

## Note

## 방파제 피복층의 누적 피해 계산 방법의 비교

서경덕\* · 장은석

서울대학교 지구환경시스템공학부  
(151-742) 서울시 관악구 신림9동 산56-1번지

## Comparison of Calculation Methods of Cumulative Damage of Breakwater Armor Layer

Kyung-Duck Suh\* and Eun-Seok Chang

School of Civil, Urban, and Geosystem Engineering, Seoul National University  
Seoul 151-742, Korea

**Abstract :** In the reliability design of the breakwater armor layer, it is often necessary to calculate the damage accumulated over the life of the breakwater. In this paper, comparison is made between the two methods proposed by Hanzawa *et al.* in 1996 and Melby and Kobayashi in 1998 to calculate the cumulative damage of the breakwater armor layer. In the case where a severe damage occurs at the beginning of the life of the breakwater, the two methods do not show significant difference, but in general the former predicts a cumulative damage several times larger than the latter.

**Key words :** 피복층(armor layer), 방파제(breakwaters), 피해(damage)

## 1. 서 론

Hudson(Shore Protection Manual 1984) 또는 van der Meer(1987, 1988)의 경험식을 이용하면 한 설계 폭풍의 절정기 동안에 발생하는 사석방파제 피복층의 피해 정도를 계산할 수 있다. 그러나, 방파제 피복층의 신뢰성 설계에서는 방파제 수명 동안에 발생하는 누적 피해를 계산해야 할 경우가 종종 있다. 필자들이 아는 바로는, 문헌상에 발표된 누적 피해 계산 방법으로 두 가지가 있다. Hanzawa *et al.*(1996)과 Melby and Kobayashi(1998). 이들 방법은 저자 자신들 이외에 Suh *et al.*(2002)과 Balas and Balas(2002)에 의해 각각 사용된 바 있다.

Hanzawa *et al.*의 방법에서는 어떤 시간  $t$ 까지의 누적 피해를 폭풍의 지속 시간에 해당하는 파의 개수로 환산한다. 이것을  $t$ 부터  $t + \Delta t$ 까지의 시간 동안에 방파제에 작

용하는 파의 개수에 더한다. 이렇게 얻어진 파의 개수를 이용하여 다시 시간  $t + \Delta t$ 까지의 누적 피해를 계산한다. 시간에 따라 변하는 파랑 조건에 대하여 이러한 절차를 반복한다. 한편, Melby and Kobayashi의 방법에서는 시간  $t$ 부터  $t + \Delta t$  사이에 발생하는 피해의 증가량을 계산하여, 이를 시간  $t$ 까지의 피해에 더해줌으로써  $t + \Delta t$ 까지의 누적 피해를 계산한다. 본 논문에서는 재래식 사석 마운드와 방파제 피복층으로 테트라포드를 사용하는 경우에 대하여 이 두 가지 방법을 비교한다.

## 2. 계산 방법

## Melby and Kobayashi의 방법

van der Meer(1987)는 돌입파(plunging wave)와 쇄도파(surging wave)에 노출된 사석방파제의 사석 피복층의 안정성에 대한 경험식들을 제안하였다. 안정수,  $N_s = H_s / (\Delta D_{n50})$ 는 돌입파와 쇄도파 사이에서 최소값을 나타내었

\*Corresponding author. E-mail : kdsuh@snu.ac.kr

으며, 여기서  $H_s$ 는 유의파고,  $\Delta = \rho_a/\rho - 1$ ,  $\rho_a$ 는 피복석의 질량,  $\rho$ 는 유체의 질량,  $D_{n50} = (M_{50}/\rho_a)^{1/3}$ , 그리고  $M_{50}$ 은 피복석 중량의 중앙값이다. Melby and Kobayashi(1998)는 이 안정수의 최소값을

$$N_s = C_N 6.2^{PQ} P^{Q(0.18P - 0.065)} (\cot\theta)^{0.25Q} \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}}\right)^{0.2} \quad (1)$$

