

## 연속재현기법을 이용한 이안제 제두부의 수리학적 안정성 분석

김홍진 · 류청로 · 강윤구

### Hydraulic stability analysis at the head of rubble mound breakwater by the real process method

Hong-Jin Kim · Cheong-Ro Ryu · Yoon-Gu Kang

**Key Word** : Stability(안정성), Head(제두부), Real process method(연속재현기법),  
Rubble mound breakwater(방파제)

#### ABSTRACT

The failure modes analysis by the real process method at the head section of rubble mound breakwaters is more important than other failure modes analysis, because this initial failure modes and failure process will lead to the destruction of the structure.

The three-dimensional failure modes are discussed using the experimental data with directional waves considering the failure modes. It was processed step by step failure around the head of rubble mound breakwaters. The spacial characteristics of failure mode by real process analysis was well descript at the rubble mound structures

#### 1. 서론

2003년 9월 6일 마리아나 제도의 괌섬 북서쪽에서 발생해 한반도에 막대한 피해를 입히고 14일 일본 삿포로 북동쪽 해상에서 소멸한 중형급 태풍 “매미”는 처음 발생 시 996 hPa 중심최대풍속이 18 m로 열대성 폭풍에 지나지 않았으나 이후 서쪽으로 이동하면서 점차 태풍으로 발달해 중심기압이 910 hPa의 강력한 태풍으로 변모 하였다. 9. 12일 16시 제주도를 거쳐 20시에는 경상남도 삼천포 해안에 상륙하였고, 7시간 뒤에 영남 내륙지방을 지나 13일 03시 부둣에는 경상북도 울진을 거쳐 동해안에 진출하면서 약해지기 시작한 뒤, 14일 06시 일본 삿포로 북동쪽 해상에서 소멸하였다.

태풍 “매미”는 한반도에서 기상관측을 실시한 1904년 이래 중심부 최저기압이 가장 낮은 태풍으로 12일 경남 사천부근에 상륙했을 때의

최저기압은 1959년 9월 발생한 태풍 “사라”(사망 실종 849명)의 952 hPa보다도 낮은 950 hPa 이었다. 이는 5,000억원의 재산피해와 사망·실종 1,231명의 인명피해를 낸 1987년 7월의 켈마(972 hPa), 2002년 8월 30일~9월 1일 발생한 “루사”(970 hPa 사망실종 270명)보다도 훨씬 강한 것이었다.

태풍 “매미”의 피해규모는 인명피해 130명(사망 117명, 실종 13명), 재산피해 4조 7,810억원이며, 4,089세대 1만 975명의 이재민이 발생하였고, 주택 2만7,547개소가 유실되거나 파괴 되었다, 이로 인해 2002년 14개 시도 156개 시군구, 1,657개 읍면동이 특별재해지역으로 선포 되었다.

또한 많은 해안시설물이 유실 및 파손 되었으며 그중 태풍 “매미” 내습으로 부산신항 동방파제 서측 두부측에 피해가 발생하였다.

이렇게 매년 증가하는 고파랑의 내습을 대비

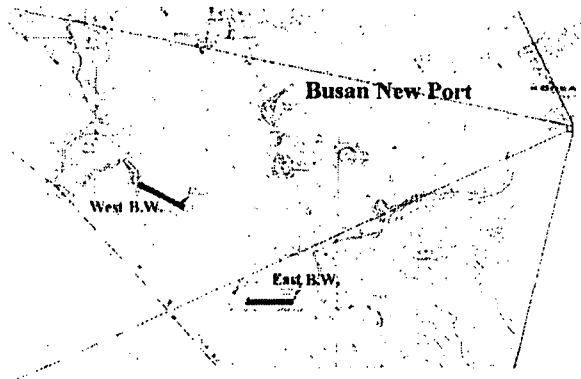


Fig. 1. East Breakwater in Busan new port.

