

강재기둥과 PHC 파일을 연결하는 반구형 접합부(HAT Joint)의 유한요소 해석 PART I : 원형강관기둥

Analytical Study of HAT Joint between PHC Pile and Steel Pipe Column

오진탁*
Oh, Jin-Tak

이연승**
Lee, Yeun-Seung

김상봉***
Kim, Sang-Bong

주영규****
Ju, Young-Kyu

Abstract

To overcome disadvantages of usual spread foundation in large space structure, some prototypes of a joint of the PHC pile to steel pipe column that directly connects a column to a PHC pile are analytically studied. With the consideration of strength requirement and stress concentration of joint of the PHC pile to column, we suggest the most appropriate one.

Keywords : Spread foundation, Large space structure, PHC Pile, Steel pipe column

1. 서론

대공간 구조물의 기초는 직접기초를 사용하는 경우가 많다. 직접기초는 단단한 암반위에 설치되지 않고 땅위에 설치되는 기초형식으로 연약지반에 설치될 경우 부동침하의 발생이 우려된다. 부동침하의 발생은 예상하지 못한 하중을 야기 시키고 이러한 하중 때문에 결국 건물은 붕괴 된다. 따라서 부동침하로 인한 추가 하중 발생을 막기 위해 기초 크기와 타설량이 증가하게 되고 공기 및 공사비용이 증가한다.

보다 더 효율적인 기초시공을 위해 부동침하의

발생을 억제하고 콘크리트 타설량을 감소시킬 수 있도록 직접기초를 대신하여 대구경 PHC 파일을 이용한 말뚝기초를 이용하는 방안에 대해 연구를 진행하였고, 본 논문에서는 PHC 파일과 원형 기둥이 접합되어야 하는 경우에 대한 새로운 시스템을 제안하고 이를 유한요소해석 프로그램을 통해 검증하였다.

2. 말뚝 기초의 연구동향

독립기초를 대체하기 위해 가장 먼저 검토되었던 말뚝은 현장타설 콘크리트 말뚝이다. 현장타설 콘크리트 말뚝은 울케이싱 공법, 어스드릴 공법, R.C.D 공법이 주로 사용된다.

이와 같은 현장타설 말뚝들은 기둥의 수직, 수평도를 맞추기 간편하며 기둥의 위치 등을 변경하는데 용이해서 일반적인 시공현장에서 많이 사용되고 있다. 하지만 시공 장비의 대형화와 시공시 사용하는 안정액으로 인한 환경오염의 발생, 현장에서 콘크리트를 타설하기 때문에 발생하는 균일한 품질관리의 어려움, 그리고 별도의 양생기간이 필요하여 공사기간이 길어지는 단점을 갖고 있다.

이러한 현장타설 말뚝이 갖는 단점을 극복하고자

* 주저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과, 공학박사
School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Ph.D
** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과, 공학석사
School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Master
*** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과, 석사과정
School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Master course
**** 교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과, 교수
School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Prof.
Tel: 02-3290-3743 Fax: 02-921-2439
E-mail: tallsite@korea.ac.kr

기성 말뚝의 사용이 검토 되었다.

기성 말뚝은 Precaste Concrete Pile과 PHC (Pretesioned spun High strength Concrete) Pile 등이 있다.

PHC 파일은 1992년에 일본에서 기술을 도입되어 생산이 시작된 기술로서 2000년대에 이르러서는 국내 콘크리트 파일 생산량의 90% 이상을 차지하고 있다. 그러므로 두 가지 기성 콘크리트 말뚝 중 더 많이 이용되는 PHC 말뚝으로 현장타설 말뚝을 대체하고자 한다.

PHC 파일은 공장에서 철근을 거푸집에 삽입 후 콘크리트 주입 파일에 인장을 가하여 프리스트레스를 준 뒤, 원심성형공정을 거쳐 고온고압양생(오토클레이밍)을 하여 제품을 제작하므로 품질 관리 면에서 현장타설 말뚝에 비해 우위에 있다고 할 수 있다. 또한, 현장타설 말뚝에 비해 휨 모멘트에 대한 저항력이 크고 높은 지지력을 가져서 상부 하중을 지하 암반에 100% 전달 할 수 있기 때문에 말뚝 사용 수량을 감소시킬 수 있다.

