

## 압축공기에너지 저장(CAES)의 현황과 전망

김택곤, 김지연, 이진무(GEOTASK팀, SK건설)

### 1. 서론

CAES란 Compressed Air Energy Storage로서 잉여전력을 저장하는 방법 중의 하나이다. 전력사업의 관점에서는 양수발전소, CAES, 플라이휠, 초전도체, 축전지 등을 전력저장시설물로 본다. 이 중 플라이휠, 초전도체나 축전지는 크기나 용량에 한계가 있어 소규모 시설, 양수발전과 CAES는 대규모 전력저장 시설이다. CAES 발전이란 심야에 잉여전력을 이용하여 심부 암반에 공기를 압축 저장한 후, 주간의 첨두부하 시 발전하여 안정적인 전력을 공급하는 것이다. 본 논문에서는 이러한 가스터빈용 CAES 발전 원리와 현황, 환경변화 등을 기술하고, 향후 CAES 모델의 적용가능성에 대한 전망을 제시하였다.

### 2. 가스터빈 발전용 CAES

#### 2.1 CAES 원리

CAES(Compressed Air Energy Storage)란 압축공기에너지 저장으로서 그림 1과 같이 심야전력 등의 잉여전력으로 심부 암반공동에 공기를 압축하여 저장한 후, 전력소모가 급증하는 주간의 첨두부하 때 발전함으로써 안정적인 전력을 공급하는 시스템이다. 현재는 가스터빈 발전에 CAES가 적용되고 있다. 즉, CAES는 전기에너지를 압력과 부피의 작용에 의한 기계에너지로 바꾸어 저장하고 이를 주간에 열과 함께 다시 전기에너지로 생산하는 시스템이다. 이러한 가스터빈 발전은 통상 압축기(Compressor), 연료가 들어가는 연소기(Combuster), 터빈(Turbine)의 세 가지 기본요소로 구성된다.

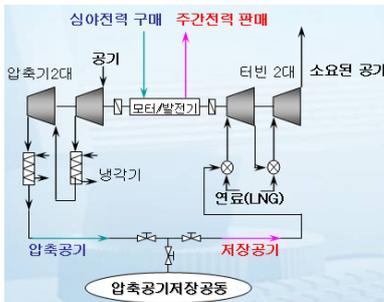


그림 1 CAES 발전

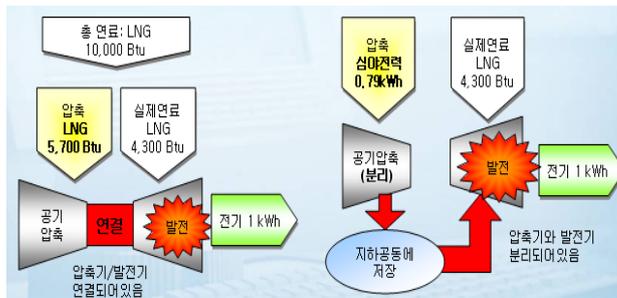


그림 2 일반가스터빈발전과 CAES 모식도

CAES는 근본적으로 기존의 가스터빈을 개조한 것이라 할 수 있다. 기존의 가스터빈은 전력 1kWh를 생산하기 위해서 10,000Btu 정도의 열량을 공급하여야 한다. 이중 전체 투입 에너지의 1/3~1/2는 공기 압축에 사용되므로 전체 효율은 30~40%정도이다. 반면 CAES는 가스터빈에서 공기압축에 사용되는 에너지를 심야 잉여전력으로 대체시켜 지하공동에 고압의 공기를 저장시킨 후 주간에 4,000Btu 정도의 LNG를 공급하여 전력 1kWh를 생산하는 방식으로서, 생산된 전력의 60%정도는 심야 전력저장에 의하여, 나머지 40%정도는 LNG의 연소에 의하여 전력을 생산하는 발전시스템이다.(그림 2)

