농도와 INDAC 코드 예측치의 비교 평가를 수행하였다. 또한, 방사성물질의 환경중 방출유형, 풍속분류, 지형 고려 유무 등에 따른 삼중수소 예측치의 변화를 측정치와 비교 평가함으로써, 규제실무에 적용할 수 있는 최적 기상자료 입력방안을 도출하였다. 공기중 및 솔잎중 삼중수소 농도와 INDAC 코드 예측치의 비교평가 결과, 월성원전 주변 삼중수소 농도 예측치는 측정값의 불확실성, 지형의 복잡성, 해륙풍의 영향 등의 제한점에도 불구하고 규제검증에 필요한 정도의 보수성을 유지하면서도 삼중수소의 거동을 잘 모사함을 확인할 수 있었다. 또한, INDAC 코드에 적용된 솔잎중 삼중수소 농도의 평가방법론 즉, 대기내 수분중의 삼중수소 농도의 절반이 식물체내에 골고루 분포되어 있다고 가정하는 것은 규제 검증에 필요한 보수성을 확보하고 있음을 알 수 있었다. 최적 기상자료 입력방안의 도출을 위한 민감도 분석 결과, 혼합방출 및 지형을 고려하지 않는 경우에는 실측치 대비 과소 평가되는 부분이 있어 규제실무에 적용하기에는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 혼합방출을 고려하는 경우에는 58m 기상자료와 지형자료에 근거하여 대기확산인자를 평가하여야 하는 것으로 나타났다.

중심어 : 환경영향평가, 주민피폭선량 평가, 대기확산인자, 환경중 삼중수소 거동, 환경방출 특성, INDAC

서론

원자력시설의 정상가동시, 방사성물질이 기체 및 액체유출물의 형태로 소의방출된다. 방사성물질이 환경중에서 이동하는 동안 복합적인 상호작용을 동반하게 되는데, 주민이 받는 방사선피폭은 외부 및 내부피폭으로 대별된다. 즉, 대기 및 해양을 통하여 부지경계선 외부로 확산된 방사성물질로부터 부지주변 주민이 받는 방사선피폭은 오염된 대기, 토양 및 해양에 노출됨으로써 받게 되는 외부피폭과 호흡 및 음식물 섭취로 인해 체내에 축적되는 방사성물질에 의한 내부피폭으로 구분할 수 있다.

우리나라의 경우, 사업자는 원자력시설로부터 환경으로 방출되는 기체 및 액체유출물에 의한 제한구역 경계에서의 피폭선량이 과학기술부장관 고시 제98-12호의 선량요건[1]을 만족하는지를 인허가심사 단계에서 보여야 하며, 발전소의 정상가동시에도 매년 정부에 제출하는 환경연보[2]를 통해 상기 선량요건을 준수한다는 것을 보여야 한다. 한편, 규제기관은 주민이 받는 피폭선량이 상기 법령을 준수하는지 확인하기 위하여 사업자가 제출한 방사선영향평가 결과를 검토하여야 하며, 이를 위하여 사업자의 방사선영향평가 코드와 별도로 검증계산을 수행할 수 있는 코드를 확보하여 사용하여야 한다.

지금까지는 한국원자력안전기술원이 1989년에 개발한 GASDOS 및 LIQDOS[3]와 미국 원자력규제위원회의 XOQDOQ[4]를 주로 사용하여 검증계산을 수행하였다. 그렇지만, 동 검증코드는 방사선영향평가에 관한 세계적 추세인 유효선량개념 및 새로운 체내피폭선량 평가모델에 근거한 연령별 선량환산계수의 적용 등이 미반영되어 있는 상태이므로 이의 보완이 필요하다. 이에 따라, 기존의 주민피폭선량 검증코드인 GASDOS, LIQDOS, XOQDOQ를 보완하여 원자력시설 주변의 주민이 받는 유효선량을 평가할 수 있는 INDAC(Integrated Dose Assessment Code Package for KINS) 코드[5, 6]를 개발하였다.

