

소파케이슨 방파제의 기대활동량 산정 Calculation of Expected Sliding Distance of Wave Dissipating Caisson Breakwater

김 동 현*
Dong Hyawn Kim*

요 지 : 소파케이슨 방파제의 기대활동량 산정방법을 제안하였다. 소파케이슨의 활동량 산정을 위해 필요한 파력의 시계열은 기존에 개발된 소파케이슨의 정적 파력모델을 동적으로 확장하여 개발하였다. 충격파와 중복파의 구성은 지속시간 및 최대파력을 이용하여 구하였다. 수치해석에서는 제안방법에 의한 소파케이슨의 1파에 대한 활동량 및 50년간의 기대활동량을 직립케이슨에 적용하는 기존방법의 결과와 비교하였다. 비교결과 제안방법에 의한 소파케이슨의 활동량은 기존방법을 적용할 때보다 감소하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 방파제, 소파케이슨, 기대활동량, 파압, 시계열

Abstract : An approach to calculate expected sliding distance of wave dissipating caisson breakwater is proposed. Time history of dynamic wave pressure for the calculation of sliding distance is made by extending conventional static wave pressure developed for the wave dissipating caisson breakwater. Construction of impact wave and standing wave was done by using duration time and maximum wave pressures of themselves. In the numerical analysis, the sliding distance for an attack of single wave and expected sliding distance for 50 years of wave dissipating breakwater by proposed method were compared with those by conventional method for uplift caisson breakwater. It was found that the sliding distance of wave dissipating breakwater by the proposed method is smaller than by conventional method.

Keywords : breakwater, perforated wall caisson, expected sliding distance, wave pressure, time history

1. 서 론

항만구조물의 신뢰성에 대한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있으며 여기에는 경사식방파제의 파괴확률(이철웅, 2000; Kim et al, 2005) 및 기대피해도(서경덕 외, 2003), 케이슨방파제의 파괴확률(長尾 외, 2001) 및 기대활동량(이철웅, 2002; 홍수영 외, 2004), 케이슨안벽의 파괴확률(김동현 외, 2004), 피복재의 구조적 파괴확률(이철웅, 2003) 등이 대표적이다. 그 중에서도 케이슨방파제의 신뢰성 설계법은 일본에서 시작된 개념으로 케이슨방파제의 내구성을 검토할 수 있는 현실적인 방법으로 활발하게 적용되고 있다. 기대활동량은 파고의 확률분포와 파력의 시계

열 모델을 이용하여 설계수명 동안 발생하는 활동량을 누적시키는 일련의 과정을 반복함으로써 활동량의 기대값을 산정하는 방법으로 방파제의 성능을 평가하는 중요한 척도로 인식되고 있다.

Shimosako 등(1998, 1999)은 혼성식 케이슨 방파제의 기대활동량 산정방법을 제안한 바 있다. 이들은 Goda(1974)가 제안한 직립식 방파제의 최대파력을 이용하여 케이슨 방파제에 작용하는 파력의 시계열을 제안하였는데 여기에는 충격쇄파와 중복파로 인한 파력이 동시에 고려되었다. 국내에서는 홍수영 등(2004)이 파향의 변동성을 고려한 방파제의 기대활동량 산정방법을 제안한 바 있다.

*군산대학교 해양시스템공학과(Department of Ocean System Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 573-701, Korea. eastlite@kunsan.ac.kr)

그러나, 이들 방법은 케이슨 전면에 소파구조가 없는 직립식 케이슨에 적용할 수 있는 방법이기 때문에 최근 그 사용이 빈번해지고 있는 소파구조를 갖는 이른바 소파케이슨 방파제에는 적용할 수 없다. 그 이유는 케이슨 전면의 소파구조로 인해 파력의 최대값 및 시계열이 달라지기 때문이다. 일반적으로 소파케이슨 방파제에 작용하는 파력은 직립케이슨에 비하여 감소한다(Takahashi 등, 1991). 더욱이, 파력 작용시 소파케이슨체의 유수실내 수위증가로 인해 정수압이 증가하고 이는 결과적으로 마찰저항력을 크게 만들게 된다. 따라서, 파력과 마찰저항력을 모두 고려한 수평방향 합력을 비교하면 직립케이슨에 비해 소파케이슨에 작용하는 수평력이 크게 감소하게 된다. 만일 이러한 파력감소효과를 고려하지 않고 직립케이슨에 적용하는 방법을 그대로 소파케이슨에 적용한다면 그 기대활동량은 과다하게 평가될 수 있고 불필요한 공사비의 증가요인이 될 수 있다.

