원전 구조물용 대구경 철근의 기계적 정착을 위한 정착판 설계

Anchor plate design for mechanical anchorage of large diameter reinforcement in nuclear containment buildings

이성호*	천성철**	오보환***	박형철***	나환선****	김상구*****
Lee, Sung Ho	Chun, Sung Chul	Oh, Bo Hwan	Park, Hyung Chul	Nah, Hwan Seon	Kim, Sang Koo

ABSTRACT

The re-bar work in the construction of nuclear power plants is difficult, due to the large diameter and the congestion of reinforcements. The mechanical anchorage offers a potential solution for this problem. However, the requirements or the standards for the shape of anchor plate of mechanical anchor has not been clearly established up to now. In this paper, the required performance of the mechanical anchorage for large diameter reinforcements in nuclear power plants are proposed, and the anchor plates are designed through nonlinear finite element analysis. The diameters of anchor plate are determined to be $\sqrt{5}$ times of reinforcement diameter for longitudinal reinforcements and $\sqrt{10}$ for shear reinforcements. The thickness of anchor plates is optimized as 0.3~0.35 times of reinforcement diameter for longitudinal reinforcements and 0.5~0.56 times for shear reinforcements.

1. 서론

철근 정착은 철근콘크리트 구조물에서 설계내력을 발현 할 수 있도록 하는 중요한 부분으로서 최근에는 철근단부에 정착판을 부착한 기계적 정착 공법에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 기계적 정착 공법을 통하여 갈고리를 제거하여 과밀배근을 해소 할 수 있고, 배근작업을 간소화할 수 있다. 또한 PC공법이나 철근선조립공법 (Pre-Fabrication)에서 접합부 배근을 합리적으로 해결할 수 있다. 특히 원전 구조물에서와 같이 대구경 철근이 사용되는 경우에는 갈고리 제작 작업을 생략하게 되고 이를 통하여 과밀배근 부근의 콘크리트 충진성을 확보할 수 있어 그 필요성이 크다고 볼 수 있다.

기계적 정착의 적용을 위해서는 우선 정착부에 대한 요구성능이 규정되어야 하며, 이에 따라 정착판의

*정회원, 대우건설기술연구소 연구원, **정회원, 대우건설기술연구소 선임연구원
***정회원, 대우건설기술연구소 책임연구원, ****정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
*****정회원, 부원비엠에스 기술이사

형상이 결정된다. 또한 적용부위에 따른 정착깊이에 대한 설계규정이 필요하다. 각 규준에서는 기계적 정착을 허용하고 있으나 설계방법 및 구조상세에 대해서는 규정하고 있지 않다. 일부 제품은 실험을 통하여 자체 정착 깊이 및 구조상세에 대한 정착 설계 기준을 제시하고 있으나[1),2),3)], 그 설계 기준을 밝히지 않고 있다. 정착판의 형상은 시공성과 경제성에 큰 영향을 끼치게 되는데, 안전측으로 정착판을 너무 크게 할 경우 제작단가의 상승 뿐 아니라 시공성을 크게 저하시켜 기계적 정착의 장점을 상실할 우려가 있다. 또한 철근의 용도에 따라 정착부의 기능이 상이하므로, 정착판의 형상은 그 용도에 맞는 요구성능을 정립하여 결정되어야 한다. 원전구조물에는 대구경철근이 사용되고, 2단에서 5단까지 철근량이 많아, 철근가공과 조립 및 콘크리트 타설이 일반구조물에 비해 어렵다. 본 연구에서는 기계적 정착의 필요성이 큰 원전구조물에 사용되는 대구경 철근을 중심으로 적용 용도별 요구성능을 정립하고, 비선형 유한요소 해석을 통하여 그 요구성능에 적합한 정착판의 설계를 수행하고자 한다.

2. 적용가능 부위의 설정

원자력 발전소의 철근콘크리트 구조물에는 주로 #11 (D35), 14 (D43), 18 (D57) 철근이 주근용으로 사용되며, #5 (D16), 6 (D19), 7 (D22) 철근이 전단보강근용으로 사용되어진다. 기계적 정착 공법은 주근에 대해서는 철근이 과밀 배근되는 슬래브, 기초판 또는 벽체간의 접합부에 사용가능하다. 전단보강근용으로는 슬래브, 기초판등의 휨부재와 벽체, 기둥 등의 압축부재의 전단보강근으로 적용가능하며, 압축주근 좌굴방지, 압축콘크리트 구속 및 휨부재의 주근 위치 고정등의 역할을 한다. 이 외에도 개구부 주변과 강재 플레이트의 접합부에도 적용성이 있다.

