

태풍 매미 내습시 마산만과 남해안 해역의 폭풍해일고 산정



강 시 환 >>

(주)헤인이엔씨 기술연구소 소장

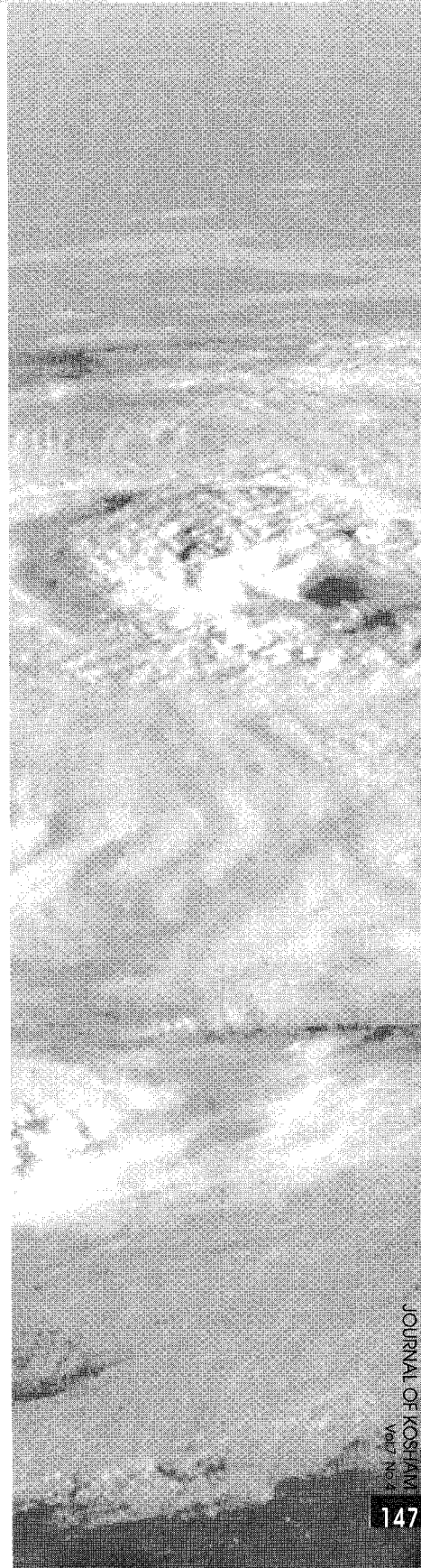


조 휴 상 >>

(주)헤인이엔씨 기술연구소 실장

1. 서론

제14호 태풍 MAEMI는 2003년 9월 6일 15시경 괌섬 북서쪽 약 400km 부근 해상에서 발생한 후 12일 18시경 제주도 동쪽 부근해상을 거쳐 12일 20시경 경상남도 사천시 해안에 상륙하여 13일 02시 30분경에 울진부근을 통해 동해상으로 빠져나가서 온대성저기압으로 소멸하였다(Fig. 1). 태풍 통과시 관측된 최대순간풍속은 제주 60m/s, 여수 49.2m/s로 종전의 최대극값을 경신하였으며, 관측된 해면기압도 여수 956.5hPa, 통영 954hPa, 마산 959hPa로 종전의 최저극값을 경신하였다. 이러한 초대형 태풍 MAEMI로 인한 재해피해액도 5조원을 넘었으며, 특히 마산시의 경우에는 해일로 인한 해안저지대 침수로 30여명의 인명피해와 함께 약 6,000억원의 재산상 피해를 유발하였다. 폭풍해일은 대기의 기압과 바람에 의해 해수면에 가해지는 대기 외력에 대한 연안 천해역의 반응이다. 이러한 동수리역학적 구조를 수치해석하여 내습해일 상황을 재현함에 있어