일반적인 공사현장에서는 직경 500~600mm의 PHC 파일이 가장 많이 사용되어 왔지만 직경 500~600mm의 PHC 파일은 대공간구조물의 기초로 활용되기에 너무 작고 대형화 되어가는 현재 파일 시장의 추세를 고려하여 직경 1000mm의 대구경 PHC 파일을 활용하여 대공간 구조물의 기초로써 활용할 수 있는 방법을 검토하였다.

3. 접합부(HAT Joint) 시스템 제안

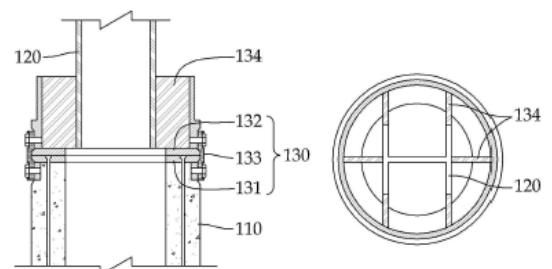
3.1 하중전달 메카니즘

PHC 파일을 대공간 구조물에 활용하기 위해서는 PHC 파일과 기둥과의 접합부에 대한 검토가 충분히 이루어져야 한다. 이러한 접합부에 대한 연구는 '복합파일을 이용한 지하골조구조물 시공방법(출원번호: 10-2010-0066954)', '기계식 이음 복합말뚝의 자동 분석 방법 및 이에 의해 제작된 기계식 이음 복합말뚝 (출원번호 10-2010-0068233)' 등이 있다.

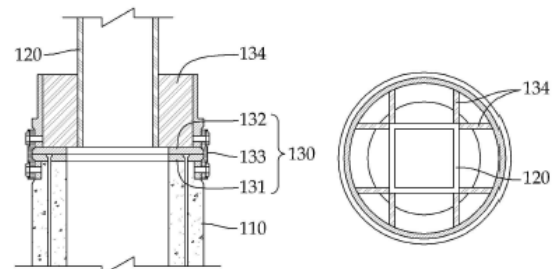
<Fig. 1>에서 기존의 PHC 파일과 강재기둥을 연결하는 접합 상세에 관한 것을 나타내었다. 그러

나 이러한 접합 방식은 PHC 파일 중공부에서 발생하는 휨을 제어하기 어려워 필요이상으로 베이스 플레이트가 과다해지며, 과다한 리브플레이트(Rib-plate)의 활용으로 시공성과 경제성이 낮다 <Fig. 2>.

PHC 파일을 활용하여 대공간구조물의 기초로 활용하기 위해서 PHC 파일 중공부에 발생하는 휨을 효과적으로 제어할 수 있는 반구형 접합부 시스템을 제안하였다.

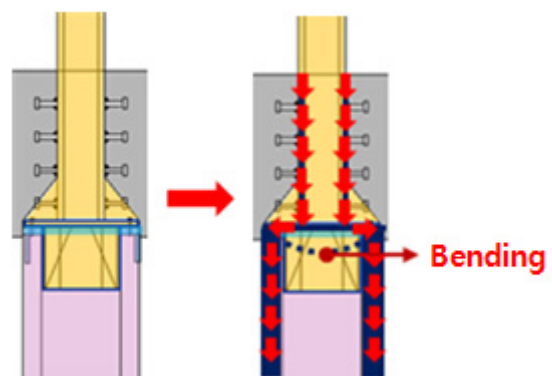


(a) Detail of existing Joint between PHC Pile and H-Column



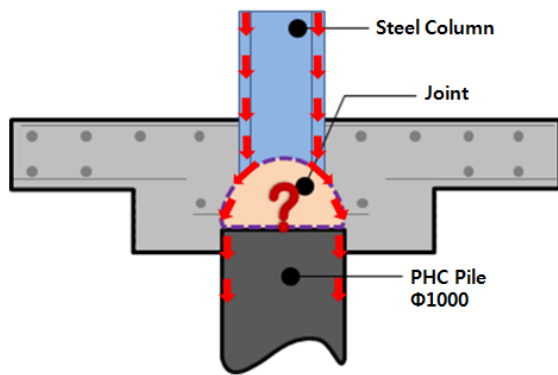
(b) Detail of existing joint between PHC pile and tube-column

