

## 초연약 점토지반 압축지수 추정에 관한 연구

### A Case-study of Compression Index Prediction on Very Soft Clay

김 병 규<sup>1</sup> Kim, Byeong-Kyu

이 송<sup>2</sup> Lee, Song

#### Abstract

Considering dredged ground is consolidated more than one meter, Compression index prediction is very important. But, UD-sampling and consolidation test are impossible because of high moisture content and weak shear strength. This paper demonstrates the compression index relation,  $C_{c(d)} = F(e_d, C_c)$ , between in-situ and dredged clay using N. Keith Tovey's Omega point and soil physical properties. Good relationship is confirmed between proposed formula and measured primary consolidation result on dredged ground in The Republic of Korea.

#### 요 지

하중이 가해지면 수십 cm에서 수 m까지 침하가 발생하는 준설매립지반의 압축특성 파악은 매우 중요하다고 할 수 있으나, 고 함수비와 낮은 전단강도로 인해 불교란 시료채취가 불가능하고 압밀시험 또한 불가능한 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 N. Keith Tovey의 omega point와 점토의 물리적 특성변화에 대한 기본적인 가정을 이용하여 원지반과 준설매립점토 사이에는  $C_{c(d)} = F(e_d, C_c)$  관계를 가진다는 것을 수학적으로 증명하였으며, 제안식의 신뢰성을 검증하기 위해 준설매립을 통해 지반이 조성된 국내 1개 현장에서 수행된 계측결과에 대한 분석결과, 매우 양호한 상관관계를 보이는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Dredging reclamation, Soft clay, Compression index prediction, Omega point, Moisture content

#### 1. 서 론

3면이 바다인 우리나라에서는 항만이나 공항, 공업지구 등을 개발할 목적으로 대규모 매립사업이 이루어지고 있다. 최근 들어서는 물류의 대부분을 담당하는 선박 규모가 대형화됨에 따라 매년 2천만<sup>3</sup> 이상의 준설토를 처리하기 위한 투기장 조성이 이루어지고 있다.

이러한 준설매립 점토는 매립완료 후 230일이 경과

한 후에도 액성한계의 2배가 넘는 함수비와 낮은 전단강도로 인해 불교란 시료의 채취가 불가능하여 전체 사업비의 30%가 넘는 지반개량 공사비를 추정하는데 어려움을 겪고 있을 뿐만 아니라, 많은 현장에서 기술자의 개인적인 판단에 따른 경험적인 설계가 이루어지고 있는 실정이다.

준설매립점토의 거동을 해석하기 위한 방법에는 Yano 등이 제시한 자중압밀 및 저응력 압밀시험이나 유한변

1 정회원, 한국항만기술단 부장 (Member, General Manager, Korea port Engineering corp.)

2 정회원, 다솔엔지니어링 회장 (Member, Chairman, DASOL Engineering Co. Ltd., Tel: +82-2-536-3145(801), Fax: +82-2-558-2368, scugeo@uos.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

형을 이론을 이용한 수치해석방법이 있으나, 높은 실험 비용과 실험시 squeezing 현상으로 인해 정확한 저응력 압밀시험이 어려운 실정이다.

따라서, 본 논문은 토질 공학적 측면에서 흙의 물리·역학적 특성에 대한 상관성을 검토하고, 기술자가 검토하고자 하는 지반에 대한 압축지수를 검토할 수 있는 방법을 제시하는데 그 목적이 있다. 또한, 준설매립 및 지하수위 변화로 인한 원지반 점토의 응력변화에 대한 지반공학적 고려방법을 제시함으로써 합리적인 사업비 추정을 위한 침하량 예측방법을 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

일반적으로 압밀침하해석에 가장 많이 이용되고 있는 Terzaghi의 압밀론은 수평으로 무한한 지반에 대한 미소요소에서 흐름에 의해 체적이 변한다는 가정과 흙 입자의 이동을 무시하고 흐름에 대해 Darcy의 법칙을 결합하여 압밀침하에 대한 1차원 미분방정식을 완성하였다. 따라서, 1) solid particle의 움직임을 무시하고, 2) 고정된 Volume에 대한 요소에서 strain을 결정했으며, 3) 압밀진행에 따른 경계의 움직임을 무시했다는 모순점을 가지고 있다.