가장 중요한 것은 첫째, 외력이 되는 해면기압 및 바람장의 정확한 추산과 둘째로는 연안국지의 수심변화와 지형적 형태에 대한 정확한 자료의 반영이다. 본 연구에서는 9월 12일 20시경 태풍 MAEMI의 남해안 상륙직후에 발생되었던 마산만 해일상황에 대하여 태풍해상풍모형을 이용하여 광역, 중간역, 국지역, 세부정밀역 격자망을 형성하고 당시의 폭풍해 일고를 산정한 후, 모형의 검증을 위하여 대상지역인 마산항을 포함한 우리나라의 남해안에 위치한 여수, 통영, 부산, 울산항에서 관측된 결과와도 비교 검토하였다.

2. 태풍매미와 마산만

2.1 태풍 매미의 특성

Fig. 1은 태풍 매미에 대한 경로도이며, 태풍 매미는 2003년 9월 6일 북위 25°, 동경 140°에서 발생하였으며 NW방향으로 이동하기 시작하였다. 이 경로는 9월 11일경에 日本 沖繩의 宮古島를 지나면서 NNE방향으로 바뀌어, 우리나라 해역으로 접근하였

다. 2003년 9월 12일 21시경 태풍은 제주도와 남해안에 통과하였으며, 내습시 태풍의 중심기압은 950hPa이었고, 태풍의 이동속도는 45km/h이었다. 2003년 9월 13일 아침경 태풍 매미는 동해상으로 빠져나갔다.

2.2 마산만

마산만(Fig. 2)은 부산에서 서쪽으로 약 50km지점에 위치하고 있으며, 폭 2.5km에 길이 8km의 타원형의 길쭉한 형태로 형성되어 있다. 또 마산만 입구부는 SSE방향으로 열려 있고, 마산만의 평균 수심은 10m이다. 가덕수로로부터 마산만 입구부까지의 거리는 25km이고, 파랑 내습은 거의 없을 것으로 판단되는데, 그 이유는 만입구부가 협소하기 때문에, 외해에서 유입되는 파랑의 영향을 거의 받지 않기 때문에 아주 뛰어난 천혜의 항구라 생각된다. 실제로 마산시는 도심지만을 끼고 형성되어 있고, 항구는 매립에 의해 해안지역에 건설되어져 있으며, 마산항이 개항한 지난 100년동안 마산만에서는 해일재해에 대한 피해가 거의 없었다.

