

상온 및 운전온도에서 부분 지지격자의 진자식 충격특성시험

Pendulum Type Impact Test on the Partial Spacer Grid
under Room and Operating Temperature Conditions

윤경호, 강홍석, 김형규, 송기남, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요약

지지격자 동적 충격특성시험의 목적은 지진이나 냉각재상실사고 발생 시 핵연료집합체 지지격자에 가해지는 측면 충격하중으로부터 지지격자의 기계/구조적 건전성을 평가하기 위한 자료를 확보하기 위함이다. 지지격자의 동적 충격특성을 파악하기 위해 상온 및 고온에서 진자식 충격특성 시험을 수행하였다. 핵연료집합체의 한 스펠에 해당하는 질량의 해머를 초기 일정각도에서부터 충격을 가하여 격자체 시편에 좌굴이 발생할 때까지 반복적인 충격을 가하여 지지격자의 충격특성을 파악하였다. 지지격자의 충격특성은 온도에 의해서도 영향을 받으며, 온도가 상승할수록 지지격자의 충격특성들은 낮아지는 것으로 나타났다.

Abstract

The purpose of the dynamic impact test of a spacer grid is to evaluate the lateral impact strength of it for seismic and LOCA, and to estimate scale for the mechanical and structural integrity of the spacer grid. Therefore, the dynamic impact test is performed to estimate the dynamic impact characteristic of a grid by pendulum type impact test. It is executed the room and operating temperature condition for the simulating the active core boundary condition. The initial impact angle is predefined by pre-test and recursively initiated the impact event until occurring the plastic buckling of the grid specimen. The dynamic impact characteristic of a grid is influenced the imposed temperature condition, and the critical impact acceleration of a grid is reduced when the temperature of the specimen is the higher and higher.

1. 서론

지지격자 충격시험은 일종의 동적 충격시험으로 이 시험의 목적은 지지격자의 충격강성, 충격강도 및 복원인자(restitution factor)를 결정하는데 있다¹⁾. 본 연구에서는 고성능지지격자 구조기술개발과제에서 개발한 진자식 충격시험장치에 대해 기술하고 이 장치를 사용하여 지르칼로이 판재로 제조한 고유모형 부분격자체²⁾(5×5형)에 대한 상온 및 운전온도에서의 충격특성을 구하여 고유모형 지지격자 형상에 대한 기계/구조적 성능을 평가하고자 하였다. 또한 상온에서의 시험과 원전 운전온도에서의 충격특성을 비교함으로써 온도에 따른 지지격자의 충격특성도 고찰하였다. 지지격자의 충격특성은 지지격자가 핵연료집합체내에서 직립으로 장전되어 지진 및 냉각재상실사고 시 측면에서 충격하중을 받게 되므로 지지격자에 측면 충격하중을 가하고 이 충격에 대한 가속도, 속도 및 충격력을 격자체 시편 내에 좌굴이 발생할 때까지의 데이터를 취득하여 지지격자의 충격특성을 파악하였다.

2. 지지격자에 대한 동적 충격특성시험

2.1 개요

노내에서 지지격자는 연료봉을 지지하고, 냉각수의 이동경로를 제공할 뿐 아니라 외부에서의 동적 충격하중에 저항하는 기계/구조적 기능을 담당하는 주요 부품이다. 이러한 지지격자는 연료봉을 지지하기 위해 수직 및 수평판으로 구성되어 있다. 또한 지지격자의 외판(outer strap)은 핵연료집합체간 지진하중을 가능한 최대로 전달할 수 있도록 설계된 접촉면을 가지고 있다. 결과적으로 지지격자에 부과하는 제한하중은 측방향 지진 가속도, 냉각재상실사고에 의한 측방향 충격력, 운송 및 취급에 의한 측방향 충격하중 등에 의해 결정된다. 본 연구에서는 지르칼로이 판재로 고유형상 지지격자의 부분격자체(5×5형)을 제조하여 진자식 충격시험을 행하였다. 시험기에 부착된 가속도계 및 힘변환기(force transducer)를 통해 초기 충격해머의 각도를 변화시켜 가면서 충격가속도와 충격력을 얻는다. 이 시험은 상온에서 뿐 아니라 원전 운전온도(본 연구에서는 320℃를 설정)에서 수행함으로써 고온에서 지지격자의 충격특성도 파악하고자 하였다.

