

2001 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 중대사고시 원자로 공동 콘크리트 고유 성분에 따른 수소 발생 분석

### Analysis of Hydrogen Generation according to the Specific Concrete Composition during Severe Accident

서미로, 김명기

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

원자로 공동 바닥 콘크리트의 화학적 구성은 MCCI의 진행과 콘크리트가 분해되면서 발생하는 기체의 종류와 양에 크게 영향을 미친다. 또한 원자로공동에 형성되는 용융물질 풀의 물리/화학적 특성의 변화과정에도 영향을 준다. 이러한 이유로 국내 원전 Level 2 PSA 중대사고 분석시 사용되는 MAAP 전산코드에서는 원자로 공동 콘크리트 성분을 입력하게 되어 있으며, 울진 3,4 호기 PSA에서부터 발전소 건설시 따로 시편을 제작/입수하여 성분 분석을 수행하여 왔다. 그러나, 국내 원전 건설시 사용되는 콘크리트 성분이 대부분 표준 Basaltic에 가까우며, 성분상의 미미한 차이로 인한 영향은 거의 없을 것으로 예상되어 왔다. 본 연구는 중대사고시 MCCI 현상에 의한 수소 발생량에 원자로 공동 바닥 콘크리트 성분 차이가 미치는 영향을 고찰하고 고유의 콘크리트 성분 분석 필요성에 대하여 논의하였다.

#### Abstract

The chemical composition of reactor cavity floor concrete affects the kind and amount of gases generated by MCCI and ablation of concrete. And it affects the physical and chemical characteristics of molten pool formed in the cavity. So, the specific concrete composition is inputted in the MAAP Code used in the Level 2 PSA, and since Ulchin Unit 3&4 PSA, the analysis of concrete composition has been performed by the concrete mold prepared for this usage at the installation of cavity floor concrete. But, the composition of domestic concrete for construction of NPP is nearly the same as that of the standard basaltic concrete, and the effect of minor variation in composition is expected to be negligible. This report analyze the effect of the concrete composition to the generation of hydrogen due to MCCI, and discuss the

necessity of analysis about the specific concrete composition for Level 2 PSA.

## 1. 서론

국내 원전에 대한 2단계 확률론적 안전성평가(Level 2 PSA)는 크게 중대사고 발생빈도를 분석하는 사고 경위 분석과정과 격납건물 안전성을 분석하는 중대사고 현상 분석 분야로 구분되고 있다. 이중 중대사고 현상 분석은 MAAP(Modular Accident Analysis Program) 코드를 사용하여 주요 사고 경위에 대한 격납건물 거동 분석 및 수소 분석을 수행하고 있다. MAAP 코드는 Parameter 파일에서 발전소 고유의 설계 변수를 입력받아 분석을 수행하게 되며, 이러한 고유의 설계변수들 중에 원자로 공동의 콘크리트 성분도 포함되어 있다. 원자로 공동 콘크리트의 성분은 중대사고시 원자로 압력용기가 파손될 경우 용융된 노심이 공동 바닥으로 떨어져 공동 바닥 콘크리트와 화학 반응을 일으켜 수소 및 일산화탄소 등을 발생시키는 것으로 알려진 MCCI(Molten Core-Concrete Interaction) 현상 때문에 중요하게 다루어져 왔다. 국내 원전의 경우, MAAP 코드를 사용한 Level 2 PSA를 최초로 수행한 울진 3,4 호기에서부터 이 콘크리트 성분은 원자로 공동 콘크리트 타설시 제작한 시편을 따로 분석하여 성분을 구하고 이를 MAAP 코드의 입력으로 사용하여 왔다. 그러나, 가동중 원전의 경우 공동 바닥 콘크리트 타설 시점의 시편을 입수하기가 거의 불가능하며, 건설중 원전의 PSA 경우에도, 공동 바닥 콘크리트 타설 시점에 맞추어 시편 입수 및 분석을 별도로 수행해야 하는 등 불편이 있어왔다. 반면, 호기별 고유의 입력자료 생성으로 인한 불확실성 감소의 이득이 있기는 하지만 국내 원전 건설시 사용되는 콘크리트의 구성성분은 지역에 따라 차이가 있기는 하지만, 그 차이가 크지 않으며, 중대사고시 수소발생 등에 큰 영향이 없을 것으로 예측되어 왔다.

본 연구의 목적은 국내 원전 건설시 사용되는 콘크리트 성분이 대부분 표준 Basaltic과 유사하며, 중대사고시 발생할 수 있는 MCCI 현상에 의한 수소 발생이 원자로 공동 바닥 콘크리트 성분에 크게 영향을 받지 않는다는 사실을 증명하기 위한 것이다. 이를 위하여, 영광 5,6 호기 PSA 수행시 사용된 MAAP Parameter 파일의 콘크리트 성분을 울진 5,6 호기 PSA 수행을 위해 조사된 콘크리트 성분 및 CORCON-MOD2 (Computer Program for Analysis of Molten Core-Concrete Interaction)에서 사용되는 표준 Basaltic 및 Limestone-Commonsand의 성분으로 변경시켜 콘크리트 성분에 따른 수소발생량의 변화를 비교하였다. 분석에 사용된 Input 파일은 영광 5,6 호기 수소 분석시 사용된 주요 사고 경위에 대한 Input을 사용하였다.