이러한 모순에 대해 Lee, Kuantsai(1979)는 1)과 2)의 경우에는 신중한 공식화와 parameter 결정을 통해 해결할 수 있으나, 침강압밀과 같은 큰 변형이 일어날 때 해석상 문제가 되는 3)의 경우에는 상대 좌표계를 이용한 유한변형을 압밀이론을 통해서만 해결이 가능하다고 하였다.

하지만, 본 논문에서는 침강 및 자중압밀이 완료된 초연약 점토지반을 대상으로 하고 있기 때문에 3)의 모순은 무시하고, 신중한 공식화와 paramter 평가방법을 제시하고자 한다.

또한, Terzaghi는 1차원 압밀해석을 위한 parameter를 결정하기 위해 표준압밀시험을 수행했는데, 시험결과

간극비와 압밀하중관계를 plotting해보면 비선형적인 관계로 나타난다. 이 문제를 해결하기 위해 x축만 log좌표계를 도입하면 e-logp관계는 선형적인 관계를 나타내는데, 이 때 직선의 기울기를 압축지수 Cc로 정의하면서 이론식이 아닌 실용적인 침하량 산정식을 제안하였다. 본 논문은 해석의 편리성을 고려하여 Terzaghi의 압축지수 개념을 도입하였다.

Lagrangian 좌표계를 도입하고, 압밀시 압축계수, 투수계수 변화와 변수간 비선형성을 고려하여 만들어진 Mikasa(1965), Gibson(1967) 등이 주장한 유한변형을 압밀이론은 침강 및 자중압밀 해석이 가능하다는 장점을 가지고 있으나, parameter 결정을 위한 특수 실험이 필요하고, 해석시 매우 높은 전문성이 요구되는 점을 고려하여 본 연구에 적용하지 않는 것으로 결정하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 자중압밀이 완료된 초연약 준설매립지반에 대한 제안식을 Terzaghi의 압축지수 개념을 도입하여 좌표계 변환 후 실험결과를 분석하면, 간극비와 압밀하중과의 비선형적인 관계식인  $e = a \cdot \log \sigma' + b$ 의 선형적인 관계로 표현됨을 알 수 있다. 따라서, 준설매립점토 침하특성을 분석하기 위해 본 논문에서는 Terzaghi의 압축지수 개념을 도입하였다.

N. Keith Tovey 등(2003)은 홍콩 점토에 대한 다양한 실험 및 계측결과, 포화된 점토의 함수비가 증가하면, 간극비도 증가하고 압축지수 또한 증가하나 동일한 점토라면 처녀압축곡선은 어느 한 점에서 만난다는 것을 발견하였다. 이 점을 ‘omega point’이라 정의하였으며, 일정 값을 가지는 Casagrande의  $0.42e_0$ 를 포함하는 포괄적인 의미를 가진다. 본 논문에서 경험적인 압축지수 추정을 위한 이론식을 전개하기 위해 N. Keith Tovey 등이 제시한 omega point 개념을 적극 도입하였다.

## 3. 경험적 압축지수 추정을 위한 이론식 도출

준설매립점토의 경험적인 압축지수 추정을 위해 1)

Table 1. Relationship of  $e-\sigma_v'$  and  $e-\log \sigma_v'$  at dredged and reclaimed ground

Proposer	Proposed equation ( $e-\sigma_v'$ )	By results ( $e-\log \sigma_v'$ )
Carrier, Beckman (1984)	$e = \alpha \left( \frac{\sigma'}{P_0} \right)^\beta + \epsilon$	$e = \beta \cdot \log \left( \frac{\sigma'}{P_0} \right) + C$
Timothy et al. (2005)	$\sigma' = \alpha \times 10^{e-\beta}$	$e = \log(\sigma') + C$
Jeon, J. S. et al. (2011)	$\sigma' = S_{coe} \times 10^{\frac{e - \frac{\alpha_s PI + \beta_s}{\eta_s}}{\eta_s}}$	$e = \log(\sigma') + \frac{\alpha_s PI + \beta_s}{\eta_s} - \log S_{coe}$
Lee, S. et al. (2004)	$e = A_{coe} \cdot \sigma'^{-B_{coe}}$	$e = -B_{coe} \log \sigma' + \log A_{coe}$

