

태풍에 의한 경사식 방파제의 피복재 침식 피해 산정 Estimation of Erosion Damage of Armor Units of Rubble Mound Breakwaters Attacked by Typhoons

김승우* · 서경덕*
Seung-Woo Kim* and Kyung-Duck Suh*

요 지 : 국내 경사식 방파제는 거의 매년 태풍 피해를 지속적으로 입고 있지만 피복블록의 침식피해를 정량적으로 분석한 사례가 드물다. 본 논문에서는 피복블록의 침식을 상대피해로 표준화하여 나타내었다. 블록의 이탈 개수가 조사된 경우에는 이를 블록의 전체 개수로 나누어 상대피해를 계산하였으며, 피해 복구 비용이 조사된 경우에는 현재 가치로 환산한 복구 비용과 상대피해의 관계를 이용하여 상대피해를 산정하였다. 상대피해는 태풍 매개변수인 중심기압 및 최대풍속과 지역별로 뚜렷한 상관관계를 보였다. 또한 기존 누적 피해 계산 방법 중에서 합리적인 방법을 선정하기 위해 수리모형 실험결과와 두 가지 수치 모의 방법을 비교하였다. 본 연구에서 Melby and Kobayashi (1998) 방법이 합리적임을 증명하였고 이 방법으로 계산된 상대피해를 관측된 상대피해와 비교하였다. 여수항 동방파제에서 관측된 상대피해와 수치 모의 결과는 잘 일치하지만 나머지 방파제에서는 상당한 차이를 보였다. 이는 기후변화에 따른 태풍 강도의 증가로 방파제의 설계파고보다 큰 파고가 사용연수 동안에 발생하여 실제 상대피해가 증가된 것으로 추정된다.

핵심용어 : 경사식 방파제, 상대피해, 표준화, 누적 피해

Abstract : Although the rubble mound breakwaters in Korea have been damaged by typhoons almost every year, quantification of erosion of armor block have seldomly been made. In this paper, the damage of armor units is standardized by the relative damage. In the case where the number of damaged units is reported, it is divided by the total number of units to calculate the relative damage. In the case where the rehabilitation cost is reported, the relative damage is calculated by using its relationship with the present value of the past rehabilitation cost. The relative damage is shown to have strong correlations with the typhoon parameters such as nearest central air pressure and maximum wind speed at each site. On the other hand, the existing numerical methods for calculating the cumulative damage are compared with hydraulic model tests. The method of Melby and Kobayashi (1998) is shown to give a reasonable result, and it is used to calculate the relative damage, which is compared with the measured damage. A good agreement is shown for the East Breakwater of Yeosu Harbor, while poor agreement is shown for other breakwaters. The poor agreement may be because waves of larger height than the design height occurred due to strong typhoons associated with climate change so that the relative damage increased during the last several decades.

Keywords : Rubble mound breakwater, Relative damage, Quantification, Accumulating damage

1. 서 론

국내 항만 구조물은 태풍에 의해 지속적으로 피해를 입고 있으며 대부분의 피해는 외곽시설인 방파제에 집중되고 있다. 국내 무역항과 연안항의 방파제는 대부분 2000년 이전에 시공되었으며 그 중 경사식 방파제는 70.4%, 혼성제는 21.6%, 그리고 소파블록피복제가 8%이다. 특히 경사식 방파제의 피복재는 방파제 연장에 따른 사용비율을 고려할 때 59.1%가 Tetrapod이며 34.2%가 사석으로 되어 있다(해양수산부, 2001).

또한 국내에서 25년간(1976~2000년) 발생한 주요 항만 시설 물의 피해원인을 기상요인별로 분석하면 태풍에 의한 피해가 88.1%로 대부분을 차지한다. 지역별로는 태풍의 영향을 가장 많이 받는 남해안 지역에서 집중적으로 피해가 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 남해안 지역의 방파제를 중심으로 태풍에 의한 Tetrapod의 피해를 분석하고자 한다. 해양수산부(2006)는 남해안 지역에서 태풍에 취약한 방파제에 대한 수리실험과 수치실험을 수행하여 보강 방안을 수립하였다. 특히 2003년 태풍 “매미”에 의한 남해안 지역의 방파제 피해

*서울대학교 건설환경공학부(Corresponding author : Seung-Woo Kim, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea, esfpknu7@snu.ac.kr)

가 크게 발생하여 피해 복구 및 보강 방안에 대한 연구가 진행되었다(부산지방해양수산청, 2004). 이와 같이 태풍에 의해 매년 반복되는 방파제 피해를 줄이기 위해서 피해에 대한 정량적인 관측 자료가 필요하다.

하지만 태풍에 의한 방파제 피해를 정량적으로 제시한 사례가 거의 없으며 많은 경우에 복구 비용 위주로 정리되어 있고 일부지역은 정성적인 피해 자료만 있는 경우도 있다(해양수산부, 2006). 본 연구에서는 복구비용을 상대피해로 표준화하는 방법을 제시한다. 여기서 상대피해는 피해를 입은 피복재의 개수를 전체 피복재의 개수로 나눈 값이다. 복구 비용과 피해 연장에 대한 정보만 있을 경우에는 경사식 방파제의 최적설계에서 Burcharth and Sorensen(2005)이 제안한 복구 비용 산정식으로부터 상대피해를 계산하였다. 관측된 상대피해를 수치모의 결과와 비교하기 위해서 합리적인 누적 피해 수치모의 방법이 필요하다. 누적 피해 계산 방법은 Melby and Kobayashi(1998) 방법과 Hanzawa et al.(1996) 방법이 있으며 후자는 전자보다 크기는 두 배 이상 큰 피해도를 산정한다(서·장, 2003). 수치해의 검증에 사용한 자료는 부산신항의 수리실험 자료(부산지방해양수산청, 2004)이다. 수치모의에서는 년 최대유의과고의 분포함수와 T년 최대유의과고 분포함수를 각각 사용하여 누적 피해 계산 방법을 검토한다. 또한 계산된 기대피해도와 실제 발생한 피해를 비교하기 위해서 구조물 설계 당시의 설계과고와 유의과고 분포를 사용하였다.

2. 피복재 피해의 표준화

2.1 대상 항만

1976년부터 2005년까지 국내 항만 구조물에 피해를 준 태풍은 24개이며 그 중 1985년에 발생한 태풍 “브랜다”, 2002년 태풍 “루사”, 그리고 2003년 태풍 “매미”에 의해 심각한 피해를 입었다. 태풍은 많은 경우에 남해안의 항만 구조물에 피해를 주었다. 본 연구의 대상은 8개의 태풍에 의해서 피복재 피해를 경험한 남해안의 7개 항만이다. 무역항은 부산신항, 장승포항, 여수항, 그리고 제주항이며, 연안항은 부산남항, 거문도항과 성산포항이다(Fig. 1). 장승포항을 제외하면 모두 3회 이상의 피해를 경험한 항만들이며 대부분의 피해는 항만의 외곽시설인 방파제에서 발생하였다(해양수산부, 2006).