## 2. 콘크리트 성분 자료

원자로 공동 바닥 콘크리트의 화학적 구성은 MCCI의 진행과 콘크리트가 분해되면서 발생하는 기체의 종류와 양에 크게 영향을 미친다. 또한 원자로공동에 형성되는 용융물질 풀의 물리/화학적 특성의 변화과정에도 영향을 준다. 이러한 중대사고현상에 미치는 영향을 고려하여 콘크리트는 크게 현무암 성분의 콘크리트(Basaltic Concrete)와 석회암성분의 콘크리트(Limestone Concrete)로 분류된다. 국내 원전 건설에 사용되는 콘크리트는 발전소 위치에 따라 채취되는 골재 및 모래의 성분이 약간씩 다르기는 하지만 국내 지리적 여건상 그 차이가 크지 않으며, 대부분 현무암 성분의 Basaltic 콘크리트와 유사한 것으로 알려져 있다.

영광 5,6 호기 PSA 수행시 조사된 원자로 공동 콘크리트 성분은 원자로 건물 바닥 콘크리트 타

설시 작성되는 Batch Adjustment 보고서와 한국 화학 시험 연구원에서 분석한 골재 및 모래에 대한 시험 보고서 등을 통하여 계산되었다. 분석결과 주성분인 골재와 모래의 화학적 성분에 따라 콘크리트 분해시 기체발생이 적은 Basaltic 콘크리트에 가까운 것으로 분류되었다. Basaltic 콘크리트의 주성분은 SiO<sub>2</sub>이며 CaO는 상대적으로 소량 포함되어 있는 특징을 가지고 있다. 콘크리트의 성분, 특히 수분의 양은 양생기간에 따라 변화하며 구성성분도 일부 변화한다. 영광 5,6 호기 PSA에는 총 시멘트량의 25%에 해당하는 물이 콘크리트에 포함되었다고 가정하였다. 그리고 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 CO<sub>2</sub>와 같은 미량 성분은 영광3,4호기 PSA 자료를 인용하고 있다. 이러한 가정에 따라 영광5,6호기에 사용된 콘크리트는 SiO<sub>2</sub>가 약 61.69% 이었으며 CaO는 약 11.97%로 나타나고 있다.

울진 5,6 호기 콘크리트 성분 분석은 콘크리트 타설시 제작된 시편을 입수하여 전력연구원에서 ASTM C169-92, C1301-95 방법에 따라 분석하였다. 여기에서도 총 시멘트량의 25%에 해당하는 물이 콘크리트에 포함되어 있다고 가정하였다. 분석결과 Basaltic 콘크리트의 주성분인 SiO<sub>2</sub>는 56.09%, CaO는 22.70%로 나타나고 있다. 이 결과는 울진 5,6 호기 콘크리트가 SiO<sub>2</sub> 성분만으로는 Basaltic으로 구분할 수 있으나 CaO 양으로 판단하면 오히려 Limestone-Commonsand의 구성에 가깝다는 판단을 내릴 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 영광, 울진, CORCON-MOD2 (Computer Program for Analysis of Molten Core-Concrete Interaction)에서 사용되는 표준 Basaltic 및 Limestone-Commonsand의 성분을 사용하여 이에 따른 수소발생 영향을 평가 비교하였다. 표 1에는 MAAP 코드에 입력된 분석대상 콘크리트별 성분비를 제시하였다.

표 1. Concrete 유형에 따른 화학적 성분 구성표

MAAP variable	Species	영광 5,6 호기 (%)	울진 5,6 호기 (%)	Basaltic (%)	Limestone-Commonsand (%)
MFCN(1)	SiO <sub>2</sub>	61.69	56.09	54.84	35.8
MFCN(2)	CaO	11.97	22.70	8.82	31.3
MFCN(3)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.75	7.37	8.32	3.6
MFCN(4)	K <sub>2</sub> O	2.58	2.43	5.39	1.22
MFCN(5)	Na <sub>2</sub> O	0.72	1.00	1.80	0.082
MFCN(6)	MgO+MnO+TiO <sub>2</sub>	4.16	1.39	7.21	0.69
MFCN(7)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.08	2.89	6.26	1.44
MFCN(8)	Fe	0.00	0.00	0.00	0.00
MFCN(9)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.00	0.00	0.014
MFCN(10)	H <sub>2</sub> O	4.29	4.81	5.86	4.7
MFCN(11)	CO <sub>2</sub>	3.00	1.31	1.50	21.15

### 3. 분석대상 사고경위 및 가정 사항

Level 2 PSA에서는 분석대상 원전에서 노심 손상으로 이어지는 모든 사고경위와 격납건물내에서 발생 가능한 중대사고현상의 모든 가능한 조합을 고려함으로써, 최종적으로 중대사고시 격납건물의 파손 및 방사성 물질의 방출 등을 포함한 격납건물의 건전성을 분석한다. 따라서 격납건물의 건전성을 위협하는 여러 중대사고 현상이 상세히 평가되고 있다. 중대사고시 격납건물의 건전성을 위협하는 중대사고 현상으로는 격납건물 직접가열(Direct Containment Heating, DCH), 증기폭발(Steam Explosion), 수소 연소(Hydrogen Combustion) 등이 있다. 이러한 현상 중 원자로 공동 콘크리트의 성분에 의해 가장 크게 영향을 받는 것은 MCCI에 의한 수소 생성이며, 수소 생성을

분석하기 위하여 Level 2 PSA에서는 중대사고분석 코드인 MAAP 코드로 주요 노심손상 사고경위에서 발생 가능한 수소 생성량, 최대 수소 발생율 등을 계산하여 수소와 관련된 격납건물 손상 가능성 평가에 필요한 정보를 제공하게 된다.

