

고파랑 대비 채움재를 이용한 오픈 셀 케이슨의 전단 벽체 거동 분석

Behavior of Walls of Open-cell Caissons Using Filler under Abnormally High Waves

서지혜* · 원덕희* · 박우선*
Jihye Seo*, Deokhee Won* and Woo-Sun Park*

요지 : 이상기후에 따른 대형 태풍 내습 시 고파랑 대응을 위한 항만구조물의 안정성 향상 기술이 대두되면서 신형식 인터로킹 케이슨의 설계 및 시공기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 인터로킹 방식에서 응력집중현상에 대한 대안으로 채움재를 이용한 오픈 셀 케이슨은 채움재 마찰에 의한 저면(일부) 및 인접케이슨과의 결속력을 증대시켜 평활화효과를 가져온다. 이러한 오픈 셀 케이슨은 시계열 수평파력에 대한 전단 횡격벽의 응력집중을 파악함으로써 부재 설계 시 안정성을 확보하기 위해 오픈 셀 케이슨의 내·외부벽에 의한 사석 전단저항을 살펴볼 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 포항북방파제에 설치되었던 케이슨의 제원 및 설계조건을 바탕으로 해석대상을 선정하였으며, 채움재는 사석으로 가정하여 인터셀에 작용하는 전단력을 산정하고 내·외부벽 제원에 따른 전단거동을 수치해석을 통해 살펴보았다. 내·외부벽 배치 개수 및 연결부 사석두께 대비 외부벽의 길이를 변수로 저항력을 분석하였다. 제원에 따라 내·외부벽이 분담하는 비율을 분석한 결과, 외해 측에 있는 외부벽이 전체 전단력의 30% 이상을 저항하며 하중을 가장 많이 분담하였고, 내부벽이 거의 유사하게 60~70% 하중을 분담하였다.

핵심용어 : 오픈 셀 케이슨, 인터로킹, 전단력, 수치해석

Abstract : In order to cope with the abnormally high waves during the storm surge due to climate change, various methods have been proposed for interlocking adjacent caissons to enhance stability of harbor structures. Among the methods, it was studied the method based on an open-cell caisson having reduction effect increasing the cohesion with adjunction caissons by filling materials such as crushed rocks in an inter-cell formed by two facing open-cells which consist of transverse walls. It is necessary to investigate the shear behaviors of an inter-cell to secure the stability using calculating shear forces on inter-cell under oblique wave loadings. It was analyzed the shear force share ratio with the length of internal and external wall and the number of internal walls. Numerical results show that 60~70% of the shear load is transmitted to adjacent caisson through the internal walls, more than 30% is through the external wall. It was applicable in the assumption that filling materials was uniformly distributed in inter-cells, and further studies were worth consideration on other conditions under construction.

Keywords : Open-cell Caisson, Interlocking, Shear Force, Numerical Analysis

1. 서 론

최근 전 지구적인 기후변화로 인하여 슈퍼태풍이 발생하면서 이상고파랑을 동반하여 연안 피해가 대규모화 되고 있다. 특히 우리나라 기상관측 이래 처음으로 순간최대풍속 60 m/s를 동반했던 태풍 매미(2003년)는 물론 최근 불라벤과 덴바(2012년) 등 설계 파고보다 높은 이상파랑이 내습하면서 항만시설물의 유실 및 파괴가 발생하여 피해를 가중시켰다. 한반도에 영향을 미칠 수 있는 북서태평양지역에서 이러한 강력한 에너지가 축적된 열대성저기압이 늘어나는 추세가 앞으로도 계속될 것이라고 전망되어(Emanuel, 2013), 향후 더욱 위협적인 슈퍼태풍이 내습할 것이라는 예측과 함께 우리나라 또한

슈퍼태풍의 안전지대가 아님을 시사하고 있다(Song et al., 2007).

국가 기반시설인 항만을 파랑으로부터 보호하는 방재역할을 담당하고 있는 중력식 안벽 및 방파제의 피해는 대부분이 활동피해로(Takayama et al., 2002), 초과 외력 발생 시 활동 파괴 발생하나 이는 부분적으로 발생하는 것을 알 수 있다(Fig. 1).

재해에 강한 방파제에 관한 연구는 일본, 유럽 등지에서 시작하여(Takayama et al., 2002; Frigaard et al., 1999), 기후변화에 대응하기 위해 새로운 개념의 방파제 개발의 필요성이 제기되었다. 인터로킹을 통한 장대형 방파제가 합리적인 대안으로 대두되고 있지만(Kim et al., 2010, 2011; Hyundai

*한국해양과학기술원 연안공학연구본부(Corresponding author: Deok Hee Won, Coastal Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 787, Haean-ro, Sangnok-gu, Ansan, 15627, Korea, Tel: +82-31-400-6339, Fax: +82-31-408-5823, thekeyone@kiost.ac.kr)

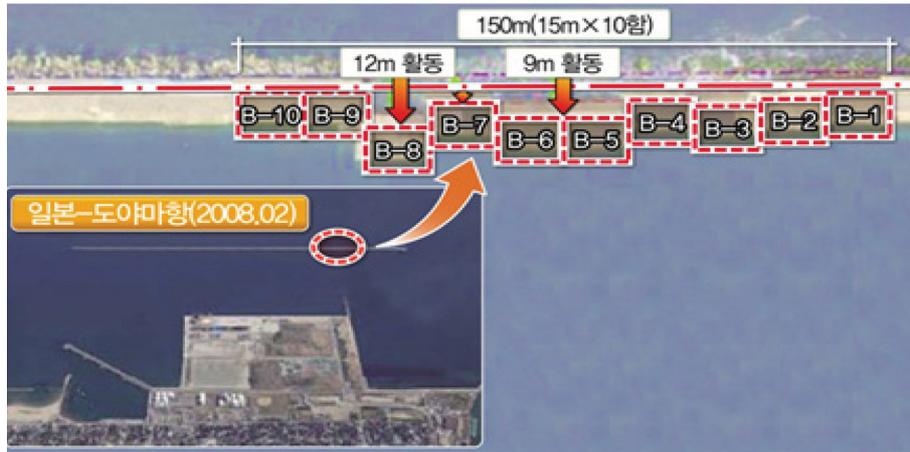


Fig. 1. Failures of Toyama port.

