

광양만에서의 2003년 태풍 “매미”에 의한 폭풍해일

김현성* · 이석우
(주)한국해양과학기술

Storm Surge Caused by the Typhoon “Maemi” in Kwangyang Bay in 2003

HYUN-SEONG KIM* AND SUK-WOO LEE
Korea Ocean Science Engineering Corp., Huam-dong Yongsan-gu Seoul 140-901, Korea

2003년 9월 12일에 태풍 “매미”가 남해안으로 상륙하면서 발생한 광양만의 해일고를 산정한 결과, 고조위 편차는 93~108 cm이고, 최대 조위편차는 176~196 cm로 나타났다. 최대 조위편차를 요인별로 분석하면 기압강하에 의한 해면상승이 59 cm, 섬진강 홍수로 인한 수위 상승이 4~5 cm, 그리고 외해로부터 해일파의 전파 및 강풍에 의한 해면상승이 113~132 cm이다. 이번에 광양항(PT3)에서의 실측 최고조위 460 cm는 광양제철소 부지 설계시에 추정한 100년 빈도 설계조위 455 cm 보다 5 cm 높고, 1987년 태풍 “셀마” 통과시에 기록된 기왕 고극조위 445 cm 보다 15 cm 높은 조위로서, 과거 20년 간의 최대 고극조위를 나타냈다.

The surges caused by the typhoon “Maemi” which struck the southern coast of Korea are analysed in Kwangyang Bay on September 12, 2003. The deviations of the high water level were 93~108 cm and the maximum deviations of the water level (maximum surges) were 176~196 cm in Kwangyang Bay during the typhoon “Maemi”. The major parameters of the maximum deviations of the water level are as follows: Analysis shows that the pressure drop increased the sea level by 59 cm, the flood of the Sumjin River by 4~5 cm and the external surge propagation and wind setup by 113~132 cm. During the typhoon “Maemi”, the highest high water recorded in Kwangyang Port (PT3) is 460 cm, which is higher by 5 cm than the highest high water (455 cm) with return period of 100 years estimated in planning the Kwangyang steelworks (POSCO) grounds and higher by 15 cm than the observed highest high water (445 cm) recorded during the typhoon “Thelma” on 1987. Thus, the highest high water caused by the typhoon “Maemi” is higher than the extreme highest high water for the last 20 years in Kwangyang Bay.

Key words: Typhoon, Maemi, Surge, Highest high water, Kwangyang Bay

서 론

해면 변동을 일으키는 요인은 달과 태양의 인력에 의한 주기적인 승강운동을 나타내는 천문조(astronomical tide)와 폭풍이나, 태풍 및 기압 변화 등에 의한 폭풍해일(storm surge)로 구분되며, 폭풍해일은 흔히 기상조(meteorological tide)라고 불린다. 폭풍해일의 발생 원인은 크게 기압 강하에 따른 해면 상승, 즉 기압 1 hPa 하강에 따라 약 1 cm의 해면 상승 및 바람에 의한 해수유동과 해안으로의 해수 충적을 들 수 있다. 또한 발생된 해일이 전파되는 과정에서 지형, 수심, 지구자전 등의 영향을 받기도 하고, 조석이 우세한 해역에서는 조석과의 비선형 상호작용을 통해 변형되며, 특정 지형조건 하에서는 공진 현상 등에 의해 증폭되기도 한다. 이 외에 반폐쇄성 내만이나 하구에서는 태풍에 수반된 집중강우가 일

시적인 해면 상승을 증가시키기도 한다. 일반적으로 태풍과 같은 열대성 저기압에 의한 폭풍해일은 저기압의 중심부에서 최대의 해일고를 보이나 그 전후에도 강한 해면교란이 생기는 경우가 많다 (오 등, 1988; 이, 1997; 최, 1999).

한국 서해안은 동계의 북서 계절풍과 하계의 태풍에 의해 역사적으로 빈번한 범람이 있었다. 특히, 1997년 8월의 백종사리 시에 태풍 “위니”가 황해를 통과하면서 서해안 전역에서 고극조위를 기록하였고, 많은 해안역에서 침수 피해를 일으킨 바 있다. 한편, 남해안에서도 1959년의 태풍 “사라”, 1987년의 태풍 “셀마” 등의 대형 태풍 내습시에 대규모 침수가 발생한 바 있다.

2003년 9월 12일에는 태풍 “매미”가 남해안 사천만으로 상륙하면서 광양만을 포함한 경상남도 일대 해안에 대규모 해일을 발생시키고, 많은 지역에서 최대 해일고 및 최고조위를 기록하였다. 해일 조사·연구의 궁극적인 목적이 정확한 사전 예보를 통하여 해일 피해를 최소화하는데 있다면, 우선 과거 해일에 대한 철저한

*Corresponding author: gkimhs@hanmail.net

기록·조사·분석을 통하여 과학적인 해일 예보를 위한 기초자료들을 축적하여야 할 것이다. 본 고에서는 광양만을 대상으로 태풍 “매미” 통과 시의 기상, 하천수리 및 조석 자료를 정리하여 해고와 해일 원인에 대한 초기 분석과 고극조위 극치분석 결과를 소개한다.

기상 개황

태풍 “매미”

태풍의 진로: 제14호 태풍 “매미”는 2003년 9월 6일 15시경에 괌 북서쪽 약 400 km 해상(16.0°N , 141.5°E)에서 열대성 저기압으로 발생하여 느리게 북서진하다가, 9일 09시경에 태풍으로 발달하였으며, 11일 09시경에 중심기압 910 hPa로 최저기압을 나타냈다. 12일 06시경부터 북북동진하면서 빠른 속도로 진행하였는데, 18시경 제주도 성산포 동쪽을 거쳐 20시경에 경상남도 사천시 해안으로 상륙하였다. 이후 계속 북북동진하여 13일 02시 30분에 경상북도 울진 해안을 거쳐 동해로 진출하였다(기상청, 2003). Fig. 1은 태풍 “매미”的 진로도이다.

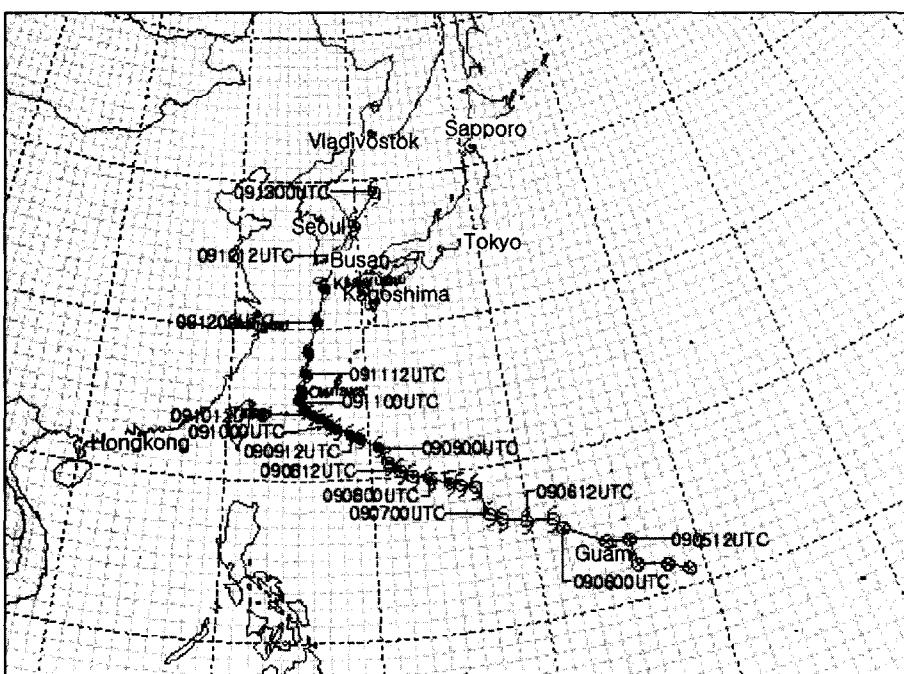
해면 기압: 태풍 “매미”가 30°N 을 지날 때의 중심기압이 940 hPa 이었고, 12일에 경남 사천시 해안에 상륙할 때의 중심기압은 950 hPa이고, 통영 954 hPa(20시 50분), 여수 956 hPa(19시 51분), 마산 959 hPa(21시 37분)로 각각 극값을 경신하였다. 태풍은 일본 오키나와 부근 해상까지 진출하면 세력이 점차 약해지지만 “매미”는 한반도를 지날 때에도 강한 세력을 유지하여 동해로 빠져나갈 때에도 950 hPa 수준을 유지하였다. 이처럼 에너지원인 수증기를 공급받지 못하는 내륙에 들어와서도 “매미”가 강한 세력을 유지한 것은 이해적인데, 이는 한국 남해의 수온이 28°C 정도로 평년보다 $1\sim2^{\circ}\text{C}$ 높아서 “매미”에게 수증기를 공급하였기 때문으로 보고 있다.