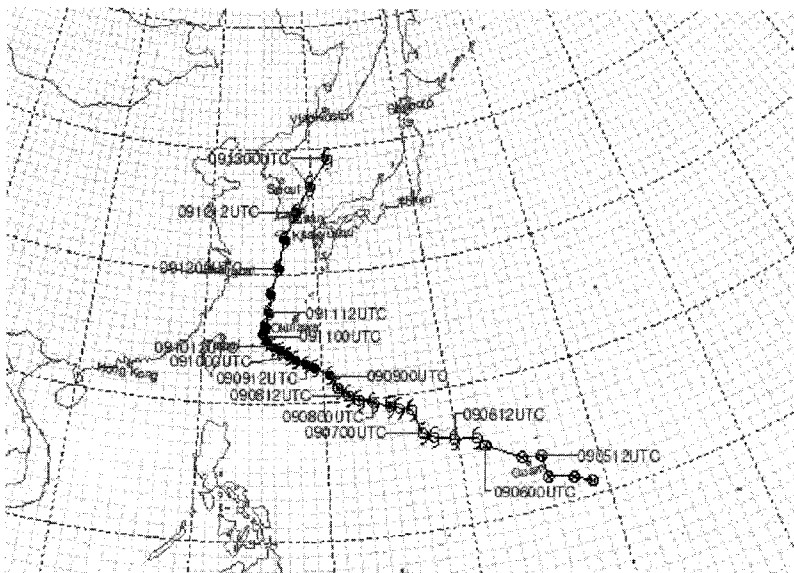


Fig. 1. Typhoon 0314 (MAEMI) track



Fig. 2. Location of Masan Bay

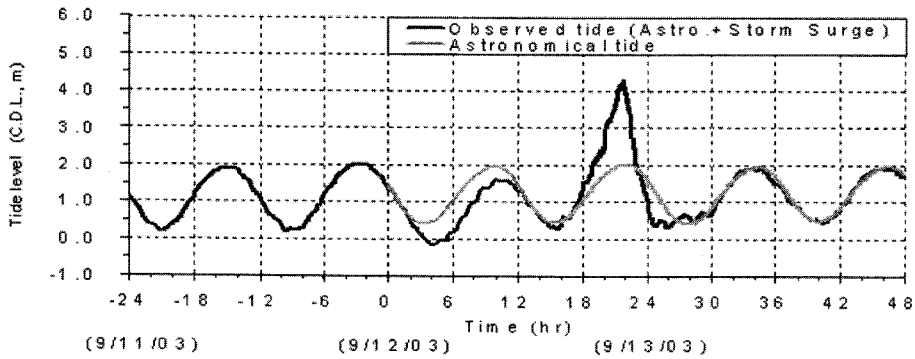


Fig. 3. Time variation of water-level at the Masan Port tide station

2.3 관측수위자료

태풍 매미는 마산만의 서측에 위치한 사천시 부근 해안을 통과하는 동안, 천문조위의 수위는 대조시 고조위 부근까지 상승하였다. Fig. 3는 마산항에서 관측된 수위를 시간변화에 따라 보여주고 있다. 조석은 조석 기록에서 약최고고조위 4.3m에 근접하는 동안 고조위와 폭풍해일이 동시에 발생하였다. 천문조위는 약 2.0m이고, 이때 폭풍해일 편차는 약 2.3m 정도였다.

3. 태풍의 해면기압 및 바람장의 추산

태풍은 그 중심부근에서 시·공간적 변화가 커서 일반 기상분석에 의한 예측이 어렵기 때문에 중심기압, 최대풍 반경, 이동속도 등의 요소들을 파라미터화하여 바람장을 산출하는 태풍모형을 이용하게 된다 (강시환 등 2002).

태풍 매미 통과시 해상의 바람과 기압장은 Chow(1971)에 의해 개발되고, Cardone등(1992)에 의해 수정된 Primitive Vortex Model(PVM)로 추정하였다. PVM의 기본방정식은 움직이는 태풍의

중심을 원점으로 하는 이동식 좌표체계에 대하여 PBL(planetary boundary layer) 내에서 연직평균된 운동방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

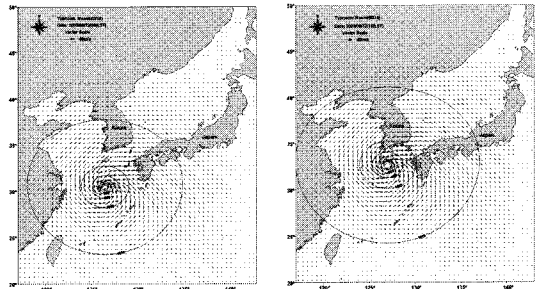
$$\frac{d\vec{V}}{dt} + f\vec{k} \times (\vec{V} - \vec{V}_g) = -\frac{1}{\rho} \nabla p_c + \nabla \cdot (K_H \nabla \vec{V}) - \frac{C_D}{h} |\vec{V} + \vec{V}_g| (\vec{V} + \vec{V}_g) \quad (1)$$

$$p = p_c + \bar{p} \quad (2)$$

$$p_c(r) = p_0 + \Delta p e^{-r/r_0} \quad (3)$$

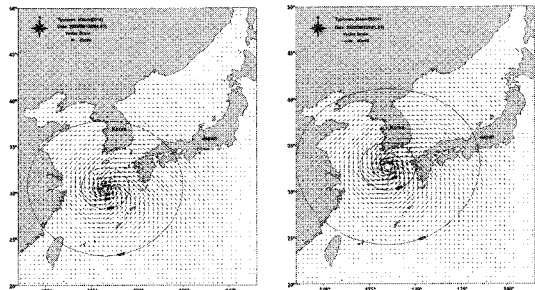
$$f\vec{k} \times (\vec{V}_g + \vec{V}_c) = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} \quad (4)$$