2.2 진자식 충격특성시험장치

진자식 충격특성 시험장치³⁾를 Fig. 1에 나타내었다. 시험장치는 메인 프레임, 충격해머, 전자식 해머고정장치, 해머 머니퓰레이터(manipulator), 고온로, 온도 컨트롤러, 신

호앰프, 시편 고정치구, 센서(가속도계, 힘변환기) 및 데이터 수집장치로 구성되어 있다. 충격해머는 부분격자체 한 스패(span)에 해당하는 질량을 가지며, 초기 정해진 충격각도로 전자석 해머고정치구에 의해 고정된다. Fig. 2에 나타난 충격해머는 4개의 연결봉(connecting rod)에 의해 머니플레이터에 고정되게 되는데, 이것은 시편의 크기변화에도 최저점에서 격자체에 충격을 가하기 위해 전후 및 해머의 길이를 가변할 수 있게 하였다. 또한 전면의 충돌 팁에 힘변환기가 위치하며, 이 충돌 팁과 해머의 질량부 사이에 가속도계가 나사로 고정된다. 5×5셀을 갖는 부분격자체의 충격시험에서 진자의 길이는 540 mm이며, 센서들을 포함한 해머의 질량은 12.874 kg으로 이것은 5×5셀 부분집합체 한 스패의 질량에 해당한다. 시편은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 격자체 시편을 브라켓으로 고정하며, 고정치구의 전면에는 충격하중을 균일하게 분포시키기 위한 평판이 있고, 이 평판은 네 개의 볼트로 고정된다. 또한 이 볼트에는 압축스프링을 내재시켜 외부의 충격하중에 의해 시편에 소성변형이 발생하여 충격 시 해머와 시편간에 간격이 발생하는 것을 방지하도록 하였다.

2.3 시험절차

Fig. 4에 나타난 5×5셀 부분격자체 시편(지르칼로이 0.35 mm 판재 두 장을 겹쳐 하나의 판을 형성하는 이중판격자체)을 고온로 내부에 위치해 있는 Fig. 3과 같은 시편 고정치구에 나사를 사용하여 고정한다. 초기 충격을 위한 해머의 각도는 예비 충격시험을 통해 결정하며, 결정된 해머의 각도로 전자석 해머 고정치구에 고정한다. 충격시험을 위한 시험조건의 설정을 완료한 후 해머를 해제하여 시편에 충격을 가한다⁴⁾. 상온에서 시험을 하는 경우에는 온도조절 프로그램을 기동하지 않고 초기 해머의 충격각도만 설정하고 시험조건을 메모항목에 입력한 후 충격하중을 가하는 절차를 진행한다. 그러나 온전온도에서 충격시험을 하는 경우에는 해머를 초기 설정된 각도로 고정한 후 노의 문을 닫고 온도조절 프로그램을 기동하여 설정된 온도까지 노를 가열한다. 그리고 설정된 온도에서 약 10분 정도의 유지시간을 가진 후 노의 문을 개방하고 충격해머를 해제하여 충격시험을 행한다. 충격에 대한 모든 결과들은 자동으로 저장되며, 시편 내부에 좌굴이 발생할 때까지 초기 해머의 충격각도를 1도 단위로 증가하면서 반복 충격하중을 가하고 데이터들을 저장한다. 시험데이터는 비록 충격시험기의 메인프레임이 노이즈 포함을 제거하는 강체의 구조로 되어 있지만 동적 충격하중에서 고주파 성분을 완전히 제거하기는 어렵다. 따라서 본 시험에서는 시험에서 저장되는 가속도 신호이력(acceleration time history)을 주파수도메인으로 전환하여 오토스펙트럼(autospectrum)을 구하고 고주파 성분의 노이즈를 제거하기 위해 하한치(threshold) 필터링을 수행한다. 이렇게 하한치 필터

링을 제거한 후의 가속도 데이터를 초기 해머의 충격각도 혹은 충돌속도에 따라 충격가속도를 충격특성⁵⁾으로 하였다.

