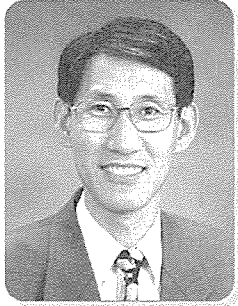


열병합발전시스템의 최적운전계획 수립기법

Optimal Operational Scheduling Method on Cogeneration Systems



원광대 공대

전기전자 및 정보공학부 교수 공학박사 이 중 범

Tel : (063) 850-6735

1. 서론

열병합발전시스템은 기존의 화력발전시스템과는 달리 사용된 연료로부터 전기에너지와 열에너지를 동시에 발생하여 각각의 부하에 공급할 수 있는 종합에너지시스템이다. 따라서 약 40%에 머무르고 있는 기존의 화력발전소 효율에 비해 열병합발전시스템은 약 70% 이상의 높은 에너지 이용효율을 보이고 있다. 그래서 일찍이 유럽을 비롯한 해외의 선진국들은 물론 국내에서도 열병합발전소의 건설이 이루어져 전력회사, 공업단지 및 일반 산업체를 비롯하여 병원, 빌딩에서 상당량의 건설이 이루어져 1997년 말 현재 4,500MW로 국내 총 발전설비의 10%라는 엄청난 비중을 차지하고 있다. 특히 최근에 국내에서는 전국적으로 대형 산업공단이 골고루 조성되어 이곳에서 사용될 산업체 자가용 열병합발전시스템 및 공업단지 집단에너지 공급 열병합발전시스템의 건설과 계획에 많은 관심을 보이고 있다. 또한 분당, 일산 등 전력회사의 복합화력과 지역난방공사의 보조설비들이 상호 연계되어 전기 및 열 에너지를 일반 수용가에 공급하는 집단 에너지사업도 확대되고 있다. 한편 호텔을 중심으로 한 건물자가용 열병합발전시스템은 물론 도시가스를 연료로 이용한 소형열병합발전시스템의 개발과 건설이 국내업체를 중심으로 활발히 이루어지고 있다. 예고 없던 산업적, 경제적 어려움으로 말미암아 열병합발전시스템의 건설계획에 많은 차질을 갖게도 되었지만 이는 경제의 회복으로 쉽게 확대될 것으로 예측되며 더욱 전력회사와의 연계에 따른 열병합발전시스템 사업자들의 이득이 가시적으로 보이는 사업자 관계법

령의 개선이 이루어진다면 더욱 활기를 찾을 것으로 기대된다. 아울러 최근 발효된 환경오염물질의 절감을 위한 선진국간의 기후협약으로 볼 때 이의 대안중의 하나가 열병합발전시스템의 확대이므로 국내에서도 열병합발전시스템을 확대시킬 수 밖에 없는 단계로 진입되었다고 할 수 있다.

열병합발전시스템은 이미 기술한 바와 같이 용도에 따라 시스템의 종류가 다르며 시스템마다 그 구성설비도 매우 다르다. 따라서 본고에서는 산업체 중 공업단지용의 집단 에너지 열병합발전시스템과 일반 개별 공장용 열병합발전시스템에 대한 운전계획에 대해 기술하기로 한다.

2. 산업체 열병합발전시스템의 운전계획

국내 산업체의 열병합발전시스템은 열저장설비에 기준온도 범위 이내의 열에너지를 저장하거나 열수요에 따라 공정열을 공급하는 동시에 전기출력 및 전력회사로부터 구매전력을 적절히 조정하여 운전하고 있다. 따라서 저렴한 비용으로 공정열 및 전력을 얻기 위해서는 일정기간(일간 및 주간) 동안의 열출력 및 전기출력을 시간대별로 적절하게 배분시킬 수 있는 열병합발전시스템의 운전기법이 필요하며 공정열의 첨두부하와 전력의 첨두부하가 동시에 요구되는 시점에서는 열출력 및 전기출력 뿐만 아니라 전력회사의 구매전력까지도 정확히 고려하여 적절하게 배분할 수 있는 열병합발전시스템의 최적운전기법이 필요하다.

