

## 地熱發電을 爲한 증기터빈 싸이클

The Vapor-Turbine Cycle for Geothermal Power Generation\*

J. Hilbert ANDERSON

金 斗 千 譯

數千年동안 人類는 地球의 內部가 地表面보다 더 따뜻하다는 사실을 알고 있었다. 그러나 불과 몇세기 전에야 비로서 高溫體로 부터 低溫體로 熱을 傳達시킴으로써 기계적인 일을 얻을수 있다는 것을 알았으며 이것이 熱機關이다. 이 두가지 원리를 안다면 우리는 高溫의 地球內部로 부터 低溫의 外部로 熱을 傳達시키므로써 能力을 얻을수 있다는 可能性을 쉽게 생각할수 있겠다. 이것이 바로 地熱動力이다. 땅속에는 全世界가 現在의 動力消費率로 數百萬年동안 使用하고도 남을 만큼의 充分한 熱이 보존되어 있다. 모든 動力을 地熱에만 依存한다고 가정하더라도 地球의 溫度를 1°F감소시키는데는 4천1백만년이 걸린다. 그러나 實際問題는 어떻게 經濟的인 溫度準位の 熱을 얻으며, 또 어떻게 다른 열기관과 경쟁할수있는 동력으로 變換시키느냐 하는데 있다. 理想機關의 熱效率은

$$E_{T,T} = (T_1 - T_2) / T_1$$

이며, 여기서  $T_1$ 은 高溫體의 絕對溫度,  $T_2$ 는 低溫體의 絕對溫度이다. 이 方程式으로부터 高溫體의 溫度  $T_1$ 이 增加할수록 더 많은 일을 얻을수 있다는 것은 明白하다. 이 地球上에는 굴착 가능한 깊이內에서 매우 높은 溫度를 얻을수 있는 곳이 대단히 많다. 그러나 드릴링 비용은 깊이에 따라 급격히 增加한다. 例로서, Oklahoma 굴착 작업대는 24,500피트의 깊이에서 360°F의 溫度를 얻었으며 6백만불의 굴착費用이 들었다고 하며, 반면에 最近 Imperial Valley에서는 아주 적은

費用으로 2,600피트 깊이에서 390°F의 溫度를 얻었다. 그림 1은 굴착깊이에 따른 비용의 증가를 도시한 것이다. 이 테이타는 기술잡지(Bowen and Groh, 1971; Bareua, 1972) 및 신문기사에서 발췌한것으로서, 1~1.5만 피트 이상에서는 費用이 급격히 증가함을 보여준다. 우물의 크기와 깊이에 따른 굴착토량의 제한점 때문에 지열발전에서는 15,000피트 이상은 적합치 못한것 같다.

왜냐하면 만약 이 曲線이 精確한 비용의 指標 라면 15,000피트 깊이의 우물의 비용은 80만불이며 또 이 우물로부터 나오는 熱이 1만 kw의 動力을 發生시키기에 充分하다면, 우물의 비용은 1kw當 80불로서 非經濟的이기 때문이다. 그러나 우물의 出力이 높아진다면 1kw當의 비용은 줄어들것이다. 그렇기 때문에 最大우물出力과 얕은 깊이가 요망된다. 低溫體는 地表面에 있고 高溫體는 地表面下 깊은곳에 있기때문에, 動力變換장

