

기기 기초 시스템의 지렛대 효과 해석 The Analysis of Prying Action for Equipment Anchor System.

김강식* 유원진** 김갑순** 서용표***
Kim, Kang Sik Yu, Won Jin Kim, Kap Sun Suh, Yong Pyo

ABSTRACT

Prying action caused by the eccentric loads within the equipment itself and the anchors can result in a lack of adequate stiffness and strength within the equipment and in additional moment loadings on the anchors. A typical case of prying action often found in power plants is the angle type anchorage system with expansion bolt.

Experimental and analytical studies were performed to investigate the relationship between the amplification factors and various geometrical and material factors. It is revealed that the value of the factor is effected by the stiffness of bolt and angle, lateral stiffness of cabinet, and geometrical parameter of anchor system.

1. 서론

기기를 콘크리트 기초에 정착하는 일반적인 방법은 기초 콘크리트에 현장매입 앵커볼트 또는 확장형 앵커볼트를 설치하고 기기 저부에 부착된 Base Plate와 조립하여 체결한다. 현재 발전소에 존재하는 일부 기기들에서 그 상세가 표준적인 형태와는 다르게 설치된 정착부가 발견되고 있다. 이러한 정착부에서는 지렛대 효과로 불리우는 하중 증폭현상이 발생하게 된다. 지진시에 기기에 작용하는 수평력은 기기 바닥에 설치된 앵커시스템에 전단력 및 모멘트를 발생시킨다. 앵글형 앵커시스템의 경우, 지진에 의한 상부인장력보다 더 큰 하중이 볼트에 증폭되어 작용하게 되며, 이 증폭값의 정확한 산정이 기기 내진검증에 중요한 요소로 평가되고 있다[2].

본 연구에서는 지렛대효과에 의한 하중증폭계수에 영향을 주는 다양한 변수들을 정의하고 이들 변수에 따른 하중증폭계수를 구하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 1단계로 간략히 모델링된 탄성해석을 통해 하중증폭계수와 변수들간에 존재하는 전체적인 경향을 파악하고, 2단계로 실험 및 비선형 해석을 통하여 보다 정확한 하중증폭계수를 도출하였다.

* 한국전력연구원, 선임보 연구원

** 한국전력연구원, 위촉 연구원

*** 한국전력연구원, 책임 연구원

2. 지렛대현상(Prying action)

그림 1, 2 는 각각 지렛대 현상이 발생할 수 있는 기초 시스템의 개념도와 사진이다.

