

컨테이너선 종강도 규칙 제정(IACS UR S11A)에 따른 실선 영향 평가

최종일, 박재홍(사한국선급)

1. 서론

1.1 배경

2007년 1월 18일 English channel을 통과하던 4,419TEU 컨테이너선(M/V "MSC NAPOLI", 1991년에 건조된 선박으로 건조 당시에는 가장 많은 컨테이너를 적재할 수 있는 선박이었음)에 심각한 구조 손상이 발생하였다.

Fig. 1과 같이 기관구역부근의 선저 외판에서 발생한 크랙이 선측 외판까지 진전되어 기관구역은 침수되기 시작하였고 선장의 빠른 판단 하에 인명피해 없이 모든 선원이 무사히 탈출할 수 있었다. 또한, SOSREP(선박구난관리대표부)의 발 빠른 대응으로 본선에 적재되어 있는 컨테이너 화물과 연료유에 의한 해상오염을 초기에 막을 수 있었다. 이 사고 이후 MAIB(영국해양사고조사국)는 MSC NAPOLI호의 사고 원인을 다각도로 조사하여 공식적인 사고조사 보고서를 작성하였다. 보고서는 손상 원인을 분석한 내용들을 포함하고 있고 MAIB는 사고 후속조치로 IACS(국제선급연합회)에 UR S11(종강도 규칙)의 개정을 요청하였다.



Fig. 1 MSC NAPOLI following the structural failure

이에 IACS는 UR S11 개정을 위한 Project Team을 구성하여 상당한 기간동안 기존 산식 검토 및 CA(Consequence Assessment)를 수행한 후 컨테이너선의 종강도만 별도로 고려하기 위한 UR S11A를 제정하게 되었다.

UR S11A 제정을 위해서 IACS는 Fig. 2와 같이 120척 이상

의 실선에 대한 비선형 계산을 통하여 하중을 계산하였고, CSR 접근 방법으로 강도 검토, 좌굴강도 및 최종강도에 대하여 평가하였다.

즉, UR S11A는 IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers (CSR)의 요건을 상당 부분 준용하고 있다.

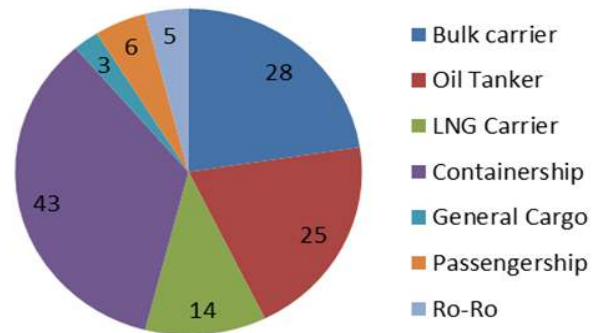


Fig. 2 Ship database used for direct calculations

1.2 적용

UR S11A는 S11과 마찬가지로 종강도 및 좌굴강도에 대한 평가를 요구하고 있고 이에 추가하여 최종강도에 대한 평가를 새롭게 요구하고 있다.

UR S11A는 제한되지 않는 항로(unrestricted service)를 운항하는 길이 90m 이상의 컨테이너선에 적용해야 한다. 평가 범위는 선박의 길이 방향으로 0.2L 에서 0.75L 이내에 현저한 변화가 있는 선체횡단면에 대해서 종강도, 좌굴강도 및 최종강도 계산을 수행하여야 한다. 이에 추가하여, 최전방 화물창의 전단 및 최후방 화물창의 후단에 대해서는 이 범위와 상관 없이 계산을 수행하여야 한다.

UR S11A는 2016년 7월 1일 이후 건조 계약되는 컨테이너선에 적용하여야 하며, (사)한국선급 "2016년 선급 및 강선규칙 7편 전용선박" 에 해당 규정이 반영되어 있다.

2. 본론

2.1 순치수 방법

UR S11에서 모든 구조부재의 치수는 총두께(gross thickness) 방법으로 산정하지만, UR S11A에서는 CSR과 유사하게 순치수(net thickness) 방법으로 치수를 정한다.