이러한 열병합발전시스템의 운전계획은 자국의 환경과 특성에 맞게 연구되어 발표되는 경우가 대부분

경과 특성에 맞게 연구되어 발표되는 경우가 대부분이다. 그래서 국내도 운전계획 개발기법 및 수리모형은 설비 공급자에 의존하거나 또는 오랜 경험을 중심으로 이루어지는 경우가 많고 산업공학에 근거한 최적이론을 도입하여 운전계획을 수립하는 경우는 많지 않다. 그뿐만이 아니라 국내의 관련 기술계나 학계에서도 이에 대해 관심이 미흡한 실정에 있다.

일반적으로 산업체의 열병합발전시스템은 여러 대의 주 보일러로부터 발생된 증기로 터빈을 가동시켜 발전을 하며, 때로는 터빈 중간에서 추기하거나 발전에 이용되고 나온 증기를 이용하여 적절한 압력에 맞는 열부하에 열 에너지를 공급하는 시스템으로 구성되어 있다. 또한 보조설비로서는 보조보일러와 축열조 때로는 자가발전기를 사용하여 적절하게 협력해 가면서 수요에 대처하고 있다. 그 이외에 폐열보일러를 비롯하여 여러 가지의 보조설비들이 시스템의 목적에 맞도록 구성되어 있다. 따라서 가장 적은 운전비로 모든 부하를 시시각각 만족시켜 주는 운전계획의 수립은 무엇보다도 정확한 시스템의 모델링을 근거로 하여 목적함수와 수많은 제약조건을 어떻게 세우고 각각의 상수들을 정확히 얻어내느냐에 달려있다고 하겠다.

따라서 여러 종류의 열병합발전시스템에 따라 운전기법도 다양하므로 본고에서는 이중 공단용과 개별 공장용을 대상으로 운전계획 수립기법 등을 중심으로 언급하고자 한다.

2.1 공단용 열병합발전시스템

일반적으로 최적화에 근거하여 운전계획을 수립하려면 수리적 모델링이 세워진 후 반드시 목적함수와 제약조건이 주어진 시스템에 근거하여 수립되어야만 한다.

(1) 목적함수 수립

열병합발전시스템을 가동시키기 위해 사용되는 연료비와 전력회사로부터의 구매전력 및 판매전력 그리고 보조보일러의 연료비 등을 가감하여 총 운전비용을 수식화 한 후 이를 최소화시키는 것을 표현한 방정식이 목적함수가 된다. 최근에는 환경계약이 크게 대두되고 있어 이러한 제약을 고려하기 위해서는 추가로 환경처리비용이 필요하게 된다. 따라서 목적함수에 이 비용을 추가하여 최소화하는 경우가 많다.

(2) 각종 제약조건 수립

열병합발전시스템의 운전계획을 최적으로 수립하기 위해서는 우선적으로 열부하와 전기부하의 모든 수요

를 사전에 예측하여야 하며, 열병합발전시스템 자체의 열과 전기에너지 최대 및 최소 출력 그리고 열전비들을 입력데이터로 확보하여야만 한다. 또한 연계되어 있는 보조보일러나 축열조 등 보조설비들의 열특성을 알고 이들의 최대 및 최소 용량한계를 입력데이터로 확보하여야만 한다. 아울러 모든 열 배관망의 열 손실 및 시간대에 대한 전력의 판매단가 및 구매단가를 확보하여야만 하며, 각종 제약을 수리적으로 나타내는 제약조건을 수립하여야 한다. 그리고 이러한 수리적 모델링이 이루어졌으면 각종 최적화 기법을 이용하여 해를 구하게 되는데 이 때의 해가 바로 수요를 충족시키는 입장에서의 열병합발전시스템과 각종 부하설비들의 운전계획을 나타내는 것이다. 따라서 운전계획의 관건은 얼마나 열병합발전시스템과 보조설비들을 정확하게 수리적으로 모델링하였고 입력데이터들이 정확한 특성치로 반영되었는가에 달려 있다. 그림 1은 운전계획수립을 위해 보조 운전설비로 축열조와 보조보일러 등과 같은 보조설비들이 연계된 공단용 2기 열병합발전시스템의 에너지 흐름도를 보이고 있다. 그리고 그림 2 ~ 그림 4는 이 경우에서의 운전계획수립 결과를 나타낸 것이다. 그림 2는 주어진 부하조건 하에서 각 시간대에서 축열조의 축열 및 방열계획을 보이고 있다. 그림에서 위 쪽은 축열이고 아래쪽은 방열을 나타낸

