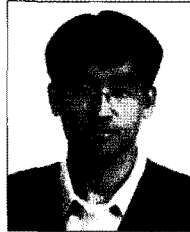


Hydrocode의 적용을 통한 원자력 시설의 대형 민항기 충돌

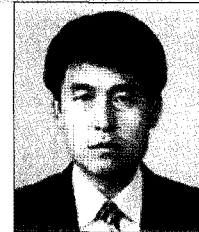
The Applicability of Hydrocode to the Problem of Large Aircraft Impact Simulation of Nuclear Power Plants



이 경 수*



신 상 섭**



박 대 효***

* 한양대학교 건설환경공학과 박사후과정
** 한양대학교 건설환경공학과 석사과정
*** 한양대학교 건설환경공학과 교수

1. 개요

대형 민항기에 의한 세계무역센터 빌딩과 펜타곤의 9.11 테러 이후(그림 1), 원자력 시설물과 같은 국가적 중요시설

물에 대해서 군사용, 상업용 비행기 및 원거리에서 발사된 미사일의 충돌/폭발과 같은 새로운 형태의 하중조건을 검토해야만 하는 필요성이 증대되고 있다. 이러한 새로운 형태의 하중은 이전에는 경험하지 못하였거나 혹은 중요시



그림 1 9.11테러(세계무역센터 빌딩 붕괴, 펜타곤 파손)

여기지 않았던 경우이다.

또한 최근 들어 국내외적 사회적, 경제적으로 전기 사용은 날로 증가하고 있는 상황에서 지구온난화의 주범인 화석연료의 사용은 엄격히 규제 받고 있다. 온실효과의 영향이 비교적 적은 청정에너지로 인식되고 있는 원자력에너지에 대한 요구

및 필요성은 날로 증가하고 있으며, 원자력발전의 친환경적 측면이 주목받고 있다. 이에 국내외에서는 원자력발전용량을 더욱 늘리고 있으며, 지금까지 축적된 시공, 운영관리 기술을 바탕으로 해외 원전의 수주까지 이르게 되었다.

그림 2는 현재 국내에 도입된 원자력발전소의 현황 및

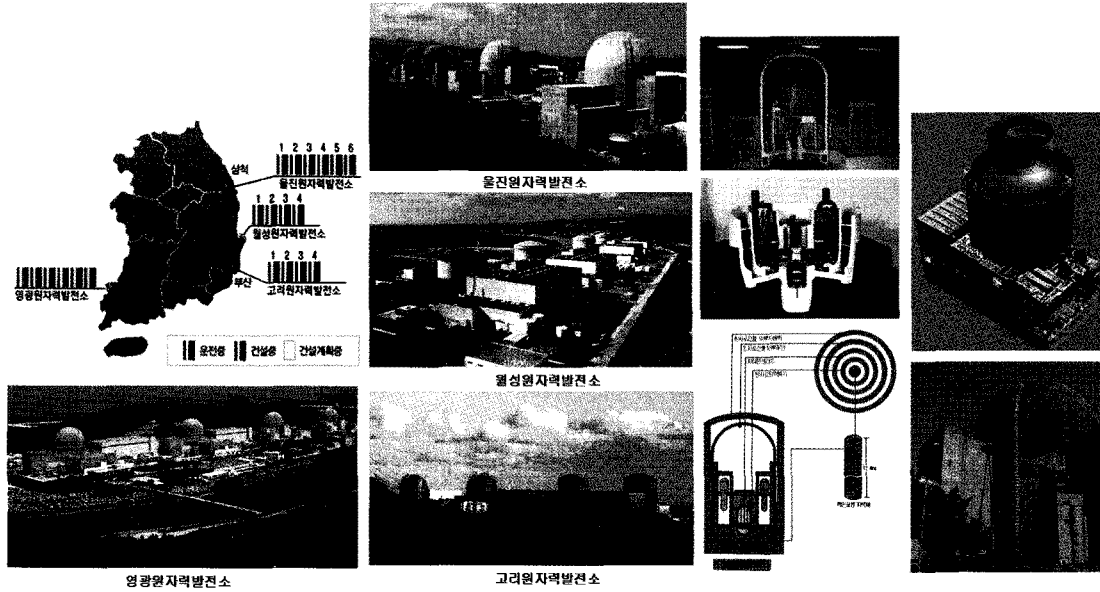
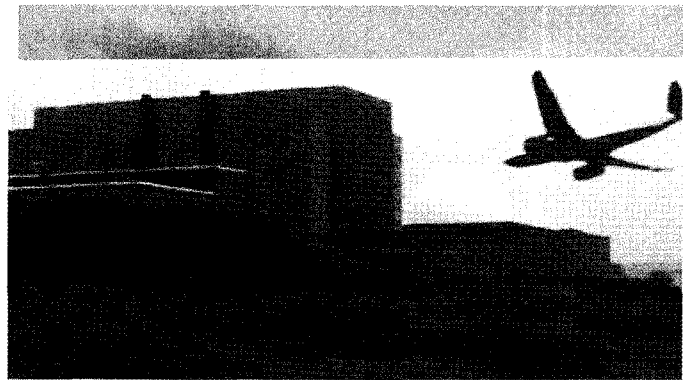