로 표시하였다. 여기서  $C_N$ 은 경험 계수,  $P$ 는 투과 계수,  $Q = (P + 0.5)^{-1}$ ,  $\tan\theta$ 는 피복층의 경사,  $S$ 는  $A/D_{n50}^2$ 로 정의되는 피해도,  $A$ 는 피복층 프로파일의 침식 단면적, 그리고  $N_w$ 는 피해도가 영인 상태부터  $S$ 가 될 때까지 작용하는 파의 개수를 나타낸다. 그들은 식 (1)을

$$S = a_s \left(\frac{H_s}{\Delta D_{n50}}\right)^5 N_w^b \quad (2)$$

의 형태로 바꾸어 썼다. 여기서  $a_s$ 는  $C_N$ ,  $P$  및  $\tan\theta$ 와 관련된 경험 계수이고,  $b$ 는 장시간 지속되는 파랑을 위하여 도입된 경험 계수이며, 식 (1)의 경우  $b = 0.5$ 이다. 평균 주기를  $T_m$ 이라 하면, 파랑의 지속시간,  $t$ 는  $t = T_m M_w$ 가 되므로, 식 (2)를

$$S = a_s \left(\frac{H_s}{\Delta D_{n50}}\right)^5 \left(\frac{t}{T_m}\right)^b \quad (3)$$

로 바꾸어 쓸 수 있다.

위 식을 이용하면  $t=0$ 에서  $S=0$ 으로 시작하여  $H_s$  및  $T_m$ 이 일정한 입사파에 의한 피해도  $S$ 를 계산할 수 있다. 시간에 따라  $H_s$ 와  $T_m$ 이 변하는 실제 상황에서의 누적 피해도를 계산하기 위하여 Melby and Kobayashi(1998)는 임의의 시간  $t$ 에서의 피해도,  $S_t$ 를 다음 식과 같이 표시하는 경험적인 방법을 제안하였다:

$$S_t = S_{t-1} + a_s \left(\frac{H_{s_i}}{\Delta D_{n50}}\right)^5 T_{m_i}^{-b} (t_i^b - t_{i-1}^b) \quad (4)$$

여기서  $S_{t-1}$ 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 기간 동안의 유의파고와 평균 주기를 나타내며 이 기간 동안 일정하다고 가정한다.

사석방파제의 피복층으로 사용된 테트라포드에 대하여 van der Meer(1988)는 다음과 같은 안정 공식을 제안하였다:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(3.75 \frac{N_0^{0.5}}{N_w^{0.25}} + 0.85\right) s_0^{-0.2} \quad (5)$$

여기서  $D_n$ 은 테트라포드의 공칭 직경으로서, 테트라포드의 부파를  $V$ 라 할 때  $V^{1/3}$ 이 되며,  $N_0$ 는 방파제에 평행한 방향으로 1 공칭 직경,  $D_n$ 의 폭을 갖는 구역에서 이탈된

테트라포드의 개수로 정의되는 상대 피해, 그리고  $s_0 = H_s/L_0$ 이며, 여기서  $L_0$ 는 심해 파장이다. 테트라포드의 상대 피해에 대하여 식 (4)에 해당되는 식은

$$N_{0_i} = N_{0_{i-1}} + \left(\frac{H_{s_i} s_{0_i}^{0.2} - 0.85}{3.75}\right)^2 T_{m_i}^{0.5} (t_i^{0.5} - t_{i-1}^{0.5}) \quad (6)$$

로 쓸 수 있다. 테트라포드의 피해는 유의파고가 어떤 임계값,  $H_{s_c}$  이상 되는 경우에만 발생한다고 가정하며, 이 임계값은 식 (5)에서  $N_0 = 0$ 에 해당하는 파고, 즉  $H_{s_c} = 0.85 s_0^{0.2} \Delta D_n$ 로 정의할 수 있을 것이다.

