

재료 동특성을 고려한 고속충돌 시뮬레이션

이상훈, 방경식, 이주찬, 최우석, 서중석, 서기석, 김호동, 정세환*, 허훈*

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

* 한국과학기술원, 대전광역시 유성구 과학로 335

shlee1222@kaeri.re.kr

1. 개요

한국원자력연구원에서는 사용후핵연료 임시저장 시설과 용기의 항공기 충돌 안전성 해석평가를 수행하기 위한 기술개발을 작년부터 수행하고 있으며 해당 연구의 일환으로 고속충돌 전산시뮬레이션에 필요한 재료 동특성을 시험적으로 평가하고 이를 반영한 전산시뮬레이션을 수행하는 작업을 진행하고 있다. 이 논문에서는 항공기 충돌과 같은 고속충돌(high speed impact) 문제에서 재료의 동특성을 고려해야하는 필요성을 논하고 사용후핵연료 수송/저장용기에 사용되는 주요 금속재료의 동특성을 시험적으로 취득하는 연구내용에 대하여 논한다. 시험적으로 얻어진 데이터를 가공하여 전산시뮬레이션에 활용하는 방법 및 간단한 예제에 대하여 수행한 해석결과를 제시하고자 한다.

2. 재료 동특성 및 시험평가

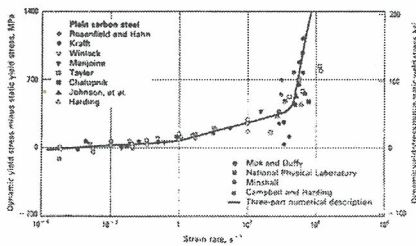


Fig. 1. 탄소강 항복응력의 변형률속도 의존성

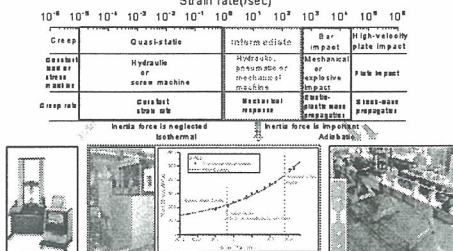


Fig. 2. 재료동특성 시험평가 기법 및 장비

일반적으로 재료는 변형률속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하며, 이때의 동적 하중과 정적 하중의 관계는 변형률속도에 의존하게 된다. 금속재료는 변형률속도가 증가할수록 강도가 증가하는 일반적인 경향이 있으나 그 정도가 각 재료마다 다르기 때문에 실험을 통해 고유의 물성치를 획득해야한다. 그림 1은 변형률속도의 자연대수 함수에 따른 탄소강의 항복응력의 변화를 나타낸 그림이다. 변형률속도가 증가할수록 항복응력이 점차 증가하다가 수천/sec을 지나면서 항복응력이 급격히 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 강도가 높은 재료일수록 변형률속도 경화 현상이 작아지는 경향을 보인다.

이러한 동특성을 올바르게 평가, 측정하기 위해서는 각각의 변형률 대역에 적절한 시험 장비를 구축할 필요가 있으며, 특히 변형률속도가 수백/sec이상으로 높아지는 경우에는 부재가 균일하게 변형하지 않기 때문에 길이 방향을 따라서 전파하는 응력파를 고려할 수 있는 시험장비가 필요하다. 그림 2는 본 연구에서 사용된 시험평가 기법을 변형률속도 대역에 따라 도시한 것이다. 수백/sec까지의 대역에서는 중고속인장시험기가 사용되었으며 그 이상의 대역에서는 인장형 Hopkinson바 시험기가 사용되었다.

본 연구에서는 사용후핵연료 수송/저장용기에 많이 사용되는 SA-B193 B7, SA-182 F304, SA-350 LF3, SA-240 316L, SA240 304 총 5가지 강종의 동특성 시험평가를 수행하였다.

3. 재료 동특성 시험평가 결과 및 데이터 가공

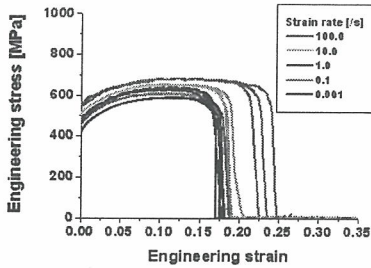


Fig. 3. 동특성 시험평가 결과 (SA350 LF3)

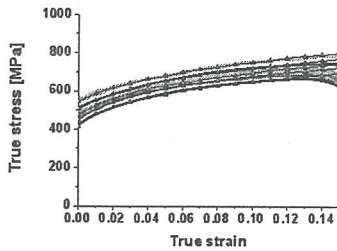


Fig. 4. 구간선형 소성모델로 가공된 데이터

그림 3, 4에 본 시험을 통하여 얻어진 데이터의 일부를 도시하였다. 시험을 통하여 얻어진 공칭응력-변형률선도를 진응력-변형률선도로 변환한 후, 균일 연신율을 보이는 구간에서 특정 점들을 기준으로 취하여 각각의 곡선을 Cowper-Symonds 곡선으로 근사한다. 이 곡선들로부터 충분한 데이터 포인트를 재생성한 후 이로부터 구간선형소성모델의 데이터를 얻어낸다. 구간선형소성모델 데이터는 ABAQUS/Explicit나 LS-DYNA와 같은 해석프로그램에 데이터 테이블의 형태로 직접 입력이 가능하여 추가적인 데이터 가공 없이 전산 해석을 수행할 수 있다.

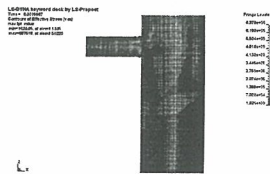


Fig. 5. 단순화된 금속 CASK와 엔진 missile의 충돌 해석 (coupled)

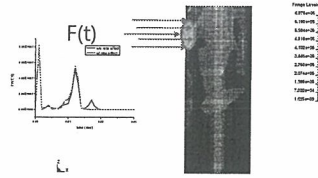


Fig. 6. 단순화된 금속 CASK와 엔진 missile의 충돌 해석 (decoupled)

4. 고속충돌 전산시뮬레이션 및 결론

항공기(F4-Phantom)의 엔진을 모사한 단순화된 Missile과 금속용기의 단순화 모델의 충돌을 고려한 전산시뮬레이션을 수행하였다. Missile을 직접 용기에 충돌시키는 연성된 방법 및 missile과 강체 벽의 충돌해석을 선행하여 충격력을 먼저 산정한 후 이를 용기에 적용하는 비연성 방법 두 가지 모두 수행하여 결과를 비교하였다. 두 가지 경우 재료의 변형률속도 의존성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하였는데, 변형률속도 의존성을 고려한 경우 충격력이 약 7% 가량 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 Missile이 고속 변형하는 과정에서 큰 변형률속도에 의하여 소성변형의 경화효과가 증대되었기 때문이다. 일반적으로 변형률속도 의존성은 재료의 유동응력을 증가시키기 때문에 이를 고려하지 않는 경우 보다 보수적인 평가를 할 수 있다고 생각하기 쉽지만, 이 문제에서와 같이 충돌체, 혹은 충격완충에 사용되는 완충체의 변형률속도 의존성을 고려하지 않는 것은 결코 보수적이지 않은 가정을 확인할 수 있었다.

5. 참고문헌

[1] M. A. Meyers, Dynamic Behavior of materials, John Wiley & Sons, New York, 1994.