본 연구에서는 INDAC 코드 개발과정에서 대기 확산 및 방사성물질의 환경거동 모델의 신뢰성 및 적용성 검토를 위하여 월성원전 주변에서 실측된 공기중 및 솔잎중 삼중수소 농도와 INDAC 코드 예측치의 비교 평가를 수행하였다. 또한, 방사성물질의 환경중 방출유형(고공방출, 지표면 방출, 혼합방출), 풍속등급분류, 지형 고려 유무 등에 따른

삼중수소 농도 예측치의 변화를 측정치와 비교 평가함으로써, 규제실무에 적용할 수 있는 최적 기상자료 입력방안을 도출하였다.

월성원전 주변 삼중수소 농도 실측치와 예측치의 비교

INDAC 코드의 검증과 현장 적용성 검토를 위하여, 월성원전 주변 공기중 삼중수소 농도 실측치와 코드 예측치의 비교를 수행하였다. 월성원자력본부에서는 월성 원전 주변 10개 지점에서 약 2주 간격으로 공기중 삼중수소 농도를 분석하고 있으며[2], 한국원자력안전기술원은 2개 지점에서 약 1개월 간격으로 공기중 및 솔잎중 삼중수소 농도 등을 분석하고 있다[7]. 현재, 월성부지에는 4기의 가압중수형 원전이 가동중에 있으며, 각 측정지점 및 측정시점에서의 시료중 삼중수소 농도는 4기 원전의 소의 삼중수소 방출특성 뿐만 아니라 기상특성, 지형특성 등에 따라 상이한 결과를 보이게 된다. 따라서, 특정 소의 삼중수소 방출특성 및 기상특성에 따른 코드 예측치와 실측치간의 상관관계를 비교하기 위하여, 월성 1호기만이 가동되던 시점인 1993년, 1996년 및 1997년의 자료를 이용하여 실측치와 코드 예측치의 비교를 수행하였다. 1993년의 자료를 선택한 것은 1996년 및 1997년의 기상자료 처리방법과 1993년의 방법이 상이하기 때문인데, 1993년에는 대기안정도를 풍향의 표준편차(σ , deg) 방법에 따라 설정하였으나 1996년도 부터는 기온감율법(ΔT , $^{\circ}C/100m$)을 적용하였다. 이러한 기상자료 처리방법의 차이에 따른 비교를 수행하기 위하여 1993년의 기상자료를 선정하였다.

INDAC 코드에 적용된 솔잎중 삼중수소 농도의 평가방법론은 미국 원자력규제위원회의 규제지침 1.109[8]에 제시된 것으로서 대기내 수분중의 삼중수소 농도의 절반이 식물체내에 끌고루 분포되어 있다고 가정한다. 공기중 삼중수소 농도는 월성원전 주변 지형을 고려하여 계산한 특정지점 및 특정시점의 대기확산인자(λ/Q)와 삼중수소 소의 방출량을 이용하여 계산하였다.

대기확산인자는 지형에 따른 영향을 고려하여 평가하였으며, 공기의 정체 및 재순환에 따른 영향은 고려하지 않았다. INDAC에 적용된 대기확산인자 평가모델은 미국 원자력규제위원회의 XOQDOQ에 근거하며, 80km내 16방위별 10개 지점을 과학기술부 고시 제98-10호의 요건에 부합하도록 보완한 것이다. 따라서, 대기확산인자의 지

형에 따른 보정은 XOQDOQ에 적용된 방법에 따라 수행되었다. 코드 예측치와 월성원자력본부의 측정치를 비교하기 위하여, 각 시료포집 주기내의 기상자료(약 2주 간격)를 이용하여 연간 총 24개의 대기확산인자를 계산하였다. 코드 예측치와 한국원자력안전기술원의 측정치를 비교하기 위하여, 각 시료포집 주기내의 기상자료(약 1개월 간격)를 이용하여 연간 총 13개의 대기확산인자를 계산하였다. 기상자료는 월성부지에서 관측한 것으로서 10m 및 53m에서 관측한 풍향, 풍속 및 온도(1997년의 경우, 대기안정도 평가시 온도차 이용)를 사용하였다.