여기서, \vec{V} , \vec{V}_g , \vec{V}_c 는 각각 태풍이동에 대한 상대 풍속, 태풍이동에 대한 상대 지균풍(Geostrophic wind)과 태풍의 이동속도를 나타내며, p_c , \bar{p} 는 각각 태풍에 의한 기압장, 태풍이 없다고 가정했을 때의 종관 기압장이며 r_0 는 태풍의 최대풍 반경이다. 태풍의 이동속도 \vec{V}_c 는 태풍의 중심위치로부터 계산되고, \vec{V}_g 또는 \bar{p} 가 주어지면 식(1)~(4)에서 \vec{V} 를 산출할 수 있다. 여기서, h 는 PBL의 높이이며 태풍중심 부근에서 약 500m의 값을 갖는다(Thompson and Cardone, 1996). 또한, K_H , C_D 는 각각 수평확산계수와 마찰계수이다. 수평확산계수는 Smagorinsky(1963)의 제안식을 사용하였으며, 마찰계수는 Arya(1977)에



(a) 2003/09/12 09LST

(b) 2003/09/12 15LST



(c) 2003/09/12 21LST

(d) 2003/09/13 03LST

Fig. 4. Surface wind and pressure fields simulated by PVM wind model

의해 제안된 식을 사용하였다.

PVM모델에서는 태풍의 중심을 원점으로 하는 이

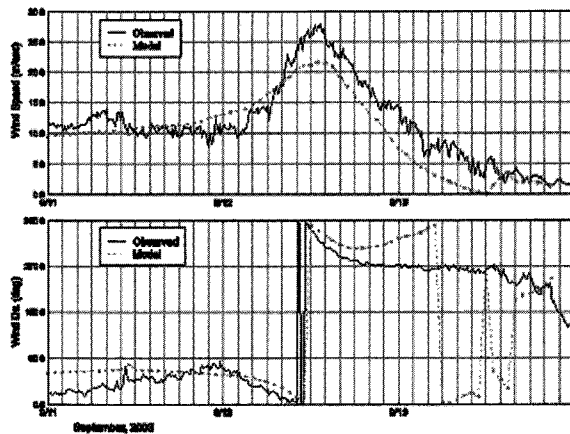
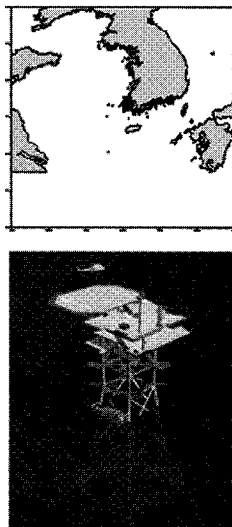


Fig. 5. Comparison of PVM model winds with observations at leodo Ocean Station for typhoon Maemi

동식 격자시스템을 사용하며, 태풍의 중심 부근에서는 2km 간격으로 조밀하게 격자를 설정하고 중심에서 멀어질수록 2배씩 격자간격이 커지도록 한 Nested grid 시스템을 사용하여 태풍중심 부근에서의 바람변화를 정밀하게 계산할 수 있도록 하였다 (강시환 등 2002). Fig. 4는 PVM 모형에 의해 계산된 태풍 “매미”시의 해면기압 및 바람장 분포이며, 여기서 화살표는 바람벡터를 등치선은 풍속의 크기를 나타낸다. Fig. 5에서는 태풍진로에 위치한 동중국해상의 이어도 해양관측기지에서 관측된 바람을 PVM모형의 모의결과와 비교한 것으로 비교적 잘 일치하였다.

