'97 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

용융물 냉각 및 간극 형성 실험(LAVA)연구

강경호, 김종환, 조영로, 김상백, 김희동

한국원자력연구소

요 약

LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험은 중대사고시 고온의 노심 용융물이 냉각수가 존재하는 원자로 용기 하부 반구내로 재배치되는 경우 노심용융물과 하부 반구의 열적 거동 모사와 노심용융물과 하부 반구 사이의 구조 분석 및 고화 후의 용융물 형상에 대한 관측을 통하여 노심용융물의 자연 냉각 현상을 규명하고자 하는 실험 연구이다. 원자로 용기 하부 반구를 1/8 로 선형 축소한 반구형 반응 용기 내부로 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물을 주입하여 용융물과 하부 반구 사이의 구조 및 하부 반구의 열적 거동을 분석하는 실험을 2회 수행하였다. 각각 20, 40 kg 의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물을 주입시킨 LAVA_PRE, LAVA-1 실험 결과 용융물 주입에 따른 하부 반구의 파손은 발생하지 않았으며, 유사한 실험 조건에서 수행된 일본 ALPHA 실험에 비해서는 하부 반구의 최대 온도가 500 K 이상 높게 측정되었고 냉각율 또한 현저히 낮게 나타났다. 이는 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물중 과열 상태의 Fe 성분이 하부 반구와 용접되었기 때문으로 판단되며 보다 정확한 하부 반구의 열적 거동을 모사하기 위하여 반구 시편에 대한 재료, 조직 검사를 수행하고 있다. 추후의 실험에서는 하부 반구 내외부의 압력 부하에 따른 반응 양상 및 Fe 용융물(금속용융물) 성분을 제거하고 순수한 Al_2O_3 용융물(산화용융물) 만을 주입하여 용융물 성분에 따른 하부 반구의 열적 거동을 분석할 예정이다.

1. 개요

19 톤의 노심용융물이 하부 반구 내로 재배치되었으나 원자로 용기의 파손 없이 노심용융물이 냉각되었던 미국 TMI-2 사고 이후로 노심용융물의 노내 냉각 가능성에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 그러나 노심용융물이 냉각수를 통과하여 하부 반구 내로 재배치되는 경우에 대한 실험 및 해석적 연구는 고온의 용융물과 냉각수 사이의 복잡한 이상 유동 현상이 존재하고, 고온 용융물의 재료적 특성으로 인하여 많은 어려움이 따른다. 현상 분석의 난이함에도 불구하고 TMI-2 사고에서 자연적으로 발생한 노심용융물의 노내 냉각 현상을 규명하고 이를 실험적으로 입증한다면 기존 원전의 중대사고에 대한 안전 여유도를 증가시킬 수 있으며 노내 노심 냉각을 위한 사고 예방 및 완화 전략을 도출할 수 있다.

본LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack)실험은 중대사고시 고온의 노심 용융물이 냉각수가 존재하는 원자로 용기 하부 반구내로 재배치되는 경우 노심용융물과 하부 반구의 열적 거동 모사와 노심용융물과 하부 반구 사이의 구조 분석 및 고화 후의 용융물 형상에 대한 관측을 통하여 노심용융물의 자연 냉각 현상을 규명하고자 하는 실험 연구이다. 원자로 용기 하부 반구를 1/8 로 선형 축소한 반구형 반응 용기(내부 직경 50 cm, 두께 2.5 cm) 내로 각각 20, 40 kg 의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물을 주입한 LAVA_PRE, LAVA-1 실험을 수행하였다.

반구형 반응 용기 내부에 일정량의 냉각수를 주입한 후 15 기압 이상의 가압 상태에서 Thermite 용융물을 주입하였다. 용융물 주입에 따른 하부 반구의 열적 거동은 반구 외벽에 설치한 K 형 열전대를 이용하여 분석하였으며, 시간에 따른 용융물의 냉각은 W/Re 열전대를 이용하여 측정하였다. 반응 중의 하부 반구의 온도 거동에 대한 측정과 더불어 반응이 종료된 후 고화용융물과 하부 반구에 대한 기계적 절단 및 시편에 대한 재료, 조직 검사를 통하여 보다 정확한 하부 반구의 열적 거동을 분석할 예정이다.

하부 반구 내로 재배치된 노심용융물의 열적 거동에 영향을 미치는 인자로는 용융물의 재배치 과정, 용융물의 질량 및 구성 성분 그리고 냉각수 수위 등을 들 수 있다. 본

LAVA 실험 연구에서는 이러한 인자들을 변화시켜 가면서 실험을 수행하여 노심용융물의 노내 냉각 가능성 및 그 원리를 규명할 것이다.