### Hanzawa et al.의 방법

Hanzawa et al.(1996)은, 아래에 서술된 바와 같이, 약간 다른 방법을 제안하였다. 그들은  $t = t_{i-1}$ 부터  $t = t_i$ 까지의 기간 동안의 파고를  $H_{s_i}$ ,  $t = t_{i-1}$ 까지의 누적 피해도를  $S_{i-1}$ 이라고 할 때,  $t = t_{i-1}$ 까지 방파제에 가해진 파의 개수,  $N_w'$ 를 식 (2)에서  $H_s$ 와  $S$ 에  $H_{s_i}$  및  $S_{i-1}$ 를 각각 대입하여 다음과 같이 구하였다:

$$N_w' = \left[\frac{S_{i-1}}{a_s \left(\frac{H_{s_i}}{\Delta D_{n50}}\right)^5}\right]^{1/b} \quad (7)$$

$t = t_i$ 까지의 누적 피해도,  $S_i$ 는 식 (2)에  $N_w = N_w' + N_{w_i}$  및  $H_s = H_{s_i}$ 를 대입하여 계산되며, 여기서  $N_{w_i}$ 는  $t = t_{i-1}$ 와  $t = t_i$ 사이의 파의 개수이다.  $N_{w_i} = (t_i - t_{i-1}) / T_{m_i}$ 의 관계를 이용하면  $S_i$ 는

$$S_i = a_s \left(\frac{H_{s_i}}{\Delta D_{n50}}\right)^5 \left\{ \left[\frac{S_{i-1}}{a_s \left(\frac{H_{s_i}}{\Delta D_{n50}}\right)^5}\right]^{1/b} + \frac{t_i - t_{i-1}}{T_{m_i}} \right\}^b \quad (8)$$

로 주어진다.

테트라포드의 누적 상대 피해를 계산하기 위한 공식은, 위와 비슷한 가정을 거쳐서, 다음과 같이 얻어진다.

$$N_{0_i} = \left(\frac{H_{s_i} s_{0_i}^{0.2} - 0.85}{3.75}\right)^2 \left\{ \left[\frac{N_{0_{i-1}}}{\left(\frac{H_{s_i} s_{0_i}^{0.2} - 0.85}{3.75}\right)^2}\right]^2 + \frac{t_i - t_{i-1}}{T_{m_i}} \right\}^{0.5} \quad (9)$$

Hanzawa et al.의 방법에서도 테트라포드의 피해는 유의파고가 임계값,  $H_{s_c}$  이상인 경우에만 발생한다고 가정한다.

### 3. 계산 방법의 비교

#### 사석 마운드

우선 Melby and Kobayashi(1998)의 실험에서의 사석방파제의 누적 피해도를 모의하기 위하여 전술한 계산 방법들을 적용하였다. 그들은 재래식 사석 마운드가 파랑 조건과 수위가 변하는 일련의 폭풍에 노출되었을 때 발생하는 피해의 진행 과정을 검토하기 위한 실험을 수행하였다. 그들의 실험에서,  $\Delta = 1.66$ ,  $D_{n50} = 3.64$ ,  $\tan\theta = 1/2$ 이었으며, 사석 마운드의 높이는 30.5 cm이었다. 그들은 Table 1에 나타낸 바와 같이 지속 시간이 15분인 여섯 개의 다른 블록 규격 파열을 사용하였으며, 여기서  $h_t$ 는 구조물 앞부리에서의 정수면 하 수심이다. 세 가지의 연속 실험을 실시하였으며, 각각에 대한 파랑의 지속 시간을 Table 2에 수록하였다. 피해 프로파일에 대한 관측은 매 30분 간격으로 실시하였다.  $a_s = 0.025$  및  $b = 0.25$ 의 값을 사용하였으며, 이는 Melby and Kobayashi(1998)가 실험 자료를 가지고 그들의 누적 피해도 계산 방법을 검증하여 얻은 값들이다.

