

원자력 발전소의 면진설계 방안



배준호
 ㈜에스코알티에스
 기술연구소 책임연구원
 jhbaek@enrtech.co.kr



이유인
 ㈜에스코알티에스
 기술연구소 선임연구원
 yinlee@enrtech.co.kr



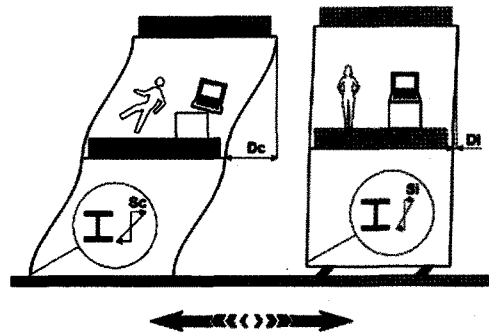
이주탁
 ㈜에스코알티에스
 기술연구소 연구원
 jtlee@enrtech.co.kr

1. 머리말

2011년 발생한 파키스탄 지진(규모 7.2), 뉴질랜드 크라이스트처치 지진(규모 6.3), 일본 동북부 지진(규모 9.0), 미얀마 지진(규모 6.8) 등은 리히터규모 6.0 이상으로, 전 세계적으로 지진의 강도 및 빈도가 증가하는 상황에서 인류에게 꼭 필요한 사회 기반시설을 강력한 지진으로부터 안전하게 보호하는 구조물의 내진대책의 중요성이 증가하고 있다.

이와 같이 지진으로부터 구조물의 건전상태를 유지하는 공법은 크게 내진공법, 제진공법, 면진(지진격리)공법으로 구분된다.

내진공법이란, 구조물에 작용하는 지진력에 대해 구조물의 강성과 연성을 증가시켜 지진 하중에 대해 저항하는 공법이다. 국내에서는 대부분의 건축구조물과 토목구조물에 적용되어 있는 공법으로써 많은 설계 및 시공노하우



〈그림 1〉 내진과 면진(지진격리)시스템

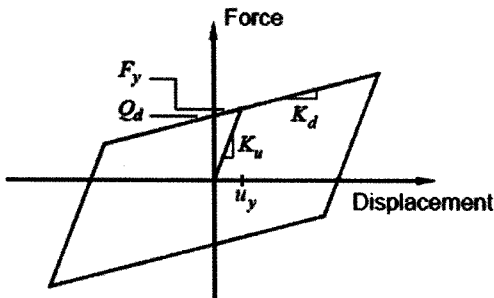
가 축적되어 있다. 하지만 구조물 자체의 강성을 증가시키기 위해서 단면적 증가와 철근의 추가 배근 등에 의한 비경제적인 설계를 유도하는 단점이 있다.

제진공법은 구조물에 설치된 제진장치(댐퍼)를 이용하여 지진력에 상응하는 힘을 역으로 작용시켜 구조물을 보호하는 공법이다. 이때 제진장치에 지진력을 집중시켜 에너지를 흡수함으로써 전체 구조물은 지진하중에 대해 건

전도를 유지하게 된다.

면진(免震)이라는 용어는 일본에서 사용되기 시작한 용어인데, '지진격리'라는 우리말을 사용하는 것이 보다 쉽게 뜻을 이해할 수 있으며 폭넓은 분야에 적용할 수 있으리라 판단된다.

면진(지진격리)공법은 지진력이 작용하는 지반 또는 기초와 구조물을 분리시켜 지진력이 건물로 전달되는 것을 감소시키거나 차단하는 공법이다. 이때는 단순히 상부 구조물을 하부 구조물로부터 분리시키는 것이 아니고, 면진(지진격리)시스템 내부에 발생된 상대변위 또는 마찰력을 이용하여 하부로부터 작용하는 지진에너지를 감소시키는 방법을 사용한다. 일반적인 면진(지진격리)받침의 힘-변위의 관계는 그림 2와 같으며, 이력곡선의 면적만큼의 에너지를 소산시킨다.



〈그림 2〉 면진(지진격리)받침의 힘-변위 관계

이러한 지진력 감소를 통해서 구조물은 보다 경제적인 설계가 가능하며 전체 구조계를 비롯해 칸막이, 설비 시설과 같은 비구조체의 안전성까지 확보하여 지진으로 인한 화재, 폭발 등의 2차 피해도 방지할 수 있다. 또한 이러한 장점을 바탕으로 지진 후 구조체의 보수, 보강에 의한 비용 절감 효과 등도 기대할 수 있다.

