

재난예방 실무자 사용을 위한 태풍 해일 경고 시스템

A Storm-Surge Warning System for the Use of Emergency Management Officials

강인남¹, 이정렬², 한성대³
 In nam Kang¹, Jung Lyul Lee² and Sung Dae Han³

1. 서 론

해마다 다양한 규모의 태풍이 우리나라 연안에 직·간접적인 피해를 입혀 왔으며, 근래에 들어서는 그 피해가 날로 심각해지고 있다. 이에 다양한 태풍 해일 모형이 우리나라 전해역 혹은 남해안 등 일부 해안에 적용되었으며 과거 자료와 비교하여 만족할 만한 결과를 산출하고 있다. 그러나 막상 위급시 사용된 예는 거의 없고, 태풍이 지나간 후 몇 주 또는 몇 달 후에야 관련된 계수를 조절하고 현장 자료와 비교하여 결과를 도출하는 실정이다. 이러한 이유로 현장마다 달리 적용될 수 있는 계수의 연속적인 보정이 필요하며, 예보목적의 해일 모형에 대한 필요성이 제기되었다. 따라서 본 연구의 목적은 현장 상황을 가장 잘 인식하는 현장 실무자가 직접 경보를 내려 가능한 한 인명 및 재산 피해를 줄이기 위한 적극적인 대처로서, 수치모형을 이용한 경고 시스템을 우선 구축하고 지속적으로 관련 계수를 현장 자료와 비교·보정하여 신뢰성을 확보한 후 최종적으로는 해일예보에 활용될 수 있도록 하는 것이다. 즉, 기존에 신뢰를 인정받고 있는 조위 예측시스템에 기상청으로부터 제공되는 태풍 특성 및 경로에 대한 정보를 최대한 활용하여 해일고 및 범람역을 산출하는 예측 시스템을 구축하고, 특히 MATLAB을 이용한 GUI 환경을 제공하여 수치모형에 제반 지식이 없는 현장 실무자들도 손쉽게 사용할 수 있도록 하였다.

2. 수심 평균 태풍 해일 모형

2.1 시스템 구성

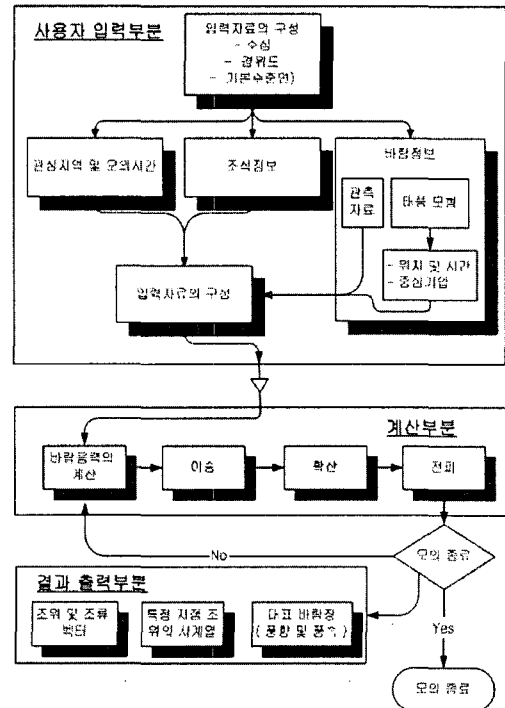


Fig. 1. 예보 시스템 구성

Fig. 1에 제시된 바와 같이 수심 평균된 태풍 해일 예보 시스템 (DICEM; Depth - Integrated

1 아주대학교 건설교통공학과 박사과정
 2 성균관대학교 토목환경공학과 교수
 3 경남대학교 토목환경공학부 교수

Currents and Elevation Model)은 지역이 선정되면 선정된 지역의 경위도가 자동으로 입력되고 입력된 경위도에 따라 그 지역에 맞는 조위 정보가 결합된다. 태풍의 경우 사용자에게 의해 태풍 중심기압, 최대 풍속 반경, 태풍 중심의 예상 이동 경로 등의 정보가 입력되는데, 사용자에게 의해 태풍 중심의 위치, 시간, 중심기압의 순으로 차례로 입력하게 되어 있다. 입력이 완료되고 모의를 하면 시간에 따른 천문조, 기상조 및 바람 응력에 따른 해일고가 산출되어 사용자가 쉽게 해일의 규모를 예측할 수 있다.