3. 정착부의 요구성능

3.1 주근

일반적인 철근 정착부에 요구되는 성능은 위험단면 (critical section)에서 내력을 확보하는 것과 콘크리트와의 일체성 확보를 위한 과도한 slip의 억제를 들 수 있다. 정착부에 slip이 발생되면 기둥면에서 보 주근의 강체이동 (rigid body motion)을 유발하여 반복하중에 대한 에너지 소산능력을 저하시킨다. 또한 정착부 콘크리트에 손상을 입혀 접합부 전단내력을 저하시킬 수 있다.

표 1은 정착부의 요구성능을 정리한 것이다. 정착판의 직경은 시공성 확보를 위해 철근직경의 $\sqrt{5}$배로 하여 지압면적비를 4로 설정하였다[4)]. 내력 측면에서는 철근의 초과강도를 고려하여 설계 항복강도의 125%까지 지지할 수 있는 정착내력을 가져야 한다. 변형 측면에서는 정착부의 slip을 최소화하여 전체구조물의 안정성을 확보하여야 한다. 최대 허용변형량에 대해서는 명확한 규정이 없으나 기계적 이음부의 허용 slip량과 일반적인 철근콘크리트 구조물의 허용 구조균열폭을 고려하여, 철근의 설계강도 발현시까지의 정착판 최대변형을 0.3mm로 제한하였다.

3.2 전단보강근

전단보강근은 부재의 전단내력 향상, 압축콘크리트의 횡구속과 압축철근의 좌굴방지의 기능을 한다. 주근과 달리 정착길이 없이 모든 정착내력을 정착부에서 확보해야 한다[5)]. 따라서 지압면적비 (정착면적/철근단면적)를 9로 하여 순수한 정착판의 지압력으로 철근설계강도의 125%를 발현하도록 하였다. 또한 갈고리 정착의 slip량에 대한 기존 연구결과를 고려하여[3)], 철근 설계항복 강도에서 최대 변형을 0.2mm로 제한하였다.

표 1 . 정착부의 요구성능

철근용도		주근	전단보강근
역할	구조	- 정착내력의 발현 - 접합부 콘크리트 구속	- 정착내력 발현 - 압축 주근의 좌굴방지 - 압축콘크리트 구속
	시공	전단보강근 위치 고정	주근 위치 고정
요구성능	내력	철근 항복강도의 125%	철근 항복강도의 125%
	변형	철근설계강도 발현시 0.3mm 이내	철근설계강도 발현시 0.2mm 이내
	직경	$\sqrt{5}\ d_b$	$\sqrt{10}\ d_b$

4. 정착판 형상 결정

제시된 정착판의 요구성능을 만족하는 형상 결정을 위하여 그림. 1과 같이 정착부의 응력 상태를 가정하여 초기설계을 수행하였다. 철근의 모든 응력은 부착력을 무시하고 정착판의 지압력으로만 지지하는 것으로 가정하였고, 정착판의 지압력 분포는 등분포로 가정하였다. 정착판은 완전 소성 거동하는 것으로 하였다.

5. 비선형 유한요소 해석

초기설계을 통하여 결정된 정착판의 형상을 비선형 유한요소 해석을 통하여 정착판의 두께별 변형량과 단면 소성화 여부를 검토하여 요구 성능을 만족하는 최적두께를 결정하였다. 비선형 유한요소 해석은 ABAQUS 6.3으로 수행하였다[6].

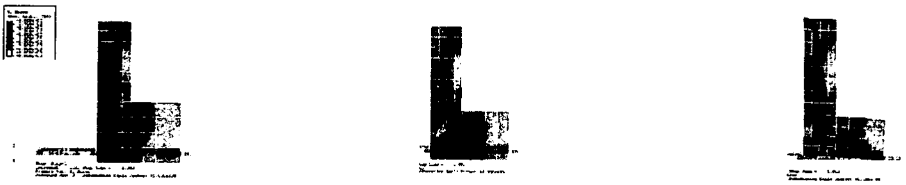
그림 1.
정착판의
응력상태

5.1 해석모델

해석모델은 축대칭요소(Axisymmetric)를 사용하였고, 경계조건으로 대칭축은 X방향으로 구속하고 끝단은 완전 구속하였다. 철근의 매립깊이는 CCD(Concrete Capacity Method)에 의한 내력이 철근의 설계강도의 125% 이상이 되는 깊이로 결정하였다. 폭은 지점부의 반력이 파괴형상과 주응력 방향에 영향을 주지 않는 범위에서 결정하였다(매립깊이의 1.5배이상). 철근의 부착력은 CEB-FIB model을 사용하였으며, 주근용에만 부착력을 고려하고 전단보강근용에는 고려하지 않았다.