3. 5×5셀 부분격자체에 대한 충격시험 결과

3.1 상온의 경우

박판을 이중으로 덧대어 단일 판을 형성하는 5×5셀을 갖는 이중판격자체의 충격 시험은 시편 5개를 사용하였다. 시험결과는 Fig. 5에 나타내었고, 임계 충격가속도를 나타내는 초기 해머의 충돌각도는 15도에서 16도로 나타났으며, 임계충격가속도의 값은 31 g에서 40 g의 범위를 가졌다. Fig. 6에는 각 시편에서 소성좌굴이 발생한 임계 충격가속도를 나타내고 있으며, 이들 각 시편에서의 임계 충격가속도의 평균은 Table 1에서 보듯이 약 35.9 g(352.1 m/sec^2)인 것으로 나타났다. 또한 예비 충격시험에서 가속도계로부터 얻은 가속도 신호에 해머의 질량을 곱해 얻은 충격력 결과와 힘변환기로부터 얻은 충격력의 결과는 거의 일치함을 확인하였다. 즉, 가속도계로부터 구한 임계 충격가속도의 평균인 35.9 g에 해머의 질량을 곱해 얻은 임계 충격력은 약 4533.4 N이었고, 힘변환기로부터 얻은 임계 충격력의 평균은 약 4561.6 N이었다. 이 두 결과가 거의 일치하는 것으로 시험기의 운동량 보존은 성립한다고 할 수 있다.

또한 이 격자체 시편의 임계 충격가속도를 나타내는 해머의 초기 충돌각도 15도에서 16도를 진자의 에너지 손실이 없다고 가정하여 최저점에서의 충돌속도를 계산하면 약 0.62 m/sec에 해당한다.

3.2 고온의 경우

고온에서의 충격특성시험은 앞서 기술한 바와 같이 다른 시험절차는 동일하나 시편을 고정하고 노의 문을 닫고 온도를 운전온도인 약 320℃까지 상승하고 인 온도를 약 10분간 유지한 후 노의 문을 개방하고 해머를 해제시켜 시편에 충격을 가하는 시험절차를 따라 시험을 하였다. 시편의 온도가 상승하게 되면 재료의 강도가 낮아져 임계 충격특성값들은 상온에서의 결과에 비해 작아지게 된다. 고온에서의 시험은 시편 4개를 사용하였다. 시험결과는 Fig. 7에 나타내었고, 임계 충격가속도를 나타내는 초기 해머의 충격각도는 10도에서 11도로 나타났으며, 임계충격가속도의 값은 약 16 g에서 25 g의 범위를 가졌다. Fig. 8에는 각 시편에서 소성좌굴이 발생한 임계 충격가속도를 나타내고 있으며, 이들 각 시편에서의 임계 충격가속도의 평균은 Table 1에서 보듯이 약 20.5 g(201.0

m/sec²)인 것으로 나타났다. 가속도계로부터 구한 임계 충격가속도의 평균인 20.5 g에 해머의 질량을 곱해 얻은 임계 충격력은 약 2588.2 N이었다. 또한 이 격자체 시편의 임계 충격가속도를 나타내는 해머의 초기 충돌각도는 10도에서 11도를 진자의 에너지 손실이 없다고 가정하여 최저점에서의 충돌속도를 계산하면 약 0.41 m/sec에 해당한다.

4. 결과 및 고찰

상온 및 고온에서 부분격자체의 진자식 충격시험을 통해 얻은 충격특성을 Table 1에 요약하였고, 각 온도조건에서 임계 충격가속도의 평균을 Fig. 9에 나타내었다. 격자체의 동적 충격특성은 온도가 증가함에 따라 감소하게 된다. 고온에서 진자식 충격시험을 통해 구한 5×5셀 부분격자체의 임계 충격 가속도는 상온에서의 약 0.6배로 작아진다. 지르칼로이 판재의 고온(운전온도인 320°C)에서의 항복강도는 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 상온의 약 0.7배에 해당하며, 탄성계수도 약 0.7배에 해당한다⁶⁾. 참고문헌 1)에 따르면 격자체의 충격특성은 상온에서의 결과가 고온에서의 결과에 비해 약 0.78배에 해당한다고 기술되어 있다. 이것은 재료의 항복강도비인 0.7배와 유사하다. 그러나 본 시험의 결과는 이보다는 작은 0.6배를 얻었으며, 이것은 고온에서의 시험오차와 고온시험 시 초기 해머의 충돌각도 설정 오차에 따른 것으로 보인다.