원지반 점토나 준설패립 후 침강 및 자중압밀이 이루어진 점토에 대한 압밀시험을 수행한다면, 두 실험의  $e-\log\sigma_v'$ 는 이상적으로 직선형태를 가지며, 2) 준설패립에 의해 원지반 점토에 비해  $n$ 배로 함수비가 증가하고, 흙의 삼상의 원리에 의해 간극비도  $n$ 배만큼 증가한다. 3) 패립완료 후 방치기간을 고려하여 점토의 Cementation 이나 Aging effect 현상은 무시하고, 4) 준설패립점토의 간극비가 증가하는 만큼 압축지수도 증가하고, 원지반 점토와 준설패립점토의 처녀압밀곡선은 Omega Point 에서 만난다는 가정조건에 따라 기본 개념도 Fig. 1을 얻을 수 있으며, 준설패립 전후 유효응력은 준설패립, 검토위치의 영향을 받으나, 준설패립지반에서 유효연직 하중  $P_d$ 가 준설패 전 원지반의 유효연직하중  $P_0$ 보다 작다고 가정하였다.

원지반 함수비를  $\omega_n$ , 비중을  $G_s$ 이라고 하면, 앞의 가정조건에 따라

$$e_d = G_s \cdot \omega_d = n \cdot G_s \cdot \omega_d = n \cdot e_0 \quad (\text{단, } n > 1.0) \quad (1)$$

$$e_m = \alpha \cdot e_0 \quad (\text{단, } \alpha < 1.0) \quad (2)$$

원지반 점토의 중간까지 깊이를  $h$ , 준설패 중심까지를  $z$ 라고 하면

$$P_m = \frac{1+e_0}{1+\alpha \cdot e_0} \cdot P_0 \quad (3)$$

$$P_d = \frac{1+e_0}{1+n \cdot e_0} \cdot \frac{z}{h} \cdot P_0 = \frac{1+e_0}{1+n \cdot e_0} \cdot \beta \cdot P_0 \quad (4)$$

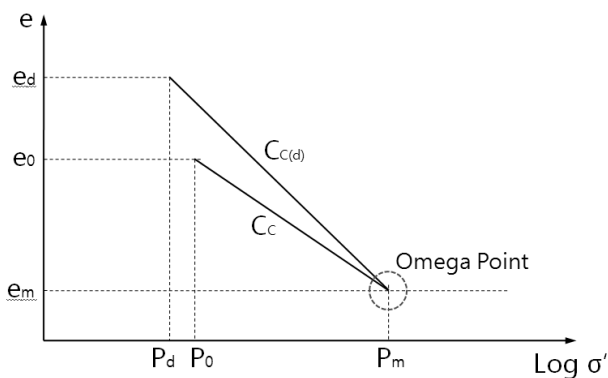


Fig. 1. Concept of compression characteristics of dredged-reclaimed and in-situ ground conditions

압축지수의 정의에 의하면

$$C_c = \frac{e_0 - \alpha \cdot e_m}{\log \frac{P_m}{P_0}} = \frac{(1-\alpha)e_0}{\log \frac{1+e_0}{1+\alpha \cdot e_m}} \quad (5)$$

$$C_{c(d)} = \frac{(n-\alpha)e_0}{\log \frac{1+n \cdot e_0}{\beta(1+\alpha \cdot e_m)}} \quad (6)$$

위 식 (5)와 (6)에서  $n$ 은 준설패립시 팽창에 의해 결정되는 초기값이고,  $\alpha$ 는 압밀에 의해 결정되는 최종값,  $\beta$ 는 패립면적에 의해 결정되는 고정값이므로, 식 (7)로 간단히 표현될 수 있다.

$$C_{c(d)} = F(n, C_c) = F(e_d, C_c) \quad (7)$$

즉, 점토의 시간의존적인 거동을 무시한다면, 준설패립지반의 압축지수는 원지반의 압축지수와 준설패된 지반의 간극비만의 함수로 표현될 수 있다는 것을 알 수 있다.