그림 1 및 그림 2는 1993년의 기상자료(혼합방출, 58m 기상자료), 월성 주변 지형자료 및 월성 1호기의 소의 삼중수소 방출량에 근거한 것으로서 직원사택(풍하방향 SSW 2km 지점) 및 청구연수원(풍하방향 NNE 2km 지점)의 공기중 삼중수소 측정치와 코드 예측치를 비교한 것이다. 또한, 그림 3 및 그림 4는 1996년의 기상자료(혼합방출, 58m 기상자료), 월성 주변 지형자료 및 월성 1호기의 소의 삼중수소 방출량에 근거한 것으로서 직원사택 및 청구연수원의 공기중 삼중수소 측정치와 코드 예측치를 비교한 것이다. 월성원전 주변 삼중수소 농도 예측치는 측정값의 불확실성, 지형의 복잡성, 해륙풍의 영향 등의 제한점에도 불구하고 규제검증에 필요한 정도의 보수성을 유지하면서도 삼중수소의 환경내 거동을 잘 묘사함을 확인할 수 있다. 또한, 1996년의 예측치는 1993년의 예측치에 비해 측정치와의 오차범위가 큰 편인데, 이것은 1996년의 기상자료 처리방법이 1993년과 다르기 때문이다. 즉, 1993년에는 대기안정도를 풍향의 표준편차 방법에 따라 설정하였으나 1996년에는 기온감률법(ΔT , $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)을 적용하였다. 그 결과, 표 1에서 보는 바와 같이 1996년의 기상자료가 1993년에 비해 대기가 안정한 상태(Pasquill-Gifford 분류등급중 F, G)가 차지하는 비율이 증가하게 되었고, 이에 따라 예측치와 실측치간의 차이도 더욱 커지게 되었다.

그림 5 및 그림 6은 1996년의 기상자료(혼합방출, 58m 기상자료), 월성 주변 지형자료 및 월성 1호기의 삼중수소 소의방출량에 근거한 것으로서 직원사택(풍하방향 SSW 2km 지점) 및 청구연수원(풍하방향 NNE 2km 지점)의 솔잎중 삼중수소 측정치와 코드 예측치를 비교한 것이다. 솔잎중 삼중수소 농도 측정치는 실험조건을 조절할 수 없는 환경에서의 값이므로 정량적인 비교는 매우 어려우며, 코드의 검증측면에서 볼 때에는 규제 검

증용으로서의 보수성을 유지하면서도 시료채취 주기별 측정치의 변동을 잘 묘사하는가의 여부가 중요하다. 이러한 관점에서 볼 때, 규제검증에 필요한 정도의 보수성을 유지하면서도 식물체내 삼중수소의 거동을 잘 묘사함을 확인하였다. 또한, 예측치가 실측치보다 2배 이상 보수적인 값을 유지하므로, INDAC 코드에 적용된 솔잎중 삼중수소 농도의 평가방법론 즉, 대기내 수분중의 삼중수소 농도의 절반이 식물체내에 골고루 분포되어 있다고 가정하는 것은 규제 검증에 필요한 보수성을 확보하고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 일본에서와 같이 대기내 수분중의 삼중수소 농도와 식물체내 수분중 삼중수소 농도가 동일하다고 가정하지 않더라도 규제 검증에 필요한 수준의 보수성은 확보하고 있다.

최적 기상자료 입력방안의 도출을 위한 민감도 분석

일반적으로, 환경중 방사성물질의 거동은 대기 확산인자의 변동에 민감하게 반응한다. 따라서, 다양한 기상자료의 입력유형별 공기중 삼중수소 농도 예측치와 실측치를 비교함으로써 규제검증에 활용할 수 있는 최적 입력방안을 도출하고자 하였다. 이를 위하여, 본 연구에서는 방사성물질의 환경중 방출유형(고공방출, 지표면 방출, 혼합방출), 풍속등급 분류, 지형 고려 유무 등에 따른 삼중수소 예측치의 변화를 측정치와 비교 평가하였다.