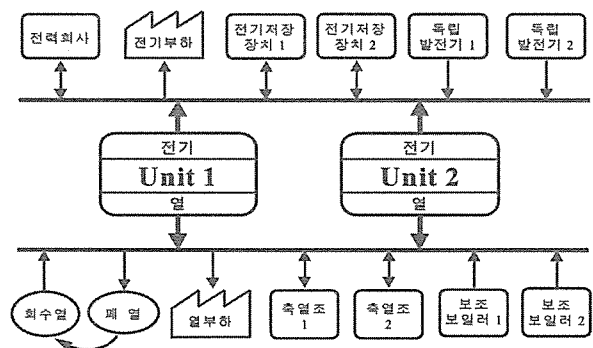


그림 1. 각종 보조설비가 연계된 2기 열병합발전시스템의 에너지 흐름도

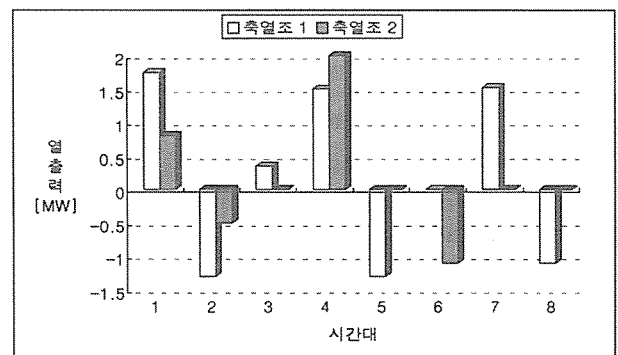


그림 2. 축열조의 축열 및 방열계획

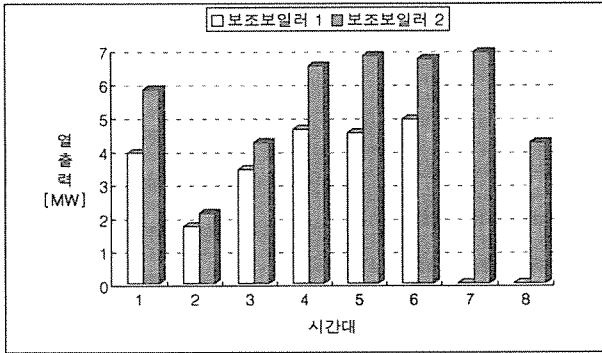


그림 3. 보조보일러의 열출력계획
것이며 또한 각 시간대는 3시간을 의미하고 있다.

또한 그림 3은 보조보일러들의 운전계획을 보이고 있다. 열 수요가 많은 중간시간대에 많은 출력이 요구됨을 알 수 있다. 모든 설비들은 종류가 같더라도 특성이 달라 운전은 경제적인 관점에서 수립되었다. 한편 그림 4는 전력회사에 전력을 판매하는 계획이다. 필요한 열 생산으로 인해 생산된 전기중 전기수요를 제

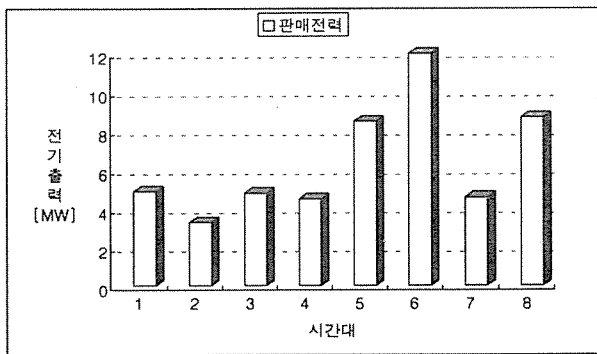


그림 4. 전력회사로의 전기에너지 판매계획

외한 나머지가 판매되고 있음을 알 수가 있다.

2.2 공장용 열병합발전시스템

배압터빈과 추기터빈 및 기타 보조운전설비들로 이루어진 공장용 열병합발전시스템의 운전계획수립 및 결과를 예로 나타낸 것이다.