그림 2 국내 원자력발전소의 분포 현황



(www.fatalfallout.com)



(www.flickr.com)

그림 3 원전시설물에 근접한 항공기 및 항공시설의 예

원자로의 구조를 설명한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 원자로 내부는 5중구조로 이루어지는 등, 외부의 충격에도 내부 원자로를 보호할 수 있도록 설계되어 있다. 또한 원자력 발전소 반경 3.2km 지역을 비행금지 구역으로 설정하여 철저히 대비하고 있다. 그러나 외국의 경우 그림 3과 같이 원자력 시설과 매우 근접하여 비행기가 비행하고 있는 경우를 발견할 수 있으며, 실제로 비행금지 구역을 약간 벗어난 비행은 전혀 규제를 받지 않고 있다.

따라서 원전시설과 같은 중요시설에서 비행기 등에 의한 테러 및 비정상 하중에 의한 구조물의 충돌, 폭발에 대한 안전성을 확보하기 위한 가이드라인, 혹은 설계기준이 도입될 필요성이 대두되고 있다.

본 원고에서는 비선형 수치해석법을 이용한 원전시설에 대한 비행기 충돌 해석기법 및 해석결과의 소개를 목적으로 하며, 이를 통하여 관련분야 연구자와 상호 정보교류를 하기 위함이다.

2. 해석 수행의 목적

세계무역센터에 대한 9.11테러 이후 필요성이 증가하고 있는, 국가 중요시설인 원전시설물(원자로)에 대한 테러 등의 비정상상태의 하중에 대한 안전성을 확보하기 위하여, 새로운 형태의 잠재적 테러 위험 중 그림 4, 5와 같은 대형 비행체에 의한 원자로 충돌 및 충돌에 의한 2차, 3차적 비정상 하중에 대한 안전성을 평가하고, 그림 6과 같이 추가

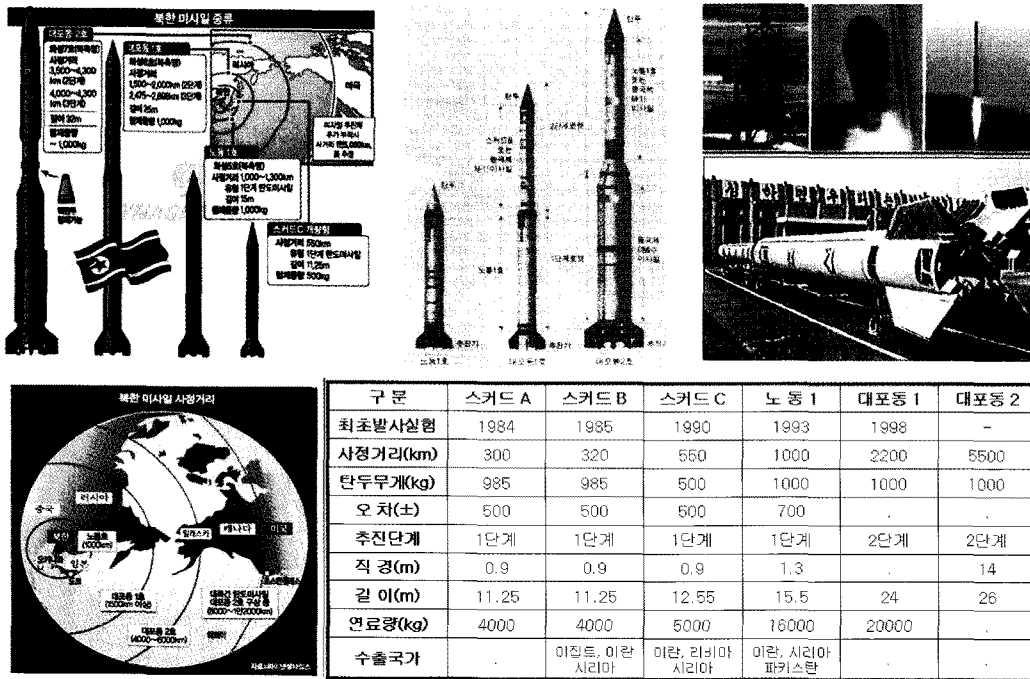


그림 4 북한의 미사일 종류(www.unme.or.kr)