2.2 피해규모의 표준화

경사식 방파제의 피해는 주로 피복재에 집중되었으며 피해 형태는 침식 및 이탈이 대부분이다. 해양수산부(2006)는 남해안의 7개 항만의 방파제 피해 사례를 수집 및 조사하였다. 하지만 피해조사는 대부분 피해 복구 비용과 피해 연장으로 정리되었고 일부는 피복재의 이탈 개수로 나타내었다. 피복재의 피해규모를 정량적으로 산정해야 하지만 주어진 자료만 가지고 피해도 및 상대피해를 계산하는 것은 한계가 있다. 따

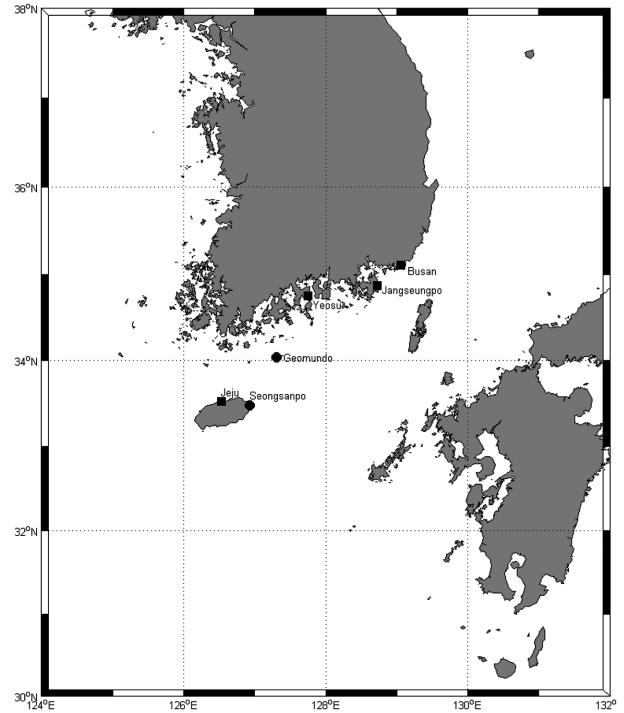


Fig. 1. Location map of severely damaged harbors (■ Trade harbors, ● Coastal harbors).

라서 본 연구에서는 제한된 자료를 사용하여 논리적인 방법으로 피해를 표준화하고자 노력하였다. 우선, 방파제 피해 연장과 피복재의 이탈 개수를 알고 있는 경우는 다음과 같이 단위 m 당 피해 개수, N_D 를 계산한다.

$$N_D(EA/m) = \frac{N_T}{L} \quad (1)$$

여기서 L 은 방파제 피해 연장(m), N_T 는 L 에서의 전체 피해 개수이다. N_D 를 표준단면도의 피복재 개수 $N_I(=EA/m)$ 로 나눠주면 상대피해, D 는 다음과 같이 계산된다.

$$D = \frac{N_D}{N_I} \quad (2)$$

실제로 방파제의 단면은 수심에 따라 다르지만 해양수산부(2006)와 해운항만청(1992)의 표준단면도를 기준으로 피해 자료를 정리하였다. 특히, 해운항만청에서 제공되는 세부적인 물량정보를 사용하여 N_I 를 계산하였다. 전체 피해 구간에서 집중적으로 피해가 발생한 구간이 있으나 본 연구에서 산정된 상대피해는 평균값이다.

방파제 피해 연장과 복구 비용을 알고 있는 경우에는 과거의 복구 비용을 현재 가치로 환산하고 Burcharth and Sorensen(2005)의 복구 비용 산정식을 사용하여 상대피해를 산정하였다. 과거에 발생한 비용은 다음 식에 의해 현재가치로 계산된다.

$$C_R = \sum_{n=1}^T (1+r)^n C_n \quad (3)$$

Table 1. Various real interest rates

Author	Kim et al. (2002)	Kweon (2004)	Suh et al. (2007)	Average
<i>r</i>	0.045	0.046	0.037	0.04

여기서 r 은 물가상승률에서 이자율을 뺀 실질이자율, T 는 구조물 완공 후 현재까지의 사용년수, n 은 피해 발생 시점부터 현재까지의 시간(년), C_n 는 과거의 복구 비용, C_R 는 현재화된 복구 비용이다. 위 식을 사용하기 위해서는 합리적인 실질이자율 r 을 산정해야 한다. Table 1은 여러 연구자들에 의해 제안된 실질이자율이며 본 연구에서는 기존 연구 자료의 평균값을 사용하였다.

한편 복구 비용을 초기 공사비, 상대피해 등으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{R_1} = (1+K)D_{TTP}C_{I,TTP}R \quad (4)$$

여기서 $C_{I,TTP}$ 는 현재 가치로 나타낸 Tetrapod의 초기 공사비, D_{TTP} 는 상대피해, $K(=0.3)$ 은 피해 발생 시 Tetrapod의 이동에 사용되는 비용계수이고 R 은 피해 복구시 발생하는 고비용 계수이다. R 은 피복재의 맞물림 정도에 따라 값이 다르며 맞물림이 클수록 값이 커진다. 인공 피복재를 난적으로 쌓는 유럽에서 Tetrapod와 Accropode의 고비용 계수 R 은 각각 1.5와 3.0이다(Burcharth and Sorensen, 2005). 하지만 국내에서는 Tetrapod를 정적으로 쌓기 때문에 유럽보다 많은 복구비용이 발생한다. 따라서 고비용 계수는 정적으로 쌓는 Accropode에 사용되는 3.0을 사용하였다.

식 (4)를 이용하면 Tetrapod의 상대피해는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D_{TTP} = \frac{C_{R_1}}{(1+K)C_{I,TTP}R} \quad (5)$$

이와 유사한 방법으로 피복석 및 기초사석과 상치 콘크리트의 상대피해를 다음과 같이 산정할 수 있다(김·서, 2010).

$$D_{ROCK} = \frac{C_{R_2}}{C_{I,ROCK}R} \quad (6)$$

$$D_{CONC} = \frac{C_{R_3}}{(1+K)C_{I,CONC}R} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서의 상대피해는 피해 부피를 전체 부피로 나눈 값을 의미한다. 또한 C_{R_2} 및 C_{R_3} 은 현재의 복구 비용이므로 $C_{I,ROCK}$ 과 $C_{I,CONC}$ 는 현재 가치로 계산된 초기 공사비이다. 초기 공사비는 표준단면도에서 계산한 부피와 김·서(2010)가 제안한 초기 공사 단가인 Table 2를 사용하여 계산할 수 있다. 김·서는 국토해양부(2008)의 공종별 단가를 사용하여 제작, 운반, 거치를 포함한 초기 공사 단가를 산정하였다. 이는 초기 공사비를 산정하기 위한 자료이며 K 와 R 은 복구 시 발생하는 추가적인 비용을 의미한다. 결론적으로 식 (3)과 식 (5), (6), (7)을 이용하면 방파제 복구 비용으로부터

Table 2. Initial construction costs depending on the weight of Tetrapod (unit: 1,000 won/m³)(김·서, 2010)

Item	Initial construction costs	
	Present	Burcharth and Sorensen (2005)
5 ton	215	
6.3 ton	193	
8 ton	190	
10 ton	182	
12.5 ton	179	
16 ton	172	80 (Cube)
20 ton	165	
25 ton	161	
32 ton	150	
40 ton	140	
50 ton	139	
64 ton	133	
Armor rock (filter)	37	40
Foundation rock	25	20
Cap concrete	83	-

상대피해를 계산할 수 있다.