Figs. 1부터 3까지는 시리즈 A부터 C까지에 대하여 식 (4) 및 (8)을 이용하여 계산한 피해도를 나타낸다. 계산 시간 간격은 30분으로서 실험에서의 프로파일 관측 시간 간격과 동일하다. 모든 시리즈에 대하여, 최초의 파랑 조건 기간 동안에는 두 가지 다른 방법으로 계산한 피해도가 차이가 없다. 그러나 그 이후로는 두 결과가 서로 벌어지기 시작하며, Hanzawa *et al.*(1996)의 방법이 더 큰 피해도를 보인다.

Table 1. Incident wave characteristics in experiments of Melby and Kobayashi (1998).

Wave	$h_t$ (cm)	$T_m$ (s)	$H_s$ (cm)
1	11.9	1.76	9.38
2	11.9	1.69	11.6
3	11.9	1.74	13.2
4	15.8	1.73	10.1
5	15.8	1.67	13.0
6	15.8	1.66	14.9

Table 2. Wave sequences in experiments of Melby and Kobayashi (1998).

Series A		Series B		Series C	
Wave	Duration (h)	Wave	Duration (h)	Wave	Duration (h)
1	1.5	1	0.5	4	1.0
2	1.5	2	2.0	5	2.0
3	7.5	3	2.0	6	2.0
4	1.0	5	2.0	2	2.0
5	6.0	6	2.0	3	2.0
6	11.0	-	-	-	-

Melby and Kobayashi(1998)의 실험에서, 각각의 연속 실험 동안 수위는 한 번만 변화시켰으며(시리즈 A와 B에서는 낮은 수위에서 높은 수위로, 그리고 시리즈 C에서는 높은 수위에서 낮은 수위로), 각 수위에 대하여 파고는 계속 증가시켰다. 그러나 실제 상황에서는 수위와 파랑 조건이 무작위 변동을 보일 것이며, 이는 피복층의 누적 피해에 영향을 미칠 것이다. 수위의 영향은 안정 공식에 포함되어 있지 않기 때문에, 여기서는 파랑 조건의 무작위 변

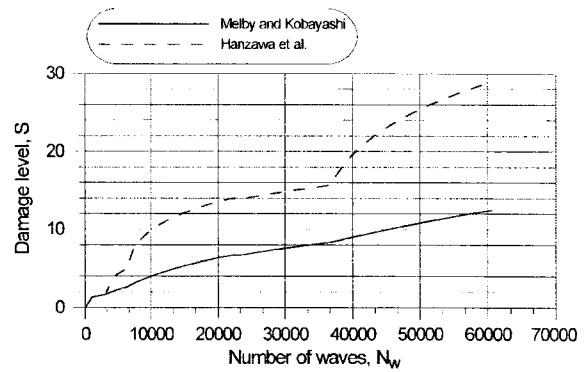


Fig. 1. Variation of calculated damage levels as function of number of waves at mean period, for series A.

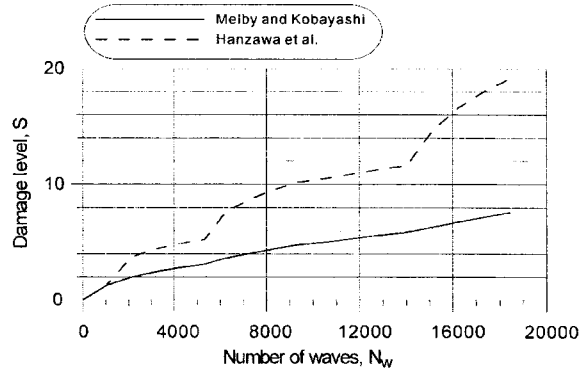


Fig. 2. Same as Fig. 1, but for series B.

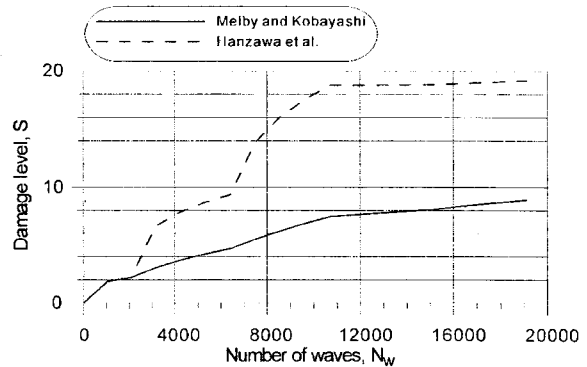


Fig. 3. Same as Fig. 1, but for series C.