2.2 파라미터 태풍 모형

태풍의 중심기압, 최대 풍속, 반경 등의 파라미터를 이용하여 태풍의 기압 분포, 풍속장의 정보를 신속히 제공하는 간단한 모형이 예보수단으로 많은 연구자들에 의하여 제시되었다. 간편한 모형으로 Holland(1980)가 제안한 경도풍 관계식은 식(1)과 같다.

$$V_g = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr}{2}\right)^2 + \frac{AB}{r^B \rho} (P_\infty - P_0)e^{-\frac{4}{r^B}}} \quad (1)$$

여기서, f 는 코리올리 계수, r 은 태풍 중심과의 거리, ρ 는 밀도이다. P_∞ 는 태풍 영향권 밖에서의 기압이며, P_0 는 태풍 중심 기압이다. A 와 B 는 태풍의 형상에 따라서 결정되는 계수로서 경험적으로 얻어지는 값이다. 여기서 B 의 값이 클수록 태풍 중심에서의 기압과 풍속의 변화가 커지며(강등, 2002), 대략 1에서 2.5사이의 값을 갖는다(Holland, 1980).

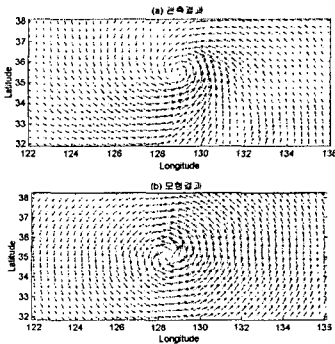


Fig. 2. 기상청 바람자료(MM5 RDAPS)와 모형치의 비교(2003년 9월 12일 21시).

본 모형에서 사용한 태풍 모형의 결과를 태풍 매미의 경우에 적용하여 기상청 바람자료 (MM5 RDAPS)와 비교한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 지배방정식

직교 좌표 상에서 태풍 시 기압 차이 및 바람응력, 조석에 따른 해수면 변화 및 해수순환을 모의하기 위하여 다음과 같이 수심 적분한 형태의 연속방정식과 운동방정식을 이용한다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{H} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial U}{\partial y} - fV \\ & = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial U}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{H} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial V}{\partial y} + fU \\ & = -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_{sy} - \tau_{by}) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial V}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, f 는 코리올리 계수이며, H 는 수심, ρ_0 는 해수의 밀도, P 는 대기압, D_x, D_y 는 각각 x, y 방향에 대한 확산계수를 의미한다. 마찰 응력항으로 표시되는 τ_s 와 τ_b 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= k_b \frac{U}{H^2} \sqrt{U^2 + V^2} \\ \tau_{by} &= k_b \frac{V}{H^2} \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= k_b W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_{xy} &= k_b W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, k_b 는 바닥 마찰계수이며, 바닥의 조도와 바닥의 재질에 의해서 영향을 받는 계수이고 k_s 는 바람저항 계수이다.

2.4 수치해석

본 연구에 사용된 모형은 전술한 지배방정식을

토대로 ADI 음해 유한 차분법으로 차분하였으며, Fractional step기법을 사용하여 해수유동을 이송, 확산, 전파의 3단계로 나누어 각각의 해석에 알맞은 수치기법을 사용하였다. 이송단계는 Lagrangian-Eulerian 접근 방법인 후방특성곡선험법을 사용하였고, 확산단계는 ADI기법으로 수치 해석되었다. 또한 난류와 와류 등에 의한 영향으로 표시되는 전단력의 향들은 모두 일종의 확산 현상으로 간주하여 확산계수 하나로만 표시하고 바닥마찰과 바람응력에 의한 전단력만을 고려하였다. 격자의 형태는 교호격자체계를 사용하였다.