이러한 문제점을 개선하고자 본 연구에서는 소파케이슨의 기대활동량을 산정함에 있어 소파효과를 고려한 파력 시계열을 개발하고 이를 이용하여 기대활동량을 합리적으로 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 제2장에서는 기존연구의 결과를 활용하여 소파케이슨에 작용하는 파력 시계열모델을 개발하였으며 제3장에서는 개발된 시계열모델을 이용하여 소파케이슨의 기대활동량을 산정하였다. 소파구조에 의한 영향을 분석하기 위하여 소파구조를 고려한 제안방법의 파력 시계열과 직립케이슨에 적용하는 기존방법의 파력시계열을 비교하였다. 또한, 소파케이슨체를 직립체로 가정하여 기존방법을 적용한 경우와 제안방법을 적용한 경우의 기대활동량을 비교함으로써 제안방법의 유용성을 평가하였다. 제4장에서는 본 연구에서 얻은 중요한 결과들을 요약하였다.

2. 기대활동량 산정방법

2.1 소파케이슨과 파력

소파케이슨에 작용하는 파력을 산정하기 위하여 Takahashi 등(1991)은 다양한 실험 조건에서 수리모형실험을 수행한 바 있다. 그들은 파가 작용하는 상태를 Fig. 1에서와 같이 압파 I, 압파 IIa, 및 압파 IIb등으로 구분하는 방법을 제안했다. 압파 I의 상태는 파가 처음 슬릿부에 부딪히는 순간으로 슬릿부와 슬릿이 없는 전면벽에 파압이 작용하고 저판에는 양압력이 작용한다. 다음으로 압파 IIa의 상태는 파가 전면 슬릿부를 지나 후벽에 부딪히는 순간으로 이 때는 전면벽은 물론 후벽에도 파압이 미치며 하상판에는 수위증가로 인한 압력증분이 발생한다. 마지막 단계인 압파 IIb는 파가 후벽을 지나 중복파형으로 바뀌면서 케이슨에 최대의 파압을 작용시키는 순간이다. 이 연구에서 제안한 소파케이슨에 작용하는 파압은 식 (1)-(6)과 같은 Goda식을 이용하여 구할 수 있도록 하였는데 특히 파압보정계수 λ_1, λ_2 를 Table 1과 같이 파압의 작용상태에 따라 달리 적용하도록 하였다.

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha^*\cos^2\beta)w_0H \quad (1)$$

$$\alpha^* = \max\{\alpha_2, \alpha_1\} \quad (2)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (3)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (4)$$

$$p_u = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)\lambda_1\alpha_1\alpha_3w_0H \quad (5)$$

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\beta)H \quad (6)$$

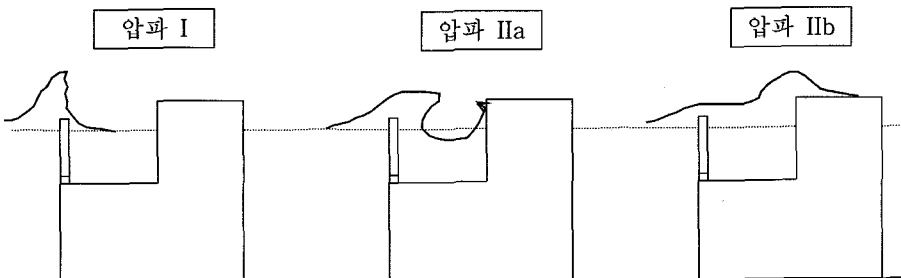


Fig. 1. Three phases of wave attack.

Table 1. Modification coefficients for wave dissipating caisson

구분		압파 I	압파 IIa	압파 IIb
슬릿부	λ_{S1}	0.85	0.7	0.3
	λ_{S2}	0.4 ($\alpha^* \leq 0.75$) 0.3/ α^* ($\alpha^* > 0.75$)	0	0
전면벽	λ_{L1}	1.0	0.75	0.65
	λ_{L2}	0.4 ($\alpha^* \leq 0.5$) 0.2/ α^* ($\alpha^* > 0.5$)	0	0
후벽	λ_{R1}	0	20/3L' ($//L' \leq 0.15$) 1.0 ($//L' > 0.15$)	1.4 ($H/h \leq 0.1$) 1.6-2 H/h ($0.1 < H/h < 0.3$) 1.0 ($H/h \geq 0.1$)
	λ_{R2}	0	†0.56 ($\alpha^* \leq 25/28$) 0.5/ α^* ($\alpha^* > 25/28$)	0
하상관	λ_{M1}	0	20/3L' ($//L' \leq 0.15$) 1.0 ($//L' > 0.15$)	1.4 ($H/h \leq 0.1$) 1.6-2 H/h ($0.1 < H/h < 0.3$) 1.0 ($H/h \geq 0.1$)
	λ_{M2}	0	0	0
양압력	λ_{U1}	1.0	0.75	0.65
	λ_{U2}	0	0	0