4. 폭풍해일 수치모형

태풍 매미 통과시의 폭풍해일은 한국해양연구원의 해일예측모형(한국해양연구원 2000: Kang et al. 2003)을 이용하였다. 모형의 기본방정식은 지구좌표계를 사용하고, 지구의 곡률과 편향력을 고려하였으며, 수직축에 따른 유속분포가 균일하여 수직방향의 가속성분을 무시할 수 있다고 가정하였다. 이러한 가정하에서 구한 수심적분된 연속방정식과 2차원 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (H\bar{U}) + \frac{\partial}{\partial \phi} (H\bar{V} \cos \phi) \right] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = f\bar{V} - \frac{1}{\rho R \cos \phi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} - \frac{\tau_{b\lambda} - \tau_{s\lambda}}{\rho H} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \frac{g}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} = -f\bar{U} - \frac{1}{\rho R} \frac{\partial P}{\partial \phi} - \frac{\tau_{b\phi} - \tau_{s\phi}}{\rho H} \quad (7)$$

여기서, λ , ϕ 와 t 는 위도, 경도, 시간이며, η , \bar{U} 와 \bar{V} 는 수위와 수심평균된 유속성분이다. R 은 지구의 반경, H 는 전수심, ρ 는 해수의 밀도이고, g 는 중력가속도, P 는 압력, f 는 Coriolis계수, τ_s 와 τ_b 는 바람과 바닥마찰에 의한 응력등이다(Park et al. 2000). 폭풍해일에 대한 지배방정식 (5)~(7)은 시간분할법

(fractional step method)을 사용하여 수치해석하였으며, 시간분할법은 이송, 확산과 같은 유체흐름의 복합적인 물리현상이 각각 독립적인 과정의 합으로 설명될 수 있다는 인식이 근거하며, 이 방법은 복잡한 문제를 수치해석하는데 상당히 효과적인 기법이며, 이 방법은 경제적이면서 최적의 방법으로 간주되어 유체역학분야에서는 이미 널리 사용되는 수치해석 수단이다. 확산 및 전파항은 각 방향에 대하여 3대각 행렬을 형성하도록 ADI 음해법으로 유한차분하여 수치해석하며 교호격자체계를 사용하였다. 초기조건으로서 전 계산 영역에 대하여 해수위와 유속을 모두 0으로 설정하는 cold start 기법을 적용하였으며, 폭풍해일 수치모형에서 나타나는 경계조건으로는 육지와 하천, 외해 등으로 나눌 수 있으며, 육지 경계면에서는 유속을 0으로 하는 완전차수조건을 적용하여 경계 처리하였으며, 하천 경계에서는 하천유량으로부터 수심 적분된 유속을 계산하여 적용하고, 외해경계에서는 시간에 따른 적절한 수위의 변화를 경계조건으로 부여되도록 모형을 구성하였다.

계산격자망의 구성은 Fig. 6에서와 같이 광역, 중간역, 국지역, 세부정밀역 등 4단계의 계산격자체계를 수립한 후 상호 유기적인 연계시스템을 구축하여 원하는 지점의 폭풍해일을 산정할 수 있도록 구성하였다(Table. 1 참조).

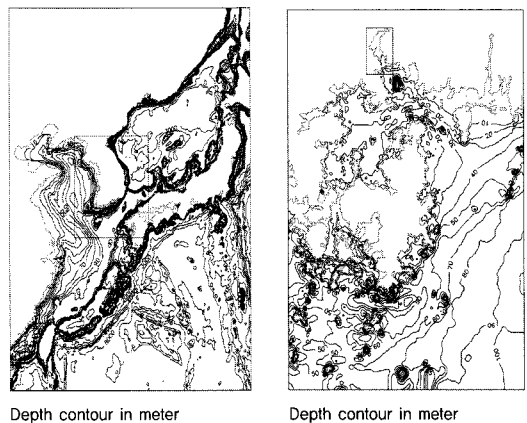


Fig. 6. Nested grid system and depth contour for storm-surge hindcasting model

Table. 1 Nested grid system and boundary condition for a regional, fine-scaled sure model