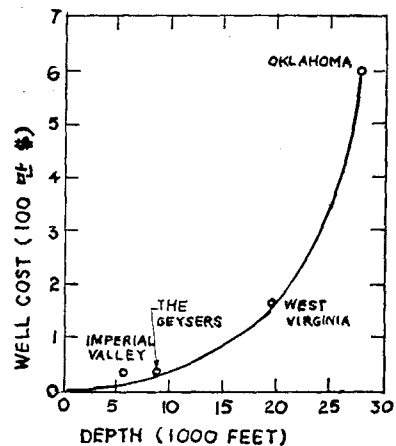


그림 1. 깊이에 대한 굴착비용

\* Geothermal Energy, ed, by P. Kruger & C. otte Stanford Univ. press, 1973에서 발췌

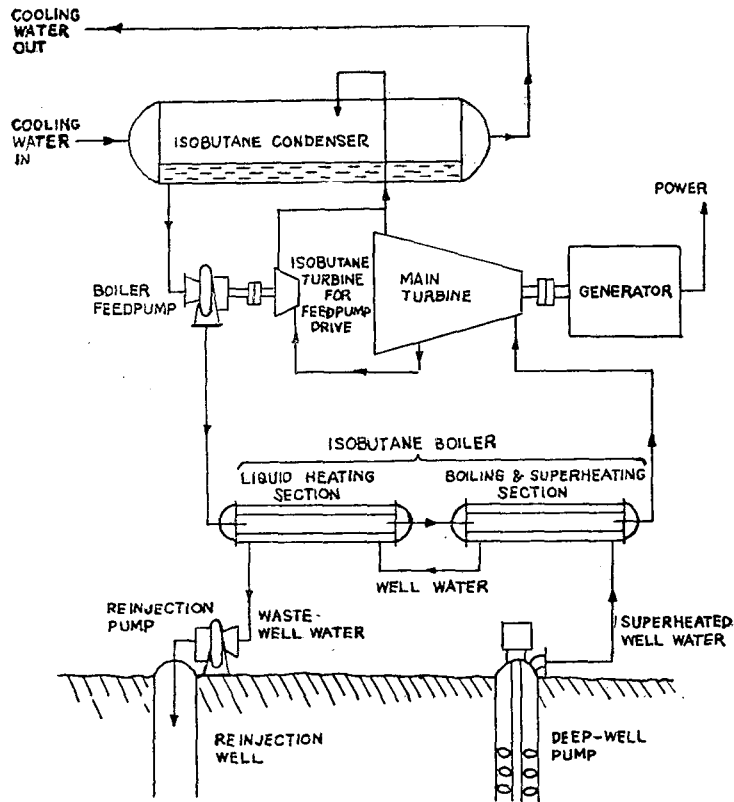


그림 2. 증기터빈 사이클 선도

치가 있는 地表面까지 熱源으로부터 열을 운반하는 수단이 있어야한다. 확실한 방법은 유체유동에 의한것으로서, 가장 값싸고 많은 물을 사용하는 것이다. 뿐만 아니라 地下에는 이미 용암에 의해 加熱된 地下水를 저절로 供給받을수 있다. 예컨대, 美合衆國大陸의 數千個의 溫泉分佈圖가 作成되어 있다.

動作流體로서 물을 사용하는데는 有用한 몇가지 方法이 있다.

1. 물이 多孔의 高溫域에 나타나면 증발하여 수증기로 되고 다시 우물구를 통하여 表面까지 上昇해서 증기터빈에 들어가 팽창하므로써 動力을 發生한다. 이것은 삼투할수없는 岩盤에 갇힌 커다란 수증기 저장소상에 놓인 岩層의 高溫水가 地上으로 뿜어나오게 되는 California에 있는 Geysers와 같은 이치이다. 이런 상태가 되려면 저

장소내의 유체의 압력이 靜壓力보다 낮아야 하며 이 경우에 증기는 과열된다. 약한 부식성의 이 乾증기는 종래의 증기터빈 에서와 같이 만족스럽게 동작한다. 그러나 이러한 낮은 압력상태의 유체저장소는 독특한 地質學的 조건하에서만 가능하므로 天然증기 地熱分野는 드물게 있는 현상이다.

2. 大部分의 경우, 地上水面이 매우 높아서 溫水域위에 冷水層이 존재한다. 심히 과열되어 있는 溫水層상에 놓여있는 얇은 冷水層은 靜壓을 維持하고 있다. 만약 冷水域에서 溫水域으로 우물을 파들어가고 또 이때 우물구의 압력이 낮다면, 이 가열된 물은 地表面으로 上昇하며 급히 증기로 변한다. 증기와 물의 混合物의 平均密度는 물의 밀도보다 낮기 때문에, 이 混合物은 表面으로 올라온다. 그리고 이 混合物은 항상 그때의 압력에 대한 포화溫度 상태에 있다. 混合物의

溫度는 上部로 흘러나 올수록 降下하므로, 表面에 到達할때는 有用에너지의 損失을 超來한다. 表面에서 증기는 물로부터 分離되어 터빈을 통과하면서 팽창된다. 그러나 물을 끌어올리기 위해 증기를 使用하는 것은 非效率的이며 相當量의 有効에너지를 소비하게 된다. 뿐만아니라 터빈 입구압력에서의 온수내에 남아있는 熱은 버려지게 된다. 이 熱의 일부는 더 낮은 압력하에서 갑자기 증기로 만들어 주므로서 회수될 수 있으나 低壓증기터빈은 비경제적이므로 이 방법은 회의적이다.