바람: 태풍 통과시 최대순간풍속(하루(00~24시)중 바람이 순간적으로 가장 세게 불었던 때의 풍속을 말함)은 제주에서 12일 18시 11분에 60.0 m/s, 북제주군 한경면 고산에서 12일 16시 10분에 역시 60.0 m/s로서 1904년 기상 관측 이래 극값을 경신하였다. 종전의 극값은 전라남도 흑산도에서 2000년 8월 31일의 태풍 “파라피룬” 통과 시에 기록된 58.3 m/s이었다. 여수의 최대순간풍속은 18시 57분에 49.2 m/s로 1942년 기상 관측 이래 1959년 9월 17일의 태풍 Sarah 통과 시에 기록된 46.1 m/s의 종전 극값을 경신하였다. 한편, 최대풍속(하루(00~24시)중 임의의 10분간 평균으로 가장 세게 불었던 풍속을 말함)은 제주도 고산에서 51.1 m/s, 제주에서 39.5 m/s, 여수에서 35.9 m/s로서 각각 43.7 m/s, 36.1 m/s, 35.5 m/s인 종전 극값을 경신하였다. 풍속이 극값을 경신한 주원인은 태풍의 중심기압이 낮았고, 북쪽에 차가운 대류성 고기압이 위치하여 태풍과 고기압간의 기압경도력이 강하였기 때문이다.

파랑: 한국해양연구원이 부산신항 동방파제 전면에서 파랑 관측한 결과에 의하면 유의파고(H_s)의 최대치는 12일 21시의 8.0 m, 최대 유의파 주기($T_{1/3}$)는 16.6초, 최대파고(H_{max}) 10.8 m이고, 동방파제에 의한 반사파를 제외한 입사파의 최대 유의파고(H_s)는 7.4 m로 보고하고 있다(Fig. 2). 또한, 울산신항 전면 수심 50 m 지점에서 12일 23시에 최대 유의파고(H_s) 9.4 m, 최대파고(H_{max}) 14.7 m가 관측되었다(최, 2003).

거제도에 설치한 기상청 부이에 의한 파랑 관측결과는 12일 21시에 최대 유의파고(H_s)가 7 m이고 주기($T_{1/3}$)는 16.7초이다. 최대파고(H_{max})는 16 m에 이른 것으로 보고하고 있다. 서울대학교 해양연구소가 묵호항 동측에 설치한 ESROB4 부이에서는 13일 04시에 유의파고(H_s) 4 m, 최대파고(H_{max}) 9 m가 관측되었다.

기상청은 3세대 해파모형을 이용하여 약 20 km 간격의 격자체계에서 3시간 간격으로 해파 예보를 실시하고 있다. 이 모형 결과에 의하면 태풍 경로를 따라 최대 유의파고(H_s)가 7.5 m에 이르는



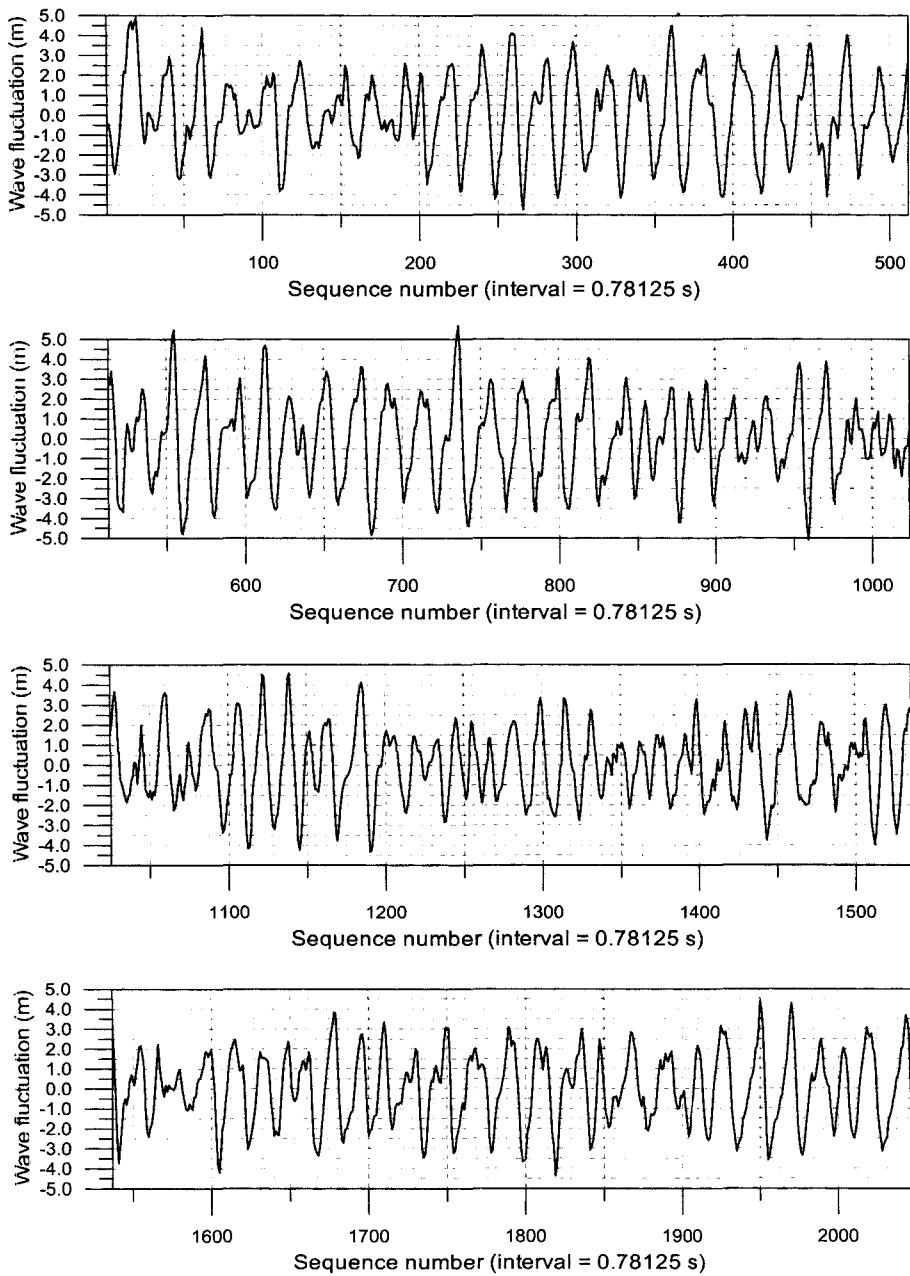


Fig. 2. Records of observed wave fluctuation in Buasn New Port when the typhoon “Maemi” is passing through the Korean Peninsula (KORDI, 21:00, 12 September, 2003).

것으로 제시되고 있어서, 한국해양연구원의 부산신항 관측치와 일치한다.

강수량: 9월 11일부터 13일 13시까지 지역별 강수량은 경상남도 100~450 mm, 강원도 20~400 mm, 전라남도 70~300 mm, 제주도 60~270 mm등이다. 국지적으로 보면 남해(452.5 mm), 대관령(397.0 mm), 강릉(308 mm), 고흥(303.0 mm)에서 300 mm 이상을 기록하였다.