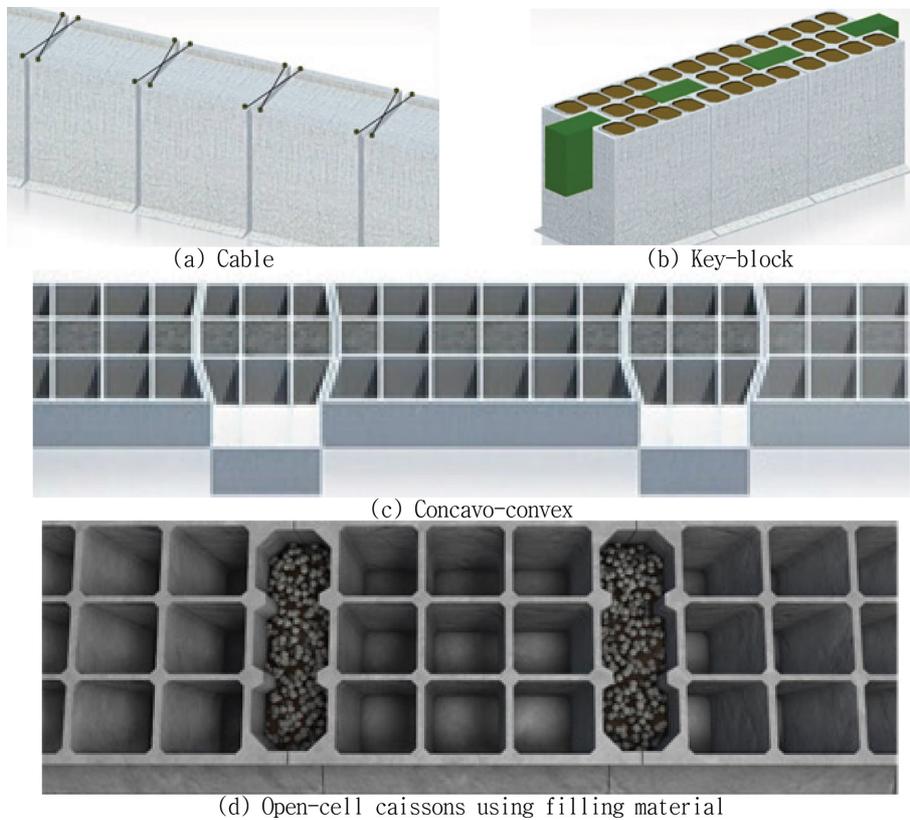


Fig. 2. Concept of interlocking caissons.

Dvp, 2009, 2011; Park et al., 2011), 아직 파력 평활화 및 안정성에 대한 구조적 평가가 제대로 이루어지지 않았다. 지금까지 제시된 케이슨의 인터로킹 방법은 다음과 같이 네 가지로 분류할 수 있다. 먼저 케이블형 인터로킹시스템(Fig. 2(a))은 인접한 케이슨을 각각 케이블을 이용하여 서로 체결하는 방식이며 이는 기존 제작된 케이슨에도 적용할 수 있다. 키블록형 인터로킹시스템(Fig. 2(b))은 연결블록을 위한 홈을 두고 블록으로 인접케이슨을 연결하여 수평파력에 저항할 수 있도록 설계하는 개념이다. 또한 굴곡 또는 요철형 인터로킹 시스템(Fig. 2(c))은 기존의 직육면체형 케이슨과는 달리 케

이슨 측면에 굴곡 또는 요철을 두어 연결하는 형태이다. 하지만 이러한 인터로킹 개념들은 개별 케이슨의 활동이 고려된 상치콘크리트와의 일체거동 및 유지보수 등 실제 시공과 관련하여 보다 더 다양한 연구가 필요한 실정이다. 이를 바탕으로 Fig. 2(a)-(c) 인터로킹 방식에서 나타난 응력집중현상에 대한 대안으로 채움재를 이용한 오픈 셀 케이슨(Fig. 2(d))에 관한 연구가 진행되고 있다(Lee et al., 2015; Seo et al., 2015a; Won et al., 2015).
오픈 셀 케이슨(Fig. 2(d))은 일반 케이슨 양 외부벽에 전단 횡격벽이 설치되어 열려있는 셀이 되는 형태를 가진다. 전

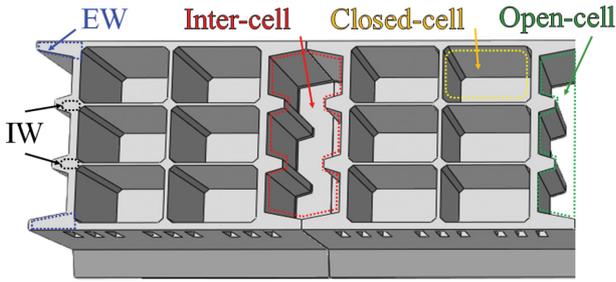


Fig. 3. Definition of open-cell caisson.

단 횡격벽은 위치에 따라 양단에 있는 경우 외부벽(EW, external wall), 양단을 제외한 중간에 있는 경우 내부벽(IW, internal wall)이라 각각 명명하였다(Fig. 3). 이로 인해 인접 케이슨과 내·외부벽 사이에 인터셀(접속부 공간)이 형성되며 여기에 채움재가 채워지는 형식이다. 이는 국부적으로 설계 하중 초과 시 채움재의 전단저항에 의해 작용하중의 평활화 효과가 있고, 인터셀의 저면 및 측면에서 채움재 마찰에 의해 활동 저항력이 증대되어 기존 케이슨 구조 대비 공용 중 안정성이 높다. 또한 케이슨 측벽과 저판 일부를 제거할 수 있어 재료비 절감이 가능하고, 동일 폭 기준 기존케이슨 구조보다 자중이 작아 설치 시 장비 선택의 폭이 넓으며, 시공 제어도 용이하다. Fig. 4는 오픈 셀 케이슨 방파제의 시공순서를 나타낸 것으로 시공 중에 채움재를 미리 채움으로써 시공 중 안정성도 높일 수 있다.