### 3.1 분석대상 사고경위 선정

일반적으로 수소 생성량 분석을 위한 사고경위 선정은 수소 발생량과 사고경위의 발생빈도 등 두 가지 관점에서 이루어진다. 본 분석을 위한 사고 경위는 “영광 5,6 호기 PSA 주요사건에 대한 수소 생성 분석”시 사용한 사고경위 중 울진 3,4 호기 수소점화기 설계시 인허가 기관의 검토를 받은 사고경위 중에서 수소생성량이 상대적으로 많은 3개의 경위를 선정하였다. 이 사고경위들은 주요 초기사건에 대하여 수소가 활발히 발생할 수 있도록 각종 공학적 안전계통의 운전상태 등이 가정되어있다. 선정된 사고경위는 표 2에 정리하였다.

표 2. 선정된 분석대상 사고경위

초기사건	이 름	사 고 경 위
SBO	SBO	(교류전원 상실) (보조급수 실패)
SB LOCA	SL	(저온관 파손) (안전주입 및 살수 실패)
TLOFW	TF	(급수 및 보조급수 상실) (모든 공학적안전계통실패) (가압기 안전밸브 개방시 SDS 2개 밸브 개방)

SBO는 초기사건으로 전원공급이 상실되는 발전소 정전사고로써 사고발생 즉시 원자로와 터빈·발전기는 정지되고, 주급수펌프와 보조급수펌프도 정지되는 것으로 가정된다. Class 1E급 전원으로 작동되는 모든 안전계통들은 그 기능을 수행하지 못하는 것으로, 즉 안전주입탱크를 제외한 안전주입계통, 격납건물살수계통, 격납건물 송풍냉각계통 모두 작동하지 못하는 것으로 모델링하였다.

발전소정전사고와 동시에 증기구동 보조급수까지 실패하여 이차측의 열제거능력이 완전히 상실되었을 경우 일차계통의 잔열로 인해 RCS 가 높은 압력으로 유지되어 잔열제거가 불가능하게 되는데, 이러한 상황을 고려하여 일차계통의 Feed & Bleed 운전이 가능하도록 영광 3,4 호기부터 안전감압계통(SDS)가 추가되었다. 이러한 안전감압계통의 설계요건으로는 Feed & Bleed 운전으로 발전소 안전정지기능을 하고, 고압안전주입계통의 이용이 불가능할 경우 원자로 파손전에 사고를 종결할 수 있거나, 원자로용기 파손시 일차계통의 고압에서 DCH 가 발생되지 않도록 RCS 를 감압시킬 수 있는 능력구비를 들 수 있다. 하지만 중대사고시 SDS 작동은 운전원의 판단에 의해 작동되므로 정확한 개방시간을 예측하기 어렵기 때문에 본 분석에서는 가압기안전밸브(PSV)의 개방만을 고려하였다. 즉, 원자로냉각계통(RCS)의 압력이 사고발생초기에 증가되어 가압기안전밸브의 방출설정치 압력인 2,500 psia를 초과하게 되면 RCS 냉각재는 가압기안전밸브를 통해 원자로 배수탱크(RDT : Reactor Drain Tank)로 방출된다. 그리고, PSV를 통해 계속적으로 증기 및 기체가 방출되면 탱크의 압력이 파열판의 설정치를 초과하여 파손되고 결국 RDT격실을 거쳐 격납건물로 이송된다

SBLOCA(Small Break Loss of Coolant Accident)는 소형냉각재상실사고로써 일차계통 압력경계에서 보통 2 인치 이하의 파단이 발생한 사고를 의미한다. 본 분석에서는 원자로 1차 계통의 저온관에서 0.023 ft<sup>2</sup> 의 파단면적을 설정하였다. 사고시작시 1차계통의 makeup system이 정지되고 letdown switch가 끊기며 charging pump를 강제로 정지시킨다. 주요 안전계통인 고압주입계통 및 저압주입계통과 격납건물 살수계통을 아울러 강제로 정지시킨다. 또한 격납건물의 송풍 및 냉각장

치를 정지시킨다. 4개의 안전주입탱크가 작동한다고 가정하였다.

완전급수상실사고인 TF 사고경위는 급수 및 보조급수의 상실을 초기사건으로 한다. 이어 모든 공학적 안전계통의 작동이 실패하고, 1차측 압력 상승에 따라 가압기 안전밸브(PSV)가 개방된 시점에서 안전감압계통(SDS)의 2개 밸브가 운전원에 의해 수동으로 개방되는 사고이다. 4개의 안전주입탱크가 작동한다고 가정하였다.