Table 3과 4는 위와 같은 방법으로 산정한 7개 항만의 Tetrapod의 상대피해, 복구비용, 피해구간(=L), 피해개수(=N_T), 설계 유의파고 및 태풍 시 관측된 유의파고, 그리고 대표적인 태풍 매개변수를 나타낸다. 제시된 중심기압과 최대풍속은 태풍의 생애기간 동안의 최소·최대치가 아니며 항만과 가장 근거리에서 접근했을 때의 값이다. 왜냐하면 실제적인 구조물의 피해는 태풍이 구조물에 근접했을 때 주로 발생하기 때문이다. 태풍의 매개변수와 상대피해의 상관관계를 분석하면 향후 발생하는 태풍의 매개변수를 사용하여 구조물의 상대피해를 개략적으로 예측할 수 있을 것이다. 하지만 구조물의 위치, 태풍의 진로, 파랑의 전파특성, 조석 및 폭풍 해일을 동시에 고려해야 정확한 상대피해를 추정할 수 있을 것이다. 본 연구는 피해 예측에 가장 기초가 되는 자료를 제공함으로써 새로운 연구 방향을 유도하는 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

Table 3은 피복재의 피해 영역에 대한 정보를 제공하고 있으며 제두부의 피해는 약 71%이고 제간부의 피해는 29%이다. 제간부의 피해는 부산남항 서방파제, 여수항 동방파제, 여수항 서방파제, 그리고 서귀포항 동방파제에서 주로 관찰되었다. 2.2절에 제시한 방법으로 계산된 상대피해를 보면 부산남항 서방파제는 1979년에 발생한 태풍 “어빙”에 의해 13%의 상대피해를 경험하였고 여수항 서방파제 및 동방파제에서 1995년 태풍 “페이”와 2003년 태풍 “매미”에 의해 각각 9%와 8%의 피해가 발생하였다. 성산포항 동방파제는 25년 동안 1997년 태풍 “올리와”와 2002년 태풍 “루사”에 의해 각각 2%와 8%의 피해를 입었다. 한편 제두부 중심의 피해는 앞에서 언급한 항만 외에서 모두 발생하였으며 특히 부산신항과 장승포항에서 50%의 큰 피해가 발생하였다. 또한 거문도항 동방파제와 북방파제에서는 20여 년 동안 여섯 차

Table 3. Relative damage of Tetrapod, repair costs and design wave heights (unit: 1 million won)

Harbor/Breakwater	Name	Year	C_n	C_R	L (m)	N_T (EA)	H_{sD} (m)	H_{sM}/H_{sD}	Weight (ton)	Damaged part	Relative damage (D)
South Busan/East	AGNES	1981	73.8	204.5	59.0	-	4	1.75	12.5	head trunk	0.142
South Busan/West	IRVING	1979	270.7	811.7	289.0	-	5	1.40	12.5	trunk	0.127
	BRENDA	1985	28.6	67.9	100.0	-	5	1.10	12.5	head	0.031
New Busan/East	MAEMI	2003	1238	1448	-	-	5.5	1.35	32.0	head (A-A)	0.490
Jangseungpo/East	MAEMI	2003	-	-	116	300	3.40	-	8.0	head	0.507
Yeosu/East	MAEMI	2003	701.0	820.1	240.0	-	6.01	-	12.5	trunk (head)	0.082
Yeosu/West	FAYE	1995	103.0	164.9	106.0	-	4.00	1.38	10.0	trunk	0.088
Geomundo/East	THELMA	1987	37.0	81.1	95.0	-	4.70	1.28	12.5		0.029
	YANI	1998	56.0	79.71	37.0	-	4.70	-	12.5	head trunk	0.073
	RUSA	2002	1600	1947	400	-	4.70	-	12.5		0.164
	MAEMI	2003	147.0	172.0	60.0	-	4.70	-	12.5		0.097
Geomundo/North	RUSA	2002	14.0	17.0	23.0	-	2.80	-	5.0	head	0.037
	MAEMI	2003	245.3	265.3	70.0	-	2.80	-	5.0	head trunk	0.191
Jeju/Bridge	MAEMI	2003	-	46.0	20.0	-	5.80	-	32.0	head	0.055
Jeju/West	RUSA	2002	-	-	113.0	127	6.30	-	32.0	head	0.130
Seongsanpo/East	OLIWA	1997	71.0	105.1	114.0	-	6.50	1.08	25.0	trunk	0.022
	RUSA	2002	-	-	114.0	62	6.50	-	25	trunk	0.082

Table 4. Typhoon parameters for each breakwater

Harbor/Breakwater	Parameters of typhoon			
	Name	Year	Nearest central pressure (hPa)	Nearest max. wind speed (m/s)
South Busan/East	AGNES	1981	985	20.62
South Busan/West	IRVING	1979	975	20.62
	BRENDA	1985	990	30.94
New Busan/East	MAEMI	2003	955	38.55
Jangseungpo/East	MAEMI	2003	955	38.55
Yeosu/East	MAEMI	2003	955	38.55
Yeosu/West	FAYE	1995	960	33.41
Geomundo/East	THELMA	1987	970	38.67
	YANI	1998	975	28.27
	RUSA	2002	960	35.98
	MAEMI	2003	945	41.12
Geomundo/North	RUSA	2002	960	35.98
	MAEMI	2003	945	41.12
Jeju/Bridge	MAEMI	2003	935	46.26
Jeju/West	RUSA	2002	960	35.98
Seongsanpo/East	OLIWA	1997	965	35.98
	RUSA	2002	960	35.98

레의 피해가 반복적으로 발생하였으며 이는 거문도항이 전형적인 태풍 진로 상에 위치하고 있기 때문이다. 그 중 가장 큰 피해를 경험한 방파제는 북방파제로 2003년 태풍 “매미”에 의해 19%의 피해를 입었고 다음은 2002년 태풍 “루사”에 의해 10%의 피해를 경험한 동방파제이다. 제주항 연륙방파제와 서방파제도 태풍 “매미”와 태풍 “루사”에 의해 5%에서 10%의 피해가 발생하였다. 현재 사용하는 피복재의 안정 공식은 대부분 제간부에 파가 직각으로 입사하는 경우에 국한된다. 따라서 관측된 상대피해 중 제간부의 자료를 중심으로 수치 모의 결과와 비교하게 될 것이다. 향후 제두부와 제간부의 경사입사를 고려할 수 있는 안정식이 개발되면 관측된 제두부의 상대피해도 수치 모의와 비교할 수 있을 것이다.

Table 3의 상대피해는 몇 가지 가정을 사용하여 계산하였다. 실제 방파제의 단면은 수심에 따라 다르지만 표준단면도를 기준으로 계산하였다. 또한 조사된 복구 비용의 항목이 Tetrapod, 피복석, 기초사석, 상치 콘크리트로 구분되지 않을 경우에는 전체 복구 비용에서 피복석, 기초사석, 상치 콘크리트의 복구 비용을 제외한 나머지 비용을 Tetrapod 복구 비용으로 가정하였다. 이때 후면 피복석의 피해 규모에 대한 정의가 없는 경우에는 Tetrapod의 상대피해가 10% 이상이면 후면 피복석의 상대피해를 30%로 가정하였고 그 이하이면 10%로 가정하였다. 부산신항 동방파제의 경우에는 제두부의 세부적인 피해 관측 자료가 있어서 외해의 A-A 단면의 상대피해를 사용하였다(부산지방해양수산청, 2004).

2.3 태풍 매개변수와 상대피해의 관계

태풍의 강도에 따른 구조물의 피해는 피복재의 상대피해와 태풍 매개변수의 관계를 통해 분석하였다. 태풍의 대표적인 매개변수는 중심기압, 최대풍속, 최대풍 반경이다. 구조물에 실제적으로 피해를 주는 태풍의 강도는 구조물과의 최단거리에 위치한 태풍의 중심기압과 최대풍속을 사용하여 간접적으로 확인할 수 있다. 하지만 같은 태풍 강도에서도 진행방향과 구조물의 위치에 따라 피해의 정도가 다를 수 있다. 따라서 남해안 7개 항만을 지형적인 특성이 유사한 4개의 구간으로 구분하였다. 첫 번째 구간은 부산신항, 부산남항, 장승포항이고 두 번째 구간은 여수항이며 세 번째 구간은 거문도항 그리고 마지막 구간은 제주항, 성산포항이다. Fig. 2는 피복재의 상대피해와 태풍 중심기압의 관계를 나타낸 것이다. 전체적으로 중심기압이 낮을수록 상대피해가 증가한다. Fig. 2(c)와 (d)는 중심기압이 낮아질수록 상대피해가 커지지만 그 증가율은 Fig. 2(a)보다 작고 상대적인 분산성은 크게 나타난다. Fig. 2(b)의 여수항은 자료가 적어 중심기압과 상대피해의 관계를 추측하기가 어렵다.