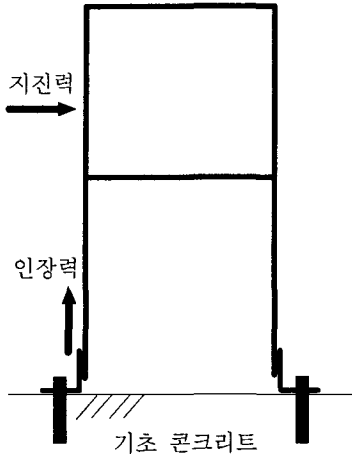


그림 1. 기기 기초 시스템 개념도

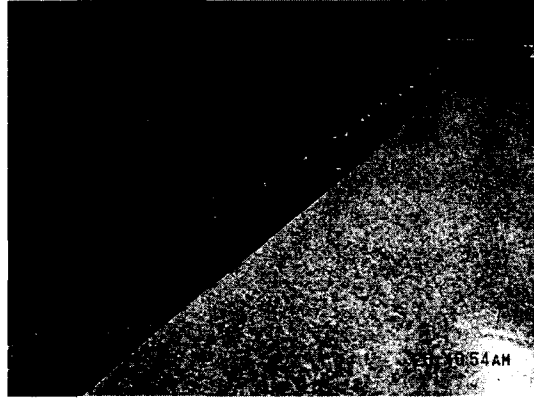


그림 2. 발전소에 설치된 앵글형 기초 시스템

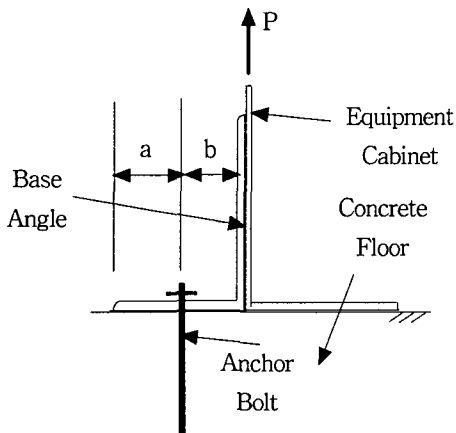


그림 3. 앵글형 기초의 단순화 모형

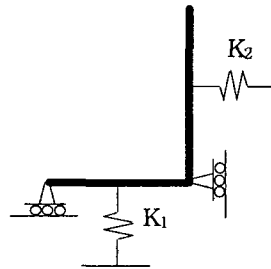


그림 4. 보요소를 이용한 탄성해석 모델

그림 3 은 기기의 Angle형 기초 형상을 일반화한 것이다. a 와 b는 연단거리와 편심거리이다. 수직방향 인장력(P)이 작용하게 되면 콘크리트 면에 부착되어있는 앵글 플랜지 끝에 지점이 형성되어, 앵커볼트 체결 지점과 하중(P) 작용점 거리(a, b)에 의해 주로 지배되는 지렛대현상(Prying Action)이 발생한다. 이러한 기하학적 형상만을 고려한 앵커볼트에 작용하는 하중의 증폭계수(λ)는 식(1)으로 간략하게 표현된다.

$$\lambda = \frac{(a+b)}{a} \quad (1)$$

그러나, 참고문헌[1]은 기하학적 변수 a, b외에도 그림 4에서 표시된 앵커볼트의 축강성(K), Angle의 횡지지 강성(K₂) 및 Angle자체의 휨강성이 하중증폭계수의 산정에 관계가 있음을 지적하였다.

3. 탄성해석

앵커볼트의 축하중 증폭에 관한 매커니즘을 확인하고 증폭계수(λ)에 영향을 미치는 요인들을 파악하기 위하여 그림 4와 같이 모형화된 앵글 기초에 대한 탄성해석을 MIDAS GENw으로 수행하였다. 앵커볼트에 발생하는 축하중의 증폭계수(prying force)에 영향을 미치는 요인으로는 앵커볼트의 축강성(K1), 캐비닛의 횡강성(K2), 연결부(앵글, 채널, 플레이트)의 강성, 볼트위치(a:b), 연결부의 유효폭(W; 참고문헌[1]에서 추천한 값)등을 들수 있으며, 기준앵글모형의 제원을 표1과 같이 설정하여 각 변수에 따른 영향을 파악하였다.

Angle size	H	B	t	W	a	b	D	k1(kip/in)	k2(kip/in)	(a+b)/a
4X4X1/4	4"	4"	1/4"	4"	1.5"	2.5"	3/8"	159	0.345	2.67
3X3X1/4	3"	3"	1/4"	3"	1.25"	1.75"	3/8"	159	0.345	2.4
6X6X3/8	6"	6"	3/8"	6"	2.5"	3.5"	3/8"	159	0.345	2.4
4X4X1/2	4"	4"	1/2"	4"	1.5"	2.5"	3/8"	159	0.345	2.67
4X4X3/4	4"	4"	3/4"	4"	1.5"	2.5"	3/8"	159	0.345	2.67

본 논문에서는 세부적인 해석결과를 생략하고 전체적인 경향만을 수록하였다. 그 경향은 다음과 같다.

- 앵커볼트의 축강성(앵커볼트 직경에 대응되는 값) 증가에 따라 하중증폭계수가 점차 증가한다. 이러한 경향은 앵글의 강성이 증가할수록 확인해진다.
- 축하중 증폭계수는 캐비닛의 횡강성이 작아질수록 매우 크게 증가하는 경향을 나타내었으며, 이러한 경향은 앵글의 강성이 클수록 더욱 큰폭으로 나타났다.
- a, b 변수에 따라 축하중 증폭계수가 변화하지고 (a+b)/a값과 밀접한 관계가 있다는 것이 확인된다. 그러나 축하중 증폭계수의 값 자체는 (a+b)/a보다는 다소 적게 나타난다.
- 연결부(앵글)의 강성이 증가함에 따라 앵커볼트의 축하중 증폭계수는 증가하지만, 그 증가폭은 다른 변수에 비해 비교적 작게 나타난다.

즉, 축하중 증폭계수는 a,b값에 밀접한 관련이 있는 것이 사실이나, 그 외에도 앵커볼트, 캐비닛, 앵글의 강성등에도 영향을 받고 있음이 확인되었다. 이러한 경향 파악 후 다음 4장에 기술된 실험을 수행하였다.