5. 결론

고안된 고유모형 부분격자체에 대해 진자식 충격시험을 통해 충격특성을 파악하고자 하였다. 시험은 상온에서 뿐 아니라 원전 운전온도 하에서 시험을 수행함으로써 격자체의 온도에 따른 충격특성의 변화를 조사하였다. 격자체의 충격특성은 온도에 따라 지르칼로이 재질의 항복강도가 감소되므로 충격특성 또한 이에 따라 감소하는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 얻은 상온과 고온에서의 임계 충격가속도비가 다른 시험결과에 비해 약간 낮은 것으로 나타났으며, 이것은 고온에서의 시험 시 시험오차에 의한 것으로 보인다. 그러나 가속도계를 통해 얻은 격자체에 좌굴이 발생하는 임계 충격가속도에 대한 결과와 힘변환기를 통해 얻은 임계 충격력의 결과가 잘 일치하는 것으로 보아 시험기의 에너지 보존은 성립한다고 할 수 있으며, 상온 및 고온에서의 시험결과도 다른 시험결과들과 유사한 경향을 보이는 것으로 미루어 볼 때 본 연구에서 사용한 진자식 충격특성 시험장치 및 방법이 신뢰할만한 것으로 보이고 있어 진자식 충격특성 시험장치를 고

유모형 지지격자에 대해 충격특성을 파악하기 위한 장치로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업 중 “경수로용 신형핵연료개발”(대과제) “고성능지지격자 구조기술개발”(세부과제)에서 과제업무의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 강홍석 외 4인, “핵연료집합체 지지격자에 대한 기계적 시험”, KAERI/TR-868/97, 한국원자력연구소, 1997.
2. 송기남 외 4인, “핵연료 핵심구조부품의 개발현황 및 연구방향”, KAERI/TR-865/97, 한국원자력연구소, 1997.
3. C. M. Harris and C. E. Crede, “Shock and Vibration Handbook”, 4th ed., McGraw-Hill Book Co., 1961.
4. 윤경호 외 3인, “지지격자의 기계/구조적 성능시험 기술개발,” KAERI/TR-1598/00, 한국원자력연구소, 2000.
5. K. H. Yoon and K. N. Song, “Analysis on the Buckling Behavior of the Spacer Grid Structure for the PWR Fuel Assembly”, SMiRT-16, Paper No. 1538, 2001.
6. Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th ed., 1990.