한편, 전 세계적으로 주요 에너지원인 석유자원이 고갈되고 무분별한 산업개발로 인해 발생하는 환경오염 문제는 반드시 해결해야만 하는 과제이다. 그에 따라 친환경 에너지원으로서 큰 관심을 받고 있는 발전시설인 원자력 발전소는 연쇄적인 핵분열로 발생하는 막대한 열 에너지

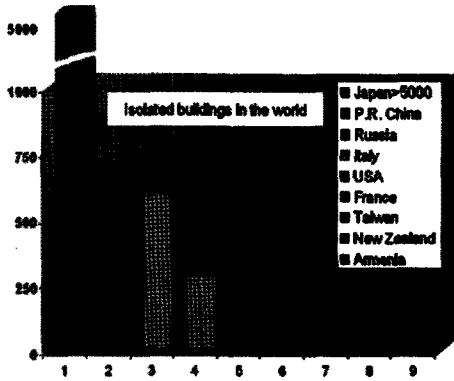
를 이용해서 만든 증기로 터빈을 돌려 전기를 생산하는 발전시설이다. 우리나라 1g이 핵분열 할 때 생기는 에너지는 석유 9드림(약 1800kg), 석탄 약 3000ton 이 완전 연소할 때 생기는 에너지와 비슷하다. 그렇기 때문에 원자력은 매우 효율적이며 경제적인 에너지로 주목받아왔다. 하지만, 원자력 기술의 핵심이라 할 수 있는 핵분열이 발생하는 원자로 내에는 생명체에 큰 위협을 줄 수 있는 방사선이 발생되기 때문에 원자력 발전소에는 운전 중은 물론이고 정지시에도 방사선 및 방사성폐기물 등을 철저히 관리해야 한다. 최근 후쿠시마원전의 경우 지진으로 인해 발전시설을 가동시키는 소외전력이 상실되고, 이후 가동된 비상 디젤발전기까지 쓰나미에 의해 가동이 멈추면서 결국 노심 냉각 계통이 제 구실을 할 수 없게 되어 국제 원자력 사고등급 레벨 7이라는 큰 피해를 기록했다. (구한모, 2011)

World Nuclear Association(2009)에 따르면 IAEA(International Atomic Energy Agency, 국제원자력기구)는 2030년까지 전 세계적으로 약 430여기의 원전이 추가로 건설될 것이라고 내다 보았다. 지금까지 대부분의 원전구조물은 지진으로부터 보호하기 위한 방법으로 내진공법으로 건설되었지만 지진력을 완벽히 예측하는 것은 현실적으로 매우 어려운 상황에서 내진공법만을 고집하기 보다는 더욱 안전하게 원전구조물을 보호할 수 있는 면진(지진격리) 시스템을 적용함으로써 초기 건설비용과 지진 후 피해복구에 필요한 비용 등의 절감효과를 기대할 수 있을 것이다.

2. 구조물의 면진(지진격리) 기술

면진(지진격리)공법에 대한 연구는 1980년대 이후 건축물, 교량, 가스시설 등을 중심으로 시작되어 왔으며, 1995년 일본 고베지진 이후 적용사례가 급증하고 있다.

미국은 1984년 이후 건축물의 경우 약 80개 이상, 교량의 경우 약 150개 이상을 면진(지진격리)구조로 적용하였다. 일본의 경우에는 1983년부터 2007년까지 건축물 등



〈그림 3〉 전세계 면진(지진격리)시스템 적용건물



〈그림 4〉 교량에 적용된 면진(지진격리)받침

에 약 5000건 이상을 적용하였고 연평균 6000개 이상의 면진장치(Isolator)를 제조하고 있다.

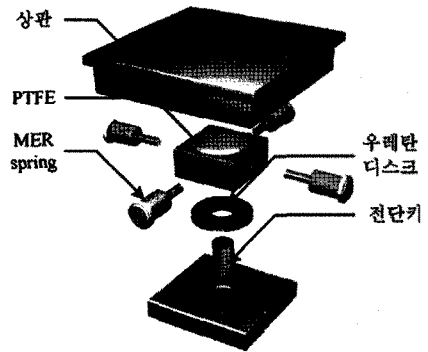
국내의 경우는 1998년 이후 교량을 중심으로 다양한 종류의 면진(지진격리)받침을 적용하고 있으며 2005년에 도로교설계기준 개정판의 내진설계 부분에 면진(지진격리)설계 기준이 처음으로 포함 되었으나, 그 외의 건축물의 면진에 대한 적용 예는 찾아보기 어려운 실정이다.

2.1 수평지진력에 대한 면진(지진격리)받침

일반적으로 면진(지진격리)설계는 수평지진력에 의한 지진시 구조물의 응답을 줄일 목적으로, 주로 상부구조와 하부구조 사이에 면진(지진격리)받침을 적용하여 설계기준에서 요구하는 내진성을 확보한다. 수평 지진력에만을 고려하는 이유는 구조물은 중력만큼의 상시 수직방향 하중을 받고 있으므로 지진시의 추가적인 수직방향 하중에 대해 어느 정도 안정성을 확보하고 있다고 판단하기 때문이다(도로교설계기준 해설, 2010).

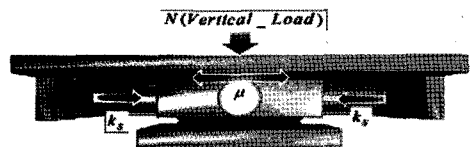
수평지진력에 대한 대표적인 면진(지진격리)받침으로는 마찰복원형 받침, 마찰진자형 받침, 탄성 받침, 강재뎀 퍼형받침 등이 있다. 이러한 받침들은 구조물 내에 적용되어 연직하중지지, 회전 및 수평변위 수용, 하중감쇠 등의 기능을 수행한다. 본 장에서는 받침의 여러기능 가운데 면진(지진격리)과 직접적으로 관련이 있는 하중감쇠기능 위주로 서술하였다.