3. 시스템의 운용

3.1 시스템설치

설치 파일을 더블클릭하면 Fig. 3과 같이 설치 화면이 생기고 설치가 종료된 후에는 바탕화면에 DICEM(ICOON)이라는 아이콘이 나타난다.

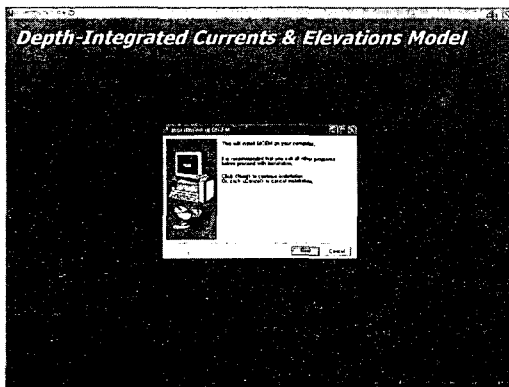


Fig. 3. 설치 화면

3.2 초기화면 및 지형정보

DICEM 아이콘을 클릭하면 Fig. 4와 같이 초기화면이 나타나고, Enter를 누르면 모의하고자 하는 지역의 수심 및 지형정보 파일을 선택하는 창이 나타난다. Quit는 최종적으로 DICEM을 종료하고자 할 때 사용한다.

모의하고자 하는 지역의 수심파일(*.dep)을 선택하면 Fig. 5에 도시된 바와 같이 3차원 수심도를 볼 수 있다. 수심창에서의 smoothing level은 수심자료가 좋지 않은 경우 수심을 평활화 시키는 것으로 경우에 따라서 다소 조절이 될 수 있다. 실제 지형에의 적용을 위하여 simulation을 누르면 모의입력 및 결과창이 생성되고 초기에 결과창은 적용지역의 해안선을 보여준다.

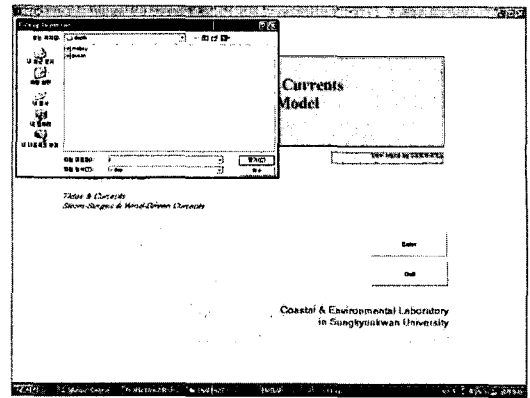


Fig. 4. 수심 선택

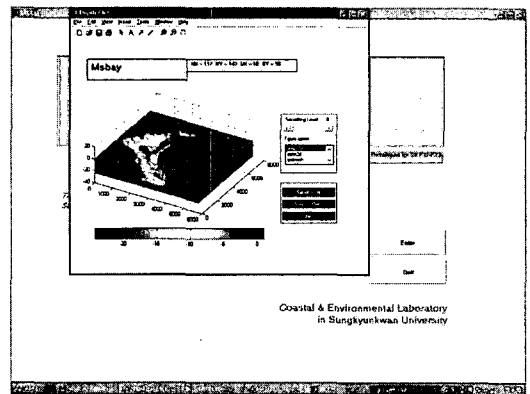


Fig. 5. 수심 도시 화면

3.3 주 입력 정보

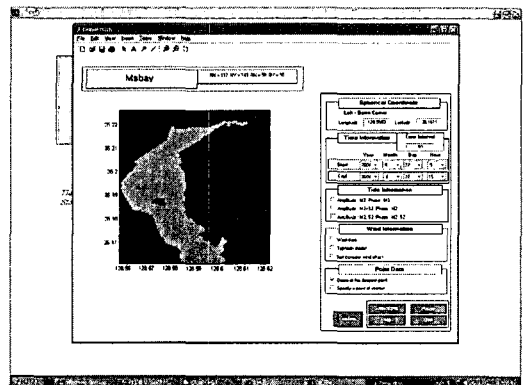


Fig. 6. 정보 입력 화면

위도와 경도는 자동으로 인식되며 모의 시간은 Fig. 6에서와 같이 현재 시간으로부터 6시간 동안 수행되도록 되어있다. 다른 시점의 모의를 원하는 경우 오른쪽 시간 입력창에서 변경할 수 있다. time interval은 90또는 180초 정도가 양호하며, 조석 및 바람자료의 형태, 특정 지점 옵션을 체크하