5.2 해석결과

#18 철근 주근용의 경우, 철근 인장력이 부착력과 지압력으로 분산되어 철근 설계 항복 하중시 정착판의 최대 변형량이 목표 변형량인 0.3mm를 만족하였다. 그림 2는 정착판 두께별 항복상태를 나타내는 것으로, 두께 18mm에서부터 전단면이 소성화 되었다. 전단보강근용도 주근과 유사한 결과를 나타내었으며, 이음부의 지압력이 정착판의 지압력보다 크게 분포되었기 때문에 초기 설계에 비해 얇은 두께로도 요구성능을 만족하였다.



t=26mm t=22mm t=18mm

그림 2. 이음부 및 정착부의 단면 항복상태 (주근용 #18)

5.3 정착판의 최적 형상 결정

비선형 해석 결과 주근용 #18 철근에 대한 정착판 두께는 전단면이 소성화되고 변형 제한 조건을 만족하는 18-20mm가 적합한 것으로 판단된다. 동일한 방법으로 해석을 수행하여 결정된 철근 직경별 정착판 형상을 표 2에 정리하였다.

표 2. 철근 직경별 최적 형상 단위: mm

구 분		공칭직경	이음부 외경(1.5D)	지압판 형상				비 고
				지압판 외경	지압판 두께(t/db)		b) / a)	
					초기설계[a)]	최적화[b)]		
전단 보강근용	#5	15.9 (0.625″)	23.85	50.28	12 (0.75)	8 (0.50)	0.67	지압판외경 ($\sqrt{10}\ D$)
	#6	19.1 (0.750″)	28.65	60.40	16 (0.84)	10 (0.52)	0.63	
	#7	22.2 (0.875″)	33.30	70.20	18 (0.81)	12 (0.54)	0.67	
	#8	25.4 (1.000″)	38.10	80.32	20 (0.79)	14 (0.56)	0.70	
	#9	28.7 (1.128″)	43.05	90.76	22 (0.77)	16 (0.56)	0.73	
주근용	#10	32.3 (1.270″)	48.45	72.22	14 (0.43)	10 (0.31)	0.71	지압판외경 ($\sqrt{5}$ D)
	#11	35.8 (1.410″)	53.70	80.05	16 (0.45)	12 (0.34)	0.75	
	#14	43.0 (1.693″)	64.50	96.15	20 (0.47)	14 (0.33)	0.70	
	#18	57.3 (2.257″)	85.95	128.13	26 (0.45)	20 (0.35)	0.77	

6. 결론

기계적 정착은 기존의 갈고리 정착에 대한 대안으로서 본 연구에서는 원전구조물용 대구경 철근의 정착판 설계를 위한 정착판의 요구성능을 제시하였고, 그 성능을 만족하는 최적의 형상을 비선형 유한요소 해석을 통하여 결정하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 정착내력은 철근의 초과강도를 고려하여 철근 설계강도의 125%까지 지지 할 수 있도록 해야 하며,

(2) 정착판의 변형은 기계적 이음부의 허용 slip량과 일반적인 철근콘크리트 구조물의 허용 구조 균열폭을 고려하여 주근은 0.3mm 이내, 전단보강근은 0.2mm 이내로 그 값을 설정하였다.

(3) 비선형 유한요소 해석을 통한 정착판 형상은 지압판 외경은 주근용일 경우는 철근직경의 $\sqrt{5}$배, 전단보강용일 경우는 $\sqrt{10}$배로 결정하였고, 지압판의 두께는 주근용은 철근직경에 0.3-0.35배로 전단보강근용은 0.5-0.56배로 최적화 되었다.

참고문헌

1. 神戸製鋼, ネジコン定着工法の設計・施工要領
2. 東京鐵鋼株式會社, “プレートナット工法 設計施工指針”, 日本建築センター 一般評価 BCJ-C2280、 1999年
3. 付着・定着WG 研究成果報告書, New RC 高强度分科, 1993
4. Amin Ghali and Walter H. Dilger, "Anchoring with Double-Head Studs", Concrete International, Nov. 1998
5. ACI 421.1-99, "Shear Reinforcement for Slabs"
6.Abaqus/Standard User's Manual ver. 6.3