그림 7에서 보는 바와 같이, 풍속군의 분류를 5개(2, 3, 4, 6, 15 m/sec) 및 10개(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 15 m/sec)로 구분하였을 경우는 예측치에 미치는 영향이 미미하였다. 10m 높이에서 관측한 기상자료를 적용한 경우에는 18번째 시료채취기간의 값이 실측치보다 과소 평가된 값을 보였고 58m 높이에서 관측한 기상자료를 적용한 경우에는 22번째의 시료채취기간의 값이 실측치보다 과소 평가된 값을 보였다. 이것은 기상자료의 측정 높이에 따라 풍향이나 대기안정도가 상이한 경우가 발생할 수 있고 가급적 방출지점 높이의 기상자료를 사용할 필요가 있음을 제시하고 있다. 그렇지만, 그림 8에서 보는 바와 같이 시료채취기간이 2주에서 1개월 주기로 확대됨에 따라 58m 기상자료에 근거한 예측치가 10m 기상자료에 근거한 값보다 보수적인 경향을 보임을 알 수 있다. 그림 9 및 그림 10은 각각 방출유형별 및 지형의 고려유무에 따른 영향을 나타낸다.

그림 9에서 보는 바와 같이, 10m 기상자료와 지표면방출을 고려한 예측치가 가장 보수적인 값을 보였으며, 10m 기상자료와 고공방출을 고려한 예측치가 경우에 따라 실측치보다도 낮은 값을 보였다. 혼합방출의 경우는 지표면방출과 고공방출의 중간정도에 해당하는 분포를 보였다. 따라서, 규제실무 측면에서 볼 때 10m 기상자료와 지표면방출을 적용하는 것이 바람직하지만, 혼합방출을 적용하는 경우에도 실측치 대비 보수성을 유지하면서도 방사성물질의 변동을 잘 모사하므로 이의 적용도 고려할 수 있다. 또한, 연간 대기확산인자와 같이 계산 대상기간이 긴 경우에는 그림 8에서 보는 바와 같이 10m 기상자료보다 58m 기상자료를 이용하는 것이 예측치의 과소평가를 방지하는데 필요하다.

그림 10에서 보는 바와 같이, 혼합방출 및 지형을 고려하지 않은 경우에는 실측치 대비 과소 평가되는 부분이 있어 규제실무에 적용하기에는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 지형의 고려와 58m 기상자료에 근거한 혼합방출을 적용하는 입력방안을 최적 기상자료 입력유형으로 도출하였다.

결과 및 논의

본 연구에서는 INDAC 코드 개발과정에서 대기 확산 및 방사성물질의 환경거동 모델의 신뢰성 및 적용성 검토를 위하여 월성원전 주변에서 실측된 공기중 및 숲잎중 삼중수소 농도와 INDAC 코드 예측치의 비교 평가를 수행하였다. 또한, 방사성물질의 환경중 방출유형(고공방출, 지표면 방출, 혼합방출), 풍속분류, 지형 고려 유무 등에 따른 삼중수소 예측치의 변화를 측정치와 비교 평가함으로써, 규제실무에 적용할 수 있는 최적 기상자료 입력방안을 도출하였다.