동의 영향에 대해서만 검토하였다. 파랑 조건은 Table 1에 제시된 여섯 가지 파랑 조건으로부터 무작위로 추출하였다. 총 모의 시간은 시리즈 A에서와 같이 28.5시간이었으며, 각 파랑 조건의 지속 시간은 0.5시간으로 하였다.

Fig. 4는 무작위로 변동하는 파랑 조건에 의한 누적 피해도의 한 예를 보여준다. 이 경우에도 Hanzawa *et al.* (1996)의 방법이 Melby and Kobayashi(1998)의 방법보다 더 큰 피해도를 보인다. Fig. 5는 또 하나의 다른 무작위 파랑 조건의 연속에 의한 결과를 나타낸다. 이 경우에는 두 방법이 큰 차이를 보이지 않는다. Fig. 4의 결과에서는 최초의 파랑이 Table 1의 wave 5인 반면, Fig. 5의 결과에서는 최초의 파랑이 wave 6로서 가장 큰 파랑이었으며 따라서 모의의 시작 단계에서 큰 피해가 발생하였다. 모의의 시작 단계에서 큰 피해가 발생하는 경우에는 두 방법이 큰 차이를 보이지 않지만, 최초의 피해가 비교적 적은 경우에는 Hanzawa *et al.*의 방법이 더 큰 누적 피해를 예측한다. 또한 Hanzawa *et al.*의 방법은 계단 형태의 증가를 보이는 반면, Melby and Kobayashi(1998)의 방법은 좀 더

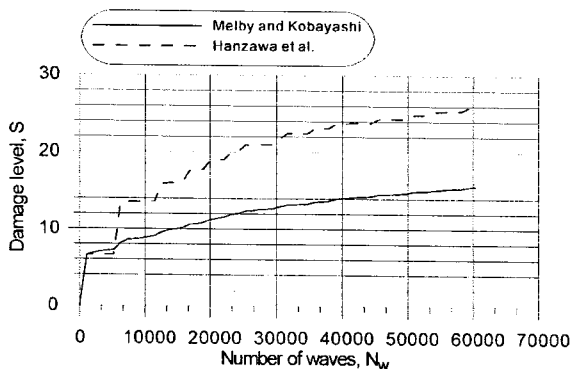


Fig. 4. Variation of calculated damage levels as function of number of waves at mean period, for randomly varying wave conditions.

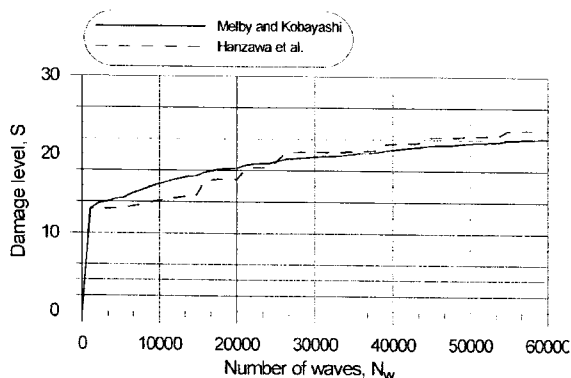


Fig. 5. Same as Fig. 4, but for different sequence of random wave conditions.

유연한 증가를 보인다.

일반적으로 사석 피복재의 허용 피해도는 피해가 발생하기 시작하는 단계에는  $S=2$ , 필터층이 노출되어 피해가 심각하게 발생하는 경우에는  $S=8$ 을 적용하고 있는데, Fig. 1부터 5까지에서는 피해도가 크기는 30까지 나타난다. 그러나 Melby and Kobayashi(1998)의 실험에서 사용된 방파제는 방파제 전체가 균일한 재질로 만들어진 재래식 사석 마운드이므로 허용 피해도가 사석 피복재보다는 클 것이다.