<Fig. 1> Detail of existing joint between PHC Pile and steel column



<Fig. 2> Moment stress at opening in PHC pile

<Fig. 3>에 나타낸 것과 같이 PHC 파일과 강재 기둥을 연결하는 부분을 반구형으로 활용함으로써 기존의 축력-휨-축력으로 전달되는 기둥에서 말뚝까지의 하중 전달 메카니즘을, 축력-축력-축력으로 전환시켜 하중 전달 과정에서의 손실을 최소화하고 경제적인 물량의 사용을 가능하게 하였다. 또한 PHC 파일 설치 이후 기초 타설 없이 기둥을 설치할 수 있으므로 PHC 파일설치, 접합부 설치, 기둥설치로 이어지는 간편한 시공이 가능하게 되었고 상부의 골조공사를 지하 공사와 동시에 진행할 수 있게 되어 공기 단축에 있어서도 탁월할 것으로 판단된다.



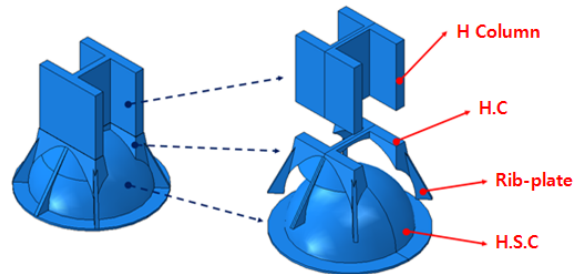
<Fig. 3> Half-sphere joint between PHC pile and steel column

3.2 HAT Joint 세부 형상

기존에 연구가 진행된 PHC 파일과 H형 강재 기둥간의 접합부 초기 형상은 <Fig. 4>에 나타내었다. 이 반구형 접합부를 HAT(Hollow hAlf-sphere sTeel) Joint라 칭한다.

HAT Joint는 기본적으로 H.S.C(Half Sphere Connector), Rib-plate, H.C(H-column Connector)로 이루어져 있다. H.S.C는 PHC 파일과 볼트로 연결할 수 있도록 하여 현장의 시공성을 향상시키고자 하였고, 상부의 하중을 축력만으로 PHC 파일에 전달하는 역할을 한다. Rib-plate는 상부의 하중을 효과적으로 H.S.C로 전달하는 역할을 하며 Rib-plate는 상부철골 기둥에서 H.C를 거쳐 H.S.C로 전달되는 하중이 집중되지 않도록 막아준다.

이와 같이 다소 복잡할 수 있는 접합부의 형상을 효과적으로 구현하기 위해 주강으로 제작하였으며 사용강재는 SCW550으로 하였다.



<Fig. 4> Basic shape of HAT Joint

H형강에 대응하여 개발된 HAT Joint를 기본으로 다양한 형태의 강재 기둥마다 선택하여 쓸 수 있는 접합부 개발의 단계로 원형강관기둥과 각형강관기둥에 대한 추가 연구를 진행하였다. PART I에서는 원형강관기둥과 PHC 파일을 연결하는 접합부 HAT Joint P-Type(Pipe)을 논하였으며, PART II에서 각형 강관기둥에 대한 T-Type(Tube)을 서술하도록 하겠다. P-Type의 Prototype을 제안하기 위해 유한요소 프로그램을 이용해 변수해석을 진행하였다.

4. 유한요소 해석

4.1 유한요소 해석 개요

유한요소 해석프로그램은 ABAQUS / CAE V6.10을 사용 하였으며 실제 제작될 접합부와 비교하여 1:1스케일(Scale)로 모델링함으로써 실제 접합부의 거동을 최대한 유사하게 확인하고자 하였다.