4. 실험

4.1 실험변수 및 실험체 형상

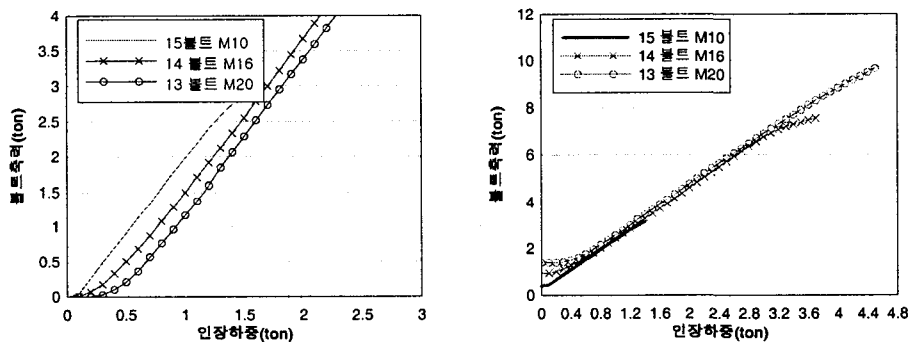
탄성해석 결과는 두가지 면에서 앵커시스템의 물리적 현상과 큰 차이를 보인다. 첫 번째는 지렛대의 지점 위치이다. 이 위치는 앵글의 끝부분인 것으로 가정되었으나 실제로는 앵커볼트와 앵글 끝단의 임의

의 점에서 형성될 수 있다. 이러한 지렛대 지점의 위치는 앵글강성이 약할수록 볼트에 가깝게 형성되어 그림 3의 a값이 작아지게 된다. 그 결과로 탄성해석 결과와는 다르게 앵글의 강성이 작을수록 오히려 하중증폭계수가 커질 수 있다. 두 번째는 실제 앵커시스템은 최초 앵커볼트 시공시 축력을 도입하지만 탄성해석에서는 이것을 고려하지 않았다는 것이다. 앵커시스템에 인장력 (P)가 0에서부터 점점 크게 작용하면 앵커볼트에 작용하는 하중도 점차로 증가하게 되는 것이 일반적이다. 그러나 최초 볼트 체결력이 존재하는 경우, 인장력에 의해 발생하는 볼트하중이 볼트 체결력보다 작을 때에는, 볼트에 하중이 작용하는 대신 주변 앵글의 변형등으로 앵커시스템에 작용하는 인장력을 흡수하게 된다. 따라서 앵커볼트에 작용하는 하중은 탄성해석 결과와는 다르며 특히 인장력이 상대적으로 작을 때는 해석 결과와 상당한 차이를 내게 될 것이다. 이러한 이유로 인하여 실험을 통하여 하중 증폭계수를 구하였다. 이 때의 시험 변수는 Angle규격(휨강성), 앵커볼트의 직경(앵커볼트 축강성(K1)), 횡지지 강성(K2), 기하학적 형상(a, b), 및 Angle의 길이(L)이다.

Angle실험체는 탄성 해석에서 수행한 4"x4"x1/4", 4"x4"x1/2", 4"x4"x3/4"앵글을 국내에서 확보하는데에 현실적인 어려움이 있어 그와 유사한 L100x100x7, L100x100x10, L100x100x13 Angle을 사용하였다. 앵글의 길이(L)는 기존 연구에서 추천한 길이 100mm를 기준으로 하였으나 그 적합성을 확인하기 위해 앵글길이가 100mm, 150mm, 200mm인 경우도 비교 시험체로 제작하였으며 실험 결과 100mm의 앵글길이가 충분한 것으로 판단되었다. 앵커볼트는 직경10mm, 16mm, 20mm의 세가지를 실험변수에 포함시켰다. 횡지지 강성 (K₂)은 등가의 처짐변형을 갖는 원형봉강의 휨강성을 이용하였다. 볼트 체결력은 앵커볼트 직경에 대응하여 직경10, 16, 20mm에 대해 각각 0.4, 0.95, 1.45ton을 가하였다.

4.2 실험결과

실험은 전력연구원 구조시험동에서 수행하였다. 인장력 P와 볼트에 걸리는 축력(초기 체결력을 제외한 값)을 그래프로 도시하였다. 본 논문에서는 실험 결과중 일부인, 4"x4"x3/4"앵글, M16볼트, 일반케비넷 등가 횡강성, 및 a=1.5", b=2.5" 값을 표준형으로 하여 각 변수들의 영향을 살펴보기로 한다. 그림 5의 a는 볼트의 직경을 변화시킨 것이다. 볼트의 직경에 관계없이 그래프의 기울기는 거의 일정하다. 다만 그래프의 x 절편이 볼트직경이 클수록(또는 체결력이 클수록) x방향으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 즉, 기존 탄성해석에서는 고려하지 않았던 축력의 영향이 인장력이 작은 부분에서 볼트 축력에 상당한 영향을 준다는 것이다. 그림 5의 b는 초기체결력을 포함한 볼트 축력을 인장력의 함수로 도시한 것이다.