고 confirm을 누르면 각각의 옵션에 맞도록 데이터를 자동으로 만들게 된다. Tide Information의 경우 현재 M_2 분조와 S_2 분조에 대한 데이터가 준비되어 있어 적용지역의 경위도와 함께 조위자료가 개방경계에 자동으로 입력되게 된다. Wind Information에서 wind data는 바람 자료가 본 모형에서 요구하는 특정 형식으로 자료가 준비되어 있는 경우로서 별다른 입력없이 자료가 만들어진다. 그러나 typhoon model의 경우에는 추가로 입력해야 할 정보들이 필요하다. position data는 수위에 대한 정보를 그래프로 표시하기 위하여 특정 지점을 선택하기 위한 것으로, 위의 것은 자동으로 가장 깊은 곳의 수심점에서 수위의 변화를 보여주며 아래 것을 누르면 사용자가 지정한 지점에서의 수위를 그래프로 보여준다.

3.4 태풍 정보 입력

실제 예보의 경우로서 typhoon을 선택하고 특정 점을 누르는 경우에 대하여 설명한다. 모든 입력이 결정되면 아래에 있는 confirm을 누르고 잠시 후면 아래와 Fig. 7과 같이 나타나며 태풍 경로에 대한 정보를 요구한다. 기존에 만든 자료(*.tpd)가 있으면 yes를 누르고 기존에 저장되어 있는 파일을 선택하고, 없으면 no를 누른 후 입력한다. yes를 선택한 경우에는 기존에 입력한 정보가 그림창에 표시가 되어 추가로 수정 또는 입력을 하면 되고, no를 선택한 경우에는 임의의 태풍에 대한 정보를 입력하게 된다. 입력해야 할 태풍의 정보로는 위치, 시간, 중심기압 등인데, 위치는 마우스 왼쪽 버튼으로 입력하며, 입력한 후에는 정보를 입력하는 창이 뜨고 정해진 형태로 정보를 입력한다.

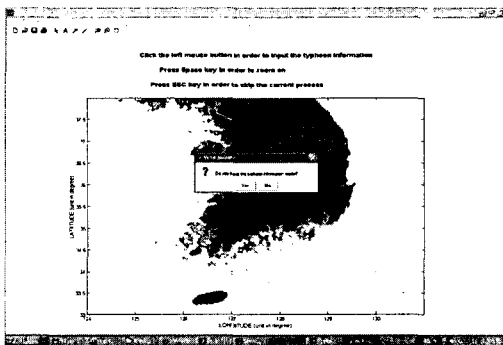


Fig. 7. 태풍 정보 및 경로 입력 화면

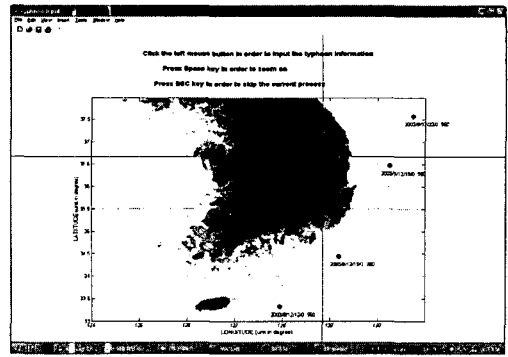


Fig. 8. 태풍 경로 입력 결과

시간 간격은 3시간 정도가 좋으며, 입력된 태풍 정보들로부터 시간과 공간 내삽을 하기 때문에 현저한 변화를 일으키는 지점은 표시를 해두는 것이 좋다. 또한 입력하는 도중에 사용자의 실수로 인하여 수정을 하고자 하는 경우 그 지점에 마우스의 오른쪽을 클릭하면 그 지점의 데이터는 지워진다. 현재 본 모형에서 태풍 모형은 가장 간단한 것으로 추후 여러 다른 모형을 실정에 맞게 추가할 예정이다. 태풍 자료를 입력한 후 esc를 누르면 본 입력창이 종료가 되며 입력한 정보에 대하여 저장할 수 있다.