이러한 오픈 셀 케이슨의 경우 케이슨 양단에 설치되어 있는 내·외부벽이 전체 방파제 시스템거동에 지배적인 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 동적구조해석을 통해 채움재 설계 시 영향을 주는 인자를 파악하고, 이를 바탕으로 오픈 셀 케이슨 인터셀에 작용하는 전단력을 산정하여 내·외부벽 제원에 따른 오픈 셀 케이슨의 시스템 거동을 분석하였다.

2. 해석방법

2.1 동적구조해석

오픈 셀 케이슨 방파제의 활동여부 및 시계열 수평파력에 대한 응력집중 파악을 통해 부재 설계 시 영향을 주는 인자를 파악하기 위하여 상용프로그램(Simulia, 2013)을 이용하여

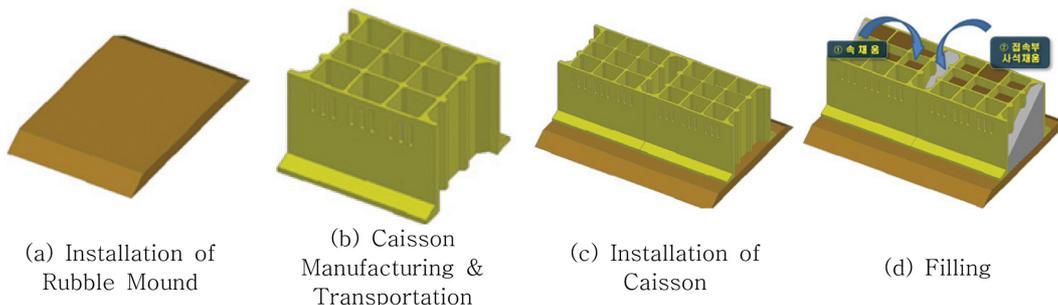


Fig. 4. Open-cell caisson installation method.

수치해석적인 방법을 통하여 분석하였다. 본 연구에 사용된 수치해석방법의 타당성은 수리모형실험과의 비교로부터 검증된 바 있으며(Seo et al., 2015a) 이를 통해 오픈 셀 케이슨의 내·외부벽 설계를 위한 하중산정 방법을 검토하였다.

2.1.1 해석모델 및 제원

본 해석에서 사용한 모델은 포항북방파제에 사용된 케이슨 단면을 오픈 셀 케이슨으로 수정한 형태로, 설치평균 수심은 DL(-) 23.1 m, 선석 수심은 DL(-) 18 m로 가정하였다. 케이슨의 제원은 Fig. 5와 같이 길이 8.7 m, 너비 25.5 m, 높이 19.5 m이며, 외부벽의 길이는 1.9 m으로 셀 길이의 50%로 설정하였다. 케이슨 간 이격거리는 20 cm로 총 16함의 오픈 셀 케이슨을 배치하여 총길이 약 200 m의 방파제를 모의하였다(Fig. 6).

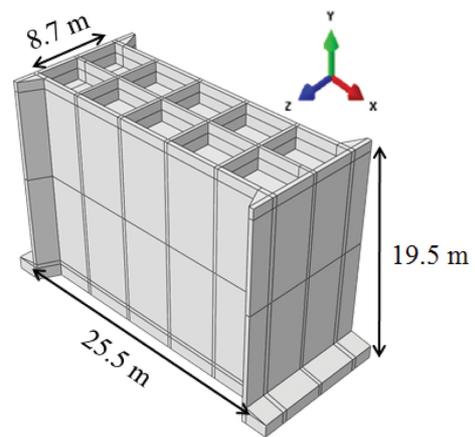


Fig. 5. Open-cell caisson.

해석에 사용된 케이슨은 무근 콘크리트, 마운드는 사석 기반으로 가정하였으며, 인터셀 내 채움재는 케이슨 벽의 파괴를 방지하며 구조적 성능을 극대화시키기 위하여 사석으로 설정하였다. 해석모델은 솔리드요소를 적용하였으며 재료 물성치는 Table 1과 같다.

2.2 하중조건

본 연구에 사용된 케이슨 모델의 인터로킹 효과를 평가하기 위하여 포항북방파제의 설계조건을 기준으로 하중의 설계

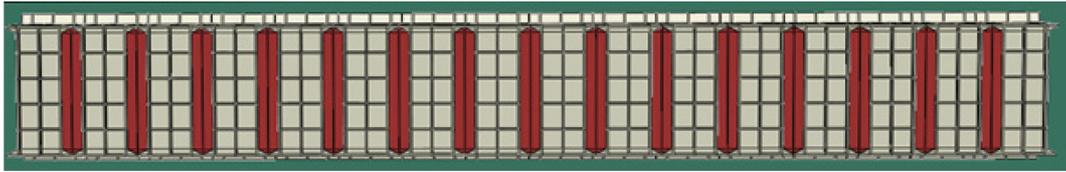


Fig. 6. Installation of open-cell caisson.

Table 1. Basic mechanical properties of applied materials

Property	Caisson	Crushed rock, mound
Mass density (kN/m ³)	2.4	1.765
Elastic modulus (GPa)	28	24
Poisson ratio	0.18	0.3

Where, Elastic modulus of concrete $E_c = 8500\sqrt{f_{ck}} + 8$ (MPa)

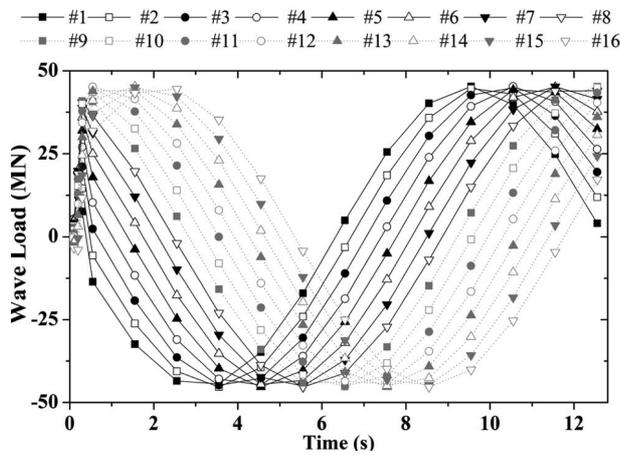


Fig. 7. Wave load.