하기 위해서 새로운 설계기준의 정립도 중요하지만, 명확한 피해원인의 분석 또한 향상된 설계를 위해 중요한 과제이다. 따라서 금번 연구에서는 부산신항 동방파제에서 발생한 제두부 피해원인을 향상된 방법으로 분석하여 파괴모드를 분석하고 제두부 설계의 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 동방파제의 피해와 태풍 "매미"

### 2.1 부산신항 동방파제 피해현황

부산광역시 가덕도 서편에 위치한 부산신항 동방파제는 금번 태풍 "매미"로 인해 항로측 두부구간 상치 1SPAN이 침하·전도되었으며, 두부의 정수면 부근 및 T.T.P(32t)가 유실되었으며, 각종 주변시설의 피해가 발생하였다.

금번 방파제 피해 중 특이한 점은 서측 제두부의 만의 파괴이다. 제간부의 20t의 T.T.P의 교란 외에 큰 피해는 없었으며, 대부분 제두부 32t의 T.T.P가 파괴되어 배후면으로 이동하는

Table 1. Observed Datas(Typhoon "Maemi")

Parameters	Wave			Water Level(m)	
	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>1/3</sub> (sec)	Dir.(deg)	Tide	Surge
Value	4.4~7.5	15	S15W±10	1.0 ~ 1.906	0.5 ~ 0.8m
Location	in front of E.B			Gadeog, Yongwon	Gadeog, Simulation

\* 2003. 9. 12 17:00 ~2003. 9. 12 22:00

피해와 피복재의 파괴로 중간피복재 및 내부사석의 흡출이 발생하였으며, 상치콘크리트 또한 전도되는 피해가 발생하였다.

### 2.2 태풍 "매미" 내습 시 주요 관측자료

태풍 "매미"내습 시의 해상조건(파고, 조위, 파향, 피해율 등)을 고려하여 재현실험의 재현성을 증대하기 위하여 부산신항 인근의 파랑자료를 조사하였다. 각 실험에 적용된 자료는 다음 Table 1과 같다.

#### 가. 조위(조석)

부산항 검조소의 위치에서 관측된 기록을 보정한 결과 부산항에서의 이상고조는 크지 않으며, 2003년 9월 12일 21:00에 극고조(H.H.W) 174cm보다 37cm 높은 211cm를 기록. 부산신항 내만 측에 위치한 진해시 용원동에서 관측된 값은 2003년 9월 12일 21시 40분에 373cm로 관측되었으나, 지형적인 영향을 고려할 때(폐쇄성 내만) 본 값의 직접적인 적용은 곤란하며, 따라