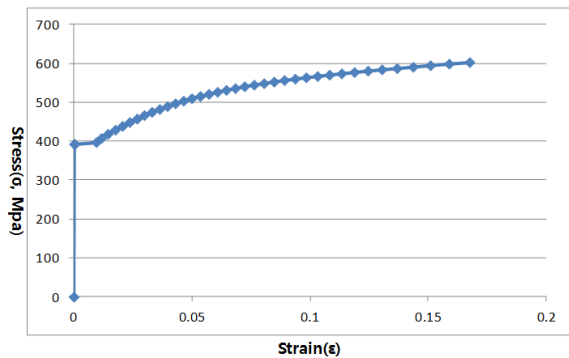
해석은 각각의 모델마다 하중제어 방식과 변위제어 방식으로 두 번에 걸쳐 진행되었다. 하중제어 방식은 접합부가 견뎌야 하는 최대 하중이 작용하였을 때 접합부에서 최대응력이 발생하는 지점을 찾고 최대 변형을 확인하기 위함이고, 변위제어 방식을 통해서도 변위 별 접합부의 응력 및 하중 변화를 확인할 수 있도록 하였다.

유한요소 해석에 사용한 재료 물성치는 실제

SCW550의 재료 실험 결과를 사용하였고 소성영역에서의 물성치 입력을 위해 [식 1]과 [식 2]를 이용하여 진변형률(True Strain)과 진응력(True Stress)로 변환하여 사용하였다.

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \quad [\text{식 1}]$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad [\text{식 2}]$$



〈Fig. 5〉 Material property of SCW550

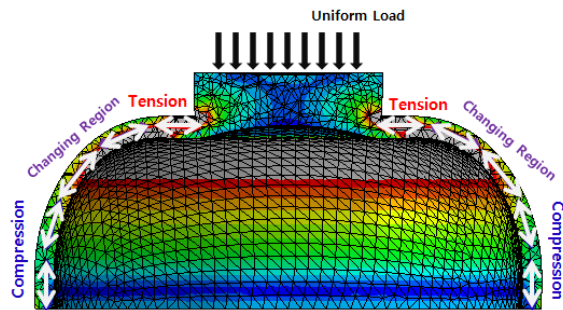
PHC 파이프와 기둥을 연결하는 접합부에서의 파괴를 방지하기 위해서 접합부의 내력은 본 논문에서 타겟으로 지정한 직경 1000mm PHC 파이프의 허용 압축강도인 967ton보다 더 커야 하며, 강재 설계시에 극한값으로 설계하기 위해서 967ton의 1.5배인 약 1500ton을 견딜 수 있어야 한다.

실제 접합부가 제작되고 구조물로서 사용될 경우의 안전율을 고려하고 강재 사용량의 효율을 위해서 일반적인 SCW550 제품에 사용된 25개의 재료실험을 통해 평균 항복강도(390MPa)를 결정하였다 <Fig. 5>. 설계 항복강도가 아닌 평균 항복강도를 기준으로 해석을 진행하므로 내력 목표 역시 상향되어야 한다. 따라서 SCW550의 항복강도가 355MPa일 때 압축내력은 1500ton, 항복강도가 390MPa일 때 압축내력은 1875ton이 되어야 할 것이다. 이러한 기준을 만족시키기 위해서 유한요소 해석을 통해 접합부가 압축응력은 390MPa 이하, 압축내력은 1875ton 이상을 가지도록 변수 스테디를 진행하여 최적의 Prototype을 제안하였다.

4.2 변수 설정

4.2.1 내부 Ring 보강위치

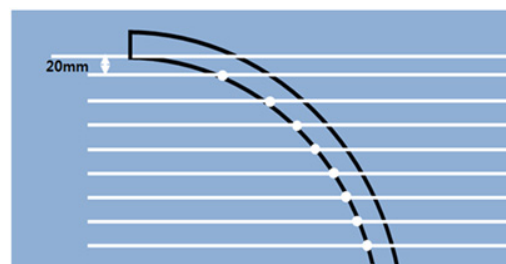
<Fig. 6>에 나타난 바와 같이 H.S.C와 같은 반구에 하중이 작용하였을 경우 아치 액션(Arch Action)에 의해 압축과 인장이 교차하는 지점이 발생하게 된다. 이렇게 압축과 인장이 교차하는 부분에 응력이 집중 될 것으로 판단되며 이를 효과적으로 제어하기 위해서 내부에 하중이 집중되는 부분을 정확히 파악하고 접합부 내부의 이 위치에 Ring을 추가하는 보강을 함으로써 최소의 물량 증가로 집중되는 응력을 해소할 수 있도록 한다.