광양만의 기상

태풍이 통과한 9월 12일과 13일에 광양만의 외해 경계에 위치하는 여수기상대에서 관측한 해면기압과 풍향 및 풍속, 그리고 섬진강 집수역의 중앙에 위치하는 남원기상관측소에서 관측한 강수

량의 시계열 변화를 Fig. 3에 도시하였고, 관측소의 위치는 Fig. 4에 표시되어 있다.

기압: 여수항에서의 해면기압은 12일 오전에 1,005 hPa 내외를 유지하다가 13시 이후부터 급격히 감소하여 19시 51분에 956 hPa로 최저를 기록하였는데, 최저해면기압이 발생한 시간은 태풍 중심이 사천만에 상륙한 시간과 일치한다. 이후 급격하게 상승하여 13일 03시에 1,000 hPa를 회복하였고, 계속 완만하게 상승하여 24시에는 1,013 hPa로 정상 해면기압을 나타내었다(Fig. 3(a)).

바람: 여수항에서의 풍향은 태풍이 사천만 해안에 상륙하기 직전인 12일 19시까지 NE~E의 범위이고 주로 ENE를 나타내었으나, 상륙 후인 22시부터 풍향이 반대로 되어 WSW~WNW를 나타내었다(Fig. 3(b))). 이러한 풍향의 변화는 바람이 태풍의 눈을 향

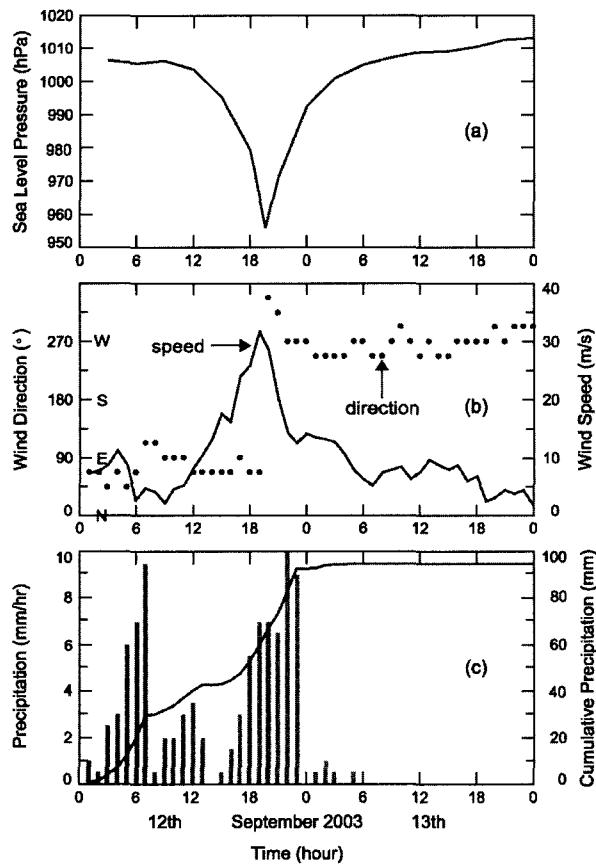


Fig. 3. Time series of the sea level pressure, wind in Yeosu and the precipitation in Namwon.

하여 반시계방향의 나선형으로 불어가는 현상, 그리고 태풍이 광양만과 여수해안의 동쪽인 사천만으로 상륙한 것을 고려하면 쉽게 설명될 수 있다.

매 시별 풍속은 태풍이 상륙하기 직전인 12일 19시를 중심으로 12일 13시부터 13일 04시까지 10 m/s 이상, 그리고 12일 17시부터 21시까지는 20 m/s 이상을 기록하였다(Fig. 3(b)). 전술한 바와 같이 최대순간풍속은 18시 57분에 49.2 m/s를 기록하였고, 최대 풍속은 35.9 m/s이다. 풍속이 해면기압과 반비례하여 증감하는 양상이 뚜렷하게 나타난다.

강수량: 태풍 통과시 남원기상관측소에서 관측한 섬진강 유역의 강수량은 12일 92.5 mm와 13일 2.5 mm의 총 95.0 mm로서 태풍의 위험반원에 속했던 경상·강원도 지역에 비해 상대적으로 적었다. 시간당 강수량은 12일 22시에 10.0 mm/hr로서 최대를 나타내었고, 태풍이 상륙하고 4시간이 지난 13일 00시부터는 강수량이 1.0 mm/hr 이하로 급격하게 감소하였다(Fig. 3(c)).

해일 분석

해일의 일반성

해일은 일종의 장파이기 때문에 수위가 상승하는 양의 해일뿐만 아니라 수위가 하강하는 음의 해일이 발생할 수 있다. 태풍은 해면의 상승 범위가 넓고 상대적으로 느리게 이동하기 때문에 음의 해일이 뚜렷하게 나타나지 않을 수도 있으나, 하나의 파원을 가지는 지진해일은 동심원적인 과정이 뚜렷하기 때문에 해안에서 현저한 양의 해일과 음의 해일이 반복적으로 나타난다. 음의 해일이 클 경우에는 임해 발전소의 취수가 중단되는 상황이 발생할 수

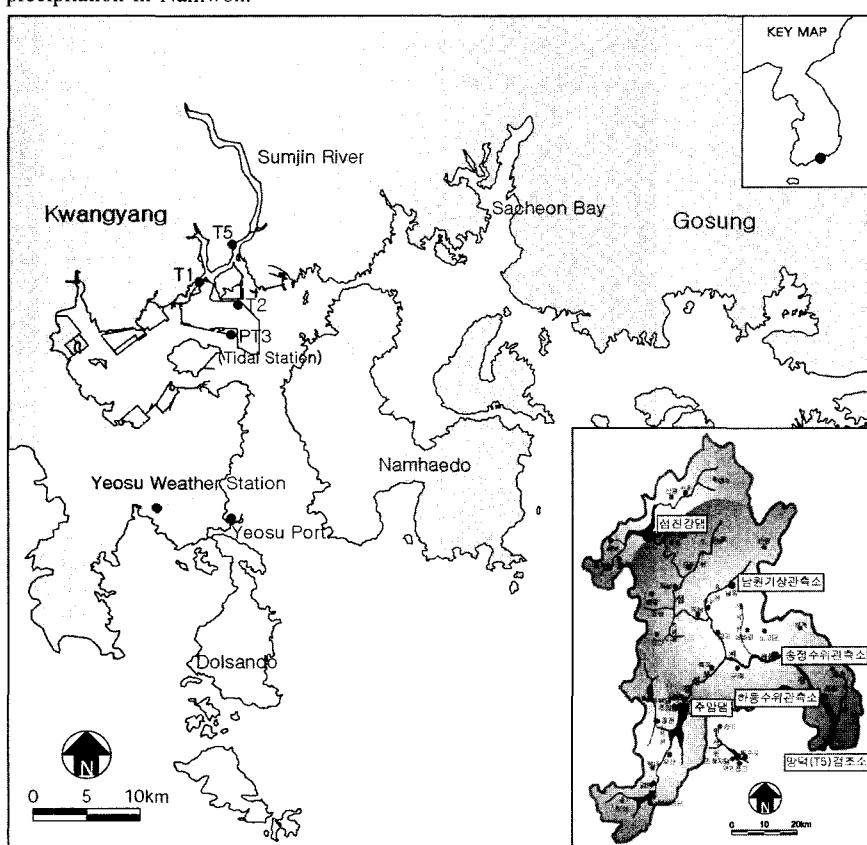


Fig. 4. Locations of Dams and weather, water level and tide stations.