Fig. 3은 태풍이 구조물과 최단거리에 있을 때 최대풍속과 중심기압의 상관관계를 보여주며 중심기압이 작을수록 상관성이 뚜렷해진다. 최대풍속과 중심기압이 반비례의 관계를 보

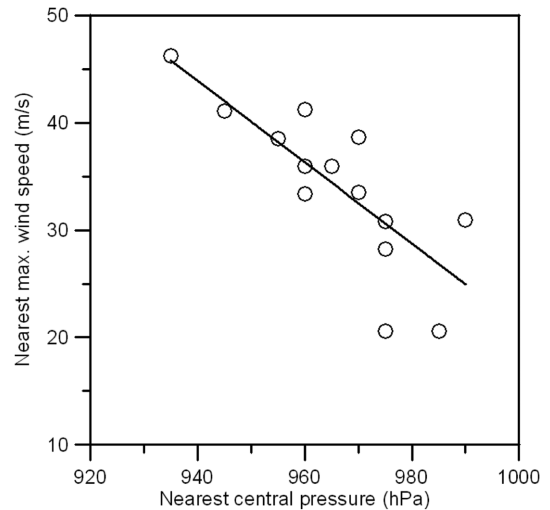


Fig. 3. Relationship between nearest max. wind speed and central pressure.

이므로 Fig. 2와 정반대로 최대풍속이 커질수록 상대피해가 증가할 것이다.

한편, Fig. 4는 피복재의 상대피해와 관측된 유의파고를 설계유의파고로 나눈 값의 관계를 보여준다. 실제로 태풍에 의한 피복재의 피해는 설계파고보다 큰 파고가 발생한 경우가

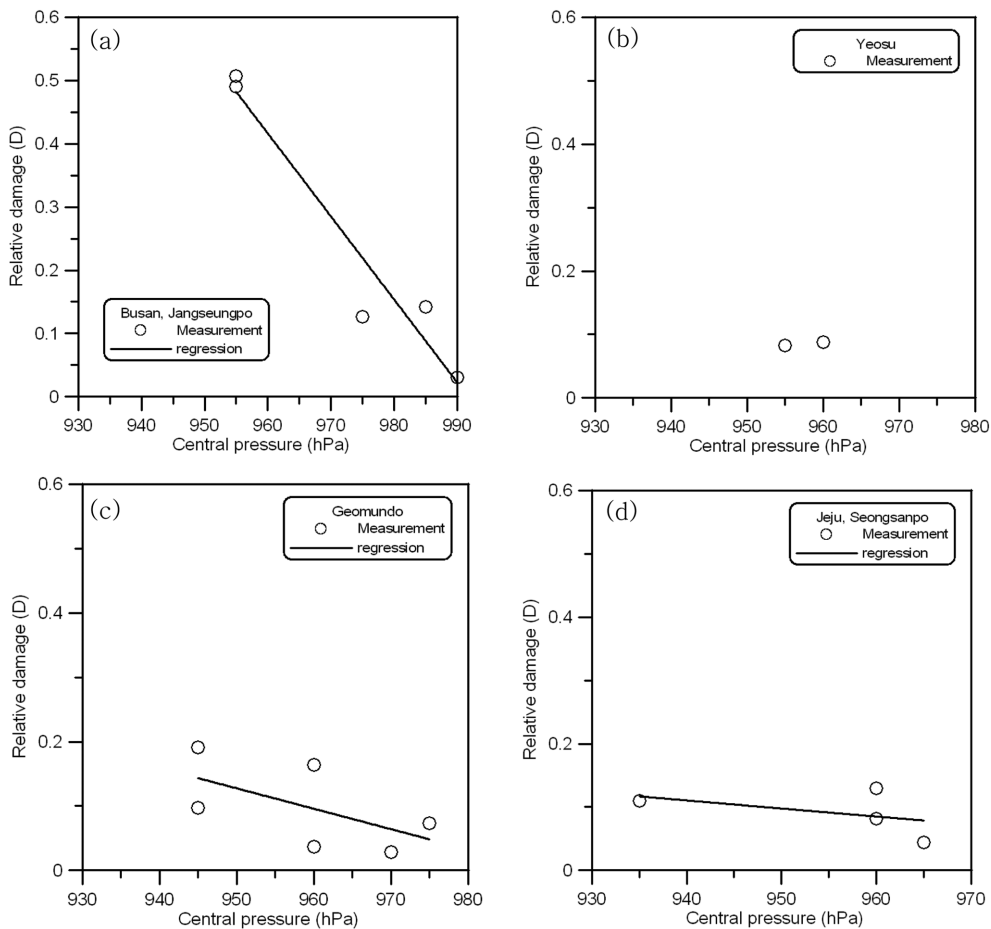


Fig. 2. Relationship between central pressure and relative damage (a) Busan & Jangseungpo, (b) Yeosu, (c) Geomundo, (d) Jeju & Seongsanpo.

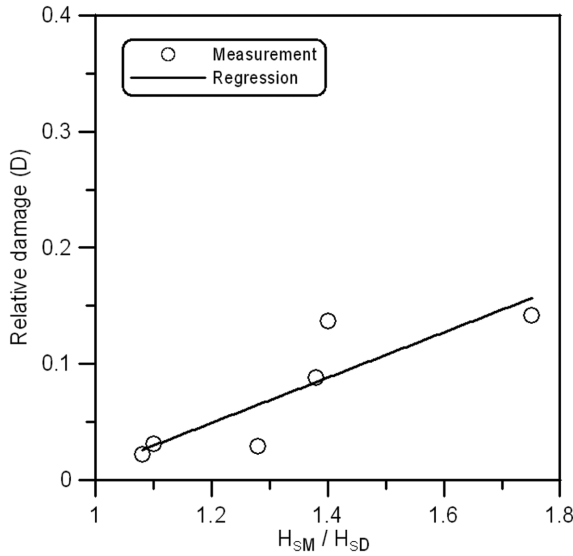


Fig. 4. Relative damage versus H_{SM}/H_{SD} .

따라서 유의파고의 비를 사용하면 상대피해와의 관계를 분명하게 분석할 수 있다. 전체 17개의 경우에서 파고가 관측된 경우는 7개이며 그 중 특정 단면에 대한 상대피해를 계산한 부산신항은 제외시켰다. 자료의 개수가 제한적이지만 유의파고의 비가 커질수록 상대피해가 커지는 것을 잘 나타낸다. Fig. 4는 설계파고보다 큰 유의파고가 발생하여 피해를 일으켰음을 보여주고 있다.

3. 피복재 피해 산정

Tetrapod의 피해는 van der Meer(1988)와 Hanzawa et al. (1996)이 각각 제안한 안정식을 사용하여 계산한다. Hanzawa et al.은 전면이 Tetrapod로 피복된 소파블록 피복재에 대한 안정식과 누적 피해 계산 방법을 제안하였고 van der Meer는 전형적인 경사식 방파제에 대한 안정식을 제시하였다. 한편 Melby and Kobayashi(1998)는 피복석에 대한 누적 피해 계산 방법을 수리 실험과 비교하여 제안하였다. 본 연구에서는 전형적인 경사식 방파제의 피복재 피해를 산정하기 때문에 van der Meer의 안정식과 Melby and Kobayashi 및 Hanzawa et al.이 각각 제안한 누적 피해 계산 방법을 사용하였다. 서·장(2003)은 두 누적 피해 계산 방법을 비교하였고 피해도가 크개는 두 배 이상 차이가 발견되어 수리 실험의 필요성을 요구하였다. 하지만 본 연구에서는 수리 실험을 수행하지 않고 누적 피해 계산 방법 중 합리적인 방법을 선정하기 위해 기존 관측자료 및 수리 실험 자료를 사용하였고 여러 가지 수치 모의를 수행하여 비교하였다. 사용된 자료는 태풍 “매미”의 내습 시 관측된 유의파고 및 유의주기와 수리 실험에서 계산된 상대피해를 사용하였다. 또한 수치 모의에서 년 최대파고와 사용년수인 T 년 최대파고의 분포함수를 사용하여 누적 피해 계산 방법을 검토하였다.