판, 웨브 및 플랜지의 순 두께(t_{net})는 아래 식 (1)과 같이 건조 두께(t_{as_built})에서 자발적 추가두께(t_{vol_add}) 및 부식추가(t_c)를 공제하여 구한다. 부식추가는 구조부재가 포함되어 있는 구획의 종류에 따라서 결정이 되어야 하며 Table 10에 따른다.

$$t_{net} = t_{as_built} - t_{vol_add} - \alpha t_c \quad (1)$$

Table 1 Corrosion addition for one side of a structural member

Compartment type	One side corrosion addition(mm)
Exposed to sea water	1.0
Exposed to atmosphere	1.0
Ballast water tank	1.0
Void and dry spaces	0.5
Fresh water, fuel oil and lube oil tank	0.5
Accommodation spaces	0.0
Container holds	1.0
Compartment types not mentioned above	0.5

2.2 파랑하중

2.2.1 파랑계수(Wave Parameter)

UR S11에서는 Table 20에서와 같이 선박의 길이에 따라서 파랑계수가 결정되었다. 하지만, 직접계산을 수행한 결과, 길이가 350m 이상인 선박의 경우 파랑계수의 값이 정확하지 않아서 S11A에서는 참조길이(referece length)를 새롭게 도입하였다. 참조길이는 선박의 길이에 대한 파랑계수를 보정하면서 수직 파랑굽힘모멘트 및 수직 파랑전단력에 대해 좀 더 정확한 계산이 가능하게 하였다.

Table 2 Wave parameter

UR S11	
$C = 10.75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{1.5}$	$90 \leq L \leq 300$
$C = 10.75$	$30 < L \leq 350$
$C = 10.75 - \left(\frac{L-350}{150}\right)^{1.5}$	$350 < L \leq 500$
UR S11A	
$C = 1 - 1.50 \left(1 - \sqrt{\frac{L}{L_{ref}}}\right)^{2.2}$	$L \leq L_{ref}$
$C = 1 - 0.45 \left(\sqrt{\frac{L}{L_{ref}}} - 1\right)^{1.7}$	$L > L_{ref}$

2.2.2 수직 파랑굽힘모멘트(Vertical Wave Bending Moment)

수직 파랑굽힘모멘트의 경우 UR S11에서는 호깅(Hogging)과 새깅(Sagging)에 대한 산식이 아래 Table 3와 같이 서로 다르지만, S11A에서는 동일한 산식에 비선형계수를 도입하여 그 값을 계산할 수 있게 수정하였다.

또한, S11에서는 방형계수(C_B)가 모멘트 값을 결정하는 중요한 요소이지만 S11A에서는 수선면계수(C_W), 운항계수(f_R) 및 비선형계수(f_{NL})가 산식에 추가 되면서 컨테이너선과 같이 날렵한 형상을 가진 선박에 대해 좀 더 정확한 파랑굽힘모멘트 계산이 가능하게 되었다.

Table 3 Vertical wave bending moments

UR S11	
Hogging	$M_w = +0.19 C_1 C_2 L^2 B C_B$
Sagging	$M_w = -0.11 C_1 C_2 L^2 B (C_B + 0.7)$
UR S11A	
Hogging	$M_w = +1.5 f_R L^3 C C_W \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} f_{NL-Hog}$
Sagging	$M_w = -1.5 f_R L^3 C C_W \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} f_{NL-Sag}$

2.2.3 수직 파랑전단력(Vertical Wave Shear Force)

수직 파랑전단력의 경우 수직 파랑굽힘모멘트와 마찬가지로 수선면계수(C_W), 운항계수(f_R) 및 비선형계수(f_{NL})가 산

식에 반영되었다. S11A에서는 S11과 달리 Table 4에서와 같이 선수부, 선미부 및 중앙부에 대한 파랑전단력 산식을 각각 다르게 적용한다는 것이 S11과의 차이점이다.

따라서, UR S11A 에서는 위치에 따라서 총 5개 식으로 파랑전단력에 대한 계산을 수행하여야 한다.