어떤 경우에는 溫水로 부터 압력변화에 의해 만들어진 증기는 부식성이 크거나 혹은 많은 다른 기체들을 포함하고 있기 때문에 증기터빈의 정비유지가 곤란하다. 이런 경우에는 이 증기는 열교환기에서 다른 물을 끓이는데 사용되고, 깨끗한 수증기를 터빈에 들여보냄이 좋다. 이것은 이 장치에 열교환기를 追加해야 하고 증기의 유용에너지의 감소를 초래하게 되므로 그 結果 kw 당 증기터빈 가격은 또한 더 높아진다.

3. 위에서 기술한 방법들의 불리점을 除去하기 위해서 개발된 새롭고 아주 다른 方法이 바로 증기터빈사이클이다. 地熱을 動力으로 변환하는 과정은 먼저 地表面으로 移送된 溫水는 열교환기를 通過하게되고 여기서 高密度의 증기를 끓이고 過熱하게 된다. 그런다음에 증기는 터빈을 지나 팽창하여 動力을 發生하고 열교환기로 되돌려보내진다. 이 과정의 實際的, 經濟的 利點은 방대한 地熱에너지를 실제로 이용할수 있게 할것이다.

간단한 형태의 증기터빈사이클은 그림 2\*와 같다. 물은 deep-well 펌프로 地表面까지 移送되며, 수증기의 발생을 방지하고 용해된 가스가 물로부터 이탈하지 못하도록 물은 전 과정동안 포화압력 이상으로 유지된다. 열교환기내에서 물은 열을 방출하여 액체를 가열하고 끓여서 過熱상태로 만든다. 冷却된 물은 가까운 우물로 주입되며 이때 용해된 가스와 용해되어 있는 고체들은 갖고

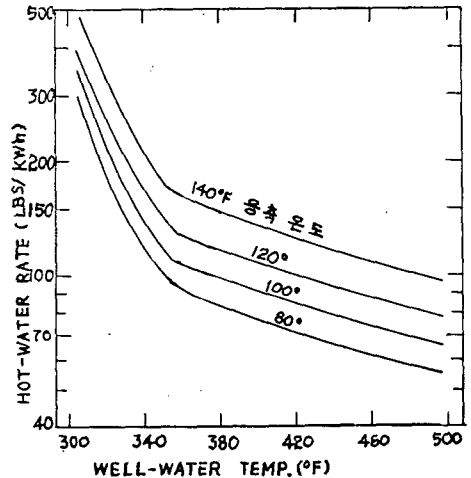


그림 3. 이소부탄 사이클에 對한 우물溫度對 물순환율

나간다. 이렇게 해서 우물에 주입된 물은 地下저장소의 압력으로 유지되며, 쉽게 多孔高溫域으로 되돌아가서 재가열된다. 이렇게 해서 물은 단순히 연속적인 사이클을 이루면서 地下의 溫水域으로부터 地表面의 power plant까지 열을 운반하는 매개체가 된다. 각종 流體가 動力사이클에 使用될수 있다. Isobutane이 우리가 최초로 시도한 plant의 물入口溫度인 325°F로 부터 動力을 發生시키는데 가장 經濟性이 있기 때문에 여기서는 Isobutane의 경우에 대해 다루겠다. 소련의 소형 power plant에서는 Freon을 사용하였다.

이 사이클線圖는 Isobutane증기가 어떻게 터빈을 통해서 팽창되어 발전기를 구동하는가를 보인 것이다. 排出된 가스는 水冷응축기에서 액상으로 응축되어서 다시 Isobutane 가열기를 거쳐 보일러로 펌프되며 사이클을 反復한다. 보일러 이송 펌프는 상당한 동력을 소모하므로 선도에서와 같이 Isobutane 터빈으로 구동시키는 것이 유리하다.

증기터빈사이클에서는 動力費를 最適化하기 爲해 많은 變數들이 評價되어야 한다.