3.1 태풍 “매미”에 의한 피복재의 피해 계산

2003년 9월에 발생한 태풍 “매미”에 의해 부산신항 동방파제의 제두부에 큰 피해가 발생하였다. Fig. 5의 동방파제 전면의 DW지점에서 유의파고와 유의주기가 관측되어 태풍에 의한 구조물의 피해를 규명할 수 있게 되었다. Table 5는 태풍 매미에 의해 피해가 발생한 주요 시간대인 9월 12일 17시부터 23시까지의 유의파고와 유의주기, 그리고 1시간을 평균주기로 나눈 1시간 동안의 파의 개수이다. 여기서 평균주기는 유의주기를 1.15로 나누어 계산하였다(Goda, 2000). 부산지방해양수산청(2004)은 Table 5의 파랑정보와 Tetrapod 25 ton을 사용하여 3차원 실험에서 제간부와 제두부의 상대피해를 각각 1.3%와 19.9%로 계산하였다. 여기서 상대피해의 정의는 2절의 식 (2)와 동일하다.

한편 같은 파랑조건에서 Melby and Kobayashi(1998) 방법과 Hanzawa et al.(1996)의 방법을 사용하여 수치 모의를 수행하였다. Melby and Kobayashi 방법은 시간 t 부터 $t + \Delta t$ 사이에 발생하는 피해의 증가량을 계산하여, 이를 시간 t 까지의 피해에 더해줌으로 $t + \Delta t$ 까지의 누적 피해를 계산한다. Tetrapod의 중량을 산정하는 안정식은 van der Meer(1988)의 공식을 사용한다. 하지만 제안된 공식은 구조물의 경사가 1:1.5일 때만 유효하다. 그러나 실제 경사식 방파제는 구조물의 경사사가 1:1.33에서 1:2까지 다양하여 안정식의 보정이 필요하다. 안정식의 보정은 Hudson(1959) 공식에서 안정수

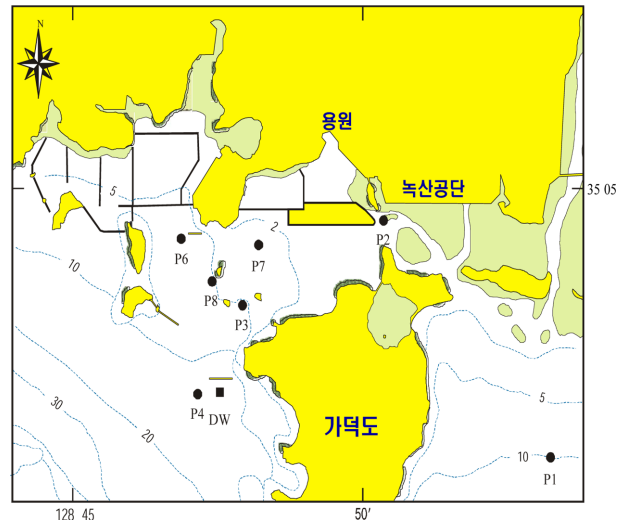


Fig. 5. Wave measurement stations near Busan new port.

Table 5. Significant wave heights and wave periods measured at DW in Fig. 5 during typhoon MAEMI

Time (mmddhh)	H_s (m)	T_s (m)	N_w
091217	3.96	17.19	241
091218	4.40	16.53	250
091219	5.85	17.00	244
091220	7.41	16.76	247
091221	7.77	16.95	244
091222	7.38	17.05	243
091223	4.35	14.16	292

N_s 와 구조물의 전면 경사 $\cot \alpha$ 의 관계를 이용하여 다음과 같이 산정한다.

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(\frac{\cot \alpha}{1.5}\right)^{1/3} A_v \left(3.75 \frac{N_0^{0.5}}{N_w^{0.25}} + 0.85\right) s_{om}^{-0.2} \quad (8)$$

여기서 D_n 은 Tetrapod의 공칭직경, N_0 는 방파제에 평행한 방향으로 1 공칭 직경의 폭을 갖는 구간에서 이탈한 Tetrapod의 개수, $s_{om} = H_s/L_0$ 이며 L_0 는 심해파장이다.

누적 피해 $N_0(i)$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$N_0(i) = N_0(i-1) + \left(\frac{H_s(i) s_{om}^{0.2}(i) \left(\frac{\cot \alpha}{1.5}\right)^{-1/3} \frac{1}{A_v} - 0.85}{3.75} \right)^2$$

$$T_m(i)^{-0.5} (t_i^{0.5} - t_{i-1}^{0.5}) \quad (9)$$

여기서 $N_0(i-1)$ 은 $t = t_{i-1}$ 에서의 알고 있는 피해도이고, $H_s(i)$ 및 $T_m(i)$ 은 각각 $t = t_{i-1}$ 부터 $t = t_i$ 까지의 유의파고와 평균주기를 나타내며 일정하다고 가정한다. 위 식을 이용하면 $t = 0$ 에서 $N_0 = 0$ 으로 시작하여 H_s 및 $T_m(=T_s/1.15)$ 이 일정한 입사파에 의한 피해도 N_0 를 계산할 수 있다.

반면 Hanzawa et al.(1996) 방법은 어떤 시간 t 까지의 누적 피해를 태풍의 지속시간에 해당하는 파의 개수로 환산한다. 이것을 t 부터 $t + \Delta t$ 까지의 시간 동안에 방파제에 작용하는 파의 개수에 더한다. 이렇게 얻어진 파의 개수를 이용하여 다시 $t + \Delta t$ 까지의 누적 피해를 계산한다. 우선 $t = t_{i-1}$ 까지의 누적피해 $N_0(i-1)$ 를 파의 개수로 환산하면 다음과 같다.

$$N_w' = \left(\frac{N_0(i-1)}{\left(\frac{H_s(i) s_{om}^{0.2}(i) \left(\frac{\cot \alpha}{1.5}\right)^{-1/3} \frac{1}{A_v} - 0.85}{3.75}\right)^2} \right)^2 \quad (10)$$

$t = t_i$ 까지의 누적 피해 $N_0(i)$ 는 식 (8)에 $N_w = N_w' + N_w(i)$ 및 $H_s = H_s(i)$ 를 대입하여 계산한다. 여기서 $N_w(i)$ 는 $t = t_{i-1}$ 와 $t = t_i$ 사이의 파의 개수이다.

누적 피해 $N_0(i)$ 는 다음과 같이 산정한다.

$$N_0(i) = \left(\frac{H_s(i) s_{om}^{0.2}(i) \left(\frac{\cot \alpha}{1.5}\right)^{-1/3} \frac{1}{A_v} - 0.85}{3.75} \right)^2 \left[N_w' + \frac{t_i - t_{i-1}}{T_m(i)} \right]^{0.5} \quad (11)$$

Fig. 6은 시간에 따라 계산된 두 방법의 결과이다. 피해도가 작은 9월 12일 19시까지 두 방법이 거의 비슷하나 피해도의 증가율이 큰 19시 이후에 두 방법에서 57% 정도의 차이를 보인다. 본 연구의 대상이 된 제간부 피해는 크지 않지만 피해가 큰 경우에는 두 방법은 더 큰 차이를 보인다.