여기서, $H, h, L, w_0, \beta, \eta^*$ 는 각각 파고, 수심, 파장, 해수중량, 파향각, 정수면상 파압고이며 p_1, p_2, p_3, p_u 는 각각 정수면, 해저면, 직립벽 저면 등에서의 파압강도와 양압력이다. 또한 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha^*$ 는 각각 기하학적 형상에 의한 증폭과 및 충격파 보정계수, 형상보정계수, 및 충격쇄파 보정계수로서 Goda파압산정식(Goda, 1974)으로부터 구할 수 있다. Table 1에서 l, L 은 각각 전면벽과 후벽간 거리, 제체전면수심(d)에 의한 파장이다. Table을 이용함에 있어 유의할 점은 압파 IIa시 후벽의 보정계수 λ_{R2} 계산에 필요한 충격파 보정계수(α^*)의 산정에는 Goda 식의 수심(d)에 유수실 하단수심(d')을, 파장(L)에 L' 을, B_M 에 $l-(d-d')$ 을 적용하는 것이다.

2.2 직립케이스에 작용하는 파력의 시계열

직립케이스의 기대활동량 산정시 이용되는 파력의 시계열은 충격과 성분과 증폭과 성분이 조합된 형태로 Fig. 2와 같다(Shimosako 등, 1998). Fig. 2에서 충격과 성분과 증폭과 성분은 각각 식 (7) 및 (8)과 같이 계산된다.

$$P_2(t) = \begin{cases} \frac{2t}{\tau_0} P_{2max} & (0 \leq t < \frac{\tau_0}{2}) \\ 2\left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right) P_{2max} & (\frac{\tau_0}{2} \leq t < \tau_0) \\ 0 & (t \geq \tau_0) \end{cases} \quad (7)$$

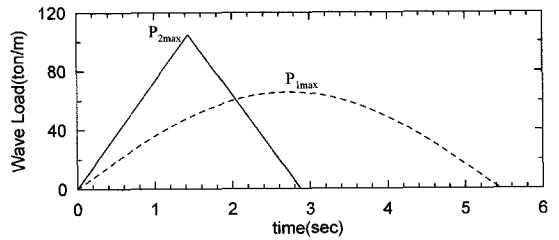


Fig. 2. Time series for caisson breakwater without dissipating structure.

$$P_1(t) = \gamma_p P_{1max} \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (t \geq 0) \quad (8)$$

여기서, T 는 주기를 나타내고 P_{1max} 는 Goda식에서 α_1 만을 고려한 파력, P_{2max} 는 α^* 까지 고려한 파력을 각각 의미한다. 또한, τ_0 와 γ_p 는 각각 충격쇄파력의 작용시간, 역적보정계수로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_0 = k \tau_{0F} \quad (9)$$

$$\tau_{0F} = \begin{cases} \left(0.5 - \frac{H}{8h}\right) T & (0 < H/h \leq 0.8) \\ 0.4T & (H/h > 0.8) \end{cases} \quad (10)$$

$$k = \left(\frac{1}{(\alpha^*)^{0.3} + 1}\right)^2 \quad (11)$$

$$\gamma_p = 1 - \frac{\pi}{P_{1max} T} \int_0^{t_2} [P_2(t) - P_{1max} \sin \frac{2\pi t}{T}] dt \quad (12)$$

단, 식 (12)의 적분구간은 적분인자가 양의 값을 가지는 범위이다. 직립케이슨의 기대활동량 산정을 위해 사용되는 파력의 최종 시계열은 두 값의 최대값으로 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$P(t) = \max[P_1(t), P_2(t)] \quad (13)$$