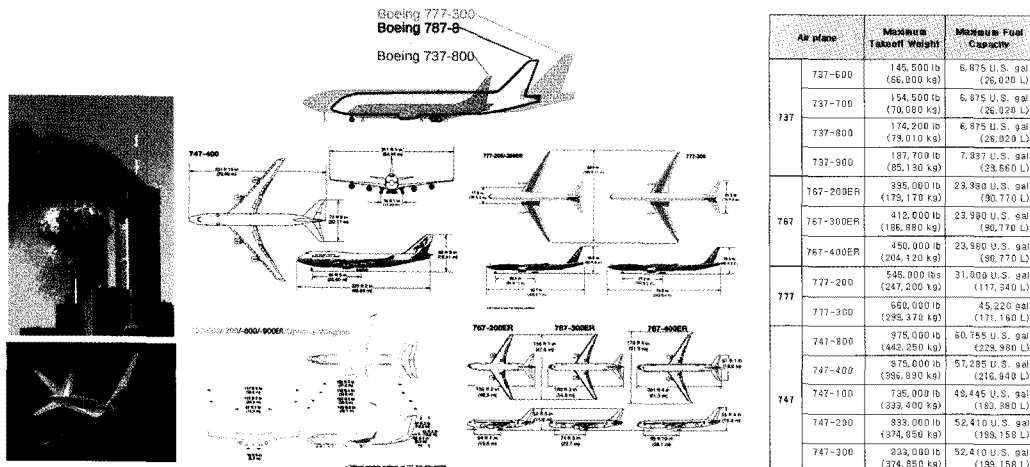


그림 5 보잉의 상업용 비행기의 종류(www.boeing.com)

집재적 위험요인에 의한 원자력발전소 원자로의 안전성 평가 및 구조보강 안 제시

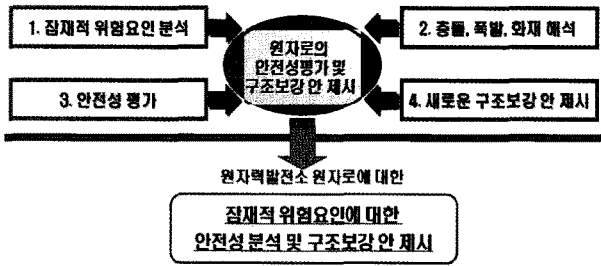


그림 6 수치 시뮬레이션의 목적

적인 안전성을 확보하기 위한 가이드라인을 제시하며, 또한 이를 통하여 새로운 구조보강 안, 대안설계 및 매뉴얼을 작성하고자 하였다.

이에 대한 기초연구 및 안전성평가 기법의 수립을 위해서 그림 5와 같은 대형 비행체가 원전의 외부 격납고에 충돌하였을 경우에 대한 수치 시뮬레이션을 통하여, 원전시설의 유한요소모델링 방법, 수치해석 결과의 평가기법 등을 확립하고자 하였다.

3. 해석 수행의 내용 및 방법

그림 7에서 나타내고 있는 해석수행의 대상은 원전시설 중 그 중요성이 가장 큰 원자력발전소의 원자로이며, 이 중 외부충격하중이 직접적으로 영향을 미칠 것으로 예상되는 외부 콘크리트 격납고에 대한 비정상 하중 충돌해석이다. 연구의 수행을 위한 첫 번째 단계로 문헌 및 자료조사를

<원자력발전소 원자로에 적용 가능한>

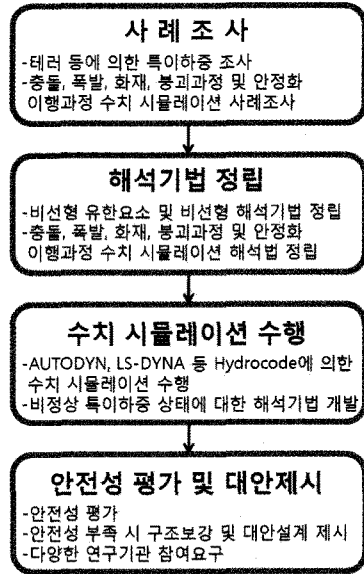
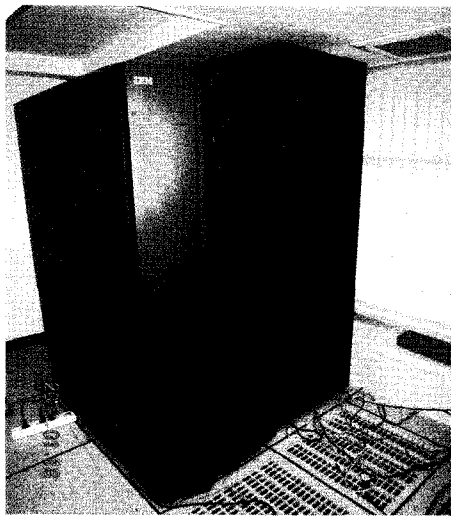