	광역	중간역	국지역	세부정밀역
격자영역	26°×30°	8°×8	0.67°×0.75°	0.075°×0.091°
격자범위	117°~143°E 20°~50°N	124°~132°E 32°~40°	N128.33°~129.00° 34.50°~35.25°	128.56°~128.63°E 35.12°~35.21°N
격자간격	1/12°	1/60°	250m	50m
격자수	313×361	481×481	242×330	139×205
경계입력조건	정역학 방정식	광역결과 이용	중간역결과 이용	국지역결과 이용

태풍해일모형에 의해 예측된 결과와 우리나라의 남해안에 위치한 5군데의 검조소(Fig. 7)의 예측결과를 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8에 나타난바와 같이 우리나라 남해안의 주요 검조소인 여수, 통영, 마산, 부산, 울산에서 관측된 현장결과와 모형의 예측결과가 대체적으로 잘 일치하는 것으로 나왔다. Fig. 9는 태풍해일모형을 이용한 마산만내에서의 최대해일고의 분포이며, 계산된

최大海일고는 226cm로서, 관측치인 230cm와 잘 일치하였다.

5. 결론

태풍 매미는 2003년 9월 12일 21시부터 약 2시간에 걸쳐 마산시에 가장 심각한 폭풍해일로 인한 해일 침수 재해를 가져왔다. 마산만에서 발생한 해일재해는 1900년 초에 마산항이 개항한 이래 역사적 최대 재해 기록이다. Yasuda(2005)등에 의해 조사된 도시침수 흔적조사에 의하면 마산시의 연안 침수 수심은 4.1~4.4m의 범위로 나타났다. 또한, 마산어항에서의 조석 기록은 해수면 높이가 약최고고조위 4.3m의 기준선 이상으로 도달된 것으로 나타났다. 피해당시 대조시 고조위와 폭풍해일이 동시에 발생하였다. 폭풍해일의 편차는 약 2.3m로 나타났다. 이는 이때 천문조위가 2.0m였기 때문이다. 마산시 연안에서의 최대 폭풍해일고의 추산 결과에서는 Fig. 9에서 나타난 바와 같이 2.1~2.26m 분포 범위로 나타났다. 이 결과는 마산어항에서 관측된 최대해일고와 매우 근접하였다.

감사의 글

본 연구는 “태풍 매미에 의한 해일피해 원인조사 및 재해방재대책” 용역사업에 의해 수행된 결과의 일부이며, 연구 지원해 주신 마산시에 감사드립니다.