## 2.2 CAES 현황

CAES 종류는 대량의 압축공기 운영보상 방식과 입지조건에 따라 나눌 수 있다. 먼저 압축공기의 압력보상 여부에 따라 정압식과 변압식으로 분류한다. 정압식은 압축공기가 저장공동에서 빠져나갈 때 지하수압을 이용하여 해당 공기압력을 보상함으로써 발전시간 동안 일정한 압력 유지가 가능한 방식이다. 이와 달리 변압식은 압축공기가 저장공동에서 빠져나갈 때 별다른 조치 없이 고압의 공기가 빠져나감과 동시에 저장공동의 내부 압력이 감압되는 방식이다.(그림 3)

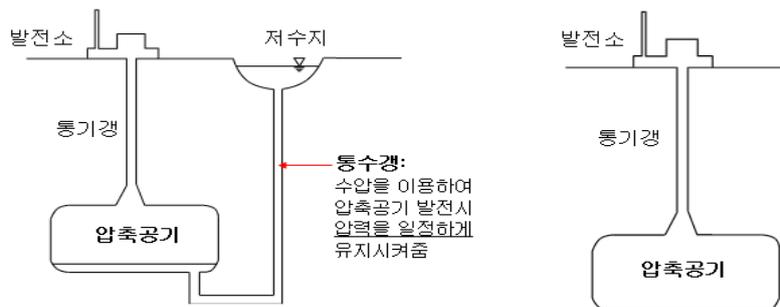


그림 3 압축공기보상여부에 따른 CAES 종류  
좌측이 정압식, 우측이 변압식

CAES 저장공동의 입지로는 고압조건을 극복하고자 대심도 기밀암반에 저장해야하므로 암염돔, 대수층, 경암반 공동, 폐가스정 또는 폐광산 등에 건설이 가능하다.

세계 최초 CAES 발전소인 독일의 Huntorf 발전소(290MW, 1987)와 미국 알라바마의 McIntosh 발전소(110MW, 1991)는 모두 암염공동에 건설되어 있다. 이는 대심도 파이프를 통한 열수로 암염을 녹여 공동을 생성하고, 지상에 변압식 CAES를 건설한 경우이다. 이와 같이 암염공동형은 추가 굴착비가 적게 들고, 저장공동의 기밀성을 확보하므로 경제적인 것이 특징이다. 그 외 다른 방식의 저장공동은 아직 상용화되지 않았으나 다수의 연구가 진행 중이다. 일본에서 1980년대에서 2000년 초까지 복공식 암반공동을 이용한 Pilot plant 건설을 진행하고 있으며, 미국 아이오와주에서는 대규모 전력저장 프로젝트인 ISEP(Iowa Storage Energy Park)에서 2700MW급 대수층 저장공동이 건설 중에 있다. 또한 폐석회석 광산을 이용한 CAES도 미국 오하이오에서 추진 중이다.

### 2.3 CAES 국내 적용가능성

국내의 경우 지질여건 상 화강암, 편마암 등 결정질암이 국토의 60~70%를 이루고 있고, 유럽 및 미주지역과 달리 암염이 존재할 가능성은 극히 적다. 하지만 도심지나 해안가 주변하부 대심도에는 신선한 암반이 대규모 분포되어 있는데다, 세계적 수준의 지하공간 기술수준을 보유하고 있으므로 정압식 무복공 암반공동형 CAES가 유리한 것으로 판단된다. 특히 국내에서 다수의 대규모 비축기지의 설계 및 시공을 통해 취득한 기밀성 확보기술은 암반공동형 CAES의 핵심기술이다. 다만 타당성과 경제성이 있어야하는데 LNG 가스터빈발전은 철두부하용으로 서 건설기간이 여타 발전소 건설에 비해 짧고, CO2 배출이 적은 청정에너지이므로 석탄이나 중유와 같은 발전에 비해 상당히 유리하다.

### 3. 지하공동형 CAES 주요 시스템

CAES 관련 주요기술은 크게 압축 및 발전을 위한 지상설비시스템과 압축공기 저장을 위한 지하공간시스템으로 분류할 수 있다. 본 원고에서는 암염공동이 아닌 대심도에 굴착될 지하공동형 CAES 설계 및 시공시 고려해야할 주요 지하시스템에 대해서 간략히 소개한다.