파고는 7.7 m, 설계주기는 12.55 s로 가정하였다. 이에 적용된 인터로킹 부재에 의한 파력 평활화 효과가 감안된 하중은 수치적으로 선행 연구가 수행된 바 있다(Park et al., 2013; Seo et al., 2015c). 방파제의 양단에 제두부가 설치되어있는 경우를 고려하여 고정된 경계조건을 적용하였으며, 케이슨과 마운드 모델 간의 마찰력은 구조 실험으로부터 습윤 상태의 바닥을 고려하여 0.6으로 설정하였다. 활동과파 한계조건인 안전율을 1.2로 고려하여 제안된 인터로킹 시스템의 유효자중을 설정하였다.

Goda 파압으로 산정된 수평파력과 중복파이론을 기진력으로 산정된 위상차를 이용하여 수평파력을 시간에 따라 가하였으며, 이 때 최대파력은 약 46 MN이다. 입사파향은 10도, 20도 및 30도 조건으로 산정하였고 수심 조건을 고려하여 각각의 케이슨면에 외력을 가하였으며, 각각의 케이슨에 작용되는 한 주기 동안의 파랑하중은 Fig. 7에 나타내었다.

3. 내·외부벽 거동분석

3.1 전체계 해석

동적구조해석을 통해 전체계 시스템의 거동을 살펴본 결과

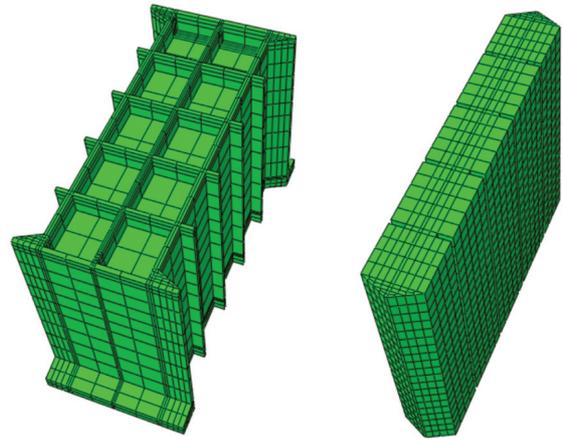


Fig. 8. Modeling of caisson and filler material.

외부벽에 의해 인터셀 내 채움재가 구속되어 효율적으로 저항함을 쉽게 볼 수 있었다. 이러한 인터셀의 효과적인 설계에 영향을 주는 요소를 파악하기 위해 오픈 셀의 현치(hunch) 두께 및 내·외부벽 길이에 따른 케이슨 벽에 가해지는 최대 인장응력을 비교하였다(Fig. 8). 해석 모델은 Fig. 8과 같이 현치 두께는 외부벽(EW)길이의 50%와 25%로 설정하였고, 내부벽(IW)의 갯수는 4개이며, 파랑하중은 입사각 30도인 조건을 가정하였다.

해석결과 Fig. 9와 같이 변형을 보이는 것으로 나타났다. 케이슨에 작용하는 하중(Fig. 7)에 따라 변형이 나타났으며, 그 변형은 최대 8 mm 이내로 나타나 인터로킹 효과가 매우 잘 발휘되는 것으로 나타났으며, 이때 케이슨에 발생하는 응력은 허용 범위 이내이다. 하중 작용상태에서 인터셀 내 채움재의 응력상태를 분석하면 Fig. 10과 같다. 응력분포가 일반적인 전단 하중이 작용할 때의 거동을 보이는 것으로 판단된다. 이에 인터셀 내의 사석 채움재는 순수 전단을 받을 때의 거동을 보이는 것으로 보아 전체계 해석이 아닌 국부적인 모델링만으로 전단 거동 특성을 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

전체계 해석에서 인터셀 내의 전단 블록에 발생하는 응력을 분석한 결과 Fig. 11과 같이 현치가 없거나 내부벽이 없는 경우 최대인장응력은 3 MPa 이상으로 전단력에 의해 파괴가 나타나는 것으로 나타났으며, 이는 현치(단면증가)유무에 따라 오픈 셀과 마주하는 벽으로 전달되는 힘의 분산이 상이하여 케이슨 길이 비율에 따른 최적화된 내·외부벽의 길이를 산출할 필요하다고 판단되었다. 이에 오픈 셀 케이슨의 인터셀 부분 부재 설계를 위한 하중산정 방법을 도출하여, 내·외부벽의 제원에 따른 전단력 분담률을 분석하였다.