(1) 목적함수 수립

각 Unit에서 사용되는 연료비의 함수 및 특성계수들은 Unit마다 열 및 전기출력의 크기에 따라 다르게 나타난다. 따라서 이들의 특성계수 및 함수를 구하면 이를 이용하여 어느 크기의 열과 전기출력을 가질 때의 연료비를 구할 수가 있다. 또한 각종 보조운전설비들도 사용되는 연료비의 특성이 다르므로 이들을 구한다면 연료비를 구할 수가 있다. 여기서 연료비함수는

열출력과 전기출력이 작은 경우나 큰 경우나 일정한 선형적 증가를 갖는 것이 아니고 비선형적 증가를 가지며 열 에너지를 방출하여 전기를 생산하므로 연료비 함수는 주로 열출력의 크기에 좌우되고 있는 경우가 많다. 또한 비선형적 특성을 갖는 연료비 함수도 선형으로 처리하더라도 무리가 없는 경우도 많다. 뿐만 아니라 모자라는 전력을 전력회사로부터 구매하기 위해서는 전력구매비용이 소요된다. 다만 시간대에 따라 구매비용이 현저히 다르므로 이를 철저히 고려하여야만 한다. 그리고 환경 처리비용이 필요한데 이 처리비용도 각 Unit는 물론 보조운전설비들도 출력에 따른 적절한 상관관계에 근거하여 구해지게 된다. 최종적으로 목적함수는 이러한 비용들을 모두 고려하되 이들을 최소화시키는 함수로 정의할 수 있다.

(2) 제약조건 수립

이 경우에도 마찬가지로 우선 매일 매시간의 전기부하 및 열부하를 예측하여 반드시 이 두 항목을 만족시켜 주어야만 한다. 그리고 이들을 만족시키기 위한 열공급 및 전기공급 방정식을 수립하여야 한다. 그러나 우선적으로 열부하를 만족시키기 위해서는 각 Unit는 물론 모든 보조 설비들을 총 동원하여야만 하며 이로 인해 생기는 전기출력의 부족분은 구매전력을 통해 해결한다. 각 Unit의 발전기 전기출력 및 보일러의 열생산 상하한 값이 입력되어야 하며 보조설비들도 마찬가지로 출력의 상하한 값이 입력되어야 한다. 또한 저압터빈에 공급되는 최소한의 열에너지가 주어져야 하며 환경처리비용을 고려하기 위해서 필요한 환경처리비용함수의 특성계수가 구해져야 한다. 기타 필요한

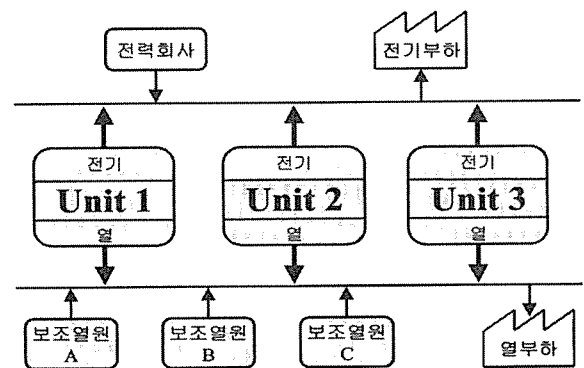


그림 5. 에너지 흐름도

손실계수 및 상수들이 주어져야 한다.

그림 5는 공장용 열병합발전시스템의 구성 및 에너지흐름을 보이고 있다. 그림 6과 그림 7은 일간 운전

기간 중 각 Unit 들의 열출력 및 전기출력 계획을 나타낸 것이고, 그림 8은 전기구매계획을 나타낸 것이다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 각 Unit마다 연료비 특성이 다르므로 각 시간대별로 총 합계는 보조 설비들의 출력과 함께 열부하를 충족시키나 개별적으로는 출력에 차이가 있으며, 이 때문에 전기출력도 차이가 있음을 보여주고 있다. 아울러 그림 8에서 보는 바와 같이 전기단가가 비싼 시간대에는 열을 많이 발생하여 터빈을 가동시켜서 전기를 생산하므로 구매전력이 적고, 전기단가가 싼 시간대에는 반대로 열부하만 충족시키고 터빈은 기계적 입장에서 최소한으로만 가동시키면서 전력은 많이 구매하는 것이 유리한데 이러한

계획이 수립되고 있음을 보여주고 있다.

물론 여기에서는 보다 정확한 운전계획수립을 위하여 더욱 고려하여야 할 항목들이 있겠으나 영향은 그리 크지 않은 것이므로 생략하였다. 그러나 필요하다면 목적함수의 항목으로 추가하거나 제약조건에 추가하여 문제를 정식화할 수가 있다.