### 3.2 MAAP 분석 가정 사항

PSA에서는 가능한 보수성을 최소화하는 최적분석기법(Best Estimate, BE)을 사용하여 분석을 수행한다. 따라서 본 분석에서는 초기조건으로서 영광 5,6 호기 정격출력 운전 상태를 가정하였으며, 각 사고경위는 영광 5,6 호기에서 사용되는 성공조건에 따라 MAAP 4.0.3코드로 24시간동안 분석되었다.

중대사고시 수소생성은 사고 진행 및 발생하는 중대사고 현상에 따라 큰 영향을 받는다. 사고 진행과 관련된 것으로는 초기사건, 안전주입탱크, 안전주입계통 및 살수계통 등의 작동여부 등이 있으며, 이와 같은 사고 진행을 좌우하는 많은 수의 요인들은 수소 생성, 노심용융물 거동을 포함한 전반적인 사고 결과에 상당히 큰 영향을 미친다. 이러한 요인들은 주로 사고경위에 따라 결정되어지므로 사고경위 각각에 대하여 고유하게 고려된다. 한편, 수소생성과 관련된 중대사고현상에 중요한 것으로는 핵연료피복재 파손, 핵연료피복재 산화반응, 핵연료 용융, 노내 FCI, 노내 내부구조물의 산화반응, DCH, CCI 등이 있다. 현재 이러한 중대사고현상은 아직 많은 불확실성을 내포하고 있는 관계식 또는 수학적 모델로서 기술되고 있다. MAAP 코드에서는 이러한 중대사고모델의 불확실성과 밀접한 관련을 갖는 모델변수(model parameter)를 사용하고 있으며, 이 변수를 이용하여 민감도 분석 및 불확실성 분석을 수행할 수 있다. 따라서 이들 모델변수는 특정 값이 아닌 어느 범위의 분포를 가지며, 이들 값의 변화에 따라 중대사고의 진행이 변화될 수 있다. 본 분석에서는 모델변수중 사고 분석 기간 동안 격납건물내에서 수소연소를 막기 위하여 MAAP 사용자 지침서에서 제시하고 있는 TJBRN=3000.0K, TAUTO=3000.0K, DXHIG=1. 으로 가정하였다. 그외 모든 모델변수의 값은 MAAP 개발사인 FAI에서 제공하는 최적값(best-estimate value)으로 가정하였다.

## 4. MAAP 분석 결과

### 4.1 사고 진행과정

표 3에서 표 5는 각 분석 대상 사고 경위의 초기 사건에 따른 발생된 주요 사고 진행 결과를 요약한 것이다. 각각의 표에 나타나 있듯이 주요 사고 경위의 사고 진행 과정은 압력용기 파손 시점까지만을 기록한 것이기 때문에 압력용기 파손이후 원자로 공동 바닥 콘크리트와의 MCCI 현상에 의한 수소 발생은 고려되어 있지 않다. 따라서, 원자로 공동 바닥 콘크리트의 성분과 관계가 없이 동일하게 나타나고 있으며, 반응된 지르칼로이 분율에서만 미미한 차이를 보이고 있다.

SBO 사고의 경우 교류전원이 끊기면서 주냉각재 펌프가 정지하고 원자로가 긴급정지한다. 그리고 즉각 주증기격리밸브가 닫히면서 사고가 진행된다. 3096초에 가압기 안전밸브가 개방되고 4189초에 원자로배수탱크의 파열판이 파손된다. 이후 6676초에 노심이 노출되기 시작한다. 사고후 3110초부터 가압기 안전밸브의 단속적이며 반복적인 개폐가 계속되는데 원자로 압력용기가 마지막으로 파손되는 11091초까지 진행된다. 약 6676초에 이르면 노심내 거의 모든 냉각수가 빠져나감에 따라 노심이 완전히 노출되며, 노심내 냉각수량이 줄어들면서 9656초에 노심온도가 2,500 K를

넘어가기 시작한다. 10098초에는 노심하부지지관이 파손되면서 하부공간으로 노심용융물이 배치되기 시작한다. 그리고, 11091초에 압력용기 파손이 진행된다. 표 3은 SBO 사고의 진행과정을 요약한 것이다

표 3. SBO 사고 주요 진행 과정

주요 사건 (초)		YGN56	UCN56	Basaltic	L-C
원자로정지		0	0	0	0
PSV 개방		3096	3096	3096	3096
RDT 파열판 파손		4188.95	4188.95	4188.95	4188.95
노심노출		6675.80	6675.80	6675.80	6675.80
TCRHOT > 2400 K		9655.89	9655.89	9655.89	9655.89
노심지지관 파손		10097.54	10097.54	10097.54	10097.54
원자로용기 파손		11091.15	11091.15	11091.15	11091.15
노내 H <sub>2</sub> 생성	H <sub>2</sub> 생성 시점	7344.2	7344.2	7344.2	7344.2
	최대 H <sub>2</sub> 생성율 (kg/sec)	16.63(at 10100)	16.63(at 10100)	16.63(at 10100)	16.63(at 10100)
	노심지지관 파손시 H <sub>2</sub> (kg)	461	461	461	461
	RV Fail시 H <sub>2</sub> (kg)	475.6	475.6	475.6	475.6
반응된 지르칼로이 비율(%)		46.66	46.68	46.68	46.72