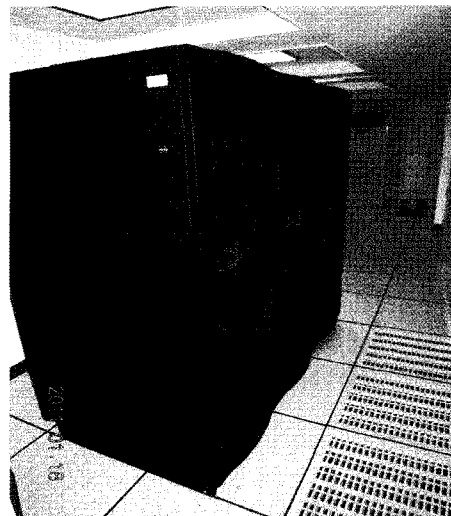
그림 7 해석 수행의 내용 및 방법

통하여 테러와 같은 특이하중을 조사하고, 충돌, 폭발, 화재, 붕괴과정과 같은 수치 시뮬레이션의 사례를 수집하여 데이터베이스를 구축하며, 이후 실제 컴퓨터 수치해석을 수행하기 위한 비선형 수치해석기법을 수립한다.

여기에서 나타내고 있는 수치 시뮬레이션 수행은 Linux Server(그림 8)에 설치되어 있는 범용 Hydrocode인 ANSYS/AUTODYN이 사용되었다. 위의 상용소프트웨어는 본 시뮬레이션에서 고려하는 충돌, 폭발과 같은 비정상하중에 의한 구조물의 거동특성을 규명할 수 있으며, 사용자에 의해



IBM UNIX SERVER P570
 -CPU : 32core(64Thread)
 -Memory : 32GB
 -Disk : 2TB
 -Speed of parallel processing : 52G Flops



LINUX SERVER(QDR InfiniBand 144port)
 -CPU : 272 core
 -Memory : 816GB
 -Disk : 35TB
 -Speed of parallel processing : 1T Flops

그림 8 수치해석을 위한 보유 하드웨어(csmlab.hanyang.ac.kr)

새로운 재료모델을 추가할 수 있는 기능을 가지고 있다.

향후 수치해석을 통해 얻은 정보를 바탕으로 지속적인 연구를 수행하여 얻은 다양한 평가지표를 근거로 하여 원자로의 안전성평가의 기반을 마련할 수 있을 것이며, 이때 설계변수 및 외부하중에 대한 민감도해석을 수행하여 보다 다양한 경우에 대한 광범위한 해석결과의 데이터베이스를 구축하고, 확률적 분석 수행에 도움이 될 것이다. 또한 연구의 최종단계에서는 원자로의 안전성 평가결과를 기준으로 새로운 매뉴얼의 작성, 보강 안 제시, 설계 방안 제시 등, 실무적 연구를 위한 기반을 마련하고자 한다.

4. Hydro-code의 정의와 적용분야

우리는 일상적으로 차량의 충돌사고, 공장이나 가정의 화재나 폭발사고 등을 접한다. 거의 매일 밤 TV 뉴스에 이러한 사건, 사고는 단골뉴스가 되었으며, 천안함 침몰이나 포격에 의한 연평도 민간 주택의 파괴와 같은 경우에는 사회적으로 큰 이슈가 되었다.

현상적으로 항상 우리의 생활과 밀접하게 연관된 이러한 충돌, 폭발, 화재 등의 물리적 현상은 구조 해석적으로 어려운 분야이다. 일반적으로 구조물이 경험할 수 있는 가장 큰 변형이나 파괴는 굉장히 빠른 속도를 가진 물체가 다른 물체에 충돌하였을 때 발생한다. 이때 충돌부위에서는 대변형이 발생하고, 경우에 따라서 변형에너지는 폭발 및 화재의 형태로 발현하게 된다.

이러한 물체의 Hypervelocity impact에 의한 재료의 대변형, 대회전, 대변형률, 상태변화의 현상을 해석하는 코드를 Hydrocode라 한다. Hydrocode는 이론적으로 전산연속체역학을 바탕으로 유체나 고체, 또는 고체와 유체의 결합으로 이루어진 연속체를 대상으로 한다. 따라서 Hydrocode는 전산고체역학과 전산유체역학을 포함하는 광범위한 해석분야를 포함하는데, 고체역학을 기본으로 Lagrangian code와 유체역학의 Eulerian code가 개발되어 왔으며, 각각의 Lagrangian, Eulerian code의 단점을 극복하기 위해 ALE, SALE, CEL, SPH의 이론이 개발되어 각각의 Hydrocode에 추가되고 있다.