2.3 소파케이슨에 작용하는 파력의 시계열

소파케이슨에 작용하는 파력의 시계열은 Takahashi 등 (1991)이 제안한 소파케이슨에 작용하는 정적파압을 직립 케이슨에 작용하는 파력의 시계열 구성방법에 적용함으로써 구할 수 있다. 즉, 직립벽에 작용하는 파력은 충격파 성분과 중복파 성분으로 구성되지만 소파케이슨에 작용하는 파력은 앞에서 구한 파의 위상에 따라 달리 작용하는 파력 즉, 압파 I, 압파 IIa, 압파 IIb시의 파력을 적용하는 것이다. 파의 위상에 따른 파력의 최대값을 각각 P_p, P_{IIa}, P_{IIb} 라고 하면 파력의 시계열은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 압파 I시에는 전면벽의 슬릿부와 전면벽 하단에 파력이 작용하며 충격파의 형태를 띤다. 압파 IIa시에는 슬릿부를 통과한 잔여파가 후벽에 충돌하면서 다시 충격파력의 형태로 작용한다. 이 때는 후벽과 함께 전면벽에도 파력이 작용하고 있다. 마지막 단계로 압파 IIb시에는 중복파의 형태를 띠면서 전면벽과 후벽에 각각 파력을 가하는 최대파력의 작용순간이 된다.

이러한 파력의 작용상태는 Takahashi 등(1991)의 연구에서 계측한 파력의 시계열 형상과 그 맥락을 같이 한다. 특히, Fig. 3에서 압파 IIa시의 시계열과 압파 IIb시의 시계열을 동시점에서 출발시킨 것은 슬릿을 통과한 파가 유수실을 거쳐 후벽까지 전달되는 과정을 직립식 케이슨에 미치는 파력의 다른 형태로 볼 수 있기 때문에 직립식 케이슨에 작용하는 파력 시계열 형태를 그대로 따르게 한 것이다.

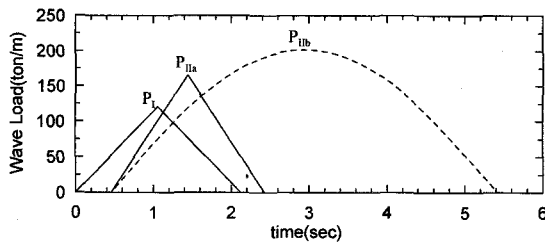


Fig. 3. Time series for wave dissipating breakwater.

또한, 압파 I의 시발점과 압파 IIa의 시발점이 가지는 시차는 P_p 와 P_{IIa} 가 가지는 위상차를 역산하여 구할 수 있다. 즉, P_p 와 P_{IIa} 가 가지는 위상차는 슬릿부에 부딪히면서 압파 I시의 최대파력(P_p)을 유발시킨 직후부터 슬릿을 통과한 파가 후벽에 도달되어 최대파력(P_{IIa})을 가하는 시점까지의 시간 차이이므로 전면벽 두께와 유수실 폭을 더한 거리(l)를 파가 진행하는 시간으로 볼 수 있다. 이 시간을 이용하여 역산을 하면 두 파압의 시발점에서의 시차를 구할 수 있다. 이상의 결과를 토대로 소파케이슨에 작용하는 파력의 시계열을 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$P_1^S(t) = \begin{cases} \frac{2t}{\tau_0} P_I & (0 \leq t < \frac{\tau_0}{2}) \\ 2(1 - \frac{t}{\tau_0}) P_I & (\frac{\tau_0}{2} \leq t < \tau_0) \\ 0 & (t \geq \tau_0) \end{cases} \quad (14)$$

$$P_2^S(t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < t_d) \\ \frac{2(t-t_d)}{\tau'_0} P_{IIa} & (t_d \leq t < \frac{\tau'_0}{2} + t_d) \\ 2(1 - \frac{t-t_d}{\tau'_0}) P_{IIa} & (\frac{\tau'_0}{2} + t_d \leq t < \tau'_0 + t_d) \\ 0 & (t \geq \tau_0 + t_d) \end{cases} \quad (15)$$

$$P_3^S(t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < t_d) \\ P_{IIa} \sin \frac{2\pi(t-t_d)}{T} & (t \geq \tau_0) \end{cases} \quad (16)$$

$$P^S(t) = \max[P_1^S(t), P_2^S(t), P_3^S(t)] \quad (17)$$

여기서, t_d 는 파력 P_1 과 P_2 의 발생 시차로서 식 (18)과 같으며 이 때 τ'_0 은 압파 IIa의 지속시간으로 식 (19)-(21)로부터 구할 수 있다.

$$t_d = \frac{\tau_0}{2} + \frac{l}{\sqrt{gd}} - \frac{\tau'_0}{2} \quad (18)$$

$$\tau'_0 = k' \tau_0 F' \quad (19)$$

$$k' = k = \left(\frac{1}{(\alpha^*)^{0.3} + 1} \right)^2 \quad (20)$$

$$\tau'_0 F' = \begin{cases} \left(0.5 - \frac{H}{8d}\right) T & (0 < H/d \leq 0.8) \\ 0.4T & (H/d > 0.8) \end{cases} \quad (21)$$

식 (19)-(21)은 직립케이스 기대활동량 산정법에서 사용하는 식에 해저수심(h) 대신 마운드 상단수심(d)을 대입하여 구한 식이다. 식 (21)에서 파고는 엄밀하게 말하면 마운드에서의 값을 의미하지만 마운드에서의 파고변화가 무시할만큼 작다는 가정하에 해저면에서의 파고를 사용한다.