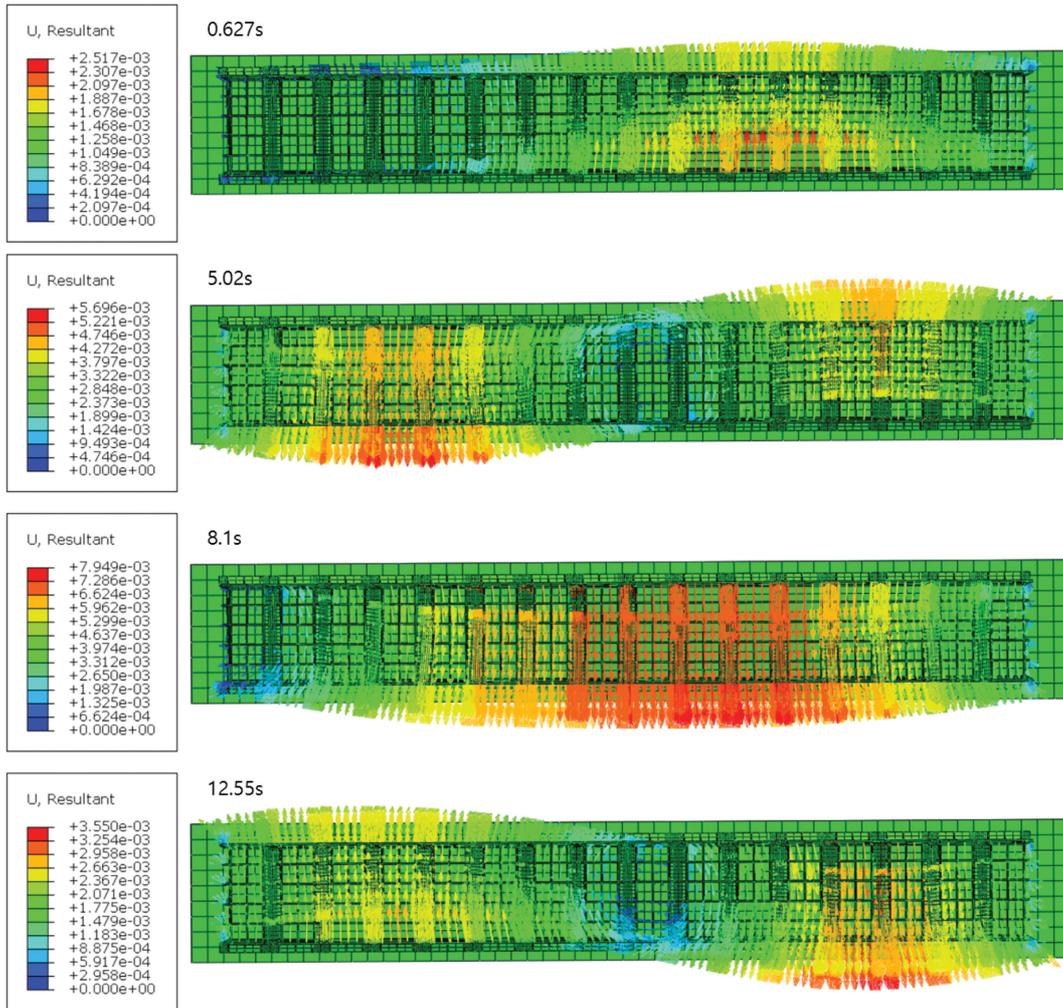


Fig. 9. Deformed shape of caisson by period(s).

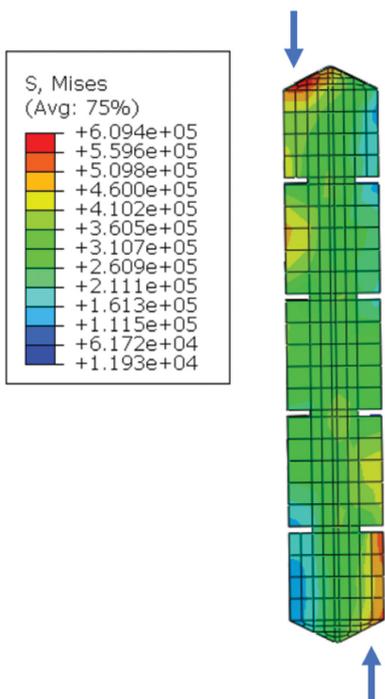


Fig. 10. Von-Mises stress distribution on filler material.

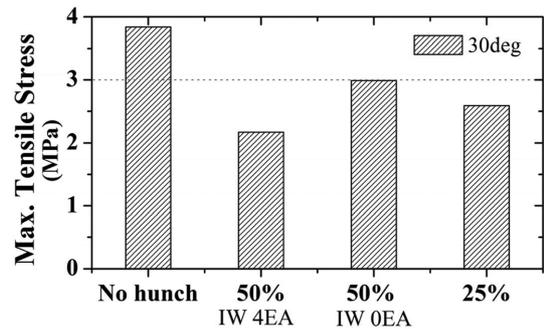


Fig. 11. Maximum tensile stress with parameter.

3.2 인터셀에 작용하는 전단력

구부적인 해석을 수행하기 위해서는 인터셀에 작용하는 전단력의 산정이 필요하다. 이에 인터셀에 작용하는 전단력을 산정하기 위하여 Fig. 12와 같이 16함의 케이슨 방파제를 범 모델로 가정하였으며, 일반적으로 케이슨의 양단에 일반 케이슨보다 자중이 1.5배 이상 무거운 케이슨을 배치하기 때문에 거의 이동이 없다. 이에 이 부분을 고정단으로 가정하였다(Seo et al., 2015b). 케이슨은 Fig. 7과 같은 하중을 받게

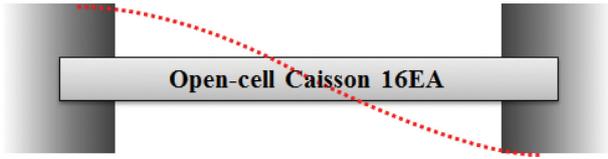


Fig. 12. Boundary condition.

된다. 이때 케이슨이 외력을 받을 때 케이슨은 첫 번째로 자중과 마찰력으로 횡력에 저항을 하게 되며, 그 후 자중 마찰 저항력 이상의 하중이 작용하였을 때 인터셀 내의 채움재가 저항한다. 이러한 메커니즘으로 저항하기 때문에 양단 고정