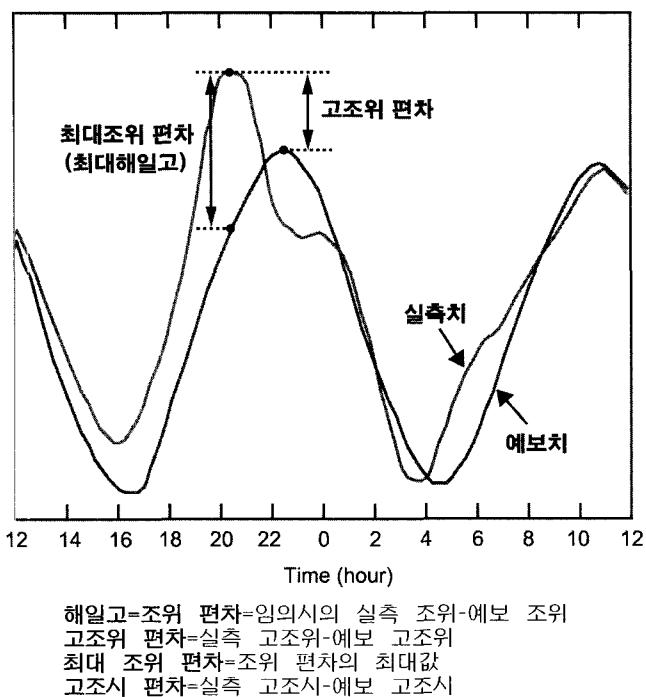


Fig. 5. The deviation of the high water level and the maximum deviation of the water level (maximum surge).

도 있다. 해일고(surge height)는 해일현상으로 발생한 해면 변화량으로 정의할 수 있다. 따라서, 엄밀한 의미에서 실측 조위에서 예보 조위를 뺀 조위 편차를 해일고로 보아야 한다. 그러나, 조차가 큰 해역에서는 조시가 약간 달라도 큰 조위 편차를 유발할 수 있는 문제가 있다. 한편, 실측 고조위에서 천문조에 의한 예보 고조위를 뺀 값을 고조위 편차라 하는데, 고조위 편차 산정시 예보 고조시와 실측 고조시의 시간(위상) 차는 무시한다. 본 고에서 사용한 용어의 정의는 Fig. 5와 같다.

한국 남·동해안의 해일

국립해양조사원이 운영중인 검조소중 제주도를 포함한 남해안 9개소와 동해안 3개소 및 (주)포스코가 운영하는 광양항 검조소등 총 13개 검조소의 조위 관측 자료로부터 태풍 “매미” 통과시의 해일고를 산정하였다. 고조위 편차, 고조시 편차와 임의 시 최대 조위 편차는 Table 1에 제시하였다.

남해 서부역: 추자도, 완도, 거문도와 제주도에서는 태풍이 제주도를 통과하기 이전인 12일 10~12시 사이에 해일이 발생하였는데, 고조위 편차는 30 cm 이하이고 고조시 편차도 -23~+24분에 불과 하다. 고조위 편차가 높지 않은 것은 태풍이 제주도를 통과하여 사천만으로 상륙하기 전인 16~20시 사이에 이 해역 조석은 저조에서 창조 중반에 해당하기 때문에, 태풍 통과전의 고조위가 다소 상승하고 태풍 통과후의 고조위는 반대로 음의 해일을 나타내었다. 그러나, 태풍이 각 검조소를 통과할 시점에 나타난 최대 조위 편차는 제주도와 완도에서 64~71 cm, 거문도에서 112 cm를 기록하였다.

남해 중부역: 광양과 여수의 고조위 편차는 각각 95 cm와 43 cm로서 예보 고조시의 약 2시간 전에 발생하였다. 광양의 고조위 편차가 여수보다 50 cm 이상 큰 것은 해일파가 여수 해안을 거쳐 수심이 얕은 광양만으로 파급되면서 증폭된 것으로 판단된다. 광양과 여수에서의 최대 조위 편차는 예보 고조시 약 2시간 전에 태풍이 통과 할 때 해일이 발생하여 최고조위를 나타내면서 각각 176 cm, 137 cm로서 고조위 편차보다 훨씬 큰 값을 기록하였다.

남해 동부역: 남해동부 해역에서 고조위 편차가 최대로 나타났는데, 통영 143 cm, 마산 248 cm, 부산에서 77 cm를 기록하였다. 예보 고조시는 통영과 마산이 동시에 22시 03분으로 예보되어 있으나, 실측고조시는 통영에서 20시 45분이고, 마산에서 21시 48분으로 통영에 비해 마산이 약 1시간 늦게 나타났다. 이는 통영이 어느 정도 의해에 개방되어 있기 때문에 태풍 통과 직후 해일고가 최대를 나타낸 후 감소한 반면에, 반폐쇄성 해안의 끝에 위치한 마산은 지형적 요인에 의한 해일파의 증폭과 남풍 계열의 바

Table 1. The deviations of the high water level, the differences of the high water time and the maximum deviations of the water level (maximum surges) at the southeastern Korean coast during the typhoon “Maemi” (12~13 September, 2003).

검조소	고조시 및 고조위 편차						최대 조위 편차 (cm)			
	실측치 (①)		예보치 (②)		편차 (①-②)		일시 (일/시:분)	실측치 (③)	예보치 (④)	편차 (③-④)
	조시 (일/시:분)	조위 (cm)	조시 (일/시:분)	조위 (cm)	조시 (분)	조위 (cm)				
추자도	12/ 12:00	295	12/ 11:52	285	+8	+10	12/ 16:44	130	83	+47
제주	12/ 11:23	268	12/ 11:23	249	0	+19	12/ 16:19	151	80	+71
서귀포	12/ 10:58	299	12/ 10:34	272	+24	+27	12/ 14:30	174	110	+64
완도	12/ 10:59	368	12/ 10:51	363	+8	+5	12/ 17:10	132	61	+71
거문도	12/ 10:02	319	12/ 10:25	315	-23	+4	12/ 17:36	182	70	+112
광양	12/ 20:30	460	12/ 22:28	365	-118	+95	12/ 20:00	435	259	+176
여수	12/ 20:00	393	12/ 22:21	350	-141	+43	12/ 20:00	393	256	+137
통영	12/ 20:45	422	12/ 22:03	279	-78	+143	12/ 20:45	422	252	+170
마산	12/ 21:48	439	12/ 22:03	191	-15	+248	12/ 21:48	439	191	+248
부산	12/ 21:00	211	12/ 21:34	134	-34	+77	12/ 21:00	211	132	+79
울산	12/ 21:04	120	12/ 20:59	68	+5	+52	12/ 22:01	116	63	+53
포항	12/ 22:40	82	12/ 17:10	31	+330	+51	12/ 22:59	82	19	+63
후포	13/ 02:20	75	13/ 05:29	29	-189	+46	13/ 00:48	72	18	+54

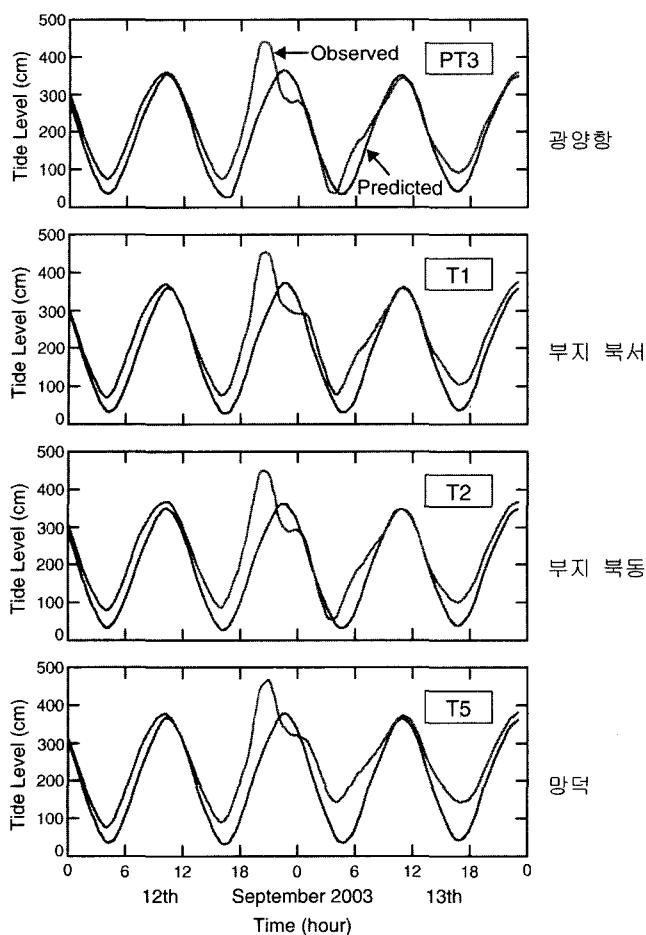


Fig. 6. The tidal curves of each tide station in Kwangyang Bay during the typhoon “Maemi”.