수평파력 외에도 소파케이스에는 양압력과 유수실 상판에 압력이 작용한다. 우선, 양압력의 시계열은 파력의 시계열과 같은 방법을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_1^S(t) = \begin{cases} \frac{2t}{\tau_0} P_I & (0 \leq t < \frac{\tau_0}{2}) \\ 2\left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right) U_I & (\frac{\tau_0}{2} \leq t < \tau_0) \\ 0 & (t > \tau_0) \end{cases} \quad (22)$$

$$U_2^S(t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < t_d) \\ \frac{2(t-t_d)}{\tau_0'} U_{IIa} & (t_d \leq t < \frac{\tau_0'}{2} + t_d) \\ 2\left(1 - \frac{t-t_d}{\tau_0'}\right) U_{IIa} & (\frac{\tau_0'}{2} + t_d \leq t < \tau_0' + t_d) \\ 0 & (t \geq \tau_0' + t_d) \end{cases} \quad (23)$$

$$U_3^S(t) = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < t_d) \\ U_{IIa} \sin \frac{2\pi(t-t_d)}{T} & (t \geq t_d) \end{cases} \quad (24)$$

$$U^S(t) = \max[U_1^S(t), U_2^S(t), U_3^S(t)] \quad (25)$$

여기서, U_P , U_{IIa} , U_{IIb} 는 Table 1의 보정계수를 이용하여 구한 파압작용상태별 최대양압력이다.

유수실 상판의 압력은 유수실내의 수위증가로 인해 발생하며 케이스 중력과 같은 방향으로 작용하기 때문에 체체의 안정성을 증가시켜 활동을 억제하는 역할을 한다. 상판의 압력은 충격파가 후면벽에 부딪히는 순간($t_d+t_0'/2$)의 최대값(P_{M1})과 중복파가 최대로 되는 순간($t_d+T/2$)의 값(P_{M2})을 이용하여 삼각형분포로 가정하였다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_V = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < t_m) \\ \frac{4(P_{M2}-P_{M1})}{T-2\tau_0'} [t - (t_d + \tau_0'/2)] + P_{M1} & (t_m \leq t < t_d + T/4) \\ \frac{4(P_{M2}-P_{M1})}{T-2\tau_0'} [t - (t_d + \tau_0'/2)] + 2P_{M2} - P_{M1} & (t_d + T/4 \leq t < t_d + T/2) \\ 0 & (t \geq t_d + T/2) \end{cases} \quad (26)$$

여기서, t_m 은 유수실 수위증가로 하상판에 연직 압력이 발생하기 시작하는 시간으로서 다음 식과 같다.

$$t_m = \frac{-P_{M1}(T-2\tau_0')}{4(P_{M2}-P_{M1})} + t_d + \frac{\tau_0'}{2} \quad (27)$$

수평방향 파력만을 비교하면 소파케이스에 작용하는 최대파력은 직립케이스의 최대파력에 비해 감소량이 미미하다. 그러나, 직립케이스에는 없는 연직방향 파력이 소파케이스의 마찰력을 증가시키기 때문에 파력과 마찰력을 고려한 총 활동력에 있어서는 그 감소량이 더 커지게 되며 결과적으로 소파케이스의 활동안정성을 증가시킨다.

소파케이스의 파력시계열에서는 기존의 직립케이스의 경우와 같은 역적보정계수를 적용하고 있지 않다. 그 이유는 직립케이스에 작용하는 파력시계열 구성시 충격파와 중복파가 각각의 최대값을 가지고 직렬로 연결되기 때문에 2개의 파가 작용할 때와 같은 역적을 갖게 되므로 이것을 1파의 작용과 같은 역적을 갖도록 보정해야 한다. 그러나, 본 연구에서 제안한 소파케이스에 작용하는 파력의 시계열은 기존 방법과 같이 인위적으로 충격파와 중복파를 합성한 것이 아니라 Takahashi 등(1991)의 실험에서 계측한 일련의 충격파와 중복파에 의한 정적 최대파압을 동적으로 확장한 것이기 때문에 1파의 역적을 가지게 된다. 따라서, 역적보정을 할 필요가 없게 된다.