3. 운전계획 수립용 최적화 기법

이 외에도 가스터빈 열병합발전시스템을 비롯하여 전력회사의 복합화력과 지역난방공사에 의한 열병합발전시스템과 같은 각종 시스템의 최적운전계획도 동일한 방법에 근거하여 수립할 수 있다. 그러나 최적해를 찾는 기법을 어느 방법으로 택하였느냐 하는 것도 중요한 부분이라고 할 수 있다. 보통 열병합발전시스템의 운전계획은 동적계획법(Dynamic Programming:DP)을 이용하거나 선형계획법(Linear Programming:LP)을 이용하는 경우가 많으나 분기한정법, 정수계획법 등도 있고 최근에는 유전알고리즘(Genetic Algorithm:GA)과 진화알고리즘(Evolutional Programming:EP)뿐만 아니라 퍼지선형계획법으로 퍼지이론을 도입하는 방법도 제시되고 있다.

DP법은 열병합발전시스템의 보조설비가 다양하거나 시간대를 세분화시킬 경우 계산시간이 늘어나는 단점을 갖고 있지만 모델링 중에 비선형 특성이 표현되어야 할 경우 이를 쉽게 소화시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 선형계획법 등은 쉽고 빨리 해를 얻는 장점은 있으나 수많은 선형방정식이 세워져 계산의 어려움이 따르거나 비선형 특성을 전혀 고려할 수 없다는 단점을 지니고 있다. 그러나 각종 설비의 운전한계를 유연하게 고려한다는 측면에서 퍼지 이론을 도입하는 경우도 의미가 있다.

한편 최근에 최적화의 이론으로 각광을 받고 있는 GA나 EP는 시간이 다소 걸리지만 모든 비선형 요소를 쉽게 처리하고 국부적인 최적점보다 전체적인 최적점을 찾는 매우 유용한 최적화 이론으로 대두되어 이에 대한 관심이 고조되고 있으며 산업의 많은 분야에서 최적화를 수행할 경우에 많이 이용되고 있다.

4. 환경을 고려한 운전계획수립

열병합발전시스템에 대해서는 단위용량이 화력발전소에 비해 작아서 환경이나 오염배출물질을 고려한 최적운전계획에 대해 보고되지는 않고 있으나 선진국끼리 협약한 기후협약과 기타의 이유 때문에도 환경요

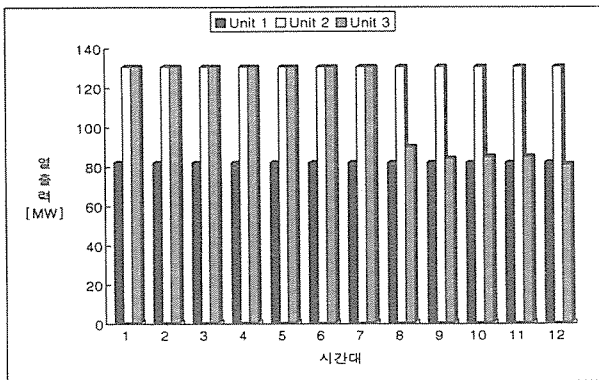


그림 6. 열출력 계획(Unit 1, 2, 3)