#### 3.1 저장공동의 배치 및 심도

기본적으로 저장공동의 축방향은 현지 지반조건을 고려하여 결정되어야 하며, 이 때 가장 중요한 것은 현지 암반에 존재하는 절리와 같은 불연속면의 주향방향이다. 저장공동의 배치는 불연속면의 방향과 최대주응력을 고려하여 결정하여야 하며 최대주응력 방향에는 가급적 공동축을 일치시키고, 특히 현지암반에서 출수되는 주절리방향에는 가급적 수직적으로 교차하는 것이 좋다. 또한 저장공동의 심도는 압축공기 40~50bar를 저장해야하므로 콘크리트 라이닝을 고려하지 않는 일반 NATM 개념이라면 암반심도는 최소 500m 이상 심부에 건설되어야 한다.

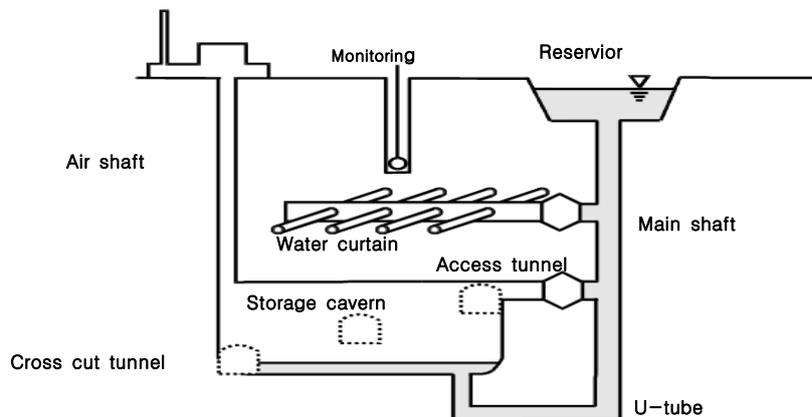


그림 4 지하암반공동형 CAES 모식도

### 3.2 Main shaft와 U-tube

Main shaft는 굴착 중에는 버력처리를 위해 활용되며, 건설이 끝나면 shaft 내부의 모든 구조물을 철거한 후 U-tube와 연결하여 수압보상을 위해 활용한다. 따라서 water curtain level과 main cavern level의 두 곳에 plug가 설치된다. Main cavern level에는 double plug가 설치되며 main cavern의 기밀성을 보장하기 위해 water curtain tunnel에서 하향으로 water curtain hole을 설치한다.

Main shaft의 직경은 굴착장비와 인력이 드나들 수 있는 최소한의 직경으로 해야 하지만 main shaft가 U-tube로서 활용되기 위해서는 물의 최대속도가 steady uniform flow가 되어야 하는 제약조건이 있다. Main shaft는 굴착중 뿐만 아니라 굴착 후에도 영구히 활용되는 시설물이므로 주변암반이 교란되지 않도록 조심스럽게 굴착한 후 콘크리트 라이닝을 타설하며, 굴착중 발생하는 water inflow는 grouting을 하여 지하수가 고갈되지 않도록 하여야 한다. 또한 Main shaft 상부는 고정식을 사용하므로 물을 담을 수 있는 Reservoir가 필요하다. 특히 지표면에서 shaft collar를 설치하는데 지표층에서의 안전한 굴착을 위해서 pre-grouting이나 curtain wall technique을 활용하여야 한다.

### 3.3 Air shaft

공사 중 환기 및 운영 중 압력제어를 위해 Air shaft가 필요하다. Air shaft의 개수는 이러한 점을 고려하며, 결정되어야 한다. Main shaft와 air shaft 위치는 지상조건에 따라 변경될 수 있다. 그러나 air shaft는 반드시 cavern의 상부에 위치하여야 하며, main shaft는 cavern으로부터 더 멀리 떨어질 수는 있지만 더 가까이 설치되어서는 안된다. 이는 cavern과 shaft 사이에서 발생할 수 있는 저장된 고압의 공기 유출을 방지하기 위해서이다.