〈Fig. 6〉 Arch-action of Half-sphere joint

H.S.C 내부 Ring 보강 위치를 찾기 위한 변수를 <Fig. 7>에 나타내었다. H.S.C 내부 반지름 370mm에서 상부의 20mm와 하부의 48mm를 제외한 나머지 구간을 총 9등분하여 10개의 Ring 위치를 변수로 하였다. 상부의 20mm와 하부의 48mm를 제외한 이유는 Ring의 단면이 완전한 형상을 유지할 수 있도록 하기 위함이다.

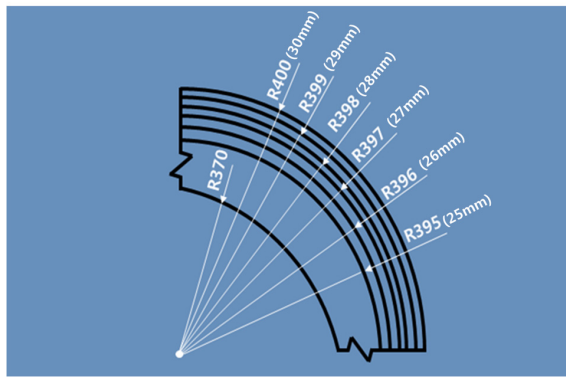
순수한 Ring 보강의 효과를 확인하기 위해 H.S.C의 기본 두께를 30mm, Rib-plate를 생략한 모델로 해석을 진행하였다. 최적의 Ring 보강 위치를 알기 위해 각각의 Ring 위치별로 응력분포와 최대내력을 검토하여 그래프를 통하여 최적의 Ring 위치를 판별하였다.



〈Fig. 7〉 Variables of Inner Ring

4.2.2 최적 H.S.C 두께

최적 H.S.C 단면 두께 판별은 상부의 하중을 저항하는데 최적의 물량을 확인하기 위함이다. H.S.C 단면의 두께는 내부의 지름은 370mm로 고정되어 있으며, 외부의 지름을 395mm~400mm(두께 25mm~30mm)까지 변화시켜가며 모델을 해석하였으며 4.2.1에서 판별된 최적의 Ring 위치를 기본으로 하여 해석을 진행하였다. Rib-plate의 개수에 따라 최적의 두께를 선정해야 하므로 Rib-plate 개수별 두께를 1mm씩 변화시킨 6개의 변수를 적용하였다. H.S.C 단면의 두께 변수는 <Fig. 8>에 나타내었다.

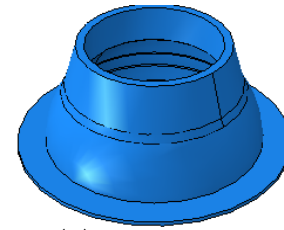


<Fig. 8> Variables thickness of H.S.C

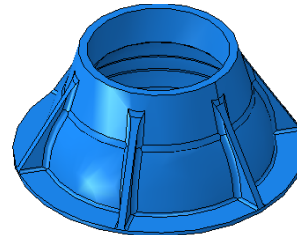
4.2.3 최적 Rib-plate 개수

최적 Rib-plate 개수 판별은 상부의 하중을 최소의 물량으로 효과적으로 H.S.C에 전달할 수 있는 최적의 개수를 파악하기 위함이다.