流體의 선택, 터빈입구의 온도와 압력, 응축온도, 冷却장치 의 형태, 우물깊이 및 기타 因子들이 plant의 全體가격과 生産체계에 影響을 미친다. 例컨대 터빈입구 溫度를 낮추면 물과 Isobutane

\* 특허 출원中, 이 사이클은 개발자인 Magma Energy Inc., of Los Angeles의 이름을 따서 "Magmamax" power process 라 명명되었다.

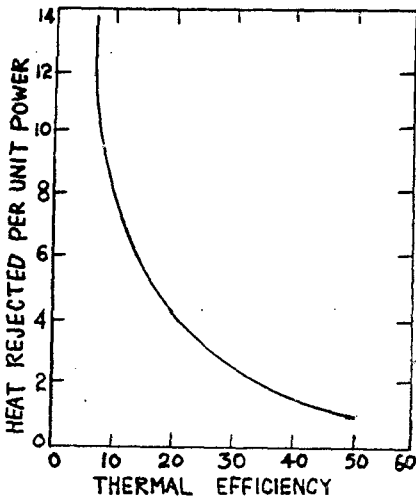


그림 4. 열효율對 방출열량

의 溫度差가 增加되고 주어진 열유량에 대한 필요한 傳熱面을 감소시키게 된다. 그러나 터빈 입구 溫度를 降下시키는 것은 또한 사이클의 效率를 감소시키고 따라서 발전되는 kwh당의 필요한 열유량을 증가시킨다. 최저가격 설계를 위한 균형을 위해서는 다른 많은 因子들이 있다.

그림 3은 Isobutane 사이클의 典型的인 性能曲線이며 水溫에 對한 kwh 당의 水量을 도시한 것이다. 재미있는 사실은 사이클의 效率를 決定함에 있어서 水溫보다 응축온도가 더 중요하다는 것이다. 예컨대 水溫이 400°F이고 응축온도가 100°F일때 물순환율은 91lb/kwh이지만, 응축온도가 80°F로 내려가면 물순환율은 76lb/kwh로 떨어진다. 100°F의 응축온도에서 76lb/kwh의 물순환율을 얻으려면 水溫을 450°F로 올려야 하며 이것은 50°F의 온도 상승이 된다. 이렇기 때문에 이 地熱발전장치는 가능한 最高의 氣溫을 最大로 活用하는데 그 초점이 있다.

증기터빈 장치의 가장 중요한 장점의 하나는 증기터빈장치에서 가장 경제적으로 사용할 수 있는 것 보다 더 낮은 응축온도로 작동될 수 있다는 점이다. 터빈의 크기는 주로 最高단의 水車의 直徑과 배기연결관의 크기에 좌우되며, 또한 經濟面에서 가장 중요한 因子이다. 그리고 水車의 最終端의 直徑과 排氣연 결관의 크기는 流動體積

率에 依해 決定된다. 80°F의 응축온도에서 水蒸기의 比體積은 633ft<sup>3</sup>/lb이나 Isobutane은 1.68ft<sup>3</sup>/lb에 不過하다. 이런점에서 Isobutane 터빈이 低응축溫度에서 동작될때 그 크기가 훨씬 줄어들고 저렴하게 된다. 100°F에서 水蒸기의 比體積은 350ft<sup>3</sup>/lb이므로 80°F에 對해 설계된 水증기터빈은 100°F에 對해 설계된 것 보다 最高단에서의 流路面積은 2배가 된다.

비록 水溫의 增加에 따라 物순환율은 감소하지만, 발전장치와 그 부수장치의 kw당 복합비용은 반드시 감소하는 것은 아니다. 일반적으로, 높은 水溫을 얻으려면 깊이 굴착해야 하므로 굴착비용과 펌프동력면에서 불리하게 된다. 뿐만 아니라 고온수는 부식성이 더 커지기 때문에 비싼 펌프, 파이프, 및 열교환기를 사용해야 된다. 그렇기 때문에 지열발전을 적용코자 할때는 最適의 사이클을 결정하기위한 신중한 고려를 해야만 한다. 우리는 이 문제에 많은 進전을 보았으며 設計장소에 따른 最適사이클의 公學적해석을 단 시일내에 행할수 있게 되었다.