람에 의한 해수 충적효과가 중첩되어 태풍 통과 후 1시간에 해일이 나타났다. 또한, 부진동 효과에 의하여 해일파가 증폭되었을 가능성이 대하여도 추후 면밀한 분석이 필요하다. 부산은 태풍 중심에서 떨어져 있고 외해에 비교적 개방되어 있기 때문에 77 cm의 고조위 편차를 나타내었다. 통영, 마산 및 부산의 고조위 편차는 최대 조위편차와 대체로 일치한다.

동해 남부역: 울산, 포항, 후포에서는 고조위 편차가 50 cm 내외를 나타내었고, 최대 조위 편차는 고조위 편차보다 약간 큰 50~60 cm 정도이다.

Table 2. The deviations of the high water level, the differences of the high water time and the maximum deviations of the water level (maximum surges) in Kwangyang Bay during the typhoon “Maemi” (12 September, 2003).

검조소	고조시 및 고조위 편차						최대 조위 편차 (cm)		
	실측치 (①)		예보치 (②)		편차 (①-②)		시간 (시:분)	실측치 (③)	예보치 (④)
	조시 (시:분)	조위 (cm)	조시 (시:분)	조위 (cm)	조시 (분)	조위 (cm)			
PT3	20:30	460	22:28	365	-118	+95	20:00	435	259
T1	20:32	470	22:39	372	-127	+98	20:00	442	246
T2	20:32	470	22:32	362	-120	+108	20:00	443	249
T5	20:35	471	22:38	378	-123	+93	20:00	437	253

광양만의 해일

태풍 “매미”에 의한 해일

(주)포스코가 운영하는 광양항 검조소 등 4개 검조소의 조석 관측 자료로부터 태풍 “매미” 통과시 광양만의 해일고를 산정하였다. Fig. 6은 9월 12-13일의 예보 조석과 실측 조석을 나타낸 것이고, 고조위 편차와 고조시 편차 및 최대 조위 편차는 Table 2에 제시하였다.

광양만 4개 검조소의 최대 조위편차는 태풍이 사천만으로 상륙한 시점인 12일 20시에 동시적으로 발생하였으며, 그 값은 176~196 cm이다. 이 발생 시간은 예보 고조시의 약 2시간 30분 전으로서, 여수기상대에서 최저 해면기압이 나타난 10분 후이고 최대풍속이 나타난 1시간 후에 해당한다. 각 검조소의 고조위 편차는 93~108 cm로 큰 차이가 없으며, 광양제철소 부지 북동(T2)에서 108 cm로 가장 크고, 망덕(T5)에서 93 cm로 가장 작다. 섬진강 하구인 망덕의 해일고가 남측보다 더 낮은 것은 섬진강 유출수가 해일고 상승에 거의 영향을 미치지 않았음을 시사하며, 이에 대한 검토 결과는 후술하였다.

섬진강 홍수가 해일에 미친 영향

섬진강 상류 댐의 방류량과 수위 자료 및 광양만의 조위 자료로부터 태풍 “매미” 통과 시 섬진강 유량이 광양만 해일고에 미친 영향을 검토하였다. 섬진강댐과 주암댐의 방류량은 Fig. 7과 같다.

태풍 통과 기간 중 두 댐으로부터의 첨두 방류량은 1,220 m³/s 이지만 이는 13일의 방류량이고 12일 03시 이전에는 약 300 m³/s, 04시부터 15시까지는 500~600 m³/s에 불과하다. 섬진강댐과 주암댐이 망덕으로부터 각각 약 140 km와 80 km 상류에 위치하므로 그 영향이 하구에 미치려면 20시간 이상이 소요될 것으로 추정되며, 따라서 댐 방류량은 12일 20시경에 발생한 광양만의 해일에는 거의 영향을 미치지 않았을 것으로 판단된다.

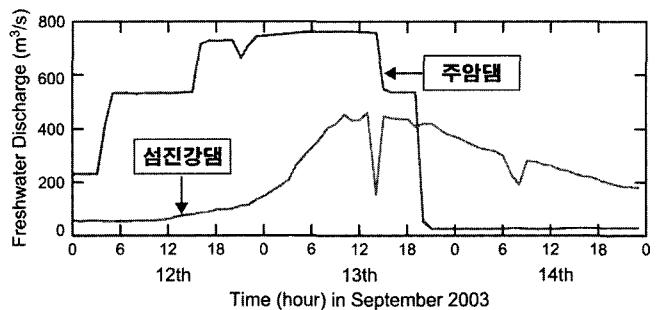


Fig. 7. Time series of the freshwater discharge of the Sumjin River and Juan Dams during the typhoon “Maemi”.

Table 3. The high water levels in Kwangyang Bay to discharges of the Sumjin River by the numerical model. (unit: cm)

섬진강 유량 (m ³ /s)	PT3 (광양항)	T1 (부지북서)	T2 (부지북동)	T5 (망덕)
120	369	376	371	376
1,200	373(+4)	381(+5)	376(+5)	381(+5)
2,400	373(+4)	381(+5)	376(+5)	382(+6)
4,800	372(+3)	384(+8)	375(+4)	399(+23)
7,200	372(+3)	392(+16)	376(+5)	438(+62)
9,600	371(+2)	406(+30)	383(+12)	483(+107)
12,000	371(+2)	425(+49)	397(+26)	538(+162)

망덕으로부터 약 40 km 상류에 위치한 송정 수위관측소의 수위는 12일 00시 2.13 m에서 21시 7.85 m로 점차 상승하였는데, 송정 하류역의 유속을 1.0 m/s로 가정하면 송정을 통과한 유량이 망덕의 조위에 영향을 미치는데 걸리는 시간은 약 10시간으로 추정된다. 따라서, 송정에서 10시의 유량이 20시경에 발생한 광양만의 해일에 직접적인 영향을 주었다고 볼 수 있다. 프랑스 SOGREAH가 섬진강 수치모형실험을 수행하여 도출한 송정에서의 수위-유량 관계식에 의하면 10시의 수위 3.9 m는 약 800 m³/s의 유량에 해당한다(포항종합제철주식회사, 1983a).

한편, (주)한국해양과학기술이 섬진강 영향을 고려하여 광양만 전역을 포함한 조석 수치 모형실험을 수행하여 섬진강 유량별로 광양만 각 검조소의 고조위를 산정한 결과가 Table 3에 제시되어 있다. 12일 10시에 송정에서 추정된 유량 800 m³/s에 송정 하류에서 추가되는 유량을 가산하면 12일 20시에 섬진강 하구의 유량은 1,500 m³/s 정도로 추정된다. Table 3에 의하면 조석 1cycle동안 지속적으로 방류한 경우에 고조위는 광양항에서 4 cm, 그리고 다른 북측의 세 검조소에서 5 cm 만큼 상승하는 것으로 예측되었다. 한편, 13일까지 지속된 댐 방류에 따라, 13일에 망덕을 비롯한 광양만 북부의 저조위가 예보치보다 크게 상승한 것을 확인할 수 있다(Fig. 6 참조).

해일 원인 분석

태풍 “매미” 통과 시 광양만에 발생한 현저한 해일 현상의 원인별로 해일고에 미친 영향을 정리하면 다음과 같다(Table 4와 Fig. 8).