따라서, 식 (7)을 이용하면 함수비가 너무 높아 압밀시험이 불가능한 시료의 압축지수를 추정하기 위해 실내시험이 가능한 범위까지 함수비를 증가시킨 재성형 시료의 압밀시험 결과로부터 준설패립과 같은 고품수비 지반의 압축지수를 추정할 수 있을 것이다. 하지만, 준설패 전·후 물리, 역학적 특성에 대한 자료와 실시공시 계측결과자료의 부족으로 인해 이론적인 압축지수 산정에 필요한  $n, \alpha$  값의 특성을 정확히 분석하지는 못했다.

이에 본 논문에서는 국내 평택 항만부지에 대해 준설패 대상지반의 물리, 역학적 특성과 제시된 제안식, 통계적인 기법을 통해 침하량을 예측하고, 계측결과 분석을 통해 제안된 방법의 신뢰성 검토하였다. 향후, 함수비와 토질 종류에 따른 다양한 실내시험과 현장 계측결과에 대한 분석이 이루어진다면 좀 더 합리적인 제안식이나 Parameter 결정방법이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 사례분석을 통한 신뢰성 검증

### 4.1 개요

본 논문에서 제시된 이론식에 대한 실용성을 입증하

기 위해 실제 준설매립 및 지반개량이 이루어진 지반에 대한 계측결과를 이용하여 신뢰성을 검증하였다.

평택에 위치한 본 부지는 원지반 점토층 상부에 모래 10,767천m<sup>3</sup>가 매립되었으며, 배수로 호안인근에 잔여수량인 1,160천m<sup>3</sup>은 수로구역 점토를 준설하여 매립하는 것으로 계획되었다.

따라서, 잔여 수량이 매립되는 구역에 대해서만 지반개량을 수행하는 것으로 결정하였으며, 지반개량 검토 후 3개월 뒤에 준설·매립이 완료될 예정인 관계로 항만분야에서 주로 이용하고 있는 체적변화계수를 이용하여 준설 대상지반에 대한 물리적 특성을 예측한 후 본 논문에서 제시하고 있는 방법을 이용하여 압축지수를 추정하였다.

#### 4.2 원지반 점토의 물리·역학적 특성

본 과업지내 잔여수토가능구간에 투기 예정인 내항

동부두 원지반 토질정수는 Table 2와 같다.

#### 4.3 준설점토의 물리·역학적 특성

고함수비 슬러리 상태로 매립된 준설매립지반은 준설 원지반의 부피보다 팽창된 초연약 상태가 된다. 따라서, 본 과업에서는 식 (8)을 이용하여 원지반 간극비  $e_0$ 에 대한 준설매립지반의 간극비  $e$ 를 산정하였으며, 체적변화비 B.F는 1.3을 적용하였다.

$$B.F = \frac{1+e}{1+e_0} \quad (8)$$

일반적으로 압밀특성은 실내 표준압밀시험에 의해 평가하나, 본 과업에서는 아직 매립이 완료되지 않은 상황과 매립 후에도 고함수비로 인해 불교란시료 채취가 불가능하므로 본 논문 '3 경험적 압축지수 추정을 위한

Table 2. Soil parameters in situ conditions at inner wharf (#1~3)

Division		Unit	In-situ Clay	Remark
Physical characteristics	Water content	%	51.5	
	Liquid limit	%	42.0	
	Plastic index	%	19.65	
	Specific gravity	-	2.71	
Consolidation characteristics	Initial void ratio	-	1.40	
	Compression index	-	0.417	
	Coefficient of vertical consolidation	cm <sup>2</sup> /s	3.16×10 <sup>-3</sup>	

Table 3. Physical properties of dredged and reclaimed ground

B.F	Void ratio at in-situ condition	Dredged and reclaimed Ground			
		Void ratio	Specific gravity	Water content	Saturated Unit weight
1.3	1.40	2.12	2.71	78.0 %	1.55 tonf/m <sup>3</sup>