#### 테트라포드 피복층

일반적으로 테트라포드와 같은 피복 블록의 피해는 설계파에 상응하는 큰 파랑에 의해 발생한다. 따라서 년 최대파고를 이용하여 피해를 계산해도 충분한 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 년 최대파고를 나타내기 위하여 다음과 같은 Weibull 분포 함수를 사용하였다:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-C}{B}\right)^k\right] \quad (10)$$

여기서  $x$ 는 년 최대 유의파고,  $B$ 는 축척 매개변수,  $C$ 는 위치 매개변수, 그리고  $k$ 는 형상 매개변수이다. 이 분포 함수로부터 년 최대 유의파고를 무작위로 추출하였다.

$k=2.0$ ,  $B=2.23$ , 그리고  $C=3.09$ 인 Weibull 분포 함수를 사용하였으며, 이 때 재현기간 50년의 설계파고는 7.5m가 된다.  $s_0$ 는 0.03으로 일정하다고 가정하였으므로 이에 상응하는 설계 유의파 주기는 12.7 s이다.  $T_m=T_s/1.2$  및  $N_w=1,000$ 을 가정하였다. 테트라포드에 대해서는  $\Delta=1.3$ 을 사용하였다. 식 (5)에서 피해 발생의 시작에 대한 기준으로  $N_0=0.3$ 을 사용하고 또한  $N_w=1,000$ 을 사용하여 설계파고에 대한 테트라포드 중량이 30 tf로 계산되었다. 임계 유의파고,  $H_{sc}$ 는 5.25 m로 계산되었다.

Fig. 6은 두 방법으로 계산한, 방파제 수명(본 연구에서는 50년) 동안의, 유의파고와 누적 피해의 한 예를 나타낸다. 여기에서도 Hanzawa *et al.*의 방법은 Melby and Kobayashi의 방법보다 두세 배 더 큰 누적 상대 피해를 예측한다. 임계파고,  $H_{sc}$ 를 도입하여 이보다 작은 파고에서는 피해가 발생하지 않는다고 가정했기 때문에, Melby and Kobayashi 방법조차도, 사석 마운드의 경우에 유연한 증가를 보였던 것과는 달리, 계단 형태의 증가를 보인다.

Fig. 7은 또 하나의 다른 무작위 유의파고의 연속에 의한 결과를 나타낸다. 이 경우에는 첫 해의 파고가 설계파고에 근접하였기 때문에 첫 해에 심한 피해가 발생하였다. 그 이후로는, 24년째에 또 다른 큰 파랑이 발생할 때까지, 두 방법으로 계산한 누적 상대 피해가 큰 차이를 보이지 않는다. 두 방법으로 계산한 최종 상대 피해의 차이는 첫 해의 피해가 비교적 작았던 Fig. 6에서의 차이보다

적다. 사석 마운드에 있어서도 유사한 결과가 관측된 바 있다(Figs. 4 및 5 참조).

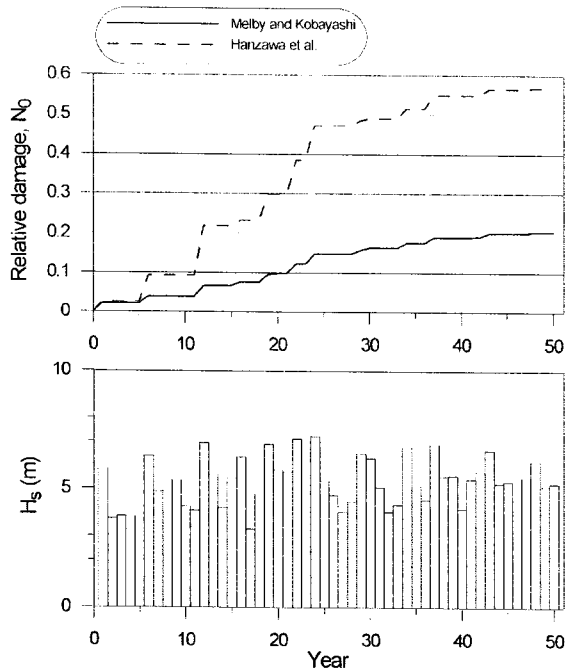


Fig. 6. Variation of significant wave heights and calculated relative damages during one life cycle of breakwater.