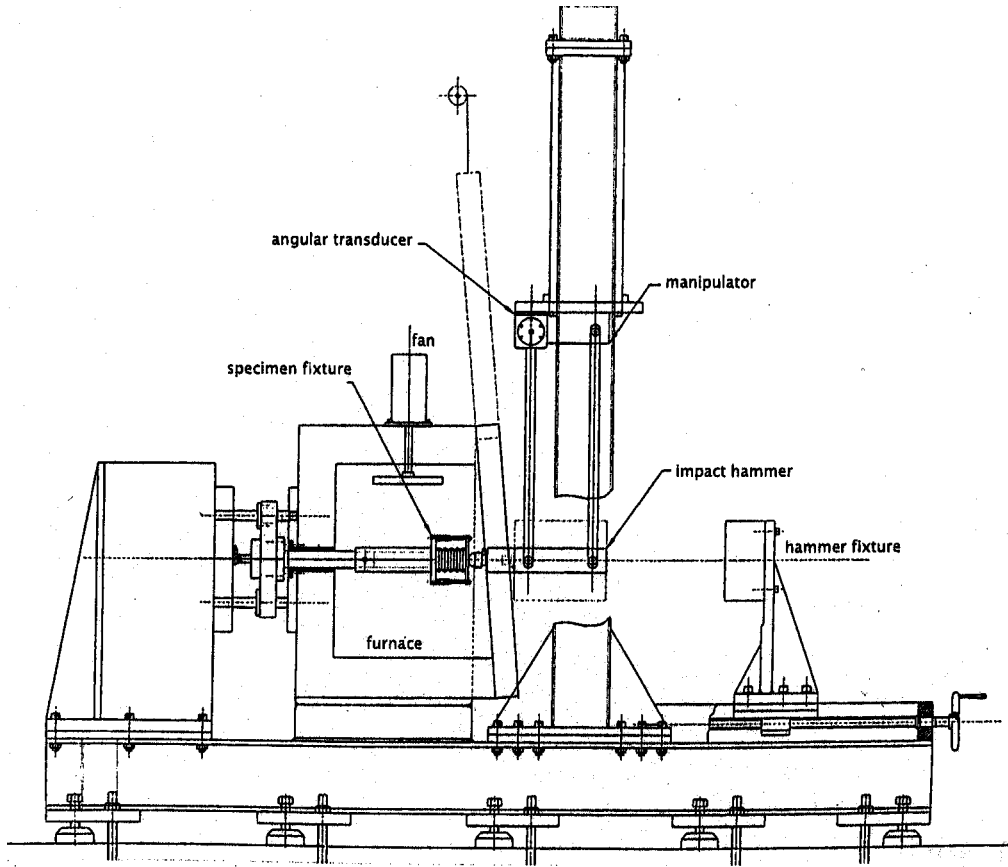


Fig. 1 진자식 충격시험기의

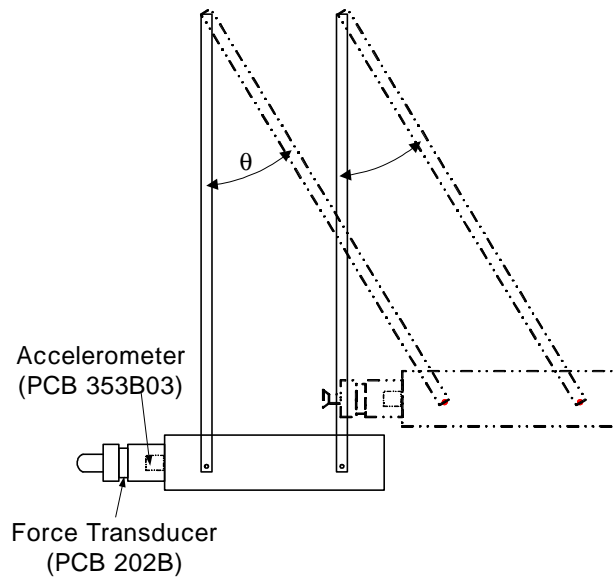


Fig. 2 충격해머 및 센서위치 개략도

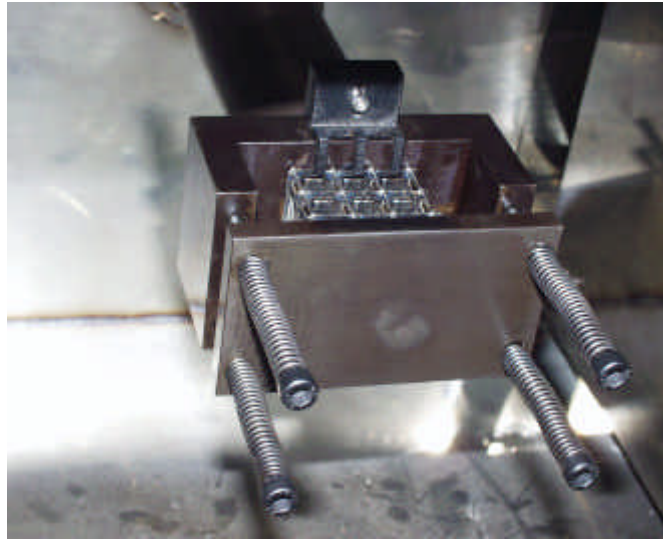


Fig. 3 격자체 시편 고정치구



Fig. 4 박판을 이중으로 덧댄 5×5셀 이중판격자체

Table 1 충격시험에 의한 5×5셀 이중판 부분격자체의 온도에 따른 임계 충격가속도

시편번호	임계 충격가속도(온도조건), 단위 : m/s^2	
	상온	고온
1	317.5	249.4
2	365.4	245.4
3	311.4	157.1
4	369.1	152.2
5	397.2	-
평균값	352.1	201.0