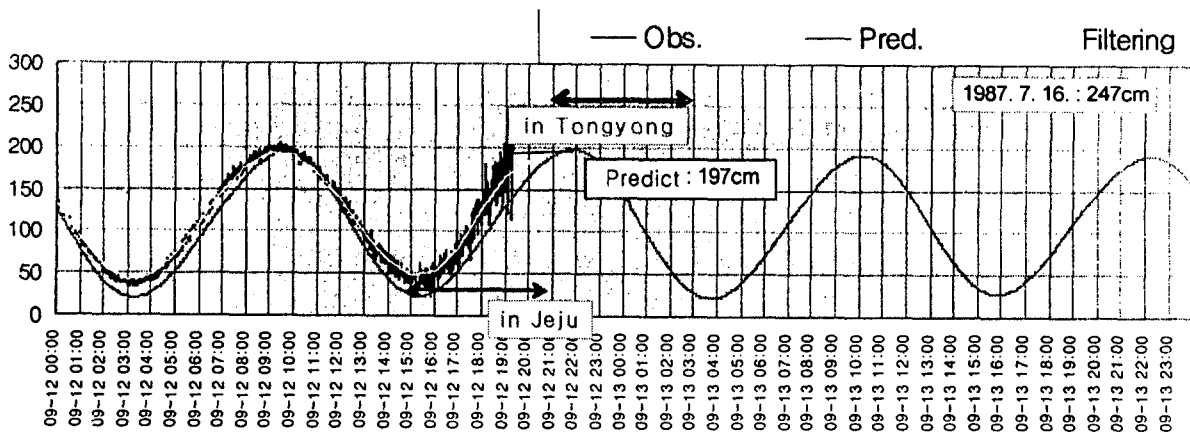


Fig. 2 Variation of idal water level

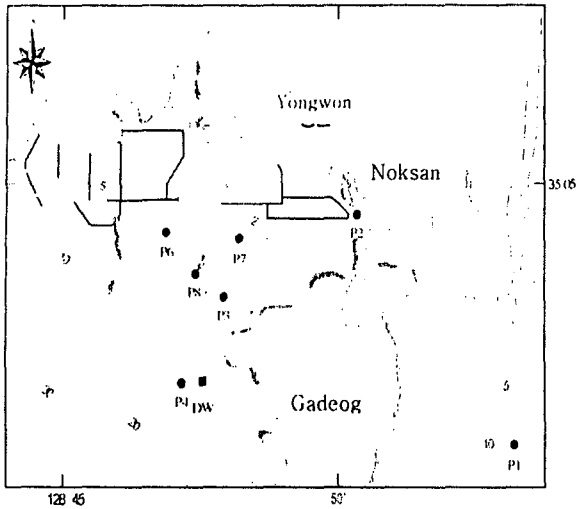


Fig. 3. Wave observation site.

서 가장 인접한 가덕도 검조소의 결측시(2003년 9월 12일 19:00)까지의 관측기록(DL(+)) 약 250cm)과 대상해역의 폭풍해일고 추정자료를 이용하였다.

나. 파랑

부산지역 주파랑관측소인 부산항 파랑관측소(태종대, 조도)에서의 관측은 결측되었으며, 동방파제 전면 해상(DW지점)에서 관측된 자료는 2003년 9월 12일 21:00에 관측된 파를 입·반사파 분리하여  $H_{1/3}=7.4$  m  $T_{1/3}=15$  sec로 보고하고 있다.

Fig. 4는 각 지점에서의 파랑 관측값을 항의 관측점(DW)에 대한 주기 및 파고비 시계열을 나타낸 값이다.

최대 파랑 발생시각인 21:00이전 6시간동안 15

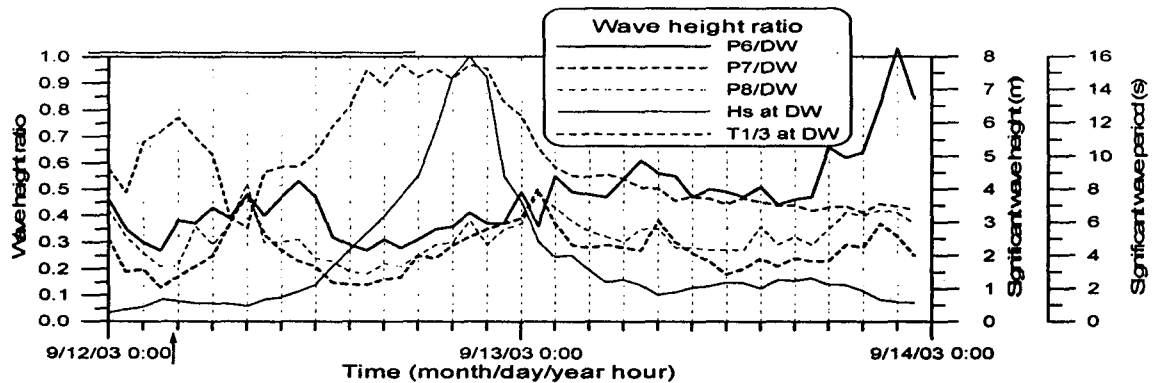


Fig. 4. Wave data. (Observed)