2. 실험 장치

LAVA 실험 장치는 그림 1 의 개략도에서 보는 바와 같이 원자로 용기 하부 반구를 모사한 반구형의 반응 용기와 Thermite 용융 도가니 그리고 반응 용기 및 도가니를 감싸고 있는 보호용기로 크게 구분할 수 있다.

반응 용기 (원자로 용기 하부 반구)

원자로 용기 하부 반구를 모사한 반응 용기는 실제 원자로 재질인 Carbon Steel (A516 Gr 70) 로 제작하였다. 반응 용기는 원자로 용기 하부 반구를 1/8 로 선형 축소한 모형으로 내부 직경은 50 cm, 두께는 2.5 cm 이다. 반구의 내부 직경과 두께는 미국 샌디아 국립 연구소(SNL) LHF 실험[1]에서와 같이 하부 반구 파손에 직접적인 영향을 미치는 인자인 Hoop Stress 를 실제 원자로용기 하부 반구와 반응 용기를 일치시켜서 결정한 것이다. 실험 장치 개념도에 나타나있는 하부 반구를 지탱해주는 원통형의 공간 내부에는 반구 외벽의 온도 및 간극 측정을 위한 각종 계측기 센서를 설치하였으며, 실험 조건에 따라 대기압 또는 일정 정도 가압 상태로 내부 조건을 변경할 수 있도록 제작하였다. 반구 내부 표면은 표면조도 1.5s 이하로 정밀가공 하였다. 하부 반구에 주입되는 냉각수의 온도 조절을 위하여 반구 상부 원통 부분에 28 kW 출력의 밴드히터를 장착하였다. 밴드 히터는 반구 상부 원통 부분 외벽에 밀착되며 높이는 60 cm 이다.

도가니에서 생성된 Thermite 용융물이 냉각수가 존재하는 하부 반구로 바로 주입되면 냉각수와 용융물의 폭발적 반응 및 용융물이 파쇄(Fragmentation) 되어 입자화될 가능성이 크다. 이를 방지하기 위하여 반응 용기 원통 부분 내부에 용융물 주입관을 설치하였다. 주입관 내부는 산화마그네슘으로 단열처리되어 용융물이 주입 도중에 고화되는 것을 방지하였다. 그리고, 주입관 출구 부분에는 두께 10 mm 의 스틸 판막을 설치하여 용융물이 주입 즉시 하부 반구 내로 유입되는 것을 방지하였다.

Thermite 반응 도가니

LAVA 실험에서는 노심용융물의 상사물로 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물을 사용한다. Thermite 용융물은 알루미늄과 산화철 분말을 고르게 혼합한 후 DC 12 V 을 가하여 전기로 점화시켜서 만든다. 화학 반응 도중에 고온의 열이 발생하므로 이를 고려하여 반응 도가니를 제작하였다. 실험에 사용된 반응 도가니의 내부에는 두께 5 cm 의 산화 마그네슘으로 단열 처리하였으며, 도가니 상부는 두껑 및 "ㄱ" 자 형태의 배출관을 설치하여 Thermite 반응으로 생성되는 고온의 화염과 가스에 의한 실험 장치에 대한 영향을 최소화하였다.

보호 용기

고온의 용융물이 냉각수와 반응하면 두 매질 간의 급격한 열전달에 의해서 강력한 폭발력을 지닌 증기 폭발 현상이 발생할 수 있다. 본 실험에서는 이러한 증기 폭발의 가능성을 억제하기 위하여 실험의 초기 압력을 15 기압 이상으로 설정하였다. 증기 폭발과 같은 순간적인 강력한 폭발의 가능성 뿐만아니라 고온 용융물의 열에너지에 의한 냉각수의 증발로 인한 보호 용기의 가압 가능성도 무시할 수 없다. 따라서,고온의 Thermite 용융물과 냉각수가 접촉하여 생성되는 수증기에 의한 가압에 견딜 수 있도록 보호 용기를 제작하는 것이 실험 수행의 안전성 측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 보호 용기의 가압 정도를 예측하고, 이에 따라 보호 용기를 설계, 제작하기 위하여 20 기압의 용기 내부 압력 조건에서 40 kg, 2700 K 의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물이 10 K 아냉(Subcooling)의 냉각수에 주입되는 경우를 가정하여 용융물의 열에너지에 의한 수증기의 증발, 그에 따른 보호 용기의 가압 정도를 TEXAS-III 코드를 이용하여 계산하였다. 계산 결과 최대 압력 상승은 약 29 기압으로 보호 용기의 설계 압력인 30 기압을 넘지 않았다. 그리고 용융물과 냉각수 사이의 에너지 관계식을 이용하여 보호 용기 내부의 압력 상승을 수계산하였다. 수계산 결과 최대 압력 상승이 약 27 기압이었으며, 이에 따라 보호 용기를 30 기압의 설계 압력으로 제작하는 것이 타당하다는 결론을 내렸다. 보호 용기 하단부에는 반응 용기에 대한 작업을 할 수 있도록 사람이 보호 용기