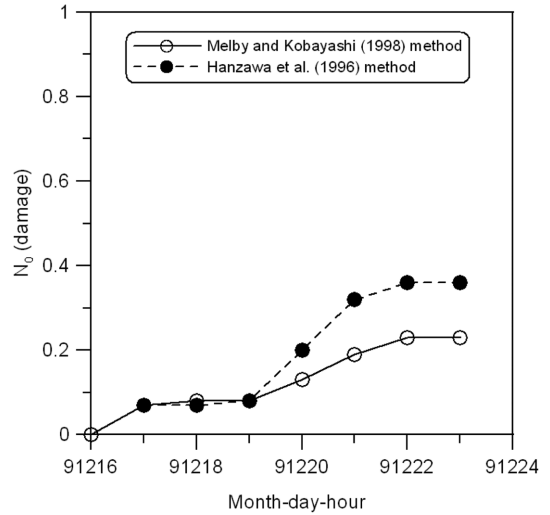


Fig. 6. Accumulated damage level N_0 during typhoon MAEMI.

Table 6. Comparison of damage level between numerical methods and experimental result

Item	Melby and Kobayashi (1998) method	Hanzawa et al. (1996) method	Experimental result
N_0	0.23	0.36	-
D (%)	2.5	2.9	1.3

Table 7. Damage levels and relative damage according to limit states (Burcharth and Sorensen, 2005)

Damage level	N_{od_cri}	D (relative damage)
Initial	0.3	2%
Serviceability	0.5	5%
Repairable	1.5	15%
Ultimate	2.1	30%

또한 Table 6에서 실험값의 상대피해는 Melby and Kobayashi의 결과와 보다 가깝다. 식 (9)와 (11)에서 계산한 피해도는 식 (12)를 사용하여 상대피해로 환산하였다.

$$D = 0.018e^{1.372N_0} \quad (r^2 = 0.95) \quad (12)$$

위 관계식은 Burcharth and Sorensen(2005)이 각 한계상태식에 대하여 제시한 상대피해와 피해도의 자료인 Table 7을 사용하여 김·서(2010)가 곡선맞춤한 식이다.

3.2 누적 피해도 산정 방법의 비교

3.1절에서 태풍 “매미”의 연속 파랑 자료를 사용하여 두 가지 누적 피해 계산 방법을 비교하였다. 하지만 실험결과가 한 가지 경우 밖에 없어 누적 피해 계산 방법의 추가적인 검증이 필요하다. 이에 년 최대파고의 분포함수와 T 년 최대파고의 분포함수를 각각 사용하여 누적 피해 계산 방법을 검토한다. 지금까지 사용년수 T 년 동안의 기대피해도 산정은 년 최대파고의 분포함수를 사용하였다(Hanzawa et al., 1996; Melby and Kobayashi, 1998). 년 최대파고의 분포함수에서 매년 최대유의파고를 사용년수 동안 추출하여 누적 피해도를

계산한다. 그러나 누적 피해 방법에 따라 기대피해도가 적어도 2~3배 정도 차이가 발생할 수 있다(서·장, 2003). 따라서 피해도를 누적하지 않고 기대피해도를 산정하는 방법을 제안한다. 년 최대파고의 분포함수 대신에 T년 최대파고의 분포함수를 사용하면 사용년수 동안에 평균적으로 1번 발생하는 최대유의파고에 의한 피해도를 계산할 수 있다. 즉, 사용년수 동안의 피해도를 누적하지 않고 산정할 수 있게 된다. T년 최대파고의 분포함수를 사용할 경우에 분포 추정에 정확성이 요구되며, 장기적인 파랑관측 자료가 필수적이다. 하지만 본 연구에서는 두 수치적인 방법을 비교하기 위해 분포함수의 매개변수 추정의 오차가 없다고 가정한다. 이는 년 최대파고의 분포함수의 매개변수가 정확하게 추정되면 T년 최대파고의 분포함수를 수학적으로 추정할 수 있음을 의미한다(Goda, 2000).

Fig. 7은 년 최대파고의 분포함수를 사용하여 사용년수 동안의 기대피해도를 누적하여 계산하는 과정이다. van der Meer(1988)의 안정 공식에서 경험계수 A_v , $\Delta(=\rho_s/\rho_w - 1)$, 그리고 대표임경 D_n 을 매 회 모의 시 추출한다. 년 최대파고의 분포함수에서 년 최대유의파고를 추출하고 추출된 유의파고에 단기 변동 오차와 수심 제한 조건을 고려하여 다시 파고를 추출한다. 단기 변동성 계수 F_{H_s} 는 파고 자료의 질적 정도를 고려할 수 있으며 본 연구에서는 평균과 변동계수에 각각 1.0과 0.1을 사용하였다. 수심 제한 조건으로 해저 경사가 1:20인 조건으로 가정하고 추출된 파고는 0.715 h를 초과하

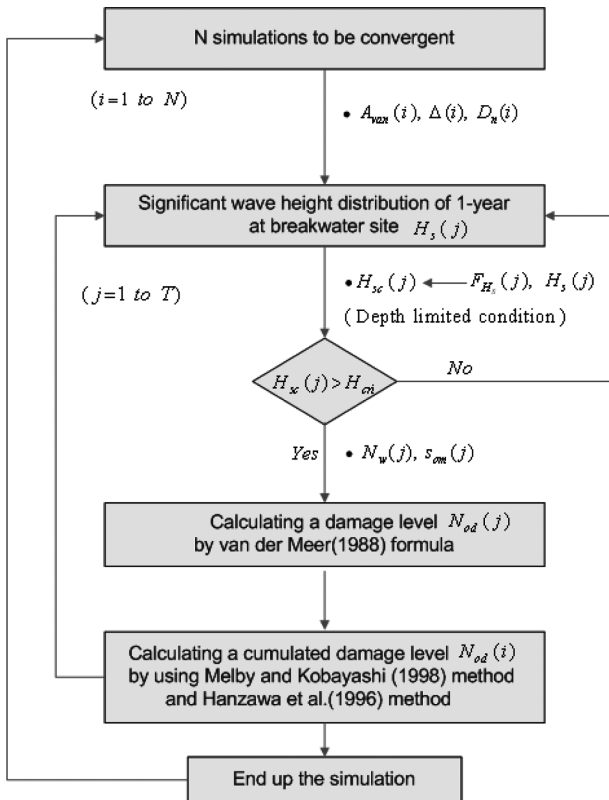


Fig. 7. Flow chart of calculation of expected damage level using annual maximum wave height distribution.

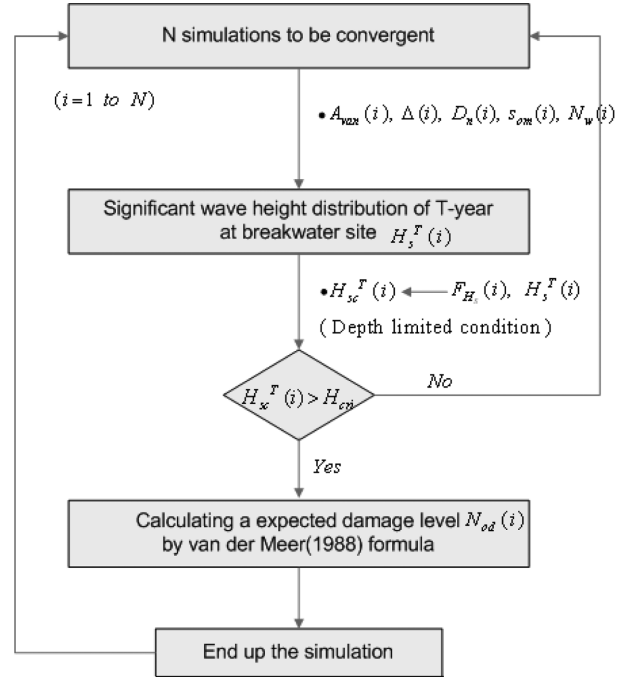


Fig. 8. Flow chart of calculation of expected damage level using T-year maximum wave height distribution.