2.4 소파케이스의 기대활동량

케이스를 강체로 가정하고 조파저항력의 크기를 무시할 수 있다고 가정하면 케이스방파제의 활동을 해석하기 위한 운동방정은 다음과 같다(이철웅, 2002; 홍수영 외, 2004).

$$\left(\frac{W+W_g}{g}\right)\ddot{x} = P - \mu(W' - U) \quad (28)$$

여기서, W 는 케이슨 중량, W_d 는 부가질량($=1.0855 \rho_d h^2$), h' 은 케이슨 저면수심, g 는 중력가속도, x 는 활동거리, P 는 수평파력, μ 는 마찰력, W 는 케이슨의 수중중량, U 는 양압력이다. 파력이 마찰저항력을 넘지 못하는 경우는 활동이 발생하지 않는 것으로 하고 파력이 마찰저항력을 초과하면 위 식을 두 번 적분하여 활동량을 구할 수 있다.

방파제의 기대활동량은 내용년한 동안 발생가능한 확률 파고를 이용하여 구한 총활동량의 기대치(또는 평균치)를 말한다. 방파제에 활동을 유발하는 정도의 큰 태풍이 연간 1회 내습했을 때 그 태풍에 의해 약 1000파가 발생되는 것으로 가정한다. 이 때 연간 최대 유의파고와 Rayleigh 분포를 이용하여 1000개의 파를 발생시킨다. 1000파에 의한 활동량을 누적하면 연간 활동량이 계산되고 이를 다시 50년 동안 누적하면 50년간 총활동량을 구할 수 있다. 이러한 일련의 과정을 반복하여 그 평균치를 구하면 활동량의 평균치 즉, 기대활동량을 구할 수 있다. 이에 대한 구체적 내용은 문헌에 자세하게 설명되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다.

3. 수치해석

3.1 방파제 및 설계조건

소파케이슨제의 활동량을 산정하기 위해서 실규모 방파제를 이용한 수치해석을 수행하였다. 설치위치에서의 해저수심은 DL(-)24.5 m, 마운드 상단 수심은 DL(-)15.9 m, 설계고조위는 DL(+).066 m이다. 케이슨의 제체폭은 21.4 m, 상부공의 마루높이는 DL(+).6.8 m이며 전면 슬릿부 상단의 높이는 DL(+).3.0 m이다.

3.2 수치해석 결과

3.2.1 수평력

파고 14.0 m, 주기 11.0초일 때 활동을 유발하는 총 수평력을 비교한 것이 Fig. 4이다. 총 수평력은 파력에서 마찰저항력을 뺀 값으로 이 값이 양의 값을 가질 때 케이슨은 활동한다. 마찰저항력은 파력이 최대정지마찰력을 초과하지 않은 범위에서는 파력과 평형을 이루기 때문에 총 수평력은 음의 값을 갖지 않으나 파력의 형상에 대한 이해를 돕기 위해 음의 값을 표시하였다. Fig. 4에서 기존방법에 의한 파력시계열은 첫 번째 충격파 성분에서 활동한계 파력을 초과하지만 제안방법에 의한 시계열은 활동한계력을 초과하지 못한다. 즉, 14 m의 파고에서 소파케이슨에는 활동이 발생하지 않지만 기존방법을 적용하면 활동이 발생하는

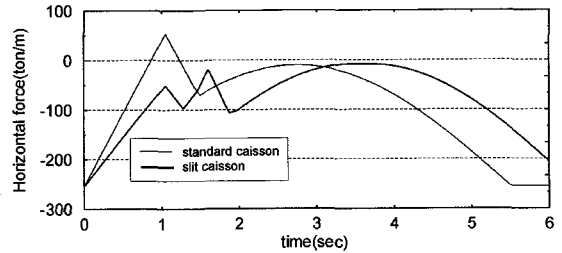


Fig. 4. Time series for net horizontal force (H=14 m).

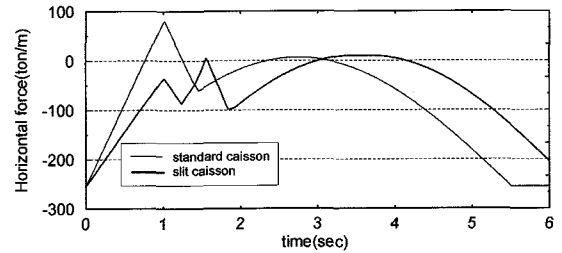


Fig. 5. Time series for net horizontal force (H=15 m).