Table 2. Typhoon Informations (KMA, 기압은 955 hPa, 중심부 최대풍속이 41 m/s 이

2003.9.12~2003.9.13)

Time	Location	Barometer	Wind, Wave
2003. 9. 12 16:30	32.7N, 127.0E	950 hPa	41m/sec, 10 ~ 13m
2003. 9. 12 19:30	33.8N, 127.5E	950 hPa	41m/sec, 10 ~ 13m
2003. 9. 12 22:30	35.1N, 128.4E	955 hPa	35m/sec, 10 ~ 13m
2003. 9. 13 01:30	35.8N, 128.7E	960 hPa	35m/sec, 10 ~ 13m
2003. 9. 13 04:30	37.1N, 129.7E	970 hPa	31m/sec, 6 ~ 9m
2003. 9. 13 07:30	37.8N, 130.7E	970 hPa	31m/sec, 6 ~ 9m
2003. 9. 13 10:30	38.6N, 131.7E	975 hPa	28m/sec, 6 ~ 9m
2003. 9. 13 16:30	40.5N, 134.5E	980 hPa	26m/sec, 6 ~ 9m

초 정도의 장주기 성분파랑이 발달한 것을 알 수 있으며, 항내 파고와의 비는 0.2에서 0.5의 값을 보인다. 또한 항내 관측값과의 비를 고려할 때 파향 자료와 함께 고려하여야 하며, 태풍 “메미” 내습시의 DW지점의 관측자료 보고서에 따르면 유의파고가 급격하게 증가하는 19:00부터 S계열의 파랑이 입사하고 있음을 알 수 있다. 이는 파고가 가장 크게 발달할 때 S계열의 파랑이 주입사방향 이었음을 알 수 있으며, 각 시간대 별 파랑내습 조건에 대한 파괴모드 검토가 우선되어야 할 것이다.

3) 기상

태풍 “메미”의 최대중심기압은 9월 11일 10시 경에 910 hPa로써 대형급이었으며.(일본 오키나와섬 나하 남서쪽 280 km 부근 해상), 우리나라 남부지방인 부산, 마산, 거제지역을 통과한 때의 중심기압은 950 hPa이고, 여수지방의 중심

었다. Table 2는 태풍 내습 시부터 우리나라를 완전히 통과하였을 때까지의 기상청의 태풍특보 사항을 시간별로 나타내고 있다.

### 3. 피해원인 재현실험

#### 3.1 재현실험개요

수리모형실험은 부경대학교 수리모형실험실에 위치한 3차원 조파수조에서 수행하였다. 조파기는 폭 18m, 높이 1m, 길이 15m의 장방형수조로 피스톤형 조파기 20대로 구성되어 있으며, 일방향 규칙파, 일방향 불규칙파 및 다방향 불규칙파 조파 가능하며, 파고를 실시간으로 변화시킬 수 있다. 수조 상부에 승강식 관측대차를 설치하여 실험장면 관찰 및 수위의 계측이 용이하도록 제작하였다. 관측대차에는 용량식 파고계가 부착되어 있어 파고계에서 독취된 자료를 바탕으로 방향스펙트럼 분석을 실시하였고, 수조의 측벽에는 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 반사파를 제어하였다.

본 실험에 사용된 조파기는 목표스펙트럼 함수에 의한 불규칙파와 각각의 성분파에 대해 임의의 스펙트럼 값을 입력하여 조파할 수 있으며, 각각 조파판 위상 디스플레이를 통해 조파판의 제어를 원활하게 함. 본 수리모형실험에 사용된 3차원 조파수조의 제원 및 기능을 요약하면 table 3과 같다.

전술한 태풍 “매미”의 제반 관측자료를 이용하여, 태풍 내습시의 상황을 재현하고자 하였으며, 먼저 일정한 파랑조건 및 수위 조건에서 실험을 실시하여 각 조건에서의 파괴모드를 확인한 후 최대파랑관측시(21:00)를 기준으로 4시간 이전부터의 조위 및 파랑조건을 연속으로 재현하여 동방파제 피해를 확인하였다.