우리에게 많이 알려진 Hydrocode는 LS-DYNA, PARM-CRASH, ANSYS/AUTODYN, MSC/DYTRAN 등이 있으며, 이들 코드의 공통된 특징은 고체역학의 Lagrangian code를 기본으로 Eulerian 해석기능이 추가되었다는 것과, 미국의 국방연구소에서 개발이 시작되어 상용화되었다는 점이다.

Hydrocode는 Hypervelocity impact, blast해석을 위해서 explicit해석법을 사용하고, 물체 간 상호 충돌해석을 위해서 접촉면 탐색기법을 보유하고 있으며, 재료의 상태방정식을 사용하고 있는 점이 일반적인 유한요소해석 프로그램과 구별된다고 할 수 있다.

여러 Hydrocode 중, 본 시뮬레이션에 이용되어진 AUTODYN

은 1985년 캘리포니아에서 설립된 Century Dynamics, Inc.는 1986년에 AUTODYN-2D를 발표하였고, 3차원 버전인 AUTODYN-3D를 1991년에 발표하였다. 이후 Eulerian 기능과 CEL, ALE, SPH를 보강하였으며, 현재는 ANSYS의 자회사로 흡수되어 ANSYS/AUTODYN으로 배포되고 있다.

AUTODYN은 유한요소법, 유한차분법, 유한체적법을 사용하고, 비교적 간단한 인터페이스에 의해 PC에서 구동되는 고체, 유체, 기체역학분야에 고루 사용될 수 있는 범용 Hydrocode 이다. AUTODYN의 장점은 해석절차 및 프로그램의 사용이 편리하고 간단하다는 점이다. 고체와 고체, 유체와 유체 및 고체와 유체의 상호 접촉면 계산이 자동으로 이루어지고, 다양한 재료모델이 라이브러리로 제공된다. 특히 Fluid-structure interaction 해석을 위한 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian), CEL(Coupled Eulerian-Lagrangian), SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 기능을 쉽게 사용할 수 있어, 복잡하고 다양한 물리적 현상의 해석을 쉽게 수행할 수 있다.

■ Hydrocode의 적용분야

- ① 군사, 무기분야
 - Impact/Penetration
 - Armor and anti-armor systems
 - Kinetic energy and chemical energy devices
 - Underwater shock and explosions
- ② 항공분야
 - Bird strike
 - Material forming
 - Impact, explosion and shock loadings
 - Space debris impact
- ③ 석유화학분야
 - Gas and dust explosions
 - Accident simulation
 - Fluid sloshing
 - Well perforation
- ④ 원자력분야
 - De-commissioning
 - Pipe break and whip
 - Jet and missile impingement
 - Fluid-structure interaction
- ⑤ 자동차분야
 - Explosions in vehicles and tunnels
 - Crashworthiness
 - Occupant dynamics
 - Safety
- ⑥ 교육분야
 - Solid, fluid and gas dynamics
 - Study of stress and shock waves
 - Constitutive model development
 - Material response

5. 수치 실험 모델

국내에 적용된 원자로 모델은 초기의 CANDU형에서 OPR1000형을 거쳐 국내 기술에 의해 개발된 APR1400형이 신고리 3,4호기 및 UAE의 수출형 원전에 적용되었다. 본 연구에서는 원자로 외부격납고에 대한 비행기충돌 해석을 수행하기 위해서, 기존 문헌을 토대로 CANDU형(그림 9), OPR1000형(그림 10) 원자로의 개략적인 유한요소모델을 준비하였다. 해석모델 및 보강판에 대한 거동특성을 분석하기 위해서 그림 11과 같이 4가지 조건의 해석모델을 만들었다. 실제의 원자로 외부격납고에는 텐던 및 매우 조밀한 보강철근이 배치되었지만, 본 연구에서는 해석모델 생성의 제약으로 인하여 텐던은 생략하였고, 보강철근은 그림 9, 그림 10과 같이 단순화하여 트러스요소로 모델링하였다. 또한 외부 보강판의 효과를 고려하기 위해서 10mm, 50mm의 외부 보강판이 도입되었을 경우에 대해서 해석을 수행하였으며, 콘크리트는 솔리드요소로 모델링하여 35MPa강도의 RHT 콘크리트모델을 적용하였고, 원전시설에 대한 충돌체는 그림 5의 보잉사의 상업용 비행기중 Boeing-767 기종을 선정하여, 알루미늄재료의 Shell요소로 모델링하였다. 비행기의 충돌속도는 150m/s로 가정하였고, 이상적으로 벽면에 대해서 수직으로 충돌하는 것으로 가정하였다.