### 3.4 Water curtain

수벽터널은 고압의 압축공기 기밀성을 확보하기 위해 필요하다. 수벽터널과 수벽공 공사는 주변 지하수 고갈을 방지하기 위해 cavern 굴착 이전에 완료되어야 한다. 수벽터널이 굴착됨에 따라 수벽공은 즉시 굴착되어야 한다. 수벽공의 심도나 간격은 지하수위가 하강하지 않도록 설치되어야 한다. 수벽공의 collar 부위에는 packer를 설치하고 지상과 pipe로 연결하여 수벽터널이 물로 충수되기 전까지 충분한 수두를 갖는 물이 공급될 수 있도록 한다. 수벽공은 최소한 main cavern의 막장면보다 수십 m 앞서서 충수되어야 하며 가능하다면 main cavern 굴착이 시작되기 이전에 수벽공 공사가 완료되어야 한다. 수벽공 공사는 전체 공정 중에서 critical path에 해당하는 공정이므로 가능한 빨리 완료되어야 한다.

### 3.5 Storage cavern

대심도 저장공동의 굴착을 위해서 main shaft로부터 수평 access tunnel이 굴착된다. 수평 access tunnel의 roof는 arch형이며 shotcrete와 rock bolt로 보강한다. Access tunnel

이 cavern을 굴착할 위치에 도달하면 access tunnel과 수직으로 cross cut tunnel을 굴착한다. 이 cross cut tunnel은 cavern의 top heading을 굴착하기 위한 access 역할을 한다. 이후 access tunnel은 하향구배로 내려가며, main cavern의 bench 1, 2 level에서 access cross cut tunnel을 access tunnel과 수직으로 굴착한다. Main cavern은 규모에 따라 다르지만 2축 가스터빈 발전이라면 폭 13m, 높이 22m인 top heading과 벤치 1, 2 정도의 크기가 된다. 터널 보강은 Q-system을 기본으로 슛크리트 두께와 록볼트 길이를 선정하며, 특수 구간에 대해서는 전산해석을 통해 보강량을 판단하게 된다.

#### 4. 국내 전력 환경변화

##### 4.1 국내 전력현황

국내의 전력 수요와 공급은 지난 90년대부터 사회성장, 고령화의 진전과 더불어 전기의 편리성에 기인하는 1인당 전력소비가 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 발전설비의 총 시설용량 중에서 공급예비력은 1990년대에는 6%, 2000년대에는 10%로 변화의 폭이 심해졌으며 2003년부터 다시 하락하는 추세이다. 공급예비력(供給豫備力, supply capacity)이란, 발전설비의 총 시설용량 중에서 예측이 가능한 출력 감소분을 제외한 공급가능용량과 전력수요와의 차이를 말하며, 주로 당일의 수요예측 오차, 발전기의 고장, 계통주파수의 조정 및 기타 순시부하의 변동 등에 대하여 전력을 원활하게 공급할 수 있도록 하기 위하여 보유한다. 공급가능용량은 총 설비용량에서 발전기 출력감소분을 제외한 것으로 출력감소는 주로 계획예방정비, 수력발전의 댐 수위저하에 의한 발전력 감소, 성능저하, 열공급 발전기의 열공급 시 출력감소 등 이다. 따라서 국내 전력의 안정된 비상용 전력, 즉 첨두부하용 전력이 필요하며 기저부하 전원 이용률 향상이 필요하다는 것을 알 수 있다.

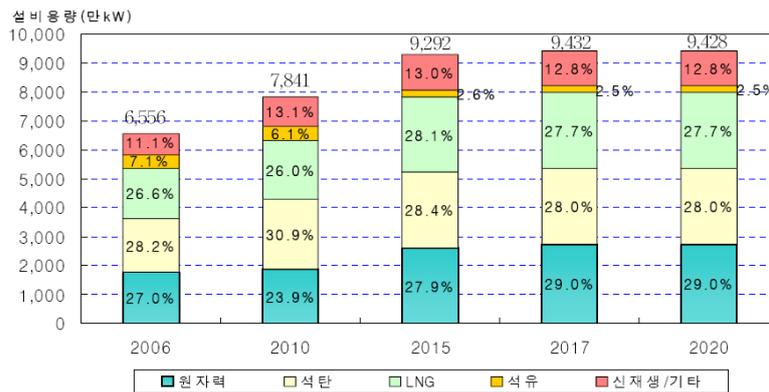


그림 5 에너지원별 전원구성(제3차 전력수급계획)