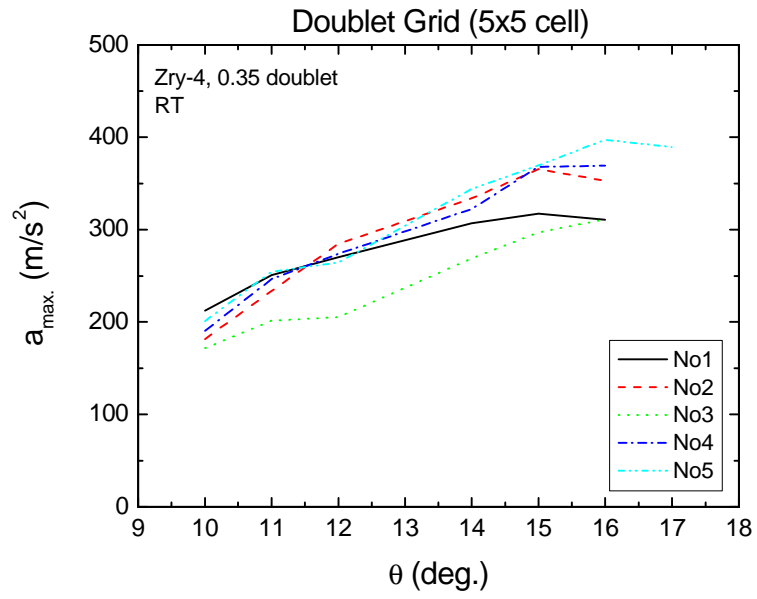


Fig. 5 상온 하에서 충격시험에 의한 초기 해머의 충돌각도에 따른 최대 충격가속도

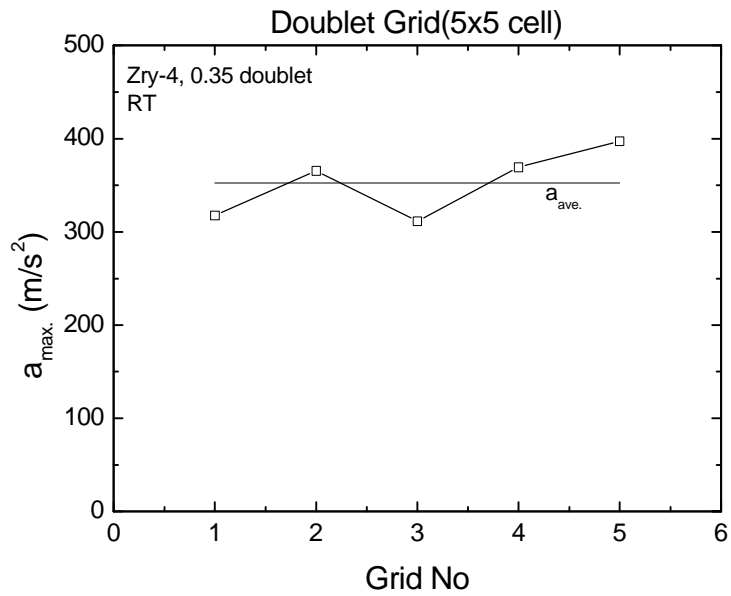


Fig. 6 상온 하에서 5x5셀 부분격자체의 임계 충격가속도

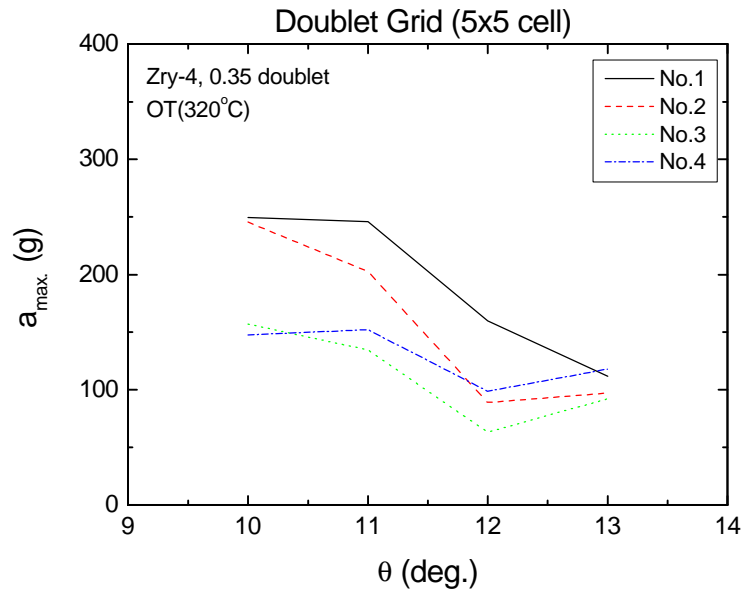


Fig. 7 고온 하에서 충격시험에 의한 초기 해머의 충돌각도에 따른 최대 충격가속도