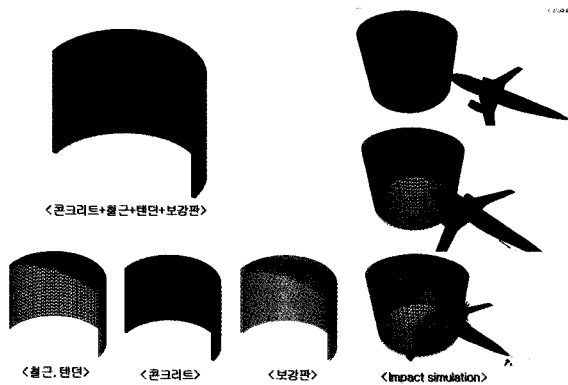


그림 9 CANDU형 모델

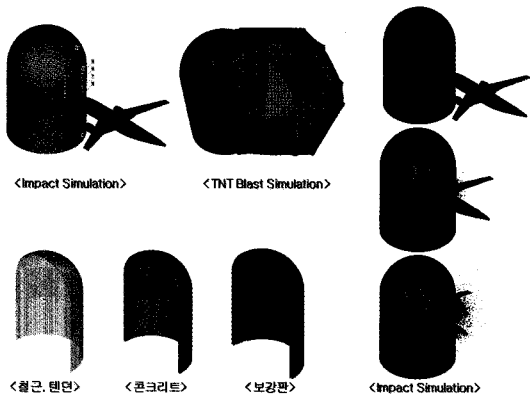


그림 10 OPR1000형 모델

6. 수치실험 결과

비정상 충돌에 의한 각각의 원전 시설의 모델에 대한 파괴거동 분석을 통하여 충돌에 대하여 구조적으로 가장 안정적인 구조시스템을 선택하고자 하였다. 비록 해석모델이 실제 원전시설과 차이가 있을 것으로 예상되지만, 전체적인 크기는 실제 원전시설과 유사하며, 따라서 실제거동과 수치해석에 의한 거동차이는 크지 않을 것으로 예상된다.

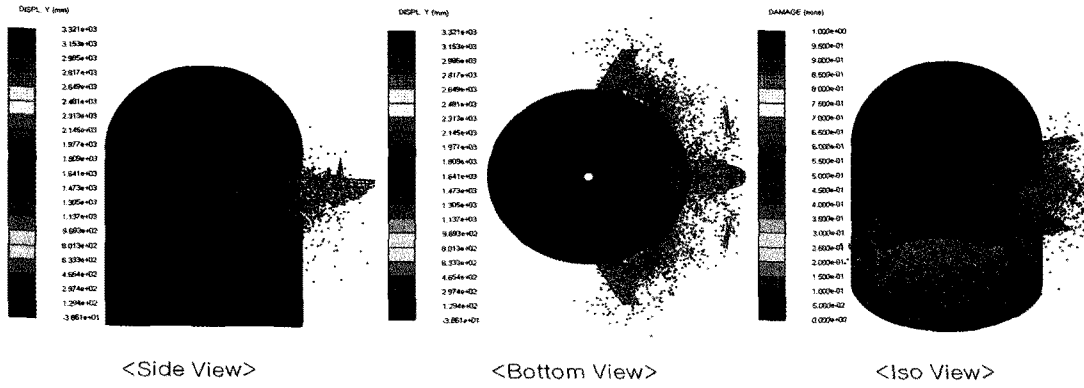
해석에 적용한 동일한 조건하에서 해석모델의 유한요소 모델링 방법 및 보강 안에 따른 거동차이를 그림 11에 나타내었다. 철근보강 여부에 따른 콘크리트재료의 거동특성을 분석하기 위해서 그림 11(a), (b)와 같이 plane concrete와 reinforce concrete로 모델링하여 해석을 수행하였다. 그림 10에서 철근모델과 콘크리트모델에 대한 유한요소모델을 확인할 수 있다.

그림 11(c), (d)는 그림 11(b)의 reinforce concrete모델에 내부 보강판과 외부 보강판을 추가하였을 경우의 해석결과이며, 각각 10mm, 50mm의 Shell 요소에 의한 강판을 사용하였다. 그림 11(a)와 같이 plane concrete에 의한 원전시설은 상업용 비행기와 같이 대형 비행체가 충돌하였을 때 재료적 파괴가 충돌부위에 집중적으로 나타남을 알 수 있었고, 충돌 후 변형이 크게 발생하였다.