태풍 통과시 기압 하강에 따른 해면 상승: 기압이 1 hPa 하강하면 해면이 0.99 cm 상승한다. 여수의 최저 해면기압은 12일 19시 51분에 956 hPa이었고, 20시 00분에 최고조위가 나타나서 태

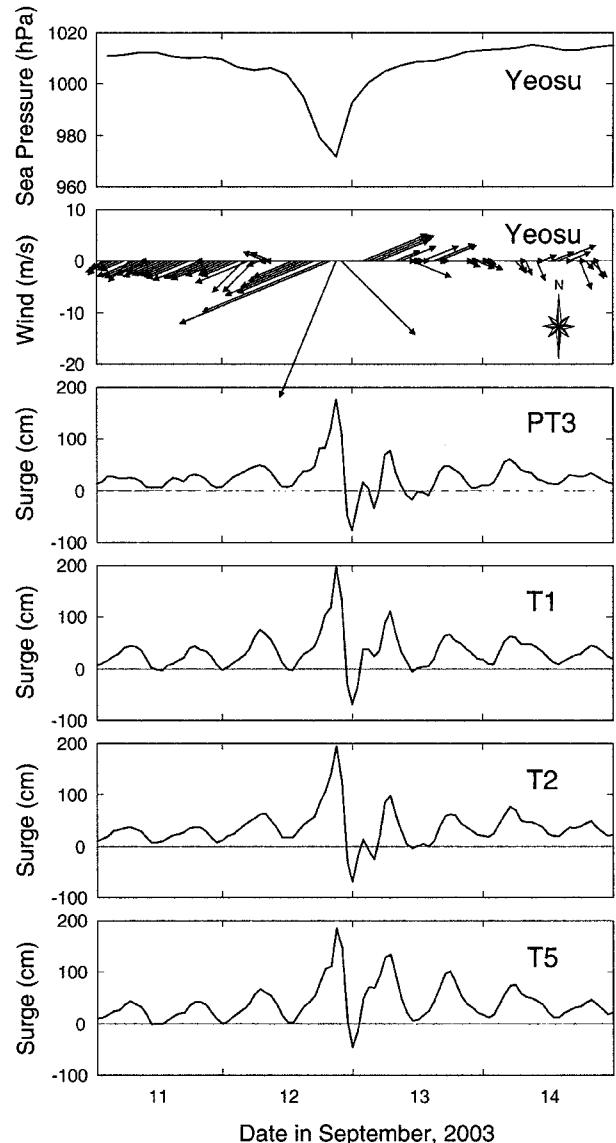


Fig. 8. Time series of the sea level pressure, wind in Yeosu and the surges in Kwangyang Bay during the typhoon “Maemi”.

풍의 중심에 가장 근접할 때 최고조위가 발생하였다. 광양만의 실측 고조위는 20시 30분경에 나타났는데, 태풍의 이동속도를 고려하면 광양만에서의 최저 해면기압과 최고조위가 거의 동시에 나

Table 4. Parameters of the maximum surges (maximum deviations of the water level) caused by the typhoon “Maemi” in Kwangyang Bay. (unit: cm)

조위	검조소				
	PT3	T1	T2	T5	
발생 시간 (2003년 9월 12일 시:분)	20:00	20:00	20:00	20:00	20:00
실측 조위 (①)	393	435	442	443	437
예보 조위 (②)	256	259	246	249	253
최대 조위 편차 (③=①-②)	137	176	196	194	184
원인별	기압 강하 (④)	59	59	59	59
해면 상승	섬진강 흐수 (⑤)	0	4	5	5
	강풍 해수충격 (=③-④-⑤)	78	113	132	120

타났다고 볼 수 있다. 여수의 최저 해면기압 956 hPa이 광양만에서도 그대로 유지되었다고 가정하면 누년 일평균 해면기압 1,016 hPa과의 차인 60 hPa 만큼의 기압 하강에 따른 59 cm의 해면 상승이 발생한 것으로 분석된다.

폭풍 해일 (강풍에 의한 연안역의 해수 충적): 폭풍에 의한 해면 상승은 풍속의 제곱과 취송거리의 곱에 비례하고 수심에 반비례한다. 태풍이 제주도 동측을 거쳐 사천만으로 상륙하면서 S~SE 계열의 강풍에 의해 남해안쪽으로 해수의 충적이 발생하였으며, 여수에 도달한 폭풍해일파는 좁고 긴 여수해만을 통과하면서 증폭되어 광양만에 진입하였다고 보아야 할 것이다.

섬진강 홍수에 따른 해면 상승: 섬진강댐과 주암댐의 방류량, 송정의 수위 변화 및 홍수 수치모형실험 결과를 종합할 때 섬진강 홍수가 해일고에 미친 영향은 광양항(PT3)에서 4 cm이고, 광양만 북측의 세 검조소(T1, T2, T5)에서 각각 5 cm로 분석된다.

태풍 통과시의 해일고(조위 편차)를 다음 세 가지 요인의 합으로 정의한다면

$$\text{해일고} = \text{기압 하강시 해면 상승} + \text{폭풍에 의한 해면 상승} + \text{홍수 유출시 수위 상승}$$

폭풍에 의한 해면 상승량은 관측된 조위 편차에서 기압 하강에 의한 해면 상승량과 홍수 유출에 의한 수위 상승량을 뺀 값으로 추정할 수 있다. 태풍 “매미” 통과시 광양만의 원인별 해면 상승 값을 얻은 결과는 Table 4와 같다. 폭풍에 의한 해면 상승량은 광양항(PT3)에서 113 cm로 최소이고 상류로 가면서 T1에서 132 cm, T2에서 130 cm로 19 cm 및 17 cm 증가하며, 섬진강 하구인 망덕(T5)에서는 120 cm로 다시 약간 감소한다. 같은 방법으로 여수에서 폭풍에 의한 해면 상승량은 78 cm로 추산되어 여수에서 광양만으로 진입하면서 증폭된 결과를 확인시켜 준다.

과거의 해일 기록

1983년 이후 광양항(PT3)에서 50 cm 이상의 고조위 편차가 발생하였을 때의 해면기압과 바람 자료는 Table 5와 같다. 고조위 편차의 최대치는 2002년 8월에 태풍 “루사” 통과시의 150 cm이고, 태풍 “매미” 통과시의 95 cm는 두 번째에 해당한다. 한편, 최대 조위 편차는 “매미” 통과시의 176 cm가 가장 크고, 다음이 “루사” 통과시의 156 cm이다. 고조위 편차나 최대 조위편차는 발생 당시의 천문 고조위에 관련되기 때문에 이들의 크기 순위가 고

극조위의 순위와 일치하지는 않으며, 이 문제는 고극조위 분석에 기술되어 있다.

고극조위 분석

극조위 기록

광양만내 4개 검조소에서 1982년 이후 2003년 9월 태풍 “매미” 통과 시까지의 연최고·저조위가 Table 6에 제시되어 있다. 광양항(PT3)과 부지 북동(T2)에서는 고극조위가 각각 460 cm와 470 cm로서 태풍 “매미” 통과시에 발생하였고, 부지 북서(T1)와 망덕(T5)에서는 각각 484 cm와 489 cm로 1987년 7월 태풍 “셀마” 통과시에 발생하였다. “셀마”와 “매미” 모두 대조기에 통과하였는데, “셀마”는 고조 2시간 전, “매미”는 고조 약 2시간 30분 전에 최대 해일고를 기록하였다. 태풍 통과시 해면기압은 “매미”가 약 15 hPa 낮고, 강수량은 “셀마”가 약 200 mm 많다. 따라서, 홍수 영향이 큰 T1과 T5에서 “셀마” 통과시의 고극조위가 더 높았던 것으로 보인다.