Table 3. Multi Directional Wave generator.

		Values
Dimension		18 m(W)×15 m(L)×1 m(D)
Paddle		1 m(D)×0.7 m(W)×20 EA
H <sub>max</sub>		30 cm
T <sub>max</sub>		2.5 sec
h <sub>max</sub>		90 cm
Type		Servo Motor, Piston

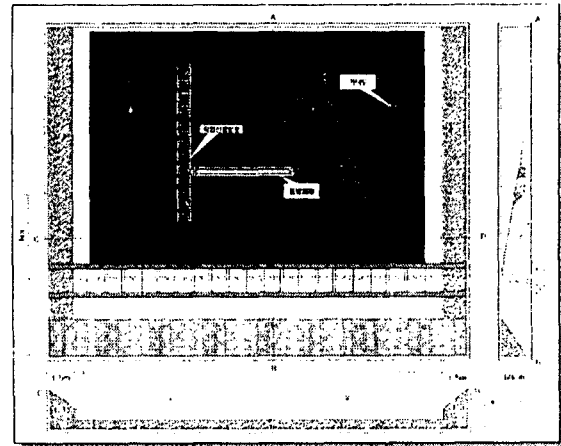


Fig. 5. Experimental setup.

실험과는 태풍 “매미”대해 동방파제 전면에서 관측된 입사파랑을 기준으로 파고의 ±10% 범위에서 입사파랑조건을 변화시키며, 안정성을 검토하였다.

입사파랑의 조건을 명확하게 하기위해 수조 내에 구조물을 설치하지 않은 조건에서 각 입사파랑조건을 재현성을 평가하여 조파기의 조파특성을 평가하고, 구조물을 조파유효영역 내에 설치하여, 파랑의 재현성을 확보하였다. 실시간 재현실험에서는 태풍 “매미” 내습시의 관측자료를 이용하여 시공간적인 상사를 조정하여 입력값을 조정하며 실험을 실시하였으며, 파향과 주기는 일정한 조건으로 실험하였다. 실험파랑의 조건은 Table 4과 같다.

다음 실험수조의 모식도에서와 같이 평판수조에 4대의 용량식 파고계를 설치(star array)하여 지점 파고 및 파고계 배열에 따른 방향성을

Table 4. Wave Conditions.

Case No.	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>1/3</sub> (sec)	Depth (m)	Dir. (°)
Case 01	7.4	15	12.95	S
Case 02	7.4	15	12.95	S15°W
Case 03	7.4	15	13.906	S
Case 04	7.4	15	13.906	S15°W
Case 05	5.5~7.4	15	12~14.5	S

관측하였고, 최소 500파 이상의 파수를 조파하였다

실험전 확인된 유효영역에서의 경사파랑의 재현성을 확인하였으며, 측면에 의한 교란 영역은 소파계를 설치하여 영향을 감소시켰다. 안정성 평가는 2단계로 진행되었으며, 1단계는 실험시 관측자에 의한 안정성 평가를 실시하여 사전에 준비한 화상야장을 이용하여 수리현상을 기입하였으며, 2단계는 저장된 화상을 동영상화하여 재검토 하였다.

재현파랑의 검토는 현재 부산신항 동방파제 파고계의 위치가, 남측 300 m 전면해상에 설치된 것을 고려하여 동방파제 전면 실험상 3.0 m 지점에서 관측하였다..

### 3.2 Case별 실험결과

안정성 실험결과는 Table 5와 같다.

#### 가. Case 01

입사파향은 동방파제에 법선방향인 경우이며, 제두부의 피해율은 20.0 %, 제간부의 피해율은 1.2 %이었다. 피해영역은 제간부에 비해 제두부의 피해가 현저하며, 두부 상치콘크리트전면과 측면주위의 T.T.P가 파괴되었으며, 전면의 T.T.P가 정수면 까지 파괴되어 제간부까지 피해  
 ○ 파괴된 T.T.P는 Section 3영역으로 이동하였으며, 상치콘크리트의 피해는 발생하지 않았음.