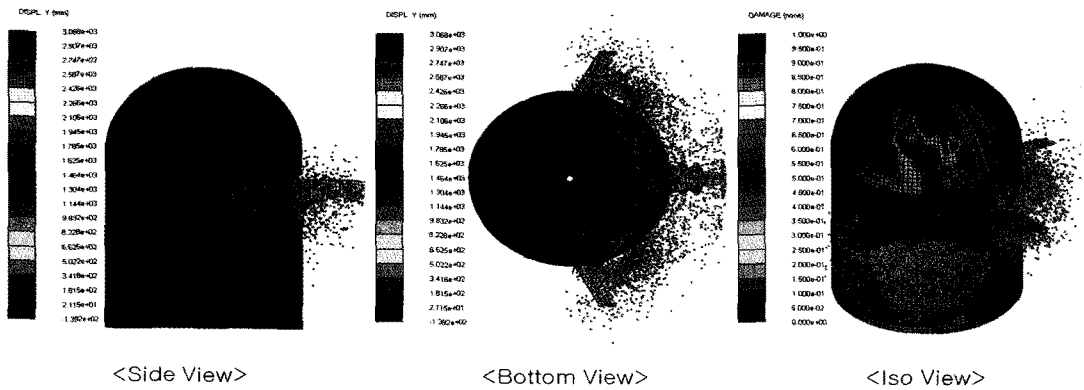
이에 비해서 철근으로 보강한 그림 11(b)는 손상 및 변형이 주변으로 전파되는 형태를 해석결과와 그림으로 확인할 수 있었는데, 이는 철근에 의한 보강효과에 의해 충돌부위의 손상이 철근의 배근에 따라 구조물로 흡수되기 때문이다. 그러나 비행체와의 충돌에 의한 과대 응력의 발생으로 충돌부위의 콘크리트재료는 크게 손상이 발생함을 알 수 있는데, 이는 철근보강에 의해서 전체적인 구조물의 변형은 감소할 수 있지만, 충돌부위에서 콘크리트의 재료적 파괴까지는 방지할 수 없기 때문이다. 실제로 그림 13의 팬텀기의 콘크리트벽체(3m) 충돌실험의 예(www.sandia.gov)에서 알 수 있듯이 빠른 속도를 가진 비행체가 콘크리트면에 충돌하면, 콘크리트는 재료적으로 과도한 손상을 입을 수 있음을 알 수 있다. 비록 그림 12의 실험을 통하여 전체적인 구조적 안정성을 확보할 수 있다고 하지만, 콘크리트재료의 파괴는 원전시설의 안전성에 중대한 영향을 미칠 수 있다.

그림 11(c), (d)는 콘크리트벽체 외부에 보강판을 설치하였을 때의 해석결과이다. 외부 철판의 보강에 따라 변위가 감소함을 알 수 있는데, 그림 11(d)와 같이 50mm의 철판으로 외부를 보강하면, 철판 내부 콘크리트벽체의 재료적 파괴를 예방할 수 있기 때문이며, 이에 따라 구조적 안정성도 증가함을 알 수 있다.

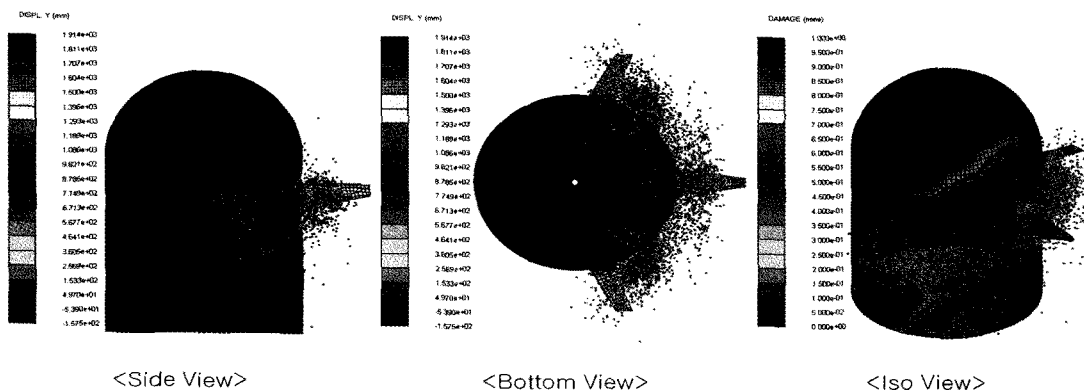
그림 12는 각 해석모델에 대한 속도와 에너지를 비교한 것으로 50mm 철판으로 보강한 모델은 그림 12(a)과 같이 탄성에 가까운 거동을 하고, 철판의 보강여부에 따라 구조적인 안