2.1.1 마찰복원형 받침



〈그림 5〉 마찰복원형 받침 개요

마찰복원형 받침은 상시에는 작용하는 수직력에 대하여 특수 설계된 우레탄 디스크로 안정성을 유지하며 구조물의 온도신축과 같은 수평변위에 대해서는 우레탄 재질의 MER spring으로 변형을 수용하게 된다. 지진시에는 전방향 수평력에 대해 교량상부와 하부구조물 사이에서 상호기초분리와 이를 통한 하중감쇠가 원활히 이루어지도록 한다. 이는 상판 안쪽의 스테인레스 스틸과 PTFE(마찰재)의 상호 작용에 의해서 감쇠효과가 일어나기 때문이며, 이후 MER spring에 의해 발생된 변위에 대해 원위치로 복원하게 된다. 이러한 거동은 다음 식 (1)로 표현될 수 있다.



〈그림 6〉 마찰복원형 받침 구조도

$$P_h = k_s \cdot \Delta h + N \cdot \mu \quad (1)$$

이때, P_h = 수평력, K_s = MER spring 강성, Δh = 수평 변위, N = 고정하중에 의한 수직력, μ = 마찰면 마찰계수를 설계변수로 지진력에 대해 다양한 설계가 가능하다.

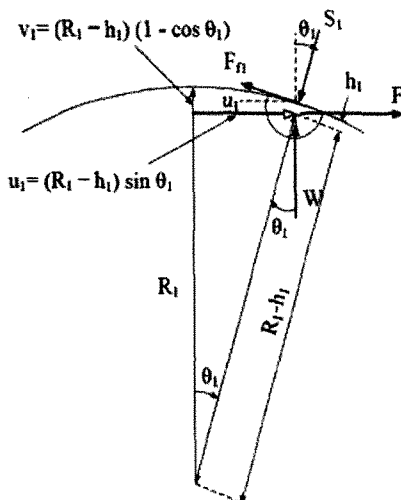
마찰 복원형 받침은 수평으로 일직선상에 배치된 스프링의 구조적인 특성으로 인해서 다른 받침에 비해 비교적 낮은 높이로 수평하중에 대한 감쇠 및 복원기능을 동시에 수행할 수 있는 장점이 있어 현재 국내 토목구조물에서 가장 많이 사용되는 면진(지진격리)받침이다.

2.1.2 마찰진자형 받침

마찰진자형 받침은 상판 또는 하판 내부의 곡률반경(ρ)을 갖는 오목한 표면위로 동일한 곡률반경과 고유의 마찰계수(μ)를 갖는 진자가 접하여 거동하는 매커니즘을 갖는다. 지진이 발생하면, 마찰진자형 받침을 통해서 격리되어 있는 상부구조물과 기초가 분리되어 상대수평변위를 발생하게 된다. 상대변위 발생시 마찰진자는 오목한 곡면



〈그림 7〉 마찰진자형 받침 (Single concave)



〈그림 8〉 마찰진자의 거동 양상

을 따라 원위치보다 높은 위치로 이동하며 이후 외력이 소실되면서 중력에 의해 마찰진자는 원위치로 복원하게 된다. 식 2는 마찰진자형 받침의 거동양상(그림 8)으로부터 유도된 평형방정식이다.

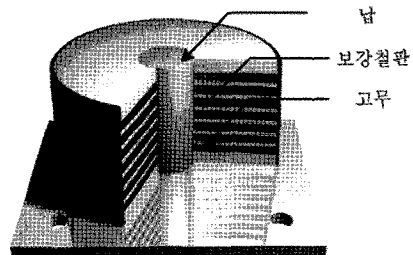
$$F = \frac{W}{(R_1 - h_1) \cos \theta_1} u_1 + \frac{F_{f1}}{\cos \theta_1} \quad (2)$$

마찰진자형 받침은 상·하판의 크기, 상·하판 내부 곡면의 곡률반경(ρ), 마찰진자 표면의 마찰계수(μ)를 설계변수로 하여 다양한 지진력에 대한 설계가 가능하다.

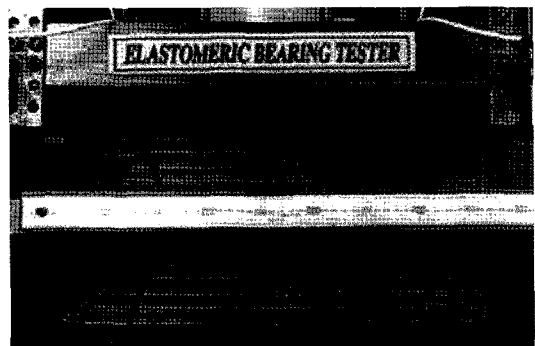
2.1.3 탄성받침

탄성받침은 기본적으로 고무와 보강철판을 적층으로 배열한 구조를 갖는다. 이러한 구조는 고무의 유연함으로 수평변위에 대한 수용을 하며, 보강철판의 적층 구조로 인해 수직처짐을 최소화하는 장점이 있다.