내부로 왕래할 수 있는 맨홀을 설치하였다. 또한 열전대, 압력센서 등의 각종 센서를 보호 용기 상단부에 설치한 플랜지를 통하여 고압 Fitting 하였다.

3. 실험 방법

실험은 반응 용기 내부에 실험 조건에 따라 일정 수위의 냉각수를 주입한 후 28 kW 용량의 밴드 히터를 이용하여 실험 초기 설정 압력의 포화상태로 가열하는 것으로 시작한다. 실험 용기의 가압은 초기 압력(약 5 - 6 기압) 까지는 공기를 이용하며, 최종 압력 까지의 가압은 질소가스를 이용한다. 냉각수의 가열과 실험 용기 내부의 가압이 완료되면 Thermite 혼합 분말에 DC 12 V 의 전원을 공급하여 Thermite 반응을 점화시킨다. Thermite 반응으로 생성된 Al_2O_3/Fe 용융물은 직경 8 cm 의 주입관을 통하여 하부 반구 내로 재배치된다.

LAVA 실험의 주요 측정 인자는 용융물과 냉각수가 반응시 실험 용기의 압력 상승 정도 및 하부 반구의 온도 상승 그리고, Thermite 용융물의 초기 온도와 냉각률 등이다. 용융물과 냉각수가 반응시 실험 용기의 압력 상승은 PDCR330-1634 (제조회사 : Druck, 압력 측정 범위 : 0 - 60 Bar) 압력 센서를 이용하여 측정하였다. 실험의 초기 조건을 정의하기 위하여 용융물 주입 시점의 용융물 온도를 탄탈륨으로 피복된 W/Re 열전대를 이용하여 측정하였으며, 냉각수의 온도 및 하부 반구 외벽의 온도는 K 형 열전대를 설치하여 측정하였다. 측정된 각종 데이타는 HP VXI System 을 이용하여 저장, 처리하였다. 그림 2 는 LAVA 실험에서 하부 반구 외벽에 설치한 K 형 열전대를 비롯한 각종 센서의 설치 위치를 나타낸 것이다. 용융물과 하부 반구 사이의 간극은 초음파 계측기를 이용하여 실시간으로 측정할 예정이며, 용융물의 열적, 기계적 부하에 의한 하부 반구의 변형은 측정 오차 0.002 mm 의 기계적 변위 측정기를 이용하여 측정할 것이다. 이상의 각종 실험 측정값들은 HP-VXI System 를 이용하여 저장, 처리하였다.

반응 중의 각종 계측과 더불어 반응이 끝난 후 두께 1 mm 의 Band Saw 를 이용하여 하부 반구를 절단하여 고화용융물과 하부 반구 사이의 구조를 분석하였다. 또한, 반구와 고화용융물의 시편을 절취하여 강도 검사 및 조직 검사를 수행하여 열적, 기계적 부하에 의한 하부 반구의 재료적 변형을 측정하였다.

4. 실험 결과

본 논문에는 LAVA 실험 장치를 제작, 설치한 후 실험 장치의 기능 시험을 목적으로 20 kg 의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물을 하부 반구 반구로 주입한 LAVA_PRE 실험과 40 kg 의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물을 하부 반구로 주입하여 하부 반구의 열적 거동을 분석한 LAVA-1 실험의 조건 및 결과를 정리하였다.