Table 4 Vertical wave shear force

UR S11	
$F_w(+)$	$+0.30 C_1 C_3 L B (C_B + 0.7)$
$F_w(-)$	$-0.30 C_1 C_4 L B (C_B + 0.7)$
UR S11A	
F_{WHog}^{Aft}	$+5.2 f_R L^2 C C_W \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} (0.3 + 0.7 f_{NL-Hog})$
F_{WHog}^{Fore}	$-5.7 f_R L^2 C C_W \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} f_{NL-Hog}$
F_{WSag}^{Aft}	$-5.2 f_R L^2 C C_W \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} (0.3 + 0.7 f_{NL-Sag})$
F_{WSag}^{Fore}	$+5.7 f_R L^2 C C_W \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8} (0.25 + 0.75 f_{NL-Sag})$
F_W^{Mid}	$+4.0 f_R L^2 C C_W \left(\frac{B}{L}\right)^{0.8}$

2.3 강도평가 기준

S11에서는 단면 2차모멘트 평가 시 선박의 중앙부 단면에 대한 평가만을 요구하고 있다. 하지만 S11A에서는 아래 Table 5에서와 같이 정수중립힘모멘트(M_S)를 산식에 포함하여 선박의 전 길이에 걸쳐서 단면 2차모멘트를 평가할 수 있도록 산식을 개정하였다.

Table 5 Strength assessment

Stiffness criterion		
	UR S11	UR S11A
Moment of Inertia	$I = 3 C_1 L^3 B (C_b + 0.7)$	$I \geq 1.55 L M_S + M_W 10^7$
Allowable stress		
	UR S11	UR S11A
Bending strength	175/k	190/k
Shear strength	110/k	120/k

또한, S11A에서는 순치수 방법으로 계산을 수행하므로 굽힘강도에 대한 허용응력을 190/k, 전단강도에 대한 허용응력을 120/k로 각각 개정하였다. 아래 Table 5에서 UR S11과의 허용응력 차이를 확인할 수 있다.

2.4 좌굴강도

S11에서는 종강도 구조부재에 대한 좌굴강도 평가 시 압축응력과 전단응력에 대한 각각의 임계좌굴응력을 평가한다. 반면에, S11A는 CSR의 좌굴강도 규정을 준용함으로써 압축응력과 전단응력을 조합하여 판 및 보강재의 좌굴강도를 평가할 수 있게 개정되었다.

2.5 최종강도

최종강도 규정은 좌굴강도와 마찬가지로 CSR을 준용한다. S11A에서는 CSR의 최종강도 규정의 설계하중 시나리오 A를 고려하여 재료와 이종저에 관한 부분안전계수 γ_M 과 γ_{DB} 는 Table 6과 같이 개정하였다.

Table 6 Partial safety factor

	γ_s	γ_w	γ_M	γ_{DB}	
CSR	1.0	1.2/1.3	1.1	Hogging	1.1
				Sagging	1.0
S11A	1.0	1.2	1.05	Hogging	1.15
				Sagging	1.0

3. 실선 계산

IACS UR S11A 규정이 실제 컨테이너선의 설계에 어떤 영향을 미치는지 한국선급에 등록되어 있는 컨테이너선들(exisiting ships)을 대상으로 계산을 수행하였다.

평가 대상 선박은 1,000TEU, 2,000TEU, 4,000TEU, 6,000TEU, 8,000TEU, 10,000TEU 및 13,000TEU 등 총 7척으로 다양한 사이즈를 선별하였고 평가 결과는 아래와 같이 요약하였다.

3.1 수직 파랑굽힘모멘트 및 굽힘강도

선박의 길이에 따른 파랑굽힘모멘트 분포는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 그래프 위쪽 빨간색 실선이 S11A의 규정값을 계산한 호킹 파랑굽힘모멘트인데 파란색 점선인 S11과 비교하여 대형선(13,000TEU)에서는 약 10% 증가하였지만 선박의 크기가 작아지면서 값이 점점 줄어들어 소형선(1,000TEU)에서는 호킹 모멘트 값이 S11 대비 약 30% 감소하였다.