일반적으로 탄성받침은 수평력에 대한 감쇠력이 낮기 때문에 감쇠력을 높이기 위해 일반 고무 대신 감쇠력이 높

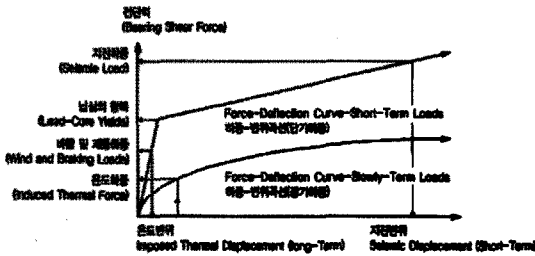


〈그림 9〉 납-탄성받침 구조도



〈그림 10〉 탄성받침의 수평변위에 대한 수용

은 고감쇠 고무를 사용하거나, 그림 9와 같이 받침의 중심에 코어형태로 납을 삽입하여 납의 비선형성을 이용해서 수평력에 대한 감쇠기능을 갖는다. 아래 그림 11을 통해서 납의 비선형적 거동을 알 수 있다.

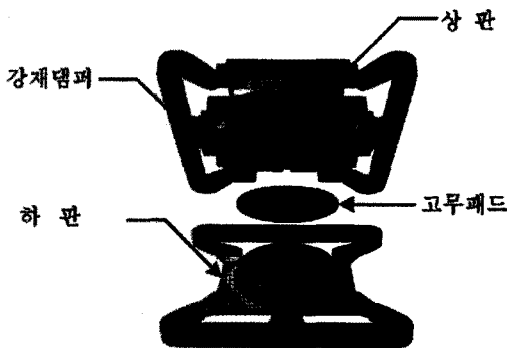


〈그림 11〉 납의 비선형 곡선

탄성받침 내부에 삽입된 납은 온도신축과 같은 장기하중에 대해서는 납 자체의 크리프 특성으로 변위를 수용하며 풍하중이나 차량의 제동과 같이 순간적으로 작용하는 비교적 약한 하중에 대해서는 납 자체의 강성으로 저항하여 안전한 구조물상태를 유지한다. 반면, 지진과 같이 순간적으로 작용하는 매우 큰 하중에 대해서는 납이 항복하여 비선형적 거동을 하게 된다. 이때 고무의 복원력이 더해져 반복거동을 하며 지진하중 감쇠 및 상호 구조물을 격리시킨다.

2.1.4 강재댐퍼형 면진(지진격리)받침

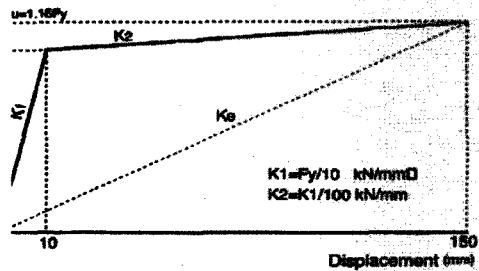
강재댐퍼형 면진(지진격리)받침은 상시에 발생하는 변위에 대해서는 특수 설계된 실린더 형태의 속도 반응형 잠



〈그림 12〉 강재댐퍼형 받침

금장치를 통해 수용하며, 지진시에는 강재 댐퍼의 비선형 거동으로 지진에너지를 흡수하는 매커니즘을 따른다. 특히, 가동축에 따라서 설치된 실린더 형태의 속도 반응형 잠금장치는 자동차에 적용되는 안전벨트와 같은 특성을 지니는데, 낮은 속도에 대해서는 변위를 수용하지만, 높은 속도에 대해서는 변위를 수용하지 않는다. 속도 반응형 잠금장치가 변위를 수용하지 않을 경우에 한해 강재댐퍼로 하중이 전제지게 되며, 그림 13과 같은 강재의 비선형적 거동을 통해 지진에너지를 소산하게 된다.

2.2 수직 지진력에 대한 면진(지진격리)받침



〈그림 13〉 강재의 비선형 곡선

앞에서 언급했듯이, 지진시에 구조물은 중력방향의 지진하중에 대해 안전성을 확보한다고 판단하였으며, 결과적으로 수평방향의 지진하중만을 고려한 면진(지진격리)설계를 적용해 왔다. 하지만 지난 1995년 일본 고베지역을 강타했던 한신·아와지 대지진(고베지진) 등의 경우에서 수직방향의 지진하중에 대한 중요 또한 알 수 있었다. 일반적인 지진의 경우 지진파의 수평방향 가속도가 수직방향의 가속도보다 훨씬 크지만, 한신·아와지 대지진과 같은 내륙 직하형 지진의 경우 수직방향의 가속도가 수평방향 가속도와 비슷하거나 그 이상의 크기를 갖는다. 그렇기 때문에 실제 지진피해 현장에서도 강력한 수직방향 지진파에 의한 파괴특성들을 확인할 수 있다(전대한, 1995). 이러한 이유에서 원전의 면진(지진격리)설계시 이와 같은 피해를 방지하고자 미국은 지진파 수평성분의 2/3~1배만큼을 연직성분으로 고려할 것을 명시하고 있다.(ASCE

4-98, ASCE 43-05)

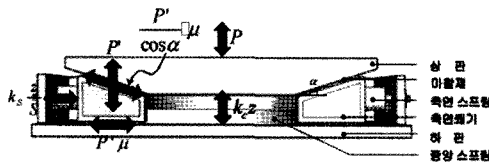
본 절에서는 수직 지진력에 대한 감쇠기능을 갖는 면진(지진격리)받침에 대해 서술하였다.