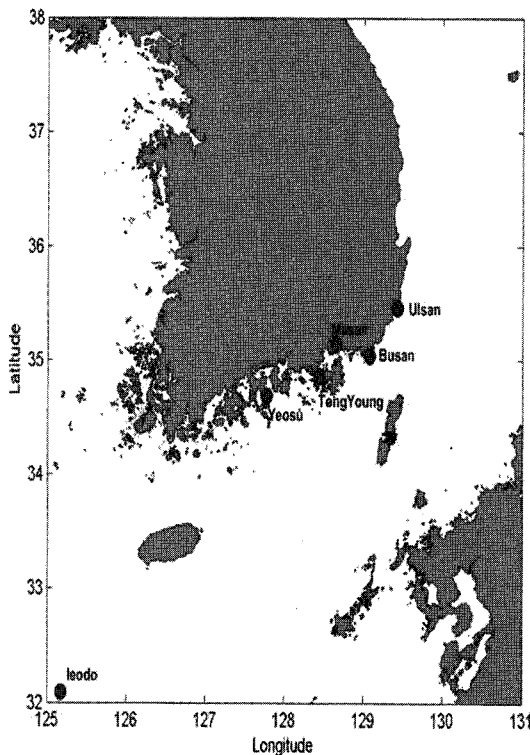


Fig. 7. Major tidal stations in the south coast of Korea

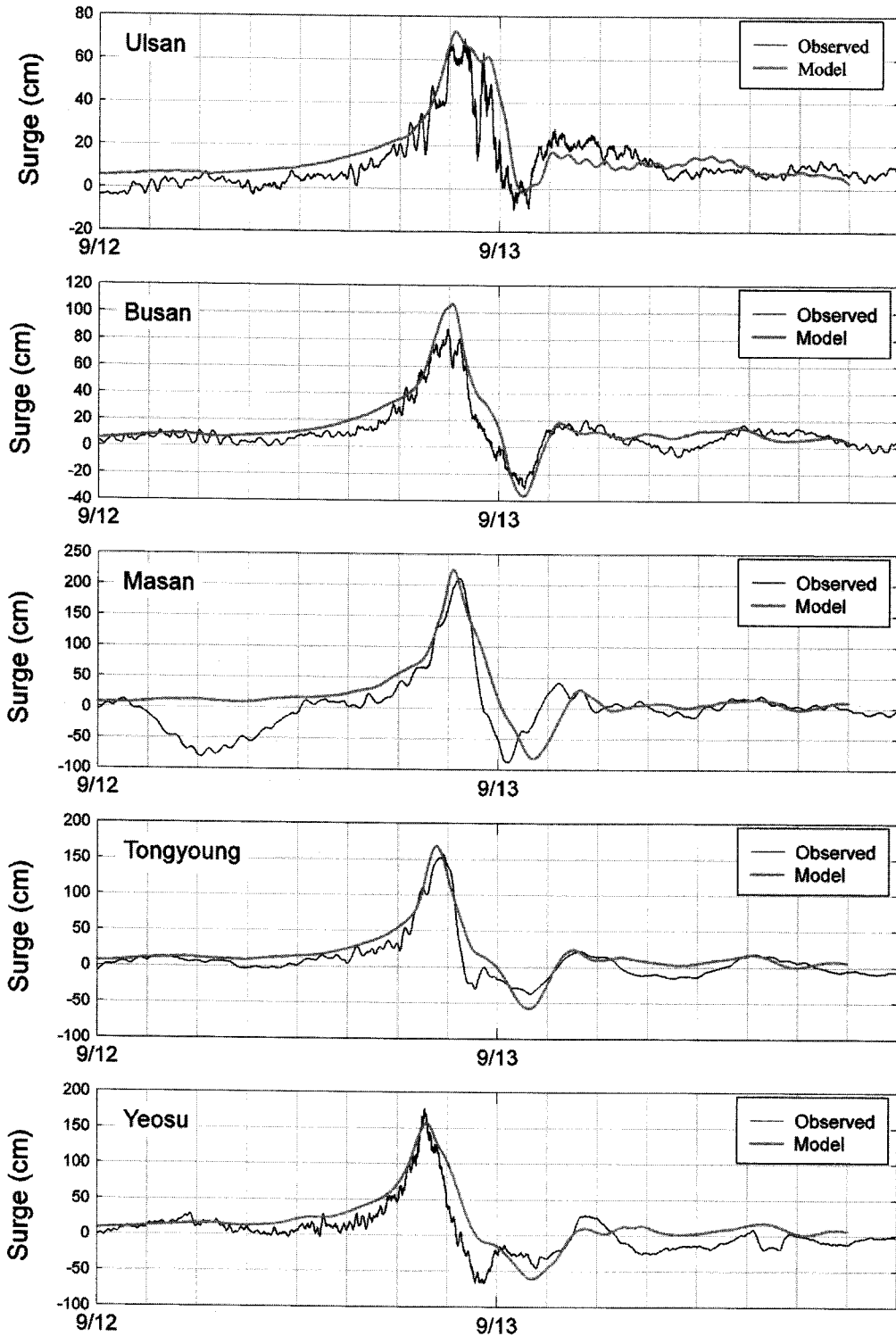


Fig. 8. Comparisons of the hindcasting results of storm surge model with the observed data at major tide stations in the south coast.