그림 4는 발전장치를 高效率로 設計해야 한다는 重要性를 시사하고있다. 열방출 1kwh가 낮은 效率에서 급격히 증가함이 주목된다. 예로서 30%의 效率에서 핵발전 장치는 1kwh의 出力에 對해 2.33kwh의 열에너지가 방출되어야 한다. 그러나 地熱발전장치에서는 10%效率에서 9kwh의 열이 방출되어야 하므로 이것은 거의 4배에 해당된다. 放熱장치는 매우 비싸기 때문에 지열발전에서는 主要한 因子가 된다. 대부분의 지열발전 대상지역이 값싼 冷却水를 쉽게 供給하기 어려운 곳에 위치해 있기때문에 大容量의 地熱발전에서 가장 심각한 문제점은 冷却문제이다.

Isobutane이나 다른 適당한 液체를 사용한 증기터빈 사이클은 水증기나 간접 水증기 가열 사이클에 비해 많은 利點을 갖고 있다.

1. 포화압력보다 더 높은 壓力下의 貯장소로부터 펌핑된 물은 거의 最大 水溫으로 표면까지 도달되지만, 水증기에 依해 移送된 물은 심한 溫度降下를 초래한다.

2. 充分한 壓力하에서 물은 가스들을 용해하고

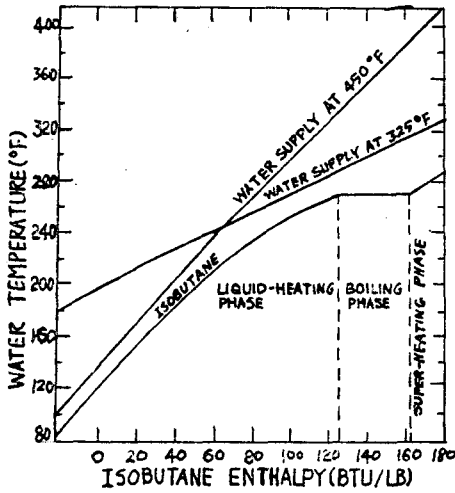


그림 5. 이소부탄의 溫度 對 水溫

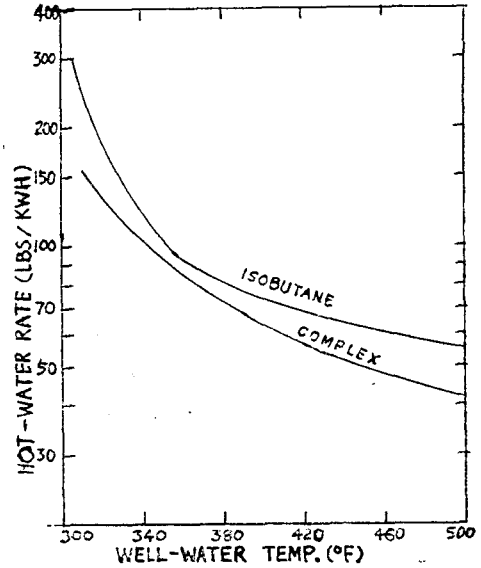


그림 6. 우물水溫對 물순환율

있기때문에 대기오염의 위험없이 그대로 地下로 되돌려보내진다.

3. 만약 수증기나 용해되었던 가스들이 물로부터 이탈되더라도 물의 化學조성이 달라져서 용액으로부터 고체침전을 일으켜서 우물을 막게 된다

4. 열교환기내에서 물을 고압으로 유지시켜 열교환기튜브의 응력을 最少로 만들어 高溫水 열교환기의 주요한 파괴원인인 응력에 의한 부식을 줄일수 있다.

5. 수증기터빈에 비해 증기터빈은 段數가 적고 터빈을 통한 증기의 體積變化가 크지않기때문에 효율이 높다.

6. 회전차의 속도가 수증기터빈 보다 느려서 설계가 간단하고 날개의 응력문제가 덜 심각해진다

7. 증기터빈싸이클은 비교적 정속운전이 可能하므로 소음대체費가 낮아진다.

8. 이소부탄 터빈은 전 싸이클이 대기압以上에서 동작되므로 공기 산소등이 터빈에 流入되어 부식을 일으킬 가능성이 줄어든다.

9. 이소부탄은 그 구조가 비교적 간단하고 가격이 저렴하다.

10. 이소부탄터빈은 동일출력의 수증기 터빈에 비하여 그 크기가 훨씬 적어지므로 가격이 싸게 된다.