Fig. 8과 같이 모든 태풍 정보에 대한 입력 과정이 끝나면 다시 수위를 도시할 위치를 정해야 한다. 마우스를 움직이면 +가 생기는데, 이것은 특정 지점에 대한 수위를 보겠다고 입력한 경우이기 때문에 요구하는 것으로 해역의 임의의 한 점을 클릭하면 그 곳이 파란 점으로 표시되고 모든 자료의 작성이 완료되었음을 알리는 메시지 창이 Fig. 9와 같이 나타난다.

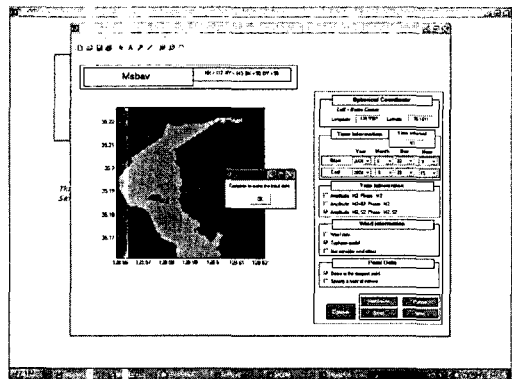


Fig. 9. 입력 완료 메시지

3.5 모형결과

자료가 모두 작성된 후 simulation 버튼을 누르면 Fig. 10에서와 같이 왼쪽의 결과창에는 조류벡터와 수면변위가 칼라로 도시된다. 아래에는 개방경계 임의 지점의 조위가 붉은색 선으로 표시되고 특정 지점의 수위는 모의시간이 진행됨에 따라 파란 점으로 표시된다. 추후 얼마간의 검증기간을 거친 후 모형의 신뢰도가 확보된 후에는 각 지역에서 내릴 경보수위를 설정할 예정이다. 풍향은 태풍 입력이 주어진 시점부터 특정지점의 조위를 나타내는 그래프 옆에 주어지며 아래 풍속이 나타난다. 계산도중 잠시 멈추고자 할 경우에는 pause 버튼을 누르면 되고 완전히 정지시키려면 stop을 누른다.

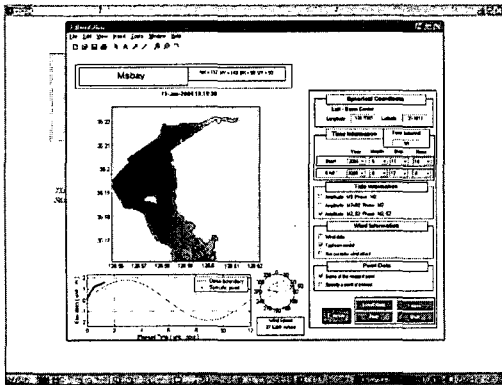


Fig. 10. 모형 결과

4. 태풍 매미에의 적용

4.1 마산만

태풍 매미를 적용할 마산만 해역은 그림 10과 같다. 마산만의 길이는 약 7km이며 폭은 약 2km인 길쭉한 형태의 폐쇄성이 강한 내만으로서 해일에 취약한 형태를 가지고 있다.