2.2.1 마찰복원형 받침

마찰복원형 받침은 그림15와 같이 상판, 중앙스프링, 마찰재, 측면쇄기, 측면스프링, 하판으로 구성되어있다.



〈그림 14〉 연직 진동 제어장치 개요

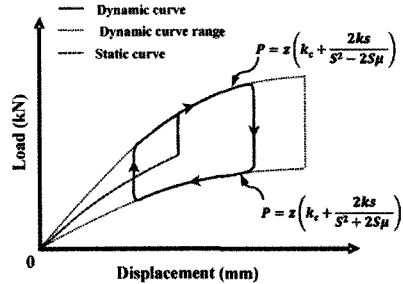


〈그림 15〉 연직 진동 제어장치 구조도

이때, $P =$ 연직하중, $P' =$ 경사면 반력, $K_c =$ 중앙스프링 강성, $K_s =$ 측면스프링 강성, $z =$ 연직방향변위, $\mu =$ 마찰계수, $S = \tan \alpha$

지진에 의해 발생된 수직력으로 인해 상판의 경사면과 측면쇄기가 맞닿게 되어 중앙스프링과 측면쇄기 모두 상판을 지지하게 된다. 수직력이 점차 증가하면 중앙스프링과 측면스프링의 수축으로 인해서 상판은 하향으로, 측면쇄기는 수평방향으로 이동한다. 이동된 상판과 측면쇄기는 각각 중앙스프링과 측면스프링의 복원력에 의해 원위치로 복원하며, 이때 마찰재의 작용에 의해 하부로 전하지는 하중이 감쇠하게 된다. 이와 같은 동·정적인 거동을 고려하여 유도한 전체거동 방정식은 다음 식과 같으며, 이를 통해 그림16과 같은 이력곡선을 얻을 수 있다. 결과적으로 반복되는 지진하중에 대해 이력곡선의 면적만큼 하중이 감쇠된다.

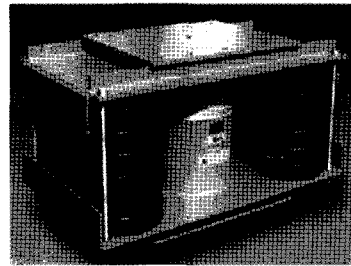
$$P = z \left(k_c + \frac{2k_s}{S^2 + 2S\mu} \right) \quad (3)$$



〈그림 16〉 연직진동제어장치 이력곡선

2.2.2 헬리컬스프링 및 점성댐퍼

헬리컬스프링과 점성댐퍼를 이용한 지진력 연직성분에 대한 면진(지진격리)장치는 다음 그림17과 같다.



〈그림 17〉 헬리컬스프링과 점성댐퍼를 이용한 면진(지진격리)장치

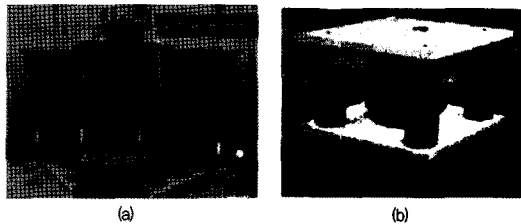
작용하는 수직력에 대해 효과적으로 기능을 수행하기 위해 헬리컬스프링과 댐퍼를 수직력이 작용하는 방향으로 배치하였다. 이 장치에 적용된 점성댐퍼는 지진 발생시에 지진력을 흡수하며, 헬리컬스프링은 변위가 발생된 장치를 원위치로 복구시켜주는 기능을 한다.

2.3 모든방향의 지진력에 대한 면진(지진격리)받침

국내·외의 면진(지진격리)시스템은 대부분 토목교량 분야 또는 지진이 자주 발생하는 지역의 건축물과 설비들에만 한정되어 적용하고 있으며 주로 지진력의 수평방향 성분만을 고려해서 설계에 반영해왔다. 하지만 면진(지진격리)에 대한 중요성과 그에 따른 관심이 커지면서 적용 범위가 크게 확대되고 있으며, 수평·수직 전 방향으로 작

용하는 지진에 대해 보다 합리적인 면진(지진격리)시스템 구축에 대한 다양한 연구가 진행되었다.

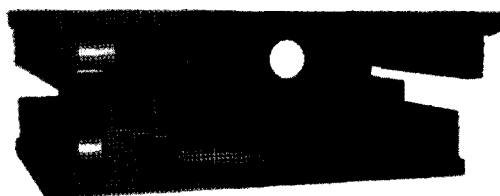
실제 적용된 전방향 면진(지진격리) 시스템은 아직까지는 존재하지 않지만 여러 나라에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 다음 그림 18은 현재 연구가 진행중인 전방향 지진력에 대한 감쇠기능을 갖는 장치들이다.