#### 나. Case 02

입사하는 파향은 동방파제에 경사방향(S15W)이며, 제두부의 피해율은 11.9 %, 제간부의 피해율은 5.1 %이다.

피해영역은 제두부의 피해와 제간부의 피해를 보이며, 경사입사하는 영역에서의 피해가 가장 많았으며 제간부의 T.T.P가 파괴되어 배후 및 상부로 이동하였다. 파괴된 T.T.P는 Section 1, Section 2영역으로 이동하였으며, 상치콘크리트의 피해는 발생하지 않았다.

#### 다. Case 03

입사하는 파향은 동방파제에 법선방향이며 제두부의 피해율은 18.6 %, 제간부의 피해율은 2.4 %이다.

피해영역은 제두부의 피해와 제간부의 피해를 보이며, 전면영역(Section 1)에서 피해가 가장 크게 발생하였음. 파괴된 T.T.P는 Section 2, Section 3 영역으로 이동하였으며, 상치콘크

리트는 약간의 동요가 있었으나 파괴는 발생하지 않았음.

#### 라. Case 04

입사하는 파향은 동방파제에 경사방향이며 제두부의 피해율은 21.4 %, 제간부의 피해율은 5.9 %임. 피해영역은 제두부와 제간부의 피해가 크게 발생하였으며, 제두부와 제간부 모두 정수면 상부가 파괴되는 심각한 피해가 발생하였으며, 상치콘크리트는 7개구간까지 파괴되었으며, 제두부의 2개구간은 활동/전도되어 배후로 유실되었다.

### 3.3. 연속재현실험

본 Case의 입사파랑조건은 전술한 태풍 “매미” 내습시의 시간별 파랑조건을 이용하였으며, 실험의 시간적 범위는 12일 17:00부터 23:00까지 이며, 동 시간에 대한 조위와 파랑자료를 적용하여, 수조내의 수위를 펌프로 제어하고, 실시간으로 스트로크를 조정하며 파고를 제어하였다. 파향의 경우 동일시간대의 관측값이 일정한 값을 보이고 있으므로 대표파향에 대해 실시하였다(S).

실험결과 제두부의 피해율은 19.9 %, 제간부의 피해율은 1.3 %이었다. 피해영역은 대부분 제두부에서 발생하였으며, 제간부의 피해는 제두부와 연결된 부분에서의 피해를 보였다.

시간대별 피해를 살펴보면 실제시간 17:00 조건에서는 Section 1과 Section 2에서 파괴가 발생하였으나 수위의 상승과 함께, 18:00를 지날 때 상치콘크리트 하부의 T.T.P의 유실을 야기하였으며, 이러한 피복재의 유실은 내부 중간피복석 및 내부사석의 유출을 야기하였다. 최대파

Table 5. Failure rates.

Case No.	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>1/3</sub> (sec)	h (m)	Dir (°)	Failure rate(%)	
					Head	Trunk
Case01	7.4	15	13	S	20.0	1.2
Case02	7.4	15	13	S15° W	11.9	5.1
Case03	7.4	15	14	S	18.6	2.4
Case04	7.4	15	14	S15° W	21.4	5.9
Case05	5.5~7.4	15	12~14.5	S	19.9	1.3