지 않도록 하였다. 추출된 파고가 임계파고보다 큰 조건에서 피해도를 계산하고 사용년수 동안 누적하면 1회 모의에 해당하는 누적 피해도가 산정된다. 누적 피해도의 변동계수가 5% 이하가 되도록 모의 횟수 10,000번을 수행하였고 평균하여 기대피해도를 산정하였다.

한편 Fig. 8은 T년 최대파고의 분포함수를 사용한 기대피해도 계산 과정이다. 사용년수 동안에 발생할 수 있는 최대유의파고를 평균적으로 1회 추출하므로 Fig. 7의 누적 피해 개념이 포함되지 않으며 나머지 계산과정은 Fig. 7과 동일하다. T년 최대파고의 분포함수는 다음과 같다(Goda, 2000).

$$F(H_s^T) = [F(H_s)]^T = [\exp\{-\exp(-k(H_s - \lambda))\}]^T \quad (13)$$

여기서 $F(H_s)$ 는 년 최대파고의 분포함수, $F(H_s^T)$ 는 T년 최대파고의 분포함수, T는 사용년수, k, λ는 각각 척도 모수와 위치 모수이다. 년 최대파고의 분포함수를 T승하여 T년 최대파고의 분포함수를 산정한다. Table 8은 피해도 산정 과정에 사용된 각 확률변수의 통계적 특성치이다.

Table 9는 년 최대파고의 분포함수를 사용한 기대피해도와 T년 최대파고의 분포함수를 사용한 기대피해도이다. van der Meer(1988)의 안정 공식은 체간부의 피해만 계산할 수 있기 때문에 체두부의 피해를 산정할 수 없다. 따라서 Table 3의 관측된 피해 사례 중에서 적어도 체간부의 피해를 포함하는 경우만 수치 모의를 실시하였다. 특히, 부산신항의 경우는 실제 피해 증량은 32 ton이지만 수리 모형실험에서 25 ton을 사용하였기 때문에 수치모의에서도 같은 증량으로 기대피해도를 계산하였다. 상대적으로 기대피해도가 작은 부산남항 동

Table 8. Statistical characteristics of design variables for van der Meer(1988) formula

Variable	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation	Distribution
A_v	1.00	0.100	0.10	Normal
Δ	1.233	0.047	0.038	Normal
$D_n(m)$	various	various	0.01	Normal
N_w	1000	250	0.25	Normal
s_{om}	0.04	0.01	0.25	Normal
$H_s(m)$	k, λ were calculated from Kim and Suh (2009)			Gumbel

Table 9. Expected damage levels of trunk section using various methods

Harbor/Breakwater	$W(\text{ton})$	$\cot \alpha$	Damage part in real	Gumbel dist.		N_0		T-year distribution
				k	λ	1-year distribution		
						Melby and Kobayashi (1998)	Hanzawa et al. (1996)	
South Busan/East	12.5	2	head trunk	1.720	1.725	0.105	0.140	0.133
South Busan/West	12.5	1.5	trunk	1.376	2.157	0.348	0.459	0.278
New Busan/East	25.0	1.5	head (trunk)	1.251	2.372	0.294	0.424	0.380
Yeosu/East	12.5	1.5	trunk (head)	1.639	3.623	1.257	2.151	1.303
Yeosu/West	10.0	1.33	trunk	2.463	2.411	0.309	0.443	0.341
Geomundo/East	12.5	1.5	trunk (head)	1.960	2.704	0.373	0.597	0.442
Geomundo/North	5.0	1.5	head trunk	3.290	1.611	0.116	0.150	0.153
Seongsanpo/East	25.0	1.5	trunk	1.529	3.941	0.583	0.948	0.601

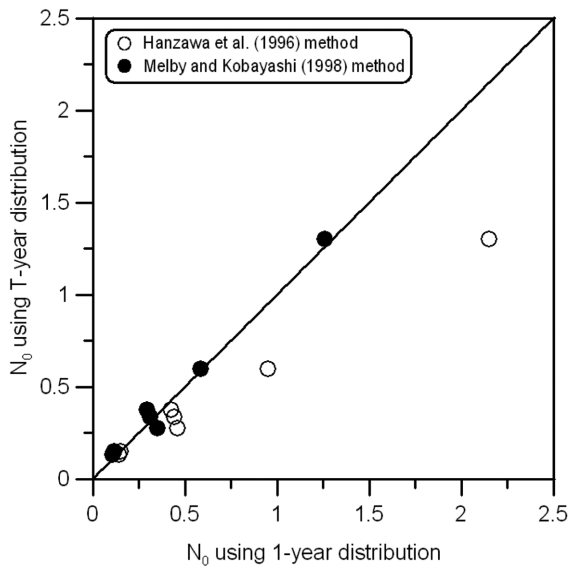


Fig. 9. Comparison of expected damage level between Melby and Kobayashi (1998) method and Hanzawa et al. (1996) method.

방파제, 부산신항 동방파제, 그리고 거문도항 북방파제에서는 년 최대파고의 분포함수를 사용한 Hanzawa et al.(1996)의 누적 방법이 T년 최대파고의 분포함수를 사용한 결과와 잘 일치한다. 하지만 기대피해도가 다소 큰 다른 방파제에서는 Hanzawa et al.의 누적 방법이 과도하게 큰 값을 산정하는 경향을 보인다. 하지만 년 최대파고의 분포함수를 사용한 Melby and Kobayashi 방법은 기대피해도의 크기와 상관없이 T년 최대파고의 분포함수의 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이를 좀 더 명확하게 검토하기 위해 Fig. 9에서 가시적으로 기대피해도를 비교하였다. 기대피해도가 0.5 이하에서는 두 누

적 방법 모두 T년 최대파고의 분포함수의 결과와 잘 일치하지만 기대피해도가 0.5를 초과할 때 Hanzawa et al. 방법은 나머지 두 방법에 비해 크게는 65% 이상 큰 값을 산정한다. 이와 같이 두 누적 피해 방법에서 Melby and Kobayashi 방법이 보다 합리적임을 보였다.

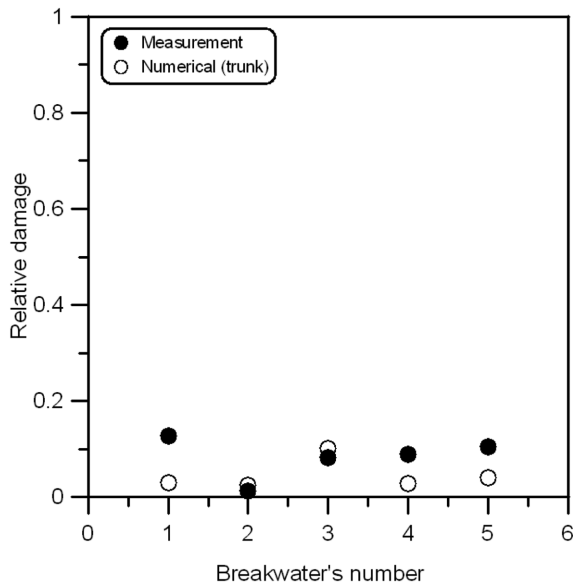
4. 피복재 피해의 비교

2절에서 관측된 피해 사례를 표준화하였고 3절에서 제간부의 피해에 대해 수치모의를 수행하였다. 본 절에서는 제간부에 국한하여 관측치와 수치 모의 결과를 Table 10에서 비교하였다. 기대피해도로 산정된 수치모의 결과는 식 (12)를 사용하여 상대피해로 환산하였다. 부산신항의 수치모형 실험결과를 포함한 제간부의 관측자료는 5가지이다. 두 결과를 비교하기 전에 유의해야 할 사항은 다음과 같다. 수치 모의된 결과는 사용년수 50년 동안의 기대피해도이며 관측된 피해도는 시공 후부터 현재까지 사용기간 동안의 피해도이다. 만약 피해를 입은 방파제의 사용기간이 50년이 된다면 두 결과의 비교는 직접적으로 비교될 수 있다. 하지만 사용기간이 구조물의 사용년수보다 작을 경우에 직접적인 비교는 조심해야 한다. 여수항의 경우는 사용기간이 50년이 되어 수치 모의의 결과와 비교하기에 가장 좋은 자료이다. 또한 부산 남항의 사용기간은 79년으로 사용년수 50년에서 29년을 더 초과했다. 나머지 부산신항과 서귀포항의 사용기간은 각각 8년과 12년으로 사용년수보다 다소 작다. 또한 본 연구의 수치모의에서 사용한 파랑 자료는 구조물의 설계 당시의 자료이기 때문에 최근 발생한 강도 높은 태풍에 의해 발생한 고파랑을 고려하지 못한다.