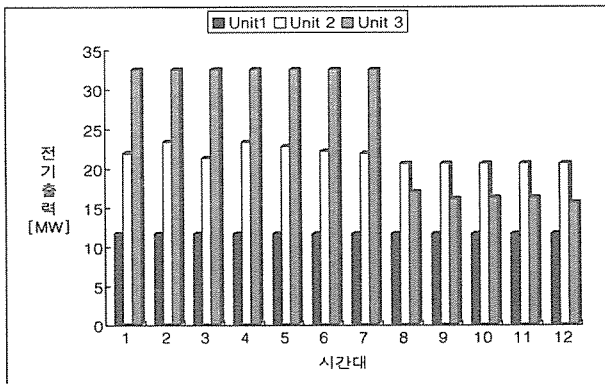


그림 7. 전기출력 계획

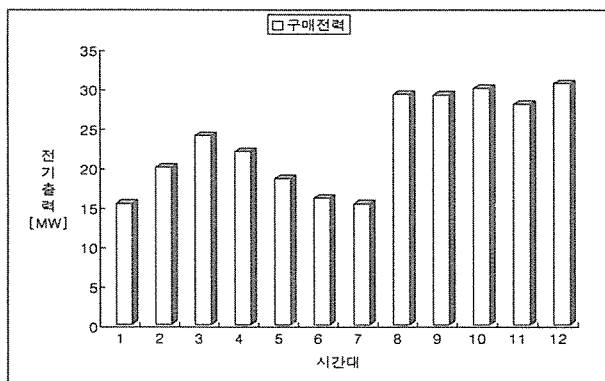


그림 8. 전기구매계획

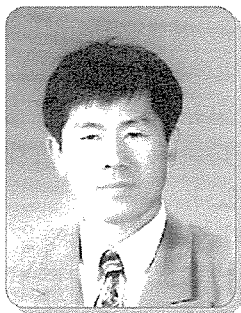
염 배출물질의 억제를 고려한 운전계획이 이루어져야만 한다. 일반적으로 전력시스템에서 화력기의 경제급전문제에서 환경을 고려하여 해결할 경우 목적함수나 제약조건에 환경오염물질의 배출을 억제하는 방향에서 수리적으로 모델링하여 추가하는 경우가 있다. 열병합발전시스템에서도 환경항목을 목적함수에 추가하는 다목적함수를 수립하든 제약조건으로 첨가시키든 이를 만족시키는 조건에서 운전해야 하므로 운전비의 상승은 불가피하게 된다. 특별히 소형 및 건물용 열병합발전시스템은 전기와 열 수요가 기본적으로 동시에 많이 존재하는 도심지 빌딩이나 호텔 및 병원 등에서도 도입하는 경우가 많고 시스템의 운전에 따라 발생하는 NOx, SOx 및 소음 등이 많으므로 이에 대한 환경적 대책이 필수적으로 이루어져야 한다.

5. 결론

열병합발전시스템은 투자모형에 근거하여 적정규모의 용량 및 보조설비의 용량을 결정하여 운전에 들어

가야만 한다. 그러나 산업과 경제의 규모에 따라 전기 및 열수요는 다양하게 변화하므로 이를 최소의 운전비용으로 충족시키는 운전계획을 수립하기 위해서는 단순히 오랜 경험이나 일부의 항목만을 최적화하는 기법으로는 접근하기에 복잡하다. 따라서 여러 대가 상호 다른 용량과 특성을 지니고 있는 열병합발전시스템과 상호 다른 용량과 특성을 지닌 각종 보조운전설비들이 연계하여 운전하는 경우들이 많으므로 이러한 경우에서의 운전계획수립은 반드시 최적화 이론을 도입하여야만 한다. 열병합발전시스템은 용도에 따라 종류와 규모가 다양하고 특성도 상이하나 어느 경우에도 적용할 수 있는 것이 최적화 이론이다. 기존에 국내에서 운전되고 있는 여러 종류의 열병합발전시스템에서도 이러한 이론을 도입하여 보다 최적적인 운전계획을 수립한다면 상당한 양의 연간 운전비 절감효과를 가져올 것이며 국가적인 이익은 물론 최적운전에 따른 운전효율 향상효과로 인하여 환경물질의 상당한 절감효과도 가져올 것으로 기대된다.

보일러튜브의 수명평가기술



한전전력연구원 발전설비지원그룹
과장 김범수
Tel : (042)865-5316

1. 서론

국내 열병합 발전설비의 대부분이 10년을 초과함에 따라 설비의 안정성 및 신뢰성을 확보하기 위한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 발전설비에 사용하는 보일러튜브의 경우에도 설비의 안정성측면에서 검토가 필요하나 현재까지 보일러튜브의 설계기준인 100,000 시간 사용의 설계개념의 도입으로 보일러튜브를 설비

의 일부라기 보다는 소모재로 간주하는 경향이 팽배되어 있다. 그러나 보일러튜브의 가격이 적지않은 상태이며 장기적인 사용을 위해 튜브재료의 보수적인 선정을 하는 추세에 따라 과, 재열기튜브의 경우도 30년 이상을 사용하는 경우가 빈번하게 발생하고 있어 설비의 경제적이고 안정적인 운영을 위해 정확한 수명평가를 통해 튜브의 교체기준을 설정하는 것이 무엇보다 중요하다.