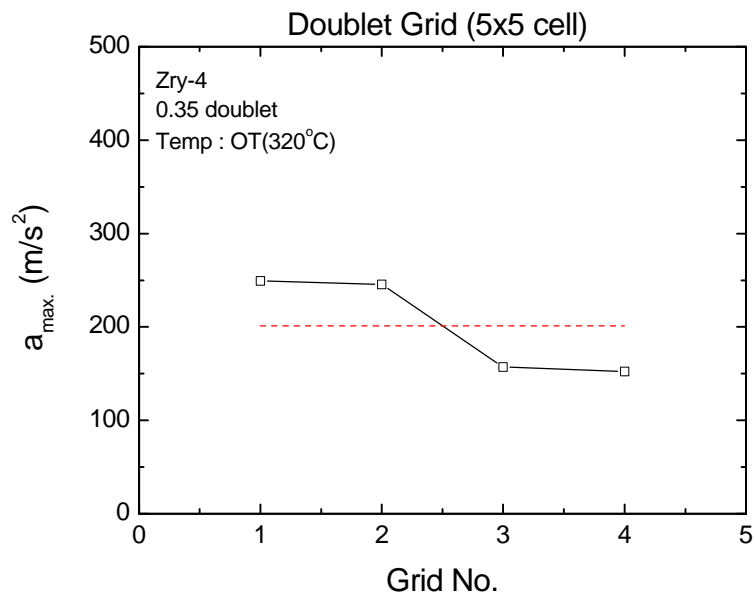


Fig. 8 상온 하에서 5×5셀 부분격자체의 임계 충격가속도

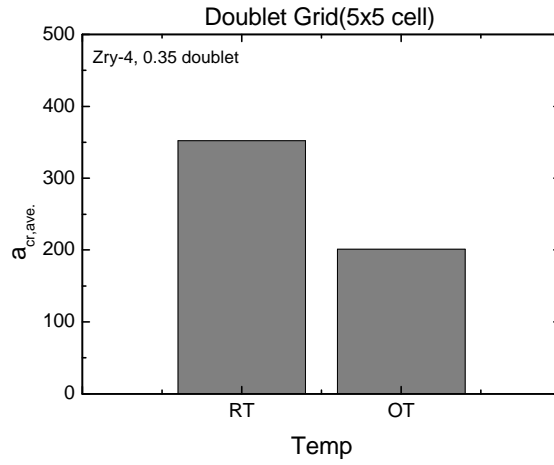
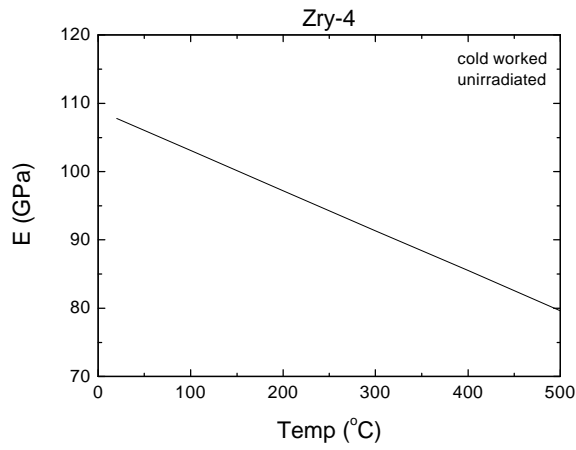
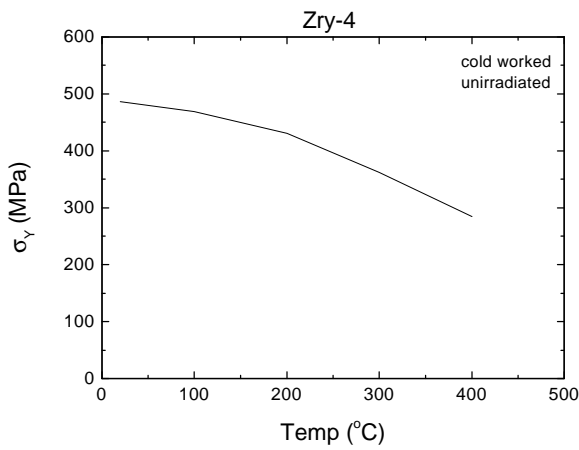


Fig. 9 온도에 따른 평균 임계 충격가속도의 비교



(a) 탄성계수



(b) 항복강도

Fig. 10 냉간가공된 지르칼로이-4의 온도에 따른 물성