것으로 평가할 수 있다. Fig. 5는 파고가 15 m일 때의 총 수평력의 시계열을 보여주고 있다. 기존방법의 시계열에서는 충격파에 의해 79.9 ton/m의 최대수평력이 발생하지만 소파케이슨의 경우 중복파에 의해 10.3 ton.m의 최대수평력이 발생하였다. 제안방법의 시계열은 활동한계력을 초과하는 지속시간은 다소 길어지지만 수평력의 최대크기는 큰 폭으로 감소한다.

3.2.2 1파에 의한 활동

소파케이슨의 활동을 동적해석한 결과가 Fig. 6과 7이다. Fig. 6에서 P는 파력, x는 케이슨의 변위, v는 속도를 각각 의미한다. 파고 15 m에서의 활동은 중복파성분에 의해서만 발생하고 있다. 파고를 16 m로 증가시킨 경우 활동해석 결과(Fig. 7)에서는 파고증가로 인해 두 번째 충격파에서도 활동이 발생하고 있다. 그러나, 대부분의 활동은 중복파에 의

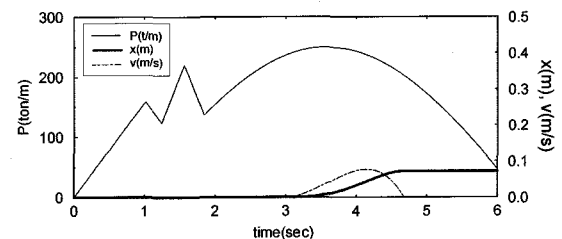


Fig. 6. Sliding distance by wave attack (H=15 m).

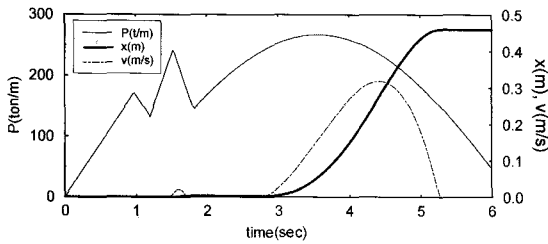


Fig. 7. Sliding distance by wave attack (H=16 m).

Table 2. Sliding distances by single wave attack

구 분	활동량(m)			
	(H=13 m)	(H=14 m)	(H=15)	(H=16)
제안방법	0.000	0.000	0.072	0.459
기존방법	0.006	0.033	0.118	1.047

해 발생하고 있다. 기존의 방법에서는 충격파성분의 최대 값이 중복파성분보다 크기 때문에 충격파에 의해 활동이 지배되지만 제안방법의 소파케이슨 방파제에서는 중복파성분이 활동을 지배하는 것이 특징적인 사항이라 할 수 있다.

파고변화에 따른 파에 의한 활동량을 비교하기 위하여 파고를 13 m에서 16 m까지 변화시키면서 활동량을 산정하여 Table 2에 나타내었다. 제안방법에 의한 결과 파고 14 m 까지도 활동이 발생하지 않고 있으나 기존방법에 의하면 파고 14 m에서도 3.3 cm의 활동이 발생하였다. 파고 16 m에 대해서는 활동량이 2배 이상 차이가 나고 있다. 50년간 기대활동량은 매년 1000파를 가정하여 50년간 활동을 누적시킨 결과이기 때문에 소파케이슨의 기대활동량 산정시 기존방법을 사용한다면 그 결과가 매우 과장될 수 있음을 알 수 있다.

3.2.3 기대활동량

제안방법과 기존방법의 내용년한 동안의 활동량 차이를 실질적으로 비교하기 위해서 기대활동량을 산정하였다. 사용된 확률파는 50년 재현주기의 설계유의파고 6.5 m에 해당되는 것으로서 Weibull분포의 척도모수(B), 위치모수(C), 형상모수(k)는 각각 2.005, 1.595, 1.525이다. 확률분포에 의해 생성된 파고를 이용하여 파력시계열을 구성하고 1파 마다의 활동량을 년간 1000회 누적시킨 후 50년 간의 평균치를 구하였다. 이 때 각 파고에 대한 주기는 정규분포를 가정하여 평균 11.0초에 변동계수 0.1을 부여하였다. 평균치 산정을 위해 실시한 반복수행 회수는 5000회이며 해석결과는 Table 3과 같다. 정적 활동안전율(SF)에 따른 기대활동량의 민감도를 파악하기 위해 케이슨의 중량을 변화

Table 3. Expected sliding distance during 50 years

구 분	기대활동량(m)			
	(SF=1.3)	(SF=1.5)	(SF=1.7)	(SF=1.9)
기존방법(A)	1.336	0.287	0.077	0.007
제안방법(B)	0.555	0.130	0.035	0.005
비율(B/A)	0.415	0.453	0.455	0.714

시켜 안전율이 1.3~1.9가 되도록 한 상태에서 해석을 수행하였다.