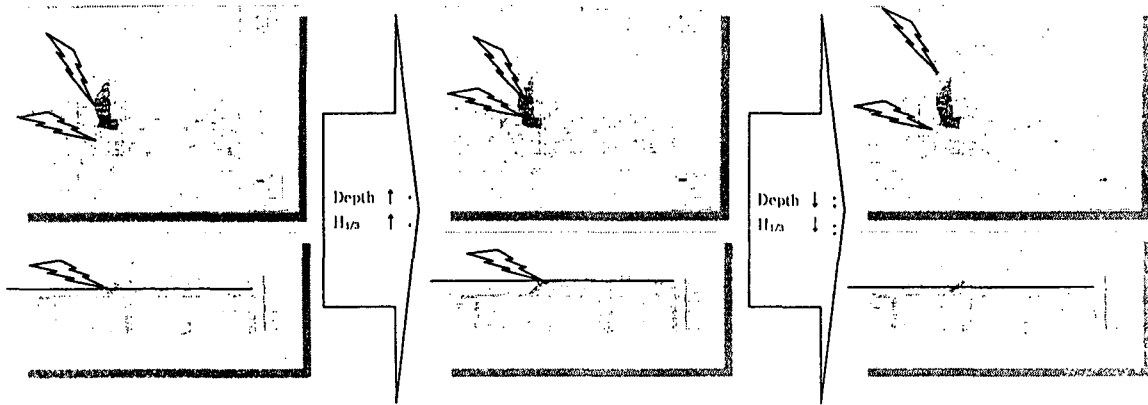


Fig. 6. Failure process of east breakwater by typhoon "Maemi".

고가 내습하는 21:00 경에는 상치하부 사석의 유출로 상치콘크리트의 침하 및 전도가 발생하였고, 이후 수위의 하강 및 파고의 감소는 추가적인 제두부 파괴의 발달을 야기하지는 않았다. 이때 제간부의 파괴는 발달하지 않았다.

### 3.4. 동방파제 피해모드 요약

본 연속재현실험을 통해서 기본 단일 파랑조건에서 얻은 결과보다 실제 피해형상에 가까운 피해모드를 확인 할 수 있었다. 시간대별 동방

파제 서측부두의 파괴 모드는 다음과 같은 시간별 파괴 진행을 확인 할 수 있었다. 수위 및 파고 변화에 따른 파괴모드의 변화는 19:00부터 설계파고를 초과한 파랑이 수위의 증가와 함께 입사하면서 피복석의 동요를 야기한다. 계속해서 수위의 증가가 이루어지고 수위의 증가에 상치콘크리트 하부까지 증가하고, 수심의 증가에 따른 파고의 증가로 제두부 T.T.P가 20:00부터 파괴되기 시작하였으며, 고파랑과 수위의 상승은 T.T.P의 파괴로 취약해진 제두부와 구조적으로 취약한 상치콘크리트 하부의 근고블록과 내부사석의 흡출을 야기시켰고, 21:00의 최대파랑은 최대수위와 함께 상치콘크리트의 침하와 전도를 가져왔다.

반면 제간부의 파괴는 진행되지 않았으며, 이는 파향과 부산신항 동방파제의 구조적인 효과(전면 수심감소)와 입사파향의 영향으로 보인다. 특히 동방파제의 지형적인 위치를 고려할 때 입사파랑의 발달은 S계열 파랑의 발달에 한정되어지며, 이러한 파랑의 발달은 동방파제 제두부의 피해를 야기하였다.

Table 6. Failure process by typhoon "Maemi".

Time	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	Dir. (°)	Depth (DL(+/-) cm)	Failure
17:00		15.55	S1.6 W	Tide(+50cm), Surge(+28cm)	• not failed
18:00	4.4 m	14.73	S21.6 W	Tide(+90cm), Surge(+35cm)	• not failed
19:00	5.85 m, ( $H_{1/3}$ sign)	15.29	S20.2 W	Tide(+130cm), Surge(+43cm)	• not failed
20:00	7.41 m	14.66	S8.1 W	Tide(+165cm), Surge(ND)	• T.T.P failed - Head: failed, back slope - Trunk: not failed • Sectional failure: HHW area
21:00	7.77 m	15.49	S5.0 E	Tide(+187cm), Surge (ND, 80cm-simulation)	• T.T.P failed( $H_{1/3}$ : max) - Head: failed, back slope, core failed(suction) - Trunk: not failed(geo. dir.) • Sectional failure : under Cap.Con
22:00	7.38 m	15.30	S7.1 E	Tide(+197cm), Surge(ND, reduce)	• T.T.P failed( $H_{1/3}$ : max) - Head: failed, back slope, Cap. Con. overturning - Trunk: not failed(geo. dir.) • Sectional failure : h: max
비고	Observed		Gadeogdo		

## 4. 결론

이상의 결과를 통해서 동방파제 제두부의 파괴모드를 연속재현기법을 통해서 확인할 수 있었다.