LAVA_PRE 실험

LAVA_PRE 실험에서는 비교적 소량인 20 kg 의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물을 냉각수가 존재하는 하부 반구 내로 주입하였다. LAVA_PRE 실험은 LAVA 실험 장치에서 수행한 첫번째 실험인 관계로 실험의 주요한 초기 조건 인자인 용융물 및 냉각수의 질량을 보수적으로 설정하였다. 증기 폭발 현상을 방지하기 위하여 실험 초기 압력을 절대압 17 기압으로 가압하고, 냉각수의 온도를 포화온도에 근접하도록 가열하여 실험하였다. 20 kg 의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물은 이상적으로 하부 반구 내에 주입될 경우 반구 하단부에서 수직 방향으로 약 8.5 cm 높이로 쌓이게 된다. 초기에 하부 반구 내로 주입한 냉각수의 질량은 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물의 모든 열에너지가 냉각수를 수증기화하는데 사용된다고 가정할 경우의 냉각수 질량인 30 kg 의 두배 이상인 66 kg 의 냉각수를 사용하였다. 냉각수는 용융물 주입 전에 반응 용기 원통 부분에서 밴드 히터에 의하여 초기 설정 온도로 가열시킨 후 실험 용기 밖으로 배출시켜서 실험 조건에 맞는 수위로 조절되게 하였다.

LAVA_PRE 실험에서는 실험 수행상의 오류로 용융물 주입관 내부의 산화 마그네슘 분말이 용융물과 함께 하부 반구 내로 주입되었다. 이에 따라 용융물의 냉각율 및 하부 반구의 열적 거동의 양상이 실제와는 상이하게 측정된 것으로 생각된다. 표 1 은 LAVA_PRE 실험과 LAVA-1 실험 그리고 유사한 조건에서 수행된 일본 ALPHA IDC001, 002 실험[2]의 결과를 비교한 것이다. 그림 3 과 4 는 하부 반구 온도 변화와 절단한 하부 반구 및 고화용융물의 단면을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 용융물 외곽 부분에서 고화용융물과 하부 반구 사이에 약 1 - 2 mm 의 간극이 뚜렷이 형성되었다. 하부 반구의 중앙 부분에서는

용융물과 하부 반구 사이에 용접이 이루어진 것을 알 수있다. 이와 같은 용접 현상은 초기에 주입된 용융물이 과열 금속용융물이고, 이 금속용융물에 의한 제트류의 영향으로 발생한 것으로 생각된다. 반면 용접 부위 주위에 간극이 형성된 이유는 간극이 형성되지 않은 LAVA-1 실험과 비교하면 산화마그네슘 분말의 영향으로 생각된다.

LAVA-1 실험

LAVA-1 실험은 LAVA_PRE 실험과 비교하여 실험 수행 절차는 동일하며, 용융물의 질량 및 냉각수의 질량만을 증가시켜 수행하였다. 40 kg 의 Al_2O_3/Fe Thermite 용융물이 하부 반구에 주입되면 반구의 중간 부분인 12.5 cm 지점까지 쌓이게 된다. 용융물의 질량이 증가되었기 때문에 하부 반구 외벽에 설치한 k 형 열전대의 수도 9 개로 증가시켰다.

하부 반구의 온도는 0, 30, 60 ° 지점에 9 개의 K-Type 열전대를 표면에서 2 mm 깊이로 장착하여 측정하였다. 측정된 하부 반구의 최대 온도는 30 ° 지점에서 1244 °C 를 나타내었다. 반면 하부 반구 최하단부인 0 ° 지점에 설치한 열전대의 온도값은 데이타 기록중 오류에 의하여 측정하지 못하였다. 용융물의 주입 방향이 정 중앙은 아니었을지라도 하부 반구 최 하단부인 0° 지점의 온도는 최소한 1200 °C 이상으로 상승하였을 것으로 생각된다. 만약 이같은 추론이 크게 틀리지 않는다면 LAVA-1 실험에서는 LAVA_PRE 실험의 경우와 비교해서 하부 반구의 외벽 온도가 약 300 °C 이상 높게 나타난것을 알 수있다. 또한, LAVA-1 실험에서의 하부 반구 냉각율은 약 0.24 K/sec 로 LAVA_PRE 실험에서의 0.56 K/sec 와 비교해서 절반의 값을 보인다. 이같은 결과는 용융물의 질량이 늘어난 점(20 kg 에서 40 kg 으로 증가하였음)과 LAVA_PRE 실험에서는 산화마그네슘 분말이 하부 반구로 주입되어서 하부 반구로의 용융물의 열전달을 방해하였기 때문으로 생각된다. 그림 5 는 하부 반구의 온도 변화를 나타낸 그래프이다.