TLOFW 사고의 경우, 주급수 및 보조급수계통의 정지됨에 따라 원자로는 30.25초에 긴급정지하게 된다. 증기발생기를 통한 열제거가 불가능함에 따라 1차계통의 압력은 계속 상승하게 되고 1010초에 가압기 안전밸브가 개방되기 시작한다. 이 시점에서 운전원이 안전감압계통의 밸브 2개를 개방함에 따라 1차계통 압력이 감압되게 된다. 이 개방된 밸브를 통해 노내 냉각수가 유출되면서 2419초에 노심이 노출된다. 24547초에는 노심최대온도가 2,500 K를 초과하며 노심의 온도는 계속 증가하면서 핵연료피복재의 산화반응이 진행된다. 그리고, 계속적인 노심용융 진행으로 31292초 이후부터는 노심 지지관이 파손되기 시작한다. 43946초에 원자로 용기 하부로 떨어진 노심용융물에 의해 원자로 압력용기 파손이 유발된다. 표 4는 TLOFW 사고의 주요 진행과정을 요약한 것이다.

표 4. TLOFW 사고 주요 진행과정

주요 사건 (초)		YGN56	UCN56	Basaltic	L-C
원자로정지		30.25	30.25	30.25	30.25
PSV 개방		1009.92	1009.92	1009.92	1009.92
RDT 파열판 파손		1131.45	1131.45	1131.45	1131.45
노심노출		2418.45	2418.45	2418.45	2418.45
TCRHOT > 2400 K		24547.31	24547.31	24547.31	24547.31
노심지지관 파손		31291.65	31291.65	31291.65	31291.65
원자로용기 파손		43945.85	43945.85	43945.85	43945.85
노내 H <sub>2</sub> 생성	H <sub>2</sub> 생성 시점	2807.79	2807.79	2807.79	2807.79
	최대 H <sub>2</sub> 생성율 (kg/sec)	2.325(at 31301)	2.325(at 31301)	2.325(at 31301)	2.325(at 31301)
	노심지지관 파손시 H <sub>2</sub> (kg)	367.5	367.5	367.5	367.5
	RV Fail시 H <sub>2</sub> (kg)	431.2	431.2	431.2	431.2
반응된 지르칼로이 비율(%)		45.07	42.66	43.45	44.99

SLOCA의 경우, 고압/저압안전계통, 격납건물송풍냉각계통 및 살수계통, 그리고 충전펌프의 작동

중지를 초기사건으로 부과하였으며 1차계통의 압력강하가 천천히 진행됨에 따라 사고발생후 107초에 원자로가 긴급정지 되었다. 동시에 보조급수계통이 가동되기 시작하며 주증기격리밸브가 닫혔다. 이어 원자로냉각재펌프가 정지하였으며 중형 및 대형 냉각재상실사고와 달리 SIT의 안전주입수가 천천히 주입되면서 3163초에 노심이 노출되는 현상이 나타났다. 즉, 안전주입탱크의 주입수가 관여하기 이전에 노심손상진행에 따른 압력강하가 천천히 이루어지기 때문에 노심 노출을 막을 수 없었다. 따라서, 4862초에는 노심최대온도가 2,500 K를 초과하며 노심의 온도는 계속 증가하면서 핵연료피복재의 산화반응이 진행된다. 그리고, 계속적인 노심용융 진행으로 17078초 이후부터는 노심 지지판이 파손되기 시작한다. 20670초에 원자로용기하부로 떨어진 노심용융물에 의해 원자로 압력용기 파손을 유발된다. 표 5는 SLOCA 사고의 주요 진행 과정을 요약한 것이다.

표 5. SLOCA 사고 주요 진행과정

주요사건(초)		YGN56	UCN56	Basaltic	L-C
원자로정지		106.72	106.72	106.72	106.72
PSV 개방		-	-	-	-
RDT 파열판 파손		-	-	-	-
노심노출		3162.75	3162.75	3162.75	3162.75
TCRHOT > 2400 K		4861.85	4861.85	4861.85	4861.85
노심지지판 파손		17077.96	17077.96	17077.96	17077.96
원자로용기 파손		20669.91	20669.91	20669.91	20669.91
노내 H <sub>2</sub> 생성	H <sub>2</sub> 생성 시점	3701.27	3701.27	3701.27	3701.27
	최대 H <sub>2</sub> 생성율 (kg/sec)	4.386(at 5019)	4.386(at 5019)	4.386(at 5019)	4.386(at 5019)
	노심지지판 파손시 H <sub>2</sub> (kg)	471.9	471.9	471.9	471.9
	RV Fail시 H <sub>2</sub> (kg)	502.4	502.4	502.4	502.4
반응된 지르칼로이 분율(%)		47.69	47.69	47.69	47.69

#### 4.2 수소 발생 분석

표 3,4,5에서 압력용기 파손시점까지의 수소 발생량은 아직 MCCI가 발생하지 않았기 때문에 원자로 공동 바닥 콘크리트 성분에 따른 수소 생성량에 차이가 없다. 그러나, 표 6의 24시간에서의 각 격실별 수소 발생량 및 MCCI에 의해 발생한 수소량을 보면 콘크리트 성분별로 수소 발생량의 차이가 나타나고 있다. 표 6의 합계는 각 격실별 24시간 시점에서의 수소양의 합계이며 MH2CBT는 CCI 현상에 의해 생성된 수소양을 나타내고 있다.