고극조위 극치분석

광양제철소 호안고 결정을 위한 극치분석

광양제철소 부지의 호안고를 결정하기 위하여 1982년 3월부터 1983년 2월까지 1년간 지진도(PT2)에서 조석관측을 하였고, 1966~1980년의 15년간 여수항 조위의 연최대치 계열에 대하여 극치분석을 하였다(포항종합제철주식회사, 1983b, 1985). 당시 PT2의 재귀연도별 고극조위는 식 (1)과 같이 구하였으며, 그 결과는 Table 7에 제시되어 있다. 여기서, HHW는 고극조위이고 AHHW는 약최고고조위이다.

$$\text{HHW}_{\text{PT2}} = \text{AHHW}_{\text{PT2}} + (\text{HHW}_{\text{여수}} - \text{AHHW}_{\text{여수}}) \quad (1)$$

광양제철소 부지의 호안고는 PT2에서의 50년 빈도 고극조위 450 cm에 호안 전면의 파고와 섬진강 홍수 영향을 예측하여 Fig. 9에 표시된 바와 같이 남측과 동측은 5.0 m, 북측은 5.5 m로 결정되었다.

최신 자료에 의한 극치분석

2003년 9월의 태풍 “매미” 통과시에 발생한 고조위를 포함하여 1984~2003년의 20년간 광양만의 조석 관측자료를 이용하여 고조

Table 5. List the surges observed in Kwangyang Port (PT3).

발생일	태풍	고조위 편차(cm)	최대 조위 편차(cm)	최저 해면 기압(hPa)	최대 풍속(m/s)	풍향
2002 8/31	Rusa	150	156	969	27.2	ENE
2003 9/12	Maemi	95	176	957	35.9	NE
1986 8/28	Vera	75	77	979	20.3	S
1987 7/15	Thelma	74	130	972	25.0	SSE
1984 3/19	-	61	60	1,015	15.0	NNE
1995 7/23	Faye	56	59	970	33.2	N
1999 8/3	Olga	56	55	993	30.7	S
1993 6/2	-	52	60	987	15.2	SSW
1985 10/5	Brenda	52	52	995	23.5	NE
1987 8/31	Dinah	51	52	975	22.2	NE
1984 3/18	-	51	53	1,017	10.0	NW
1987 3/19	-	50	54	1,003	13.3	N

Table 6. Annual values of the highest high water and the lowest low water observed in Kwangyang Bay (1982~2002). (unit:cm)

연도	연최고조위				연최고조위			
	PT3	T1	T2	T5	PT3	T1	T2	T5
1982	435 (6)				-31 (11)			
1983	432 (9)	440 (9)	433 (9)	443 (9)	-47 (2)	73 (12)	8 (12)	74 (12)
1984	446 (3)	445 (8)	451 (8)	450 (8)	-50 (3)	57 (12)	-8 (4)	56 (12)
1985	422 (5)	441 (5)	429 (5)	448 (5)	-32 (3)	38 (11)	-30 (3)	23 (12)
1986	421 (7)	435 (7)	425 (7)	433 (7)	-26 (2)	19 (2)	-19 (2)	18 (1)
1987	445 (7)	484 (7)	465 (7)	489 (7)	-30 (2)	3 (2)	-23 (1)	-10 (2)
1988	425 (8)	438 (1)	428 (7)	439 (1)	-43 (2)	-18 (2)	-44 (2)	-19 (2)
1989	429 (8)	436 (8)	430 (8)	439 (8)	-49 (3)	-21 (3)	-38 (3)	-28 (3)
1990	430 (11)	436 (11)	435 (11)	444 (11)	-27 (12)	-21 (2)	-22 (2)	-24 (2)
1991	429 (8)	443 (8)	437 (7)	451 (8)	-30 (3)	-32 (2)	-15 (2)	-31 (2)
1992	431 (7)	442 (7)	434 (7)	450 (7)	-44 (2)	-41 (1)	-43 (2)	-43 (2)
1993	425 (8)	430 (8)	422 (8)	440 (8)	-44 (2)	-33 (2)	-44 (2)	-45 (2)
1994	415 (4)	423 (5)	414 (5)	430 (4)	-46 (3)	-51 (2)	-49 (3)	-51 (3)
1995	421 (5)	430 (5)	410 (11)	431 (5)	-39 (3)	-40 (3)	-33 (3)	-40 (11)
1996	422 (8)	430 (8)	424 (8)	440 (8)	-49 (2)	-40 (2)	-43 (2)	-53 (2)
1997	420 (9)	435 (9)	430 (8)	440 (8)	-31 (3)	-34 (2)	-28 (3)	-40 (3)
1998	425 (10)	435 (11)	429 (10)	441 (10)	-37 (3)	-37 (3)	-29 (3)	-39 (3)
1999	423 (11)	432 (3)	423 (10)	440 (1)	-21 (1)	-25 (4)	-15 (4)	-22 (4)
2000	423 (7)	430 (7)	437 (7)	441 (7)	-21 (12)	-24 (12)	-15 (12)	-26 (12)
2001	437 (9)	441 (9)	439 (9)	449 (9)	-30 (2)	-30 (2)	-27 (2)	-37 (2)
2002	427 (9)	440 (8,9)	443 (8)	445 (8)	-32 (2)	-45 (2)	-28 (3)	-40 (3)
2003	460 (9)	470 (9)	470 (9)	471 (9)	-41 (4)	-34 (4)	-21 (4)	-37 (4)
평균	460	484	470	489	-50	-51	-49	-53
	(2003.9)	(1987.7)	(2003.9)	(1987.7)	(1984.3)	(1994.2)	(1994.3)	(1996.2)

※()는 관측월

Table 7. Approximately higher high water and estimated highest high waters in Jijin Do (PT2). (unit : cm)

약최고고조위	고극조위			
	10년 빈도	25년 빈도	50년 빈도	100년 빈도
382.2	436.7	444.1	449.7	455.2

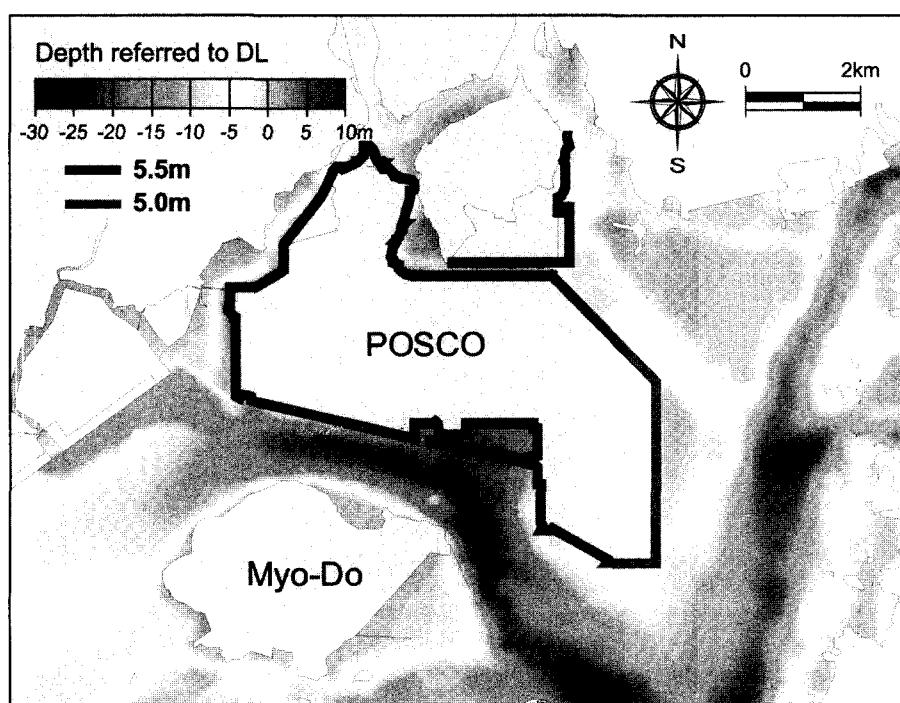
**Fig. 9.** Shore protection elevations of the Kwangyang steelworks (POSCO) grounds.

Table 8. Extreme value analysis of the highest high water in Kwangyang Bay (Annual maximum series, Weibull model). (unit : cm)

검조소	1984~2002년					1984~2003년				
	10년	20년	50년	100년	기왕고극조위	10년	20년	50년	100년	기왕고극조위
PT3	439.7	444.8	451.4	456.4	446(1984.3)	444.9	451.5	460.1	466.5	460(2003.9)
T1	455.1	462.2	471.3	478.1	484(1987.7)	459.9	468.2	479.1	487.2	484(1987.7)
T2	451.4	459.5	470.0	477.9	465(1987.7)	456.8	466.4	478.8	488.1	470(2003.9)
T5	461.6	468.8	478.2	485.2	489(1987.7)	465.3	473.5	484.2	492.2	489(1987.7)

※PT3는 1983년부터임.