(a) 초기체결력을 제외한 경우

(b) 초기체결력을 고려한 경우

그림 5. 4"x4"x3/4"앵글, 일반케비넷 등가 횡강성, 및 a=1.5", b=2.5"이고 볼트직경이 변하는 경우

그림 6은 앵글의 강성을 변화시킨 것이다. 강성은 앵글의 두께를 1/4", 1/2", 3/4"로 변화시켰다. 세가지 모두 초기에는 거의 동일한 양상을 보였으나 하중이 증가하면서 앵글이 항복을 한 이후에는 서로 다른 결과를 보인다. 실험 케이스 2번 (앵글 두께 1/4)같은 경우는 앵글이 인장하중 1톤 근처에서 이미 항복을 하게 된다. 이러한 항복으로 인해 이후에 볼트에 걸리는 축력은 여타의 경우와 현격한 차이를 보이게 된다. 이러한 이유로 인해 1/4"두께를 가진 앵글의 경우 하중증폭계수 λ 값을 인장하중 1ton 이상에서 구하게 되면 기타의 경우와는 상당히 다른 결과를 내게 될 것이다. 그림 7은 횡강성을 변화시킨 경우이다. ($K1 < K2 < K3$) 그림에서 보는 바와 같이 앵글강성의 영향은 방향성을 지니고 있지않다.

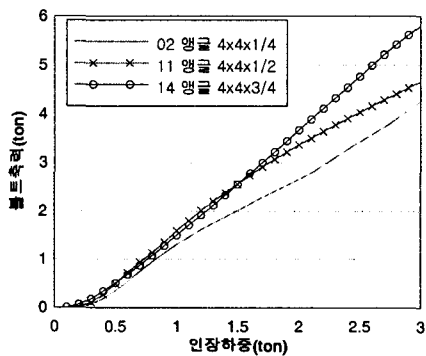


그림 6. 앵글강성이 변화하는 경우

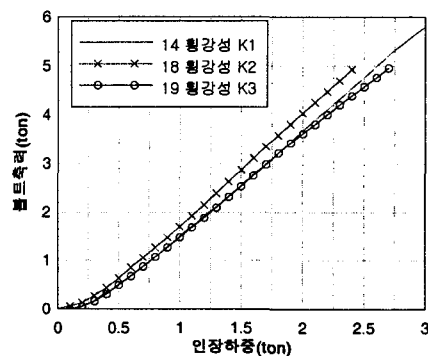


그림 7. 횡강성이 변화하는 경우

볼트의 위치를 변화시킨 경우는, Prying action의 개념으로 보거나 탄성해석 결과로 볼 때 가장 뚜렷하게 하중증폭효과가 대비되어 나타날 것이다. 그림 8은 그 결과를 도시한 것이다. 위치 L1, L2, L3는 각각 a값이 1.5, 1.75, 2.0"에 대응한다. 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 L3의 경우가 가장 하중 증폭 효과가 작다. 그림 9는 표준시험체에 대한 실험 모습으로 지점이 형성되어 앵글이 들린 사진이다.