2006년 12월 산업자원부가 발표한 제3차 전력수급계획(2006년~2020년)에 의하면 2차 계획대비 석유발전을 점진적으로 축소하고, 석탄은 축소 후 유지하며, 원자력, LNG, 신재생에너지는 증가 후 유지하려는 정책을 제시하였다.(그림 5) 이는 현재 전 세계적으로 뜨거운 이슈인 고유가와 CO2로 인한 지구온난화, 기후변화협약과도 무관하지 않은 것으로 판단된다. 또한 그

동안 첨두부하용으로 자리를 차지해왔던 양수발전은 더 이상 추가 건설하지 않으므로 첨두부하 발전은 LNG가 대체할 것으로 예상된다.

## 4.2 심야전력 환경변화

CAES 경제성 관점에서 가장 중요한 부분 중의 하나는 바로 잉여 전력을 어떻게 도입하여 압축공기를 미리 저장하는가에 있다. 국내의 경우에는 심야전력제도라는 것이 있어서 잉여전력을 이용한 CAES 발전은 어느 정도 경쟁력이 있었다. 심야전력제도는 원자력발전 등에서 꾸준히 나오는 잉여전력의 활용을 최대화 해보자는 취지에서 시작되어, 심야전력을 이용한 산업체로부터 가정의 심야전기 보일러 등까지 정부에서 활용을 권고한 제도이다. 그러나 최근 들어 심야 전력비를 폐지하자는 주장이 설득력을 얻고 있어 이러한 추세가 바뀔 것으로 예상된다. 즉 IMF 이후 경기회복세에 접어들고, 야간 생활패턴이 바뀌면서 심야전력이 잉여로 남는다고 보기 어려워졌다. 이로 인해 2007년 현행 심야전력요금은 고유가 등의 영향으로 생산원가의 60%에도 미치지 못해 연간 5,000억 원에 달하는 손실이 발생함에 따라 최근 6년간 2조1천627억 원의 누적적자를 기록하였다. 이를 타개하기 위해 2008년에 산업용 전력비도 4.2% 상승되었고, 심야 시간대(오후 11시 ~ 오전 9시)의 전기요금은 9.7% 인상이 결정되었으나, 적자를 메우기엔 부족한 수준이라고 한다. 따라서 심야전력비의 상승은 추후에도 지속될 것으로 예상된다. 따라서 기존 심야전력을 이용한 CAES 발전의 경쟁력을 위해서는 새로운 돌파구가 필요하다.

## 5. CAES 발전 전망

### 5.1 신재생에너지와의 융합

상기와 같은 환경변화에도 불구하고, CAES 발전에 대한 전세계적 움직임은 활발하게 진행되고 있다. 특히 발전분야에서는 지구온난화, 기후협약변화 등에 힘입어 풍력, 조력, 태양열, 바이오에너지 등 신재생에너지 개발에 대한 관심이 급증하고 있다. 즉 신재생에너지는 향후 미래 시대적 요구상황에 부응하는 발전개념인 것이다. 그럼에도 불구하고 자연의 힘을 많이 이용하다보니 지속적이고 일관성있는 전력공급 확보에 차질이 발생할 수 있다. 따라서 전력수요가 급격히 변하는 첨두부하 시 즉각 대응속도가 느리다는 단점이 있다. 풍력발전의 예를 들어보면 바람의 세기나 강도는 계절별, 시간별로 차이가 나기 마련이며, 따라서 안정적 전력공급에 뜻하지 않는 바가 발생할 수도 있는 것이다.