Table 4. Consolidation characteristic of dredged and reclaimed ground

Division	Relationship equation	Initial void ratio	Compression index
Dredged and reclaimed Ground	$C_c = 0.4005e_0 - 0.0622$	2.12	0.78

Table 5. Geotechnical integers for design

Division	Unit	Soil parameter		
		In-situ	Deged & Reclaimed	
Physical characteristics	Water content	%	51.5	78.0
	Specific gravity	-	2.69	2.71
	Saturated Unit weight	tonf/m <sup>3</sup>	1.70	1.55
Consolidation characteristics	Initial void ratio	-	1.43	2.12
	Compression index	-	0.59	0.78
	Coefficient of vertical consolidation	cm <sup>2</sup> /s	2.67×10 <sup>-3</sup>	3.16×10 <sup>-3</sup>

이론식 도출의 식 (7)을 이용하여 준설점토의 압축성을 추정하였다.

준설매립으로 인해 간극비가 증가하면, 투수계수가 증가하므로 압밀계수도 증가한다. 하지만, 본 과업에서는 실 시공시 사업비와 계측을 고려하여 기존 값을 동일 하게 적용하였다.

#### 4.4 예측침하량과 실 계측결과에 대한 비교결과

압축지수 추정방법에 따라 검토된 준설매립지반의 압밀특성과 원지반 점토의 응력상태를 고려하여 재하 성토시 압밀 침하량을 산정하였으며, 현장에서 실측된 계측결과와 비교하였다.

본 연구에서 제시된 방법을 이용한 예측결과와 현장에서 실측된 계측결과를 비교한 결과, Table 6과 같이 두 값이 매우 좋은 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다. 따라서, 금회 연구를 통해 새로 제시된 방법을 이용하여 압축지수를 합리적으로 추정할 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구는 준설매립 후 침강 및 자중압밀이 완료된 초연약 준설매립 점토지반의 압밀침하량을 예측하기 위한 것으로, 불교란 시료채취가 불가능한 준설매립점 토 지반의 압축지수를 추정하는 방법을 제시하였다. 또한, 준설매립을 통해 조성된 지반에 대한 계측자료를 활용하여 제시된 방법의 신뢰성을 검증하였다. 본 논문을 통해 연구된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Terzaghi의 1차원 압밀이론에서 Solid particle의 움직임을 무시하고, 고정된 Volume에 대한 요소에서 Strain을 결정하는 모순을 가지고 있으나, 이는 신중한 공식화와 parameter 결정을 통해 해결할 수 있다.
- (2) 원지반 점토와 준설매립점토가 만나는 점을 Omega Point라고 가정하면 두 지반의 압축지수는  $C_{c(d)} = F(e_w, C_c)$ 의 관계를 가지므로, 간극비에 따른 원지반 점토의 압축지수와 준설매립지반의 간극비 만으로도 압축지수를 추정할 수 있다.