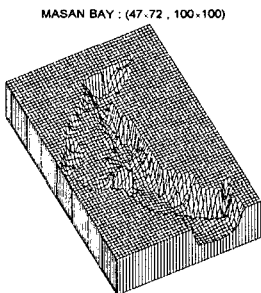


Fig. 11. 마산만 지형도

4.2 태풍 매미의 특성

2003년 9월 12일 경상남도 해안 지방으로 상륙한 태풍 "매미"는 중심기압이 950hPa, 중심 부근의 최대풍속 약 40m/s로 강한 바람과 함께 기압강하에 의해 복합적 원인으로 해수면이 상승하였다. 태풍 "매미"는 해안 상륙 직전에 950hPa의 강력한 세력을 유지한 상태여서, 상륙 일인 12일에 해면기압이 통영 954.0hPa(20시 50분), 여수 956.5hPa(19시 51분), 마산 959.0hPa(21시37분)로 각각 극값을 경신하였다(기상청, 2003). 태풍이 남해안에 상륙할 시기(9월 12일)에 통영의 만조시간은 22시 03분, 간만조차는 247cm로 태풍의 상륙 시간인 12일 20시경에는 해수면이 상승하고 있었고, 중심기압에 의해 약 60cm 이상의 기상조가 추가되었다. 제 14호 태풍 '매미'로 인해 경남지방을 비롯한 부산과 남부지방에는 실로 엄청난 인적 그리고 물적인 피해를 입게 되었는데, 인명피해는 사망이 85명, 실종 30명이고 재산 피해는 4조 3000억원 정도로 고속도로 4개를 건설 할 수 있는 액수이고, 대규모 정전 및, 수도물 공급 중단, 교량, 철도 6개선 불통, 고속도로 및 대교 파손 등 엄청난 피해를 입혔다.(중앙재해대책본부, 2003). 특히 마산에 해일의 규모가 커진 것은 첫째, 당시 남해상의 해수면 온도가 평소보다 1~2℃ 정도 높아 북상하는 태풍에 수증기량을 증가시켜 에너지를 보급하였고 둘째, 바람의 방향(남남동풍 SSE)이 마산만의 열린 방향과 일치하여 해일의 발생을 유도하였다. 셋째, 엄청난 강풍과 대조의 만조시간에 해일이 겹친 것이 해일고의 효과를 크게 하였다.

4.3 해수면의 변화

태풍 매미에 의한 해수면의 변화를 모형 모의한 결과가 그림 12에 관측조위와 비교하여 그림 13에 나타내었다. 입력된 바람장은 당시 기상관측소로부터 관측한 자료를 이용하여 모의한 결과를 제시하였다. 당시 해안 범람 시각인 21시와 22시 사이에 수위가 최고조에 이르는 것을 관찰할 수 있으며, 관측치와도 최고조의 시각과 그 값의 차이가 크지 않게 나타나는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 태풍의 해일피해가 우려되는 위급시 현장 상황이 가장 잘 파악되는 실무자가 직접 사용할 수 있도록 수립된 예보 시스템을 소개

하였다. 다양한 태풍 파라미터에 대한 검증 및 보정이 되지 않는 등 아직 보완할 문제가 많이 있지만 현장에서 쉽게 다룰 수 있는 예측 시스템의 수립이 절실히 요구되고 있다.

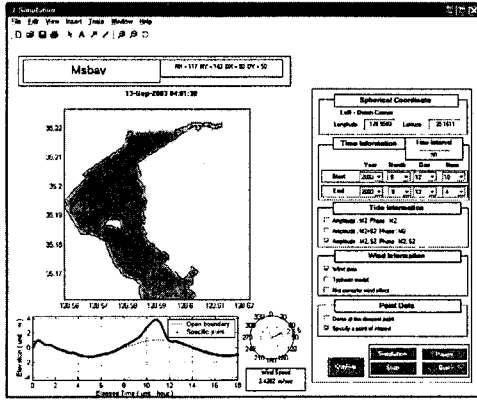


Fig. 12. 태풍 매미 내습시 예보 결과

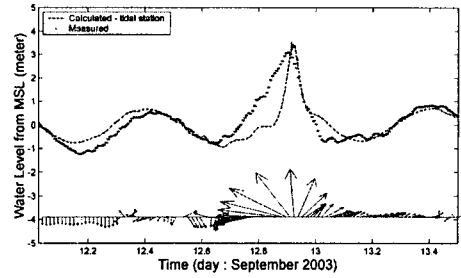


Fig. 13. 관측치와의 비교

참고문헌

- 강시환, 전기천, 방경훈, 박광순 (2002). 동북아시아 해상에서의 태풍중심기압과 최대풍속의 경험적 관계식. 한국기상학회지. 제 38권 5호, pp. 523-530
- Holland, G. J. (1980). An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes. Mon. Wea. Rev., 108, 1212-1218.