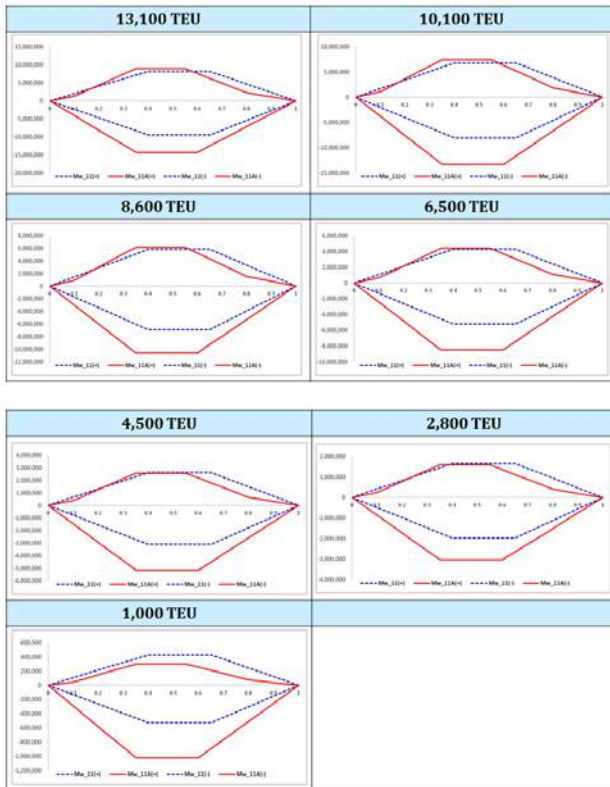


Fig. 3 Distribution of VBM(S11 vs. S11A)

Fig. 3에서 그래프 아래쪽 빨간색 실선이 새깅 파랑굽힘모멘트인데 선박의 크기에 상관없이 크게 증가하였음을 확인할 수 있다. 새깅 파랑굽힘모멘트는 S11과 비교하여 대형선에서는 50%정도 증가하였고 소형선에서는 90%이상 증가하였다.

비선형계수가 S11A에서 새롭게 적용 되면서 소형선에서의 새깅 파랑굽힘모멘트가 가장 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

굽힘강도 평가 결과 파랑굽힘모멘트는 S11과 비교하여 대형선에서는 증가하는 경향을 보인다. 하지만, 앞서 언급한바와 같이 순차수 방법으로 계산하기 때문에 허용응력 또한 커졌다.

Table 7은 상갑판(Upper deck) 및 선저(Bottom shell)에 대해서 S11A에 따른 굽힘강도의 실제값과 허용값을 비교한 것이다. 대형선의 경우 파랑굽힘모멘트 증가비보다 허용응력 증

가비가 더 높아서 S11과 비교하여 단면계수 요구치가 증가하지 않았지만, 소형선의 경우 파랑굽힘모멘트 증가비가 허용응력 증가비보다 훨씬 높아져서 S11과 비교하여 단면계수 요구치가 증가하여 상갑판의 단면계수가 부족한 결과가 발생하였다. Table에서 100% 미만이면 해당 규정을 만족하지 못함을 의미한다.

Table 7 Ratio of bending strength comparison between actual value and required value

Section Modulus	13,100 TEU	10,100 TEU	8,600 TEU	6,500 TEU	4,500 TEU	2,800 TEU	1,000 TEU
Deck ($Z_{act/req}$)	101%	101%	102%	103%	103%	95%	84%
Btm ($Z_{act/req}$)	116%	116%	110%	106%	154%	119%	147%

단면 2차모멘트의 경우 선박의 중앙부, 0.25L 및 0.75L에 해당하는 단면을 평가하였고 해당 선박들이 충분한 여유가 있음을 확인할 수 있었다.

Table 8 Ratio of moment of inertia comparison between actual value and required value

Moment of Inertia	13,100 TEU	10,100 TEU	8,600 TEU	6,500 TEU	4,500 TEU	2,800 TEU	1,000 TEU
I_{net}	119%	118%	108%	130%	150%	123%	132%

3.2 수직 파랑전단력 및 전단강도

선박의 길이에 따른 수직 파랑전단력의 분포는 Fig. 4와 같다. 그래프 빨간색 실선이 S11A에 따라서 계산된 파랑전단력의 규정값이다.

수직 파랑전단력의 경우, 모든 선박들에서 UR S11A에 따라서 계산된 값이 증가하였으며 특히, 선박의 길이 방향으로 0.25L 및 0.75L 근방에서 크게 증가하였다. S11과 비교하여 S11A에 의하여 계산된 파랑전단력은 대형선에서는 약 90% 증가하였고 소형선에서는 약 120% 증가하였다.