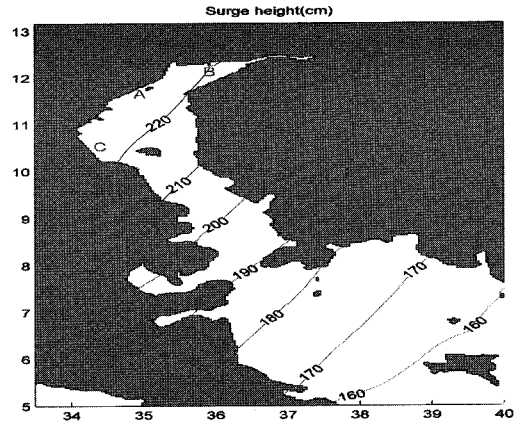
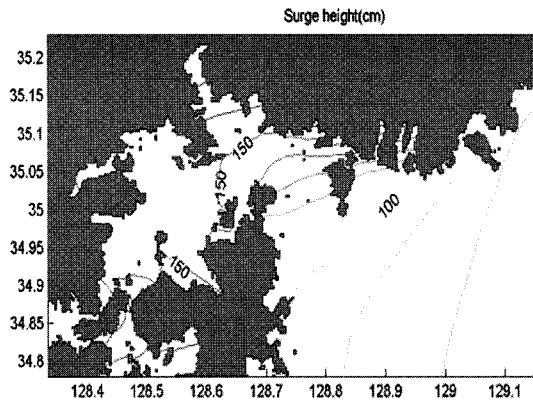


Fig. 9. The maximum surge heights(in cm) in Masan Bay, hindcasted for typhoon MAEMI

참고문헌

1. 강시환, 전기천, 박광순, 방경훈, 2002a: 해상풍 관측자료에 근거한 태풍 해상풍 모형간의 상호비교. 한국해양학회지, Vol. 7, No. 3, 100-107.
2. 한국해양연구원 2000: 해상·연안재해 대응기술 개발. 연구보고서(N2-02-01-A-02) 과학기술부 pp.397.
3. Kang, S.W., K.C. Jun, K.S. Park, and D.Y. Lee, 2003: Long-term Estimation of Storm Surge in the Korean Coast, Coastal Hazard 2003, Japan, G1-G8.
4. Arya, S. P. S., 1977. Suggested revisions to certain boundary layer parameterization schemes used in atmospheric circulation models, Mon. Wea. Rev., 105(2): 215-227.
5. Cardone, V.J., C.V. Greenwood, and J.A. Greenwood, 1992: Unified program for the specification of hurricane boundary layer winds over surfaces of specified roughness, Contract Rep. CERC-92-1, U.S. Army Engrs. Wtrwy. Experiment Station,

Vicksburg, Miss.

6. Chorin, A. J., 1968. Vortex Sheet approx. of boundary layer, J. of Comput. Phys., 27: 428-442.
7. Chow, S.H, 1971: A study of the wind field in the planetary boundary layer of a moving tropical cyclone, MS thesis, School of Engrs. and Sci., New York Univ., N.Y.
8. Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiment with the primitive equation. I: The basic experiment. Monthly Weather Review, 91(3): 99-164.
9. Thompson, E. F., and V. J. Cardone, 1996: Practical modeling of hurricane surface wind fields, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 122(4): 195-205.
10. Yasuda, T., T. Hiraishi, H. Kawai, K. Nagase, S.W. Kang, and W.M. Jeong, 2005: Field survey and computation analysis of storm surge disaster in Masan due to Typhoon Maemi, Proceeding of Asian and Pacific Coasts 2005, Jeju, Korea.