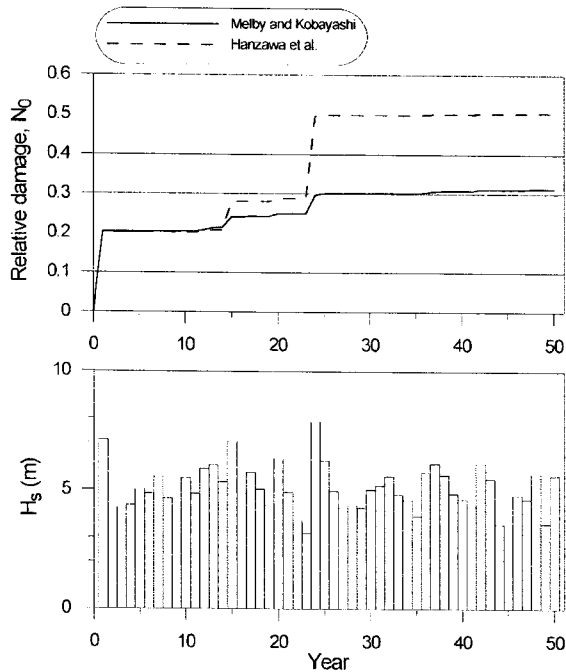


Fig. 7. Same as Fig. 6, but for different sequence of random wave conditions.

#### 4. 결 론

방파제 피복층의 누적 피해를 계산하기 위하여 Hanzawa *et al.*(1996)과 Melby and Kobayashi(1998)가 제안한 방법들을 비교하였다. 사석 마운드 및 테트라포드 피복층을 둘 다 검토하였다. 방파제 수명의 처음에 큰 피해가 발생한 경우에는 두 방법이 큰 차이를 보이지 않았지만, 일반적으로는 Hanzawa *et al.*의 방법이 Melby and Kobayashi 방법보다 두세 배 더 큰 누적 피해를 예측하였다. 실제 설계에서 이러한 방법들의 적용성을 검증하기 위해서는 무작위로 변하는 파랑조건에 대한 수리모형실험이 필요하며, 특히 테트라포드와 같은 인공 블록에 대해서 실험이 필요하다.

#### 사 사

이 논문은 2003년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

Balas, C.E. and L. Balas. 2002. Risk assessment of some revetments in Southwest Wales, United Kingdom. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 128, 216-223.

Hanzawa, M., H. Sato, S. Takahashi, K. Shimosako, T. Takayama, and K. Tanimoto. 1996. New stability formula for wave-dissipating concrete blocks covering horizontally composite breakwaters. p. 1665-1678. In: *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Eng.*, Orlando, Florida, USA, ASCE.

Melby, J.A. and N. Kobayashi. 1998. Progression and variability of damage on rubble mound breakwaters. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 124, 286-294.

CERC. 1984. *Shore Protection Manual*. Coastal Engineering Research Center, Department of the Army.

Suh, K.D., H.-M. Kweon, and H.D. Yoon. 2002. Reliability design of breakwater armor blocks considering wave direction in computation of wave transformation. *Coastal Eng. J.*, 44, 321-341.

van der Meer, J.W. 1987. Stability of breakwater armour layers - Design formulae. *Coastal Eng.*, 11, 219-239.

van der Meer, J.W. 1988. Stability of Cubes, Tetrapods and Accropods. p. 59-68. In: *Proc. Int. Conf. Breakwaters '88*. ASCE.

Received Jun. 26, 2003

Accepted Aug. 20, 2003