Table 9는 외판(S/Shell) 및 종격벽(L/BHD)에 대해서 S11A에 따른 전단강도의 실제값과 허용값을 비교한 것이다. 특히, 0.75L 단면의 수직 파랑전단력이 크게 증가하면서 5척의 선박에서 외판 및 종격벽의 전단강도가 국부적으로 부족한 부분이 있는 것으로 식별되었다.

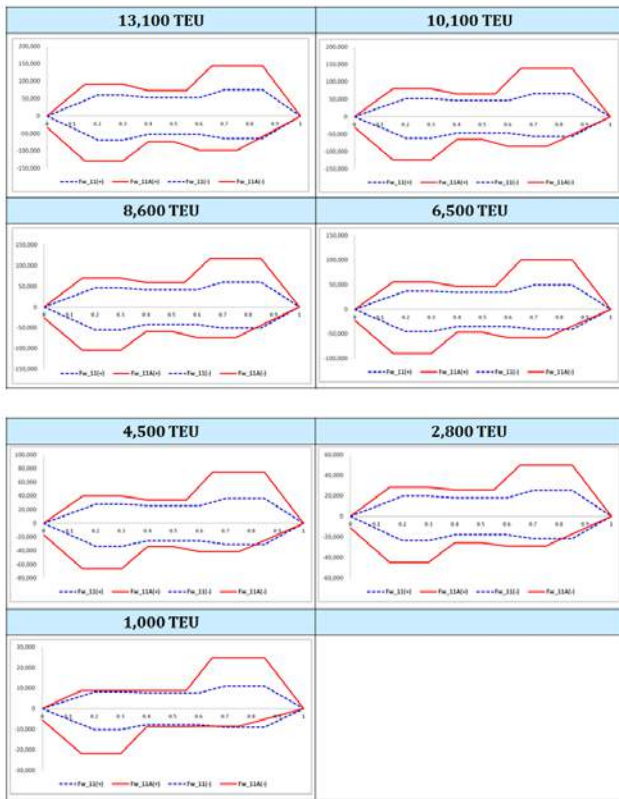


Fig. 4 Distribution of VSF(S11 vs. S11A)

Table 9 Ratio of shear strength comparison between actual value and required value

Shear Strength		13,100 TEU	10,100 TEU	8,600 TEU	6,500 TEU	4,500 TEU	2,800 TEU	1,000 TEU
0.25L ($\tau_{act/req}$)	S/S	104%	187%	126%	117%	115%	128%	155%
	L/B	101%	138%	121%	134%	124%	106%	137%
0.75L ($\tau_{act/req}$)	S/S	87%	84%	96%	107%	105%	111%	64%
	L/B	108%	117%	101%	132%	90%	104%	90%

3.3 좌굴강도

좌굴강도는 선박의 중앙부, 0.25L 및 0.75L에 해당하는 단면을 평가하였다. 판의 경우 전단응력이 크게 증가된 중립축 근처의 외판과 종격벽에서 일부 좌굴이 발생하였다. 특히, 0.25L 및 0.75L 단면에서 급격하게 커진 전단응력 때문에 좌굴이 더 많이 발생하였고 중앙부의 경우도 일부 종격벽에서 좌굴이 발생하였다. Fig. 5는 중앙부 단면에 대한 전형적인 좌굴강도 평가 결과를 보여준다.

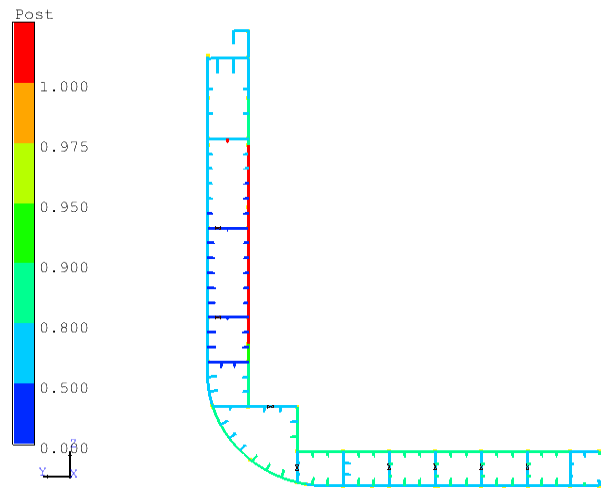


Fig. 5 Buckling strength evaluation at midship section

보강재의 경우 내저판과 선저외판의 보강재에서 좌굴이 주로 발생하였다. 보강재의 좌굴강도 평가 시 보강재에 작용하는 면외하중(P, kN/m²)을 고려해야 하는데 P에 대한 산식이 S11A에서 명확하게 정의하고 있지 않고 각 선급의 규정을 따르게 규정하고 있어 한국선급은 2016 선급 및 강선규칙 3편 선체구조, 15장 디프탱크의 수두(h)를 적용하였다.