이러한 시대적 요구에 부응하는 신재생에너지의 단점을 보완하고자 선진국에서는 신재생에너지와 융합된 CAES 연구가 진행되고 있다. 특히 풍력발전산업의 경우 유럽 선진국들은 90년대 후반부터 원자력 발전의 증설이 약화되면서 비약적으로 성장하여 연평균 30%이상의 성장률을 나타냈다. 이러한 풍력기술의 동향은 계통 연계형 풍력발전단지 구성에 따라 시스템 대형화, 구조 단순화를 통해 생산원가가 하락하고, 해양풍력발전단지 등 새로운 분야로까지 확대되고 있다.



그림 6 독일의 풍력발전과 CAES

이에 대해 최근 독일의 KBB는 풍력에너지와 CAES가 결합될 경우 상호 보완 및 발전을 이룰 수 있다고 발표하였다.(그림 6참조) 즉 이는 풍력발전의 단점인 불안정한 전력 생산을 보완하기 위해 풍력을 이용해 압축공기를 저장함으로써 첨두부하 시 가스터빈 발전으로 보완하는 개념인 것이다. 이와 관련하여 미국 콜로라도대학의 한 연구에서도 풍력과 연계된 전력 저장시설 분석 시 양수 발전, 석탄화력 발전보다 CAES가 가장 수익성이 좋은 것으로 보고되었다. 또한 미국 오하이오주의 폐석회석 광산을 이용한 Norton Energy Storage, 암염공동을 이용한 텍사스의 Markham 프로젝트, 지하 대수층을 이용한 아이오와 주의 ISEP(Iowa Stored Energy Project) 등이 진행 중에 있다.

우리나라의 경우에는 1995년 태양광발전(2228MWh)의 20%에 미치는 수준이었던 풍력발전(432MW)이 2006년 현재 태양광발전(31,022MWh)에 비해 약 8배의 발전량(238,911MWh)을 보이면서 단기간 내 급격한 성장을 보여주고 있다. 이러한 풍력발전(發電)의 비약적 발전(發展)이 가능할 수 있었던 것은 자체개발 가능한 풍력발전 기술의 약진에서 비롯된 것이다. 그러므로 조만간 신재생에너지와 융합된 CAES 기술이 국내에서도 진행될 가능성이 충분하다. 더불어 신재생에너지와 CAES 기술을 융합하게 되면 CDM사업이라는 부가적으로 얻는 수익도 발생하게 된다. CDM(Clean Development Mechanism)이란 청정개발체제로서 선진국이 개도국과 공동 기술 개발로 CO2 감축 실적을 얻으면 유엔의 승인에 의해 해당감축량 만큼의 탄소배출권을 획득하는 것이다. 탄소배출권 시장은 이미 일부에서 거래가 이루어지고 있고, 향후 환경문제와 더불어 국가 정책의 중요한 임팩트 요소로 작용할 것으로 판단된다.

## 5.2 새로운 진보, AA-CAES

AA-CAES란 Advanced Adiabatic-CAES로서 혁신적인 발전 개념이라 할 수 있다. 기존 가스터빈 발전이 LNG 연료와 압축공기를 혼합하여 발전하는 개념인 반면, AA-CAES는 LNG와 같은 화석연료를 전혀 사용하지 않고 스팀터빈으로 발전하는 것이다.

이러한 발전의 핵심기술은 바로 압축할 때 발생하는 엄청난 열의 재활용에 있다. 즉, 공기압축시 발생하는 열은 600℃ 이상의 고온으로, 압축공기와 더불어 이 열을 임시로 저장하였다가, 발전 시 압축공기를 이용한 스팀터빈 발전을 진행한다는 것이다. 이러한 단열공정은 기존의 관련 기술에 비해 높은 전환효율과 화석연료의 도움 없이도 지속적인 가동이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 참고로 기존 가스터빈 CAES 발전은 발생한 열을 그냥 폐기하거나 일부 복합발전

의 개념으로 사용하여 그 효율이 30~50%에 지나지 않았으나, AA-CAES는 LNG를 전혀 사용하지 않고서 추가 발생열을 이용하므로 70% 효율로 증가한다.(그림 7)