공기중 및 숲잎중 삼중수소 농도와 INDAC 코드 예측치의 비교평가 결과, 월성원전 주변 삼중수소 농도 예측치는 측정값의 불확실성, 지형의 복잡성, 해륙풍의 영향 등의 제한점에도 불구하고 규제검증에 필요한 정도의 보수성을 유지하면서도 삼중수소의 거동을 잘 모사함을 확인할 수 있었다. 또한, INDAC 코드에 적용된 숲잎중 삼중수소

농도의 평가방법론 즉, 대기내 수분중의 삼중수소 농도의 절반이 식물체내에 골고루 분포되어 있다고 가정하는 것은 규제 검증에 필요한 보수성을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

최적 기상자료 입력방안의 도출을 위한 민감도 분석 결과, 혼합방출 및 지형을 고려하지 않는 경우에는 실측치 대비 과소 평가되는 부분이 있어 규제실무에 적용하기에는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 따라서, 혼합방출을 고려하는 경우에는 58m 기상자료와 지형자료에 근거하여 대기확산인자를 평가하여야 하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 지원한 중장기연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 과학기술부 고시 제98-12호, 방사선량 등을 정하는 기준 (1998).
2. 월성원전 주변 환경방사능조사보고서, 한국전력공사 (1994, 1997, 1998).
3. 고리주변 환경종합평가 및 관련모델 개발, 한국에너지연구소, KAERI/NSC-397/89 (1989).
4. XOQDOQ : Computer Program for the Meteorological Evaluation of Routine Effluent Releases at Nuclear Power Stations, PNL, NUREG/CR-2919 (1982).
5. INDAC 코드 버전 1, 한국원자력안전기술원, 프로그램 등록번호:99-01-25 (1999).
6. 방사선 환경영향평가 규제기술개발, 한국원자력안전기술원 (1998).
7. 원자력시설 주변 환경조사 및 평가보고서, 한국원자력안전기술원, (1994, 1997, 1998).
8. USNRC Regulatory Guide 1.109, Numerical Guides for Design Objectives and Limiting Conditions of Operation to Meet the Criterion ALARA for Radioactive Material in LWR Effluents (1977).

Table 1. Occurrence probabilities of atmospheric stability classes in SSW down-wind sector

Stability classification	Pasquill categories	Occurrence probabilities(%)	
		Year 1993	Year 1996
Extremely unstable	A	27.9	10.2
Moderately unstable	B	8.0	1.2
Slightly unstable	C	19.0	1.0
Neutral	D	31.4	11.4
Slightly stable	E	10.6	21.0
Moderately stable	F	1.4	51.4
Extremely stable	G	1.7	3.8
Total		100.0	100.0

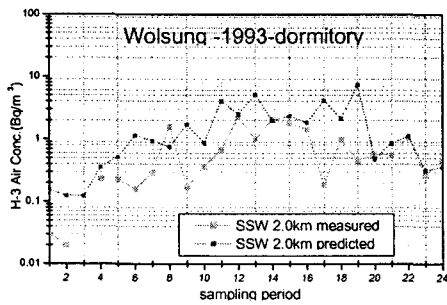


Fig. 1. ³H concentration in air at the dormitory based on meteorological data in 1993.

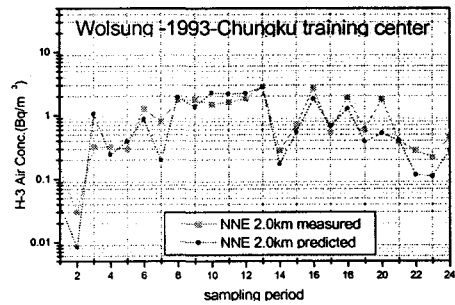


Fig. 2. ³H concentration in air at the Chungku training center based on meteorological data in 1993.

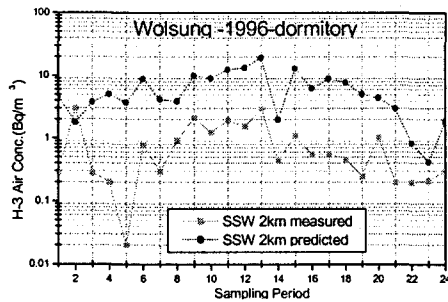


Fig. 3. ³H concentration in air at the dormitory based on meteorological data in 1996.