위 극치분석을 하였다. PT3에 대하여는 1983년부터 21년간의 자료를 대상으로 하였다. 또한, 태풍 “매미” 통과시에 발생한 고조위가 극치에 미친 영향을 파악하기 위하여 2002년까지의 자료에 대하여도 극치분석을 하여 그 결과를 비교하였다.

극치분석은 연최대치와 연초과치 계열에 대하여 Gumbel-Chow, Log-normal, Weibull, Jenkinson 방법을 적용하였다. 각 검조소별로 8가지의 극치분석 결과 중 기왕고극조위의 재귀년수와 표준추정오차를 기준으로 판단할 때 연최대치에 대한 Weibull 방법의 결과가 가장 적합하며, 그 결과는 Table 8과 같다. 2003년까지의 자료에 의한 50년 빈도 고극조위는 PT3에서 460 cm, T1과 T2에서 479 cm, T5에서 484 cm이며, 이 값은 2002년까지의 자료에 의한 50년 빈도 고극고위 보다 6~9 cm 더 높다. 또한, PT3에서의 50년 빈도 고극조위 460 cm는 1983년에 추정한 450 cm 보다 10 cm 더 높다. 즉, 1983년에 추정한 빈도별 고극조위와 2002년까지의 자료에 의한 고극조위는 거의 차이가 없으나, 태풍 “매미” 통과시의 해일이 포함된 2003년까지의 자료에 의한 빈도별 고극조위는 10 cm 정도 높아지게 된다. 한편, 태풍 “매미” 통과시 광양항(PT3)의 실측 고극조위 460 cm는 광양제철소 부지 설계시에 추정한 100년 빈도 고극조위 455 cm 보다도 5 cm 높은 조위이다.

태풍 “매미” 통과 시 광양항(PT3)에서의 고조위 편차는 95 cm이지만 최대 조위편차는 176 cm에 달하였는데, 만일 태풍이 2시간 30분 늦은 예보 고조시에 사천만에 상륙하였다면 최대 조위편차 발생 시간과 고조시가 일치하여 예보 고조위 365 cm에 최대 조위편차 176 cm를 더한 541 cm의 조위를 기록하였을 것이다. 즉, 부지고 500~550 cm인 광양제철소 부지가 수 십분 동안 침수되는 상황을 맞게 될 수 있다. 실제로 최대조위편차 발생시간과 고조시가 일치하고 좁고 긴 만의 안쪽에 위치한 마산에서는 248 cm의 해일고가 발생하여 엄청난 인명과 물적 피해가 발생하였다.

결 론

태풍 “매미”가 사천만에 상륙한 2003년 9월 12일에 여수에서는 19시 51분에 956 hPa의 최저 해면기압을 기록하였고, 18시 57분에 49.2 m/s의 최대순간풍속을 기록하여 1942년 기상관측 이후 기왕의 극값을 경신하였다. 섬진강 유역의 강수량은 100 mm 이하로 상대적으로 적은 편이었다.

광양만의 최고조위는 예보 고조시의 약 2시간 전인 12일 20시 30분 경에 발생하였는데, 4개 검조소의 고조위 편차는 93~108 cm이고, 최대 조위편차는 176~196 cm이다. 최대 조위편차를 유발한 요인은 기압 강하가 59 cm, 섬진강 홍수가 4~5 cm, 그리고 폭풍해일이 113~132 cm인 것으로 분석되었다. 광양항의 고조위 편차

95 cm는 1983년 이후 2002년 8월에 발생한 태풍 “루사” 통과시의 150 cm에 이어 두 번째 크기이고, 최대 조위편차 176 cm는 가장 큰 규모이다.

태풍 “매미” 통과 시 광양항(PT3)과 광양제철소 부지 북동(T2)의 각 실측 고조위 460 cm와 470 cm는 최고극조위를 기록하였으며, 부지 북서(T1)와 망덕(T5)의 각 고조위 470 cm와 471 cm는 1987년 태풍 “셀마” 통과시의 각 고조위 484 cm와 489 cm에 이어 두 번째 고극조위이다. 또한, 광양항의 실측 고극조위 460 cm는 광양제철소 부지 설계시에 추정한 100년 빈도 고극조위 455 cm 보다도 5 cm 높은 조위이다.

만일 태풍 “매미”가 2시간 30분 늦게 사천만에 상륙하였다면 최대 조위편차 발생시간과 고조시가 일치하여 예보 고조위 365 cm에 최대 조위편차 176 cm를 더한 541 cm의 고조위를 기록하였을 것이며, 부지고 500~550 cm인 광양제철소 부지가 수 십분 동안 침수되는 상황을 맞게 되었을 것이다.

태풍 “셀마”와 같이 태풍이 광양만의 서측 인접지역을 통과하는 경우 광양만은 태풍의 위험반원에 속하여 강한 남풍에 의한 해수의 연안측으로의 충격현상으로 현저한 해일 현상이 발생할 것으로 예상된다. 최근에는 전 지구적 온난화와 엘리뇨 등의 영향으로 태풍과 같은 자연재해의 규모가 커지는 추세이고, 광양만 서측의 천해역과 조간대를 대규모로 매립함으로써 태풍 내습 시 해일고를 추가적으로 상승시킬 가능성이 높다. 광양만내의 부지는 지형적으로 여수해만을 거쳐 광양만의 안쪽에 위치하고 섬진강의 홍수 영향을 직접 받을 수 있으므로 태풍에 의한 폭풍해일로 인한 침수에 대비하여야 할 것으로 본다.

감사의 글

기상, 조석, 하천 방류량 및 수위 자료를 기꺼이 신속하게 제공하여 주신 기상청, 국립해양 조사원, 포스코 및 한국수자원공사 관계자들께 깊이 감사드립니다. 자료 정리 및 분석을 도와주신(주) 한국해양과학기술의 한동훈님, 한명희님, 그리고 깔끔한 그림과 표를 작성하여 주신 최의정님의 노고에 사의를 표합니다. 본 논문을 세밀하게 검토하시고 많은 지적과 조언을 해주신 강석구, 정경태 박사님과 익명의 심사위원님께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 기상청, 2003. 제14호 태풍 “매미(Maemi)” 종합상황(최종), 보도 자료(2003. 9. 13, 14:30).
오임상, 김성일, 봉종현, 1988. “한국 남해를 통과하는 태풍에 의

- 한 폭풍해일 연구”, 한국기상학회지, 24(3), 72-84.
- 이석우, 1997. “1997년 백중사리시 서해안의 고극조위,” 항만, 21(2): 16-37.
- 최병호, 1999. “한국의 폭풍해일연구 활동”, 1999년도 자연재해경감학술발표회(한국근해의 폭풍해일) 논문집, 한국해안·해양공학회, 1-10.
- 최병호, 2003. “태풍 매미에 의한 해안재해”, 우리나라의 재해관리시스템 개선방안 심포지움, 한국수자원학회, 한국방재협회, 한국해안·해양공학회, 한국도시방재학회, 대한토목학회, 39-73.
- 포항종합제철주식회사, 1983a. 광양만 광양제철소부지조성에 대한 영향, 중간보고 제5권, 조류 및 조위에 미치는 제철소부지의 영향, 예기되는 침식 및 퇴적, PAH, SOGREAH, (주) 한국해양과학기술, 42p.
- 포항종합제철주식회사, 1983b. 광양만-지진도 장기조석관측보고서 (1982. 3-1983. 2), (주)한국해양과학기술.
- 포항종합제철주식회사, 1985. 광양제철소부지주변 하해조사보고서, 요약편.
-
- 2004년 1월 29일 원고접수
- 2004년 5월 25일 수정본 채택
- 담당편집위원: 강석구