표 6에서 알 수 있듯이 SBO 사고 경위의 경우 Basaltic 콘크리트와 Limestone-Commonsand 콘크리트 성분에 대한 수소 전체 격실 수소 발생량 및 MCCI에 의해 발생하는 수소 양은 거의 차이가 없다. 표준 Basaltic 콘크리트 성분에 더 가까운 영광 5,6 호기 콘크리트에서 발생한 수소량보다 울진 5,6 호기 콘크리트에서 발생하는 수소량이 Basaltic 콘크리트에서 발생하는 수소량과 거의 동일하게 나타나고 있다. 그림 1은 SBO 사고시 MCCI 현상이 발생하는 원자로 공동 격실에서의 시간에 따른 수소 거동을 각 콘크리트 별로 비교한 그림이며, 그림 2는 발생한 수소가 모이게 되는 격납건물 돔에서의 시간에 대한 수소 변화량을 나타내고 있다. 그림 3에 SBO 사고시 MCCI에 의해 생성되는 수소량을 각 콘크리트 성분별로 비교하였다. 그림1,2,3 및 표 6을 통하여 SBO 사고 경위에서는 영광 5,6 호기의 경우가 수소 발생량이 약간 많지만 울진 5,6 호기 및 표준 Basaltic, Limestone-Commonsand 콘크리트에 대한 수소 거동은 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

TLOFW 사고의 경우 표준 Basaltic 콘크리트에서 발생하는 총 수소량은 551.45 kg이고, 이중 MCCI에 의해 발생하는 양은 82.41 kg이며, Limestone-Commonsand 콘크리트의 경우 총 수소발생량이 557.53, MCCI에 의한 수소 발생량은 75.7 kg이다. 영광 5,6 호기의 경우 총 수소 발생량 및 MCCI에 의한 수소 발생량이 오히려 Limestone-Commonsand와 유사하며, 울진 5,6 호기 콘크리트에서 표준 Basaltic 콘크리트보다 수소 발생량이 많게 나타나고 있다. 그림 4는 원자로 공동 격실에서의 시간에 따른 수소 거동을 각 콘크리트 별로 비교한 그림이며, 그림 5는 격납건물 돔에서의 시간에 대한 수소 변화량을 나타내고 있다. 그림 6은 TLOFW 사고시 MCCI에 의해 생성되는 수소량을 각 콘크리트 성분별로 비교한 것이다. 이를 통하여 TLOFW 사고시 울진 5,6 호기 콘크리트의 수소 발생량이 많은 것으로 나타나고 있으나, 거동은 Basaltic 콘크리트와 상당히 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

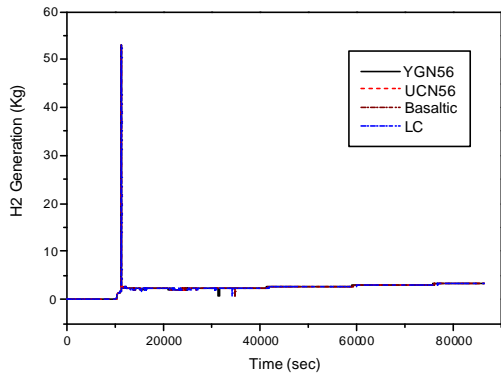
SLOCA의 경우 수소 총생성량은 영광 5,6 호기가 약간 작을 뿐 나머지 콘크리트 성분에서 유사하게 나타나고 있으며, MCCI에 의한 수소 발생량은 영광 5,6 호기 보다 울진 5,6 호기가 표준 Basaltic 콘크리트나 Limestone-Commonsand 콘크리트와 가까운 결과를 보이고 있다. 그림 7은 원자로 공동 격실에서의 시간에 따른 수소 거동을, 그림 8은 격납건물 돔에서의 시간에 대한 수소 변화량을 나타내고 있다. 그림 9는 MCCI에 의해 생성되는 수소량을 각 콘크리트 성분별로 비교한 것이다. SLOCA시의 수소 거동에서도 영광 5,6 호기 콘크리트보다 울진 5,6 콘크리트 성분이 표준 Basaltic 및 Limestone-Commonsand 콘크리트와 유사한 거동을 보이고 있다.