결과적으로 Table 10에서 여수항 동방파제는 관측된 값과

Table 10. Comparison of relative damage between measurements and numerical results

No	Harbor/Breakwater	Used life-time (yrs)	Number of occurrence of design wave height or greater	Damage part	Relative damage (D)	
					Numerical result (Melby and Kobayashi, 1998)	Measurement
1	South Busan/West	79	1	trunk	0.029	0.127
2	New Busan/East	8	1	trunk	0.025 (real time series H_s)	0.013 (experimental test)
3	Yeosu/East	50	1	trunk (head)	0.101	0.082
4	Yeosu/West	50	1	trunk	0.028	0.089
5	Seongsanpo/East	12	2	trunk	0.040	0.104

**Fig. 10.** Comparison of relative damage between measurement and numerical result.

수치 모의한 결과가 비슷하게 산정되었고 부산신항의 수리실험자료 역시 수치 모의와 유사한 결과를 얻었다. 하지만 부산남항 서방파제, 여수항 서방파제에서 두 결과는 상당한 차이를 보이고 있다(Fig. 10). 이는 앞에서 언급한 설계 당시보다 강도가 증가된 태풍의 영향이 주원인일 것이다. 또 다른 이유는 수치 모의에서 조위를 직접적으로 고려하지 못했기 때문일 것이다. 구조물의 위치의 설계파고를 산정할 때 조위를 고려하여 파랑변형을 수행하였지만 나머지 분포 추정 과정에서는 조위의 변동성이 포함되지 않았다. 향후 개정된 심해설계파와 조위, 폭풍 해일 등을 고려하여 수치모의를 수행한다면 보다 향상된 결과를 얻게 될 것이다. 궁극적으로 구조물의 사용기간이 50년이기 때문에 기후변화에 대한 개념이 설계에 포함되지 않으면 구조물의 기능을 목표로 하는 기간 동안 수행하기가 어렵게 될 것이다. 또한 구조물의 피해에 대한 정보를 계속해서 축적하고 피해도를 예측할 수 있는 모형이 발전된다면 구조물의 수명동안 기능을 온전히 수행할 수 있는 설계를 할 수 있을 것이다.

5. 결 론

태풍에 의한 구조물의 피해는 매년 반복되고 있지만 지금까지 대부분의 피해 사례는 간략한 피해규모와 복구비용으로

정리되어 왔다. 하지만 구조물의 피해를 효과적으로 제어하기 위해 구조물의 정량적인 피해규모 산정이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 경사식 방파제의 피복재 침식에 대한 피해규모를 상대피해로 표준화 하는 방법을 제시하였다. 피복재의 피해 개수가 조사된 경우에는 이를 피복재 전체 개수로 나누어 상대피해를 계산하였으며, 피해 복구 비용이 조사된 경우에는 이를 현재 가치로 환산한 복구 비용과 상대피해의 관계를 이용하여 상대피해를 계산하였다. 표준화된 상대피해는 제간부에 국한하여 수치모형결과와 비교되었다. 수치모형에서 누적 피해를 계산하기 위해 제안된 기존의 방법들을 수리모형실험 결과와 비교하여 합리적인 방법을 채택하였다. 채택된 수치모형을 사용하여 제간부의 피복재 침식에 대한 상대피해를 계산하였고 관측결과와 비교하였다. 수치모형은 사용년수 50년 동안에 발생할 수 있는 기대피해도를 산정하기 때문에 비교 대상인 방파제의 실제 사용년수가 50년일 때 가장 이상적인 비교가 된다. 실제 사용년수가 50년인 여수항 동방파제는 수치모형과 관측결과가 비교적 잘 일치함을 보였다. 하지만 나머지 방파제는 실제 사용년수가 계획된 사용년수보다 짧음에도 불구하고 관측된 상대피해가 크게 계산되었다. 이는 기후변화에 따른 태풍 강도의 증가로 인하여 설계파고를 초과하는 고파랑이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 구조물의 설계 당시의 파괴자료를 사용하여 파괴분포를 추정하더라도 구조물의 사용년수에 상응하는 수십년 동안에 연안환경이 변화되어 목표로 하는 구조물의 성능을 사용년수 동안에 발휘하기가 어렵게 될 수 있다. 앞으로는 구조물의 설계 단계에서부터 기후변화를 고려한 파괴분포를 산정해야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국해양수산진흥원 지원과제인 ‘항만구조물 신뢰성 설계법 개발’ 연구과제(PM48400)와 서울대학교 BK21 안전하고 지속가능한 사회기반건설 사업단의 지원을 받았습니다. 본 연구는 서울대학교 건설환경종합연구소에서 수행되었습니다.

참고문헌

국토해양부 (2008). 2008년 하반기 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가.

- 권혁미 (2004). 대도시 아스팔트 포장공법에 대한 LCC 분석 모델 개발 및 VE 평가에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교.
- 김승우, 서경덕 (2010). 경사식 방파제의 비용 최적화에 기초한 부분안전계수 및 목표파괴확률 산정, 한국해양해양공학회논문집, 22(3), 191-201.
- 김창학, 이철규, 최형래, 강인석 (2002). 항만구조물의 VE/LCC 사례 적용 연구, 대한토목학회 정기학술대발표회논문집, 51-41.
- 부산지방해양수산청(2004). 부산신항 방파제 태풍피해복구 및 보강공사 재검토 보고서.
- 서경덕, 김덕래, 김경숙 (2007). 장기간의 항만 폐쇄와 일시적 중단이 직립 방파제 케이슨의 최적설계에 미치는 영향, 한국해양해양공학회지, 19(2), 113-127.
- 서경덕, 장은석 (2003). 방파제 피복층의 누적 피해 계산 방법의 비교, Ocean and Polar Research, 25(3s), 417-421.
- 해양수산부 (2001). 경사식 방파제의 최적설계 기술개발 II.
- 해양수산부 (2006). 항만시설(방파제) 태풍피해 취약지역 보강방안용역 총괄보고서.
- 해운항만청 (1992). 전국 항만 구조물도집, 무역항 및 연안항편
- Burcharth, H.F. and Sorensen, J.D. (2005). Optimum safety levels for breakwaters, Proc. Coastline, Structures and Breakwaters, London, UK, 20-32.
- Goda, Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures, 2nd edn. (World Scientific, Singapore)
- Hanzawa, M., Sato, H., Takahashi, S., Simosako, K., Takayama, T. and Tanimoto K. (1996). New stability formula for wave-dissipating concrete blocks covering horizontally composite breakwaters, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Orlando, 1665-1678.
- Melby, J. and Kobayashi, N. (1998). Progression and variability of damage on rubble mound breakwaters, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 124, 286-294.
- van der Meer, J. W. (1988). Stability of Cubes, Tetrapods and Accropods, Proc. of the Breakwaters '88 Conference; Design of Breakwaters, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, UK, 71-80.

원고접수일: 2010년 6월 22일

수정본채택: 2010년 8월 2일

게재확정일: 2010년 9월 2일