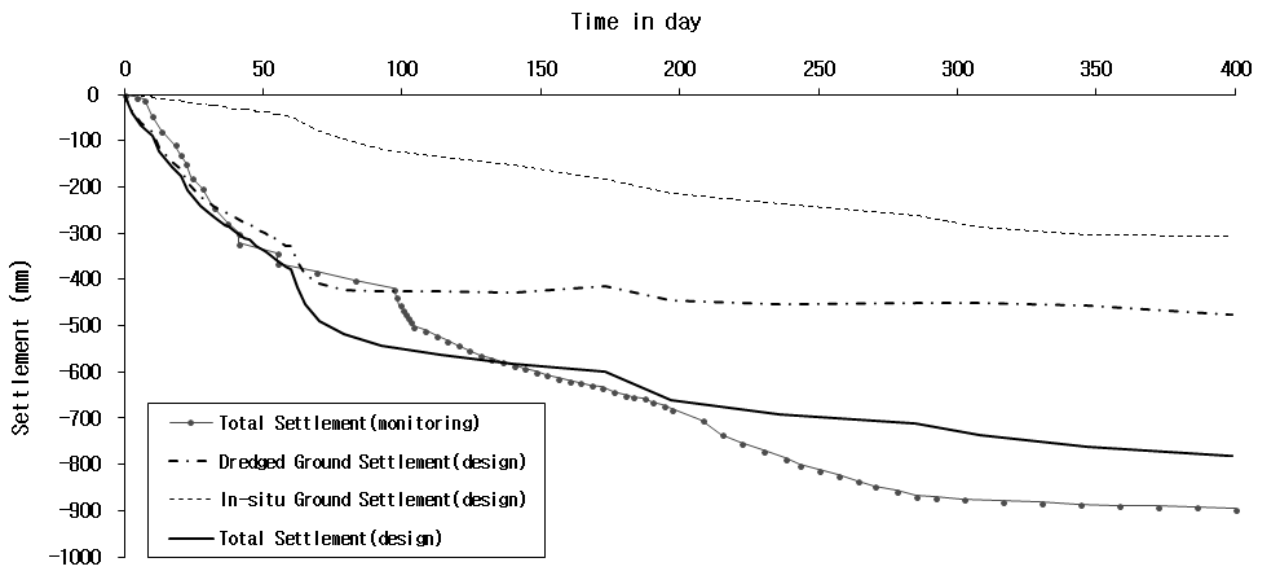


Fig. 2. Reviewed results of settlement at S-5, ST-11 area

Table 6. Reviewed results of consolidation settlement

Area	Embankment (m)	Thickness of clay (m)		Settlement (cm)		Remark
		Dredged	In-situ	Design value	Monitoring value	
S-3	2.5	1.5	10.0	124.6	130.0	No vertical drain
S-4	3.4	1.5	8.0	123.6	110.0	
S-5	1.6	1.9	4.7	84.1	90.0	
S-6	2.3	1.0	6.8	77.8	70.0	

(3) 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 평택 현장에 대한 압축지수 추정하여 예측된 침하량과 계측된 실측결과와 비교한 결과, 예측값 59~125cm와 유사한 50~130cm로 나타나는 점을 고려할 때, 제안된 압축지수 예측방법은 신뢰성이 있다고 판단된다.

향후 다양한 준설매립지반에 대한 조사와 계측자료 분석이 이루어진다면 시공조건별 점토 종류별 압축지수 예측에 관한 인공신경망 연구나 본 논문에서 제시한 parameter의 특성을 분석하는 연구가 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 해양수산부 산하 한국해양과학기술진흥원의 첨단항만건설기술개발사업 연구비 지원(과제명 : 해상풍력 지지구조 설계기준 및 콘크리트 지지구조물 기술 개발/20120093)을 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌 (References)

1. Jeon, J.S. and Koo, J.K. (2011), "Assessment on Consolidation Material Function and Initial Stress for Soft Ground by Hydraulic Fill the at Southern Coast of Korea", *Korea Institute for Structural maintenance and inspection*, Vol.15(4), pp.136-144.
2. Lee, S., Jeon, J.S., and Yi, C.T. (2004), "Characteristics of Material Function Related to Permeability and Compressibility for Soft Clay Ground", *Korea Institute for Structural maintenance and inspection* Vol.8(1), pp.183-194.
3. Lee, Kuantsai (1979), "An Analytical and Experimental Study of Large Strain Soil Consolidation", *Paper for the degree of doctor of philosophy on the University of Oxford*.
4. Mikasa, M. (1965), "The Consolidation of Soft Clay, A New Consolidation Theory and Its Application", *Japanese Society of Civil Engineering(Reprint from Civil Engineers in Japa)*, pp.21-26.
5. Gibson, R.E., England, G.L., and Hussey, M.J.L. (1967), "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clay 1. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous layers", *Geotechnique*, Vol.17, pp.261-273.
6. Carrier, W.D. and Beckman, J.F. (1984), "Correlation between test and the properties of remolded clays", *Geotechnique*, 34(2): 211-228.
7. Timothy D. Stark, Hangseok Choi, and Paul R. Schroeder (2005), "Settlement of Dredged and Contaminated Material Placement Areas. II", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering @Asce*, pp.52-61.

Received : July 15<sup>th</sup>, 2014

Revised : November 13<sup>th</sup>, 2014

Accepted : April 8<sup>th</sup>, 2015