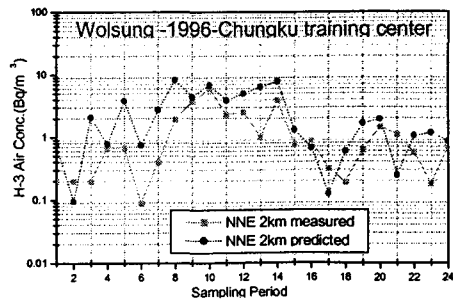


Fig. 4. ³H concentration in air at the Chungku training center based on meteorological data in 1996.

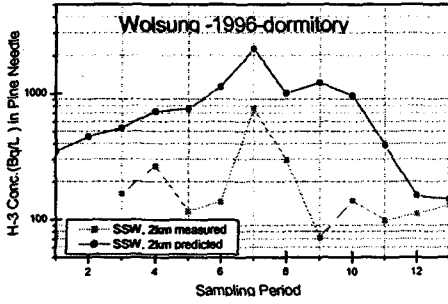


Fig. 5. ^3H concentration in pine needle at the dormitory based on meteorological data in 1996.

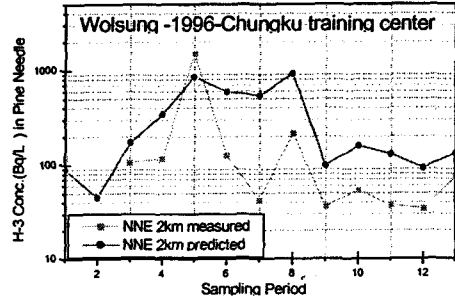


Fig. 6. ^3H concentration in pine needle at the dormitory based on meteorological data in 1996.

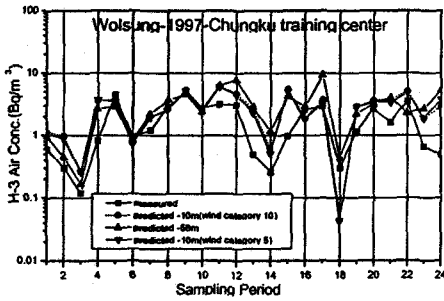


Fig. 7. ^3H concentration in air at the Chungku training center based on meteorological data in 1997 with respect to wind categories.

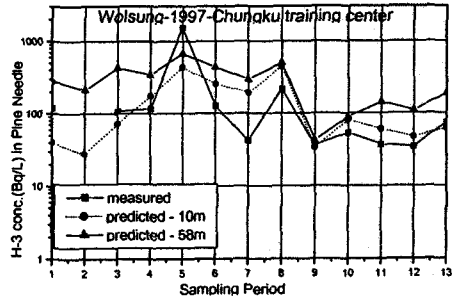


Fig. 8. ^3H concentration in pine needle at the Chungku training center based on meteorological data in 1997 with respect to measuring heights of weather data.

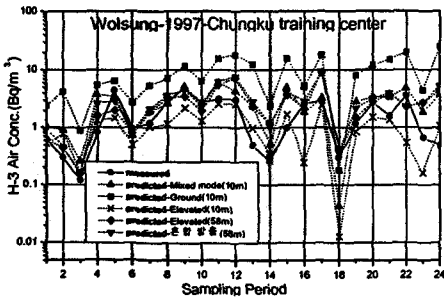


Fig. 9. ^3H concentration in air at the Chungku training center based on meteorological data in 1997 with respect to release modes.

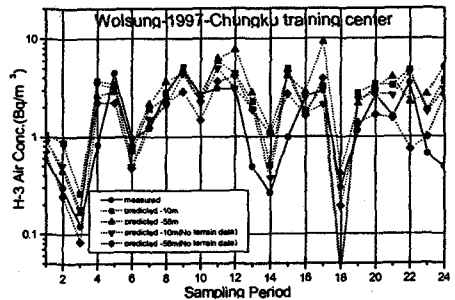


Fig. 10. ^3H concentration in air at the Chungku training center based on meteorological data in 1997 with respect to consideration of terrain data.