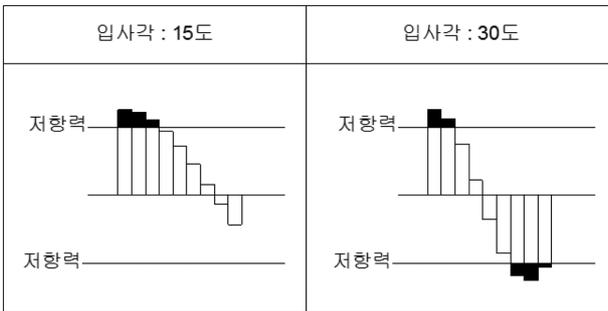
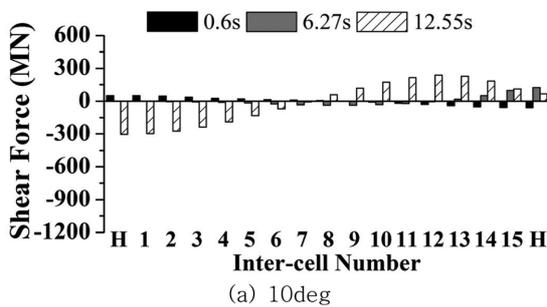
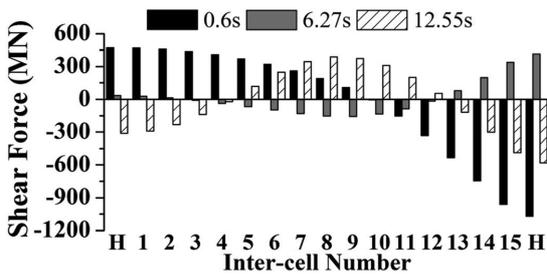


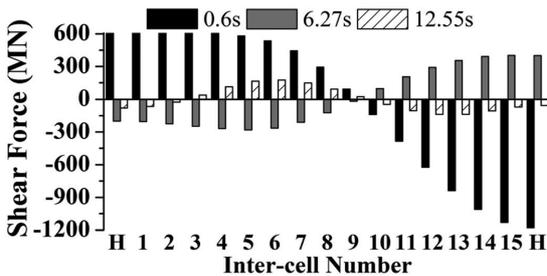
Fig. 13. Resistance force by crushed rock of inter-cell.



(a) 10deg



(b) 20deg



(c) 30deg

Fig. 14. Computation of shear forces with incident angle.

보를 모델링하여 전단력을 산정하였다. 이때 작용하중으로는 자중 - 마찰 저항력보다 큰 하중만 가하여 전단력을 산정할 수 있다.

Fig. 13은 수평과력에서 유효자중의 60%를 제외한 하중만을 보에 작용시키는 방법을 나타낸 것으로 마찰에 의한 저항력을 제외하고 보에 하중을 작용시킨다.

마찰력을 제외한 하중을 보에 작용할 경우 마찰력 한계 이상에서 인터셀에 작용하는 전단력을 산정할 수 있다. 이에 제두부(Head of breakwater)를 제외한 최대전단력은 입사각 별로 각각 1,417.55 MN, 1,760 MN, 1,464.65 MN이며, 입사각이 커질수록(Fig. 14(a)~(c)) 인터셀에 작용하는 전단력이 커지는 것을 알 수 있다.

이와 같은 방법으로 산정한 전단력을 국부모델에 적용시켜 내·외부벽 각각에 작용하는 분담률을 상세히 살펴보기 위해 해석대상 케이슨의 인터셀 부분에 대해 상세모델을 구성하였다(Fig. 15). 오픈 셀의 최적 길이 산정을 위해 인터셀 구조를 Fig. 16과 같이 명명하였으며, 내해측에 있는 외부벽부터 #1번 벽체로 정하고 외해측의 외부벽까지 순번을 정하였다. 전단거동을 살펴보기 위한 해석변수로는 동적구조해석결과를

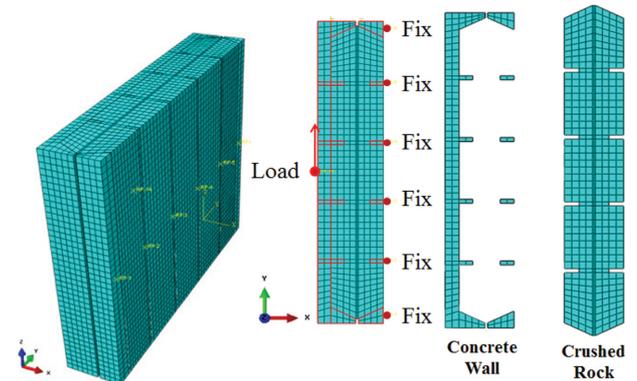


Fig. 15. Boundary condition for local model.

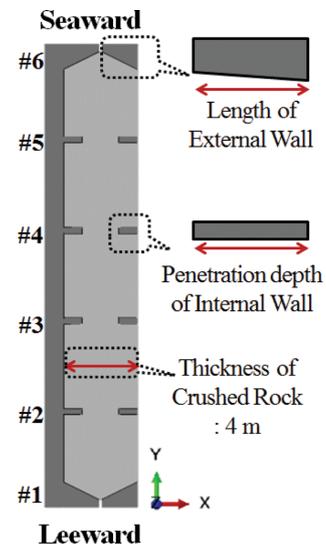


Fig. 16. Analysis parameter for shear forces.

Table 2. Parameter of internal walls

IW numbers (EA)	Thickness of crushed rock (m)	Penetration depth (m)	Rate
3	4	1	25%
		0.8	20%
		0.6	15%
		0.4	10%
		0.2	5%
4	4	1	25%
		0.8	20%
		0.6	15%
		0.4	10%
		0.2	5%
5	4	1	25%
		0.8	20%
		0.6	15%
		0.4	10%
		0.2	5%

Table 3. Parameter of external walls

Length of cell (m)	Length of EW (m)	Rate
3.8	1.9	50%
	1.7	45%
	1.5	39%
	1.3	34%

바탕으로 영향이 있을 것이라고 판단된 인자들인, 내부벽의 배치개수 및 사석에의 묻힘 길이(Table 2)와 외부벽의 길이(Table 3)로 선정하여 분석하였다.

3.3 내·외부벽 거동 분석

Fig. 17은 내부벽(IW)의 배치개수 및 길이에 따른 저항력 분포를 분석한 결과로, 여기서 횡축은 격벽의 번호이며, 종축은 하중분담비율을 의미한다. 변수는 사석으로 가정된 채움재 두께 대비 내부벽의 묻힘 길이비로 0%는 내부벽이 없이 양단에 외부벽체 만 있을 경우를 의미한다.