또한, 소형선을 제외하고 최상부 외판의 내부 보강재에서 좌굴강도는 만족함을 확인할 수 있었다.

3.4 최종강도

UR S11A에서 최종강도 평가는 길이가 150m 이상인 컨테이너선에 요구하고 있다. Table 10에서와 같이 6척의 선박에 대해서 중앙부, 0.25L 및 0.75L에 해당하는 단면에 대해서 최종강도 평가를 수행하였으며 호킹 및 새깅에 대한 충분한 Capacity를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

Table 10 Ratio of ultimate strength comparison between actual value and required value

		13,100 TEU	10,100 TEU	8,600 TEU	6,500 TEU	4,500 TEU	2,800 TEU
0.25L	Hog	132%	132%	169%	127%	139%	154%
	Sag	154%	213%	213%	145%	123%	147%
Mid	Hog	108%	111%	104%	116%	125%	119%
	Sag	128%	122%	135%	127%	114%	123%
0.75L	Hog	182%	185%	161%	192%	233%	196%
	Sag	135%	161%	149%	123%	149%	145%

4. 결론

IACS UR S11A가 제정이 되면서 굽힘강도, 전단강도 및 좌굴강도 계산 과정이 S11과 비교하여 굉장히 복잡해졌다. 특히, 최종강도 규정이 추가 되면서 복잡한 계산을 위한 소프트웨어가 필수적으로 요구된다.

한국선급은 자체 개발한 SeaTrust-HullScan 소프트웨어에 UR S11A를 반영하여 고객들에게 컨테이너 선박에 대한 쉽고 빠른 계산을 수행할 수 있는 서비스를 제공하고 있다.

UR S11A는 CSR을 적용 받는 산적화물선이나 유조선과 같이 선박의 설계 개념이 완전히 바뀌고 선박의 구조부재 치수를 크게 증가해야 하는 것은 아니다. 적하지침서(loading manual)상의 정수중 굽힘모멘트나 전단력에 대한 envelope 값을 면밀히 검토하여 조정한다면 굽힘강도 및 전단강도는 쉽게 만족시킬 수 있다.

또한, 전단강도나 좌굴강도가 부족한 구조부재에 대해서는 국부적으로 재료 등급을 높이거나 두께를 조금 키우는 방법으로 충분한 보강이 가능하다. 단, 소형선의 경우 새김 시 수직 파랑굽힘모멘트가 매우 증가하였으므로 설계 시 주의가 요구된다.

참고 문헌

Marine Accident Investigation Branch, Report on the investigation of the structural failure of MSC Napoli English Channel on 18 January 2007, April 2008.

IACS. UR S11A Longitudinal Strength Standard for Container, June 2015.

Korean Register of Shipping 2016. Rules for the Classification of Steel Ships Part 3 Hull Structures.

Korean Register of Shipping 2016. Rules for the Classification of Steel Ships Part 7 Ships of Special Service.

Korean Register of Shipping 2016. Rules for the Classification of Steel Ships Part 13 Common Structural Rues for Bulk Carriers and Oil Tankers.



최종일

- 1978년생
- 2004년 인하대학교 선박해양공학과 학사
- 현 재 : (사)한국선급 선급규칙팀 책임검사원
- 관심분야 : 선체구조, CSR
- 연 락 처 : ***-***-****
- E - mail : jichoi@krs.co.kr



박재홍

- 1962년생
- 2007년 영국 사우스앰트대 선박공학과 박사
- 현 재 : (사)한국선급 선급규칙팀 팀장
- 관심분야 : 선체구조, CSR
- 연 락 처 : ***-***-****
- E - mail : jaehpark@krs.ac.kr

2017년도 춘계공동학술대회

일 자: 2017년 4월 19일(수)~20일(목)

장 소: 부산 BEXCO