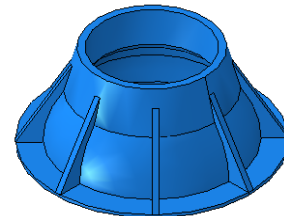
<Fig. 9 (a), (b), (c)>의 Rib-plate의 개수에 따른 변수는 Rib-plate 0개, 6개, 8개가 있으며 4.2.1에서 판별된 최적의 내부 Ring 보강위치를 기본으로 갖는다. 또한 Rib-plate 개수별로 H.S.C 단면의 두께는 25mm~30mm로 변화시켜 가며 18개의 모델을 해석하였다. 이때 최대 응력과 최대 내력을 검토하여 최종 HAT Joint P-Type의 Prototype을 선정할 수 있다.



(a) 0 Rib-plate



(b) 6 Rib-plate



(c) 8 Rib-plates

<Fig. 9> Variables of Rib-plate

HAT Joint P-Type Prototype 선정을 위한 변수를 <Table 1>에 정리하였다.

<Table 1> Summary of P-Type variables

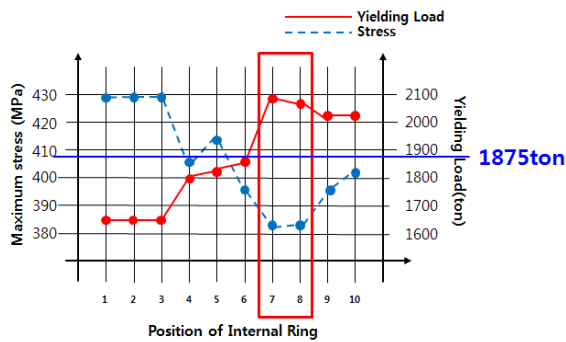
TH(mm)	Inner Ring for reinforcement			Model
30	#1~#10			10
TH(mm)	Rib-plate			Model
25	0	6	8	18
26	0	6	8	
27	0	6	8	
28	0	6	8	
29	0	6	8	
30	0	6	8	

4.3 변수별 해석결과

4.3.1 최적 내부 Ring 보강 위치 판별

<Fig. 10>에 나타낸 HAT Joint P-Type의 최적 Ring 위치에 대한 결과는 H.S.C 두께 30mm, Rib-plate 0개를 기본으로 하여 해석하였다.

해석 결과 Ring 7번, 8번 위치에서 응력은 383MPa로 최소이며 내력은 2090ton으로 최대임을 알 수 있었다. 이 값은 기준치인 390MPa이하, 1875ton을 두 모델 모두 만족한다. 그러나 7번이 8번 위치에 비해 반구형의 상부에 위치하므로 Ring이 설치되는 총 길이가 줄어들게 되어 강재 사용량에 있어서 8번에 비해 보다 더 효율적임을 확인할 수 있었다. 최적의 H.S.C 내부 Ring 보강 위치는 7번 위치, 즉 높이 108mm부분이 적절하다.



〈Fig. 10〉 Analytic result of optimized reinforcement position of inner ring

4.3.2 H.S.C 최적 두께 및 Rib-plate 개수 판별

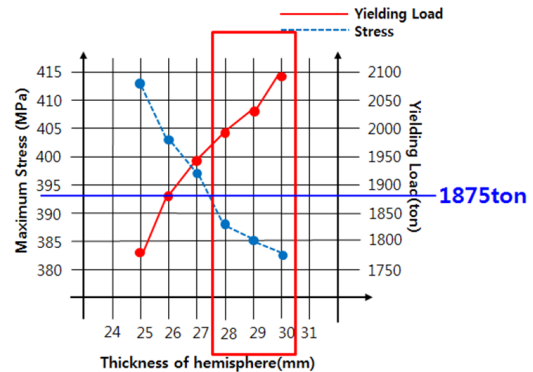
내부 Ring 위치는 7번을 기본으로, Rib-plate 개수를 0, 6, 8개로 변화시키고 각각의 경우 두께를 25mm~30mm까지 늘려감에 따라 변화하는 응력과 최대 내력에 대하여 해석을 진행하였다.

Rib-plate 개수를 0개로 하였을 때 해석 결과는 <Fig. 11>에 나타내었다. 두께가 가장 얇은 25mm인 모델과 가장 두꺼운 30mm 모델의 최대응력은 412MPa에서 383MPa까지 감소하고 최대 내력은 1770ton에서 2090ton까지 증가함을 확인할 수 있었다. 해석결과 최대응력이 390MPa 이하 이며 최대 내력 1875ton 이상인 모델은 두께 28mm~30mm의 모델임을 확인할 수 있었다.