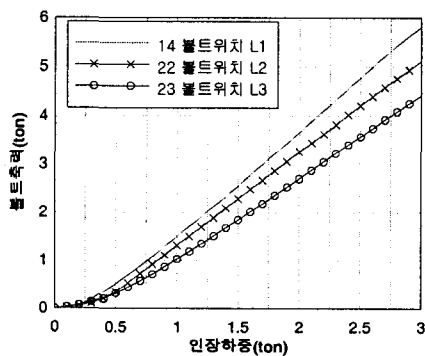


그림 8. 볼트구멍 위치가 변하는 경우

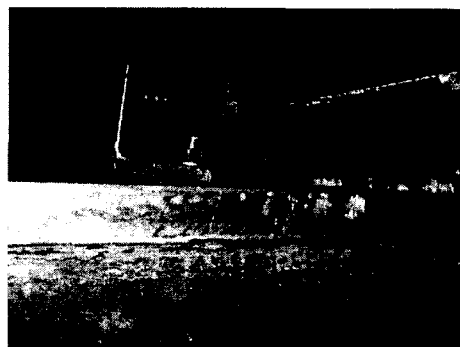


그림 9. 표준시험체의 시험장면

5. 비선형 수치해석

5.1 해석 목적

탄성해석과 실증실험의 결과로 하중증폭계수를 구하기 위해 고려할 변수들과 절차들이 확인되었다. 그러나 실제 기기 정착부의 경우 다양한 치수와 재료로 구성되어 있다. 개별적인 응용을 위해 실험을 수행하는 것은 비경제적이며, 탄성해석은 3장에서 언급한 바와 같이 실제현상을 고려하기에 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 실제 물리적 현상을 정확히 파악할 수 있는 수치해석 기법을 개발하고자 한다.

5.2 모델링 방법

해석에 사용한 프로그램은 ABAQUS 6.1이다. 앵글의 Prying action을 해석하기 위해 재료의 비선형성, 초기체결력 도입, 앵글과 바닥의 접촉문제 등을 모델링시에 고려하였다. 초기체결력과 접촉면을 도입하고 인장력을 가하는 절차는 5단계에 걸쳐 이루어졌다.

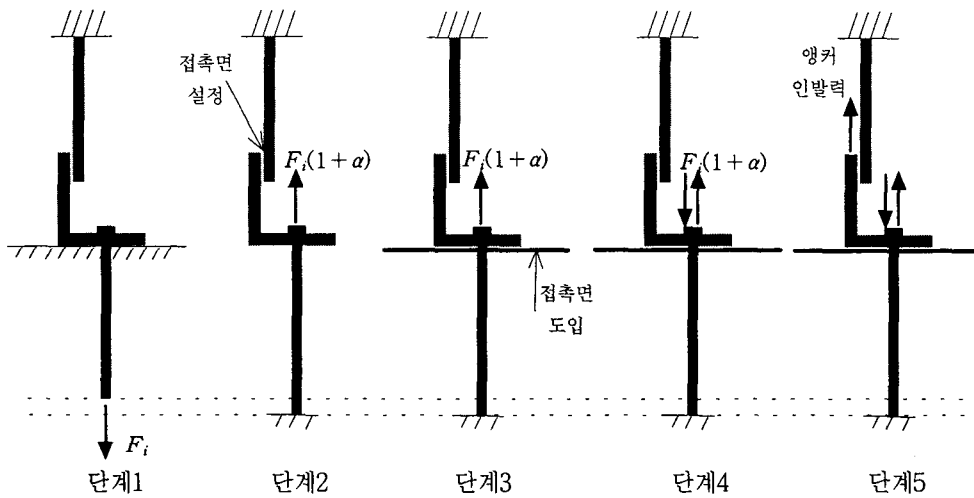


그림 10. Prying action 의 단계별 모델링

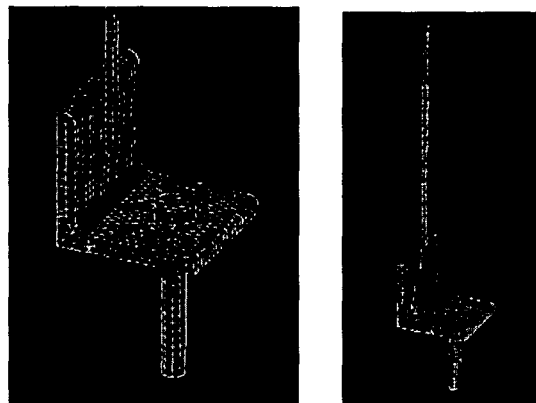


그림 11. 기초 시스템 유한요소망

그림 11은 기기 기초 시스템을 완전히 모델링한 기기그림이다.

5.3 해석결과

그림 5에서 수행한 실험과 동일한 자료를 바탕으로 하여 수치해석을 수행하였다. 즉, 4"x4"x3/4"앵글, 일반케비넷 등가 횡강성, 및 $a=1.5'$, $b=2.5'$ 이고 볼트직경이 변하는 경우에 대해 해석을 수행하였다. 그림 12는 볼트 직경이 16mm인 경우의 변형형상과 표면응력 상태이다. 앵글은 우측의 앵글 끝단을 지점으로 하여 완전한 지렛대 형상을 보이고 있다.