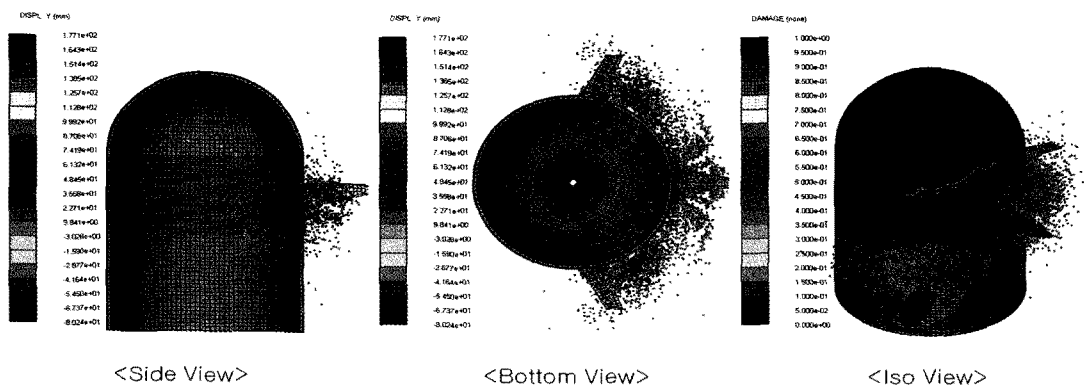
(a) Plane concrete



(b) Reinforced Concrete



(c) Reinforced Concrete + Steel Plate(10mm)



(d) Reinforced Concrete + Steel Plate(50mm)

그림 11 OPR1000형 원자로의 해석모델에 따른 해석결과(Damage, Displacement)

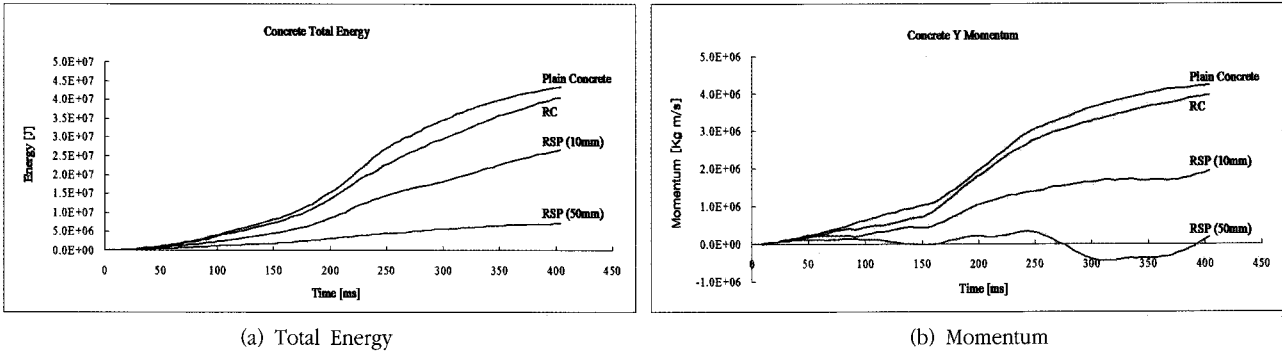


그림 12 OPR1000형 원자로의 해석모델에 따른 해석결과 그래프

정성이 증대되고 있음을 알 수 있었다. 이에 비하여 비행체의 충돌에 대해서 철근의 보강효과는 미미함을 알 수 있다.

7. 결론 및 기대효과

Hydrocode인 AUTODYN을 이용하여 원전시설 외부 격납고에 대한 비행기 충돌 시뮬레이션을 수행하여, 해석기법의 적용성 및 비행기 충돌에 대한 각각의 해석모델에 대한 거동특성을 평가하였고, 시뮬레이션 결과를 토대로 민

감도해석 및 평가지표에 따른 대상구조물의 안전성을 평가할 수 있었다. 향후 지속적인 연구를 수행한다면 설계기술 및 방재기술의 향상을 유도할 수 있을 것이며, 비정상 상태에 대한 불확실성의 해소에 기여할 것으로 판단된다.

현재 활발히 진행되고 있는 국내의 원전시설물의 설계에서 구조물의 안전과 관련된 분야가 새로운 연구과제로 주목받고 있으며, 다양한 목적과 형식의 프로젝트들이 진행 중에 있는 상황에서 본 연구결과는 비정상하중에 대한 안전성평가라는 새로운 연구 분야를 개척하는 초석이 될 수 있을 것이다. 또한 진보된 설계기술의 확보 및 향상을 통해 국내 건설업계의 시공, 설계, 엔지니어링 등 관련분야의 시장 활성화에 도움이 될 것이며, 원전시설의 해외진출을 위한 차별화된 연구 및 설계 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업(WCU)으로부터 지원받아 수행되었습니다(R32-2008-000-20042-0). 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 하재선(2003) 가상일의 원리에서 유한요소코드, 그리고 Hydrocode까지, 전산구조공학회, 제16권 제2호, pp.13-29.
2. 전세진, 이윤석, 정철현, 정연석(2005) 대형 민항기 충돌 하중에 대한 국내 원전 격납건물의 동적 비선형 응답, 대한토목학회논문집, 제25권, 제1호, pp.1-10.
3. Centry Dynamics, Ltd(2005) AUTODYN Theory manual.
4. John O. Hallquist(1998) LS-DYNA THEORETICAL MANUAL.

[담당 : 강형택, 편집위원]



그림 13 팬젯기의 벽체충돌실험
(www.sandia.gov)