Fig. 17을 살펴보면, 먼저, 내부벽이 없을 때는 (0%) 외해측 외부벽(#5, #6, #7)이 모두 저항함을 알 수 있다. 내부벽의 묻힘길이를 25%에서 5%까지 변경하였을 때를 각각 살펴보면, 내부벽의 개수가 3개일 경우(Fig. 17(a)), 외해측 외부벽(#5)이 전단력의 약 40%를 담당하였으며 #2, #3, #4번의 내부벽이 나머지 전단력을 분담하였다. 이어 내부벽이 4개, 5개인 경우(Fig. 17(b, c)), 외해측 외부벽(#6, #7)이 전단력의 약 30%를 담당하였으며 나머지 내부벽이 남은 하중을 분담하며 내부벽의 개수에 하중 분담 비율이 거의 유사하였다.

또한 내부벽의 개수가 증가할수록 외해측 외부벽이 저항하는 하중분담률이 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 18은 케이슨 길이 대비 외부벽(EW) 길이에 따른 저항력 분포를 분석한 결과이다. 이 때 외부벽의 길이는 기존 케이슨의 셀의 길이인 3.8 m를 기준으로 50%에서 29%에 이르도록 설정하였다. 그 결과, 외부벽의 길이가 감소할수록

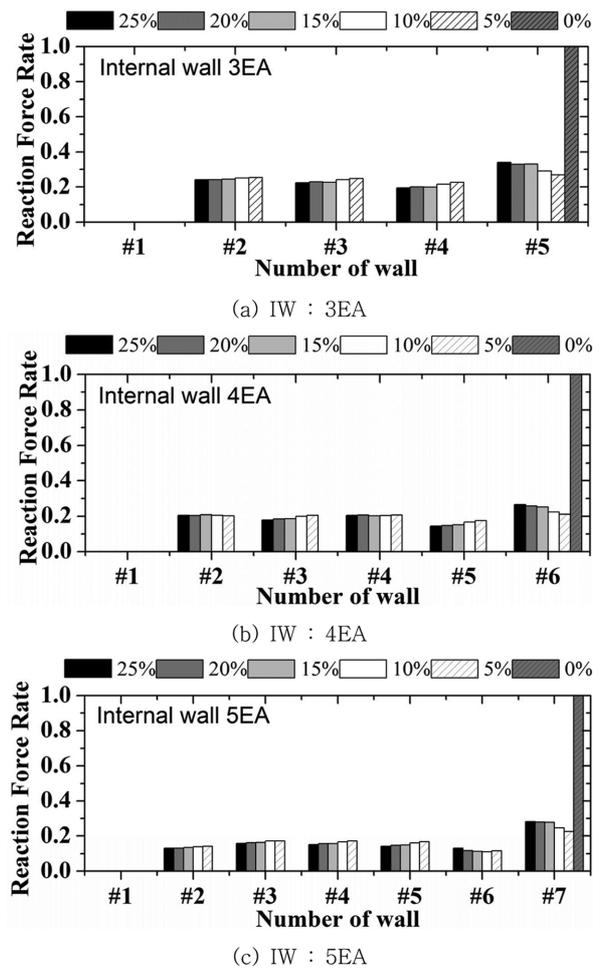


Fig. 17. Reaction forces with parameter of internal walls.

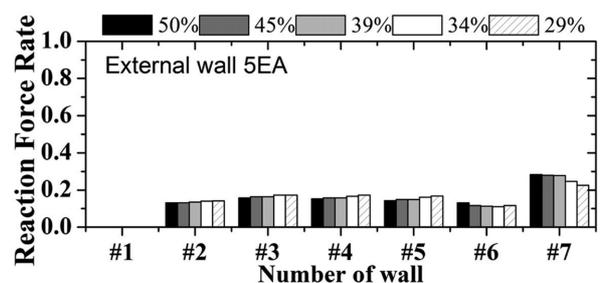


Fig. 18. Reaction forces with parameter of external walls.

(50% → 29%) 외해측 외부벽(#7)이 담당하는 하중분담률도 감소하나 미소하였다. 이는 본 해석모델의 인터셀 내 채움재를 사석으로 가정하였기 때문에 외부벽의 길이가 감소할 경우 상대적으로 내부벽의 길이 비율이 감소하여 채움재의 구속에 영향을 미치게 된다. 따라서 외부 벽체의 최적 길이는 설계 시 중요한 고려요소라 판단된다.

하지만, 상기 결과들은 전단력이 인터셀에 균일하게 분포하여 완전히 일체하였다고 가정하고 하중에 저항하였을 때의 현상이며, 만약 오픈 셀 케이슨간의 간격이 균등하게 유지되지 않아 부분만 일체가 될 경우에는 Fig. 19와 같이 외부벽의 하중 분담률이 증가하게 된다.

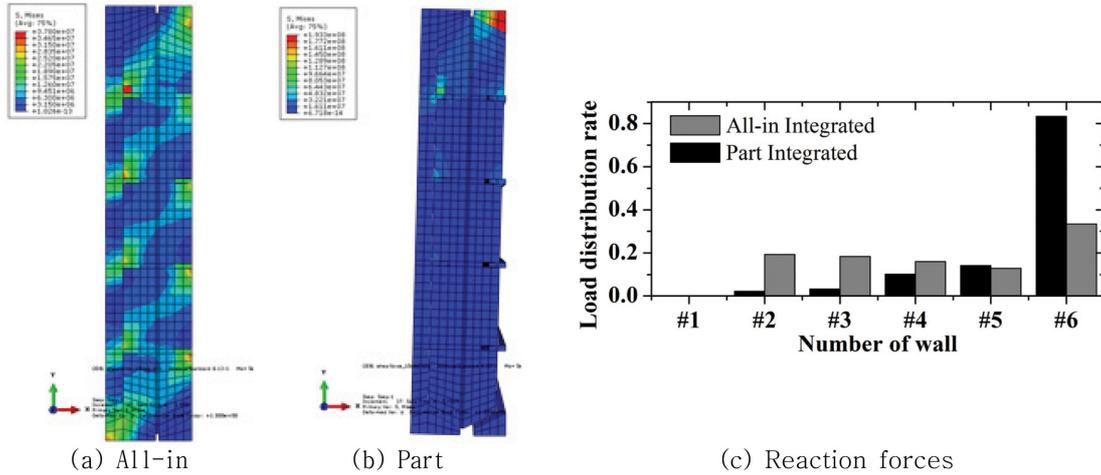


Fig. 19. Load distribution rate tied with integrated condition.