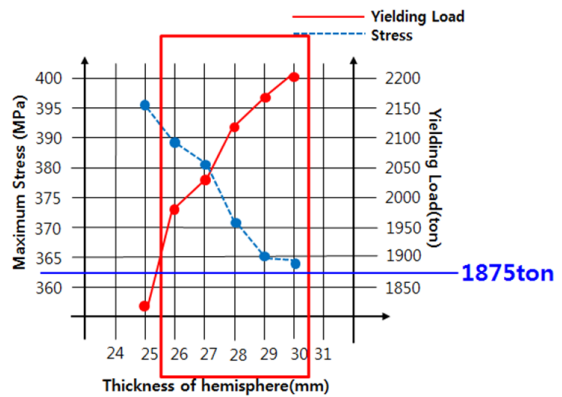
Rib-plate 개수를 6개로 하였을 때 해석결과는 <Fig. 12>에 나타내었다. Rib-plate가 0개 일 때와 마찬가지로 두께가 증가함에 따라 응력은 감소하고 내력은 증가함을 확인할 수 있었다. Rib-plate가 6개일 때는 H.S.C 두께 26~30mm인 모델의 경우 기준치(응력 390MPa 이하, 하중 1875ton 이상)를

모두 만족하였다.

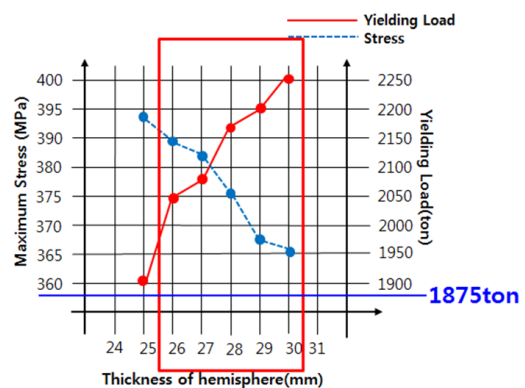
Rib-plate 개수를 8개로 하였을 때 해석 결과는 <Fig. 13>에 나타내었다. 해석 결과 Rib-plate가 6개일 때의 경우와 큰 차이가 없었으며 두께 26~30mm 모델에서 기준치를 만족함을 확인할 수 있었다.



〈Fig. 11〉 Analytic result of Ring #7 (no Rib-plate)



〈Fig. 12〉 Analytic result of Ring #7 (6 Rib-plates)



〈Fig. 13〉 Analytic result of Ring #7 (8 Rib-plates)

최적 두께 및 Rib-plate의 개수 판별에 대한 해석 결과를 토대로 기준치를 만족시키는 모델은 Rib-plate의 개수에 따라 다양하게 존재했다. 따라서 최적의 Prototype을 도출하기 위해서 기준치를 만족하는 모델들의 중량에 대해서 검토하였고 그 결과를 <Table 2>에 나타내었다.

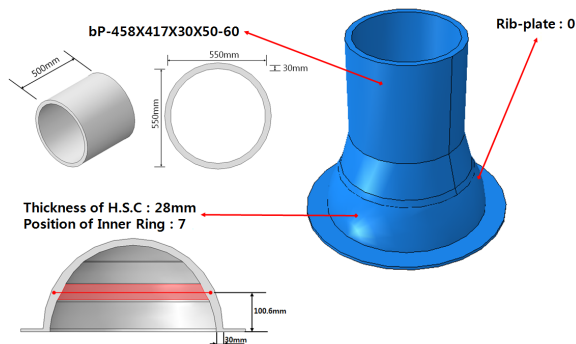
목표한 값을 만족하는 모델 중 가장 최적의 Prototype은 HAT-P_Ring7_TH28_R0, 즉 아래에서 7번 위치(148.5mm)에 보강 Ring을 설치하고 두께 28mm, Rib-plate는 없을 때 가장 최적의 형상임을 확인 할 수 있었다<Fig. 14>.