기존의 단일파랑조건에서의 파괴모드실험은 실제 방파제 피해의 과정을 재현하지 못하는 한계가 있으며 파괴의 연속성에도 영향을 준다. 일반적인 파괴의 진행과정은 연속적이며, 단

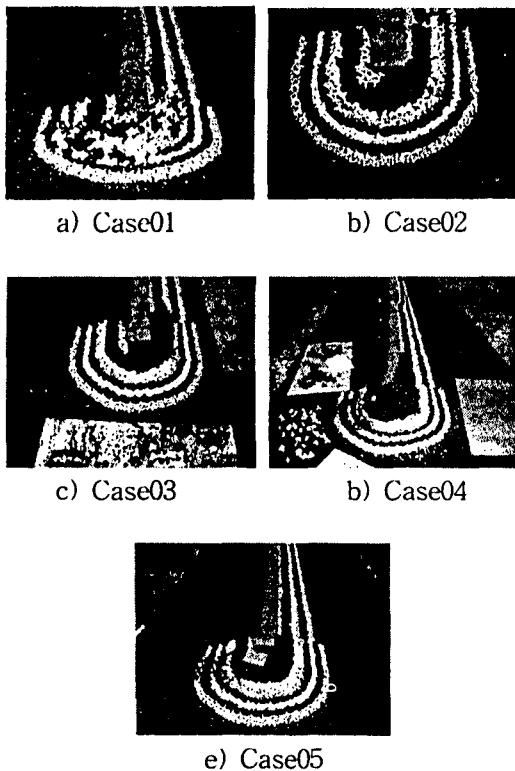


Fig. 7. Scene of Failed head

계적이다. 따라서 파괴과정재현은 피해원인 분석의 중요한 검토요소이며 초기파괴의 취약점을 검토·대응할 수 있는 수단이 될 것이다. 또한 외곽시설의 모니터링 및 장기관리는 피해원인 분석에 중요한 자료가 되고 있음을 알 수 있다. 지속적이고 장기적인 외곽시설의 설계와 시공·관리가 필요할 것이다.

### 참고문헌

- 1) Fredsoe, J. and Sumer, B.M., "Scour at the round head of a rubble-mound breaker", ASCE, coastal Engineering Vol. 29, 231-262, 1997.
- 2) Fredsoe, J. and Sumer, B.M., "Turbulent Boundary layer in wave-current motion", ASCE, Hydro Engineering, Vol. 110, No. 8, 1103-1120, 1984.
- 3) Purandare, M.M. and Narayana, P.A.A., "Wave Power Variation in the Near-shore Regions", Coastal Engineering Vol. 11, 381-390, 1987.
- 11) Saito, E. and Shibayama, T., "Local Scour around a Large Circular Cylinder on the Uniform Bottom Slope due to Waves Currents", ASCE, Coastal Engineering, No. 214, 2799-2810, 1992.
- 14) Van der Meer, Jentsje W. , "Rock slopes and Gravel Beaches under wave attack", Delft Hydraulics Communication, 1988.
- 15) Van der Meer, J.W. and Vedman, Johannes J., "Singular points at berm breakwater: scale effects, rear, round head longshore transport" ASCE, Coastal Engineering, Vol.17, 153-171, 1992.
- 17) 横木 亨 著, "漂砂와 海岸侵蚀", 清文閣, 1996.