용융물의 온도 변화는 하부 반구 내부에 설치한 C-Type 열전대 1 Channel 을 이용하여 측정하였다. 측정된 온도 데이타를 보면 용융물 주입관 하단부가 파손된 직후인 155 초 경에 용융물의 온도가 107 °C 에서 917 °C 로 급격히 증가하였고, 179 초 경에 최대 1943 °C 를 나타내었다. 용융물의 온도는 800 °C 까지 냉각율 6.31 K/sec 로 급격히 냉각되었으며, 260 °C 까지는 냉각율 0.57 K/sec 로 냉각되었다. 이와 같은 급격한 용융물의 온도 감소는 용융물이 하부 반구와 용접되어 열에너지를 하부 반구로 급격히 전달하였기 때문으로 생각된다.

LAVA_PRE 실험에서와 마찬가지로 반응이 종료된 후 고화용융물과 하부 반구를 Band Saw 를 이용하여 중앙 절단하였다. 단면 절단 결과 용융물이 하부 반구와 용접되어 완전히 접합되어 있는 것을 알 수 있었으며, 특정 부분은 하부 반구가 고온의 용융물에 의하여 침식되었음을 보여준다. 그림 6 은 절단한 하부 반구의 단면을 나타낸 사진이다. 본 연구에서는 하부 반구의 열적 거동을 자세히 분석하기 위하여 하부 반구의 기계적인 절단과 더불어 재료의 조직 검사를 수행중이다. 현재는 시편에 대한 강도 검사를 완료한 상태이며, 열적 부하에 의한 재질 변형 및 반구의 열적 거동을 분석하기 위해서 초정밀 미시 현미경을 사용하여 조직 검사를 수행하고 있다. 강도 검사는 시편의 강도를 검사하는 데 일반적으로 사용하는 방법인 압입 시험(Continuous Ball Indentaion Test) 방법을 사용하였으며, 검사에 사용한 구(Ball) 의 직경은 0.5 mm 이다. 그림 7 은 압입 시험 결과를 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 반구 외벽으로 부터 약 20 - 22 mm 지점에서 강도가 현격히 낮아짐을 알 수 있다. 이는 반구의 두께가 25 mm 임을 감안하면 약 3 - 5 mm 두께 정도가 용융물에 의하여 용융되었다는 것을 보여주는 것이다. 용융물의 열적 부하에 의한 하부 반구의 용융 및 열적 거동에 대해서는 조직 검사가 완료되면 보다 정확히 알 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

원자로 용기 하부 반구를 1/8 로 선형 축소한 반응 용기 내부로 용융물을 주입하여 용융물의 열적, 기계적 부하에 의한 하부 반구의 열적 거동에 대한 실험을 수행하였다. 2 회에 걸친 실험 결과 용융물 주입에 따른 하부 반구의 파손은 발생하지 않았으나, Fe 용융물 성분이 하부 반구와 용접되어 하부 반구의 온도가 1500 K 정도로 높게 측정되었고, 냉각율은 약 0.24 K/sec 로 하부 반구가 상당 시간동안 열적인 부하를 받은 것으로 생각된다. 반구 시편을 중앙 절단한 결과를 보더라도 용융물과 하부 반구 사이의 간극은 존재하지 않았고, 특정 부분의

반구는 용융물에 의하여 침식되었음을 보여주었다. 반구 시편에 대한 강도 검사와 조직 검사가 완료되면 용융물 주입에 따른 반구의 열적 거동을 정확히 분석할 수 있을 것이다.

추후의 실험에서는 하부 반구 내로 재배치된 노심용융물의 열적 거동에 영향을 미치는 인자들인 용융물의 재배치 과정, 용융물의 질량 및 구성 성분 그리고 냉각수 수위 등을 변화시켜 실험을 수행하여 노심용융물의 노내 냉각 가능성 및 그 원리를 규명할 것이다. 특히, LAVA-1 실험 결과에서 보여주듯이 용융물과 하부 반구 사이의 구조에 영향을 미치는 주요한 인자는 용융물의 성분이므로 금속용융물(Fe 용융물)을 제거하고 순수한 산화용융물(Al_2O_3 용융물) 만을 주입시킬 계획이다. 또한, 용융물에 의한 열적 부하 뿐만 아니라 하부 반구 내외부의 압력 부하에 의한 용융물과 하부 반구 사이의 구조 및 반구의 열적 거동의 변화를 알아보는 실험을 수행할 예정이다.