위의 세가지 초기사건으로 인한 중대사고시 각 콘크리트 성분에 따른 수소 거동을 살펴본 결과 사고 경위에 따라 수소 발생량에서의 표준 Basaltic 콘크리트에 가까운 영광 5,6 호기 콘크리트가 경우에 따라서는 Limestone-Commonsand 콘크리트와 유사한 거동을 보이는 경우가 있으며, CaO 함유량 때문에 Limestone-Commonsand 콘크리트와 유사할 것으로 우려했던 울진 5,6 호기 콘크리트에서의 수소 거동이 오히려 표준 Basaltic 콘크리트와 유사한 경우가 많이 나타나고 있다. 이러한 사실로 Level 2 PSA 수행시 MAAP 전산코드에서 콘크리트 성분을 호기별로 분석하여 입력하는 것과 표준 Basaltic으로 분석하는 것이 중대사고시 수소 거동에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

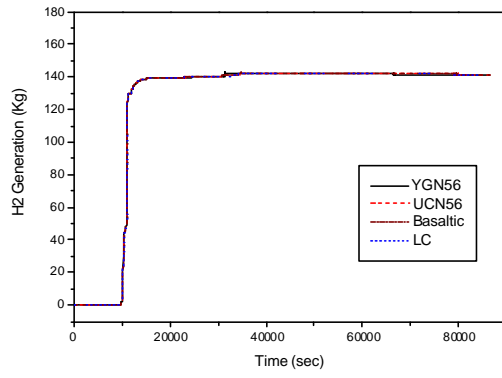
표 6. MAAP 분석에 의한 24시간에서의 격납건물 격실별 수소 양 (kg)

격 실	사 고 경 위											
	SBO				TLOFW				SLOCA			
	YGN56	UCN56	Basaltic	L-C	YGN56	UCN56	Basaltic	L-C	YGN56	UCN56	Basaltic	L-C
원자로공동	3.353	3.347	3.347	3.336	4.118	4.482	4.287	4.118	3.489	3.514	3.515	3.517
S/G격실 1	19.02	19.05	19.05	19.05	22.37	22.83	22.16	22.37	19.58	19.69	19.7	19.69
S/G격실 2	18.71	18.73	18.73	18.73	22.17	22.59	21.96	22.17	19.75	19.85	19.86	19.85
상부격실	241.2	241.4	241.4	241.3	270.5	276.2	267.9	270.8	247.9	249.1	249.3	249.2
돔격실	141.3	141.5	141.5	141.4	157.8	160.7	156.0	158.0	146.8	147.4	147.6	147.5
환형공간	68.27	68.36	68.36	68.33	80.17	80.96	79.14	80.07	69.87	70.18	70.23	70.19
합 계	491.853	492.387	492.387	492.146	557.128	567.762	551.447	557.528	507.389	509.734	510.205	509.947
MH2CBT	17.7	17.28	17.28	17.2	74.55	98.14	82.41	75.7	2.657	5.006	5.389	5.123

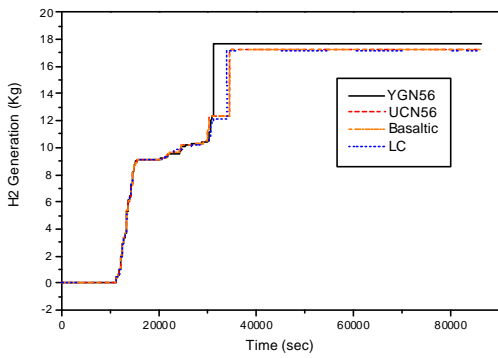




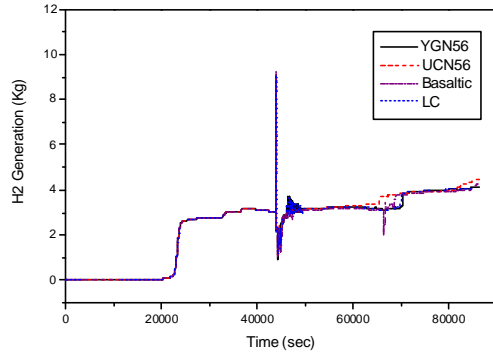
**Fig.1 H2 Mass in Cavity during SBO**



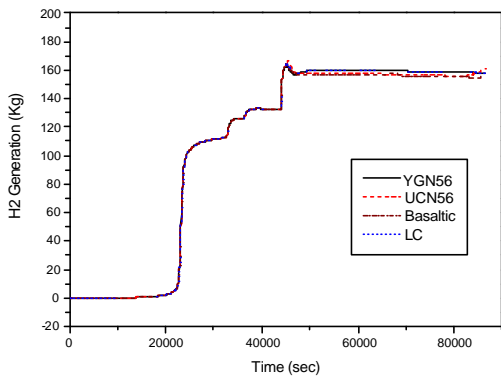
**Fig. 2 H2 Mass in Containment Dome during SBO**



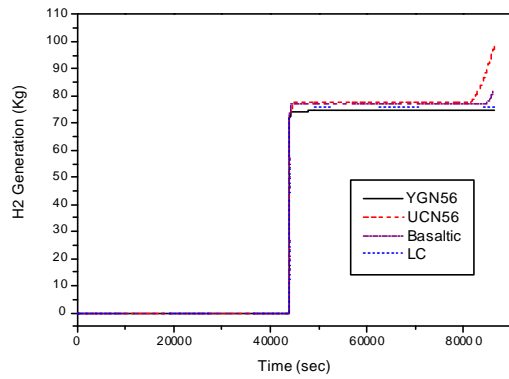
**Fig.3 Integrated H2 generated from CCI in SBO**