<Table 2> Comparison of weight for each model

Model Name	Weight
HAT-P_Ring7_TH28_R0	323kg
HAT-P_Ring7_TH29_R0	331kg
HAT-P_Ring7_TH30_R0	340kg
HAT-P_Ring8_TH30_R0	348kg
HAT-P_Ring7_TH26_R6	343kg
HAT-P_Ring7_TH27_R6	350kg
HAT-P_Ring7_TH28_R6	358kg
HAT-P_Ring7_TH29_R6	366kg
HAT-P_Ring7_TH30_R6	374kg
HAT-P_Ring7_TH26_R8	364kg
HAT-P_Ring7_TH27_R8	371kg
HAT-P_Ring7_TH28_R8	379kg
HAT-P_Ring7_TH29_R8	387kg
HAT-P_Ring7_TH30_R8	395kg

※ Index of specimens

HAT-P : Hat Joint for steel pipe column
 Ring7 : Inner Ring #7 for reinforcement
 TH : Thickness
 R : Number of Rib-plate



<Fig. 14> Optimized prototype of HAT Joint P-Type

5. 결론

본 연구에서는 PHC 파일과 강재 기둥과의 접합부에 대하여 Prototype을 제안하고, 유한요소 해석을 통해 접합부의 거동과 내력을 확인하여 제안된 Prototype의 최적화 형상과 그 타당성을 검증하였으며 내용을 정리하면 다음과 같다.

1) 기존 대공간 구조물에서 사용되는 직접기초를 기성 말뚝인 PHC 파일을 활용하여 말뚝 기초로 대체하기 위해 HAT Joint 시스템을 제안하였다.

2) 반구형의 HAT Joint는 PHC 파일 중공부에서의 휨 거동을 제어하여 기둥에서 전달되는 축력을 손실 없이 파일로 전달할 수 있으므로 기존의 PHC 파일과 강재기둥 접합부에 비해 효율적으로 PHC 파일을 활용할 수 있게 되었다.

3) PHC 파일과 원형 강관기둥을 연결하는 HAT Joint P-Type은 28개의 변수를 적용한 유한요소 해석 결과, 목표를 만족하는 총 14개의 모델 중 가장 경제적인 도출된 HAT-P_Ring7_TH28_R0 모델을 Prototype으로 선정하였다. 이 모델은 두께 28mm, 내부 Ring 7번 위치, Rib-plate 0개를 갖는 모델이다<Fig. 14>.

감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원의 건설교통 기술축진 연구사업(14CTAP-C066889-02-000000)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

1. AIK, Korean Building Code 2009 - Steel, KBC 2009
2. Korean Industrial Standards, KS D 3515 : Rolled Steels For Welded Structure, KS, Seoul(2008)

3. Korean Industrial Standards, KS D 4106 : Steel casting for welded structure (2008)
4. Ickhyun Kim, Donguk Choi, Sungchul Chun, Deukwon Lee, Moonhee Yang(2004) Comparison of test results of anchors with design strength, Korea concrete institute journal of expert committee(2004) pp71-95
5. Yeunseung Lee, Jintak Oh, Youngsik Kim, Young-K Ju(2014) Hemisphere-Shaped Iron Joint between PHC Pile and Steel Reinforced Concrete Column. Part I: Analysis Applied Mechanics and Materials Vol. 470 (2014) pp 958-961
6. Yeunseung Lee, Jintak Oh, Young-K Ju(2014) Hemisphere-Shaped Iron Joint between PHC Pile and Steel Reinforced Concrete Column. Part II: Experiment Applied Mechanics and Materials Vol. 470 (2014) pp 950-953
7. Hyunggeun Kim, Soogeun Chai(2011) A case on design and construction of large-diameter PHC Pile, Architectural Institute of Korea, n12(2011) pp119-124
8. Sangbong Kim, Jintak Oh, Youngsik Kim, Sunghun Jang, Youngkyu Ju(2014) Cast Steel Joint between PHC Pile and Column, Korean Association for Spatial Structures, Vol.14 n4(2014) pp8-13

- Received : February 02, 2015
- Revised : February 25, 2015
- Accepted : March 09, 2015