〈그림 18〉 전방향 지진력에 대한 면진(지진격리)장치

그림 18(a)와 (b)는 작용하는 수직성분 지진력에 대해서 에어스프링과 점성댐퍼를 결합시켜 감쇠기능을 수행하며, 수평성분 지진력에 대해서는 각각 탄성받침과 마찰진자형받침을 이용해 감쇠기능을 수행하게 된다. 아직 개발 단계지만 이러한 구조의 면진(지진격리)장치는 수직성분 지진력을 감쇠시키는 과정에서 받침의 수직단차가 크고, 요소들을 조밀하게 배치하기에는 한계가 있기 때문에 장치의 부피가 크다. 그러므로 다양한 분야에 적용을 하기에는 어려움이 따르며 지속적인 연구를 통해서 이러한 단점을 극복해야 할 것이다.

그림 19는 장치 내부에 강재를 비롯해 마찰재, 우레탄 스프링 등을 적절히 배치하여 전방향 지진력에 대해 감쇠기능을 갖는 장치이다. 먼저, 수평 지진력에 대해서는 탁월한 면진(지진격리) 기능이 검증된 마찰복원형 받침을 적용했으며, 수직 지진력의 경우 수평방향으로 움직이는 썸



〈그림 19〉 마찰복원형 전 방향 면진(지진격리)장치

기의 경사면을 이용해 매우 낮은 수직단차로 감쇠기능을 갖는다. 이러한 거동으로 지진 발생시 상·하부의 장치들이 각각 수평·수직력에 대해 감쇠작용을 하면서 면진(지진격리)장치로서의 기능을 수행하게 된다. 특히 다른 장치들과 달리 고강도 재료들이 적용됐고, 효율적인 구조로 구성되었기 때문에 동일한 하중에 대해 다른 장치들과 비교해 상대적으로 작은 크기(size)로 저장할 수 있다는 점에서 공간 및 비용 적인 측면에서 큰 장점을 갖는다.

3. 원전구조물의 면진(지진격리)시스템 적용 및 기술현황

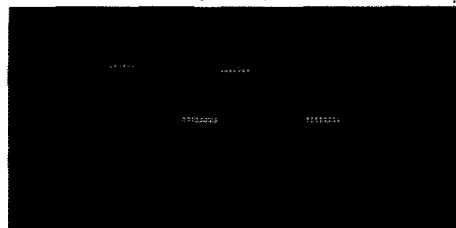
세계적으로 교량 및 건축 시설물에 대한 면진(지진격리)시스템 적용이 매우 활발한 것과 달리 원전 구조물에서의 면진(지진격리)시스템 적용은 이제 시작단계라고 할 수 있다.

현재 국내외에서 원전구조물을 대상으로 하는 면진(지진격리)기술은 원전의 지진안전성 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 것은 물론이며 다양한 지역에 원전 건설이 가능하게 하는 핵심 기술로 인식되면서 각국에서 많은 관심을 보이고 있다.

3.1 국외 현황



(a) Cruas-Meyssse NPP, French



(b) Koeberg NPP, South Africa

〈그림 20〉 면진(지진격리)이 적용된 원전

전 세계적으로 면진(지진격리)시스템을 적용한 원자력 발전소는 프랑스의 Cruas-Meysses NPP(Nuclear Power Plant) 4기와 남아프리카공화국의 Koeberg NPP 2기 만이 존재하지만, 선진국을 중심으로 다양한 연구가 진행되고 있다.

일본의 경우 정부의 지원하에 전력중앙연구소(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI), 원자력안전기반기구(Japan Nuclear Energy Safety Organization, JNES)와 같은 연구기관이 지난

20여년간 원자력 발전소 면진(지진격리)기술을 완성시키기 위해 많은 연구를 진행 하였다. 또한 국제공조강화를 위해 프랑스, 미국 등과의 협력사업을 추진한 결과 다양한 실험자료를 보유하고 있으며 2001년에는 원전면진구조 설계지침(JEAG - 4614)을 개발하였다.

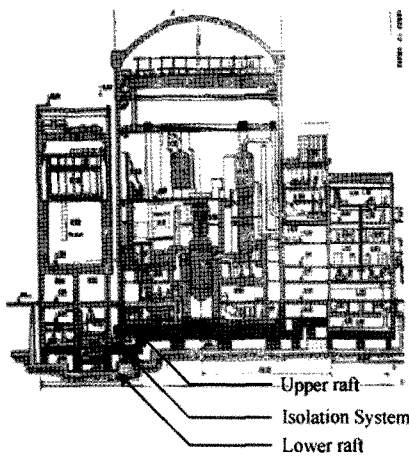
한편 미국의 경우 원자력발전소 구조물 설계에 적용되는 기준인 ASCE 4-98, 43-05에서 구조물의 면진설계 규정 및 설계법을 포함하고 있으며 그밖에 US NRC, FEMA (2004, Chapter 13) 등에서 원전구조물의 면진규정 및 최소 요구사항 등을 제시하고 있다. 두 나라 모두 원전구조물에 대한 면진기술 개발은 상당히 진행된 상태이지만 원자로나 기타 시설물에 부분적으로 면진(지진격리)장치를 사용한 경우만 있고, 가동중인 원전 구조물에 면진(지진격리) 시스템을 적용한 예는 없다.