4. 결 론

본 연구에서는 채움재 마찰에 의한 저면(일부) 및 인접케이스와의 결속력을 증대시켜 평활화효과를 가져오는 오픈 셀 케이스의 인터셀에 작용하는 전단력을 산정하고 전단횡격벽의 제원에 따른 전단 거동을 살펴보았다.

포항북방파제에 설치되었던 케이스의 제원 및 설계조건을 바탕으로 오픈 셀 케이스으로 수정한 모델을 해석대상으로 선정하였으며, 채움재는 사석으로 가정하여 인터셀 내 부재 설계 시 고려사항을 전체계 동적구조해석을 통해 살펴보았다. 분석결과 인터셀내의 사석의 경우 전단거동을 하는 것으로 분석되었기 때문에 국부 모델링을 통하여 인터셀 내의 내·외부벽 제원에 따른 전단 거동을 살펴보았다.

케이스가 외력을 받을 때 케이스는 첫 번째로 자중과 마찰력으로 횡력에 저항을 하게 되며, 그 후 자중 마찰저항력 이상의 하중이 작용하였을 때 인터셀 내의 채움재가 저항한다. 이러한 메커니즘으로 저항하기 때문에 양단 고정보를 모델링하여 전단력을 산정하였으며, 이 때 작용하중으로는 자중·마찰 저항력보다 큰 하중만 가하여 전단력을 산정하였다.

전단력 분담률 분석 결과, 외부벽이 전체 전단력의 30% 이상을 저항하며 가장 많은 하중을 분담하였고, 내부벽이 나머지 약 60~70%의 하중을 나누어 분담하였다. 내부벽의 개수가 증가할수록 외해측 외부벽이 저항하는 하중분담률이 감소함을 알 수 있었다.

또한 외부벽의 길이가 감소할 경우 상대적으로 내부벽의 길이 비율이 감소하여 사석으로 가정한 채움재의 구속에 영향을 미치게 되기 때문에, 외부 벽체의 최적 길이 산정은 설계 시 고려해야한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원 미래해양산업기술개발 사업으로 수행 중인 ‘채움재를 이용한 인터로킹 케이스 방파

제 설계기술 개발(20160147)’의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Emanuel, K.A. (2013). Downscaling CMIP5 Climate Models Shows Increased Tropical Cyclone Activity over the 21st Century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(30), 12219-12224.

Frigaard, P., Burcharth, H.F. and Kofoed, J.P. (1999). Wave Impacts on Caisson Breakwaters Situated in Multidirectionally Breaking Seas. *Coastal Engineering Conference*. 2, 1959-1971.

Hyundai Dvp. Company. (2009). Report of Alternative-design of Counter Facilities Construction at Yeongil Bay Port in Pohang (Stage 2-1) (in Korean).

Hyundai Dvp. Company. (2011). Report of Basic Design of South-Breakwater at Yeongil Bay Port in Pohang (Stage 1 on Zone 1) (in Korean).

Kim, B.H., Lee, J.W., Park, W.S. and Jung, J.S. (2010). Making Long Caisson Breakwater Using interlocking System. *KSCE J. Civil Engrg.*, Vol. 58. No. 12, pp. 65-71 (in Korean).

Kim, B.H., Kim, J.S., Park, S.Y. and Kim, J.W. (2011). Design Case of the 3D Interlocking Breakwater, *Proc. KAOSTS '11 Conf.*, 1903-1906 (in Korean).

Lee, Y.S., Lee, O.J. and Park, W.S. (2015). Application of an Open Cell Caisson to Harbor Wharfs. *Proc. KSCOPE '15 Conf.*, 257-260 (in Korean).

Park, S.H., Park, W.S. and Kim, H.S. (2011). Evaluation of Structural Behavior for Interlocking Breakwater. *Proc. KAOSTS '11 Conf.*, 1915-1918 (in Korean).

Park, W.S., Yi, J.H., Won, D.H. and Seo, J.H. (2013). Dispersion Characteristics of Wave Forces on Interlocking Caisson Breakwaters. *Proc. KSCDP '13 Conf.*, 70 (in Korean).

Seo, J.H., Park, W.S., Won, D.H., Yi, J.H. and Oh, S.H. (2015a). Numerical Simulation of Behaviors of Interlocking Caisson Breakwaters under Abnormally High Waves. *Proc. KAOSTS '15 Conf.*, 167-170 (in Korean).

- Seo, J.H., Won, D.H. and Park, W.S. (2015b). Behavior of Transverse Wall in Open-cell Caissons. Proc. KAIS '15 Conf., 581 (in Korean).
- Seo, J.H., Yi, J.H., Park, W.S. and Won, D.H. (2015c). Dispersion Characteristics of Wave Forces on Interlocking Caisson Breakwaters by Cross Cables. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 27(5), 315-323 (in Korean).
- Simulia (2013) ABAQUS.
- Song, K.S. and Ha, M.B. (2007). Disaster Measures for SUPER typhoon, Technical note. Korean Society of Road Engineers, 9(3), 106-114 (in Korean).
- Takahashi, S., Shimosako, K.I., Kimura, K. and Suzuki, K. (2001). Typical Failures of Composite Breakwaters in Japan. Coastal Engineering Conference, 2, 1899-1910.
- Takayama, T. and Higashira, K. (2002). Statistical Analysis on Damage Characteristics of Breakwaters. In Proc. of Ocean Development Conf., 18, 263-268 (in Japanese).
- Won, D.H., Seo, J.H. and Park, W.S. (2015). Structural Behavior of Shear Block for Open Cell Caisson. Proc. KSCOE '15 Conf., 265-268 (in Korean).

Received 6 April, 2017

Revised 17 April, 2017

Accepted 19 April, 2017