11. 이소부탄은 터빈에서 팽창간에 건증기로 존재하기때문에 수증기터빈 에서와 같은 물방울에 의한 날개의 부식이 생기지 않는다.

12. 이소부탄은 오일과 섞이지 않으므로 터빈에 내부베어링을 사용할수 있으며, 터빈 軸의 接手端에 하나의 軸封合장치만 하면되므로 수증기터빈에서와 같은 길고 복잡한 누설방지용 봉합장치가 필요없게 된다.

13. 이소부탄은 부식성이 없어서 수증기 터빈의 여러부분에 흔히 사용되고 있는 高價의 스텐레스강이 불필요하다.

14. 응축된 이소부탄은 수증기에 비해 밀도와 潛熱이 낮아 보일러 이송펌프의 空腔現象에 의한 파손이 일어나지 않는다.

15. 부식문제가 덜 심각하므로 이소부탄 보일러 이송펌프는 값싼 재료로 만들수 있다.

16. 이소부탄 터빈은 회전능율이 매우 낮기 때문에 구동카플링으로부터의 漏電토크 문제가 제거된다.

17. 이소부탄터빈은 낮은 응축溫度에서 사용토록 설계되었기 때문에 효율이 개선되고 물순환율이 줄어든다.

18. 응축기내에 空氣나 不凝縮가스가 개재되지

않기때문에 응축기를 100% 유효하게 사용할 수 있다.

19. 수증기 터빈에서는 잔존가스除去장치가 필요하지만 이소부탄터빈은 그렇지 않다.

20. 이소부탄사이클에서는 우물溫度로부터 아주 낮은 溫度까지 熱을 效果의으로 傳達시킬 수 있어서 발전장치로부터 120°F의 낮은 溫度로 물이 排出되지만, 수증기 터빈사이클에서는 212°F에서 배출되므로 非經濟的이다.

그림 5는 우물溫水와 이소부탄의 傳熱關係를 보인것이다. 물의 比熱은 거의 一定하기 때문에 溫度는 이소부탄에 방출되는 熱量에 거의 直線的으로 變한다. 그러나 이소부탄의 比熱은 액상과 沸騰 및 過熱相에서 일정하지가 않아 이소부탄에 對한 물의 一定量比에서 溫度差는 一定하지가 못하다. 325°F의 물의 경우 장치의 出口溫度는 매우 높아야 하는데 그것은 液體의 沸騰點 근처에서 溫度差가 너무 적어지기 때문이다. 450°F의 물의 경우에는 出口에서의 溫度差는 最少가 되어서 沸騰과 過熱相에서 쓸데없이 높은 溫度差를 이루게 된다. 이를 傾斜度의 變化效果는 그림 3에서 보인바와 같이 이소부탄터빈장치의 물순환 曲線의 취약점이 된다. 좀더 복잡한 사이클을

사용함으로써 그림 6에 도시된 바와같이 물순환을 어느정도 向上시킬수 있다.

우물 揚水펌프의 사용은 價格을 비싸게하고 장치를 복잡하게 만든다. 그러나 우물當의 양수량의 증가, 우물當의 出力의 급격한 增加 및 上記한 여러 利點 때문에 揚水펌프의 使用의 正當性은 充分히 인정된다. Iceland에서는 1961년 이래 軸구동 溫水펌프가 成功的으로 사용되고 있다.

더 높은 溫度와 깊은 우물에는 터보펌프가 권장된다. 그것은 軸구동 펌프보다 간단하고 소형이며, 설치 및 정비를위한 除去가 용이할뿐만 아니라 더 높은 溫度에서 動作가능하기 때문이다. 물론 축구동펌프보다 큰 구동마력이 요구되지만, 그차이는 전 장치出力의 極小量에 불과하다.

Magma Energy Inc.에서 製作된 最初의 이소부탄 증기터빈은 7000rpm, 9000kw 出力의 三段 半徑流터빈이며, 그 構造는 內部배아링과 한개의 外軸封合장치로 되어있어 정비가 거의 불필요하며, 케이싱徑은 38인치에 不過하다.

좀더 효율높은 증기터빈 사이클, 더 나은 펌프와 열교환기 및 效果의인 冷却장치를 개발하므로써 우리는 可用한 많은 地熱源으로부터 低價의 動力을 발전할 수 있음을 確信하고 있다.