**Fig. 4 H2 Mass in Cavity during TLOFW**



**Fig.5 H2 Mass in Containment Dome during TLOFW**



**Fig.6 Integrated H2 generated from CCI in TLOFW**

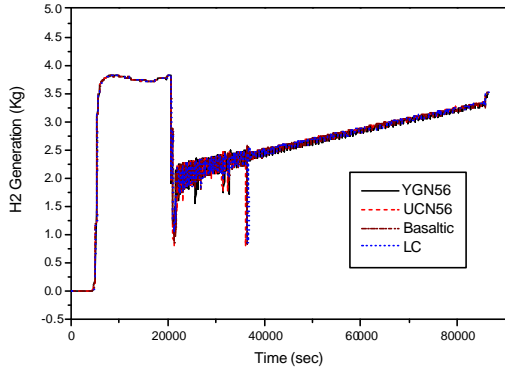


Fig. 7 H2 Mass in Cavity during SLOCA

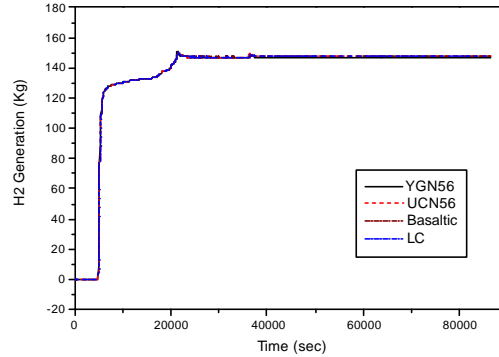


Fig. 8 H2 Mass in Containment Dome during SLOCA

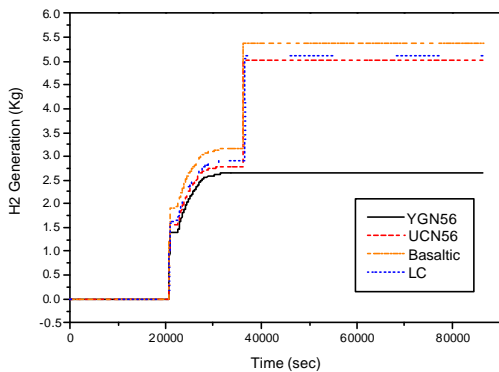


Fig. 9 Integrated H2 generated from CCI in SLOCA

## 5. 결론

본 연구는 중대사고시 MCCI에 의한 수소 발생을 평가함에 있어서 격납건물 공동 바닥 콘크리트의 성분에 따른 영향을 평가하여 기존의 Level 2 PSA에서 수행해 오던 공동 바닥 콘크리트 고유 성분 분석의 타당성에 문제를 제기하였다. 원자로 공동 바닥 콘크리트 성분은 중대사고 진행과정에서 여러 가지 영향을 미칠 수 있으나, 가장 큰 관심은 MCCI에 의한 수소 발생이라 할 수 있다. 본 연구에서는 영광 5,6 호기 PSA 관련 수소발생 보고서에 사용된 사고 경위 중 SBO, TLOFW, SLOCA 사고 경위에 대하여 영광 5,6 호기 원자로 공동 콘크리트, 울진 5,6 호기, 표준 Basaltic, Limestone-Commonsand 등 4가지 콘크리트 구성 성분에 의한 수소 발생량을 MAAP 4.0.3 으로 분석하였다. 연구 결과, 표준 Basaltic 콘크리트에 가까운 성분인 영광 5,6호기 콘크리트의 경우 Limestone-Commonsand 콘크리트와 유사한 거동을 보이는 경우가 있었으며(TLOFW 경우), Si 함유량으로는 표준 Basaltic에 가깝지만 CaO 함유량으로는 오히려 Limestone-Commonsand에 가까운 울진 5,6 호기 콘크리트의 MCCI에 의한 수소 발생 및 거동은 오히려 표준 Basaltic 콘

크리트의 거동과 유사한 경우가 많았다. 또한, 본 분석에서 표준 Basaltic 콘크리트와 Limestone-Commonsand의 거동이 거의 유사하게 나타나고 있으며, 중대사고 현상의 불확실성을 고려할 때 이 차이는 미미한 것으로 판단된다. 따라서, Level 2 PSA 중대사고 분석에서 MAAP Parameter 파일의 원자로 공동 콘크리트 성분 입력을 위한 시편 제작 및 분석을 통하여 호기 고유의 입력자료를 생성하는 것은 의미가 있지만, 결과적으로는 크게 Basaltic과 Limestone으로 구분하여 표준 자료를 사용하는 것과 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 국내의 경우, 원전 건설시 사용되는 콘크리트가 대부분 현무암 성분의 Basaltic에 가깝게 나타나고 있기 때문에 호기별 콘크리트 성분 분석 없이 콘크리트 타설시 작성되는 Batch Adjustment 보고서나 기타 시험보고서 등을 통하여 Basaltic 혹은 Limestone으로 구분한 뒤 표준 성분으로 분석해도 큰 차이가 없을 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

1. 권종주, "영광 5,6 호기 PSA 주요 사고경위에 대한 수소 생성 분석 보고서", '99전력연-단557, TM.94ZJ15.P1990.550, 1999. 9.
2. 김명기, 권종주, 정백순, 서미로, 오해철, "영광 5,6호기 확률론적 안전성평가 최종보고서", '00전력연-단612, TR.94ZJ15.T2000.607, 2000. 11.
3. FAI, "MAAP4-Modular Accident Analysis Program for LWR Power Plants" Computer Code Manual, May. 1994