그림 12. 앵글의 휨과 표면 응력상태

그림 13에서 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 여기서의 볼트축력은 초기체결력 성분이 포함되어 있다. 인장하중이 증가하더라도 볼트 축력은 초기에는 증가하지 않는다. 이것은 볼트의 직경이 커서 초기체결력이 큰 경우에 더욱 큰 인장력 범위까지 관찰된다. 해석결과와 실험결과는 매우 유사한 경향을 보이고 있으며 본 연구에서 제시한 해석 기법이 상당한 정확도를 보이고 있음을 입증한다.

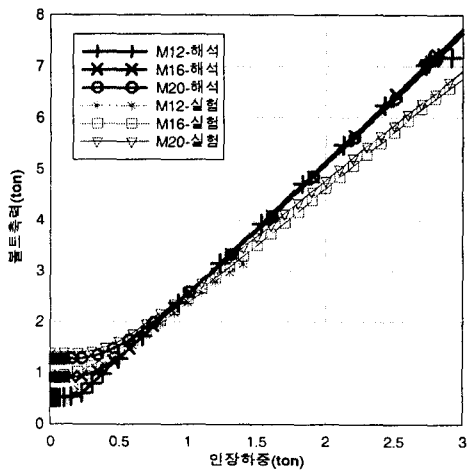


그림 13. 수치해석 결과와 실험결과의 비교

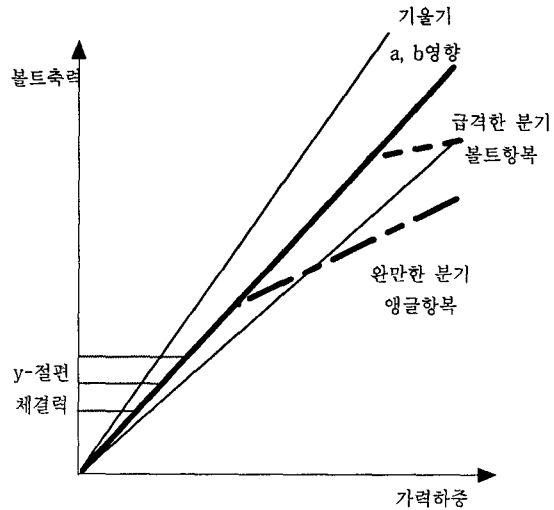


그림 14. 지렛대 현상 개념도

6. 결론

본 연구는 모두 세단계로 이루어졌다. 첫단계로 탄성해석을 통해 Prying action에 대한 전체적인 경향을 살펴 보고 실험에 필요한 변수들의 범위를 설정하였다. 두 번째 단계로 실증실험을 통해 실제적인 하중증폭형태를 관찰하였다. 마지막으로 추후 문제가 될 일반적인 앵커시스템의 해석을 위한 수치해석 모형을 제시하였다.

분석대상 시험변수로는 앵글, 볼트, 케비넷의 강성; a, b, 유효폭 등의 기하학적 치수; 및 볼트의 초기 체결력이다. 가장 지배적인 변수는 a, b에 따라 식(1)과 같이 결정되는 하중증폭계수이다. 케비넷의 강성은 하중증폭계수 산정에 무관한 것으로 판단된다. 유효폭은 참고문헌[2]에서 제시한 바를 그대로 이용하였는 바, 일정폭(앵글의 한쪽 면길이)이상이 되면 실험 및 해석을 하는 데에 충분한 것으로 파악되었다. 앵글의 강성은 하중증폭계수에 직접적인 연관이 없지만 앵글이 볼트보다 먼저 항복하는 경우 하중의 증폭양상이 변화됨을 관찰하였다. 볼트의 강성은 볼트의 초기체결력과 일대일의 대응관계를 가지고 있으며 가력하중에 따른 볼트축력(체결력포함) 그래프에서 y축 절편으로 나타난다. 이러한 분석결과를 그래프로 표시하면 그림 14와 같다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발 사업비 지원하에 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. "Generic Implementation Procedure for Seismic Verification of Nuclear Plant Equipment", SQUG, 1992.
2. URS/John A. Blume & Associate, Engineers, "Recommended Approaches for Resolving Anchorage Outliers", EPRI, TR-103960, EPRI, 1994, 65pp.
3. 김진형, 최영규, "지레작용을 고려한 T-스텝 접합부의 탄소성 거동에 관한 연구", '88추계학술발표회논문집, 대한건축학회, pp.631-634.
4. 류종열, 김근덕, "Tee-스텝 접합부의 지레작용에 관한 연구" '88추계학술발표회논문집, 대한건축학회, pp413-416.