제안방법의 소파케이슨 파력 시계열을 사용한 수치해석 결과는 기존방법의 결과에 비해 41.5%~71.4% 수준으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 1cm이상의 활동이 발생하는 경우(안전율 1.7 이하)에서는 기존방법을 적용했을 때에 비해 제안방법에 의한 활동량이 약 40% 수준에 머무는 것으로 나타났다. 이것은 소파효과에 의한 파력을 적용하므로써 파력을 합리적으로 산정한 결과로 분석된다. 따라서, 소파케이슨방파제의 기대활동량을 평가할 때는 기존의 직립식 케이슨을 위해 개발된 파력시계열을 사용하기 보다 제안방법과 같이 소파효과를 고려한 방법을 적용하므로써 적정수준의 경제성을 확보하는 것이 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

소파케이슨에 작용하는 정적 파력모델을 이용하여 동적 시계열을 개발하였으며 이를 이용한 소파케이슨의 기대활동량 산정방법을 제안하였다. 소파케이슨에 작용하는 파력의 시계열은 두 개의 충격파와 한 개의 중복파를 조합한 형태로 그 최대값은 중복파 성분이며 케이슨의 활동을 주로 지배하는 것으로 확인되었다. 동일한 파고에 대한 파력의 시계열 비교 결과 소파케이슨의 최대파력은 직립케이슨에 비해 상당히 감소한 형태를 보였다. 이러한 결과로 인해 직립케이슨에서 활동한계파력을 초과할 때 소파케이슨에서는 활동이 발생하지 않는 경우를 발견하였다. 이러한 현상은 기대활동량 평가결과에서도 나타났으며 제안방법을 사용한 경우 기존방법에 비해 활동량이 줄어드는 것으로 평가되었다. 따라서, 소파케이슨의 기대활동량을 산정함에 있어서 기존의 파력 시계열을 이용하면 그 피해정도가 과다 산정될 소지가 있음을 확인하였다. 결과적으로 제안방법은 소파케이슨의 동적 내구성을 합리적으로 평가할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 군산대학교 신입교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김동현, 윤길립, 박우선 (2003). 지진토압의 위상차를 고려한 케이슨 안벽의 신뢰성해석. 한국해양해양공학회지, 15(4), 242-248.
- 서경덕, 권혁민, 윤현덕 (2003). 파향의 변동성을 고려한 피복블럭의 기대피해 계산. 한국해양해양공학회지, 15(1), 21-32.
- 이철웅 (2002). 혼성제 직립케이슨의 활동량 산정. 대한토목학회논문집, 22(4-B), 517-530.
- 이철웅 (2003). 콘크리트 피복재의 단면파괴에 대한 신뢰성 해석. 한국해양해양공학회지, 15(2), 86-96.
- 홍수영, 서경덕, 권혁민 (2004). 파향의 변동성을 고려한 직립방파제 콘크리트 케이슨의 기대활동량 산정. 한국해양해양공학회지, 16(1), 27-38.
- Goda, Y. (1974). A new method of wave pressure calculation for the design of composite breakwater. Proc. 14th Int. Conf. Coastal Engrg., ASCE, Copenhagen, 1702-1720.
- Kim, D.H. and Park, W.S. (2005). Neural network for design and reliability analysis of rubble mound breakwaters. Ocean Engineering, 32, 1332-1349.
- Shimosako, K. and Takahashi, S. (1998). Reliability design method of composite breakwater using expected sliding distance. Rep. of port and harbor Res. Inst., 47(1), 4-30(in Japanese).
- Shimosako, K. and Takahashi, S. (1999). Application of deformation based reliability design for coastal structures. Proc. Int. Conf. Coastal Structures 99, A. A. Balkema, Spain, 363-371.
- Takahashi, S., Shimosako, K. and Sasaki, H. (1991). Experimental study on wave forces acting on perforated wall caisson breakwaters. Rep. of port and harbor Res. inst., 30(4), 3-34(in Japanese).
- 長尾毅, 吉浪康行 (2001). 信頼性解析によるケソン式防波堤の外的安定性評. 構造工學論文集, 47A, 305-312.

Received April 18, 2005

Accepted August 29, 2005