참고 문헌

1. T.Y.Chu, M.M.Pilch, " Scaling and Design of a Lower Head Failure Experimen," CSARP Meeting, May 1-5, 1995

2. Yu Maruyama et al., " In-Vessel Debris Coolability Experiments in ALPHA Program," Procs. of the Int. Top. Mtg. on PSA '96, Park City, Utah, September 1996

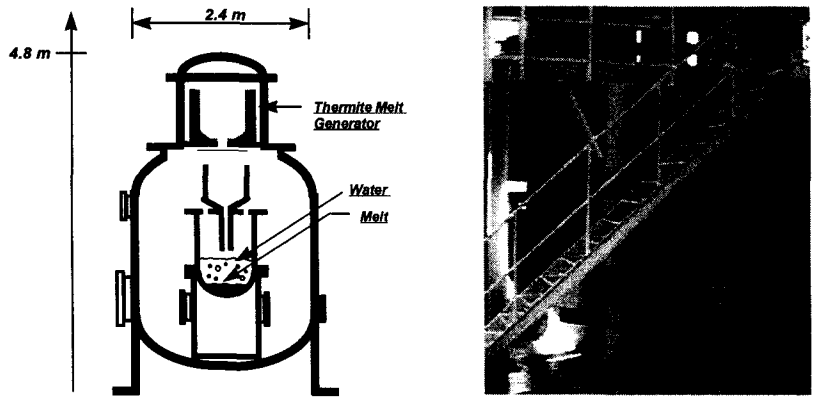

그림 1. LAVA 실험 장치 개략도

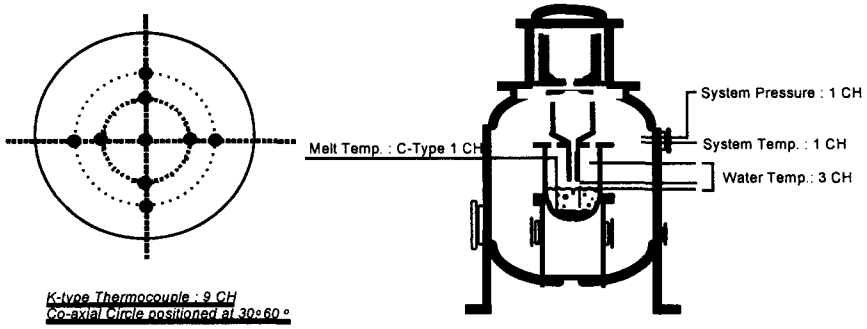

그림 2. LAVA 실험 계측 센서 위치도

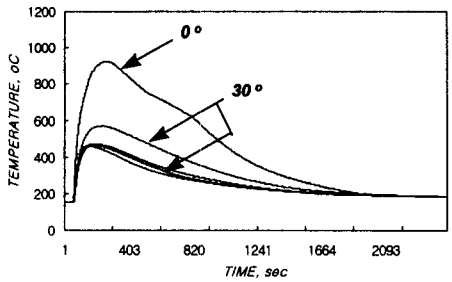

그림 3. 하부 반구 온도 변화:LAVA_PRE

그림 4. 하부 반구 중앙 절단 단면:LAVA_PRE

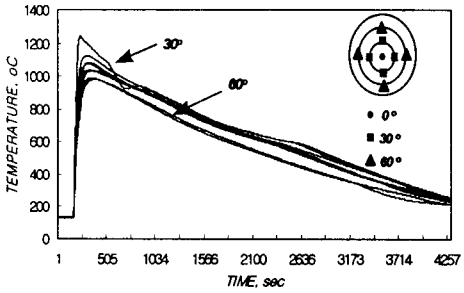

그림 5. 하부 반구 온도 변화:LAVA-1

그림 6. 하부 반구 중앙 절단 단면:LAVA-1

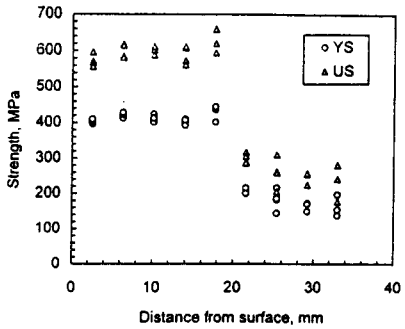

그림 7. LAVA-1 실험 압입 시험 결과 (YS: Yield Strength, US: Ultimate Strength)

	ALPHA IDC001	ALPHA IDC002	LAVA_PRE	LAVA-1
LHV 최고 온도	820 K	900 K	1200 K	1500 K
LHV 고온 유지 시간	350 sec	550 sec	1800 sec	3500 sec
LHV 냉각율	4 K/s	3 K/s	0.56 K/s	0.24 K/s

표 1. LAVA 실험과 ALPHA 실험 결과 비교