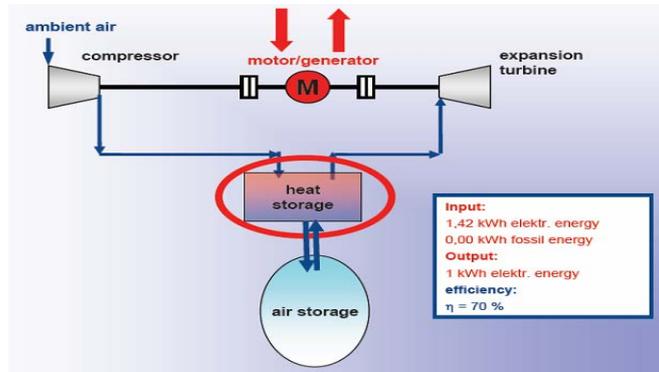


그림 7 AA-CAES 개념도

따라서 관련 핵심기술로 600℃ 이상까지 급격히 증가하는 공기의 온도를 제어하는 것이 매우 중요하다. 또한 공기 압축과정에서 발생하는 열에너지의 손실을 최소화하기 위해 따로 마련된 열저장장치의 개발도 중요하다. 압축공기 과정에서 저장된 열에너지는 다시 압축공기로 전환된다. 이로써 압축공기뿐 아니라 열에너지도 전기 생산에 이용할 수 있게 되는 것이다. 이에 대한 구체적 연구는 19개 컨소시엄이 참여한 EU R&D project를 통해 이미 2006년에 개념과 가능성을 확보하였으며, 파일럿을 거쳐 향후 2010년 상용화를 앞두고 있다. 이에 질세라 독일 RWE와 미국 GE사도 최근 AA-CAES 관련연구 협약을 맺고 2012년 이후 상용화를 목표로 하고 있다. 이와 같은 획기적인 발전시스템을 위해서는 대규모 지하압축공기 심부 저장공간이 반드시 필요하므로 국내에서도 관련 분야에 대한 관심을 지속적으로 가져야 한다.

## 6. 결론

원자력 발전의 기저부하를 이용하고, 첨두부하 전력수요를 고려할 때 안정적인 전력수급을 위해서는 대규모 전력저장시설이 필요하다. 특히 미주 유럽의 암염공동과 달리 지하공간에 유리한 국내 화강암, 편마암 지역에서도 CAES 발전시스템의 가능성이 높다고 본다. 하지만 최근 심야전력상승과 LNG 연료가 상승 등의 리스크가 발생하고 있어 경제성에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 게다가 지구온난화, 기후협약에 발맞춰 국내외적으로 신재생에너지의 활용을 독려하고 있는 추세이다. 이러한 상황에 발맞춰 선진국에서는 이미 신재생에너지의 일관적, 안정적 전력 확보의 어려움을 보완하기 위해 CAES 시스템의 융합기술이 시행되고 있다. 또한 화석연료가 전혀 필요 없이 압축팽창과정에서 발생하는 열을 회수하여 발전할 수 있는 AA-CAES 관련 프로젝트도 현실화로 다가왔다. 따라서 국내의 높은 지하공간의 설계 및 시공기술을 바탕으로 혁신적인 지하압축공기저장 시설의 진일보된 모습을 기대해 본다.

## 참고문헌

1. 유럽연합 조사 및 발전 정보제공서비스 <http://cordis.europa.eu/>

2. 전력통계정보시스템(EPSSIS) <http://epsis.kpx.or.kr/>
3. 지하압축공기저장 발전시스템(CAES) 예비타당성 조사연구, 1998, SK건설 내부보고서
4. 한국전력공사, 2006. 12, 제 3차 전력수급계획(2006년 ~ 2020년)
5. Chris Bullough etc, 2004. 11, Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Intergration of Wind Energy, Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC
6. Fritz Crotagino, 2006, Compressed Air Energy Storage, EUROSOLAR
7. Michael Nakhmkin, 2007, Available Compressed Air Energy Storage(CAES) Plant Concepts, POWER-GEN2007
8. Richard David Moutoux, 2007, Wind Intergrated Compressed Air Energy Storage In Colorado, Master Thesis
9. Septimus van der Linden, 2006, Bulk energy storage potential in the USA, current developments and future prospects