면진(지진격리)이 적용된 프랑스의 Cruas-Meysses NPP와 남아공의 Koeberg NPP는 모두 900MW급 프라마툼 가압경수로(Pressurized Water Reactor, PWR)로 각각 1984년과 1985년에 첫 가동을 시작하였으며 안전정지 지진(SSE) 0.2g 및 0.3g에 대해 설계되었다.

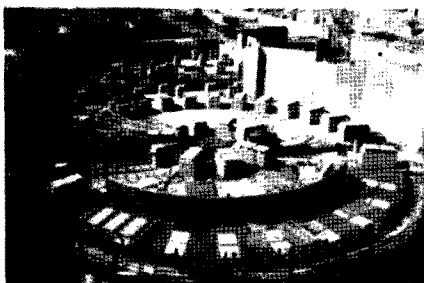
다음 그림21은 프랑스의 Cruas-Meysses NPP의 면진(지진격리) 시스템 적용예에 대해 보여주고 있다.

프랑스 Cruas-Meysses NPP는 호기당 50cm × 50cm × 6.5cm 크기의 Neoprene Pad 약 1900여개를 Upper raft 와 Lower raft 사이에 장착시켜 면진(지진격리) 시스템을 완성시켰다. Upper raft 와 Lower raft 사이에는 일정한 공간을 확보하여 향후 유지 보수시 편리성을 확보하였다.

이러한 프랑스의 원전 면진(지진격리)기술은 남아공의 Koeberg NPP 건설시에도 적용이 되었으며, Koeberg NPP 호기당 70cm × 70cm × 13cm 크기의 Reinforced Elastomer Pad 약 1,820여개를 Upper raft 와 Lower raft 사이에 장착시켰다. 지진시에는 탄성받침의 전단변형과 더불어, 스테인레스 강재로 구성된 Upper raft 표면과 납침동 합금 소재의 탄성받침 상부표면 사이에 미끄러



(a) 면진(지진격리)구조 개략도



(b) 면진(지진격리)시스템 설치 공간

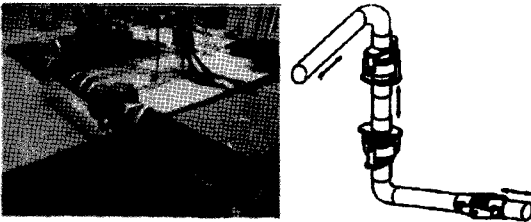


(c) 면진(지진격리)시스템 설치 공간

(그림 21) Cruas-Meysses NPP 면진 System

집이 발생되어 구조물로 전해지는 지진력에 대해 감쇠효과를 갖도록 설계되었다.

하지만, 프랑스 Cruas-Meyssse NPP 면진(지진격리)시스템에 쓰인 Neoprene 합성 고무는 시간이 지나면서 강성의 변화가 발생했으며, 남아공의 Koeberg NPP 면진(지진격리) 시스템에 쓰인 합성 강재 표면에서는 부식에 의한 심각한 기계적 물성 변화가 관찰되었다. 그로인해 미국은 자국 원전구조물의 면진(지진격리)시스템 연구를 진행하면서 프랑스와 남아공 원자력발전소에 적용된 면진(지진격리)시스템에 대해 부정적 견해를 보였다.



〈그림 22〉 배관에 적용된 면진(지진격리)시스템

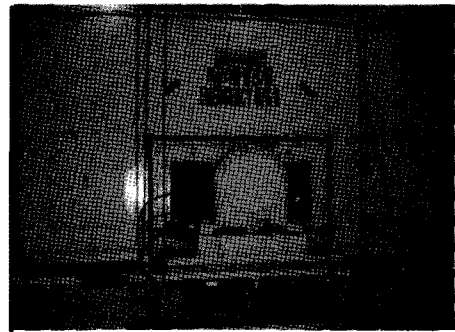
면진(지진격리)받침을 이용해 공동기초 위에 건설된 원전설비의 지진시 안전성을 확보 하였다면, 공동기초 외부의 시설물과 연결되는 배관 등에 대해서도 지진시 안전성을 확보해야 한다. 그림 22은 배관 조인트에 짐발(Gimbal)을 적용해서 수평 및 수직 변위를 허용할 수 있도록 고안된 장치이다. 이 장치로 인해 지진시 시설물간에 상대변위가 발생하여도 허용된 범위 내에서 안전하게 제 기능을 할 수 있다.

3.2 국내 현황

우리나라는 1958년 공표한 원자력법을 기반으로 원자력발전을 도입한 이후, 1978년 4월 고리원전 1호기가 첫 상업운전을 시작하여 현재 총 21기의 원자력발전소를 운영하고 있다. 설비용량은 1,872만kW로 미국, 프랑스, 일본, 러시아, 독일에 이은 세계 6위의 규모이다. 2009년도 국내 원자력발전량은 1,478억kWWh로 국내 총 발전량의 약 40%를 차지한다.(KONEPA, 한국원자력문화재단)

국내 원전구조물에 대한 내진설계기술은 이미 구축되어 실무에 적용하고 있지만 면진(지진격리)설계기술에 대한 기준은 아직까지 제정되지 않았으며, 발전소 보조건물 내부의 주요 설비나 터빈기초의 진동저감을 목적으로 면진(지진격리)장치를 설치하는 경우를 제외하고는 적용 경험 또한 전무하다.

그림 23은 울진 원자력발전소 3, 4호기 비상 디젤발전기에 설치되어 있는 진동저감을 위한 방진장치로 연직방향으로 헬리컬스프링과 댐퍼를 설치하여 수직방향으로 작용하는 진동을 저감시키는데 용이하도록 했다. 이러한 장치는 원전 이외에도 다른 발전소의 보조건물 내부에 있는 전력설비 등의 방진을 목적으로 설치되었다.



〈그림 23〉 울진원자력 3,4호기 비상디젤발전기

4. 맺음말

본 연구에서는 지진시 구조물의 건전상태를 유지하는 공법으로 내진공법, 제진공법, 면진(지진격리)공법에 대해 소개하였다. 특히 면진(지진격리)공법의 경우 적용 필요성이 증가하고 있는 상황으로 그 중요성과 적용범위 및 구성 요소들에 대해서 보다 자세히 검토하였으며 국내·외의 원전 구조물에 적용된 면진(지진격리)시스템 현황과 관련 기술에 대해 서술하였다.

이러한 검토를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 면진(지진격리)시스템을 적용한 구조물의 설계는 상부로 전해지는 지진력이 감쇠하여 보다 경제적인 설계가 가능하며 구조물 내의 칸막이 또는 설비시설 등

의 2차 피해 또한 방지할 수 있어 추가적인 비용 절감 효과를 가져온다.

2. 구조물의 면진(지진격리)시스템 설계시에는 설계기준에 따라 지진력의 수평 성분만을 고려해 왔으나 지진 피해사례 연구를 통해 수직력 성분의 중요성 또한 확인되었다.
3. 면진(지진격리)시스템을 구성하는 장치는 사용재료와 작용하는 지진력의 방향에 따라 여러 종류의 받침이 개발되어 다양한 분야에 적용 중이다.
4. 세계적으로 면진(지진격리)시스템을 적용한 원전구조물 시공사례는 프랑스의 Cruas-Meysse NPP 4기와 남아공의 Koeberg NPP 2기만이 존재하며, 보다 효율적이고 모든 방향의 지진력에 대해 면진(지진격리)기능을 수행할 수 있는 장치의 개발을 위해 다양한 연구가 진행되고 있다.

향후 추가적으로 건설될 약 430여기 원전의 내진안전성 확보를 위해, 합리적으로 고려된 지진력을 바탕으로 설계한 면진(지진격리)시스템을 적용한다면 보다 안전하고 경제적인 원전건설이 가능하리라 판단된다.

참고문헌

1. 박형기, 이유인, 정대유(2011), 폴리우레탄 스프링 복원형 디스크 받침의 동적거동에 대한 실험 및 해석적 연구, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제15권 제2호, pp. 61-69
2. 전대한(1995), 일본 고베 대지진의 특징과 지진피해 개요, 한국소음진동공학회지, 한국소음진동공학회, 제 5권 제1호, pp. 21-27
3. 최은수, 이주탁, 유성문, 이유인(2011), 철도구조물의 연직진동 제어기법에 관한 연구, 한국철도학회 춘계학술대회, 한국철도학회
4. 구한모(2011), 일본 후쿠시마 원전 사고의 경위와 향후 추이, 원자력산업, 한국원자력산업회의, 제 325호, pp. 27-37
5. 한국전력기술주식회사(2010), APR1400의 면진시스템 적용 계획, 2010 KEPIC-WEEK 면진설계 WORKSHOP
6. 한국도로교통협회(2010), 도로교 설계기준
7. Massimo(2010), Seismic Isolation of Advanced NPPs, Technical Meeting on Seismic Safety of NPPs Scuderie Estensi Tivoli, Italy, March 25-26
8. E. Blandford, E. Keldrauk, M. Laufer, M. Mieler, J. Wei, B. Stojadinovic, and P.F. Peterson(2009), Advanced Seismic Base Isolation Method for Modular Reactors, Technical Report, University of California Berkeley
9. Daniel M. Fenz and Michael C. Constantinou (2006), Behaviour of the Double Concave Friction Pendulum Bearing, Earthquake Engng Struct. Dyn., Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 35, 1403-1424
10. Sanjeev R. Malushte and Andrew S. Whittaker (2005), Survey of Past Base Isolation Applications in Nuclear Power Plants and Challenges to Industry/Regulatory Acceptance, 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology
11. Pierre Labbe(2010), Pioneering Actual Use of Seismic Isolation for Nuclear Facilities, 1st Kashiwazakii International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations
12. ASCE Standard 4 (1998), Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, published by the American Society of Civil Engineers(ASCE)
13. ASCE Standard 43 (2005), Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities, published by the American Society of Civil Engineers(ASCE)